四川东部和重庆地区三叠纪海相红层分布及时代

薄婧方[1,2)]，姚建新[1,2)]，林宝玉[1,2)]，刘惟庆[1,2)]，李明[1,2)]

1）中国地质科学院地质研究所，北京，100037；2）国土资源部地层古生物重点实验室，北京，100037

内容提要：在综合分析四川东部和重庆地区的三叠纪地层资料的基础上，本文着重对研究区三叠纪海相红层的分布格局和沉积特征进行了分析和对比。在四川东部和重庆地区三叠纪海相地层中初步识别出5组12段海相红层，分别是：飞仙关组（大冶组）红层（印度阶）、嘉陵江组红层（奥列尼克阶）、雷口坡组（巴东组）红层（安尼阶）、天井山组红层（拉丁阶）和马鞍塘组红层（卡尼阶），并将这些红层与相邻地区（湖北中西部和贵州）三叠纪海相红层进行了对比。分析表明研究区所有海相红层均属于滨海－浅海陆棚相红层，四川东部和重庆地区三叠纪海相红层的碎屑物质及Fe_2O_3主要来源于康滇古陆和龙门山等高地。同时，文中还探讨了四川东部和重庆地区三叠纪海相红层纵向分布与古气候、古纬度、水深、植被、矿产、岩石颜色、构造运动等之间的关系。上述研究为进一步开展全国乃至全球三叠纪海相红层分布规律研究和时代对比提供基础数据和资料。

关键词：三叠纪；海相红层；陆棚红层；四川东部；重庆

近年来，我国中生代海相红层的研究进展迅速，发表了一系列著作（Wan Xiaoqiao et al.，2005；Wang Chengshan et al.，2005，2009；Hu Xiumian et al.，2005，2007，2012；胡修棉等，2006；Li Guobiao et al.，2011；Hu Xiumian，2009，2013），其研究红层的时代和地区主要为青藏高原地区白垩纪地层。对于中生代三叠纪海相地层除提及四川盆地下三叠统飞仙关组红色泥质沉积外，尚未有作者对我国三叠纪海相红层的分布和具体时代进行过系统研究，可以说仍处于空白的研究状态。

四川东部－重庆地区三叠纪海相红层（如飞仙关组等）因其含有丰富的重要矿产（如膏盐等）资源而闻名于世，故而之前的研究重点是其沉积环境和赋存的有用矿产。但是将三叠纪红色地层作为海相红层研究，特别是对其层序、特征、分布和对比的研究则很少涉及。本文系初次对四川东部与重庆及周边地区三叠纪海相红层的比较系统研究。

四川东部及重庆地区三叠纪地层，特别是早、中三叠世海相红层非常发育，而且地层层序、化石研究程度比较高，为中国南方三叠纪海相红层层序建立及其对比的研究提供了可靠的地层和古生物依据。本文主要目的是建立四川东部和重庆地区三叠纪海相红层层序并确定其具体时代，为今后中国南方三叠纪海相红层分布规律研究和时代对比提供基本资料。

虽然四川东部及重庆地区三叠纪地层划分存在一定差异，但总体出入不大。本文主要采用Sichuan Compiling Group for Regional Stratigraphic Scale（1978），Chen Chuzhen et al.（1979），Zhao Jinke et al.（1982），Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province（1991，1997），Yang Zunyi et al.（2000.），以及Tong Jinnan（2018）三叠系的划分方案（表1）。而岩相古地理方面的资料则主要参考饶荣标（1980），Zhang Jinghua et al.（1981），Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province（1991，1997），Feng Zengzhao et al.（1997）。

注：本文为国家自然科学基金项目（编号：41702025，41472030）、中国地质调查局项目（编号：DD20160126，12120114026701，DD20160120-04，DD20160345）和科技部科技基础性工作专项（编号：2015FY310100）资助的成果。

收稿日期：2018-09-25；改回日期：2018-11-20；网络发表时间：2018-12-04；责任编辑：黄敏。

作者简介：薄婧方，女，1982年生，博士，助理研究员。古生物学与地层学专业。Email：jfbo@cags.ac.cn。通讯作者：林宝玉，1935年生，研究员，主要从事地层学与古生物学研究工作。Email：lin_baoyu@163.com。

引用本文：薄婧方，姚建新，林宝玉，刘惟庆，李明. 2019. 四川东部和重庆地区三叠纪海相红层分布及时代. 地质学报，93(2)：285～301，doi：10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019016.

Bo Jingfang，Yao Jianxin，Lin Baoyu，Liu Weiqing，Li Ming. 2019. Distribution and age of the Triassic marine red beds in eastern Sichuan and Chongqing. Acta Geologica Sinica，93(2)：285～301.

1 四川东部、重庆地区三叠纪海相红层形成的地质背景及沉积环境

四川东部及重庆地区海相红层分布广泛，主要见于早、中三叠世地层中。代表性剖面主要有：①四川江油剖面；②四川广元剖面；③四川绵竹汉旺剖面；④四川威远剖面；⑤四川南江五权剖面；⑥四川高县、珙县、长宁剖面；⑦四川乐山铜街子剖面；⑧四川合川盐井溪飞仙关组剖面；⑨四川广安市谢家槽三叠系剖面；⑩重庆石柱方斗山巴东组剖面；⑪重庆巴县姜家坊－中梁山剖面；⑫重庆巫山大溪剖面；⑬重庆酉阳思渠剖面；⑭重庆武隆平桥剖面；⑮重庆开县、云阳沙陀剖面。（图 1）。对于陆相上三叠统剖面一般均忽略。

表 1 四川东部及重庆地区三叠纪地层划分简表
（据四川省区域地层表编写组，1978；
四川省地质矿产局，1991，1997；童金南，2018）

Table 1 Summary of Triassic stratigraphical subdivision in eastern Sichuan and Chongqing (followed Sichuan Compiling Group for Regional Stratigraphic Scale, 1978; Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province, 1991, 1997; Tongjinnan, 2018)

地层系统 \ 地区			川东-重庆地区	
			西 部	东 部
上覆地层			J_{1-2}	J_{1-2}
三叠系	上统	瑞替阶	须家河组	须家河组
		诺利阶	小塘子组	
		卡尼阶	马鞍塘组	
	中统	拉丁阶	天井山组	
		安尼阶	雷口坡组	巴东组
	下统	奥列尼克阶	嘉陵江组 / 铜街子组	嘉陵江组
		印度阶	飞仙关组	大冶组
下伏地层			P_3	P_3

四川东部及重庆地区三叠纪地层发育完整，上、中、下三统俱全，沉积类型多种多样，化石丰富，诸如双壳类、菊石、腕足类、牙形石、有孔虫、植物化石等，而且矿产丰富，其中食盐、石膏等含矿层位与海相红层形成的条件几乎完全相似，两者经常伴生。海相红层的研究对寻找食盐、石膏等矿床有重要意义（Sichuan Compiling Group for Regional Stratigraphic Scale，1978；Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province，1991，1997）。

1.1 地质背景

四川东部及重庆地区的三叠系位于扬子地台的西北角，属于稳定的地台型沉积，北部为大巴山古陆，西北角为龙门山古陆，西部为康滇古陆，研究区为向东及东南开口的盆地。受到这些古陆的制约，地势上西高东低，从西向东相变明显（Sichuan Compiling Group for Regional Stratigraphic Scale，1978；Zhang Jinghua et al.，1981，Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province，1991，1997；Feng Zengzhao et al.，1997）。陆源碎屑物质及 Fe_2O_3 主要来源于北面和西面的古陆。从岩性上大致可划分出两部分，西部以碎屑岩相为主，东部以碳酸盐岩相为主。界限大致在通江－南充－重庆－宜宾一线（图 2）。

早三叠世时由西向东分别为河流相－潮坪相－浅海相，碎屑岩逐渐减少，碳酸盐岩渐次增多，海相红层发育（Sichuan Compiling Group for Regional Stratigraphic Scale，1978；Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province，1991，1997）。

中三叠世时，由于东南部雪峰古陆的扩大和升起，形成东高西低的趋势，沉积中心向西移动，由重庆地区迁移至四川东部地区，逐渐形成封闭－半封闭的海湾沉积环境，海水咸化程度逐渐增高，四川东部一带广布石膏及钠盐沉积，海相红层非常发育（Sichuan Compiling Group for Regional Stratigraphic Scale，1978；Zhang Jinghua et al.，1981，Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province，1991，1997；Feng Zengzhao et al.，1997，Zhou Jiayun et al.，2015）。

晚三叠世时，研究区内海水萎缩，为重要的成煤时期，从东向西沉积物由细变粗，直至沉积了巨厚的砾岩层，海相红层不发育，仅偶见于晚三叠世早期的局部地区（Zhang Jinghua et al.，1981，Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province，1991，1997；Feng Zengzhao et al.，1997；Shao Longyi et al.，2009）。

纵观三叠纪的沉积，在纵向上由潮坪－泻湖（咸化海湾）－浅海－潮坪－陆相，呈一个完整的沉积旋回。之后，为更新的地层不整合覆盖。

1.2 岩相古地理及沉积环境

1.2.1 早三叠世岩相古地理及沉积环境

早三叠世海水从东南向西北入侵研究区，抵达

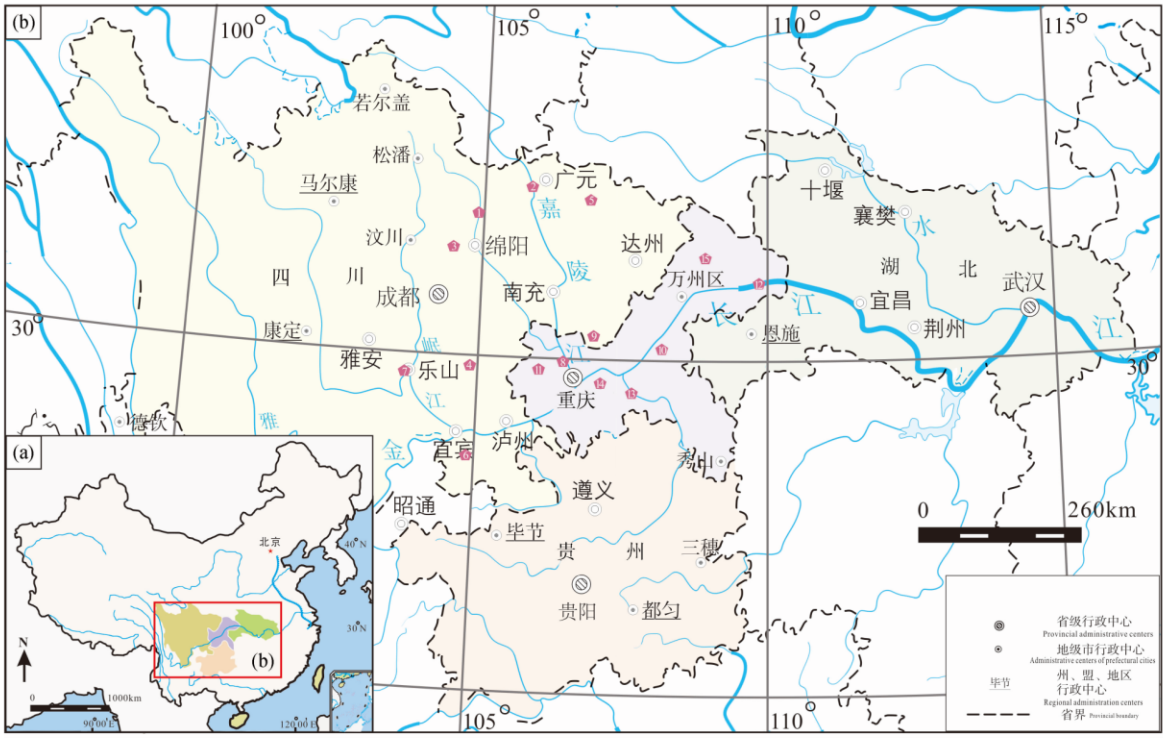


图 1　四川东部及重庆地区研究区域相关剖面位置图

Fig. 1　Section locations of the study area in eastern Sichuan and Chongqing

1—四川江油剖面；2—四川广元剖面；3—四川绵竹汉旺剖面；4—四川威远剖面；5—四川南江五权剖面；6—四川高县、珙县、长宁剖面；7—四川乐山铜街子剖面；8—四川合川盐井溪剖面；9—四川广安市谢家槽剖面；10—重庆石柱方斗山剖面；11—重庆巴县姜家坊—中梁山剖面；12—重庆巫山大溪剖面；13—重庆酉阳思渠剖面；14—重庆武隆平桥剖面；15—重庆开县、云阳沙陀剖面

1—Jiangyou section, Sichuan; 2—Guangyuan section, Sichuan; 3—Hanwang section in Mianzhu, Sichuan; 4—Weiyuan section, Sichuan; 5—Wuquan section in Nanjiang, Sichuan; 6—Gaoxian section, Gongxian section and Changning section, Sichuan; 7—Tongjiezi section in Leshan, Sichuan; 8—Yanjingxi section in Hechuan, Sichuan; 9—Xiejiacao section in Guang'an, Sichuan; 10—Fangdoushan section in Shizhu, Chongqing; 11—Jiangjiafang—Zhongliangshan section in Baxian, Chongqing; 12—Daxi section in Wushan, Chongqing; 13—Siqu section in Youyang, Chongqing; 14—Pingqiao section in Wulong, Chongqing; 15—Shatuo section in Yunyang and Kaixian, Chongqing

龙门山古陆和康滇古陆一带(图 3)，陆源碎屑和 Fe_2O_3 主要来自西南部的古陆，由西向东形成陆相(或海陆交互相)—潮坪相—浅海碎屑岩、碳酸盐岩和蒸发岩等红色砂泥岩建造(海相红层)。海水西浅东深，气候干热，海相红层发育(Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province, 1991, 1997; Wang Mingquan et al., 2015)。

(1)印度期(飞仙关组或大冶组)：由西向东，即由康滇古陆东侧向外，大致可分出如下的 6 个岩相带(图 3，图 4)，分别是：I. 峨眉河流碎屑岩相带，分布于康滇古陆东侧；II. 成都潮间沙泥坪，分布于龙门山古陆东侧，向南延伸至峨眉山河流碎屑岩相带东侧；III. 南充潮下台坪，华蓥山断裂以西是潮下台坪，在华蓥山断裂与七曜山断裂之间，呈一缓的斜坡，水动力条件较强，形成鲕粒滩堡堤；IV. 重庆潮下斜坡碳酸盐岩夹砂泥岩相，为向南倾斜的缓地；V. 万源潮间台坪，位于万源—巫溪一带，其北为“大巴山古陆”；VI. 开阔海相碳酸盐岩相，位于重庆地区的东部(Sichuan Compiling Group for Regional Stratigraphic Scale, 1978; Zhang Jinghua et al., 1981, Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province, 1991, 1997; Feng Zengzhao et al., 1997; Dai Liguo et al., 2009; Liu Ping et al., 2018)。前 4 种岩石组合主要见于飞仙关组及其相当的地层及所含的海相红层，最后一种主要见于大冶组，及其所含的海相红层。

(2)奥列尼克期(嘉陵江组)，此期古地理与印度期相似，但海水略深，位于龙门山—康滇古陆以东，由西向东，大致可分出以下 5 个岩相带(图 5)，分别是：I. 峨眉—绵竹潮内砂泥坪；II. 成都萨布哈边缘

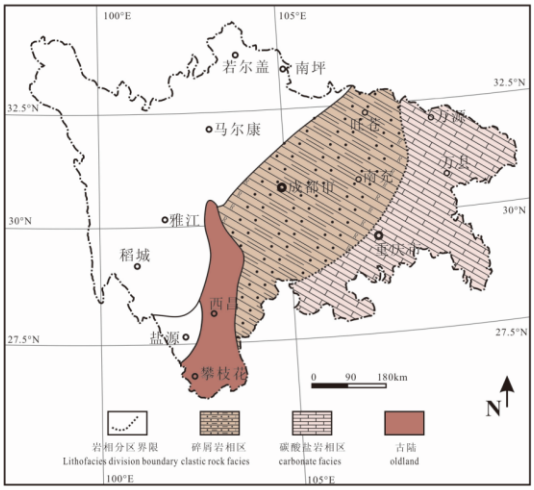


图 2 四川东部及重庆地区三叠纪岩相分布
(据四川地质矿产局，1991，1997 修改)

Fig. 2 Triassic litholofacies distribution in eastern Sichuan and Chongqing (modified from Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, 1991, 1997)

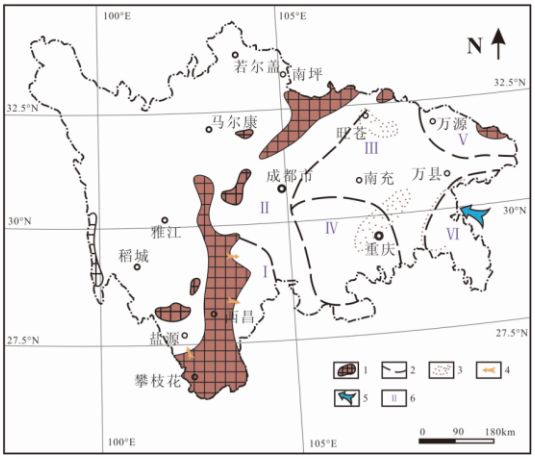


图 3 四川东部及重庆地区早三叠世印度期(飞仙关组)岩相古地理略图(据四川地质矿产局，1991，1997 修改)

Fig. 3 Lithofacies paleogeography during the Induan period (Feixianguan Fm.) of Early Triassic in eastern Sichuan and Chongqing (modified from Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, 1991, 1997)

1—古陆；2—相带界线；3—鲕粒滩；4—物质搬运方向；5—主要海侵方向；6—相带编号

1—oldland; 2—facies boundary; 3—oolitic beach; 4—direction of material transportation; 5—major direction of transgression; 6—facies belt number

砂泥岩台坪；III. 旺苍潮间缓坡砂、泥、灰岩相；IV. 南充、万县萨布哈蒸发台坪；V. 巫溪－彭水开阔碳酸盐岩相(Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province, 1991, 1997; Lin

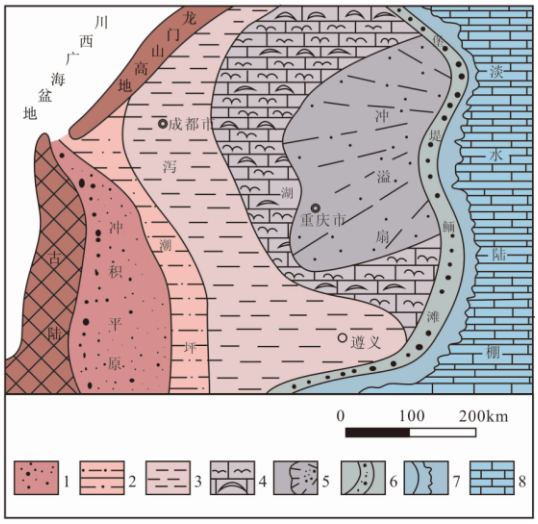


图 4 四川东部及重庆地区印度期(飞仙关组)沉积相及沉积环境展布示意图(据四川省地质矿产局，1991，1997 修改)

Fig. 4 Sketch-map showing the distribution of sedimentary facies and depositional environment during the Induan period (Feixianguan Fm.) in eastern Sichuan and Chongqing (modified from Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, 1991, 1997)

1—红色碎屑岩；2—紫红－灰绿色粉砂岩，泥岩夹细砂岩；3—紫红色陆源泥岩，夹较深水风暴岩；4—主要风暴作用形成的石灰岩；5—鲕粒灰岩夹介屑灰岩；6—鲕粒亮晶灰岩；7—过渡带含砂屑泥晶灰岩；8—规则薄板状泥晶灰岩

1—red clastics; 2—purple red-greyish-green siltstone, mudstone-intercalated with fine sandstone; 3—purple-red earth-sourced mudstone, with deeper tempestite; 4—limestone formed by major storm action; 5—oolitic limestone intercalated with shelly; 6—oosparite; 7—transition zone sand-bearing micrite; 8—regular laminar mudstone

Liangbiao et al., 2010)。

1.2.2 中三叠世岩相古地理及沉积环境

(1)安尼期(雷口坡组)：基本上继承了早三叠世晚期的古地理状况，由于四川东部和重庆地区周边古陆的逐渐抬升，尤其是东边的雪峰古陆的升起，形成了东高西低的地势，陆源物质来自研究区的北面和东面。与早三叠世相反，由东向西岩相变化明显，东部为碎屑岩，碳酸盐岩(巴东组)向西逐渐被盐化海所形成的白云岩、膏盐岩所取代(Sichuan Compiling Group for Regional Stratigraphic Scale, 1978; Zhang Jinghua et al., 1981, Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province, 1991, 1997; Feng Zengzhao et al., 1997; Lin Liangbiao et al., 2010)。推断当时在古隆起边缘的万源、广元及峨眉、雅安一带有一条潮上

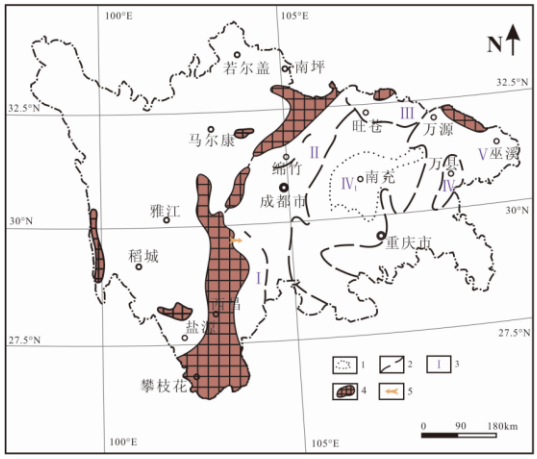


图 5　四川东部及重庆地区早三叠世奥列尼克期(嘉陵江组)岩相古地理略图(据四川地质矿产局，1991，1997 修改)

Fig. 5　Lithofacies paleogeography during the Olenekian period (Jialingjiang Fm.) of Early Triassic in eastern Sichuan and Chongqing (modified from Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, 1991, 1997)

1—盐、石膏、杂卤石分布区;2—相带界线;3—相带编号;4—古陆;5—物质搬运方向

1—distribution area of salts, gypsum and polyhalite; 2—facies Boundary; 3—facies number; 4—oldland; 5—direction of material transportation

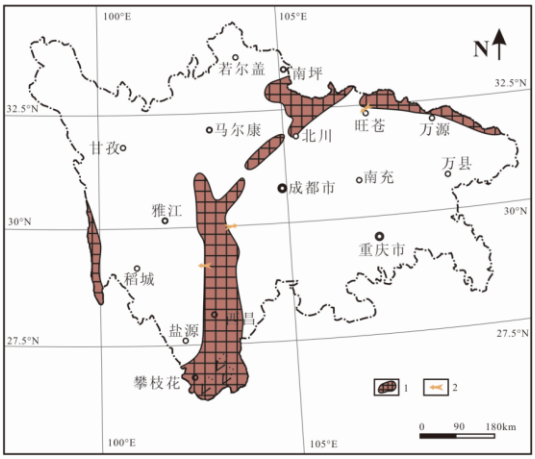


图 6　四川东部及重庆地区晚三叠世早－中期岩相古地理略图(据四川地质矿产局，1991，1997 修改)

Fig. 6　Sketch-map showing the lithofacies paleogeography of the early-middle Late Triassic in eastern Sichuan and Chongqing (modified from Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, 1991, 1997)

1—古陆;2—物质搬运方向

1—oldland; 2—direction of material transportation

一潮间斜坡带、缓坡带;在七曜山与彭山、江油之间，为潮上、潮间萨布哈台坪。

(2)拉丁期(天井山组):古地理状况与安尼期大致相似,随着海水侵入,逐渐改变了安尼期的封闭局面和盐化状态,海水淡化,沉积盆地仅限于研究区的西部,由西向东可分为两个相带:I. 龙门山前潮下灰坪。分布于龙门山东侧。由于受断裂影响,灰坪呈连续下降趋势; II. 成都－盐亭潮间、潮下灰坪,分布于南充、内江以西(Zhang Jinghua et al., 1981, Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province, 1991, 1997; Feng Zengzhao et al., 1997)。

1.2.3　晚三叠世岩相古地理及沉积环境

卡尼期－诺利期早期(马鞍塘组－小塘子组):在这个时期,沉积盆地更向西迁移,但仍出现沉积物从西向东,从研究区中部向南超覆的现象。在龙门山东侧形成潮下高能带的鲕粒灰岩和介壳滩,沿滩发育有潮下低能带海绵点礁,在此带之东为潮间泥坪沉积,在马鞍塘组中发育少量红层(图 6)。晚三叠世后期,海水全部退出,形成了以陆相含煤沉积为主的地层,气候转变为潮湿(Sichuan Compiling Group for Regional Stratigraphic Scale, 1978; Zhang Jinghua et al., 1981, Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province, 1991, 1997; Feng Zengzhao et al., 1997; Shi Zhensheng et al., 2015; Zhao Xiafei et al., 2018)。

2　四川东部、重庆地区三叠纪海相红层的地层层序及岩石特征

四川东部和重庆地区的三叠系,地层层序清楚,化石丰富,研究程度比较高。下统由海陆交互相、浅海相砂泥岩和碳酸盐岩组成;中统主要由泻湖相蒸发岩组成;上统以含煤陆相沉积为主,仅见于西部地区(Zhang Jinghua et al., 1981, Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province, 1991, 1997; Feng Zengzhao et al., 1997)。

根据岩石类型的不同,大致可以划分两个岩相区:四川东部地区,以碎屑岩为主,下、中、上三叠统发育齐全;重庆相区,以碳酸盐岩为主,仅发育下三叠统、中三叠统下部和上三叠统上部。现将两个不同岩相区的海相红层特征分别叙述如下:

2.1　四川东部地区三叠纪海相红层特征

主要是指以成都为中心及其以东的地区。西界西北为龙门山高地,西部为康滇古陆。Fe_2O_3 和碎屑物质主要来自康滇古陆,岩性分布受控于上述两

个古陆(Sichuan Compiling Group for Regional Stratigraphic Scale, 1978; Zhang Jinghua et al., 1981, Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province, 1991, 1997; Feng Zengzhao et al., 1997)(图 2,图 3)。三叠系发育齐全,上三叠统上部为陆相沉积,不在本文的叙述范围。现仅对三叠系中下统及上统下部海相红层的特征简述如下:

2.1.1 飞仙关组红层[TFRB](T—三叠纪,F—飞仙关组,RB—红层)

①飞仙关组一段(TFRB-1)海相红层,见于重庆合川盐井溪飞仙关组剖面第一段(1～11 层),岩性主要为紫红色、灰紫色砂泥岩、泥质灰岩等,厚 115.5m。其下与二叠系长兴组整合接触。②飞仙关组二段(TFRB-2)海相红层,见于重庆合川盐井飞仙关组剖面第二段(12～18 层),岩性几乎全部为紫红色、紫灰色中厚层钙质泥岩夹灰岩。厚约 197.5m。③飞仙关组三段(TFRB-3)海相红层,见于四川旺苍罐子坝剖面飞仙关组三段(15～20 层),岩性为灰紫色、灰色泥灰岩等。厚 150m。④飞仙关组四段(TFRB-4)海相红层,见于四川旺苍罐子坝剖面飞仙关组四段(21～24 层),岩性为紫红色、紫灰色页岩、泥灰岩等。厚 134.5m(Sichuan Compiling Group for Regional Stratigraphic Scale, 1978; Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province, 1991, 1997)。

2.1.2 嘉陵江组红层[TJRB](T—三叠纪,J—嘉陵江组,RB—红层)

以四川南江五权剖面嘉陵江组为代表。①嘉陵江组一段(1～3 层)(TJRB-1)海相红层,岩性为紫色、灰紫色中厚层泥灰岩、页岩等。厚 260.5m。向西至旺苍罐子坝剖面紫色层增多,相变成铜街子组下部。②嘉陵江组二段上部(5 层)(TJRB-2)海相红层,岩性为灰色、玫瑰色白云岩、白云质灰岩,底部为厚 2m 的角砾岩,厚约 60m。向西至旺苍罐子坝剖面紫色层增多,过渡为铜街子组上部。③嘉陵江组第三段(6～7 层)(TJRB-3)海相红层,岩性为青灰、黄灰夹棕红色、紫红色、紫色中至厚层泥质灰岩、白云质灰岩、白云岩等。厚 157.6m。④嘉陵江组四段(8 层)(TJRB-4)海相红层,岩性为灰色白云岩夹棕红色白云岩及一层 2m 厚角砾岩。厚约 34m(Sichuan Compiling Group for Regional Stratigraphic Scale, 1978; Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province, 1991, 1997)。

2.1.3 雷口坡组红层[TLRB](T—三叠纪,L—雷口坡组,RB—红层)

①雷口坡组一段(TLRB-1)海相红层,见于四川高县雷口坡组剖面一段(1,2,5 层)。岩性底部第 1 层为浅黄绿色、浅棕红色水云母粘土岩("绿豆岩"),厚 1.6m;第 2 层为黄色、紫红色钙质泥岩与泥质白云岩互层,厚 2.7m;第 5 层上部为浅红灰色、紫色薄层钙质白云岩夹钙质页岩或条带状钙质白云岩。厚 2～8m。共厚 7.1m。②雷口坡组二段(TLRB-2)海相红层,见于四川高县雷口坡组剖面二段顶部(18 层)。岩性为浅红灰色中厚层含泥质生物碎屑白云岩。③雷口坡组四段(TLRB-4)海相红层,见于四川南江五权至金溪剖面雷口坡组顶部 9 层。岩性为白灰、微带紫色钙质白云岩、钙质页岩,厚 67m(Sichuan Compiling Group for Regional Stratigraphic Scale, 1978; Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province, 1991, 1997)。

2.1.4 天井山组红层[TTRB](T—三叠纪,T—天井山组,RB—红层)

以四川绵竹汉旺剖面天井山组为代表,岩性为浅灰带肉红色鲕粒灰岩夹生物碎屑灰岩。底部具一层粉砂质碎屑灰岩,厚 28.7m(Sichuan Compiling Group for Regional Stratigraphic Scale, 1978; Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province, 1991, 1997)。

2.1.5 马鞍塘组红层[TMRB](T—三叠纪,M—马鞍塘组,RB—红层)

以江油马鞍塘剖面马鞍塘组下部第 3 层为代表,岩性为灰色、暗红褐色生物碎屑灰岩、砂质灰岩及钙质页岩,厚 6.5m,与下伏中三叠统天井山组可能为整合接触(Sichuan Compiling Group for Regional Stratigraphic Scale, 1978; Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province, 1991, 1997)。

根据上述分析,在四川东部碎屑岩相区三叠纪海相红层可归纳为 5 组 11 段红层。自上而下分别为:

卡尼阶 马鞍塘组红层;

拉丁阶 天井山组红层;

安尼阶 雷口坡组红层(分别为:雷 1 段,雷 2 段和雷 4 段),雷 3 段中目前尚未见海相红层;

奥列尼克阶 嘉陵江组红层(分别为:嘉 1 段,嘉 2 段,嘉 3 段和嘉 4 段红层);

印度阶 飞仙关组红层(分别为:飞 1 段,飞 2

段,飞 3 段和飞 4 段红层);

上述飞仙关组、嘉陵江组和雷口坡组可划分出 11 段的海相红层仅适用于该 3 组中分段明显的地区,在某些地区,特别是靠近古陆的地域,在碎屑岩相区分段不明显的情况下,通常可识别出 3 组(套)海相红层。

表 2　四川东部及重庆地区三叠纪海相红层特征(西部碎屑岩相区)

Table 2　Characteristics of Triassic marine Red Beds in eastern Sichuan and Chongqing (western clastic rock facies)

系	统	阶	地层名称 组	地层名称 段	海相红层 名称	海相红层 岩性特征	化石带(组合) 双壳类	化石带(组合) 菊石	典型剖面
三叠系	上统	瑞替阶	须家河组						
		诺利阶	小塘子组						
		卡尼阶	马鞍塘组		马鞍塘组红层(TMRB)	暗红褐色生物碎屑灰岩		*Trachyceras*	江油石元乡马鞍塘
	中统	拉丁阶	天井山组		天井山组红层(TTRB)	浅灰带肉红色块状鲕状灰岩夹厚层生物碎屑灰岩			绵竹汉旺
		安尼阶	雷口坡组	4	雷口坡组红层(TLRB) 雷四段红层(TLRB-4)	白灰微带紫色钙质白云岩			南江五权
				3					
				2	雷二段红层(TLRB-2)	紫色泥质粉砂岩,泥质白云岩,棕紫色鲕状灰岩	*Eumorphotis (Asoella) illyrica* *Myophoria (Costoria) goldfussi*		
				1	雷一段红层(TLRB-1)	紫红色钙质泥岩、页岩,浅红棕色水云母黏土岩			
	下统	奥列尼克阶	嘉陵江组 铜街子组	4	嘉陵江组红层(TJRB) 嘉四段红层(TJRB-4)	棕红色白云质灰岩			南江五权
				3	嘉三段红层(TJRB-3)	棕红色、紫红色泥质灰岩	*Entolium discites microtis*	*Tirolites*	
				2	嘉二段红层(TJRB-2)	玫瑰色白云岩、白云质灰岩			
				1	嘉一段红层(TJRB-1)	紫色薄层泥灰岩、页岩	*Pteria murchisoni* *Eumorphotis inaequicostata*		
		印度阶	飞仙关组	4	飞仙关组红层(TFRB) 飞四段红层(TFRB-4)	紫红色页岩、紫红色泥灰岩、页岩互层			旺苍罐子坝
				3	飞三段红层(TFRB-3)	紫灰、灰紫色灰岩	*Eumorphotis multiformis* *Ctaraia aurita, C. stachei*	*Koninckites*	
				2	飞二段红层(TFRB-2)	紫色、暗紫色、紫红色钙质泥岩	*Ctaraia aurita--C. stachei* 组合		合川盐溪
				1	飞一段红层(TFRB-1)	紫色钙质粉砂岩、泥岩	*Ctaraia wangi*	*Lytophiceras* *Ophiceras*	
下伏			P_3 长兴组						

2.2　重庆地区三叠纪海相红层特征

主要是指重庆地区以碳酸盐岩为主的三叠纪海相红层,仅见下统和中统下部,分别是大冶组、嘉陵江组和巴东组,缺失中三叠统上部和上三叠统下部地层,上三叠统上部为陆相含煤沉积。该区下三叠统和中三叠统下部海相红层特征及时代简介如下:

2.2.1　大冶组海相红层[TDRB](T—三叠纪,D—大冶组,RB—红层)

大冶组海相红层共分四段,第 1 段、第 2 段和第 4 段红层以四川广安谢家槽大冶组剖面为代表;第 3 段红层以重庆云阳沙陀至牛角洞剖面为代表。①大冶组 1 段(TDRB-1)海相红层,见于大冶组第 1 段底部第 2 层,岩性为灰、灰紫色泥质灰岩和泥灰岩互层,厚约 32m,其下与上二叠统长兴组整合接触。②大冶组 2 段(TDRB-2)海相红层,见于大冶组第 2 段底部第 7 层,岩性为灰色、灰紫、紫色泥质灰岩与钙质页岩互层,厚约 8m。③大冶组 3 段(TDRB-3)海相红层,见于大冶组第 3 段的第 8 层,岩性为灰色、紫红色灰岩、泥质灰岩和钙质页岩互层,厚 45.8m。④大冶组 4 段(TDRB-4)海相红层,见于大冶组第 4 段第 18 层和 20～21 层,岩性下部(18 层)为紫红色钙质页岩,厚 3.2m,上部(20～21 层)为紫红、灰紫色砂质页岩、泥质灰岩与钙质页岩互层,厚约 20m(Sichuan Compiling Group for Regional Stratigraphic Scale, 1978; Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province, 1991, 1997)。

2.2.2　嘉陵江组海相红层[TJRB](T—三叠纪,J—嘉陵江组,RB—红层)

嘉陵江组海相红层都见于重庆酉阳思渠剖面。其中:①嘉陵江组 1 段(TJRB-1)海相红层,见于嘉陵江组 1 段的第 1 层和第 3 层,第 1 层岩性为灰红色白云质灰岩、生物碎屑灰岩,厚 61.6m,第 3 层岩性为浅灰、红灰色白云质灰岩夹白云岩,厚 96.4m。②嘉陵江组 2 段(TJRB-2)海相红层,见于嘉陵江组

2 段第 4～5 层，岩性下部(4 层)为灰红色厚层角砾状白云岩，厚 11.4m；上部(5 层)岩性为灰红色白云岩、白云质灰岩，局部呈角砾状，厚 63.7m，共厚 75m。③嘉陵江组 3 段(TJRB-3)海相红层，见于嘉陵江组 3 段第 6～7 层，岩性下部(6 层)为灰红色灰岩，上部含鲕粒，厚 65.8m；上部(7 层)岩性为灰肉红色灰岩，底部为 0－8m 角砾状页岩，厚 121.2m，共厚 187m。④嘉陵江组 4 段(TJRB-4)海相红层，见于嘉陵江组剖面第 9～13 层，岩性下部为紫红色、红灰色角砾状白云岩，厚约 113m；上部灰红色、深灰色白云岩和灰色，厚约 53m，其上与巴东组底部“绿豆岩”整合接触，总厚 166m(Sichuan Compiling Group for Regional Stratigraphic Scale，1978；Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province，1991，1997)。

2.2.3 巴东组海相红层 [TBRB](T－三叠纪，B－巴东组，RB－红层)

巴东组海相红层分为四段，巴东组 1 段至巴东组 3 段海相红层位于重庆开县温泉柏木沟剖面，巴东组 4 段海相红层位于重庆酉阳思渠剖面。

①巴东组 1 段(TBRB-1)海相红层，见于巴东组第 1 段的第 1～2 层，第 1 层岩性为灰红色白云岩、白云质灰岩、白云质页岩、泥灰岩，厚 43.7m；第 2 层岩性为灰红色、深灰色白云岩、白云质页岩、泥灰岩等，厚 11.9m；共厚 55.6m。②巴东组 2 段(TBRB-2)海相红层，见于第 2 段第 4～7 层，岩性为紫红色、灰色页岩和泥灰岩等。厚约 82m。③巴东组 3 段(TBRB-3)海相红层，见于巴东组第 3 段顶部第 12 层，岩性为灰色、灰红色泥灰岩与页岩互层，中部夹钙质泥岩，厚约 23m。④巴东组 4 段(TBRB-4)海相红层，见于巴东组第 4 段第 12～17 层，岩性为紫红色、灰红色、灰绿色泥岩，钙质页岩，泥灰岩及砂岩等，厚 355.8m(Sichuan Compiling Group for Regional Stratigraphic Scale，1978；Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province，1991，1997)。

根据上述分析，在重庆地区碳酸盐岩相区三叠纪海相红层可归纳为三组(套)及 12 段海相红层，自上而下为：

安尼阶 巴东组海相红层，(分别为：巴 1 段，巴 2 段，巴 3 段和巴 4 段红层)；

奥列尼克阶 嘉陵江组海相红层(分别为嘉 1 段，嘉 2 段，嘉 3 段和嘉 4 段红层)；

印度阶 大冶组海相红层(分别为：大 1 段，大 2 段，大 3 段和大 4 段红层)。

在上述三组岩性段不易划分地区，可采用大冶组海相红层、嘉陵江组海相红层和巴东组海相红层(表 3)。

综上所述，四川东部和重庆两个地区三叠纪海相红层可以初步确认共有 5 组 12 段：

四川东部：飞仙关组红层(可分为 1～4 段红层)，嘉陵江红层(可分为 1～4 段红层)，雷口坡组红层(可分为 1 段、2 段和 4 段红层)，天井山组红层，马鞍塘组红层；

重庆地区：大冶组红层(可分为 1～4 段红层)，嘉陵江组红层(可分为 1～4 段红层)，巴东组红层(可分为 1～4 段红层)。

四川东部和重庆地区三叠纪海相红层的时代和对比关系见表 4。

3 四川东部及重庆地区三叠纪海相红层 Fe_2O_3 和 FeO 含量简述

Fe_2O_3 是海相红层致色的原因。因此，本文选择研究区西部四川江油和广元地区的飞仙关组、铜街子组(相当嘉陵江组 1 段和 2 段)、嘉陵江组和马鞍塘组红层及其上覆非红层部分采集 Fe_2O_3 测试样品。分析和测试工作由国家地质实验测试中心完成。分析测试主要过程为，新鲜样品在玛瑙钵中磨制至 200 目，称取试样 0.1000～0.5000g(称样量视样品的氧化亚铁含量定)于聚四氟坩埚中，加入氢氟酸和硫酸分解样品，重铬酸钾标准溶液滴定 FeO 含量；称取试样 0.1000g 于聚四氟坩埚中加入盐酸、硝酸、氢氟酸、高氯酸置电热板过夜分解试样，加热赶尽高氯酸白烟，加入盐酸、硝酸溶解样品，溶液转入清洁塑料瓶中测试 TFe_2O_3 含量，按照公式 $TFe_2O_3-(FeO\times1.1113)=Fe_2O_3$ 计算的含量。测试结果见表 5。

根据对表 5 中不同层位、不同岩性海相红层 Fe_2O_3 含量的分析比较，可以得出如下的几点认识：

(1)暗紫红色钙质泥质粉砂岩的 Fe_2O_3 含量最高，高达 19.77%，如马鞍塘组红层；

(2)紫红色泥灰岩、泥岩 Fe_2O_3 含量次之，如飞仙关组 1 段 Fe_2O_3 含量为 5.98%，2 段下部 Fe_2O_3 含量为 4.30～10.65%，4 段 Fe_2O_3 含量为 7.91%；

(3)浅紫红色、浅紫色钙质泥岩 Fe_2O_3 含量居第三位，如嘉陵江组 3 段红层 Fe_2O_3 含量 1.82%，4 段红层 Fe_2O_3 含量 1.61%；

(4)浅红色角砾状钙质泥岩最低 Fe_2O_3 含量仅为 0.98%；

表 3　四川东部及重庆地区三叠纪海相红层特征(东部碳酸盐岩相区)

Table 3　Characteristics of Triassic marine Red Beds in eastern Sichuan and Chongqing (eastern carbonate facies)

系	统	阶	地层名称 组	段	海相红层 名称	海相红层 岩性特征	化石带(组合) 双壳类	化石带(组合) 菊石	典型剖面
三叠系	上统	瑞替阶	须家河组						
		诺利阶							
		卡尼阶							
	中统	拉丁阶							
		安尼阶	巴东组	4	巴东组红层(TBRB)	巴四段红层(TBRB-4) 紫红色泥岩、钙质泥岩、页岩			重庆酉阳
				3		巴三段红层(TBRB-3) 肉红色灰岩、灰红色灰岩、灰粉红色生物灰岩、紫红色粉砂质泥岩	*Myophoria* (*Costoria*) *goldfussi* *Eumorphotis* cf. *illyrica*	*Progonoceratites*	
				2		巴二段红层(TRRB-2) 紫红色泥岩、页岩			重庆开阳
				1		巴一段红层(TRRB-1) 樱红色白云岩	*Eumorphotis* (*Asoella*) *illyrica*		
	下统	奥列尼克阶	嘉陵江组	4	嘉陵江组红层(TJRB)	嘉四段红层(TJRB-4) 红灰、紫红白云岩	*Myophoria ovata*		重庆酉阳
				3		嘉三段红层(TJRB-3) 浅灰、肉红色灰岩	*Entolium discites microtis*		
				2		嘉二段红层(TJRB-2) 肉红、灰红色白云岩			
				1		嘉一段红层(TJRB-1) 红灰、灰色白云质灰岩	*Eutolium* cf. *discites microtis*		
		印度阶	大冶组	4	大冶组红层(TDRB)	大四段红层(TDRB-4) 紫红色页岩与灰色灰岩互层	*Eumorphotis inaequicostata* *E. multiformis*		广安谢家槽
				3		大三段红层(TDRB-3) 灰色灰岩与紫红色页状泥质灰岩互层			云阳沙陀
				2		大二段红层(TDRB-2) 灰色泥质灰岩与灰紫、紫色钙质页岩互层	*Ctaraia aurita*, *C. stachei*		广安谢家槽
				1		大一段红层(TDRB-1) 灰、灰紫色泥质灰岩与泥灰岩互层	*Ctaraia wangi*	*Ophiceras* *Lytophiceras sakuntata*	
下伏			P_3 长兴组						

表 4　四川东部、重庆地区三叠纪海相红层划分和对比

Table 4　Subdivision and correlation of Triassic Marine Red Beds in eastern Sichuan and Chongqing

时代 \ 地区			西部碎屑岩相区		东部碳酸盐岩相区	
三叠系	上统	瑞替阶				
		诺利阶				
		卡尼阶	马鞍塘组红层(TMRB)			
		拉丁阶	天井山组红层(TTRB)			
	中统	安尼阶	雷口坡组红层(TLRB)	雷四段红层(TLRB-4)	巴东组红层(TBRB)	巴四段红层(TBRB-4)
						巴三段红层(TBRB-3)
				雷二段红层(TLRB-2)		巴二段红层(TBRB-2)
				雷一段红层(TLRB-1)		巴一段红层(TBRB-1)
	下统	奥列尼克阶	嘉陵江组红层(TJRB)	嘉四段红层(TJRB-4)	嘉陵江组红层(TJRB)	嘉四段红层(TJRB-4)
				嘉三段红层(TJRB-3)		嘉三段红层(TJRB-3)
				嘉二段红层(TJRB-2)		嘉二段红层(TJRB-2)
				嘉一段红层(TJRB-1)		嘉一段红层(TJRB-1)
		印度阶	飞仙关组红层(TFRB)	飞四段红层(TFRB-4)	大冶组红层(TDRB)	大四段红层(TDRB-4)
				飞三段红层(TFRB-3)		大三段红层(TDRB-3)
				飞二段红层(TFRB-2)		大二段红层(TDRB-2)
				飞一段红层(TFRB-1)		大一段红层(TDRB-1)
下伏			P_3 长兴组			

(5)同属于红层中(或其夹层)中的非红色、粉砂质灰岩 Fe_2O_3 含量也比较高。如马鞍塘组红层,暗红褐色钙质泥质粉砂岩 Fe_2O_3 含量 19.77%,同层灰色含粉砂质灰岩 Fe_2O_3 含量为 10.96%,尽管如此,但也比其上覆非红层灰黄色粉砂质泥岩 Fe_2O_3 含量 3.48%要高出 2 倍以上;

(6)飞仙关组海相红层普遍要高于嘉陵江组海相红层 Fe_2O_3 含量 2 倍以上,是否可以说明三叠纪印度阶 Fe_2O_3 来源较奥列尼克阶红层 Fe_2O_3 来源较丰富,随着时间的推移,Fe_2O_3 含量逐渐减少;

(7)不管是飞仙关组、嘉陵江组、铜街子组或马鞍塘组红层,Fe_2O_3 含量都要高于其上覆的非海相红层,这说明 Fe_2O_3 含量是海相红层致色的主要原因。

4　四川东部及重庆地区三叠纪海相红层的分类

4.1　古代海相红层分类简介

根据岩石类型、形成的海水深度、地理位置等,不同作者对古代海相红层有不同的划分方案:

4.1.1　根据岩石类型划分

根据岩石类型,前人将海相红层分为 3～4 种类型,如:Wang Chengshan et al.(2009)将白垩纪大

表 5 四川东部地区三叠纪海相红层 Fe_2O_3 与 FeO 含量比较

Table 5 Comparison of Fe_2O_3 and FeO contents in Triassic marine Red Beds in eastern Sichuan and Chongqing

层位		层段		岩性	颜色	编号	Fe_2O_3(%)	FeO(%)	产地
卡尼阶	马鞍塘组红层		上覆	含粉砂质泥岩	灰黄色	J-M-Compare	3.48	2.23	四川江油马鞍塘
			同层	含粉砂灰岩	灰色	J-M-LS	10.96	4.70	
			红层	钙质泥质粉砂岩	暗红褐色	J-M-RB	19.77	0.84	
奥列尼克阶	嘉陵江组红层	4段	上覆	钙质白云岩	浅灰、灰白色	G-J-RBtopC	0.05	0.08	四川广元
			红层	钙质泥岩	浅紫红色	G-J-Rbtop	1.61	0.32	
		3段	上覆	钙质白云岩	浅灰白色	G-J-RBtop-1C	0.42	0.24	
			红层	钙质泥岩	浅紫红色	G-J-RBtop-1	1.82	0.31	
		1段	上覆	角砾状钙质白云岩	浅灰色	G-J-RBbaseC	0.83	0.29	
			红层	角砾状钙质泥岩	浅红色	G-J-RBbase	0.98	0.19	
	铜街子组红层		上覆	灰岩	灰色	G-T-RB1C	0.95	0.79	四川广元
			红层	泥灰岩	暗紫色	G-T-RB1	4.40	0.97	
印度阶	飞仙关组红层	4段	红层	泥岩	紫红色	G-F-RB4	7.91	2.60	四川广元
		3段	非红层	鲕粒灰岩	灰白色	G-F-RB4C	0.17	0.24	
		2段(下部)	红层	泥岩、泥灰岩	紫红色	G-F-RB2	10.65	0.70	
			同层	灰岩	灰白色	G-F-RB2C	2.87	0.29	
			红层	泥岩、泥灰岩	紫红色	G-F-RB2-2	4.30	0.65	
			上覆	泥岩	黄绿色	G-F-RB1-C	5.03	1.01	四川广元
			红层	泥岩	紫红色	G-F-RB1-	6.98	0.93	

洋红层(CORB)的岩石类型划分为三大类:泥质CORB、钙质CORB和硅质CORB;Hu Xiumian et al.(2012)根据主量元素CaO,Al_2O_3,SiO_2含量将CORB分成3个端元:Ca-CORB、Al-CORB和Si-CORB;Lin Baoyu et al.(2018)根据一般的沉积岩分类原则,将中国主要块体达瑞威尔晚期至凯特期早期海相红层划分为4类:碳酸盐岩类型、碎屑岩类型、火山碎屑岩类型和鲕状赤铁矿类型。

4.1.2 根据海水深度和海域划分

Wang Chengshan et al.(2005)根据红层形成环境的不同,将红层分为大陆红层和大洋红层。并认为"大洋红层是指海洋深水远洋、半远洋环境下,在富氧条件下形成的一套红色-紫红色为主的沉积物。大洋红层沉积环境以大陆斜坡-深水盆地为主"。

Hu Xiumian(2013)认为"根据沉积环境大体可分为陆相红层和海相红层","大洋红层是指海相红层的特殊类型"。其含义与Wang Chengshan et al.(2005)含义基本相同,也是指海相红层中深水远洋、半远洋沉积的海相红层。

Rong Jiayu et al.(2012)根据地理位置和沉积特征,将海相红层大致归纳为三个类型:①大洋深海沉积,如藏南白垩系-古近系;②陆棚或陆表海远岸较深水沉积,如华南扬子地台奥陶系紫台组;③近岸浅水沉积,如志留系、三叠系(如华南飞仙关组、巴东组)等。分别称其为大洋盆地深水、远岸较深水和内陆棚浅水红层。

Lin Baoyu et al.(2017, 2018)均基于沉积时海水的大致深度对海相红层进行分类,并认为:"陆棚红层和大洋红层在沉积环境、海水深度、岩石类型等方面均有较大的区别。陆棚红层主要分布于寒武纪-三叠纪,而大洋红层则主要分布于白垩纪-现代,这是由于前一时期的海域(陆表海广布),而后一时期的海域更接近于现代海域(陆源海和大洋广布)所致。"

根据上述不同作者对海相红层的论述,本文采用的分类如下表6。

表 6 中国古海相红层分类(据林宝玉等, 2018 修改)

Table 6 Classification of Chinese paleo-marine Red Beds (modified from Lin Baoyu et al., 2018)

类型 / 依据	陆棚红层		大洋红层
	浅水红层	半深水红层	深水红层
构造位置	陆棚		陆坡下部盆地
	内陆棚(陆棚上部)	外陆棚(陆棚下部)	
海域	陆表海(或滨海-浅海)	陆缘海	大洋(深海)
水深	0~20m或50m	50~200m	>200m
主要分布时代	寒武纪—三叠纪		侏罗纪(?)白垩纪—现代

4.2 四川东部-重庆地区三叠纪海相红层分类

4.2.1 根据岩石类型分类

海相红层属于沉积岩类型的范围,包括滨海-深海(大洋)沉积。因此,本文基本上采用现代沉积

岩的分类,大致可分为三大类:泥质碎屑岩类、碳酸盐岩类和硅质岩类。

泥质碎屑岩类和碳酸盐岩类在研究区的三叠纪海相红层中非常发育。典型的大洋深水盆地沉积的硅质岩类型在研究区暂未发现。

(1)泥质碎屑岩类型:主要有紫色钙质粉砂岩(如飞仙关组 1 段红层)、紫红色页岩(如飞仙关组 4 段红层)、紫红色钙质泥岩(如飞仙关组 2 段红层)等;

(2)碳酸盐岩类型:主要有棕红色、紫红色泥灰岩(如嘉陵江组 3 段红层)、棕红色白云岩灰岩(如嘉陵江组 3 段红层)、棕红色鲕状灰岩(如雷口坡组 2 段和天井山组红层)、暗红褐色生物碎屑灰岩(如马鞍塘组红层)等。

4.2.2　根据沉积环境、海水深度、构造位置等分类

四川东部及重庆地区三叠纪红层与中国主要块体中奥陶世晚期—晚奥陶世早期的海相红层均属陆棚红层类型。研究区三叠纪海相红层主要发育于滨岸至浅水陆棚(内陆棚)环境,而后者(奥陶纪)海相红层主要发育于远岸半深水(外陆棚)环境。

在研究区内暂未发现有典型的大洋或深水海相红层的存在,但是在研究区的南部,贵州东南部地区发育深水海相红层,如紫云组的两层海相红层(属奥列尼克阶),层位相当于研究区域的嘉陵江组。它属于大洋红层中的陆坡下部的重力流沉积。岩性为灰、深灰色及肉红色厚层状、角砾状砾屑灰岩,夹多层紫红色薄层灰岩及页岩。砾屑物质主要来自陆坡上部沉积灰岩。

5　四川东部—重庆地区三叠纪海相红层与邻区的对比

四川东部—重庆地区三叠纪海相红层在其东邻湖北省中西部和南邻贵州省的三叠纪海相地层中也广泛分布,仅是在后二者红层层位略少而已。它们之间的对比关系见表 7。

表 7　四川东部—重庆地区与邻区(湖北中西部、贵州)三叠纪海相红层的对比

Table 7　Comparison of the Triassic Marine Red Beds in eastern Sichuan-Chongqing area and adjacent areas (Central-Western Hubei and Guizhou)

地层系统 \ 地区		川东-重庆地区(本文)			湖北中西部(本文)		贵州(本文)											
		西部		东部	恩施-巴东	南漳-京山	黔西-黔北			黔中			黔南					
上覆地层		J_{1-2}		J_{1-2}	桐竹园组	桐竹园组	自流井群 J_{1-2}			自流井群 J_{1-2}			第四系 Q					
上统	瑞替阶	须家河组		须家河组	沙镇溪组	玉龙滩组	二桥组			二桥组								
	诺利阶	小塘子组				九里岗组	火把冲组 把南组			三桥组								
	卡尼阶	马鞍塘组					法郎组											
							竹杆坡组			改茶组								
中统	拉丁阶	天井山组					杨柳井组			垄头组			边阳组	4				
														3				
														2				
	安尼阶	雷口坡组	4	巴东组	巴东组	巴东组	巴东组	4	关岭组	狮子山段	坡段组		青岩组	新苑组	许满组			
			3					3										
			2					2		松子坎段								
			1					1										
下统	奥列尼克阶	嘉陵江组	4	嘉陵江组	嘉陵江组	嘉陵江组	茅草铺组	2	永宁镇组	4	安顺组	3	紫云组	2				
			3							3		2						
			2							2		1		1				
			1				1			1								
	印度阶	飞仙关组	4	大冶组	大冶组	大冶组	夜郎组	3	飞仙关组	2	大冶组	3	罗楼组					
			3					2				2						
			2					1		1		1						
			1															
下伏地层		P_3		P_3	P_3	P_3	汪家寨组		长兴组 P_3		大隆组 P_3		大隆组 P_3					

● 浅水-半深水陆棚红层 shallow water-semi-deep water Shelf Red Beds　　◆ 深水大洋红层 deep water Oceanic Red Beds　　1, 2, 3, 4　段号 section number

5.1 与湖北省中西部三叠纪海相红层的对比

根据 Bureau of Geology and Mineral Resources of Hubei Province(1990, 1996),在湖北省中西部南漳－京山地区和恩施－巴东地区三叠纪海相红层中,本文从其中大致可识别出 7 层海相红层(表 7),它们的特征及与川东－重庆地区的对比情况如下:

(1)大冶组海相红层:位于南漳－京山地区南漳县小漳河葛公刘集剖面大冶组第 2 段的海相红层,其下第 1 层含菊石 *Ophiceras* sp. 等,与四川东部及重庆地区的大冶组第 2 段红层层位大致相当。位于恩施－巴东地区利川县小河火荀塘大冶组剖面第 12 层的海相红层,其上第 4 岩性段含 *Eumorphotis multiformis* Rittner 等。其下第 1 岩性段含菊石 *Ophiceras* cf. *sinensis* Tien, O. cf. *tingi* Tien 等(Bureau of Geology and Mineral Resources of Hubei Province, 1990, 1996),可能与四川东部及重庆地区大冶组第 2 段红层层位相当。这里应当提及的是,根据湖北省岩石地层报道,大冶沙田剖面的大冶组也可见到 2 层海相红层(12～13 层和 25～33 层)。其层位亦相当四川东部及重庆地区的第 2 段及第 3 段海相红层。

(2)嘉陵江组海相红层:位于恩施－巴东地区利川县小河火荀塘剖面嘉陵江组底部 1～7 层的海相红层,其上第 8 层含大量嘉陵江组常见的双壳类化石,与四川东部及重庆地区嘉陵江组第 1 段红层层位大致相当。位于南漳－京山地区的南漳县小漳河葛公刘集剖面的“嘉陵江组”第 7 层的海相红层大致相当于四川东部及重庆地区嘉陵江组第 3 段海相红层。在恩施－巴东地区的始建县马扎坪剖面的 45～52 层的肉红色含石膏白云岩也应属于该海相红层。

(3)巴东组海相红层:位于恩施巴东地区的恩施七里坪剖面的巴东组第 2 段的 4～5 层的海相红层与四川东部及重庆地区的巴东组第 2 段海相红层层位相当。位于南漳－京山地区南漳县小漳河公社剖面的巴东组 12～14 层的海相红层亦与四川东部及重庆地区巴东组第 2 段红层层位相当。位于恩施－巴东地区恩施七里坪剖面巴东组的 6 层和 8 层夹层的海相红层,非红层部分含大量的双壳类化石,属于 *Leptochondria subillyrica-L. illyrica* 组合(Bureau of Geology and Mineral Resources of Hubei Province, 1990, 1996),与四川东部及重庆地区的巴东组第 3 段海相红层层位相当;同一剖面巴东组顶部 9～10 层的海相红层与四川东部及重庆地区巴东组第 4 段海相红层层位相当。位于南漳－京山地区的南漳县小漳河葛公剖面的巴东组 4 段的 16～17 层的海相红层也与四川东部及重庆地区巴东组第 4 段海相红层层位相当。

上述 7 层海相红层分属印度阶 2 层,奥列尼克阶 2 层,和安尼阶 3 层。均可与四川东部及重庆地区相当的海相红层进行对比,尤其是巴东组 2、4 两段海相红层,厚度大,分布广泛,这与四川东部及重庆地区情况极其相似,是进行区域对比和寻找有用矿床的良好标志。

5.2 与贵州三叠纪海相红层的对比

根据 Guizhou working Party of Stratigraphy and Palaeontology(1977), Bereau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province (1987, 1997), Regional Geological Survey of Guizhou of Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources (1996), Tong Jinnan(2018)等,贵州三叠纪地层可划分为扬子区和右江区。前者主要为浅水碳酸盐岩,底栖生物丰富,厚度大,总厚达 6000m 以上,按沉积环境和岩石组合,又大致可分为黔西－黔北分区和黔中分区。右江区主要为深水陆源浊积岩和钙质重力流沉积,以浮游型菊石及双壳类为主,厚度在 4000m 左右。扬子区海相红层发育,多为浅水－半深水陆棚红层。右江区海相红层仅见于奥列尼克阶,为深水大洋红层。现将四川东部及重庆地区海相红层分别与其进行对比(表 7)。

5.2.1 与黔北－黔西地区三叠纪海相红层的对比

该区北部与四川东部及重庆地区相邻,海相红层发育,本文从其中大致可识别出 9 层(段)海相红层,它的特征及其与四川东部及重庆地区的对比简述如下:

(1)夜郎组海相红层:见于贵州高桥剖面夜郎组第 2 段(黄坝村段)24～29 层的底部的海相红层,含 *Claraia stachi*,应属于 *C. stachi-C. aurita* 组合带,大致与四川东部及重庆地区的飞仙关组第 2 段红层层位相当。见于贵州高桥剖面夜郎组第 3 段上部(九级滩段)的 30～50 层的海相红层,含 *Eumorphotis multiformis* 等,与四川东部及重庆地区飞仙关组 3～4 段海相红层层位相当。在贵州毕节地区,飞仙关组剖面第 2 段的 7～19 层海相红层,含 *Eumorphotis multiformis* 等(Bereau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province, 1987, 1997; Regional Geological Survey of Guizhou of

Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources, 1996),与四川东部及重庆地区的飞仙关组 3～4 段海相红层相当。

(2)茅草铺组海相红层:茅草铺组第 1 段海相红层,产双壳类 *Eumorphotis inaequicostata*, *E. laezkoi* 等,大致与四川东部及重庆地区的嘉陵江组 1～2 段海相红层相当(Bereau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province, 1987, 1997)。茅草铺组第 2 段海相红层,偶夹双壳类 *Entolium* cf. *discites*, *Myophoria costatoria* 等(Bereau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province, 1987, 1997; Regional Geological Survey of Guizhou of Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources, 1996),与四川东部及重庆地区的嘉陵江组上部 3～4 段海相红层相当。

(3)永宁镇组海相红层:在贵州关岭县永宁镇组(嘉陵江组)可分 4 段,其中 2～4 段为海相红层。2 段含含菊石 *Tirolites spinosus*,4 段含 *Danarites* sp. (Bereau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province, 1987, 1997; Regional Geological Survey of Guizhou of Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources, 1996),第 2 段和第 4 段分别可与四川东部及重庆地区嘉陵江组第 2 段和 4 段海相红层对比。

(4)巴东组海相红层:巴东组第 2 段海相红层,产双壳类 *Myophoria* (*Costateria*) *goldfussi* 等,与四川东部及重庆地区巴东组 2 段海相红层层位相当。关岭组松子坎段海相红层可能属于此层位。见于贵州余庆觉林巴东组第 3 段 41～42 层海相红层与四川东部及重庆地区巴东组第 3 段海相红层层位相当。巴东组 4 段海相红层,含双壳类 *Myophoria* (*Costateria*) *goldfussi* 等(Bereau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province, 1987, 1997; Regional Geological Survey of Guizhou of Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources, 1996),与四川东部及重庆地区巴东组 4 段红层层位相当。

(5)杨柳井组海相红层:见于遵义高桥三叠系剖面杨柳井组底部 112～116 层的海相红层可能相当于四川东部及重庆地区的天井山组海相红层。

(6)法郎组瓦窑段海相红层:关岭永宁镇西南 4km 竹杆坡瓦窑段海相红层,含菊石 *Protrachyceras* sp., *P. yongningensis*,时代属卡尼期早期(Bereau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province, 1987, 1997; Regional Geological Survey of Guizhou of Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources, 1996),层位大致相当于四川东部及重庆地区的马鞍塘组底部海相红层。

5.2.2　与黔中地区三叠纪海相红层的对比

黔中地区三叠纪地层属于台地碳酸盐岩边缘相的沉积,水体略深,海相红层层位相对减少(Bereau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province, 1987, 1997; Regional Geological Survey of Guizhou of Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources, 1996)。本文从其中共识别出 6 层海相红层,奥列尼克阶安顺组 3 层,拉丁阶杨柳井组(垄头组)、卡尼阶改茶组各 1 层和诺利阶三桥组 1 层。现将其特征及与四川东部及重庆地区海相红层的对比简述如下:

(1)安顺组海相红层:见于贵阳翁井下三叠统安顺组第 1 段(灰岩段)的 18～25 层的海相红层,产双壳类 *Leptochondria* cf. *bittneri*,与四川东部及重庆地区的嘉陵江组第 1 段海相红层相当;安顺组 2 段底部的 26～35 层的海相红层,产双壳类 *Entolium discites*, *Eumorphotis telleri* 等(Bereau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province, 1987, 1997; Regional Geological Survey of Guizhou of Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources, 1996),可能与四川东部及重庆地区嘉陵江组 2 段海相红层层位相当;安顺组 3 段的底部 50～54 层的海相红层很可能与四川东部及重庆地区的嘉陵江组 3 段海相红层相当。

(2)杨柳井组海相红层:见于贵阳市三桥剖面拉丁期早期杨柳井组底部 100～103 层的海相红层,含双壳类 *Myophoria* (*Costateria*) *goldfussi*, *M.* (*C.*) cf. *submultistriata* 等(Bereau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province, 1987, 1997; Regional Geological Survey of Guizhou of Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources, 1996),可能相当于四川东部及重庆地区的天井山组海相红层。

(3)改茶组海相红层:见于贵阳花溪垄头村剖面卡尼期早期的改茶组底部 60～69 层的海相红层,层位可能与四川东部及重庆地区马鞍塘组海相红层相当。

(4)三桥组海相红层:见于清镇后五至莫石冲剖

面诺利期早期的三桥组第2段(下灰岩段)26～29层的海相红层，富产腹足类 *Sanqiaothyris elliptica*，*Rhetinobsis ovata* 等，时代为诺利期早期(Bereau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province, 1987, 1997; Regional Geological Survey of Guizhou of Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources, 1996)。其可能是目前中国南方地区发现的三叠纪时期最高层位的海相红层，四川东部及重庆地区目前尚未识别出该期海相红层。

5.3 与黔南(右江)地区三叠纪海相红层的对比

黔南地区三叠系为深水相沉积，其中海相红层仅见于奥列尼克期的紫云组。紫云组属斜坡钙屑重力流沉积，在紫云板当茶叶哨剖面，紫云组分上下两段，均含海相红层(Bereau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province, 1987, 1997; Regional Geological Survey of Guizhou of Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources, 1996)，其特征及与四川东部及重庆地区海相红层的对比如下：

紫云组第1段海相红层见于该剖面紫云组第1段中部19～20层，紫云组第2段海相红层，见于紫云组的26～29层。上述二层海相红层层位与四川东部及重庆地区的嘉陵江组相当。但是属于陆坡下部的深水大洋红层。这说明在三叠纪时期，除广泛发育浅水－半深水三叠纪陆棚红层外，还在扬子地区南缘的东南区局部地区发育深水大洋红层。

综上所述，贵州地区三叠纪海相红层一共有12层，其中印度阶2层，奥列尼克阶3层，安尼阶3层，拉丁阶1层，卡尼阶2层和诺利阶1层，除诺利阶1层在四川东部及重庆地区未见到外，其余11层海相红层均可与四川东部及重庆地区三叠纪海相红层进行对比(表8)。

表8 四川东部及重庆地区三叠纪海相红层纵向分布与古气候、水深等要素之关系

Table 8 The relationship between the vertical distribution of the Triassic marine Red Beds and the paleoclimate, paleo-latitude, water depth, vegetation, minerals, rock color, and tectonic movement in eastern Sichuan and Chongqing during the Triassic period

时代 \ 因素				气候	纬度	水深	植物	矿产	岩石颜色	构造活动	海相红层
三叠系	上统	瑞替阶	须家河组	温凉、潮湿	高	陆地	繁盛	煤层发育	灰黑色(还原色发育) 灰色	成陆	陆相
		诺利阶	小塘子组		中	淡化近岸		煤夹层		上升	无
		卡尼阶	马鞍塘组			珊瑚等发育) (有孔虫、菊石、 正常浅海		无		下降	稀(一层) 稀(一层)
	中统	拉丁阶	天井山组								
		安尼阶	雷口坡组(巴东组)	干燥、炎热	中低	咸化 (潮上、潮间、泻湖) 滨岸、极浅水	不繁盛	膏盐等发育	(氧化色发育) 红色、紫红色等	上升	(可识别出3组12段红层) (陆棚红层广布) 极发育
	下统	奥列尼克阶	嘉陵江组								
		印度阶	飞仙关组(大冶组)								

6 结论

通过对四川东部和重庆地区三叠纪海相红层的研究，可以初步得出如下的结论：

(1)初次建立四川东部及重庆地区三叠纪海相红层的地层层序并确定了岩石特征，在此基础上初步识别出5组(套)12层(段)海相红层，由老到新分别是：印度阶飞仙关组或大冶组海相红层(1组4段)，奥列尼克阶嘉陵江组海相红层(1组4段)，安尼阶雷口坡组海相红层(1组3段)或巴东组海相红层(1组4段)，拉丁阶天井山海相红层(1组)，卡尼阶马鞍塘组海相红层(1组)。

(2)根据对三叠纪海相红层的岩石特征、生物群面貌及其形成的沉积环境分析，初步确定四川东部及重庆地区海相红层为浅水－半深水海相红层，属于典型的滨浅海陆棚红层类型；黔南地区紫云组的

两层深水海相红层,基本属于深海红层类型。通过对上述两种类型海相红层在四川东部和重庆地区及其与邻区的对比研究,可以确认在三叠纪时期存在着陆棚红层广布情况,而深海红层可能仅见于局部地区,如黔南一带。

(3)四川东部和重庆地区三叠纪海相红层发育程度、地层层序及岩石特征等均与周边古陆有紧密的关系,如早三叠世飞仙关期(图 4)的海相红层分布主要受控于其西面康滇古陆和西北面的龙门山高地,呈带状分布;三叠纪海相红层的碎屑物质及Fe_2O_3主要来源于康滇古陆和龙门山等高地(图 3,4,5)。

(4)四川东部及重庆地区三叠纪海相红层纵向分布与古气候、古纬度、水深等密切的关系(见表 8)。①早三叠世印度期、奥列尼克期和中三叠世安尼期气候干燥炎热,纬度低、海水浅、因而氧化条件强烈,陆棚红层广布,共发育 3 组(套)12 段海相红层,膏盐等矿产发育。②中三叠世晚期拉丁期和晚三叠世早期卡尼期,气候转凉,海水变深,纬度可能偏高,因而海相红层仅发育 2 层,拉丁期和卡尼期各 1 层,而且分布不太广泛。③晚三叠世中期诺利期气候变凉,海水变浅,而且淡化,植物开始繁盛,主要为海陆交互相,夹有少量煤层,由氧化条件转变成还原的条件。④晚三叠世时期瑞替期,海水全部退出,变成陆地,煤层发育,是研究区陆相成煤时期。

本文对四川东部及重庆地区三叠纪海相红层的研究为中国乃至全球三叠纪海相红层的研究提供基础数据和资料。由于此项工作初步开展,有些内容有待今后进一步的补充和深化。

致谢:感谢审稿人细致的点评和修改建议,并致谢在该区工作的前人所付出的辛勤劳动!

References

Bereau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province. 1987. Regional Geology of Guizhou Province. Beijing: Geological Publishing House, 07: 1～698 (in Chinese with English abstract).

Bereau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province. 1997. Lithostratigraphy of Guizhou Province. Wuhan: Publishing House of China University of Geology, 1～306 (in Chinese with English abstract).

Bureau of Geology and Mineral Resources of Hubei Province. 1990. Regional Geology of Hubei Province. Beijing: Geological Publishing House, 20: 1～707 (in Chinese with English abstract).

Bereau of Geology and Mineral Resources ofHubei Province. 1996. Lithostratigraphy of Hubei Province. Wuhan: Publishing House of China University of Geology, 1～284 (in Chinese with English abstract).

Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province. 1991. Regional Geology of Sichuan Province. Beijing: Geological Publishing House, 23: 1～730 (in Chinese with English abstract).

Bereau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province. 1997. Lithostratigraphy of Sichuan Province. Wuhan: Publishing House of China University of Geology, 1～417 (in Chinese with English abstract).

Chen Chuzhen, Li Wenben, Ma Qihong, Shang Yuke, Wu Shunqing, Zhang zuoming, Ye Meina, He Guoxiong, Shen Yanbin, Zheng Shuying. 1979. Triassic system of southwest China. In: Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Academic Sinica (ed.), Carbonate Biostratigraphy of Southwest China. Beijing: Science Press, 289～336 (in Chinese).

Dai Liguo, Zheng Rongcai, Li Shuang, Zheng Chao, Hu Zhonggui. 2009. Sequence-based lithofacies and paleogeography of Lower Triassic Feixianguan Formation in eastern Sichuan and northern Zhongqing area. Geologyin China, 36(1), 110～119 (in Chinese with English abstract).

FengZengzhao, Bao Zhidong, Wu Shenghe, Li Yongtie, Wang Guoli. 1997. Lithofacies palaeogeography of the early and Middle Triassic of south China. Scientia Geologica Sinica, 32(2): 212～220.

Guizhou working Party of Stratigraphy and Palaeontology. 1977. Regional Stratigraphic scale of southwest China, Guizhou volume. Beijing: Geological Publishing House, 1～604 (in Chinese).

Hu Xiumian. 2013. Distribution, Types and Origins of Phanerozoic Marine Red Beds. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. 32(3): 334～342 (in Chinese with English abstract).

Hu Xiumian. 2009. Cretaceous Oceanic Red Beds: Stratigraphy, Composition, Origins and Paleoceanographic and Paleoclimatic Significance. SEPM Soc for Sed Geology, 91.

Hu Xiumian, Jansa L, Wang Chengshan, Sarti L, Bak K, Wagreich M, Michalik J, Sotak J. 2005. Upper Cretaceous oceanic red beds (CORBs) in the Tethys: occurrences, lithofacies, age, and environments. Cretaceous Research, 26(1): 3～20.

Hu Xiumian, Scott R W, Cai Yuanfeng, Wang Chengshan, Melinte-Dobrinescu M C. 2012. Cretaceous oceanic red beds (CORBs): Different time scales and models of origin. Earth-Science Reviews, 115(4): 217～248.

Hu Xiumian, Wang chengshan. 2007. Creteceous Oceanic Red Beds: Characteristics, distribution and Origins. Acta Geologica of High School. 13(1): 1～13 (in Chinese with English abstract).

Li Guobiao, Jiang Ganqing, Wan Xiaoqiao. 2011. "The age of the Chuangde Formation in Kangmar, southern Tibet of China: Implications for the origin of Cretaceous oceanic red beds (CORBs) in the northern Tethyan Himalaya." Sedimentary Geology, 235: 111～121.

Lin Baoyu, Li Ming, Wu Zhenjie. 2017. Silurian Marine Red Beds in the Yangtze Platform of China and its international correlation. In: Lin Baoyu, Huang zhigao, Li Ming, Wu Zhenjie. On the discussion of some Silurian Problems in China. Beijing: Science Press, 102～128 (in Chinese with English abstract).

Lin Baoyu, Ren Jishun, Li Ming, Wu Zhenjie. 2018. Late Darriwilian to early Katian (Ordovician) Marine Red Beds from the main Blocks in China and its tectonic significance. Acta Geologica Sinica, 92(10): 2002～2007 (in Chinese with English abstract).

Lin Liangbiao, Chen Hongde, Zhu Lidong, Xu Shenglin, Zhong Yijiang. 2010. The sequence-based lithofa-cies-paleogeography of Jialingjiang formation and Leikoupo formation in eastern Sichuan Basin. Journal of Chengdu University of Technology: Sci & Technol Ed, 2010, 37(4): 446～451 (in Chinese with English abstract).

Liu Ping, Zheng Rongcai, Chang Hailiang, Liang Ning, Zhou Gang. 2018. Geological events and element geochemistry

response in the PTB Section from Eastern Sichuan area. Geological Review, 64(1): 29～44 (in Chinese with English abstract).

Regional Geological Survey of Guizhou of Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources. 1996. Stratigraphic Lexicon of Guizhou. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House. 1～508 (in Chinese without English abstract).

Rong Jiayu, Wang Yi, Zhang Xiaole. 2012. Tracking shallow marine Red Beds through geological time as exemplified by the lower Telychian (Silurian) in the Upper Yangtze Region, South China. Science China: Earth Sciences, 55(5): 699～713 (in Chinese with English abstract).

Shao Longyi, Lu Jing, Wang Hao, Zhang Pengfei. 2009. Developments of coal measures sequence stratigraphy in China. Acta Sedimentologica Sinica, 27(9): 904～914 (in Chinese with English abstract).

Shi Zhensheng, Wang Zhihong, Hao Cuiguo, Guo Changmin, Mo Wuling. 2015. Sedimentary facies of the Upper Triassic Ma'antang Formation in Sichuan Basin. Journal of Palaeogeography, 17(6): 771～786 (in Chinese with English abstract).

Sichuan Compiling Group for Regional Stratigraphic Scale. 1978. Regional Stratigraphic Scale of Southwest China, Sichuan volume. Beijing: Geological Publishing House, 1～572 (in Chinese).

Tong Jinnan. 2018. Triassic System. In: National Communission of Stratigraphy of China (ed.), "The Stratigraphic Chart (2014)" and Directions. Beijing: Geological Publishing House, 253～281 (in Chinese).

Wan Xiaoqiao, Li Guobiao, Si Jialiang. 2005. The distribution and ages of Late Cretaceous-Palaeocene Oceanic Red Beds in South Tibet. Earth Science Frontiers, 12(2): 31～37 (in Chinese with English abstract).

Wang Chengshan, Hu Xiumian. 2005. Cretaceous world and oceanic red beds. Earth Science Frontiers, 12(2): 011～021 (in Chinese with English abstract).

Wang Chengshan, Hu Xiumian, Huang Yongjiang, Scott R W, Wagreich M. 2009. Overview of Cretaceous Oceanic Red Beds (CORBs): a window on global oceanic and climate change. Cretaceous Oceanic Red Beds: Stratigraphy, Composition, Origins and Paleoceanographic and Paleoclimatic Significance: SEPM Special Publication, 91: 13～33.

Wang Mingquan, Zhao Yanjun, Liu Chenglin, Ding Ting. 2015. Paleotemperature and significance of the evaporated seawater in salt-forming process of the fourth member of Jialingjiang formation in the eastern Sichuan Basin. Acta Petrologica Sinica, 31: 2745～2750.

Yang Zunyi, Zhang Sunxin, Yang Jiri, Zhou Huiqin, Cao Hongsheng. 2000. Stratigraphical Lexicon of China, Triassic. Beijing: Geological Publishing House, 1～139 (in Chinese with English abstract).

Zhang Jinghua, Huang Jianguo. 1981. Stratigraphic and Lithofacies Palaeogeographic characteristics of the Early and Middle Triassic in Sichuan Basin. Journal of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 3: 59～82 (in Chinese with English abstract).

Zhao Jinko, Chen Chuzhen, Wang Yigang, He Guoxiong, Chen Jinhua. 1982. Problems on subdivision and correlation of the marine Triassic strata in China with explanatory text. In: Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences (ed.). Stratigraphic Correlation Chart in China with Explanatory Text. Beijing: Science Press, 191～205 (in Chinese).

Zhao Xiafei, Liu Shugen, Peng Jingsong, Dong Shunli, Zhang Yinde. 2018. Sedimentary environment, tectonic implication and exploration perspective of the Upper Triassic Xiaotangzi Formation in Longmenshan in Western Sichuan. Acta Geologica Sinica, 92(3): 604～617 (in Chinese with English abstract).

Zhou Jiayun, Gong Daxing, Li Meng. 2015. The characteristic of evaporite, migration of salt basins and its tectonic control in Triassic Sichuan Basin. Acta Geologica Sinica, 89(11): 1945～1952 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

陈楚震，黎文本，马其鸿，尚玉珂，吴舜卿，张作铭，厉宝贤，叶美娜，何国雄，沈炎彬，郑淑英. 1979. 西南地区的三叠系. 见：中国科学院南京地质古生物研究所(著). 西南地区碳酸盐生物地层. 北京：科学出版社，289～336.

戴荔果，郑荣才，李爽，郑超，胡忠贵. 2009. 川东－渝北地区飞仙关组层序－岩相古地理特征. 中国地质，36(1)：110～119.

冯增昭，鲍志东，吴胜和，李永铁，王国力. 1997. 中国南方早中三叠世岩相古地理. 地质科学，32(2)：212～220.

贵州地层古生物工作队. 1977. 西南地区区域地层表，贵州省分册. 北京：地质出版社，1～604.

贵州地质矿产局. 1997. 贵州省岩石地层. 武汉：中国地质大学出版社，1～306.

贵州省地质矿产局区调院. 1996. 刘裕周(主编). 贵州地层典. 贵阳：贵州科技出版社，1～508.

贵州省地质矿产局. 1987. 贵州省区域地质志. 北京：地质出版社，07：1～698.

湖北省地质矿产局. 1990. 湖北省区域地质志. 北京：地质出版社，20：1～707.

湖北省地质矿产局. 1996. 湖北省岩石地层. 武汉：中国地质大学出版社，1～284.

胡修棉. 2013. 显生宙海相红层的分布，类型与成因机制. 矿物岩石地球学通报，32(3)：335～342.

胡修棉，王成善. 2007. 白垩纪大洋红层：特征，分布与成因. 高校地质学报，13(1)：1～13.

胡修棉，王成善，李祥辉，Jansa L. 2006. 藏南上白垩统大洋红层：岩石类型，沉积环境与颜色成因. 中国科学 D 辑·地球科学，36(9)：811～821.

林宝玉，李明，武振杰. 2017. 扬子地台志留纪海相红层及其国际对比. 见：林宝玉等. 中国志留系若干问题的探讨. 北京：科学出版社，102～128.

林宝玉，任纪舜，李明，武振杰. 2018. 中国主要块体奥陶纪达瑞威尔期(Darriwillian)晚期－凯特期(Katian)早期海相红层及其构造意义. 地质学报，92(10)：2002～2017.

林良彪，陈洪德，朱利东，徐胜林，钟怡江. 2010. 川东嘉陵江组－雷口坡组层序岩相古地理. 成都理工大学学报(自然科学版)，37(4)：446～451.

刘萍，郑荣才，常海亮，梁宁，周刚. 2018. 川东地区二叠纪－三叠纪界限地层地质与地球化学特征. 地质论评，64(1)：29～44.

饶荣标. 1980. 西南地区地层总结，三叠系. 见：地质部成都地质矿产研究所(编). 西南地区地层总结. 北京：地质出版社，1～182.

戎嘉余，王怿，张小乐. 2012. 追踪地质时期的浅海红层－以上扬子区志留系下红层为例. 中国科学 D 辑·地球科学，42(6)：862～878.

邵龙义，鲁静，汪浩，张鹏飞. 2009. 中国含煤岩系层序地层学研究进展. 沉积学报，27(5)：904～914.

施振生，王志宏，郝翠果，郭长敏，莫午零. 2015. 四川盆地上三叠统马鞍塘组沉积相. 古地理学报，17(6)：771～786.

四川省地质矿产局. 1991. 四川省区域地质志. 北京：地质出版社，23：1～730.

四川省地质矿产局. 1997. 四川省岩石地层. 武汉：中国地质大学出版社，1～417.

四川省区域地层表编写组. 1978. 西南地区区域地层表，四川省分册. 北京：地质出版社，1～572.

童金南. 2018. 三叠系. 见：全国地层委员会(主编). 中国地层表(2014)说明书. 北京：地质出版社，253～281.

万晓樵，李国彪，司家亮. 2005. 西藏南部晚白垩世－古新世大洋红层的分布与时代. 地学前缘，12(2)：31～37.

王成善，胡修棉. 2005. 白垩纪世界与大洋红层. 地学前缘，12(2)：

11～21.
汪明泉，赵艳军，刘成林，丁婷. 2015. 四川盆地东部三叠系嘉陵江组成盐期浓缩海水古温度及其意义. 岩石学报，31(9)：2745～2750.
杨遵仪，张舜新，杨基瑞，周惠琴，曹洪升. 2000. 中国地层典，三叠系. 北京：地质出版社. 1～139.
张景华，黄建国. 1981. 四川盆地早、中三叠世地层及其岩相古地理特征. 中国地质科学院地质研究所所刊，3：59～82.
赵金科，陈楚震，王义刚，何国雄，陈金华. 1982. 中国海相三叠系的划分和对比问题(中国海相三叠系对比表及说明书). 见：中国科学院南京地质古生物研究所(编). 中国各纪地层对比表及说明书. 北京：科学出版社，191～205.
赵霞飞，刘树根，彭靖淞，董顺利，张银德. 2018. 川西龙门山前上三叠统小塘子组沉积环境、构造含意与含气远景. 地质学报，92(3)：604～617.
周家云，龚大兴，李萌. 2015. 四川盆地三叠纪蒸发岩特征，盐盆迁移及其构造控制. 地质学报，89(11)：1945～1952.

Distribution and age of the Triassic marine red beds in eastern Sichuan and Chongqing

BO Jingfang*[1,2], YAO Jianxin[1,2], LIN Baoyü[1,2], LIU Weiqing[1,2], LI Ming[1,2]

1) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing*, 100037, *China*;

2) *Key Laboratory of Stratigraphy and Paleontology, Ministry of Land and Resources, Beijing*, 100037, *China*

* *Corresponding author*: *lin_baoyu@163.com*

Abstract

Based on the Triassic stratigraphic data in eastern Sichuan and Chongqing, this paper carried out the correlation analysis of the distribution pattern and sedimentary characteristics of the Triassic marine Red Beds in the study area. 12 members of five groups of marine Red Beds have been preliminarily identified in the Triassic marine Red Beds in eastern Sichuan and Chongqing, namely: Feixianguan Formation (Daye Fm.) Red Beds (Induan), Jialingjiang Formation marine Red Beds (Olenekian), Leikoupo Formation (Badong Fm.) marine Red Beds (Anisian), Tianjingshan Formation marine Red Beds (Ladinian) and Ma'antang Formation marine Red Beds (Carnian). And the Triassic Marine Red Beds in eastern Sichuan-Chongqing area are compared with the Triassic Marine Red Beds in adjacent areas (west-central Hubei and Guizhou). The study reveals that all the marine Red Beds in eastern Sichuan and Chongqing should be the coastal-shallow water Shelf Red Beds (SRB), and the debris materials and Fe_2O_3 of the Triassic marine Red Beds in eastern Sichuan and Chongqing are mainly from Kham-Dian old land and other highlands such as Longmenshan. In addition, this paper also discusses the relationship between the vertical distribution of the Triassic marine Red Beds and the paleoclimate, paleo-latitude, water depth, vegetation, minerals, rock color, and tectonic movement in the eastern Sichuan and Chongqing regions during the Triassic period. In a word, this study provides the basic data for further research on the distribution pattern and stratigraphic correlation of the Triassic marine Red Beds in China and the world.

Key words: Triassic; marine red beds; shelf red beds; eastern Sichuan; Chongqing

古生物学报，56(3)：301－311(2017 年 9 月)
Acta Palaeontologica Sinica，56(3)：301－311(September，2017)

贵州剑河八郎寒武系“清虚洞组”*Tuzoia**

陈婉怡　赵元龙**　杨兴莲　文荣琴
(贵州大学资源与环境工程学院，贵阳 550025，zhaoyuanlong@126. com)

提要　大型双瓣壳节肢动物吐卓虫 *Tuzoia* 是一个形态丰富的属，广泛分布在北美、中国、澳大利亚和捷克的寒武系第二、三统中。文中报道了采自贵州剑河八郎“清虚洞组”的吐卓虫的 2 种：即 *Tuzoia jianheensis* sp. nov. 与 *T. bispinosa* Yuan and Zhao，1999。新种的主要特征为中后刺、后腹刺细长，腹部边缘发育有锯齿状边缘刺，壳面网纹细密，不同于 *Tuzoia* 的其他种，有较强地域性。新种化石数量占优，占总数三分之二。*T. bispinisa* 背缘发育有三角形或近三角形背刺，前后铰突发育，壳面的网纹以不规则六边形为主，网眼大。*T. jianheensis* sp. nov. 与上覆凯里组的 *T. bispinosa* 对比研究，得出 *Tuzoia* 的壳长有变短的趋势。

关键词　*Tuzoia*　大型双瓣壳节肢动物　“清虚洞组”　寒武系　贵州剑河

1　前　言

贵州剑河八郎“清虚洞组”位于凯里组之下，其上部泥岩夹层中发现了具软躯体的特异埋藏化石群。2009 年至今，在赵元龙教授的组织安排下，对其中的许多门类化石进行了研究，包括三叶虫(杨兴莲等，2010；罗绣春等，2013，2014；孙宗元等，2013；潘永金等，2013；王铭坤等，2014，2016)、藻类(傅晓平等，2012)、单板类(杨宇宁等，2012)、刺胞动物(张培兴等，2013a，2013b)、腕足类(刘玉娟等，2014，2015)和 *Wiwaxia*(Sun *et al.*，2014)。该化石群以节肢动物为主，包括大型双瓣壳节肢动物如 *Tuzoia*，*Isoxys*，*Occacaris* 等。其中 *Tuzoia* Walcott，1912 是大型双瓣壳节肢动物中壳型最大的一属，形态丰富，以左右两个非矿化硬壳、具网纹壳饰、背缘直或稍有拱曲、背缘前后有铰突起、中腹部有一侧脊和腹缘常具刺为主要特征，广泛分布于北美洲(加拿大、美国)、中国、澳大利亚和捷克等地的寒武系二、三统中(Resser，1929；Endo and Resser，1937；Resser and Howell，1938；潘江，1957；Briggs，1977；Glaessner，1979；Robison and Richards，1981；舒德干，1990；袁金良、赵元龙，1999；罗惠麟等，1999；Chlupáč and Kordul，2002)。

Tuzoia 由 Walcott(1912)于加拿大不列颠哥伦比亚省的布尔吉斯页岩中首次报道并命名 *Tuzoia retifera* Walcott，1912。后 Resser(1929)根据更多标本将 *T. retifera* 重新描述、修订，描述了三个新种：*T. canadensis*，*T. burgessensis* 和 *T. polleni*。此后，在北美、中国、澳大利亚、捷克等地陆续发现并报道了 *Tuzoia* 的 20 多个种(Resser，1929；Endo and Resser，1937；Resser and Howell，1938；潘江，1957；Briggs，1977；Glaessner，1979；Robison and Richards，1981；舒德干，1990；袁金良、赵元龙，1999；罗惠麟等，1999；Chlupáč and Kordul，2002；彭进等，2007)。Vannier 等(2007)系统研究全球的 *Tuzoia* 后将其归为 9 种、2 疑问种及 2 未定种：*Tuzoia retifera* Walcott，1912，*Tuzoia burgessensis* Resser，1929，*T. canadensis* Resser，1929，*T. guntheri* Robison and Richards，1981，*T. polleni* Resser，1929，*T. bispinosa* Yuan and Zhao，1999，*T. sienensis* P'an，1957，*T. manchuriensis* Resser and Endo，1937，*T. australis* Glaessner，1979，*T.* ? *peterseni* Robison and Richards，1981，*T.* ? *par-*

收稿日期：2017-06-01
* 国家重点基础研究发展规划项目(973)(2013CB835002，2015FY310100)、国家自然科学基金项目(41330101，41362002，41662001)、中国地质科学院全国地层委员会基金和贵州大学研究生创新基金(研理工 2017043)联合资助。
** 通讯作者：赵元龙，贵州贵阳花溪，贵州大学西区资源与环境工程学院，邮政编码 550025，E-mail：zhaoyuanlong@126. com。

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

va (Walcott, 1912), *T.* sp. in Chlupáč and Kordule, 2002, 和 *T.* sp. 。其中 Vannier 认为 *T. magna* 是 *T. bispinosa* 成年期的观点得到姚路等(2009)和 Wen(2015)对凯里组 *T. bispinosa* 个体发育研究数据的支持。另外,彭进等(2007)首次报道了杷榔组 *Tuzoia* cf. *T. retifera* Walcott, 1912。

Tuzoia 的系统分类位置一直存在争议。Walcott(1912)建立 *Tuzoia* 属时将其归于甲壳纲(Crustuacea)软甲亚纲(Malacostraca)膜壳虾目(Hymenocarida),科未定。Raymond(1935)建立吐卓虫科(Tuzoiidae)。Endo 和 Resser(1937)将 *Tuzoia* 属置于软甲亚纲的薄甲目(Leptostraca)。潘江(1957)将其归在同足亚纲(Homopoda)。Rolfe(1969)认为 *Tuzoia* 属于甲壳纲的叶虾亚纲(Phyllocarida),科、目未定。Simoetta 和 Delle(1975)建立吐卓虫目(Tuzoiida),侯先光等(1997)将其归入吐卓虫目吐卓虫科。Briggs(1977)先将 *Tuzoia* 归在软甲纲叶虾亚纲,目、科未定,之后 Briggs 等(1994)又将 *Tuzoia* 归于甲壳动物门。Robinson 和 Richards(1981)则将其置于 Protocarididae 科。陈均远(1996)则统称为无腹双瓣壳节肢动物。Vannier 等(2007)将其归为纲未定,吐卓虫目吐卓虫科。多数学者认同将 *Tuzoia* 归入甲壳纲。笔者同意将 *Tuzoia* 归入甲壳纲,但科、目未定。

本文对产于"清虚洞组"的 54 块 *Tuzoia* 标本进行研究,认为有两个种,即双刺吐卓虫 *T. bispinosa* 和剑河吐卓虫 *T. jianheensis* sp. nov. ,其中 *T. Jianheensis* sp. nov. 占优势,保存相对较好。化石均保存于贵州大学地层与古生物研究所。

2 地质背景

研究区位于贵州剑河八郎一带,区内寒武系发育,由老至新出露有留茶坡组、牛蹄塘组、九门冲组、变马冲组、杷榔组、"清虚洞组"、凯里组、甲劳组、娄山关群(Zhao *et al*. ,2012)(插图 1)。其中,"清虚洞组"时代为寒武纪黔东世都匀期中晚期(寒武纪第二世第四期),由赵元龙等测制(罗绣春等,2014),厚 272 m,下部为灰色中厚层至厚层细晶灰岩、泥质灰岩,偶夹层间泥页岩,中上部为灰色中厚层灰岩、泥质灰岩及灰黄色泥页岩,岩性组合与典型清虚洞组以及东南部主要由页岩组成的乌训组均有差异,用"清虚洞组"来表示(罗绣春等,2014;刘玉娟等,2015)。由于"清虚洞组"上部发现了大量北极古掘头虫 *Protoryctocephalus arcticus*,新建了 *Protoryctocephalus arcticus* 带(罗绣春等,2014),下部建带尚未成熟。

本文所报道的 *Tuzoia* 采自剑河革东八郎松山剖面"清虚洞组"中上部,位于 *Protoryctocephalus arcticus* 带(插图 2)。

3 系统古生物

节肢动物门 Phylum Arthropoda Siebold and Stannius, 1845

甲壳纲 Class Crustacea Penmant, 1777

目、科未定 Order, Family uncertain

吐卓虫属 Genus *Tuzoia* Walcott, 1912

1912 *Tuzoia* Walcott, Walcott, p. 187.
1929 *Tuzoia* Walcott, Resser, p. 6.
1969 *Tuzoia* Walcott, Rolfe, pt. R, p. 328.
1981 *Tuzoia* Walcott, Robinon and Richards, p. 12.
1994 *Tuzoia* Walcott, Briggs *et al*. , p. 155.
1999 *Tuzoia* Walcott,袁金良、赵元龙,89,90 页。
2003 *Tuzoia* Walcott, Lieberman, p. 678.
2007 *Tuzoia* Walcott, Vannier *et al*. , p. 459.
2007 *Tuzoia* Walcott,彭进等,400 页。

模式种 *Tuzoia retifera* Walcott, 1912

属征 壳体较大,由两瓣等大的壳组成,呈卵圆形,两瓣壳铰合的背缘直或稍有拱曲,常具刺,两端具呈三角形的前、后铰突。一般后腹部较前腹部膨大,呈后摆状,部分属种腹缘具边缘刺,多数具有后腹刺和中后刺结构。壳身中部具一近乎平行背缘带刺的侧脊。壳面为不规则的多边形纹饰组成,五边形或六边形居多。前背铰突下方具一对较大的带柄的球状眼。

分布时代 加拿大(不列颠哥伦比亚、阿尔伯塔)、美国(犹他、内华达、佛蒙特、宾夕法尼亚)、中国(辽宁、云南及贵州)、澳大利亚袋鼠岛及捷克波西米亚等地,寒武系第二、三统。

剑河吐卓虫(新种) *Tuzoia jianheensis* sp. nov. Chen and Zhao

(插图 3,5)

词源 *jianheensis*,新种的发现地贵州剑河。

材料 34 块化石,其中 19 块保存较好。

正模 Q52-3499a/b,为一块保存较为完整的侧压标本。

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

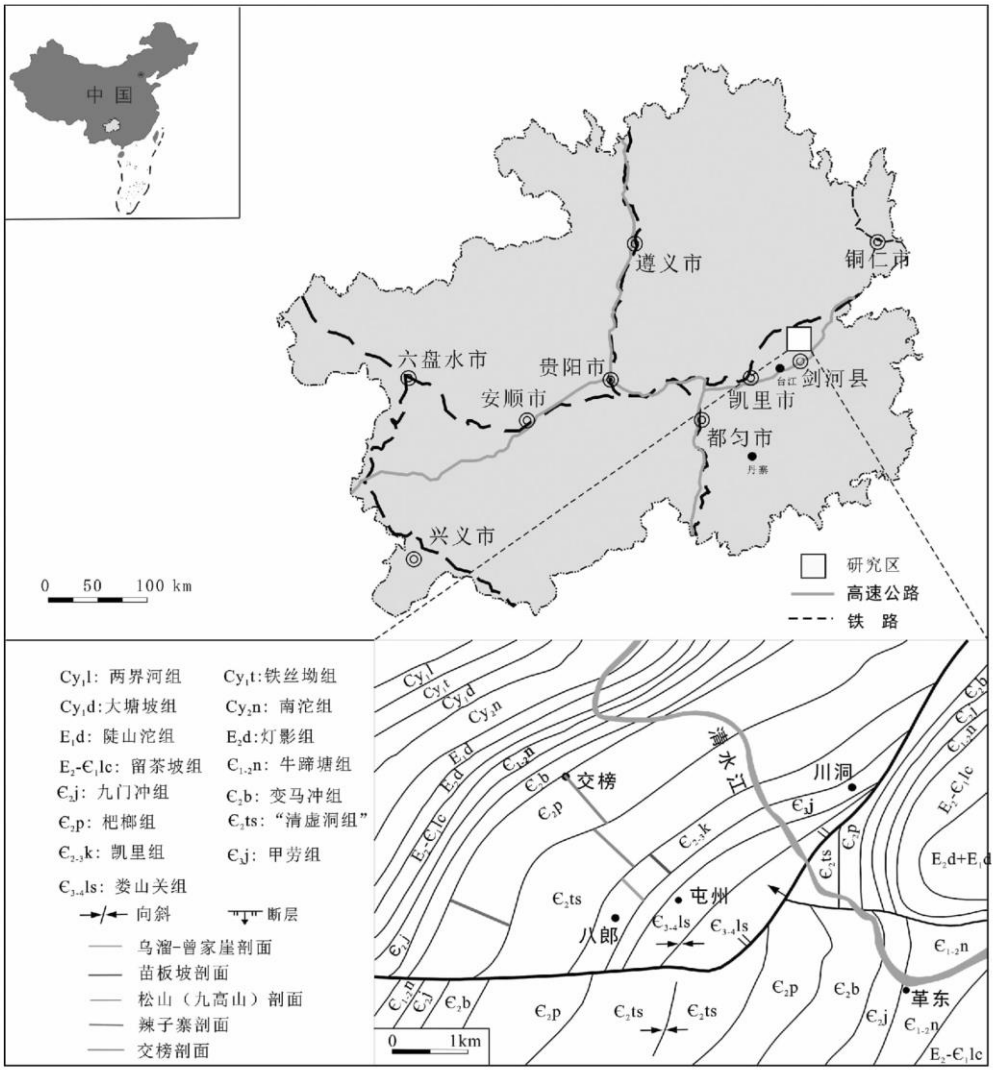


插图 1　松山（九高山）剖面地理位置图及地质图（据 Zhao *et al.*，2012）

Geological map and geographic map showing the location of Songshan (Jiugaoshan) section (after Zhao *et al.*, 2012).

特征　壳瓣卵圆形，后摆，背缘直，具背刺，两端铰突发育，具中前刺、中后刺和后腹刺，腹部边缘发育有锯齿状边缘刺，壳面网纹细密。

描述　壳瓣卵圆形，长高比值的范围在 1.34—1.57，后腹部膨大呈后摆。铰合线直，背缘发育有 4 根粗壮的三角形背刺和若干较纤细背刺；背缘前后铰突发育，基部较宽，前铰突略大于后铰突并稍向前下方延伸。前、后腹部均发育三角形或近三角形边缘刺，中后刺和后腹刺细长，接近相互平行，中后刺与后铰突之间发育有 2 个边缘刺，后腹刺后侧发育有一边缘刺，均近三角形。侧脊发育，侧脊到背缘距离小于 1/2 壳高，几乎与背缘平行。壳面的网纹多呈五边形，网纹小，每平方厘米网纹数为 30—100 个，网纹直径 0.8—2 mm，网纹壁纤细。

比较　新种与其他种最大的区别是网纹细密，另外，前后腹缘刺均十分发育（插图 5）。*T. sinensis*（潘江，1957，254 页，图版 Ⅰ，图 1ax1，2x1，1bx2；罗惠麟等，2006，465 页，图版 Ⅰ，图 1，2；图版 Ⅱ，图 1—3；何通江等，2012，11 页，图版 Ⅰ，图 1，2）虽也有发育的腹缘刺，但壳面网纹相对较大，每平方厘米约为 10 个，单壳网纹密度小于新种，并且新种前铰突较 *T. sinensis* 发育，更粗壮；*T. canadensis* 的边缘刺从后向前逐渐变小，而新种前腹缘边缘刺基本等大，且前者背缘和铰突常发育有次级刺，壳形椭圆，

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

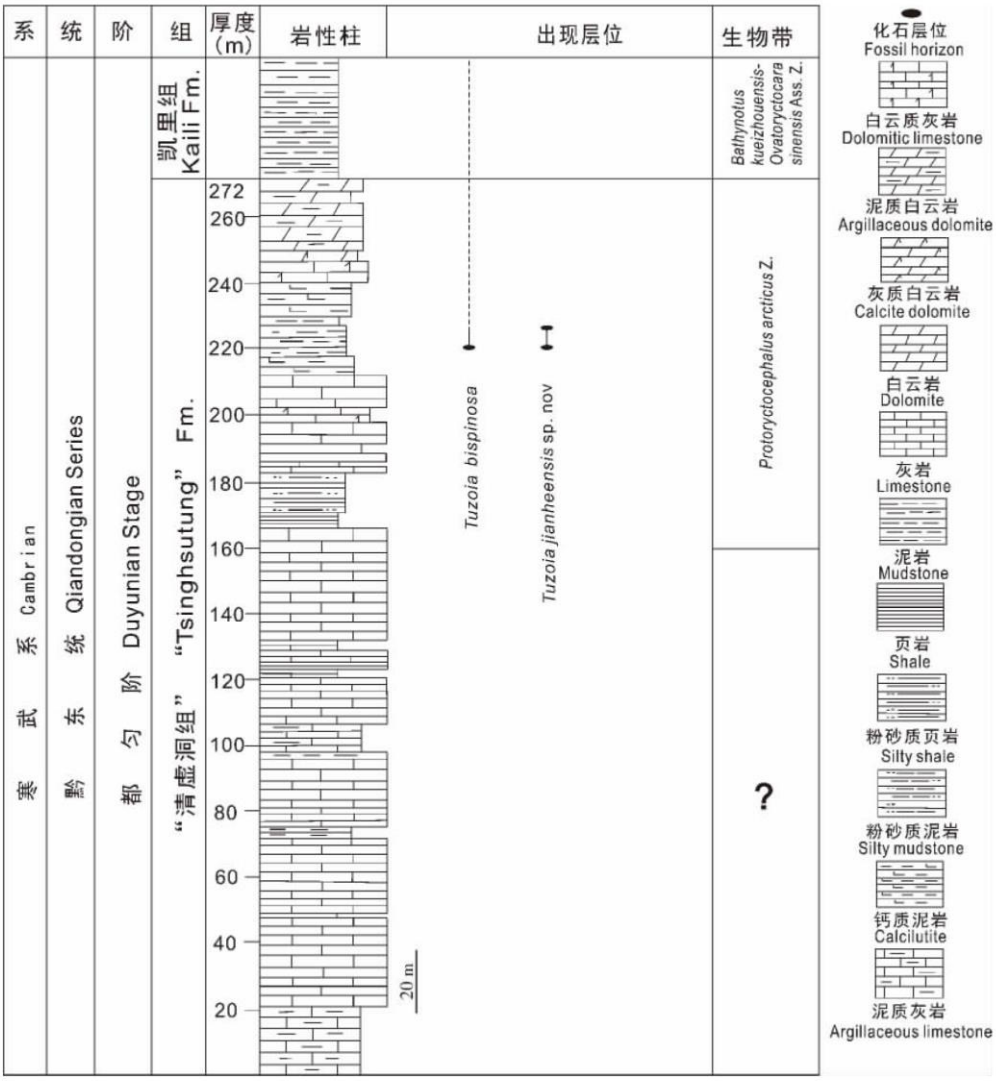


插图 2 松山剖面"清虚洞组"*Tuzoia* 地层分布图(据 Zhao *et al.*,2012)

Stratigraphic ranges of *Tuzoia* from the "Tsinghsutung Formation" of Songshan Section (after Zhao *et al.*, 2012).

后腹刺相对更长,网纹大,另前者前铰突较细和新种发育的前铰突形成区别。新种与 *T. bispinosa* Yuan and Zhao 相比(插图 4),两者的铰合线、背刺较相似,但后者的前铰突平直,前腹边缘刺不发育,后腹刺与中后刺均较粗壮,侧脊到背缘距离大于1/2壳高,壳面网纹虽因个体和(或)性别不同大小有差异,但总体以六边形为主,且网眼壁较厚。新种与杷榔组所产 *Tuzoia* cf. *T. retifera* Walcott, 1912 相比,两者的壳形、背刺和前后铰突均较相似,区别是后者的前腹部边缘刺较不发育,呈小齿状,后腹部边缘刺发育,侧脊到背缘距离大于 1/2 壳高,网纹遍布整个壳体,网纹大,以不规则的五边形、六边形为主,网纹壁较厚。

产地层位 贵州剑河八郎村,寒武系第二统第四阶"清虚洞组" *Protoryctocephalus arcticus* 带。

双刺吐卓虫 *Tuzoia bispinosa* Yuan and Zhao, 1999

(插图 4)

1999 *Tuzoia bispinosa* Yuan and Zhao,袁金良、赵元龙,89,90 页,图版Ⅰ,图 1—8;图版Ⅱ,图 9—12。

1999 *Tuzoia magna* Yuan and Zhao,袁金良、赵元龙,89,90 页,图版Ⅱ,图 13—16。

2009 *Tuzoia bispinosa* Yuan and Zhao,姚璐,60—62 页,插图 3,图 1—4;插图 4,图 1—6;插图 5,图 1—6。

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

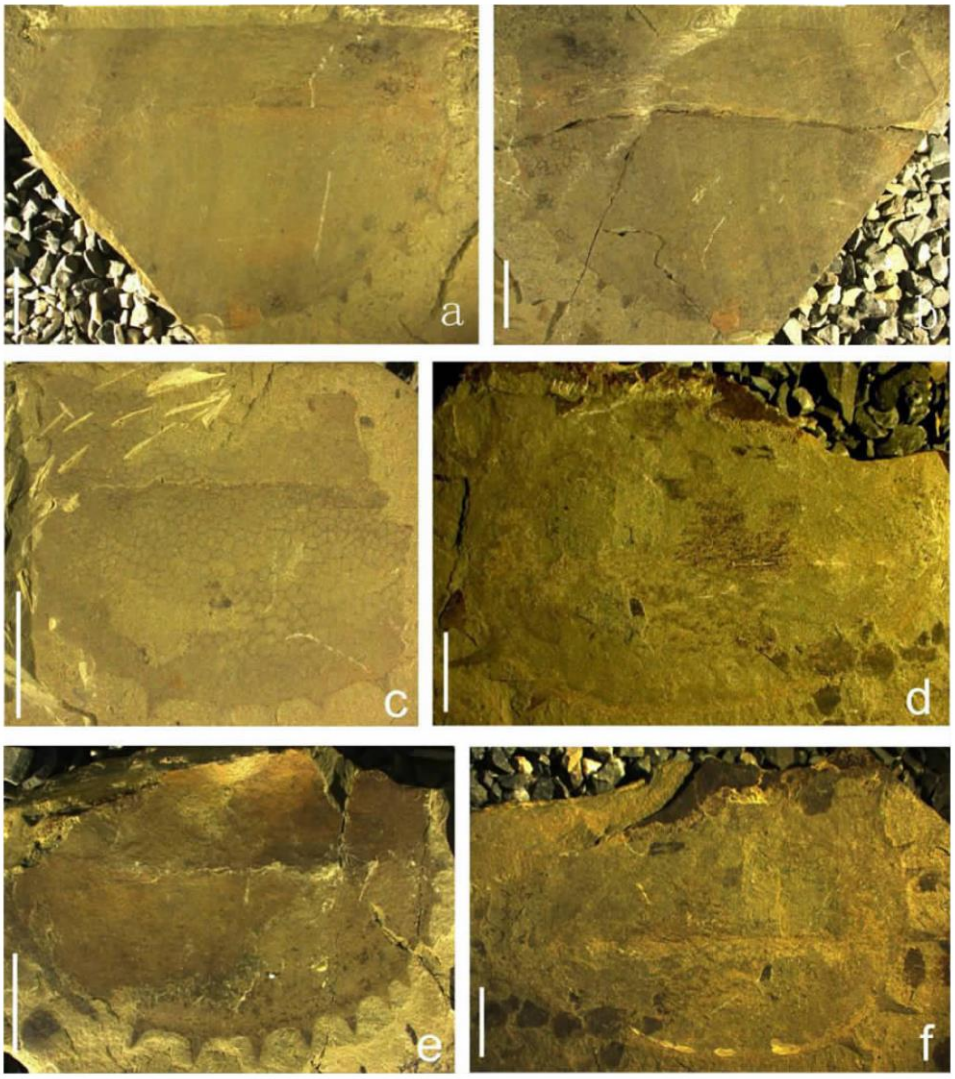


插图 3　剑河八郎“清虚洞组”中上部 *T. jianheensis* sp. nov.

T. jianheensis sp. nov. from the middle-upper part of the “Tsinghsutung Formation” at Balang Village, Jianhe County.

a. 右壳，正模，标本号：Q52-3499b（Q 剑河八郎“清虚洞组”）；b. 右壳，正模，标本号：Q52-3499a；c. 右壳，注意网纹构造，标本号：Qm-498（Qm 剑河八郎“清虚洞组”）；d. 右壳，副模，注意后腹刺，标本号：Q51-b；e. 右壳，注意边缘刺，标本号：Qm32a-82；f. 右壳，副模，注意中后刺和后腹刺，标本号：Q51-a。比例尺均为 10 mm。

a. Right valve, holotype, Q52-3499b (Q indicates “Tsinghsutung Formation at Balang Village, Jianhe County); b. Right valve, holotype, Q52-3499a; c. Right valve, note reticulate pattern, Qm-498 (Qm indicates “Tsinghsutung Formation at Balang Village, Jianhe County); d. Right valve, paratype, note posteroventral spine, Q51-b; e. Right valve, note ventral spines, Qm32a-82; f. Right valve, paratype, note mid-posterior spine and posteroventral spine, Q51-a. All scale bars equal 10 mm.

2015　*Tuzoia bispinosa* Yuan and Zhao, Wen *et al*, p. 64—68, fig. 4, pic. A—F; fig. 5, pic. A—F; fig. 6, pic. A—F; fig 7, pic. A—F; fig. 8, pic. F.

材料　17 块化石，其中 9 块保存较好。

描述　壳瓣椭圆形。铰合线直，背缘发育有三角形或近三角形背刺；背缘前后铰突较短，基部较宽，后铰突向后上方延伸。侧脊发育，几乎与背缘平行，侧脊到背缘距离大于 1/2 壳高。壳面的网纹以不规则六边形为主，网眼较大。

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

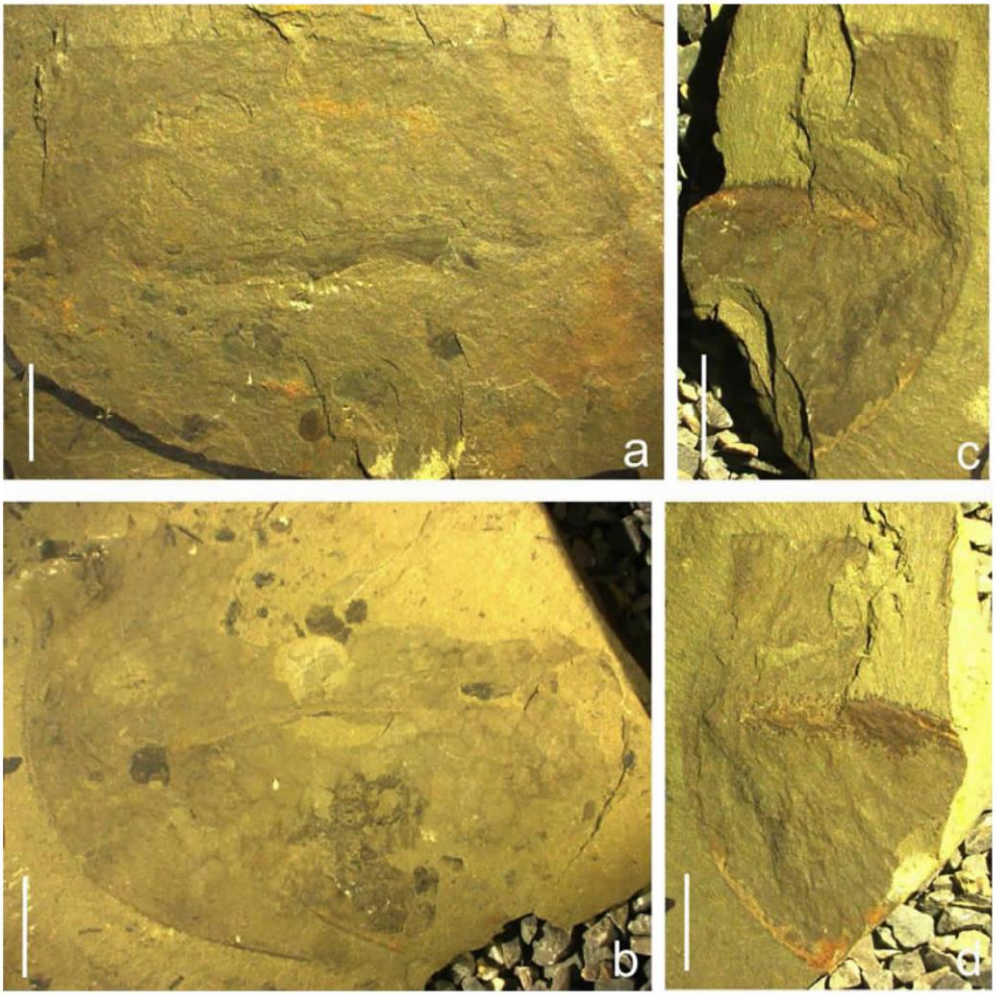


插图 4 剑河八郎"清虚洞组"中上部 *T. bispinosa* Yuan and Zhao, 1999

T. bispinosa Yuan and Zhao, 1999 from the middle-upper part of the "Tsinghsutung Formation" at Balang Village, Jianhe County. a. 左壳,注意背刺,标本号:Q52-3859;b. 右壳,注意网纹结构,标本号:Q52-3053;c. 左壳,注意铰突,标本号:Qm-168;d. 左壳,标本号:Qm-177。比例尺均为 10 mm。

a. Left valve, note dorsal spines, Q52-3859; b. Right valve, note reticulate pattern, Q52-3053; c. Left valve, note anterior cardinal process, Qm-168; d. Left valve, Qm-177. All scale bars equal 10 mm.

