

·专题研究·

扬子西缘澄江组底部玄武岩形成时代新证据 及其地质意义

崔晓庄¹, 江新胜¹, 王 剑¹, 卓皆文¹, 江卓斐², 伍 皓^{1,3}, 邓 奇¹, 魏亚楠³

(1. 中国地质调查局 成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083;
3. 中国地质科学院, 北京 100037)

摘 要: 扬子西缘新元古代澄江组底部发育一套玄武岩, 其形成时代一直未能准确限定。本文在野外地质调查的基础上, 对云南武定罗茨地区澄江组底部玄武岩进行了较为系统的岩石学 and 同位素年代学研究。结果表明, 最年轻一组锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 804 ± 6 Ma (MSWD=0.40), 可以代表澄江组玄武岩的形成时代, 从而进一步确定澄江组底界年龄为 800 Ma 左右。武定罗茨地区澄江组底部玄武岩显示低 SiO₂, 高 (K₂O + Na₂O)、TiO₂ 和 Al₂O₃ 的特点, 具有大陆裂谷碱性玄武岩的性质。结合区域相关研究资料, 认为扬子西缘可能存在一个自 ~800 Ma 持续至 725 Ma 的幕式双峰式岩浆岩带, 而澄江组底部玄武岩和苏雄组火山岩均为 ~800 Ma 双峰式岩浆活动的产物, 并推测该双峰式岩浆岩带可能形成于大陆裂谷环境。此外, 玄武岩中捕获的锆石年龄信息指示扬子西缘可能存在 2.5 Ga、1.8~1.6 Ga 及 1.0 Ga 等数期重要的区域构造-热事件。

关键词: 澄江组; 玄武岩; 锆石 U-Pb 年龄; 新元古代; 扬子西缘

中图分类号: P588.14⁺5; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)01-0001-13

New evidence for the formation age of basalts from the lowermost Chengjiang Formation in the western Yangtze Block and its geological implications

CUI Xiao-zhuang¹, JIANG Xin-sheng¹, WANG Jian¹, ZHUO Jie-wen¹, JIANG Zhuo-fei²,
WU Hao^{1,3}, DENG Qi¹ and WEI Ya-nan³

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 2. School of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The formation age of basalts from the lowermost Neoproterozoic Chengjiang Formation in the western Yangtze Block has not been determined yet. In this paper, field investigations and detailed petrologic and geochronologic researches were carried out on basalts of the lowermost Chengjiang Formation from the Luoci area, Wuding, and the results show that the formation age of basalts from the lowermost Chengjiang Formation is 804 ± 6 Ma, which further confirms that the lower age limit of the Chengjiang Formation should be about 800 Ma. Petrologic studies show that basalts from the lowermost Chengjiang Formation have lower SiO₂ content and high K₂O + Na₂O and TiO₂ content, which indicates that their formation should be attributed to alkaline basalts developed in the continental rift. Combined with regional relevant research data, it is suggested that there possibly existed an episodic bimodal magmatic rock belt that lasted from ~800 Ma to 725 Ma along the western Yangtze

收稿日期: 2014-08-04; 修订日期: 2014-12-14

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41030315); 中国地质调查局资助项目(12120114067901, 1212011121105); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41402103)

作者简介: 崔晓庄(1984-), 男, 硕士, 助理研究员, 沉积学与岩石大地构造学研究方向, E-mail: cgscuixz@126.com; 通讯作者: 江新胜(1956-), 男, 研究员, 主要从事古地理与盆地分析研究, E-mail: cdjxinsheng@126.com。

Block. It is thus held that basalts of the Chengjiang Formation as well as volcanic rocks of the Suxiong Formation were formed by 800 Ma bimodal magmatic activity, and that this bimodal magmatic rock belt might have been developed in the continental rift. Moreover, the ages of captured zircons from the basalts indicate that there were multi-stage regional tectonic-thermal events along the western Yangtze Block, which took place at 2.5 Ga, 1.8~1.6 Ga and 1.0 Ga.