比较 新材料归入 *T. bispinosa* 的原因在于其背缘前部发育有 2 个三角形背刺,且背缘前后铰突均较短,腹缘刺不发育,网纹壁较同层位的 *T. jianheensis* sp. nov. 厚且大。与布尔吉斯页岩中所产的 *T. burgessensis* Resser 相比,后者铰合线可见轻微凸起,前铰突相对较短,后铰突小,后腹刺与中后刺突出但纤细,后腹部见小齿状突起,最大壳高位于壳体中前部。与产于加拿大不列颠哥伦比亚省 Eager Formation 的 *T. polleni* Resser 相比,后者壳形呈卵圆形,铰合线可见轻微凸起,前铰突较钝,基部宽,前铰窝浅,中后部刺和后腹刺相对较短,侧脊稍有倾斜,最大壳高位于中后部。

产地层位 贵州剑河八郎村,寒武系第二统第四阶"清虚洞组";贵州剑河八郎村,寒武系第三统第五阶凯里组。

4 讨 论

新种 *T. jianheensis* sp. nov. 与同层位产出的 *T. bispinosa* 相比,形态上明显不同,前者网纹细密且前腹缘边缘刺更为发育并粗短。袁金良等曾将发现于台地的种与发现于台地边缘及斜坡区的种进行

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

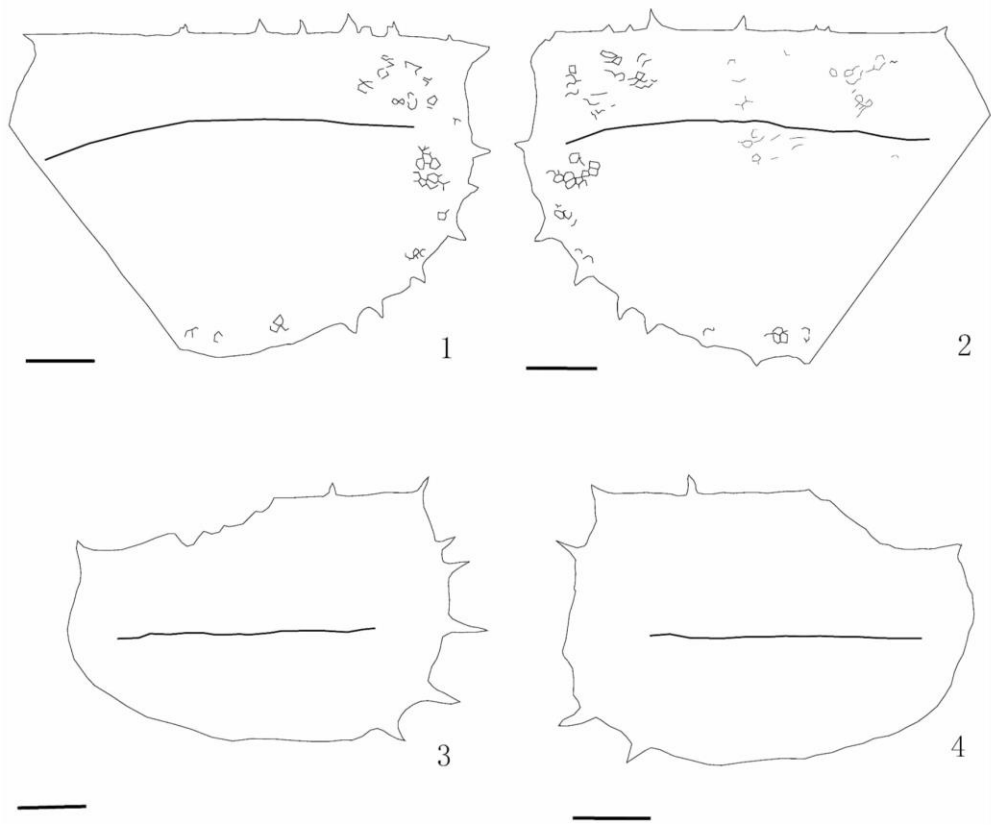


插图 5　*Tuzoia jianheensis* sp. nov. 标本素描图

Schematic reconstruction of *Tuzoia jianheensis* sp. nov.

1. 标本号(Specimen number)：Q52-3499b；2. 标本号：Q52-3499a；3. 标本号：Q51-a；4. 标本号：Q51-b。图中比例尺代表 10 mm(scale bar = 10 mm)。

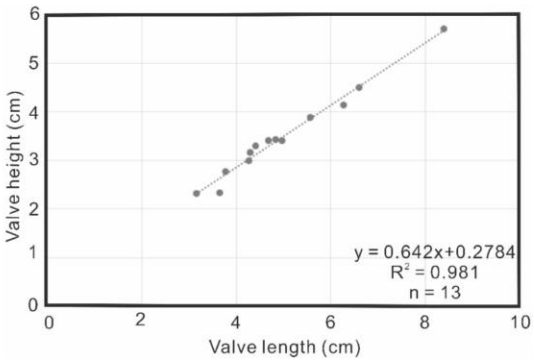


插图 6　“清虚洞组”*Tuzoia jianheensis* sp. nov. 壳高/长值散点图

Scatter plot diagram of length versus width for *Tuzoia jianheensis* sp. nov. of the “Tsinghsutung” Formation.

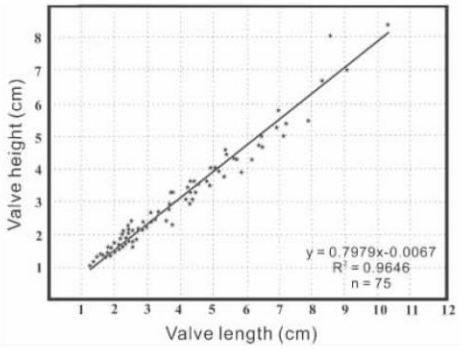


插图 7　凯里组 *Tuzoia bispinosa* 壳高/长比值散点图(据 Wen *et al.*，2015，fig. 10-A)

Scatter plot diagram of length versus width for *Tuzoia bispinosa* of the Kaili Formation (from Wen *et al.*, 2015, fig. 10-A).

比较，发现前者壳壁较厚、网纹壁较厚、边缘刺发育且粗短，推测是由于生活在相对较浅的水体中，为适应较强的水动力环境而出现的变化(袁金良、赵元龙，1999)。据此推测新种相对于 *T. bispinosa* 可能更适应水动力较强的环境，“清虚洞组”的 *T. jianheensis* sp. nov. 与 *T. bispinosa* 占据了不同的生

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

态位，且“清虚洞组”*Tuzoia* 标本保存欠佳，全部为侧压保存，一定程度上反映其水动力较强的埋藏环境。散点图展示了 *Tuzoia* 壳长与壳高之间的线性关系（插图 6，7），斜率（壳高/长比值）越大，相对壳形越短，“清虚洞组”的为 0.642，凯里组的为 0.7979（Wen *et al.*，2015），初步认识到“清虚洞组”的 *Tuzoia* 新种壳形较凯里组的 *Tuzoia* 壳形更短。“清虚洞组”中 *Tuzoia* 在大型双瓣壳节肢动物中化石数量所占比例最大，与凯里组类似，而澄江生物群中未见 *Tuzoia*，这样的生物组合特征为全球寒武纪大型双瓣壳节肢动物多样性变化的研究增添了重要材料，也为分析剑河生物群埋藏环境提供了依据。

致谢 中国科学院南京地质古生物研究所袁金良研究员给予悉心指导和帮助，两位审稿专家提出宝贵意见，贵州大学周彦君、辽宁省古生物博物馆刘美彤修改英文摘要，剑河八郎村村民刘峰、刘泽福及贵州大学古生物研究所研究生等参与化石的采集工作，在此一并致以衷心的感谢。

参 考 文 献 (References)

Briggs D E G, 1977. Bivalved arthropods from the Cambrian Burgess Shale of British Columbia. Palaeontology, **20**(3): 595—621.

Briggs D E G, Erwin D H, Collier F J, 1994. The Fossils of the Burgess Shale. Washington: Smithsonian Institution Press. 1—238.

Chen Jun-yuan (陈均远), Zhou Gui-qing (周桂琴), Zhu Mao-yan (朱茂炎), Ye Gui-yu (叶贵玉), 1996. Chengjiang Biota—A unique Window of the Cambrian Explosion. Taiwan: The National Museum of Nature Science. 1—222 (in Chinese).

Chlupáč I, Kordul V, 2002. Arthropods of Burgess Shale type from the Middle Cambrian of Bohemia (Czech Republic). Bulletin of Czech Survey, **77**(3): 167—182.

Endo R, Resser C E, 1937. The Sinian and Cambrian formations and fossils of southern Manchoukuo. Bulletin of Manchuian Science Museum, **1**: 1—473.

Fu Xiao-ping (傅晓平), Wu Meng-yin (伍孟银), Zhao Yuan-long (赵元龙), Zhu Wei-hua (朱伟华), Yang Yu-ning (杨宇宁), 2012. Discovery of Macroalgae from the Cambrian Tsinghsutung Formation of Guizhou. Acta Palaeontologica Sinica (古生物学报), **51**(1): 56—63 (in Chinese with English abstract).

Glaessner M F, 1979. Lower Cambrian Crustacea and Annelid worms Kangaroo Island, South Australia. Alcheringa, **3**: 21—31.

He Tong-jiang (何通江), Liu Jian-ni (刘建妮), Han Jian (韩健), 2012. *Tuzoia sinensis* Pan of Early Cambrian Guanshan Fauna from Eastern Yunnan. Gansu Geology (甘肃地质), **21**(2): 10—13 (in Chinese with English abstract).

Hou Xian-guang, Bergström J, 1997. Arthropods of the Lower Cambrian Chengjiang fauna, Southwest China. Fossils and Strata, **45**: 1—116.

Lieberman B S, 2003. A new soft-bodies fauna: the Pioche Formation of Nevada. Journal of Paleontology, **77**(4): 674—690.

Liu Yu-juan (刘玉娟), Zhao Yuan-long (赵元龙), Liu Yu-ying (刘玉莹), Mao Yong-qin (毛永琴), 2015. A preliminary study of *Kutorgina* Billings, 1861 from the Cambrian “Tsinghsutung Formation” of Guizhou, China. Acta Palaeontologica Sinica (古生物学报), **54**(3): 342—350 (in Chinese with English abstract).

Liu Yu-juan (刘玉娟), Zhao Yuan-long (赵元龙), Mao Yong-qin (毛永琴), 2015. *Kutorgina* from the Cambrian Kaili Formation at Balang Village, Jianhe County, Guizhou Province. Journal of Guizhou University (贵州大学学报), **32**(1): 49—53 (in Chinese with English abstract).

Luo Hui-lin (罗惠麟), Hu Shi-xue (胡世学), Chen Liang-zhong (陈良忠), Zhang Shi-shan (张世山), Tao Yong-he (陶永和), 1999. Early Cambrian Chengjiang Fauna from Kunming region, China. Kunming: Yunnan Science and Technology Press. 1—129 (in Chinese with English abstract).

Luo Xiu-chun (罗绣春), Zhao Yuan-long (赵元龙), Peng Jin (彭进), Yang Yu-ning (杨宇宁), Pan Yong-jin (潘永金), 2014. A preliminary study of *Protorycotocephalus* Chow (Zhou) in Lu *et al.*, 1974b from the Cambrian “Tsinghsutung Formation” of Guizhou, China. Acta Palaeontologica Sinica (古生物学报), **53**(3): 327—334 (in Chinese with English abstract).

Luo Xiu-chun (罗绣春), Zhao Yuan-long (赵元龙), Wang Ping-li (王平丽), Yang Yu-ning (杨宇宁), Zhang Pei-xing (张培兴), Pan Yong-jin (潘永金), 2013. Dorypygidae Trilobites from the Tsinghsutung Formation in Balang, Jianhe County, Guizhou Province. Journal of Guizhou University (贵州大学学报), **30**(3): 39—45 (in Chinese with English abstract).

P'an Kiang (潘 江), 1957. On the discovery of Homopoda from South China. Acta Paleontologica Sinica (古生物学报), **5**(4): 523—526 (in Chinese with English abstract).

Pan Yong-jin (潘永金), Zhao Yuan-long (赵元龙), Sun Hai-jing (孙海静), Yang Yu-ning (杨宇宁), Zhang Pei-xing (张培兴), Luo Xiu-chun (罗绣春), 2013. Discovery of *Nangaops danzhaiensis* (Zhou, 1974) from the Cambrian “Tsinghsutung Formation” of Balang District, Jianhe County, Guizhou Province, China. Acta Palaeontologica Sinica (古生物学报), **45**(2): 235—242 (in Chinese with English abstract).

Peng Jin (彭 进), Feng Hong-zhen (冯洪真), Zhao Yuan-long (赵元龙), Fu Xiao-ping (傅晓平), Wang Yu-xuan (王宇轩), 2007. *Tuzoia* from the Lower Cambrian Balang Formation, Eastern Guizhou, China. Geological Review (地质评论), **53**(3): 397—403 (in Chinese with English abstract).

Resser C E, 1929. New Lower and Middle Cambrian Crustacea. Proceeding U. S. National Museum, **71**(9): 1—18.

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Resser C E, Howell B F, 1938. Lower Cambrian *Olenellus* Zone the Appalachians. Bulletin of the Geology Society of America, **49**: 195—248.

Robison R A, Richards B C, 1981. Larger bivalve arthropods from the Cambrian of Utah. The University of Kansas, Paleontological Contributions, Paper **106**: 1—19.

Rolfe W D, 1969. Phyllocarida. *In*: Moore (ed.), Treatise on Invertebrate Paleontology, Part R. Arthropoda 4, Volume 1. Geological Society of American and University of Kansas. R269—R331.

Shu De-gan (舒德干), 1990. Cambrian and Lower Ordovician Bradoriida from Zhejiang, Hunan and Shaanxi Province. Xi'an: Northwest University Press. 1—95 (in Chinese with English abstract).

Simonetta A M, Delle Cave L, 1975. The Cambrian nontrilobite arthropods from the Burgess Shale of British Columbia. A study of their comparative morphology taxonomy and evolutionary significance. Palaeontographica Italy, **69**(39): 1—37.

Sun Hai-jing, Zhao Yuan-long, Peng Jin, Yang Yu-ning, 2013. New *Wiwaxia* material from the Tsingsutung Formation (Cambrian Series 2) of eastern Guizhou, China. Geological Magazine, **151**(2): 339—348.

Sun Zong-yuan (孙宗元), Yang Xing-lian (杨兴莲), Zhao Yuan-long (赵元龙), Zheng Hao-lin (郑昊林), Zhu Ya-jie (朱雅杰), 2013. Exuvination of trilobite *Protoryctocephalus arcticus* from the Cambrian Tsinghsutung Formation of Guizhou. Acta Palaeontologica Sinica (古生物学报), **52**(2): 256—264 (in Chinese with English abstract).

Vannier J, Caron J B, Yuan Jin-liang, Briggs D E G, Collins D, Zhao Yuan-long, Zhu Mao-yan, 2007. *Tuzoia*: morphology and lifestyle of a large bivalved arthropod of the Cambrian seas. Journal of Paleontology, **81**(3): 445—471.

Walcott C D, 1912. Middle Cambrian Branchiopoda, Malacoetraca, Trilobita and Merostomata. Cambrian geology and paleontology Ⅱ. Smithonian Miscellaneous Collection, **57**(6): 145—228.

Wang Ming-kun (王铭坤), Zhao Yuan-long (赵元龙), 2016. Ptychopariid Trilobites from the upper part of the "Tsinghsutung Foemation" (Stage 4, Cambrian) at Balang Village, Jianhe County, Guizhou Province. Acta Palaeontologica Sinica (古生物学报), **55**(2): 147—159.

Wang Ming-kun (王铭坤), Zhao Yuan-long (赵元龙), Zhang Pei-xing (张培兴), Liu Feng (刘　峰), Liu Ze-fu (刘泽福), 2014. The study of *Balangcunaspis* from the Cambrian "Tsinghsutung Formation" of Balang District, Jianhe County, Guizhou Province, China. Journal of Guizhou University (贵州大学学报), **31**(5): 36—39 (in Chinese with English abstract).

Wen Rong-qin, Zhao Yuan-long, Peng Jin, 2015. Morphology and ontogeny of *Tuzoia bispinosa* from the Kaili Biota (Cambrian Stage 5) of eastern Guizhou, China. Palaeoworld, **24**: 61—70.

Yang Xing-lian (杨兴莲), Zhao Yuan-long (赵元龙), Peng Jin (彭　进), Yang Yu-ning (杨宇宁), Yang Kai-di (杨凯迪), 2010. Discovery of Oryctocephalid Trilobites from the Tsinghsutung Formation (Duyunian Stage, Qiandongian Series, Cambrian), Jianhe County, Guizhou Province. Geological Journal of China Universities (高校地质学报), **16**(3): 309—316 (in Chinese with English abstract).

Yang Yu-ning (杨宇宁), Zhao Yuan-long (赵元龙), Peng Jin (彭　进), Yang Xing-lian (杨兴莲), 2012. *Oelandiella* from the Cambrian "Tsinghsutung Formation" of Jianhe County, Guizhou. Acta Palaeontologica Sinica (古生物学报), **51**(3): 308—319 (in Chinese with English abstract).

Yao Lu (姚　璐), Peng Jin (彭　进), Fu Xiao-ping (傅晓平), Zhao Yuan-long (赵元龙), 2009. Ontogenensis of *Tuzoia bispinosa* (Arthropoda) from the Middle Cambrian Kaili Biota, Guizhou, China. Acta Palaeontologica Sinica (古生物学报), **48**(1): 56—68 (in Chinese with English abstract).

Yuan Jin-liang (袁金良), Zhao Yuan-long (赵元龙), 1999. *Tuzoia* (bivalved arthropods) from the Lower-Middle Cambrian Kaili Formation of Taijiang, Guizhou. Acta Palaeontologica Sinica (古生物学报), **38**(Suppl.): 88—94 (in Chinese with English abstract).

Zhang Pei-xing (张培兴), Zhao Yuan-long (赵元龙), Wang Ping-li (王平丽), Yang Yu-ning (杨宇宁), Luo Xiu-chun (罗绣春), 2013a. *Sphenothallus* Hall, 1847 from the Tsinghsutung Formation (Qiandongian Series, Cambrian) in Banglang Village of Jianhe County, Guizhou Province, China. Acta Micropalaeontologica Sinica (微体古生物学报), **30**(3): 310—317 (in Chinese with English abstract).

Zhang Pei-xing (张培兴), Zhao Yuan-long (赵元龙), Yang Yu-ning (杨宇宁), Luo Xiu-chun (罗绣春), Pan Yong-jin (潘永金), 2013b. Discovery of *Byronia* Mathew, 1899 from the Tsinghsutung Formation (Qiandongian Series, Cambrian) in Balang Village of Jianhe County, Guizhou Province, China. Journal of Guizhou University (贵州大学学报), **30**(3): 46—51 (in Chinese with English abstract).

Zhao Yuan-long, Peng Jin, Yuan Jin-liang, Babcock L E, Guo Qing-jun, Yin Lei-ming, Yang Xing-liang, Tai Tong-shu, Wang Chun-jiang, Lin Jin-pai, Gaines R R, Sun Hai-jing, Yang Yu-ning, 2012. Discussion of candidate stratotypes for the GSSP defining the conterminous base of Cambrian provisional Series 2 and Stage 5. Journal of Guizhou University (贵州大学学报), **29**(Suppl. 1): 35—48.

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

TUZOIA WALCOTT, 1912 FROM THE CAMBRIAN "TSINGHSUTUNG FORMATION" OF GUIZHOU, CHINA

CHEN Wan-yi, ZHAO Yuan-long, YANG Xing-lian and WEN Rong-qin

(*College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang* 550025, *China, zhaoyuanlong@126.com*)

Key words *Tuzoia*, large bivalved arthropod, "Tsinghsutung Formation", Cambrian, Guizhou Province

Summary

Tuzoia occurs in strata of Cambrian Series 2 to 3 in North America, China, Australia and Czech Republic. This paper reports 2 species of *Tuzoia* from the "Tsinghsutung Formation" at Balang Village, Jianhe County of Guizhou: *T. jianheensis* sp. nov. and *T. bispinosa* Yuan and Zhao, 1999. *T. jianheensis* sp. nov. is characterized by midposterior spine and posteroventral spine both prominent and slender, ventral margins with denticulation ventral spines, and dense reticulate pattern on the surface of carapace, it is endemic. Specimens of *T. jianheensis* sp. nov. account for 2/3 are more abundant than those of *T. bispinosa*. *T. bispinosa* with strong triangular or subtriangular dorsal spines along dorsal margin, anterior cardinal process broadbased, reticulate pattern large and are mainly in irregular hexagon. The comparison of *Tuzoia* between "Tsinghsutung Formation" and Kaili Formation concludes that the shell shape of *Tuzoia* gradually become shorter through the stratigraphy.

SYSTEMATIC PALAEONTOLOGY

Phylum Arthropoda Siebold and Stannius, 1845
Class Crustacea Penmant, 1777
Order, Family uncertain
Genus *Tuzoia* Walcott, 1912

Type species *Tuzoia retifera* Walcott, 1912

Diagnosis Large carapace, constituted by two shells with same size, and ovoid in shape. Straight or slightly convex dorsal margin usually has spines. The dorsal margin has anterior and posterior cardinal process (acp and pcp). Posterior margin has a midposterior spine (mps) and a posteroventral spine (pvs). Lateral ridge almost parallels to the dorsal margin in the middle of carapace. Reticulate pattern is mainly in irregular pentagon and hexagon. There are a pair of large, stalked eyes facing forward under the acp.

Age and distribution In strata of Cambrian Series 2 to 3 of Canada (British Columbia, Albeta), America (Utah, Nevada, Vermont and Pennsylvania), China (Liaoning, Yunnan and Guizhou), Australia Kangaroo Island and Czech Bohemia.

***Tuzoia jianheensis* sp. nov.**

(Text-figs. 3, 5)

Etymology Specific name refers to Jianhe, from which the specimens were discovered.

Materials 19 relatively well preserved fossils in 34 specimens.

Holotype Q52-3499a/b (Q indicates "Tsinghsutung Formation" at Balang Village, Jianhe County of Guizhou), a comparatively complete carapace in lateral view.

Diagnosis Ovoid carapace with postplete outline; straight dorsal margin with spines; the dorsal margin has acp and pcp. Ventral margin has denticulation ventral spines, midanterior spine (mas), mps and pvs; reticulate pattern is dense.

Description Ovoid carapace with postplete outline (the range of L : H is 1.34 to 1.57). Straight dorsal margin with 4 strong dorsal spines

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

and several slender dorsal spines. Acp and pcp are well-developed and broad-based, slightly downwards acp stronger than pcp. Ventral margin has triangular or subtriangular denticulation ventral spines; mps and pvs slender and almost parallel to each other. 2 marginal spines exist between pvs and pcp; A marginal spine exists afterwards pvs. Lateral ridge almost parallel to the dorsal margin. Reticulate pattern is dense and mainly in irregular pentagon. The reticulate pattern (diameter range is 0.8 mm to 2 mm) has 30—100 reticulation per square centimetre.

Discussion The main differences between the new species and others species are the dense reticulate pattern and well-developed ventral spines (text-figs. 3, 5). *T. sinensis* (P'an, 1957, p. 254, pl. Ⅰ, pic. 1ax1, 2x1, 1bx2; Luo *et al.*, 2006, p. 465, pl. Ⅰ, figs. 1, 2; pl. Ⅱ, figs. 1—3; He *et al.*, 2012, p. 11, pl. Ⅰ, figs. 1, 2) has developmental ventral spines but with larger reticulate pattern (about 10 reticulations per square centimetre) and incomplete developed acp. The ventral spines of *T. jianheensis* sp. nov. differ from *T. canadensis* in gradually being smaller. Otherwise, *T. canadensis* usually developed secondary spines at dorsal margin and cardinal process. *T. canadensis* is oval-shape, and has longer pvs and larger reticulate pattern. *T. canadensis* differs from *T. jianheensis* sp. nov. in thinner acp. *T. bispinosa* (text-fig. 4) is similar to *T. jianheensis* sp. nov. in the dorsal margin and dorsal margin spines but differs from the straight acp, incomplete developed anterior ventral spines and strong mps and pvs. The distance from lateral ridge to dorsal margin of *T. bispinosa* is longer than half of the carapace height, reticulate pattern difference due to individual and (or) sexuality, mainly in hexagon, with thick reticulum. *Tuzoia* cf. *T. retifera* Walcott, 1912 at Balang Formation is similar to *T. jianheensis* sp. nov. in outline, dorsal margin spines, acp and pcp. But the distance from lateral ridge to dorsal margin of *Tuzoia* cf. *T. retifera* Walcott, 1912 is longer than half of the carapace height. The reticulate pattern of *Tuzoia* cf. *T. retifera* Walcott, 1912, spreading all over the carapace, is thick and it is usually irregular pentagon and hexagon.

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

文章编号 1000-5269(2018)04-0054-08 DOI:10.15958/j.cnki.gdxbzrb.2018.04.11

贵州剑河八郎寒武系“清虚洞组”*Redlichia*

陈争鹏,赵元龙*

(贵州大学 资源与环境工程学院,贵州 贵阳 550025)

摘 要:贵州寒武系黔东统都匀阶“清虚洞组”富含三叶虫,其中莱得利基虫主共 1 属 3 种:贵州莱得利基虫 *Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis* Zhou, 1974、著目莱得利基虫 *Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis Walcott*, 1905 及村上翼形莱得利基虫 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* Resser et Endo in Kobayashi, 1935。*Redlichia* 广泛分布于浅水台地区,具有一定的地层意义。“清虚洞组”*Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis*、*Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* 产于“清虚洞组”中上部,*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 产于“清虚洞组”下部且向下延伸至下伏地层杷榔组中上部。本文基于“清虚洞组”Redlichia 形态学的研究,讨论了 3 个种的种间差异。

关键词:寒武系;*Redlichia*;“清虚洞组”;三叶虫;贵州剑河

中图分类号:Q915.819+.1 文献标识码: A

莱得利基虫属的分类较冗杂,一些种内差异被作为种的分类依据,使得莱得利基虫属多达 100 余种[1-3],有待归并整理。*Redlichia* 分布于我国华南、华北及西班牙、澳大利亚等地区[2],其生存时限较短,于寒武系第二统末期绝灭,是华北寒武系生物地层划分的重要依据。卢衍豪[1] 及张文堂[2,4] 就莱得利基虫类的分类及地理分布进行了详细的讨论,一些学者对莱得利基虫属的部分种进行了个体发育的研究[2,5]。

黔东地区剑河八朗“清虚洞组”三叶虫化石丰富,共有 8 科 15 属 19 种[6](王铭坤,2016):耸棒头虫目 7 属 8 种(包括 1 相似种)、褶颊虫目 6 属 7 种(包括 2 相似种)、莱得利基虫目 1 属 3 种、未定目的 *Burlingia* 1 属 1 种。其中 *Redlichia* 包括:*R.* (*Redlichia*) *guizhouensis*、*R.* (*Redlichia*) *nobilis* 及 *R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii*。“清虚洞组”下伏地层杷榔组 *Redlichia* 共 4 种(包括 1 亚种)[5,7]:*R.* (*Pteroredlichia*) *chinensis*、*R.* (*Pteroredlichia*) *chinensis lui*、*R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii*、*R.* (*Pteroredlichia*) *yilongensis*,上覆地层凯里组 *Redlichia* 共 3 种(包括 1 未定种)[8-9]:*R.* (*Redlichia*) *takooensis longispina*、*R.* (*Redlichia*) *taijiangensis* 及 *R.* (*Redlichia*) sp.。

R. (*Pteroredlichia*) *murakamii* 分布于“清虚洞组”中下部的灰岩及下伏地层杷榔组中上部页岩中,*R.* (*Redlichia*) *nobilis* 及 *R.* (*Redlichia*) *guizhouensis* 产于中上部页岩中。“清虚洞组”莱得利基虫为该组的生物带的划分及地层对比提供了材料。

1 地质背景

研究区位于贵州剑河革东镇八郎、屯州村一带,出露的寒武系由新至老为娄山关组、甲劳组、凯里组、“清虚洞组”、杷榔组、变马冲组、九门冲组、牛蹄塘组、留茶坡组顶部[10](图 1)。松山剖面位于革东镇屯州村西北面,由赵元龙等 2014 年测制,厚 272 m,自下而上为:灰色中厚层至厚层灰岩;灰色中厚层泥岩、泥质灰岩及灰黄色页岩;中厚层白云岩,与黔北地区典型的清虚洞组(岩性主要为鲕状灰岩夹豹皮状灰岩、白云质灰岩及白云岩和泥质白云岩)有所不同,故以“清虚洞组”来表示[2,11-22]。属于较深水的陆棚—陆棚边缘沉积为主的环境[22-23]。

收稿日期:2018-07-12

基金项目:国家重点基础项目基金(973 项目)(2015FY310100-5);国家重点自然科学基金(41330101);中国地质调查局地质调查项目(DD20160120-04);国家自然科学基金(41772021,41662001,41702022)

作者简介:陈争鹏(1993-),男,在读硕士,研究方向:古生物与地层学,Email:chenzhengpeng2016@163.com.

* 通讯作者:赵元龙,Email:zhaoyuanlong@126.com.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

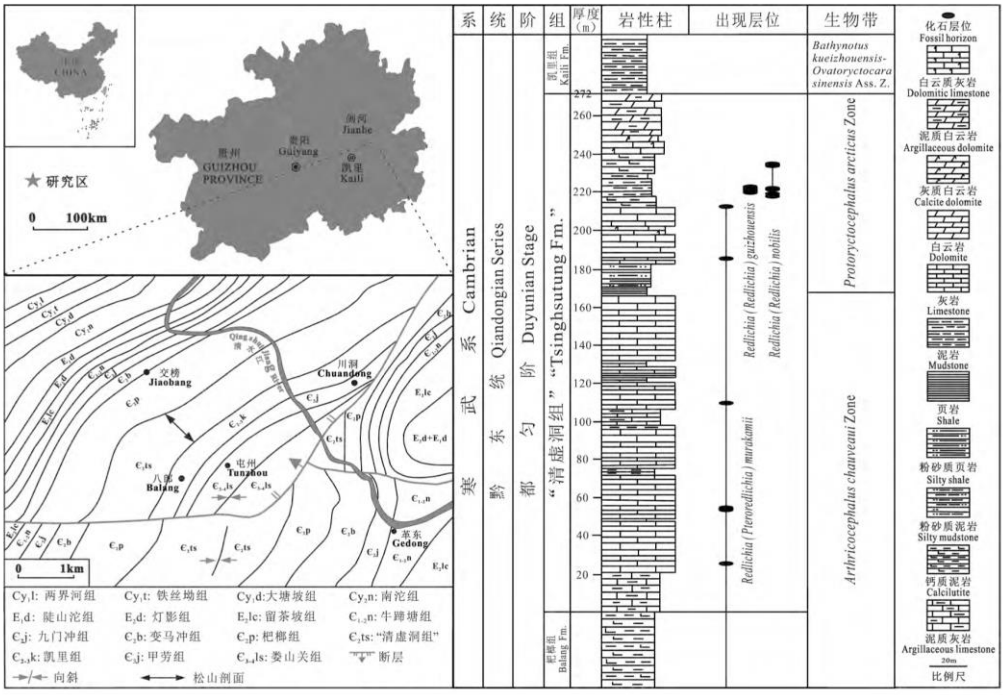


图 1　松山剖面地理位置及“清虚洞组”*Redlichia* 地层分布图（据 Zhao *et al.*，2012）

尹恭正[24] 在清虚洞组上部建立 *Redlichia*（*Redlichia*）*guizhouensis*—*Redlichia*（*Redlichia*）*nobilis* 富集带，下部 *Redlichia*（*Pteroredlichia*）*murakamii-Hoffetella-Eoptyhoparia* 组合带。根据黔东地区“清虚洞组”中发现的大量掘头虫类三叶虫，袁金良等在八郎一带“清虚洞组”内建立了两个化石带：上部为 *Protoryctocephalus wuxunensis* 带，下部为 *Arthricocephalites taijiangensis* 带[25]。之后又将下部重新修订为 *Arthricocephalus jishouensis-Changaspis plana* 带[26-27]。在其后的研究中未在“清虚洞组”上部发现 *Protoryctocephalus wuxunensis*，而是发现了 *Protoryctocephalus arcticus*，因而在其上部建立 *Protoryctocephalus arcticus* 带[16-17]，Zhao *et al.* 将“清虚洞组”下部及杷榔组中上部划归为 *Arthricocephalus chauveaui* 带[28]。

本文所报道的化石材料产自松山剖面“清虚洞组”中上部页岩、粉砂质泥岩及下部灰岩中（图 1）。

2　系统古生物

三叶虫纲　**Class Trilobita Walch，1771**

莱得利基虫目　**Order Redlichiida Richter，1932**

莱得利基虫亚目　**Suborder Redlichiina，Harrington，1959**

莱得利基虫超科　**Superfamily Redlichiacea Poulsen，1927**

莱得利基虫科　**Family Redlichiidae Poulsen，1927**

莱得利基虫亚科　**Subfamily Redlichiinae Poulsen，1927**

莱得利基虫属　**Genus *Redlichia* Cossmann，1902**

模式种　*Hoferia noetling* Redlichia，1899

莱得利基虫亚属　**Subgenus *Redlichia*（*Redlichia*）Cossmann，1902**

贵州莱得利基虫　***Redlichia*（*Redlichia*）*guizhouensis* Zhou，1974**

（图 2，(A)-(C)）

1974　*Redlichia guizhouensis* Zhou，卢衍豪等，85 页，图版 31，图 10。

1978　*Redlichia guizhouensis* Zhou，尹恭正、李善姬，400 页，图版 147，图 1。

1983　*Redlichia guizhouensis* Zhou，仇洪安等，46-47 页，图版 15，图 8。

材料　18 块较为完整的背甲标本及 120 块头盖标本。

描述　背壳长椭圆形。头鞍呈锥状，前端圆滑。具 3 对头鞍沟：S1 为横穿头鞍沟，作圆弧形向

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

后弯曲,两端深,中部由一浅沟相连;S2 向后斜伸,两端深,中部浅;S3 模糊不清,形状与 S2 相似。颈沟形状与 S1 相似,两端较深,中部浅。颈环宽度均匀,向后拱曲。外边缘宽,具横向近似同心圆的不连续的细而短的线脊装饰。内边缘较窄,略凹下。眼前翼近似三角形。内眼颊宽度约为两眼叶之间头鞍宽度的 1/3。眼叶长,呈新月形,前端略宽于后端,后端伸达颈环中部相对水平位置上,并靠近颈环。眼脊短。后颊类面线,面线前支向前侧边缘斜伸,与头鞍中轴之间的夹角约为 75°;面线后支短,向后侧方斜伸,中部略向前凸,切于后侧边缘,间夹角约为 150°。后侧翼短,极窄。活动颊长而较窄;颊刺较靠前,与活动颊后侧边缘之间的夹角为锐角,伸长至胸节第 9 个胸节相对位置。胸部 14 节。中轴较肋叶宽,肋节平伸,第 11 个轴节中部具一轴刺。肋沟深而宽,向后斜伸。肋刺长,呈爪状的角锥形向后侧方延伸。尾部小。

比较 本种是根据产自贵州金沙岩孔清虚洞组顶部的一块头盖标本建立,并不能清晰地反映该种的特征,剑河"清虚洞组"的保存有完整的背壳标本,对该种形态特征的完善提供了材料,本种与 *R.*(*Redlichia*) *nobilis* 相似,主要区别是两者的头鞍、鞍沟形状及眼叶形状,后者的头鞍呈柱状,向前收缩交换,眼叶呈半圆形。两者具体的对比详见表 1。

产地层位 贵州剑河八郎,寒武系第 2 统第 4 阶(都匀阶)"清虚洞组"中上部;贵州金沙岩孔,清虚洞组顶部;江苏南京幕府山,炮台山组;湖北京山县惠亭山及殷家冲,石龙洞组。

著目莱得利基虫 *Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* Walcott, 1905

(图 2,(D)-(F))

1905 *Redlichia nobilis*, Walcott, p. 26。

1913 *Redlichia nobilis*, Walcott, p. 105, pl. 7, figs. 12, 12a-e。

1953 *Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* Walcott,张文堂,126 页,图版 III,图 3;图版 IV,图 1-4。

1963 *Redlichia nobilis*,项礼文等,贵州及湖南西部寒武纪三叶虫动物群,24 页,图版 3,图 1。

1965 *Redlichia nobilis*,卢衍豪等,63-64 页,图版 8,图 5-8。

1977 *Redlichia nobilis*,周天梅等,120-121 页,图版 38,图 17。

1978 *Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* Walcott,尹恭正、李善姬,400 页,图版 147,图 7。

1980 *Redlichia nobilis*,仇洪安,47 页,图版 1,图 6-7。

1980 *Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* Walcott,张文堂等,122 页,图版 17,图 4-7。

1980 *Redlichia nobilis* Walcott,南润善,486 页,图版 200,图 18。

1983 *Redlichia nobilis* Walcott,仇洪安等,47 页,图版 15,图 10-11。

1985 *Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* Walcott,张进林、王绍鑫,335 页,图版 104,图 1-4。

1991 *Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* Walcott,郭鸿俊,咎淑芹,5 页,图版 I,图 2-4。

1994 *Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* Walcott,罗惠麟等,117 页,图版 9,图 1-6。

1996 *Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* Walcott,郭鸿俊等,53 页,图版 11,图 4-13。

材料 30 块头盖标本。

描述 头鞍长柱状,向前略收缩,前端宽圆。具 3 对头鞍沟:S1-S2 为横穿头鞍沟,向后弯曲,两端深,中部浅;S3 模糊不清。颈环向后拱曲,中部略宽于两端。颈沟与较 S1 更为向后突出。眼叶长,宽度均匀,向外侧弯曲,中部凸度较大,后端位于颈环中部的相对位置并靠近头鞍。眼脊短,与眼叶相连呈连续状。面线前支前段近似水平,略向后弯曲,与头鞍中轴的夹角约为 70°;后端向前侧方斜伸,后向内侧弯曲,且于侧外边缘。外边缘宽,平凸,具横向同心状的不连续的细而短的线脊装饰。内边缘较外边缘窄,平缓。眼前翼微凸,呈三角形。内眼颊呈半圆形,宽度约为两眼叶之间头鞍宽度的 1/3。部分标本头盖表面布满细小的疣点。

比较 该种与 *R.* (*Redlichia*) *noetlingi* 较为相似,主要区别是面线前支前者呈波浪状,且于头鞍中轴的夹角较大。与云南曲靖双龙潭龙王庙组的 *R.* (*Redlichia*) *nobilis* 相比,后者的内边缘更窄。

产地层位 贵州剑河八郎,寒武系第 2 统第 4 阶(都匀阶)"清虚洞组"中上部;黔北,清虚洞组上部;云南宜良,龙王庙组;辽宁复县,馒头组;云南曲靖,龙王庙组顶部。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

翼形莱得利基虫亚属 **Subgenus *Redlichia* (*Pteroredlichia*) Chang, 1966**

村上翼形莱得利基虫 ***Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* Resser et Endo in Kobayashi, 1935**

(图 2,(G)-(I))

1935　Redlichia *murakamii* Resser et Endo in Kobayashi, p.120, pl. 21, fig. 9。

1937　*Redlichia manchuriensis* Resser et Endo in Kobayashi, p. 12, pl. 21, figs. 6-7。

1951　*Redlichia chinensis*, Kobayashi et Kato, p. 99, pl. 1, figs. 1-16; pl. 2, figs 1-3; pl. 3, figs. 1-9。

1965　*Redlichia murakamii* Resser et Endo, 卢衍豪等, 63 页, 图版 8, 图 4。

1966　*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* Resser et Endo, 张文堂等, 135-141 页, 插图 2, 图 11。

1974　*Redlichia murakamii* Resser et Endo, 卢衍豪等, 86 页, 图版 32, 图 1。

1977　*Redlichia murakamii* Resser et Endo, 周天梅等, 120 页, 图版 39, 图 2。

1978　*Redlichia murakamii* Resser et Endo, 尹恭正、李善姬, 402 页, 图版 146, 图 3。

1978　*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* Resser et Endo, 周天梅、林天瑞, 147 页, 图版 22, 图 5-9。

1980　*Redlichia murakamii* Resser et Endo, 仇洪安, 46 页, 图版 4, 图 1。

1980　*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* Resser et Endo, 张文堂等, 133 页, 图版 26, 图 1-10, 插图 61-62。

1980　*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* Resser et Endo, 张进林, 106 页, 图版 I, 图 1-4。

1980　*Redlichia murakamii* Resser et Endo, 南润善, 485 页, 图版 200, 图 16-17。

1982　*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* Resser et Endo, 周志强等, 223 页, 图版 58, 图 2。

1983　*Redlichia murakamii* Resser et Endo, 仇洪安等, 47 页, 图版 16, 图 4。

1984　*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* Resser et Endo, 孙振华, 340 页, 图版 127, 图 7-11。

1985　*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* Resser et Endo, 张进林, 王绍鑫, 336 页, 图版 104, 图 5、6。

1987　*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* Resser et Endo, Zhang and Jell, p. 52-53; pl. 8, figs. 1-2, 4-8, 10; figs. 1-4; pl. 10, figs. 1-2。

1991　*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* Resser et Endo, 郭鸿俊, 昝淑芹, 5-6 页, 图版 I, 图 6-9。

1994　*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* Resser et Endo, 罗惠麟等, 119 页, 图版 10, 图 12-14; 图版 11, 图 1-13。

1996　*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* Resser et Endo, 郭鸿俊等, 54-55 页, 图版 12, 图 7-11。

2009　*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* Resser et Endo, 彭进, 88-89 页, 图版 23, 图 7-13; 图版 30, 图 1。

2017　*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* Resser et Endo, 庞崇进等, 21 页, 插图 1。

材料　50 块头盖标本。

描述　头鞍长锥状, 向前收缩, 前端圆润, 表面见不规则的不连续的线状纹饰。具 3 对头鞍沟: S1-S2 为横穿头鞍沟, 向后斜伸, 两端深, 中部由一浅沟相连; S3 清晰, 与 S1、S2 形状相似, 但中部不相连。颈环均匀, 向后拱曲。颈沟与 S1 形状相似。外边缘较宽, 微凸, 表面具有具横向近似同心圆的不连续的细而短的线脊装饰。内边缘窄, 较外边缘向下凹。眼叶窄, 凸起, 后端与接近靠近头鞍, 并位于颈沟后侧方。面线为 *chinensis* 类型, 前支平伸, 中段微向后凸, 与头鞍中轴的夹角 α 角约为 90°。眼前翼呈翼状。内眼颊窄, 宽度约为两眼叶之间头鞍宽度的 1/4。

比较　几乎所有的标本都为灰岩保存, 且不完整, 只保存了头盖, 与下伏地层杷榔组及同期地层所产 *R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 相似, 并无太大区别。

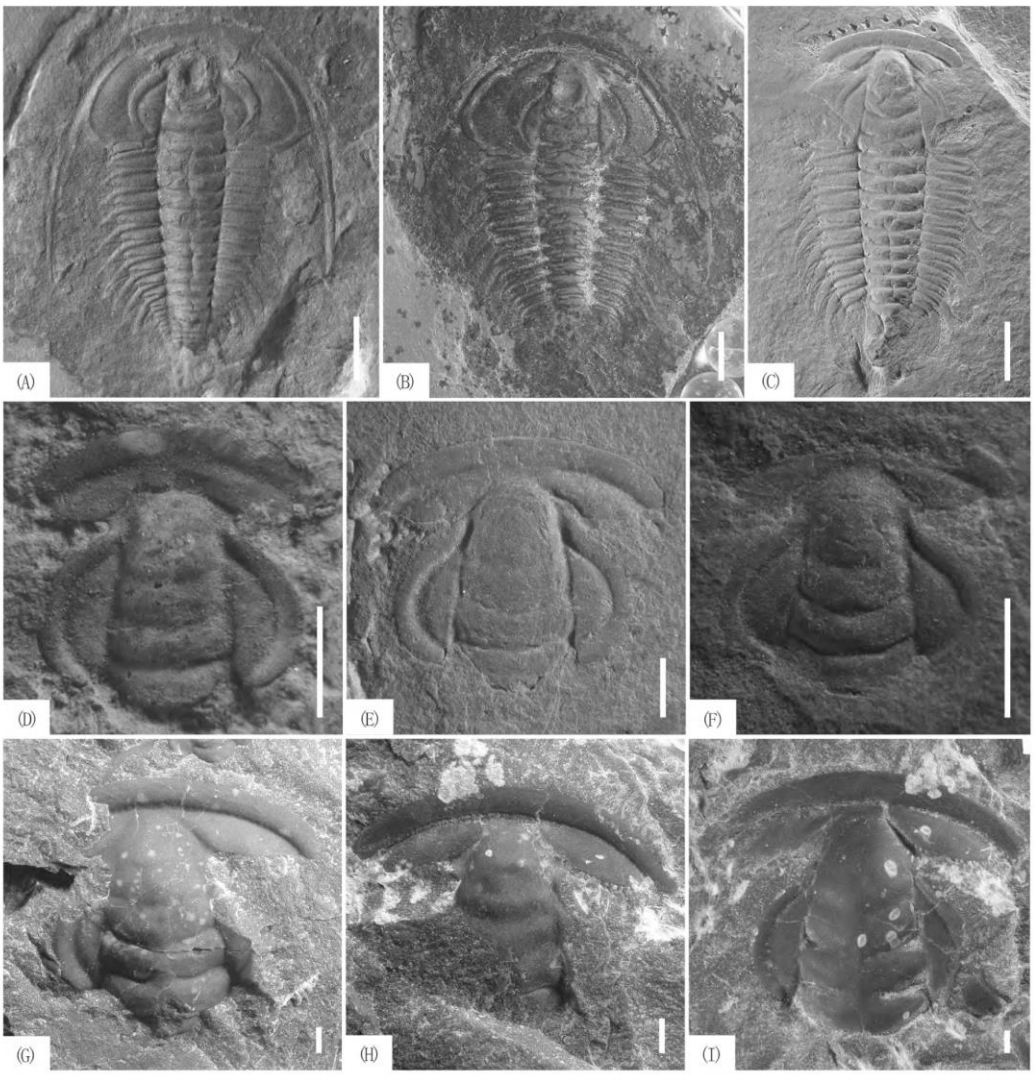
产地层位　贵州剑河八郎, 寒武系第 2 统第 4 阶(都匀阶) “清虚洞组”中上部, 杷榔组中上部; 贵州湄潭金盆水, 清虚洞组; 云南宜良, 龙王庙组; 湖北宜昌石牌, 石牌组。辽宁复县, 馒头组。

3　讨论

关于莱得利基虫的群体演化, 卢衍豪[1]指出至少有 4 点可以作为参考: (1) 面线位置的变化; (2) 眼叶长短及其后端与头鞍的距离的远近; (3) 肋刺的变化; (4) 尾板的发育。张文堂[4]提出莱得利基虫科的分类依据并加以讨论: (1) 面线的类型及眼

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

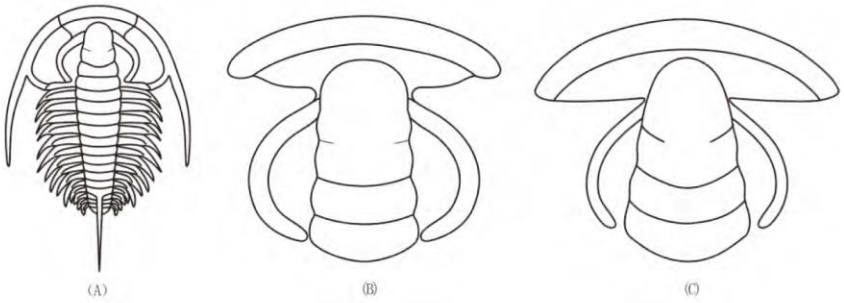
前颜线的位置;(2) 背沟、头鞍及头鞍沟的形状;(3) 颈沟及颈环的形状;(4) 眼叶长短及其后端距头鞍的距离;(5) 头盖上边缘沟内凹坑与刺塞的有无;(6) 眼脊的长短及其伸出的形状;(7) 头鞍前内边缘的的宽度及形态或中脊的有无;(8) 后侧翼的长短及宽窄;(9) 活动颊的形状及颊刺的位置;(10) 轴刺在胸节上的位置;(11) 尾部的形态及其大小;(12) 腹边缘板的长度;(13) 口版的形态。在其后的研究中张文堂[2]对这些分类依据作了补充。基于以上分类特征,对"清虚洞组"3 个种的莱得利基虫(图 3)进行对比,三者最大区别在于头鞍形状及面线前支(详见表 1)。



(A)-(C):村上翼形莱得利基虫 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii*. (A),背壳,标本号:Q52-3082;(B),背壳,标本号:Q52-2503;(C),背壳,标本号:Q51-1405。(D)-(F):著目莱得利基虫 *Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* Walcott, 1905. (D),头盖,标本号:Q51-235;(E),头盖,标本号:Q51-2985;(F),头盖,标本号:Q53-96。(G)-(I):贵州莱得利基虫 *Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis* Zhou, 1974. (G),头盖,标本号:Q219-376;(H),头盖,标本号:Q219-482;(I),头盖,标本号:Q218-170。比例尺除图(C)为 5 mm 外,其余皆为 2 mm。

图 2 松山剖面"清虚洞组"*Redlichia*

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



（A）*R.*（*Redlichia*）*guizhouensis* 复原图（据图 2,（A）-（C）进行复原）；（B）*R.*（*Redlichia*）*nobilis* 复原图（据图 2,（D）-（F）进行复原）；（C）*R.*（*Pteroredlichia*）*murakamii* 复原图（据图 2,（G）-（I）进行复原）。

图 3　*R.*（*Redlichia*）*guizhouensis*，*R.*（*Redlichia*）*nobilis* 和 *R.*（*Pteroredlichia*）*murakamii* 复原图

表 1　*R.*（*Redlichia*）*guizhouensis*，*R.*（*Redlichia*）*nobilis* 和 *R.*（*Pteroredlichia*）*murakamii* 对比表

特征 \ 名称				*R.*（*Redlichia*）*guizhouensis*	*R.*（*Redlichia*）*nobilis*	*R.*（*Pteroredlichia*）*murakamii*
头鞍	形状			锥状	长柱状，向前略收缩	长锥状
	头鞍沟	数量		3	3	3
		形状	S1	横穿头鞍沟，圆弧状向后弯曲	横穿头鞍沟，圆弧状向后弯曲	横穿头鞍沟，两端向中间斜伸
			S2	横穿头鞍沟，两端向中间斜伸	与S1相似	与S1相似
			S3	模糊不清	模糊不清	清晰，与S1相似
颈环				宽度均匀，向后拱曲	向后拱曲，两端宽度略小于中部	宽度均匀，向后拱曲
颈沟				与S1相似	较S1更为后凸	与S1相似
眼叶	形状			新月形	近半圆形	新月形
	后端位置			位置与颈环相当，靠近头鞍	位置与颈环相当，靠近头鞍	位置与颈环相当，靠近头鞍
眼脊				短	短	短
眼前翼				三角形，凸起	三角形，微起	翼形，凸起
后侧翼				横短纵窄	——	——
面线	前支			向前侧方延伸	前端水平，后端向前侧方延伸	水平延伸，中部略向后凸
	形状			弧形	波浪形	水平
	α 角			70°～75°	70°	90°
β 角				150°	——	——
颊刺位置				靠前，与活动颊后侧边缘之间的夹角约为80° 左右	——	——
胸节数				14	——	——
尾部				小	——	——

致谢　贵州大学杨宇宁帮助修改英文摘要，贵州大学古生物研究所研究生及剑河八郎村村民刘锋、刘泽福等参与化石的采集工作，在此一并致以衷心的感谢。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参考文献:

[1] 卢衍豪. 莱得利基虫及其数新种[J]. 地质论评,1951,15(6):157-170.

[2] 张文堂,卢衍豪,朱兆玲,等. 西南地区寒武纪三叶虫动物群[M].北京:科学出版社,1980,1-479.

[3] 袁金良,赵元龙,李越,等. 黔东南早、中寒武世凯里租三叶虫动物群[M]. 上海:上海科学技术出版社,2002,1-422.

[4] 张文堂. Redlichiacea 超科的分类及新科、新属的记述[J]. 古生物学报,1966,14(2):135-184.

[5] 梁博焱,彭进,文荣琴,等. 寒武系杷榔组 *Redlichia*(*Pteroredlichia*) *chinensis*(Walcott,1905)个体发育研究[J]. 古生物学报,2017,56(1):25-36.

[6] 王铭坤. 贵州剑河八郎寒武系"清虚洞组"三叶虫的研究[D]. 贵阳:贵州大学,2016:1-84.

[7] 彭进. 贵州东部寒武纪黔东世杷榔动物群[D]. 南京:南京大学,2009:1-137.

[8] 郭庆军,赵元龙.贵州黔东南中、下寒武统凯里组下部 *Redlichia* 的发现及意义[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版),1998,27(1):51-55.

[9] 郭庆军,赵元龙,袁金良. 贵州凯里地区下、中寒武统凯里组下部 *Redlichia* 的再研究[J]. 古生物学报,1999(Supplement):157-164.

[10] Zhao Yuan-long, Peng Jin, Yuan Jin-liang, et al. Discussion of candidate stratotypes for the GSSP defining the conterminous base of Cambrian provisional Series 2 and Stage 5[J]. Journal of Guizhou University,2012,29(Suppl. 1):35-48.

[11] 傅晓平,伍孟银,赵元龙,等. 贵州剑河八郎寒武系都匀阶"清虚洞组"宏观藻类化石的发现[J]. 古生物学报,2012,51(1):56-63.

[12] 杨宇宁,赵元龙,彭进,等. 贵州剑河八郎寒武系"清虚洞组"单板类化石 *Oelandiella*[J]. 古生物学报,2012,51(3):308-319.

[13] 罗绣春,赵元龙,王平丽,等. 贵州剑河八郎"清虚洞组"叉尾虫科 Dorypygidae 三叶虫[J]. 贵州大学学报(自然科学版),2013,30(3):39-45.

[14] 罗绣春,赵元龙,彭进,等. 贵州剑河八郎"清虚组" *Protorycto-cephalus* Chow(Zhou) in Lu et al.,1974b 的初步研究[J]. 古生物学报,2014,53(3):327-334.

[15] 王铭坤,赵元龙,张培兴,等. 贵州剑河八郎寒武系"清虚洞组"八郎村虫 *Balangcunaspis*(Yuan et Zhao)的研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版),2014,31(5):36-39.

[16] 王铭坤,赵元龙,罗绣春,等. 贵州剑河八郎"清虚洞组" *Olenoides* Meek,1877 的研究[J]. 高校地质学报,2016,22(3):486-493.

[17] 王铭坤,赵元龙. 2016. 贵州剑河八郎寒武系"清虚洞组"中上部褶颊虫类三叶虫[J]. 古生物学报,55(2):147-159.

[18] 刘玉娟,赵元龙,刘玉莹,等. 贵州剑河八郎"清虚洞组" *Kutorgina* Billings,1861 的初步研究[J]. 古生物学报,2015,54(3):342-350.

[19] 张源,赵元龙,蒋宗凯,等. 贵州剑河八郎寒武系"清虚洞组"帐篷螺 *Scenella*,的发现[J].贵州大学学报(自然科学版),2016,33(4):34-37.

[20] 王圆,杨兴莲,赵元龙,等. 贵州剑河八郎寒武系"清虚洞组"海绵化石初步研究[J]. 古生物学报,2017,56(2):176-188.

[21] 陈婉怡,赵元龙,杨兴莲,等. 贵州剑河八郎寒武系"清虚洞组" *Tuzoia*[J]. 古生物学报,2017,56(3):301-311.

[22] 张源,赵元龙. 贵州剑河八郎地区寒武系"清虚洞组"沉积环境初探—以剑河八郎地区松山剖面为例[J]. 古生物学报,2018,57(1):11-20.

[23] 杨兴莲,赵元龙,彭进,等. 贵州剑河黔东统都匀阶清虚洞组掘头虫类三叶虫的发现[J].高校地质学报,2010,16(3):109-316.

[24] 尹恭正. 寒武系//中华人民共和国地质矿产部地质专报一区域地质 第7号,贵州省区域地质志[M]. 贵州省质地矿产局. 北京:地质出版社,1987,49-96.

[25] Yuan Jinliang, Zhu Xuejian, Lin Jinpai, et al. Tentative correlation of Cambrian Series 2 between South China and other continents[J]. Bulletin of Geosciences,2011,80(3):397-404.

[26] Yuan Jinliang, Ng TimWai. Tentative correlation of the Duyunian (Cambrian Series 2, Stage 4) and the Taijiangian (Cambrian Series 3, Stage 5) between South China and the Mediterranean region[J]. GFF,2014,136(1):314-319.

[27] Yuan Jinliang, Jorge Esteve. The earliest species of *Burlingia* Walcott, 1908 (Trilobita) from South China: Biostratigraphical and palaeogeographical significance[J]. Geological Magazine, 2015, 152(2):358-366.

[28] Zhao Yuanlong, Yuan Jinliang, Jorge Esteve, et al. The trilobite biostratigraphy of the Balang and "Tsinghsutung" Formation, Cambrian Series 2, Stage 5 from South China and its correlation significance (Trilobite Zonation from the Cambrian Series 2 of South China). In Yang Qun, J. Reitner, Wang Yuan-dong, M. Reich (eds.), Critical intervals in Earth history: Palaeobiological innovations. Abstract Volume of the 2nd Joint Conference of the Palaeontological Society of China and the Paläontologische Gesellschaft[C]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2017,496-497.

(责任编辑:曾 晶)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Trilobite *Redlichia* from the Cambrian “Tsinghsutung Formation” (Series 2, Stage 4) of Eastern Guizhou, South China

CHEN Zhengpeng, ZHAO Yuanlong*

(College of Resources and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Redlichiid trilobite are very common in shallow water facies during Early Cambrian and of important stratigraphical significance. Here, three species of *Redlichia*, *Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis* Zhou, 1974, *Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* Walcott, 1905 and *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* Resser et Endo in Kobayashi, 1935, were described from the Cambrian “Tsinghsutung Formation” (Qiandong Series, Duyun Stage) of eastern Guizhou, Morphological difference between these species were discussed in this paper. Additionally, based on their occurrences, *R.* (*Redlichia*) *guizhouensi* and *R.* (*Redlichia*) *nobilis* occur in upper part of the “Tsinghsutung Formation”, whereas *R.* (*Petroredlichia*) *murakamii* ranges from the lower part of “the Tsinghsutung Formation” to the middle-upper part of the underlying Balang Formation.

Key words: Cambrian; *Redlichia*; “Tsinghsutung Formation”; trilobite; Jianhe County

---

(上接第 46 页)

The study of multi-genes in transgenic tobacco plants based on Gene-deletor system

ZENG Xiaofang[1], ZENG Zhaosong[1], GUO Zhen[1], ZHAO Degang[1,2*]

(1. Key Laboratory of Plant Resources Conservation and Germplasm Innovation in Mountainous Region (Ministry of Education), Guizhou Key Lab of Agro-Bioengineering, Institute of Agro-Bioengineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guiyang station for DUS testing center of New Plant Varieties of MOA.P.R. China in Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China)

Abstract: In this study, the multi-gene expression vector pGM626-D18-OsGA2ox1 plasmid, which contained the rice pollen-specific expression promoter *OSIPA* of the Gene-deletor system, fusion selection marker gene *BAR* :: *GUS* under the control of maize Ubiquitin promotor, the*OsGA2ox*1 under the control of rice*OsGA3ox*2 (*D*18) promoter, and the *Cry*1*Ab* gene under the control of rice *Actin* promoter was transformed into the Xanthi tobacco using *Agrobacterium tumefaction* mediated method. Forty-three individual T_0 transgenic tobacco plants were identified by GUS histochemical staining and PCR detection. The results showed that the expression of*OsGA2ox*1 gene in tobacco reduced the height of transgenic plants, but did not affect their reproductive growth. Larvae of *Spodoptera litura* (F.) fed on transgenic plants showed reduced food ingestion and reduced growth and weight. The concentration of 50 mg/L basta was used for the herbicide sensitivity treatment. The expression of *BAR* gene enhanced the herbicide resistance in transgenic tobacco. The pollens from 12 individual T_0 transgenic strains were used for the determination of excision efficiency test. The results showed that part of the tobacco strains with 100% excision efficiency, and the excision efficiencies in other lines were between 42.84 and 99.97%.

Key words: Gene-deletor; insect-resistant; pollen; tobacco

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

贵州剑河八郎寒武系“清虚洞组”的 *Redlichia* 及其地层意义①

陈争鹏[1)] 赵元龙[1)] 罗绣春[1)2)] 杨光福[1)]

1) 贵州大学资源与环境工程学院 贵州贵阳 550025;
2) 贵州省博物馆 贵州贵阳 550081

摘 要: 贵州境内寒武系黔东统都匀阶清虚洞组富含具有重要地层意义的三叶虫莱得利基虫，前人据此将该组由下而上划分为 2 个三叶虫带：*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii-Hoffetella-Eoptychoparia* 组合带和 *Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis-Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* 富集带。对黔东剑河八郎地区松山剖面非典型的“清虚洞组”中大量的莱得利基虫化石进行了初步研究，根据分类和属种延限，识别出 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 带和其上的 *Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis-Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* 组合带。*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 带的底界可下延至下伏地层杷榔组中上部，但带内未发现常见于黔北地区典型清虚洞组的 *Hoffetella*。剑河八朗松山剖面“清虚洞组”上述两个莱得利基虫化石带可以分别与此前建立的两个掘头虫三叶虫带 *Arthricocephalus chauveaui* 带和 *Protoryctocephalus arcticus* 带对应，进而为斜坡相区的“清虚洞组”与浅水台地相区同期地层的生物地层对比提供化石依据。

关 键 词: 生物地层, *Redlichia*, “清虚洞组”, 寒武系, 剑河, 贵州

中图分类号: P534.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4959(2018)03-0352-08

莱得利基虫属 *Redlichia* 目前包含一百余种（卢衍豪，1951；张文堂等，1980；袁金良，2002），为莱得利基虫目的重要组成部分，其地理分布较广、生存时限较短，于寒武纪第 4 世末期绝灭。张文堂等（1980）对莱得利基虫属及其亚属的形态特征、地理分布做了详细的讨论，并对 *R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 和 *R.* (*Redlichia*) *takooensis* 进行了个体发育的研究，梁博焱等（2017）研究了 *R.* (*Pteroredlichia*) *chinensis* 的个体发育。贵州寒武系明心寺组或杷榔组、清虚洞组产有大量莱得利基虫，凯里组下部也产有少量的莱得利基虫，这一时期的莱得利基虫属于莱得利基虫演化的末期（郭庆军等，1999）。

笔者对剑河松山剖面寒武系“清虚洞组”的化石标本重新整理，鉴定及研究了 *R.* (*Redlichia*) *guizhouensis*, *R.* (*Redlichia*) *nobilis* 及 *R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii*；其中 *R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 分布于“清虚洞组”中下部的灰岩及下伏地层杷榔组中上部页岩中，*R.* (*Redlichia*) *nobilis* 及 *R.* (*Redlichia*) *guizhouensis* 产于中上部页岩及泥岩中。基于“清虚洞组”莱得利基虫的研究，在该组建立两个莱得利基虫生物带，自下而上为：*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 带，*Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis-Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* 组合带，并与国内其他地区的地层进行对比。“清虚洞组”莱得利基虫生物带的建立与分布于该组的掘头虫类三叶虫一起为该组的生物带的划分及地层对比提供了依据，为全球寒武系第二统第 4 阶的建立提供了材料。

1 研究区地质背景

研究区位于贵州省黔东南州剑河县革东镇内，处于寒武纪扬子区和江南区之间的过渡区（尹恭正，1987），出露的寒武系由老至新为留茶坡组顶部、牛蹄塘组、九门冲组、变马冲组、杷榔组、“清虚洞组”、凯里组、甲劳组、娄山关

①国家重点基础项目基金（973 项目）（2015FY310100-5），国家重点自然科学基金（No.41330101）；中国地质调查局地质调查项目（DD20160120-04），国家自然科学基金（No.41772021，41662001，41702022），现代古生物学和地层学国家重点实验室开放课题基金（173130）联合资助。

文稿接受日期: 2018-06-16; 修改稿收到日期: 2018-07-12。

第一作者简介: 硕士研究生，主要从事古生物与地层学研究；e-mail：chenzhengpeng2016@163.com

通讯作者: 赵元龙，教授，主要从事古生物与地层学研究；e-mail：zhaoyuanlong@126.com

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

组（Zhao Yuan-long *et al*.，2012）（图 1）。松山剖面位于革东镇屯州村西北面，与全球寒武系第 5 阶候选层型剖面——乌溜—曾家崖剖面相邻，属寒武纪黔东世都匀期地层，厚 272 m，由赵元龙等 2014 年测制，自上而下为：中厚层白云岩；灰色中厚层泥岩、泥质灰岩及灰黄色页岩；灰色中厚层至厚层灰岩，属于较深水的陆棚沉积为主的环境（杨兴莲等，2010）。松山剖面“清虚洞组”与黔北地区岩性主要为鲕状灰岩夹豹皮状灰岩、白云质灰岩及白云岩和泥质白云岩的典型的清虚洞组有所不同，故以“清虚洞组”来表示（张文堂等，1980；傅晓平等，2012；杨宇宁等，2012；罗绣春等，2013、2014；王铭坤等，2014、2016；王铭坤、赵元龙，2016；刘玉娟，2015；张源等，2016；王圆等，2017；陈婉怡等，2017）。

尹赞勋等（1945）命名“清虚洞石灰岩”，后改称清虚洞组（卢衍豪，1964），周志毅等（1980）在沿用清虚洞组时，在其上部建立了 *Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis* 带，李善姬(1981)建立 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii-Hoffetella* 带。尹恭正（1987）在清虚洞组上部建立 *Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis-Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* 富集带，下部修正为 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii-Hoffetella-Eoptychoparia* 组合带。根据黔东地区“清虚洞组”中发现的大量掘头虫类三叶虫，有学者在“清虚洞组”上部建立 *Protoryctocephalus arcticus* 带（王铭坤等，2016；王铭坤、赵元龙，2016），或将该组下部及杷榔组中上部划为 *Arthricocephalus chauveaui* 带（Zhao Yuan-long *et al*.，2017）。笔者根据莱得利基虫，在“清虚洞组”内建立 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 带及 *Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis-Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* 组合带，这两个带为斜坡相的“清虚洞组”与浅水台地同期的地层对比提供了依据。

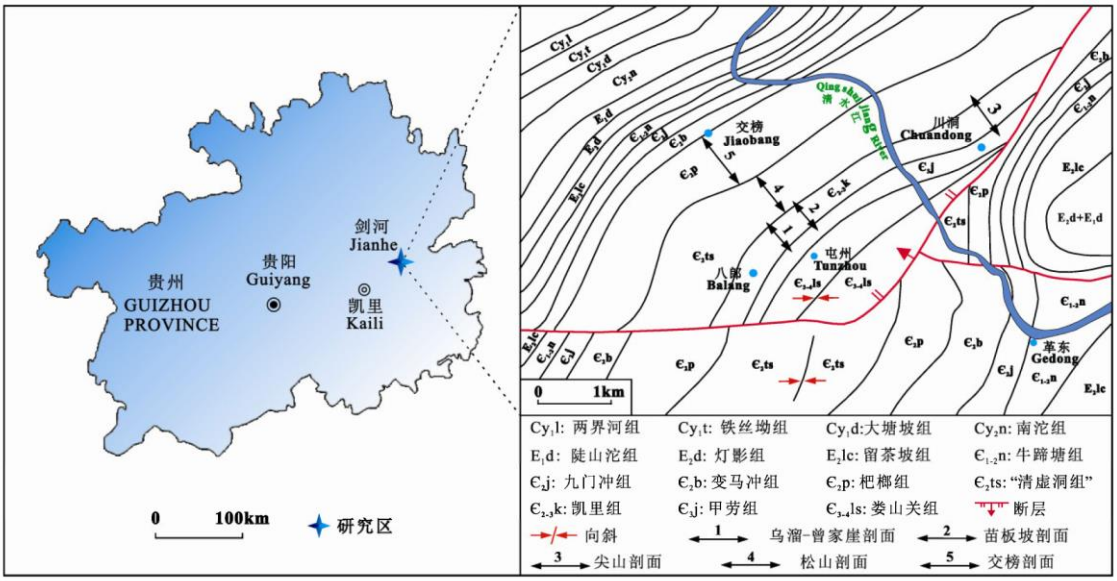


图 1　剑河一带地质图及松山剖面地理位置（据 Zhao Yuan-long *et al*.，2012 修改）

Fig. 1　Geological sketch map of Jianhe area and geographic location of Songshan section（modified from Zhao Yuan-long *et al*.，2012）

2　“清虚洞组”莱得利基虫的演化

莱得利基虫的演化可以分为 3 个阶段（卢衍豪，1951；张文堂，1966；张文堂等，1980）：早期阶段，面线为 *tingi* 型；眼前颜线靠近头鞍轴线且斜伸；眼叶短，后端与头鞍距离较远。中期阶段，面线为 *intermedia* 型；颜线偏离头鞍轴线，与头鞍的距离及斜伸程度介于早期及末期两者之间；眼叶较长，后端距头鞍距离较近。末期阶段，面线为 *chinensis* 型；眼前颜线远离头鞍轴线，近似横向平伸；眼叶长，后端几乎靠近头鞍。

“清虚洞组”莱得利基虫的比较：*R.* (*Redlichia*) *guizhouensis* 与 *R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 的头鞍长，呈锥状；*R.* (*Redlichia*) *nobilis* 的头鞍呈长柱状，向前收缩的力度较前两者小。头鞍沟 3 者皆是 3 对，

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

R. (*Redlichia*) *nobilis* 与 *R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 的头鞍沟形状皆相似，*R.* (*Redlichia*) *guizhouensis* 的 S2 与 S1 并不相似。眼叶的形状 *R.* (*Redlichia*) *guizhouensis* 与 *R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 相似，呈新月形；*R.* (*Redlichia*) *nobilis* 呈半圆形；三者眼叶后端皆靠近头鞍。*R.* (*Redlichia*) *guizhouensis* 与 *R.* (*Redlichia*) *nobilis* 的眼前翼呈三角形，*R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 眼前翼呈翼状。三者最大的区别在于面线，*R.* (*Redlichia*) *guizhouensis* 面线为弧形，α 角约 70°~75°，为 *noetlingi* 型；*R.* (*Redlichia*) *nobilis* 面线前支前端水平延伸，后段斜伸，α 角约为 70°，为 *nobilis* 型；*R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 面线为典型的 *chinensis* 型，α 角约为 90°；三者的面线前支皆呈大角度向外扩张。其余特征三者大致相同。综上所述“清虚洞组”*Redlichia* 处于最后一个演化阶段。

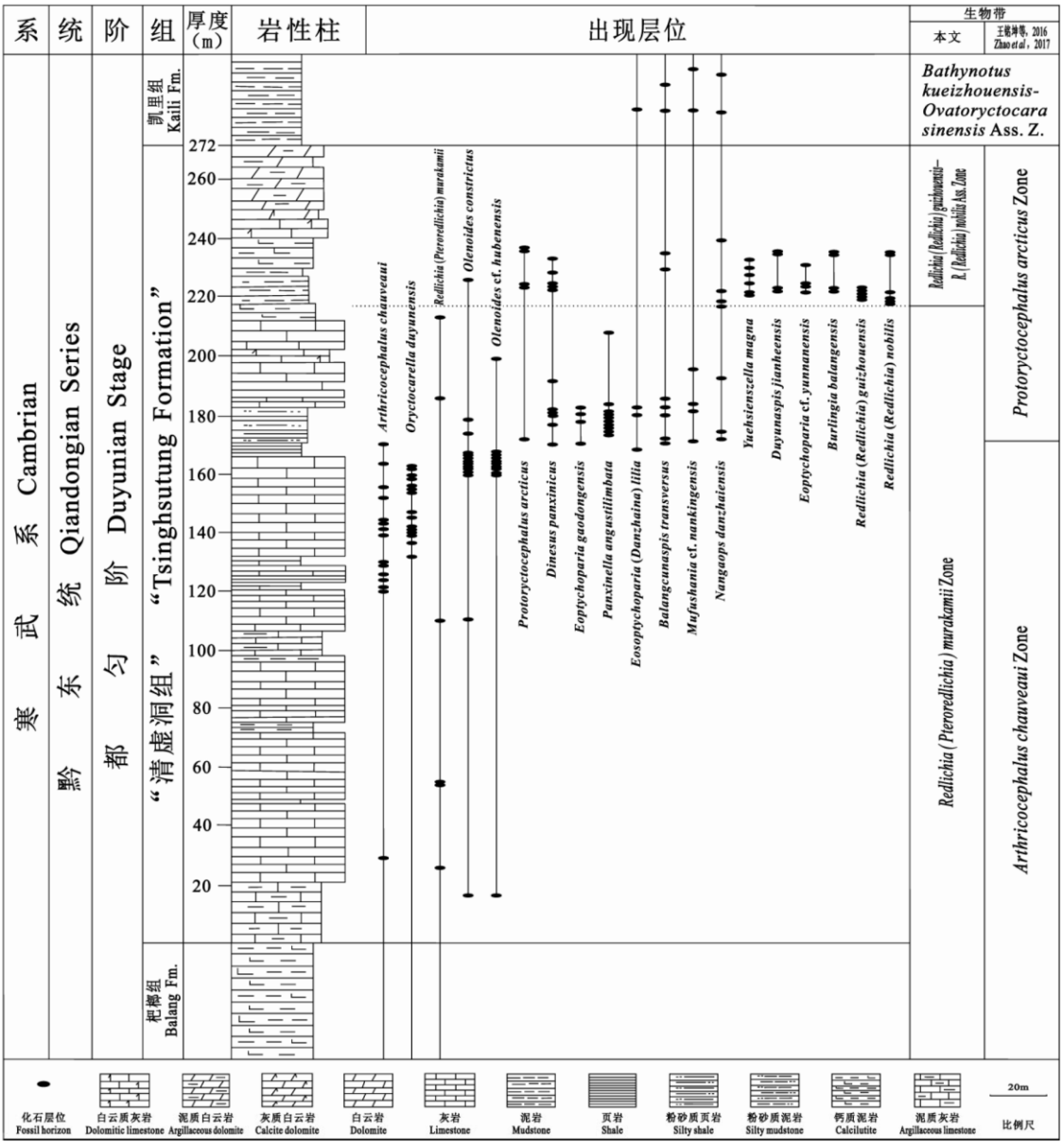


图 2 剑河松山剖面“清虚洞组”三叶虫地层分布图

Fig. 2 Stratigraphic ranges of trilobites in the Songshan section, Jianhe County, Guizhou Province

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　“清虚洞组”莱得利基虫生物带的划分及其对比

3.1　“清虚洞组”莱得利基虫生物带的划分

典型的清虚洞组含丰富莱得利基虫及褶颊虫，由下而上划分为 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii-Hoffetella-Eoptychoparia* 组合带及 *Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis-Redlichia* (*Redli- chia*) *nobilis* 富集带（尹恭正，1987）。袁金良等在研究八郎一带“清虚洞组”时，在该组内建立了两个化石带：上部为 *Protoryctocephalus wuxunensis* 带，下部为 *Arthricocephalites taijiangensis* 带（Yuan Jin-liang *et al.*，2011）。之后又将下部修订为 *Arthricocephalus jishouensis-Changaspis plana*（Yuan Jin-liang & Ng，2014；Yuan Jin-liang & Jorge，2015）。后有学者将上部带修改为 *Protoryctocephalus arcticus* 带（王铭坤等，2016；王铭坤、赵元龙，2016）。赵元龙等将杷榔组中上部及“清虚洞组”下部划为 *Arthricocephalus chauveaui* 带（Zhao Yuan-long *et al.*,2017）。笔者对松山剖面“清虚洞组”所采集的化石整理研究，建立 2 个莱得利基虫三叶虫带（表 1），由下而上为：*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 带及 *Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis-Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* 组合带，其中将下伏地层杷榔组的中上部亦划归为 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 带。各带的三叶虫组合特征介绍如下：

表 1　剑河八郎寒武系都匀阶三叶虫生物地层划分

Tab. 1　Trilobite zonation chart of the Duyunian Stages, Qiandong Series (Cambrian Series 2, Stage 4) in Jianhe County

<table>
<tr><th>系</th><th>统</th><th>阶</th><th>组</th><th>掘头虫生物带</th><th>莱得利基虫生物带</th></tr>
<tr><td rowspan="4">寒武系</td><td rowspan="4">黔东统</td><td rowspan="3">都匀阶</td><td>凯里组（底部）</td><td>Bathynotus kueizhouensis-Ovatoryctocara sinensis Assemblage Zone</td><td>Redlichia (Redlichia) takooensis longispina
Redlichia (Redlichia) taijiangensis
层位
（郭庆军、赵元龙，1999）</td></tr>
<tr><td rowspan="2">『清虚洞组』</td><td>Protoryctocephalus arcticus Zone
（王铭坤、赵元龙，2016）</td><td>Redlichia (Redlichia) guizhouensis—Redlichia (Redlichia) nobilis Assemblage Zone
（本文）</td></tr>
<tr><td rowspan="2">杷榔组</td><td rowspan="2">Arthricocephalus chauveaui Zone
（Zhao et al.，2017）</td><td>Redlichia (Pteroredlichia) murakamii Zone
（本文）</td></tr>
<tr><td>南皋阶</td><td>Oryctocarella duyunensis Zone
（Zhao et al.，2017）</td><td>Redlichia (Pteroredlichia) chinensis
层位
（闫巧洁等，2014）</td></tr>
</table>

3.1.1　*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 带　*R*. (*Pteroredlichia*) *murakamii* 在杷榔组中上部有产出（彭进，2009；闫巧洁等，2014），且上延至“清虚洞组”，笔者将“清虚洞组”中下部及杷榔组中上部划归为 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 带，本带以 *R*. (*Pteroredlichia*) *murakamii* 的首现为底界，*R*. (*Redlichia*) *nobilis* 的首现为顶界。黔北清虚洞组下段为 *Redlichia* (*Petroredlichia*) *murakamii-Hoffetella- Eoptychoparia* 组合带（尹恭正，1987）。在剑河“清虚洞组”并未发现 *Hoffetella*，而 *Eoptyhoparia* 发现 2 个种（图 2）：*Eoptychoparia gaodongensis* 和 *Eoptychoparia* cf. *yunnanensis*，其中 *Eoptychoparia gaodongensis* 层位低于 *Eoptychoparia* cf. *yunnanensis*，且在本带顶部与 *R*. (*Pteroredlichia*) *murakamii* 共存，

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Eoptychoparia cf. *yunnanensis* 层位则高于 *R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii*，这与典型的清虚洞组有所区别。*R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 分布较广且易于识别，除在黔北清虚洞组中有产出外，在滇东南、滇东及华北同期地层中亦有产出。本带在黔东、滇东南的清虚洞组及其同期地层中可识别。

本带产出的三叶虫丰富，有 12 属 13 种（包括 2 个相似种）：*R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii*、*Arthricocephalus chauveaui*, *Oryctocarella duyunensis*, *Olenoides constrictus*, *Olenoides* cf. *hubenensis*, *Eoptychoparia gaodongensis*, *Nangaops danzhaiensis*, *Balangcunaspis transversus*, *Mufushania* cf. *nankingensis*, *Eosoptychoparia* (*Danzhaina*) *lilia*, *Protoryctocephalus arcticus*, *Panxinella angustilimbata*, *Dinesus panxinicus*。其中带化石 *R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 与 *Arthricocephalus chauveaui*, *Oryctocarella duyunensis* 向下延伸至下伏地层杷榔组中。

3.1.2 *Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis-Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* 组合带　本带位于“清虚洞组”中上部，以 *R.* (*Redlichia*) *guizhouensis* 的首现为底界，*R.* (*Redlichia*) *guizhouensis* 的最高层位为顶界，带化石 *R.* (*Redlichia*) *guizhouensis*, *R.* (*Redlichia*) *nobilis* 地理分布较为局限，但丰度较高，易于识别。本带在黔东、黔北的清虚洞组及其同期地层中可识别。

除 *Yuehsienszella magna*, *Eoptychoparia* cf. *yunnanensis*, *Duyunaspis jianheensis*, *Burlingia balangensis* 以外，*Nangaops danzhaiensis*, *Balangcunaspis transversus*, *Mufushania* cf. *nankingensis*, *Eosoptychoparia* (*Danzhaina*) *lilia*, *Protoryctocephalus arcticus*, *Dinesus panxiniucs* 皆由下伏 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 带上延至本带。其中 *Nangaops danzhaiensis*, *Balangcunaspis transversus*, *Mufushania* cf. *nankingensis*, *Eosoptychoparia* (*Danzhaina*) *lilia* 延伸至上覆地层凯里组。

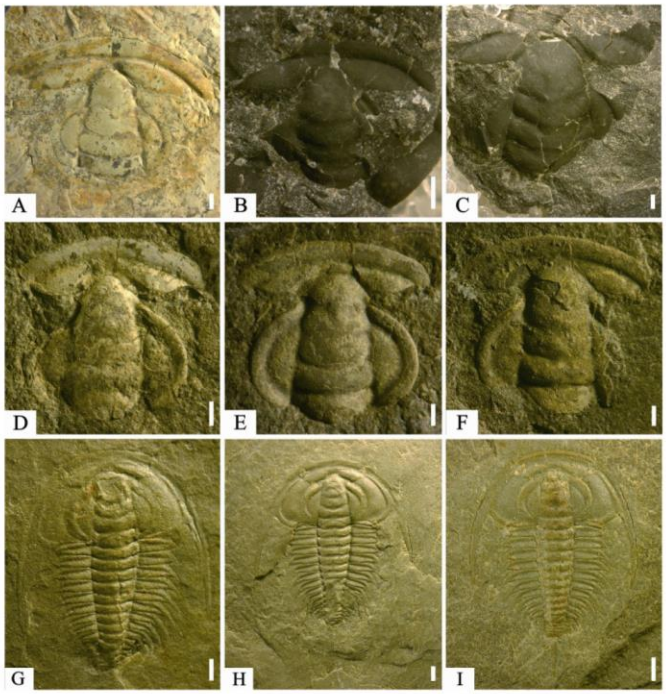
3.2 “清虚洞组”莱得利基虫生物地层对比

黔东地区寒武系发育，为斜坡相地层，其中兼有华北浅水区及江南斜坡带共有的区域性三叶虫分子（彭善池，2009）。剑河松山剖面“清虚洞组”中的 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 及 *Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* 除在华北寒武系馒头组中有产出，在云南龙王组中也有分布。这为同期地层的对比提供了依据，现将“清虚洞组”依据莱得利基虫建立的两个三叶虫生物地层与同期地层的对比介绍如下：

3.2.1 黔北　黔北地区同期地层为典型的清虚洞组，下部含丰富的 *R.*（*Pteroredlichia*）*murakamii* 及 *Hoffettella*，顶部含有 *R.* (*Redlichia*) *guizhouensis*, *R.* (*Redlichia*) *nobilis* 及小型褶颊虫 *Eoptychoparia* 等。尹恭正（1987）将清虚洞组上部划归为 *Redlichia* (*Redlichia*)*guizhouensis-Redlichia*(*Redlichia*) *nobilis* 富集带，下部划归为 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii-Hoffetella-Eoptychoparia* 组合带。根据尹恭正（1987）所描述的梅子湾剖面清虚洞组，在其中下部 0~150.2 m（总厚度 208.3 m）中只有 *R.*（*Petroredlichia*）*murakamii* 及 *Hoffettella*，而并未见 *Eoptyhoparia*，*Eoptychoparia* 只见于 150.2~165.0 m 区间内，且与 *R.* (*Redlichia*) *guizhouensis* 共存。在黔东“清虚洞组”中亦见此情形，区别是未在下部发现 *Hoffetella*，其中 *Eoptychoparia* cf. *yunnanensis* 与 *R.* (*Redlichia*)*guizhouensis* 及 *R.* (*Redlichia*) *nobilis* 共存，*Eoptychoparia gaodongensis* 与 *R.*（*Pteroredlichia*）*murakamii* 共存只在 *R.*（*Pteroredlichia*）*murakamii* 地层分布的末期，即 *Eoptychoparia gaodongensis* 并未向下延伸至“清虚洞组”底部（图 2）。黔北地区的 *Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis-Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* 富集带与剑河八郎“清虚洞组”的 *Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis-Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* 组合带的底界基本一致，可进行对比；黔东“清虚洞组”及杷榔组中上部 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 带的底界要低于黔北清虚洞组 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii-Hoffetella-Eoptychoparia* 组合带的底界，两者顶界相当（表 2）。

3.2.2 滇东南　滇东南寒武系可划分为 19 个生物化石带（罗惠麟等，2009），其中在中哨组中 *R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 与 *R.* (*Pteroredlichia*) *chinensis* 及 *R.* (*Pteroredlichia*) *chinensis lui* 共存，这与黔东地区 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 带的中下段（杷榔组中上部）相同。黔东 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 带不同于滇东南地区 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 带的是，黔东地区具有很多掘头虫类三叶虫，如 *A. chauveaui* 及 *O. duyunensis* 等。滇东南地区中哨组中的 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 带的底界与黔东地区“清虚洞组”及杷榔组中上部的 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 带底界相一致，两个带可对比（表 2）。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



A-C.村上翼形莱得利基虫 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii*. A.头盖，标本号：Q87-187；B，头盖，标本号：Q218-2；C.头盖，标本号：Q219-28; D-F.著目莱得利基虫 *Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* Walcott, 1905; D.头盖，标本号：Q35.6-171；E.头盖，标本号：Q35.6-320；F.头盖，标本号：Q37.6-105; G-I.贵州莱得利基虫 *Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis* Zhou, 1974; G.背壳，标本号：Q51-1544；H.背壳，标本号：Q52-1085；I.背壳，标本号：Q52-3072，比例尺皆为 1 mm，比例尺除图 A-C 为 2 mm 外，其余皆为 1 mm

A-C.*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii*. A，cranidium，collection No.Q87-187；B，cranidium，collection No.Q218-2；C.cranidium，collection No.Q219-28. All scale bars equal 2 mm. D-F.*Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis*. D，cranidium，collection No.：Q35.6-171；E.cranidium，collection No.Q35.6-320；F.cranidium，collection No.Q37.6-105；Scale bars represent 1 mm. G-I.*Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis* Zhou, 1974. G.exoskeleton，collection No.Q51-1544；H.exoskeleton，collection No.Q52-1085；I，exoskeleton，collection No.Q52-3072. Scale bars in figs. A, B and C equal 2 mm and the other scale bars equal 1 mm

图 3　松山“清虚洞组”莱得利基虫

Fig. 3　*Redlichia* from “Tsinghsutung Formation” of the Songshan section

表 2　八朗松山剖面“清虚洞组”与国内同期地层三叶虫生物带对比

Tab. 2　Trilobite zonation and correlation chart of“Tsinghsutung Formation” (Songshan Section at Jianhe Balang) and related regions in China

<table>
<tr><td colspan="3">年代地层</td><td>剑河八郎</td><td>黔北</td><td>滇东南</td><td>滇东</td><td>华北</td></tr>
<tr><td>系</td><td>统</td><td>阶</td><td>本文</td><td>尹恭正（1987）</td><td>罗惠麟等（2009）</td><td>罗惠麟等（1994）</td><td>彭善池（2018），仇洪安（1980）</td></tr>
<tr><td rowspan="6">寒武系</td><td rowspan="1">苗岭统</td><td>乌溜阶</td><td>Peronopsis taijiangensis</td><td rowspan="2">Kaotaia—Paramecephalus</td><td>Plesiagraulos</td><td rowspan="2">Sinoptychoparia</td><td rowspan="2">Yaojiayuella</td></tr>
<tr><td rowspan="5">黔东统</td><td rowspan="4">都匀阶</td><td>Oryctocephalus indicus</td><td>Mengzia</td></tr>
<tr><td>Bathynotus kueizhouensis-Ovatoryctocara sinensis</td><td rowspan="2">Redlichia (Redlichia) guizhouensis—Redlichia (Redlichia) nobilis</td><td rowspan="3">Redlichia (Pteroredlichia) murakamii</td><td>Chittidilla</td><td>Qiaotouaspis</td></tr>
<tr><td>Redlichia (Redlichia) guizhouensis—R. (Redlichia) nobilis</td><td rowspan="2">Hoffstella—Redlichia (Pteroredlichia) murakamii</td><td>Redlichia (Redlichia) nobilis</td></tr>
<tr><td>Redlichia (Pteroredlichia) murakamii</td><td>Redlichia (Pteroredlichia) murakamii—Hoffetella—Eoptychoparia</td><td>Redlichia (Pteroredlichia) chinensis</td></tr>
<tr><td>南皋阶</td><td>———</td><td>Palaeolenus</td><td>Palaeolenus</td><td>Palaeolenus</td><td>Palaeolenus</td></tr>
<tr><td colspan="3"></td><td colspan="4">地层间断</td></tr>
</table>

注：剑河八朗都匀阶下部及南皋阶上部生物带暂不做讨论，以“—”表示

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.2.3 滇东 罗惠麟等（1994）将龙王庙组的三叶虫生物带修改为 *Hoffetella—Redlichia*（*Pteroredlichia*）*murakamii* 带。但在寻甸清水海，一般产于龙王庙组中部的 *Eoptychoparia* 与 *Hoffetella elongate* 共存，而宜良龙肇寺及马龙小罗贵剖面的龙王庙组皆未见 *Hoffetella*，且在宜良龙肇寺龙王庙组 *R.* (*Redlichia*) *nobilis* 产于该组中部并与 *R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 共存（罗惠麟，1994）。在黔东松山剖面“清虚洞组”中 *R.* (*Redlichia*) *nobilis* 产于该组中上部且并未与 *R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 共存，且在华北区系的馒头组中 *R.* (*Redlichia*) *nobilis* 也并未与 *R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 共存（仇洪安，1980；郭鸿俊、咎淑芹，1991）。若暂不考虑宜良龙肇寺龙王庙组 *R.* (*Redlichia*) *nobilis* 与 *R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 共存（罗惠麟，1994）的特例，则滇东龙王庙组 *Hoffetella-Redlichia*(*Pteroredlichia*) *murakamii* 带与黔东“清虚洞组”下部及杷榔组中上部的 *Redlichia* (*Pteroredlichia*)*murakamii* 带相当（表 2）。

3.2.4 华北 卢衍豪等（1982）将寒武纪华北区系分为华北—东北南部亚区及扬子—青川藏亚区。由于地层的缺失，华北区系寒武系第二统只保存了上部，共包含 5 个三叶虫带，由下而上为：*Palaeolenus* 带、*Redlichia* (*Pteroredlichia*) *chinensis* 带、*Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* 带、*Qiaotouaspis* 带及 *Yaojiayuella* 带的下部（彭善池，2018）。仇洪安（1980）描述了徐宿地区馒头组中 *R.* (*Redlichia*) *nobilis* 与 *R.* (*Pteroredlichia*) *chinensis* 在该组下段中、上部共存，并未发现 *R.* (*Redlichia*) *nobilis* 与 *R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 有共存的现象。在辽宁本溪及辽西地区 *R.* (*Pteroredlichia*) *chinensis* 常出现于 *R.* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 之下（郭鸿俊、咎淑芹，1991）。黔东“清虚洞组”及杷榔组中上部 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* 带层位高于华北 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *chinensis* 带，“清虚洞组”中上部 *Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis*- *Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* 组合带可与华北 *Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* 带对比（表 2）。

中国科学院南京地质古生物研究所袁金良研究员及贵州省古生物研究中心彭进教授给予指导，中国科学院南京地质古生物研究所彭善池研究员及两位审稿专家评审本文并提出修改意见，杨宇宁、兰天帮助修改英文摘要，贵州大学大学古生物研究所研究生及剑河八郎村村民刘锋、刘泽福等参与化石的采集工作，在此一并致以衷心的感谢。

参 考 文 献

陈婉怡，赵元龙，杨兴莲，文荣琴. 2017. 贵州剑河八郎寒武系“清虚洞组”*Tuzoia*. 古生物学报, **56**(3)：301-311.

傅晓平，伍孟银，赵元龙，朱伟华，杨宇宁. 2012. 贵州剑河八郎寒武系都匀阶“清虚洞组”宏观藻类化石的发现. 古生物学报, **51**(1)：56-63.

郭鸿俊，咎淑芹. 1991. 辽东半岛早及中寒武世早期生物地层. 长春地质学院学报, **21**(1)：1-12, 120.

郭庆军，赵元龙，袁金良. 1999. 贵州凯里地区下、中寒武统凯里组下部 *Redlichia* 的再研究. 古生物学报，**38**(Supplement)：157-164.

李善姬. 1981. 扬子区的寒武系//项礼文等，中国地层 中国的寒武系. 北京：地质出版社. 73-115.

梁博焱，彭 进，文荣琴，刘 帅. 2017. 寒武系杷榔组 *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *chinensis* (Walcott，1905)个体发育研究. 古生物学报, **56**(1)：25-36.

刘玉娟，赵元龙，刘玉莹，毛永琴. 2015. 贵州剑河八郎“清虚洞组”*Kutorgina* Billings，1861 的初步研究. 古生物学报, **54**(3)：342-350.

卢衍豪. 1951. 莱得利基虫及其数新种. 地质论评, **15**(6)：157-170.

卢衍豪. 1964. 中国的寒武系 全国地层委员会《全国地层会议学术报告汇编》. 北京：科学出版社. 1-133.

卢衍豪，朱兆玲，钱义元，林焕令，袁金良. 1982. 中国寒武纪地层对比表说明书//中国科学院南京地质古生物研究所编，中国各纪地层对比表及说明书. 北京：科学出版社. 28-54.

罗惠麟，蒋志文，唐良栋. 1994. 中国下寒武统建阶层型剖面. 云南：云南科技出版社. 1-183.

罗惠麟，胡世学，侯蜀光，高宏光，詹冬琴，李文昌. 2009. 滇东南寒武纪地层及三叶虫动物群. 云南：云南科技出版社. 1-252.

罗绣春，赵元龙，王平丽，杨宇宁，张培兴，潘永金. 2013. 贵州剑河八郎“清虚洞组”叉尾虫科 Dorypygidae 三叶虫. 贵州大学学报(自然科学版), **30**(3):39-45.

罗绣春，赵元龙，彭 进，杨宇宁，潘永金. 2014. 贵州剑河八郎“清虚洞组”*Protoryctocephalus* Chow (Zhou) in Lu *et al.*，1974b 的初步研究. 古生物学报, **53**(3)：327-334.

彭 进. 2009. 贵州东部寒武纪黔东世杷榔动物群. 南京：南京大学. 1-137.

彭善池. 2009. 华南斜坡相寒武纪三叶虫动物群研究回顾并论我国南、北方寒武系的对比. 古生物学报，**48**(3)：437-452.

彭善池. 2018. 寒武系//全国地层委员会编，中国地层表（2014）说明书. 北京：地质出版社. 73-100.

王铭坤，赵元龙，罗绣春，陈婉怡. 2016. 贵州剑河八郎“清虚洞组”*Olenoides* Meek，1877 的研究. 高校地质学报, **22**(3):486-493.

王铭坤，赵元龙，张培兴，刘 锋，刘泽福. 2014. 贵州剑河八郎寒武系“清虚洞组”八郎村虫 *Balangcunaspis* (Yuan & Zhao)的研究. 贵州大学学报(自然科学版), **31**(5)：36-39.

仇洪安. 1980. 徐州—宿县地区下寒武统馒头组的三叶虫. 中国地质科学院南京地质矿产研究所文集(1)：34-69.

王铭坤，赵元龙. 2016. 贵州剑河八郎寒武系“清虚洞组”中上部褶颊虫类三叶虫. 古生物学报, **55**(2)：147-159.

王 圆，杨兴莲，赵元龙，段晓林. 2017. 贵州剑河八郎寒武系“清虚洞组”海绵化石初步研究. 古生物学报, **56**(2)：176-188.

闫巧洁，彭 进，赵元龙，文荣琴，孙海静. 2014. 贵州剑河寒武系黔东统杷榔组沉积环境及生物地层再研究——以剑河交榜剖面为

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

例. 地质论评, **60**(4)：893-902.

杨兴莲，赵元龙，彭　进，杨宇宁，杨凯迪. 2010. 贵州剑河黔东统都匀阶清虚洞组掘头虫类三叶虫的发现.高校地质学报，**16**(3)：109-316.

杨宇宁，赵元龙，彭　进，杨兴莲. 2012. 贵州剑河八郎寒武系“清虚洞组”单板类化石 *Oelandiella*. 古生物学报, **51**(3)：308-319.

尹恭正. 1987. 寒武系//贵州省质地矿产局. 贵州省区域地质志 北京：地质出版社. 49-96.

尹赞勋，谌义睿、秦　俞. 1945. 湄潭县之寒武纪地层. 地质论评，**10**(5-6)：205-221.

袁金良，赵元龙，李　越，黄友庄. 2002. 黔东南早、中寒武世凯里租三叶虫动物群. 上海：上海科学技术出版社. 1-422.

张文堂. 1966. Redlichiacea 超科的分类及新科、新属的记述. 古生物学报, **14**(2)：135-184.

张文堂，卢衍豪，朱兆玲，钱义元，林焕令，周志毅，章森桂，袁金良. 1980. 西南地区寒武纪三叶虫动物群. 北京：科学出版社. 1-479.

张　源，赵元龙，蒋宗凯，陈婉怡. 2016. 贵州剑河八郎寒武系“清虚洞组”帐篷螺 *Scenella* 的发现. 贵州大学学报(自然科学版)，**33**(4)：34-37.

周志毅，袁金良，张正华，吴孝儒，尹恭正. 1980. 贵州寒武纪地层的分类和对比. 地层学杂志，**4**(4)：273-281.

Yuan Jin-liang & Jorge Esteve. 2015. The earliest species of Burlingia Walcott，1908（Trilobita） from South China：Biostratigraphical and palaeogeographical significance. Geological Magazine, **152**(1)：358-366.

Yuan Jin-liang & Ng Tim-Wai. 2014. Tentative correlation of the Duyunian(Cambrian Series 2，Stage 4) and the Taijiangian(Cambrian Series 3，Stage 5)between South China and the Mediterranean region. GFF, **136**(1)：314-319.

Yuan Jin-liang，Zhu Xue-jian，Lin Jin-pai & Zhu Mao-yan. 2011. Tentative correlation of Cambrian Series 2 between South China and other continents. Bulletin of Geosciences，**80**(3)：397-404.

Zhao Yuan-long, Peng Jin, Yuan Jin-liang, Babcock L E, Guo Qing-jun, Yin Lei-ming, Yang Xing-lian, Tai Tong-shu, Wang Chun-jiang, Lin Jin-bai, Gaines R R, Sun Hai-jing & Yang Yu-ning. 2012. Discussion of candidate stratotypes for the GSSP defining the conterminous base of Cambrian provisional Series 2 and Stage 5. Journal of Guizhou University，**29**(Supplement-1)：35-48.

Zhao Yuan-long, Yuan Jin-liang, Jorge Esteve & Wang Ming-kun. 2017. The trilobite biostratigraphy of the Balang and“Tsinghsutung” Formation，Cambrian Series 2，Stage 5 from South China and its correlation significance（Trilobite Zonation from the Cambrian Series 2 of South China）// Yang Qun, Reitner J, Wang Yuan-dong &. Reich M eds.Critical intervals in Earth history: Palaeobiological innova- tions. Abstract Volume of the 2nd Joint Conference of the Palaeontological Society of China and the Paläontologische Gesellschaft. Hefei:University of Science and Technology of China Press.496-497.

TRILOBITE *REDLICHIA* FROM THE CAMBRIAN “TSINGHSUTUNG FORMATION” AT BALANG AREA IN JIANHE, GUIZHOU AND ITS BIOSTRATIGRAPHIC SIGNIFICANCE

CHEN Zheng-peng[1)], ZHAO Yuan-long[1)], LUO Xiu-chun[1) 2)] and YANG Guang-fu[1)]

1) *College of Resources and Environment Engineering, Guizhou University*, *Guiyang* 550025;

2) *Institute of Mountain Resources*, *Guizhou Provincial Museum*, *Guiyang* 550081

Abstract　Two redlichiid trilobite zones, the *Redlichia* (*Petroredlichia*) *murakamii-Hoffetella-Eoptychoparia* Assemblage Zone and the upper *Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis-Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* Abundance Zone, have been recognized in the Cambrian Tsinghsutung Formation (Qiandongian Series, Duyunian Stage) in North Guizhou (platform facies), South China. However, little is known about the redlichiid assemblage of its contemporaneous sediments in the foreslope facies. Here we present new redlichiid trilobite fossils from the “Tsinghsutung Formation” at the Songshan section in Jianhe County, eastern Guizhou (outer shelf facies). So far we have found 3 species of the genus *Redlichia*, and most of the species are common in the Tsinghsutung Formation of North Guizhou. Based on their occurrences, two zones were detected, in ascending order they are *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* Zone and *Redlichia* (*Redlichia*) *guizhouensis-Redlichia* (*Redlichia*) *nobilis* Assemblage Zone, which positively coincide with two known Oryctocephalid trilobite zones of the Songshan section, *Arthricocephalus chauveaui* Zone and *Protoryctocephalus arcticus* Zone, respectively. It is worth mentioning that the *Redlichia* (*Pteroredlichia*) *murakamii* Zone here could begin from the middle part of the underlying Balang Formation, whilst *Hoffetella*, a typical trilobite taxon in the Tsinghsutung Formation of North Guizhou, is not yet available in Songshan section. New redlichiid trilobite fossils from the “Tsinghsutung Formation” at Jianhe, eastern Guizhou shed new light on biostratigraphy of Cambrian Stage 4 between the Yangtze carbonate platform and deep-water outer shelf facies in South China.

Key words　biostratigraphy, *Redlichia*, “Tsinghsutung Formation”, Cambrian, Jianhe County, Guizhou

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

古生物学报，57(2)：181—191(2018 年 6 月)
Acta Palaeontologica Sinica，57(2)：181—191(June，2018)

贵州剑河八郎寒武系“清虚洞组”三叶虫 *Duyunaspis* Zhang and Qian *in* Zhou *et al.*，1977*

陈争鹏[1)] 赵元龙[1)**] 杨兴莲[1)] 王铭坤[1,2)]

1) 贵州大学资源与环境工程学院，贵阳 550025，zhaoyuanlong@126.com；
2) 贵州省山地资源研究所，贵阳 550001

提要 *Duyunaspis* Zhang and Qian *in* Zhou *et al.*，1977 是黔东、湘西北杷榔组掘头虫类三叶虫的重要分子。本文描述剑河八郎“清虚洞组”的 *Duyunaspis*，这些新材料的头鞍中部膨大且向前略有收缩，前颊类型面线，成虫具 10 个胸节；而杷榔组的 *Duyunaspis duyunensis* Zhang and Qian *in* Zhou *et al.*，1977 头鞍桶状，背沟较平直，后颊类型面线，成虫 10 个胸节，二者明显不同。本文将“清虚洞组”的 *Duyunaspis* 定为一个新种：剑河都匀盾壳虫 *Duyunaspis jianheensis* sp. nov.。研究显示，*D. jianheensis* 与杷榔组的 *D. duyunensis* 具有形态相似性，后者可能为其祖先种。

关键词 *Duyunaspis* 三叶虫 “清虚洞组” 寒武系 贵州剑河

1 前 言

贵州剑河松山剖面寒武系“清虚洞组”含有大量三叶虫化石，经不断发掘，共有 8 科 15 属 17 种(王铭坤，2016)，耸棒头虫目 7 属、褶颊虫目 6 属、莱得利基虫目 1 属及未定目的 *Burlingia* 1 属(杨兴莲等，2010；罗绣春等，2013，2014；孙宗元等，2013；王铭坤等，2014，2016；王铭坤、赵元龙，2016；Yuan and Ng，2014)，其中 *Duyunaspis* 过去被描述为 *D.* cf. *duyunensis*(杨兴莲等，2010)，罗绣春等(2014)也曾报道该组产有 *Duyunaspis*。*Duyunaspis* 由张文堂和钱义元建立(见周天梅等，1977)，分布于黔东杷榔组(彭进，2009；闫巧洁等，2014)、“清虚洞组”(杨兴莲等，2010)以及湘西北杷榔组地层中(雷倩萍、彭善池，2014；McNamara *et al.*，2006；Lei，2016；Dai *et al.*，2017)；有学者先后对其属征进行了补充与修订(钱义元、林焕令，见尹恭正、李善姬，1978；张文堂等，1980；雷倩萍、彭善池，2014；McNamara *et al.*，2006)，及对模式种 *D. duyunensis* 做了个体发育研究(McNamara *et al.*，2006；Lei，2016；Dai *et al.*，2017)。雷倩萍和彭善池(2014)将 *Duyunaspis* 的一些种做了归并，认为 *Duyunaspis songtaoensis* Qian and Lin *in* Zhou *et al.*，1977，*Duyunaspis guzhangensis* Zhou *in* Zhou *et al.*，1977，*Duyunaspis briaris* Chien and Lin *in* Yin and Li *et al.*，1978，*Duyunaspis laevigatus* Qian and Lin *in* Zhang *et al.*，1980；*Duyunaspis obesis* Qian and Lin *in* Zhang *et al.*，1980，都是模式种 *Duyunaspis duyunensis* Zhang and Qian *in* Zhou *et al.*，1997 的晚出异名，同时认为成虫有 9 个胸节，前颊类面线。Dai 等(2017)报道了 *D. duyunensis*10 个胸节的成虫，其面线类型在分节期 0—6 期为前颊类型，在分节期 7—8 期变为角颊类型，分节期 9 期至成虫期再变为后颊类型。本文通过对贵州剑河八郎松山剖面“清虚洞组”的 *Duyunaspis* 的研究，描述为 1 新种，即剑河都匀盾壳虫 *Duyunaspis jianheensis* sp. nov.，并对 *Duyunaspis* 的属征进行补充。

收稿日期：2018-03-02
*国家重点基础项目基金(973 项目)(2015FY310100-5)，国家重点自然科学基金(41330101)，中国地质调查局地质调查项目(DD20160120-04)，国家自然科学基金(41772021，41662001，41702022)，现代古生物学和地层学国家重点实验室开放课题基金(173130)联合资助。
**通讯作者。

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2 地质背景

研究区位于贵州省黔东南州剑河县革东镇八郎村，出露的寒武系由老至新为留茶坡组顶部、牛蹄塘组、九门冲组、变马冲组、杷榔组、“清虚洞组”、凯里组、甲劳组、娄山关组(Zhao *et al.*，2012)(插图 1)。松山剖面位于革东镇屯州村西北面，与全球寒武系第 5 阶候选层型剖面——乌溜-曾家崖剖面相邻。

松山剖面“清虚洞组”属寒武纪黔东世都匀期地层，厚 272 m，由赵元龙等 2014 年测制，自上而下为：中厚层白云岩；灰色中厚层泥岩、泥质灰岩及灰黄色页岩；灰色中厚层至厚层灰岩，属于较深水的陆棚沉积为主的环境(杨兴莲等，2010)。

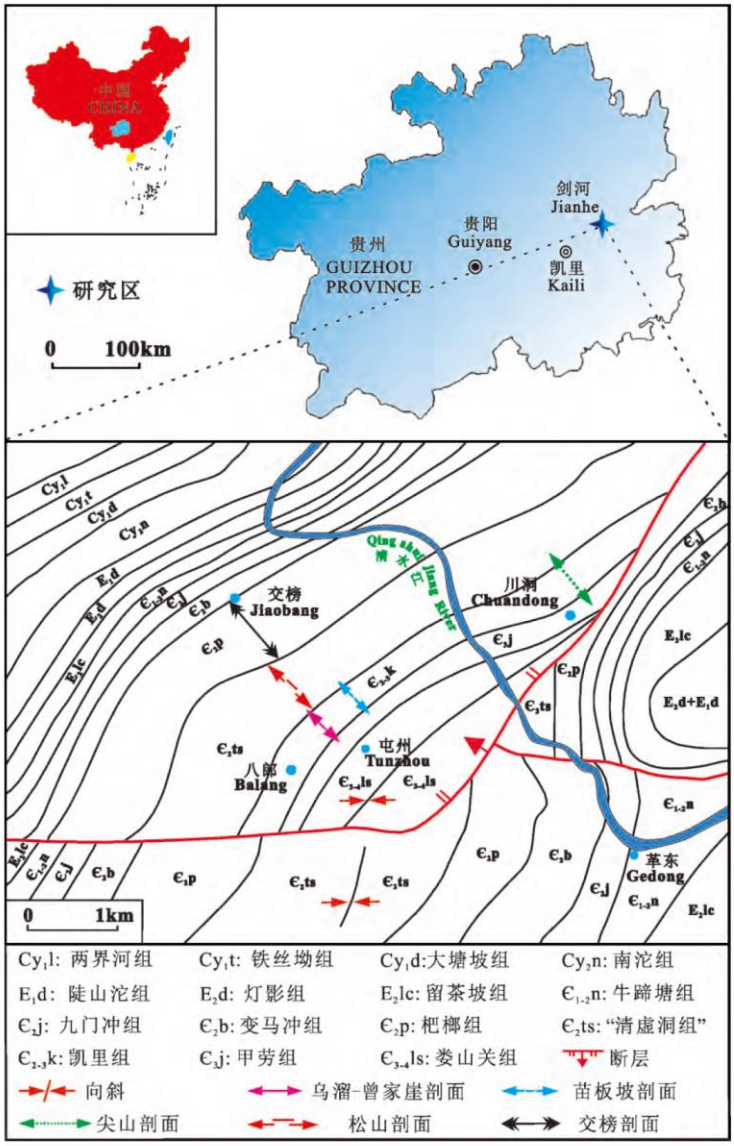


插图 1 松山剖面地理位置及地质图(据 Zhao *et al.*，2012)

Geological map and geographic map showing the location of the Songshan section(modified from Zhao *et al.*，2012)

松山剖面“清虚洞组”与黔北地区典型的岩性主要为鲕状灰岩夹豹皮状灰岩、白云质灰岩及白云岩和泥质白云岩的清虚洞组有所不同，故以“清虚洞组”来表示(张文堂等，1980；傅晓平等，2012；杨宇宁等，2012；罗绣春等，2014；王铭坤等，2014，2016；王铭坤、赵元龙，2016；刘玉娟，2015；张源等，2016；王

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

圆等，2017；陈婉怡等，2017）。

袁金良等在八郎一带“清虚洞组”内建立了两个化石带：上部为 *Protoryctocephalus wuxunensis* 带，下部为 *Arthricocephalites taijiangensis* 带（Yuan *et al.*，2011）。之后又将下部重新修订为 *Arthricocephalus jishouensis-Changaspis plana*（Yuan and Ng，2014；Yuan and Jorge，2015）。但在之后的采集及研究中，未在“清虚洞组”上部发现 *Protoryctocephalus wuxunensis*，而是采集到了大量的 *Protoryctocephalus arcticus*，认为此带难以成立（罗绣春等，2014），建议将此带拟建为 *Protoryctocephalus arcticus* 带（王铭坤等，2016；王铭坤、赵元龙，2016），笔者采纳这一意见。近来就 *Arthricocephalus* 的问题提出了一个新的观点，认为似节头虫亚属 *Arthricocephalus*（*Arthricocephalites*）Qian and Lin *in* Lu *et al.*，1974、漂游虫属 *Haliplanktos* Blaker and Peel，1997、似节头虫属 *Arthricocephalites* Qian and Lin *in* Lu *et al.*，1974 皆是 *Arthricocephalus* 的晚出异名，而过去归入 *Arthricocephalus chauveaui* 的有些标本应为 *Oryctocarella duyunensis*（彭善池等，2015；雷倩萍，2016；Peng *et al*，2017）。真正的 *Arthricocephalus chauveaui* 在“清虚洞组”中下部亦有分布，故 Zhao 等（2017）将杷榔组中上部及“清虚洞组”下部划为 *Arthricocephalus chauveaui* 带，将“清虚洞组”中上部划为 *Protoryctocephalus arcticus* 带。本文描述的 *Duyunaspis* 产于松山剖面“清虚洞组”上部 *Protoryctocephalus arcticus* 带（插图 2）。

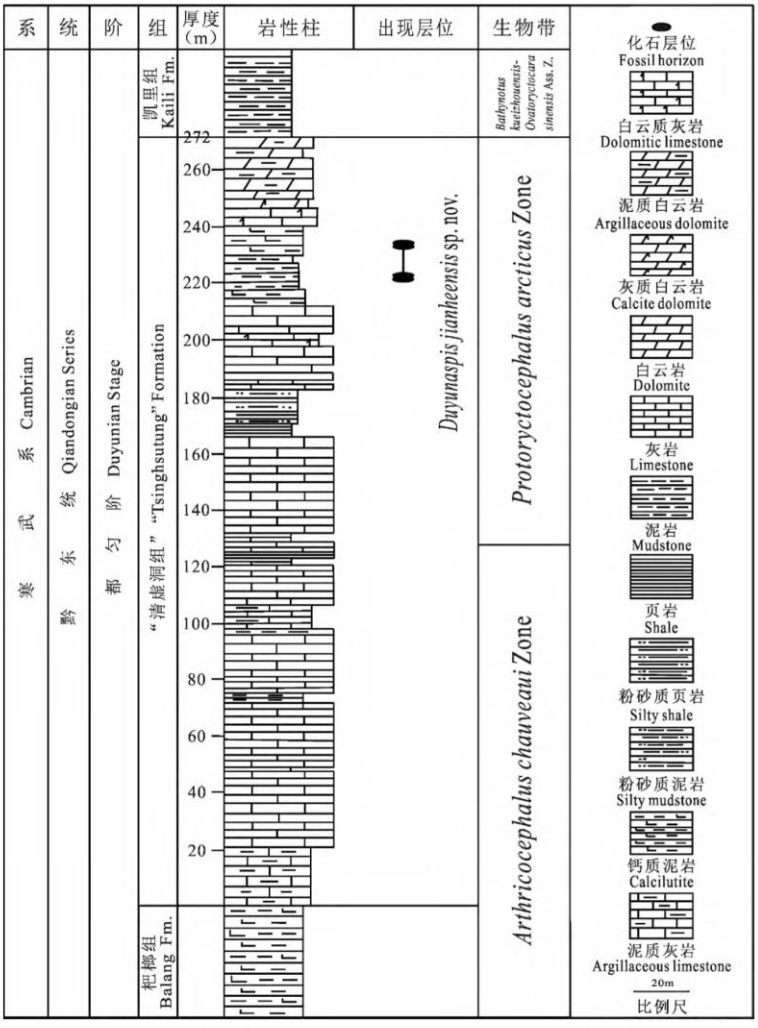


插图 2　松山剖面“清虚洞组”*Duyunaspis jianheensis* sp. nov. 地层分布图

Stratigraphic ranges of *Duyunaspis jianheensis* sp. nov. from the “Tsinghsutung Formation” of Songshan section（modified from Zhao *et al.*，2012）

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 系统古生物

耸棒头虫目 Order Corynexochida Kobayashi, 1935

掘头虫科 Family Oryctocephalidae Beecher, 1897

掘冠虫亚科 Subfamily Oryctocarinae Hupé, 1953

都匀盾壳虫属 Genus *Duyunaspis* Zhang and Qian *in* Zhou *et al.*, 1977

1977 *Duyunaspis* Zhang and Qian *in* Zhou *et al.*, 周天梅等, 131 页。

1978 *Duyunaspis* Zhang and Lin *in* Yin and Li, 尹恭正、李善姬, 443 页。

1980 *Duyunaspis* Zhang and Qian, 张文堂等, 273 页。

2006 *Duyunaspis* Zhang and Qian, McNamara *et al.*, p. 7.

2009 *Duyunaspis* Zhang and Qian, 彭进, 91 页。

2014 *Duyunaspis* Zhang and Qian, 雷倩萍、彭善池, 354 页。

2016 *Duyunaspis* Zhang and Qian, Lei, p. 354.

2017 *Duyunaspis* Zhang and Qian, Dai *et al.*, p. 527.

2017 *Duyunaspis* Zhang and Qian, Peng *et al.*, p. 953.

模式种 *Duyunaspis duyunensis* Zhang and Qian *in* Zhou *et al.*, 1977

属征修订 对钱义元、林焕令(见尹恭正、李善姬, 1978)及雷倩萍(2014)对属征的描述进一步补充如下:头鞍两侧近平行或略有膨大,于第 1 对头鞍沟附近收缩;具 4 对长坑状头鞍沟,皆不与背沟相连,且在头鞍中部不相连,第 4 对模糊;前颊类或后颊类面线;成虫 9—10 个胸节。

讨论 *Duyunaspis* 由张文堂和钱义元建立(见周天梅等, 1977),张文堂等(1980)将其置于 Feilongshaninae 亚科,而 Whittington(1995)将其归为 Oryctocarinae 亚科,雷倩萍(2014)认为 Feilongshaninae 亚科是 Oryctocarinae 亚科的晚出异名,同意将 *Duyunaspis* 归为 Oryctocarinae 亚科。原始的属征描述为:后颊类或角颊类面线,胸节 7—8 节,尾部后缘中部向上弯曲(张文堂、钱义元,见周天梅等, 1977);钱义元和林焕令(见尹恭正、李善姬, 1978)对属征作了修订,将胸节数修改为 8 节;McNamara 等(2006)将成虫期面线类型修改为角颊型,胸节数 7 节;雷倩萍等(2014)修改属征为:成虫胸节为 9 节,尾后缘中部具缺刻或无。Dai 等(2017)将成虫面线类型修改为后颊类,具 10 个胸节。

雷倩萍和彭善池(2014)依据种内差异或保存的差异,认为 *Duyunaspis songtaoensis* Qian and Lin *in* Zhou *et al.*, 1977, *Duyunaspis guzhangensis* Zhou *in* Zhou *et al.*, 1977, *Duyunaspis briaris* Qian and Lin *in* Yin and Li, 1978, *Duyunaspis laevigatus* Qian and Lin *in* Zhang *et al.*, 1980 是模式种 *Duyunaspis duyunensis* Zhang and Qian *in* Zhou *et al.*, 1977 的晚出异名,并建立一新种 *Duyunaspis paiwuensis* Lei and Peng, 2014。加上本文所描述的 *Duyunaspis jianheensis* sp. nov.,目前 *Duyunaspis* 共有 3 个种。

剑河都匀盾壳虫(新种) *Duyunaspis jianheensis* sp. nov.

(插图 3)

2010 *Duyunaspis* cf. *duyunensis* Zhang and Qian *in* Zhou *et al.*, 杨兴莲等, 316 页,图版 3,图 10。

词源 种名源自化石标本采集地贵州剑河(Jianhe)。

正模 标本 Q52-562,完整背壳;采自贵州剑河八朗松山剖面 220 m 处。

材料 205 块完整背壳。

种征 背壳长椭圆形。头盖亚梯形,前端微凸;头鞍中部膨大,在 S1 附近向内微收缩;4 对长坑状头鞍沟,与背沟不相连,第 4 对头鞍沟微弱。眼脊微弱;眼叶大,位置与 S1—S3 的区域相对应。前颊类面线。胸部 10 个胸节,中轴宽。尾部 2—4 个轴节及一末叶,尾后缘中部具一向内凹缺。

描述 背壳长椭圆形,最大标本长 9.71 mm。头盖亚梯形。外边缘窄,为一线状凸起,边缘沟深。头鞍长桶状,横向较宽且中部明显向外膨凸;在 S1 处微向内收敛并向前扩大,在 S2 处或附近达到最宽后向前微缩,前端宽圆,具 4 对头鞍沟,与背沟皆不相连,S1—S3 为坑状,横向平伸,S4 为不明显的坑状,S1—S4 中间不相连。颈沟平直,两端加深呈长坑状。面线成虫期为前颊类型:前支短,由与 S3 相对应的位置处先向外侧方前伸,再向内弯曲;后支由与 L1 相对应的位置处向后微斜伸,交于头部侧边缘。眼脊与背沟相连,向后斜伸。眼叶较长,约为头鞍长度的 1/2,向外侧弯曲,眼叶的前端和后端分别与 S3 和 S1 相对应。后侧翼横向宽,后边缘沟内侧较深,向外变浅,近平伸并略向前斜。固定颊窄,眼区部分仅为头鞍宽度的 1/3 左右。活动颊窄,颊角圆润。

成虫 10 个胸节,轴部较宽,略宽于两侧的肋叶。肋沟深,位于肋节中后部。肋节末端尖,三角形。

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

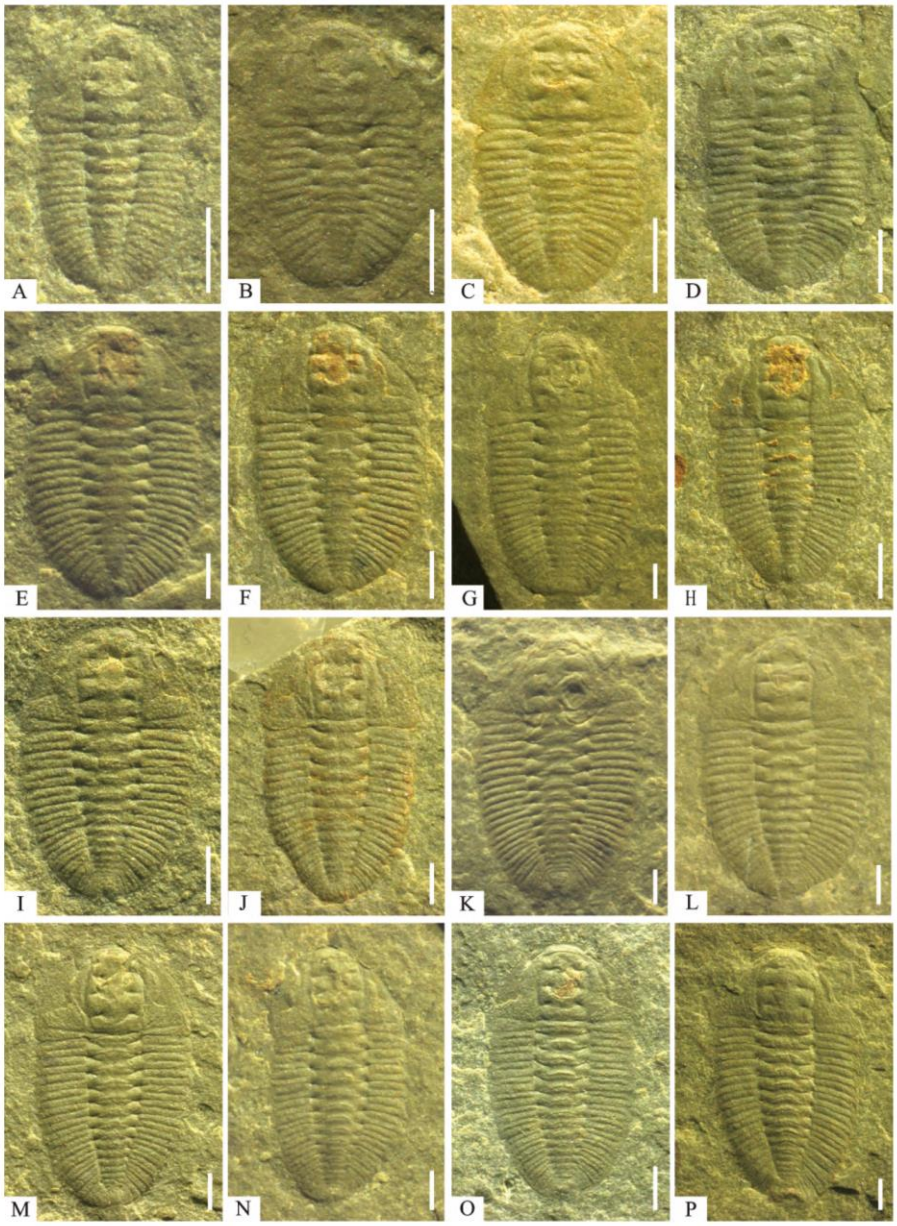


插图 3　松山"清虚洞组"*Duyunaspis jianheensis* sp. nov.

Duyunaspis jianheensis sp. nov. from the "Tsinghsutung Formation" at the Songshan section

分节期及成虫期背壳,化石标本均保存于贵州大学贵州省古生物研究中心。所有比例尺都为 1 mm。A. 分节期 4 期背壳,标本编号:Q52-2221;B. 分节期 5 期背壳,标本编号:Q51-1882;C—D. 分节期 6 期背壳,标本编号:C. Q51-5001,D. Q52-1671;E—H. 分节期 7 期背壳,标本编号:E. Q52-1418,F. Q51-1105,G. Q52-1617,H. Q52-3665;I—L. 分节期 8 期背壳,标本编号:I. Q52-1785,J. Q52-255,K. Q51-1142,L. Q52-1091;M. 分节期 9 期背壳,标本编号:Q52-1199;N—P. 成虫期背壳(10 个胸节),标本编号:N. Q51-457,O. Q52-562,P. Q52-1306。

Meraspides and holaspides of *Duyunaspis jianheensis* sp. nov. from the "Tsinghsutung Formation" at Balang village, Jianhe County, Guizhou Province. All specimens are deposited in Guizhou Research Centre for Palaeontology, Guizhou University. Scale bars=1 mm. A. Meraspid degree 4 exoskeletons, specimen No.: Q52-2221; B. Meraspid degree 5 exoskeletons, specimen No.: Q51-1882; C-D. Meraspid degree 6 exoskeletons, specimen Nos.: C. Q51-5001, D. Q52-1671; E-H. Meraspid degree 7 exoskeletons, specimen Nos.: E. Q52-1418, F. Q51-1105, G. Q52-1617, H. Q52-3665; I-L. Degree 8 exoskeletons, specimen Nos.: I. Q52-1785, J. Q52-255, K. Q51-1142, L. Q52-1091; M. Degree 9 exoskeletons, specimen No.: Q52-1199; N-P. Holaspides exoskeletons, specimen Nos.: N. Q51-457, O. Q52-562, P. Q52-1306.

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

尾部小，尾轴具 4 个轴节及一个末叶，后缘中部有一向内凹缺。

比较　本种与产自杷榔组的 *D. duyunensis* 很相似，主要的区别是前者的面线是前颊类，而后者为后颊类。两者详细的对比见下文讨论。

产地层位　贵州剑河八郎，“清虚洞组”中上部，寒武系第 2 统第 4 阶（都匀阶）。

4　*Duyunaspis jianheensis* sp. nov. 个体发育

研究标本包括分节期 4 期至成虫期，分节期 4 期之前的标本尚未发现。在 205 块标本中选取 97 块保存较好的标本做了个体发育序列观察（插图 4）。

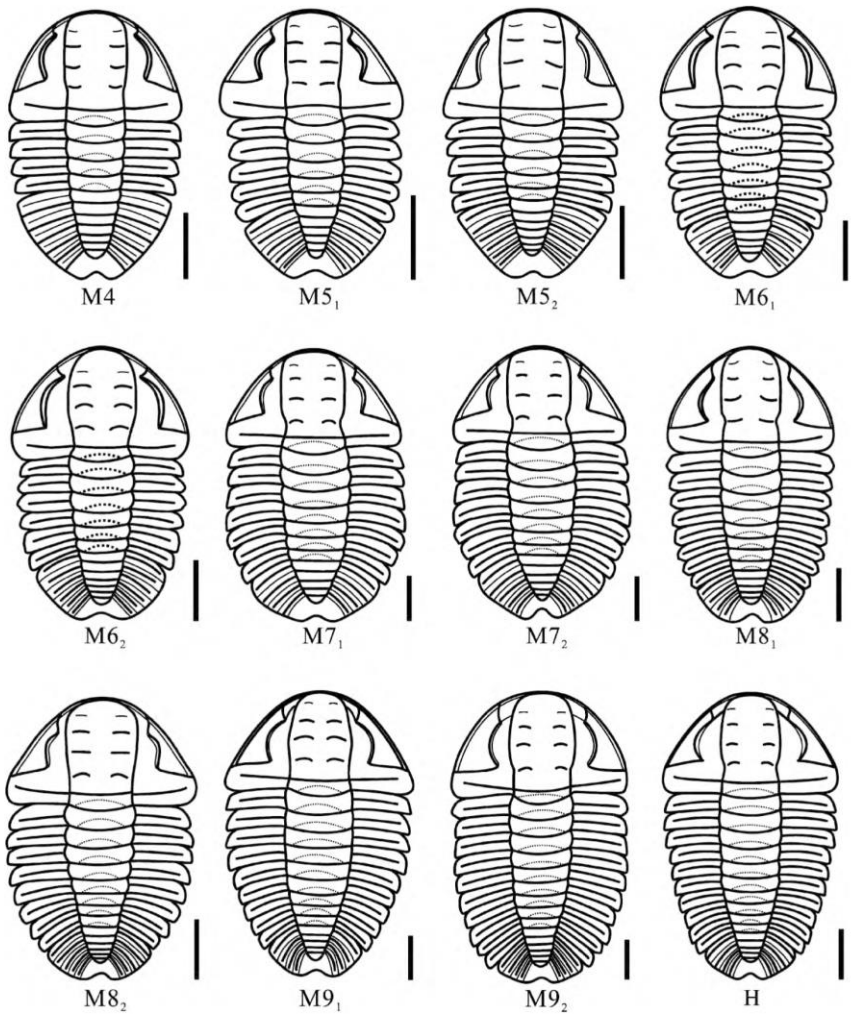


插图 4　*Duyunaspis jianheensis* sp. nov. 个体发育序列复原图

Reconstruction of the ontogeny of *Duyunaspis jianheensis* sp. nov. based on the specimens in Fig. 3

M4–M10. 分节期 4 期—分节期 10 期；H. 成虫期。所有比例尺都为 1 mm。

M4–M10. degree 4 – degree 10; H. holaspide. Scale bars = 1 mm

（1）分节期

分节期 4 期（M4）：仅有 1 块标本。背壳长椭圆形，长 3.13 mm。头盖亚梯形。前边缘窄，外边缘呈脊状，没有内边缘。头鞍长桶状，背沟两侧近平行。见 3 对坑状头鞍沟，S1 与背沟相连（可能是由于保存原因），S2、S3 未与背沟相连。颈环（L0）纵向长度比 L1 要短，颈沟清晰。前颊类型面线，面线后支于 S1 与 S2 中间向后微斜伸。眼叶位于头鞍侧叶 L2 和 L4 之间，眼区最大宽度约为头鞍宽度的 1/2。后侧翼纵向短，约为 L1 纵向的长度，其横向

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

较宽。后边缘沟向前微斜伸，未延伸至侧边缘。后边缘纵向短横向宽。胸部 4 个胸节，中轴横向宽度大于肋区，内沟清晰，保存有关节半环。尾部大，具 7 个轴节，尾边缘中部见一凹缺。

分节期 5 期(M5)：有 1 块标本。背壳长椭圆形，长 3.21 mm。头部保存不清晰，头鞍长桶状，背沟两侧近平行，除多一胸节(5 个胸节)以外，与分节期 4 期相似(插图 5)。

分节期 6 期(M6)：共 2 块标本。长 3.73—4.24 mm。头鞍长桶状，于 S1 和 S2 中间处膨大。见 4 对坑状头鞍沟，第 4 对(S4)头鞍沟模糊，S1—S3 长坑状，皆不与背沟相连。颈环(L0)横宽纵短，颈沟清晰。前颊类型面线，形状与分节期 5 期相似。胸部 6 个胸节。尾部小，具 6 或 7 个轴节，尾边缘中部具一凹缺。

分节期 7 期(M7)：共 9 块标本。背壳长椭圆形，长 4.30—6.38 mm。头盖亚梯形。前边缘窄，外边缘呈脊状，没有内边缘。胸部 7 个胸节。尾部小。具 5 或 6 个轴节。与分节期 6 期相似。

分节期 8 期(M8)—分节期 9 期(M9)：除胸节的增加外，整体与分节期 7 期相似。

(2) 成虫期

共 46 块标本。背壳长椭圆形，长 5.33—9.71 mm。前颊类面线，具 10 个胸节，尾部小，具 3 或 4 个轴节。与分节期 9 期相似。

在分节期 4 期(M4)至成虫期(H)，*D. jianheensis* 整体变化不大，背壳整体呈长椭圆形，长度在 3.13—9.71 mm 之间，主要的变化有：(1) 头部在分节 4 期(M4)至成虫期(H)，长宽比逐渐增大，成虫期约为 1/2；(2) 头鞍在分节 4 期(M4)到分节 5 期(M5)呈长柱状，背沟近似平行，在分节 6 期(M6)至成虫期(H)于中部明显膨大，且在前端微缩；(3) 头鞍沟在分节 4 期(M4)至成虫期(H)都不与背沟相连，S1—S3 都较清晰，但 S4 始终较为模糊不清；(4) 面线在分节 4 期(M4)至成虫期(H)都为前颊类型，面线前支在与 S3 相对应的位置向前斜伸然后收缩，交头部前缘，面线后支交头部后侧边缘，位置与 L1 相对；(5) 眼脊在前期都很微弱，不清晰，在分节 9 期(M9)至成虫期(H)逐渐变得清晰；(6) 尾后缘中部在分节 4 期(M4)至成虫期(H)都具有一向内的凹缺。

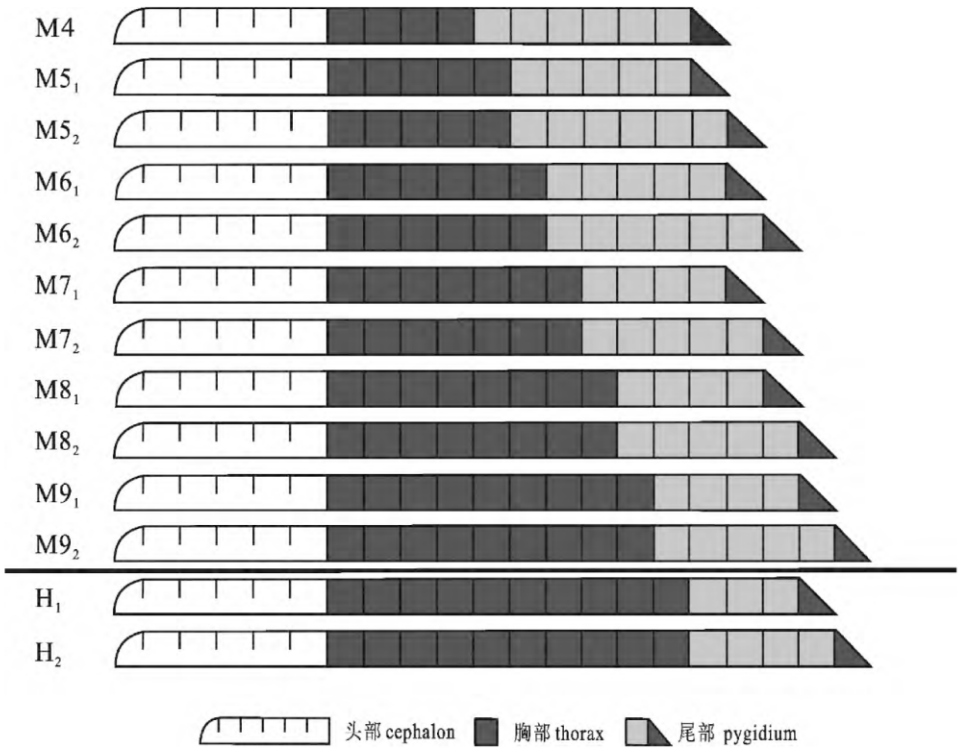


插图 5　*Duyunaspis jianheensis* sp. nov. 体节增长模式图

Trunk segmentation schedule of *Duyunaspis jianheensis* sp. nov.

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

5 讨 论

D. jianheensis 与湘西杷榔组的 *D. duyunensis* 比较相似(见插图 6):头部的形态大致相似;鞍沟的形状、位置及其与背沟之间相连的情形,几乎并无太大区别;成虫期的胸节数都为 10 节;尾部形态相似。*D. jianheensis* 与 *D. duyunensis* 主要的区别是:*D. duyunensis* 的头部呈半圆形,*D. jianheensis* 的头部略向前凸;*D. jianheensis* 的头鞍于中部明显膨大,而 *D. duyunensis* 虽略有膨大,但其膨大程度较小;两者眼叶都很大,位置与 S1—S3 相对应,*D. jianheensis* 的眼叶较 *D. duyunensis* 更向外凸出;*D. duyunensis* 被认为成虫期是前颊类面线(雷倩萍、彭善池,2014;Lei,2016),而 Dai 等(2017)发现的同为湘西杷榔组的 *D. duyunensis* 成虫期为后颊类面线,*D. jianheensis* 的面线后支交于侧边缘,位置大致与 S1 相对,为明显的前颊类面线。

D. duyunensis 的产出层位较低,可能为 *D. jianheensis* 的祖先种,演化趋势主要是面线由后颊类变为前颊类。*D. duyunensis* 的面线在个体发育过程中由早期的前颊类变为角颊类,直至最后的后颊类(Dai *et al.*,2017),而 *D. jianheensis* 在分节 4 期(M4)至成虫期(H)一直都是前颊类型面线,面线的演化保持了 *D. duyunensis* 分节期早期的类型。新种与 *D. paiwuensis* 的主要区别在于后者头部相对较为宽短,头鞍较为狭长,固定颊眼区较宽,胸部分节较少。目前在剑河地区"清虚洞组"尚未发现 *D. paiwuensis*。*Duyunaspis* 三个种之间的主要区别,见下表(表Ⅰ)。

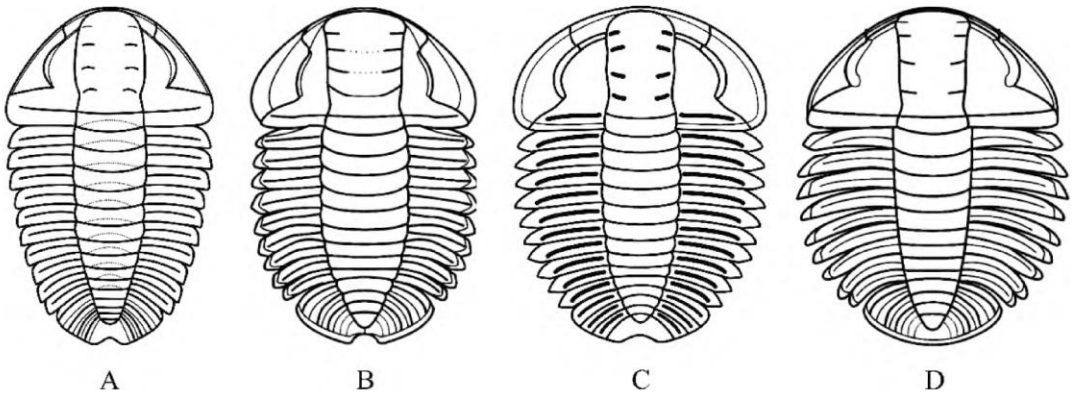


插图 6 *Duyunaspis jianheensis* sp. nov.,*Duyunaspis duyunensis* Zhang and Qian *in* Zhou *et al.*,1977 和 *Duyunaspis paiwuensis* Lei and Peng,2014 示意图

Reconstruction of *Duyunaspis jianheensis* sp. nov.,*Duyunaspis duyunensis* Zhang and Qian *in* Zhou *et al.*,1977 and *Duyunaspis paiwuensis* Lei and Peng,2014

A. *D. jianheensis* sp. nov.(据正模标本 Q52-562 进行复原),B. *D. duyunensis*(据雷倩萍、彭善池,2014),C. *D. duyunensis*(据 Dai *et al.*,2017),D. *D. paiwuensis*(据雷倩萍、彭善池,2014)

A. *D. jianheensis* sp. nov.(based on the holotype Q52-562),B. *D. duyunensis*(after Lei and Peng, 2014),C. *D. duyunensis*(after Dai *et al.*,2017),D. *D. paiwuensis*(after Lei and Peng, 2014)

表Ⅰ ***Duyunaspis jianheensis* sp. nov.,*Duyunaspis duyunensis* Zhang and Qian *in* Zhou *et al.*, 1977 和 *Duyunaspis paiwuensis* Lei and Peng,2014 对比表**

Comparison of *Duyunaspis jianheensis* sp. nov.,*Duyunaspis duyunensis* Zhang and Qian *in* Zhou *et al.*, 1977 and *Duyunaspis paiwuensis* Lei and Peng,2014

名称	*D. duyunensis*	*D. jianheensis*	*D. paiwuensis*
头部	头部半椭圆形	头部半椭圆形,略向前凸	头部扁、半椭圆形
	头鞍两侧近平形	头鞍中部明显膨大	头鞍长柱状,两侧近平行
	后颊类面线	前颊类面线	前颊类面线
胸节	10 个胸节	10 个胸节	9 个胸节
尾部	3 个轴环+1 个末叶	4 个轴环+1 个末叶	3 个轴环+1 个末叶

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

致谢　中国科学院南京地质古生物研究所彭善池研究员和雷澍老师对笔者的关心及对本文的修改提出宝贵意见,袁金良研究员对本文的关心,两位审稿人提出的宝贵意见及对文章深入、详细的修改,杨宇宁、陈婉怡及文荣琴帮助修改英文摘要,贵州大学古生物研究所研究生及剑河八郎村村民刘锋、刘泽福等参与化石的采集工作,在此一并致以衷心的感谢。

参 考 文 献 (References)

Blaker M R, Peel J S, 1997. Lower Cambrian trilobites from North Greenland. Meddr Grønland Geoscience, **35**: 1—145.

Chen Wan-yi(陈婉怡), Zhao Yuan-long(赵元龙), Yang Xing-lian(杨兴莲), Wen Rong-qin(文荣琴), 2017. *Tuzoia* Walcott, 1912 from the Cambrian "Tsinghsutung Formation" of Guizhou, China. Acta Palaeontologica Sinica(古生物学报), **56**(3): 301—311 (in Chinese with English abstract).

Dai Tao, Zhang Xing-liang, Peng Shan-chi, Yao Xiao-yong, 2017. Intraspecific variation of trunk segmentation in the oryctocephalid trilobite *Duyunaspis duyunensis* from the Cambrian (Stage 4, Series 2) of South China. Lethaia, **50**(4): 527—539.

Fu Xiao-ping(傅晓平), Wu Meng-yin(伍孟银), Zhao Yuan-long(赵元龙), Zhu Wei-hua(朱伟华), Yang Yu-ning(杨宇宁), 2012. Discovery of macroalgae from the Cambrian Tsinghsutung Formation of Guizhou. Acta Palaeontologica Sinica(古生物学报), **51**(1): 56—63(in Chinese with English abstract).

Lei Qian-ping(雷倩萍), 2016. Restudy on the *Arthricocephalus chauveaui* Bergeron, 1899 from the Cambrian Qiandongian in northwestern Hunan. Geological Journal of China Universities(高校地质学报), **22**(3): 494—501(in Chinese with English abstract).

Lei Qian-ping, 2016. New ontogenetic information on *Duyunaspis* Zhang and Qian in Zhou *et al*., 1977(Trilobita Corynexochida) from Cambrian and its possible sexual dimorphism. Alcheringa An Australasian Journal of Palaeontology, **40**(1): 12—23.

Lei Qian-ping(雷倩萍), Peng Shan-chi(彭善池), 2014. *Duyunaspis* Zhang and Qian in Zhou *et al*., 1977(Trilobita) from the Balang Formation (Cambrian, Qiandongia) in northwestern Hunan Province and its intraspecific variations. Acta Palaeontologica Sinica(古生物学报), **53**(3): 352—362(in Chinese with English abstract).

Liu Yu-juan(刘玉娟), Zhao Yuan-long(赵元龙), Liu Yu-ying(刘玉莹), Mao Yong-qin(毛永琴), 2015. A preliminary study of *Kutorgina* Billings, 1861 from Cambrian "Tsinghsutung Formation" of Guizhou, China. Acta Palaeontologica Sinica(古生物学报), **54**(3): 342—350(in Chinese with English abstract).

Luo Xiu-chun(罗绣春), Zhao Yuan-long(赵元龙), Peng Jin(彭进), Yang Yu-ning(杨宇宁), Pan Yong-jin(潘永金), 2014. A preliminary study of *Protoryctocephalus* Chow(Zhou) in Lu *et al*., 1974b from the Cambrian "Tsinghsutung Formation" of Guizhou, China. Acta Palaeontologica Sinica(古生物学报), **53**(3): 327—334(in Chinese with English abstract).

Luo Xiu-chun(罗绣春), Zhao Yuan-long(赵元龙), Wang Ping-li(王平丽), Yang Yu-ning(杨宇宁), Zhang Pei-xing(张培兴), Pan Yong-jin(潘永金), 2013. Dorpygidae trilobites from the Tsinghsutung Formation in Balang, Jianhe County, Guizhou Province. Journal of Guizhou University(贵州大学学报), **30**(3): 39—45 (in Chinese with English abstract).

McNamara K J, Yu Feng, Zhou Zhi-yi, 2006. Ontogeny and heterochrony in the oryctocephalid trilobite *Changaspis*, *Duyunaspis* and *Balangia* from China. Palaeontology, **49**(1): 1—19.

Peng Jin(彭　进), 2009. The Balang Fauna (Qiandongian, Cambrian) from Eastern Guizhou. Doctoral Dissertation. Nanjing: Nanjing University. 1—137(in Chinese).

Peng Shan-chi, Babcok L E, Zhu Xue-jian, Lei Qian-ping, Dai Tao, 2017. Revision of the oryctocephalid trilobite genera *Arthricocephalus* Bergeron and *Oryctocarella* Tomashpolskaya and Karpinski(Cambrian) from South China and Siberia. Journal of Paleontology, **91**(5): 933—959.

Peng Shan-chi(彭善池), Zhu Xue-jian(朱学剑), Babcok L E, Korovnicov I V, 2015. Restudy on the Genus *Arthricocephalus* (Cambrian): concept and synonyms. Guizhou Geology(贵州地质), **32**(2): 83—90(in Chinese with English abstract).

Sun Zong-yuan(孙宗元), Yang Xing-lian(杨兴莲), Zhao Yuan-long(赵元龙), Zheng Hao-lin(郑昊林), Zhu Ya-jie(朱雅杰), 2013. Exuviation of trilobite *Protoryctocephalus arcticus* from the Cambrian Tsinghsutung Formation of Guizhou. Acta Palaeontologica Sinica(古生物学报), **52**(2): 256—264(in Chinese with English abstract).

Wang Ming-kun(王铭坤), 2017. The Study of Cambrian Trilobites from the "Tsinghsutung Formation", Balang Village, Jianhe County, Guizhou Province. Master Dissertation, Guizhou: Guizhou University. 1—84(in Chinese).

Wang Ming-kun(王铭坤), Zhao Yuan-long(赵元龙), 2016. Ptychopariid trilobites from upper part of the "Tsinghsutung Formation"(Stage 4, Cambrian) at Balang village, Jianhe County, Guizhou Province. Acta Palaeontologica Sinica(古生物学报), **55**(2): 52—62(in Chinese with English abstract).

Wang Ming-kun(王铭坤), Zhao Yuan-long(赵元龙), Luo Xiu-chun(罗绣春), Chen Wan-yi(陈婉怡), 2016. *Olenoides* Meek, 1877 from the "Tsinghsutung Formation" at Balang, Jianhe County, Guizhou Province. Geological Journal of China Universities(高校地质学报), **22**(3): 486—493 (in Chinese with English abstract).

Wang Ming-kun(王铭坤), Zhao Yuan-long(赵元龙), Zhang Pei-xing(张培兴), Liu Feng(刘　峰), Liu Ze-fu(刘泽福), 2014. The study of *Balangcunaspis* from the Cambrian "Tsinghsutung Formation" of Balang District, Jianhe County, Guizhou Province, China. Journal of Guizhou University(贵州大学学报), **31**(5): 36—39(in Chinese with English abstract).

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Wang Yuan(王 圆), Yang Xing-lian(杨兴莲), Zhao Yuan-long(赵元龙), Duan Xiao-lin(段晓林), 2017. A preliminary study of sponge fossils from the Cambrian "Tsinghsutung Formation" of Guizhou, China. Acta Palaeontologica Sinica(古生物学报), **56**(2): 176—188(in Chinese with English abstract).

Whittington H B, 1995. Oryctocephalid trilobites from the Cambrian of North America. Palaeontology, **38**: 543—562.

Yan Qiao-jie(闫巧洁), Peng Jin(彭 进), Zhao Yuan-long(赵元龙), Wen Rong-qin(文荣琴), Sun Hai-jing(孙海静), 2014. Restudy of sedimentary and biostratigraphy of the Qiandongian (Cambrian) Balang Formation at Jianhe, Guizhou, China——Example for Jiaobang Section of the Balang Formation. Geological Review(地质论评), **60**(4): 893—902(in Chinese with English abstract).

Yang Xing-lian(杨兴莲), Zhao Yuan-long(赵元龙), Peng Jin(彭进), Yang Yu-ning(杨宇宁), Yang Kai-di(杨凯迪), 2010. Discovery of oryctocephalid trilobites from the Tsinghsutung Formation(Duyun Stage, Qiandong Series, Cambrian), Jianhe County, Guizhou Province. Geological Journal of China Universities(高校地质学报), **16**(3): 309—316(in Chinese with English abstract).

Yang Yu-ning(杨宇宁), Zhao Yuan-long(赵元龙), Peng Jin(彭进), Yang Xing-lian(杨兴莲), 2012. *Oelandiella* from the Cambrian "Tsinghsutung Formation" of Jianhe County, Guizhou. Acta Palaeontologica Sinica(古生物学报), **51**(3): 308—319(in Chinese with English abstract).

Yin Gong-zheng(尹恭正), Li Shan-ji(李善姬), 1978. Trilobita. *In*: Stratigraphical and Palaeontological Working Group of Guizhou Province(贵州地层古生物工作队)(ed.), Palaeotological Atlas of Southwest China, Guizhou Province(1). Beijing: Geological Publishing House. 385—595(in Chinese).

Yuan Jin-liang, Jorge E, 2015. The earliest species of *Burlingia* Walcott, 1908(Trilobita) from South China: Biostratigraphical and palaeogeographical significance. Geological Magazine, **152**(2): 358—366.

Yuan Jin-liang, Ng T W, 2014. Tentative correlation of the Duyunian (Cambrian Series 2, Stage 4) and the Taijiangian (Cambrian Series 3, Stage 5) between South China and the Mediterranean region. GFF, **136**(1): 314—319.

Yuan Jin-liang, Zhu Xue-jian, Lin Jin-pai, Zhu Mao-yan, 2011. Tentative correlation of Cambrian Series 2 between South China and other continents. Bulletin of Geosciences, **80**(3): 397—404.

Zhang Wen-tang(张文堂), Lu Yan-hao(卢衍豪), Zhu Zhao-ling(朱兆玲), Qian Yi-yuan(钱义元), Lin Huan-ling(林焕令), Zhou Zhi-yi(周志毅), Zhang Sen-gui(章森桂), Yuan Jin-liang(袁金良), 1980. Cambrian Trilobite Fauna of Southwestern China. Beijing: Science Press. 1—479(in Chinese).

Zhang Yuan(张 源), Zhao Yuan-long(赵元龙), Jiang Zong-kai(蒋宗凯), Chen Wan-yi(陈婉怡), 2016. Discovery of Scenella from Tsinghsutung Formation (Qiandongian Series, Cambrian) in Balang village of Jianhe County, Guizhou Province, China. Journal of Guizhou University(贵州大学学报), **33**(4): 34—37(in Chinese with English abstract).

Zhao Yuan-long, Peng Jin, Yuan Jin-liang, Babcock L E, Guo Qing-jun, Yin Lei-ming, Yang Xing-lian, Tai Tong-shu, Wang Chun-jiang, Lin Jin-bai, Gaines R R, Sun Hai-jing, Yang Yu-ning, 2012. Discussion of candidate stratotypes for the GSSP defining the conterminous base of Cambrian provisional Series 2 and Stage 5. Journal of Guizhou University, **29**(Suppl. 1): 35—48.

Zhao Yuan-long, Yuan Jin-liang, Jorge E, Wang Ming-kun, 2017. The trilobite biostratigraphy of the Balang and "Tsinghsutung" Formation, Cambrian Series 2, Stage 5 from South China and its correlation significance (Trilobite zonation from the Cambrian Series 2 of South China). *In*: Yang Qun, Reitner J, Wang Yong-dong, Reich M (eds.), Critical Intervals in Earth History: Palaeobiological Innovations. Abstract Volume of the 2nd Joint Conference of the Palaeontological Society of China and the Paläontologische Gesellschaft. Hefei: University of Science and Technology of China Press. 496—497.

Zhou Tian-mei(周天梅), Liu Yi-ren(刘义仁), Meng Xian-song(孟宪松), Sun Zheng-hua(孙正华), 1997. Trilobita. *In*: Hubei Institite of Geological Sciences(湖北省地质科学研究所), Geological Bureau of Henan Province(河南省地质局), Geological Bureau of Hubei Province(湖北省地质局) *et al*.(eds.), Palaeontological Atlas of Central and Southern China(1): Early Palaeozoic. Beijing: Geological Publishing House. 104—266(in Chinese).

DUYUNASPIS ZHANG AND QIAN *IN* ZHOU *ET AL*., 1977(TRILOBITA) FROM THE "TSINGHSUTUNG FORMATION" (SERIES 2, STAGE 4) OF EASTERN GUIZHOU, SOUTH CHINA

CHEN Zheng-peng[1)], ZHAO Yuan-long[1)], YANG Xing-lian[1)] and WANG Ming-kun[1,2)]

1) *College of Resources and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang* 550025, *zhaoyuanlong@126.com*;
2) *Institute of Mountain Resources, Guizhou Academy of Science, Guiyang* 550001, *China*

Key words *Duyunaspis*, trilobite, "Tsinghsutung Formation", Cambrian, Jianhe County

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Abstract

A new oryctocephalid species *Duyunaspis jianheensis* sp. nov. is described from the Cambrian "Tsinghsutung Formation" (Series 2, Stage 4) at Songshan, Jianhe, eastern Guizhou, South China, revealing that the genus *Duyunaspis* ranges up from the slightly older Balang Formation (Cambrian Stage 4). The Balang Formation is widely exposed in the border area between eastern Guizhou and western Hunan and is dominated by oryctocephalids including *Duyunaspis*. *Duyunaspis jianheensis* sp. nov. is characterized by having a glabella that is more or less expanded at its mid-lengtha, a proparian suture, and a thorax with 10 segments in holaspids. Detailed exploration of ontogeny of *D. jianheensis* sp. nov. shows that the new species seems to be a descendent of *Duyunaspis duyunensis* of the Balang Formation.

SYSTEMATIC PALAEONTOLOGY

Order Corynexochida Kobayashi, 1935

Family Oryctocephalidae Beecher, 1897

Subfamily Oryctocarinae Hupé, 1953

Genus *Duyunaspis* Zhang and Qian *in* Zhou *et al.*, 1977

Type species *Duyunaspis duyunensis* Zhang and Qian *in* Zhou *et al.*, 1977

***Duyunaspis jianheensis* sp. nov.**

(Text-figs. 3)

Etymology After the Jianhe County, from where the fossils were collected.

Materials A total of 205 complete specimens from the same quarry, all are exoskeletons.

Holotype Q52-562, complete exoskeletons from the "Tsinghsutung Formation" at Balang village, Jianhe County, Guizhou.

Diagnosis Cephalon semi-elliptical, glabella more or less expanded at its mid-length; proparian suture; thorax with ten segments; and posterior margin of pygidium with broad indentation medially.

Description Exoskeleton oval in outline. Anterior border extremely narrow (sag.), of slightly convexity, defined by deeply border furrow. Glabella large, relatively wide (tr.), more or less expanded at mid-length; with four pairs of pit-like glabellar furrows, and not extending to dorsal furrows and not connected by transglabellar furrows; S4 short and faint. Occipital furrow deep and straight, pit-like on both ends. Eye ridge distinct, extending backward obliquely. Palpebral lobe large, crescentic in outline, extending between S1 and S3. Facial suture proparian with anterior branche short and slightly divergent anteriorly and posterior branch extending slightly obliquely outward, cutting lateral margin. Posterior border furrow deep, extending outward and slightly forward. Fixigenal narrow (sag.), about one-third of glabella width. Thorax with ten segments with axis rings wider than pleura. Pygidium small, tapering posteriorly and having an indentation at posterior margin medially.

?1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1000-0569/2018/034(04)-1154-74　　*Acta Petrologica Sinica*　岩石学报

华北克拉通五台地区 2.2～2.1Ga 花岗岩的成因与构造背景*

杜利林[1]　杨崇辉[1]　宋会侠[1]　赵磊[2]　路增龙[1]　李伦[1,3]　王涛[1]　任留东[1]

DU LiLin[1], YANG ChongHui[1], SONG HuiXia[1], ZHAO Lei[2], LU ZengLong[1], LI Lun[1,3], WANG Tao[1] and REN LiuDong[1]

1. 中国地质科学院地质研究所，北京　100037
2. 中国科学院地质与地球物理研究所，北京　100029
3. 中国地质大学地球科学与资源学院，北京　100083

1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*
2. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*
3. *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*

2017-12-01 收稿，2018-03-02 改回.

Du LL, Yang CH, Song HX, Zhao L, Lu ZL, Li L, Wang T and Ren LD. 2018. Petrogenesis and tectonic setting of 2.2～2.1Ga granites in Wutai area, North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 34(4):1154－1174

Abstract　2.2～2.0Ga magmatism widely occurs in the Trans-North China Orogen (TNCO), which is vital for unveiling the Paleoproterozoic tectonic evolution on the North China Craton (NCC). This paper presents the whole rock geochemical data, zircon U-Pb ages and Hf isotopes of Paleoproterozoic Dawaliang, Wangjiahui and Lianhuashan granitoids in Wutai area. SHRIMP U-Pb zircon dating of Dawaliang porphyritic granite sample yields an age of 2170±17Ma. One sample from Wangjiahui monzonitic granitic gneiss obtains a LA-ICPMS zircon U-Pb age of 2101±6Ma, and 3 samples from Lianhuashan granite gets zircon U-Pb ages of 2117±6Ma, 2110±4Ma and 2143±15Ma, respectively. Dawaliang granite is high in SiO_2 and K_2O+Na_2O, low in CaO, and enriched in REEs (except Eu), Zr, Nb, Ga and Y, and depleted in Sr. Meanwhile, all samples of Dawaliang granite have high Ga/Al values and Zr+Nb+Y+Ce contents with whole rock zircon saturation temperature as high as 876～986℃, which is identical with the features of the A-type granite. Wangjiahui and Lianhuashan granites enrich in SiO_2, K_2O and Na_2O, and deplete in MgO and CaO, on the other hand, the granites show minor to intensive differentiation on REEs with obviously negative Eu abnormity. Three plutons (Dawaliang, Wangjiahui and Lianhuashan granites) have high Nb and Y concentrations, so they show the features of post-collision and within plate granite. Zircon $\varepsilon_{Hf}(t)$ values in all samples are lower than that in depleted mantle, and meanwhile, one and two stage Hf model ages are 2.4～2.6Ga and 2.45～2.75Ga, respectively, which are much older than the zircon U-Pb ages of the granites. Combining petrology, geochemistry and isotope in the samples, we propose that the Paleoproterozoic granites are derived from the partial melting by the Late Archean TTG gneisses under the extensional environment. Considering the 2.2～2.0Ga magmatism along the TNCO exhibits two stages of 2.2～2.1Ga and 2.1～2.0Ga in different regions, in which 2.2～2.1Ga magma represent the early stage and some granites at this stage show the features of A-type granite and form the bimodal magmatic assemblages with the coeval mafic rocks. Therefore, we deduce that the middle of Paleoproterozoic magmatism is related with the intracontinental rift in the NCC.

Key words　2.2Ga to 2.1Ga granites; Zircon U-Pb age; Geochemistry; Zircon Hf isotope; Intracontinental rift; Wutai area

摘　要　华北克拉通中部造山带内古元古代中期(2.2～2.0Ga)岩浆活动较为广泛,对探讨华北古元古代地质演化过程具有十分重要的意义。本文选择了五台地区古元古代大洼梁、王家会和莲花山花岗岩进行了地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素研究。大洼梁似斑状花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 2170±17Ma,王家会二长花岗质片麻岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄结果为 2101±6Ma,3 个莲花山花岗岩的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄结果分别为 2117±6Ma、2110±4Ma 和 2143±15Ma。大

* 本文受国家自然科学基金项目(41172171、41772191、41572175)、中国地质调查局地质调查项目(DD20160121-04)和科技部基础性工作专项(2015FY310100)联合资助.

第一作者简介：杜利林,男,1973 年生,研究员,从事前寒武纪地质研究,E-mail: dulilin7310@cags.ac.cn

洼梁花岗岩高 SiO_2、富 K_2O+Na_2O,低 CaO,稀土元素含量较高(Eu 除外),Zr、Nb、Ga 和 Y 等高场强元素含量也较高,而 Sr 含量极低;同时 Ga/Al 比值和 Zr+Nb+Y+Ce 总量高,全岩 Zr 饱和温度高达 876~968℃。该花岗岩体具有 A 型花岗岩的特征。王家会花岗岩和莲花山花岗岩样品也具有高硅、富碱和低镁钙特征,稀土元素具有弱到较强烈的分异,Eu 负异常明显。3 个花岗岩岩体微量元素都具有较高的 Nb 和 Y 值,因此具有后碰撞到板内花岗岩特征。所有花岗岩样品中锆石的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值均远低于同期亏损地幔值,同时单阶段和两阶段模式年龄为 2.4~2.6Ga 和 2.45~2.75Ga,明显大于花岗岩的成岩时代。这些花岗岩与五台地区新太古代晚期 TTG 质片麻岩具有相似的锆石 Hf 模式年龄。因此,结合岩石学、地球化学和同位素特征,本文倾向于认为古元古代花岗岩为新太古代 TTG 质片麻岩在伸展条件下部分熔融形成的。综合资料发现,华北克拉通中部带内 2.2~2.0Ga 岩浆事件不同地区表现有分带性。2.2~2.1Ga 岩浆活动代表较早的阶段,其中部分花岗质岩石具有 A 型花岗岩特征,与同期的基性岩形成双峰式组合,推断其与华北克拉通古元古代中期陆内裂谷有关。

关键词 2.2~2.1Ga 花岗岩;锆石 U-Pb 年龄;地球化学;锆石 Hf 同位素;陆内裂谷;五台地区

中图法分类号 P588.121; P597.3

华北克拉通是中国三大克拉通之一,也是世界最古老的一个克拉通(图 1)。克拉通内部广泛出露太古宙—古元古代基底岩系,其中最老的岩石记录可以追溯到鞍山地区 3.8Ga 的片麻岩(Liu *et al.*, 1992; Song *et al.*, 1996; Wan *et al.*, 2013a),并经历了长期而复杂的演化历史。已有的研究认为,华北克拉通在古太古代已开始形成陆核,而后经历不同时期、不同规模的拼合形成规模较大的陆块(沈其韩和钱祥麟,1995;陆松年等,1996;耿元生等,1997;李江海等,1997;伍家善等,1998;Zhai and Liu, 2003),这些陆块通过古元古代晚期吕梁运动拼合在一起,形成了最终的华北克拉通(伍家善等,1998;Zhai and Santosh, 2011, 2013; Zhao *et al.*, 2005, 2012; Zhao and Zhai, 2013)。然而,对于华北克拉通新太古代-古元古代基底构造划分和演化过程还存在着不同的认识(Kusky and Li, 2003; Li and Kusky, 2007; Zhai and Santosh, 2011; Zhao *et al.*, 2005, 2012)。一些学者认为,华北克拉通由几个微陆块在太古宙拼合而成,之后在 2.35~

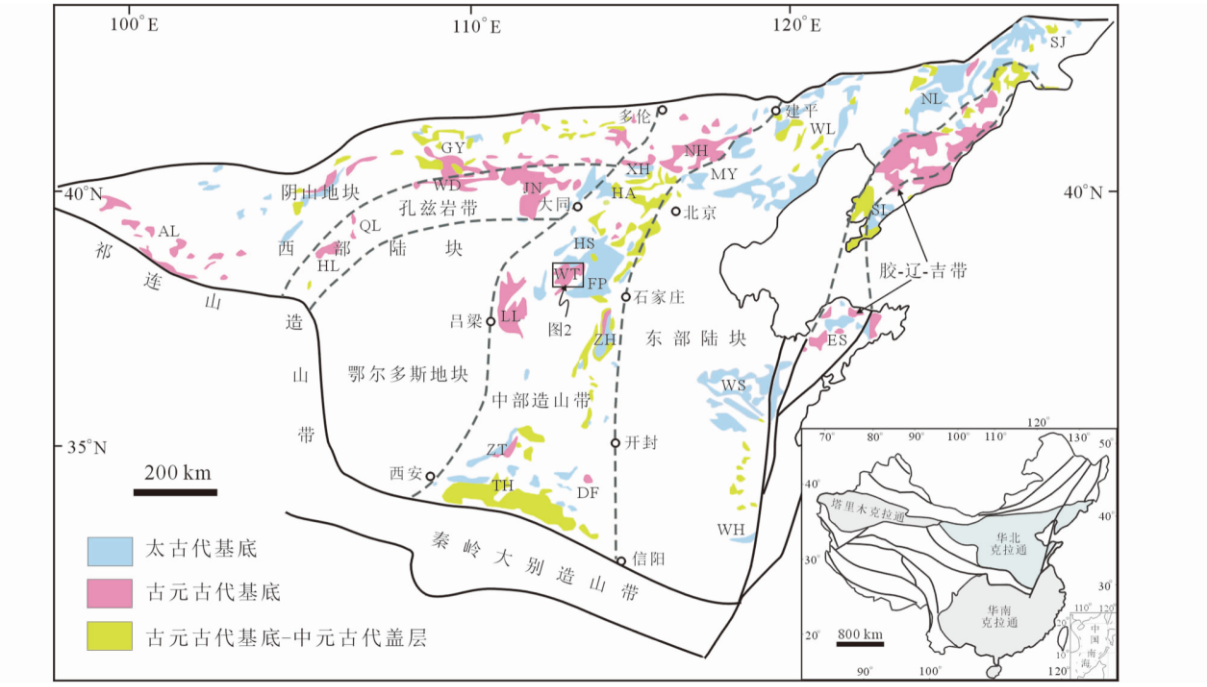


图 1 华北克拉通基底分布及陆块划分图(据 Zhao *et al.*, 2005)

TH-太华;DF-登封;ZT-中条;ZH-赞皇;LL-吕梁;FP-阜平;WT-五台;HS-恒山;HA-怀安;XH-宣化;NH-冀北;WH-五河;WS-鲁西;ES-胶东;SL-辽南;NL-辽北;SJ-吉南;JN-集宁;WD-乌拉山-大青山;GY-固阳;QL-千里山;HL-贺兰山;AL-阿拉善

Fig. 1 Basement distribution and tectonic subdivision of the North China Craton (after Zhao *et al.*, 2005)

The abbreviation of the metamorphic complexes: TH-Taihua; DF-Dengfeng; ZT-Zhongtiao; ZH-Zanhuang; LL-Lvliang; FP-Fuping; WT-Wutai; HS-Hengshan; HA-Huaian; XH-Xuanhua; NH-Northern Hebei; WH-Wuhe; WS-Western Shandong; ES-Eastern Shandong; SL-Southern Liaoning; NL-Northern Liaoning; SJ-Southern Jilin; JN-Jining; WD-Wulashan-Daqingshan; GY-Guyang; QL-Qianlishan; HL-Helanshan; AL-Alxa

1.97Ga 沿着克拉通内部的丰镇、辽-吉和晋豫活动带先后经历了裂谷、增生及碰撞过程,并在 1.95 ~ 1.82Ga 完成华北最终的克拉通化并进入伸展阶段(Zhai and Santosh, 2011)。部分研究者将华北克拉通划分为东部陆块、西部陆块和中部造山带(Central Orogenic Belt),并认为东部陆块向西部陆块俯冲,两者在 2.5Ga 发生碰撞拼合,之后古元古代早期(2.5 ~ 2.4Ga)伸展形成一系列陆内裂谷(Kusky and Li, 2003; Li and Kusky, 2007)。目前,以 Zhao *et al.* (1999a, b, 2005, 2012)提出的华北克拉通陆块划分方案及构造演化模式影响最为广泛。Zhao *et al.* (1999a, b)将华北克拉通划分为东部陆块、西部陆块和连接两者的中部造山带(Trans-North China Orogen),之后进一步将西部陆块划分为鄂尔多斯地块、阴山地块和古元古代孔兹岩带,同时在东部陆块划分出胶-辽-吉带(Zhao *et al.*, 2005)。西部陆块由鄂尔多斯地块和阴山地块在 2.0 ~ 1.9Ga 沿孔兹岩带拼合而成,而东部陆块在 2.2 ~ 1.9Ga 沿胶-辽-吉带经历了裂谷及其闭合过程,最终东、西陆块沿中部造山带在古元古代晚期(1.85 ~ 1.8Ga)形成稳定的克拉通(Zhao *et al.*, 2005, 2010, 2012)。在这三种演化模式中,华北克拉通中部造山带(晋豫活动带)古元古代演化过程是争议的焦点之一。因此,研究中部造山带中古元古代地质事件的性质,对探究华北克拉通地质演化过程具有非常重要的意义。

中部造山带是一条长 1200km、宽约 300km 的近南北向的构造带(图 1),可能经历了 2.5 ~ 1.85Ga 长达 700Myr 的俯冲-汇聚过程(Zhao *et al.*, 1999a, b, 2005, 2008, 2010, 2012)。近年来,虽然一些研究者通过五台、阜平和赞皇杂岩构造变形特征及五台、阜平杂岩中古元古代侵入体的地球化学特征,提出中部造山带中可能存在 2.1Ga 碰撞造山过程(Liu *et al.*, 2005; Faure *et al.*, 2007; Trap *et al.*, 2009, 2012; Wang *et al.*, 2010, 2013)。然而,一些学者通过中部造山带古元古代沉积岩和岩浆岩的岩石组合、年代学与地球化学研究认为,2.2 ~ 2.0Ga 的岩浆事件形成于裂谷环境(杜利林等,2009,2011,2012;杨崇辉等,2011a;赵瑞幅等,2011; Du *et al.*, 2010, 2013, 2015, 2016a, b, 2017; Peng *et al.*, 2012, 2017a; Zhang *et al.*, 2011; Xie *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2014; Zhou *et al.*, 2014, 2015)。中部造山带内古元古代 2.45 ~ 1.9Ga 岩浆活动在不同地区陆续被发现,其中较早期 2.4 ~ 2.3Ga 的岩浆记录仅在登封、太华、中条、吕梁和恒山地区有少量分布(Kröner *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2008; Diwu *et al.*, 2014; Huang *et al.*, 2012;孙大中等,1991;耿元生等,2006;第五春荣等,2007;黄道袤等,2012;杨崇辉等,2015)。大量的年代学资料表明,2.2 ~ 2.0Ga 的岩浆事件在中部造山带内广泛分布(Du *et al.*, 2016a 及其中文献; Peng *et al.*, 2017a)。在五台地区,前人仅对王家会花岗岩和黄金山花岗斑岩进行过较详细的地球化学和年代学研究(Wilde *et al.*, 2004a;王月然等,2005;Du *et al.*, 2013),其他 2.2 ~ 2.1Ga 的侵入体并未开展较系统的工作。鉴于此,本文拟选取五台地区大洼梁花岗岩、王家会花岗岩和莲花山花岗岩进行岩石学、地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素研究,结合同期火山岩和沉积记录,以期对五台地区乃至华北克拉通中部造山带古元古代中期构造环境做进一步限定。

1 地质背景

五台地区位于华北克拉通中部、“中部造山带”中段(Zhao *et al.*, 2012)。区内出露的早前寒武纪岩石单元主要为新太古代五台群、新太古代花岗岩类、古元古代滹沱群及零星分布的古元古代花岗岩。区域东部出露的阜平杂岩以龙泉关剪切带与五台杂岩呈构造接触,北边出露的恒山杂岩与五台杂岩之间被第四系沉积盖层分隔(图 2)。其中新太古代五台群和同时代花岗质片麻岩组成华北克拉通新太古代晚期典型的花岗绿岩带之一(伍家善等,1998;Zhai and Santosh, 2011)。

根据五台群内部的两个不整合面(甘泉不整合和探马石不整合),不整合面上、下地层岩石组合及变质程度不同,白瑾(1986)将五台群地层自下而上划分为石咀、台怀和高凡亚群。石咀亚群包括板峪口组、金刚库组、庄旺组和文溪组,主要岩性为斜长角闪岩、角闪变粒岩和黑云变粒岩,底部为长石石英岩、黑云变粒岩和透闪石大理岩,在金刚库组和文溪组中夹有磁铁石英岩层,总体是一套角闪岩相变质的火山-沉积岩系(白瑾,1986)。台怀亚群由柏枝岩组和鸿门岩组组成,主要岩石组合为绢云石英片岩、绿泥石英片岩、磁铁石英岩及变质砂砾岩,偶见大理岩和石英岩夹层,主体为一套绿片岩相的变质火山岩组合,其中柏枝岩组中磁铁石英岩是五台地区重要的含矿层位(白瑾,1986)。较新的地层方案将高凡亚群划分为张仙堡、磨河和鹞口前组,中、下部的岩石组合为石英岩、变质粉砂岩和千枚岩,顶部为变质基性火山岩,火山岩相顶部气孔和杏仁构造十分发育,该套地层是经历了低绿片岩相变质的碎屑沉积-火山岩组合(田永清,1991)。田永清(1991)根据五台地区 1∶5 万填图资料,认为原划为石咀和台怀亚群之间的甘泉不整合面实际代表滹沱群和五台群之间界面,据此将石咀和台怀亚群合并成为五台群下亚群,并命名为石咀亚群,而保留的高凡亚群为上亚群。Liu *et al.* (1985)根据五台群不整合于兰芝山花岗岩(2560Ma ± 9Ma)和五台群上部石英角斑岩的时代(2522 ± 17Ma),限定五台群的时代为 2560 ~ 2520Ma。Wilde *et al.* (2004a)进一步从五台群三个不同亚群中获得中-酸性火山岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 2533 ~ 2513Ma。据此提出五台群所属三个亚群尽管变质程度不同,但之间并不存在上下层序关系,而是后期构造变形叠置在一起的(Wilde *et al.*, 2004a)。最近几年,五台群高凡亚群的研究取得了许多重要进展。Wan *et al.* (2010)在高凡亚群石英岩中获得最年轻碎屑锆石年龄为 2.47 ± 0.03Ga,认为这套地层代表了华北古元古界最老地层之一。Liu *et al.* (2016)根据高凡亚群中最年轻碎屑锆石

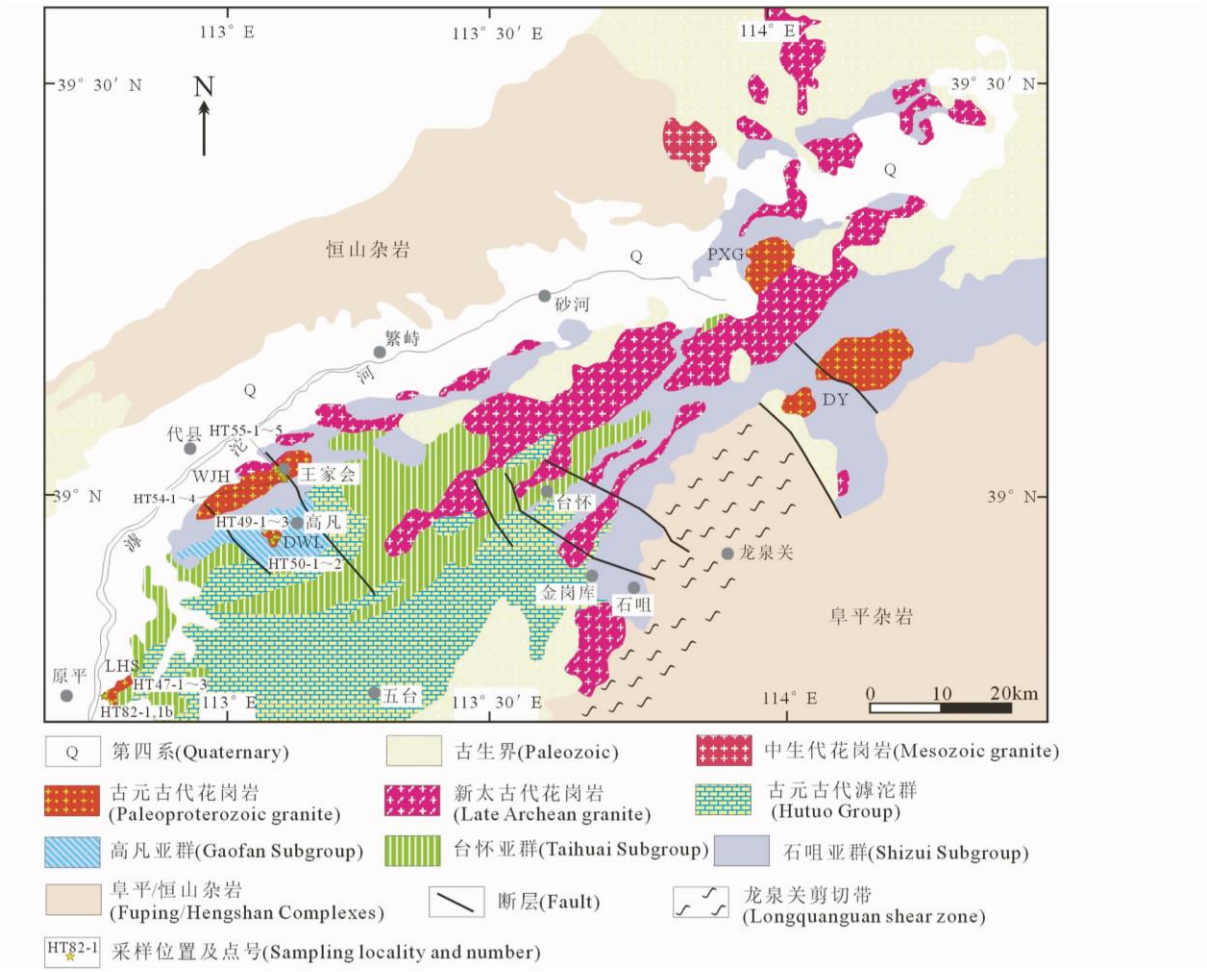


图 2 五台杂岩地质简图(据 Wilde *et al.*, 2004a)

LHS-莲花山花岗岩;WJH-王家会二长花岗片麻岩;DWL-大洼梁花岗岩;DY-独峪花岗岩;PXG-平型关花岗岩

Fig. 2 Geological sketch map of the Wutai Complex (after Wilde *et al.*, 2004a)

LHS-Lianhuashan granite; WJH-Wangjiahui monzonitic granitic gneiss; DWL-Dawaliang granite; DY-Duyu granite; PXG-Pingxingguan granite

(2348Ma)和 2176 ~ 2161Ma 花岗质侵入体时代,进一步限定高凡亚群的时代为 2.35 ~ 2.18Ga。Peng *et al.* (2017b)从高凡亚群磨河组变质火山凝灰岩中获得锆石 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄为 2186 ±6Ma,同时结合碎屑锆石年龄结果和滹沱群(2140 ±14Ma;Du *et al.*, 2010)的时代,认为高凡亚群的时限为 2350 ~ 2150Ma。

除兰芝山花岗岩和部分峨口花岗岩为钾质-二长花岗岩外,五台地区新太古代花岗岩主体为 TTG 质片麻岩,形成时代为 2560 ~ 2513Ma(Liu *et al.*, 1985, 2004; Wilde *et al.*, 2005)。根据花岗岩的侵位时代,五台地区 TTG 片麻岩可以分为两个阶段:早期阶段包括峨口和部分车厂-北台花岗岩,侵位时代为 2560 ~ 2540Ma;晚期阶段有石佛、光明寺和王家会灰色相花岗岩(1∶25 万忻州幅改称为义兴寨片麻岩),形成时代为 2540 ~ 2513Ma。地球化学和 Nd 同位素指示这些片麻岩是俯冲板片或交代的地幔楔部分熔融形成的(Liu *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2004)。该期花岗岩与五台群地层多呈构造接触关系(田永清,1991)。

滹沱群主要分布于山西五台山台怀-士集(四集庄)一线以南,石咀-定襄一线以北,东起台山河上游,西至原平奇村一带,总面积约 1500km^2。在五台山北坡代县滩上到原平白石一带出露约 200km^2,繁峙县中台等地也有零星分布(图 2;白瑾,1986)。滹沱群与下伏五台群和新太古代片麻岩为不整合接触关系。地层内部保留有波痕、斜层理和交错层理等原始沉积构造,上下层序关系清楚。滹沱群自下而上被划分为豆村亚群、东冶亚群和郭家寨亚群(白瑾,1986)。下部的豆村亚群以陆源碎屑沉积岩为主,底部为厚层-巨厚层的四集庄组砾岩,顶部出现玄武岩(刘定寺变火山岩)。东冶亚群底部以紫红色砂岩/板岩为主夹少量石英砂岩,之后以砂岩

与碳酸盐岩交互沉积为特征,碳酸盐岩中叠层石普遍发育。东冶亚群中下部的河边村组顶部发育有标志性的玄武岩层(马头口变火山岩)。该亚群中上部以厚层的碳酸盐岩沉积为主,顶部出现少量的变泥质岩。郭家寨亚群明显地不整合于东冶亚群之上,沉积序列自下而上为粉砂岩→砂岩→砾岩,其中砾岩中砾石主要为白云岩和砂岩,白云岩砾石中可见叠层石,因而郭家寨亚群顶部砾岩应来自于下伏滹沱群地层(Du *et al.*, 2017)。伍家善等(1986)从豆村亚群青石村组变质玄武岩中获得 TIMS 单颗粒锆石 U-Pb 为 2366 + 103/-94Ma,限定滹沱群初始沉积时代为 2.4 ~ 2.3Ga。大量火山岩和碎屑沉积岩锆石 U-Pb 年龄结果共同限定滹沱群的底界时代约为 2.2Ga(Wilde *et al.*, 2004b; Du *et al.*, 2010, 2017; Liu *et al.*, 2011; 杜利林等,2011, 2015)。根据郭家寨亚群与豆村、东冶亚群的不整合关系及上、下地层明显不同的沉积组合和序列,伍家善等(2008)和杜利林等(2011)认为郭家寨亚群应从滹沱群中独立出来,单独命名为郭家寨群;并进一步限定其时代为 1.9 ~ 1.8Ga(Du *et al.*, 2017)。

2 2.2 ~ 2.1Ga 花岗岩

早期研究认为五台地区花岗质岩石主体为新太古代 TTG 片麻岩和少量二长花岗质片麻岩(白瑾,1986; Liu *et al.*, 2004; Wilde *et al.*, 2005)。但近年来的资料表明,五台地区广泛分布 2.2 ~ 2.1Ga 的花岗岩,从西到东出露的岩体有莲花山花岗岩、凤凰山花岗岩、王家会花岗岩、黄金山花岗斑岩、大洼梁花岗岩、蒋村石英斑岩和独峪花岗岩(白瑾,1986;王凯怡和 Wilde, 2002; Wilde *et al.*, 2005; Du *et al.*, 2013; 杜利林等,2015)。该期花岗质岩浆活动主要以小岩株状侵位于五台群和/或新太古代片麻岩中,单个岩体规模不大,但岩体分布范围较广(图 2;白瑾,1986);与滹沱群的关系多呈构造接触关系,局部作为滹沱群底部砾岩的物质源区之一(杜利林等,2015;Du *et al.*, 2017)。岩性以二长花岗岩为主,部分为碱性花岗岩,并表现为 A 型花岗岩的地球化学特征(白瑾,1986;Du *et al.*, 2013)。除此之外,区域内滹沱群中出露有同期的基性火山岩和辉绿岩岩席(Peng *et al.*, 2005; Du *et al.*, 2010, 2015)。

3 野外地质与岩石学特征

大洼梁花岗岩出露于代县滩上镇掌寺村西大洼梁。岩体平面上近似心形,出露面积约 3km^2。围岩为高凡亚群变质粉砂岩、千枚岩和长石石英岩。岩体侵位于围岩地层中,但在岩体与围岩接触带附近,两者皆表现为强烈的变形而呈构造接触特征(图 3a)。花岗岩岩体露头上呈灰白色,块状构造,边缘相具片麻状构造,似斑状-斑状结构,斑晶主要为钾长石(10% ~ 15%)、钠长石(5% ~ 10%),斑晶粒度 1 ~ 2cm,另外可见少量石英斑晶(图 3b)。基质为细粒结构,主要组成为他形斜长石、条纹长石和石英,同时可见细小鳞片状黑云母充填在长英质矿物颗粒间,还有少量细鳞片状白云母出现,部分由斜长石蚀变而来;副矿物主要为磁铁矿(图 3c)。

王家会花岗岩位于五台山北坡王家会一带,平面上呈北东-南西向展布的花岗岩体,出露面积约 55km^2(白瑾,1986)。岩体侵入五台群石咀亚群金刚库组和新太古代晚期义兴寨灰色片麻岩(曾称为王家会灰色相花岗岩)(图 3d),同时可见其被后期的辉绿岩墙切割(图 3e)。王家会花岗岩岩性为黑云母二长花岗质片麻岩,野外露头呈浅粉红色,片麻状构造,中粗粒结构,局部可见变余似斑状结构。主要矿物组合为微斜条纹长石、斜长石、石英和黑云母,白云母少量,副矿物为绿帘石、榍石、锆石和磁铁矿(图 3f)。

莲花山花岗岩出露于原平市东滹沱河东岸莲花山一带,岩体北东长 5km,北西宽 2.5km,露头面积约 8km^2。岩体东侧侵入于五台群台怀亚群绿泥石英片岩中,其他三面为第四系覆盖(白瑾,1986)。莲花山花岗岩在露头上可以观察到三种岩相:第一种为斑状结构的花岗岩,露头上呈灰白色,斑晶主要为斜长石,粒度 0.5 ~ 1cm,含量 5% ~ 10%,基质为细粒-隐晶质结构,主要组成矿物为微斜条纹长石、斜长石和石英,含少量的黑云母和白云母,副矿物主要为磁铁矿。第二种为似斑状结构的花岗岩,露头上也呈灰白色,斑晶主体为微斜条纹长石,含少量斜长石,粒度 1 ~ 1.5cm,含量 25% ~ 35%,基质为中-细粒结构,主要组成矿物为微斜条纹长石、斜长石和石英,含少量黑云母,黑云母绿泥石化较强烈,副矿物为磁铁矿、锆石和褐帘石(图 3g)。斑状结构的花岗岩斑晶含量较少,基质粒度更细,但与似斑状结构花岗岩之间无明显的界限,两者间呈过渡出现。第三种为较均匀的中-细粒花岗岩,露头上呈灰白色-浅粉红色,块状构造,中-细粒结构,主要组成矿物为微斜条纹长石、斜长石、石英和黑云母,白云母少量,部分是由斜长石蚀变而成,副矿物主要为磁铁矿(图 3h)。局部可见中细粒花岗岩呈包体赋存于似斑状花岗岩中(图 3i),而在似斑状花岗岩中后期钾质伟晶岩脉较为常见。

4 分析方法

全岩粉末样品的制备由河北省区域地质矿产调查研究所完成。选取 300 ~ 500g 新鲜的岩石样品利用颚式破碎机破碎后,用粉碎机将样品碎块粉碎研磨至 200 目以下,取其中 30 ~ 50g 以备全岩化学分析。全岩主、微量元素分析在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成。先将粉末样品熔制成玻璃饼后,利用 X 荧光光谱仪(XRF,Rigaku-2100)测定主量元素,分析误差 <0.5%。微量元素测试时,先用 Teflon 罐称取粉末样品后,加入高纯度 HNO_3 和 HF 充分溶解后蒸干,然后加入 1% 的高纯度 HNO_3 后,在电感耦合等离子体质谱(ICP-MS,Thermo X-series)上测定稀土与微量元素,分析误差 <5%。

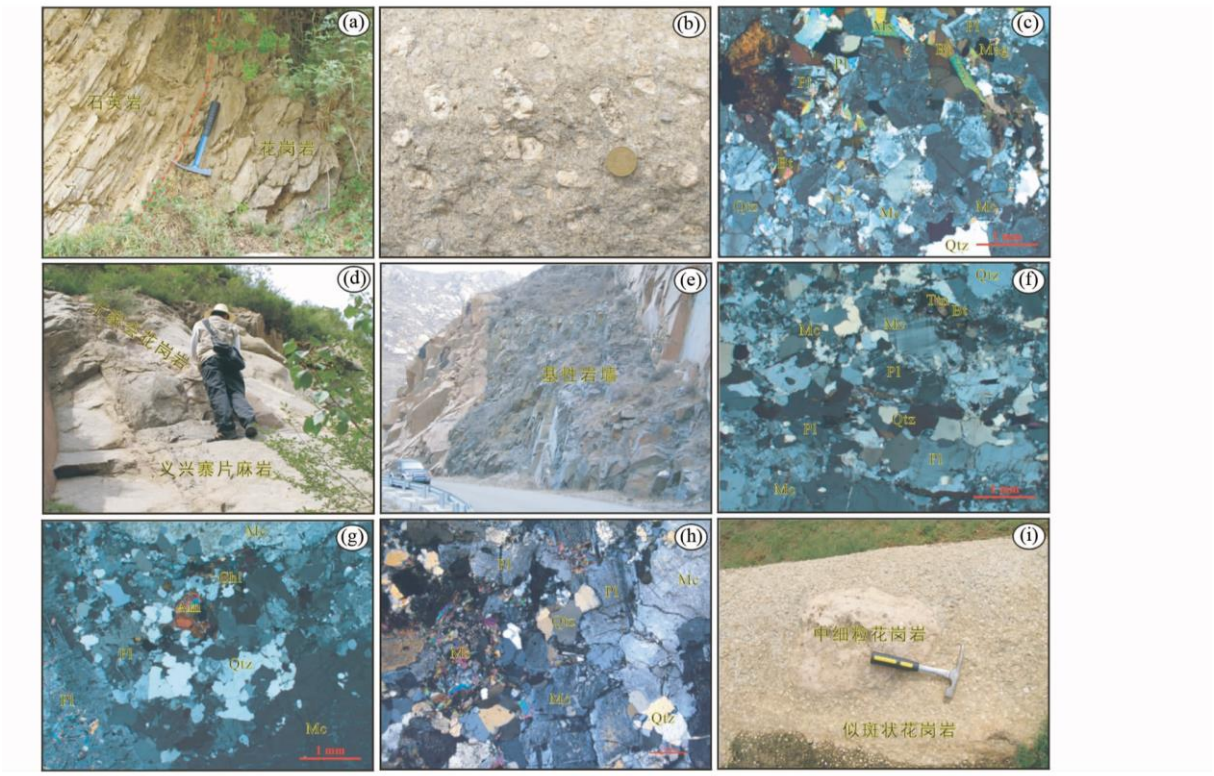


图 3 五台地区古元古代花岗岩野外与显微照片(矿物缩写据沈其韩,2009)

Fig. 3 Field and micro photographs of Paleoproterozoic granitoids in Wutai area (abbreviation of minerals after Shen, 2009)

锆石单矿物分选在河北省区域地质矿产调查研究所完成。部分样品(HT49-3)的锆石 U-Pb 年龄测定在北京离子探针中心的 SHRIMP Ⅱ上完成,分析原理与详细流程见 Williams(1998)和宋彪等(2002)。应用锆石标样 M257(Nasdala *et al.*, 2008)标定锆石的 U、Th、Pb 含量,利用锆石标样 TEMORA1(年龄 417Ma)(Black *et al.*, 2003)进行待测样品年龄校正。测试过程中仪器质量分辨率大于 5000(1%峰高),一次离子流 O^{2-} 的强度为 3~4 nA,一次离子流束斑大小约为 25~30μm。每分析 4 个待测样品点进行一次 TEMORA1 标样测定,每个测点记录采用 5 组扫描。数据处理采用 SQUID1.02(Ludwig,2001)及 ISOPLOT(Ludwig,2000)程序。普通铅用实测的 ^{204}Pb 校正。单个分析数据的误差为 1σ。年龄结果采用 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 加权平均值,内部误差为 2σ(95%的置信度)。

部分样品(HT55-1、HT47-1 和 HT47-3)的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成,详细实验分析流程见文献(侯可军等,2009)。锆石定年分析所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP213 激光剥蚀系统。激光剥蚀所用束斑直径为 25μm,频率为 10Hz,能量密度约为 2.5J·cm^{-2},以 He 为载气。信号较小的 ^{207}Pb,^{206}Pb,^{207}Pb(+^{204}Hg),^{202}Hg 用离子计数器(multi-ion-counters)接收,^{208}Pb,^{232}Th,^{238}U 信号用法拉第杯接收,实现了所有目标同位素信号的同时接收并且不同质量数的峰基本上都是平坦的,进而可以获得高精度的数据,均匀锆石颗粒 $^{207}Pb/^{206}Pb$,$^{206}Pb/^{238}U$,$^{207}Pb/^{235}U$ 的测试精度(2σ)均为 2%左右,对锆石标准的定年精度和准确度在 1%(2σ)左右。LA-MC-ICP-MS 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式,数据分析前用锆石 GJ-1 进行仪器调试,使之达到最优状态,锆石 U-Pb 定年以标准锆石 GJ-1(年龄:600Ma,Jackson *et al.*, 2004)为外标(年龄校正),U,Th 含量以锆石 M127(U:923×10^{-6};Th:439×10^{-6};Th/U:0.48,Nasdala *et al.*, 2008)为外标进行校正。测试过程中在每测定 10 个样品后重复测定两个锆石 GJ-1 对样品进行校正,并测量一个锆石 Plesovice,观察仪器的状态以保证测试的精确度。数据处理采用 ICPMSDataCal 程序(Liu *et al.*, 2010),测试结果显示绝大多数分析点 $^{206}Pb/^{204}Pb$ > 1000,故未进行普通铅校正;^{204}Pb 由离子计数器检测,考虑到 ^{204}Pb 含量异常高的分析点可能受包体或裂隙中普通 Pb 的影响,所以剔除 ^{204}Pb 含量异常高的分析点,锆石年龄用 Isoplot 程序(Ludwig, 2000)计算。

另有 1 件样品(HT82-1)的锆石 U-Pb 年龄测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,具体测试方法和流程见文献(Diwu *et al.*, 2011)。将德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas 200 型 193nmArF 准分子激光器与 ICP-MS 仪器链接。

ICP-MS 为美国 Agilent 公司生产的 Agilent7500a。采用 He 作为剥蚀物质的载气。激光束斑直径为 32μm,频率为 6Hz 时,用美国国家标准技术研究院的人工合成硅酸盐玻璃 NISTSRM610 进行仪器最佳化,使仪器达到最大的灵敏度(^{238}U灵敏度 >460 cps/×10^{-6})、最小的氧化物产率(ThO/Th <1%)。激光采样方式为单点剥蚀。ICP-MS 数据采集模式为 Time-resolved Analysis,采用每个质量峰采集一点的跳峰方式,单点滞留时间分别设定为 6ms(Si、Ti、Nb、Ta 及 REE)、20ms(^{204}Pb、^{206}Pb、^{207}Pb 及^{208}Pb)和 10ms(^{232}Th、^{238}U)。每个分析点的气体背景采集时间为 20s,信号采集时间为 40s。数据处理采用 GLITTER(ver 4.0)程序,^{207}Pb/^{206}Pb、^{206}Pb/^{238}U、^{207}Pb/^{235}U(^{235}U = ^{238}U/137.88)^{208}Pb/^{232}Th 的比值采用标准锆石 91500 为外部标准进行校正。元素浓度计算以 Si 为内标,采用 NIST610 为外标。锆石谐和图采用 Isoplot 程序(Ludwig, 2000)。

锆石 Lu-Hf 同位素分析在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成。分析仪器为德国 Geolas200M 型 193nmArF 准分子激光剥蚀系统和美国 Bruker 公司生产的 Bruker aurora M90 ICP-MS,分析方法和流程参见侯可军等(2007)。分析过程中,激光束斑直径为 44μm,信号采集时间为 26.2s。为消除^{176}Lu 和^{176}Yb 对^{176}Hf 的质量干扰,利用^{176}Lu/^{175}Lu = 0.02658 和^{176}Yb/^{172}Yb = 0.5887(Chu *et al.*, 2002)进行质量干扰校正。利用^{179}Hf/^{177}Hf = 0.7325 对 Lu 同位素比值基性指数归一化质量歧视校正,采用^{173}Yb/^{172}Yb = 1.35274 对 Yb 同位素比值进行指数归一化质量歧视校正(Wu *et al.*, 2006;侯可军等,2007)。实验过程中,GJ-1 锆石作为参考标准锆石,23 个 GJ-1 标准锆石的^{176}Hf/^{177}Hf 平均值为 0.282006 ± 8(MSWD = 1.3),与 Elhlou *et al.*(2006)分析结果(0.282013 ± 19)在误差范围内一致。

5 分析结果

5.1 地球化学

5.1.1 大洼梁花岗岩

从大洼梁花岗岩的不同部位采集了 5 件样品完成主微量元素分析,其中 3 件位于岩体东部近边缘相(HT49-1 ~ 3)、2 件样品采自岩体中部(HT50-1、2)。花岗岩 SiO_2 含量 70.12% ~ 75.38%、Al_2O_3 含量 13.4% ~ 14.59%、MgO 含量 0.4% ~ 1.43%、Fe_2O_3 含量 0.15% ~ 2.73%、FeO 含量 1.2% ~ 2.64%、CaO 含量 0.2% ~ 0.64%、Na_2O 含量 0.02% ~ 7.23%、K_2O 含量 0.27% ~ 4.86%(表 1)。大洼梁花岗岩总体具有高硅、铁,低钙、镁特征,可能由于后期的蚀变或变质作用影响,个别样品的钾、钠变化范围较大。在 Q-A-P 图中,大洼梁花岗岩主体属于正长花岗岩-二长花岗岩,而非常低钠和低钾的样品分别位于碱长花岗岩区域和花岗闪长岩与二长花岗岩的界限附近(图 4)。所有样品主体属于高钾-中钾钙碱性系列,并具有过铝质花岗岩特征(图 5)。

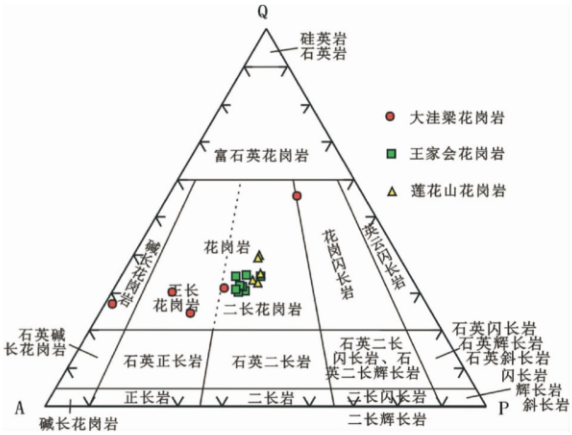


图 4 五台地区古元古代花岗岩分类图

Fig. 4 Q-A-P classification of Paleoproterozoic granitoids in Wutai area

大洼梁花岗岩稀土元素总量变化较大(∑REE = 147 × 10^{-6} ~ 381 × 10^{-6}),轻重稀土元素具有弱-中等程度分异($(La/Lu)_{CN}$ = 2.2 ~ 6.4),Eu 负异常明显(Eu/Eu^* = 0.39 ~ 0.52);其中轻稀土元素分异较明显($(La/Sm)_{CN}$ = 1.6 ~ 3.5),而重稀土元素无明显分异($(Gd/Lu)_{CN}$ = 0.7 ~ 1.2)(表 1;图 6)。所分析的花岗岩样品 Nb、Ta、Zr、Hf、Y 和 Ga 含量较高,相容性元素 Cr、Ni、Sc、V 和部分大离子亲石元素 Rb、Cs 和 Sr 含量较低。在原始地幔标准的微量元素配分图解中,大洼梁花岗岩具有强烈的 Sr、P、Ti 和弱 Nb、Ta、Ba 负异常(表 1;图 6)。

5.1.2 王家会花岗岩

本次工作沿代县-滩上公路横穿了王家会岩体,在新鲜露头连续采集了 8 件样品。其主微量元素分析结果见表 1。王家会花岗岩的 SiO_2 含量 72.9% ~ 76.62%、Al_2O_3 含量 13.01% ~ 13.63%、Fe_2O_3 含量 0.39% ~ 1.59%、FeO 含量 0.27% ~ 1.1%、CaO 含量 0.92% ~ 1.28%、MgO 含量 0.1% ~ 0.57%、Na_2O 含量 3.34% ~ 3.69%、K_2O 含量 4.39% ~ 5.3%(表 1)。该岩体具有高硅、高钾钠,而低镁钙特征,属于二长花岗岩(图 4),并具有高钾钙碱性和偏铝质-弱过铝质花岗岩特征(图 5)。

王家会花岗岩稀土元素含量范围很大(∑REE = 107 × 10^{-6} ~ 430 × 10^{-6}),稀土元素中等程度-强烈分异($(La/Lu)_{CN}$ = 5.7 ~ 18.9),轻稀土元素分异较强烈($(La/Sm)_{CN}$ = 4.8 ~ 8.2),重稀土元素分异较弱($(Gd/Lu)_{CN}$ = 0.7 ~ 1.4),Eu 负异常明显(Eu/Eu^* = 0.30 ~ 0.56)(表 1;图 6)。王家会花岗岩相对高 Rb、Ba 和 Pb,其他微量元素含量相对较低(表 1)。在原始地幔标准化的微量元素配分图解中,所有的样品具有较强烈的 Sr、P、Ti、Nb、Ta 和 Ba 负异常(图 6)。

5.1.3 莲花山花岗岩

本次在莲花山岩体不同相选取了 5 件样品进行主微量元

表 1 五台地区古元古代花岗岩主量(wt%)、微量($\times10^{-6}$)元素分析

Table 1 Major (wt%) and trace ($\times10^{-6}$) elements analyses on Paleoproterozoic granites in Wutai area

样品号	HT49-1	HT49-2	HT49-3	HT50-1	HT50-2	HT54-1	HT54-2	HT54-3	HT54-4	HT55-1	HT55-2	HT55-4	HT55-5	HT47-1	HT47-2	HT47-3	HT82-1	HT82-1b
所属单元	大洼梁花岗岩					王家会二长花岗片麻岩								莲花山花岗岩				
SiO_2	72.05	75.38	70.12	71.04	73.67	73.43	72.9	72.69	74.21	74.36	73.9	76.23	76.62	76.65	73.87	74.34	77.78	77.28
TiO_2	0.31	0.42	0.37	0.4	0.38	0.35	0.42	0.42	0.33	0.23	0.23	0.12	0.12	0.12	0.36	0.33	0.12	0.12
Al_2O_3	14.59	13.4	14.49	14.1	14.39	13.24	13.46	13.24	13.25	13.54	13.63	13.01	13.04	12.6	12.63	12.83	11.43	11.71
Fe_2O_3	1.35	1.23	1.05	2.73	0.15	0.98	1.38	1.59	1.12	0.80	0.79	0.49	0.39	0.88	1.25	0.87	0.53	0.64
FeO	1.98	1.20	2.64	1.90	1.51	1.10	0.86	0.81	0.81	0.83	0.83	0.47	0.27	0.23	1.31	1.49	0.34	0.27
MgO	0.56	0.87	1.08	0.40	1.43	0.46	0.48	0.57	0.42	0.39	0.40	0.17	0.1	0.15	0.34	0.34	0.17	0.17
CaO	0.31	0.2	0.64	0.34	0.28	1.27	1.41	1.02	1.28	1.25	1.22	0.85	0.92	0.27	1.18	1.17	0.62	0.7
MnO	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.04	0.05	0.05	0.03	0.04	0.03	0.03	0.01	0.01	0.07	0.05	0.01	0.01
Na_2O	5.31	0.02	4.89	3.85	7.23	3.39	3.52	3.35	3.37	3.55	3.69	3.56	3.34	3.52	2.99	2.98	3.05	3.1
K_2O	2.27	4.86	3.45	4.17	0.27	5.05	4.82	4.82	4.39	4.70	4.67	4.74	5.30	5.22	5.05	5.37	4.75	4.79
P_2O_5	0.10	0.14	0.12	0.13	0.12	0.08	0.1	0.11	0.08	0.04	0.04	0.02	0.01	0.02	0.08	0.07	0.01	0.02
H_2O^+	0.82	1.44	0.88	0.78	1.02	0.5	0.4	0.58	0.46	0.48	0.34	0.22	0.18	0.36	0.7	0.36	0.72	0.56
CO_2	0.21	0.51	0.30	0.14	0.16	0.11	0.11	0.11	0.11	0.07	0.09	0.09	0.07	0.09	0.09	0.09	0.17	0.26
Total	99.89	99.69	100.05	99.99	100.62	100	99.91	99.36	99.86	100.28	99.86	100	100.37	100.12	99.92	100.29	99.7	99.63
LOI	1.04	2.02	1.1	0.93	1.01	0.37	0.5	0.54	0.63	0.38	0.39	0.37	0.23	0.43	0.67	0.42	0.72	0.78
K_2O/Na_2O	0.43	243.00	0.71	1.08	0.04	1.49	1.37	1.44	1.30	1.32	1.27	1.33	1.59	1.48	1.69	1.80	1.56	1.55
K_2O+Na_2O	7.58	4.88	8.34	8.02	7.50	8.44	8.34	8.17	7.76	8.25	8.36	8.30	8.64	8.74	8.04	8.35	7.80	7.89
TFeO	3.19	2.31	3.58	4.36	1.64	1.98	2.10	2.24	1.82	1.55	1.54	0.91	0.62	1.02	2.43	2.27	0.82	0.85
$Mg^{\#}$	24	40	35	14	61	29	29	31	29	31	32	25	22	21	20	21	27	27
A/CNK	1.18	2.36	1.07	1.18	1.06	0.96	0.96	1.02	1.02	0.99	0.99	1.00	0.98	1.02	0.98	0.97	0.98	0.98
A/NK	1.24	2.52	1.17	1.25	1.11	1.16	1.18	1.19	1.24	1.19	1.18	1.14	1.12	1.06	1.18	1.16	1.09	1.10
La	64.5	43.6	73.3	27.1	13.4	63.9	108	84	107	45	51	22.3	35.8	64	182	94.7	32.6	57.1
Ce	145	106	159	91.6	78.4	143	201	176	203	98.1	106	47.9	74.6	78	303	214	104	155
Pr	16.6	12.1	18.5	7.53	4.68	15.1	20	19.1	19.8	10.6	11.7	5.39	8.5	19.7	46.9	24.6	9.03	15.6
Nd	62.3	45.5	70.2	28.6	20.6	52.7	66.1	66.7	63	36.2	39.4	18.4	28	66.7	178	90.1	29.3	52.3
Sm	11.8	8.71	12.9	5.69	5.21	7.57	9.67	9.53	7.94	5.14	5.71	2.84	4.81	10.1	28.6	14.6	5.98	10.4
Eu	1.52	1.1	2.06	0.74	0.92	1.21	1.41	1.42	1.19	0.75	0.77	0.34	0.44	1.12	3.67	2.48	0.43	0.72
Gd	11.1	9.28	10.9	5.89	5.59	5.32	6.76	6.49	5.62	3.79	3.54	2.27	4.11	5.96	20.1	10.6	5.11	8.49
Tb	1.85	1.86	2	1.17	1.03	0.88	1.07	1.07	0.88	0.57	0.61	0.34	0.72	1	3.13	1.87	0.96	1.44
Dy	11.5	12.6	11.9	8.29	6.47	5.09	6.09	5.86	4.9	3.14	3.27	2.03	4.54	6.07	17	11.1	5.83	8.07
Ho	2.37	2.74	2.38	1.83	1.31	1.02	1.18	1.19	0.94	0.62	0.65	0.44	0.95	1.29	3.15	2.14	1.2	1.59
Er	7.38	9.03	7.47	5.99	4.05	3.24	3.94	3.82	3.21	2.12	2.15	1.57	3.17	4.75	9.55	6.65	4.21	5.2
Tm	1.17	1.5	1.16	1.01	0.65	0.5	0.58	0.56	0.47	0.33	0.33	0.29	0.56	0.84	1.35	0.98	0.74	0.88
Yb	8.49	10.6	8.07	7.25	4.47	3.49	4.04	3.9	3.58	2.38	2.3	2.36	4.08	6.5	8.74	6.74	5.67	6.73
Lu	1.25	1.54	1.17	0.99	0.63	0.54	0.6	0.59	0.58	0.37	0.36	0.4	0.61	1.06	1.29	1	0.9	1.08
∑REE	347	266	381	1934	147	304	430	380	422	209	228	107	171	267	807	482	206	325
Eu/Eu^*	0.40	0.38	0.52	0.39	0.52	0.56	0.51	0.53	0.52	0.50	0.49	0.40	0.30	0.41	0.45	0.59	0.23	0.23
$(La/Lu)_{CN}$	5.3	2.9	6.4	2.8	2.2	12.1	18.4	14.6	18.9	12.5	14.5	5.7	6.0	6.2	14.4	9.7	3.7	5.4
$(La/Sm)_{CN}$	3.3	3.0	3.5	2.9	1.6	5.1	6.8	5.4	8.2	5.3	5.4	4.8	4.5	3.9	3.9	3.9	3.3	3.3
$(Gd/Lu)_{CN}$	1.1	0.7	1.2	0.7	1.1	1.2	1.4	1.4	1.2	1.3	1.2	0.7	0.8	0.7	1.9	1.3	0.7	1.0
Cs	5.34	2.87	3.74	0.65	0.1	3.84	2.92	3.13	2.88	5.93	5.46	4	1.64	1	4.98	5.04	1.41	1.51
Rb	104	163	103	81.9	6.89	248	210	203	194	254	242	325	148	208	190	198	228	229
Ba	476	533	414	789	46.3	643	724	698	716	469	507	113	437	124	962	1054	228	229
Th	17.7	16.7	15.6	12.9	11.6	15.9	22	14.1	30.1	14.6	20.1	21.7	17.2	38.1	15.9	12.5	21.4	22.9
U	3	2.78	2.61	1.94	2.23	3.14	2.4	2.7	4.43	2.14	3.11	3.12	3.08	2.8	2.06	2.59	2.37	2.45

续表 1

Continued Table 1

样品号	HT49-1	HT49-2	HT49-3	HT50-1	HT50-2	HT54-1	HT54-2	HT54-3	HT54-4	HT55-1	HT55-2	HT55-4	HT55-5	HT47-1	HT47-2	HT47-3	HT82-1	HT82-1b
所属单元	大洼梁花岗岩					王家会二长花岗片麻岩								莲花山花岗岩				
Ta	2.35	2.69	2.05	2	2.07	1.69	1.83	1.58	1.76	1.44	1.42	1.48	2.57	2.16	2.07	1.99	5.02	4.57
Nb	32.2	36.7	31.7	33.2	32.5	23.3	24.7	23	23.6	17.9	17.2	18.5	28.6	25	29.8	27.8	43.4	38.3
Sr	60.2	13.8	61.8	62.6	45.3	163	193	181	170	146	150	52.5	163	37	145	156	18	17.9
Pb	7.7	4.45	7.38	4.54	2.25	19.5	20.1	19.7	21	19.5	21.7	26.8	17.4	10.3	21.3	22.3	5.42	6.24
Zr	349	469	408	411	425	228	320	329	320	153	166	89.8	123	170	407	373	213	186
Hf	9.93	12.6	11.5	10.8	12	6.87	8.77	9.38	9.82	5.57	5.71	4.3	6.14	8.67	11.6	10.8	8.78	8.71
Y	65.7	76.1	68.1	50.4	32.5	28.7	33.6	33.2	27.2	18	18.4	13.9	27.3	33.2	90.2	57.6	33.4	44.7
Co	3.07	1.73	4.27	3.56	2.28	2.78	3.22	3.68	2.54	2.35	2.28	0.87	0.5	0.61	2.28	1.65	0.77	0.79
Cr	3.53	2.8	3.08	4.52	3.65	4.45	4.41	5.07	6.66	6.23	5.24	3.63	2.96	5.16	3.75	3.18	0.7	0.64
Ga	25.7	22.6	25.5	23.9	20.4	17.3	18.6	18.8	18.8	16.7	17.1	16.5	15.9	18.5	22.1	19.6	19.8	20.5
Mo	0.57	1.01	4.38	0.54	0.38	0.89	1.18	0.66	0.95	0.43	0.26	0.14	0.73	0.51	0.43	0.68	0.59	0.49
Ni	1.81	1.08	1.69	1.96	1.9	2.8	3.22	3.9	4.04	3.36	3.06	1.5	1.29	2.54	2.09	2.93	0.74	0.77
Sc	4.89	6.09	5.4	6.31	2.99	4.72	5.16	5.21	5.15	3.58	4.0	3.14	2.17	1.75	6.11	5.68	2.47	2.58
V	4.27	4.1	3.93	4.53	3.91	19.2	22.6	24.1	18.3	15.8	15.9	7.37	3.14	2.0	7.84	6.83	1.59	1.4
Sr/Y	0.92	0.18	0.91	1.24	1.39	5.68	5.74	5.45	6.25	8.11	8.15	3.78	5.97	1.11	1.61	2.71	0.54	0.40
Y + Nb	97.9	112.8	99.8	83.6	65	52	58.3	56.2	50.8	35.9	35.6	32.4	55.9	58.2	120	85.4	76.8	83
Ga/Al	3.32	3.18	3.32	3.20	2.67	2.47	2.61	2.68	2.68	2.33	2.37	2.39	2.30	2.77	3.30	2.88	3.27	3.30
Zr + Nb + Ce + Y	592	688	667	586	568	423	579	561	574	287	308	170	254	306	830	672	394	424
T_{Zr}(℃)	876	968	878	892	887	813	844	855	853	782	788	742	765	798	873	863	817	804

注:A/NK = $Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)$, A/CNK = $Al_2O_3/(Na_2O + K_2O + CaO)$ molar ratio

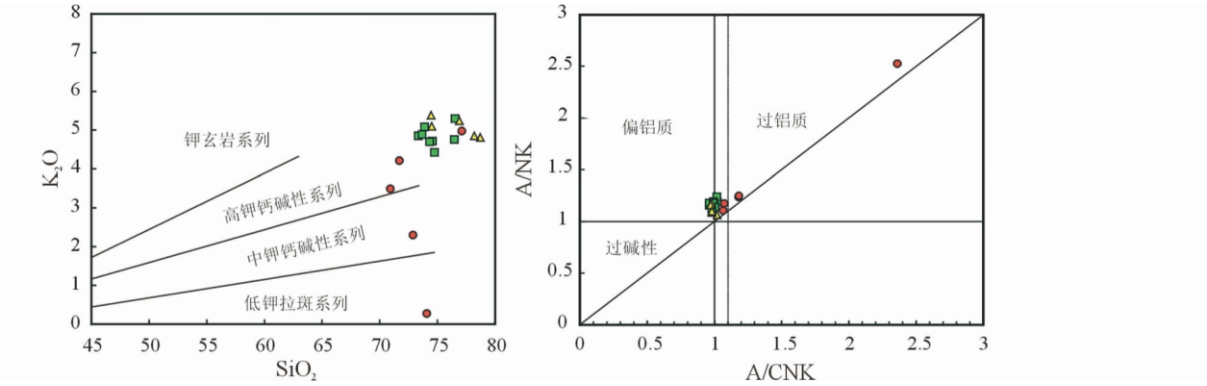


图 5 五台地区古元古代花岗岩 SiO_2-K_2O 图(据 Peccerillo and Taylor, 1976)与 A/CNK-A/NK 图

Fig. 5 Plots of K_2O vs. SiO_2 (after Peccerillo and Taylor, 1976) and A/NK vs. A/CNK

素分析,其中 1 件斑状花岗岩(HT47-1)、2 件似斑状花岗岩(HT47-2、3)和 2 件中细粒花岗岩(HT82-1, -1b)。样品的 SiO_2 含量 73.87% ~77.78%、Al_2O_3 含量 11.43% ~12.83%、Fe_2O_3 含量 0.53% ~1.25%、FeO 含量 0.23% ~1.49%、CaO 含量 0.27% ~1.18%、MgO 含量 0.15% ~0.34%、Na_2O 含量 2.98% ~3.54%、K_2O 含量 4.75% ~5.37%(表 1)。莲花山花岗岩也具有高硅、高钾和钠特征,低钙、镁、铁,同时相对富钾(表 1)。莲花山花岗岩为二长花岗岩(图 4),为高钾钙碱性系列,并具有偏铝质-弱过铝质花岗岩特征(图 5)。

莲花山花岗岩稀土元素含量相对较高($\sum REE = 206 \times 10^{-6} \sim 807 \times 10^{-6}$),稀土元素微弱-较强烈分异($(La/Lu)_{CN}$ = 3.7 ~ 14.4),轻稀土元素分异较强烈($(La/Sm)_{CN}$ = 3.3 ~ 3.9),重稀土元素无明显分异($(Gd/Lu)_{CN}$ = 0.7 ~ 1.9),同时具有强烈的 Eu 负异常(Eu/Eu^* = 0.23 ~ 0.59)(图 6)。莲花

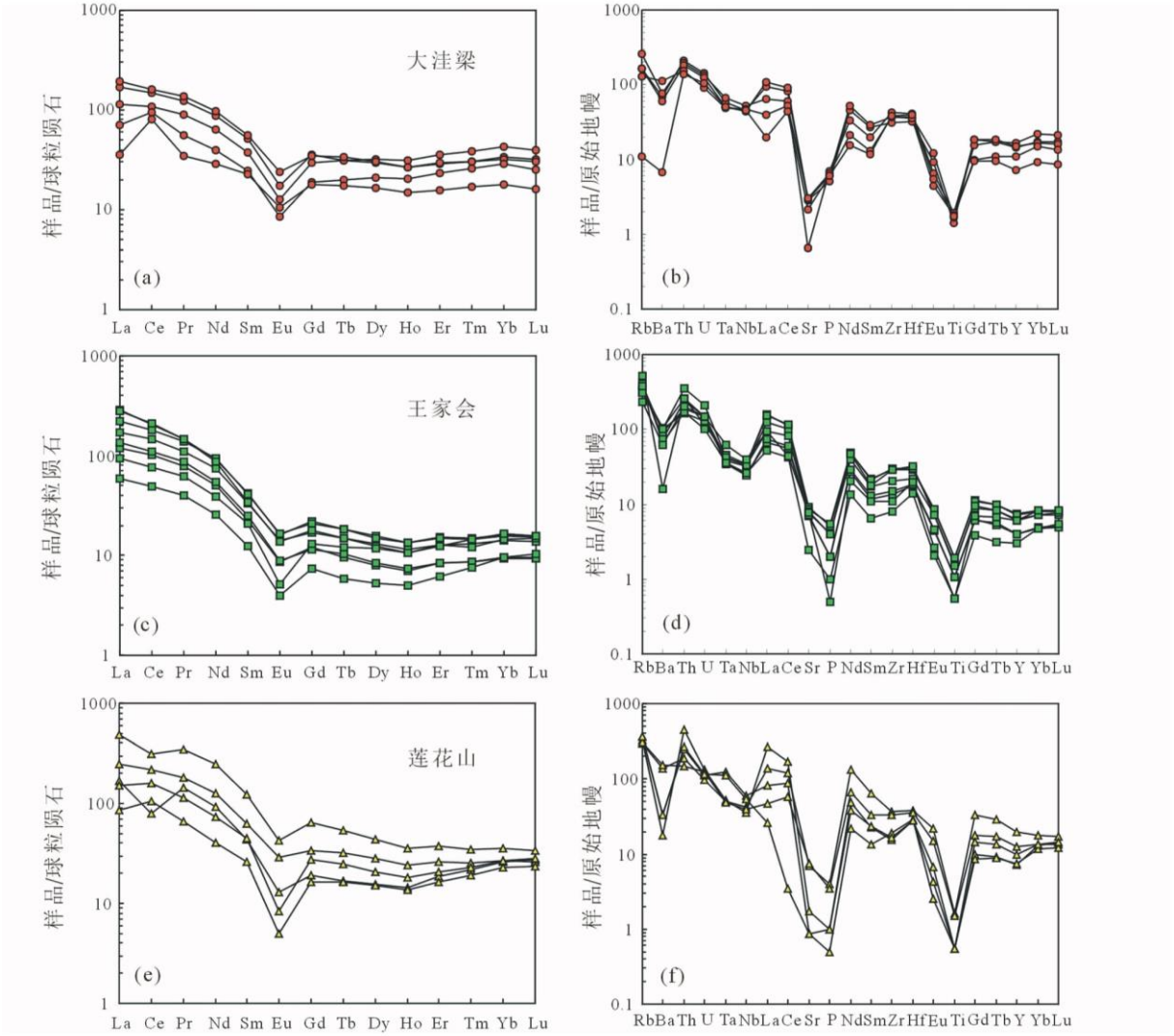


图 6 五台地区古元古代花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(标准化值据 Henderson, 1984)与原始地幔标准化微量元素蛛网图解(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REEs (normalization values after Henderson, 1984) and PM-normalized trace elements patterns (normalization values after Sun and McDonough, 1989) for Paleoproterozoic granitoids in Wutai area

山花岗岩除 Rb 含量较高、变化范围较小外,其他微量元素含量变化范围较大(表 1)。在原始地幔标准化的微量元素配分图解中,所有的样品具有较强烈的 Sr、P、Ti 负异常,部分样品 Nb、Ta 和 Ba 负异常明显(图 6)。

5.2 锆石 U-Pb 年龄

5.2.1 大洼梁花岗岩

大洼梁似斑状花岗岩样品(HT49-3)采自于代县掌寺村西 1km 山沟内(GPS 坐标:38°56.341′N、113°04.969′E)。其中锆石主要为自形短柱-长柱状。透射光下,大多数锆石呈无色透明,少量锆石颗粒具有不均匀的浅黄褐色,粒度大小多为 100~300μm,延长系数为 1∶1.2~1∶3,多数柱面和锥面都很发育。阴极发光图像中,多数锆石具有较明显的韵律环带,部分环带较宽缓(图 7),个别颗粒可见板状环带特征。

从似斑状花岗岩锆石中选择了 17 个颗粒完成了 17 个测点分析(见电子版附表 1)。U、Th 含量分别为 40×10^{-6}~379×10^{-6}和 37×10^{-6}~391×10^{-6},Th/U 比值为 0.55~1.18(附表 1)。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中,除 5 个分析结果位于谐和线上或附近外,其他 12 个点具有不同程度的 Pb 丢失,所有分析结果形成的不一致线与谐和线的上交点 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄为 2164±30Ma(图 8)。利用位于谐和线上 5 个分析点获得的 $^{207}Pb/^{206}Pb$加权平均年龄为 2170±17Ma(MSWD=0.75),与上交点年龄在误差范围内相近,同时也与前人获得大洼梁花岗

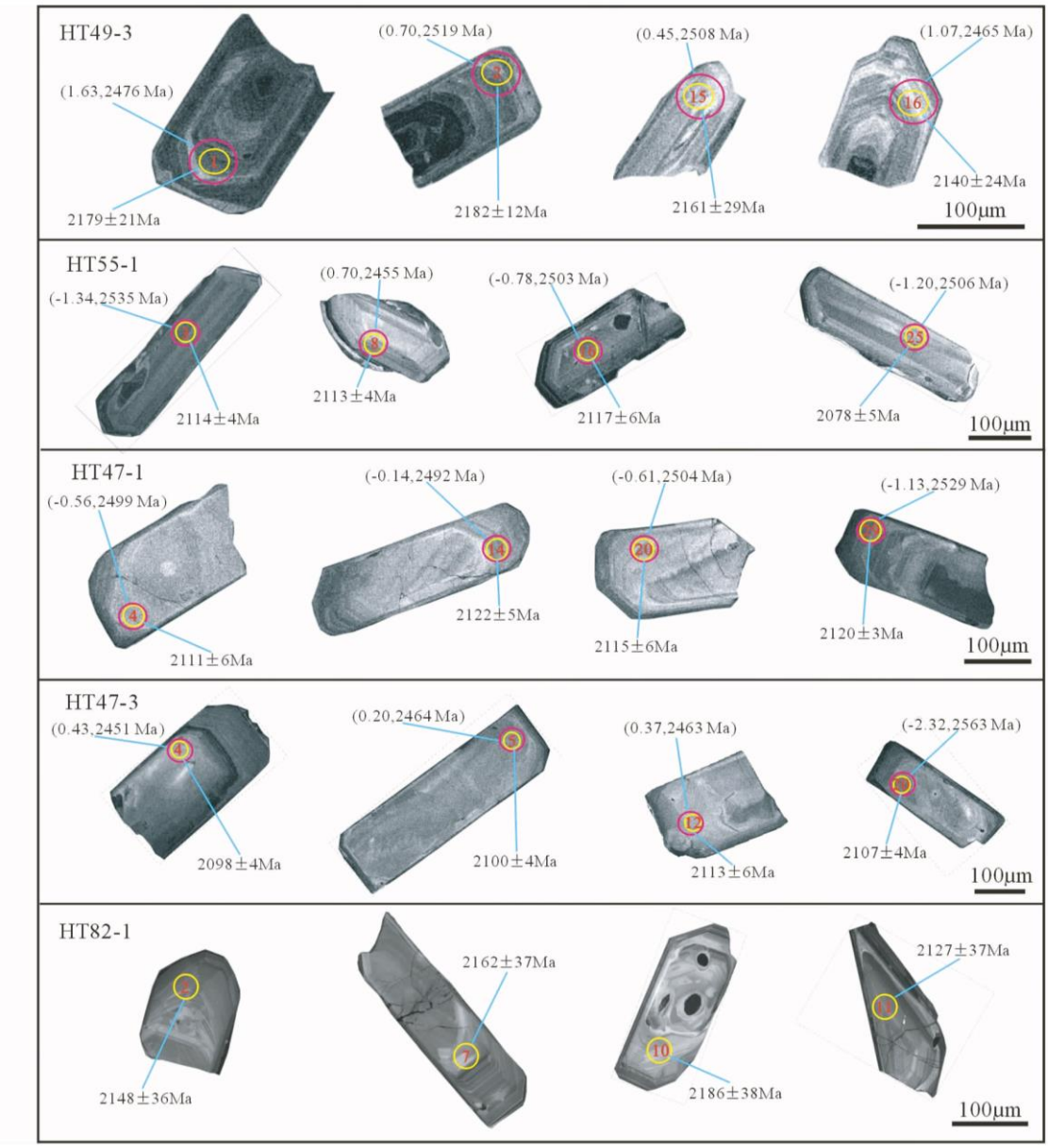


图 7 五台地区古元古代花岗岩锆石 CL 图像

图中黄色椭圆和圆圈分别代表 SHRIMP 和 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 分析;红色圆圈代表 Hf 同位素分析

Fig. 7 CL images of zircons from Paleoproterozoic granitoids in Wutai area

In the images, yellow ovals and circles represent the zircon SHRIMP U-Pb and LA-ICPMS U-Pb analyses; red circles represent the Hf isotope analyses

岩的年龄结果一致(2176 ± 12Ma;王凯怡和 Wilde, 2002)(图 8)。

5.2.2 王家会花岗岩

用于锆石 U-Pb 年龄测定的王家会片麻状花岗岩(HT55-1)采自代县王家会村北公路边(GPS 坐标:39°02.194′N、113°04.721′E)。该样品中锆石主要呈粒状、柱状。透射光下,多数锆石呈无色透明、少数颗粒透光性较差,粒度大小多为 150~400μm,延长系数为 1∶1.2~1∶4,表面溶蚀特征非常明显。在阴极发光图像中,多数锆石隐约可见岩浆振荡环带,少量锆石内部具有熔蚀特征表现出不规则的结构(图 7)。

选择了片麻状花岗岩中 26 粒锆石进行了 28 个测点分析(电子版附表 2)。U、Th 含量分别为 10×10^{-6}~183×10^{-6} 和 13×10^{-6}~166×10^{-6},Th/U 比值为 0.28~2.43(附表 2)。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中,除 5,14,15,20 和 22 号点具有较明显的 Pb 丢失外,其他分析点都位于谐和线上或附近。除了 5 号分析点获得 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄为 2481 ± 17Ma 外,其他的 $^{207}Pb/$

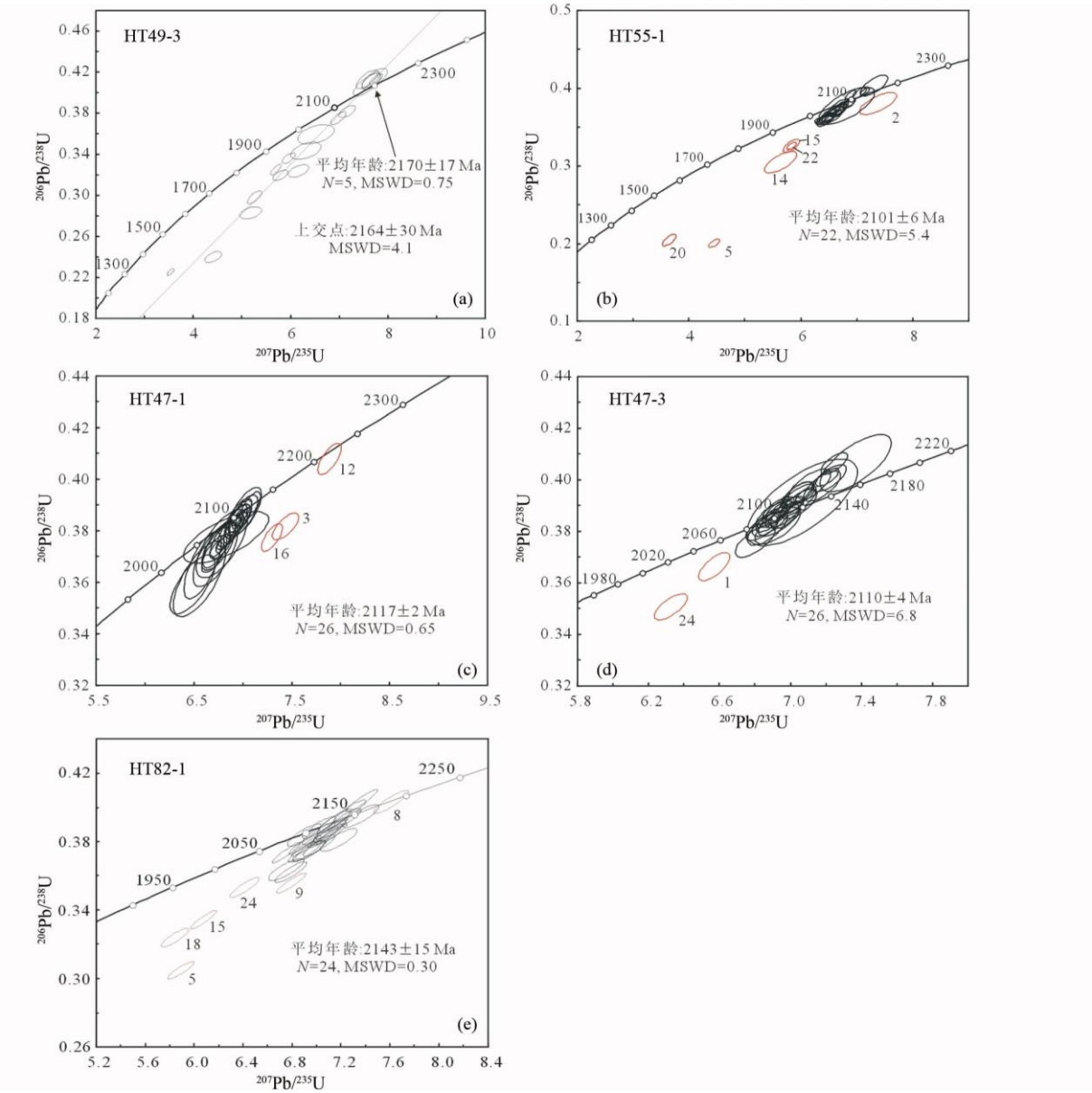


图 8 五台地区古元古代花岗岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 8 $^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ concordia diagrams of zircon U-Pb ages from Paleoproterozoic granitoids in Wutai area