Key words: Chengjiang Formation; basalts; zircon U-Pb age; Neoproterozoic; western Yangtze Block

扬子西缘康滇裂谷是华南新元古代裂谷盆地系统的重要组成部分,其间广泛发育与盆地形成、演化密切相关的岩浆-沉积记录(王剑, 2000; Wang and Li, 2003; Li *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2009, 2011; Zhao and Cawood, 2012)。目前,关于这些岩浆-沉积记录形成的构造环境一直存在争议。一些学者认为它们应形成于大陆裂谷环境,与导致 Rodinia 超大陆裂解的地幔柱幕式活动有关(Li *et al.*, 2002a, 2003, 2008, 2010; Wang and Li, 2003; 林广春等, 2006, 2008, 2013; Zhu *et al.*, 2007, 2008); 另一些学者则认为其形成于岛弧环境,主要依据是该期岩浆岩以花岗质岩石为主,持续时间大于 100 Ma,而基性岩浆记录相对较少(Zhou *et al.*, 2002, 2006; 杜利林等, 2005, 2006, 2007; Zhao and Zhou, 2007; 耿元生等, 2008; Sun and Zhou, 2008; Zhao *et al.*, 2008; Du *et al.*, 2014)。大规模溢流玄武岩或基性岩墙群等地幔柱活动直接标志对解决上述争议具有重要意义。

澄江组分布于康滇裂谷南段,为发育于晋宁运动不整合面之上、澄江组运动不整合面之下的一套紫红色陆相碎屑沉积(云南省地质矿产局, 1990, 1996; 刘鸿允, 1991; 《中国地层典》编委会, 1996)。孙家骢(1985)曾在云南武定罗茨地区澄江组底部发现一套厚达 300 余米的玄武岩,并认为其与川西地区苏雄组火山岩相当。Li 等(2002a)获得的苏雄组流纹岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 803 ± 12 Ma,与滇中地区澄江组底部凝灰岩锆石 U-Pb 年龄完全一致(江新胜等, 2012),但与罗茨澄江组底部玄武岩的 Rb-Sr 等时线年龄 885 Ma 相差甚大(孙家骢, 1985)。因此,武定罗茨地区澄江组底部玄武岩与川西地区苏雄组火山岩是否为同期岩浆活动的产物,是否与导致 Rodinia 超大陆裂解的地幔柱活动有关,值得进一步研究。鉴于此,本文在野外详细地质调查基础上,对武定罗茨澄江组玄武岩开展了岩石学和同位素年代学研究,以期对上述问题解答提供可靠证据。

1 地质背景

扬子西缘康滇裂谷呈南北向展布,为发育于晋宁运动不整合面之上的伸展断陷盆地。前人研究认为康滇裂谷西侧的主边界断裂为安宁河-易门断裂,东侧为甘洛-小江断裂,可能属于对称的地堑盆地(夏文杰等, 1994)。然而,最新研究揭示安宁河-易门断裂确实为新元古代康滇裂谷的控盆断裂,而甘洛-小江断裂并未起到控制作用,康滇裂谷实际上为不对称的半地堑盆地(Zhuo *et al.*, 2013; 崔晓庄等, 2014)。裂谷基底主要由古元古代河口群和东川群、中元古代会理群和昆阳群及其相当地层组成(Zhao *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2013)。此外,最近发表的陆良组底部凝灰岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 818 ± 9 Ma(Zhuo *et al.*, 2013),与南华裂谷典型充填物板溪群底界年龄基本相当,共同揭示华南新元古代裂谷盆地系统的开启时间应为 820 Ma 左右(王剑, 2000; 崔晓庄等, 2015)。

澄江组是一套紫红色为主的陆相碎屑岩地层,局部发育厚度不等的火山岩和火山碎屑岩,底部常以砾岩或含砾砂岩与下伏昆阳群地层呈角度不整合接触,顶部以岩屑砂岩与上覆南沱组冰碛泥砾岩角度不整合接触(云南省地质矿产局, 1990, 1996; 刘鸿允, 1991; 《中国地层典》编委会, 1996)。江新胜等(2012)报道的澄江组底部凝灰岩锆石 U-Pb 年龄为 798 ± 8 Ma 和 803 ± 9 Ma,将澄江组的底界年龄直接限定在了 800 Ma 左右;而澄江组顶部凝灰岩年龄为 725 ± 11 Ma,限定澄江组的顶界年龄为 725 Ma 左右(崔晓庄等, 2013)。因此,澄江组确切沉积时限应为 800~725 Ma,区域上与其相当的地层主要包括苏雄组/开建桥组、莲沱组及板溪群上段等(江新胜等, 2012; 崔晓庄等, 2013, 2014)。