^{206}Pb年龄结果范围为 2078 ~ 2239Ma。去除发生强烈 Pb 丢失的 14、15、20 和 22 点及年龄偏大的 2 号分析点外,其余 22 个分析结果获得$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄加权平均值为 2101 ± 6Ma(图 8),与前人所报道的 2084 ~ 2129Ma 花岗岩成岩时代在误差范围内完全一致(Wilde *et al.*, 2005;张许平和耿威,2016)。

5.2.3 莲花山花岗岩

本次工作从莲花山花岗岩中采集了 3 件样品进行锆石 U-Pb 定年。斑状花岗岩(HT47-1)和似斑状花岗岩(HT47-3)采自原平市峙峪东南山梁上(GPS 坐标分别为:38°44.753′N、112°48.306′E 和 38°44.647′N、112°48.100′E),另一个中-细花岗岩样品(HT82-1)采自原平市东石鼓寺东山坡(GPS 坐标:38°43′05.00″N、112°48′14.05″E)。莲花山花岗岩(HT47-1、HT47-3 和 HT82-1)锆石主要呈短柱-长柱状,少量锆石呈粒状。透射光下,锆石呈无色透明,粒度大小多为 200 ~ 500μm,延长系数为 1∶1.5 ~ 1∶4,多数锆石柱面非常发育,而锥面不发育。在阴极发光图像中,部分锆石发育宽缓的环带,而部分锆石内部结构较为均匀,无明显环带,而靠近边部发育环带特征(图 7)。

从斑状花岗岩(HT47-1)样品的锆石中选择了 29 粒锆石完成了 29 个测点分析。锆石 U、Th 含量分别为 11×10^{-6} ~ 71

$\times10^{-6}$和$8\times10^{-6}\sim52\times10^{-6}$,Th/U 比值为 0.64~1.15,29 个分析结果的$^{207}Pb/^{206}Pb$表面年龄集中于 2114~2243Ma(附表 2)。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中,3、12 和 16 号分析点年龄偏大,同时 3 和 12 号点具有较强烈的 Pb 丢失。去除上述 3 个分析点外,其余 26 个位于谐和线上或附近分析结果所获得$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄加权平均值为 2117±6Ma(图 8)。

从似斑状花岗岩(HT47-3)样品的锆石中选择了 28 粒锆石进行了 28 个测点分析。锆石 U、Th 含量分别为$11\times10^{-6}\sim38\times10^{-6}$和$7\times10^{-6}\sim29\times10^{-6}$,Th/U 比值为 0.53~1.12,所有分析点获得$^{207}Pb/^{206}Pb$表面年龄为 2091~2118Ma(附表 2)。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中,除分析点 1 和 24 具有一定的 Pb 丢失外,其他的分析结果基本位于谐和线上或附近,26 个分析点获得$^{207}Pb/^{206}Pb$加权平均年龄为 2110±4Ma(图 8)。

在中-细粒花岗岩样品(HT82-1)的锆石中选择了 30 粒完成了 30 个测点分析。锆石 U、Th 含量分别为$25\times10^{-6}\sim124\times10^{-6}$和$15\times10^{-6}\sim155\times10^{-6}$,Th/U 比值为 0.44~1.70(电子版附表 3),所有分析点的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄范围为 2103~2231Ma。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中,除去 Pb 丢失较为强烈的 5、9、15、18、24 点和年龄偏大的 8 号分析点外,其余 24 个分析结果获得$^{207}Pb/^{206}Pb$加权平均年龄为 2143±15Ma(图 8)。

从上述 3 个年龄结果,我们认为莲花山花岗岩的时代为 2110~2143Ma,而非前人报道的中元古代花岗岩(白瑾,1986)。

5.3 锆石 Lu-Hf 同位素

5.3.1 大洼梁花岗岩

在大洼梁似斑状花岗岩样品(HT49-3)锆石 U-Pb 分析的原位进行 Lu-Hf 同位素分析,分析结果见电子版附表 4。对于强烈 Pb 丢失而$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄偏低的 3、7、11 和 12 号分析点的 Lu-Hf 同位素时采用最终的加权平均年龄 2171Ma 进行计算。17 个点的$^{176}Lu/^{176}Hf$和$^{177}Hf/^{176}Hf$比值分别为 0.000617~0.002952 和 0.281456~0.281574(附表 4)。利用锆石 U-Pb 年龄结果计算获得$\varepsilon_{Hf}(t)$为-0.08~3.31,单阶段(t_{DM1})和两阶段(t_{DM}^{C})模式年龄分别为 2395~2539Ma 和 2462~2638Ma(附表 4)。

5.3.2 王家会花岗岩

对王家会片麻状花岗岩样品(HT55-1)锆石 28 个 U-Pb 年龄分析点完成了 Lu-Hf 同位素分析。28 个点的$^{176}Lu/^{176}Hf$和$^{177}Hf/^{176}Hf$比值分别为 0.000432~0.002940 和 0.281423~0.281574(附表 4)。除 5 号分析点$\varepsilon_{Hf}(t)$为高的正值(7.29),其余 27 个点的$\varepsilon_{Hf}(t)$为-3.51~1.98;单阶段(t_{DM1})和两阶段(t_{DM}^{C})模式年龄分别为 2424~2611Ma 和 2498~2740Ma(附表 4)。

5.3.3 莲花山花岗岩

对斑状花岗岩(HT47-1)样品 29 个原位 U-Pb 分析点进行 Lu-Hf 同位素分析。$^{176}Lu/^{176}Hf$和$^{177}Hf/^{176}Hf$比值分别为 0.000516~0.000990 和 0.281394~0.281507,$\varepsilon_{Hf}(t)$、单阶段(t_{DM1})和两阶段(t_{DM}^{C})模式年龄分别为-2.47~1.62、2422~2572Ma 和 2512~2708Ma(附表 4)。

在似斑状花岗岩(HT47-3)样品 28 个年龄分析点上进行了 Lu-Hf 同位素分析。$^{176}Lu/^{176}Hf$和$^{177}Hf/^{176}Hf$比值分别为 0.000520~0.001153 和 0.281380~0.281500,$\varepsilon_{Hf}(t)$、单阶段(t_{DM1})和两阶段(t_{DM}^{C})模式年龄分别为-3.13~2.09、2394~2592Ma 和 2480~2735Ma(附表 4)。

6 讨论

6.1 五台地区 2.2~2.1Ga 的岩浆作用

王凯怡和 Wilde(2002)从大洼梁花岗岩内部及边缘相采集了 2 件样品,并分别获得 SHRIMP 锆石$^{207}Pb/^{206}Pb$加权平均年龄 2176±12Ma 和 2107±16Ma,认为 2176Ma 代表岩体的侵位时代,而后者代表热事件影响。本次工作从大洼梁花岗岩近边缘相获得锆石 U-Pb 年龄为 2170±17Ma,与 2176±12Ma 年龄结果完全一致,应代表了大洼梁花岗岩的形成时代。

已有不同的学者对王家会花岗岩进行过年代学研究。Wilde *et al.*(2005)从王家会粉色相花岗岩中获得 3 个 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 2084±20Ma、2117±17Ma 和 2116±16Ma。张许平和耿威(2016)利用 LA-ICPMS 测定花岗岩的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄为 2129±11Ma。本次工作获得王家会花岗岩的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄结果为 2101±6Ma,表明该花岗岩的时代为~2.1Ga。而莲花山花岗岩研究程度相对较低,仅有的全岩 K-Ar 年龄结果为 1503~1507Ma(白瑾,1986)。本文从该花岗岩不同相中获得锆石年龄结果为 2110~2143Ma,表明莲花山岩体为古元古代中期花岗岩。

在五台地区除本文研究的大洼梁、王家会和莲花山花岗岩外,已获得较精确年龄结果的花岗质岩体包括黄金山花岗斑岩(2137±9Ma;Du *et al.*, 2013)和蒋村石英斑岩(2166±17Ma 和 2138±17Ma;杜利林等,2015)。除此之外,在滹沱群中出现的变质基性火山岩(2140±14Ma;Du *et al.*, 2010)、横岭基性岩席(2147±5Ma;Peng *et al.*, 2005)和 2.2~2.1Ga 的碎屑锆石(Wilde *et al.*, 2004b; 杜利林等,2011;Liu *et al.*, 2011; Du *et al.*, 2017)。从分布特征看,与相邻吕梁地区同期大规模分布的花岗质岩体比较(耿元生等,2000,2006;杜利林等,2012;Zhao *et al.*, 2008),虽然五台地区的 2.2~2.1Ga 花岗质侵入体单个岩体规模较小,但分布区域较广泛,表明五台地区该期岩浆活动也非常强烈。

6.2 五台地区 2.2~2.1Ga 花岗岩的成因

6.2.1 大洼梁花岗岩的成因

大洼梁花岗岩高SiO_2、富K_2O+Na_2O(部分可能由于后期钾化或钠化影响出现异常高钾或富钠),低 CaO,稀土元素(Eu 除外)与高场强元素 Zr、Nb、Ga 和 Y 等含量高,而 Sr 含量极低,显示出 A 型花岗岩的特征。所有的花岗岩样品具有高的 Ga/Al 比值(2.67~3.32),Zr+Nb+Y+Ce 总量高(568×10^{-6}

~688×10⁻⁶),与典型的 A 型花岗岩相同,而非高分异的 I 型或 S 型花岗岩(Whalen *et al.*, 1987; Jiang *et al.*, 2009)。另外,利用全岩成分计算的花岗岩 Zr 饱和温度可达 876~968℃(Watson and Harrison, 1983; Miller *et al.*, 2003),平均温度为 900℃(表 1),指示岩浆形成温度很高,与典型 A 型花岗岩的高温特征相似。综合上述证据表明,大洼梁花岗岩为 A 型花岗岩。

已有多种不同的成因模式来解释 A 型花岗岩的源区:(1)幔源玄武质岩浆分离结晶形成富碱的熔体(Auwera *et al.*, 2003; Frost and Frost, 1997; Litvinovsky *et al.*, 2002; Loiselle and Wones, 1979; Mushkin *et al.*, 2003; Namur *et al.*, 2011; Turner *et al.*, 1992);(2)花岗质熔体抽取的富 F^- 和 Cl^- 的麻粒岩下地壳低程度部分熔融(Clemens *et al.*, 1986; Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987);(3)浅部地壳中钙碱性花岗岩脱水熔融(Anderson, 1983; Creaser *et al.*, 1991; Skjerlie and Johnson, 1992; Patiño Dounce, 1997; Dall'agnol *et al.*, 1999; King *et al.*, 1997, 2001);(4)花岗质岩浆和幔源镁铁质岩浆混合(BéDard, 1990; Kerr and Fryer, 1993; Yang *et al.*, 2006);(5)紫苏花岗岩下地壳高温部分熔融(Landenberger and Collins, 1996);(6)脱水和/或熔体亏损的麻粒岩相变质沉积岩高温部分熔融(Huang *et al.*, 2011)。

大洼梁花岗岩 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 为 -0.08~3.31,远低于同期亏损地幔值(附表 4;图 9);同时,花岗岩的单阶段 Hf 模式年龄为 2395~2539Ma,也明显大于岩体形成年龄。岩体中也未发现同源暗色包体。所以,可以排除该花岗岩由玄武岩分离结晶形成。岩浆混合成因的 A 型花岗岩中常出现大量的镁铁质包体,同时岩石同位素成分变化很大(Yang *et al.*, 2006),但

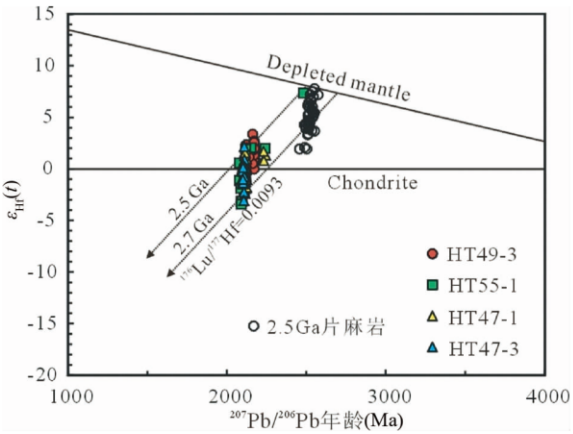


图 9 五台地区古元古代花岗岩锆石 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄与 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 关系图(2.5Ga TTG 片麻岩数据引自杜利林等,2013)

Fig. 9 Zircon $^{207}Pb/^{206}Pb$ ages vs. $\varepsilon_{Hf}(t)$ of Paleoproterozoic granitoids in Wutai area (2.5Ga TTG gneisses from Du *et al.*, 2013)

大洼梁花岗岩却明显不同。因此,大洼梁花岗岩不可能是壳幔混合成因。变质沉积岩熔融形成的长英质熔体通常表现为强过铝质特征(Clemens and Finger, 2012; Frost and Frost, 1997),但大洼梁花岗岩并不是所有的样品都表现为强过铝质特征。因此,该花岗岩也可以排除沉积岩的部分熔融。虽然,Landenberger and Collins(1996)首次报道下地壳紫苏花岗岩部分熔融可以生成 A 型花岗岩。但通过详细的分析其文章中数据结果发现,他们所指的 A 型花岗岩实际上为 I 型花岗岩,仅高分异部分表现出 A 型花岗岩的地球化学特征。此外,下地壳通常低 Ba、Rb 和 Sc,因此并非 A 型花岗岩合适的源区(Sylvester, 1989)。

已有实验资料证明,A 型花岗岩可以由 TTG(英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩)和石英闪长岩高温条件下在地壳浅部发生部分熔融形成的(Anderson, 1983; Creaser *et al.*, 1991; Dall'agnol *et al.*, 1999; King *et al.*, 1997, 2001; Patiño Dounce, 1997; Skjerlie 和 Jonhston, 1992)。大洼梁花岗岩似斑状结构发育,指示浅成侵入体特征;在 Qz-Ab-Or 图中,花岗岩也显示浅成特征(图 10)。此外,大洼梁花岗岩稀土元素具有较明显的负 Eu 异常,很低的 Sr 和高的 Yb 含量,也指示岩浆形成深度很浅(张旗等,2006)。五台地区新太古代 TTG 质片麻岩分布较为广泛,同时大洼梁花岗岩 Hf 同位素位于 2.5~2.7Ga 地壳演化线上,与五台地区 2.5Ga 的 TTG 片麻岩相似(图 9)。因此,我们倾向于认为,大洼梁花岗岩为五台地区新太古代 TTG 片麻岩在浅部地壳部分熔融形成的。

6.2.2 王家会和莲花山花岗岩的成因

王家会花岗岩和莲花山花岗岩都具有高硅、高钾钠,而相对富钾特征,同时低镁、钙(表 1)。花岗岩稀土元素具有弱-较强烈的分异,都具有明显的 Eu 负异常(图 6)。一种原因为源区存在长石的大量残留;另一种可能是在岩浆侵位过程中发生了长石的分离结晶。从稀土元素含量与 Eu 负异常的变化特征看,随着稀土元素含量降低,Eu 负异常更为强烈(图略),表明长石的分离结晶在岩浆演化中起重要作用。这也与两个花岗岩体中普遍出现长石斑晶的特征相符合。然而,稀土元素含量较高的样品也普遍具有较明显的 Eu 负异常,表明原始岩浆部分熔融于长石的不稳定区域。在 Qz-Ab-Or 图中,王家会和莲花山花岗岩都显示浅成岩浆特征(图 10)。王家会和莲花山花岗岩中,相容性元素 Cr、Ni 含量非常低,同时锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值远离亏损地幔演化线,而位于球粒陨石值附近(图 9)。因此,可以推断两个花岗岩体不可能来自亏损地幔部分熔融。在锆石 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄-$\varepsilon_{Hf}(t)$ 关系图中(图 9),所有的花岗岩样品基本位于 2.5~2.7Ga 的地壳演化线上,也与五台地区 2.5Ga 的 TTG 片麻岩类似。据此,我们进一步推断王家会和莲花山花岗岩是新太古代 TTG 质片麻岩在中上地壳深度发生部分熔融形成的。

6.3 2.2~2.1Ga 岩浆作用的构造背景

前人对五台地区王家会花岗岩和黄金山花岗斑岩进行

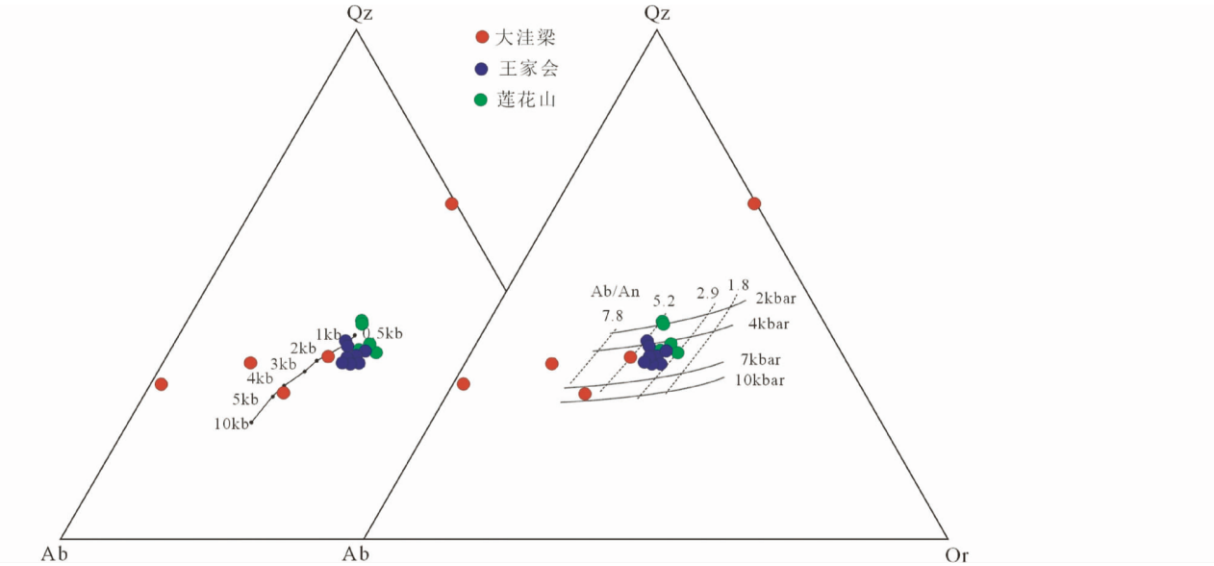


图 10 五台地区古元古代花岗岩 Qz-Ab-Or 共结压力图(据 Huang and Wyllie, 1975; Anderson and Cullers, 1978)

Fig. 10 Qz-Ab-Or diagram for Paleoproterozoic granitoids in Wutai area (after Huang and Wyllie, 1975; Anderson and Cullers, 1978)

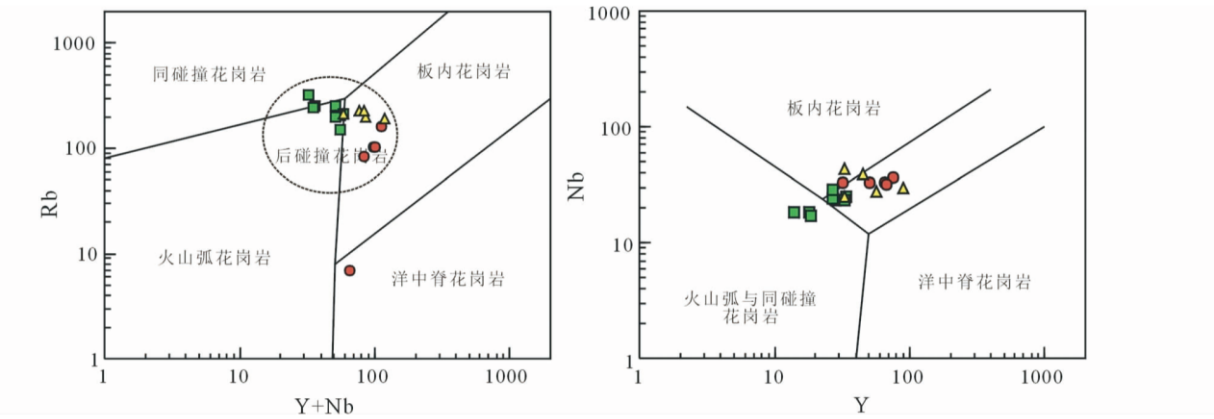


图 11 五台地区古元古代花岗岩构造环境判别图(据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 11 Tectonic discrimination of Nb vs. Y and Rb vs. Y + Nb for granitoids in the Xuting pluton (after Pearce *et al.*, 1984)

了较详细的研究工作。王家会古元古代二长花岗岩具有后碰撞花岗岩的特征,形成于伸展到挤压转换的构造环境(王月然等,2005)或后造山环境中(张许平和耿威,2016);而黄金山花岗斑岩明显具有高温 A 型花岗岩特征,可能形成于板内构造环境中(Du *et al.*, 2013)。王凯怡等(2000)根据大洼梁花岗岩的全岩成分特征和岩石中类似环斑结构长石斑晶特征,认为其为非造山型花岗岩,形成于五台造山事件后的拉张环境中。

本次工作中,3 个花岗岩岩体的微量元素具有较高的 Nb、Y 和 Nb + Y 值,因而多位于后碰撞和板内花岗岩的区域(图 11;Pearce *et al.*, 1984)。后碰撞花岗岩多出现在主碰撞期之后 25 ~ 75Ma,空间上与碰撞缝合带的位置紧密相关,同时在时间上碰撞后花岗岩紧随碰撞和后碰撞的钙碱性、强过铝质花岗岩出现(Sylvester, 1989)。虽然,有些学者提出中部带可能存在 ~ 2. 1Ga 的碰撞记录(Liu *et al.*, 2005; Faure *et al.*, 2007; Trap *et al.*, 2009, 2012; Wang *et al.*, 2013),但从目前的资料分析,中部带缺乏 ~ 2. 1Ga 与碰撞造山有关的变质和岩浆活动的记录,而主要的变质作用记录为 1. 95 ~ 1. 8Ga(Guo *et al.*, 2002, 2005; Liu *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2010; Peng *et al.*, 2014 及其中文献; Qian *et al.*, 2013; Qian and Wei, 2016; Zhang *et al.*, 2016)。一些研究者认为,五台地区 2. 2 ~ 2. 1Ga 具有后碰撞性质的花岗岩可能与新太古代

末的五台造山事件有关(王月然等,2005;张许平和耿威,2016)。但根据现有的年代学资料,五台地区的花岗岩与传统意义的五台运动时代相差 400 ~300Ma,不可能是同一构造运动的产物。因此,我们认为五台地区的这些花岗岩应形成于板内构造环境。研究区域内同期 A 型花岗岩和富铁玄武岩的出现也支持五台地区 2.2 ~2.1Ga 的岩浆事件形成于板内构造环境(Du *et al.*, 2013, 2015)。此外,古元古代滹沱群的沉积组合为砾岩、砂岩、页岩和碳酸盐岩,碳酸盐岩中叠层石发育,反映其沉积于浅水盆地环境(Wilde *et al.*, 2004b; 杜利林等,2011; Liu *et al.*, 2011; Du *et al.*, 2017);其中砂岩碎屑颗粒组成和碎屑锆石指示其物源区主要来自于稳定的克拉通和循环的造山带,而非火山弧,指示滹沱群形成于裂谷环境(杜利林等,2011;Du *et al.*, 2017)。

华北克拉通中部带内古元古代中期(2.2 ~2.0Ga)岩浆活动较为广泛(Du *et al.*, 2016a 及其中文献)。根据岩性特征分析,该期岩浆活动具有明显的双峰式特征(Du *et al.*, 2016a 及其中文献);同时,结合不同区域该期岩浆活动精确的锆石 U-Pb 年龄资料(SIMS 和 LA-ICPMS)可以发现,五台、吕梁、中条和太华地区该期岩浆活动主要集中于 2.2 ~2.1Ga,而赞皇、阜平、恒山和怀安地区主要集中于 2.1 ~2.0Ga(Du *et al.*, 2016 a 中附表 1)。按照 Zhao 等(1999a, b, 2005, 2008, 2010, 2012)的中部造山带演化模式,2.2 ~2.0Ga 的岩浆活动与俯冲有关。在古元古代西部陆块向东部陆块的俯冲过程中,岩浆作用应该从东至西逐渐变年轻。但从现有的资料分析,中部造山带中岩浆作用的年龄变化显示西老东新的特征。因此,我们认为该期岩浆活动并非东西陆块俯冲作用的结果(Du *et al.*, 2016a)。中部带内大量出现的 2.2 ~2.1Ga 的岩浆岩是古元古代中期(2.2 ~2.0Ga)岩浆活动的一个阶段。该阶段岩浆活动总体具有高钾钠特征,部分花岗岩为 A 型花岗岩,并与区域内同期基性岩浆活动组成典型的双峰式岩石组合。更为重要的是,在东部陆块内部的冀东地区新发现有 ~2.1Ga 的变质基性岩墙群,与华北古元古代陆内裂谷活动有关(Duan *et al.*, 2015; 杨崇辉等,2017);同时,在鄂尔多斯盆地基底中也发现 2.2 ~2.0Ga 的花岗质岩石和碎屑锆石(Wan *et al.*, 2013b; Zhang *et al.*, 2015),也进一步反映古元古代中期岩浆作用呈面状分布特征(Du *et al.*, 2016a)。因此,我们倾向认为 2.2 ~2.1Ga 岩浆作用与华北克拉通古元古代中期陆内裂谷有关,也表明华北在新太古代末已初步完成了拼合(Zhai and Santosh, 2011),古元古代中期转入陆内裂谷阶段。

7 结论

大洼梁似斑状花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 2170 ±17Ma,王家会黑云母二长花岗质片麻岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄结果为 2101 ±6Ma,3 个莲花山花岗岩样品的锆石 U-Pb 年龄分别为 2117 ±6Ma、2110 ±4Ma 和 2143 ±15Ma。结合同期的黄金山花岗斑岩、蒋村石英斑岩、变质基性火山岩和辉绿岩席,五台地区 2.2 ~2.1Ga 的岩浆活动也较为广泛。

大洼梁、王家会和莲花山花岗岩都具有高硅、高钾钠,而相对低钙特征,稀土元素表现为强烈的 Eu 负异常。大洼梁花岗岩高 Ga/Al 比值、Zr + Ce + Y + Nb 值含量较高,同时全岩锆饱和温度非常高,具有 A 型花岗岩特征。3 个花岗岩岩体皆表现为碰撞后至板内花岗岩特征。结合岩石学、地球化学和锆石 Hf 同位素特征,这些富碱的古元古代花岗质岩石是在伸展条件下,新太古代晚期 TTG 质片麻岩部分熔融形成的。根据华北克拉通中部带 2.2 ~2.0Ga 岩浆活动不同地区具有一定的分带性,而五台地区岩浆岩时代集中于 2.2 ~2.1Ga,代表较早的阶段;同时区域内该期岩浆事件表现为双峰式组合特征,部分花岗质岩石具有板内 A 型花岗岩特征,表明古元古代中期华北克拉通处于陆内裂谷阶段。

致谢 在全岩主微量元素分析、SHRIMP 和 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄测试和 Hf 同位素分析中,得到中国地质科学院国家地质实验测试中心韩慧明老师、马天芳老师、郭晓辰老师、北京离子探针中心刘敦一研究员、张玉海高级工程师、杨之青高级工程师、杨淳研究员、范润龙副研究员、刘建辉工程师、中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICPMS 实验室侯可军副研究员、西北大学大陆动力学国家重点实验室柳小明教授和第五春荣副教授的热情帮助和支持;成文过程中,与薛怀民研究员和童英研究员进行过交流和讨论;耿元生研究员、万渝生研究员和第五春荣副教授对文章初稿提出许多宝贵的修改意见,使文章质量得以提高;同时俞良军老师对文稿进行了认真的审阅。在此一并致以衷心感谢!

沈其韩院士是我国著名的前寒武纪地质与变质地质学家。沈先生不仅知识渊博,而且治学非常严谨。最为可贵的是,先生的高尚品格堪称学界楷模。恰逢沈先生 96 华诞之际,谨以此文恭贺先生寿辰,祝先生福寿安康!

References

Anderson JL and Cullers RL. 1978. Geochemistry and evolution of the Wolf River batholith, a Late Precambrian rapakivi massif in North Wisconsin, U. S. A. Precambrian Research, 7(4): 287 - 324

Anderson JL. 1983. Proterozoic anorogenic granite plutonism of North America. In: Medaris Jr LG, Byers CW, Mickelson DM and Shanks WC (eds.). Proterozoic Geology: Selected Papers from an International Proterozoic Symposium. New York: Geological Society of America Memoirs, 161: 133 - 154

Auwera JV, Bogaerts M, Liégeois JP, Demaiffe D, Wilmart E, Bolle O and Duchesne JC. 2003. Derivation of the 1.0 ~ 0.9Ga ferro-potassic A-type granitoids of southern Norway by extreme differentiation from basic magmas. Precambrian Research, 124(2 - 4): 107 - 148

Bai J. 1986. The Early Precambrian Geology of Wutaishan. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1 - 475 (in Chinese)

BéDard J. 1990. Enclaves from the A-type granite of the Mégantic Complex, White Mountain magma series: Clues to granite

magmagenesis. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 95 (B11): 17797 - 17819

Black LP, Kamo SL, Allen CM, Aleinikoff JN, Davis DW, Korsch RJ and Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. Chemical Geology, 200(1 - 2): 155 - 170

Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. Earth and Planetary Science Letters, 148(1 - 2): 243 - 258

Chu NC, Taylor RN, Chavagnac V, Nesbitt RW, Boella RM, Milton JA, German CR, Bayon G and Burton K. 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 17(12): 1567 - 1574

Clemens JD, Holloway JR and White AJR. 1986. Origin of an A-type granite: Experimental constraints. American Mineralogist, 71(3 - 4): 317 - 324

Clemens JD and Finger F. 2012. Formation of high $\delta^{18}O$ fayalite-bearing A-type granite by high-temperature melting of granulitic metasedimentary rocks, southern China: Comment. Geology, 40 (10): e277, doi: 10.1130/G33175C.1

Collins WJ, Beams SD, White AJR and Chappell BW. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to Southeastern Australia. Contributions to Mineralogy and Petrology, 80(2): 189 - 200

Creaser RA, Price RC and Wormald RJ. 1991. A-type granites revisited: Assessment of a residual-source model. Geology, 19(2): 163 - 166

Dall'agnol R, Scaillet B and Pichavant M. 1999. An experimental study of a lower Proterozoic A-type granite from the eastern Amazonian Craton, Brazil. Journal of Petrology, 40(11): 1673 - 1698

Diwu CR, Sun Y, Lin CL, Liu XM and Wang HL. 2007. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of Yiyang TTG gneisses from Henan Province, China. Acta Geologica Sinica, 23 (2): 253 - 262 (in Chinese with English abstract)

Diwu CR, Sun Y, Guo AL, Wang HL and Liu XM. 2011. Crustal growth in the North China Craton at ~2.5Ga: Evidence from in situ zircon U-Pb ages, Hf isotopes and whole-rock geochemistry of the Dengfeng complex. Gondwana Research, 20(1): 149 - 1702.2 ~ 2.1Ga

Diwu CR, Sun Y, Zhao Y and Lai SC. 2014. Early Paleoproterozoic (2.45 ~ 2.20Ga) magmatic activity during the period of global magmatic shutdown: Implications for the crustal evolution of the southern North China Craton. Precambrian Research, 255: 627 - 640

Du LL, Yang CH, Ren LD, Wan YS and Wu JS. 2009. Petrology, geochemistry and petrogenesis of the metabasalts of the Hutuo Group, Wutai Mountain, Shanxi, China. Geological Bulletin of China, 28 (7): 867 - 876 (in Chinese with English abstract)

Du LL, Yang CH, Guo JH, Wang W, Ren LD, Wan YS and Geng YS. 2010. The age of the base of the Paleoproterozoic Hutuo Group in the Wutai Mountains area, North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating of basaltic andesite. Chinese Science Bulletin, 55(17): 1782 - 1789

Du LL, Yang CH, Wang W, Ren LD, Wan YS, Song HX, Geng YS and Hou KJ. 2011. The re-examination of the age and stratigraphic subdivision of the Hutuo Group in the Wutai Mountains area, North China Craton: Evidences from geology and zircon U-Pb geochronology. Acta Petrologica Sinica, 27(4): 1037 - 1055 (in Chinese with English abstract)

Du LL, Yang CH, Wang W, Ren LD, Wan YS, Song HX, Gao LZ, Geng YS and Hou KJ. 2012. Provenance of the Paleoproterozoic Hutuo Group basal conglomerates and Neoarchean crustal growth in the Wutai Mountains, North China Craton: Evidence from granite and quartzite pebble zircon U-Pb ages and Hf isotopes. Science China (Earth Sciences), 55(11): 1796 - 1814

Du LL, Yang CH, Ren LD, Song HX, Geng YS and Wan YS. 2012. The 2.2 ~ 2.1Ga magmatic event and its tectonic implication in the Lüliang Mountains, North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 28 (9): 2751 - 2769 (in Chinese with English abstract)

Du LL, Yang CH, Wang W, Ren LD, Wan YS, Wu JS, Zhao L, Song HX, Geng YS and Hou KJ. 2013. Paleoproterozoic rifting of the North China Craton: Geochemical and zircon Hf isotopic evidence from the 2137Ma Huangjinshan A-type granite porphyry in the Wutai area. Journal of Asian Earth Sciences, 72: 190 - 202

Du LL, Yang CH, Wyman DA, Nutman AP, Lu ZL, Zhao L, Wang W, Song HX, Wan YS, Ren LD and Geng YS. 2015. Petrogenesis and tectonic implications of the iron-rich tholeiitic basalts in the Hutuo Group of the Wutai Mountains, Central Trans-North China Orogen. Precambrian Research, 271: 225 - 242

Du LL, Yang CH, Lu ZL, Zhao L, Geng YS, Cao GY, Diwu CR, Guo CL and Hou KJ. 2015. The Sijizhuang Formation at Jiangcun area of Wutai Mountains: Further constraints on the age of the Hutuo Group. Acta Geoscientica Sinica, 36(5): 599 - 612 (in Chinese with English abstract)

Du LL, Yang CH, Wyman DA, Nutman AP, Lu ZL, Song HX, Xie HQ, Wan YS, Zhao L, Geng YS and Ren LD. 2016a. 2090 ~ 2070Ma A-type granitoids in Zanhuang Complex: Further evidence on a Paleoproterozoic rift-related tectonic regime in the Trans-North China Orogen. Lithos, 254 - 255: 18 - 35

Du LL, Yang CH, Wyman DA, Nutman AP, Lu ZL, Song HX, Zhao L, Geng YS and Ren LD. 2016b. Age and depositional setting of the Paleoproterozoic Gantaohe Group in Zanhuang Complex: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes of sandstones and dacite. Precambrian Research, 286: 59 - 100

Du LL, Yang CH, Wyman DA, Nutman AP, Zhao L, Lu ZL, Song HX, Geng YS and Ren LD. 2017. Zircon U-Pb ages and Lu-Hf isotope compositions from clastic rocks in the Hutuo Group: Further constraints on Paleoproterozoic tectonic evolution of the Trans-North China Orogen. Precambrian Research, 303: 291 - 314

Duan ZZ, Wei CJ and Qian JH. 2015. Metamorphic *P-T* paths and zircon U-Pb age data for the Paleoproterozoic metabasic dykes of high-pressure granulite facies from Eastern Hebei, North China Craton. Precambrian Research, 271: 295 - 310

Elhlou S, Belousova E, Griffin WL, Pearson NJ and O'Reilly SY. 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70(18): A158

Faure M, Trap P, Lin W, Monié P and Bruguier O. 2007. Polyorogenic evolution of the Paleoproterozoic Trans-North China Belt: New insights from the Lüliangshan-Hengshan-Wutaishan and Fuping massifs. Episodes, 30(2): 95 - 106

Frost CD and Frost BR. 1997. Reduced rapakivi-type granites: The tholeiite connection. Geology, 25(7): 647 - 650

Geng YS, Liu DY and Song B. 1997. Chronological framework of the Early Precambrian important events of the northwestern Hebei granulite terrain. Acta Geologica Sinica, 71(4): 316 - 327 (in Chinese with English abstract)

Geng YS, Wan YS, Shen QH, Li HM and Zhang RX. 2000. Chronological framework of the Early Precambrian important events in the Lüliang area, Shanxi Province. Acta Geologica Sinica, 74(3): 216 - 223 (in Chinese with English abstract)

Geng YS, Yang CH and Wan YS. 2006. Paleoproterozoic granitic magmatism in the Lüliang area, North China Craton: Constraint from isotopic geochronology. Acta Petrologica Sinica, 22(2): 305 - 314 (in Chinese with English abstract)

Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, van Achterbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64(1): 133 - 147

Guo JH, O'Brien PJ and Zhai MG. 2002. High-pressure granulites in the Sanggan area, North China Craton: Metamorphic evolution, *P-T* paths and geotectonic significance. Journal of Metamorphic Geology, 20(8): 741 - 756

Guo JH, Sun M, Chen FK and Zhai MG. 2005. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high-pressure granulites in the Sanggan area, North China Craton: Timing of Paleoproterozoic continental collision. Journal of Asian Earth Sciences, 24(5): 629 - 642

Henderson P. 1984. General geochemical properties and abundances of

the rare earth elements. In: Henderson P (ed.). Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1-510

Hou KJ, Li YH, Zou TR, Qu XM, Shi YR and Xie GQ. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2595-2604 (in Chinese with English abstract)

Hou KJ, Li YH and Tian YY. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS. Mineral Deposits, 28(4): 481-492 (in Chinese with English abstract)

Huang DM, Zhang DH, Wang SY, Zhang YX, Dong CY, Liu DY and Wan YS. 2012. 2.3Ga magmatism and 1.94Ga metamorphism in the Xiatang area, southern margin of the North China Craton: Evidence from whole-rock geochemistry and zircon geochronology and Hf isotope. Geological Review, 58(3): 565-576 (in Chinese with English abstract)

Huang HQ, Li XH, Li WX and Li ZX. 2011. Formation of high $\delta^{18}O$ fayalite-bearing A-type granite by high-temperature melting of granulitic metasedimentary rocks, southern China. Geology, 39(10): 903-906

Huang WL and Wyllie PJ. 1975. Melting reactions in the system $NaAlSi_3O_8$-$KAlSi_3O_8$-SiO_2 to 35 kilobars, dry and with excess water. The Journal of Geology, 83(6): 737-748

Huang XL, Wilde SA, Yang QJ and Zhong JW. 2012. Geochronology and petrogenesis of gray gneisses from the Taihua Complex at Xiong'er in the southern segment of the Trans-North China Orogen: Implications for tectonic transformation in the Early Paleoproterozoic. Lithos, 134-135: 236-252

Jackson SE, Pearson NJ, Griffin WL and Belousova EA. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. Chemical Geology, 211(1-2): 47-69

Jiang N, Zhang SQ, Zhou WG and Liu YS. 2009. Origin of a Mesozoic granite with A-type characteristics from the North China craton: Highly fractionated from I-type magmas? Contributions to Mineralogy and Petrology, 158(1): 113-130

Kerr A and Fryer BJ. 1993. Nd isotope evidence for crust-mantle interaction in the generation of A-type granitoid suites in Labrador, Canada. Chemical Geology, 104(1-4): 39-60

King PL, White AJR, Chappell BW and Allen CM. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. Journal of Petrology, 38(3): 371-391

King PL, Chappell BW, Allen CM and White AJR. 2001. Are A-type granites the high-temperature felsic granites? Evidence from fractionated granites of the Wangrah Suite. Australian Journal of Earth Sciences, 48(4): 501-514

Kröner A, Wilde SA, Li JH and Wang KY. 2005. Age and evolution of a late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China. Journal of Asian Earth Sciences, 24(5) 577-595

Kusky TM and Li JH. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 22(4): 383-397

Landenberger B and Collins WJ. 1996. Derivation of A-type granites from a dehydrated charnockitic lower crust: Evidence from the Chaelundi Complex, eastern Australia. Journal of Petrology, 37(1): 145-170

Li JH, Qian XL and Zhai MG. 1997. The tectonic division of North China granulite facies belt and its Early Precambrian tectonic evolution. Scientia Geologica Sinica, 32(3): 254-266 (in Chinese with English abstract)

Li JH and Kusky T. 2007. A Late Archean foreland fold and thrust belt in the North China Craton: Implications for early collisional tectonics. Gondwana Research, 12(1-2): 47-66

Litvinovsky BA, Jahn BM, Zanvilevich AN, Saunders A, Poulain S, Kuzmin DV, Reichow MK and Titov AV. 2002. Petrogenesis of syenite-granite suites from the Bryansky Complex (Transbaikalia, Russia): Implications for the origin of A-type granitoid magmas. Chemical Geology, 189(1-2): 105-133

Liu CH, Zhao GC, Sun M, Zhang J, He YH, Yin CQ, Wu FY and Yang JH. 2011. U-Pb and Hf isotopic study of detrital zircons from the Hutuo Group in the Trans-North China Orogen and tectonic implications. Gondwana Research, 20(1): 106-121

Liu CH, Liu FL, Shi JR, Liu PH, Yang H, Liu LS, Wang W and Tian ZH. 2016. Depositional age and provenance of the Wutai Group: Evidence from zircon U-Pb and Lu-Hf isotopes and whole-rock geochemistry. Precambrian Research, 281: 269-290

Liu DY, Page RW, Compston W and Wu JS. 1985. U-Pb zircon geochronology of Late Archaean metamorphic rocks in the Taihangshan-Wutaishan area, North China. Precambrian Research, 27(1-3): 85-109

Liu DY, Nutman AP, Compston W, Wu JS and Shen QH. 1992. Remnants of ≥3800Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton. Geology, 20(4): 339-342

Liu SW, Pan YM, Xie QL, Zhang J and Li QG. 2004. Archean geodynamics in the Central Zone, North China Craton: Constraints from geochemistry of two contrasting series of granitoids in the Fuping and Wutai complexes. Precambrian Research, 130(1-4): 229-249

Liu SW, Pan YM, Xie QL, Zhang J, Li QG and Yang B. 2005. Geochemistry of the Paleoproterozoic Nanying granitic gneisses in the Fuping Complex: Implications for the tectonic evolution of the Central Zone, North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 24(5): 643-658

Liu SW, Zhao GC, Wilde SA, Shu GM, Sun M, Li QG, Tian W and Zhang J. 2006. Th-U-Pb monazite geochronology of the Lüliang and Wutai complexes: Constraints on the tectonothermal evolution of the Trans-North China Orogen. Precambrian Research, 148(3-4): 205-224

Liu YS, Gao S, Hu ZC, Gao CG, Zong KQ and Wang DB. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. Journal of Petrology, 51(1-2): 537-571

Loiselle MC and Wones DR. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites. Geological Society of America Bulletin (Abstracts with Programs), 11(7): 468

Lu SN, Yang CL, Jiang MM, Li HK and Li HM. 1996. Tracing of Precambrian Continental Crust Evolution. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)

Ludwig KR. 2000. User's manual for Isoplot/Ex version 2.2: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 1a. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 1-50

Ludwig KR. 2001. Squid 1.02: A User's Manual. Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 2. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 1-19

Miller CF, Meschter McDowell S and Mapes RW. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. Geology, 31(6): 529-532

Mushkin A, Navon O, Halicz L, Hartmann G and Stein M. 2003. The petrogenesis of A-type magmas from the Amram Massif, southern Israel. Journal of Petrology, 44(5): 815-832

Namur O, Charlier B, Toplis MJ, Higgins MD, Hounsell V, Liégeois JP and Vander Auwera J. 2011. Differentiation of tholeiitic basalt to A-type granite in the Sept Iles layered intrusion, Canada. Journal of Petrology, 52(3): 487-539

Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, Mattinson JM, Corfu F, Dörr W, Kamo SL, Kennedy AK, Kronz A, Reiners PW, Frei D, Kosler J, Wan YS, Götze J, Häger T, Kröner A and Valley JW. 2008. Zircon M257: A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon. Geostandards and Geoanalytical Research, 32(3): 247-265

Patiño Dounce AE. 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids. Geology, 25(8): 743-746

Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element

discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25(4): 956 – 983

Peccerillo A and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58(1): 63 – 81

Peng P, Zhai MG, Zhang HF and Guo JH. 2005. Geochronological constraints on the Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: SHRIMP zircon ages of different types of mafic dikes. International Geology Review, 47(5): 492 – 508

Peng P, Guo JH, Zhai MG, Windley BF, Li TS and Liu F. 2012. Genesis of the Hengling magmatic belt in the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonics. Lithos, 148: 27 – 44

Peng P, Wang XP, Windley BF, Guo JH, Zhai MG and Li Y. 2014. Spatial distribution of ca. 1950 ~ 1800Ma metamorphic events in the North China Craton: Implications for tectonic subdivision of the craton. Lithos, 202 – 203: 250 – 266

Peng P, Yang SY, Su XD, Wang XP, Zhang J and Wang C. 2017a. Petrogenesis of the 2090Ma Zanhuang ring and sill complexes in North China: A bimodal magmatism related to intra-continental process. Precambrian Research, 303: 153 – 170

Peng P, Feng LJ, Sun FB, Yang SY, Su XD, Zhang ZY and Wang C. 2017b. Dating the Gaofan and Hutuo Groups: Targets to investigate the Paleoproterozoic great oxidation event in North China. Journal of Asian Earth Sciences, 138: 535 – 547

Qian JH, Wei CJ, Zhou XW and Zhang YH. 2013. Metamorphic *P-T* paths and new zircon U-Pb age data for garnet-mica schist from the Wutai Group, North China Craton. Precambrian Research, 233: 282 – 296

Qian JH and Wei CJ. 2016. *P-T-t* evolution of garnet amphibolites in the Wutai-Hengshan area, North China Craton: Insights from phase equilibria and geochronology. Journal of Metamorphic Geology, 34(5): 423 – 446

Shen QH and Qian XL. 1995. Archean rock assemblages, episodes and tectonic evolution of China. Acta Geoscientica Sinica, 16(2): 113 – 120 (in Chinese with English abstract)

Shen QH. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations. Acta Petrologica et Mineralogica, 28(5): 495 – 500 (in Chinese with English abstract)

Skjerlie KP and Johnston AD. 1992. Vapor-absent melting at 10kbar of a biotite-and amphibole-bearing tonalitic gneiss: Implications for the generation of A-type granites. Geology, 20(3): 263 – 266

Song B, Nutman AP, Liu DY and Wu JS. 1996. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China. Precambrian Research, 78(1 – 3): 79 – 94

Song B, Zhang YH, Wan YS and Jian P. 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating. Geological Review, 48 (Suppl. 1): 26 – 30 (in Chinese with English abstract)

Sun DZ, Li HM, Lin YX, Zhou HF, Zhao FQ and Tang M. 1991. Precambrian geochronology, chronotectonic framework and model of chronocrustal structure of the Zhongtiao Mountains. Acta Geologica Sinica, 65(3): 216 – 231 (in Chinese with English abstract)

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313 – 345

Sylvester PJ. 1989. Post-collisional alkaline granites. The Journal of Geology, 97(3): 261 – 280

Tian YQ. 1991. Geological and Gold Mineralization of Wutaishan-Hengshan Greenstone Belt. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press, 1 – 244 (in Chinese)

Trap P, Faure M, Lin W, Monié P, Meffre S and Melleton J. 2009. The Zanhuang Massif, the second and eastern suture zone of the Paleoproterozoic Trans-North China Orogen. Precambrian Research, 172(1 – 2): 80 – 98

Trap P, Faure M, Lin W, Le Breton N and Monié P. 2012. Paleoproterozoic tectonic evolution of the Trans-North China Orogen: Toward a comprehensive model. Precambrian Research, 222 – 223: 191 – 211

Turner SP, Foden JD and Morrison RS. 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge, South Australia. Lithos, 28(2): 151 – 179

Vervoort JD, Patchett PJ, Albarède F, Blichert-Toft J, Rudnick R and Downes H. 2000. Hf-Nd isotopic evolution of the lower crust. Earth and Planetary Science Letters, 181(1 – 2): 115 – 129

Wan YS, Miao PS, Liu DY, Yang CH, Wang W, Wang HC, Wang ZJ, Dong CY, Du LL and Zhou HY. 2010. Formation ages and source regions of the Palaeoproterozoic Gaofan, Hutuo and Dongjiao groups in the Wutai and Dongjiao areas of the North China Craton from SHRIMP U-Pb dating of detrital zircons: Resolution of debates over their stratigraphic relationships. Chinese Science Bulletin, 55(13): 1278 – 1284

Wan YS, Zhang YH, Williams IS, Liu DY, Dong CY, Fan RL, Shi YR and Ma MZ. 2013a. Extreme zircon O isotopic compositions from 3.8 to 2.5 Ga magmatic rocks from the Anshan area, North China Craton. Chemical Geology, 352: 108 – 124

Wan YS, Xie HQ, Yang H, Wang ZJ, Liu DY, Kröner A, Wilde SA, Geng YS, Sun LY, Ma MZ, Liu SJ, Dong CY and Du LL. 2013b. Is the Ordos block Archean or Paleoproterozoic in age? Implications for the Precambrian evolution of the North China Craton. American Journal of Science, 313(7): 683 – 711

Wang JP, Kusky T, Polat A, Wang L, Deng H and Wang SJ. 2013. A late Archean tectonic mélange in the Central Orogenic Belt, North China Craton. Tectonophysics, 608: 929 – 946

Wang KY, Hao J, Wilde S and Cawood P. 2000. Reconsideration of some key geological problems of Late Archaean-Early Proterozoic in the Wutaishan-Hengshan area: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon data. Scientia Geologica Sinica, 35(2): 175 – 184 (in Chinese with English abstract)

Wang KY and Wilde S. 2002. Precise SHRIMP U-Pb ages of Dawaliang granite in Wutaishan area, Shanxi Province. Acta Petrologica et Mineralogica, 21(4): 407 – 411, 420 (in Chinese with English abstract)

Wang X, Zhu WB, Ge RF, Luo M, Zhu XQ, Zhang QL, Wang LS and Ren XM. 2014. Two episodes of Paleoproterozoic metamorphosed mafic dykes in the Lvliang Complex: Implications for the evolution of the Trans-North China Orogen. Precambrian Research, 243: 133 – 148

Wang YR, Liu SW, Li QG, Dang QN, Liu CH, Yang B, Gu LB and Zhao FS. 2005. Late Paleoproterozoic geodynamic setting in Wutai Mountains: Constraints from geochemistry of Wangjiahui granitoids. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 41(6): 840 – 850 (in Chinese with English abstract)

Wang ZH, Wilde SA, Wang KY and Yu LJ. 2004. A MORB-arc basalt-adakite association in the 2.5Ga Wutai greenstone belt: Late Archean magmatism and crustal growth in the North China Craton. Precambrian Research, 131(3 – 4): 323 – 343

Wang ZH, Wilde SA and Wan JL. 2010. Tectonic setting and significance of 2.3 ~ 2.1Ga magmatic events in the Trans-North China Orogen: New constraints from the Yanmenguan mafic-ultramafic intrusion in the Hengshan-Wutai-Fuping area. Precambrian Research, 178(1 – 4): 27 – 42

Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. Earth and Planetary Science Letters, 64(2): 295 – 304

Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95(4): 407 – 419

Wilde SA, Cawood PA, Wang KY, Nemchin A and Zhao GC. 2004a. Determining Precambrian crustal evolution in China: A case-study from Wutaishan, Shanxi Province, demonstrating the application of precise SHRIMP U-Pb geochronology. In: Malpas J, Fletcher CJN, Ali JR and Aitchison JC (eds.). Aspects of the Tectonic Evolution of China. Geological Society, London, Special Publication, 226(1): 5 – 25

Wilde SA, Zhao GC, Wang KY and Sun M. 2004b. First SHRIMP zircon

U-Pb ages for Hutuo Group in Wutaishan: Further evidence for Palaeoproterozoic amalgamation of North China Craton. Chinese Science Bulletin, 49(1): 83 - 90

Wilde SA, Cawood PA, Wang KY and Nemchin AA. 2005. Granitoid evolution in the Late Archean Wutai Complex, North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 24(5): 597 - 613

Williams IS. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: Mickibben MA, Shanks Ⅲ WC and Ridley WI (eds.). Applications of Micro Analytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Review of Economic Geology, 7: 1 - 35

Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. Chemical Geology, 234(1 - 2): 105 - 126

Wu JS, Liu DY and Jin LG. 1986. The zircon U-Pb age of metamorphosed basic volcanic lavas from the Hutuo Group in the Wutai Mountain area, Shanxi Province. Geological Review, 32(2): 178 - 184 (in Chinese with English abstract)

Wu JS, Geng YS, Shen QH, Wan YS, Liu DY and Song B. 1998. Archaean Geology Characteristics and Tectonic Evolution of China-Korea Paleo-continent. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)

Wu JS, Liu DY and Geng YS. 2008. Integrated Research Report on the Establishment Paleoproterozoic Hutuo Group of China: Geochronological Framework of Hutuo Group and Sequences of Major Geological Events. Research Report on the Establishment of Major Stratigraphical Stages in China (2001 - 2005). Beijing: Geological Publishing House, 534 - 544 (in Chinese)

Xie HQ, Liu DY, Yin XY, Zhou HY, Yang CH, Du LL and Wan YS. 2012. Formation age and tectonic environment of the Gantaohe Group, North China Craton: Geology, geochemistry, SHRIMP zircon geochronology and Hf-Nd isotopic systematics. Chinese Science Bulletin, 57(36): 4735 - 4745

Yang CH, Du LL, Ren LD, Song HX, Wan YS, Xie HQ and Liu ZX. 2011. The age and petrogenesis of the Xuting granite in the Zanhuang Complex, Hebei Province: Constraints on the structural evolution of the Trans-North China Orogen, North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 27(4): 1003 - 1016 (in Chinese with English abstract)

Yang CH, Du LL, Ren LD, Song HX and Wan YS. 2015. Early Precambrian Strata Subdivision and Magmatic Evolution of the North China Craton. Beijing: Science Press, 1 - 277 (in Chinese)

Yang CH, Du LL, Geng YS, Ren LD, Lu ZL and Song HX. 2017. Paleoproterozoic metamafic dyke swarms in the eastern Hebei massif, the eastern North China Craton: ~2.1Ga extension and ~1.8Ga metamorphism. Acta Petrologica Sinica, 33(9): 2827 - 2849 (in Chinese with English abstract)

Yang JH, Wu FY, Chung SL, Wilde SA and Chu MF. 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, Northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence. Lithos, 89(1 - 2): 89 - 106

Zhai MG and Liu WJ. 2003. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China Craton: A review. Precambrian Research, 122(1 - 4): 183 - 199

Zhai MG and Santosh M. 2011. The Early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. Gondwana Research, 20(1): 6 - 25

Zhai MG and Santosh M. 2013. Metallogeny of the North China Craton: Link with secular changes in the evolving Earth. Gondwana Research, 24(1): 275 - 297

Zhang CL, Diwu CR, Kröner A, Sun Y, Luo JL, Li QL, Gou LL, Lin HB, Wei XS and Zhao J. 2015. Archean-Paleoproterozoic crustal evolution of the Ordos Block in the North China Craton: Constraints from zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes for gneissic granitoids of the basement. Precambrian Research, 267: 121 - 136

Zhang HF, Zhai MG, Santosh M, Diwu CR and Li SR. 2011. Geochronology and petrogenesis of Neoarchean potassic meta-granites from Huai'an Complex: Implications for the evolution of the North China Craton. Gondwana Research, 20(1): 82 - 105

Zhang HF, Wang HZ, Santosh M and Zhai MG. 2016. Zircon U-Pb ages of Paleoproterozoic mafic granulites from the Huai'an terrane, North China Craton (NCC): Implications for timing of cratonization and crustal evolution history. Precambrian Research, 272: 244 - 263

Zhang Q, Wang Y, Li CD, Wang YL, Jin WJ and Jia XQ. 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications. Acta Petrologica Sinica, 22(9): 2249 - 2269 (in Chinese with English abstract)

Zhang XP and Geng W. 2016. The geological features and tectonic significances of the Wangjiahui rock in Wutai Mountains, Shanxi. Journal of Taiyuan University of Technology, 47(6): 779 - 785 (in Chinese with English abstract)

Zhao GC, Cawood P and Lu LZ. 1999a. Petrology and *P-T* history of the Wutai amphibolites: Implications for tectonic evolution of the Wutai Complex, China. Precambrian Research, 93(2 - 3): 181 - 199

Zhao GC, Wilde SA, Cawood PA and Lu LZ. 1999b. Tectonothermal history of the basement rocks in the western zone of the North China Craton and its tectonic implications. Tectonophysics, 310(1 - 4): 37 - 53

Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. Precambrian Research, 136(2): 177 - 202

Zhao GC, Wilde SA, Sun M, Li SZ, Li XP and Zhang J. 2008. SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the Lüliang Complex: Implications for the accretion and evolution of the Trans-North China Orogen. Precambrian Research, 160(3 - 4): 213 - 226

Zhao GC, Wilde SA, Guo JH, Cawood PA, Sun M and Li XP. 2010. Single zircon grains record two Paleoproterozoic collisional events in the North China Craton. Precambrian Research, 177(3 - 4): 266 - 276

Zhao GC, Cawood PA, Li SZ, Wilde SA, Sun M, Zhang J, He YH and Yin CQ. 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion. Precambrian Research, 222 - 223: 55 - 76

Zhao GC and Zhai MG. 2013. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: Review and tectonic implications. Gondwana Research, 23(4): 1207 - 1240

Zhao RF, Guo JH, Peng P and Liu F. 2011. 2.1Ga crustal remelting event in Hengshan Complex: Evidence from zircon U-Pb dating and Hf-Nd isotopic study on potassic granites. Acta Petrologica Sinica, 27(6): 1607 - 1623 (in Chinese with English abstract)

Zhou YY, Zhai MG, Zhao TP, Lan ZW and Sun QY. 2014. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of the Early Paleoproterozoic potassic granite in the Lushan area, southern margin of the North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 94: 190 - 204

Zhou YY, Zhao TP, Zhai MG, Gao JF, Lan ZW and Sun QY. 2015. Petrogenesis of the 2.1Ga Lushan garnet-bearing quartz monzonite on the southern margin of the North China Craton and its tectonic implications. Precambrian Research, 256: 241 - 255

附中文参考文献

白瑾. 1986. 五台山早前寒武纪地质. 天津: 天津科学技术出版社, 1 - 475

第五春荣, 孙勇, 林慈銮, 柳小明, 王洪亮. 2007. 豫西宜阳地区 TTG 质片麻岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素地质学. 岩石学报, 23(2): 253 - 262

杜利林, 杨崇辉, 任留东, 万渝生, 伍家善. 2009. 山西五台山区滹沱群变质玄武岩岩石学、地球化学特征及其成因意义. 地质通报, 28(7): 867 - 876

杜利林, 杨崇辉, 王伟, 任留东, 万渝生, 宋会侠, 耿元生, 侯可军. 2011. 五台地区滹沱群时代与地层划分新认识: 地质学与锆石年代学证据. 岩石学报, 27(4): 1037 - 1055

杜利林, 杨崇辉, 任留东, 宋会侠, 耿元生, 万渝生. 2012. 吕梁地

区 2.2 ~ 2.1Ga 岩浆事件及其构造意义. 岩石学报, 28(9): 2751 - 2769

杜利林, 杨崇辉, 王伟, 任留东, 万渝生, 宋会侠, 高林志, 耿元生, 侯可军. 2013. 五台地区滹沱群砾岩物质源区及新太古代地壳生长: 花岗岩和石英岩砾石锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素制约. 中国科学(地球科学), 43(1): 81 - 96

杜利林, 杨崇辉, 路增龙, 赵磊, 耿元生, 曹光跃, 第五春荣, 郭春丽, 侯可军. 2015. 五台山蒋村地区四集庄组——对滹沱群时代的再限定. 地球学报, 36(5): 599 - 612

耿元生, 刘敦一, 宋彪. 1997. 冀西北麻粒岩区早前寒武纪主要地质事件的年代格架. 地质学报, 71(4): 316 - 327

耿元生, 万渝生, 沈其韩, 李惠民, 张如心. 2000. 吕梁地区早前寒武纪主要地质事件的年代框架. 地质学报, 74(3): 216 - 223

耿元生, 杨崇辉, 万渝生. 2006. 吕梁地区古元古代花岗岩浆作用——来自同位素年代学的证据. 岩石学报, 22(2): 305 - 314

侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. 岩石学报, 23(10): 2595 - 2604

侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. 矿床地质, 28(4): 481 - 492

黄道袭, 张德会, 王世炎, 张毅星, 董春艳, 刘敦一, 万渝生. 2012. 华北克拉通南缘豫西下汤地区 2.3Ga 岩浆作用和 1.94Ga 变质作用——锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素组成及全岩地球化学研究. 地质论评, 58(3): 565 - 576

李江海, 钱祥麟, 翟明国. 1997. 华北北部麻粒岩相带的构造区划及其早前寒武纪构造演化. 地质科学, 32(3): 254 - 266

陆松年, 杨春亮, 蒋明媚, 李怀坤, 李惠民. 1996. 前寒武纪大陆地壳演化示踪. 北京: 地质出版社

沈其韩, 钱祥麟. 1995. 中国太古宙地质体组成、阶段划分和演化. 地球学报, 16(2): 113 - 120

沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表. 岩石矿物学杂志, 28(5): 495 - 500

宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 48(增 1): 26 - 30

孙大中, 李惠民, 林源贤, 周慧芳, 赵凤清, 唐敏. 1991. 中条山前寒武纪年代学、年代构造格架和年代地壳结构模式的研究. 地质学报, 65(3): 216 - 231

田永清. 1991. 五台山-恒山绿岩带地质及金的成矿作用. 太原: 山西科学技术出版社, 1 - 244

王凯怡, 郝杰, Wilde S, Cawood P. 2000. 山西五台山-恒山地区晚太古-早元古代若干关键地质问题的再认识: 单颗粒锆石离子探针质谱年龄提出的地质制约. 地质科学, 35(2): 175 - 184

王凯怡, Wilde S. 2002. 山西五台地区大洼梁花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 精确年龄. 岩石矿物学杂志, 21(4): 407 - 411, 420

王月然, 刘树文, 李秋根, 党青宁, 刘超辉, 杨斌, 古丽冰, 赵凤三. 2005. 五台山古元古代晚期的动力学背景: 王家会花岗岩地球化学的制约. 北京大学学报(自然科学版), 41(6): 840 - 850

伍家善, 刘敦一, 金龙国. 1986. 五台山区滹沱群变质基性熔岩中锆石 U-Pb 年龄. 地质论评, 32(2): 178 - 184

伍家善, 耿元生, 沈其韩, 万渝生, 刘敦一, 宋彪. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社

伍家善, 刘敦一, 耿元生. 2008. 中国古元古界滹沱群建系综合研究报告——滹沱群地质年代格架和重大地质事件序列. 中国主要断代地层建阶研究报告(2001 - 2005). 北京: 地质出版社, 534 - 544

杨崇辉, 杜利林, 任留东, 宋会侠, 万渝生, 领颜强. 刘增校. 2011. 河北赞皇地区许亭花岗岩的时代及成因: 对华北克拉通中部带构造演化的制约. 岩石学报, 27(4): 1003 - 1016

杨崇辉, 杜利林, 任留东, 宋会侠, 万渝生. 2015. 华北克拉通早前寒武纪地层划分对比及岩浆演化. 北京: 科学出版社, 1 - 277

杨崇辉, 杜利林, 耿元生, 任留东, 路增龙, 宋会侠. 2017. 冀东古元古代基性岩墙群的年龄及地球化学: ~2.1Ga 伸展及 ~1.8Ga 变质. 岩石学报, 33(9): 2827 - 2849

张旗, 王焰, 李承东, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义. 岩石学报, 22(9): 2249 - 2269

张许平, 耿威. 2016. 山西五台山区王家会岩体的地质特征及构造意义. 太原理工大学学报, 47(6): 779 - 785

赵瑞幅, 郭敬辉, 彭澎, 刘富. 2011. 恒山地区古元古代 2.1Ga 地壳重熔事件: 钾质花岗岩锆石 U-Pb 定年及 Hf-Nd 同位素研究. 岩石学报, 27(6): 1607 - 1623

附表 1　大洼梁花岗岩(样品 HT49-3)SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分析

Appendix Table 1　Zircon SHRIMP U-Pb analyses on Dawaliang granite (Sample HT49-3)

测点号	$^{206}Pb_c$ (%)	$^{206}Pb^*$ ($\times10^{-6}$)	U ($\times10^{-6}$)	Th ($\times10^{-6}$)	Th/U	$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄(Ma)	$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄(Ma)	不谐和度 (%)	$\frac{^{207}Pb^*}{^{206}Pb^*}$	±%	$\frac{^{207}Pb^*}{^{235}U}$	±%	$\frac{^{206}Pb^*}{^{238}U}$	±%	误差相关性
-1	1.06	42.4	128	102	0.83	2083±18	2179±21	4.42	0.13620	1.20	7.160	1.6	0.3815	1.00	0.64
-2	0.24	51.8	146	88	0.62	2226±17	2182±12	-2.01	0.13644	0.67	7.760	1.1	0.4125	0.90	0.80
-3	0.14	73.4	379	391	1.07	1310±11	1863±16	29.67	0.11393	0.87	3.540	1.3	0.2254	0.93	0.73
-4	0.66	20.7	70	56	0.82	1903±26	2145±50	11.27	0.13350	2.90	6.320	3.3	0.3434	1.60	0.49
-5	0.73	17.3	56	64	1.18	1978±29	2121±59	6.72	0.13170	3.40	6.520	3.8	0.3592	1.70	0.45
-6	2.05	18.9	76	74	1.01	1606±19	2136±46	24.78	0.13280	2.60	5.180	2.9	0.2830	1.30	0.46
-7	0.72	44.2	152	128	0.87	1870±17	2079±20	10.08	0.12860	1.10	5.967	1.5	0.3365	1.00	0.67
-8	0.45	32.8	119	103	0.89	1788±17	2117±23	15.53	0.13140	1.30	5.790	1.7	0.3197	1.10	0.63
-9	1.07	22.6	80	72	0.93	1809±20	2204±33	17.92	0.13810	1.90	6.170	2.3	0.3239	1.30	0.55
-10	0.18	35.2	99	67	0.70	2224±23	2161±18	-2.92	0.13480	1.00	7.660	1.6	0.4120	1.20	0.77
-11	0.14	19.8	77	65	0.87	1683±21	2070±22	18.71	0.12790	1.20	5.262	1.9	0.2983	1.40	0.75
-12	0.06	72.1	258	138	0.55	1815±17	2059±13	11.81	0.12712	0.76	5.701	1.3	0.3253	1.10	0.81
-13	0.10	43.7	136	102	0.78	2053±20	2165±17	5.21	0.13510	0.98	6.980	1.5	0.3749	1.10	0.76
-14	0.77	21	101	87	0.89	1386±18	2144±37	35.35	0.13340	2.10	4.410	2.6	0.2398	1.50	0.56
-15	0.20	13.9	40	41	1.08	2204±33	2161±29	-2.00	0.13480	1.70	7.570	2.4	0.4077	1.80	0.73
-16	0.21	18.7	53	46	0.90	2228±27	2140±24	-4.12	0.13320	1.40	7.580	2	0.4129	1.40	0.72
-17	0.26	18	51	37	0.75	2230±31	2172±27	-2.68	0.13560	1.60	7.730	2.3	0.4134	1.60	0.72

注:表中误差为 1σ,$^{206}Pb_c$ 和 Pb^* 分别代表普通铅和放射成因铅

附表 2　王家会和莲花山花岗岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 分析

Appendix Table 2　Zircon LA-ICPMS U-Pb analyses on Wangjiahui and Dawaliang granites

测点号	元素含量 ($\times10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	Pb	Th	U		$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ
王家会黑云母二长花岗片麻岩(HT55-1)																
-1	328	18	14	1.28	0.13075	0.00054	6.52948	0.06970	0.36284	0.00379	2109	7	2050	9	1996	18
-2	703	37	92	0.41	0.14087	0.00096	7.38424	0.21731	0.38020	0.00934	2239	11	2159	26	2077	44
-3	1230	71	36	1.98	0.13119	0.00029	7.14351	0.05507	0.39543	0.00304	2114	4	2129	7	2148	14
-4	616	39	29	1.33	0.13113	0.00034	6.86626	0.07130	0.38021	0.00389	2113	4	2094	9	2077	18
-5	1552	62	183	0.34	0.16244	0.00160	4.45411	0.06634	0.20049	0.00344	2481	17	1722	12	1178	18
-6	265	14	35	0.40	0.13117	0.00105	6.81881	0.32903	0.37709	0.01587	2114	14	2088	43	2063	74
-7	390	27	29	0.93	0.13138	0.00041	6.68609	0.07608	0.36941	0.00411	2116	6	2071	10	2027	19
-8	994	71	37	1.95	0.13109	0.00026	6.87129	0.06472	0.38043	0.00358	2113	4	2095	8	2078	17
-9	667	46	32	1.43	0.13021	0.00039	6.65969	0.09769	0.37102	0.00535	2102	5	2067	13	2034	25
-10	278	22	17	1.29	0.12937	0.00036	6.60059	0.06521	0.36995	0.00356	2100	5	2059	9	2029	17
-11	281	23	29	0.79	0.12982	0.00032	7.05060	0.08080	0.39383	0.00464	2095	4	2118	10	2141	21
-12	304	25	24	1.06	0.13009	0.00043	6.44171	0.09958	0.35868	0.00510	2099	6	2038	14	1976	24
-14	499	39	61	0.64	0.13398	0.00066	5.64085	0.19148	0.30494	0.00909	2151	9	1922	29	1716	45
-15	528	38	27	1.41	0.12988	0.00043	5.83206	0.09498	0.32578	0.00558	2098	6	1951	14	1818	27
-16	981	79	40	1.96	0.13131	0.00045	7.30951	0.16250	0.40344	0.00878	2117	6	2150	20	2185	40
-18	320	30	21	1.45	0.13015	0.00058	6.55086	0.14232	0.36488	0.00773	2102	8	2053	19	2005	37
-19	476	43	23	1.85	0.12924	0.00051	6.66968	0.12221	0.37452	0.00713	2088	7	2069	16	2051	33
-20	957	166	145	1.14	0.13115	0.00094	3.61373	0.06966	0.20177	0.00464	2113	12	1553	15	1185	25
-21	152	13	48	0.28	0.12940	0.00030	6.72829	0.07542	0.37691	0.00412	2100	4	2076	10	2062	19
-22	545	73	71	1.03	0.13004	0.00033	5.83657	0.05723	0.32544	0.00318	2098	4	1952	9	1816	15

续附表 2

Continued Appendix Table 2

测点号	元素含量（$\times10^{-6}$）			Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	Pb	Th	U		$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ
-23	250	25	16	1.57	0.12961	0.00047	6.51164	0.08640	0.36434	0.00486	2094	6	2047	12	2003	23
-24	1189	118	49	2.43	0.12942	0.00028	6.76234	0.03290	0.37892	0.00195	2100	4	2081	4	2071	9
-25	566	58	25	2.31	0.12777	0.00039	6.89581	0.06476	0.39130	0.00363	2078	5	2098	8	2129	17
-26	137	15	10	1.55	0.13135	0.00082	6.64506	0.06486	0.36672	0.00263	2117	11	2065	9	2014	12
-27	696	79	39	2.01	0.12780	0.00035	6.45164	0.04329	0.36588	0.00208	2078	4	2039	6	2010	10
-28	244	25	27	0.92	0.12909	0.00134	6.41873	0.11305	0.36032	0.00357	2087	14	2035	15	1984	17
-29	317	36	40	0.92	0.12963	0.00068	6.44868	0.11274	0.36056	0.00482	2094	9	2039	15	1985	23
-30	208	25	16	1.60	0.12930	0.00058	6.42496	0.03860	0.36033	0.00222	2089	8	2036	5	1984	11
莲花山含斑中细粒花岗岩(HT47-1)																
-1	284	38	53	0.71	0.13120	0.00021	6.94375	0.03522	0.38367	0.00181	2114	3	2104	5	2093	8
-2	123	19	21	0.90	0.13125	0.00037	6.91726	0.03743	0.38214	0.00184	2115	5	2101	5	2086	9
-3	152	21	19	1.12	0.14126	0.00110	7.43627	0.08882	0.38167	0.00341	2243	14	2165	11	2084	16
-4	127	17	18	0.92	0.13097	0.00046	6.79405	0.08649	0.37617	0.00465	2111	6	2085	11	2058	22
-5	92	12	15	0.79	0.13091	0.00075	6.75246	0.11450	0.37417	0.00627	2110	9	2080	15	2049	29
-6	79	10	13	0.80	0.13165	0.00110	6.55619	0.17580	0.36128	0.00964	2120	47	2053	24	1988	46
-7	125	17	24	0.71	0.13154	0.00039	7.00376	0.09810	0.38595	0.00518	2120	5	2112	12	2104	24
-8	121	15	22	0.69	0.13139	0.00057	6.72108	0.15184	0.37092	0.00826	2116	8	2075	20	2034	39
-9	124	17	18	0.93	0.13112	0.00074	6.78631	0.17289	0.37502	0.00877	2113	10	2084	23	2053	41
-10	93	12	16	0.71	0.13126	0.00048	6.95312	0.09116	0.38478	0.00506	2117	6	2105	12	2099	24
-11	192	25	23	1.06	0.13143	0.00041	7.02063	0.11114	0.38754	0.00614	2117	1	2114	14	2111	29
-12	226	24	23	1.03	0.14033	0.00054	7.88652	0.07850	0.40789	0.00401	2231	7	2218	9	2205	18
-13	103	13	19	0.70	0.13083	0.00050	6.72855	0.09116	0.37344	0.00523	2109	7	2076	12	2046	25
-14	107	13	18	0.70	0.13098	0.00035	6.93692	0.07130	0.38416	0.00387	2122	5	2103	9	2096	18
-15	204	23	35	0.67	0.13177	0.00027	7.07817	0.06781	0.38955	0.00365	2122	4	2121	9	2121	17
-16	441	52	71	0.73	0.14024	0.00047	7.29810	0.07205	0.37738	0.00352	2231	6	2149	9	2064	16
-17	64	8	11	0.74	0.13101	0.00046	6.86309	0.07598	0.37988	0.00397	2122	6	2094	10	2076	19
-19	80	10	11	0.90	0.13098	0.00139	6.48682	0.15088	0.35915	0.00753	2111	19	2044	20	1978	36
-20	118	14	14	1.01	0.13125	0.00043	6.97606	0.07721	0.38563	0.00415	2115	6	2108	10	2103	19
-21	204	28	29	0.97	0.13085	0.00047	6.97201	0.06265	0.38617	0.00272	2110	7	2108	8	2105	13
-22	89	11	17	0.64	0.13137	0.00043	6.79711	0.04791	0.37528	0.00246	2116	6	2085	6	2054	12
-23	70	10	14	0.73	0.13095	0.00044	6.73826	0.04856	0.37317	0.00236	2111	5	2078	6	2044	11
-24	155	22	19	1.15	0.13144	0.00058	6.80719	0.04728	0.37547	0.00173	2118	8	2087	6	2055	8
-25	99	12	14	0.86	0.13118	0.00090	6.70767	0.08544	0.37098	0.00469	2114	12	2074	11	2034	22
-26	138	19	18	1.06	0.13189	0.00052	7.00526	0.05285	0.38521	0.00246	2124	8	2112	7	2101	11
-27	132	22	22	1.03	0.13108	0.00329	6.82790	0.28650	0.37747	0.00662	2113	44	2089	37	2064	31
-28	137	20	19	1.09	0.13096	0.00037	6.95743	0.03274	0.38545	0.00171	2111	5	2106	4	2102	8
-29	108	15	18	0.82	0.13157	0.00058	6.90831	0.06655	0.38090	0.00376	2120	3	2100	9	2080	18
-30	231	37	52	0.72	0.13046	0.00081	6.59087	0.12557	0.36657	0.00856	2106	11	2058	17	2013	40
莲花山似斑状黑云母花岗岩(HT47-3)																
-1	131	18	34	0.53	0.13072	0.00100	6.57186	0.05753	0.36634	0.00359	2109	13	2056	8	2012	17
-2	194	24	33	0.75	0.13035	0.00042	6.98192	0.06174	0.38737	0.00418	2103	6	2109	8	2111	19
-3	84	12	15	0.77	0.12940	0.00032	6.93587	0.04838	0.38854	0.00272	2100	4	2103	6	2116	13
-4	76	11	12	0.90	0.13004	0.00036	6.88501	0.06617	0.38372	0.00363	2098	4	2097	9	2094	17
-5	222	29	27	1.07	0.12937	0.00028	7.04295	0.06054	0.39440	0.00326	2100	4	2117	8	2143	15
-6	151	20	25	0.83	0.12938	0.00030	7.04241	0.05286	0.39458	0.00304	2100	4	2117	7	2144	14

续附表 2

Continued Appendix Table 2

测点号	元素含量(×10⁻⁶)			Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	Pb	Th	U		$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ
-7	187	26	31	0.83	0.12934	0.00028	6.92910	0.05989	0.38824	0.00340	2100	4	2102	8	2115	16
-9	53	7	11	0.67	0.13076	0.00043	6.87153	0.07465	0.38122	0.00434	2109	6	2095	10	2082	20
-10	140	18	23	0.79	0.12948	0.00035	7.10761	0.07829	0.39765	0.00431	2091	4	2125	10	2158	20
-12	96	12	17	0.68	0.13111	0.00042	6.80285	0.07403	0.37627	0.00416	2113	6	2086	10	2059	19
-13	136	16	17	0.92	0.13091	0.00037	7.17864	0.06848	0.39763	0.00386	2110	6	2134	9	2158	18
-14	140	17	19	0.90	0.13020	0.00033	7.03795	0.07058	0.39208	0.00409	2102	5	2116	9	2132	19
-15	223	26	34	0.77	0.13140	0.00041	7.36809	0.13278	0.40649	0.00732	2117	10	2157	16	2199	34
-16	136	18	16	1.08	0.13076	0.00041	6.93485	0.07612	0.38453	0.00416	2109	6	2103	10	2097	19
-17	135	16	23	0.69	0.13082	0.00029	7.04773	0.06698	0.39068	0.00376	2109	4	2117	8	2126	17
-18	128	16	20	0.79	0.13001	0.00029	6.84444	0.06282	0.38165	0.00344	2098	4	2091	8	2084	16
-19	189	22	27	0.81	0.13089	0.00055	7.06545	0.20498	0.39129	0.01109	2110	7	2120	26	2129	51
-20	185	21	30	0.70	0.13068	0.00027	7.22012	0.06172	0.40070	0.00341	2107	4	2139	8	2172	16
-21	227	27	38	0.73	0.13146	0.00040	6.92880	0.08417	0.38231	0.00472	2118	1	2102	11	2087	22
-22	82	10	13	0.79	0.13045	0.00038	6.96319	0.06888	0.38732	0.00389	2106	5	2107	9	2110	18
-23	127	15	18	0.87	0.13001	0.00031	6.87713	0.04640	0.38366	0.00254	2098	4	2096	6	2093	12
-24	193	21	30	0.70	0.13080	0.00034	6.32653	0.06139	0.35072	0.00331	2109	4	2022	9	1938	16
-25	146	18	22	0.79	0.12933	0.00050	7.24657	0.04907	0.40636	0.00278	2100	6	2142	6	2198	13
-26	128	16	19	0.85	0.13045	0.00035	7.00496	0.03515	0.38929	0.00164	2106	5	2112	4	2120	8
-27	148	18	22	0.80	0.13030	0.00031	7.20751	0.04286	0.40105	0.00225	2102	4	2137	5	2174	10
-28	119	15	14	1.12	0.13032	0.00034	7.08244	0.03464	0.39416	0.00189	2102	4	2122	4	2142	9
-29	86	10	15	0.70	0.13031	0.00037	6.92658	0.03197	0.38547	0.00169	2102	4	2102	4	2102	8
-30	148	18	19	0.94	0.12940	0.00031	6.89543	0.05787	0.38639	0.00325	2100	4	2098	7	2106	15

注:Pb 代表全铅

附表 3　莲花山花岗岩(样品 HT82-1)LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄分析

Appendix Table 3　Zircon LA-ICPMS U-Pb analyses on Lianhuashan granite (Sample HT82-1)

测点号	元素含量(×10⁻⁶)			Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	Pb*	Th	U		$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ
-01	30	32	58	0.56	0.13354	0.00284	7.10992	0.08803	0.38618	0.00425	2145	37	2105	20	2125	11
-02	35	38	67	0.57	0.13378	0.00281	7.08180	0.08381	0.38397	0.00416	2148	36	2095	19	2122	11
-03	60	66	124	0.53	0.13446	0.00279	7.12543	0.08147	0.38437	0.00412	2157	36	2097	19	2127	10
-04	21	31	42	0.74	0.13600	0.00292	6.78960	0.08594	0.36209	0.00401	2177	37	1992	19	2084	11
-05	28	45	65	0.70	0.14027	0.00296	5.89351	0.07118	0.30474	0.00332	2231	36	1715	16	1960	10
-06	16	23	29	0.78	0.13469	0.00300	6.75178	0.09528	0.36358	0.00419	2160	38	1999	20	2079	12
-07	38	31	71	0.44	0.13485	0.00286	7.02166	0.08648	0.37765	0.00415	2162	37	2065	19	2114	11
-08	23	25	41	0.61	0.13689	0.00291	7.61040	0.09440	0.40323	0.00444	2188	37	2184	20	2186	11
-09	57	111	113	0.98	0.13854	0.00290	6.79322	0.08000	0.35564	0.00385	2209	36	1962	18	2085	10
-10	13	33	25	1.29	0.13672	0.00302	7.18104	0.09943	0.38094	0.00436	2186	38	2081	20	2134	12
-11	21	24	38	0.63	0.13220	0.00282	7.15619	0.08920	0.39260	0.00432	2127	37	2135	20	2131	11
-12	34	36	65	0.55	0.13321	0.00279	7.12244	0.08426	0.38778	0.00420	2141	36	2113	20	2127	11
-13	36	40	70	0.57	0.13375	0.00279	7.05555	0.08251	0.38259	0.00412	2148	36	2088	19	2119	10
-14	20	28	37	0.75	0.13231	0.00283	7.01715	0.08864	0.38463	0.00425	2129	37	2098	20	2114	11
-15	48	62	106	0.59	0.13187	0.00274	6.07700	0.07015	0.33422	0.00358	2123	36	1859	17	1987	10

续附表 3

Continued Appendix Table 3

测点号	元素含量（×10⁻⁶）				同位素比值						年龄(Ma)					
	Pb*	Th	U	Th/U	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ
-16	27	30	49	0.62	0.13257	0.00279	7.27168	0.08750	0.39780	0.00433	2132	36	2159	20	2145	11
-17	23	25	43	0.57	0.13348	0.00283	7.22884	0.08922	0.39275	0.00431	2144	37	2136	20	2140	11
-18	18	55	38	1.46	0.13090	0.00281	5.84373	0.07461	0.32375	0.00357	2110	37	1808	17	1953	11
-19	47	155	92	1.70	0.13296	0.00276	6.92059	0.07957	0.37747	0.00404	2137	36	2064	19	2101	10
-20	16	17	30	0.56	0.13040	0.00284	6.90001	0.09172	0.38374	0.00431	2103	38	2094	20	2099	12
-21	19	24	36	0.68	0.13433	0.00287	6.93789	0.08771	0.37455	0.00413	2155	37	2051	19	2104	11
-22	23	31	47	0.66	0.13451	0.00286	6.94615	0.08623	0.37449	0.00411	2158	37	2051	19	2105	11
-23	52	46	104	0.45	0.13199	0.00273	6.89436	0.07839	0.37880	0.00404	2125	36	2071	19	2098	10
-24	25	60	51	1.17	0.13168	0.00279	6.41200	0.07872	0.35310	0.00385	2121	37	1949	18	2034	11
-25	17	20	31	0.63	0.13118	0.00281	7.02275	0.08921	0.38821	0.00429	2114	37	2115	20	2114	11
-26	53	56	104	0.54	0.13114	0.00270	6.75393	0.07609	0.37347	0.00397	2113	36	2046	19	2080	10
-27	16	15	28	0.55	0.13519	0.00294	7.36291	0.09808	0.39494	0.00444	2166	37	2146	21	2157	12
-28	41	41	74	0.55	0.13230	0.00274	7.37108	0.08480	0.40402	0.00432	2129	36	2188	20	2158	10
-29	17	20	34	0.60	0.13381	0.00286	6.90513	0.08796	0.37418	0.00413	2149	37	2049	19	2099	11
-30	21	21	39	0.53	0.13228	0.00280	7.14082	0.08849	0.39142	0.00429	2129	37	2129	20	2129	11

注：Pb* 代表放射成因铅

附表 4　五台地区古元古代花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素分析

Appendix Table 4　Zircon Lu-Hf isotopic analyses on Paleoproterozoic granitoids in Wutai area

测点号	Age(Ma)	$^{176}Yb/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Lu/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$f_{Lu/Hf}$	$^{176}Hf/^{177}Hf_i$	$\varepsilon_{Hf}(0)$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	t_{DMI}(Ma)	t_{DM}^{C}(Ma)
HT49-3 大洼梁花岗岩													
-1	2179	0.031490	0.000743	0.001117	0.000021	0.281486	0.000016	-0.97	0.281439	-45.5	1.63	2476	2559
-2	2182	0.047024	0.000748	0.001552	0.000023	0.281476	0.000019	-0.95	0.281411	-45.8	0.70	2519	2608
-3	2171	0.072361	0.000454	0.002341	0.000015	0.281534	0.000022	-0.93	0.281437	-43.8	1.37	2490	2566
-4	2145	0.020874	0.000516	0.000786	0.000016	0.281492	0.000017	-0.98	0.281460	-45.2	1.60	2446	2534
-5	2121	0.042107	0.000489	0.001500	0.000015	0.281556	0.000020	-0.95	0.281495	-43.0	2.29	2404	2480
-6	2171	0.058027	0.003666	0.001821	0.000099	0.281494	0.000019	-0.95	0.281419	-45.2	0.71	2511	2598
-7	2171	0.037474	0.000296	0.001356	0.000011	0.281516	0.000019	-0.96	0.281459	-44.4	2.16	2451	2527
-8	2171	0.091531	0.002085	0.002952	0.000062	0.281556	0.000022	-0.91	0.281434	-43.0	1.25	2500	2572
-9	2171	0.041484	0.000460	0.001449	0.000015	0.281456	0.000020	-0.96	0.281396	-46.5	-0.08	2539	2638
-10	2161	0.024099	0.000166	0.000938	0.000005	0.281537	0.000017	-0.97	0.281498	-43.7	3.31	2395	2462
-11	2171	0.060594	0.001038	0.001905	0.000031	0.281530	0.000019	-0.94	0.281451	-43.9	1.86	2467	2542
-12	2171	0.068536	0.001000	0.002445	0.000037	0.281574	0.000022	-0.93	0.281472	-42.4	2.62	2441	2504
-13	2165	0.051695	0.003040	0.001738	0.000094	0.281524	0.000016	-0.95	0.281452	-44.1	1.76	2465	2542
-14	2171	0.022908	0.000156	0.000849	0.000005	0.281504	0.000019	-0.97	0.281469	-44.8	2.50	2434	2510
-15	2161	0.031784	0.000057	0.001205	0.000002	0.281467	0.000021	-0.96	0.281418	-46.1	0.45	2508	2604
-16	2140	0.033395	0.000475	0.001177	0.000013	0.281497	0.000018	-0.96	0.281449	-45.1	1.07	2465	2555
-17	2172	0.015658	0.000080	0.000617	0.000003	0.281477	0.000017	-0.98	0.281452	-45.8	1.91	2456	2540
HT55-1 王家会黑云母二长花岗片麻岩													
-1	2109	0.032364	0.000351	0.001166	0.000014	0.281423	0.000018	-0.96	0.281377	-47.7	-2.20	2565	2692
-2	2239	0.013095	0.000370	0.000630	0.000013	0.281436	0.000016	-0.98	0.281409	-47.2	1.94	2512	2593
-3	2114	0.027681	0.000276	0.001058	0.000009	0.281440	0.000021	-0.97	0.281398	-47.1	-1.34	2535	2653
-4	2113	0.031834	0.000135	0.001264	0.000006	0.281507	0.000018	-0.96	0.281456	-44.7	0.72	2457	2551
-5	2481	0.032619	0.000842	0.001272	0.000031	0.281463	0.000015	-0.96	0.281403	-46.3	7.29	2518	2528

续附表 4

Continued Appendix Table 4

测点号	Age(Ma)	$^{176}Yb/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Lu/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$f_{Lu/Hf}$	$^{176}Hf/^{177}Hf_i$	$\varepsilon_{Hf}(0)$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	t_{DMI}(Ma)	t_{DM}^{C}(Ma)
-6	2114	0.010256	0.000162	0.000467	0.000006	0.281470	0.000018	-0.99	0.281451	-46.0	0.56	2456	2560
-7	2116	0.009709	0.000170	0.000432	0.000006	0.281422	0.000017	-0.99	0.281405	-47.7	-1.03	2518	2640
-8	2113	0.026827	0.000402	0.001054	0.000014	0.281498	0.000019	-0.97	0.281456	-45.0	0.70	2455	2552
-9	2102	0.036268	0.000946	0.001440	0.000036	0.281487	0.000019	-0.96	0.281429	-45.5	-0.51	2496	2602
-10	2100	0.021456	0.000078	0.000883	0.000005	0.281473	0.000016	-0.97	0.281438	-45.9	-0.24	2479	2588
-11	2095	0.014934	0.000632	0.000621	0.000022	0.281444	0.000017	-0.98	0.281420	-46.9	-0.99	2501	2621
-12	2099	0.020358	0.000040	0.000818	0.000002	0.281448	0.000018	-0.98	0.281416	-46.8	-1.05	2508	2627
-14	2151	0.013535	0.000083	0.000606	0.000003	0.281492	0.000014	-0.98	0.281467	-45.3	1.98	2435	2519
-16	2098	0.033181	0.000267	0.001320	0.000008	0.281476	0.000019	-0.96	0.281424	-45.8	-0.78	2503	2613
-17	2117	0.056380	0.000188	0.002197	0.000007	0.281574	0.000018	-0.93	0.281486	-42.4	1.85	2424	2498
-18	2102	0.021616	0.000107	0.000884	0.000003	0.281461	0.000018	-0.97	0.281426	-46.4	-0.62	2495	2608
-19	2088	0.086432	0.004512	0.002940	0.000139	0.281478	0.000017	-0.91	0.281361	-45.8	-3.23	2611	2725
-20	2113	0.020479	0.001095	0.000872	0.000038	0.281449	0.000015	-0.97	0.281414	-46.8	-0.80	2511	2626
-21	2100	0.013790	0.000320	0.000613	0.000012	0.281459	0.000020	-0.98	0.281435	-46.4	-0.34	2480	2593
-22	2098	0.039657	0.000643	0.001725	0.000028	0.281476	0.000017	-0.95	0.281407	-45.8	-1.37	2530	2642
-23	2094	0.021210	0.000391	0.000873	0.000019	0.281441	0.000021	-0.97	0.281406	-47.1	-1.48	2521	2644
-24	2100	0.024315	0.000620	0.000960	0.000023	0.281487	0.000018	-0.97	0.281448	-45.5	0.13	2465	2569
-25	2078	0.043741	0.000594	0.001698	0.000024	0.281492	0.000017	-0.95	0.281425	-45.3	-1.20	2506	2617
-26	2117	0.022618	0.000387	0.000890	0.000011	0.281474	0.000016	-0.97	0.281438	-45.9	0.17	2477	2581
-27	2078	0.039172	0.000263	0.001502	0.000009	0.281533	0.000018	-0.95	0.281473	-43.8	0.51	2437	2533
-28	2087	0.014082	0.000132	0.000584	0.000005	0.281421	0.000017	-0.98	0.281398	-47.8	-1.96	2530	2662
-29	2094	0.031599	0.001467	0.001237	0.000047	0.281407	0.000020	-0.96	0.281358	-48.3	-3.20	2592	2729
-30	2089	0.031219	0.000148	0.001260	0.000005	0.281403	0.000019	-0.96	0.281353	-48.4	-3.51	2599	2740
HT47-1 莲花山斑状花岗岩													
-1	2114	0.016515	0.000029	0.000641	0.000001	0.281461	0.000016	-0.98	0.281435	-46.4	0.00	2479	2587
-2	2115	0.021433	0.000022	0.000820	0.000001	0.281453	0.000018	-0.98	0.281420	-46.6	-0.53	2502	2614
-3	2243	0.025373	0.000827	0.000950	0.000027	0.281429	0.000017	-0.97	0.281388	-47.5	1.28	2543	2629
-4	2111	0.019137	0.000223	0.000746	0.000007	0.281452	0.000016	-0.98	0.281422	-46.7	-0.56	2499	2612
-5	2110	0.020480	0.000165	0.000774	0.000005	0.281427	0.000017	-0.98	0.281396	-47.6	-1.49	2534	2658
-6	2120	0.014094	0.000049	0.000557	0.000002	0.281471	0.000015	-0.98	0.281449	-46.0	0.61	2460	2562
-7	2120	0.018051	0.000074	0.000709	0.000003	0.281465	0.000017	-0.98	0.281437	-46.2	0.20	2478	2583
-8	2116	0.017027	0.000033	0.000677	0.000001	0.281475	0.000017	-0.98	0.281448	-45.9	0.49	2463	2565
-9	2113	0.025109	0.000066	0.000990	0.000002	0.281463	0.000019	-0.97	0.281424	-46.3	-0.44	2499	2608
-10	2117	0.016297	0.000060	0.000645	0.000002	0.281437	0.000017	-0.98	0.281411	-47.2	-0.82	2513	2630
-11	2117	0.017447	0.000197	0.000687	0.000007	0.281407	0.000016	-0.98	0.281379	-48.3	-1.94	2556	2686
-12	2231	0.022183	0.000038	0.000864	0.000001	0.281442	0.000018	-0.97	0.281405	-47.0	1.62	2519	2603
-13	2109	0.017022	0.000084	0.000672	0.000003	0.281428	0.000014	-0.98	0.281401	-47.5	-1.33	2526	2649
-14	2122	0.019071	0.000077	0.000742	0.000003	0.281456	0.000016	-0.98	0.281426	-46.5	-0.14	2492	2601
-15	2122	0.019136	0.000054	0.000748	0.000002	0.281431	0.000016	-0.98	0.281401	-47.4	-1.05	2527	2646
-16	2231	0.021759	0.000246	0.000850	0.000009	0.281417	0.000018	-0.97	0.281381	-47.9	0.75	2553	2646
-17	2122	0.021121	0.000322	0.000821	0.000012	0.281489	0.000019	-0.98	0.281456	-45.4	0.92	2453	2549
-19	2111	0.018794	0.000052	0.000758	0.000001	0.281502	0.000019	-0.98	0.281472	-44.9	1.22	2431	2524
-20	2115	0.018601	0.000108	0.000733	0.000004	0.281448	0.000015	-0.98	0.281418	-46.8	-0.61	2504	2618
-21	2110	0.025106	0.000325	0.000967	0.000011	0.281465	0.000019	-0.97	0.281426	-46.2	-0.45	2496	2606
-22	2116	0.012952	0.000088	0.000516	0.000003	0.281455	0.000019	-0.98	0.281434	-46.6	0.01	2479	2589
-23	2111	0.015314	0.000156	0.000607	0.000006	0.281474	0.000017	-0.98	0.281449	-45.9	0.42	2460	2564
-24	2118	0.018286	0.000251	0.000715	0.000009	0.281467	0.000020	-0.98	0.281438	-46.2	0.17	2477	2582

续附表 4

Continued Appendix Table 4

测点号	Age(Ma)	$^{176}Yb/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Lu/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$f_{Lu/Hf}$	$^{176}Hf/^{177}Hf_i$	$\varepsilon_{Hf}(0)$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	t_{DMI}(Ma)	t_{DM}^{C}(Ma)
-25	2114	0.018471	0.000042	0.000730	0.000001	0.281507	0.000019	-0.98	0.281478	-44.7	1.51	2422	2512
-26	2124	0.019092	0.000045	0.000741	0.000002	0.281407	0.000018	-0.98	0.281377	-48.3	-1.86	2560	2687
-27	2113	0.017053	0.000025	0.000669	0.000001	0.281394	0.000017	-0.98	0.281367	-48.7	-2.47	2572	2708
-28	2111	0.019810	0.000314	0.000763	0.000011	0.281469	0.000017	-0.98	0.281439	-46.1	0.04	2476	2583
-29	2120	0.019844	0.000062	0.000775	0.000003	0.281431	0.000018	-0.98	0.281400	-47.4	-1.13	2529	2648
-30	2106	0.015632	0.000140	0.000621	0.000005	0.281444	0.000019	-0.98	0.281419	-47.0	-0.76	2501	2618
HT47-3 莲花山似斑状黑云母花岗岩													
-1	2109	0.013310	0.000045	0.000526	0.000001	0.281519	0.000016	-0.98	0.281497	-44.3	2.09	2394	2480
-2	2103	0.019583	0.000248	0.000759	0.000008	0.281484	0.000015	-0.98	0.281453	-45.6	0.37	2456	2560
-3	2100	0.013327	0.000105	0.000520	0.000004	0.281457	0.000016	-0.98	0.281436	-46.5	-0.30	2477	2591
-4	2098	0.020157	0.000429	0.000772	0.000013	0.281488	0.000017	-0.98	0.281458	-45.4	0.43	2451	2553
-5	2100	0.028261	0.000280	0.001075	0.000010	0.281493	0.000019	-0.97	0.281450	-45.2	0.20	2464	2566
-6	2100	0.018017	0.000128	0.000714	0.000004	0.281437	0.000016	-0.98	0.281408	-47.2	-1.28	2517	2639
-7	2100	0.021248	0.000426	0.000812	0.000014	0.281452	0.000018	-0.98	0.281419	-46.7	-0.89	2503	2620
-9	2109	0.017138	0.001036	0.000670	0.000039	0.281479	0.000017	-0.98	0.281452	-45.7	0.47	2457	2560
-10	2091	0.016429	0.000117	0.000645	0.000004	0.281444	0.000015	-0.98	0.281419	-47.0	-1.13	2502	2624
-12	2113	0.015010	0.000072	0.000596	0.000002	0.281471	0.000018	-0.98	0.281447	-46.0	0.37	2463	2568
-13	2110	0.021506	0.000101	0.000842	0.000004	0.281496	0.000018	-0.97	0.281462	-45.1	0.85	2445	2542
-14	2102	0.018034	0.000095	0.000700	0.000003	0.281428	0.000018	-0.98	0.281400	-47.5	-1.55	2528	2654
-15	2117	0.016384	0.000022	0.000641	0.000000	0.281438	0.000017	-0.98	0.281412	-47.2	-0.76	2510	2627
-16	2109	0.025911	0.000045	0.000987	0.000002	0.281445	0.000018	-0.97	0.281405	-46.9	-1.19	2524	2642
-17	2109	0.017440	0.000152	0.000683	0.000006	0.281456	0.000017	-0.98	0.281428	-46.5	-0.37	2489	2601
-18	2098	0.016107	0.000023	0.000635	0.000001	0.281430	0.000015	-0.98	0.281405	-47.5	-1.46	2521	2646
-19	2110	0.018287	0.000033	0.000712	0.000001	0.281425	0.000016	-0.98	0.281396	-47.6	-1.47	2533	2657
-20	2107	0.019806	0.000227	0.000743	0.000007	0.281404	0.000015	-0.98	0.281375	-48.4	-2.32	2563	2696
-21	2118	0.015954	0.000026	0.000626	0.000001	0.281459	0.000016	-0.98	0.281434	-46.4	0.03	2481	2589
-22	2106	0.016891	0.000029	0.000666	0.000001	0.281459	0.000016	-0.98	0.281433	-46.4	-0.30	2483	2595
-23	2098	0.018962	0.000207	0.000740	0.000007	0.281467	0.000018	-0.98	0.281437	-46.2	-0.30	2478	2589
-24	2109	0.016404	0.000065	0.000641	0.000002	0.281441	0.000018	-0.98	0.281416	-47.1	-0.82	2506	2623
-25	2100	0.018333	0.000059	0.000713	0.000002	0.281441	0.000014	-0.98	0.281413	-47.1	-1.13	2511	2632
-26	2106	0.017378	0.000018	0.000679	0.000001	0.281380	0.000016	-0.98	0.281353	-49.2	-3.13	2592	2735
-27	2102	0.017171	0.000088	0.000670	0.000003	0.281429	0.000016	-0.98	0.281402	-47.5	-1.45	2525	2649
-28	2102	0.030445	0.000652	0.001153	0.000024	0.281500	0.000016	-0.97	0.281454	-45.0	0.38	2459	2559
-29	2102	0.017223	0.000076	0.000677	0.000003	0.281472	0.000018	-0.98	0.281445	-46.0	0.06	2467	2575
-30	2100	0.022600	0.000098	0.000856	0.000003	0.281447	0.000020	-0.97	0.281413	-46.8	-1.11	2512	2631

注:锆石 Hf 同位素计算所用的参数为:^{176}Lu 衰变常数 $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}$,球粒陨石(CHUR)$^{176}Lu/^{177}Hf = 0.0332$,$^{176}Hf/^{177}Hf = 0.282772$(Blichert-Toft and Albeèade, 1997);亏损地幔(DM)$^{176}Lu/^{177}Hf = 0.0384$,$^{176}Hf/^{177}Hf = 0.28325$(Griffin *et al.*, 2000);长英质(Felsic)上地壳的 $f_{Lu/Hf}$ 为 -0.72(Vervoort *et al.*, 2000)

滇东昆阳群地层序列的厘定及其在中国地层表的位置

高林志[1)],张 恒[1)],张传恒[2)],丁孝忠[1)],尹崇玉[1)],武振杰[1)],宋 彪[1)]
1)中国地质科学院地质研究所,北京,100037;2)中国地质大学(北京),北京,100083;

内容提要:本文通过滇东地区中元古代昆阳群年代地层学研究,提供了新元古代青白口系柳坝塘组的几组高精度锆石SHRIMP U-Pb年龄,通过新元古代地层柳坝塘组与下伏地层(美党组、大龙口组和富良棚组)连续沉积关系以及昆阳群各组的同位素年代学数据,将滇东地区建立新的"系"一级地层单位,即"玉溪系",填补其在中国地层表中待建系的位置。笔者通过进一步的野外地层追踪和对"原昆阳群"的锆石年龄数据的比对研究,明确了"原昆阳群"争议已久的"倒八序列"为华南古陆西南缘中—新元古代地层的正确沉积序列,并以此在滇东地区建立了完整中—新元古代地层及年代地层层序,结合华北古陆上已建立的西山系(1.4 ~ 1.2 Ga),本文将昆阳群分属于西山系(1.2 ~ 1.4 Ga)和玉溪系(1.0 ~ 1.2 Ga),重新厘定昆阳群时代的归属,以期填补中国地层表中的"待建系"。

关键词:滇东地区;玉溪系;锆石SHRIMP U-Pb;昆阳群

建立中国中—新元古代地层柱,使其成为国际地层对比标准是中国地质学家的梦。中国地层表中传统新元古代青白口群下马岭组,由于获得高精度锆石SHRIMP U-Pb年龄1368 ± 12 Ma(高林志等,2007;Gao Linzhi et al., 2007),而下移到中元古界之后,中国完整的地层年表中似乎缺失了近0.4 Ga的地层。全国地层委员会将乔秀夫等(2007)命名的西山系(1.4 ~ 1.2 Ga)和缺失的那个时段(1.2 ~ 1.0 Ga)暂定为"待建系"。笔者通过近年来在云南滇东地区进行的野外工作,在晋宁地区的青白口系柳坝塘组命名地—柳坝塘村获得一系列高精度锆石SHRIMP U-Pb年龄(高林志等,2015),将柳坝塘组从昆阳群中分离出来,使我们可以从昆阳群的地层中还原出"未建系(1.4 ~ 1.0 Ga)"时段的地层。本次研究中,笔者等首先厘定了昆阳群在地层柱中的位置,考虑到西山系(1.0 ~ 1.2 Ga)已在华北古陆上命名的事实;本文将昆阳群分属于西山系(1.0 ~ 1.2 Ga)和玉溪系(1.2 ~ 1.4 Ga),重新厘定昆阳群时代的归属,以期填补中国地层表中的"待建系"。

昆阳群由朱庭祜1927年命名。李希勣等(1953)在铜矿研究中引用了昆阳群的概念和地层序列。邓家藩等[1]做了更系统的地层划分和地层定位总结,1960年代末,滇中地区通过1∶20 0000区测(1∶20 0000昆明幅,1971),建立起昆阳群—自下而上为黄草岭组、黑山头组、大龙口组、美党组、因民组、落雪组、鹅头厂组、绿汁江组八个组的层序(称"正八"观点);其后根据康滇野外实地调查及四川"双会"片区公认的"会理群"层序和东川片区昆阳群层序,吴懋德、李希勣、吕世琨等对争论的焦点—即"东川运动"存在与否进行了讨论;吴懋德等[2]提出昆阳群的八个组可分为两个四组,"因民组、落雪组、鹅头厂组、绿汁江组"四个组应倒过来置于"黄草岭组、黑山头组、大龙口组、美党组"四个组之下(称"倒八"观点)。至此,"正八"与"倒八"序列之争一直延续至今。

综观长期争论的焦点,某些地质学家曾错误地将东川地区因民组紫色页岩与柳坝塘组紫色页岩对比而产生了问题,使云南地区的昆阳群地层序列在地层排序上出现极大混乱;在地层年表中曾出现不同的岩石排列组合,甚至引起近50年来的地层划分和地层对比争论。目前广义的"昆阳群"主要分布于东川、滇中和滇东地区,所处大地构造位置为扬子板块西缘。但是,由于昆阳群岩组命名众多,地层划

注:本文为科技部基础项目(编号:2015FY310100)、国家自然科学基金资助项目(编号:41372038)和中国地质调查局地调项目(编号:12120110200015009,12120110200016141)的成果。
收稿日期:2017-09-06;改回日期:2018-02-08;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2018.02.002
作者简介:高林志,男,1955年生。研究员,主要从事生物地层、层序地层、灾变事件地层研究。Email:gaolzh@cags.ac.cn。

分几经变革,地层对比产生了极大的混乱(孙家聪,1982,1983,1988;曹瑞骥等,1984;尹福光等,2011;周邦国等,2012;汪正江等,2015;王生伟等,2016);其原因为邓家藩(1963)将云南中东部的“柳坝塘组”和“军哨组”与东川地区的因民组紫色层对比,将其底部发育的沉积间断命名为“易门运动”,进而否定了云南东川地区因民组之下的“东川运动”,认为“东川运动面”为断层接触关系,随即将“易门运动”替代“东川运动”,并作为上、下昆阳群的分界。自此“易门运动”与“东川运动”的争论引起上、下昆阳群地层排序的困惑和地层对比的矛盾。然而,因民组火山岩 U—Th—Pb 年龄(1685 Ma 和 1878 Ma)曾一度成为昆阳群“倒八组”在地层柱中的排列位置上重要的参考年龄依据(吴懋德等,1990);尽管争论依然继续,该年龄已影响了整个西南地区前寒武纪的地层划分和对比(吕世琨和戴恒贵,2001)。首先,其排除了因民组与柳坝塘组的对比关系,其次使柳坝塘组成为昆阳群的顶部层位,也确立了柳坝塘组是中国南、北两陆块青白口纪地层对比的关键层位。其高精度的同位素年代学研究是中外地质学家追求的目标,成为急待解决问题(高林志等,2015)。应肯定,20 世纪 70 年代起,吴懋德❷、李希勣等(1984)、吴懋德等(1990)对地层划分和对比做出卓越贡献,得到后期在成矿预设中的肯定和发扬(戴恒贵,1997)。吴懋德等(1990)经过不断野外地层观察和野外构造确认以及大范围的地层追朔,明确了昆阳群自下而上可划分为三个亚群;其下亚群包括了因民组、落雪组、鹅头厂组(黑山组)、绿汁江组(青龙山组)四个组;中亚群为黄草岭组(大营盘组)、黑山头组(小河口组)、大龙口组(麻地组)、美党组(茅草房组)四个组;上亚群为柳坝塘组(者贵组中、下部,或望厂组,或军哨组)、华家箐组(上二组)两个组的野外地层序列的事实。昆阳群的地层排序长期以来存在极大的争议,尤为突出的是 70 年代以来的上亚群(4 组)与中亚群(4 组)的排序问题,有了“正八组”(孙家聪,1982,198,1988;薛步高,1999)和“倒八组”(云南省地质局,1966;吴懋德,1978;李希勣等,1984)之分。由于昆阳群多个岩组富产铜和铁等矿床,以及其他有色金属矿床,因此,修订昆阳群的地层序列和地层对比关系始终是昆阳群研究争论的焦点。吴懋德和李希勣(1981)依据云南昆阳群的两种底辟构造认识,对“倒八组”现象做出了很好的构造解释。李希勣等(1984)强调了“昆阳群厚度大(近 20 km),是阿尔卑斯式褶皱断裂发育,特别是几个大的逆冲断层和刺穿构造存在结果,使得正确认识这套地层排序产生了很多困难”。然而,有关李氏的昆阳群上亚群与青白口系的关系的观点,被鄢芸樵(1986)在同刊物(《地质论评》)上进行商榷。

昆阳群变质和变形涉及到:

(1)对“晋宁运动”认识,原定义该运动发生在昆阳群之后,澄江组之前,特别是华南地区与“晋宁运动”对比的四堡运动、梵净山运动、武陵运动、九岭运动等均定位于 820 Ma 左右的运动(高林志等,2011,2012;张恒等,2015;Zhang Heng et al.,2015),“晋宁运动”是否与之相同?

(2)由于早期的同位素测年延续了“正八组”(下四个组:黄草岭组、黑山头组、大龙口组、美党组;上四个组:因民组、落雪组、黑山组、青龙山组)展开的,Greentree 等(2006)曾用锆石 SHRIMP U-Pb 测年方法获得一些数据,由于其受“正八组”序列观点影响下,数据排在正八组序列上,反而无规律可循,使地层对比更加混乱。

2005 年国土资源部开展的新一轮大地调项目,使“正八组”序列再次被新的同位素年龄数据改变。张传恒等(2007)在黑山头组富良棚段上部安山质熔结凝灰岩(层凝灰岩)获得的锆石 SHRIMP U-Pb 加权平均年龄为 1032 ± 9 Ma,成为该地区首次发表的“颠覆性”成果,彻底结束了“正八组”和“倒八组”地层序列之争,也首次以精确同位素定年明确了李氏等“倒八组”排序的正确性;随后,孙志明等(2009)在东川地区黑山组中的凝灰岩锆石中获得 SHRIMP U-Pb 加权平均年龄为 1503 ± 17 Ma,明确了黑山组隶属东川群。

依据上述的最新同位素测年成果,2009 年 12 月中国地层委员会与中国地质调查局成都地调中心的专家在云南东川和易门地区联合召开野外现场会,会后“纪要”(中国地质调查局科技外事部,2010)建议将东川地区的昆阳群(原下亚群)恢复最初的命名,即东川群,包括自下而上为因民组、落雪组、黑山组和青龙山组;将昆阳群中亚群保留为昆阳群(原中亚群),自下而上为黄草岭组、黑山头组、富良棚组、大龙口组和美党组(李怀坤等,2013)。“纪要”中强调了东川群与昆阳群在地域上没有直接的接触关系。然而,胡荣民等(1993)在石屏县热水塘—车家城一带发现昆阳群黄草岭组以下存在一套厚逾 1000m 的连续沉积地层,并建立了两个新组:车家城组和热水塘组。“正八组”观点的学者(薛步

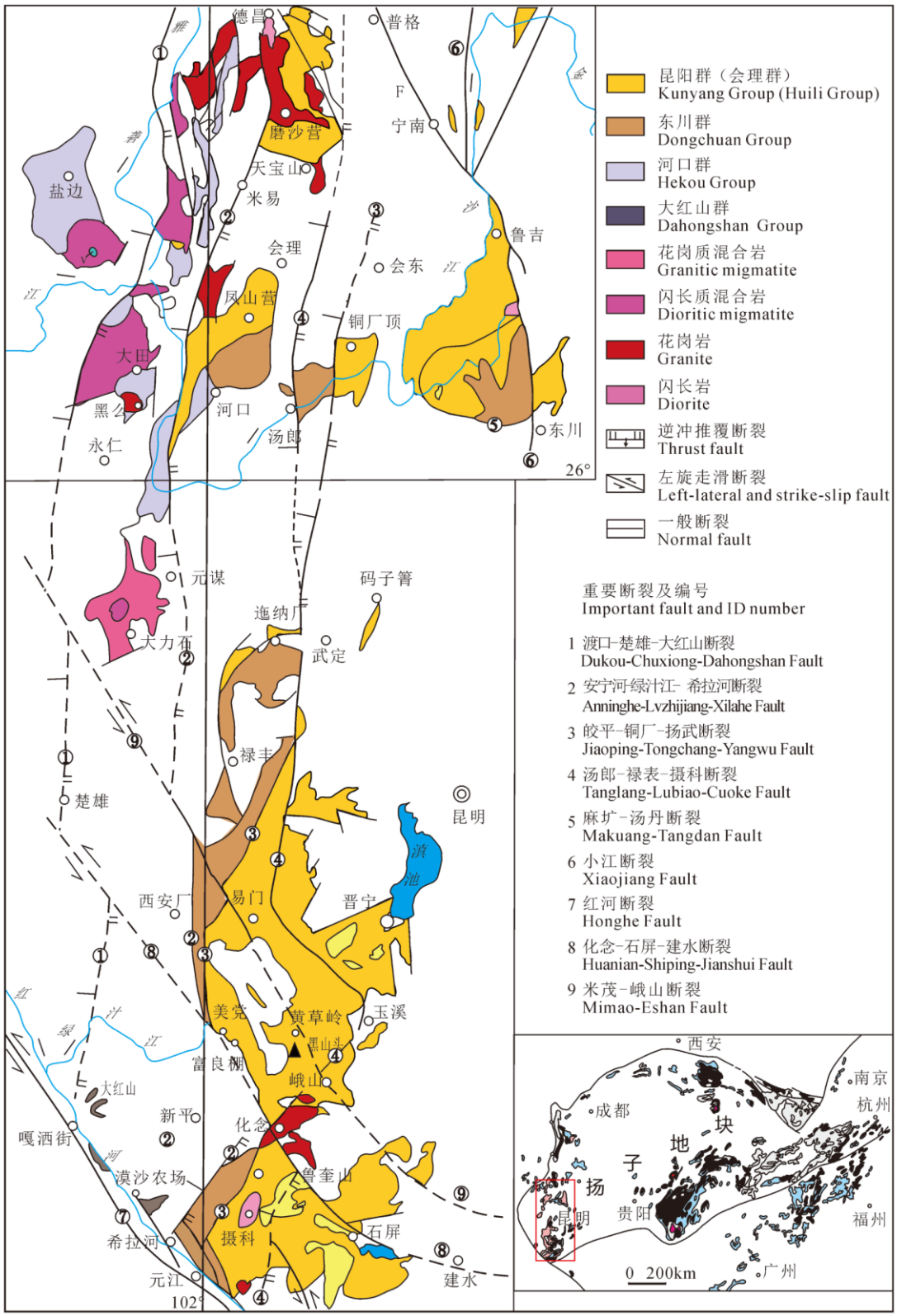


图 1 康滇地区前南华系及构造要图(据戴恒贵,1997, 改编)

Fig. 1 Pre-Nanhuan System in Sichuan and Yunnan provinces and tectonic map (from Dai Henggui, 1997&)

高,2000),曾一再强调云南石屏县地区黄草岭组之下有连续沉积(车家城组和热水塘组),似乎其地层意义就是"正八组"序列之下还有"根"。而云南石屏县地区正是吴懋德等(1990)划分的昆阳群下亚群;据此,戴恒贵(1997)也认为云南元江撮科地区的黄草岭组之下的这套地层有望建立滇东地区的黄草岭组完整剖面。本文作者等在野外实地追索了这两个新建组,发现石屏县热水塘地区热水塘组中发育了大量的凝灰岩、流纹岩以及大量的辉绿岩,在构造上与东川地区的黑山组可能同为裂谷构造背景,因此,笔者认为黄草岭组之下车家城组和热水塘组的同位素定年尤为重要,有利于从构造模式上与东川群的黑山组对比。另外,关于东川群(原昆阳群下亚群)的底界,杨斌等(2016)发表了武定地区因民组大竹棚流纹岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄加权平均值为 1730 ± 4Ma,再次确定了因民组隶属长城系,结合孙志明等(2009)在东川地区黑山组中凝灰岩获得的锆石 SHRIMP U-Pb 加权平均年龄 1503 ± 17 Ma,确立了黑山组隶属新年代地层表中的蓟县系(图 2)。

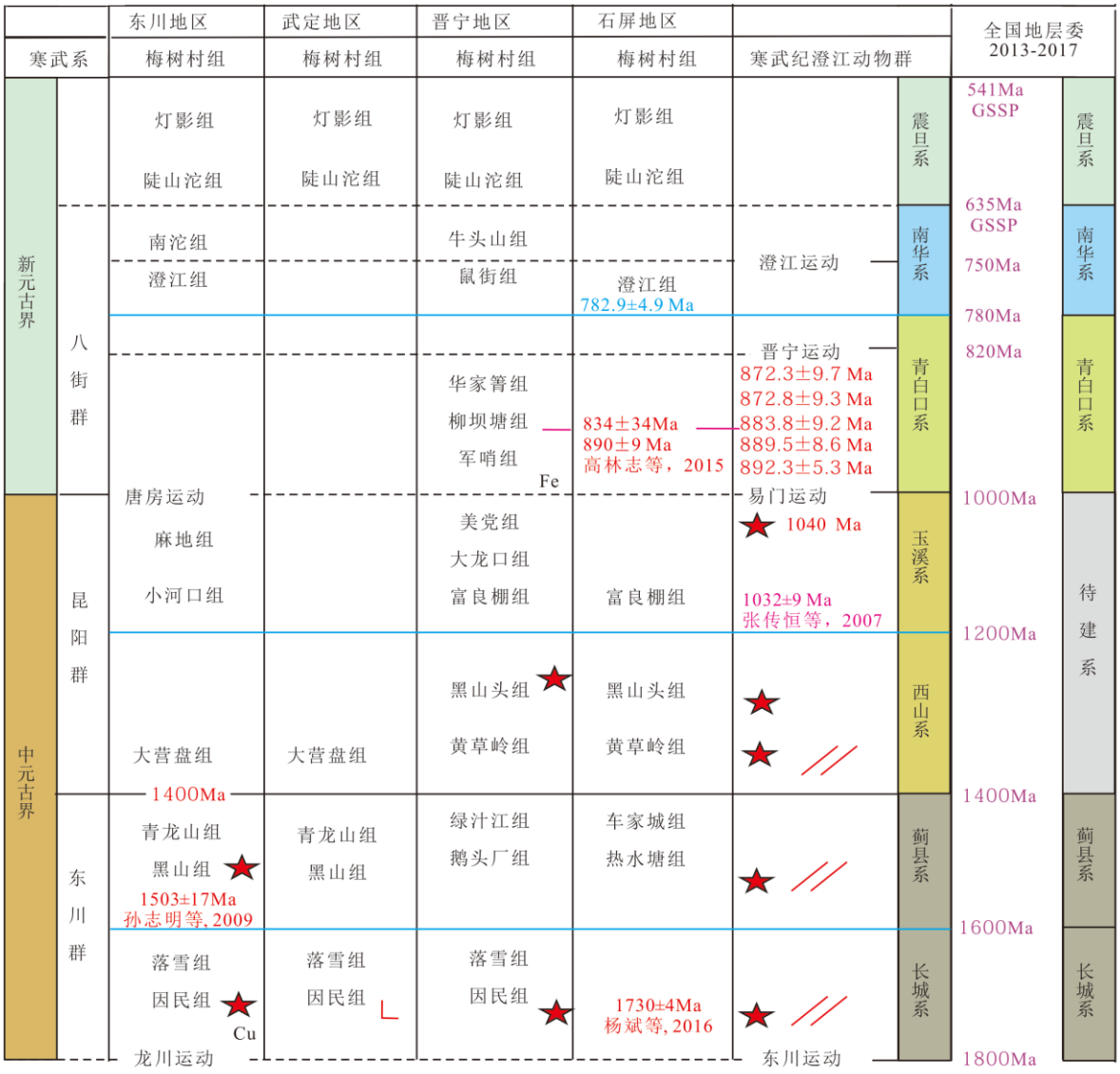


图 2 滇东地区中—新元古代地层在地层柱中的位置

Fig. 2 Meso—Neoproterozoic strata of Eastern Yunnan in its position of the stratigraphic column

1　地层序列及采样层位

1.1　云南东川地区

东川群(原昆阳群下亚群)发育了因民组、落雪组、黑山组和青龙山组。东川地区的昆阳群(原昆阳群中亚群)发育了大营盘组、小河口组、麻地组。

因民组,孟宪民等(1944)命名;1947 年进一步描述。选层型为云南东川矿区三风口—因民剖面(N26°17′00″;E102°56′00″),次层型 1:东川矿区播卡汤家箐沟剖面(E103 °02′00 ″, N26 °24′00 ″);次层型 2:东川落雪稀矿山九号硐铁南沿至铜南沿剖面(N26 °15′00 ″;E102 °57′00 ″),均由西南地质勘探公司 314 队陈天佑等在 1985 年测制。该组自下而上分 6 个段(玉新村段、大绿江段、三岔段、稀矿山段、马柱洞段、面山段)。下部为灰绿色砾岩夹灰紫色白云质粉砂岩及板岩;中部为紫红色铁质板岩及泥质白云岩夹板岩及赤铁矿层,具干裂纹、波痕、斜层理及色调粒度韵律,含黄铜矿、斑铜矿;上部为紫红、灰紫色砂质白云岩夹板岩,具色调、粒度韵律及斜层理、波痕构造。因民组底部与下伏大洪山亚群角度不整合接触(龙川运动),顶与落雪组为整合过渡。厚 225 ~ 388m。分布在云南东川、易门、元江及武定一带及四川通安、黎溪等地区。

落雪组,孟宪民等(1944)命名。选层型为云南东川矿区三风口—因民剖面(N26°17′00″;E102°56′00″),陈天佑等 1985 年测。该组自下而上分 5 个段(波纹段、平纹段、燧石段、稀纹段、过渡段)。该组主要为青灰、灰白、肉红色厚层—块状含藻白云岩,夹硅质白云岩和泥砂质白云岩。下部有硅质团块,底部粉砂泥质白云岩夹钙泥质板岩薄层,具硅质条带状和马尾丝状构造,含叠层石及藻类等。下部及底部为铜矿床的主要赋存层位。底与因民组、顶与鹅头厂组均为整合接触。厚 105 ~ 506m。分布于云南东川、禄丰、易门、元江、汤丹、武定一带。

黑山组,孟宪民(1947)命名。正层型为云南东川黑山剖面;次层型为四川会理通安剖面,四川第一区测队 1960 年测制。该组以黑色板岩、黄绿色千枚岩、变粉砂岩为主,夹碳酸盐岩、火山碎屑岩等。在黎溪地区伴有磁菱铁矿床。与上覆青龙山组、下伏落雪组均为整合接触。厚度大于 1000 m。分布于四川会理、会东及云南。

青龙山组,王可南(1963)命名。正层型为云南东川青龙山剖面。岩性为一套巨厚碳酸盐岩夹板岩。与上覆大营盘组不整合或平行不整合接触,与下伏黑山组整合接触。厚 1500 ~ 2000 m。分布于云南东川及四川一带。

大营盘组,谢振西等(1965)命名。选层型为云南东川矿区小黑箐—普普河剖面(N26° 16′ 30″;E102°52′30″),西南地质勘探公司 314 队陈天佑等 1985 年测。该组上部为灰黑色绢云板岩夹灰黑色碳质板岩,顶部夹灰色薄层泥灰岩及石英砂岩;下部为黑色碳质绢云板岩及少量硅质板岩,泥质岩屑砂岩;底为紫红色铁质角砾岩和含赤铁矿凸镜体的铁质板岩。下部有黄铁矿细层。顶部与小河口组呈整合接触。底部平行不整合于绿汁江组之上。厚 960 ~ 2781 m。分布于云南东川及四川一带。

小河口组,王可南等(1963)命名;谢振西等,1965 年介绍。正层型为云南东川矿区小黑箐—普渡河剖面(N26° 16′ 00″; E102° 52′ 00″),陈天佑等 1985 年测。该组为灰、灰白色石英砂岩及石英岩,夹有深灰色板岩,下部还夹少量灰色砂质灰岩和红色铁质板岩,顶部为红色铁质砂岩及铁质板岩。顶与麻地组为平行不整合接触;底整合覆于大营盘组之上。层型剖面处厚 765 m,最厚处为 1200 ~ 1800 m,最薄处仅 50 m。分布于云南东川一带。

麻地组,黎功举等(1964)命名。选层型为云南东川矿区小黑箐—普渡河剖面(N26°16′00″;E102°52′00″),陈天佑等 1985 年测。该组上部为灰白、肉红色白云岩及深灰色灰岩夹砂质灰岩;下部为灰、灰白色石灰岩夹砂质灰岩、泥灰岩和少量钙质石英砂岩;近底部为灰白色砾状硅质灰岩夹灰绿色凝灰质千枚岩;底为灰绿色具枕状构造的细碧岩。未见顶。下与小河口组平行不整合接触。出露厚 50 ~466 m。分布于云南东川及四川一带。

1.2　云南易门—元江地区

东川群(原昆阳群下亚群)包括鹅头厂组、绿汁江组及可能的可对比地层(热水塘组、车家城组);昆阳群(原昆阳群中亚群)包括黄草岭组、黑山头组、富良棚组、大龙口组、美党组。

鹅头厂组,云南省地质局(1966)命名;张远志等(1996)介绍。选层型为云南禄丰县小新厂黄龙寨河鹅头厂组实测地质剖面(N25°24′00″;E102°12′00″),吴懋德等(1990)重测。该组自下而上分 4 个段(小新厂段、黄龙寨段、五翻山段、冷水沟段)。该组以深灰至灰黑色板岩为主,常见由硅质或粉砂质组成的条带,或由深浅色调交替形成的条纹条带。底部板岩含碳质和硅质;下部夹灰岩、泥质白云岩、硅质岩、硅质板岩;中上部夹变质砂岩。下与落雪

组、上与绿汁江组均为整合过渡关系。厚 861 ~ 1786 m。分布于云南禄丰、东川一带。

绿汁江组,冶金部昆明地质勘探公司三零三勘探队(1956)命名;云南省地质矿产局地层清理组张远志等(1996)介绍。选层型为云南武定慢坡—家村绿汁江组剖面(N25°28′00″;E102°19′00″),吴懋德、段锦荪等 1990 年测。自下而上分 5 个段(满坡段、响水箐段、五家坟段、锅底塘段、鲁家村段)。该组为青灰色、浅灰至深灰色中厚—块状白云岩,普遍含有硅质细条纹,中—上部含少量硅质团块,中部及上部夹绢云板岩,上部夹泥质灰岩及灰岩。含叠层石及藻类化石等。底与鹅头厂组整合接触;顶与大营盘组平行不整合接触。厚 1277 ~ 1971 m。分布于云南易门、武定、东川、汤丹、元江一带。

黄草岭组,温杰史(1961)命名。正层型为云南峨山岔河乡黄草岭—旧寨黄草岭组、黑山头组实测剖面(N24°18′00″;E102°18′00″),云南二区测队七分队 1969 年测;云南地质局昆阳群专题研究小组 1972 年修测。主要为黑色与灰黑色绢云千枚状板岩及粉砂质千枚状板岩、千枚岩。下部为灰白与灰绿色含长石石英粉砂岩、石英岩,夹粉砂质绢云板岩。含微古植物及叠层石等。与车家城组整合接触;上与黑山头组整合接触。厚 661 ~ 1438 m。分布云南晋宁、元江、峨山、石屏、汤丹及东川一带。

黑山头组,云南第二区域地质测量大队七分队(1969)命名。正层型为云南峨山县黄草岭—旧寨黄草岭组、黑山头组实测剖面(N24°19′00″;E102°07′00″);云南地质局昆阳群专题研究小组 1972 年重测。由变质石英砂岩、石英岩、粉砂岩、板岩互层组成。黑山头组分三个段(村竹段、河外段、塔冲段);下与黄草岭组(落雪组)、上与富良棚组(绿汁江组或青龙山组)均为整合接触。厚度为 1786 ~ 3152 m。分布于云南峨山县、禄劝、东川、路南、陆良一带。

富良棚组,云南第二区域地质测量大队七分队(1969)命名。正层型为云南峨山县寸竹—富良棚实测剖面(E102°07′00″;N24°19′00″)。下部为绢云板岩、钙质板岩夹钙质石英粉砂岩;中部为泥灰岩;上部为安山质晶屑凝灰岩、安山质层凝灰岩、凝灰质板岩、绢云板岩、泥灰岩互层。下与黑山头组、上与大龙口组均为整合接触。厚 92 ~ 256 m。分布于云南易门、峨山、禄劝、石屏、元江、玉溪一带。

大龙口组,黄懿(1940)命名。正层型为云南省易门县城北 1km 三元宫村三元宫剖面(N24°41′00″;E102°10′00″)。云南第二区测大队七分队 1969 年重测。大龙口组分四个段(鲁奎山段、龙棚段、大六尤段、三元宫段)。下部、中部为深灰色、灰黑色粉晶、泥晶灰岩夹数层绢云板岩、粉砂绢云板岩,泥质灰岩,局部含燧石团块;上部为浅灰色中厚层状、臼齿构造发育,成蠕条状藻屑灰岩、隐晶灰岩夹块状藻灰岩;顶部有黄色薄层泥灰岩。顶与美党组、底与富良棚组均为整合接触。厚 650 ~ 2183 m。分布于云南易门至元江及东川至四川一带。

美党组,云南第二区域地质测量大队七分队(1969)命名。正层型为云南峨山县咱拉黑—橄榄若美党组实测剖面(N24°22′00″;E102°05′00″),云南第二区域地质测量大队七分队 1969 年测。美党组分三个段(去奶箐段、泥吉段、岔河段)。上部为深灰、灰黑色绢云板岩及含泥质灰岩,小扁豆体的钙质板岩,夹少量变粉砂岩;下部夹厚层砾状灰岩,藻灰岩。含微古植物,叠层石及藻类化石等。底与大龙口组整合接触,顶与柳坝塘组整合接触。厚 467 ~ 1085 m。分布于云南峨山、元江、建水、石屏、玉溪、易门一带。

1.3 云南易门地区

八街群(原昆阳群上亚群)包括柳坝塘组、华家箐组。

柳坝塘组,邓家藩(1961)命名。选层型为云南晋宁县柳坝塘村南实测剖面(N24°38′00″;E102°40′00″),云南第二区域地质测量大队七分队 1969 年测。柳坝塘组分两段,下段为清水沟段,上段为禄裱段。该组底部为紫红色铁质砾岩夹铁矿层;下部为黑色粉砂泥质板岩、碳质板岩夹硅质岩和少量含锰板岩,近底部有灰、肉红色厚层状白云岩;上部为紫红、黄绿、蛋青色粉砂质板岩、硅质泥质板岩夹深灰色硅质岩,在底部有层状赤铁矿。底部整合于美党组,顶被澄江组不整合覆盖。厚 64~255 m。分布于云南中部晋宁、易门、安宁、禄丰等县。

华家箐组,吴懋德、李希磧等和西南勘探司 312 队(1990)命名。该组分为北甸段和李家段。为一套变质砾岩、板岩、变质板岩、白云质灰岩。下与柳坝塘组为整合接触,上被澄江组不整合覆盖。厚 427 m 以上。分布于安宁市杨家箐、华家箐一带。

热水塘组,云南地调院八分队胡荣民等(1993)命名。选层型为云南石屏县热水塘组实测剖面(N23°36′00″;E102°28′00″)。岩性为灰、深灰色粉砂质绢云板岩及绢云板岩,浅灰色云母长英质角岩、二云母变质砂岩,灰色黑云片岩,灰白、灰黄色块状

变质酸性斑岩,浅灰色云母石英片岩夹石英岩等。热水塘组组未见底,上与车家城组整合接触。厚 750 m 以上。主要分布于石屏县地区。

车家城组,云南地调院八分队胡荣民等(1993)命名。选层型为云南石屏县车家城组实测剖面(N23°36′00″;E102°29′00″)。岩性为浅灰、黄灰色中厚层细—中粒钙质白云岩及泥质白云岩和黄绿色泥质板岩夹少量薄层变质粉砂岩,呈水平层理。下部为浅灰色中—厚层粉晶白云岩,有大量重晶石脉穿插及铅、铜矿化,底部有数米深灰色薄层泥质灰岩。下与热水塘组为整合接触,上与黄草岭组整合接触。厚 274 m 以上。分布于石屏县地区。

1.4 采样层位

本研究在昆明市晋宁区柳坝塘村的柳坝塘组中再次获得两件火山凝灰岩样品,样品编号:LBT141226-2(E102° 39′ 22.8″; N26° 38′ 9.6″)和 LBT141226-3(N26° 38′ 11.7″; E102° 39′ 22.8″)。LBT141226-2:岩石由粘土质组成,约占 100%。粘土质呈隐晶状、微鳞片状,粒度<0.01mm,构成岩石主体。岩石部分表面显褐黄色,有些表面可见铁质,局部略显破碎。LBT141226-3:岩石由粘土质组成,约占 99%。粘土质呈隐晶状、微鳞片状,粒度<0.01mm,构成岩石主体,少数表面略显褐黄色。陆源细砂由石英组成,呈次棱角状,零星分布,粒度 0.05~0.2mm。岩内少见裂隙(图 3a)。

在易门县六街乡七贤村剖面柳坝塘组获得两件火山凝灰岩样品,样品编号:Q141225-1(N24° 51′ 21.9″;E102°08′41.7″)和 Q141225-4(N24°51′29.6″;E102°08′42.3″)。Q141225-4:岩石由粘土质、陆源粉砂组成。粘土质:约占 90%,陆源粉砂约占 10%。粘土质呈隐晶状、微鳞片状,粒度<0.02mm,构成岩石主体,局部铁矿化。陆源粉砂主要由石英组成,呈次棱角—次圆状,杂乱分布,粒度 0.01~0.05mm。岩内多见裂隙。QL141225-1:陆源砾石约占 45%,以岩屑为主。填隙物以粘土质为主、陆源粉砂次,约占 45%。陆源碎屑由岩屑及少量石英组成,呈棱角状、次棱角状,杂乱分布,粒度一般 2~10mm,少数 0.05~2mm,岩屑成分为粉砂质粘土岩、绢云板岩等。填隙物由粘土质、陆源粉砂组成,二者混杂,填隙状分布于陆源碎屑间。粘土质呈隐晶状、微鳞片状,粒度<0.01mm。陆源粉砂由长石、石英组成,呈棱角状、次棱角状,粒度 0.01~0.05mm(图 3b)。

在易门铜矿北 1km 路边获得一件柳坝塘组凝灰岩样品,样品编号:T140427-1(N24° 43′ 37.1″; E102°11′45.5″)。再次充实柳坝塘组区域分布的高精度锆石测年成果。

在晋宁临川地区古埂村剖面获得一件澄江组火山凝灰岩样品,样品编号:T140425-1(N24° 42′ 69.9″;E102°27′50.4″)。其主要以火山岩屑为主,约占 70%~80%;石英次之,约占 15%;其余主要以火山基质为主(图 3c)。

2　分析方法

锆石的分离在河北廊坊区域地质调查所实验室进行,锆石的阴极发光图像在北京离子探针中心 HITACHI S-3000N 扫描电镜上完成。锆石 U-Pb 年龄同位素测定在北京离子探针中心的 SHRIMP-II 上进行,详细的分析流程参考 Lance(Lance et al., 2003a,2003b)。年龄测定时仪器质量分辨率约为 5000(1%峰高),一次离子流 O_2^- 强度为 4nA。一次离子流束斑直径为 30μm 左右,每个数据点测定由 5 次扫描构成。测定质量峰为 $^{90}Zr_2{}^{16}O^+$、$^{204}Pb^+$,背景值、$^{206}Pb^+$、$^{207}Pb^+$、$^{208}Pb^+$、$^{238}U^+$、$(^{232}Th^{16}O)^+$ 和 $(^{238}U^{16}O)^+$。分别采用标准锆石 TEM 和 M257 进行元素间的分馏校正及 U 含量标定;其中 TEM 具有 U-Pb 谐和年龄,其 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为(416.8 ±1.1)Ma,但 U、Th 及 Pb 含量不均一;M257 的 U 含量为 840×10^{-6}。原始数据的处理和锆石 U-Pb 谐和图的绘制采用 Ludwig 博士编写的 Squid 和 Isoplot 程序(Ludwig,2002)。根据实测的 ^{204}Pb 扣除普通铅,普通铅的组成根据 Stacey & Kramers 给出的模式计算得到(Stacey et al.,1975)。表 2 中年龄的误差为 1 σ 绝对误差,同位素比值的误差为 1 σ 相对误差;文中所使用 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均值为 95% 的置信度误差。

3　分析结果

锆石的阴极发光图像(Cathodoluminescence, CL)特征:全部样品的锆石晶形完好,为浅黄色-无色透明短柱状的晶体。锆石粒度多在 100 ~ 200μm 之间。CL 图像显示出典型的岩浆生长振荡环带和韵律结构,均属于岩浆结晶的产物(图 4)。测定时,根据可见光照片显示的特征,不选取裂纹较发育和包裹体较多的锆石颗粒,再根据 CL 图像选取同一个世代的晶域。

锆石的 U、Th 含量及 Th/U 值:大量的研究表明,岩浆锆石的 U、Th 含量较高,Th/U 值较大(一般大于 0.4)。所有锆石分析点均位于明显的岩浆环



图 3 云南柳坝塘组和澄江组部分凝灰岩或火山碎屑岩野外露头及镜下特征：

(a)晋宁县柳坝塘村柳坝塘组凝灰岩；(b)易门县七贤村柳坝塘组凝灰岩；(c)晋宁古埂村澄江组火山碎屑岩

Fig. 3 Photos of the outcrop and microscope of tuff from Liubatang Formation, volcaniclastic rock from Chengjiang Formation:

(a) Tuff from the Liubatang Formation, Kunyang Group, in Liubatang village, Jinning County; (b) Tuff from the Liubatang Formation, Kunyang Group, in Qixian village, Yimen County; (c) volcanic fragment rock from the Chengjiang Formation, Kunyang Group, in Gugeng village, Jinning County

带部位。

(1)凝灰岩(LBT141226-2)12 个测点中 U 含量变化范围为 70×10^{-6} ~ 344×10^{-6}；个别可到 580×10^{-6}；Th 含量变化范围为 55×10^{-6} ~ 299×10^{-6}；个别

可到 765×10^{-6};Th/U 值变化范围为 0.67 ~ 1.36(表 1)。样品(LBT141226-2)共测试了 12 个数据点。11 个数据点均位于谐和线(图 5a),10 个数据点的$^{206}Pb/^{238}U$年龄加权平均值为 883.8 ± 9.2 Ma,对应的 MSWD = 0.29。$^{206}Pb/^{238}U$年龄加权平均值代表了柳坝塘组凝灰岩的形成时代。

(2)凝灰岩(LBT141226-3)15 个测点中 U 含量变化范围为 107×10^{-6} ~ 347×10^{-6};Th 含量变化范围为 42×10^{-6} ~ 195×10^{-6};Th/U 值变化范围为 0.25 ~ 1.08(表 1)。样品(LBT141226-3)共测试了 15 个数据点。11 个数据点均位于谐和线(图 5b),排除受后期热事件影响的数据点 1.1,以及可能为捕获锆石的数据点 3.1、10.1。11 个数据点的$^{206}Pb/^{238}U$年龄加权平均值为 889.5 ± 8.6 Ma,对应的 MSWD =

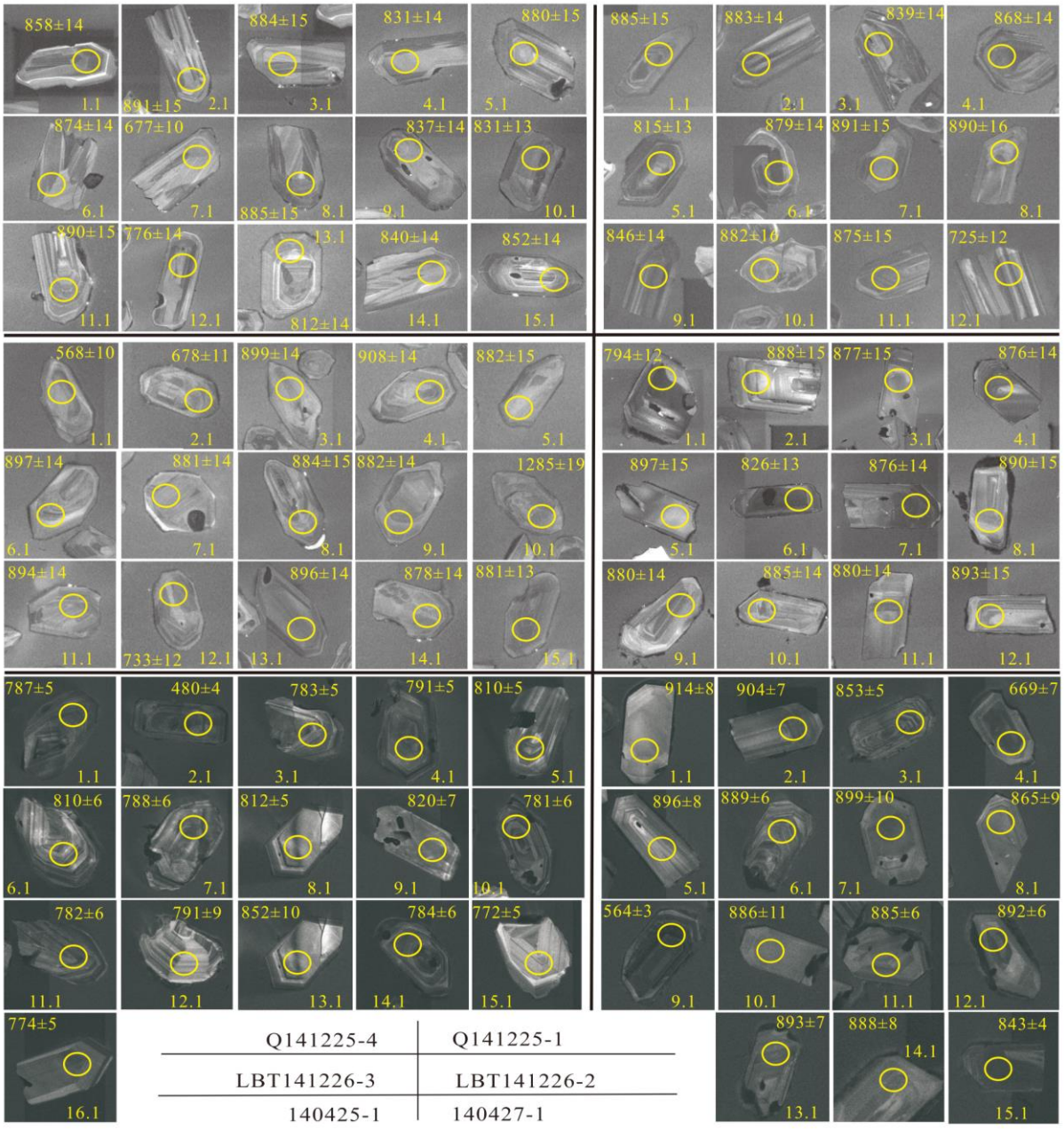


图 4 柳坝塘组及澄江组凝灰岩锆石特征及年龄(单位:Ma)

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images and ages (Ma) of the zircons of tuff in the Liubatang Formation

表 1 滇东昆阳群柳坝塘组、澄江组凝灰岩中锆石 SHRIMP U—Th—Pb 同位素测定结果

Table 1 SHRIMP U—Th—Pb isotopic composition of the zircons from the Liubatan Formation and Chengjiang Formation, Kunyang Group, in eastern Yunnan

测点号	$^{206}Pb_c$ (%)	元素含量 ($\times10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						误差相关系数	同位素年龄(Ma)				不谐和度 (%)
		U	Th		$\frac{n(^{207}Pb^*)}{n(^{206}Pb^*)}$		$\frac{n(^{207}Pb^*)}{n(^{235}U)}$		$\frac{n(^{206}Pb^*)}{n(^{238}U)}$			$\frac{n(^{206}Pb)}{n(^{238}U)}$		$\frac{n(^{207}Pb)}{n(^{206}Pb)}$		
					测值	±%	测值	±%	测值	±%		测值	1σ	测值	1σ	
昆明市晋宁区柳坝塘村柳坝塘组中凝灰岩,样品编号:LBT141226-2, 位置: N26°38′9.6″E102°39′22.8″																
1.1	0.29	580	765	1.36	0.06876	1.4	1.242	2.1	0.1310	1.6	0.754	794	12	891	29	11
2.1	0.38	93	78	0.87	0.0656	2.4	1.336	3.1	0.1477	1.8	0.600	888	15	794	51	−12
3.1	0.46	112	77	0.71	0.0673	3.6	1.352	4.0	0.1457	1.8	0.455	877	15	847	74	−4
4.1	0.46	177	124	0.72	0.0667	2.2	1.338	2.8	0.1455	1.7	0.612	876	14	828	46	−6
5.1	0.45	70	55	0.82	0.0690	3.1	1.420	3.7	0.1493	1.9	0.519	897	16	898	65	0
6.1	0.24	344	293	0.88	0.0671	1.6	1.265	2.3	0.1366	1.6	0.713	826	13	842	33	2
7.1	0.08	343	299	0.90	0.06914	1.1	1.388	2.0	0.1456	1.6	0.833	876	14	903	23	3
8.1	0.63	134	103	0.79	0.0647	3.2	1.321	3.7	0.1481	1.8	0.480	890	15	765	68	−16
9.1	0.61	203	171	0.87	0.0654	2.3	1.319	2.9	0.1463	1.7	0.595	880	14	786	48	−12
10.1	0.08	179	142	0.82	0.0683	2.7	1.384	3.2	0.1471	1.7	0.533	885	14	876	56	−1
11.1	0.17	144	94	0.67	0.0690	2.1	1.392	2.7	0.1463	1.7	0.646	880	14	898	42	2
12.1	0.40	103	83	0.83	0.0682	3.0	1.397	3.5	0.1485	1.8	0.516	893	15	876	62	−2
昆明市晋宁区柳坝塘村柳坝塘组中凝灰岩,样品编号:LBT141226-3, 位置: N26°38′11.7″E102°39′22.8″																
1.1	1.50	221	195	0.91	0.0650	4.6	0.825	4.9	0.0922	1.7	0.354	568.3	9.5	773	97	26
2.1	0.56	223	135	0.62	0.0648	2.6	0.989	3.2	0.1108	1.7	0.543	678	11	766	56	12
3.1	0.43	172	42	0.25	0.0661	2.5	1.364	3.1	0.1497	1.7	0.559	899	14	809	53	−11
4.1	1.13	220	79	0.37	0.0650	2.7	1.354	3.1	0.1512	1.7	0.529	908	14	773	56	−17
5.1	0.38	107	33	0.32	0.0657	3.5	1.329	3.9	0.1466	1.8	0.468	882	15	798	73	−10
6.1	0.42	147	57	0.40	0.0678	4.1	1.396	4.4	0.1493	1.7	0.389	897	14	863	85	−4
7.1	0.20	172	42	0.25	0.0675	1.5	1.362	2.3	0.1465	1.7	0.746	881	14	852	31	−3
8.1	0.39	129	91	0.73	0.0665	3.0	1.347	3.5	0.1470	1.8	0.510	884	15	821	62	−8
9.1	0.+17	184	48	0.27	0.0676	3.4	1.367	3.8	0.1467	1.7	0.447	882	14	856	71	−3
10.1	0.55	219	165	0.78	0.0933	1.6	2.837	2.3	0.2206	1.7	0.712	1285	19	1494	31	14
11.1	0.24	218	69	0.33	0.0669	1.9	1.373	2.6	0.1488	1.7	0.658	894	14	836	40	−7
12.1	0.97	165	172	1.08	0.0669	4.2	1.111	4.5	0.1205	1.8	0.388	733	12	835	87	12
13.1	0.36	192	47	0.25	0.0667	2.1	1.371	2.7	0.1492	1.7	0.633	896	14	827	44	−8
14.1	0.42	161	59	0.38	0.0672	3.2	1.351	3.6	0.1459	1.8	0.485	878	14	843	66	−4
15.1	0.42	347	91	0.27	0.0651	1.7	1.316	2.3	0.1465	1.6	0.698	881	13	778	35	−13
易门县六街乡七贤村剖面柳坝塘组中凝灰岩,样品编号:Q141225-1,位置:N24°51′21.9″E102°08′41.7″																
1.1	0.57	189	41	0.22	0.0661	2.7	1.297	3.2	0.1423	1.7	0.543	858	14	811	56	−6
2.1	0.76	156	56	0.37	0.0662	3.3	1.353	3.7	0.1483	1.8	0.475	891	15	813	68	−10
3.1	0.03	149	43	0.30	0.0692	1.7	1.402	2.4	0.1469	1.8	0.733	884	15	905	34	2
4.1	0.13	196	46	0.24	0.0668	2.0	1.268	2.6	0.1377	1.7	0.663	831	14	832	41	0
5.1	0.44	106	137	1.34	0.0662	2.9	1.334	3.4	0.1462	1.9	0.543	880	15	812	60	−8
6.1	0.21	158	46	0.30	0.0678	2.8	1.358	3.3	0.1451	1.8	0.534	874	14	864	58	−1
7.1	1.13	309	161	0.54	0.0743	4.0	1.076	4.3	0.1050	1.7	0.391	644	10	1050	81	39
8.1	0.51	169	73	0.45	0.0650	2.4	1.318	3.0	0.1472	1.8	0.599	885	15	773	50	−14
9.1	0.38	169	55	0.34	0.0674	2.6	1.288	3.2	0.1387	1.8	0.562	837	14	849	55	1
10.1	0.11	247	48	0.20	0.0699	1.5	1.325	2.3	0.1376	1.7	0.748	831	13	924	31	10
11.1	0.11	191	52	0.28	0.0680	1.9	1.388	2.6	0.1481	1.8	0.683	890	15	868	39	−2
12.1	0.61	171	34	0.21	0.0680	3.5	1.199	4.0	0.1280	1.9	0.469	776	14	867	73	10
13.1	0.23	152	61	0.41	0.0671	2.6	1.243	3.1	0.1343	1.8	0.579	812	14	841	53	3
14.1	0.63	135	23	0.18	0.0656	3.0	1.260	3.5	0.1393	1.8	0.524	840	14	795	63	−6
15.1	0.12	206	76	0.38	0.0690	2.2	1.344	2.8	0.1414	1.8	0.630	852	14	898	45	5

测点号	$^{206}Pb_c$(%)	元素含量($\times10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						误差相关系数	同位素年龄(Ma)				不谐和度(%)
		U	Th		$\frac{n(^{207}Pb^*)}{n(^{206}Pb^*)}$		$\frac{n(^{207}Pb^*)}{n(^{235}U)}$		$\frac{n(^{206}Pb^*)}{n(^{238}U)}$			$\frac{n(^{206}Pb)}{n(^{238}U)}$		$\frac{n(^{207}Pb)}{n(^{206}Pb)}$		
					测值	±%	测值	±%	测值	±%		测值	1σ	测值	1σ	
易门县六街乡七贤村剖面柳坝塘组中凝灰岩,样品编号:Q141225-4,位置:N24°51′29.6″;E102°08′42.3″																
1.1	0.43	275	121	0.46	0.0665	2.1	1.350	2.7	0.1472	1.8	0.649	885	15	823	43	−7
2.1	0.40	271	148	0.57	0.0659	2.1	1.335	2.8	0.1469	1.8	0.633	883	14	804	45	−10
3.1	0.23	267	113	0.44	0.0681	1.8	1.305	2.5	0.1390	1.8	0.700	839	14	872	37	4
4.1	0.13	312	116	0.38	0.0681	1.8	1.352	2.5	0.1441	1.7	0.692	868	14	871	38	0
5.1	0.27	317	154	0.50	0.0675	1.5	1.255	2.3	0.1348	1.7	0.751	815	13	854	32	5
6.1	0.01	315	460	1.51	0.0689	1.8	1.386	2.5	0.1460	1.7	0.701	879	14	894	37	2
7.1	0.09	179	65	0.37	0.0687	1.7	1.403	2.5	0.1482	1.8	0.729	891	15	889	35	0
8.1	0.38	123	93	0.78	0.0669	2.9	1.365	3.5	0.1480	1.9	0.544	890	16	834	61	−7
9.1	0.38	239	159	0.69	0.0675	1.6	1.306	2.4	0.1403	1.8	0.739	846	14	853	34	1
10.1	0.63	108	59	0.56	0.0654	3.3	1.322	3.8	0.1466	1.9	0.504	882	16	786	69	−12
11.1	0.42	184	342	1.92	0.0675	2.4	1.353	3.0	0.1454	1.8	0.610	875	15	852	50	−3
12.1	0.59	231	251	1.12	0.0645	2.6	1.059	3.2	0.1190	1.8	0.554	725	12	759	56	4
易门铜矿北 1km 路边柳坝塘组凝灰岩样品,样品编号:T140427-1, 位置:N24°43′37.1″E102°11′45.5″																
1.1	0.38	126	110	0.90	0.0718	3.2	1.507	3.3	0.1523	0.92	0.278	913.7	7.8	980	65	7
2.1	0.01	169	115	0.70	0.0685	1.5	1.421	1.7	0.1505	0.81	0.475	903.7	6.8	884	31	−2
3.1	0.07	550	276	0.52	0.06863	0.84	1.339	1.0	0.14144	0.60	0.578	852.8	4.8	888	17	4
4.1	0.33	602	428	0.73	0.06486	1.5	0.978	1.8	0.1094	1.1	0.604	669.2	7.1	770	31	15
5.1	0.04	118	105	0.92	0.0691	2.4	1.421	2.6	0.1491	0.94	0.363	895.7	7.9	902	50	1
6.1	0.10	211	123	0.60	0.0683	1.8	1.392	1.9	0.1478	0.74	0.387	888.6	6.1	878	36	−1
7.1	0.23	161	143	0.92	0.0697	2.3	1.439	2.6	0.1497	1.2	0.474	899	10	921	47	2
8.1	0.73	89	69	0.80	0.0641	9.2	1.27	9.3	0.1435	1.1	0.114	864.7	8.6	745	200	−14
9.1	0.22	840	644	0.79	0.06632	1.1	0.836	1.2	0.09137	0.52	0.418	563.6	2.8	817	23	45
10.1	--	102	70	0.71	0.0698	1.8	1.418	2.3	0.1474	1.4	0.603	886	11	923	37	4
11.1	0.20	202	181	0.93	0.0689	1.8	1.398	1.9	0.1472	0.77	0.398	885.3	6.3	895	36	1
12.1	0.10	261	185	0.73	0.06927	1.3	1.418	1.5	0.1484	0.69	0.464	892.2	5.7	907	27	2
13.1	0.36	153	110	0.75	0.0672	2.4	1.377	2.6	0.1487	0.85	0.328	893.4	7.1	844	51	−6
14.1	0.33	109	67	0.63	0.0665	2.5	1.354	2.6	0.1477	0.96	0.363	888.0	7.9	822	51	−7
15.1	0.02	651	541	0.86	0.06853	0.78	1.320	0.94	0.13971	0.54	0.568	843.0	4.2	884	16	5
晋宁临川地区古埂村剖面澄江组凝灰岩,样品编号:T140425-1, 位置 N24°42′69.9″;E102°27′50.4″																
1.1	0.25	289	238	0.85	0.0637	2.0	1.140	2.1	0.12987	0.62	0.303	787.1	4.6	731	41	−7
2.1	2.00	727	513	0.73	0.0637	4.5	0.679	4.6	0.07726	0.79	0.174	479.8	3.7	732	95	53
3.1	0.39	206	147	0.73	0.0640	2.2	1.140	2.3	0.12923	0.72	0.313	783.4	5.3	740	46	−6
4.1	0.94	274	176	0.66	0.0646	3.4	1.164	3.4	0.13062	0.66	0.193	791.4	4.9	763	71	−4
5.1	0.31	216	263	1.25	0.0652	2.0	1.202	2.1	0.13382	0.68	0.325	809.6	5.1	779	41	−4
6.1	0.37	179	144	0.83	0.0654	2.4	1.207	2.5	0.13395	0.74	0.295	810.4	5.6	786	50	−3
7.1	0.31	210	204	1.00	0.0649	2.7	1.163	2.8	0.12995	0.76	0.271	787.6	5.7	772	57	−2
8.1	0.09	197	146	0.76	0.0668	1.7	1.235	1.9	0.13419	0.70	0.376	811.7	5.4	830	36	2
9.1	0.65	103	55	0.56	0.0662	3.9	1.238	4.0	0.1357	0.95	0.239	820.0	7.3	812	81	−1
10.1	0.98	151	163	1.12	0.0634	3.9	1.126	4.0	0.1288	0.82	0.206	781.0	6.0	722	82	−8
11.1	0.96	201	327	1.68	0.0645	4.5	1.148	4.6	0.12903	0.75	0.165	782.3	5.5	759	95	−3
12.1	0.30	71	42	0.61	0.0680	4.1	1.224	4.2	0.1306	1.1	0.271	791.2	8.5	867	84	10
13.1	0.48	59	37	0.66	0.0653	4.3	1.272	4.5	0.1413	1.2	0.279	852.2	9.9	784	90	−8
14.1	0.66	181	286	1.63	0.0645	3.0	1.151	3.1	0.12938	0.76	0.241	784.3	5.6	759	64	−3
15.1	0.36	201	163	0.84	0.0653	2.1	1.145	2.2	0.12727	0.71	0.325	772.3	5.1	783	43	1
16.1	0.53	242	204	0.87	0.0640	2.4	1.126	2.5	0.12755	0.66	0.262	773.9	4.8	743	51	−4

. 注: 年龄值为 1σ 绝对误差,同位素比值为 1σ 相对误差;$^{206}Pb_c$(%)为总^{206}Pb 中属于普通 Pb 的^{206}Pb 的百分比,Pb* 代表放射成因 Pb;用于校正未知样品的标准样品的测定误差——LBT141226-2、Q141225-4、Q141225-1 为 0.41%(1σ, %,下同),T140427-1 为 0.12%,140425-1 为 0.22%。

0.48。$^{206}Pb/^{238}U$年龄加权平均值为凝灰岩年龄,代表了柳坝塘组形成年代。

(3)凝灰岩(Q141225-1)15 个测点中 U 含量变化范围为 106×10^{-6} ~ 206×10^{-6};个别可到 309×10^{-6};Th 含量变化范围为 34×10^{-6} ~ 137×10^{-6};个别可到 161×10^{-6};Th/U 值变化范围为 0.18 ~ 1.34(表 1)。样品(Q141225-1)共测试了 15 个数据点。9 个数据点均位于谐和线(图 5c),排除受后期热事件的影响等 6 个数据点的年龄值。9 个数据点的$^{206}Pb/^{238}U$年龄加权平均值为 872.8 ± 9.3 Ma,对应的 MSWD = 1.6。$^{206}Pb/^{238}U$年龄加权平均值代表了柳坝塘组凝灰岩的形成时代。

(4)凝灰岩(Q141225-4)12 个测点中 U 含量变化范围为 108×10^{-6} ~ 312×10^{-6};Th 含量变化范围为 59×10^{-6} ~ 460×10^{-6};Th/U 值变化范围为 0.56 ~ 1.50(表 1)。样品(Q141225-4)共测得了 12 个数据点。9 个数据点均位于谐和线(图 5d),排除受后期热事件的影响等 3 个数据点的年龄值,9 个数据点的$^{206}Pb/^{238}U$年龄加权平均值为 872.3 ± 9.7 Ma,对应的 MSWD = 1.06。$^{206}Pb/^{238}U$年龄加权平均值为凝灰岩年龄,代表了柳坝塘组形成年代。

(5)凝灰岩(T140427-1)15 个测点中 U 含量变

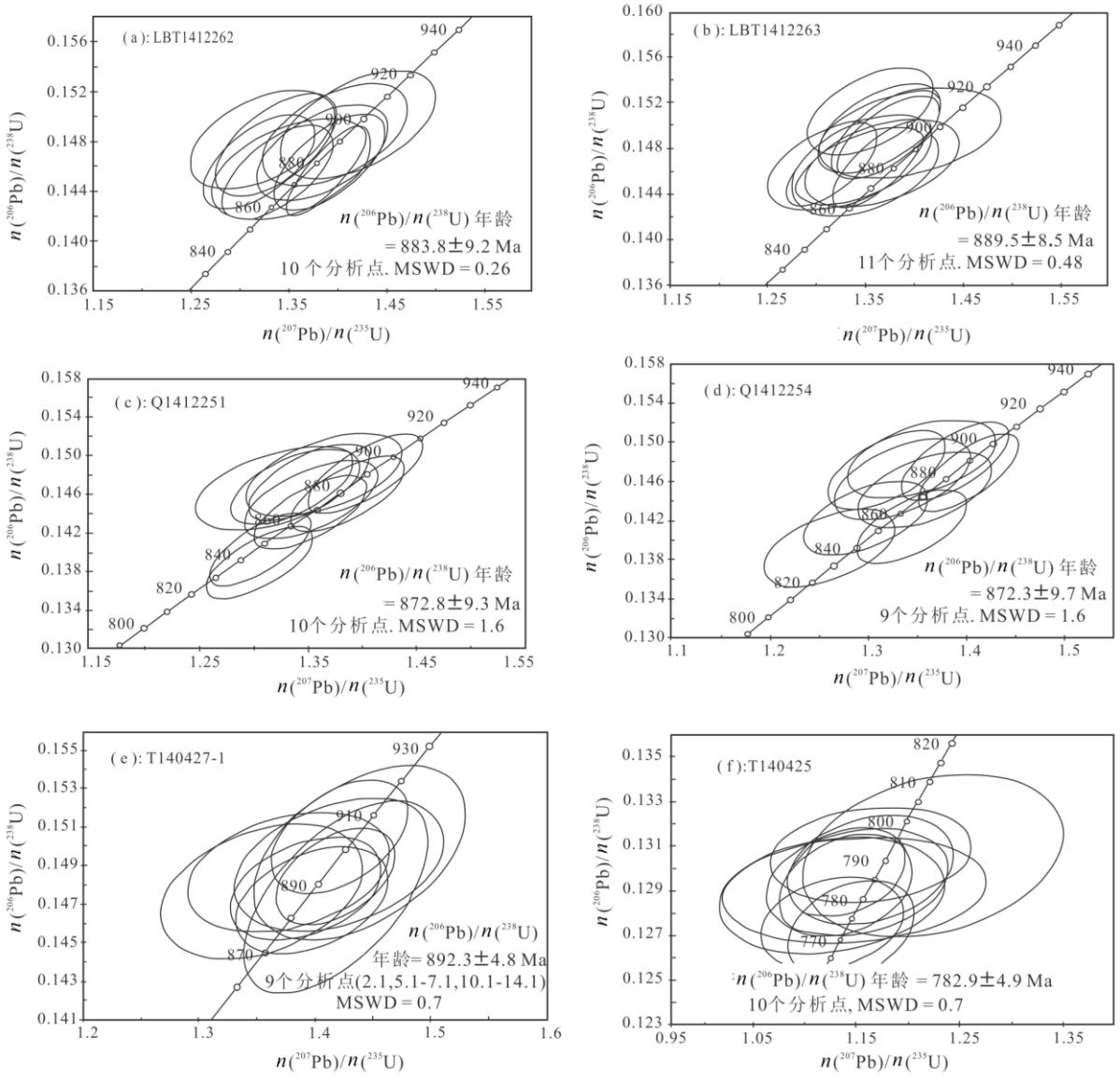


图 5 柳坝塘组及澄江组凝灰岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagrams of volcanic rocks

化范围为 102×10^{-6} ~ 261×10^{-6};个别可到 840×10^{-6};Th 含量变化范围为 67×10^{-6} ~ 541×10^{-6};个别可到 644×10^{-6};Th/U 值变化范围为 0.52 ~ 0.93(表 1)。样品(T140427-1)共测试了 15 个数据点。9 个数据点均位于谐和线(图 5e),排除受后期热事件的影响等 6 个数据点的年龄值。9 个数据点的 $^{206}Pb/^{238}U$年龄加权平均值为 892.3 ± 4.8 Ma,对应的 MSWD = 1.6。$^{206}Pb/^{238}U$年龄加权平均值代表了柳坝塘组凝灰岩的形成时代。

(6)凝灰岩(T140425)16 个测点中 U 含量变化范围为 59×10^{-6} ~ 289×10^{-6};个别可到 727×10^{-6};Th 含量变化范围为 37×10^{-6} ~ 286×10^{-6};Th/U 值变化范围为 0.56 ~ 1.68(表 1)。样品(T140425)共测试了 16 个数据点。10 个数据点均位于谐和线(图 5f),排除相对较小的 6 个数据点的年龄值,10 个数据点的 $^{206}Pb/^{238}U$年龄加权平均值为 782.9 ± 4.9 Ma,对应的 MSWD = 1.49。$^{206}Pb/^{238}U$年龄加权平均值为凝灰岩年龄,也代表了澄江组形成年代。

4　讨论

在中国前寒武纪地层中,华南古陆主要由扬子陆块和华夏陆块组成。

(1)上扬子地区(扬子陆块)是具有三个构造演化阶段的产物,即古老结晶基底(大洪山群)、变质基底(昆阳群)和沉积盖层(南华系—震旦系)。目前,扬子陆块西南缘和北缘古老结晶基底上普遍发育与格林威尔造山带同期的沉积记录(张传恒等,2007,耿元生等,2007;李怀坤等,2013)。

(2)下扬子地区(江南陆块)研究的焦点是扬子陆块和华夏陆块之间带状分布的元古宙浅变质的沉积地层和一系列岩浆岩,被称为“江南古陆”。随着精确锆石 U-Pb 年龄的不断发现,已从根本上否定了“江南造山带”(四堡群、梵净山群、冷家溪群和双桥山群等)为中元古代地层,“江南造山带”与格林威尔造山带同期的传统认识受到了挑战。目前,格林威尔造山带同期地层的锆石同位素年龄证据仅见于扬子陆块西南缘广泛的地层中,包括昆阳群、会理群等地层单元。

但是,这些地层单元分布面积广,跨多个区域,缺乏足够的、精确的年代学数据对其进行限制。尤其是滇中地区昆阳群顶、底的年代学界限一直未能精确限定,进而无法确定其是否可填补中国地层年表中 1.4 ~ 1.0 Ga 的“未建系”。因此,本研究尝试对原昆阳群最上部地层单元柳坝塘组及上覆地层澄江组进行年代学标定,分别在昆明市晋宁区柳坝塘村剖面柳坝塘组凝灰岩中获得了 883.8 ± 9.2 Ma、889.5 ± 8.6 Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄,在易门县七贤村剖面柳坝塘组凝灰岩中获得了 872.8 ± 9.3 Ma、872.3 ± 9.7 Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄,在易门铜矿附近柳坝塘组凝灰岩中获得了 892.3 ± 4.8 Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄,在多个区域对原昆阳群最上部地层柳坝塘组进行了精确的年代学限定,进而限定了昆阳群的顶界;在晋宁古埂村,角度不整合覆盖在昆阳群之上澄江组火山碎屑岩中获得了 782.9 ± 4.9 Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄,限定了其地层时代,进而对昆阳群盖层的年代进行了限定。晋宁运动后的澄江组地层年代定位直接约束了造山后沉积盆地启动的最早时限。滇中地区原昆阳群自下而上分为黄草岭组、黑山头组、大龙口组、美党组和柳坝塘组,通过本研究其上限柳坝塘组的地层年代已经得到很好的标定,其下限黄草岭组的时代就凸显重要性了。在石屏地区,黄草岭组下部连续沉积车家城组、热水塘组(胡荣民等,1993),这两个地层单元的时代及其对黄草岭组地层时代的限制将直接影响到昆阳群在中国地层年表中“未建系”中的位置。因而,本研究在地层序列中对车家城组、热水塘组做了详细介绍。

值得注意的是华南古陆北缘湖北大洪山和神农架地区以及川滇地区依据锆石测年确定格林威尔造山带同期地层(张传恒等,2007,耿元生等,2007;李怀坤等,2013)是否是的梵净山群、四堡群、冷家溪群和双桥山群中发现的大量继承锆石的(900 ~ 1000 Ma)物源? 因此,需要不同地区完善其年代地层格架,以解决扬子块体和华夏块体与全球古地理格局的关系。

5　结论

(1)获得晋宁地区柳坝塘村柳坝塘组凝灰岩锆石 U-Pb 年龄(883.8 ± 9.2)Ma 和(889.5 ± 8.6)Ma;易门县六街地区七贤村柳坝塘组凝灰岩锆石 U-Pb 年龄(872.3 ± 9.7)Ma 和(873 ± 9)Ma;以及易门铜矿柳坝塘组凝灰岩锆石 U-Pb 年龄(892.3 ± 2.4)Ma,系列锆石同位素年龄表明上述地层应属于青白口系下统;

(2)澄江组锆石 U-Pb 平均加权年龄为(782.9 ± 4.9)Ma。该年龄代表了造山后的启动时间;

(3)云南玉溪地区柳坝塘组凝灰岩精确的锆石 U-Pb 年龄有助于正确认识东川群、昆阳群、八街群

与南华系盖层之间的沉积关系,同时将有利于我们理清中国地层年表的缺失部分;

(4)本文确认了云南地质学家多年来坚持的“倒八”序列的年代学框架,依据云南石屏地区东川群热水塘组和车家城组与上覆地层黄草岭组的连续沉积关系,将成为该地区与东川地区黑山组和大青山组地层对比的纽带;

(5)本文认为在滇东地区昆阳群包括了中元古代地层(1.4 ~ 1.0 Ga)的沉积地层,可能填补中国地层年表中 1.4 ~ 1.0 Ga 的“未建系”的缺失。

致谢:感谢国家科技基础条件平台北京离子探针中心的范润龙高工、车晓超博士在装载样品、仪器调试、仪器监控和数据处理方面所提供的帮助。审稿专家和章雨旭研究员对本文进行了细致的审阅,并提出了宝贵的意见,在此一并致以衷心的感谢!

注 释 / Notes

❶ 邓家藩,谢振西,申玉莲. 1963. 云南前震旦系层序及几个地质问题,中国地质学会云南省分会 1963 年首届学术年会论文选集.

❷ 吴懋德. 1974. 滇中、滇东前寒武系若干问问的探讨(初稿摘要). 见:云南地质科学研究所. 编. 科学技术研究报告第一号.

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

崔晓庄,江新胜,王剑,卓皆文,熊国庆,陆俊泽,邓奇,伍皓,刘建辉. 2013. 滇中新元古代澄江组层型剖面锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. 现代地质,27 (3):547 ~ 556.

戴恒贵. 1997. 康滇地区昆阳群和会理群地层、构造及找矿靶区研究. 云南地质, 16 (1):1 ~ 39.

高林志, 丁孝忠, 庞维华, 张传恒. 2011. 中国中—新元古代地层年表的修正——锆石 U-Pb 年龄对地层的制约. 地层学杂志, 35 (1):1 ~ 7.

高林志, 丁孝忠, 张传恒, 陆松年, 刘燕学, 庞维华. 2012. 江南古陆变质基底地层年代的修正和武陵运动构造意义. 资源调查与环境, 33 (2):71 ~ 76.

高林志, 尹崇玉, 张恒, 唐烽, 丁孝忠, 王约, 张传恒. 2015. 云南晋宁地区柳坝塘组凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对晋宁运动的制约. 地质通报, 34 (9):1595 ~ 1604.

高林志, 张传恒, 史晓颖, 周洪瑞, 王自强. 2007. 华北青白口系下马岭组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 地质通报, 26 (3), 249 ~ 255.

耿元生, 杨崇辉, 王新社, 任留东, 杜利林, 周喜文. 2007. 扬子地台西缘结晶基底的时代.高校地质学报,13 (3):429 ~ 441.

胡荣民, 钱长海, 李万里, 陈依龙. 1993. 滇中南部昆阳群黄草岭组下伏地层的发现及其意义. 云南地质,12 (1):112 ~ 114.

李怀坤, 张传林, 姚春彦, 相震群. 2013. 扬子西缘中元古代沉积地层锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成. 中国科学:地球科学, 43 (8):1287 ~ 1298.

李希勣, 花友仁, 李良骥, 范承钧, 段国莲, 瞿云川. 1953. 云南东川铜矿地质. 地质学报, 3 (1):76~84.

李希勣, 吴懋德, 段锦荪. 1984. 昆阳群的层序及顶底问题. 地质论评, 30 (5):399 ~ 407.

吕世琨, 戴恒贵. 2001. 康滇地区建立昆阳群—会理群—层序的回顾和重要赋矿层位的发现. 云南地质, 20 (1):1 ~ 24.

乔秀夫, 高林志, 张传恒. 2007. 中朝板块中、新元古界年代地层柱与构造环境新思考. 地质通报, 26 (5), 503 ~ 509.

沈权. 1993. 昆阳群 ^{40}Ar-^{39}Ar 法测年探讨晋宁运动和澄江运动的时限. 云南地质, 12 (3):317 ~ 323.

孙家聪. 1982. 论昆阳群的划分及对比. 昆明工学院学报, 1:1 ~ 9.

孙家聪. 1983. 论昆阳群的划分及对比. 昆明工学院学报, 3:1 ~ 18.

孙家聪. 1985. 云南罗次澄江组下部火山岩系的发现与震旦系底界年龄的讨论. 地质科学, 4:354 ~ 363.

孙家聪. 1988. 云南中东部昆阳群的划分. 昆明工学院学报,13 (3):2 ~ 15.

孙志明, 尹福光, 关俊雷, 刘建辉, 李军敏, 耿全如, 王立全. 2009. 云南东川地区昆阳群黑山组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地层学意义. 地质通报, 28 (7):896~900.

吴懋德, 段锦荪, 宋学良, 陈良忠, 但韵清. 1990. 云南昆阳群地质, 云南科技出版社, 昆明. 1 ~ 265.

吴懋德, 李希勣. 1981. 云南昆阳群的两种底辟构造. 地质学报, 5 (2):105 ~ 116.

吴懋德. 1978. 滇中前寒武系含铁层位及某些富铁矿有关问题的讨论. 矿产专辑(一), 铁矿. 北京:地质出版社.

薛步高. 1999. 从东川铁架山铁矿层位探讨昆阳群层序. 云南地质, 18 (4):469 ~ 475.

薛步高. 2000. 昆阳群层序与对比问题, 云南地质, 20 (4):376 ~ 384.

鄢芸樵. 1986. 对“昆阳群的层序及顶底问题”一文的商榷. 地质论评, 22 (3):295 ~ 299.

杨斌, 董国臣, 郭阳, 王子正, 王鹏. 2016. 扬子地台西南缘大竹棚流纹岩的年代学、地球化学特征及其地质意义. 矿物岩石, 36 (2):82 ~ 91.

云南地质局. 1966. 1/50 万云南省地质图.

张传恒, 高林志, 武振杰, 史晓颖, 阎全人, 李大建. 2007. 滇中昆阳群凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄:华南格林维尔期造山的证据. 科学通报, 52 (7):818 ~ 824.

张恒, 李廷栋, 高林志, 耿树方, 丁孝忠, 刘燕学, 吴昊. 2015. 江南造山带东段赣东北广丰地区翁家岭组凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 中国地质,42(1):96 ~ 104.

中国地质调查局科技外事部. 2010. 扬子地台西缘前寒武纪地层野外现场会纪要. 地层学杂志, 34:336.

Black L P, Kamo S L, Allen C M, Aleinikoff J N, Davis D W, Korsch R J, Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. Chemical Geology, 200(1~2): 155 ~ 170.

Black L P, Kamo S L, Williams I S, Mundil R, Davis D W, Korsch R J, Foudoulis C. 2003. The Application of SHRIMP to Phanerozoic geochronology; a critical appraisal of four zircon standards. Chemical Geology, 200 (1~2): 171 ~ 188.

Cao Ruiji, Liang Yuzuo, Duan Jinsun. 1984&. A discussion of the stratigraphic sequence of the Kunyang Group and its correlation on the basis of the stromatolite assemblage recently discovered and the date of isotopic ages recently determined. Geological Review, 30 (1): 69 ~ 72.

Cui Xiaozhuang, Jiang Xinsheng, Wang Jian, Zhuo Jiewen, Xiong Guoqing, Lu Junze, Deng Qi, Wu Hao, Liu Jianhui. 2013&. Zircon U-Pb Geochronology for the stratotype section of the Neoproterozoic Chengjiang Formation in Central Yunnan and Its

Geological Significance. Geoscience, 27 (3): 547 ~ 556.

Dai Henggui. 1997&. On the strata, structure and prospecting target area of Kunyang Group and Huili group in Kang-dian region. Yunan Geology, 16(1): 1 ~ 39.

Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Pang Weihua, Zhang Chuanheng. 2011&. New geologic tine scale of Meso- and Neoproterozoic of China and geochronologic constraint by SHRIMP zircon U-Pb dating. Journal of Stratigraphy, 35 (1): 1 ~ 7.

Gao Linzhi, Yin Chongyu, Zhang Heng, Tang Feng, Ding Xiaozhong, Wang Yue, Zhang Chuanheng. 2015&. SHRIMP zircon U-Pb dating of the Liubatang Formation in the Jinning area, Yunnan Province, and its implication for the Jinning Movement. Geological Bulletin of China, 34 (9): 1595 ~ 1604.

Gao Linzhi, Zhang Chuanheng, Shi Xiaoyin, Zhou Hongrui, Wang Ziqiang. 2007&.Zircon SHRIMP U-Pb dating of the tuff bed in the Xiamaling Formation of the Qingbaikouan System in North China. Geological Bulletin of China, 26 (3): 249 ~ 255.

Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, Ren Liudong, Du Lilin, Zhou Xiwen. 2007&.Age of Crystalline Basement in Western Margin of Yangtze Terrane. Geological Journal of China Universities, September,13 (3): 429 ~ 441.

Greentree M R, Li Zhengxiang, Li Xianhua, Wu Huaichun. 2006. Late Mesoproterozoic to earliest Neoproterozoic basin record of the Sibao orogenesis in western South China and relationship to the assembly of Rodinia. Precambrian Research, 151 (1): 79 ~ 100.

Hu Rongmin, Qian Changhai, Li Wanli, Chen Yilong. 1993&. The discovery of underlying strata of the Huangcailing Formation, Kunyang Group, Southern part of the middle Yunnan Province. Yunnan Geology, 12(1): 112 ~ 114.

Li Huaikun, Zhang Chuanlin, Yao Chunyan, Xiang Zhenqun. 2013&. U-Pb zircon age and hf isotope compositons of Mesoproterozoic sedimentary strata on the western margin of the Yangtze massif. Science China: Earth Sciences, 56: 628 ~ 639.

Li Xianhua. 1999. U-Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze margin: timing of Neoproterozoic Jinning Orogen in SE China and implication for Rodinia assemble. Precambrian Research, 97: 43 ~ 57.

Li Xiji, Hua Youren, Li Liangji, Fan Chengjun, Duan Guoliang, Qu Yunchuan. 1953#. Geology of copper mine in Dongchuan, Yunnan. Acta Geological Sinica, 3 (1): 76 ~ 84.

Li Xiji, Wu Maode, Duan Jinsun. 1984&. The stratigraphic sequence of the Kunyang Group and its top and bottom boundaries. Geological Review, 30 (5): 399 ~ 407.

Li Zhengxiang, Li Xianhua, Kinny P D, Wang Jian. 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatismin the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle super plume that broke up Rodinia. Precambrian Research, 122 (1 ~ 4): 85 ~ 109.

Li Zhengxiang, Zhang Linghua, Powell C M. 1995. South China in Rodinia: part of the missing link between Australia—East Antacticle and Laurentia? Geology, 23(5): 407 ~ 410.

Li Zhengxiang, Zhang Linghua, Powell C M. 1996.Position of the East Asian cratons in the Neoproterozoic supercontinent Rodinia. Aust J Earth Sci, 43 (6): 593 ~ 604.

Ludwig K R. 2002. SQUID 1. 02, a user's manual. Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 2. 2455 Ridge Road, Berkeley, CA 94709, USA.

Lue Shikun, Dai Henggui. 2001&. A review of the set-up of Kunyang groups sequence and the discovery of important ore-bearing horizons in Kang-Dian area. Yunnan Geology, 20 (1):1 ~ 24.

Qiao Xiufu, Gao Linzhi, Zhang Chuanheng. 2007&. New idea of the Meso- and Neoproterozoic chronostratigraphic chart and tectonic environment in Sino—Korean Plate. Geological Bulletin of China, 26 (5) :3 ~ 9.

Stacey J S, Kramers J D.1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by two-stage model, Earth Planet. Sci. Lett., 26: 207 ~ 221.

Sun Jiachong. 1982#. On Division and correlation of Kunyang Group. Journal of Kunming Institute of Technology. 1: 1 ~ 9.

Sun Jiachong. 1983&. On Division and correlation of Kunyang Group. Journal of Kunming Institute of Technology. 3: 1 ~ 18.

Sun Jiachong. 1985&. Discovery the volcanic rocks series in the Chengjiang Formation at Luoci area and discussion on the age of the basal limit of the Sinian System, Yunnan. Scientia geologica Sinica, 4: 354 ~ 363.

Sun Jiachong. 1988#. Division of Kunyang Group in middle east Yunnan. Journal of Kunming Institute of Technology. 13 (3): 2 ~ 15.

Sun Zhiming, Yin Fuguang, Guan Junlei, Liu Jianhui, Li Junmin, Geng Quanru, Wang Liquan. 2009&. SHRIMP U-Pb dating and its stratigraphic significance of tuff zircons from Heishan Formation of Kunyang Group, Dongchuan area, Yunnan Province, China. Geological Bulletin of China, 8 (7): 896 ~ 900.

Wang Zhengjiang, Wang Jian, Jiang Xinsheng, Sun Haiqing, Gao Tianshan, Chen Jianshu, Qiu Yansheng, DuQiuding, Deng Qi, Yang Fei. 2015&. New Progress for the Stratigraphic Division and Correlation of Neoproterozoic in Yangtze Block, South China. Geological Review, 61 (1): 1 ~ 22.

Wang Shengwei, Jiang Xiaofang, Yang Bo, Sun Xiaoming, Liao Zhenwen, Zhou Qing, Guo Yang, Wang Zizheng, Yang Bin. 2016&. The Proterozoic Tectonic Movement In Kangdian Area Ⅰ: Kunyang Intracontinental Rift,Mantle Plume and Its Metallogenesis. Geological Review, 62 (6) :1353 ~ 1377.

Wu Maode, Duan Jinsun, Song Xueliang, Chen Liangzhong, Dan Yunqing. 1990#. Geologiy of Kunyang Group in Yunnan. Kunming: Yunnan Tectonic Publish House, 1 ~ 265.

Wu Maode, Li Xiji. 1981&. Two types of Diapiric structure of the Kunyang Group, Yunnan. Acta Geological Sinica, 5 (2): 105 ~ 116.

Xue Bugao. 1999&. A discussion about the stratigraphic sequence of Kunyang Group according to the fe ore horizon of Tiejia MT in Dongchuan. Yunnan Geology, 18 (4):469 ~ 475.

Xue Bugao. 2000&. Problems in stratigraphic sequence and correlation of Kunyang Group. Yunnan Geology, 20 (4):376 ~ 384.

Yan Yunqiao. 1986&. A discussion of the Paper "the stratigraphic sequence of the Kunyang Group and its top and bottom boundaries". Geological Review, 22 (3): 295 ~ 299.

Yang Bin, Dong Guochen, Guo Yang, Wang Zizheng, Wang Peng. 2016&. Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and significances of the Dazhupeng rhyolites in the western Yangtze Platform. Journal of Mineralogy Petrology, 36 (2): 82 ~ 91.

Yin Fuguang, Sun Zhiming, Zhang Zhang. 2011&. Mesoproterozoic Stratigraphic—Structure Framework in Huili—Dongchuan Area Geological Review, 57 (6): 770 ~ 778.

Zhang Chuanheng, Wu Zhengjie, Gao Linzhi, Shi Xiaoying, Yan Quanren, Li Dajian. 2007&. SHRIMP U-Pb zircon age of tuff from the Kunyang Group in central Yunnan: Evidence for Grvillian

orogeny in South China. Chinese Scieence Bulletin, 52 (11): 289 ~ 294.

Zhang Heng, Gao Linzhi, Li Tingdong, Geng Shufang, Ding Xiaozhong, Liu Yanxue, Wu Hao. 2015&.Zircon SHRIMP U—Th—Pb dating and implications for its stratigraphy of the Wengjialing Formation in the east section of the Jiangnan Orogenic Belt in Northeast Jiangxi Province. Geology in China, 2015: 96 ~ 104.

Zhang Heng, Li Tingdong, Xie Ying, Gao Linzhi, Geng Shufang, Chen Tingyu, You Guoqing. 2015. Geochronology and tectonic evolution of the west section of the Jiangnan Orogenic Belt. Acta Geologica Sinica (English Edition), 89(5): 1497 ~ 1515.

Shen Quan. 1993&. The ^{40}Ar-^{39}Ar Chronology of Kunyang Group to explore the time constraint of Jinning Movement and Chengjiang Movement. Yunnan Geology, 12 (3):317 ~ 323.

Wu Maode. 1978#. The discussion of Precambrian iron layer and some rich iron ore in the centre of Yunnan Province. Mineral album (一), Iron ore. Beijing: geological publishing house.

Yunnan geological survey. 1966#, 1/500 000 geological map of yunnan province. Beijing: geological publishing house.

Science and Technology Department, China Geological Survey. 2010#. Minutes of meetings of Precambrian stratigraphic field in the West of Yangtze plate. Journal of stratigraphy, 34 : 336.

Collate and Stipulate the Sequences of the Mesoproterozoic Kunyang Group in Eastern Yunnan and Its Position in Stratigraphic Column of China

GAO Linzhi[1)], ZHANG Heng[1)], ZHANG Chuanheng[2)], DING Xiaozhong[1)], YIN Chongyu[1)], WU Zhengjie[1)], SONG Biao [1)]

1) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing*, 100037;

2) *China University of Geosciences, Beijing*, 100083

Abstract: By the study of the chronostratigraphy of the Mesoproterozoic Kunyang Group, we set a series of SHRIMP U-Pb dating has been achieved from the Liubatang Formation. According to the relationship of the depositional succession between the Neoproterozoic Liubatang Formation and underlying Mesoproterozoic strata, such as the Meidang, Dalongkou and Fuliangpeng formations and their chronostratigrphic data, we first set up new Systemic unit of the Yuxi system in Eastern Yunnan and fill up the position of the undefined (or unnamed) system in Chinese stratigraphic column. The authors did more field work in Yunnan Province and take the correlation of the isotopic zircon dating in the Kunyang Group. We consider the long term arguer of the "eight reverse order" is the true sequences of the Meso and Neoproterozoic strata in southwestern margin of the South China Croton. On the basses of the true sequence and combine the Yunxi System (1.2 ~ 1.0 Ga) with the Xishan System (1.4 ~ 1.2 Ga) which had been set up in North China Croton, we consider that the new system fill up the hiatus in the stratigraphic column of China.

Keywords: Jinning, Yunan; the Yuxi System, SHRIMP zircon U-Pb dating; the Kunyang Group

Acknowledgements: This study is supported by basic project of Ministry of Science and Technology (No. 2015FY310100), Natural Science Fund Project (No. 41372038), and Geological Survey Project of China Geological Survey (No. 121201102000150009 and 121201102000161414).

First author: GAO Linzhi, Male, born in 1955. Research fellow (professor). Mainly engaged in biostratigraphy, sequence stratigraphy and catastrophic event stratigraphy research. Email:gaolzh@cags.ac.cn

Manuscript received on:2017-09-06;Accepted on: 2018-02-08; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2018.02.002

河北围场早中新世藓类化石的植物地理学意义

郭彩清[1]，李　亚[1]，吴鹏程[2]，姚建新[1]
GUO Caiqing[1], LI Ya[1], WU Pengcheng[2], YAO Jianxin[1]

1. 国土资源部地层与古生物重点实验室/中国地质科学院地质研究所，北京 100037；
2. 系统与演化重点实验室/中国科学院植物研究所，北京 100093
1. *Key Laboratory of Stratigraphy and Paleontology/Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China;*
2. *State Key Laboratory of Systematic and Evolutionary Botany/Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100093, *China*

摘要：对河北省围场地区广发永剖面藓类植物薄网藓 *Leptodictyum riparium*、似叶镰刀藓 *Drepanocladus trichophyllus* 和多姿柳叶藓 *Amblystegium varium* 的古地理及其对应的现代植物地理分布研究显示，这些植物最早出现于早中新世的围场地区，可能起源于该时期的古北大陆，东亚为起源中心。之后向东通过白令陆桥扩散到北美，向西沿欧亚大陆扩散至欧洲西部，至全新世时主要分布在北半球。全新世后，薄网藓与多姿柳叶藓进一步向南扩散，分别由北美及亚洲东部扩散到南美洲及澳大利亚地区，逐步形成现在的分布格局；毛叶镰刀藓则在更新世就已形成与现代相近的分布格局。该研究确立了 3 种藓类植物的地理起源、地史分布及迁移路线。

关键词：河北围场；早中新世；藓类植物化石；地史分布
中图分类号：P534.62⁺1；Q914　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1671-2552(2016)12-1976-09

Guo C Q, Li Y, Wu P C, Yao J X. The phytogeographic significance of Early Miocene mosses from Weichang area, Hebei Province. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(12):1976-1984

Abstract: Based on the study of fossils and modern distribution of mosses *Leptodictyum riparium*, *Drepanocladus subtrichophyllus*, *Amblystegium varium* from the Guangfayong section, Weichang area, Hebei Province, the authors found that these mosses first appeared in Weichang area in the Early Miocene (22.1Ma), and they were possibly derived from Eastern Asia of Laurasian. Then, the mosses spread eastward to North America through Beringia and westward to Western Europe along Eurasia. Until the Holocene, they were mainly distributed in the North Hemisphere. Mosses of *Leptodictyum riparium* and *Amblystegium varium* further spread southward to South America and Australia since the Holocene, and gradually formed modern distribution framework, and the geographical distribution framework of *Drepanocladus trichophyllus* was formed in Holocene. The phytogeographical significance concerning origin and spread of these mosses is discussed in this paper.

Key words: Weichang area; Early Miocene; fossil mosses; phytogeography

苔藓植物是植物界一大类群，包括苔类、藓类和角苔类，在植物的系统演化，特别是在植物由水生向陆生的演化过程中，具有重要意义[1-3]。苔藓植物资源丰富、种类繁多、分布广泛，生活史中以配子体世代占优势。目前，世界范围内记载的苔藓植物约有 23000 种[4]。由于其个体小、结构简单、体表不具有角质层、体内缺少维管束组织等特点，导致其在陆生环境中比维管植物更容易受到机械损伤及生物降解的作用，因此在地质历史时期保存为化石的数量非常稀少[5]。微体化石证据表明，苔类植物

收稿日期：2016-04-17；**修订日期**：2016-11-10
资助项目：中国地质调查局项目（编号：12120114026701、DD2016012、DD20160345）、科技部科技基础性工作专项（编号：2015FY310100）、国家自然科学基金项目（批准号：41402023、41472030）及中国地质科学院基本科研业务费专项（编号：J1510）
作者简介：郭彩清（1975- ），女，博士，助理研究员，从事地层学及古生物学研究。E-mail: caiqingguo@163.com
通讯作者：姚建新（1953- ），男，博士，研究员，从事地层学及古生物学研究。E-mail: yaojianxin@cags.ac.cn

孢子最早出现在中奥陶世[6]。云南曲靖泥盆纪地层也发现过类似黑藓的古孢子体 *Sporogonites yunnanense* Hsü[7]。迄今,世界最早的苔类及藓类植物均产自中国,分别来自贵州凯里中寒武世和云南文山早泥盆世地层[8-9]。

苔藓植物化石在新近纪、第四纪地层中出现较多[10-14]。该时期的柳叶藓科植物 *Amblystegiaceae* B. S. G. 先后被30余位专家研究报道[15-17]。与国际相比,中国对该类化石的研究起步较晚,化石记录也较稀少。截至目前,中国仅有贵州凯里中—下寒武统、云南文山中—下泥盆统、河北蔚县中侏罗统、新疆阜康中—下侏罗统、辽西义县下白垩统、内蒙古下白垩统等地区有少量苔藓植物化石产出及报道[9,18-28]。

河北省围场地区的古植物研究始于20世纪初。法国古生物学家Depape最早研究并报道了采自该地区的14种植物叶化石[29]。之后,甘振波等①[30]、河北省地质矿产局[31]分别对围场五罗贡地区的植物化石及孢粉样品进行了研究。2006年后,中国科学院古植物研究组宸铁梅[32]、梁肖青[33]、Li等[34]、李金锋[35]、Guo等[27]和Li等[36]对围场广发永植物群做了进一步调查。截止目前,河北省(蔚县中侏罗统乔儿涧组)已报道的苔藓植物化石仅8种,且均为苔类植物[21]。

由于目前苔藓植物化石发掘的数量有限,研究难度大,对这一古老类群在地质历史时期的面貌、分布等尚不了解,对其在生物学、系统发育学、古气候与古环境、古地理分布等方面的研究有待进一步加强。笔者于2013年报道了采自河北省围场县广发永剖面的藓类植物化石,通过形态及解剖学研究,最终确定为3种:薄网藓 *Leptodictyum riparium* (Hedw.) Warnst.、似毛叶镰刀藓 *Drepanocladus subtrichophyllus* Wu et Guo 和多姿柳叶藓 *Amblystegium varium* (Hedw.) Lindb.,分别从属于灰藓目Hypnobryales 柳叶藓科 Amblystegiaceae 的3个属:薄网藓属 *Leptodictyum* (Schimp.) Warnst.、镰刀藓属 *Drepanocladus* (Müell. Hal.) G. Roth 和柳叶藓属 *Amblystegium* B.S.G.,并从分类学、系统演化、古环境、古气候重建等方面进行了系统研究和讨论[27]。本文在上述研究的基础上,对3种藓类植物在地质历史时期的分布状况及与现代地理分布之间的相关性进一步研究,力图探寻其植物地理起源、地史分布、扩散、迁移路线等。

1　材料与地层概况

标本采自河北省围场县广发永乡广发永剖面的粉砂质泥岩中(图1),以压型化石为主,保存较好,茎及少数叶片保存完整。处理后,叶片及茎横切面显微结构清晰可见。广发永剖面出露于围场广发永乡附近的煤窑岭煤矿,为汉诺坝组玄武岩中的一套含煤沉积夹层[31],主要由泥岩、褐煤和砾岩组成,厚12.3m,与上覆第四纪沉积物和下伏玄武岩不整合接触。经K-Ar测年,汉诺坝组玄武岩的时代为22.1Ma[37]。根据岩性变化自下而上分为9层:第1~5层以粉砂质泥岩为主,第6层为褐煤层,第7层为夹有角砾岩的粉砂岩,第8层是底部含有煤线的泥岩,第9层为夹有煤线的页岩。其中,第4、6、8层产丰富的植物化石。本文的化石材料采自第8层,该层主要由泥岩组成,底部含有褐煤薄层(图1)。剖面层序岩性描述如下。

上覆:第四纪沉积物

~~~~~~ 不整合 ~~~~~~

9. 灰黑色页岩夹煤线　1.5m

8. 灰褐色泥岩,底部含褐煤薄层,产 *Leptodictyum riparium*, *Drepanocladus subtrichophyllus*, *Amblystegium varium* 化石　2.00m

7. 上部0.40m厚角砾岩,下部灰色泥岩、灰绿色粉砂岩、砂岩　2.20m

6. 煤层　1.25m

5. 灰黄色泥岩,局部夹砂岩透镜体　1.90m

4. 灰黑色泥岩　0.25m

3. 灰色泥岩夹粉砂岩和砂岩透镜体　1.10m

2. 灰色、灰黑色泥岩,极薄的水平层理发育　0.70m

1. 深灰色泥岩,局部水平层理　1.40m

~~~~~~ 不整合 ~~~~~~

下伏:玄武岩

2　地理分布

2.1　古地理分布

通过对早中新世藓类植物薄网藓 *Leptodictyum riparium*、多姿柳叶藓 *Amblystegium varium*、亲缘种毛叶镰刀藓 *Drepanocladus trichophyllus* (Warnst.) Podp. 的化石记录调查(表1),发现围场地区是迄今3种藓类植物在地层中保存的最早记录(22.1Ma)。中新世后,薄网藓 *Leptodictyum riparium* 最先出现在墨西哥查尔科、莫雷洛斯更新世泥炭沉积中[38];更新

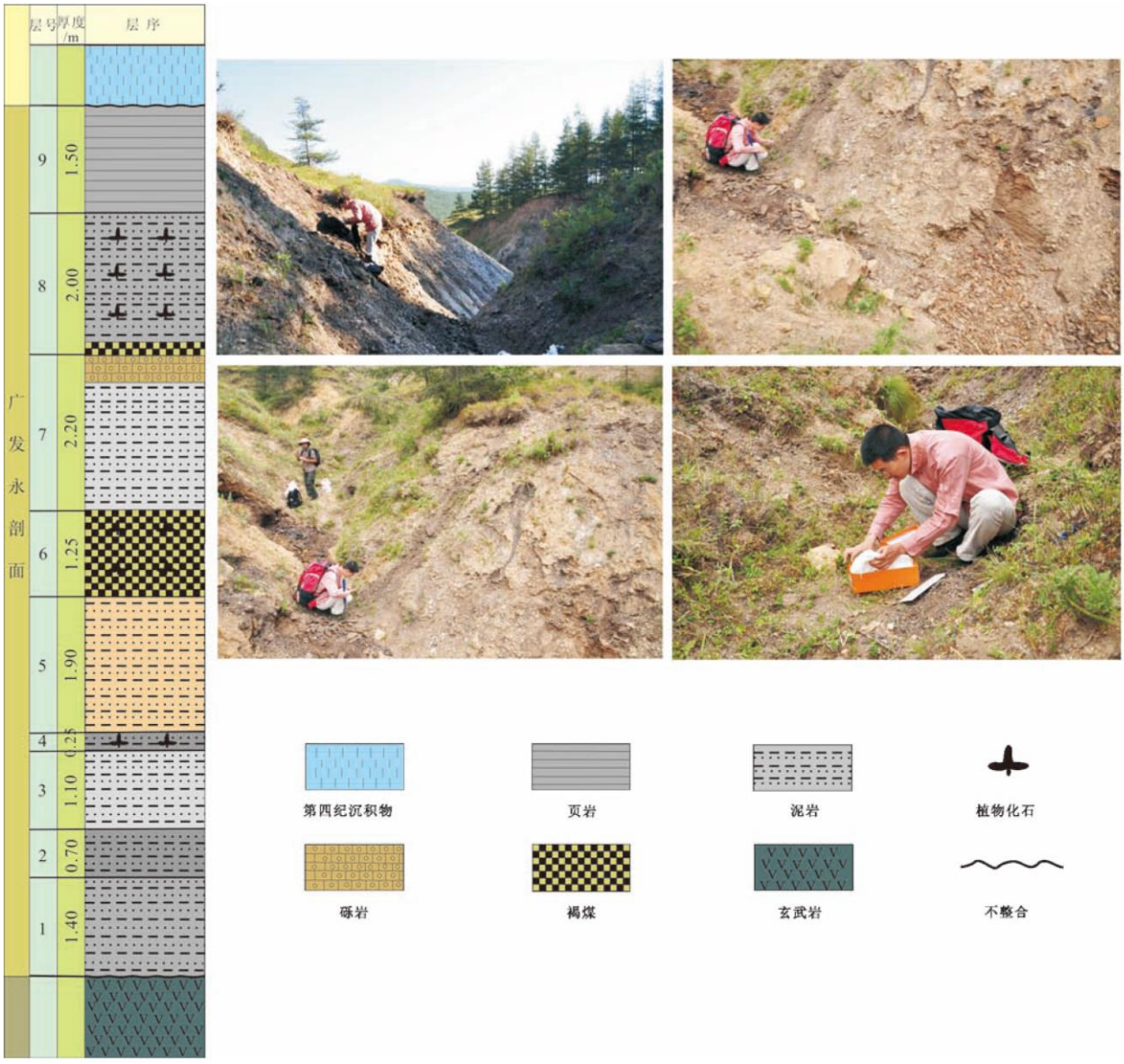


图1 广发永剖面柱状图及野外标本采集

Fig. 1 Stratigraphic column of the Guanfayong section and specimens collected

世晚期(0.06Ma),加拿大西北部育空地区发现了该植物的大量碎片[39];其叶片及配子体碎片在该时期(0.055~0.042Ma)的荷兰瓦赫宁恩和特温特2个地区也有产出[40-41]。由此可见,至更新世晚期,薄网藓主要分布在北美及欧洲大陆西部。全新世时,仅见于美国爱荷华州沉积(0.025~0.01Ma)[42]。除上述化石外,植物碎片及花粉在南非克尼斯纳早全新世(0.008Ma)泥炭沉积中[43]也有发现(图2-A;表1)。

毛叶镰刀藓 *Drepanocladus trichophyllus* 在地史时期的分布与薄网藓 *Leptodictyum riparium* 略有不同,该植物化石在更新世—全新世时期的分布较为均衡,数量上未见明显变化,集中分布在北美和欧洲西部,全部位于北半球。更新世晚期—全新世(0.1~0.002Ma),在加拿大艾伯塔、西北部的育空地区及北美阿拉斯加均有发现[44]。此外,在加拿大育空北部距今0.06Ma的晚更新世沉积[39]和挪威北部安岛地区0.012~0.009Ma的更新世晚期—全新世早期地层也有产出[45]。全新世时,主要发现于以下3

个地区,挪威西部卑尔根的早全新世沉积(0.01Ma)[46];瑞典北部和美国明尼苏达州北部晚全新世泥炭及湖泊沉积(0.005~0.004Ma)[15,44](图2-B;表1)。

多姿柳叶藓*Amblystegium varium*除早中新世围场地区有保存的化石记录外,至全新世时,该化石在地层中保存的记录共有7处,主要集中在北美地区:美国路易斯安那州密西西比河西南部的晚更新世—早全新世沉积(0.025~0.01Ma)[47]、美国苏厄德半岛西北部地区(0.022Ma)[48]、墨西哥查尔科更新世沉积及美国明尼苏达州北部全新世泥炭沉积[38,50]。欧洲仅见于德国新维德西部距今0.013Ma的地层中[49](图2-C;表1)。

综合3种藓类植物地层中出现的顺序(图2)不难看出,在渐新世时尚无可靠的化石记录,自早中新世开始出现在东亚的围场地区,由此可以推论,薄网藓、毛叶镰刀藓和多姿柳叶藓出现的时间应不晚于早中新世。虽然这些现有的化石资料对其起源地没有直接的指示作用,但根据所有化石均产自古北大陆这一事实可以判断,它们的起源地应在古北大陆[51],东亚为起源中心。3种藓类植物化石在早中新世时仅存在于亚洲东部的围场地区,更新世—全新世时期,已扩散至欧洲西部及北美地区,说明北美、欧洲和东亚在新近纪有一个相通的植物区系。中新世中期白令陆桥仍连接着东亚和北美大陆[52],北美地区的藓类植物应该是在早中新世以后通过该路桥到达的;在欧洲西部则由亚洲东部沿欧亚大陆向西扩散至该地区。3种藓类植物化石在更新世—全新世达到鼎盛,与苔藓植物化石在新近纪、第四纪地层中出现较多[10]的事实相吻合。藓类植物物种多样性在该时期显著增加,主要受当时气候变化的影响[53]。

2.2　自然地理分布

为了进一步研究围场早中新世藓类植物在地史时期的扩散及迁移路线,对其现代自然地理分布也进行了详细调查(图3)。其中,薄网藓*Leptodictyum riparium*植物的现代分布范围较广,在北纬75°的加拿大德文岛至南纬45°的新西兰奥塔哥地区均有分布,全球约10000多个分布点[54-67],主要位于西欧、北美、亚洲东部及南美、非洲和澳大利亚的东南部地区。其中,90%以上的分布点位于温带及亚热

表1　围场藓类植物化石的地史分布

Table 1　Distribution of fossil mosses in Weichang area

化石种	现代种	保存	时代	年龄/Ma	产地	文献
Leptodictyum riparium	*Leptodictyum riparium*	配子体	早中新世	22.1	中国辽宁	本文
		泥炭沉积	更新世	-	墨西哥查尔科、莫雷洛斯	[38]
		茎碎片	晚更新世	0.06	加拿大育空地区	[39]
		叶片	晚更新世	0.055~0.047	荷兰瓦赫宁恩	[40]
		有机沉积	晚更新世	0.042	荷兰特温特	[41]
		茎	早全新世	0.01	美国爱荷华州	[42]
		配子体碎片及孢粉	全新世	0.008	非洲克尼斯纳	[43]
Drepanocladus subtrichophyllus	*Drepanocladus trichophyllus*	配子体	早中新世	22.1	中国辽宁	本文
		配子体	晚更新世—全新世	0.1~0.002	加拿大艾伯塔、育空地区;北美阿拉斯加	[44]
		泥炭沉积	晚更新世	0.06	加拿大育空地区	[39]
		茎	晚更新世—早全新世	0.012~0.009	挪威安岛地区	[45]
		沉积	早全新世	0.01	挪威卑尔根	[46]
		泥炭沉积	晚全新世	0.005	瑞典北部	[15]
		配子体碎片	晚全新世	0.004	美国明尼苏达州	[44]
Amblystegium varium	*Amblystegium varium*	配子体	早中新世	22.1	中国辽宁	本文
		茎	晚更新世—全新世	0.025~0.01	美国路易斯安那州	[47]
		有机沉积	晚更新世	0.022	美国苏厄德半岛	[48]
		有机沉积	晚更新世	0.013	德国新维德	[49]
		泥炭沉积	更新世	-	墨西哥查尔科	[38]
		泥炭沉积	全新世	-	美国明尼苏达州	[50]

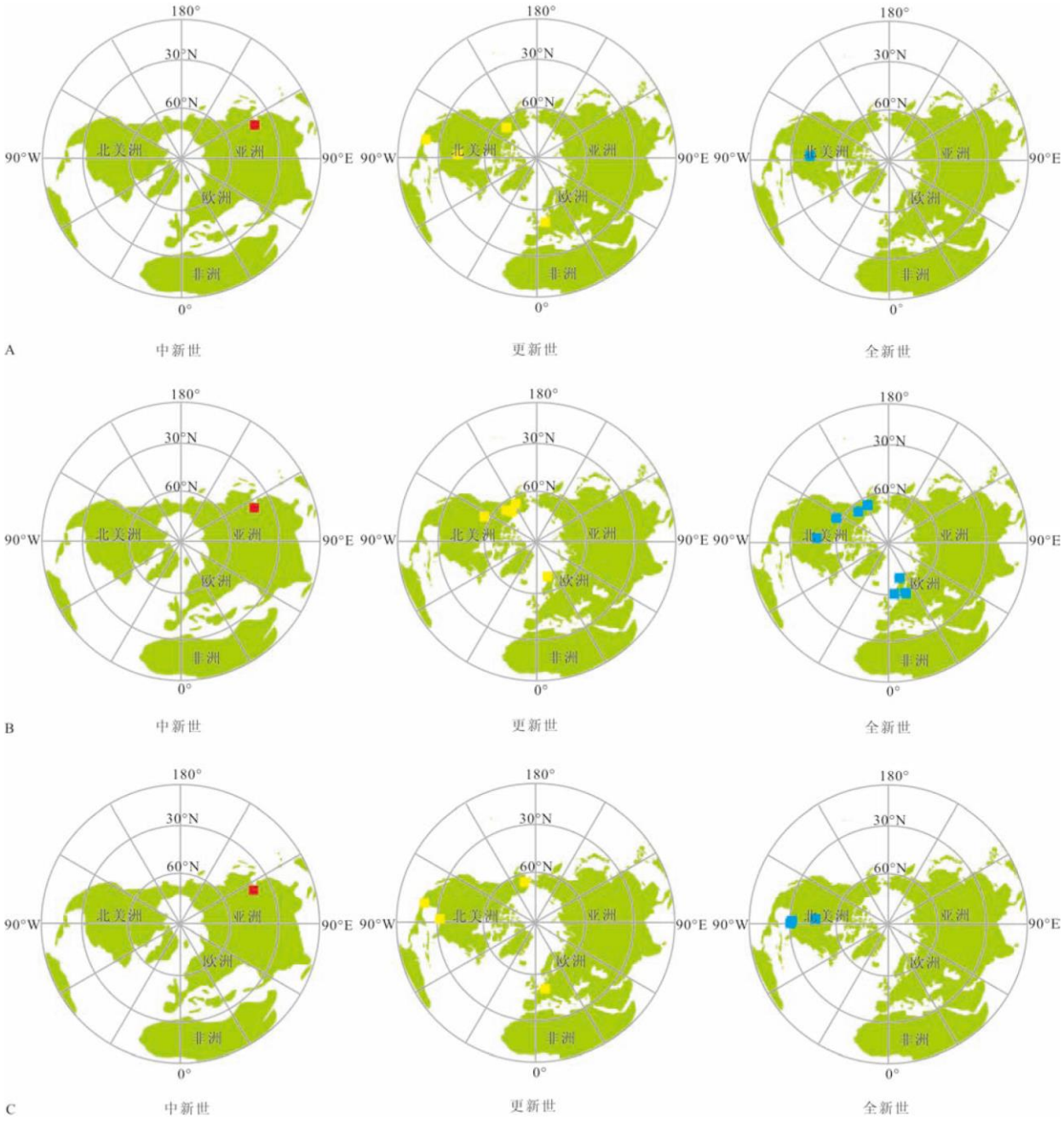


图 2 三种藓类植物的地史分布

Fig. 2 The palaeogeographical distribution of three moss species

A—*Leptodictyum riparium*; B—*Drepanocladus trichophyllus*; C—*Amblystegium varium*

带地区，为温带、亚热带广布种(图 3-A)。

与薄网藓相比，现代毛叶镰刀藓 *Drepanocladus trichophyllus* 植物的分布范围较小，仅分布于欧洲大陆最北端的挪威霍宁斯沃格-南美洲西北部厄瓜多尔(北纬 70°58′~南纬 5°)之间的 230 多个位点[54-55,68-72]；集中于加拿大西部育空、哥伦比亚地区，以及美国阿拉斯加和西欧的瑞典、芬兰，在南美洲北部、中国东北部有少量分布。除南美的厄瓜多尔外，全部位于北半球，且 95%以上位于温带地区，为北半球温带广布种(图 3-B)。

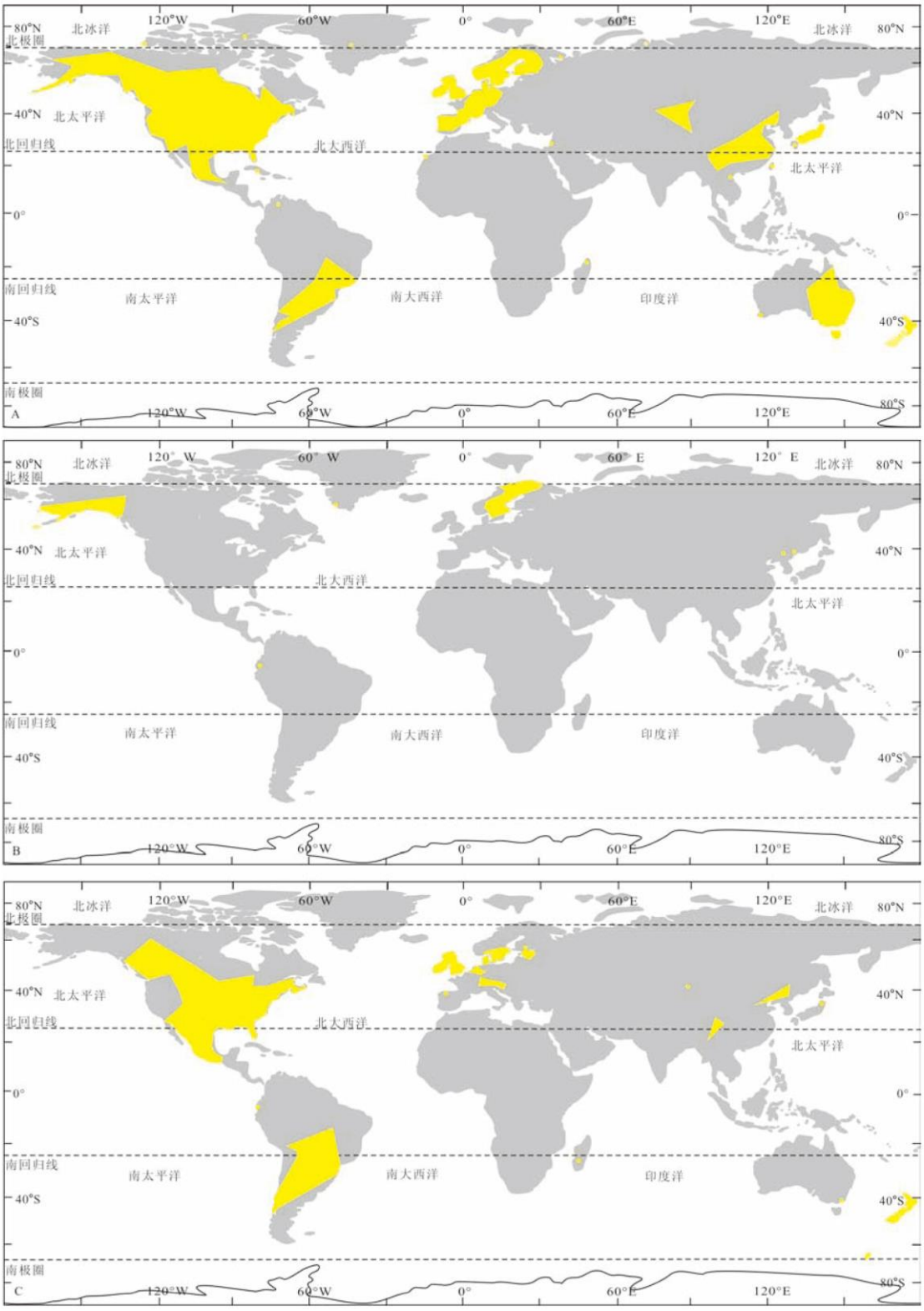


图3　三种藓类植物的现代分布

Fig. 3　Modern global distribution of three moss species

A—*Leptodictyum riparium*;B—*Drepanocladus trichophyllus*;C—*Amblystegium varium*

现代多姿柳叶藓 *Amblystegium varium* 的分布与薄网藓相似，主要集中在西欧、北美、南美洲、亚洲及澳大利亚东南部几个地区，全球约2000个位点[54-56,59,61-67,73-75]。最北端见于北纬61°的芬兰地区，南至南纬54°的澳大利亚麦阔里岛。近90%的分布点位于温带及亚热带地区，为温带及亚热带广布种(图3-C)。

通过对薄网藓 *Leptodictyum riparium*、毛叶镰刀藓 *Drepanocladus trichophyllus* 和多姿柳叶藓 *Amblystegium varium* 的现代分布研究发现，薄网藓与多姿柳叶藓植物的现代分布格局基本相同，即主要集中在西欧、南北美洲、东亚及澳大利亚东南部的温带及亚热带地区；毛叶镰刀藓植物主要分布在西欧及北美西部2个地区(图3)。进一步将3种藓类的古地理分布与现代地理分布进行比较，不难看出，早中新世，这些藓类植物仅存在于亚洲东部地区，更新世时已扩散至西欧、北美地区，至全新世，仅见于北半球，南美洲及澳大利亚未见分布，而薄网藓及多姿柳叶藓现今在上述2个地区均有较多分布(图2、图3)。究其原因，笔者推测，早中新世这些藓类植物分别沿东亚经白令陆桥扩散至北美洲、欧亚大陆向西扩散至欧洲西部。全新世时，薄网藓与多姿柳叶藓2种藓类植物继续向南扩散，由北美洲经巴拿马进入南美，由东亚向南扩散至澳大利亚地区，最终形成现在的分布格局；而毛叶镰刀藓在全新世时就已经形成与现在相近的分布格局。研究发现，这3种藓类植物的植物地理起源及迁移路线与陆生高等植物三棱栎属和桦属现代分布模式的成因非常相似，依据海陆固定论和三棱栎属起源于东南亚的思想，Hernandez等[76]认为，该属起源后由东亚向北扩散，在上新世经白令陆桥扩散到北美，而后沿巴拿马进入南美地区[51]。

3 结 论

通过对围场地区早中新世藓类植物古地理、现代地理分布及两者之间的相关性研究发现，这些藓类植物最早出现于早中新世的东亚地区；早中新世后，分别由东亚经白令陆桥扩散至北美洲，沿欧亚大陆向西扩散至欧洲西部；至全新世，主要分布在北半球，推测它们起源于该时期的古北大陆，东亚为起源中心，3种藓类植物化石分布范围在更新世—全新世达到鼎盛。全新世后，薄网藓与多姿柳叶藓植物继续向南扩散，由北美及东亚分别向南扩散至南美及澳大利亚，形成现在的分布格局；毛叶镰刀藓在更新世时期就已形成与现在相近的分布格局。

参考文献

[1]Graham L E. Origin of Land Plants[M]. New York: Wiley, 1993.

[2]Louise A L, Mishler B D, Vilgalys R. Phylogenetic Relationships of the Liverworts (Hepaticae), a Basal Embryophyte Lineage, Inferred from Nucleotide Sequence Data of the Chloroplast Gene rbcL[J]. Molecular Phylogenetics and Evolution, 1997, 7(3): 377-393.

[3]钟如涛, 陈喜英. 中国苔藓植物研究现状[J]. 林业调查规划, 2009, 34(5): 43-46.

[4]艾应伟, 刘浩, 李伟, 等. 苔藓植物资源保护利用中的生态环境效应研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 227-232.

[5]Krassilov V A, Schuster R M. Palaeozoic and Mesozoic fossils[M]. Japan: Nichinan, Miyazuki, 1984, 2: 1172-1193.

[6]Kenrick P. Fishing for the first plants[J]. Nature, 2003, 425: 248-249.

[7]徐仁. 云南泥盆纪植物化石和其在该区泥盆系地层划分上的意义[J]. 植物学报, 1966, 14(1): 50-69.

[8]Yang R D, Mao J R, Zhang W H. Bryophyte-like Fossil (Parafunaria sinensis) from Early-Middle Cambrian Kaili Formation in Guizhou Province, China[J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(2): 180-185.

[9]Guo C Q, Edwards D, Wu P C, et al. Riccardiothallus devonicus gen. et sp. nov. , the earliest simple thalloid liverwort from the Lower Devonian of Yunnan, China[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2012, 176/177: 35-40.

[10]Frahm J P, Newton A E. A New Contribution to the Moss Flora of Dominican Amber[J]. Bryologist, 2005, 108(4): 526-536.

[11]Moisan P, Voigt S, Schneider J W, et al. New fossil bryophytes from the Triassic Madygen Lagerstätte (SW Kyrgyzstan)[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2012, 187: 29-37.

[12]Bomfleur B, Klymiuk A A, Taylor E L, et al. Diverse bryophyte mesofossils from the Triassic of Antarctica[J]. Lethaia, 2014, 47(1): 120-132.

[13]Heinrichs J, Kettunen E, Lee G E, et al. Lejeuneaceae (Marchantiophyta) from a species-rich taphocoenosis in Miocene Mexican amber, with a review of liverworts fossilised in amber[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2015, 221: 59-70.

[14]Lee G E, Bechteler J, Schäfer-Verwimp A, et al. Microlejeunea miocenica sp. nov. (Porellales, Jungermanniopsida) in Dominican amber, the first fossil of a subcosmopolitan genus of leafy liverworts[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2015, 222: 16-21.

[15]Kokfelt U, Reuss N, Struyf E, et al. Wetland development, permafrost history and nutrient cycling inferred from late Holocene peat and lake sediment records in subarctic Sweden[J]. Journal of Paleolimnology, 2010, 44: 327-342.

[16]Reyes A V, Jensen B J L, Zazula G D, et al. A late-Middle Pleisto-

cene (Marine Isotope Stage 6) vegetated surface buried by Old Crow tephra at the Palisades, interior Alaska[J]. Quaternary Science Reviews, 2010, 29: 801−811.

[17]Thompson W B, Griggs C B, Miller N G, et al. Associated terrestrial and marine fossils in the late−glacial Presumpscot Formation, southern Maine, USA, and the marine reservoir effect on radiocarbon ages[J]. Quaternary Research, 2011, 75: 552−565.

[18]郭双兴. 两广南部晚白垩世和早第三纪植物群及地层意义[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 223−231.

[19]郑少林, 张武. 黑龙江东部地区龙爪沟群及鸡西群植物化石[J]. 中国地质科学院沈阳地质矿产研究所所刊, 1982, 5: 277−382.

[20]陈芬, 孟祥营, 任守勤, 等. 辽西阜新和铁法盆地早白垩世植物群及含煤地层[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1−180.

[21]吴向午, 历宝贤. 河北蔚县中侏罗世苔藓植物[J]. 古生物学报, 1992, 31(3): 257−382.

[22]吴向午. 新疆北部早、中侏罗世的几种苔类植物[J]. 古生物学报, 1996, 1: 71−140.

[23]吴舜卿. 辽西热河植物群初步研究[J]. Palaeoworld, 1999, 11: 7−37.

[24]孙革, 郑少林, 迪尔切 D , 等. 辽西早期被子植物及伴生植物群[M]. 上海: 科技出版社, 2001: 67−69.

[25]林志成. 冀西滇西等地中生代陆生植物与古大气CO_2浓度重建[D]. 兰州大学博士学位论文, 2011: 31−32.

[26]林志成, 孙柏年, 吴靖宇, 等. 恢复地史时期大气CO_2浓度的新指标: 苔藓植物化石[J]. 中国地质大学学报, 2012, 37(1): 145−155.

[27]Guo C Q, Yao J X, Wu P C, et al. Early Miocene moss from Weichang, North China, and their environment significance[J]. Acta Geologica Scinica (English Edition), 2013, 87(6): 1508−1519.

[28]Li R Y, Sun B N, Wang H S, et al. Marchantites huolinhensis sp. nov. (Marchantiales)− A new fossil liverwort with gemma cups from the Lower Cretaceous of Inner Mongolia, China[J]. Cretaceous Research, 2014, 50: 16−26.

[29]Depape G. La flore Tertiaire du Wei−Tch'ang (Province de Jehol, Chine)[J]. Publications du Musée Hoang ho Pai ho, 1932, 6: 1−26.

[30]甘振波. 冀北五罗贡早中新世孢粉组合[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 59−63.

[31]河北省地质矿产局. 河北省北京市天津市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989.

[32]袁铁梅. 河北中新世球果和果实及云南、浙江上新世化石木研究[D]. 中国科学院植物研究所博士后出站报告, 2007.

[33]梁肖青. 河北围场早中新世植物群研究[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2009.

[34]Li J F, Ferguson D K, Yang J, et al. Early Miocene vegetation and climate in Weichang District, North China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2009, 280(1): 47−63.

[35]李金锋. 河北围场早中新世孢粉植物群及其古植被和古气候[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2011: 6−8.

[36]Li Y, Svetlana P, Yao J X, et al. A Review on the taxonomic, evolutionary and phytogeographic studies of the lotus plant (Nelumbonaceae: Nelumbo)[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(4): 1252−1261.

[37]李吉,王彦青,肖志刚,等. 区域地质调查报告棋盘山幅K−50−16[M]. 北京:地质出版社,1979: 8.

[38]Delgadillo C. Floristic corridors for moss distribution across the Neovolcanic Belt of Mexico. Ⅳ. The Toluca and Chalco corridors[J]. Journal of Bryology, 2009, 31: 30−40.

[39]Janssens J A, Zander R H. Leptodontium flexifolium and Pseudocrossidium revolutum as 60000−Year−Old Subfossils from the Yukon Territory, Canada[J]. Bryologist, 1980, 83: 486−496.

[40]Geel B V, Bos J A A, Huissteden J V, et al. Palaeoecological study of a Weichselian wetland site in the Netherlands suggests a link with Dansgaard−Oeschger climate oscillation[J]. Netherlands Journal of Geosciences, 2010, 89: 187−201.

[41]Brinkkemper O, Geel B V, Wiegers J. Palaeoecological study of a Middle−Pleniglacial deposit from Tilligte, the Netherland[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 1987, 51: 235−269.

[42]Baker R G, Bettis E A, Horton D G. Late Wisconsinan−early Holocene riparian paleoenvironment in southeastern Iowa[J]. Geological Society of America Bulletin, 1993, 105: 206−212.

[43]Martin A R H. Pollen analysis of Groenvlei lake sediments, Knysna (South Africa)[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 1968, 7 (2): 107−144.

[44]Janssens J A. A Quantitative Method for Stratigraphic Analysis of Bryophytes in Holocene Peat[J]. Journal of Ecology, 1983, 71(1): 189−196.

[45]Vorren K D, Elverland E, Blaauw M, et al. Vegetation and climate c. 12300~9000 cal. yr BP at AndØya, NW Norway[J]. Boreas, 2009, 38: 401−420.

[46]Övestedal D O, Aarseth I. Bryophytes from Late Weichselian sediments at Vinnes, western Norway[J]. Lindbergia, 1975, 3: 61−68.

[47]Givens C R, Givens F M. Age and significance of fossil white spruce (Picea glauca), Tunica Hills, Louisiana−Mississippi[J]. Quaternary Research, 1987, 27(3): 283−296.

[48]Geotcheus V G, Birks H H. Full−glacial upland tundra vegetation preserved under tephra in the Beringia National Park, Seward Peninsula, Alaska[J]. Quaternary Science Reviews, 2001, 20: 135−147.

[49]Bittmann F. Reconstruction of the Allerød vegetation of the Neuwied Basin, western Germany, and its surroundings at 12900cal bp[J]. Vegetation History and Archaeobotany, 2007, 16: 139−156.

[50]Janssens J A, Glaser P H. The bryophyte flora and major peat−forming mosses at Red Lake peatland, Minnesota[J]. Canadian Journal of Botany, 1986, 64: 427−442.

[51]周浙昆. 壳斗科的地质历史及其系统学和植物地理学意义[J]. 植物分类学报, 1999, 37(4): 369−385.

[52]王磊, 解三平, 刘珂男, 等. 云南临沧晚中新世桦属翅果化石及其古植物地理学意义[J]. 吉林大学学报, 2012, 42(2): 331−342.

[53]Parmesan C, Yohe G A. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems[J]. Nature, 2003, 421: 37−42.

[54]Roth G. Die Europäischen Laubmoose. Band Ⅱ. Fam XLI. Amblystegiaceae[M]. Leipzig, 1904: 506−665.

[55]Nyholm E. Illustrated moss flora of Fennoscandia Ⅱ. Musci. Fasc.

5. Amblystegiaceae[J]. Bryologist, 1965: 413−496.

[56]Nyholm E. Illustrated Flora of Nordic Mosses. Fasc. 3[M]. Nordic Bryological Society, Lund, 1993: 145−244.

[57]Kanda H. A revision of the family Amblystegiaceae of Japan Ⅰ[J]. Proceedings of the Bryological Society of Japan, 1975, 15: 201−276.

[58]Kanda H. A revision of the family Amblystegiaceae of Japan Ⅱ[J]. Proceedings of the Bryological Society of Japan, 1976, 16: 47−119.

[59]Crum H A, Anderson L E. Mosses of Eastern North America Ⅱ[M]. New York: Columbia University Press, 1981: 916−1105.

[60]Hu R L, Wang Y F. A review of the moss flora of East China[J]. Memoirs New York Bot. Gard, 1987, 45: 455−465.

[61]Noguchi A. Illustrated Moss Flora of Japan. Part 2[M]. Hattori Botanical Laboratory, 1988.

[62]Noguchi A. Illustrated Moss Flora of Japan. Part 3[M]. Hattori Botanical Laboratory, 1989.

[63]Anderson L E, Crum H A, Buck W R. List of the mosses of North America north of Mexico[J]. Bryologist, 1990, 93(4): 448−499.

[64]Croshy M R, Magill R E, Bauer C R. Index of mosses[M]. Missouri Botanical Garden, 1994.

[65]Hedenäs L. Notes on some taxa of Amblystegiaceae[J]. Bryologist, 1997, 100(1): 98−101.

[66]William M A L S. Enumeration of all the species of Musci and Hepaticeae recorded from Japan. Ⅲ[J]. Transactions of the Linnean Society of London, 2009, 3(3): 153−206.

[67]吴鹏程, 贾渝, 张力. 中国高等植物志(第一卷)[M]. 青岛: 青岛出版社, 2012: 802−827.

[68]Loeske L. Drepanocladus, eine biologische Mischgattung[J]. Hedwigia, 1907, 46: 300−321.

[69]Grout A J. Moss Flora of North America North of Mexico. Ⅱ[M]. Newfane, Vermont, 1931.

[70]Wynne F E. Studies in Drepanocladus Ⅳ. Taxonomy[J]. Bryologist, 1944, 47: 147−189.

[71]Wu Y H, Cao C, Cai T. Notes on Chinese Amblystegiaceae[J]. Chenia, 2002, 7: 51−58.

[72]胡人亮, 王幼芳. 中国苔藓志(第七卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 12−40.

[73]Cheney L S. North American Species of Amblystegium[J]. Botanical Gazette, 1897, 24(4): 236−291.

[74]Wilbraham J. The Illustrated Moss Flora of Antarctica[J]. Botanical Journal of the Linnean Society, 2010, 164(1): 110−111.

[75]Conard H S. Amblystegium[J]. Bryologist, 1959, 62: 96−104.

[76]Hernandez C G, Lozano C J, Henao S J E. Hallazgo del genero Trigonobalanus Forman, 1962 (Fagaceae) en el Neotropico− Ⅱ[J]. Caldasia, 1980, 13: 9−43.

①甘振波, 佘建辉. 河北五罗贡早中新世植物及孢粉组合. 河北: 综合研究地质大队, 1978.