云南武定罗茨地区位于康滇裂谷中南部,紧邻

裂谷西侧的安宁河-易门控盆断裂,区内出露的前寒武纪地层包括中元古代昆阳群、新元古代澄江组和灯影组(图 1)。澄江组明显分为两个部分,下部为玄武岩夹少量粗安岩及火山碎屑岩,局部为砾岩,上部为长石石英砂岩。在水口阱水库一带,澄江组玄武岩最为发育,厚达 300 余米,底部为碱性超基性岩侵入而未见底。详细的野外调查结果表明,该地区澄江组下部砾岩厚度较薄,砾石分选、磨圆极差,成分

单一,颗粒支撑,杂乱堆积,明显为近源的冲积扇沉积;向上变为紫红色厚层中粗粒长石石英砂岩,板状交错层理发育,局部可见叠瓦状排列的滞留砾石,属于辫状河沉积。此外,武定罗茨地区以西未见澄江组的沉积,而向东则逐渐变为滨岸-湖泊碎屑岩相。可以看出,澄江组的岩浆-沉积作用均明显受安宁河-易门控盆断裂的控制。

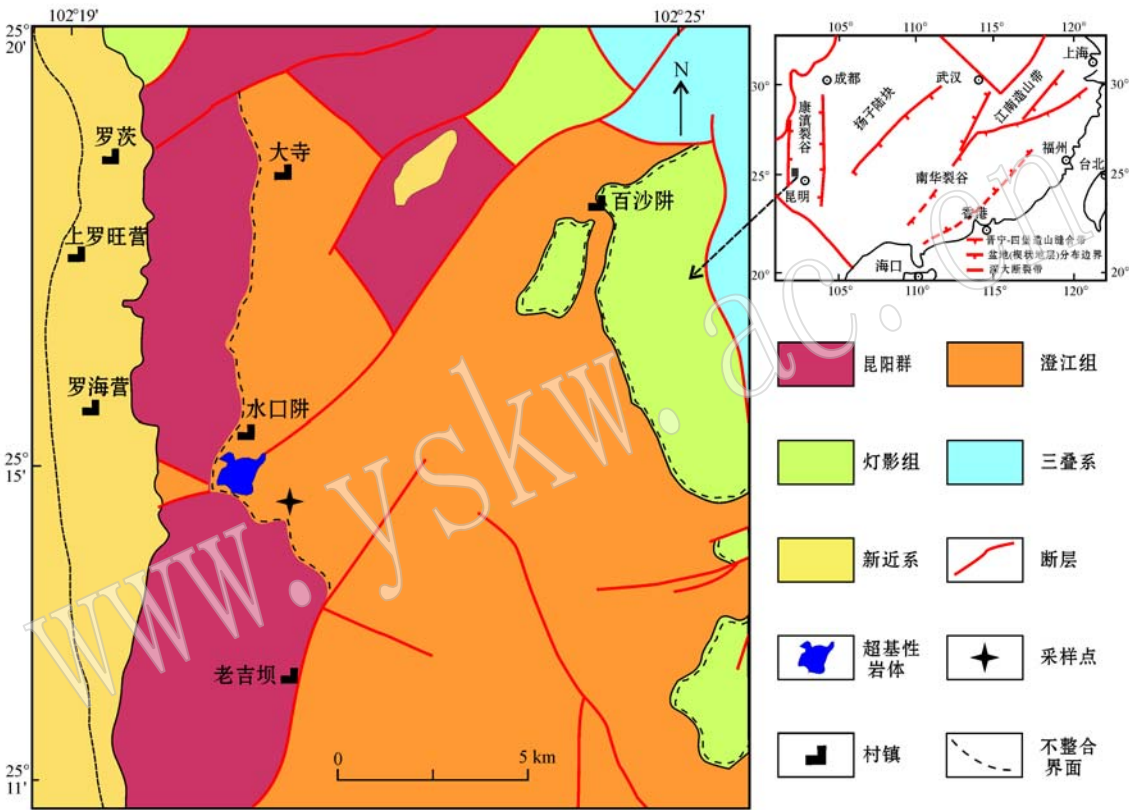


图 1 武定罗茨地区地质简图(插图据 Wang and Li, 2003)
Fig. 1 Simplified geological map of the Luoci area, Wuding (inserted figure based on Wang and Li, 2003)