申扎县永竹俄玛北日拉组中发现早白垩世珊瑚*

何继富[1)]，纪占胜[2)]，刘景彦[1)]，武桂春[2)]，石秋圆[1,2)]，李浩[2)]，仲昭[1)]

1) 中国地质大学，北京，100083；

2) 国土资源部地层与古生物重点实验室，中国地质科学院地质研究所，北京，100037

关键词：西藏；措勤盆地；早白垩世；珊瑚；朗山组；油气勘探

青藏高原是位于特提斯构造域东段的一个既具有很大油气潜力但同时勘探研究程度又很低的地区（王成善等，2006；南征兵等，2012），其很有可能成为我国西部第二个油气资源战略接替区（丘东洲，1997）。措勤盆地是青藏高原中仅次于羌唐盆地的另一重要目标勘探盆地（魏玉帅等，2011）。长期以来，措勤盆地朗山组一直被认为是盆地内部较好的烃源岩层和储集层（赵政璋等，2000；汪恩华等，2002；王剑等，2005），然而随着研究的进行，纪占胜等（2008）通过一系列对古生物地层细致的研究认为措勤盆地的上古生界是潜在的油气建造，纪占胜等(2011)进一步发现晚侏罗世吐卡日组，吐卡日组以浅海碳酸盐台地相的生物礁亚相、鲕粒滩亚相为特征，并认为其具有良好的生油和储油潜力，孟亚洲等(2016)也于措勤盆地保吉地区发现礁滩相上侏罗统，并建议将上侏罗统吐卡日组作为新的油气勘探目标层系。在此认识的基础之上，本文通过实测剖面及珊瑚化石研究，修订了地层时代，认为申扎县永竹俄玛北部地区朗山组地层出露，而晚侏罗世地层绝大部分仍埋于地下，此地区仍具良好的油气勘探潜力。

1 研究剖面

本次研究剖面位于永竹俄玛以北，行政区划上隶属西藏自治区申扎县。属 2000~2002 年吉林地质调查院二调队实测的多巴区幅。起点坐标：N31°17′57.60″，E88°42′36.52″，海拔高度 4668.0m，终点坐标：N31°17′15.97″，E88°43′11.95″，海拔高度 4746.6m。在以前的区调工作中，此处划分为晚侏罗统日拉组和白垩统则弄群。此次，选取剖面地层出露情况较好，化石比较丰富，有利于对地层时代精确确定，现将生物地层剖面描述如下。

下白垩统朗山组（K_1l，原划 K_1zl）

11. 灰黑色粉砂岩，泥质粉砂岩 3m

10. 灰绿色细砂岩 2m

9.灰绿色叶片状粉砂岩 8m

8. 灰绿色砂岩 20m

7.灰黑色泥岩 15m

6.灰-灰黑色泥质粉砂岩 2m

5.灰绿色薄层橄榄质砂岩，产状 285°∠24° 12m

4.灰黑色泥岩，粉砂质泥岩 11m

原划 J_3K_1r

3.砾屑灰岩，灰岩砾石中见生物碎屑，产状 280°∠50°， 产珊瑚：M150805-39~47、49~55、59~66，产珊瑚化石 *Stylina* cf. *sablensi* Trautschold，*Isastraea* sp., Albian of Egypt，*Heliocoenia* cf. *carpathica* Morycowa，*Heliocoenia* cf. *carpathica* Morycowa，*Fungiastraea* l*amellistrat*a (Michelin)，*Fungiastraea* l*amellistrata* (Michelin)，（52 号化石只有两个纵切面，可能是 *Eugyra* sp.），*Calamophylliopsis* ? sp.（时代为 J-K），*Stylina regularis* Fromentel，（63 号化石保存不好不能鉴定），*Pseudocoeniopsis* sp.，*Actinastrea* sp., Albian of Egypt，*Cyathophora pygmaea* Volz，*Stylina* cf. *sablensi* Trautschold，珊瑚化石时代为 K_1 65m

*注：本文为国家自然科学基金项目（编号：41472030），科技基础性工作专项（编号：2015FY310100），中国地质调查局项目（编号：12120115069001、1212011120142、1211402108021-2、121201102000150010-02、121201102000150010-04、1212011120115)和中国地质科学院基本科研业务费项目(编号：J1601)的成果。

收稿日期：2017-02-15；改回日期：2017-03-24；责任编辑：周健。Doi: 10.16509/j.georeview. 2017. s1. 151

作者简介：何继富，男，1994 年生。硕士研究生在读，地质工程专业。Email:2648191493@qq.com。

通讯作者：纪占胜，男，1974 年生。研究员，主要从事地层学及古生物学方面研究。Email:jizhansheng@vip.sina.com。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.灰黑色粉晶灰岩，大量坡积物，见生屑，产珊瑚，双壳，向上生物变少，采珊瑚样品 M150805-13~35，产珊瑚化石 *Cyathophora gomangcoensis* Liao & Xia, *Cryptocoenia otoseptata* (Étallon)(时代为 K_1)，*Thecosmilia* ? sp.，*Calamophylliopsis* ? sp.(时代为 J-K)；*Ovalastraea turbinata* (Fromentel)，*Astraraea* ? sp.，*Microsolena guttata* Koby，*Myriophyllia undans* Étallon，*Baryphyllia* cf. *haimei* Fromentel，*Latiastraea kaufmani* (Koby)，*Calamophylliopsis stockesi* (Milne-Edwards & Haime)，*Stylina parvistella* Volz，*Pseudocoenia annae*(Volz)，珊瑚化石时代为 K_1 85m

1. ∑，蛇绿岩 40m

2 珊瑚动物群的组成和时代

此次所测剖面原划为上侏罗统日拉组，地层出露良好，化石丰富。岩性以含生物碎屑的砾屑灰岩、粉晶灰岩及砂泥岩为主，下部出露蛇绿岩。本次笔者在此剖面上共采集珊瑚化石 19 属 16 种及未定种共 40 多件，主要有：*Thecosmilia* ? sp，*Cya-thophora gomangcoensis* Liao & Xia，Cryptocoenia *otoseptata* (Étallon)，*Calamophylliopsis* ? sp，*Ovalastraea turbinata* (Fromentel)，*Microsolena guttata* Koby，*Myriophyllia undans* Étallon，*Bary-phyllia* cf. *Haimei* Fromentel，*Astraraea*?sp，*Lati-astraea kaufmani* (Koby),*Calamophylliopsis stocke-si* (Milne-Edwards & Haime)，*Stylina parvistella* Volz，*Pseudocoenia annae* (Volz)，*Stylina* cf. *sab-lensi* Trautschold，*Isastraea* sp.Albian of Egypt，*Heliocoenia* cf. *carpathica* Morycowa，*Fungiastra-ea lamellistrata* (Michelin)，*Eugyra*? sp.，*Calamo- phylliopsis* ? sp，*Stylina regularis* Fromentel，*Ps-eudocoeniopsis* sp，*Stylina* cf. *sablensi* Trautschol-d，*Cyathophora pygmaea* Volz，*Actinastrea* sp. Albian of Egypt 等。经中国地质科学院南京古生物研究所廖卫华鉴定，这些化石整体分布于侏罗纪到白垩纪之间，其中大部分属于下白垩统朗山组，限于篇幅，此处不做详细讨论。

参 考 文 献 / References

纪占胜, 姚建新, 武桂春. 2008.西藏措勤盆地的上古生界—下古生界:潜在的油气沉积建造. 地质通报, 27(1)：36-63.

纪占胜, 姚建新, 武桂春. 2011. 西藏改则县物玛乡北部晚侏罗世吐卡日组珊瑚动物群的发现及其地质意义. 地质通报, 30(2~3)：418~438.

孟亚洲，纪占胜，廖卫华，等.2016.西藏保吉地区晚侏罗世珊瑚动物群的发现及其意义.地质学报，90（5）：833~847.

南征兵，张艳玲，李永铁，等.2012. 青藏高原重点盆地与特提斯构造域含油气盆地对比分析. 天然气地球科学，23（6）：1039~1044.

丘东洲.1997.西藏地区油气资源评价的几个问题.特提斯地质，第 21 号：1~5.

汪恩华，柳广弟，梁尚勇，等.2002.措勤盆地油气系统研究. 西安石油学院学报 (自然科学版)， 17（4）：1039~1044.

王剑, 谭富文, 李亚林，等. 2005.青藏高原重点沉积盆地油气资源潜力. 北京:地质出版社, 1~300.

王成善，李亚林，李永铁.2006.青藏高原油气远景评价问题.石油学报，27（4）：1~7.

魏玉帅，王成善，李亚林，等.2011.西藏措勤盆地中生界生储盖特征和含油气远景评价.地质通报， 30（10）：1575~1586.

赵政璋, 李永铁, 叶和飞，等. 2000. 青藏高原海相烃源层的油气生成. 北京:科学出版社, 1~634.

HE Jifu，JI Zhansheng，LIU Jingyan，WU Guichun，SHI Qiuyuan，LI Hao，ZHONG Zhao: Discovery of the Early Cretaceous Coral in Rila Formation in the North of Yongzhuema，Xainza County

Keywords: Xizang(Tibet); Coqên Basin; Early Cretaceous; Coral; Langshan Formation; Oil and gas exploration

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2018 年 7 月 地 球 学 报 Jul. 2018
第 39 卷 第 4 期: 387-400 Acta Geoscientica Sinica Vol.39 No.4: 387-400
www.cagsbulletin.com

青藏高原油气勘探战略选区和战术突破目标的建议

纪占胜[1)], 武桂春[2)], 姚建新[2)], 孙 倩[3, 1)], 石秋圆[1, 3)], 何继富[3, 1)], 李 浩[1, 3)], 刘振宇[4)], 郭安臣[4)], 侯召硕[4)], 李东泽[4)]

1)中国地质科学院, 北京 100037;
2)中国地质科学院地质研究所, 国土资源部地层与古生物重点实验室, 北京 100037;
3)中国地质大学(北京), 北京 100083; 4)吉林省地质调查院, 吉林长春 130102

摘 要: 三陆两槽基础地质认识是长期指导青藏高原油气勘探的基础地质认识, 其核心支柱是冈底斯地区晚二叠世—侏罗纪是长期地层缺失或是发育陆相地层的冈底斯古陆。然而最新的青藏高原地质大调查工作识别出了很多原来认为缺失的地层, 证明冈底斯古陆并不存在, 因此三陆两槽的基础地质认识也不成立。基于新的地层学发现, 笔者提出了两陆一盆基础地质认识, 将青藏高原的古生代—中生代海相盆地命名为古格盆地, 指出古格盆地的措勤断块具有形成大型油气区的地质背景, 古格层系和保吉层系是措勤断块的两个油气勘探的有利层系, 都是碳酸盐岩台地相沉积, 这两个层系大部分保存在白垩系地层之下, 保存条件好。燕山期晚期—喜山期的南北向构造挤压造成措勤断块全区发育复式背向斜, 郎山组及以下的地层形成褶皱, 褶皱的背斜核部是油气勘探的有利构造部位, 这些背斜构造在后期东西向断层的掀斜作用下, 形成鼻状构造。这些鼻状构造的高点位置就是油气勘探的靶点位置。青藏高原油气勘探重心应该从羌塘断块转向措勤断块, 建议在措勤断块识别出的鼻状构造高点部位开展物探和钻探验证工作。

关键词: 西藏; 两陆一盆; 措勤断块; 保吉层系; 油气勘探

中图分类号: TE121.1; TE321 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2018.062501

Suggestions on the Strategic Selection of Petroleum Target Areas and the Tactic Breakthrough of the Oil and Gas Exploration in the Tibetan Plateau

JI Zhan-sheng[1)], WU Gui-chun[2)], YAO Jian-xin[2)], SUN Qian[3, 1)], SHI Qiu-yuan[1, 3)], HE Ji-fu[3, 1)], LI Hao[1, 3)], LIU Zhen-yu[4)], GUO An-chen[4)], HOU Zhao-shuo[4)], LI Dong-ze[4)]

1) *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037;
2) *Key Laboratory of Stratigraphy and Paleontology, Ministry of Land and Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037;
3) *China University of Geosciences(Beijing), Beijing* 100083;
4) *Geological Survey Institute of Jilin Province, Changchun, Jilin* 130102

Abstract: The geological hypothesis of three oldlands separated by two troughs has long been the guiding theory for the oil and gas exploration of the Tibetan Plateau. The core pillar of the hypothesis is that Gangdise region was an oldland (the Gangdise Oldland) during Late Permian to Jurassic. The oldland was interpreted by the argument that the strata of the upper Permian and the Middle–Upper Jurassic are terrestrial facies and the strata of the Triassic and lower Jurassic failed to deposit. However, many marine strata previously thought to be not deposited have been identified by biostratigraphic investigations, which proves that the Gangdise Oldland does not exist actually. The absence of the Gangdise Oldland means that the above hypothesis does not represent the

本文由国家自然科学基金项目(编号: 41472030)、科技基础性工作专项(编号: 2015FY310100)、中国地质调查局基础性公益性矿产地质调查项目(编号: DD20160120-02; DD20160120-04; DD20160126)和中国地质科学院基本科研业务费项目(编号: J1607)联合资助。
收稿日期: 2018-04-24; 改回日期: 2018-06-20; 网络首发日期: 2018-06-26。责任编辑: 张改侠。
第一作者简介: 纪占胜, 男, 1974 年生。博士, 研究员。主要从事西藏地层古生物学研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: jizhansheng@vip.sina.com。
?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

actural aspects of the geological pattern of the Tibetan Plateau. A new hypothesis of one basin between two oldlands is proposed in this paper. This hypothesis is mainly characterized by the argument that marine sediments deposited on the so-called Gandise Oldland. Guge Basin seems to have been the unique marine basin from Paleozoic to Mesozoic in the Tibetan Plateau. The Coqen Block in the Guge Basin had favorable geological conditions to form a large hydrocarbon province because of the existence of the Guge oil-bearing assemblage and the Baoji oil-bearing assemblage. These two assemblages comprise sediments of carbonate platform facies with hydrocarbon shows in the ourcrops and are well preserved by the Cretaceous strata which constitute the main outcrops. The Cretaceous and the strata below were compressed to form compound anticlinal structure by the NS-trending tectonic movement of Late Yanshanian–Himalayan period. The core of the anticline is the favorable structural part of the oil and gas exploration. The anticline structure was tilted to form nose structure by the EW-trending fault later. The structural high point of the nose structure is the target position for oil and gas exploration. The strategic petroleum target area selection in the Tibetan Plateau is suggested to be transferred from the Qiangtang Block to the Coqen Block, and geophysical exploration and drilling verification should be conducted on the identified nose structure in the Baoji area.

Key words: Tibet; hypothesis of one basin between two oldlands; Coqen Block; Baoji oil-bearing assemblage; oil and gas exploration

青藏高原是中国陆上油气勘探的战略选区，羌塘盆地和措勤盆地是西藏北部的 2 个大型中生代沉积盆地(图 1)，前人普遍认为羌塘盆地油气地质条件最好(王成善等, 2001; 赵政璋等, 2001; 高瑞祺等, 王剑等, 2004, 2009; 潘继平等, 2004; 付孝悦等, 2005; 潘继平, 2006; 门相勇等, 2006; 张大伟等, 2006; 刘家铎, 2007)，是青藏高原油气勘探突破的首选目标，而措勤盆地是备选盆地(赵政璋等, 2001)。青藏高原的油气勘探评价工作始于 20 世纪 90 年代(青藏油气区石油地质志编写组, 1990; 蒋忠惕等, 1990)，此后，中国石油天然气总公司(赵政璋等, 2001)和国土资源部(王剑等, 2004, 2009)又开展了 2 轮油气勘探评价工作，为后人提供了丰富的资料和宝贵的借鉴。近年来，青藏高原地质大调查取得了很多新资料和新认识，为进一步探讨油气勘探问题创造了条件。本文拟粗浅地探讨一下青藏高原油气勘探的基础地质理论、战略选区和战术突破的认识。

1 三陆两槽地质认识及其油气勘探战略方向

1.1 三陆两槽地质认识

“三陆两槽”是蒋忠惕等(1990)对青藏高原宏观地质格局的概括性总结，三叠纪的“三陆”是指北部的祁连—柴达木—昆仑大陆块、中间的羌塘—念青唐古拉陆块和南部的喜马拉雅—印度陆块。“两

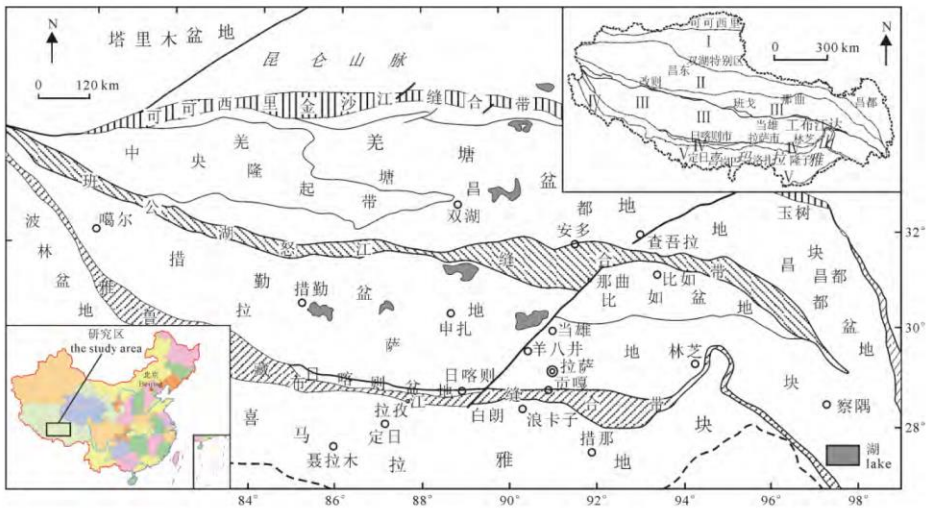


图 1 青藏高原沉积盆地及研究区示意图(据王剑等, 2009)

Fig. 1 Schematic map of the sedimentary basins in the Tibetan Plateau (modified after WANG et al., 2009)

Ⅰ-喀拉昆仑—北羌塘地层区; Ⅱ-南羌塘地层区; Ⅲ-冈底斯—念青唐古拉地层区; Ⅳ-雅鲁藏布江地层区; Ⅴ-喜马拉雅地层区

I-Karakoram–North Qiangtang stratigraphic region; II-South Qiangtang stratigraphic region; III-Gangdise–Nyainqentanglha stratigraphic region; IV-Yarlung–Zangpo stratigraphic region; V-Himalaya stratigraphic region

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

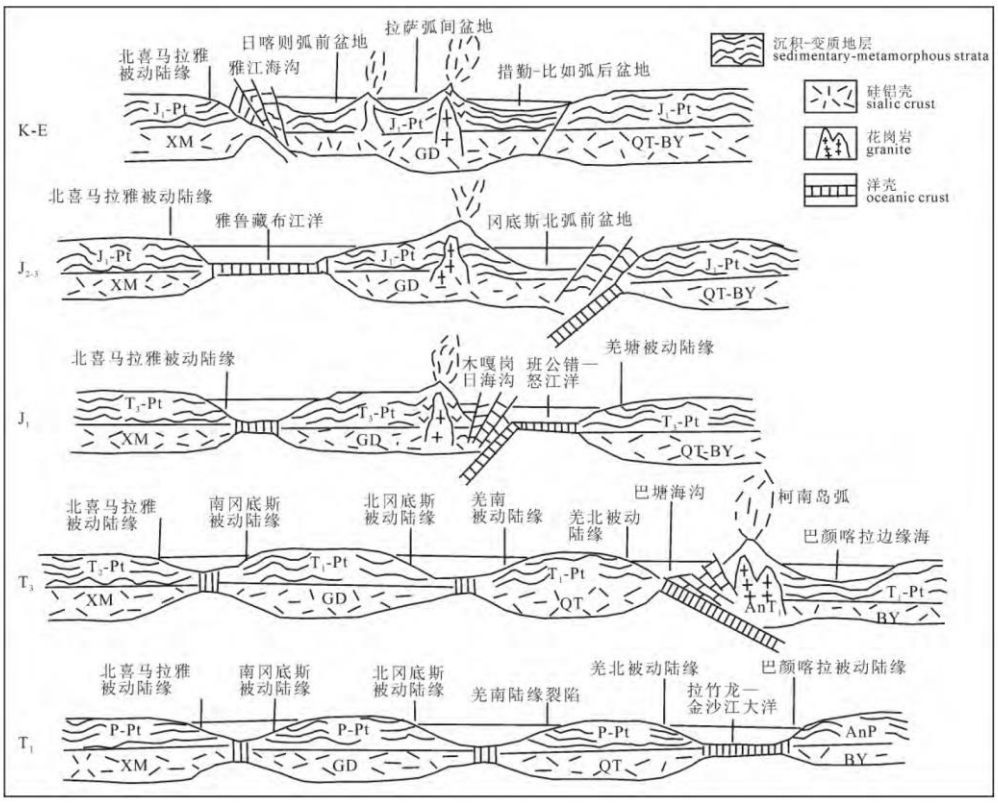


图 2　青藏高原中新生代的地质模型(引自赵政璋等, 2001)

Fig. 2　Geological model of the Tibetan Plateau from Mesozoic to Cenozoic (after ZHAO et al., 2001)

T_1-早三叠世; T_3-晚三叠世; J_1-早侏罗世; J_{2-3}-中、晚侏罗世; K-E-白垩纪—古近纪; J_1-Pt-早侏罗世—元古代; T_3-Pt-晚三叠世—元古代; T_2-Pt-晚三叠世—元古代; T_1-Pt-早三叠世-元古代; P-Pt-二叠纪—元古代; AnP-太古代—元古代; XM-喜玛拉雅地块; GD-冈底斯地块; QT-羌塘地块; BY-巴颜喀拉地块; QT- BY-羌塘—巴颜喀拉地块

T_1-Early Triassic; T_3-Late Triassic; J_1-Early Juassic; J_{2-3}-Middle–Late Juassic; K-E-Cretaceous–Paleogene; J_1-Pt-Early Jurassic–Proterozoic; T_3-Pt-Late Triassic–Proterozoic; T_2-Pt-Middle Triassic–Proterozoic; T_1-Pt-Early Triassic–Proterozoic; P-Pt-Permian–Proterozoic; AnP-Archean–Proterozoic; XM-Himalaya Block; GD-Gangdise Block; QT-Qiangtang Block; BY-Bayan Har Block; QT-BY-Qiangtang–Bayan Har Block

槽”是指北部和中部陆块之间的若拉错—治多深海槽，中部与南部陆块之间的雅鲁藏布江深海槽。侏罗纪的“三陆”指北面的祁连—柴达木—昆仑大陆块和羌塘地块构成的联合陆块，中间的冈底斯—念青唐古拉陆块，南侧的喜马拉雅—印度陆块。“两槽”是指北面的联合陆块与中间陆块之间的班公错—怒江海槽，中间陆块和南侧陆块之间的雅鲁藏布江深海槽。有关认识于 2006 年正式发表(赵文津等, 2006)。21 世纪初，赵政璋等(2001)延续了三陆两槽认识，青藏高原从南到北划分为“冈瓦纳古陆、雅鲁藏布江海槽、冈底斯古陆，羌塘和巴颜喀拉联合海槽、欧亚古陆(巴颜喀拉地块)”等 5 个宏观地质单元(图 2)。

目前几乎所有关于青藏高原油气勘探和评价的专著和论文都是建立在青藏高原三陆两槽基础地质认识之上。冈底斯古陆(包括早、中三叠世的羌南古隆起)是三陆两槽地质认识的核心支柱之一。衡量一个观点是不是从“三陆两槽”地质认识衍生出来的，最简单的办法就是看这种观点是不是承认冈底斯古陆的存在。羌塘盆地和措勤盆地的概念都是三陆两槽基础地质认识框架下的产物。地质学家都不再讨论青藏高原宏观地质格局的问题，而是关注羌塘盆地和措勤盆地的油气勘探战术突破问题。然而，基础地质理论决定了油气勘探战略方向，方向选对了才能快速而低成本地取得油气勘探的战术突破。

三陆两槽的认识产生于 20 世纪 90 年代，是对当时基础地质认识的高度概括，这种认识不可避免地受当时基础地质调查和研究程度的限制。90 年代初期当时只有 1:100 万的区域地质调查资料和科学考察的路线地质调查资料，即使是到了 90 年代末期，1:25 万中比例尺青藏高原地质大调查工作也未展开，依据的地质资料丰富程度和可靠程度都很低。当时牙形石微体古生物学没有开展，冈底斯地区的上二叠统和三叠系没有识别出来，同时，没有

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

开展大面积的珊瑚化石调查工作，冈底斯地区的侏罗系也没有正确识别出来，进而导致地质学家认为冈底斯地区在晚二叠世—早侏罗世地层缺失，是一个隆起剥蚀的陆地。措勤盆地中、晚侏罗世的古地理格局认识最初受达雄群时代是中、晚侏罗世认识的误导，达雄群是滨海相-浅海相碎屑岩沉积，指示了旁边有一个陆源剥蚀区，再考虑到其北侧已有海相拉贡塘组和木嘎岗日群，因此其北侧不可能是陆源剥蚀区，只能推断南侧存在一个古陆剥蚀区，并且推断其为岛弧发育所致。随后，达雄群的时代又修订为白垩纪(石和等, 2002)。达雄群的时代修订之后，地质学家认为冈底斯北侧中晚侏罗世地层是接奴群，接奴群也代表着滨海、浅海相碎屑岩沉积，仍然指示着旁边有一个陆源剥蚀区，在其北侧是海相拉贡塘组和木嘎岗日群，因此北侧不能成为陆源剥蚀区，而只能推测其南侧为隆起剥蚀区。这样进一步导致地质学家认为措勤盆地在中、晚侏罗世的古地理格局是南陆北海。

1.2 油气勘探战略方向认识

三陆两槽地质认识下的青藏高原油气勘探战略方向是“北上”，即：在措勤盆地和羌塘盆地的选择上，更重视北面的羌塘盆地的油气勘探，在羌塘盆地内部，更重视羌塘盆地的北部。在三陆两槽观点下，冈底斯地区存在一个晚二叠世—早侏罗世的冈底斯古陆。冈底斯古陆的存在意味着：(1)晚二叠世曾经强烈地构造抬升，中二叠世形成的碳酸盐岩沉积建造被破坏，在随后的75 Ma间长期暴露，失去作为有利勘探目标的价值，只能作为盆地的基底考虑(王剑等，2004)；(2)三叠纪—早侏罗世为陆相，无沉积盆地，因此也没有油气勘探价值；(3)中、晚侏罗世沉积分布区仅限于措勤盆地北部，为海陆交互相沉积，也没有被视为有利勘探目标层系；(4)早白垩世才在措勤盆地北部出现有利于油气生成和聚集的大规模的碳酸盐岩沉积；(5)晚白垩世以来措勤盆地又以陆相沉积为主。因此，措勤盆地只有下白垩统一个有利的油气勘探层系。与措勤盆地相比，羌塘盆地的沉积建造条件就要好得多，南羌塘盆地早、中三叠世是隆起剥蚀区，但北羌塘盆地三叠系和侏罗系发育完整，上三叠统和侏罗系都是有利的油气勘探层系。因此地质学家做出了“羌塘盆地首选、措勤盆地备选”的战略方向选择。

2 两陆一盆地质认识及其油气勘探战略方向

2.1 两陆一盆地质认识

两陆一盆的认识起源于对冈底斯地区和南羌塘地区三叠系牙形石微体古生物学的研究，是针对青藏高原三叠纪宏观地质格局的概括(图3)。这种认识与三陆两槽地质认识最大的区别就是认为冈底斯古陆(包括早、中三叠世的羌南古隆起)不存在。“冈底斯地区上二叠统为陆相、三叠系—下侏罗统大面积缺失，羌塘南部中、下三叠统大面积缺失”是认为冈底斯古陆存在的重要依据。然而，近年来在“冈底斯古陆”和“羌南古隆起”上发现了很多海相地层和古生物证据，动摇了上述地质学认识的基础。上三叠统方面，纪占胜等(2006)在措勤地区新发现海相碳酸盐岩地层“江让组”，曲永贵等(2003)在申扎地区也发现了海陆交互相地层——多布日组；中、下三叠统方面，地层剖面西起狮泉河左左(西藏地质调查院，2005；郑有业等，2007；纪占胜等，2007a)，向东经措勤县敌布错(纪占胜等，2007b；武桂春等, 2007)，到达那曲县嘎加(尼玛次仁等, 2005)，绵延达1 000 km左右。而且这些剖面点上的岩性大都是海相碳酸盐岩，在那曲嘎加地区还出现了含放射虫的硅质岩。上述海相地层的发现说明冈底斯三叠纪不是古陆剥蚀区。南羌塘地区西部的日土多玛地区早就有中、下三叠统海相碳酸盐岩地层“欧拉组”存在(郭铁鹰等, 1991)，最近在中东部也新发现了早三叠世海相碳酸盐岩沉积物，如：吉林省地质调查院在1：25万帕度错幅西北角的达杂迪扎错北的孜狮桑地区发现了下三叠统海相碳酸盐岩沉积(张树岐等，2005)，贵州省地质调查院在1：25万加措幅的磨盘山一带发现了中、下三叠统海相沉积。上述资料说明南羌塘早、中三叠世也不是隆起剥蚀区。因此，冈底斯地区和南羌塘地区并非陆地剥蚀区，而是特提斯海洋沉积区(纪占胜等, 2008)。

“冈底斯古陆变成特提斯海洋沉积区”使原来的“三陆”(冈瓦纳古陆、冈底斯古陆、欧亚古陆)就减少为“两陆”(冈瓦纳古陆、欧亚古陆)，原来彼此分割的“两槽”(雅鲁藏布江海槽、羌塘和巴颜喀拉联合海槽)通过冈底斯和南羌塘地区海洋的连接，合并为“一槽”。因此，受三陆两槽名词术语的影响，笔者在撰写博士论文时使用两陆一槽的名词(纪占胜，2006)。后来有学者建议不要使用带有固定论槽台学色彩的术语，因此，笔者现在将其更名为两陆一盆，用来概括对青藏高原晚古生代—早中生代宏观地质格局认识。

两陆一盆不但适用于青藏高原三叠纪的宏观地质格局认识，也适用于侏罗纪的宏观地质格局认识(图3)。吉林省地质调查院(2006)在班公湖—怒江断裂带双湖县多玛乡发现了吐卡日组，纪占胜等(2011)在班公湖—怒江断裂带的改则县物玛乡抢古村剖面发现了1 000多m厚的上侏罗统吐卡日组碳酸盐岩地层，上述发现直接否定了班公湖—怒江断裂带内上

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

侏罗统是深海相木嘎岗日群或者滨浅海相沙木罗组的地层学认识。根据沉积学基本原理，如此之厚的礁滩相碳酸盐岩沉积意味着该地区当时处于一个地形平缓的碳酸盐岩台地的环境，在这种沉积环境下，碳酸盐岩沉积应该不会呈孤立的点状存在，而应该具有广阔的面上分布。如果结合措勤盆地考虑，这意味着在措勤盆地北边，以往认为以接奴群为代表的陆地边缘碎屑岩沉积体系的认识是不正确的，应该也有吐卡日组的分布。措勤盆地北部分布有仁多组(赵兵等，2005)、日拉组(曲永贵等，2003)，它们在时代、岩性和动物群面貌上跟吐卡日组是相同的，本质上都是晚侏罗世碳酸盐岩台地相沉积。这些发现指示措勤盆地晚侏罗世是广阔平缓的碳酸盐岩台地环境，而不是三陆两槽观点下南陆北海的古地理格局。

如果措勤盆地侏罗纪是广阔平缓的碳酸盐岩台地环境的这一理论推测是正确的，那么我们必然会在措勤盆地其他具有出露条件的地点发现新的吐卡日组剖面。理论上，侏罗系应该出现在三叠系和白垩系之间，但是实际上，由于前人没有识别出三叠系，而是可能将其归入中二叠统下拉组，因此就应该在出露有中二叠统下拉组和白垩系地区寻找。按照上述思路，我们在措勤盆地东侧班戈县保吉乡地区找到了上侏罗统吐卡日组碳酸盐岩地层(孟亚洲等，2016，2017；孙倩等，2018a)，并且找到了吐卡日组下伏的萨波直不勒组(孙倩等，2017，2018b)。孟亚洲等(2018)将措勤盆地及邻区的晚侏罗世牛津期—基默里奇期的地层资料进行了总结，提出了晚侏罗世措勤盆地也不存在隆起剥蚀的陆地，古地理格局不是南陆北海，而是盆地北部为大面积的碳酸盐岩台地沉积，向南变深，过渡到斜坡相。

根据笔者的研究，冈底斯地区中二叠世发育碳酸盐岩台地沉积——下拉组，晚二叠世—早三叠世海平面相对下降，发育蒸发岩台地沉积——木纠错组或文布当桑组，中三叠世海平面相对上升，发育

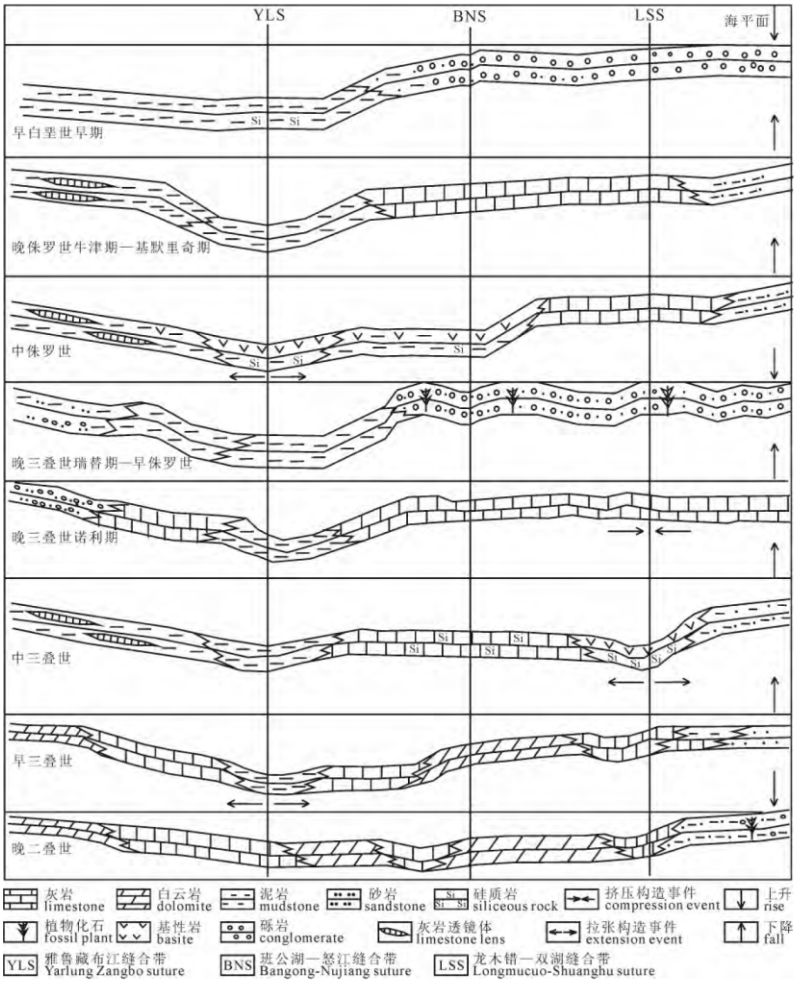


图 3　青藏高原晚二叠世—早白垩世早期地质演化示意图

Fig. 3　Sketch map of the geological evolution of the Tibetan Plateau from Late Permian to early Early Cretaceous

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

斜坡相珠龙组，晚三叠世诺利期海平面相对下降，发育碳酸盐岩台地沉积-麦龙岗组或江让组，晚三叠世诺利期末期，受印支运动影响，海平面相对下降，大面积的碳酸盐岩台地沉沉积结束，晚三叠世瑞替期—早侏罗世发育含植物化石的碎屑岩沉积-坚扎弄组或敌布错组，中侏罗世拉张沉陷，出现一套深海-半深海相泥岩地层，同时在局部地区出现了基性岩和超基性岩-永珠蛇绿岩，晚侏罗世早期，冈底斯地区变浅，出现了斜坡相泥岩——萨波直不勒组，向上变浅，萨波直不勒组上部出现了一些零星分布的孤立的碳酸盐岩生物礁，晚侏罗世中期，继续变浅，出现了大规模的碳酸盐岩台地沉积——吐卡日组，此后继续变浅，吐卡日组自下而上表现为碎屑岩增加，到了早白垩世出现了大段的碎屑岩沉积——多尼组。

2.2 油气勘探战略方向认识

纪占胜(2010)提出青藏高原油气勘探工作实施南下发展战略，从“独重羌塘盆地”变为“羌塘盆地和措勤盆地并举”，重视措勤盆地新发现的晚古生代—早中生代海相地层的油气远景评价工作。古格层系的研究近几年又取得了新进展，古格层系被进一步细化为上下两个组合，并且在下组合的木纠错组白云岩发现了稠油显示(武桂春等，2017)，班戈县保吉乡地区木纠错组地表露头的累计含油气显示的地层厚度大于114 m(何继富等，2018)，申扎县买巴乡地区木纠错组地表露头的累计含油气显示的地层厚度达到200 m(张帅等，2016)。木纠错组在冈底斯地区大面积存在(武桂春等，2018)。措勤盆地侏罗系的研究也取得了可喜的进展。措勤盆地上侏罗统吐卡日组礁滩相地层的发现(孟亚洲等，2016，2017)和萨波直不勒组烃源岩的发现(孙倩等，2017，2018)，吐卡日组在冈底斯地区及北侧的班公湖—怒江断裂带也是大面积存在(纪占胜等，2011；孟亚洲等，2018)，措勤盆地又增加了一个上侏罗统油气勘探的有利层系。

措勤盆地除了有前人识别出来的下白垩统油气有利勘探层系外，又增加了古格层系和上侏罗统的油气有利勘探层系。从沉积建造条件上看(图3)，措勤盆地反而优于羌塘盆地。并且羌塘盆地的白垩系不发育，侏罗系大面积暴露，侏罗系保存条件不佳。而措勤盆地地表出露的是白垩系，古格层系和上侏罗统大部分都保存于地下，侏罗系保存条件好。羌塘盆地地处偏远的藏北“无人区”，自然条件恶劣，社会基础设施几乎为零，勘探和开发的难度大、成本高，并且越向北越恶劣。然而措勤盆地所在区域的自然条件和社会基础设施更好，有城镇和较多的人口，相对适合人类开展生产活动，更有利于油气的勘探和开发。因此，笔者建议青藏高原油气勘探评价工作应该向南转移到措勤盆地所在的冈底斯地区。

3 油气勘探战术突破的思路和方法

3.1 重新划分青藏高原的原型盆地

(1)以往青藏高原盆地划分方案存在的问题。在三陆两槽地质认识下，措勤盆地和羌塘盆地是两个在空间上、时代上和盆地性质上不同的盆地。按照蒋忠惕(1990)的观点，羌塘盆地是位于班公湖—怒江断裂带以北，在海西期构造基底上的晚二叠世—侏罗纪的盆地。后来羌塘盆地被视为三叠纪—侏罗纪的沉积盆地，盆地依托于南羌塘地区早中三叠世的隆起，南浅北深(赵政璋等，2001；王剑等，2004，2009)。措勤盆地是在晚二叠世—早侏罗世冈底斯古陆基础上，依据中、上侏罗统和白垩系的沉积范围划定的中生代沉积盆地，是依托于冈底斯南侧岩浆弧的弧后盆地，盆地呈现为南陆北海、南浅北深的古地理格局(赵政璋等，2001；王剑等，2004，2009)。按照措勤盆地的定义，古生代盆地和中生代盆地不是连续沉积的，晚古生代末期—早中生代发生了强烈构造挤压，导致上二叠统转化为陆相或海陆交互相的坚扎弄组或敌布错组，三叠系和下侏罗统缺失。措勤盆地的上二叠统—下三叠统白云岩、上侏罗统礁滩相碳酸盐岩不在措勤盆地的定义之内。同样，按照原来羌塘盆地的定义，南羌塘地区上二叠统和中、下三叠统不在羌塘盆地的定义之内。

(2)青藏高原盆地划分的建议。纪占胜等(2008)就发现了措勤盆地古生界、三叠系不能涵盖在原始定义之下的问题，并提出用古格盆地的概念代表中、晚侏罗世—白垩纪措勤盆地之下的沉积盆地。这种认识主要是因为当时没有开展侏罗系的研究，不知道措勤盆地在侏罗纪也是两陆一盆的宏观格局。现在的研究表明两陆一盆仍然适用于侏罗纪的盆地，因此可以使用古格盆地的概念来代表青藏高原晚古生代—中生代的海相原型盆地。在时代上，古格盆地是古生代—中生代连续沉积的盆地，在空间上，古格盆地是一个涵盖整个青藏高原统一的盆地。在古格盆地概念下，原来措勤盆地所在的区域仅仅是古格盆地中的一个断块(表1)，不具有中、晚侏罗世的盆地边缘相-滨浅海相碎屑岩体系及其推断下的陆地隆起区。在古格盆地概念下，青藏高原按照边界断裂划分为几个断块：措勤断块、羌塘断块、比如断块和昌都断块，这些断块的空间范围与原来措勤盆地、羌塘盆地、比如盆地和昌都盆地的

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

空间范围一致(图1)，这些断块上的古生代和中生代某一时期的海相沉积物都是整个古格盆地沉积相带体系中的某一具体的沉积相(图4)，不是一个单独盆地级别的自成体系的完整的沉积相，如：措勤断块在晚二叠世—早三叠世是藏北统一的蒸发岩相碳酸盐岩台地的一部分(武桂春等，2017，2018)、措勤断块在晚侏罗世是藏北统一的碳酸盐岩台地的一部分(孟亚洲等，2018)。

3.2　重新确定油气勘探突破的有利层系

要想快速地实现油气勘探突破，就要把油气勘探的重点层位放在郎山层系之下的古格层系和保吉层系(表2)。目前应该重点关注保吉层系，保吉层系是笔者(2016)在《措勤盆地页岩气资源调查评价成果报告》中提出的概念，保吉一词取自于班戈县保吉乡的名称，笔者在保吉地区识别出了上侏罗统萨波直不勒组和吐卡日组，很多石油地质学认识也都源于该地区的考察，保吉地区也是油气勘探“后发先至，率先突破”的希望之地。以“保吉”命名也是为了感谢保吉乡的干部和群众对地质调查工作的大力支持。保吉层系是指措勤断块晚侏罗世—早

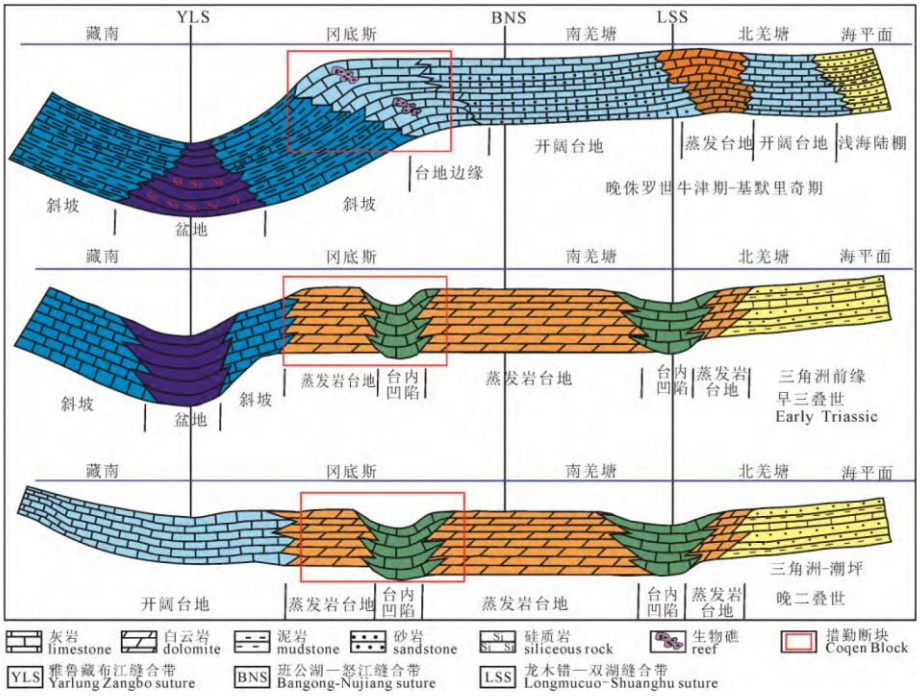


图 4　古格盆地主要油气勘探目的层沉积相划分示意图

Fig. 4　Schematic map of sedimentary facies of the main target strata for the oil and gas exploration in the Guge Basin

表1　古格盆地概念下措勤断块主要认识对比表

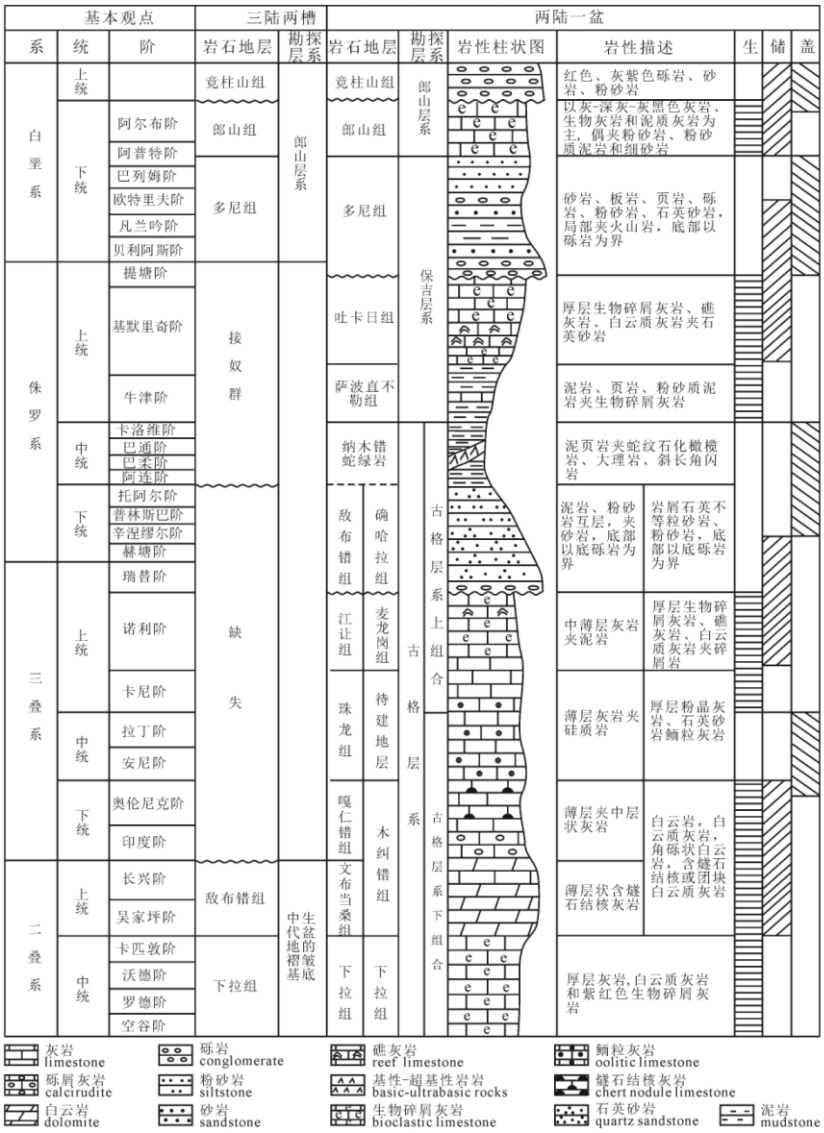
Table 1　Comparison of the main viewpoints of the Coqen Block under the concept of the Guge Basin

基础理论	三陆两槽	两陆一盆
地层认识	上二叠统为陆相或者海陆交互相的坚扎弄组或敌布错组，三叠系和下侏罗统的地层缺失，中上侏罗统为接奴群和拉贡塘组	上二叠统为文布当桑组或木纠错组下部，下三叠统为嘎仁错组或木纠错组上部，中三叠统为珠龙组，上三叠统诺利阶为江让组或麦龙岗组，上三叠统瑞替阶—下侏罗统为坚扎弄组或敌布错组，中侏罗统为永珠蛇绿岩，上侏罗统为萨波直不勒组和吐卡日组
古地理	冈底斯古陆存在，南浅北深	冈底斯古陆不存在，北浅南深
构造运动	海西运动。中二叠世末期挤压导致冈底斯地区隆起，三叠纪—早侏罗世保持隆起	印支运动。晚三叠世诺利期末期包括措勤断块和羌塘断块的藏北地区整体区域性抬升
盆地划分	单独划分为措勤盆地。是中晚侏罗世—白垩纪的盆地	措勤断块是古格盆地中的一个断块。古生代与中生代连续沉积盆地
勘探层系	郎山层系	古格层系、保吉层系
含油层位	早白垩世的多尼组和郎山组	晚二叠世—早三叠世木纠错组、晚三叠世诺利期麦龙岗组、晚侏罗世吐卡日组
勘探面积	油气有利勘探面积小，只有上白垩统或者新生界覆盖区才是下白垩统的油气有利勘探面积	油气有利勘探面积大，除了上白垩统或者新生界覆盖区外，下白垩统的出露区也是下伏二叠系、三叠系、侏罗系的油气有利勘探面积，侏罗系出露区是下伏二叠系、三叠系的油气有利勘探面积
勘探思路	下白垩统的凹陷中找油	油苗找油、背斜圈闭找油、礁滩相岩性圈闭找油

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 两种地质认识下措勤断块油气勘探层系对比表

Table 2 The comparison of the favorable oil-bearing assemblages of the Coqen Block under the two geological viewpoints



白垩世的油气生储盖组合。生油层为萨波直不勒组、吐卡日组，储层为吐卡日组的礁滩相地层或者多尼组底部的平行不整合面上下地层，盖层为多尼组中的细碎屑岩。在保吉层系之下还有古格层系，古格层系分为上、下两个组合，目前下组合的木纠错组白云岩也应该给予重视。从笔者在班戈县纳木错西岸的中、上泥盆统查果罗玛组的岩石薄片观察，其中也可见到沥青脉，这预示着措勤断块的深层可能还有一个上泥盆统和下石炭统组成的油气勘探层系。

3.3 措勤断块的油气勘探战术突破目标

3.3.1 措勤断块具有形成大型油气区的沉积背景

措勤断块的二叠纪、三叠纪和侏罗纪地层都是海相地层，海平面的反复升降形成了晚二叠世—早三叠世、晚三叠世诺利期和晚侏罗世 3 套碳酸盐岩台地沉积(图 3)，这种沉积环境是形成大型油气区的有利地质条件。其中，晚二叠世—早三叠世发育蒸发岩台地相白云岩(图 4)，这和特提斯西部阿拉伯板块上的诺斯气田(North Field)和特提斯东部我国的普光—龙岗油气田都具有高度的相似性，这两个大型油气田的产层都是晚二叠世—早三叠世的白云岩，无论跟哪个进行类比，措勤断块晚二叠世—早三叠世白云岩油气前景都非常乐观。措勤断块的上侏罗统为礁滩相碳酸盐岩，从沉积相带上分析，措勤断块恰好位于碳酸盐岩台地向斜坡过渡的区域

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(图 4)，这一相区也是油气勘探的有利相区，无论是跟位于西特提斯南部的、世界上最大的油气田——加瓦尔油田(Ghawar Field)进行类比、还是跟西特提斯北部的阿姆河盆地(Amu Darya Basin)进行类比，措勤断块上侏罗统为礁滩相碳酸盐岩的油气前景都非常乐观。因为这两个地区的油气产层都是上侏罗统碳酸盐岩，都有巨量的油气产出。

3.3.2　措勤断块可以应用海相碳酸盐岩油气勘探评价的理论方法

在以往三陆两槽的地质认识下，上二叠统为陆相或海陆交互相沉积，三叠系缺失，中、上侏罗统是陆相和浅海相-半深海相碎屑岩，不发育碳酸盐岩，因此海相碳酸盐岩的油气勘探评价的理论方法就无用武之地。然而在两陆一盆的观点下，古格层系和保吉层系都是海相碳酸盐岩，这就可以应用海相碳酸盐岩的油气勘探评价的理论方法。古格层系下组合生油层位可能为木纠错组本身，因为在岩石薄片中见到藻屑(何继富等(2018)图 4 中的 5a)，也可能来自于下伏或者临近的中二叠统下拉组碳酸盐岩。木纠错组是白云岩，白云岩是公认的优质储层，上覆盖层条件也不错，覆盖有中、上三叠统、侏罗系和白垩系(何继富等, 2018)。保吉层系生油层为萨波直不勒组(孙倩等, 2018)，吐卡日组既是储层又是潜在的生油层，盖层是上覆的白垩系多尼组和郎山组。多尼组和郎山组是中-好的盖层(赵政璋等, 2001)，白垩系是措勤断块主要出露的地层(图 5)，因此，保吉层系大部分埋藏在白垩系之下，保存条件较好。

除上述生、储、盖等宏观地质条件评价外，碳酸盐岩的岩溶理论也可以应用到储层条件的评价中，古格层系下组合中的木纠错组白云岩指示当时水体较浅，当海平面相对下降时，蒸发岩台地整体变浅，具备发育大面积准同生期岩溶体系的可能，岩溶作用会使储层的孔隙度和连通性变好。保吉层系的吐卡日组下段为稳定的碳酸盐岩台地沉积(孙倩等, 2018)，向上，吐卡日组上段沉积时出现了大量的碎屑岩沉积(孟亚洲等, 2017)，预示水体变浅，再向上，到了多尼组沉积的时候，变成了大段的碎屑岩沉积，吐卡日组上段和多尼组之间似乎存在沉积间断，这预示着当时存在着发育大面积岩溶体系的可能，这就会使储层的孔隙度和连通性变好。古格层系和保吉层系在燕山期晚期—喜山期构造运动的南北向挤压作用下，发生褶皱作用，形成区域上大面积的复式背向斜，在褶皱形成过程中会使背斜核部发育张性、脆性断裂，改善碳酸盐岩储层的孔隙度和连通性，使储集条件变好，同时也为构造抬升之后发育沿着背斜核部分布的岩溶体系创造条件，进一步使储层的孔隙度和连通性变好。这两套层系在抬升出地表之后，仍然会受到岩溶作用的影响，发育岩溶体系，在木纠错组的地表露头可以见到溶洞的发育(何继富等，2018)，在列日可洞地区可以见到吐卡日组的大型溶洞。这预示着地表以下可能也有岩溶体系造成的缝洞，使储层的孔隙度和连通性变好。

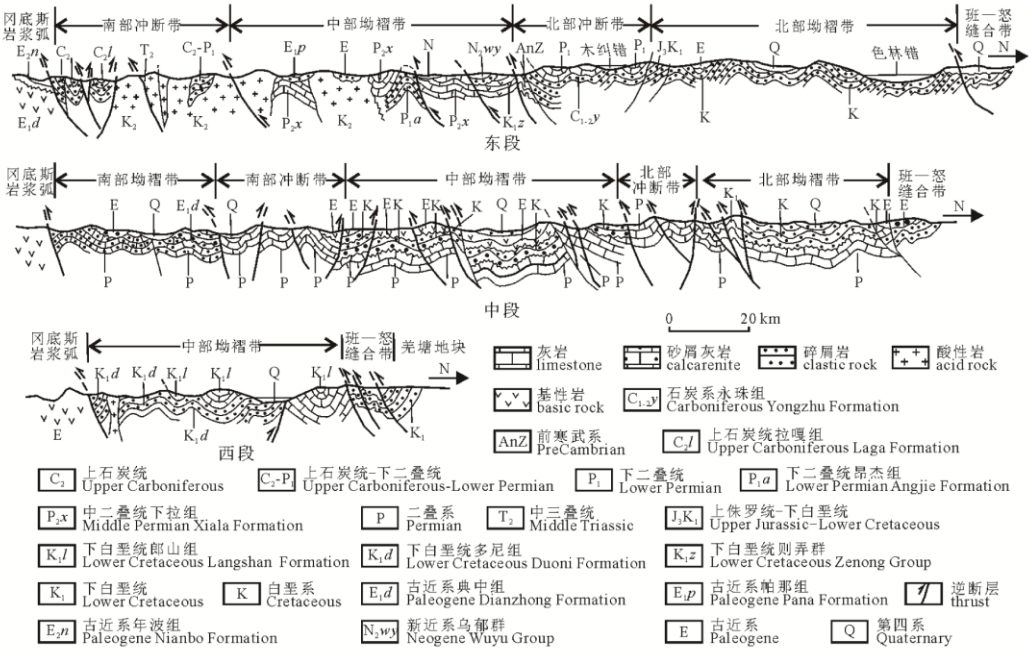


图5　措勤断块的复式背向斜和地表地层组成(赵政璋等, 2001)

Fig. 5　Compound anticline and surface stratigraphic composition of the Coqen Block(after ZHAO et al., 2001)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

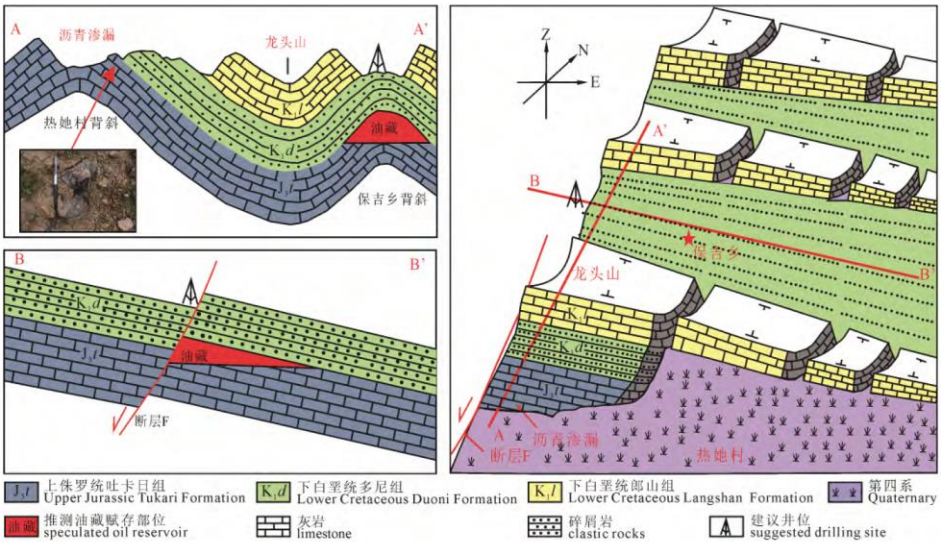


图6 班戈县保吉地区保吉层系勘探靶点的地质模型

Fig. 6 Geological model of the favorable prospecting target for the Baoji oil-bearing assemblage in Baoji area, Bange County

3.3.3 措勤断块有利勘探区圈定的思路和方法

古格层系和保吉层系在措勤断块上是全区分布的，而碳酸盐岩台地的整个范围内都有生油的可能，这意味着在油气勘探评价的最初阶段可以不考虑沉积建造的情况，仅仅依据地表的地层时代、构造样式就能圈定出有利勘探靶区，简化了油气勘探模型。如：只要地表覆盖有白垩系，构造条件合适就可以圈定保吉层系的油气有利勘探区。只要地表覆盖侏罗系，构造条件合适就可以圈定古格层系的油气有利勘探区。

措勤断块地表从西到东大面积发育复式背向斜构造(图 5)，如果把郎山层系作为油气勘探目的层，那么下白垩统的出露区域就不是有利勘探区。然而，如果把古格层系和保吉层系作为油气勘探目的层，下白垩统就变成了盖层，下白垩统出露区域也变成了油气有利勘探区。背斜圈闭是最主要的油气圈闭类型，在阿拉伯板块上发育的东西向挤压造成的背斜是油气的最主要圈闭类型。因此，措勤断块北部的中生代多尼组和郎山组的复式背向斜区就是油气勘探的有利勘探区。根据背斜圈闭理论，我们可以根据“吐卡日组目的层，多尼组覆盖区；南北向找背斜，东西向寻高点”的一般原则，进一步缩小有利勘探区范围，找出保吉层系的油气有利构造部位。

同理，按照“古格层系目的层，侏罗系覆盖区；南北向找背斜，东西向寻高点”这个原则，寻找古格层系具体的有利勘探背斜构造。虽然下白垩统覆盖区也是古格层系的有利勘探区，但从经济学角度考虑，当前阶段针对古格层系的勘探工作应该首先放在侏罗系出露区，侏罗系出露区位于白垩系出露区的南侧，位于以往认为的措勤盆地北部隆起区(王剑等，2009)或者狮泉河—永珠—纳木错—嘉黎蛇绿混杂岩带内。在纳木错西岸，以往划分为古生界的混杂岩块都被证明是侏罗系(孟亚洲等，2016，2017；孙倩等，2018a，b)，根据笔者在这个区域开展的“措勤盆地北部海相地层试点填图”的成果，这个区域不是古生代岩块组成的构造混杂区，而是由地表出露的侏罗系地层组成的复式背向斜区，构造样式与其北侧的白垩系组成的复式背向斜区构造样式一致。碳酸盐岩地层(吐卡日组)组成向斜核部，在地貌特征上表现为东西向展布的条带状“城墙灰岩”，下伏的碎屑岩地层(萨波直不勒组)组成背斜，在地貌上表现为地形相对平坦的草滩。这些东西向展布的背斜就是潜在的“油库”。按照这一思路和方法，我们可以把有利勘探区缩小到几十到几百 km^2 的区域。

3.3.4 措勤断块油气突破靶点确定的思路和方法

为了更为直观形象地说明上述寻找油气有利勘探构造部位的原则，笔者建立了保吉乡地区的地质模型(图 6)。保吉乡地区下白垩统组成了东西向展布的复式背向斜，郎山组是向斜的核部，由于灰岩抗风化能力强，因此在地貌上呈现为条带状的山脊，像城墙一样近东西向展布。而多尼组地层组成背斜，由于其岩性是碎屑岩，抗风化能力弱，并且在背斜形成过程中会形成很多张裂隙，这些张裂隙为地表水形成径流，并向下侵蚀地层创造了条件，最后在水流的长期作用下形成低洼平缓的地形。按照两陆一盆的观点，吐卡日组在措勤断块应该是全区分布

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的(孟亚洲等，2018)，在保吉乡以南的地区出露(孟亚洲等，2016，2017；孙倩等，2018)，在北侧双湖县多玛区也有出露(吉林省地质调查院，2006)。在保吉乡地区，保吉层系都被覆盖在下白垩统以下。并且在吐卡日组露头见到干沥青，说明这一地区具有生油条件，并且发生了油气的运移。总体判断这一地区具备生、储、盖和圈闭条件。

南北方向上找背斜核部相对容易，郎山组形成的山脊是向斜轴部，那么在相邻两条郎山组灰岩山之间多尼组分布的低洼地带的中间线附近就是多尼组的背斜轴部 BB'(图 6)，背斜轴还是一条线，背斜不是水平展布的，要想确定钻探的井位点，还需要沿着背斜的线寻找构造高点。由于背斜轴被多尼组覆盖，构造高点的位置无法通过地表观察找到，需要通过两侧的郎山组灰岩山的构造形态判断。龙头山地区的郎山组之下的多尼组出露，向东逐渐尖灭，说明该区构造形态西高东低，受到龙头山的正断层 AA'控制，因此，构造高点就在正断层 AA'和背斜轴部 BB'的交点处(图 6)。按照上述的方法，我们就可以把油气勘探评价工作缩小到单个的背斜构造，缩小到几 km^2 的范围内。

4　结束语

理论研究是地质找油工作的灵魂，众所周知，只有能够合理解释已知地层学、沉积学、岩石学和构造学等已知地质现象，并且经得起地质学基本原理推敲的理论，才是更为贴近客观实际的主观认识，才能具备预测功能，指导生产实践。地质理论认识是基于一定历史条件下客观事实的主观认识，地质学家在当时所掌握的客观事实，不一定是全部的、绝对的客观事实，受限于当时的技术手段和方法。新的技术手段可以使地质学家发现新的客观事实，如：牙形石微体古生物学手段揭示了冈底斯地区三叠系是海相地层的客观事实，这一事实是三陆两槽地质模型不能合理解释的，因此需要构建能够解释这一客观事实的地质模型，从而催生了两陆一盆的认识。

两陆一盆的认识带来了新的油气勘探评价认识和思路，油气勘探战略选区应该转移到措勤断块，论述了措勤断块具有形成大型油气区的地质条件。在时代上，措勤断块上的有利勘探层系是古格层系和保吉层系，在空间上，在地表由侏罗系组成的复式背向斜区寻找古格层系的有利勘探区，在地表由白垩系组成的复式背向斜区寻找保吉层系有利勘探区。通过在单个背斜核部寻找构造高点可以进一步确定油气勘探的靶点。按照这种认识和思路，油气勘探工作就可以从宏观到微观，从面到点，不断缩小靶区范围，建立勘探靶区的地质模型，为油气勘探突破指引目标。

实践是检验和发展地质找油理论的重要环节，也是实现油气勘探突破的必然步骤。下一步措勤断块的地表油气勘探工作应该从点到面展开，根据有利勘探区的圈定思路和方法，将措勤断块上保吉层系和古格层系的有利勘探区识别出来。从地表到地下发展，在已经识别出来的有利勘探靶点开展物探方法和钻探方法的验证工作，进一步获取目的层段的物性和含油气性等信息，获取新生代构造运动对油气保存影响的直接信息。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41472030), Basic Research Project of Ministry of Science and Technology of China (No. 2015FY310100), China Geological Survey (Nos. DD20160120-02, DD20160120-04 and DD20160126), and Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. J1607).

参考文献:

付孝悦，张修富. 2005. 西藏高原石油地质[M]. 北京：石油工业出版社.

高瑞祺，赵政璋. 2001. 中国油气新区勘探，第六卷，青藏高原石油地质[M]. 北京：石油工业出版社.

郭铁鹰，梁定益，张宜智，赵崇贺. 1991. 西藏阿里地质[M]. 武汉：中国地质大学出版社.

何继富，纪占胜，武桂春，刘景彦，孙倩，石秋圆，李浩，刘振宇，郭安臣，侯召硕，李东泽. 2018. 西藏措勤盆地保吉地区上二叠统—下三叠统木纠错组显微荧光特征及油气勘探建议[J]. 地球学报，39(4)：463-473.

吉林省地质调查院. 2006. 中华人民共和国 1:25 万区域地质调查报告(帕度错-昂达尔错幅)[R]. 吉林：吉林省地质调查院.

纪占胜，姚建新，武桂春. 2007a. 西藏西部狮泉河地区二叠纪和三叠纪牙形石的发现及其意义[J]. 地质通报，26(4)：383-397.

纪占胜，姚建新，武桂春. 2007b. 西藏冈底斯西段措勤地区海相三叠系的划分[J]. 地质通报，26(8)：947-952.

纪占胜，姚建新，武桂春. 2008. 西藏措勤盆地的上古生界—下古生界：潜在的油气沉积建造[J]. 地质通报，27(1)：36-63.

纪占胜，姚建新，武桂春. 2011. 西藏改则县物玛乡北部晚侏罗世吐卡日组珊瑚动物群的发现及其地质意义[J]. 地质通报，30(2-3)：418-438.

纪占胜. 2016. 措勤盆地页岩气资源调查评价成果报告[R]. 北京：中国地质科学院地质研究所.

纪占胜. 2006. 西藏石炭—三叠纪沉积体系和古生物群演化规律及其地质意义[D]. 北京：中国地质科学院.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

纪占胜. 2010. 特提斯演化理论的创新[N/OL]. 中国国土资源报. 2010-04-02(7). http://gtszb.gtzyb.com/html/2010-04/02/node_7.htm.

蒋忠惕, 刘鐩, 宋立珩. 1990. 青藏高原北部地区含油气条件及前景预测[R]. 河北: 地质矿产部五六二综合大队.

刘家铎, 周文, 李勇, 丘东洲. 2007. 青藏地区油气资源潜力分析与评价[M]. 北京: 地质出版社.

门相勇, 赵文智, 李小地, 张义杰, 陈谦. 2006. 中国石油战略选区重点目标油气地质条件分析及勘探建议[J]. 地质通报, 25(9-10): 1064-1067.

孟亚洲, 纪占胜, 廖卫华, 姚建新, 武桂春, 孙倩, 武振杰. 2016. 西藏保吉地区晚侏罗世动物群的发现及其意义[J]. 地质学报, 90(5): 833-847.

孟亚洲, 纪占胜, 姚建新, 武桂春, 孙倩, 廖卫华, 潘华璋. 2017. 西藏班戈县扎穷地区古生界混杂岩块中发现中生代化石[J]. 地质学报, 91(4): 812-821.

孟亚洲, 纪占胜, 武桂春, 孙倩, 石秋圆, 李浩. 2018. 西藏措勤盆地晚侏罗世牛津期—基默里奇期沉积环境及油气勘探意义[J]. 地球学报, 39(4): 445-452.

尼玛次仁, 谢尧武. 2005. 藏北那曲地区中三叠世地层的新发现及其地质意义[J]. 地质通报, 24(12): 1141-1149.

潘继平, 金之钧. 2004. 中国油气资源潜力及勘探战略[J]. 石油学报, 25(2): 1-6.

潘继平. 2006. 中国油气资源勘探现状与前景展望[J]. 地质通报, 25(9/10): 1055-1059.

青藏油气区石油地质志编写组. 1990. 青藏油气区中国石油地质志卷十四[M]. 北京: 石油工业出版社.

曲永贵, 王永胜, 张树岐, 吕鹏, 姜雪飞. 2003. 西藏申扎地区晚三叠世多布日组地层剖面的启示—对冈底斯印支运动的地层学制约[J]. 地质通报, 22(07): 470-473.

石和, 陶晓风, 胡新伟, 马润则, 刘登忠, 周家云. 2002. 西藏达雄群的化石新资料和再认识[J]. 地质通报, 21(11): 784-786.

孙倩, 纪占胜, 廖卫华, 姚建新, 武桂春, 武振杰. 2017. 西藏班戈县保吉地区萨波直不勒组珊瑚化石的发现及其意义[J]. 地质论评, 63(S1): 323-324.

孙倩, 纪占胜, 廖卫华, 武桂春, 何继富, 石秋圆, 李浩, 刘振宇, 郭安臣, 侯召硕, 李东泽, 万晓樵. 2018a.西藏措勤盆地上侏罗统吐卡日组上下段的厘定及其礁灰岩发现的油气勘探意义[J]. 地球学报, 39(4): 419-431.

孙倩, 纪占胜, 廖卫华, 武桂春, 何继富, 石秋圆, 李浩, 刘振宇, 郭安臣, 侯召硕, 李东泽, 万晓樵. 2018b. 西藏措勤盆地上侏罗统萨波直不勒组的发现及烃源岩意义[J]. 地球学报, 39(4): 432-444.

王成善, 尹海生. 2001. 西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价[M]. 北京: 地质出版社.

王剑, 丁俊, 王成善, 谭富文. 2009. 青藏高原油气资源战略选区调查与评价[M]. 北京: 地质出版社.

王剑, 谭富文, 李亚林, 李永铁, 陈明, 王成善, 郭祖军, 王小龙, 杜佰伟, 朱忠发. 2004. 青藏高原重点沉积盆地油气资源潜力分析[M]. 北京: 地质出版社.

武桂春, 纪占胜, 姚建新, 何继富, 孙倩, 石秋圆, 李浩, 仲昭, 刘振宇, 郭安臣, 侯召硕, 李东泽, 沈斌. 2017. 纳木错西岸白云岩的时代修订及油浸现象发现的意义[J]. 地质学报, (12): 2867-2880.

武桂春, 纪占胜, 孙倩, 石秋圆, 何继富, 李浩, 刘振宇, 郭安臣, 侯召硕, 李东泽. 2018. 西藏仲巴县仁多地区早三叠世牙形石及冈底斯西部早三叠世古地理格局[J]. 地球学报, 39(4): 409-418.

西藏地质调查院. 2005. 1∶25 万斯诺乌山幅、狮泉河幅地质调查成果和进展[J]. 沉积与特提斯地质, 25(1/2): 57-61.

张大伟. 2006. 中国油气资源战略选区若干问题的思考[J]. 地质通报, 25(9-10): 1014-1016.

张树岐, 蒋丽杰, 冯德臣, 李庆武, 李学彬, 孙中纲. 2005. 藏北南羌塘孜狮桑地区早三叠世牙形刺化石新资料[J]. 地质通报, 24(12): 1173-1174.

张帅. 2016. 西藏措勤盆地上二叠统白云岩成因及储集性研究[D]. 成都: 成都理工大学.

赵兵, 刘登忠, 陶晓风, 马润则, 胡新伟. 2005. 西藏措勤-申扎地层分区新建中-上侏罗统仁多组[J]. 地质通报, 24(7): 53-57.

赵文津, 赵逊, 蒋忠惕, 刘葵, 吴珍汉, 熊嘉育. 2006. 西藏羌塘盆地深部结构构造与含油气前景预测[M]. 中国地质, 33(1): 1-13.

赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 张昱文. 2001. 青藏高原大地构造特征及盆地演化[M]. 北京: 科学出版社.

赵政璋, 李永铁. 2000. 青藏高原羌塘盆地石油地质条件[C]//中国地质学会. 第 31 届国际地质大会中国代表团学术论文集. 北京: 地质出版社: 408-411.

郑有业, 许荣科, 王成源, 马国桃, 赖旭龙, 叶得金, 曹亮, 梁积伟. 2007. 冈底斯西缘早三叠世牙形石的发现及尚那勒组的建立[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 37(7): 916-921.

References:

FU Xiao-yue, ZHANG Xiu-fu. 2005. Plateau Petroleum Geology of Tibet[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).

GAO Rui-qi, ZHAO Zheng-zhang. 2001. New area exploration of Chinese oil and gas, Volume 6, Qinghai-Tibet Plateau Petroleum Geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).

Geological Survey Institute of Jilin Province. 2006. 1:250000 Regional geological survey report (Paducuo-Angdaercuo area)of China[R]. Jilin: Geological Survey Institute of Jilin Province(in Chinese).

GUO Tie-ying, LIANG Ding-yi, ZHAG Yi-zhi, ZHAO Chong-he. 1991. Geology of Ali, Tibet[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).

HE Ji-fu, JI Zhan-sheng, WU Gui-chun, LIU Jing-yan, SUN Qian, SHI Qiu-yuan, LI Hao, LIU Zhen-yu, GUO An-chen, HOU Zhao-shuo, LI Dong-ze. 2018. The Micro-fluorescence Characteristics of the Upper Permian–Lower Triassic Mujiucuo Formation and Suggestions for Oil-gas Exploration in Baoji

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Area of Coqen Basin, Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(4): 463-473(in Chinese with English abstract).

JI Zhan-sheng. 2016. Report on the investigation and evaluation results of shale gas resources in the Coqen Basin[R]. Beijing: Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).

JI Zhan-sheng, YAO Jian-xin, WU Gui-chun. 2007a. Discovery of Permian and Triassic conodonts in the Shiquanhe area, Ngari, western Tibet, China and their significances[J]. Geological Bulletin of China, 26(4): 383-397(in Chinese with English abstract).

JI Zhan-sheng, YAO Jian-xin, WU Gui-chun. 2007b. Stratigraphic division of the marine Triassic in the Coqên area, western Gangdise, Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 26(8): 947-952(in Chinese with English abstract).

JI Zhan-sheng, YAO Jian-xin, WU Gui-chun. 2008. Upper Paleozoic-Lower Mesozoic in the Coqên Basin, Tibet, China: a potential petroleum-bearing sedimentary sequence[J]. Geological Bulletin of China, 27(1): 36-63(in Chinese with English abstract).

JI Zhan-sheng, YAO Jian-xin, WU Gui-chun. 2011. Discovery of the Late Jurassic coral fauna in the Tukari Formation at northern Oma Village, Gaize County, Tibet, China and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 30(2-3): 418-438(in Chinese with English abstract).

JI Zhan-sheng. 2006. The Carboniferous-Triassic sediment and biotaevolutions in Tibet and their geological significances[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).

JI Zhan-sheng. 2010. Innovation on the theory of the Tethys'evolition[N/OL]. China Land and Resources Daily. 2010-04-02(7). http://gtszb.gtzyb.com/html/2010-04/02/node_7.htm(in Chinese).

JIANG Zhong-ti, LIU Liu, SONG Li-heng. 1990. Oil and gas conditions and prospect forecast in the northern part of the Qinghai-Tibet Plateau[R]. Hebei: 562 Geolical Team of the Ministry of Geology and Mineral Resources(in Chinese).

LIU Jia-duo, ZHOU Wen, LI Yong, QIU Dong-zhou. 2007. Analysis and evaluation of oil and gas resource potential in qinghai-tibet region[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).

MEN Xiang-yong, ZHAO Wen-zhi, LI Xiao-di, ZHANG Yi-jie, CHEN Qian. 2006. Analysis of petroleum geological conditions of key targets for strategic petroleum area selection in PetroChina and suggestions of exploration[J]. Geological Bulletin of China, 25(9-10): 1064-1067(in Chinese with English abstract).

MENG Ya-zhou, JI Zhan-sheng, LIAO Wei-hua, YAO Jian-xin, WU Gui-chun, SUN Qian, WU Zhen-jie. 2016. Discovery of the Late Jurassic coral fauna in the Baoji Area, Tibet and its significance[J]. Acta Geologica Sinica, 90(5): 833-847(in Chinese with English abstract).

MENG Ya-zhou, JI Zhan-sheng, YAO Jian-xin, WU Gui-chun, SUN Qian, LIAO Wei-hua, PAN Hua-zhang. 2017. Mesozoic Fossils discovered in the Paleozoic Melange at the Zhaqiong area of Bange County, Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 91(4): 812-821(in Chinese with English abstract).

MENG Ya-zhou, JI Zhan-sheng, WU Gui-chun, SUN Qian, SHI Qiu-yuan, LI Hao. 2018. Sedimentary Environment and Hydrocarbon Exploration of the Late Jurassic Oxfordian–Kimmeridgian Strata in the Coqen Basin, Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(4): 445-452(in Chinese with English abstract).

NIMACIREN, XIE Rao-wu. 2005. Discovery of Middle Triassic strata in the Nagqu area, northern Tibet, China, and is geological implications[J]. Geological Bulletin of China, 24(12): 1141-1149(in Chinese with English abstract).

PAN Ji-ping, JIN Zhi-jun. 2004. Potentials of petroleum resources and exploration strategy in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 25(2): 1-6(in Chinese with English abstract).

PAN Ji-ping. 2006. Present state of petroleum exploration in China and its prospective[J]. Geological Bulletin of China, 25(9/10): 1055-1059(in Chinese with English abstract).

Petroleum Geology Group of Qinghai-Tibet Oil and Gas Area. 1990. Qinghai-tibet oil and gas zone, China petroleum geology book Volume14[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).

QU Yong-gui, WANG Yong-sheng, ZHANG Shu-qi, LÜ Peng, JIANG Fei-xue. 2003. An inspiration from the section of the Late Triassic Duoburi Formation in the Xainza area—Stratigraphic constraints on the Indosinian movement in Gangdise[J]. Geological Bulletin of China, 22(7): 470-473(in Chinese with English abstract).

SHI He, TAO Xiao-feng, HU Xin-wei, MA Run-ze, LIU Deng-zhong, ZHOU Jia-yun. 2002. Some new fossil materials and new understanding of the Daxiong Group in Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 21(11): 784-786(in Chinese with English abstract).

SUN Qian, JI Zhan-sheng, LIAO Wei-hua, YAO Jian-xin, WU Gui-chun, WU Zhen-jie. 2017. The discovery of Coral Fossils in Sabozhibule Formation and its significances, Baoji area, Bange County, Xizang Tibet[J]. Geological Review, 63(S1): 323-324(in Chinese).

SUN Qian, JI Zhan-sheng, LIAO Wei-hua, WU Gui-chun, HE Ji-fu, SHI Qiu-yuan, LI Hao, LIU Zhen-yu, GUO An-chen, HOU Zhao-shuo, LI Dong-ze, WAN Xiao-qiao. 2018a. Redefinition of Upper and Lower Member of the Upper Jurassic Tukari Formation and significances on oil-gas exploration of reef limestone in the Coqen Basin, Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(4): 419-431(in Chinese with English abstract).

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

SUN Qian, JI Zhan-sheng, LIAO Wei-hua, WU Gui-chun, HE Ji-fu, SHI Qiu-yuan, LI Hao, LIU Zhen-yu, GUO An-chen, HOU Zhao-shuo, LI Dong-ze, WAN Xiao-qiao. 2018b. The Discovery of the Upper Jurassic Sabozhibule Formation in Coqen Basin, Tibet, and Its Source Rock[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(4): 432-444(in Chinese with English abstract).

WANG Cheng-shan, YI Hai-sheng. 2001.The geological evolution and prospective oil and gas assessment of the Qiangtang Basin in Northern Tibetan plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).

WANG Jian, DING Jun, WANG Chen-shan, TAN Fu-wen. 2009. Investigation and evaluation on oil and gas resource strategic area selection of Qinghai-Tibet plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).

WANG Jian, TAN Fu-wen, LI Ya-lin, LI Yong-tie, CHEN Ming, WANG Chen-shan, GUO Zu-jun, WANG Xiao-long, DU Bai-wei, ZHU Zhong-fa. 2004. Important sedimentary basin analysis on oil and gas resource potential of Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).

WU Gui-chun, JI Zhan-sheng, YAO Jian-xin, HE Ji-fu, SUN Qian, SHI Qiu-yuan, LI Hao, ZHONG Zhao, LIU Zhen-yu, GUO An-chen, HOU Zhao-shuo, LI Dong-ze, SHEN Bin. 2017. Age revision of the dolomite to the west of Namtso and the significance of the discovered oil-immersed dolomite[J]. Acta Geologica Sinica, 91(12): 2867-2880(in Chinese with English abstract).

WU Gui-chun, JI Zhan-sheng, SUN Qian, SHI Qiu-yuan, HE Ji-fu, LI Hao, LIU Zhen-yu, GUO An-chen, HOU Zhao-shuo, LI Dong-ze. 2018. The Early Triassic Conodonts in Rendo Area of Zhongba County, Tibet, and Paleogeographic Pattern of the West Gangdise Block in Early Triassic[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(4): 409-418(in Chinese with English abstract).

WU Gui-chun, YAO Jian-xin, JI Zhan-sheng. 2007. Triassic conodont biostratigraphy in the Coqên area, western Gangdise, Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 26(8): 938-946(in Chinese with English abstract).

Xizang Institute of Geological Survey. 2005. 1:250 000 Sinuowushan and Shiquanhe Sheets in Xizang[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 25(1/2): 57-61(in Chinese with English abstract).

ZHANG Da-wei. 2006. Some problems of strategic areas of petroleum resources in China[J]. Geological Bulletin of China, 25(9-10): 1013-1016(in Chinese with English abstract).

ZHANG Shuai. 2016. Origin and reservoir characteristics of dolomite of The Upper Permian in Coqen basin, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).

ZHANG Shu-qi, JIANG Li-jie, FENG De-chen, LI Qing-wu, LI Xue-bin, SUN Zhong-gang. 2005. New data of Early Triassic conodonts in the Zishisang area, sourthern Qiangtang, northern Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 24(12): 1173-1174(in Chinese with English abstract).

ZHAO Bing, LIU Deng-zhong, TAO Xiao-feng, MA Run-ze, HU Xin-wei. 2005. Ringtor Formation- a new Mid-Upper Jurassic lithostatigraphic unit in the Coqin-Xainza stratipraphic area, Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 24(7): 637-641(in Chinese with English abstract).

ZHAO Wen-jin, ZHAO Xun, JIANG Zhong-ti, LIU Kui, WU Zhen-han, XIONG Jia-yu. 2006. Deep structure and petroleum prospect evaluation of the Qiangtang basin, Tibet[J]. Geology in China, 33(1): 1-13(in Chinese with English abstract).

ZHAO Zheng-zhang, LI Yong-tie, YE He-fei, ZHANG Yu-wen. 2001. Tectonic Characteristics and Basin Evolution of Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).

ZHAO Zheng-zhang, LI Yong-tie. 2000. Petroleum geology conditions of qiangtang basin, qinghai-tibet[C]//Geological Society of China. Chinese delegation of the 31st international geological conference. Beijing: Geological Publishing House: 408-411(in Chinese with English abstract).

ZHENG You-ye, XU Rong-ke, WANG Cheng-yuan, MA Guo-tao, LAI Xu-long, YE De-jin, CAO Liang, LIANG Ji-wei. 2007. The discovery of the early Triassic conodonts and the establishment of the Tangnale formation[J]. Science in China D Series: Earth science, 37(7): 916-921(in Chinese with English abstract).

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2018 年 7 月　　地　球　学　报　　Jul. 2018
第 39 卷 第 4 期: 401-407　　Acta Geoscientica Sinica　　Vol.39 No.4: 401-407
www.cagsbulletin.com

西藏措勤盆地的地层学研究进展及上二叠统—侏罗系地层序列的厘定

纪占胜[1)], 姚建新[2)], 武桂春[2)], 孙　倩[3, 1)], 石秋圆[1, 3)],
何继富[3, 1)], 李　浩[1, 3)], 刘振宇[4)], 郭安臣[4)],
侯召硕[4)], 李东泽[4)]

1)中国地质科学院, 北京 100037;
2)中国地质科学院地质研究所, 国土资源部地层与古生物重点实验室, 北京 100037;
3)中国地质大学(北京), 北京 100083;　4)吉林省地质调查院, 长春 130102

摘　要: 本文简要总结了西藏措勤盆地相关区域的地层学研究进展。近年来, 笔者及研究团队对措勤盆地及邻区进行了多次野外地质调查和室内古生物鉴定和研究, 获得了一些新的发现和认识, 在结合前人在相关地区取得的地层学成果和资料的基础上, 厘定了该地区上二叠统—侏罗系的地层序列。措勤盆地的上二叠统是以文布当桑组为代表的灰岩和以木纠错组为代表的白云岩。三叠系存在着广海陆棚相和碳酸盐岩台地两种地层序列: 前者自下而上划分为下三叠统嘎仁错组、中三叠统至上三叠统卡尼阶珠龙组、上三叠统诺利阶江让组、上三叠统瑞替阶至下侏罗统敌布错组; 后者自下而上划分为木纠错组、待建的中三叠统、上三叠统诺利阶麦隆岗组和上三叠统瑞替阶至下侏罗统的确哈拉组。下侏罗统与上三叠统瑞替阶难以区分开。中侏罗统的岩性为深海-半深海相泥岩夹有基性-超基性岩。上侏罗统自下而上划分为萨波直不勒组和吐卡日组, 目前尚未发现提唐阶的化石, 因此推测下白垩统多尼组和吐卡日组之间有沉积间断。措勤盆地在晚二叠世—早三叠世、晚三叠世诺利期和晚侏罗世牛津期—基默里奇期都处于碳酸盐岩台地环境, 冈底斯地区在中三叠世和中侏罗世发生了 2 期构造伸展事件, 在晚三叠世诺利期末期和晚侏罗世基默里奇期晚期发生了两次构造抬升事件。构造伸展和挤压抬升造成了海平面的反复升降变化, 导致了深水和浅水沉积相的垂向叠置, 为油气成藏创造了良好的沉积建造组合条件。上二叠统—侏罗系地层序列还有待于进一步完善, 应该加大地层古生物学的投入力度。

关键词: 西藏; 措勤盆地; 上二叠统; 三叠系; 侏罗系

中图分类号: P534.46; P534.51; P534.52　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.3975/cagsb.2018.071701

Stratigraphic Progress of the Coqen Basin and Redefinition of the Upper Permian–Jurassic Stratigraphic Sequence

JI Zhan-sheng[1)], YAO Jian-xin[2)], WU Gui-chun[2)], SUN Qian[3, 1)], SHI Qiu-yuan[1, 3)],
HE Ji-fu[3, 1)], LI Hao[1, 3)], LIU Zhen-yu[4)], GUO An-chen[4)],
HOU Zhao-shuo[4)], LI Dong-ze[4)]

1) *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037;
2) *Key Laboratory of Stratigraphy and Paleontology, Ministry of Land and Resources; Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037;
3) *China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083;
4) *Geological Survey Institute of Jilin Province, Changchun, Jilin* 130102

本文由国家自然科学基金项目(编号: 41472030)、科技基础性工作专项(编号: 2015FY310100)、中国地质调查局基础性公益性矿产地质调查项目(编号: DD20160120-02; DD20160120-04; DD20160126)和中国地质科学院基本科研业务费项目(编号: J1607)联合资助。
收稿日期: 2018-06-27; 改回日期: 2018-07-14; 网络首发日期: 2018-07-18。责任编辑: 魏乐军。
第一作者简介: 纪占胜, 男, 1974 年生。博士, 研究员。主要从事西藏地层古生物学研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: jizhansheng@vip.sina.com。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Abstract: In this paper, the authors made a brief summarization of the stratigraphic progress in the study of Coqen Basin and its adjacent areas. Based on the lots of field geological survey and indoor palaeontology identification and research in recent years, the authors and their research team obtained some new discovery. Upper Permian–Jurassic stratigraphic sequence was redefined, in combination with previous stratigraphy results and data in the study area. The Upper Permian rocks in Coqen Basin could be divided into limestone represented by Wenbudangsan Formation and dolomite indicated by Mujiucuo Formation. The Triassic stratigraphic successions have two types, formed respectively in shelf facies and carbonate platform facies. The shelf facies consists of the Lower Triassic Garencuo Formation, the Middle Triassic to Upper Triassic Carnian Zhulong Formation, the Upper Triassic Norian Jiangrang Formation, and the Upper Triassic Rhaetian to the Lower Jurassic Dibucuo Formation, whereas the carbonate platform facies comprises of the Lower Triassic Mujiucuo Formation, the unnamed Middle Triassic unit, the Upper Triassic Norian Mailonggang Formation and the Upper Triassic Rhaetian to the Lower Jurassic Quehala Formation. It is difficult to distinguish in detail the Lower Jurassic from the Upper Triassic Rhaetian strata at present. The Middle Jurassic sediments are characterized by the mudstones interbedded with basic-ultrabasic rocks, reflecting a deep sea or semi-deep sea facies. The Upper Jurassic strata comprise the Sabozhibule Formation and Tukari Formation in upward succession. No Tithonian fossils have been found yet, so there seems to have a sedimentary gap between the Lower Cretaceous Duoni Formation and the Tukari Formation. From the newly recognized Upper Permian to Jurassic successions, the authors found that Coqen Basin was in carbonate platform environments in three periods, respectively in the Late Permian to Early Triassic, Late Triassic Norian, and Late Jurassic Oxfordian to Kimmeridgian. In addition, there existed two tectonic extension events, which occurred in Middle Triassic and Middle Jurassic, and two tectonic uplifting events that happened at the end of the Late Triassic Norian and the end of late Jurassic Kimmeridgian period. These repeated tectonic extension and uplifting events directly caused the rise and fall of the sea level, leading to the vertical superposition of deep-water and shallow-water sedimentary facies. The formed sedimentary assemblages under this background were favorable for the hydrocarbon accumulation. It is necessary to strengthen the paleostratigraphic work to improve the research on the Upper Permian to Jurassic successions in the future.

Key words: Tibet; Coqen Basin; Upper Permian; Triassic; Jurassic

近年来，措勤盆地的上二叠统—侏罗系的地层研究取得了一些突破性的进展(表 1)，这些地层学进展对于重新认识青藏高原的古地理格局、构造事件划分、大地构造区划和沉积盆地划分等诸多方面都具有深远而重大的影响。现将有关进展和存在的问题概略介绍如下，供地质学家参考。

1 上二叠统

前人普遍认为措勤盆地上二叠统是含有冈瓦纳相和华夏相混生植物群的碎屑岩地层——坚扎弄组和敌布错组(蒋忠惕和徐正余，1983；周幼云等，2002；西藏自治区地质矿产局，1993；夏代祥和刘世坤，1997；赵政璋等，2001；潘桂棠和丁俊，2004；王剑等，2004，2009)，这种认识是导致人们认为冈底斯地区晚二叠世是古陆环境、存在海西期构造运动、位于冈瓦纳大陆北缘的地层学根源，这种认识对很多青藏高原的大地构造模型也产生了深刻的影响。然而，纪占胜等(2007a)将敌布错组(图 1a)的时代修订为晚三叠世瑞替期—早中侏罗世。上二叠统不是碎屑岩地层，而是碳酸盐岩地层，还可细分为灰岩相和白云岩相两种类型，白云岩相的上二叠统以木纠错组为代表(程立人等，2002a，b；武桂春等，2017，2018；石秋圆等，2018)。碳酸盐岩相上二叠统以文布当桑组代表(Wu et al., 2014)(图 1b, c)。

灰岩相上二叠统的研究还存在以下 2 个问题。郭铁鹰等(1991)认为狮泉河地区存在着吴家坪期的沉积间断，然而陈清华等(1998)将改则县下东乡阿多嘎布的下拉组顶部 87 m 厚的灰岩划分为上二叠统吴家坪阶，建立了桑穷组，但由于断层破坏，与上覆地层的关系不清楚。Wu 等(2014)报道了上二叠统长兴阶顶部的地层，建立了文布当桑组。根据上述情况，上二叠统似乎可以进一步划分为吴家坪阶的桑穷组和长兴阶文布当桑组，但由于目前还没有在同一个剖面识别出吴家坪阶和长兴阶的地层和古生物化石，所以还需要进一步寻找理想剖面开展细致的研究。另外一个问题是含有丰富浅水类型化石的开阔台地相上二叠统的寻找。木纠错组为含大化石很少的蒸发岩台地相沉积，文布当桑组为斜坡相或开阔台地相较深水沉积，大化石稀少，从桑穷组的发现推断，措勤盆地还应存在大化石丰富的开阔台地相沉积。这一相区的海洋生产力高，是理想的油气勘探相区。今后应加强寻找工作。

2 三叠系

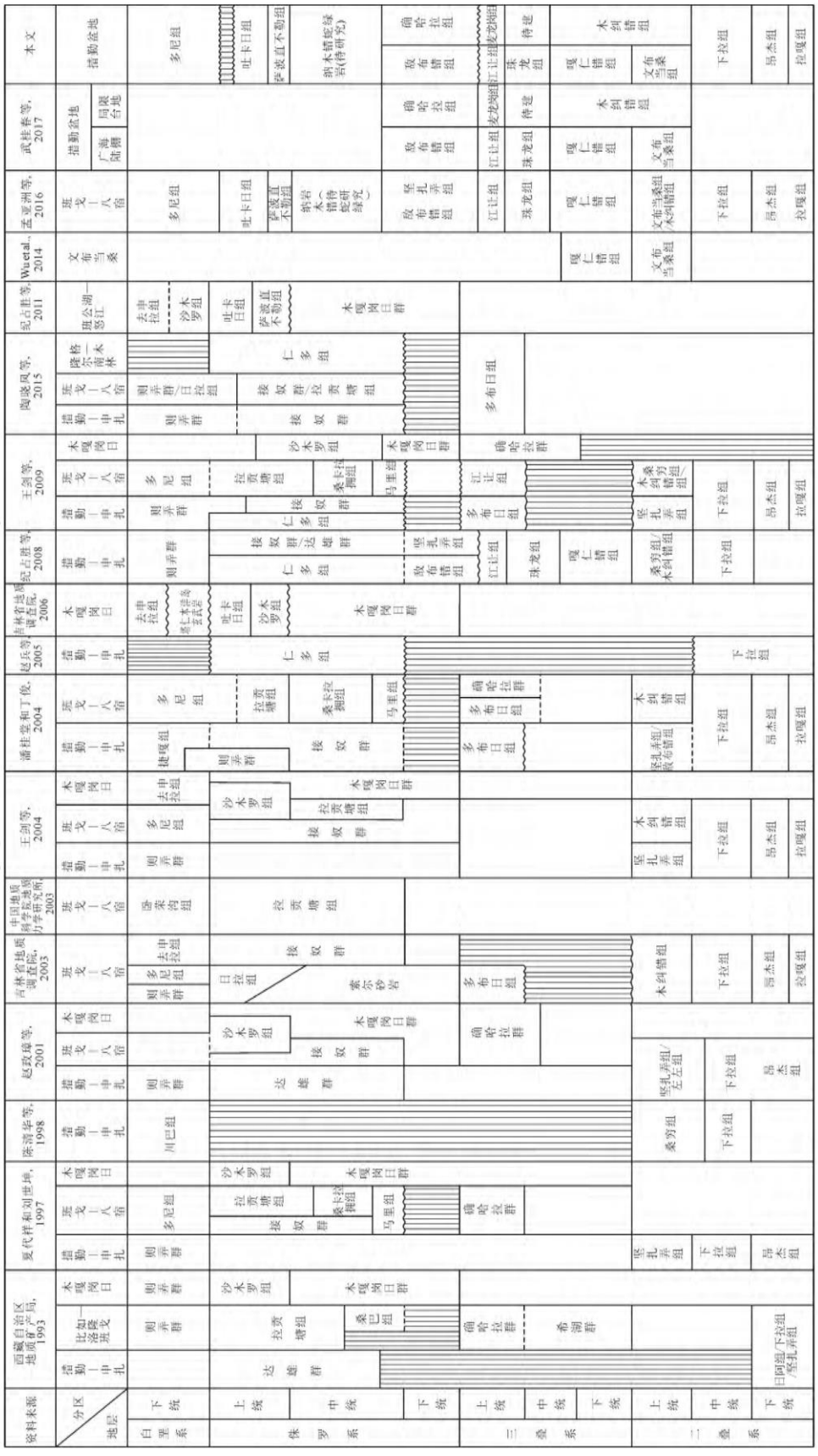
2.1 广海陆棚相三叠系序列的发现

根据措勤县江让乡敌布错北岸地层的研究，广

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　措勤盆地及邻区的地层划分沿革

Table 1　The stratigraphic schemes of the Coqen Basin and its adjacent areas



?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

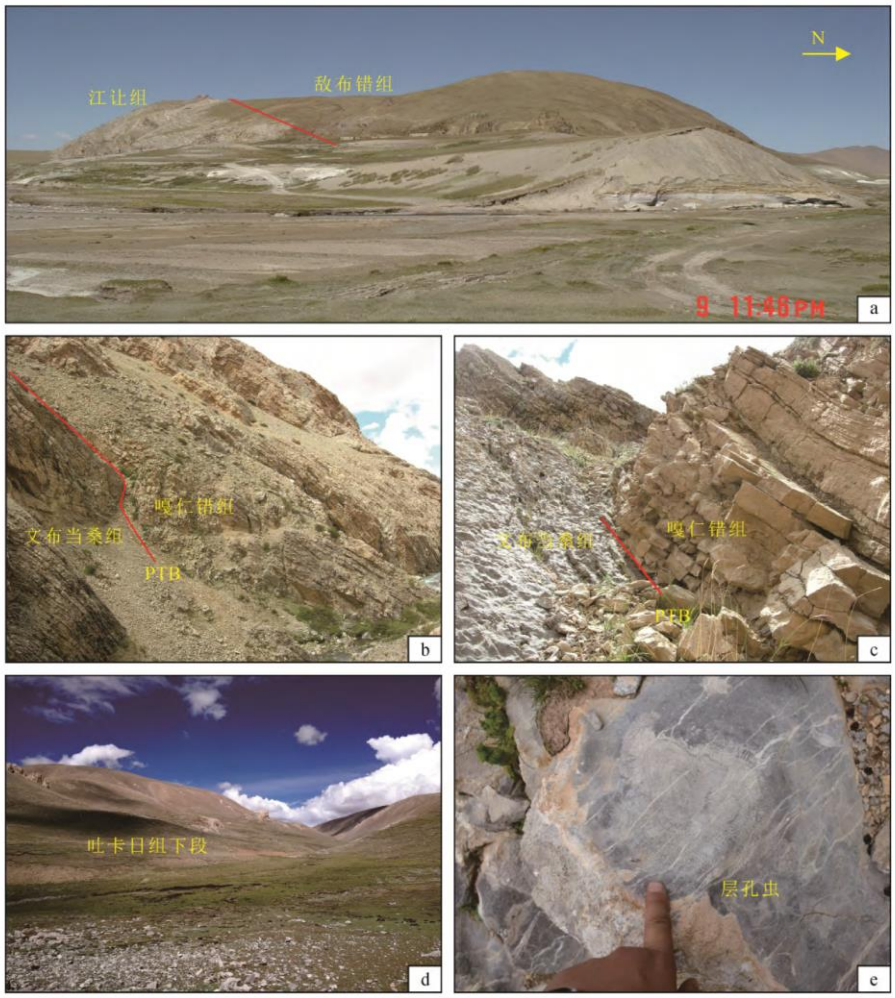


图 1 措勤盆地上二叠统—侏罗系典型剖面的照片

Fig. 1 Photos for some typical sections of the Upper Permian to Jurassic strata

a-措勤县江让乡的江让剖面，示上三叠统诺利阶江让组(T_3^3j)和上三叠统瑞替阶—下侏罗统敌布错组(T_3^3-J_1d)；b-革吉县文布当桑乡的文布当桑剖，示上二叠统长兴阶文布当桑组(P_3^3w)和下三叠统印度阶嘎仁错组(T_1g)的接触关系；c-图 b 中的二叠系—三叠系界线(PTB)的整合接触关系近景照片；d-班戈县保吉乡各昌茶玉剖面，示吐卡日组下段(J_3t)；e-图 d 中吐卡日组下段中的层孔虫化石

a-the Jiangrang section at the Jiangrang Village, Cuoqen County, demonstrating the Upper Triassic Norian Jiangrang Formation (T_3^3j) and the Upper Triassic Rhaetian–Lower Jurassic Dibuco Formation (T_3^3-J_1d); b-the Wenbudangsang section at the Wenbudangsang Village, Geji County, demonstrating the Upper Permian Changhsingian Wenbudangsang Formation (P_3^3w) and the Lower Triassic Induan Garenco Formation (T_1g); c-the Permian-Triassic boundary (PTB) at the Wenbudangsang section in Fig. c; d-the upper member of the Tukari Formation (J_3t) at Baoji Village, Bange County; e-the stromatoporoids fossil in the Tukari Formation in Fig. d

海陆棚相三叠系地层序列自下而上为：下三叠统嘎仁错组、中三叠统至上三叠统卡尼阶珠龙组、上三叠统诺利阶江让组(图 1a)、上三叠统瑞替阶至下侏罗统敌布错组(纪占胜等，2006，2007a，b；武桂春等，2007)。嘎仁错组、珠龙组、江让组的岩性以灰岩为主，局部夹有硅质岩，几乎见不到大化石。敌布错组底部发育砾岩，中上部以大段的泥岩、粉砂岩发育为特征。这一地层序列的发现改变了三叠系地层缺失的认识。

2.2 碳酸盐岩台地相三叠系地层序列的发现

武桂春等(2017)从纳木错西岸的白云岩地层中获得了早三叠世牙形石化石，并将木纠错组的时代上限修订为下三叠统，确认了蒸发岩台地相下三叠统的存在。根据这一线索，笔者在纳木错西岸对木纠错组之上的地层开展调查工作，进一步发现了待建的中三叠统、开阔台地相上三叠统诺利阶麦隆岗组和上三叠统瑞替阶至下侏罗统的确哈拉组。这一地层序列的发现揭示了措勤盆地的三叠系具有良好油气勘探前景。该序列由于刚刚发现，相关资料将陆续报道。

2.3 冈底斯地区印支运动时代的修订

曲永贵等(2003)认为晚二叠世木纠错组和晚三叠世多布日组之间的不整合代表冈底斯地区的印支

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

运动，晚古生代末期至早(中)三叠世期间冈底斯的部分地区已褶皱隆升，并经历了较长时期的风化剥蚀过程。晚三叠世开始拉张，形成多布日组的海侵层序。然而，现在的研究表明中、下三叠统并不缺失，文布当桑剖面指示二叠—三叠系连续沉积(图 1b, c)(Wu et al., 2014)，即使在相对浅水的纳木错西岸，晚二叠世—早三叠世可能也为连续的白云岩沉积，因此晚二叠世末期没有发生构造运动。冈底斯地区的印支运动发生在晚三叠世诺利期末期，在敌布错剖面(纪占胜等，2006)表现为碳酸盐岩相的江让组相变为碎屑岩为主的敌布错组(图 1a)，保吉乡纳木错西岸的剖面表现为碳酸盐岩为主的麦龙岗组相变为碎屑岩为主的确哈拉组。多布日剖面应该加强古生物学研究，多布日组上段可对比于晚三叠世诺利期麦龙岗组，多布日组下段很可能代表代表碳酸盐岩台地相的中三叠统—晚三叠世卡尼期地层。

3　侏罗系

前人认为措勤盆地的下侏罗统缺失，中上侏罗统以接奴群和拉贡塘组为代表。纪占胜等(2007a)指出措勤盆地下侏罗统并不缺失，而是包含在上三叠统瑞替阶—中下侏罗统的敌布错组或者坚扎弄组中。敌布错组或者坚扎弄组要想解体为上三叠统瑞替阶和下侏罗统两个时限更短的岩石地层单位，还要进一步加强岩石地层学和古生物学的研究。下侏罗统在广海陆棚相区以敌布错组为代表，泥岩较发育为特征，在碳酸盐岩台地相区以确哈拉组为代表，粗碎岩较发育为特征。

从保吉乡地区的最新研究看，中侏罗统的岩性应该为深海-半深海相泥岩夹有以纳木错蛇绿岩为代表的基性-超基性岩，其中大化石较少，中侏罗统的岩性与上覆、下伏地层的岩性也较为接近，都是以大段的泥岩发育为特征。从青藏高原全区看，中侏罗世是剧烈拉张时期，在雅鲁藏布江缝合带、冈底斯地区、班公湖—怒江断裂带都出现了基性-超基性岩，到羌塘盆地，基性-超基性岩活动减弱。基性-超基性岩的出露地点可能指示着切穿地壳的深大断裂的存在，在远离深大断裂的地区，中侏罗统可能只表现为深海-半深海相泥岩沉积。中侏罗统的研究刚刚开始，在进一步调查研究中，应该重点注意冈底斯地区和班公湖怒江断裂带与基性-超基性岩密切共生的深海相泥页岩地层。

上侏罗统自下而上为萨波直不勒组和吐卡日组(纪占胜等，2011)。萨波直不勒组以碎屑岩夹少量生物碎屑岩灰岩为特征，与下伏的中侏罗统在岩性上很难区分，但水体变浅，基性岩浆活动性显著减弱，灰岩夹层中见珊瑚化石。吐卡日组以含有丰富珊瑚、苔藓虫化石的碳酸盐岩为特征。吐卡日组分为上、下两段，下段以大段的碳酸盐岩发育为特征(图 1d)(孙倩等，2018)，其中发育含有珊瑚和层孔虫化石的礁灰岩(图 1e)，上段以碳酸盐岩中发育大量碎屑岩夹层为特征(孟亚洲等，2017)，表现出自下而上水体逐渐变浅的特征。珊瑚指示吐卡日组时代为晚侏罗世牛津期—基默里奇期，目前尚未发现上侏罗统顶部提唐阶的化石，似乎指示着晚侏罗世末期存在沉积间断，吐卡日组和上覆多尼组为不整合接触关系，指示着存在一次重要的构造抬升事件。

4　结束语

措勤盆地的上二叠统—侏罗系地层的研究进展取得了一些突破性的进展，为沉积学、构造学和油气勘探评价等认识(武桂春，2018；何继富等，2018；孟亚洲等，2018；孙倩等，2018a, b；纪占胜等，2018)的创新提供了新材料。有 4 个方面值得特别关注：第一是冈底斯地区发育了晚二叠世—早三叠世蒸发岩台地、晚三叠世诺利期开阔碳酸盐岩台地、晚侏罗世牛津期—基默里奇期开阔碳酸盐岩台地；第二是中三叠世和中侏罗世 2 期构造伸展时期；第三是晚三叠世诺利期末期的构造抬升事件和晚侏罗世基默里奇期晚期的构造抬升事件；第四是措勤盆地晚二叠世—晚侏罗世经历了构造伸展和挤压造成的多次海平面升降，导致了深水和浅水沉积相的垂向叠置，为油气成藏创造了良好的沉积建造条件。上二叠统—侏罗系地层序列还有待于进一步完善，应该加大地层古生物学的投入力度。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41472030), Basic Research Project of Ministry of Science and Technology of China (No. 2015FY310100), China Geological Survey (Nos. DD20160120-02, DD20160120-04 and DD20160126), and Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. J1607).

参考文献:

陈清华，王建平，王绍兰，吴孔友. 1998. 西藏措勤盆地上二叠统的发现及其地质意义[J]. 科学通报, 43(19): 2111-2114.

程立人，王天武，李才，武世忠. 2002b. 藏北申扎地区上二叠统木纠错组的建立及皱纹珊瑚组合[J]. 地质通报，21(3): 140-143.

程立人，武世忠，张予杰. 2002a. 藏北申扎地区晚二叠世早期的皱纹珊瑚[J]. 地质通报, 21(1): 24-28.

郭铁鹰，梁定益，张宜智，赵崇贺. 1991. 西藏阿里地质[M]. 武汉：中国地质大学出版社.

何继富，纪占胜，武桂春，刘景彦，孙倩，石秋圆，李浩，刘振宇，郭安臣，侯召硕，李东泽. 2018. 西藏措勤盆地保吉地区上二叠统—下三叠统木纠错组显微荧光特征及油气勘探

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

建议[J]. 地球学报, 39(4): 463-473.
吉林省地质调查院. 2003. 中华人民共和国 1:25 万区域地质调查报告(多巴区幅)[R]. 长春: 吉林地质调查院.
吉林省地质调查院. 2006. 中华人民共和国 1:25 万区域地质调查报告(帕度错-昂达尔错幅)[R]. 吉林: 吉林省地质调查院.
纪占胜, 武桂春, 姚建新, 孙倩, 石秋圆, 何继富, 李浩, 刘振宇, 郭安臣, 侯召硕, 李东泽. 2018. 青藏高原油气勘探战略选区和战术突破目标的建议[J]. 地球学报, 39(4): 387-400.
纪占胜, 姚建新, 武桂春, 刘贵忠. 2006. 西藏措勤县敌布错地区“下拉组”中发现晚三叠世诺利期高舟牙形石[J]. 地质通报, 25(1-2): 138-141.
纪占胜, 姚建新, 武桂春. 2007a. 关于藏北改则地区夏岗江植物群及其地层时代的修订意见[J]. 地质通报, 26(8): 953-959.
纪占胜, 姚建新, 武桂春. 2007b. 西藏冈底斯西段措勤地区海相三叠系的划分[J]. 地质通报, 26(8): 947-952.
纪占胜, 姚建新, 武桂春. 2008. 西藏措勤盆地的上古生界—下古生界: 潜在的油气沉积建造[J]. 地质通报, 27(1): 36-63.
纪占胜, 姚建新, 武桂春. 2011. 西藏改则县物玛乡北部晚侏罗世吐卡日组珊瑚动物群的发现及其地质意义[J]. 地质通报, 30(2-3): 418-438.
蒋忠惕, 徐正余. 1983. 西藏夏岗江等地华夏植物群的地质意义[J]. 中国地质, (2): 4.
孟亚洲, 纪占胜, 廖卫华, 姚建新, 武桂春, 孙倩, 武振杰. 2016. 西藏保吉地区晚侏罗世动物群的发现及其意义[J]. 地质学报, 90(5): 833-847.
孟亚洲, 纪占胜, 武桂春, 孙倩, 石秋圆, 李浩. 2018. 西藏措勤盆地晚侏罗世牛津期—基默里奇期沉积环境及油气勘探意义[J]. 地球学报, 39(4): 445-452.
孟亚洲, 纪占胜, 姚建新, 武桂春, 孙倩, 廖卫华, 潘华璋. 2017. 西藏班戈县扎穷地区古生界混杂岩块中发现中生代化石[J]. 地质学报, 91(4): 812-821.
潘桂棠, 丁俊. 2004. 青藏高原及邻区地质图 1:1500000 说明书[R]. 成都: 成都地图出版社.
曲永贵, 王永胜, 张树岐, 吕鹏, 姜雪飞. 2003. 西藏申扎地区晚三叠世多布日组地层剖面的启示—对冈底斯印支运动的地层学制约[J]. 地质通报, 22(7): 470-473.
石秋圆, 纪占胜, 武桂春, 孙倩, 李浩, 何继富, 刘振宇, 张占云, 赵占富, 刘圣庆, 郭安臣, 侯召硕, 李东泽. 2018. 西藏申扎县格仁错北岸中上泥盆统查果罗玛组中发现中晚二叠世珊瑚化石[J]. 地球学报, 39(4): 453-462.
孙倩, 纪占胜, 廖卫华, 武桂春, 何继富, 石秋圆, 李浩, 刘振宇, 郭安臣, 侯召硕, 李东泽, 万晓樵. 2018a. 西藏措勤盆地上侏罗统吐卡日组上下段的厘定及其礁灰岩发现的油气勘探意义[J]. 地球学报, 39(4): 419-431.
孙倩, 纪占胜, 廖卫华, 武桂春, 何继富, 石秋圆, 李浩, 刘振宇, 郭安臣, 侯召硕, 李东泽, 万晓樵. 2018b. 西藏措勤盆地上侏罗统萨波直不勒组的发现及烃源岩意义[J]. 地球学报, 39(4): 432-444.
陶晓风, 赵兵, 马润则, 刘登忠, 胡新伟. 2015. 中华人民共和国 1:25 万区域地质调查报告(赛利普幅)[M]. 北京: 地质出版社.
王剑, 丁俊, 王成善, 谭富文. 2009. 青藏高原油气资源战略选区调查与评价[M]. 北京: 地质出版社.
王剑, 谭富文, 李亚林, 李永铁, 陈明, 王成善, 郭祖军, 王小龙, 杜佰伟, 朱忠发. 2004. 青藏高原重点沉积盆地油气资源潜力分析[M]. 北京:地质出版社.
武桂春, 纪占胜, 姚建新, 何继富, 孙倩, 石秋圆, 李浩, 仲昭, 刘振宇, 郭安臣, 侯召硕, 李东泽, 沈斌. 2017. 纳木错西岸白云岩的时代修订及油浸现象发现的意义[J]. 地质学报, (12): 2867-2880.
武桂春, 姚建新, 纪占胜. 2007. 西藏冈底斯西段措勤地区三叠纪牙形石生物地层特征[J]. 地质通报, 26(8): 938-946.
西藏自治区地质矿产局. 1993. 西藏自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
夏代祥, 刘世坤. 1997. 西藏自治区岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
赵兵, 刘登忠, 陶晓风, 马润则, 胡新伟. 2005. 西藏措勤-申扎地层分区新建中-上侏罗统仁多组[J]. 地质通报, 24(7): 53-57.
赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 张昱文. 2001. 青藏高原地层[M]. 北京: 科学出版社.
中国地质科学院地质力学研究所. 2003. 中华人民共和国 1:25 万区域地质调查报告(当雄县幅)[R]. 北京: 中国地质科学院地质力学研究所.
周幼云, 江元生, 王明光. 2002. 西藏措勤-申扎地层分区二叠系敌布错组的建立及其特征[J]. 地质通报, 21(2): 79-82.

References:

Bureau of Geology and Mineral Resources of Xizang Autonomous Region. 1993. Regional geology of Xizang (Tibet) Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
CHEN Qing-hua, WANG Jian-ping, WANG Shao-lan, WU Kong-you. 1998. Discovery of upper Permian in Coqen Basin and its geological significance[J]. Chinese Science Bulletin, 43(19): 2111- 2114(in Chinese with English abstract).
CHENG Li-ren, WANG Tian-wu, LI Cai, WU Shi-zhong. 2002b. Establishment of the Upper Permian Mujiu Co Formation and rugose coral assemblage in the Xainza area, northern Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 21(3): 140-143(in Chinese with English abstract).
CHENG Li-ren, WU Shi-zhong, ZHANG Yu-jie. 2002a. Early Late Permian rugosa in the Zainza area, northern Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 21(1): 24-28(in Chinese with English abstract).
Geological Survey Institure of Jilin Province. 2003. Chinese Regional Geological Survey Report (1:250000 Duoba Sheet)[R]. Changchun: Geological Survey Institure of Jilin Province(in Chinese).
Geological Survey Institute of Jilin Province. 2006. 1:250000 Regional geological survey report (Paducuo-Angdaercuo area)of China[R]. Jilin: Geological Survey Institute of Jilin Province(in Chinese).
GUO Tie-ying, LIANG Ding-yi, ZHAG Yi-zhi, ZHAO Chong-he. 1991. Geology of Ali, Tibet[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
HE Ji-fu, JI Zhan-sheng, WU Gui-chun, LIU Jing-yan, SUN Qian, SHI Qiu-yuan, LI Hao, LIU Zhen-yu, GUO An-chen, HOU Zhao-shuo, LI Dong-ze. 2018. The Micro-fluorescence Characteristics of the Upper Permian–Lower Triassic Mujiucuo Formation and Suggestions for Oil-gas Exploration in Baoji Area of Coqen Basin, Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(4): 463-473(in Chinese with English abstract).
Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences. 2003. 1:250000 Regional geological survey report(Dangxiong County)[R]. Beijing: Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
JI Zhan-sheng, WU Gui-chun, YAO Jian-xin, SUN Qian, SHI Qiu-yuan, HE Ji-fu, LI Hao, LIU Zhen-yu, GUO An-chen,

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

HOU Zhao-shuo, LI Dong-ze. 2018. Suggestions on the Strategic Selection of Petroleum Target Areas and the Tactic Breakthrough of the Oil and Gas Exploration in the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(4): 387-400(in Chinese with English abstract)

JI Zhan-sheng, YAO Jian-xin, WU Gui-chun, LIU Gui-zhong. 2006. Discovery of Late Triassic Norian Epigondolella in the Xiala Formation in the Dibu Co area, Coqen County, Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 25(1-2): 138-141(in Chinese with English abstract).

JI Zhan-sheng, YAO Jian-xin, WU Gui-chun. 2007a. Revision of the age of the Xiagangjiang flora and its related strata in the Gerze area, northern Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 26(8): 953-959(in Chinese with English abstract).

JI Zhan-sheng, YAO Jian-xin, WU Gui-chun. 2007b. Stratigraphic division of the marine Triassic in the Coqên area, western Gangdise, Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 26(8): 947-952(in Chinese with English abstract).

JI Zhan-sheng, YAO Jian-xin, WU Gui-chun. 2008. Upper Paleozoic-Lower Mesozoic in the Coqên Basin, Tibet, China: a potential petroleum-bearing sedimentary sequence [J]. Geological Bulletin of China, 27(1): 36-63(in Chinese with English abstract).

JI Zhan-sheng, YAO Jian-xin, WU Gui-chun. 2011. Discovery of the Late Jurassic coral fauna in the Tukari Formation at northern Oma Village, Gaize County, Tibet, China and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 30(2-3): 418-438(in Chinese with English abstract).

JIANG Zhong-ti, XU Zheng-yu. 1983. Geological significance of Chinese flora in Xiagang river and other places in Tibet[J]. Geology of China, (2):4(in Chinese with English abstract).

MENG Ya-zhou, JI Zhan-sheng, LIAO Wei-hua, YAO Jian-xin, WU Gui-chun, SUN Qian, WU Zhen-jie. 2016. Discovery of the Late Jurassic coral fauna in the Baoji Area, Tibet and its significance[J]. Acta Geologica Sinica, 90(5):833-847(in Chinese with English abstract).

MENG Ya-zhou, JI Zhan-sheng, WU Gui-chun, SUN Qian, SHI Qiu-yuan, LI Hao. 2018. Sedimentary Environment and Hydrocarbon Exploration of the Late Jurassic Oxfordian–Kimmeridgian Strata in the Coqen Basin, Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(4): 445-452(in Chinese with English abstract).

MENG Ya-zhou, JI Zhan-sheng, YAO Jian-xin, WU Gui-chun, SUN Qian, LIAO Wei-hua, PAN Hua-zhang. 2017. Mesozoic Fossils Discovered in the Paleozoic Melange at the Zhaqiong area of Bange County, Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 91(4): 812-821(in Chinese with English abstract).

PAN Gui-tang, DING Jun. 2004. Geological map of qinghai-tibet plateau and adjacent areas (1:1500000) specification[R]. Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House(in Chinese).

QU Yong-gui, WANG Yong-sheng, ZAHANG Shu-qi, LV Peng, JIANG Fei-xue. 2003. An inspiration from the section of the Late Triassic Duoburi Formation in the Xainza area—Stratigraphic constraints on the Indosinian movement in Gangdise[J]. Geological Bulletin of China, 22(07): 470-473(in Chinese with English abstract).

SHI Qiu-yuan, JI Zhan-sheng, WU Gui-chun, SUN Qian, LI Hao, HE Ji-fu, LIU Zhen-yu, ZHANG Zhan-yun, ZHAO Zhan-fu, LIU Sheng-qing, GUO An-chen, HOU Zhao-shuo, LI Dong-ze. 2018. The Newly Discovered Middle to Late Permian Coral Fauna in the Upper to Middle Devonian Chaguoluoma Formation from the Northern Geren Co Area in Xianza County, Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(4): 453-462(in Chinese with English abstract).

SUN Qian, JI Zhan-sheng, LIAO Wei-hua, WU Gui-chun, HE Ji-fu, SHI Qiu-yuan, LI Hao, LIU Zhen-yu, GUO An-chen, HOU Zhao-shuo, LI Dong-ze, WAN Xiao-qiao. 2018a. Redefinition of Upper and Lower Member of the Upper Jurassic Tukari Formation and significances on oil-gas exploration of reef limestone in the Coqen Basin, Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(4): 419-431(in Chinese with English abstract).

SUN Qian, JI Zhan-sheng, LIAO Wei-hua, WU Gui-chun, HE Ji-fu, SHI Qiu-yuan, LI Hao, LIU Zhen-yu, GUO An-chen, HOU Zhao-shuo, LI Dong-ze, WAN Xiao-qiao. 2018b. The Discovery of the Upper Jurassic Sabozhibule Formation in Coqen Basin, Tibet, and Its Source Rock[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(4): 432-444(in Chinese with English abstract).

TAO Xiao-feng, ZHAO Bing, LIU Deng-zhong, HU Xin-wei. 2015. Chinese regional geological survey report (1:250000 Sailipu Sheet)[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).

WANG Jian, DING Jun, WANG Chen-shan, TAN Fu-wen. 2009. Investigation and evaluation on oil and gas resource strategic area selection of Qinghai-Tibet plateau. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).

WANG Jian, TAN Fu-wen, LI Ya-lin, LI Yong-tie, CHEN Ming, WANG Chen-shan, GUO Zu-jun, WANG Xiao-long, DU Bai-wei, ZHU Zhong-fa. 2004. Important sedimentary basin analysis on oil and gas resource potential of Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).

WU Gui-chun, JI Zhan-sheng, TROTTER JULIE A, YAO Jian-xin, ZHOU Li-qin. 2014. Conodont biostratigraphy of a new Permo-Triassic boundary section at Wenbudangsang, north Tibet[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 411: 188-207.

WU Gui-chun, JI Zhan-sheng, YAO Jian-xin, HE Ji-fu, SUN Qian, SHI Qiu-yuan, LI Hao, ZHONG Zhao, LIU Zhen-yu, GUO An-chen, HOU Zhao-shuo, LI Dong-ze, SHEN Bin. 2017. Age Revision of the Dolomite to the West of Namtso and the Significance of the Discovered Oil-Immersed Dolomite[J]. Acta Geological Sinica, 91(12): 2867-2880(in Chinese with English abstract).

WU Gui-chun, YAO Jian-xin, JI Zhan-sheng. 2007. Triassic conodont biostratigraphy in the Coqên area, western Gangdise, Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 26(8): 938-946(in Chinese with English abstract).

XIA Dai-xiang, LIU Shi-kun. 1997. Rock strtum of the Tibet autonomous[M]. Wuhan: China University of Geoscience Press(in Chinese).

ZHAO Bing, LIU Deng-zhong, TAO Xiao-feng, MA Run-ze, HU Xin-wei. 2005. Ringtor Formation- a new Mid-Upper Jurassic lithostatigraphic unit in the Coqin-Xainza stratipraphic area, Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 24(7): 637-641(in Chinese with English abstract).

ZHAO Zheng-zhang, LI Yong-tie, YE He-fei, ZHANG Yu-wen. 2001. Stratum of Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).

ZHOU You-yun, JIANG Yuan-sheng, WANG Ming-guang. 2002. Permian Dibuco Formation in the Coqen-Xainza stratigraphic area, Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 21(2) : 79-82(in Chinese with English abstract).

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.144

贵州海相拉丁阶—卡尼阶界线研究展望

江海水[1,2],陈 龑[1,2],刘 芬[1,2]

1.中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室,湖北武汉 430074
2.中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074

摘要:全球海相拉丁阶—卡尼阶界线(Ladinian-Carnian Boundary,LCB)层型已经确定意大利的 Prati Di Stuores/Stuores Wiesen 剖面,菊石 *Daxatina canadensis*(Whiteaves)的首现位置标志着卡尼阶的底界.该界线通常被认为与牙形石 *Quadralella polygnathiformis* 或者 *Budurovignathus diebeli* 的首现接近,然而该界线在我国的确定却存在一定争议.一方面,由于主要的标志菊石 *Daxatina canadensis* 缺乏;另一方面,菊石(如 *Trachyceras*)生物地层确定的界线比起牙形石生物地层确定的界线要高许多.如在我国华南海相 LCB 地层发育最好的贵州西南地区,依据菊石一般将 LCB 置于竹杆坡组顶部附近,而依据牙形石生物地层,则又置 LCB 于竹杆坡组底部附近.贵州贞丰龙场大坪子剖面杨柳井组上部发育有牙形石 *Quadralella polygnathiformis* 和 *Budurovignathus* 属分子共生的过渡层,其时代可能归入卡尼阶的第一个亚阶 Cordevolian.是以贵州贞丰龙场大坪子剖面的 LCB 可能置于杨柳井组上部.但是,确定我国海相 LCB 仍需综合牙形石、菊石等生物地层,辅以磁性地层以及绝对年龄等多手段的研究来互相印证.

关键词:牙形石;菊石;磁性地层;贵州贞丰;生物地层学.
中图分类号:P581 **文章编号**:1000-2383(2018)11-3947-08 **收稿日期**:2018-04-17

Research Prospects on Marine Ladinian-Carnian Boundary in Guizhou Province

Jiang Haishui[1,2], Chen Yan[1,2], Liu Fen[1,2]

1.*State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*
2.*School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*

Abstract: The Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) for Ladinian-Carnian Boundary (LCB) was defined at Prati Di Stuores/Stuores Wiesen Section in Italy at a level coinciding with the lowest occurrence of the ammonoid *Daxatina canadensis*. This GSSP level is commonly considered to near the lowest occurrence of the conodonts *Quadralella polygnathiformis* or *Budurovignathus diebeli*. However, the placement of the LCB within sections of South China is controversial, because the primary ammonoid marker for LCB (*D. canadensis*) hasn't been reported in South China. The working placement of LCB based on ammonoid biostratigraphy (e.g., *Trachyceras*) is considerably higher than the levels where the conodont biostratigraphy would suggest its position. For example, ammonoids in the southwest Guizhou region with the best marine record in South China suggest the LCB should be assigned near the top of Zhuganpo Formation, whereas conodont biostratigraphy suggests that the LCB should be at the base of Zhuganpo Fm.. The Dapingzi Section in Zhenfeng County of Guizhou Province, yielded elements of the conodonts *Quadralella polygnathiformis* and *Budurovignathus* sp. from the transitional bed near the top of Yangliujing Formation, which suggests an assignment to the lowermost Carnian (the "Cordevolian" substage, as used by some authors). Therefore, this conodont assemblage would imply that the LCB in the Dapingzi Section should be placed within the upper part of Yangliujing Formation, below the base of the Zhuganpo Formation. However, to accurately assign the LCB within

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 41830320);科技部基础性工作专项项目(No. 2015FY310100-11);中国地质调查局项目(No. DD20160120-04).
作者简介:江海水(1975-),男,教授,博士,从事三叠纪牙形石与地质事件研究及相关教学工作.ORCID: 0000-0001-9636-0307. E-mail: jiangliuis@163.com

引用格式:江海水,陈龑,刘芬,2018.贵州海相拉丁阶—卡尼阶界线研究展望.地球科学,43(11):3947-3954.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

the marine deposits of South China requires integrating the ammonoid and conodont biostratigraphy with additional stratigraphic correlation methods, such as magnetostratigraphy and U/Pb ages.

Key words: conodont; ammonoid; magnetostratigraphy; Zhenfeng County of Guizhou; biostratigraphy.

海相拉丁阶—卡尼阶(Ladinian-Carnian)界线(LCB),即中—上三叠统界线,卡尼阶(Carnian)底界的全球界线层型与点(GSSP)已于 2008 年被国际地层委员会批准定位于意大利东北阿尔卑斯山南部的 Prati Di Stuores/Stuores Wiesen 剖面,以菊石 *Daxatina canadensis*(Whiteaves)的首现位置标志着卡尼阶的底界,而第二标志牙形石 *Paragondolella polygnathiformis*(Budurov and Stefanov)(= *Quadralella polygnathiformis*,见 Orchard(2013))的首现,则比菊石 *D. canadensis* 的首现稍高 70 cm(Mietto *et al.*, 2012).该剖面的 LCB 与一正极性带(S2n)的底界接近一致.遗憾的是,层型剖面上缺少测年数据,但依据同样是意大利北部 Alpe di Siusi/Seiser Alm 地区的拉丁阶上部的测年数据(237.77±0.14 Ma,低于 LCB 一个菊石(*Frankites regoledanus*)亚带,卡尼阶底界年龄被推测为 237 Ma,这一底界年龄值也为界线层型所采用(Mietto *et al.*, 2012).

然而华南尚未发现有定义卡尼阶底界第一标志的菊石 *Daxatina canadensis*.主要以第二标志牙形石 *Q. polygnathiformis* 的首现来定义卡尼阶底界.在该界线的绝对年龄上,依据 Gradstein *et al.*(2012)据"A Concise of Geologic Time Scale 2012",中国地层表 2014(全国地层委员会《中国地层表》编委会,2014)仍将我国海相拉丁阶—卡尼阶界线年龄值放在 235 Ma,但最新的"A Concise of Geologic Time Scale 2016"(Ogg *et al.*, 2016)该界线年龄值仍是置于 237 Ma.

1 LCB 生物地层研究现状

1.1 菊石生物地层

菊石在三叠系生物地层上发挥着重要作用(Tozer, 1994),根据菊石地层对比,特提斯地区和加拿大(Tozer, 1994)存在菊石属 *Frankites*→*Daxatina*→*Trachyceras* 先后出现的顺序(Mietto *et al.*, 2012).然而在美国 Nevada 地区,虽然 *Frankites* 属依然出现在先,但是 *Daxatina* 属和 *Trachyceras* 属的首现却被认为是同时的(Mietto *et al.*, 2012).国际 LCB 菊石地层序列以特提斯地区最为详细,从拉丁阶最上部的一个亚阶 Longobardian 到卡尼阶最下部一个亚阶 Cordevolian 依次发育 *Protrachyceras longobardicum*、*Pr. neumayi*、*F. regoledanus*、*D. canadensis* 和 *T. aon* 等亚带(Jenks *et al.*, 2015)(图 1).遗憾的是,迄今为止,在中国还未有菊石 *Daxatina* 属的报道.

我国很早就有关于该时期的菊石研究,如许德佑(1944)就曾报道过贵州贞丰龙场、关岭法郎的

阶	亚阶	特提斯菊石生物地层	特提斯牙形石生物地层	
			Kozur, 2003	Chen *et al.*, 2015
卡尼阶	Cordevolian	*Trachyceras aon*	*Bu. diebli-Q. Polygnathiformis*	*Paragondolella tadpole*
		Daxatina canadaensis		*Paragondolella intermedius*
		237 Ma		
拉丁阶	Longobardian	*Frankites regoledanus*	*Bu. supralongobardica*	*Paragondolella inclinata*
		237.77 Ma		
		Protrachyceras neumayi	*Bu. mungoensis*	*Bu. mungoensis*
		238.0 Ma		
		Protrachyceras longobardicum		
	Fassanian	*Eotrachyceras gredleri*	*Bu. hungaricus*	*Bu. hungaricus*
		Protrachyceras margitosum		

图 1 拉丁阶—卡尼阶界线生物地层与绝对年龄

Fig.1 Correlation of Ladinian-Carnian conodont and ammonoid zones with absolute ages at Tethys

特提斯菊石生物地层引自 Jenks *et al.*(2015);牙形石生物地层引自 Kozur(2003)和 Chen *et al.*(2015),*Bu.* = *Budurovignathus*,*Q.* = *Quadralella*;绝对年龄值引自 Mundil *et al.*(1996)、Brühwiler *et al.*(2007)和 Mietto *et al.*(2012)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

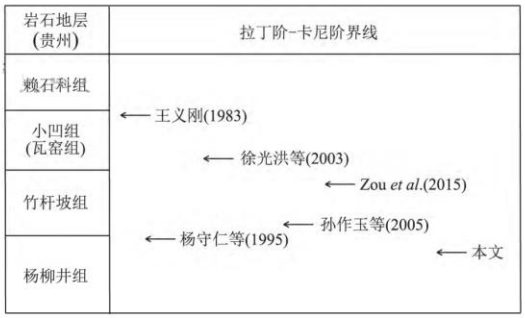


图 2　贵州地区不同学者确定的海相拉丁阶－卡尼阶界线

Fig. 2　Conflictions among scholars about the marine Ladinian-Carnian boundary at Guizhou area

T. multituberculatum Hsu.王义刚(1983)对黔西南的菊石生物地层做了初步划分，建立了 *Xenoprotrachyceras primum*，*Pr. deprati* 及 *T. multituberculatum* 三个菊石带，并将 LCB 置于后两个带之间，即“法朗组”(曾被分为竹杆坡段、赖石科段及龙场段(王义刚，1983))的赖石科段(相当于小凹组)的上部(图 2).Hao *et al.*(2003)对贵州关岭及贞丰“瓦窑组”(后更名为小凹组(汪啸风等，2002))的头足类进行研究得出结论，“瓦窑组”的时代应该为早卡尼期的晚期.徐光洪等(2003)对贵州关岭地区的竹杆坡组和小凹组的菊石地层进行了详细研究，建立了 5 个菊石带，自下而上分别为：*X. primum* 带、*Pr. deprai* 带、*Pr. costulatum* 带、*T. multituberculatum* 带和 *Sirenites* cf. *senticosus* 带.据此，将该地区的 LCB 置于小凹组靠近底部的位置(图 2).李岩等(2013)在云南罗平牛补歹剖面上三叠统“法郎组”瓦窑段(相当于小凹组)自下而上识别出菊石 *T. aonoides* 带和 *Austrotrachyceras triadicum* 带，进一步完善了该时期的菊石生物地层序列.在“兴义动物群”的发现地，贵州兴义市泥麦古村，Zou *et al.*(2015)对该剖面的菊石进行了详细研究，他们在该剖面法朗组瓦窑段(＝小凹组)的底部(第 8 层)及法朗组竹杆坡段(竹杆坡组)第 6、7 层报道了菊石 *Trachyceras* 属，在第 2 层建立了菊石 *Haoceras xingyiense* 带.尽管在该剖面第 2 层曾报道过牙形石 *P. polygnathiformis*(王成源等，1998)，Zou *et al.*(2015)仍将该剖面的 LCB 暂置于第 6 层靠近底部的位置，即竹杆坡组的上部(图 2).

1.2　牙形石生物地层

辅助界线标志牙形石 *Q. polygnathiformis* 在世界上有着较广泛的分布，在华南，其首现也被作为标志来确定卡尼阶底界(王红梅等，2005；孙作玉等，2005；Lehrmann *et al.*，2015). Kozur(1989a)认为除了 *P. polygnathiformis* 的首现，*Budurovignathus diebeli* 的首现也可以用来指示卡尼阶的底界；并指出卡尼阶最下面的考狄夫亚阶(Cordevolian)的牙形石兼具晚三叠世分子(*P. polygnathiformis*)和拉丁阶分子(*Budurovignathus* 属)共生的过渡色彩.这种类似的拉丁阶－卡尼阶过渡层在我国黔南也有过报道(殷鸿福和童金南，1992).*Bu. diebeli* 在我国虽有报道(杨守仁与董致中个人通讯(杨守仁等，1999))，但并无图示.董致中和王伟(2006)后来也未报道此种.因此，该种在中国的出现尚无确切证据(王成源和王志浩，2016).然而，晚三叠世分子 *P. polygnathiformis* 和拉丁阶子遗分子 *Budurovignathus* 属分子在贵州关刀剖面上确有共生的报道(王红梅等，2005；Lehrmann *et al.*，2015).

目前国际上 LCB 附近已有较详细的牙形石生物地层序列.Kozur(2003)总结了从 Longobardian 到 Cordevolian 的牙形石带，从下至上分别为：*Bu. hungaricus* 带、*Bu. mungoensis* 带、*Bu. supralongobardica* 带、及 *Budorovignathus diebli* - *P. polygnathiformis* 组合带(图 1).Chen *et al.*(2015)则在界线附近提出 *Bu. hungaricus* 带、*Bu. mungoensis* 带、*P. inclinata* 带、*P. intermedius* 带和 *P. tadpole* 带的牙形石生物地层序列(图 1).

在华南，杨守仁等(1995)在黔西南“法朗组”地层研究中由老至新建立了 *Neogondolella polygnathiformis*-*Neogondolella maantangensis* 组合带、*Neogondolella polygnathiformis*-*Neogondolella tadpole* 组合带及 *Neogondolella polygnathiformis* 带.尽管在贞丰龙场大湾坡剖面杨柳井组距顶十几米的地层中发现有 *Neogondolella polygnathiformis*，杨守仁等(1995)仍将 LCB 置于该剖面竹杆坡组的底部(图 2).孙作玉等(2005)对 *Paragondolella* 属在 LCB 附近的演化进行了探讨，认为其沿两个分支方向演化，一支为：*P. foliata inclinata*-*P. polygnathiformis*-*P. maantangensis*，另一支为 *P. foliata inclinata*-*P. foliata foliata*-*P. tadpole*，且认为 *P. polygnathiformis* 的首现作为卡尼阶底界的标志是合理的.据此，他们将贵州关岭竹杆坡剖面的 LCB 置于杨柳井组和竹杆坡组岩石界线以上 3.38 m 处(图 2).值得注意的是，除了贵州关刀，华南其他地方并无 *P. polygnathiformis* 和 *Budurovignathus* 属分子共生的报道.

由此，依据菊石生物地层，我国华南海相 LCB

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在贵州西南地区一般置于竹杆坡组顶部附近，而依据牙形石生物地层，该界线则又置于竹杆坡组底部附近.菊石方面，华南仍未发现 *Daxatina canadensis*；牙形石方面，除关刀剖面外，其他地区还未报道有代表(Cordevolian)的 *P. polygnathiformis* 和 *Budurovignathus* 属分子共生的过渡层.这使得华南海相 LCB 的生物地层研究依然薄弱.

2 磁性地层

在生物地层精细控制的前提下，磁性地层可以为地层对比提供较好的帮助.虽然国际上有关生物地层控制跨越 LCB 的磁性地层研究并不多，但是界线层型 Prati Di Stuores/Stuores Wiesen 剖面(Mietto *et al.*, 2012)指出在跨越 LCB 的时间内是以正极性带为主(S2n)，并在接近 LCB 的下部有一较短反极性带(S1r)，这一特征可与华南关刀剖面(Lehrmann *et al.*, 2015)以及奥地利 Mayerling 剖面进行对比(UT1n 和 MT13r 来自 Geomagnetic polarity timescale 地磁极性时间格架对比(Hounslow and Muttoni, 2010)). 尽管华南海相 LCB 的确定仍然存疑，但最近对贵州关岭地质公园附近的杨柳井组顶部至小凹组下部的磁性地层研究表明：小凹组底界附近主要为反极性带，而竹杆坡组底界之上主要为正极性带，而杨柳井组顶部又为反极性带(Minzoni *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015).其中值得注意的是，杨柳井组和竹杆坡组的地层岩性界线与磁性地层从反极性带转变为正极性的界线相耦合.因此，根据磁性地层及天文旋回地层的研究，该处 LCB 仍被置于竹杆坡组与杨柳井组之间，杨柳井组的顶部被认为有沉积缺失(Zhang *et al.*, 2015)，这段沉积间断的延续时间未知，但推断杨柳井顶部的反极性带仍可能代表拉丁期晚期，可与界线层型剖面反极性带(S1r)相对比.但是由于杨柳井组为浅水台地内沉积并多见白云岩化以及微生物藻席沉积，可能受到生物化石如牙行石、菊石以及磁性矿物信号的较差保存等因素的影响，导致目前缺乏该段地层的磁性地层格架.

3 界线年龄

Mundil *et al.*(1996)对南 Alps 的 Seceda 剖面产双壳 *Daonella lommeli* 的地层中的火山灰层锆石 U-Pb 测年给出的数据是 238.0±0.4 Ma 或 238.0±0.7 Ma，这一年龄值被认为是接近菊石 *longobardicum/neumayri* 亚带(均属 Longobardian)界线的年龄(Mietto *et al.*, 2012)(图 1).Brühwiler *et al.*(2007)对奥地利西部 Flexenpass 剖面 Reifling 组上部报道了 U-Pb 锆石年龄为 239.3±0.2 Ma，该年龄值被认为产于菊石 *longobardicum* 亚带内(Mietto *et al.*, 2012).如前所述，Mietto *et al.*(2012)给出了意大利北部 Alpe di Siusi/Seiser Alm 地区 Rio Nigra 剖面拉丁阶上部菊石 *Frankites regoledanus* 亚带地层内的锆石 U-Pb 测年数据为 237.77±0.14 Ma，低于 LCB 一个亚带(图 1).因此，卡尼阶底界年龄被推测为 237 Ma.李志广等(2016)对贵州兴义法朗组竹杆坡段(竹杆坡组)上部凝灰岩夹层中的锆石进行了 LA-ICP-MS 的 U-Pb 年代学测定，测得兴义动物群化石赋存层位年龄为 240.8±1.8 Ma，将竹杆坡组大部归入拉丁期.值得注意的是，该剖面兴义动物群被认为属菊石 *Haoceras xingyiense* 带，相当于南 Alps 地区的菊石 *F. regoledanus* 亚带(见于 Zou *et al.*, 2015 里的 Fig.11)，而菊石 *F. regoledanus* 亚带的年龄却是在 237.77～237.00 Ma之间(Mietto *et al.*, 2012)，与李志广等(2016)的数据有较大出入.

4 贵州贞丰龙场大坪子剖面的生物地层

大坪子剖面(N25°26′40.09″, E105°29′16.38″)位于贵州贞丰龙场镇南约 2 km 采石场东面约 600 m 的山坡土路边上.剖面主要出露杨柳井组上部厚层纹层状灰岩和竹杆坡组下部薄至中层含泥质灰岩，总厚度约 18 m(图 3)，具体描述如下：

竹杆坡组

8.灰色薄－中层含生物碎屑细晶灰岩、粉晶灰岩.顶部采牙形石样品 LCC-012，含 *Q. polygnathiformis*，厚 2.40 m，其上覆盖.

7.灰黑色薄层生屑灰岩夹红褐色泥岩.顶部采牙形石样品 LCC-011，无牙形产出，厚 1.50 m.

6.灰黑色中层状含生屑灰岩，层面上可见大量生物碎屑.顶部采牙形石样品 LCC-010，底＋2.18 m 处采样 LCC-009，底＋0.50 m 处采样 LCC-008，无牙形产出，厚 3.68 m.

5.灰黑色厚层状含生屑灰岩.顶部采牙形石样品 LCC-007，底部采样 LCC-006，无牙形产出，厚 0.50 m.

整合接触

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

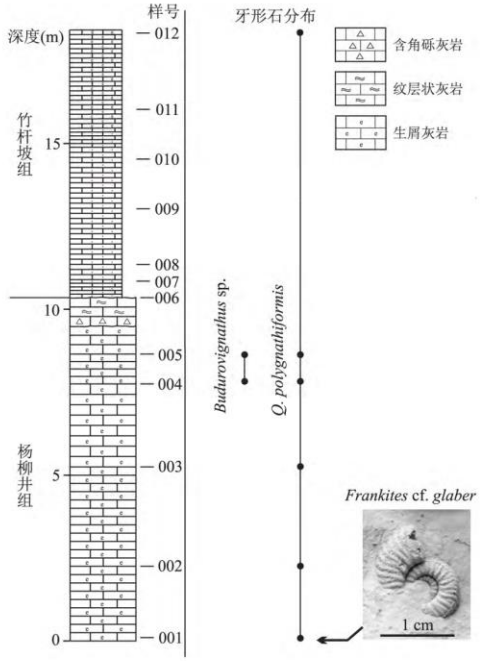


图 3　贵州贞丰龙场大坪子剖面牙形石及菊石分布

Fig.3　Conodonts and ammonoid distributions at the Dapingzi Section, Zhenfeng, Guizhou

杨柳井组

4.厚层纹层状灰岩，底部含角砾灰岩.底部采牙形石样品 LCC-005.含牙形石：*Q. polygnathiformis*、*Budurovignathus* sp.，厚 1.70 m.

3.灰色中厚层含生屑灰岩.底部采牙形石样品 LCC-004.含牙形石：*Q. polygnathiformis*、*Budurovignathus* sp.，厚 0.90 m.

2.灰黑色厚层含生物碎屑灰岩.底部采牙形石样品 LCC-003.含牙形石 *Q. polygnathiformis*，厚 2.50 m.

1.灰黑色中—厚层状生物碎屑灰岩，含菊石 *Frankites* cf. *glaber* 及腕足、双壳、海百合茎等生物碎屑.距底＋2.25 m 采牙形石样品 LCC-002，底部采样 LCC-001.含牙形石 *Q. polygnathiformis* 及少量枝形分子.厚 5.25 m，下部覆盖.

该剖面近底部采得菊石 *Frankites* cf. *glaber*（图 3）.另外共采集牙形石样品 12 件（每样约 5～6 kg）.样品据 Jiang *et al.*（2007）和苑金玲等（2015）方法处理后，在该剖面获得一定数量的牙形石分子（图 4），其中 *Q. polygnathiformis* 在竹杆坡组下部及杨柳井组上部近十米的地层中均有发现，值得注意的是，*Budurovignathus* 属分子在杨柳井组上部地层中也有发现，且与 *Q. polygnathiformis* 共生（图 3）.

菊石 *Frankites* 属在特提斯、北美等地可分布于拉丁阶上部至卡尼阶下部地层中（Mietto *et al.*，2012）.牙形石 *Q. polygnathiformis* 在杨柳井组距顶部约十米的层位有发现，这与杨守仁等（1995）对贞丰龙场大湾坡剖面的研究结果一致.本次还在大

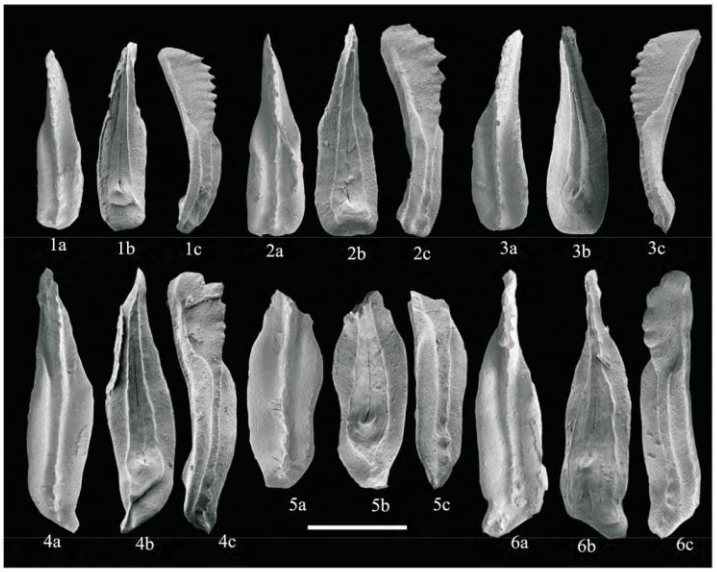


图 4　产于贵州贞丰龙场大坪子剖面的部分牙形石

Fig.4　Selected photos of key conodonts from the Ladinian-Carnian Boundary Strata of the Dapingzi Section

比例尺＝500 μm，标本保存在中国地质大学（武汉）地球科学学院地球生物学系，a 为口视，b 为反口视，c 为侧视.1～3，*Q. polygnathiformis*；1.LCC-001，I-i039；2.LCC-004，I-i065；3.LCC-012，I-i041.4～6，*Budurovignathus* sp.；4.LCC-004，I-i082；5.LCC-004，I-i084；6.LCC-005，I-i023

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

坪子剖面杨柳井组上部发现了几个 *Budurovignathus* 属的分子(图4).与 *Budurovignathus* 属的模式种 *Polygnathus mungoensis* Diebel, 1956 相比,虽然这些标本不具侧齿瘤,也没见基腔后齿槽,但具有明显的自由齿片、前移的基腔、S形弯曲的齿台、指向后端的龙脊等特征,更多符合 Kozur(1988, 1989b)对 *Budurovignathus* 属的定义与阐述,还是应归入 *Budurovignathus* 属分子.因此,贵州贞丰大坪子剖面与关刀剖面一样,都发育有 *Q. polygnathiformis* 和 *Budurovignathus* 属分子共生的过渡层.而这一过渡层的时代应该归入卡尼阶的 Cordevolian.从这点看,贵州贞丰龙场大坪子剖面的 LCB 可能置于杨柳井组上部(图2).

5 展望

近年来,关于我国海相 LCB 附近的生物地层研究取得了许多成果,牙形石以贵州关刀剖面的报道最为详细(Lehrmann *et al.*, 2015).但遗憾的是,该剖面并无菊石地层报道,缺乏牙形石生物地层与菊石生物地层的相互验证.而在菊石生物地层研究较好的我国贵州西南地区,大多数研究单纯以菊石来划定 LCB.然而,极为重要的菊石 *Daxatina canadensis* 在华南仍然没有发现.

牙形石 *Q. polygnathiformis* 的首现理应成为确定 LCB 的重要标志,但由于其正模原始插图并不完整(仅给出了侧视图与反口视图,缺少口视图),原始定义也不充分(见 Ziegler,1973 里 p.145),但是其侧齿台前部膝状弯曲后来都被用作鉴定该种的主要特征(Orchard and Balini, 2007).Orchard and Balini(2007)认为卡尼阶上部的"*Q. polygnathiformis*"与 LCB 附近的 *Q. polygnathiformis* 有很大不同,因此又重新严格限定了该种的特征.据他们的修订,*Q. polygnathiformis* 应具如下6个特征:(1)齿台后部为圆形或方圆形;(2)齿台延伸达整个分子的长度,口视逐渐向前变窄,无向内的明显变弯;(3)侧视齿台前部具膝状弯曲;(4)齿脊中等高度并融合,但侧视时可能被翻转的齿台边缘所阻挡;(5)前齿片有分化并部分融合,突出于向下弯曲的前齿台之上;(6)主齿大、显著,明显区别于齿脊上融合的瘤齿,靠近后部被一窄的齿台边缘所包围.据此,有必要对原先定为 *Q. polygnathiformis* 的标本进行重新检查.另外,值得注意的是 *Budurovignathus diebeli* 的首现也可以用来确定 LCB,但是该种在华南并没有确切报道.

综上,我国海相拉丁阶—卡尼阶界线研究的重点应该还是在牙形石以及菊石等生物地层上,依靠良好的生物地层格架才能进一步进行磁性地层及绝对年龄研究.并不是所有剖面都能够完成良好的单一生物地层格架,在这种情况下,需结合多门类生物地层(仇鑫程等,2016),或辅以地球化学曲线(叶茜和江海水,2016)来进行地层格架厘定.总言之,多手段的研究互相印证才能更好地解决地层学问题.

致谢:牙形石照片在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室完成;王达成、苑金玲、杨泰山、叶茜等在野外工作中提供了帮助;代旭在菊石鉴定中提供了帮助;J.G.Ogg 教授对本文提供了宝贵意见;在此一并表示感谢!

References

Brühwiler, T., Hochuli, P. A., Mundil, R., et al., 2007. Bio- and Chronostratigraphy of the Middle Triassic Reifling Formation of the Westernmost Northern Calcareous Alps. *Swiss Journal of Geosciences*, 100(3): 443-455. https://doi.org/10.1007/s00015-007-1240-2

Chen, Y. L., Krystyn, L., Orchard, M. J., et al., 2015. A Review of the Evolution, Biostratigraphy, Provincialism and Diversity of Middle and Early Late Triassic Conodonts. *Papers in Palaeontology*, 2(2): 235-263. https://doi.org/10.1002/spp2.1038

Diebel, K., 1956. Über Trias Conodonten. *Geologie*, 5: 9-12.

Dong, Z.Z., Wang, W., 2006. The Cambrian-Triassic Conodont Faunas in Yunnan, China—Correlative Biostratigraphy and the Study of Paleobiogeography Province of Conodont. Yunnan Science and Technology Press, Kunming (in Chinese).

Editorial Committee of the Stratigraphic Chart of China, National Commission on Stratigraphy of China, 2014. The Stratigraphic Chart of China (2014). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M., et al., 2012. The Geologic Time Scale 2012. Elsevier, volume, 43(1): 5-13(9).

Hao, W. C., Sun, Y. L., Jiang, D. Y., et al., 2003. Cephalopods of the "Falang Formation" (Triassic) from Guanling and Zhenfeng Counties, Guizhou Province, China. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 77(4): 430-439. https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2003.tb00124.x

Hounslow, M. W., Muttoni, G., 2010. The Geomagnetic Polarity Timescale for the Triassic: Linkage to Stage Boundary Definitions. *Geological Society, London, Special Publications*, 334(1): 61-102. https://doi.org/10.1144/sp334.4

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Jenks, J. F., Monnet, C., Balini, M., et al., 2015. Biostratigraphy of Triassic Ammonoids. Springer, Netherlands, 44: 329—388.

Jiang, H. S., Lai, X. L., Luo, G. M., et al., 2007. Restudy of Conodont Zonation and Evolution across the P/T Boundary at Meishan Section, Changxing, Zhejiang, China. *Global and Planetary Change*, 55 (1 — 3): 39 — 55. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.06.007

Kozur, H. W., 1988. Division of the Gondolellid Platform Conodonts. 1st International Senckenberg Conference and 5th European Conodont Symposium (Ecos V). Part 2 Abstract of Meeting, CFS, 102: 244—245, Frankfurt/M.

Kozur, H. W., 1989a. Significance of Events in Conodont Evolution for the Permian and Triassic Stratigraphy. *Cfs Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, 117: 385—408.

Kozur, H. W., 1989b. The Taxonomy of the Gondolellid Conodonts in the Permian and Triassic. *Cfs Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, 117: 409—469.

Kozur, H. W., 2003. Integrated Ammonoid, Conodont and Radiolarian Zonation of the Triassic and Some Remarks to Stage/Substage Subdivision and the Numeric Age of the Triassic Stages. *Albertiana*, 28: 57—74.

Lehrmann, D. J., Stepchinski, L., Altiner, D., et al., 2015. An Integrated Biostratigraphy (Conodonts and Foraminifers) and Chronostratigraphy (Paleomagnetic Reversals, Magnetic Susceptibility, Elemental Chemistry, Carbon Isotopes and Geochronology) for the Permian-Upper Triassic Strata of Guandao Section, Nanpanjiang Basin, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 108: 117—135.

Li, Y., Sun, Z. Y., Sun, Y. L., et al., 2013. Carnian (Late Triassic) Ammonoid Biostratigraphy in Luoping County, Eastern Yunnan Province, China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 49 (3): 471—479 (in Chinese with English abstract).

Li, Z. G., Sun, Z. Y., Jiang, D. Y., et al., 2016. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of the Fossil Layer of Triassic Xingyi Fauna from Xingyi, Guizhou, and Its Significance. *Geological Review*, 62 (3): 779—790 (in Chinese with English abstract).

Mietto, P., Manfrin, S., Preto, N., et al., 2012. The Global Boundary Statotype Section and Point (GSSP) of the Carnian Stage (Late Triassic) at Prati Di Stuores/Stuores Wiesen Section (Southern Alps, NE Italy). *Episodes*, 35 (3): 414—430.

Minzoni, M., Lehrmann, D. J., Dezoeten, E., et al., 2015. Drowning of the Triassic Yangtze Platform, South China, by Tectonic Subsidence into Toxic Deep Waters of an Anoxic Basin. *Journal of Sedimentary Research*, 85 (5): 419—444. https://doi.org/10.2110/jsr.2015.32

Mundil, R., Brack, P., Meier, M., et al., 1996. Erratum to "High Resolution U-Pb Dating of Middle Triassic Volcaniclastics: Time-Scale Calibration and Verification for Tuning Parameters for Carbonate Sedimentation". *Earth and Planetary Science Letters*, 143 (1 — 4): 275. https://doi.org/10.1016/0012-821x(96)00147-1

Ogg, J. G., Ogg, G. M., Gradstein, F. M., 2016. A Concise Geologic Time Scale: 2016. Elsevier Publisher, Amsterdam, 234.

Orchard, M. J., 2013. Five New Genera of Conodonts from the Carnian-Norian Boundary Beds, Black Bear Ridge, Northeast British Columbia, Canada. In: Tanner, L. H., Spielmann, J. A., Lucas, S. G., eds., The Triassic System. *New Mexico Museum of Natural History and Science, Bulletin*, 61: 445—457.

Orchard, M. J., Balini, M., 2007. Conodonts from the Ladinian-Carnian Boundary Beds of South Canyon, New Pass, Nevada, USA. In: Lucas, S. G., Spielmann, J. A., eds., The Global Triassic. *New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin*, 41: 333—340.

Qiu, X. C., Tong, J. N., Tian, L., et al., 2016. The Biostratigraphic Correlation of the Permian-Triassic Boundary in Jinzhong Section, Weining, Guizhou, South China. *Earth Science*, 41 (10): 1709—1722 (in Chinese with English abstract).

Sun, Z. Y., Hao, W. C., Jiang, D. Y., 2005. Conodont Biostratigraphy near the Ladinian-Carnian Boundary Interval in Guanling of Guizhou. *Journal of Stratigraphy*, 29 (3): 257—263 (in Chinese with English abstract).

Tozer, E. T., 1994. Canadian Triassic Ammonoid Faunas. *Bulletin of the Geological Survey of Canada*, 156: 1—663.

Wang, C. Y., Wang, Z. H., 2016. Conodont Biostratigraphy in China. Zhejiang University Press, Hangzhou (in Chinese).

Wang, C. Y., Kang, P. Q., Wang, Z. H., 1998. Conodont-Based Age of the *Kueichousaurus* hui Yang, 1958. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 15 (2): 196 — 198 (in Chinese with English abstract).

Wang, H. M., Wang, X. L., Li, R. X., et al., 2005. Triassic Conodont Succession and Stage Subdivision of the Guandao Section, Bianyang, Luodian, Guizhou. *Acta Palaeontologica Sinica*, 44 (4): 611 — 626 (in Chinese with English abstract).

Wang, X. F., Chen, X. H., Xu, G. H., et al., 2002. A Unique Rare Fossil Lagerstätte: Guanling Biota. In: Chen, Y. C., ed., Academic Anthology of 80th Anniversary Geological Society of China. Geological Publishing House, Beijing, 42—53 (in Chinese).

Wang, Y. G., 1983. Ammonoids from Falang Formation (Ladinlan-E. Carnian) of Southwestern Guizhou, China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 22 (2): 153—162, 237—238

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(in Chinese with English abstract).

Xu, D. Y., 1944. Middle Triassic Ammonoids from Guizhou. *Geological Review*, 23: 275－279 (in Chinese).

Xu, G. H., Niu, Z. J., Chen, H. M., 2003. Triassic Cephalopods from the Zhuganpo and Xiaowa Formations in Guanling, Guizhou, with a Discussion on the Age of the Guanling Biota. *Geological Bulletin of China*, 22(4): 254－265 (in Chinese with English abstract).

Yang, S. R., Hao, W. C., Wang, X. P., 1999. Triassic Conodont Sequences from Different Facies in China. In Yao, A., Ezaki, Y., Hao W. C., et al., eds., Biotic and Geological Development of the Paleo-Tethys in China. Peking University Press, Beijing, 81－95 (in Chinese with English abstract).

Yang, S. R., Liu, J., Zhang, M. F., 1995. Conodonts from the "Falang Formation" of Southwestern Guizhou and Their Age. *Journal of Stratigraphy*, 19(3): 161－170, 198 (in Chinese with English abstract).

Ye, Q., Jiang, H. S., 2016. Conodont Biostratigraphy and a Negative Excursion in Carbonate Carbon Isotopes across the Wuchiapingian-Changhsingian Boundary at the Dawoling Section, Hunan Province. *Earth Science*, 41(11): 1883－1892 (in Chinese with English abstract).

Yin, H. F., Tong, J. N., 1992. The Ladinian-Carnian Transitional Bed in the Central-Southern Guizhou. *Earth Science*, 17(3): 308 (in Chinese).

Yuan, J. L., Jiang, H. S., Wang D. C., 2015. LST: A New Inorganic Heavy Liquid Used in Conodont Separation. *Geological Science and Technology Information*, 34(5): 225－230 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y., Li, M. S., Ogg, J. G., et al., 2015. Cycle-Calibrated Magnetostratigraphy of Middle Carnian from South China: Implications for Late Triassic Time Scale and Termination of the Yangtze Platform. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 436: 135－166.

Ziegler, W., 1973. Catalogue of Conodonts. Schwiezerbart's sche Verlags-Buchhandlung, Stuttgart, 1, 504.

Zou, X. D., Balini, M., Jiang, D. Y., et al., 2015. Ammonoids from the Zhuganpo Member of the Falang Formation at Nimaigu and Their Relevance for Dating the Xingyi Fossil-Lagerstätte (Late Ladinian, Guizhou, China). *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 121(2): 135－161.

附中文参考文献

董致中，王伟，2006.云南牙形类动物群－相关生物地层及生物地理区研究.昆明：云南科技出版社.

李岩，孙作玉，孙元林，等，2013.云南省东部罗平地区晚三叠世卡尼期菊石生物地层.北京大学学报(自然科学版)，49(3)：471－479.

李志广，孙作玉，江大勇，等，2016.贵州兴义三叠纪兴义动物群化石层锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其意义.地质论评，62(3)：779－790.

仇鑫程，童金南，田力，等，2016.贵州威宁金钟二叠系－三叠系界线剖面生物地层及其对比.地球科学，41(10)：1709－1722.

全国地层委员会《中国地层表》编委会，2014.中国地层表(2014).北京：地质出版社.

孙作玉，郝维城，江大勇，2005.贵州三叠系拉丁阶－卡尼阶界线层牙形石生物地层.地层学杂志，29(3)：257－263.

王成源，康沛泉，王志浩，1998.以牙形刺确定胡氏贵州龙(*Kueichousaurus hui* Yang)层的时代，微体古生物学报，15(2)：196－198.

王成源，王志浩，2016.中国牙形刺生物地层.杭州：浙江大学出版社.

王红梅，王兴理，李荣西，等，2005.贵州罗甸边阳镇关刀剖面三叠纪牙形石序列及阶的划分.古生物学报，44(4)：611－626.

汪啸风，陈孝红，徐光洪，等，2002.一个罕见的珍稀生物群－关岭生物群.见：陈毓川主编，中国地质学会 80 周年学术文集.北京：地质出版社，42－53.

王义刚，1983.黔西南法郎组(Ladinian-E.Carnian)菊石.古生物学报，22(2)：153－162，237－238.

许德佑，1944.贵州之中三叠纪菊石化石.地质论评，23：275－279.

徐光洪，牛志军，陈辉明，2003.贵州关岭三叠系竹杆坡组、小凹组头足类化石——兼论关岭生物群的时代.地质通报，22(4)：254－265.

杨守仁，郝维城，王新平，1999.中国三叠系不同相区的牙形石序列.见：八尾昭，江琦洋一，郝维城，等，著，中国古特提斯生物及地质变迁.北京：北京大学出版社，81－95.

杨守仁，刘疆，张明发，1995.贵州西南部"法郎组"牙形石及其时代.地层学杂志，19(3)：161－170，198.

叶茜，江海水，2016.湖南嘉禾大窝岭剖面吴家坪阶－长兴阶界线牙形石 生物地层及一次碳同位素负偏.地球科学，41(11)：1883－1892.

殷鸿福，童金南，1992.贵州南部拉丁－卡尼阶过渡层.地球科学，17(3)：308.

苑金玲，江海水，王达成，2015.新型无机重液 LST 在牙形石分离中的使用.地质科技情报，34(5)：225－230.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

西宁盆地嵌齿象化石地点考证及地层对比①

李春晓[1)2)3)] 王世骐[1)2)] 郝呈禄[4)] 陈光庭[4)] 孙博阳[1)2)] 郑 妍[1)] 许泗建[1)]

1) 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所，中国科学院脊椎动物演化与人类起源重点实验室 北京 100044;
2) 中国科学院生物演化与环境卓越创新中心 北京 100044;
3) 中国科学院大学 北京 100049;
4) 青海省地质调查院 青海西宁 810012

摘 要: 西宁盆地的间型嵌齿象(*Gomphotherium connexum*)和维曼嵌齿象(*Gomphotherium wimani*)的种型群材料是中国最早的一批有出土地点记录的长鼻类化石。这些化石在西宁盆地新生代地层划分和对比中起到了基础性的作用，但长期以来，对二者种型群材料产出的精确地点和层位并不完全清楚。受此影响，对二者生物年代及演化阶段的研究，以及西宁盆地的地层对比存在很多争议。对西宁盆地间型嵌齿象和维曼嵌齿象种型群化石点(即正型地点)进行了多方考证，获取了化石地点的准确位置：吊沟和八盘山。通过地层对比，证明两种嵌齿象的正型地点出自同一层位——关家山组(原咸水河组下部)底部河道相的绿色砂砾岩层中，两者的时代相同。依据已有的古地磁结果，间型嵌齿象和维曼嵌齿象的正型地点的年代应为 16～15 Ma。通过形态学分析进一步阐释两种嵌齿象的系统演化关系，认为二者仅仅代表不同的演化方向，而不是原始与进步的演化阶段。这一方面对中国古生物史的研究有重要意义，另一方面为探讨嵌齿象类群演化的问题提供了关键性的年代学数据，也对西宁盆地的大地构造和沉积环境演化等方面提供了重要的生物地层学证据。

关 键 词: 地层对比，生物年代，嵌齿象，中中新世，西宁盆地，青海
中图分类号: P534.62 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4959(2018)03-0313-12

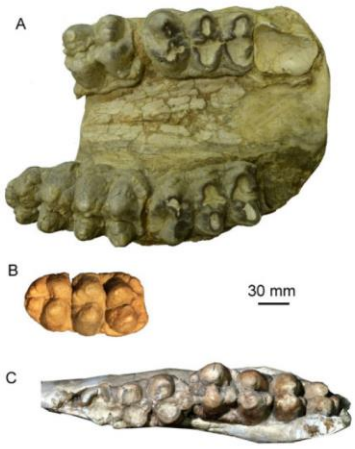
胡步伍(Hopwood, 1935)首先描述了西宁盆地的长鼻类化石，包括间型三棱齿象(*Trilophodon connexus*)和维曼三棱齿象(*T. wimani*)。三棱齿象(*Trilophodon*)属后来被认为是嵌齿象(*Gomphotherium*)属的同物异名(Simpson, 1945)，因此二者的名称分别被订正为间型嵌齿象(*G. connexum*)和维曼嵌齿象(*G. wimani*)(图 1)。这是中国最早建立的嵌齿象种类，也是中国第一批有确切的出土地点记录的长鼻类化石(Hopwood, 1935)。这些化石是由安特生(Andersson)于 1923~1924 年考察甘肃、青海和宁夏等地时发现的(Andersson, 1925; Sun C. C., 1936; Young C. C. & Bian M. N.1937; Mateer & Lucas, 1985)。

Hopwood(1935)记载两种嵌齿象在西宁盆地种型群材料的地点记录如下：地点 1, “Kansu, Sining Fu, SW 20 li, Shui Ch’üan P’u, SE 5 li, Tiao Kou”，出产间型嵌齿象(Hopwood, 1935: p. 15)；地点 2, “Kansu, Sining Hsien from city SE 35 li, Hsin T’ien P’o N 3 li, Pa P’an Shan”，出产维曼嵌齿象(Hopwood, 1935: p. 20)。这些地名仅见于英文文献，由于年代久远，化石出土的地点已经不为人熟悉，其对应的中文写法并不清楚；并且近现代中国发生过多次行政区域变更，很多地名已不再使用。吊沟地点(地点 1, Tiao Kou)由邱铸鼎等(1981)在石油队的指引下重新确定，但限于技术条件，当时没有对化石点的经纬度进行准确的记录，也没有对地点详细的进行考证；而八盘山地点(地点 2, Pa P’an Shan)，则不为学术界所知(图 2)。

近年来，通过对当地百姓的走访和对西宁盆地的地层考察，确定了维曼嵌齿象和间型嵌齿象种型群的精确出土地点(即正型地点)和层位,这对中国古生物史的研究具有重要意义。详细的地层对比证明，两种嵌齿象的出土位置均位于关家山组

①国家自然科学基金项目(No：41372001, 41430102)，科学技术部基础性工作专项(2015FY310100-14)，青海省基金项目(批准号：2016113003JC003)和中国地质调查局项目(DD20160120-04/121201102000150010-04)。
文稿接受日期: 2018-03-27; 修改稿收到日期: 2018-06-25。
第一作者简介: 硕士研究生，从事晚新生代哺乳动物和陆相地层的研究; e-mail:chunxiaoli323@126.com

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



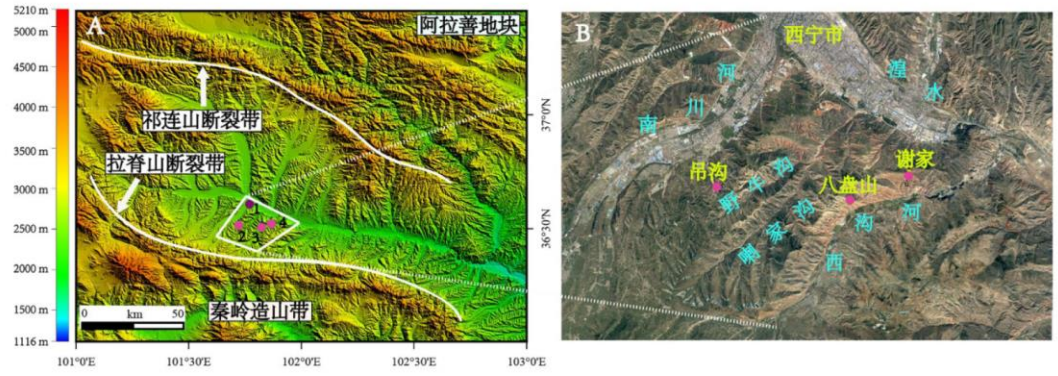
A: 维曼嵌齿象上颌, 正型标本(PMU M3649), 腹视, 八盘山地点; B: 间型嵌齿象左第三上臼齿, 副型标本模型(RV35049), 冠面视, 吊沟地点; C: 间型嵌齿象左下颊齿列, 正型标本模型(RV35015), 冠面视, 吊沟地点。
A, ventral view of the maxilla of *G. wimani* (PMU M3649, holotype), Bapanshan locality; B, occlusal view of the left M3 of *G. connexum* (RV35049, cast of the paratype); Diaogou locality; C, occlusal view of the left lower tooth row of *G. connexum* (RV35015, cast of the holotype), Diaogou locality.

图 1 Hopwood(1935)报道的西宁盆地长鼻类化石
Fig. 1 Fossil proboscideans from the Xining Basin, reported by Hopwood(1935)

(原咸水河组下部)的底部, 两者的层位完全一致, 说明两种嵌齿象的时代相同, 这对于嵌齿象的演化研究提供了非常重要的信息。嵌齿象化石在西宁盆地的地层对比中起到了非常重要的作用(李传夔、邱铸鼎, 1980; 邱铸鼎等, 1981; 青海省地质矿产局, 1985、1991; 刘梦儒, 1992; 青海省地质调查院, 2007; 肖国桥, 2009; Xiao G. Q. *et al*., 2012; Zan J. B. *et al*., 2015; Zhang W. L. *et al*., 2017), 因此, 对嵌齿象化石地点的考证和厘清, 为新生代西宁盆地演化的年代学研究提供了生物地层方面的关键证据。

1 地点考证

地点考证主要通过两条途径: 一是语音学方面的考证, 二是走访当地的村民。上世纪 50 年代以前中国常采用威妥玛式拼音法(Wade-Giles romanization), 其中利用送气符号(')来表示送气的声母, 在中国推广汉语拼音方案前广泛被用于人名、地名注音(威妥玛, 1886)。按照汉语拼音与威妥玛式拼法的对照, 化石地点 1, "Kansu, Sining Fu, SW 20 li, Shui Ch'üan P'u, SE 5 li, Tiao Kou" 其中的四个地名转换成汉语拼音应该是: Gansu, Xining Fu, Shuiquanpu, Diaogou; 前两个地名指的是甘肃、西宁府。据《西宁市志·大事记》记载: 公元 1725 年(雍正三年)改西宁卫为西宁府, 隶属甘肃省, 其所属西宁附廓为西宁县。公元 1913 年(民国 2 年)北洋政府裁撤西宁府。公元 1929 年(民国 18 年), 1 月 1 日, 青海省政府正式成立, 以西宁为省会(西宁市志编纂委员会, 1998)。其中还提到: 在公元 1923 年, 瑞典学者安特生(Andersson)以中国政府矿业顾问身份来到西宁十里铺进行墓葬发掘(西宁市志编纂委员会, 1998)。



A. 西宁盆地的地形和地貌(DEM 图像), 白色框线表示该研究的区域, 1. 西宁市中心, 2. 吊沟剖面, 3. 八盘山剖面, 4. 谢家剖面; B. 吊沟、八盘山和谢家化石点的位置(Google Earth 图像)
A. Topography and geomorphology of the Xining Basin(DEM image). White frame denotes the study area in the present paper. 1. center of the Xining city; 2. Diaogou locality; 3. Bapanshan locality; 4. Xiejia locality. B. location of the Diaogou, Bapanshan, and Xiejia fossil localities(Google Earth image)

图 2 西宁盆地长鼻类化石点的地理信息
Fig. 2 Geographic information of fossil proboscidean localities from the Xining Basin

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

根据青海省地质调查院提供的线索, 我们在西宁市城中区总寨镇泉尔湾村(原属湟中县), 访问了泉尔湾村村民方胜邦和方振满。根据他们的叙述, 泉尔湾村(GPS 坐标: 36°32′24.23″N, 101°42′59.21″E)原名“水泉堡”, 与地点 1 的第三个地名 Shui Ch’üan P’u(Shuiquanpu)发音一致。通过在 Google Earth 上距离测量, 泉尔湾村在西宁西关(原市中心)西南方向, 直线距离 10.31 km, 与 Hopwood(1935)记载的 SW(south-west 西南)20 li(里)非常吻合。方胜邦和方振满均提到了泉儿湾村东南的吊沟化石点, 出产过大量的龙骨, 并且听闻上世纪 20 年代有外国人在这里收集过化石(应该指安特生等人), 吊沟的发音与地点 1 中的第四个地名 Tiao Kou(Diaogou)吻合。方胜邦还带领我们找到了吊沟化石点(GPS 坐标: 36°30′53.60″N, 101°43′19.60″E), 与泉儿湾的直线距离为 2.59 km, 和 Hopwood(1935)记载的 SE(south-east 东南)5 li(里)非常吻合。此外, 邱铸鼎等人在石油队的带领下在吊沟收集过长鼻类化石(邱铸鼎等, 1981)。综合以上所有证据, 表明吊沟化石点即为 Hopwood(1935)记载的间型嵌齿象的正型地点。

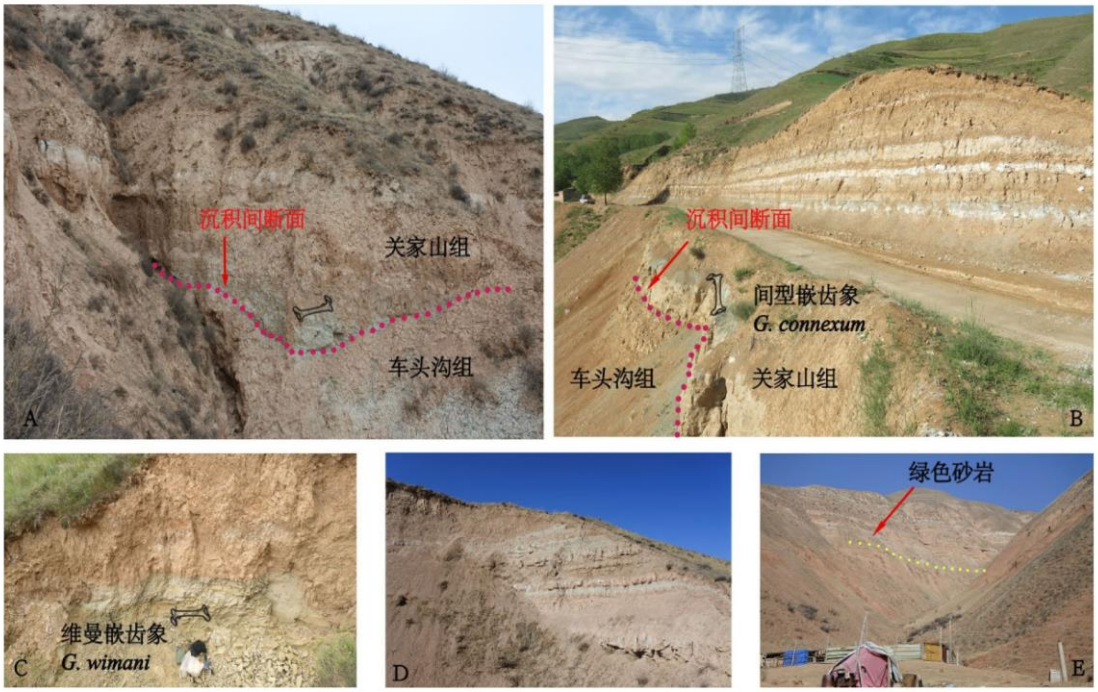
化石地点 2, “Kansu, Sining Hsien from city SE 35 li, Hsin T’ien P’o N 3 li, Pa P’an Shan”, 四个地名转换成汉语拼音应该是: Gansu, Xining Xian, Xintianpu, Bapanshan。其中第二个地名应为西宁县, 据《西宁市志·大事记》, 西宁府和西宁县是同一位置, 前文已述(西宁市志编纂委员会, 1998)。我们到西宁市湟中县田家寨镇新村村进行走访, 通过一位名叫李宣禄的老人了解到: 新村村(GPS 坐标: 36°29′42.29″N, 101°49′28.40″E)原名新添堡, 发音与第三个地名 Hsin T’ien P’o (Xintianpu)一致。该地名在人民公社时期改名为新村村。村北八盘山上部的“青土”层中出产“龙骨”, 在 50 年代和 70 年代当地都有大规模挖掘“龙骨”活动。通过在 Google Earth 上距离测量, 新村村在西宁西关(原市中心)西南方向, 直线距离 17.11 km, 与 Hopwood(1935)记载的 SE 35 Li(里)吻合; 而八盘山的发音 Bapanshan 与第四个地名 Pa P’an Shan 一致。在方胜邦的带领下, 我们找到了八盘山化石地点(GPS 坐标: 36°30′35.60″N, 101°49′16.20″E), 与新村村的直线距离为 1.57 km, 与 Hopwood(1935)记载的 N 3 li(里)相吻合。综合以上证据, 八盘山化石点即为 Hopwood(1935)记载的维曼嵌齿象的正型地点。这也是在 Hopwood (1935)之后对八盘山地点的唯一的地质古生物学记载。

2　地质概况和地层剖面

西宁盆地位于青海省东北部, 青藏高原东北缘。西宁盆地在大地构造上处于祁连地块和北祁连造山带的中段, 东北部与阿拉善地块相邻, 西南部与西秦岭造山带相邻(肖国桥, 2009)。受新生代印度板块向欧亚板块俯冲的影响, 在拉脊山断裂带和祁连山南北两条深大断裂带控制下, 发育了从晚古新世到更新世比较连续的陆相沉积(图 2A)。从下到上分别为上古新统—下始新统祁家川组、中始新统—下渐新统洪沟组、下渐新统—上渐新统马哈拉沟组、上渐新统—下中新统谢家组、下中新统车头沟组、中中新统—上中新统关家山组、上中新统—下上新统莫家庄组, 以及之上的风成黄土(青海省地质调查队, 1985; 刘梦儒, 1992; 肖国桥, 2009; Zhang W. L. *et al*., 2017; Yang R. S. *et al*., in press)。其中, 关家山组和莫家庄组原来被划为咸水河组, Zhang W. L. 等(2017)和 Yang R. S. 等(in press)采用新的划分取代“咸水河组”, 以便与兰州盆地的同名组相区分, 避免不必要的混乱。在谢家村附近的谢家组下部发现了著名的的谢家动物群(李传夔、邱铸鼎, 1980), 成为中国新生代谢家期和谢家阶的命名地点。关于谢家剖面, 武力超等(2006), Dai S. *et al*.(2006), Xiao G. Q. *et al*.(2012), Zan J. B. *et al*.(2015)均进行过深入的古地磁研究, 但是谢家剖面的最上部仅仅到了关家山组的最底部, 对于关家山组的大部分层位, 这些研究中均没有涉及。

我们对西宁盆地间型嵌齿象正型地点所在的吊沟剖面, 和维曼嵌齿象正型地点所在的八盘山剖面进行了详细的地层观察。八盘山剖面与谢家剖面均位于西沟河的西侧, 东北距谢家剖面约 7 km(图 2B)。该剖面从下往上依次出露马哈拉沟组、谢家组、车头沟组、关家山组, 其中, 最下部的马哈拉沟组只出露了最上部, 而上部的关家山组仅出露下部。该剖面下部的马哈拉沟组和谢家组以红棕色、灰绿色湖泊相的中—厚层泥岩、石膏质泥岩为主, 并含有大量成层的准同生石膏; 中部车头沟组石膏逐渐减少, 颜色逐渐变黄, 碳酸钙质成分逐渐增多, 偶夹有河道相的灰黄、灰白色粉砂岩、细砂岩, 并含有河漫滩沉积及古土壤层; 上部关家山组褐黄色泥岩中含多层湖泊相中—厚层灰白色泥灰岩或钙质泥岩, 其底部凹凸不平, 且有冲刷—填充构造, 说明存在沉积间断(图 3A, 3B)。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



A. 八盘山剖面关家山组和车头沟组的沉积间断面; B. 吊沟剖面关家山组和车头沟组的沉积间断面, 同时也是间型嵌齿象化石层位(绿色砂砾岩层); C. 八盘山维曼嵌齿象(*Gomphotherium wimani*)化石地点及层位(绿色砂砾岩层); D. 吊沟剖面的"斑马层"; E. 野牛沟地区的"斑马层"及沉积间断面之上的绿色砂岩(黄色虚线)

A. hiatus between the overlying Guanjiashan Formation and the underlying Chetougou Formation, in the Bapanshan Section; B. hiatus between the overlying Guanjiashan Formation and the underlying Chetougou Formation, in the Diaogou Section, also denoting the fossiliferous horizon of *Gomphotherium connexum* (greenish sandstones and conglomerates); C. fossiliferous horizon of *Gomphotherium wimani* from Bapanshan Section(greenish sandstones and conglomerates); D. multilayer of marlstones("zebra bands") in the Diaogou Section; E, multilayer of marl stones("zebra bands") in Yeniugou area and the greenish sandstones just above the hiatus(yellow dotted line)

图 3 吊沟和八盘山地区的野外露头照片

Fig. 3 Photographs of outcrops of the study area

八盘山剖面(起点 36°30′27.19″N, 101°49′23.53″E)(图 4A)描述如下:

第四系草山覆盖

~~~~~~不 整 合~~~~~~

关家山组

32. 灰橙色块状泥质粉砂岩, 夹浅绿色中层状泥灰岩 5.5 m

31. 浅绿色厚层状泥灰岩 0.8 m

30. 浅绿色薄层状泥灰岩 1.1 m

29. 暗黄橙色厚层状泥岩 0.5 m

28. 浅绿色薄层状泥灰岩 0.05 m

27. 暗黄橙色块状泥岩 2.0 m

26. 灰橙色块状泥质粉砂岩, 底部钙质胶结 5.5 m

25. 浅棕色薄层状粉砂质泥岩, 含植物根系 0.08 m

24. 浅绿色中层状泥灰岩 0.3 m

23. 淡黄橙色厚层状泥灰岩 0.8 m

22. 浅绿色中层状泥岩, 相变为浅棕色、黄棕色薄层状含砾砂岩、泥岩互层, 有水平及波状层理, 含大量粒径 1~5 cm 钙质粉砂岩结核 4.5 m

21. 灰橙色块状粉砂岩, 含有浅绿色钙质粉砂质团块 4.5 m

20. 浅橄榄灰色块状中粒长石石英砂岩,孔隙胶结, 局部为浅橄榄棕色, 含化石及石膏碎片, 底部为沉积间断面, 含哺乳动物化石 *Gomphotherium wimani*,? *Palaeotragus* sp.,*Palaeomeryx* (*Sinomeryx*) sp., *Micromeryx* sp., *Tachyoryctoides* sp. 1.5 m

……假 整 合……

车头沟组

19. 灰橙色块状粉砂质泥岩, 夹有淡黄橙色钙质粉砂质结核, 直径约 10 cm 3 m

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net
~~~~~~

18. 灰橙色块状粉砂质泥岩, 夹有浅橄榄灰色薄层状粉砂质泥岩, 其中在 9 m、42 m 和 84 m 处分别有厚约 1 m 的暗黄橘色中层状钙质泥质粉砂岩, 偶夹浅黄棕色薄层状钙质泥质粉砂岩　100.5 m

17. 浅棕色块状粉砂质泥岩, 夹浅橄榄灰色薄层状粉砂质泥岩。其中在 8 m、15.5 m、27 m 和 48.5 m 处分别有厚约 1 m 的暗黄橙色中层状钙质泥质粉砂岩, 偶夹浅黄棕色薄层状钙质泥质粉砂岩　80 m

16.浅棕色薄层状含石膏泥岩, 石膏在底部 30 cm 和上部 50 cm 很富集　1.8 m

15. 棕色块状粉砂质泥岩, 夹有深黄绿色薄层状泥岩　20 m

14. 黄棕色薄层状厚约 15 cm 的钙质粉砂质泥岩　1.5 m

13. 浅棕色中层状中细粒长石砂岩, 有小规模平行层理和板状交错层理　0.3 m

12. 浅棕色与黄棕色薄层状粉砂质泥岩　0.5 m

11. 浅黄棕色薄层状粉砂岩　2.6 m

……假　整　合……

谢家组

10. 棕色块状含粉砂泥岩, 夹浅橄榄灰色薄层状泥岩, 在 13 m 和 32.5 m 处的浅橄榄灰色薄层状泥岩中, 夹蓝绿色土状矿物, 下部含小哺乳动物化石碎片　61.5 m

9. 浅橄榄灰色和灰绿色薄层状泥岩, 夹有棕色泥岩, 夹薄层石膏　1 m

8. 深黄棕色块状、局部薄层状的含粉砂泥岩, 断面有铁锰质斑痕, 有微层理　7.5 m

7. 深黄棕色中层状含粗砾长石岩屑砂岩, 局部含钙质, 孔隙胶结, 有小规模平行层理和板状交错层理, 中间有一深黄棕色厚层状泥岩, 含哺乳动物化石碎片(相当于谢家动物群)　1.5 m

6. 红棕色块状含粉砂泥岩, 夹浅棕色中层或厚层状含钙粉砂质泥岩　16.9 m

5. 红棕色块状泥岩夹灰橄榄色中层状泥岩　19.2 m

4. 深黄棕色薄层状石膏质泥岩, 相变为浅橄榄色夹有深黄绿色含砾的粗粒长石砂岩, 石膏质孔隙胶结, 有小规模板状交错层理, 砾石为棱角状, 分选好, 主要为直径 5 mm 以下的石英岩及变质岩　0.3 m

……假　整　合……

马哈拉沟组

3. 红棕色块状泥岩夹灰橄榄色中层状泥岩　3 m

2. 深黄棕色薄层状石膏质泥岩, 相变为浅橄榄色夹有深黄绿色含砾的粗粒石膏质长石砂岩, 孔隙胶结, 有小规模板状交错层理, 砾石为棱角状, 分选好, 主要为直径 5 mm 以下的石英岩及变质岩　0.33 m

1. 红棕色块状泥岩, 夹有深黄棕色薄层状泥岩, 夹有多层厚 2 cm 间距 30 cm~1.5 m 的薄层状石膏, 斜向裂隙中有 2 cm 厚的石膏层　16.5 cm

0. 灰绿色、深黄色薄层状石膏质泥岩与红棕色中层状石膏质泥岩互层, 层间有浅黄褐色铁质斑痕, 中夹有薄层状石膏, 斜向裂隙中间有＜6 cm 的石膏层　未见底

吊沟剖面位于八盘山剖面正东约 8 km, 该剖面覆盖较为严重, 仅出露下部的车头沟组和上部的关家山组。车头沟组和关家山组的岩性和沉积特征与八盘山剖面完全一致。关家山组的底部存在褐黄色和绿色的块状—厚层状砂砾岩, 底面起伏较大, 并有较明显的冲刷—填充构造。

吊沟剖面(起点 36°31′01.74″N, 101°43′21.23″E)(图 4B)描述如下:

第四系草山覆盖

~~~~~~不 整 合~~~~~~

关家山组

29. 浅棕色块状含钙粉砂质泥岩, 夹有深黄绿色钙质团块, 裂隙中含铁锰质胶膜　5 m

30. 浅棕色厚层状钙质粉砂质泥岩或泥灰岩, 裂隙中含铁锰质胶膜　0.5 m

27. 浅棕色块状含钙粉砂质泥岩, 夹有深黄绿色钙质团块, 裂隙中含铁锰质胶膜　4.5 m

28. 橘粉色或红橙色薄层状泥岩　0.1 m

25. 浅绿色中层状泥灰岩, 夹浅棕色薄层状粉砂质泥岩, 下部含直径约 15 cm 的浅绿色钙质结核　3 m

25. 浅棕色厚层状钙质粉砂质泥岩或泥灰岩, 裂隙中含铁锰质胶膜　0.8 m

24. 浅棕色块状含钙粉砂质泥岩, 夹有深黄绿色钙质团块, 裂隙中含铁锰质胶膜　2 m

23. 橘粉色或红橙色薄层状泥岩　0.2 m

22. 浅黄绿色与灰橘粉色中层状泥灰岩　0.4 m

21. 浅绿色中层状泥灰岩, 顶部颜色过渡为灰橘粉色　0.4 m

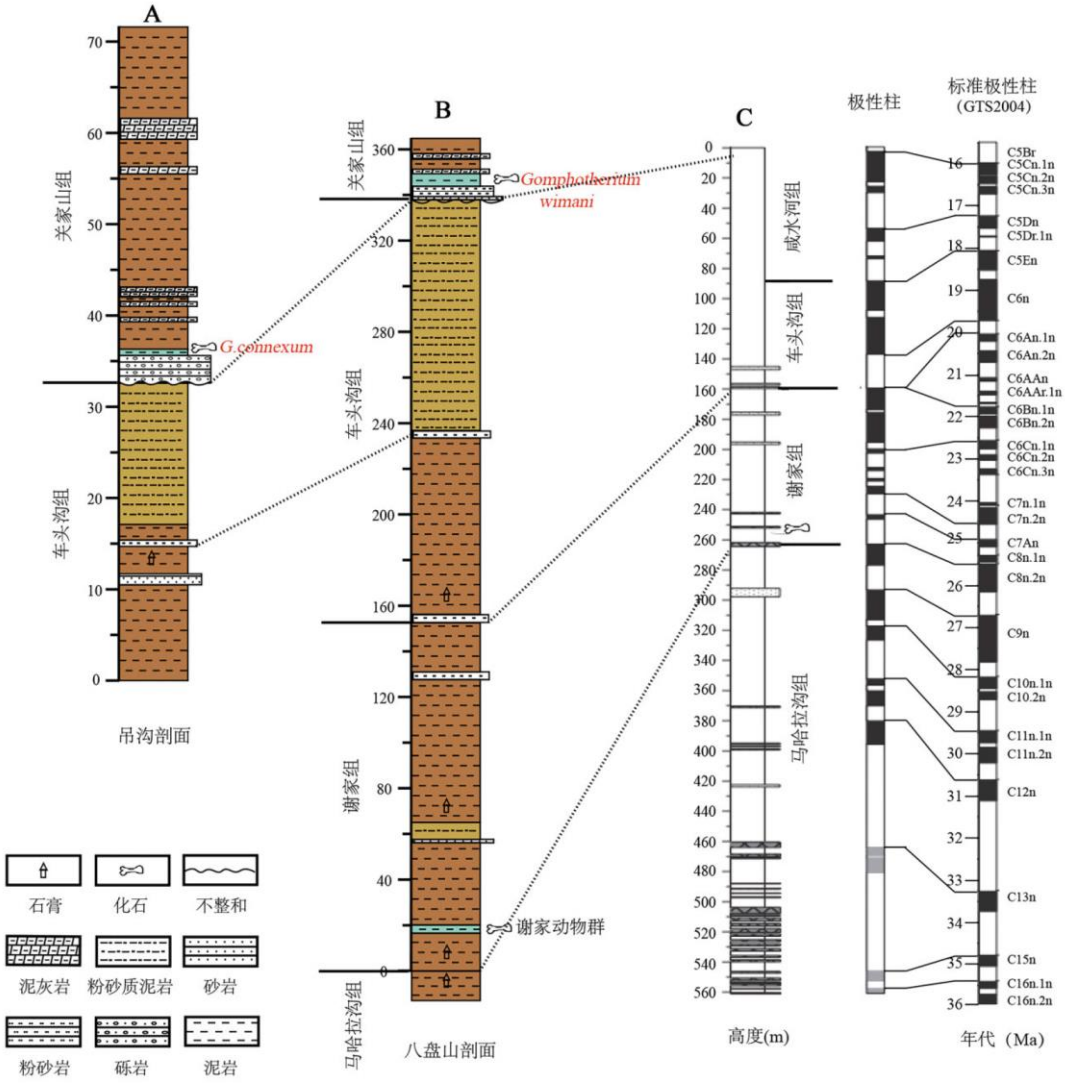
20. 浅棕色厚层状钙质粉砂质泥岩或泥灰　2 m

19. 浅棕色块状粉砂质泥岩, 40 cm 处夹有 10 cm 灰橘粉色薄层状泥灰岩　1.5 m

18. 淡橘色厚层状钙质泥岩和浅棕色泥岩, 断面有树枝状孔洞, 洞中含方解石晶体　0.7 m

17. 浅棕色中层状含钙粉砂质泥岩, 夹浅棕色薄层状粉砂质泥　9 m

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net
~~~~~~



A. 吊沟剖面; B. 八盘山剖面; C. 塔山剖面及磁性地层结果(据 Xiao G. Q. *et al*., 2012)
A. Diaogou Section; B. Bapanshan Section; C. Tashan Section with magnetostratigraphy (Xiao G. Q. *et al*., 2012), correlating to the GTS2004(Gradstein *et al*., 2004)

图 4 吊沟、八盘山和塔山剖面柱状图和地层对比
Fig. 4 Histograms showing the correlation of the Diaogou, Bapanshan, and Tashan sections.

16. 浅黄绿色块状泥灰岩, 裂隙中含铁锰胶膜 1 m
15. 浅黄绿色中层状钙质粉砂质泥岩, 夹浅棕色薄层状粉砂质泥岩 0.6 m
14. 青白色厚层状泥灰岩, 裂隙中含铁锰质胶膜, 断面可见方解石晶屑 0.5 m
13. 浅棕色厚层状钙质粉砂质泥岩或泥灰岩, 裂隙中含铁锰质胶膜, 夹黄棕色薄层状泥岩 1.2 m
12. 浅绿色厚层状泥灰岩, 裂隙中含铁锰质胶膜 0.5 m
11. 浅棕色块状含钙粉砂质泥岩, 夹有深黄绿色钙质团块, 裂隙中含铁锰质胶膜 3 m
10. 浅黄绿色中、厚层状钙质粉砂质泥岩, 含大量岩屑杂质及哺乳动物化石, 含 *G. connexum*, Amebelodontidae gen. et sp. indet 0.7 m
9. 浅黄棕色, 顶部变为浅黄绿色块状砾质长石岩屑粗粒砂岩, 接触胶结, 局部具小

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

规模平行层理。砂岩中夹同色砂质卵砾, 分选差, 次磨圆状, 杂基支撑, 砾石粒径大于 3 cm, 最大粒径约 10 cm, 砾石以杂色石英岩为主。砂岩中夹暗黄橙色薄层—中层状泥岩, 底部不平。　1.2~3 m

……假　整　合……

车头沟组

8. 浅棕色厚层状粉砂质泥岩, 夹有深黄绿色泥质团块, 与厚层状暗黄橙色含钙粉砂岩互层　6.0 m

7. 黄褐色薄层状含粉砂岩屑长石细砂岩与暗黄橙色薄层状泥岩互层, 砂岩含大量云母碎屑, 泥岩局部有水平微层理, 含石膏薄片　0.5 m

6. 浅棕色厚层状粉砂质泥岩, 夹有深黄绿色泥质团块, 与暗黄橙色厚层状含钙粉砂岩互层　9 m

5. 浅棕色块状钙质粉砂质泥岩, 夹有深黄绿色钙质结核, 结核直径约 8 cm　1 m

4. 浅棕色厚层状粉砂质泥岩, 夹有深黄绿色泥质团块　0.7 m

3. 暗黄橙色厚层状含钙粉砂岩, 断面有树枝状孔洞, 其中有方解石晶体　0.7 m

2. 暗黄橙色块状粉砂质泥岩, 局部有水平层理, 含不规则石膏薄片　3 m

1. 黄褐色薄层状含粉砂岩屑长石细砂岩, 含大量云母碎屑　1.2 cm

0. 浅棕色块状粉砂质泥岩, 夹有深黄绿色泥质团块　(未见底)

3 讨　论

3.1　吊沟、八盘山剖面的地层对比及其在西宁盆地构造和沉积环境演化方面的意义

吊沟剖面、八盘山剖面, 经典的谢家剖面、及其附近的塔山剖面的地层可以很好地对比。在西宁盆地中, 这几个剖面均位于西宁市南部一块约 270 km^2 的梯形区域范围之内(图 2A, 白色框线中)。东西边分别以西沟河和南川河为界, 南边是拉脊山断裂, 北边是湟水谷地(即西宁市城东区)。其东北角为泥盆纪小峡英云闪长岩(青海省地质调查院, 2007), 受该岩体的影响, 西沟河谷形成一 NW 向背斜(小峡背斜)(Yang R. S. *et al.*, in press)。八盘山剖面与谢家剖面同位于西沟河谷西侧, 地貌上连为一体, 地层亦直接相连, 只不过八盘山剖面位于西沟河更上游的位置, 靠近盆地南缘, 出露层位比谢家和塔山剖面较高, 最下部仅出露马哈拉沟组的最顶部(肖国桥, 2009: p.31, 所谓“绿腰带”层), 上部则出露了关家山组(原咸水河组下部)下部较多的层位。由于位于小峡背斜西翼, 整套地层向西北倾斜, 从八盘山剖面向西的喇家沟和野牛沟, 下部的马哈拉沟组和谢家组逐渐没入地表以下, 到接近南川河的吊沟剖面, 仅车头沟组的上部出露, 而关家山组出露的层位更多, 但上不见顶。

吊沟剖面和八盘山剖面的关家山组底部均存在一层绿色、分选较差的河道滞留相砂砾岩沉积。砂砾岩底面凹凸不平, 在吊沟剖面, 这种起伏的高度差达到了 1.8 m, 表现出明显的沉积间断, 为平行不整合构造(图 3A, 3B)。间型嵌齿象和维曼嵌齿象的出产层位, 均位于这一层绿色砂砾岩之中(图 2B, 2C)。在绿色砂砾岩之下, 为车头沟组洪泛平原相褐黄色粉砂质泥岩, 几乎不具水平层理, 并夹有多层古土壤; 在绿色砂砾岩之上, 则为褐黄色泥岩夹多层灰白、灰绿色泥灰岩条带的“斑马层”(图 2D), 即我们所说的关家山组。

在吊沟剖面和八盘山剖面之间的野牛沟和喇家沟, 均可以发现“斑马层”及其底部的绿色砂砾岩和沉积间断(图 2E), 说明这一沉积构造在西宁市东南部的西宁盆地具有普遍性。但在谢家和塔山剖面, 这一沉积间断并不明显。其原因是在谢家和塔山剖面, 由于小峡背斜的影响, 关家山组仅在剖面的最上部出露, 第四系的覆盖及表面风化作用对原生层位的破坏非常严重, 并且由于谢家和塔山剖面相对更靠近盆地中心, 水动力条件减弱, 岩性变细。但该沉积间断面在塔山的顶部仍然存在, 位于塔山剖面 5 m 的位置(肖国桥, 2009: p. 69, fig. 5-3, 图中标记为带问号的不整合面)。

在过去的文献中, 咸水河组(下部大体上相当于关家山组)的底部划分存在争议。本文的划分与李传夔、邱铸鼎(1980)基本一致, 李传夔、邱铸鼎 将咸水河组的底界划在第一层泥灰岩之下(1980: 图 1), 盖因砂岩在谢家剖面已经变细, 但其上的泥灰岩层仍然延续到此处。有资料表明咸水河组的底界远在这一沉积间断面之下(刘梦儒,1992; 肖国桥, 2010; Xiao G. Q. *et al.*, 2012)的划分。例如肖国桥(2009)将咸水河组的底界划在塔山剖面的 87.8 m 处, 依据是之上的地层不再出现石膏。显然, 该划分在岩性上并不易于识别, 在肖国桥(2009: p. 30 fig. 3-4)地层划分中, 咸水

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

河组的下界也标记了问号，显示出肖国桥对该划分的怀疑。在这里，我们同意 Zhang W. L. 等(2017)于方小敏(个人通讯)的意见，由于咸水河组首先被用于兰州盆地，西宁盆地的“咸水河”组与兰州盆地的同名组岩性和时代存在一定的差异，无法直接对比，使用该名称会引起不必要的混乱，使用重新定义的关家山组和莫家庄组则避免了这种矛盾和混乱，并且关家山组的底界应该划在绿色河道相砂砾岩限定的沉积间断面的位置。根据的古地磁数据，这一界线恰好在标准磁性柱GTS2004的正向带C5Cn.1n的顶部，年龄约为 16 Ma，亦即：车头沟组顶界的年龄值为 16 Ma (肖国桥, 2009; Xiao G. Q. *et al.*, 2012)，而关家山组的底(即间型嵌齿象和维曼嵌齿象)的年代由于有沉积间断的存在，可能会比 16 Ma 稍晚，这里估计为 16～15 Ma 之间(图 4C)。

吊沟剖面和八盘山剖面的关家山组均以多层灰白、灰绿色中—厚层泥灰岩条带夹于黄褐色泥岩中为典型特征，即所谓“斑马层”(图 3B, 3D)，塔山剖面顶部的钻孔也表明“斑马层”在西宁市东南部这一区域广泛存在(Zan J. B. *et al.*, 2015)。斑马层与马哈拉沟组的多层石膏层相似，代表了短暂的浅湖与洪泛平原的交替发育。在西宁市以北，如莫家庄剖面，关家山组中泥灰岩条数较少(Yang R. S. *et al.*, in press)。很可能西宁市东南部位于前陆盆地的前渊沉积带上，湖泊相对比较发育；而西宁市以北更接近于前隆沉积带，以洪泛平原为主，湖泊较少发育。由于西宁盆地和临夏盆地的成因和发育过程存在同构性，关家山组和东乡组反映了相似的沉积环境。维曼嵌齿象也在东乡组发现(杨湘雯等，2017)，很可能暗示关家山组和东乡组的时代也具有可比性。

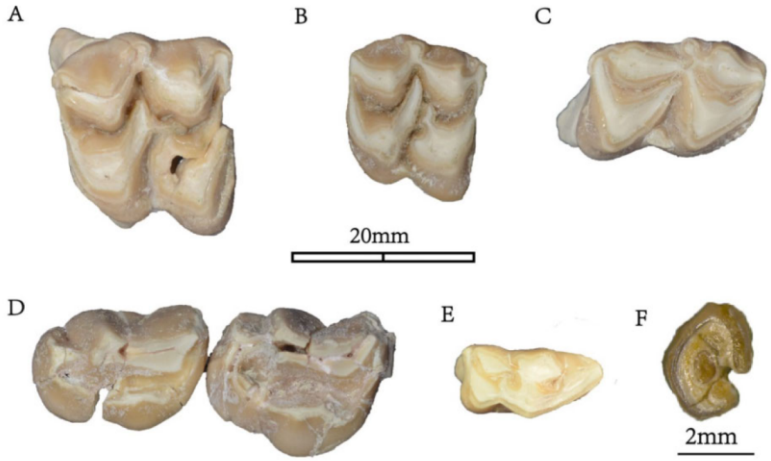
3.2 间型嵌齿象和维曼嵌齿象时代和演化关系的讨论及其在西宁盆地气候及动物群演化的意义

在本文之前，对于间型嵌齿象和维曼嵌齿象(图 1)生存的时代问题，存在两种不同的意见。第一种意见以 Tobien *et al.*(1986)为代表，认为间型嵌齿象比维曼嵌齿象形态原始，时代要早。Wang S. Q. *et al.*(2015)，杨湘雯(2017)，杨湘雯等(2017)均采用此说法。Tobien *et al.*(1988: p. 200, table 4)进一步将间型嵌齿象的时代对比为山旺期，而维曼嵌齿象对比为通古尔期，但这种对比并没有直接的地层学依据。Tassy(1985)从嵌齿象属中划分出联合嵌齿象类群(*G. annectens* group)和窄齿嵌齿象类群(*G. angustidens* group)。Wang S. Q.(2014), Wang S. Q. *et al.*(2017)进一步提出了“衍生嵌齿象类群”(derived *Gomphotherium* group)。通过臼齿形态学的比较认为间型嵌齿象与属型种窄齿嵌齿象很相似，应归入窄齿嵌齿象类群，而维曼嵌齿象与施泰因海姆嵌齿象(*G. steinheimense*)、进步嵌齿象(*G. productum*)等相似，应归入衍生嵌齿象类群(Wang S. Q. *et al.*, 2017, 杨湘雯, 2017, 杨湘雯等, 2017)。并且，窄齿嵌齿象类群和衍生嵌齿象类群都是单系群，因此，间型嵌齿象和维曼嵌齿象代表了两个不同的演化方向，其形态学特征不能作为判断年代早晚的依据。

第二种意见认为两者时代相同(邱铸鼎等，1981；刘梦儒，1992)，与本文结论一致。但是该意见的来源是邱铸鼎等(1981)报道的在吊沟地点发现的一件“维曼嵌齿象”的右 M3(IVPP V6018.1)。根据杨湘雯(2017)的研究，这件 M3 比八盘山维曼嵌齿象的正型标本齿冠低且窄长，齿柱的分裂趋势弱。杨湘雯(2017: p. 41)认为，这件标本有可能是维曼嵌齿象的祖先类型，也有可能属于铲齿象科(Amebelodontidae)。杨湘雯(2017)显然受到了 Tobien *et al.*(1986, 1988)对间型嵌齿象和维曼嵌齿象年代判断的影响；但同时也说明，以吊沟发现的“维曼嵌齿象”的右 M3 这件标本判定间型嵌齿象和维曼嵌齿象时代相同并不充分。

根据吊沟和八盘山地层的对比，间型嵌齿象和维曼嵌齿象的正型地点的层位相同，时代相同，并且由于有古地磁年代的约束(肖国桥，2009；Xiao G.Q. *et al.*, 2012; Zan J. B. *et al.*, 2015)，可以充分讨论间型嵌齿象和维曼嵌齿象的时代问题。前文已述，西宁盆地关家山组底部，即间型嵌齿象和维曼嵌齿象正型地点时代应比 16 Ma 稍晚。间型嵌齿象还报道于新疆准噶尔盆地北缘的哈拉玛盖组(Wang S. Q. *et al.*, 2015)，发现于播塔莫音地点的第三层，相当于哈拉玛盖组的上部化石层(王世骐，未发表数据)。根据叶捷等(2012)，哈拉玛盖组的底界的年代为 16.8 Ma，但组内部由于岩性的原因，没有古地磁数据，这里将哈拉玛盖组间型嵌齿象的层位估计为16～15 Ma，与关家山组底部化石层的年代相同。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



A. 古鹿(*Palaeomeryx*(*Sinomeryx*)sp.), 右第二上臼齿; B. 古鹿(*Palaeomeryx*(*Sinomeryx*)sp.), 右第四上乳前臼齿; C. 古鹿(*Palaeomeryx*(*Sinomeryx*)sp), 右第二下臼齿; D. ？古麟(?*Palaeotragus* sp.), 左第二和第三上前臼齿 E. ？古麟(?*Palaeotragus* sp.), 右第三上乳前臼齿; F. 拟速掘鼠(*Tachyoryctoides* sp.), 左第一下臼齿前半部
A.*Palaeomeryx*(*Sinomeryx*)sp., right M2; B.*Palaeomeryx*(*Sinomeryx*)sp, right DP4; C.*Palaeomeryx* (*Sinomeryx*) sp., right m2; D. ?*Palaeotragus* sp., left P2 and P3; E. ?*Palaeotragus* sp, right DP3; F. *Tachyoryctoides* sp., left m1

图 5　八盘山动物群的颊齿的冠面图
Fig. 5　Cheek teeth of the Bapanshan Fauna, all in occlusal view

关于维曼嵌齿象正型地点的年代, 杨湘雯等(2017), 杨湘雯(2017)初步估计为 14～15 Ma, 现在根据我们最新的地层对比, 八盘山维曼嵌齿象正型地点的年代应调整为 16～15 Ma。除了正型地点, 维曼嵌齿象化石的出产地点较多, 其中比较重要的地点是杨湘雯(2017)、杨湘雯等(2017)报道的临夏盆地郑家坪地点, 该地点的维曼嵌齿象化石位于东乡组。上文已经讨论过, 东乡组与关家山组沉积环境和年代均可能相近。根据邓涛等对 Fang X. M. 等(2003)古地磁数据的重新解释(Deng T 等，2013) ,东乡组的开始约为 17 Ma, 杨湘雯等(2017), 杨湘雯(2017)将郑家坪地点的时代估计为 15～14 Ma, 与八盘山地点的时代接近。另一个重要地点是兰州的泉头沟, 也是维曼嵌齿象种型群的产地之一。古地磁数据均认为, 泉头沟地点的时代约为 15 Ma 左右(Qiu Z. X. *et al.*, 2001; Yue L. P. *et al.*, 2001), 而杨湘雯等(2017)认为估计为 13 Ma, 依据是泉头沟发现的铲齿象(*Platybelodon*)可以与通古尔推饶木的铲齿象对比, 但这种间接的比较的依据不是很充分。我们的判断更倾向于前者, 泉头沟的年代可能约为 14～15 Ma。

刘梦儒(1992)提出了吊沟地方哺乳动物群, 包括间型嵌齿象、维曼嵌齿象、青海跳兔(*Alloptox chinghaiensis* Qiu *et al.*, 1981)、李氏近古仓鼠(*Pleisiodipus leei* Young, 1927)、民和库班猪(*Kubanochoerus minheensis* (Qiu *et al.*, 1981))、继土耳其羊(*Turcocerus noverca* (Pilgrim, 1934))、青海皇冠鹿(*Stephanocemas chinghaiensis* Young, 1964)等。然而, 上述动物并非发现于同一地点, 也不能证明属于同一层位, 因此, 这种归类是有风险的。例如民和库班猪的p4下原尖和下后尖明显可区分, 要比其他中中新世早期的库班猪进步(邱占祥等, 1987)。我们在民和盆地来家山地点发现的民和库班猪与进步的葛氏铲齿象(*Platybelodon grangeri*)共生, 时代可能是最晚的中中新世, 比吊沟和八盘山晚约 3～4 Ma。所以我们建议仅将位于西宁盆地关家山组底部的化石归为吊沟动物群, 除间型嵌齿象、维曼嵌齿象之外, 还有我们在同一层位新发现的哺乳动物群, 如 *Palaeotragus* sp., *Palaeomeryx* (*Sinomeryx*) sp., *Micromeryx* sp.等(图 5)。但无论如何, 吊沟动物群是以大型的哺乳动物, 尤其是长鼻类的大量出现为特色, 与中国西北地区的其他一些动物群, 如新疆准噶尔盆地哈拉玛盖组、宁夏同心地区彰恩堡组、甘肃临夏盆地东乡组的哺乳动物群相似(邓涛, 2016), 属于中中新气候适宜期(Zachos *et al.*, 2001)。吊沟动物群的嵌齿

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

象、古鹿(*Palaeomeryx*)、小古麝(*Micromeryx*)等动物均适宜于温暖湿润的森林环境，而塔山剖面顶部的钻孔的颜色、磁化率、氧同位素等指标均证明，西宁盆地关家山组下部对应于中中新气候适宜期(Zan J. B. *et al*., 2015)，很好地解释了间型嵌齿象、维曼嵌齿象等大型动物在这一时期的突然出现。

4 结 论

笔者通过语音学考证和走访当地的村民，确定了Hopwood (1935)所记载的间型嵌齿象(*Gomphotherium connexum*)和维曼嵌齿象(*Gomphotherium wimani*)的种型群材料的精确出土地点：吊沟和八盘山。对正型地点剖面的地层对比证明二者均位于关家山组底层绿色河道相的砂砾岩之中。同时根据前人对附近谢家剖面和塔山剖面的古地磁结果，认为间型嵌齿象和维曼嵌齿象的正型地点的年代约为 16～15 Ma。经过形态学的比较认为：间型嵌齿象应归入窄齿嵌齿象类群，而维曼嵌齿象应归入衍生嵌齿象类群；二者并非代表原始和进步类型，而是表示两种不同的演化方向。

感谢中国科学院地质与地球物理研究所方小敏，中国科学院古脊椎动物与古人类研究所邓涛，葛俊逸，邱铸鼎，李传夔在地层对比方面提供的帮助；青海省地质调查院拜永山，保光普，丁玉进和中国科学院古脊椎动物与古人类研究所孙丹辉等人在野外考察中提供的指导和帮助；中国科学院地质与地球物理研究所郭利成和吴佳斌在作图方面的指点，笔者在此致以诚挚谢意！

参 考 文 献

邓 涛. 2016. 中国北方哺乳动物群在中中新世气候适宜期的记录和表现. 第四纪研究, **36**: 810-819.

李传夔, 邱铸鼎. 1980. 青海西宁盆地早中新世哺乳动物化石. 古脊椎动物与古人类, **18**(3): 198-214.

刘梦儒. 1992. 西宁－民和盆地上第三系层序及所含化石. 青海地质, (2): 1-17.

邱铸鼎, 李传夔, 王士阶. 1981. 青海西宁盆地早中新世哺乳动物化石. 古脊椎动物与古人类, **18**(3): 198-214.

邱占祥, 叶 捷, 霍福臣. 1988. 记宁夏同心发现的库班猪头骨化石. 古脊椎动物学报, **26**: 1-19.

青海省地质矿产局. 1985. 中华人民共和国区域地质调查报告(1/50000)《多巴幅》, 《西宁市幅》, 《田家寨幅》, 《高店幅》. 武汉: 中国地质大学出版社. 1-545.

青海省地质矿产局. 1991. 青海省区域地质志. 北京: 地质出版社. 1-665.

青海省地质调查院. 2007. 中华人民共和国区域地质调查专题报告(1/250000), 西宁市幅. 西宁: 青海省地质调查院. 1-365.

威妥玛(英), 1886. 语言自迩集（第二版）(张卫东译). 上海: 上海海关总督察统计署. 1-532.

武力超, 岳乐平, 王建其. 2006. 新近系谢家阶层型剖面古地磁年代学研究. 地层学杂志, **30**(1): 50-53.

西宁市志编纂委员会. 1998. 西宁市志•大事记. 西安: 陕西人民出版社. 1-239.

肖国桥. 2009. 西宁地区晚始新世—早中新世沉积的磁性地层与沉积环境演化研究[博士论文]. 西安: 中国科学院研究生院. 1-108.

杨湘雯. 2017. 临夏盆地中中新统维曼嵌齿象((*Gomphotherium wimani*))(长鼻目, 嵌齿象科)新材料研究[硕士论文], 北京: 中国科学院大学. 1-57.

杨湘雯, 李 雨, 王世骐. 2017. 临夏盆地中中新统维曼嵌齿象(*Gomphotherium wimani*)(长鼻目, 嵌齿象科))的头骨及颊齿. 古脊椎动物学报, **55**(4): 331-346.

叶 捷, 吴文裕, 倪喜军, 毕顺东, 孙继敏, 孟 津. 2012. 新疆准噶尔盆地北缘夺勒布勒津剖面的地层学及环境意义. 中国科学（地球科学）, **42**: 1523-1532.

Andersson J G. 1925. Geological notes from Kansu. Bulletin of the Geological Society of China, **4**: 15-18.

Dai S, Fang X M, Dupont-Nivet G, Song C H, Gao J P, Krijgsman W, Langereis C & Zhang W L. 2006. Magnetostratigraphy of Cenozoic sediments from the Xining Basin: Tectonic implications for the northeastern Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research, **111**(B11102): doi: 10.1029/2005JB004187

Deng T, Qiu Z X, Wang B Y, Wang X M & Hou S K. 2013. Late Cenozoic biostratigraphy of the Linxia Basin, northwestern China // Wang X M, Flynn L J & Fortelius M eds. Neogene Terrestrial Mammalian Biostratigraphy and Chronology of Asia. New York: Columbia University Press. 243-273.

Fang X M, Garzione C, Vood R V, Li J J & Fan M J. 2003. Flexural subsidence by 29 Ma on the NE edge of Tibet from the magnetostratigraphy of Linxia Basin. Earth and Planetary Science Letters, **210**: 545-560.

Fang X M, Wang J Y, Zhang W L, Zan J B, Song C H, Yan M D, Appel E, Zhang T, Wu F L, Yang Y B & Lu Y. 2016. Tectonosedimentary evolution model of an intracontinental flexural(foreland)basin for paleoclimatic research. Global and Planetary Change, **145**: 78-97.

Gradstein F M, Ogg J G & Smith A G eds. 2004. A Geologic Time Scale 2004. Cambridge: Cambridge University Press. 1-589.

Hopwood A T. 1935. Fossil Proboscidea from China. Palaeontologia Sinica, Series C, **9**: 1-108.

Mateer N J & Lucas S G. 1985. Swedish vertebrate palaeontology in China: A history of the Lagrelius Collection. Bulletin of the Geological Institutions of the University of Uppsala, New series, **11**: 1-24.

Qiu Z X, Wang B Y & Qiu Z D. 2001. Land mammal geochronology and magnetostratigraphy of mid-Tertiary deposits in the Lanzhou Basin, Gansu Province, China. Eclogae Geologicae Helvetiae, **94**: 373-385.

Simpson G G. 1945. The principles of classification and a classification of mammals. Bulletin of the American Museum of Natural History, **85**: 1-350.

Sun C C. 1936. On the stratigraphy of upper Huangho and Nanshan regions. Bulletin of the Geological Society of China, **15**(1): 75-85.

Tassy P. 1985. La place des mastodontes Miocènes de l'ancien monde dans la phylogénie des Proboscidea (Mammalia): hypothèses et conjectures. Unpublished Thèse Doctoratès Sciences. Paris: UPMC

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(Université Pierre et Marie CURIE).

Tobien H, Chen G F & Li Y Q. 1986. Mastodonts (Proboscidea, Mammalia) from the Late Neogene and Early Pleistocene of the People's Republic of China, part I: historical account, the genera *Gomphotherium*, *Choerolophodon*, *Synconolophus*, *Amebelodon*, *Platybelodon*, *Sinomastodon*. Mainzer Geowissenschaftliche Mitteilungen, **15**: 119-181.

Tobien H, Chen G F & Li Y Q. 1988. Mastodonts (Proboscidea, Mammalia) from the Late Neogene and Early Pleistocene of the People' s Republic of China, part II: the genera *Tetralophodon*, *Anancus*, *Stegotetrabelodon*, *Zygolophodon*, *Mammut*, *Stegolophodon*. Mainzer Geowissenschaftliche Mitteilungen, **17**: 95-220.

Wang S Q. 2014. *Gomphotherium inopinatum*, a basal *Gomphotherium* species from the Linxia Basin, China, and other Chinese members of the genus. Vertebrata PalAsiatica, **52**: 183-200.

Wang S Q, Duangkrayom J & Yang X-W. 2015. Occurrence of the *Gomphotherium angustidens* group in China, based on a revision of *Gomphotherium connexum* (Hopwood, 1935)and *Gomphotherium shensiensis* Chang and Zhai, 1978: continental correlation of *Gomphotherium* species across the Palearctic. Paläontologische Zeitschrift, **89**: 1073-1086.

Wang S Q, Li Y, Duangkrayom J, Yang X-W, He W & Chen S-Q. 2017. A new species of *Gomphotherium*(Proboscidea, Mammalia)from China and the evolution of *Gomphotherium* in Eurasia. Journal of Vertebrate Paleontology, **37**: 1-15.

Xiao G Q, Guo Z T, Guillaume D N, Lu H Y, Wu N Q Ge J Y, Hao Q Z, Peng S Z, Li F J, Abels H A & Zhang K X. 2012. Evidence for northeastern Tibetan Plateau uplift between 25 and 20 Ma in the sedimentary archive of the Xining Basin, Northwestern China. Earth and Planetary Science Letters, **317-318**: 185-195.

Yang R S, Fang X M, Meng Q Q, Zan J B, Zhang W L, Deng T, Yang Y B, Ruan X B, Yang L Y & Li B S. in press. Paleomagnetic constraints on the Middle Miocene-Early Pliocene stratigraphy in the Xining Basin, NE Tibetan Plateau, and the geologic implications. Geochemistry, Geophysics, Geosystems.

Young C C & Bian M N. 1937. Cenozoic geology of the Kaolan-Yungteng Area of Central Kansu. Bulletin of the Geological Society of China, **16**: 221-260.

Yue L P, Heller F, Qiu Z X, Zhang L, Xie G P, Qiu Z D & Zhang Y X. 2001. Magnetostratigraphy and paleoenvironmental record of Tertiary deposits of Lanzhou Basin. Chinese Science Bulletin, **46**: 770-774.

Zachos J, Pagani M, Sloan L, Thomas E & Billups K. 2001. Trends, rhythms and aberrations inglobal climate 65 Ma to present. Science, **292**: 686-693.

Zan J B, Fang X M, Yan M D, Zhang W L & Lu Y. 2015. Lithologic and rock magnetic evidence for the Mid-Miocene Climatic Optimum recorded in the sedimentary archive of the Xining Basin, NE Tibetan Plateau. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, **431**: 6-14.

Zhang W L, Zhang T, Song C H, Appel E, Mao Z Q, Fang Y H, Lu Y, Meng Q Q, Yang R S, Zhang D W, Li B S & Li J. 2017. Termination of fluvial-alluvial sedimentation in the Xining Basin, NE Tibetan Plateau, and its subsequent geomorphic evolution. Geomorphology, **297**: 86-99.

A TEXTUAL RESEARCH OF THE EARLY LOCALITIES OF FOSSIL *GOMPHOTHERIUM* IN THE XINING BASIN WITH RELEVANT STRATIGRAPHIC CORRELATION

LI Chun-xiao[1) 2) 3)], WANG Shi-Qi[1) 2)], HAO Cheng-lu[4)], CHEN Guang-ting[4)], SUN Bo-yang[1) 2)], ZHENG Yan[1)] and XU Si-jian[1)]

1) *Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human Origins of Chinese Academy of Sciences, Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100044;
2) *Center for Excellence in Life and Paleoenvironment, Beijing* 100044;
3) *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049;
4) *Qinghai Institute of Geological Survey, Xining* 810012

Abstract　The hypodigms of *Gomphotherium connexum* and *G. wimani* from the Cenozoic of the Xining Basin are the earliest known fossil-proboscidean localities in China. The materials were collected by Andersson in the 1920s and were first studied by Hopwood in the 1930s. *Gomphotherium connexum* and *G. wimani* play a fundamental role in the stratigraphic subdivision and correlation of the Cenozoic of the Xining Basin. However, the precise locations and horizons of the type localities have been lost for a long time. Partially for this reason, many controversies exist both in biochronology and evolution in the two species, and in the stratigraphic correlation of the Cenozoic of the Xining Basin. In this paper, we made a textual research on the type localities of *G. connexum* and *G. wimani* in various ways, and finally obtained their precise positions, Diaogou(=Tiao Kou)and Bapanshan(=Pa P'an Shan), respectively. Based on the stratigraphic correlation, it is established that both fossiliferous beds of the two localities are characterized by massive green-grayish channel sandstones and

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

both situate in the lower part of the newly established Guanjiashan Formation(formerly the lower part of Xianshuihe Formation). Therefore, *G. connexum* and *G. wimani* were contemporary species. According to paleomagnetic data, the estimated age of the type localities is approximately 16–15 Ma. A recent phylogenetic study of *Gomphotherium* suggested that the morphological distinction between *G. connexum* and *G. wimani* represents different evolutionary directions rather than primitive or advanced evolutionary stages. This study contributes to our understanding on the research history of Chinese paleontology, provides key biochronology data for the evolution of the genus *Gomphotherium* and important biostratigraphic evidence for the geotectonic and sedimentary evolution in the Cenozoic of the Xining Basin.

Key words *Gomphotherium*, stratigraphic correlation, Middle Miocene, biostratigraphy, biochronology, Xining Basin, Qinghai

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

西藏马跃乡南部地区早白垩世珊瑚动物群的发现及其意义*

李浩[1)]，纪占胜[1)]，武桂春[1)]，石秋圆[1,2)]，何继富[2)]，仲昭[2)]
1) 国土资源部地层与古生物重点实验室，中国地质科学院地质研究所，北京, 100037；
2）中国地质大学，北京, 100083†

关键词：西藏；马跃乡；早白垩世；珊瑚；地层年代

青藏高原位于塔里木、华北、扬子与印度刚性地块之间，属于特提斯构造域亚段的区域，具形成大、中型油气田的基本地质特征，是一个有勘探前景的有利区（赵政璋等，2011）,也是中国陆上未来油气资源的重要的战略选区之一（张大伟，2006）。本文所研究的是具有较好的面积、规模和生烃条件的措勤盆地，其油气远景是仅次于羌塘盆地的第二大盆地[1]，而措勤盆地的中、上侏罗统长期以来不是公认的油气勘探的目标层系，仅有极少数的学者予以关注和讨论（孟亚洲等，2016）。本文中西藏申扎县马跃乡南部的剖面，在此之前因缺乏相应实测剖面的控制，导致该区域地层年代不清晰。纪占胜等（2015）通过详尽的实地勘察之后，最终重新划定为早白垩世朗山组；纪占胜等（2011）研究发现：措勤盆地申扎县下伏吐卡日组是良好的生油层和储层，所以朗山组地层的证实，为未来油气勘探靶区的确立提供了依据。现将有关情况简要介绍如下，供广大专家学者参考，敬请批评指正。

1 研究剖面

本次的研究剖面位于马跃乡南部地区，行政区划隶属于西藏自治区申扎县。剖面起点坐标：E88°27′20.87″，N31°32′24.18″，H5047.2m（点位来自郭安臣❶审核地质图）。区调专家之前将该区域划分为早白垩世多尼组，但是因为没有较为准确的实测控制剖面，所以此处的地层时代还存在很多误差。本剖面地层出露良好，化石较为丰富。在经过仔细的找寻和勘察之后，我们在山腰，山脚，山坡等多处露头发现了保存较好的珊瑚、圆笠虫等化石。现将生物地层学剖面介绍如下。

早白垩世朗山组（K_1l，原划为K_1d）

未见顶

11.灰，灰绿色泥岩，钙质泥岩，采样 M150801-35~45（TOC） 80m

10. 灰绿色泥岩，采样M150801-35~45（TOC） 50m

9.灰岩，含生物碎屑灰岩，采珊瑚样品 M150801-32~34 产珊瑚 cf. *Epistreptophyllum*sp., Albian of Egypt，*Clausastraea julistephanovi* Zlatarski 10m

8.灰色灰岩，含有生物碎屑，砾屑灰岩 15m

7.灰黑色灰岩，砾屑灰岩 20m

6.灰色灰岩，砾屑灰岩 20m

5.灰紫色砂屑灰岩，灰色灰岩，产状100°∠26°，采样M150801-30（TOC），M150801-31（牙） 20m

前方见覆盖 60m

4.生物碎屑灰岩，采珊瑚样品M150801-29，经鉴定为圆笠虫(*Orbitolina* sp.) 25m

3.灰岩，砾屑灰岩，灰黑色灰岩，采样M150801-28（TOC） 35m

2.灰色生屑灰岩，砾屑灰岩，灰岩，见苔藓虫、珊瑚、层孔虫、腕足等生物化石。；采珊瑚样品 M150801-22~27，产珊瑚:*Siderosmilia*? sp., *Siderosmilia?* sp., *Tiaradendron?* sp.,

*注：本文为国家自然科学基金项目（编号：41472030），科技基础性工作专项（编号：2015FY310100），中国地质调查局项目 (编号：12120115069001、1212011120142、1211402108021-2、12120110200015001O-02、12120110200015001O-04、1212011120115)和中国地质科学院基本科研业务费项目(编号 J1601)的成果。
收稿日期：2017-02-15；改回日期：2017-03-24；责任编辑：周健。Doi: 10.16509/j.georeview. 2017. s1. 152
作者简介：李浩，男，1994 年生。本科，石油工程专业。Email：lihao4088@163.com。
通讯作者：纪占胜，男，1974 年生。研究员，主要从事地层学及古生物学方面研究。Email：jizhansheng@vip.sina.com。
††

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Placophyllum rugosa Becker, *Astraraea ngariensis* Liao；采样 M150801-21（苔藓虫）；见层孔虫，采样 M150801-20（层孔虫）；采珊瑚样品 M150801-11~19，产珊瑚：*Axosmilia styphelos* Liao & Xia, *Stylina parvistella* Volz, cf. *Epistreptophyllum* sp., Albian of Egypt, *Chaetetes(Pseudoseptifer) gembaensis* (Yang & Wu), *Ptychochaetetes (Varioparietes)* sp., *Montlivaltia xainzaensis* Liao；采样 M150801-7、9、10（TOC）；采珊瑚样品 M150801-4、5、6、8 产珊瑚化石 *Axosmilia* cf. *sinensis* Liao, *Complexastraea* sp.

40m

1.灰色砾屑灰岩，生屑灰岩，采珊瑚样品 M150801-1、2、3，产珊瑚 cf.*Epistreptophyllum* sp., Albian of Egypt，未见底

20m

2 珊瑚动物群的组成和时代

本次研究的剖面原划为早白垩世多尼组，剖面处地层出露良好，化石丰富，山坡处覆盖较为严重。岩性多以灰岩，砾屑灰岩，生物碎屑灰岩，泥岩，钙质泥岩为主，局部夹砂岩。剖面上含有丰富的珊瑚化石，笔者在此处剖面上共采集珊瑚化石多达 23 件。经中国地质科学院南京古生物研究所廖卫华鉴定，这些珊瑚化石为 15 属 8 种及未定种。所处地层层位大部分为早白垩世朗山组。它们是：cf. *Epistreptophyllum* sp., Albian of Egypt（K_1 为早白垩世，下同。），*Axosmilia* cf. *sinensis* Liao（J-K 为时代延续为侏罗纪-白垩纪，下同。），*Complexastraea* sp.（J-K），*Axosmilia styphelos* Liao & Xia（K_1），*Stylina parvistella* Volz（K_1），cf. *Epistreptophyllum* sp., Albian of Egypt（K_1），*Chaetetes(Pseudoseptifer) gembaensis* (Yang & Wu)（K_1），*Ptychochaetetes (Varioparietes)* sp.（K_1），*Montlivaltia xainzaensis* Liao（K_1），*Siderosmilia ?* sp.（K_1），*Tiaradendron ?* sp.（K_1），*Placophyllum rugosa Becker*（K_1），*Astraraea ngariensis* Liao（K_1），*Orbitolina* sp.（K_1），cf. *Epistreptophyllum* sp., Albian of Egypt（K_1），*Clausastraea julistephanovi* Zlatarski（K_1）。本剖面所采珊瑚化石均来自于马跃乡南部，其鉴定结果为早白垩世朗山组，这些化石的发现对该区域原本模糊不清地层的重新厘定有重大的意义。此外关于纪占胜等（2011）吐卡日组为良好生油或储层问题的研究将由纪占胜研究员做详细讨论。

注 释 / Note

❶吉林省地质调查院. 2015.04. 西藏永珠-纳木错蛇绿混杂岩带综合地质图（1:250000）..