2 样品及分析方法

本文玄武岩定年样品 13SKD-N2 采自武定罗茨地区水口阱剖面,采样点 GPS 坐标:25°14′52″N, 102°19′24″E。玄武岩露头新鲜面呈深灰黑色,风化后为土黄色(图 2a),发育气孔构造(图 2b)。岩石主要组成矿物为基性斜长石(含量约 70%)、普通辉石(含量约 10%)和磁铁矿(含量约 15%),间粒结构。斜长石多呈规则板条状,杂乱分布,格架中充填辉石和磁铁矿微粒(图 2c, 2d),部分已绢云母化,表面不

干净;辉石部分蚀变为绿泥石和绿帘石,保留辉石短柱状晶体外形。已有研究资料表明(朱创业,1990),武定罗茨地区澄江组玄武岩的 SiO₂ 含量较低,介于 43.13%~47.15%,平均值为 45.40%;K₂O + Na₂O 含量大于 4%,介于 4.26%~5.81%,平均值为 4.81%;TiO₂ 含量大于 2%,介于 2.23%~3.12%,平均值为 2.50%。在(Na₂O + K₂O)-SiO₂ 岩石分类图解中,该套玄武岩均落入碱性玄武岩范围(图 3)。

锆石的分选工作在河北省区域地质矿产调查研究所完成。样品经破碎后,通过常规重力和磁选方法分选出锆石。在双目镜下挑选出晶型较好、无裂



图 2 武定罗茨地区澄江组玄武岩野外露头 and 镜下显微照片

Fig. 2 Outcrop photographs and microphotographs of basalts from the Chengjiang Formation in the Luoci area, Wuding
a—玄武岩野外露头; b—玄武岩气孔状构造; c, d—正交偏光、单偏光显微照片, 主要矿物为斜长石(Pl)、辉石(Py)和磁铁矿(Mt)
a—photograph showing outcrops of basalts; b—photograph showing vesicular structures of basalts; c, d—microphotographs showing mineral assemblages, including plagioclase (Pl), pyroxene (Py) and magnetite (Mt)

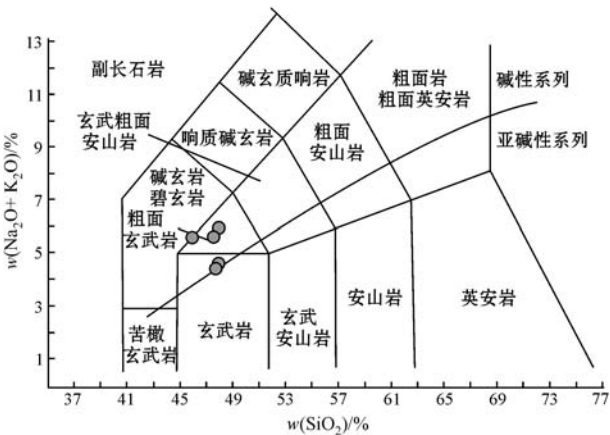


图 3 澄江组玄武岩($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)– SiO_2 岩石分类图解
(底图据 Middlemost, 1994)

Fig. 3 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)– SiO_2 classification diagram of basalts from the Chengjiang Formation (base map after Middlemost, 1994)

隙、无明显包裹体的锆石颗粒粘贴在环氧树脂表面, 打磨抛光, 制成样靶。对锆石进行反射光、透射光显微照相和阴极发光(CL)图像分析。根据锆石透、反射光及 CL 图像, 尽量避开锆石内部的包裹体、裂隙, 选择代表性的锆石颗粒和区域进行 U-Th-Pb 同位素分析。

锆石原位微区 U-Th-Pb 同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用激光剥蚀(LA)电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)完成。实验采用的 ICP-MS 为美国 Agilent 公司生产的 Agilent7500a, 激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的配备有 193nmArF 准分子激光器的 Geo-Las2005。激光剥蚀孔径为 32 μm , 采用氦气作为载气、氩气作为补偿气以调节灵敏度。原始数据离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度偏移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计

算)利用 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2008)完成。具体的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu 等(2010)。数据表中年龄误差为 1(绝对误差, 同位素比值为 1σ 相对误差。文中对 $>1\,000$ Ma 的年龄值采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 而对 $<1\,000$ Ma 的年龄值则采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。

3 分析结果

玄武岩样品(13SKD-N2)的锆石颗粒总体较小, 长轴长度多为 $50\sim 150\ \mu\text{m}$, 长宽比约为 $1:1\sim 2:1$, 多呈短柱状, 少数为半截锥状, 自形程度较好, 无裂隙和包裹体。根据阴极发光(CL)图像可将这些锆石分为两类: 第一类锆石自形, 棱角分明, 发育宽缓的板状环带, 为典型的基性岩浆结晶锆石(吴元保等, 2004); 第二类锆石多呈自形-半自形, 边部常有一定程度的磨圆, 发育较明显的振荡环带, 可能为岩浆上升过程中捕获的围岩锆石(图 4)。选取其中具有代表性的 17 颗锆石进行了 17 个测点的 U-Pb 同位素分析, 分析结果列于表 1。

从表 1 中可以看出, 17 个测点的 U 含量为 $142\times 10^{-6}\sim 850\times 10^{-6}$, Th 含量为 $69\times 10^{-6}\sim 392\times 10^{-6}$, Th/U 比值为 $0.29\sim 0.97$ 。在锆石 U-Pb 年龄

谐和图上, 除去测点 07 明显偏离谐和线, 其余 16 个测点多位于谐和线上及其附近, 表明锆石形成后 U-Pb 同位素体系保持封闭(图 5a)。根据年龄结果, 这 16 个测点明显分为 2 组(图 5b): 一组为年龄值较老的 6 个测点, 其中测点 09 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 851.0 ± 8.5 Ma, 其他 5 个测点的年龄值范围为 998 ± 16.3 Ma $\sim 2\,437.0\pm 31.8$ Ma, 阴极发光(CL)图像显示该组年龄值较老的锆石均为捕获锆石; 另一组为年龄值较年轻的 10 个测点, 这些测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值分布非常集中, 介于 798.0 ± 9.7 Ma $\sim 816.0\pm 9.5$ Ma 之间, 这 10 个年龄值的加权平均值为 804 ± 6 Ma (MSWD=0.40), 与其谐和年龄值 804 ± 3 Ma (MSWD=1.17) 完全一致(图 5c, 5d)。结合阴极发光(CL)图像, 认为 804 ± 6 Ma 应代表样品 13SKD-N2 形成年龄。

4 讨论

4.1 澄江组玄武岩形成时代

关于武定罗茨地区澄江组底部玄武岩的形成时代, 前人已利用 Rb-Sr 同位素定年方法开展了一些研究工作。孙家骢(1985)最早报道的 Rb-Sr 等时线年龄为 885 Ma, 与胡世玲等(1991)获得的 Rb-Sr 等