参 考 文 献 / Reference(s)

孟亚洲，纪占胜，廖卫华，等. 2016. 晚侏罗世珊瑚动物群的发现及其意义. 地质学报, 90(5): 833~847.

张大伟.2006. 战略选区若干问题的思考.地质通报，25(9/10)：1013~1016.

赵政璋,李永铁,叶和飞,等.2001. 源层的油气生成.北京：科学出版社.

LI Hao, JI Zhansheng , WU Guichun , SHI Qiuyuan, HE Jifu, ZHONG Zhao: Discovery of the Early Cretaceous coral Fauna in South of Mayuexiang Area, Xizang(Tibet) and Its Significances

Keywords: Xizang(Tibet); Mayuexiang; Early Cretaceous; Coral; Stratigraphic chronology

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

第 90 卷 第 8 期
2016年8月 1998～2012
地 质 学 报 ACTA GEOLOGICA SINICA
Vol. 90 No. 8 2016
Aug. 1998～2012

泸沽湖地区晚全新世气候和环境演变

李素萍[1,2)]，李金锋[3)]，武振杰[1)]，姚建新[1,2)]

1）中国地质科学院地质研究所，北京，100037；2）国土资源部地层与古生物重点实验室，北京，100037；
3）中国科学院植物研究所系统与进化植物学国家重点实验室，北京，100093

内容提要：泸沽湖地区受人类活动影响较小、对气候变化较为敏感，是开展古气候研究的理想区域。本文以孢粉为重要研究手段，对采自泸沽湖草海地区 103 cm 的浅钻沉积物开展研究，采样间距 2 cm，共取得 52 块样品用于孢粉分析。沉积物年龄采用 AMS-^{14}C 测定，经校正之后钻孔底部年龄为 3455 cal. a BP。经实验分析之后，所有样品均含有丰富的孢粉类群，反映的植被组成主要以松（*Pinus*）林为主，铁杉（*Tsuga*）也较为常见，被子植物中则以栎属（*Quercus*）占绝对优势，栗属（*Castanea*）和木犀科（Oleaceae）植物也频繁出现，而草本植物则以禾本科（Gramineae）为主，蓼科（Polygonaceae）、菊科（Asteraceae）和莎草科（Cyperaceae）植物也是重要的组成成分，林下生长有大量的蕨类的植物，主要以紫萁属（*Osmunda*）、石松属（*Lycopodium*）和膜蕨科（Hymenophyllaceae）等为主，另外，采样点草海为季节性湿地，水生植物主要以香蒲属（*Typha*）和藻类植物中的双星藻（*Zygnema*）和水绵（*Spirogyra*）最为常见。为了获得该地区晚全新世以来的气候变化曲线，本研究采用共存分析法分别对划分的四个孢粉带进行了古气候的定量重建，年均温和年均降水量分别为：3455 cal. a BP 至 2585 cal. a BP，MAT（mean annual temperature）＝11.5～18.6 ℃，MAP（mean annual precipitation）＝797.5～1484.3 mm；2585 cal. a BP 至 1699 cal. a BP，MAT＝11.7～18.6 ℃，MAP＝617.9～1523.1 mm；1699 cal. a BP 至 595 cal. a BP，MAT＝8.5～18.6 ℃，MAP＝797.5～1484.3 mm；595 cal. a BP 至今，MAT＝5.7～18.6 ℃，MAP＝617.9～1484.3 mm。结果显示该地区 3455 cal. a BP 以来气候经历了略微变暖－变凉－持续变凉－回暖四个阶段。本研究还将变化曲线与其他地区同时代的研究结果进行了对比分析，显示年均温的变化趋势与格陵兰冰芯 δ^{18}O 以及祁连山敦德冰芯所反映的温度变化趋势基本一致，并可观察到中世纪暖期、晚全新世小冰期及现代温暖期。

关键词：晚全新世；孢粉；气候变化；泸沽湖；云南

近年来，全球变化研究成为各界关注的热点。区域气候变化过程及其机制是全球变化研究的重要组成部分。湖泊沉积物一般具有较好的连续性，并且蕴含了生物学、地球物理和地球化学等信息，在多数情况下，湖泊沉积物是研究生物、地球物理和化学演化历史的第一选择（Jiang Xuezhong et al.，2001；Smol et al.，2001）。

泸沽湖作为云南九大高原湖泊之一，其流域内植被覆盖率较高且垂直分带明显。因其为半封闭性湖泊，湖泊沉积物连续、稳定。泸沽湖作为摩梭族的聚居区，受现代文明干扰较少，是研究云贵高原及周边区域气候环境演化的理想地点（Shi Zhengtao et al.，2004，2005）。

沉积物样品中的孢粉分析是研究过去植被对陆地环境变化反应的基本技术，作为研究地质历史时期气候变化的手段已发展了超过 100 年（von Post，1946）。孢粉分析近年来已有较快的发展，以孢粉学研究为手段的气候变化研究由定性描述逐渐发展为定量研究并取得了很多可靠的研究数据（e.g. Mosbrugger et al.，2005；Li Suping et al.，2013a，b）。

在泸沽湖区域，近年来以地球化学手段探讨古气候和古环境的工作较为丰富（e.g. Cui Linlin et al.，2015；Sheng et al.，2015；Wang Zixiang et al.，2015a，b）。而孢粉研究工作则相对较少，包括现代花粉雨（Li Suping et al.，2013）和全新世古气候研究（Wang Peifang et al.，1986；Zheng Qian，2014），而高分辨率的晚全新世古气候定量重建工作尚未开展。因此，仍然需要在重点区域建立独立的、

注：本文为国家自然科学基金项目（31500183，31300186，41472030）、科技基础性工作专项项目（2015FY310100）和中国地质科学院基本科研业务费（YYWF201501）联合资助。
收稿日期：2016-04-30；改回日期：2016-05-31；责任编辑：黄敏。
作者简介：李素萍，女，1983 年生。博士，助理研究员，主要从事地层与古生物相关研究。Email：lisuping@cags.ac.cn。

具有代表性的高分辨率古气候记录为全新世古气候研究提供充分、有效的证据。本文通过综合孢粉分析及精确的测年数据,对泸沽湖草海地区获得的浅钻进行了孢粉研究,并完成了古气候的定量重建,以期为晚全新世以来该地区气候与环境变化提供重要参考。

1　研究区域概况

泸沽湖位于云南省宁蒗县和四川省盐源县交界处(100°50′E, 27°40′N),海拔 2690 m,湖面面积约 50 km^2,汇水面积 180 km^2(Wang Sumin et al., 1998)。泸沽湖是云南大型高原湖泊之一,属于断陷型半溶岩半封闭湖泊,干季湖水基本没有外流,而雨季湖水则主要通过草海湿地外泄,其沉积物来源较为稳定(Chen Yifeng et al., 1999; Chen Chuanhong et al., 2012)。湖水 pH 值为 7.7～8.62,呈微碱性。湖畔居住着仍保留母系婚姻家庭的摩梭族人。泸沽湖湖区属中亚热带高原季风型气候,年均温 12.7 ℃,1 月平均气温 4.2 ℃,极端最低气温－10.3 ℃(1969 年),7 月平均气温 19.1 ℃,极端最高气温 31.4 ℃(1977 年),年无霜期 190 天,年降水量 920 mm。湖水清澈湛蓝,透明度 11.0 m(Wang Sumin et al., 1998)。

由于宁蒗独特的地形特征,使得这个地区气候存在海拔差异,其海拔范围为 1360～4000 m,山谷地区是亚热带气候,而山顶气候则为寒温带气候(Zeng Juemin, 1990)。泸沽湖周围山地存在植被垂直分带现象,泸沽湖周围 3000 m 以下,主要分布大面积的云南松林,局部发育黄栎林或栎灌丛。海拔 3000 m 以上主要是云杉(*Picea*)、冷杉林(*Abies*)。泸沽湖内有维管束植物 32 种,其中挺水植物 11 种,浮叶植物 1 种,漂浮植物 2 种,沉水植物 18 种。优势类群主要为芦苇(*Phragmites australis*)、茭草(*Zizania latifolia*)、水葱(*Scirpus validus*)、香蒲(*Typha orientalis*)等(Li Heng et al., 1979; Zeng Xiwen et al., 2012)。

2　材料和方法

采样点位于泸沽湖东南面的草海地区(图 1),“草海”是指长满草的高原湖泊,它是泸沽湖地区的季节性湖泊,属于泸沽湖的子湖泊,泸沽湖的水与它相连。采样点位于泸沽湖地区山兰村东,经纬度为:27°42′04.0″ N,100°51′38.9″ E,海拔 2690 m。

采样点位置有一个人工挖掘的深坑,我们首先从人工挖掘的深坑旁边获得一段 35 cm 长的岩芯,又在深坑底部采集了一段长度为 80 cm 的岩芯,根据岩性特征摒除掉重叠部分,获得的岩芯长度共计 103 cm(见图 2),岩性主要为土黄色至黑灰色淤泥。采样密度为 2 cm,共获得孢粉样品 52 块。

2.1　年代

加速质谱(AMS)-^{14}C 测年工作由美国 Beta Analytic Radiocarbon Dating Laboratory 分析测定完成,校正年龄的计算参考 INTCAL13(Reimer et al., 2013)。考虑到本研究钻孔的长度,共选择了

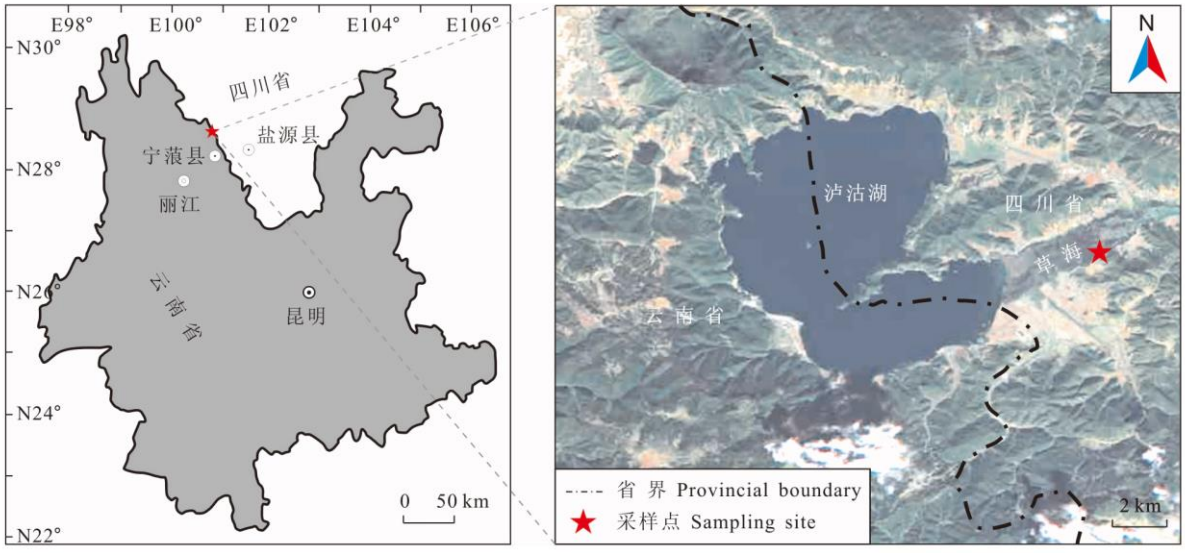


图 1　泸沽湖地区浅钻沉积物样品采样点位置示意图

Fig. 1　Sketch map showing the sampling site of our core samples in Lugu Lake area

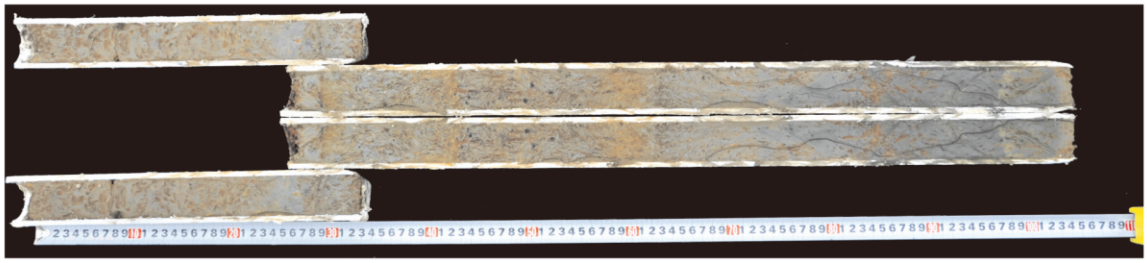


图 2 泸沽湖地区获得的浅钻沉积物岩芯图

Fig. 2 Core samples obtained from Lugu Lake area

三块样品进行了年代测试，测年样品深度分别为 31 cm(样品编号 LG-31)，64 cm(LG-64)和 103 cm (LG-103)，结果见表 1。在此基础上，每个样品的具体年龄通过获得的两个年代样品间的线性内插获得。岩芯底部 103 cm 的校正年龄为 3455 cal. a BP。

表 1 泸沽湖浅钻沉积物 AMS-^{14}C 测年数据

Table 1 AMS-^{14}C Dating results of core samples from Lugu lake area

样品号	深度(cm)	^{14}C 年代	年龄(cal. a BP)	2-sigma 范围
LG-31	31	1310±30	1275	1180～1295
LG-64	64	2170±30	2150	2305～2070
LG-103	103	3240±30	3455	3560～3390

2.2 孢粉分析

用于孢粉分析的沉积物样品共计 52 份，采样间距为 2 cm。样品的实验分析在国土资源部地层与古生物重点实验室完成，样品分析采用氢氟酸处理方法。首先用 10%浓度盐酸溶液去除样品中的碳酸盐，然后用 10%的氢氧化钾氧化去除样品中的有机质，再以 40%浓度氢氟酸浸泡处理，再加入盐酸溶液去除氟化钙和氟化硅，残余物经水洗后超声波过筛，经醋酸酐硫酸混合液(醋酸酐：硫酸＝9：1 (v/v))处理，孢粉样品加甘油存用。孢粉统计和鉴定使用 Olympus CX41 显微镜，部分类群利用单颗花粉粒技术(Ferguson et al.，2007)在 JEOL 6700F 扫描电子显微镜下进行了观察和拍照。孢粉百分比含量图用 Tilia 软件分析和制作。

2.3 古气候重建

古气候定量重建采用共存分析法(Coexistence Approach，CA)(Mosbrugger et al.，1997；Xu Jingxian et al.，2000)，这也是目前利用孢粉分析数据进行古气候定量重建的常用方法之一。共存分析法以最近现存亲缘类群的原理为基础，即假定化石植物和其最近现存亲缘类群生长所需的气候与生态环境条件相同或相近。运用共存分析法，首先确定孢粉类群中种子植物类群的最近现存亲缘类群及其地理分布范围(Wu Zhengyi et al.，1999)，然后在每个类群的分布范围内获取气象台站的 1951～1980 年间 30 年的各气象数据的平均观测值(IDBMC，1983a，b，1984a，b，c，d)，确定每个类群生长所需的 7 个气候参数的变化范围，最后将所有最近现存亲缘类群的气候参数变化范围进行叠加，即可获得孢粉类群共存的气候参数的范围。利用该方法，可获得年均温(mean annual temperature，MAT)、最高月均温(mean temperature of the warmest month，WMT)、最低月均温(mean temperature of the coldest month，CMT)、年较差(difference of temperature between the coldest and warmest months，DT)、年均降雨量(mean annual precipitation，MAP)、最大月均降雨量(maximum monthly precipitation，MaMP)、最小月均降雨量(minimum monthly precipitation，MiMP)7 个气象参数的数值范围。

3 结果

52 份沉积物样品共获得 79 个孢粉类群(表 2)。其中木本植物(TRSH)类群 31 个，草本植物(UPHE)类群 30 个，蕨类植物(VACR)类群 12 个，水生植物，包括水生被子植物(AQVP)和藻类(ALGA)共计 6 个类群。裸子植物中松属(*Pinus*)和铁杉属(*Tsuga*)花粉占优势；被子植物中禾本科(Gramineae)和栎属(*Quercus*)含量较高；蕨类植物紫萁属(*Osmunda*)和石松属(*Lycopodium*)孢子占优势。

鉴于孢粉颗粒较小，部分孢粉仅仅依靠在光学显微镜下的形态特征很难鉴定，为了提高孢粉的鉴定精度，本研究在光学显微镜下挑取了部分代表性孢粉颗粒，对同一颗孢粉分别在光学显微镜和扫描电镜下拍照(图 3～5)。

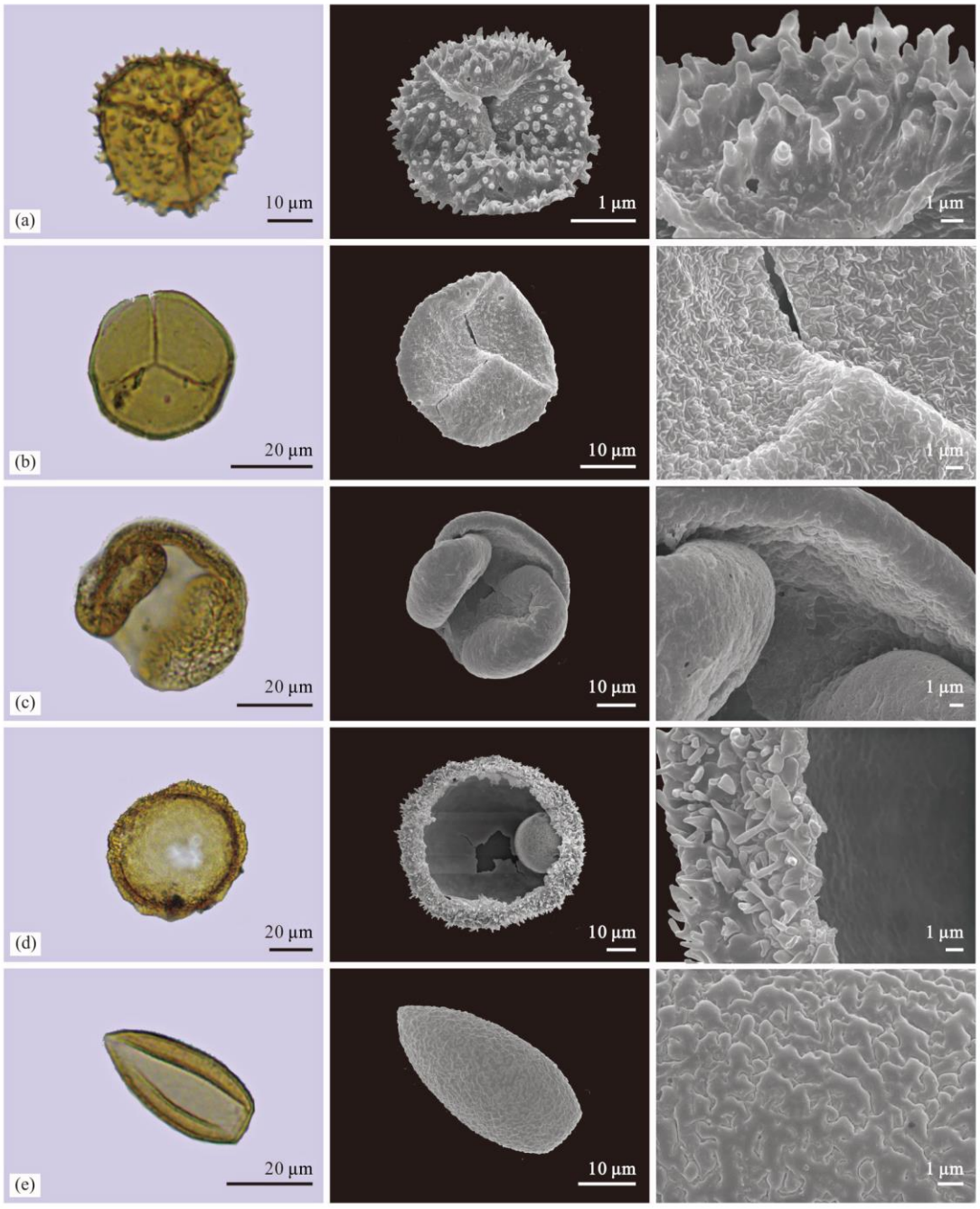


图 3　泸沽湖地区晚全新世主要孢粉类群光学显微镜和扫描电镜图版－蕨类植物和裸子植物

Fig. 3　Combined light microscopic and scanning electron microscopic images of the main palynomorphs in Lugu Lake area, late Holocene—Pteridophytes and Gymnosperms

(a)—*Osmunda*; (b)—Hymenophyllaceae; (c)—*Pinus*; (d)—*Tsuga*; (e)—*Ginkgo*

3.1　孢粉组合

根据主要类群的百分比含量,采用 Tilia 软件绘制了孢粉百分比含量图(图 6),以此分析在整个沉积序列上各孢粉类群的变化趋势。孢粉组合中,裸子植物中松属(*Pinus*)花粉占绝对优势,其百分比含量为 18.8%～52.94%,其次为铁杉属(*Tsuga*)花粉,其含量为 0～3.51%。偶见冷杉属(*Abies*)、云杉属(*Picea*)等花粉。被子植物中木本植物的优势类群为栎属(*Quercus*),其百分比含量为 2.25%～19.34%,栗属(*Castanea*)花粉也有较高的含量

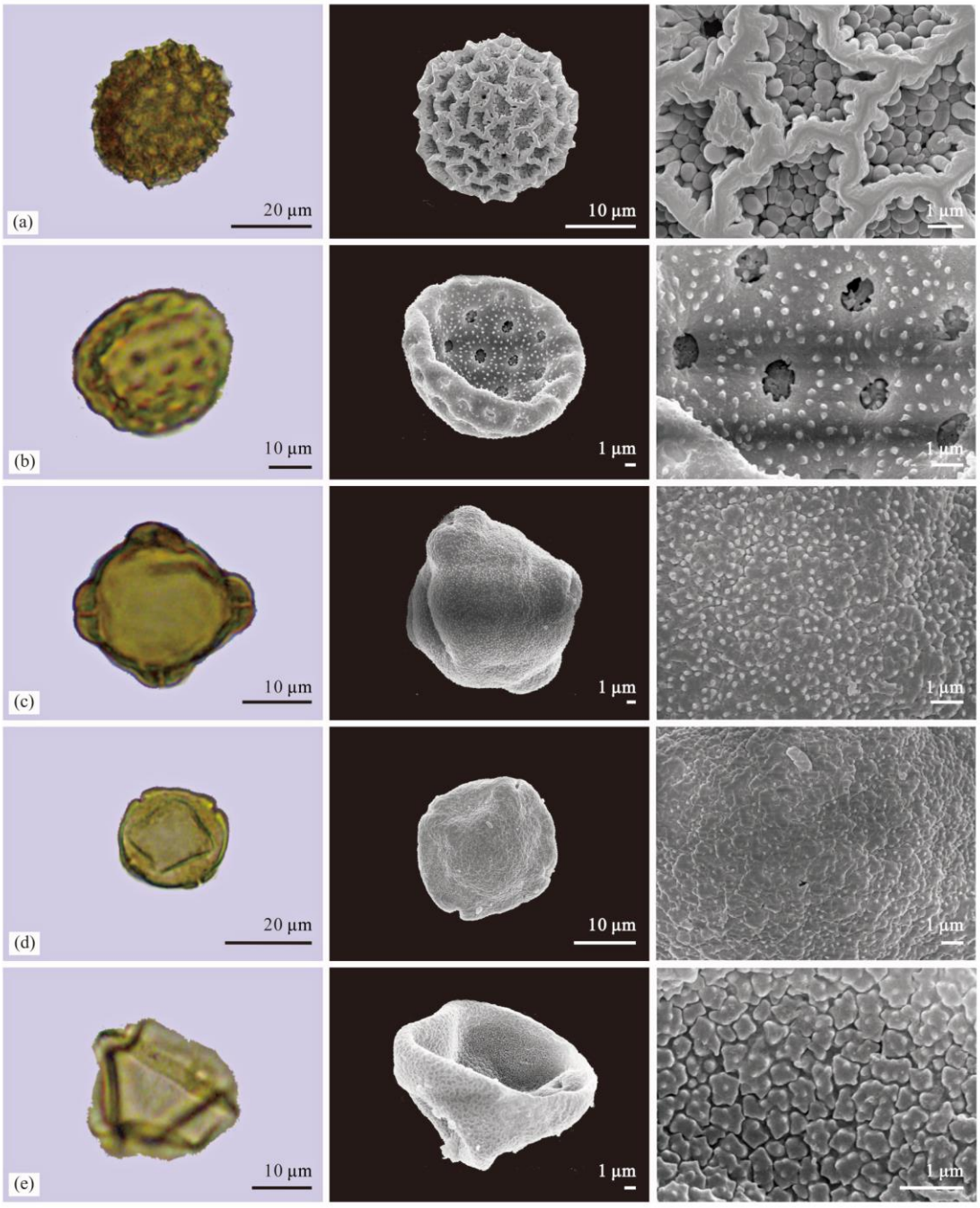


图 4 泸沽湖地区晚全新世主要孢粉类群光学显微镜和扫描电镜图版－被子植物 I

Fig. 4 Combined light microscopic and scanning electron microscopic images of the main palynomorphs in Lugu Lake area, late Holocene—Angiosperms I

(a)—Polygonaceae; (b)—Chenopodiaceae; (c)—*Betula*; (d)—*Alnus*; (e)—Gramineae

(0.29%～4.97%)。被子植物中的草本植物则以禾本科(Gramineae)为主,其含量高达 8.35%～22.76%,蓼科(Polygonaceae)和菊科(Asteraceae)含量也较高,其百分比含量分别为 0.83%～9.54%和 0.49%～7.43%。蕨类植物中紫萁属(*Osmunda*)和石松属(*Lycopodium*)为主要优势类群。水生植物包括被子植物和藻类,被子植物包括香蒲属(*Typha*)、泽泻科(Alismataceae)和眼子菜属(*Potamogeton*),其中香蒲属含量最高,为 0～2.68%,藻类包括双星藻(*Zygnema*)(0～5.07%)、

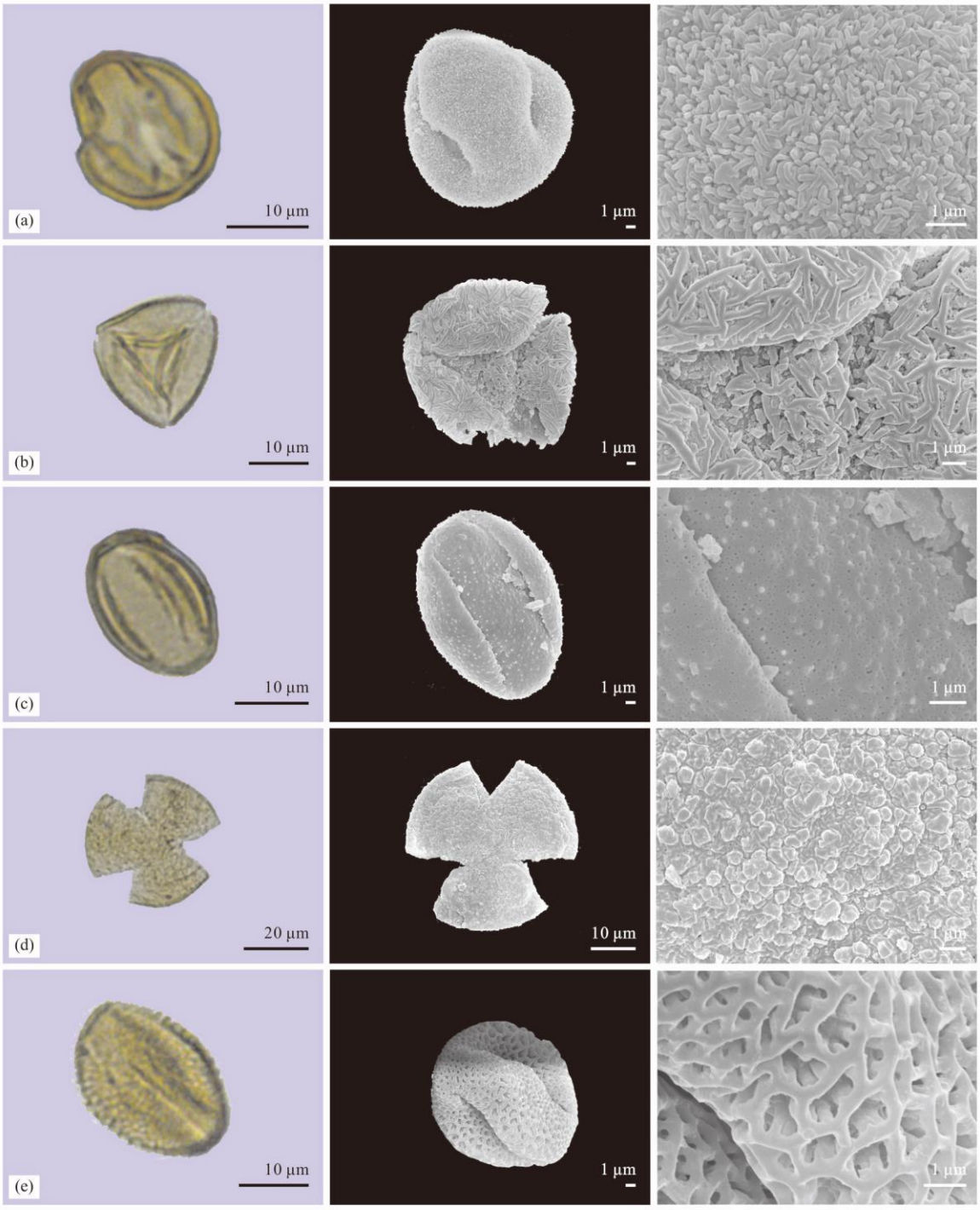


图 5　泸沽湖地区晚全新世主要孢粉类群光学显微镜和扫描电镜图版－被子植物 II

Fig. 5　Combined light microscopic and scanning electron microscopic images of the main palynomorphs in Lugu Lake area, late Holocene—Angiosperms II

(a)—*Quercus*; (b)—Gentianaceae; (c)—Ranunculaceae; (d)—Lamiaceae; (e)—Oleaceae

水绵（*Spirogyra*）（0 ～ 3.69%）和环形孢（*Pseudoschizaea*）(0～1.23%)。另外,有部分未鉴定出的孢粉类群,含量为 0～0.55%。根据主要类群孢粉百分含量变化和 CONISS 聚类分析结果,将整个钻孔分为四个孢粉带进行详细的孢粉组合分析。

表 2 泸沽湖浅钻沉积物样品获得的孢粉类群名录

Table 2 Palynomorphs obtained from core samples of Lugu Lake area

TRSH (Trees and Shrubs)		
Pinus	*Juglans*	Caprifoliaceae
Tsuga	*Corylus*	*Morus*
Picea	Oleaceae	Ericaceae
Abies	Magnoliaceae	Elaeagnaceae
Podocarpus	*Tilia*	Anacardiaceae
Cycas	*Salix*	Meliaceae
Ginkgo	*Ulmus*	Melastomataceae
Quercus	*Lithocarpus*	Bignoniaceae
Betula	*Acer*	Hamamelidaceae
Alnus	Palmae	*Ilex*
Castanea		
UPHE (Upland Herbs)		
Gramineae	*Plantago*	Lamiaceae
Polygonum	Dipsacaceae	Solanaceae
Cyperaceae	Caryophyllaceae	Cucurbitaceae
Rosaceae	Convolvulaceae	Malvaceae
Chenopodiaceae	Gesneriaceae	Verbenaceae
Asteraceae	Rubiaceae	Araliaceae
Artemisia	Euphorbiaceae	Thymelaeaceae
Gentianaceae	Papilionaceae	Apiaceae
Polygonaceae	Liliaceae	Campanulaceae
Ranunculaceae	Brassicaceae	Apocynaceae
VACR (Vascular Cryptogams)		
Osmunda	Selaginellaceae	*Pteris*
Hymenophyllaceae	Hemionitidaceae	Dennstaedtiaceae
Gleicheniaceae	Loxogramme	*Lycopodium*
Polypodiaceae	Athyriaceae	Sinopteridaceae
Aquatic Plants (AQVP and Alga)		
Typha	Alismataceae	*Spirogyra*
Potamogeton	*Zygnema*	*Pseudoschizaea*

3.1.1 带Ⅰ(3455 cal. a BP～2585 cal. a BP)

松属植物花粉在此阶段处于较高的百分含量(33.24%～52.94%,平均46.62%,下同)并在末期有较明显的降低;铁杉属(1.47%～3.08%,2.26%)也具有一定的含量;苏铁属(*Cycas*)花粉(0～0.51%,0.07%)仅在本带中出现,但含量不高。栎属花粉百分含量(3.64%～10.66%,6.61%)在该阶段表现出持续的增加趋势。草本植物禾本科花粉也具有较高的含量(11.48%～20.57%,16.98%)。蕨类植物紫萁属孢子含量在该阶段处于较低的水平(0.58%～4.13%,1.48%);石松属孢子含量(0.49%～1.37%,0.92%)较低。水生植物中香蒲属(0.24%～2.46%,1.27%)和双星藻(0～1.91%,0.75%)含量在本阶段较高。

3.1.2 带Ⅱ(2585 cal. a BP～1699 cal. a BP)

松属花粉含量(18.83%～36.84%,29.62%)在本带中较带Ⅰ中有比较明显的降低;铁杉属(2.26%～3.08%,1.65%)在本带中含量较高。栎属花粉含量(7.80%～16.37%,11.60%)较前一阶段有明显的升高。禾本科花粉含量(11.29%～22.62%,15.58%)在本阶段仍然是被子植物花粉中最高的,但较上阶段有小幅的降低。紫萁属孢子含量(2.18%～12.21%,7.34%)在本带中达到了整个序列中的最高水平;石松属(0.42%～2.39%,0.98%)含量较带Ⅰ稍有升高。水生植物中香蒲(0～0.55%,0.30%)和双星藻(0～2.12%,0.73%)均有所下降。

3.1.3 带Ⅲ(1699 cal. a BP～595 cal. a BP)

在本带中,松属花粉含量(20.72%～31.25%,26.79%)降低到最低;铁杉属含量(0～2.68%,1.13%)继续小幅降低。栎属在本带中达到最高值(10.98%～19.34%,15.33%)。禾本科含量(13.67%～22.76%,17.28%)较上一阶段小幅升高。蕨类植物紫萁属孢子含量(0.52%～4.8%,2.38%)较带Ⅱ明显回落;石松属(0.76%～2.30%,1.52%)较带Ⅰ和带Ⅱ均有明显的升高。香蒲含量(0～2.68%,1.48%)在本阶段达到最高,双星藻含量(0～1.95%,0.63%)比上一阶段略有下降。

3.1.4 带Ⅳ(595 cal. a BP～0 cal. a BP)

在经过带Ⅰ至带Ⅲ的大幅度降低后,松属花粉含量(34.53%～46.15%,42.00%)在本阶段大幅度升高;铁杉属花粉含量(0.74%～2.70%,1.79%)也略微升高。被子植物花粉中,栎属花粉含量(2.25%～11.41%,4.56%)在前三个阶段逐步升高,但在该阶段大幅降低。草本植物中禾本科花粉含量(8.35%～17.14%,11.31%)在经历了上阶段的略微升高后,在本带中再次降低。紫萁属孢子含量(4.51%～9.23%,5.96%)在本带中明显升高;石松属孢子在本阶段达到最高含量(0～5.18%,2.47%)。双星藻(0.68～5.07%,2.26%)和水绵(0～3.69%,1.14%)在这个阶段含量都达到最高,香蒲含量(0～1.86%,1.30%)略有下降。

3.2 植被恢复

虽然松属因为花粉产量很高且带有气囊,一般被认为是具有超代表性的孢粉类群(Ruffaldi,1994; Vermoere et al., 2001; Xiao Xiayun et al., 2011)。但作为整个孢粉序列中花粉含量最高的类群,四个带中松属花粉含量均值范围为26.79%～46.62%。有关研究表明,当松属花粉含量超过30%时,一般可以认为其为本地植被(Xiao Xiaoyun et al., 2006; Zheng Qian et al., 2014)。因此在本

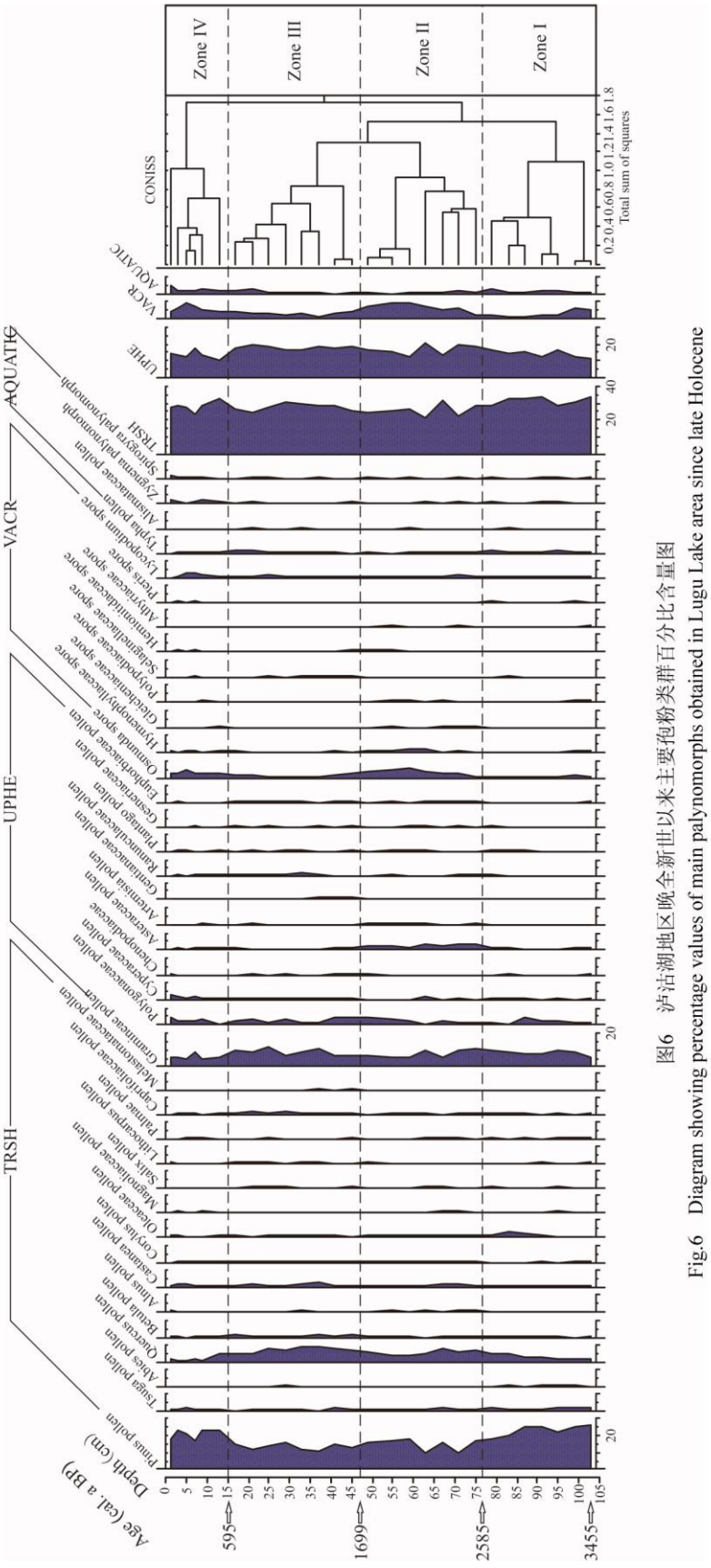


图6　泸沽湖地区晚全新世以来主要孢粉类群百分比含量图

Fig.6　Diagram showing percentage values of main palynomorphs obtained in Lugu Lake area since late Holocene

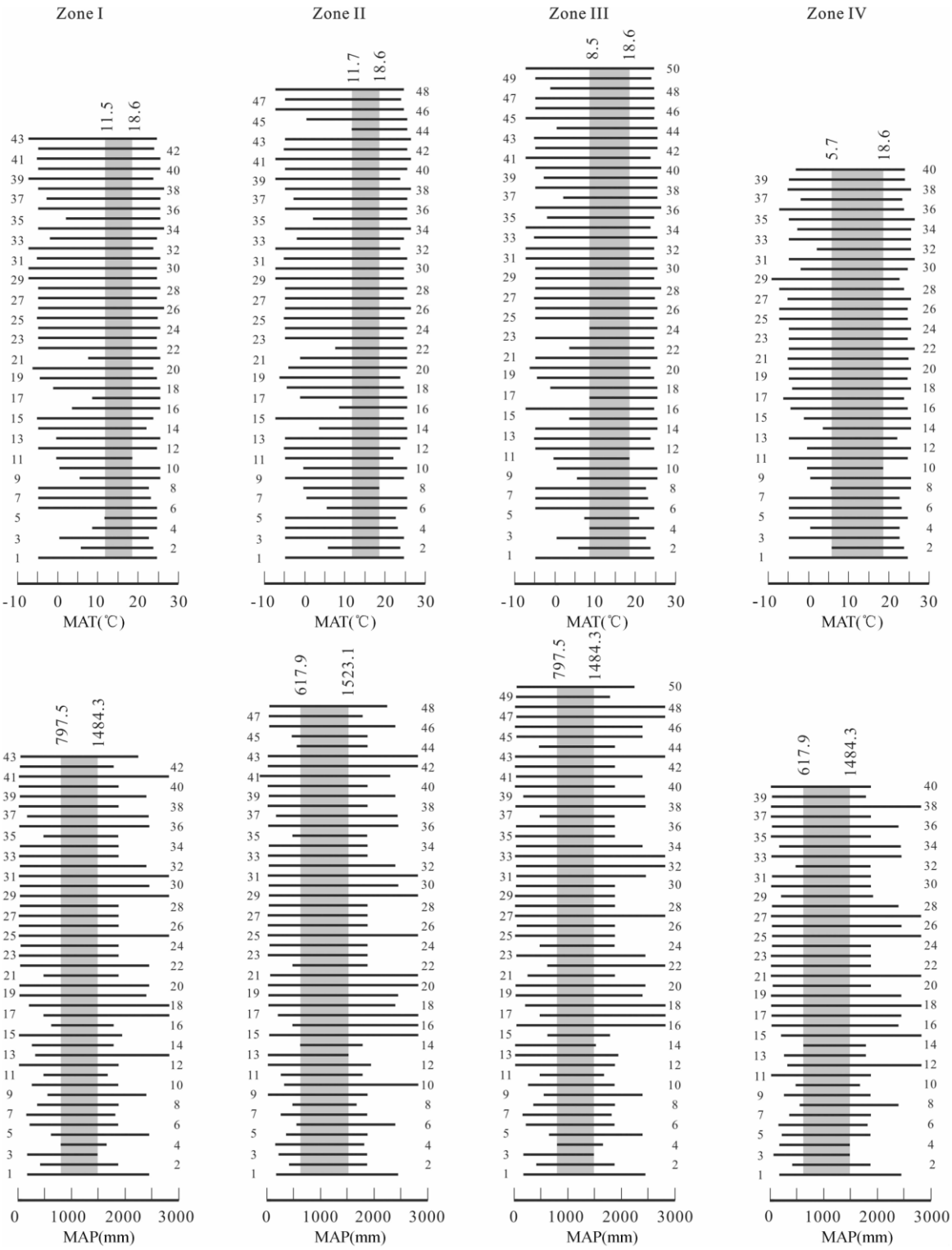


图 7 泸沽湖钻孔四个孢粉带年均温(MAT)和年均降水量(MAP)的共存区间

Fig. 7 Intervals of the reconstructed MAT and MAP of four zones, Lugu Lake area

Zone I. 1. *Pinus*; 2. *Tsuga*; 3. *Abies*; 4. *Podocarpus*; 5. *Cycas*; 6. *Quercus*; 7. *Betula*; 8. *Alnus*; 9. *Castanea*; 10. *Juglans*; 11. *Corylus*; 12. Oleaceae; 13. Magnoliaceae; 14. *Tilia*; 15. *Salix*; 16. *Lithocarpus*; 17. Palmae; 18. *Ilex*; 19. Caprifoliaceae; 20. *Morus*; 21. Meliaceae; 22. Bignoniaceae; 23. Gramineae; 24. Cyperaceae; 25. Rosaceae; 26. Chenopodiaceae; 27. Asteraceae; 28. *Artemisia*; 29. Gentianaceae;

30. Polygonaceae; 31. Ranunculaceae; 32. *Plantago*; 33. Caryophyllaceae; 34. Convolvulaceae; 35. Gesneriaceae; 36. Rubiaceae; 37. Euphorbiaceae; 38. Leguminosae; 39. Liliaceae; 40. Lamiaceae; 41. Cucurbitaceae; 42. *Typha*; 43. Alismataceae. Zone II. 1. *Pinus*; 2. *Tsuga*; 3. *Quercus*; 4. *Betula*; 5. *Alnus*; 6. *Castanea*; 7. *Juglans*; 8. *Corylus*; 9. Oleaceae; 10. Magnoliaceae; 11. *Tilia*; 12. *Salix*; 13. *Ulmus*; 14. *Lithocarpus*; 15. *Acer*; 16. Palmae; 17. *Ilex*; 18. Caprifoliaceae; 19. *Morus*; 20. Elaeagnaceae; 21. Anacardiaceae; 22. Meliaceae; 23. Gramineae; 24. Cyperaceae; 25. Rosaceae; 26. Chenopodiaceae; 27. Asteraceae; 28. *Artemisia*; 29. Gentianaceae; 30. Polygonaceae; 31. Ranunculaceae; 32. *Plantago*; 33. Caryophyllaceae; 34. Convolvulaceae; 35. Gesneriaceae; 36. Rubiaceae; 37. Euphorbiaceae; 38. Leguminosae; 39. Liliaceae; 40. Lamiaceae; 41. Solanaceae; 42. Cucurbitaceae; 43. Malvaceae; 44. Verbenaceae; 45. Araliaceae; 46. Thymelaeaceae; 47. *Typha*; 48. Alismataceae. Zone III. 1. *Pinus*; 2. *Tsuga*; 3. *Abies*; 4. *Podocarpus*; 5. *Ginkgo*; 6. *Quercus*; 7. *Betula*; 8. *Alnus*; 9. *Castanea*; 10. *Juglans*; 11. *Corylus*; 12. Oleaceae; 13. *Salix*; 14. *Ulmus*; 15. *Lithocarpus*; 16. *Acer*; 17. Palmae; 18. *Ilex*; 19. Caprifoliaceae; 20. *Morus*; 21. Ericaceae; 22. Melastomataceae; 23. Bignoniaceae; 24. Hamamelidaceae; 25. Gramineae; 26. Cyperaceae; 27. Rosaceae; 28. Chenopodiaceae; 29. Asteraceae; 30. *Artemisia*; 31. Gentianaceae; 32. Polygonaceae; 33. Ranunculaceae; 34. *Plantago*; 35. Caryophyllaceae; 36. Convolvulaceae; 37. Gesneriaceae; 38. Rubiaceae; 39. Euphorbiaceae; 40. Leguminosae; 41. Liliaceae; 42. Lamiaceae; 43. Cucurbitaceae; 44. Araliaceae; 45. Thymelaeaceae; 46. Apiaceae; 47. Campanulaceae; 48. Apocynaceae; 49. *Typha*; 50. Alismataceae. Zone IV. 1. *Pinus*; 2. *Tsuga*; 3. *Picea*; 4. *Abies*; 5. *Quercus*; 6. *Betula*; 7. *Alnus*; 8. *Castanea*; 9. *Juglans*; 10. *Corylus*; 11. Oleaceae; 12. Magnoliaceae; 13. *Tilia*; 14. *Lithocarpus*; 15. *Ilex*; 16. Caprifoliaceae; 17. *Morus*; 18. Elaeagnaceae; 19. Gramineae; 20. Cyperaceae; 21. Rosaceae; 22. Chenopodiaceae; 23. Asteraceae; 24. *Artemisia*; 25. Gentianaceae; 26. Polygonaceae; 27. Ranunculaceae; 28. *Plantago*; 29. Dipsacaceae; 30. Caryophyllaceae; 31. Convolvulaceae; 32. Gesneriaceae; 33. Rubiaceae; 34. Euphorbiaceae; 35. Leguminosae; 36. Liliaceae; 37. Brassicaceae; 38. Cucurbitaceae; 39. *Typha*; 40. *Potamogeton*

研究中,虽然带 III 中均值略低于 30%,但每个样品中松属百分比含量也基本徘徊在 30%左右,所以我们可以认为在整个研究时段都应当有松林的存在。铁杉属花粉没有气囊且个体较大,受气流影响较小,一般沉降在母体植物附近(Li Chunhai et al., 2008)。被子植物中栎属在花粉组合中也占有较大比例,在本地植被中应该有栎树林的存在。此外,栗属(*Castanea*)、榛属(*Corylus*)植物也有一定的比例。禾本科在整个孢粉序列中占有较大的比重,指示了其在植被中也占有较高的比例。基于本研究所取的钻孔位于湖岸位置,禾本科花粉可能包含了相当一部分的芦苇属(*Phragmites*)植物。但鉴于禾本科花粉的低表达性(Zheng Zhenhua et al., 2008)及形态的低特异性(Perveen, 2006),很难将其区分开来。紫萁属、石松属及膜蕨科(Hymenophyllaceae)是林下生长主要的蕨类植物。

在本工作涉及的整个研究序列中,并没有很明显的植被类型层面上的转换。植被的动态变化主要表现为各个类群所占比例随气候变化而波动。因此,此处不再赘述各阶段的植被变化。

3.3 气候重建

本研究采用共存分析法对泸沽湖地区晚全新世的古气候进行了定量重建,并获得了 4 个孢粉带重建的 7 个气候参数的共存区间,其中年均温 MAT 和年均降水量 MAP 的共存区间见图 7。具体各带重建获得的 7 个气候参数的数值(共存区间的中值)见表 3。

从表 3 中我们可以观察到,泸沽湖地区晚全新世以来的年均温变化较为频繁,幅度也较大,但是年均降水量的波动幅度较小,所以本研究认为泸沽湖地区晚全新世在湿度上应该存在些许波动,但仅仅从共存结果上是无法反映的,分析可能有以下两个方面的原因:第一,研究区为湖泊周围,属于相对湿度较高的地区,在降水量发生变化时,湖泊仍是一个重要的湿度来源渠道,对于大部分生长在湖泊周围的植物类群来说,可以利用的有效湿度变化不大,所以在应用共存因此分析法时,所反映出来的降水量变化也不显著;第二,气候因素中降水比温度的变化更复杂,也更难确定,有时甚至在同一地区结果都不尽相同,尤其在高海拔地区,温度会随着海拔高度的变化有规律的变化,降水量则不同,它与多种因素有关,比如海拔、坡向、植被、气流等,所以定量重建的降水量相关的气象参数数值误差会更大。

表 3　采用共存分析法获得的泸沽湖地区的古气候参数(中值)列表

Table 3　Values of seven meteorological parameters (median) reconstructed by Coexistence Approach

	MAT/℃	WMT/℃	CMT/℃	DT/℃	MAP/mm	MaMP/mm	MiMP/mm
现今	12.7	/	/	/	920	/	/
ZoneIV	12.2	24	4.1	18.6	1051.1	179.2	16.6
Zone III	13.6	24	6	17.9	1140.9	203.5	14.6
Zone II	15.2	26.1	6	18.6	1070.5	183.7	14.6
Zone I	15.1	25.9	6	18.6	1140.9	192.05	16.6

4　讨论

气候的频繁波动是全新世气候变化的一个显著特征,这在很多的古气候记录中均有体现(e.g. Bi

Fuzhi et al.，1998；Li Bin et al.，1998)。尽管由于中国复杂的地形使得全新世气候变化具有明显的地区差异，但南北半球大部分地区在全新世都经历了三个主要的气候变化阶段，即早全新世的快速升温阶段，中全新世适宜期阶段以及晚全新世的干凉化阶段。Thompson et al.(2002)的研究也表明，大约 4000 cal. a BP 之后，气候开始变干变凉，而在本研究中，泸沽湖地区自 3455 cal. a BP 以来的年均温变化基本呈现下降趋势，这与大部分研究结果一致，所以尽管存在地区性差异，气候变化的内在驱动机制仍然是气候变化的主要驱动因素，也就是气候变化具有全球性，不同地区气候变化的趋势具有可对比性。

对于中世纪暖期(Medieval Warm Period，1～1.5 cal. ka BP)是否是全球性的气候现象或者仅仅为区域性特征仍然存在争议，但是一些研究证实晚全新世存在一个温暖期(e.g. Mann et al.，2003；Jones et al.，2004；Moberg et al.，2005)。而国内关于中世纪暖期，即隋唐暖期(550～1050 AD)是否存在以及其起讫时间也存在一些争议，但有研究表明隋唐高温期期间的气候也存在冷暖波动(Wu Hongqi et al.，1998)。本研究的高温期出现在 2585 cal. a BP 至 1699 cal. a BP，略早于前人报道的隋唐暖期，可能与区域性差异有关。祁连山敦德冰芯的研究指出，距今 3000 年左右为气候变化的重要界线，在此之前，温度以上升为主要趋势，并于界限期左右达到最暖，而之后温度则明显下降，并在 1000 AD 左右达到最冷，之后温度又趋上升(Yao Tandong et al.，1992)，这与我们重建的结果基本一致。

为了更为直观的了解年均温的变化，本研究结合重建的晚全新世以来泸沽湖地区的年均温数值和今天泸沽湖的年均温，绘制了气候变化曲线，并选择了有代表性的两条其他地区的气候变化曲线与我们的研究结果进行对比分析，见图 8。

从图 8 中可以看出，本研究中第一阶段(3455 cal. a BP 至 2585 cal. a BP)年均温轻微升高；第二阶段(2585 cal. a BP 至 1699 cal. a BP)和第三阶段(1699 cal. a BP 至 595 cal. a BP)年均温连续下降，其中第三阶段包含了晚全新世的小冰期(Little Ice Age，1400～1850 AD)阶段(Mann et al.，2003；Liu Jianbao et al.，2011；Sheng Enguo et al.，2015)；第四阶段(595 cal. a BP 至今)年均温的回升与北半球现代温暖期(Current Warm Period，1850 AD 至今)(Mann et al.，2003)相符合，该事件也表现在泸沽湖沉积物粒度研究(Sheng Enguo et al.，2015)、洱海孢粉研究(Shen Ji et al.，2006)和湖光岩玛珥湖 C/N 研究(Chu Guoqiang et al.，2014)中。整体而言，本研究中泸沽湖地区自 3455 cal. BP 以来的年均温变化趋势与格陵兰冰芯中 $\delta^{18}O$ 含量所反映的温度变化趋势(Johnsen et al.，1972；Johnsen et al.，1992)基本一致，但因研究手段的不同，本研究结果没有反映出更频繁的波动。

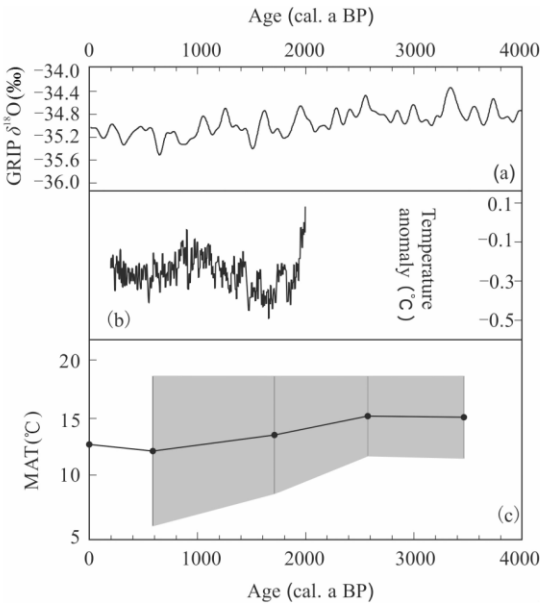


图 8 泸沽湖晚全新世气候变化曲线与其他研究曲线对比图

Fig. 8 Comparisons of our MAT changing curve with other paleoclimatic records

(a)—高斯平滑处理(200 a)后的格陵兰 GRIP 氧同位素 $\delta^{18}O$(‰)变化曲线(Johnsen et al.，1972；Mayewski et al.，2004)；(b)—北半球温度波动曲线(Mann et al.，2003)；(c)—本研究

a—Gaussian smoothed (200 a) GRIP $\delta^{18}O$ (‰) proxy for temperature (Johnsen et al.，1972；Mayewski et al.，2004)；b—temperature anomaly in the Northern Hemisphere (Mann et al.，2003)；c—this study

5 结论

(1)本研究对泸沽湖草海地区 103 cm 浅钻进行了孢粉分析，获得了丰富的孢粉类群。共鉴定出孢粉类群 79 个，其中木本植物类群 31 个，草本植物类群 30 个，蕨类植物类群 12 个，水生植物类群 6 个。

(2)孢粉组合反映出的植被中松属占有很大的比例，此外在本地植被中应该有栎树林的存在，栗属和榛属植物也有一定的比例，禾本科也是当时植被的重要组成成分，紫萁属、石松属及膜蕨科是林下生长的主要蕨类植物。

(3)根据各样品孢粉百分比含量,整个孢粉序列分为 4 个带,基于测年数据并利用共存因子分析法对 4 个孢粉带的古气候完成了定量重建,结果显示晚全新世泸沽湖地区经历了轻微变暖—变凉—持续变凉—变暖四个阶段;

(4)古气候研究表明自 3455 cal. a BP 至今,泸沽湖区域的年均温变化趋势与全球气候变化的趋势基本一致(如格陵兰冰芯氧同位素记录)。并在此期间反映了晚全新世以来的中世纪暖期、小冰期和现代温暖期。

致谢:感谢维也纳大学 David Kay Ferguson 教授和太原理工大学吴鹏在野外采样期间给予的帮助。特别感谢地质学报责任编辑黄敏老师在文章修改过程中提出的宝贵的修改意见。

References

Bi Fuzhi, Yuan Youshen. 1998. Average annual temperature changes in the Holocene in China. Acta Geologica Sinica (English Edition), 72(3): 321～328.

Chen Chuanhong, Wang Jingzhong, Zhu Chi, Zhao Liangyuan, Jiang Jinhui, Yang Jiaoyan, Yang Shao. 2012. Relationship between the sediment pigment records of Lake Lugu and the regional climate change over the past 200a. Journal of Lake Science, 24(5): 780～788 (in Chinese with English abstract).

Chen Yifeng, Wan Guojiang. 1999. Extraction of α-Cellulose from Lugu Lake sediment and its stable carbon isotope. Geology-Geochemistry, 27(4): 72～76 (in Chinese with English abstract).

Chu Guoqiang, Sun Qing, Xie Manman, Lin Yuan, Shang Wenyu, Zhu Qingzen, Shan Yabin, Xu Deke, Rioual P, Wang Luo, Liu Jiaqi. 2014. Holocene cyclic climatic variations and the role of the Pacific Ocean as recorded in varved sediments from northeastern China. Quaternary Science Reviews, 102: 85～95.

Cui Linlin, Wang Xu, Shen Ji, Ding Zhongli. 2015. Changes in distribution and compound-specific carbon isotope compositions of n-alkanes as recorded in Lugu Lake sediments from southwestern China since last glacial maximum and implications for paleovegetation evolution. Quaternary Sciences, 35(4): 871～880 (in Chinese with English abstract).

Ferguson D K, Zetter R, Paudayar K N. 2007. The need for the SEM in palaeopalynology. Comptes rendus-Palevol, 6: 423～430.

IDBMC (Information Department of Beijing Meteorological Center), 1983a, 1983b, 1984a, 1984b, 1984c, 1984d. Land climate data of China (1951～1980). Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).

Jiang Xuezhong, Yang Xiangdong, Wang Sumin, Tong Guobang. 2001. The last glacier maximal pollen record in the lakes sediments from ancient Heqing Lake and its significance for paleomonsoon. Acta Micropalaeontologica Sinica, 18(3): 263～267 (in Chinese with English abstract).

Johnsen S J, Clausen H, Dansgaard W, Fuhrer K, Gundestrup N, Hammer C U, Iversen P, Jouzel J, Stauffer B, Steffensen J P S. 1992. Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core. Nature, 359: 311～313.

Johnsen S J, Dansgaard W, Clausen H B, Langway C C. 1972. Oxygen isotope profiles through the Antarctic and Greenland Ice Sheets. Nature, 235: 429～430.

Jones P D, Mann M E. 2004. Climate over past millennia. Reviews of Geophysics, 42(2): RG2002.

Li Bin, Yuan Daoxian, Lauritzen S E, Qin Jiaming, Lin Yushi. 1998. The younger Dryas Event and Holocene climate fluctuations recorded in a stalagmite from the Panlong Cave of Guilin. Acta Geologica Sinica (English Edition), 72(4): 455～465.

Li Chunhai, Tong Guobang, Shen Ji, Wang Sumin, Yang Xiangdong, Liu Zhiming. 2008. A study of surface pollen on an elevational gradient in Lijiang and Dali areas, Yunnan Province, China. Acta Palaeontologica Sinica, 47(2): 168～175 (in Chinese with English abstract).

Li Heng, Xu Tingzhi. 1979. The geobotanical expedition on lake Luguhu. Acta Botanica Yunnanica, 1(1): 125～137 (in Chinese with English abstract).

Li Suping, Hu Yaqin, Ferguson D K, Yao Jianxin, Li Chengsen. 2013a. Pollen dispersal in a mountainous area based on pollen analysis of four natural trap types from Lugu Lake, southwest China. Journal of Systematic and Evolution, 51(4): 413～425.

Li Suping, Ferguson D K, Wang Yong, Li Jinfeng, Yao Jianxin. 2013b. Climate Reconstruction based on Pollen Analysis in Inner Mongolia, North China from 51.9 to 30.6 ka BP. Acta Geologica Sinica (English Edition), 87: 1444～1459.

Liu Jianbao, Chen Fahu, Chen Jianhui, Xia Dunsheng, Xu Qinghai, Wang Zongli, Li Yuecong. 2011. Humid medieval warm period recorded by magnetic characteristics of sediments from Gonghai Lake, Shanxi, North China. Chinese Science Bulletin, 56: 2464～2474.

Mann M E, Jones P D. 2003. Global surface temperatures over the past two millennia. Geophysical Research Letters, 30: 1820.

Mayewski P A, Rohling E E, Stager J C, Karlén W, Maasch K A, Meeker L D, Meyerson E A, Gasse F, Kreveld S V, Holmgren K, Lee-Thorp J, Rosqvist G, Rack F, Staubwasser M, Schneider R R, Steig E J. 2004. Holocene climate variability. Quaternary Research, 62: 243～255.

Moberg A, Sonechkin D M, Holmgren K, Datsenko N M, Karlén W. 2005. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low-and high-resolution proxy data. Nature, 433:613～617.

Mosbrugger V, Utescher T. 1997. The coexistence approach-a method for quantitative reconstructions of Tertiary terrestrial palaeoclimate data using plant fossils. Palaeogeography,

Palaeoclimatology, Palaeoecology, 134 (61): 61～86.

Mosbrugger V, Utescher T, Dilcher D L. 2005. Cenozoic continental climatic evolution of Central Europe. Proceedings of the National Academy of Sciences, 102: 14964～14969.

Perveen A. 2006. A contribution to the pollen morphology of Family Gramineae. World Applied Sciences Journal, 1(2): 60～65.

Reimer P J, Bard E, Bayliss A, Beck J W, Blackwell P G, Ramsey C B, Buck C E, Cheng Hai, Edwards R L, Friedrich M, Grootes P M, Guilderson T P, Haflidason H, Hajdas I, Hatté C, Heaton T J, Hoffmann D L, Hogg A G, Hughen K A, Kaiser K F, Kromer B, Manning S W, Niu Mu, Reimer R W, Richards D A, Scott E M, Southon J R, Staff R A, Turney CSM, Plicht J V D. 2013. IntCal 13 and Marine 13 radiocarbon age calibration curves 0～50,000 years cal BP. Radiocarbon, 55 (4): 1869～1887.

Ruffaldi P. 1994. Relationship between recent pollen spectra and current vegetation around the Cerin peat bog (Ain, France). Review of Palaeobotany and Palynology, 82(1～2): 97～112.

Shen Ji, Jones R T, Yang Xiangdong, Dearing J A, Wang Sumin. 2006. The Holocene vegetation history of Lake Erhai, Yunnan Province southwestern China: the role of climate and human forcings. Holocene, 16(2): 265～276.

Sheng Enguo, Yu Keke, Xu Hai, Lan Jianghu, Liu Bin, Che Shuai. 2015. Late Holocene Indian summer monsoon precipitation history at Lake Lugu, northwestern Yunnan Province, southwestern China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 438: 24～33.

Shi Zhengtao, Ming Qingzhong, Zhang Hucai. 2004. Investigation of the evolution and environment change of typical lakes in Yunnan. Journal of Geomechanics, 10(4): 344～365 (in Chinese with English abstract).

Shi Zhengtao, Ming Qingzhong, Zhang Hucai. 2005. A study review on the modern processes and environmental evolution of the typical lakes in Yunnan. Yunnan Geographic Environment Research, 17(1): 24～63 (in Chinese with English abstract).

Smol J P, John H, Briks B, William M L. 2001. Tracking environmental change using lake sediments Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, Henderson K A, Brecher H H, Zagorodnov V S, Mashiotta T A, Lin Pingnan, Mikhalenko V N, Hardy D R, Beer J. 2002. Kilimanjaro Ice Core records: evidence of Holocene climate change in tropical Africa. Science, 298: 589～593.

Vermoere M, Vanhecke L, Waelkens M, Smets E. 2001. Modern pollen studies in the territory of Sagalassos (Southwest Turkey) and their use in the interpretation of a Late Holocene pollen diagram. Review of Palaeobotany and Palynology, 114: 29～56.

Von Post L. 1946. The prospect for pollen analysis in the study of the earth's climatic history. New Phytologist, 45: 193～217.

Wang Peifang, Sun Guangyou. 1986. The spore-pollen analysis and significance of the north-west Yunnan Plateau in the Hengduan Mountains. Scientia Geographica Sinica, 6(3): 254～260 (in Chinese with English abstract).

Wang Sumin, Dou Hongsheng. 1998. Lakes in China. Beijing: Science Press (in Chinese).

Wang Zixiang, Wang Yongli, Meng Pei, Wang Gen, Sun Lina, Sun Zepeng, Xu Liang, Wu Baoxiang. 2015a. Iron and n-alkanes records and their environmental significance of Lugu Lake, southeastern Tibetan Plateau. Quaternary Sciences, 35(1): 131～142 (in Chinese with English abstract).

Wang Zixiang, Wang Yongli, Wu Baoxiang, Wang Gen, Sun Zepeng, Xu Liang, Sun Lina. 2015b. Distribution of n-alkanes in the Luguhu Lake sediments and their paleovegetation significance. Marine Geology & Quaternary Geology, 35(2): 169～177 (in Chinese with English abstract).

Wu Hongqi, Dang Anrong. 1998. Fluctuation and characteristics of climate change in temperature of Sui-Tang Times in China. Quaternary Sciences, 1: 31～38 (in Chinese with English abstract).

Wu Zhengyi, Ding Tuoya. 1999. Seed plants of China. Kunming: Science and Technology Press (in Chinese).

Xiao Xiayun, Shen Ji, Wang Sumin. 2011. Spatial variation of modern pollen from surface lake sediments in Yunnan and southwestern Sichuan Province, China. Review of Palaeobotany and Palynology, 165(3): 224～234.

Xiao Xiayun, Shen Ji, Xiao Haifeng, Tong Guobang. 2006. Pollen records and vegetation and climate changes in Heqing Basin, Yunnan Province since middle Pleistocene. Journal of Lake Science, 18(4): 369～376 (in Chinese with English abstract).

Xu Jingxian, Wang Yufei, Du Naiqiu, Zhang Cuifen. 2000. The Neogene pollen/spore flora of Lühe, Yunnan. Acta Botanica Sinica, 42(5): 526～532 (in Chinese with English abstract).

Yao Tandong, Thompson L G. 1992. Records of Dunde Ice core and changes of the temperature during the past 5 ka. Science China B, 10: 1089～1093 (in Chinese without English abstract).

Zeng Juemin. 1990. Forest vegetation in Ninglang area. Kunming: Southwest Forestry University (in Chinese).

Zeng Xiwen, Wang Baorong, Yang Shuhua. 2012. The terrestrial vegetation characteristics in Lugu Lake watershed. Journal of Yunnan University, 34(4): 476～485 (in Chinese with English abstract).

Zheng Qian, Zhang Hucai, Ming Qingsong, Chang Fengqin, Meng Hongwei, Zhang Wenxiang, Liu Mengzhu, Shen Caiming. 2014. Vegetational and environmental changes since 15ka B.P. recorded by Lake Lugu in the southwest monsoon domain region. Quaternary Sciences, 34(6): 1314～1326 (in Chinese with English abstract).

Zheng Zhenhua, Tian Fang, Cao Xianyong, Xu Qinghai, Li Yuecong, Yang Xiaolan. 2008. A study on surface pollen assemblage and relationship with vegetation from some vegetation types in central North China. Geography and Geo-Information Science, 24(4): 92～97 (in Chinese with English

abstract)

参 考 文 献

北京气象中心资料室. 1983a, 1983b, 1984a, 1984b, 1984c, 1984d. 1951～1980 年中国地面气候资料. 北京:气象出版社.

陈传红, 汪敬忠, 朱迟, 赵良元, 蒋金辉, 杨娇艳, 杨劭. 2012. 近 200 a 来泸沽湖沉积物色素记录与区域气候变化的关系. 湖泊科学, 24(5): 780～788.

陈毅风, 王国江. 1999. 泸沽湖沉积物 α 纤维素的提取及其稳定碳同位素初探. 地质地球化学, 27(4): 72～76.

崔琳琳, 王旭, 沈吉, 丁仲礼. 2015. 末次盛冰期以来泸沽湖沉积记录的正构烷烃分布特征和单体碳同位素组成及其古植被意义. 第四纪研究, 35(4): 871～880.

蒋雪中, 羊向东, 王苏民, 童国榜. 2001. 云南鹤庆盆地末次盛冰期的孢粉记录与古季风. 微体古生物学报, 18(3): 263～273.

李春海, 童国榜, 沈吉, 王苏民, 羊向东, 刘志明. 2008. 云南丽江—大理地区现代花粉垂直分布特征. 古植物学报, 47(20): 168～175.

李恒, 徐廷志. 1979. 泸沽湖植被考察. 云南植物研究, 1(1): 125～137.

史正涛, 明庆忠, 张虎才. 2004. 云南高原典型湖泊演化及环境变化初步考察. 地质力学学报, 10(4): 344～350.

史正涛, 明庆忠, 张虎才. 2005. 云南高原典型湖泊现代过程及环境研究进展. 云南地理环境研究, 17(1): 24～26.

汪佩芳, 孙广友. 1986. 滇西北横断山区全新世古植被与古气候演变. 地理科学, 6(3): 254～260.

王苏民, 窦鸿声. 1998. 中国湖泊志. 北京:科学出版社.

王自翔, 王永莉, 孟培, 汪亘, 孙丽娜, 孙则朋, 徐亮, 吴保祥. 2015a. 泸沽湖沉积物中的铁元素和有机分子记录及其古气候/环境意义. 第四纪研究, 35(1): 131～142.

王自翔, 王永莉, 吴保祥, 汪亘, 孙则朋, 徐亮, 孙丽娜. 2015b. 泸沽湖沉积物正构烷烃分布特征及其古植被意义. 海洋地质与第四纪地质, 35(2): 169～177.

吴宏岐, 党安荣. 1998. 隋唐时期气候冷暖特征与气候波动. 第四纪研究, 1: 31～38.

吴征镒, 丁托娅. 1999. 中国种子植物. 昆明:云南科技出版社.

肖霞云, 沈吉, 肖海丰, 童国榜. 2006. 云南鹤庆盆地中更新世以来的孢粉记录及其植被与气候变化. 湖泊科学, 18(4): 369～376.

徐景先, 王宇飞, 杜乃秋, 张翠芬. 2000. 云南吕合地区晚第三纪孢粉植物群. 植物学报, 42(5): 526～532.

姚檀栋, Thompson LG. 1992. 敦德冰芯记录与过去 5ka 温度变化. 中国科学 B 辑, 10: 1089～1093.

曾觉民. 1990. 宁蒗森林植被. 西南林业大学: 昆明.

曾熙雯, 王宝荣, 杨树华. 2012. 泸沽湖流域的陆生植被特征. 云南大学学报(自然科学版), 34(4): 476～485.

郑茜, 张虎才, 明庆忠, 常凤琴, 蒙红卫, 张文翔, 刘梦竹, 沈才明. 2014. 泸沽湖记录的西南季风区 15000a B.P. 以来的植被与气候变化. 第四纪研究, 34(6): 1314～1326.

郑振华, 田芳, 曹现勇, 许清海, 李月丛, 阳小兰. 2008. 中原地区不同植被类型花粉组合特征及对周围植被的代表性. 地理与地理信息科学, 24(4): 92～97.

Climatic and Environmental Changes of the Lugu Lake Area During the Late Holocene

LI Suping[1,2], LI Jinfeng [3], WU Zhenjie[1], YAO Jianxin[1,2]

1) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing*, 100037;

2) *Key Laboratory of Stratigraphy and Paleontology, Ministry of Land and Resources, Beijing*, 100037; 3) *State Key Laboratory of Systematic and Evolutionary Botany, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing*, 100093

Abstract

There is little influence by human activities in the Lugu Lake area, and it's sensitive to the climatic changes. Therefore, Lugu Lake is an ideal place to carry out the paleoclimate study. In this study, we drilled a 103 cm long core in Caohai, Lugu Lake area. In total of 52 samples were obtained for pollen analysis from the core with the interval of 2 cm. The dating was measured by AMS-^{14}C method, and the calibrated age of the bottom is 3455 cal. a BP. Abundant of pollen and spores were obtained from all the samples. The vegetation is described as follows: *Pinus* trees are predominant through all this period, and *Tsuga* trees are also with frequent appearances. *Quercus* trees dominate the angiosperms, *Castanea* and Oleaceae both occur frequently. Gramineae is the main component of herbs, together with Polygonaceae, Asteraceae and Cyperaceae. Ferns are one important composition of the understory vegetation, which including *Osmunda*, *Lycopodium* and Hymenophyllaceae etc. In addition, Caohai is a seasonal wetland and the aquatic plants are mainly composed by *Typha*, *Zygnema* and *Spirogyra*. In order to obtain the climatic changing curves since late Holocene in the Lugu Lake area, we applied coexistence approach to the four pollen zones. The MAT (mean annual temperature) and MAP (mean annual precipitation) are listed as follows: 3455 cal. a BP to 2585 cal. a BP, MAT=11.5～18.6 ℃, MAP=797.5～1484.3 mm; 2585 cal. a BP to 1699 cal. a BP, MAT=11.7～18.6 ℃, MAP=617.9～1523.1 mm; 1699 cal. a BP to 595 cal. a BP, MAT=8.5～18.6 ℃, MAP=797.5～1484.3 mm; 595 cal. a BP to present, MAT=5.7～18.6 ℃, MAP=617.9～1484.3 mm. The climate since 3455 cal. a BP went through four phases: getting warmer slightly, being colder, still tend to colder and getting warmer again. We also compared our climatic changing curve with other records (such as δ^{18}O curves of Greenland ice core and Dunde ice core) which shows similar changing trend. The medieval warm period, little ice age and current warm period can be all observed.

Key words: Late Holocene; palynology; climatic change; Lugu Lake; Yunnan

滇中北部昆阳群凝灰岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及其地层学意义

刘昊岗[1,2],张 恒[2],张传恒[1],高林志[2],刘燕学[2],张继彪[2]
LIU Haogang[1,2], ZHANG Heng[2], ZHANG Chuanheng[1], GAO Linzhi[2],
LIU Yanxue[2], ZHANG Jibiao[2]

1. 中国地质大学(北京),北京 100083;
2. 中国地质科学院地质研究所,北京 100037
1. *China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China;*
2. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*

摘要:滇中昆阳群一直是华南前寒武纪地质研究的热点之一,其地层序列、时代与区域对比长期存在争议。通过对滇中易门县小街乡普家村-岔河水库剖面禄表组2个凝灰岩样品进行SHRIMP锆石U-Pb定年,获得禄表组凝灰岩的锆石$^{206}Pb/^{238}U$年龄为878.5±4.7Ma和878.0±4.0Ma,首次证实禄表组的形成时代为新元古代中期。禄表组凝灰岩SHRIMP锆石U-Pb年龄的获得,有利于正确认识昆阳群的划属关系,并为西南地区青白口纪地层格架的建立和对比提供可靠的年代学依据。

关键词:昆阳群;禄表组;SHRIMP锆石U-Pb年龄;新元古代;滇中
中图分类号:P588.14;P597⁺.3;P534.3 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-2552(2019)07-1183-08

Liu H G, Zhang H, Zhang C H, Gao L Z, Liu Y X, Zhang J B. SHRIMP zircon U-Pb age of the Kunyang Group in northern Central Yunnan Province and its stratigraphic significance. *Geological Bulletin of China*, 2019, 38(7):1183-1190

Abstract: The Kunyang Group in the Central Yunnan Province, whose stratigraphic sequence and stratigraphic correlation are controversial, are always the research focus of Precambrian geology. Two zircon dating ages (878.5±4.7Ma and 878.0±4.0Ma) of tuff bedding from the Lubiao Formation in Yimen County are reported in this paper. Zircon dating of tuff bedding indicates that the formation occurred in Middle Neoproterozoic, which is the first report from the Lubiao Formation. Combined with a large number of high precision ages obtained from Kunyang Group, these stratigraphic ages provide important evidence for the acceptable division of Kunyang Group, and also offer reliable chronological data for the setting up of the Qingbaikou System in Southwest China.

Key words: Kunyang Group; Lubiao Formation; SHRIMP zircon U-Pb age; Neoproterozoic; Central Yunnan Province

昆阳群是发育于滇中地区、角度不整合于澄江组之下的一套浅变质的陆源碎屑岩、碳酸盐岩及火山碎屑岩(朱庭祜于1927年提出[1-3]),大地构造上属扬子陆块的西南部[4](图1)。1962年,全国地层委员会将易门、昆阳地区出露的浅变质岩系称为昆阳群,并提出可与东川地区角度不整合于澄江组之下的浅变质岩系对比,时代统一划归为前震旦系。1960年代末,通过滇中地区1:20万区域地质调查,将昆阳群进一步划分为9个组,自下而上为黄草岭组、黑山头组、大龙口组、美党组、因民组、落雪组、鹅头厂组、绿汁江组、柳坝塘组,并认为黄草岭组、黑山头组、大龙口组、美党组发育于铜厂-小街断裂以东

收稿日期:2018-11-12;**修订日期**:2019-01-29
资助项目:中国地质调查局项目《全国地质构造区划与区域地质调查综合集成》(编号:DD20160345)、《中国及邻区海陆大地构造研究和相关图件编制》(编号:DD20160343)和科技部基金项目《中国标准地层建立——中国地层表的完善》(编号:2015FY310100)
作者简介:刘昊岗(1994-),男,在读硕士生,从事前寒武纪地层研究。E-mail: liu.h.g@foxmail.com
通讯作者:张恒(1985-),男,博士,助理研究员,从事前寒武纪地层与大地构造研究。E-mail: heng0520@126.com

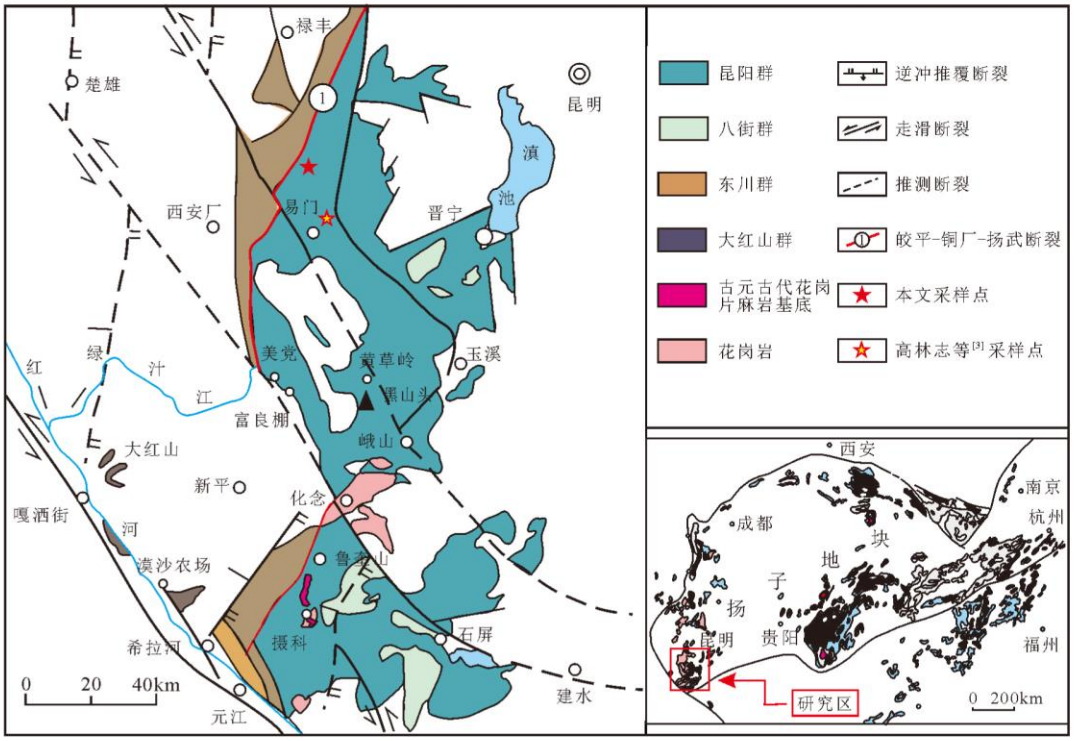


图1 滇中前南华系及构造简要图(据参考文献[1]修改)

Fig. 1 Pre-Nanhua System in Central Yunnan Province and tectonic map

地区,因民组、落雪组、鹅头厂组、绿汁江组发育于小街-铜厂断裂以西地区,柳坝塘组角度不整合于昆阳群不同层位之上。吴懋德等[5]对昆阳群层序进行分析讨论,认为"因民组、落雪组、鹅头厂组、绿汁江组"应置于"黄草岭组、黑山头组、大龙口组、美党组"之下。2009年,全国地层委员会组织召开昆阳群野外现场会议,建议将东川地区的昆阳群恢复最初的命名,即东川群,自下而上分为因民组、落雪组、黑山组和青龙山组;将昆阳群中亚群保留为昆阳群,自下而上为黄草岭组、黑山头组、大龙口组和美党组[6];并强调东川群与昆阳群在地域上没有直接的接触关系[1]。然而,除以上昆阳群8个组外,还有一套岩性组合与昆阳群有一定差异但密切相关的地层单元[5,7-8],即邓家藩于1961—1962年在滇中东部发现的"柳坝塘组"及相关地层单元[9],其变质程度较昆阳群浅,叠层石组合和古生物植物化石组合与昆阳群也有所区别[7,10]。吕世琨等[11]进一步将柳坝塘组划分为清水沟组、禄表组。吴懋德等[5,12]对易门栗窝—禄丰罗茨一带的柳坝塘组及上、下地层的研究,认为柳坝塘组整合于美党组之上,不整合或整合于华家箐组之下,内部可进一步分为清水沟段和禄表段。鄢芸樵[7]则将柳坝塘组划属为"八街群"。与上述观点明显不同的是,云南1:20万地质图(昆明幅)及报告将滇中西部地区的"柳坝塘组"对比为昆阳群美党组①,柳坝塘组则零星出露于军哨、安宁、华家箐地区。因此,柳坝塘组及相关地层单元的内涵、地层划分与对比、地质年代等存在争议。限于技术手段缺乏,地层划分与对比多以岩性组合特征为主要依据。高精度同位素测年数据是建立区域地层格架可靠的时间标尺,其在前寒武纪地层划分与对比研究中更具不可替代的重要作用。2009年,全国地层委员会组织召开的昆阳群野外现场会议的会后报告中提出,应加强样品采集与测年工作,强化对扬子陆块西缘昆阳群、东川群的岩石地层层序划分及对比研究[13]。通过野外剖面研究,结合前人工作成果,对比岩性组合特征,笔者认为吕世琨等[11]的划分方案(柳坝塘组划分为清水沟组和禄表组)更合理。本文采集禄表组可靠的测年样品,利用SHRIMP锆石定年技术,获得滇中北部禄表组凝灰岩高质量的年龄数据。

1　地质背景及地层序列

在约1.0Ga全球Rodinia超大陆聚合事件中,扬子陆块西南缘发生与格林威尔造山期相关的弧陆碰撞事件,昆阳群是在扬子陆块一侧的弧后前陆盆地形成的沉积组合[14-18]。昆阳群分布于东川、滇中和滇东地区,呈南北向展布在扬子板块西南缘,区域上处于扬子板块、华夏板块和三江造山带的结合部位[16,19],以皎平-铜厂-扬武断裂为界,东部为昆阳群,西部为东川群[3](图1)。2009年,全国地层委员会组织昆阳群野外现场会议,建议将原定义的昆阳群解体。然而,原属昆阳群的岔河组、柳坝塘组、华家箐组等的划属仍未达成共识。李希勣等[20-21]、孙家聪[22]、鄢芸樵[7,10]、吴懋德等[5]、吕世琨等[11]先后对昆阳群的地质背景、形成时代做了深入研究,为昆阳群地层序列的厘定做出了卓越贡献。高林志等[1-3]在云南晋宁地区柳坝塘村、易门六街地区七贤村和易门铜矿北获得柳坝塘组清水沟段(本文清水沟组)多个凝灰岩样品,得到SHRIMP锆石U-Pb年龄为870~890Ma,属青白口纪(图1),对清水沟组进行了精确的年代学限定。本文分析禄表组2组凝灰岩样品,标定禄表组的时限,为西南地区地层格架的建立和对比提供可靠的年代学依据。

2　地层序列和采样层位

研究区地层自下而上为美党组、岔河组、清水沟组、禄表组、澄江组。依据戴恒贵等[8]、吕世琨等[11]对昆阳群地层特征的总结,结合野外观测,对研究区地层特征简述如下(图2)。

凝灰岩样品A20170408-5、A20170408-6均采自易门县普家村-岔河水库剖面,地理坐标分别为北纬24°51′38.09″、东经102°8′40.22″和北纬24°51′38.24″、东经102°8′33.61″(图1、图3)。剖面自东向西发育美党组、岔河组、清水沟组、禄表组。禄表组为灰黄色粉砂质板岩夹细砂岩,粉砂质泥岩偶有凝灰岩夹层,夹层呈土黄色-灰白色,厚1~10cm。镜下鉴定结果表明,凝灰岩样品均具有典型的凝灰结构,主要由粘土、石英、长石等矿物组成,矿物风化蚀变较强,普遍见定向排列的玻屑(图版Ⅰ)。

3　分析方法

锆石单矿物分选在河北廊坊区域地质调查研究所实验室进行。在无污染的条件下,将原岩样品粉碎至60目,淘洗岩石粉末,得到含锆石的重砂。再经重液和电磁分选后得到锆石样品,在双目镜下挑选出锆石颗粒。将待测锆石颗粒依照从大到小

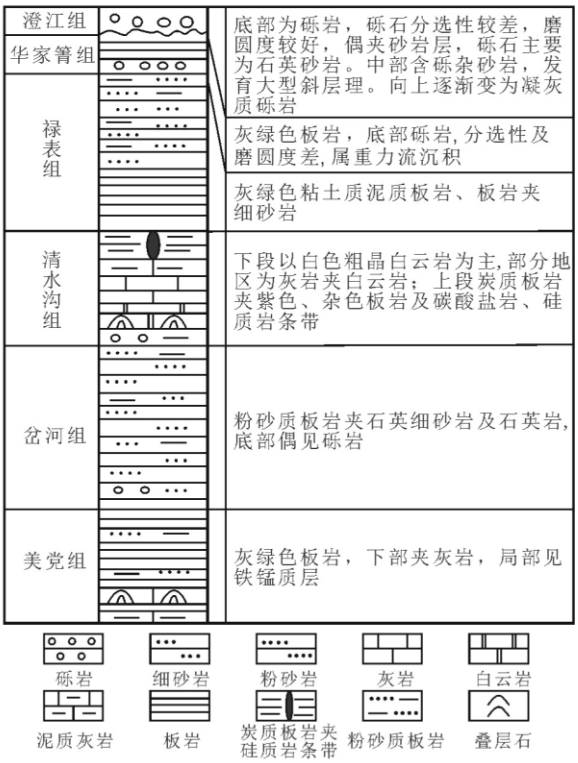


图2　研究区地层柱状图(据参考文献[8]修改)

Fig. 2　Stratigraphic column of the study area

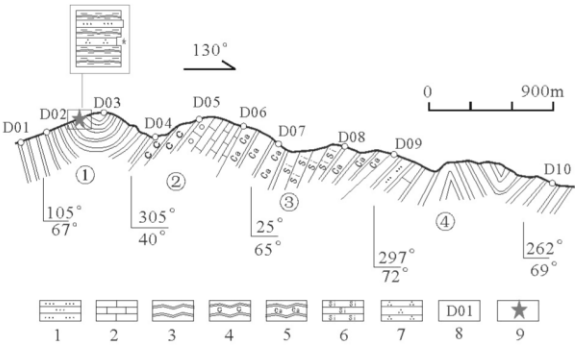
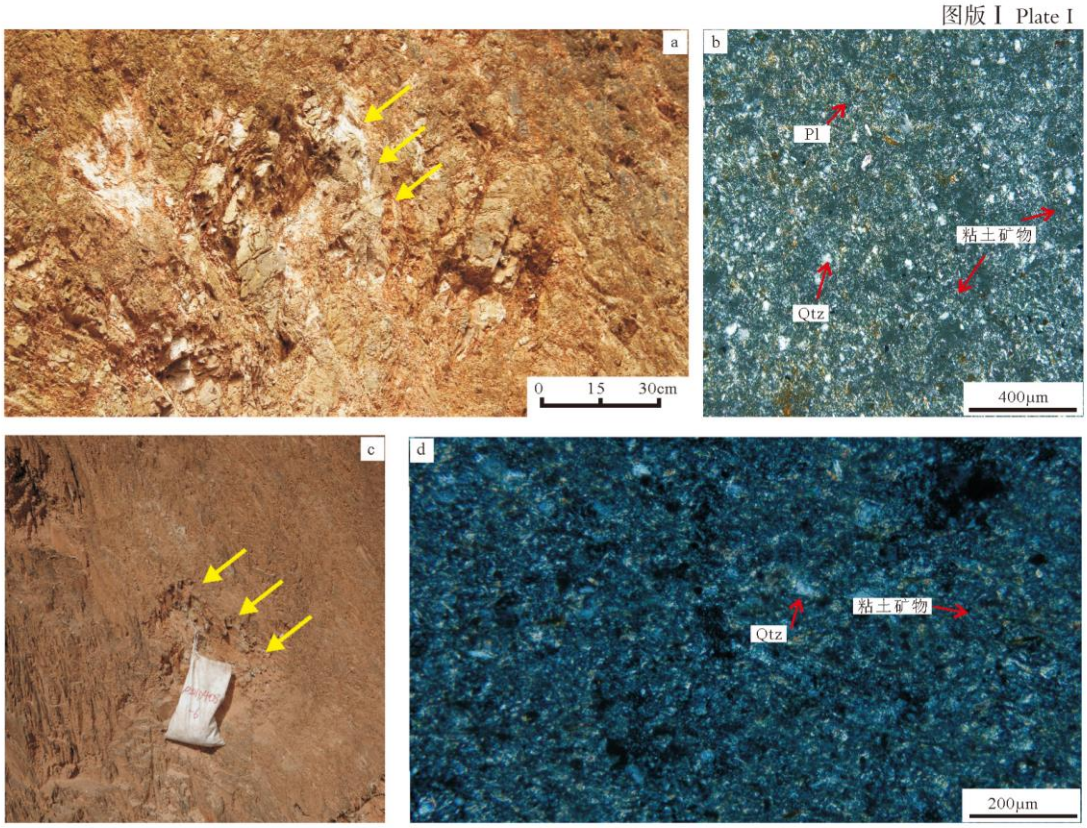


图3　易门县普家村-岔河水库剖面

Fig. 3　Pujiacun-Chahe reservoir section in Yimen County

1—细砂岩;2—灰岩;3—板岩;4—炭质板岩;5—钙质板岩;6—硅质板岩;7—凝灰岩;8—野外定点号;9—采样点;①—禄表组 ②—清水沟组;③—岔河组;④—美党组

图版Ⅰ Plate I



a、b.凝灰岩样品A20170408-5野外采样点及镜下照片;c、d.凝灰岩样品A20170408-6野外采样点及镜下照片

的顺序排列,与锆石标样(TEM)一起粘贴在玻璃板上,灌注环氧树脂后制成样品靶。待树脂固结变硬后,打磨和抛光至锆石中心部位暴露。然后拍摄锆石的透射光、反射光和阴极发光(CL)图像。测定时选取无裂隙和包裹体且CL图像灰度单一、发育岩浆环带的位置测定。SHRIMP锆石U-Pb同位素测定在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心SHRIMP-Ⅱ上完成。锆石样品靶制作、测试流程和数据处理见参考文献[23-26]。本次测试过程中,仪器质量分辨率约为5000(1%峰高),一次离子流O_2^-强度为4nA。一次离子流束斑的直径为25~30μm,每个数据点测定由5次扫描获得。测定质量峰为$(^{90}Zr_2{}^{16}O)^+$、$^{204}Pb^+$、背景值、$^{206}Pb^+$、$^{207}Pb^+$、$^{208}Pb^+$、$^{238}U^+$、$(^{232}Th^{16}O)^+$和$(^{238}U^{16}O)^+$。采用标准锆石样TEM和M257分别进行元素间的分馏校正及U含量标定;其中TEM具有U-Pb谐和年龄,其$^{206}Pb/^{238}U$年龄为416.8±1.1Ma;M257的U含量为840×10^{-6}。原始数据的处理和年龄计算采用Ludwig[27]的Squid和Isoplot程序。普通铅校正根据实测的^{204}Pb进行,普通铅的组成根据Stacey等[28]给出的模式计算得到。表1中年龄的误差为1σ绝对误差,同位素比值的误差为1σ相对误差,文中的$^{206}Pb/^{238}U$年龄加权平均值误差为95%的置信度误差。

4 测定结果

阴极发光(CL)图像显示,样品锆石晶形较好,为浅黄色-无色透明自形长柱状晶体,部分为短柱状,柱状长宽比为2~3,锆石粒度多在50~150μm之间,具典型的岩浆生长振荡环带和韵律结构,属于岩浆结晶的产物(图4)。测年结果表明,岩浆锆石的U、Th含量较高,Th/U值较大(一般大于0.4,少量接近0.4),显示岩浆锆石的特征。

(1)A20170408-5样品共测试18个数据点,其U含量为96×10^{-6}~406×10^{-6},Th含量为48×10^{-6}~390×10^{-6},Th/U值为0.32~1.22(表1)。其中数据点1.1的$^{206}Pb/^{238}U$年龄为1635.5±7.5Ma,数据点2.1

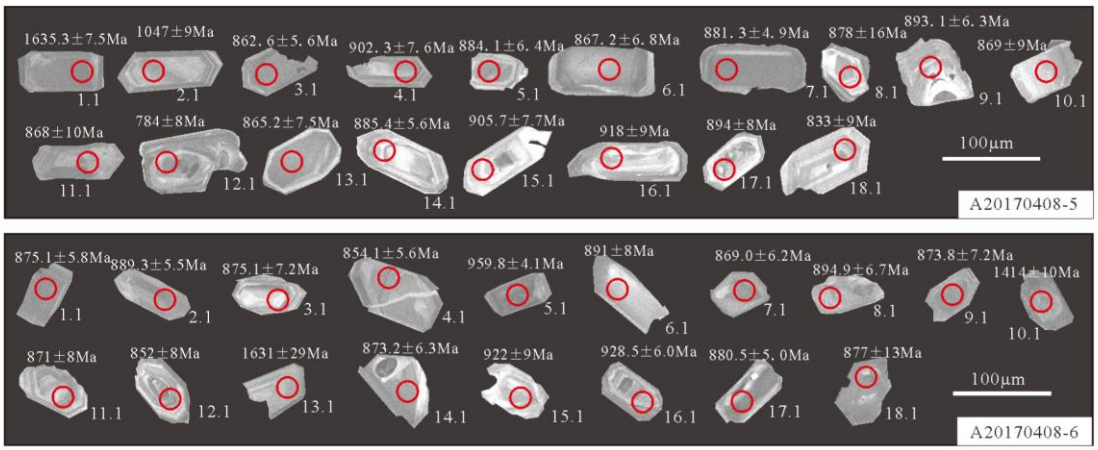


图4　凝灰岩样品锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 4　The CL images of the tuff zircons in the tuff samples

的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 1047±9Ma,明显老于其他数据点,可能为继承性锆石;数据点 3.1、12.1、18.1 的 ^{204}Pb 值偏高,可能是制样过程中锆石被污染,导致该数据的准确度降低,偏离主群,时代较年轻;4 个数据点(4.1、9.1、15.1、16.1)可能受后期热事件影响,U、Pb 有不同程度的丢失,$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄较年轻;另 9 个数据点位于谐和线上(图 5),其 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均值为 878.5±4.7Ma(MSWD=1.7),代表了禄表组凝灰岩的形成时代。

(2)A20170408-6 样品共测试 18 个数据点,其 U 含量为 86×10^{-6}~738×10^{-6},Th 含量为 69×10^{-6}~908×10^{-6},Th/U 值为 0.48~2.69(表 1)。其中 2 个数据点(10.1、13.1)的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄分别为 1459±21Ma、1566±39Ma,明显老于其他数据点,可能为继承性锆石;数据点 4.1 的 U 值偏高,数据点 12.1 的 ^{204}Pb 值偏高,偏离主群;数据点 5.1、8.1、5.1、16.1 的 U、Pb 有不同程度的丢失,其 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄较年轻;其余 10 个数据点位于谐和线上(图 5),其 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均值为 878.0±4.0Ma(MSWD=1.3),也代表禄表组凝灰岩的形成时代。

5　讨　论

2009 年全国地层委员会野外现场会议纪要[13]提出,昆阳群指发育于滇中地区、角度不整合于澄江组之下的一套浅变质的陆源碎屑岩、碳酸盐岩及火山岩系,自下而上划分为黄草岭组、黑山头组、大龙

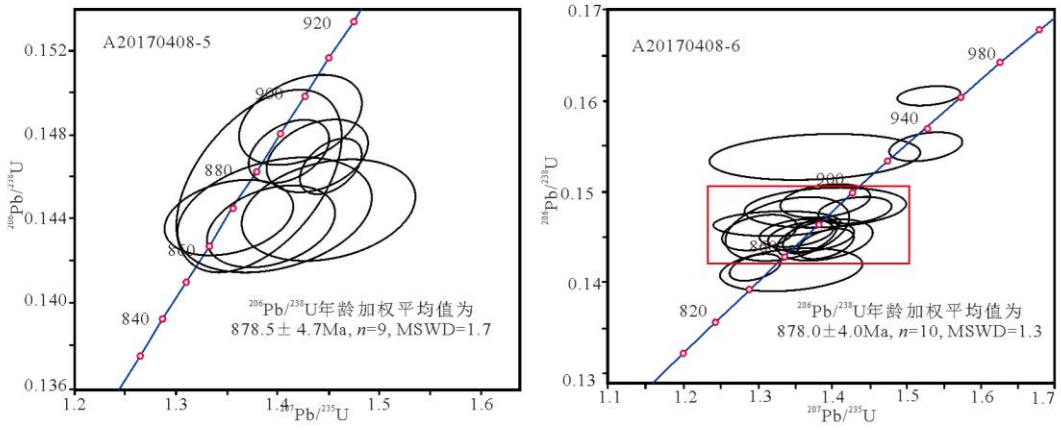


图5　凝灰岩样品锆石U-Pb谐和图

Fig. 5　Zircon U-Pb concordia diagrams of tuff samples

表1 凝灰岩SHRIMP锆石U-Th-Pb同位素测定结果

Table 1 SHRIMP U-Th-Pb isotopic compositions for zircons from tuff

测点	$^{206}Pb_c$/%	U/10^{-6}	Th/10^{-6}	$^{232}Th/^{238}U$	$^{206}Pb^*/10^{-6}$	$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄/Ma	$^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄/Ma	不谐和度/%	$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	±%	$^{207}Pb^*/^{235}U$	±%	$^{206}Pb^*/^{238}U$	±%	误差相关系数
A20170408-5															
1.1	0.25	406	302	0.77	101	1635.3±7.5	1629±18	0	0.10027	0.97	3.992	1.1	0.2888	0.52	.474
2.1	--	124	66	0.55	18.7	1047±9	1108±38	6	0.0765	1.9	1.860	2.1	0.1763	0.92	.433
3.1	1.29	270	116	0.44	33.7	862.6±5.6	855±70	-1	0.0676	3.4	1.334	3.5	0.14317	0.70	.201
4.1	0.26	176	208	1.22	22.8	902.3±7.6	838±36	-8	0.0670	1.7	1.388	2.0	0.1502	0.90	.460
5.1	--	190	142	0.77	24.0	884.1±6.4	957±44	8	0.0710	2.2	1.439	2.3	0.1470	0.77	.335
6.1	0.43	161	89	0.57	20.0	867.2±6.8	872±61	1	0.0681	3.0	1.352	3.1	0.1440	0.84	.272
7.1	--	346	286	0.85	43.5	881.3±4.9	983±26	10	0.07190	1.3	1.452	1.4	0.14650	0.59	.417
8.1	0.16	181	138	0.79	22.7	878±16	892±70	2	0.0688	3.4	1.383	3.9	0.1458	1.9	.498
9.1	0.01	214	157	0.76	27.4	893.1±6.3	892±34	0	0.0688	1.7	1.409	1.8	0.1486	0.75	.414
10.1	--	96	48	0.52	11.9	869±9	1009±76	14	0.0728	3.7	1.450	3.9	0.1444	1.1	.283
11.1	0.85	289	152	0.54	36.1	868±10	937±89	7	0.0703	4.3	1.397	4.5	0.1441	1.2	.277
12.1	9.99	335	380	1.17	41.5	784±8	796±240	2	0.0658	12	1.17	12	0.1292	1.1	.098
13.1	0.07	185	155	0.87	22.8	865.2±7.5	938±58	8	0.0703	2.8	1.393	3.0	0.1436	0.93	.311
14.1	0.15	247	76	0.32	31.3	885.4±5.6	913±36	3	0.0695	1.7	1.411	1.9	0.1472	0.68	.367
15.1	0.38	147	52	0.37	19.1	905.7±7.7	842±56	-8	0.0671	2.7	1.396	2.9	0.1508	0.92	.321
16.1	0.33	139	73	0.54	18.3	918±9	879±84	-5	0.0683	4.1	1.443	4.2	0.1531	1.0	.248
17.1	0.37	274	180	0.68	35.1	894±8	909±54	2	0.0693	2.6	1.421	2.8	0.1487	0.98	.350
18.1	2.10	360	390	1.12	43.6	833±9	856±85	3	0.0676	4.1	1.285	4.2	0.1379	1.1	.270
A20170408-6															
1.1	0.24	268	201	0.77	33.6	875.1±5.8	851±49	-3	0.0674	2.4	1.351	2.5	0.1454	0.70	.287
2.1	0.40	303	169	0.58	38.7	889.3±5.5	932±45	5	0.0701	2.2	1.430	2.3	0.14792	0.66	.290
3.1	0.60	166	153	0.96	20.8	875.1±7.2	772±50	-13	0.0649	2.4	1.302	2.6	0.1454	0.88	.343
4.1	0.30	329	263	0.83	40.1	854.1±5.6	817±34	-4	0.0664	1.6	1.296	1.8	0.14166	0.70	.396
5.1	0.77	738	528	0.74	103	959.8±4.1	901±37	-7	0.0691	1.8	1.529	1.8	0.16054	0.46	.253
6.1	0.21	138	111	0.83	17.6	891±8	870±100	-2	0.0680	5.1	1.390	5.2	0.1482	1.0	.198
7.1	--	216	113	0.54	26.8	869.0±6.2	925±34	6	0.0699	1.6	1.390	1.8	0.1443	0.76	.420
8.1	0.35	204	94	0.48	26.2	894.9±6.7	860±58	-4	0.0677	2.8	1.390	2.9	0.1489	0.80	.277
9.1	0.23	316	268	0.88	39.5	873.8±7.2	881±32	1	0.0684	1.5	1.370	1.8	0.1452	0.88	.501
10.1	0.08	234	118	0.52	49.3	1414±10	1459±21	3	0.0916	1.1	3.098	1.4	0.2453	0.78	.570
11.1	0.62	257	157	0.63	32.1	871±8	918±60	5	0.0696	2.9	1.389	3.1	0.1447	1.0	.327
12.1	2.99	348	908	2.69	43.6	852±9	897±94	5	0.0690	4.6	1.342	4.7	0.1412	1.1	.240
13.1	0.25	86	82	0.97	21.4	1631±29	1566±39	-4	0.0970	2.1	3.85	2.9	0.2878	2.0	.693
14.1	0.36	225	163	0.75	28.1	873.2±6.3	886±55	1	0.0686	2.7	1.371	2.8	0.1450	0.77	.278
15.1	1.64	134	69	0.53	18.0	922±9	773±140	-19	0.0650	6.8	1.377	6.9	0.1537	1.1	.156
16.1	0.47	338	211	0.64	45.3	928.5±6.0	969±42	4	0.0714	2.0	1.525	2.2	0.1549	0.70	.324
17.1	2.69	468	721	1.59	60.5	880.5±5.0	794±88	-11	0.0656	4.2	1.324	4.3	0.14636	0.61	.144
18.1	1.77	285	259	0.94	36.4	877±13	825±80	-6	0.0666	3.8	1.338	4.1	0.1458	1.5	.376

注：年龄的误差为1σ绝对误差，同位素比值的误差为1σ相对误差，Pb_c代表普通Pb，Pb^*代表放射成因Pb，标准校正的误差为0.15%。

不谐和度 =($^{206}Pb/^{238}U$年龄 − $^{207}Pb/^{206}Pb$年龄)/($^{207}Pb/^{206}Pb$年龄)×100%

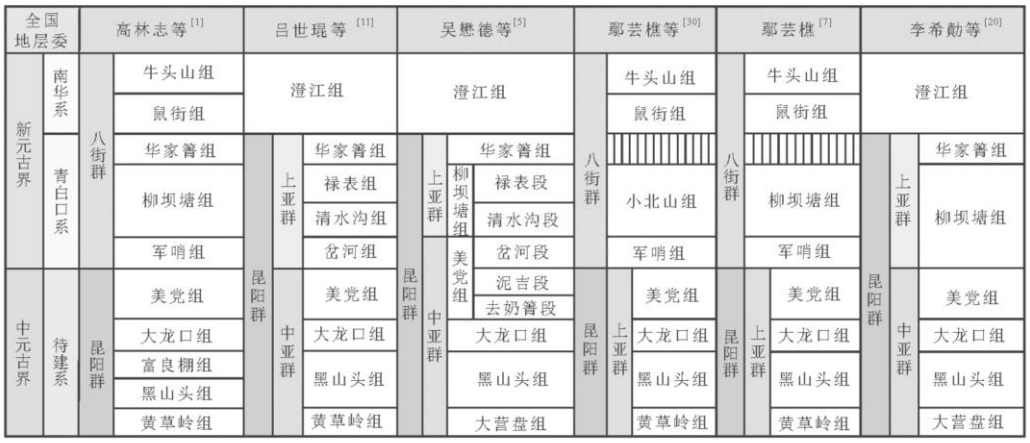


图6　滇中地区中、新元古界主要地层划分沿革

Fig. 6　Historical record of changes in major Meso-Neoproterozoic stratigraphic division of Central Yunnan Province

口组、美党组。黄草岭组主要为板岩及粉砂质板岩、千枚岩[1-3,29]。黑山头组是一套具正向粒级韵律的砂岩、板岩和凝灰岩[1-3,5,29]。大龙口组为一套厚达2000m以上的灰岩、白云质灰岩组合[1-3,5,9,29]。美党组主要为板岩、灰岩[5,29]。张传恒等[15]在黑山头组富良棚段上部安山质熔结凝灰岩(层凝灰岩)中获得的SHRIMP锆石U-Pb年龄加权平均值为1032±9Ma,指示传统意义上的昆阳群主体应属中元古界上部。

昆阳群之上还发育一套以清水沟组、禄表组为代表的砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩、白云岩及炭质板岩、硅质岩岩系,吴懋德等[5]、戴恒贵等[8]、吕世琨等[11]称之为上昆阳亚群,鄢芸樵等称之为"八街群"[7,30](图6)。高林志等[1-3]在柳坝塘组清水沟段(本文清水沟组)获得凝灰岩SHRIMP锆石U-Pb年龄870~890Ma,首次证实"八街群"属新元古界。本文在滇中北部禄表组获得凝灰岩SHRIMP锆石U-Pb年龄878.5±4.7Ma、878.0±4.0Ma,进一步确定滇中北部的禄表组在层位上位于清水沟组之上,而不能对比成美党组,进一步佐证了"八街群"应属青白口系的认识。

"八街群"自下而上为军哨组、柳坝塘组、鼠街组和牛头山组[7,10]。鄢芸樵等[3-4,30]认为,这套地层的时代与天津蓟县剖面的青白口系时代相当。高林志等采用鄢芸樵的划分方案[1],厘定了昆阳群在地层柱中的位置。然而,鄢芸樵所述的军哨组仅获得一组1022Ma的Rb-Sr同位素年龄[7,10],鼠街组、牛头山组均缺乏可靠的年龄数据。吴懋德等[5,12]所述岔河组、华家箐组均缺乏可靠的年龄数据。因此,是否采用"八街群"仍需更多的年代学证据论证。2009年全国地层委员会野外现场会议建议,把不同构造区的岩性地层柱的建立放在第一位,然后再建立年代构造格架;应注意构造地层学的研究,进行地层划分与对比,完善大地构造背景的研究。昆阳群的划分仍需多方协作,需要不同地区完善其年代地层格架,以解决扬子块体和华夏块体与全球古地理格局的关系。

6　结　论

(1)本文获得滇中北部禄表组凝灰岩SHRIMP锆石U-Pb年龄为878.5±4.7Ma和878.0±4.0Ma,属新元古代青白口纪。

(2)确认滇中地区的禄表组之上发育一套新元古界碎屑岩系。

(3)本文获得的禄表组凝灰岩锆石U-Pb年龄,有利于正确认识滇中元古代地层的划属关系,有助于厘清其区域年代地层格架。

致谢:国家科技基础条件平台北京离子探针中心杨淳、江南女士,车晓超博士在样品接收、制样、仪器调试监控和数据处理方面提供了帮助,宋彪研究员对本文进行了细致的审阅并提出了建设性意见,审稿专家对本文进行了细致的审阅,并提出宝贵的意见,在此一并致以衷心的感谢。

参考文献

[1]高林志, 张恒, 张传恒, 等. 滇东昆阳群地层序列的厘定及其在中

国地层表的位置[J]. 地质论评, 2018, 64(2): 283−298.
[2]高林志, 尹崇玉, 丁孝忠, 等. 华南地区新元古代年代地层标定及地层对比[J]. 地球学报, 2015, 36(5): 533−545.
[3]高林志, 尹崇玉, 张恒, 等. 云南晋宁地区柳坝塘组凝灰岩SHRIMP锆石U−Pb年龄及其对晋宁运动的制约[J]. 地质通报, 2015, 34(9): 1595−1604.
[4]乔秀夫, 高林志, 张传恒. 中朝板块中、新元古界年代地层柱与构造环境新思考[J]. 地质通报, 2007, 26(5): 503−509.
[5]吴懋德, 段锦荪, 宋学良, 等. 云南昆阳群地质[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1990.
[6]李怀坤, 张传林, 姚春彦, 等. 扬子西缘中元古代沉积地层锆石U−Pb年龄及Hf同位素组成[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(8): 1287−1298.
[7]鄢芸樵. 对“昆阳群的层序及顶底问题”一文的商榷[J]. 地质论评, 1986, 22(3): 295−299.
[8]戴恒贵. 康滇地区昆阳群和会理群地层、构造及找矿靶区研究[J]. 云南地质, 1997, 16(1): 1−39.
[9]邓家藩, 谢振西, 申玉莲. 云南前震旦系层序及几个地质问题[C]// 中国地质学会云南省分会1963年首届学术年会论文选集, 1963.
[10]鄢芸樵. 再评“唐房运动”与“龙川运动”[J]. 云南地质, 1994, 13(2): 230−232.
[11]吕世琨, 戴恒贵. 康滇地区建立昆阳群(会理群)层序的回顾和重要赋矿层位的发现[J]. 云南地质, 2001, 20(1): 1−24.
[12]吴懋德, 李希勣. 云南昆阳群的两种底辟构造[J]. 地质学报, 1981, 55(2): 105−117, 163.
[13]中国地质调查局科技外事部. 扬子地台西缘前寒武纪地层野外现场会纪要[J]. 地层学杂志, 2010, 34: 336.
[14]张传恒, 高林志, 武振杰, 等. 滇中昆阳群凝灰岩SHRIMP锆石U−Pb年龄: 华南格林威尔期造山的证据[J]. 科学通报, 2007, (7): 818−824.
[15]郝杰, 翟明国. 罗迪尼亚超大陆与晋宁运动和震旦系[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 139−152.
[16]颜丹平, 周美夫, 宋鸿林. 等, 华南在Rodinia古陆中位置的讨论——扬子地块西缘变质−岩浆杂岩证据及其与Seychelles地块的对比[J]. 地学前缘, 2002, 9(4): 249−256.
[17]纪星星, 周诗, 陈棋, 等. 滇中地区昆阳群物源及构造环境[J]. 中国地质, 2016, 43(3): 857−878.
[18]郝杰, 李曰俊, 胡文虎. 晋宁运动与震旦系及有关问题的讨论[J]. 中国区域地质, 1992, 3(2): 131−140.
[19]Zhang H, Gao L Z, Zhang C H, et al. The Discovery of the 2.35 Ga Crystalline Basement in the Southwest of the Yangtze Block and its Geological Significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(6): 2460−2461.
[20]李希勣, 吴懋德, 段锦荪. 昆阳群的层序及顶底问题[J]. 地质论评, 1984, 30(5): 399−408.
[21]李希勣, 花友仁, 李良骥, 等. 云南东川铜矿地质[J]. 地质学报, 1953, 3(1): 76−84.
[22]孙家骢. 论昆阳群的划分及对比[J]. 昆明工学院学报, 1983, 3(1): 1−19.
[23]Lance P B, Sandra L K, Charlotte M A, et al. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U−Pb geochronology[J]. Chemical Geology, 2003, 200: 155−170.
[24]Lance P B, Sandra L K, Williams I S, et al. The Application of SHRIMP to Phanerozoic geochronology: a critical appraisal of four zircon standards[J]. Chemical Geology, 2003, 200: 171−188.
[25]宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石SHRIMP样品靶制作, 年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 2002, 48(S1): 26−30.
[26]宋彪, 张拴宏, 王彦斌, 等. 锆石SHRIMP年龄测定数据处理时系统偏差的避免[J]. 岩矿测试, 2006, 25(1): 9−14.
[27]Ludwig K R. SQUID 1.02− a user´s manual[J]. Berkeley Geo chronology Center Special Publication No. 2. 2002.
[28]Stacey J S, Kramers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by two−stage model[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1975, 26: 207−221.
[29]云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1990: 1−44.
[30]鄢芸樵, 曹仁关, 杨暹和. 云南陆良牛头山地区浅变质岩系的地层时代及对比[C]//中国地质科学院成都地质矿产研究所文集, 1986, 7: 3.
①云南地质局. 1/20万云南省地质图(昆明幅). 1971.