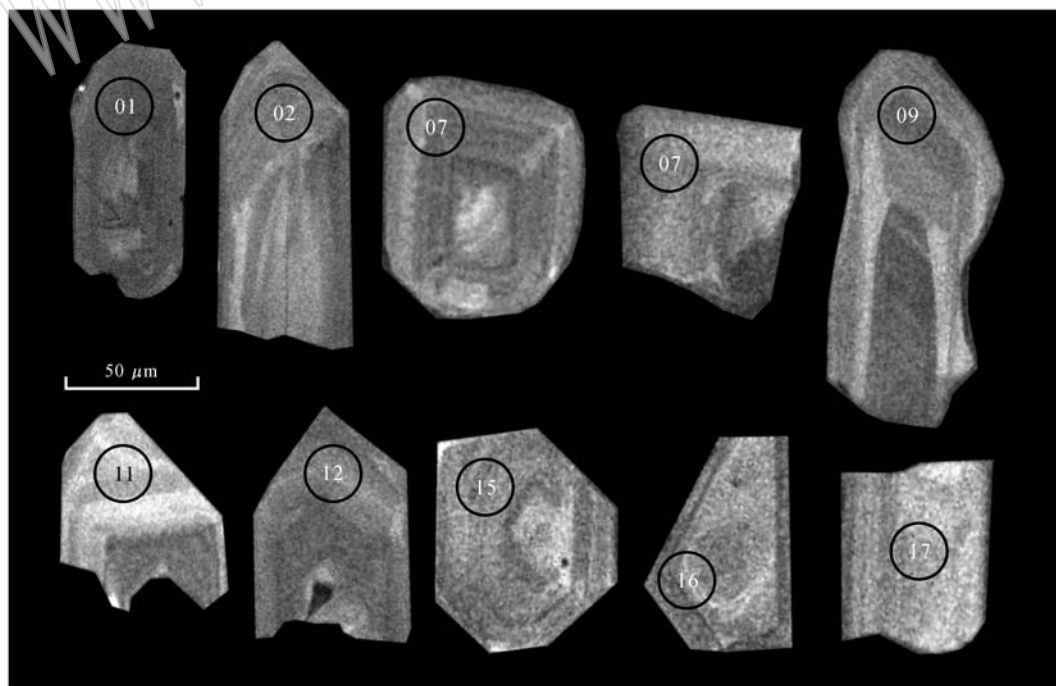


图 4 澄江组玄武岩代表性锆石阴极发光照片

Fig. 4 Typical zircon CL image of basalts from the Chengjiang Formation

表 1 澄江组玄武岩锆石 U-Th-Pb 同位素数据
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotopic data of basalts from the Chengjiang Formation

分析点号	$w_B/10^{-6}$			同位素比值						年龄/Ma			
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
01	392	405	0.97	1.198 4	0.040 4	0.131 8	0.001 3	794	68.5	800	18.6	798	7.3
02	205	275	0.75	1.229 9	0.064 1	0.133 1	0.001 8	833	100	814	29.2	805	10.4
03	175	315	0.56	5.049 5	0.097 8	0.334 4	0.002 6	1 792	30.6	1 828	16.5	1 860	12.7
04	249	850	0.29	1.672 8	0.043 0	0.168 4	0.002 2	984	44.4	998	16.3	1 003	12.4
05	363	400	0.91	1.132 2	0.035 5	0.132 1	0.001 2	683	66.7	769	16.9	800	7.1
06	94	229	0.41	1.213 3	0.039 7	0.133 3	0.001 6	820	75.0	807	18.2	807	9.4
07	291	315	0.92	1.318 6	0.041 7	0.122 5	0.001 9	1 165	70.1	854	18.3	745	10.8
08	169	342	0.49	10.388 9	0.197 4	0.474 7	0.003 7	2 437	31.8	2 470	17.7	2 504	16.0
09	120	325	0.37	1.371 1	0.045 7	0.141 1	0.001 5	948	70.4	877	19.6	851	8.5
10	294	369	0.80	1.277 8	0.052 3	0.133 4	0.002 9	931	85.2	836	23.3	807	16.3
11	69	142	0.49	1.207 8	0.084 5	0.133 6	0.003 6	857	153	804	38.9	809	20.3
12	224	410	0.55	3.902 8	0.079 3	0.281 7	0.002 6	1 628	36.9	1 614	16.5	1 600	13.2
13	188	324	0.58	1.273 7	0.052 3	0.132 5	0.001 5	915	85.2	834	23.4	802	8.5
14	103	220	0.47	1.228 1	0.042 7	0.133 9	0.001 6	817	72.2	813	19.5	810	9.0
15	114	156	0.73	4.663 3	0.109 8	0.315 2	0.003 2	1 747	41.5	1 761	19.7	1 766	15.9
16	236	432	0.55	1.237 5	0.047 5	0.131 8	0.001 7	855	77.8	818	21.6	798	9.7
17	136	221	0.62	1.325 8	0.048 5	0.135 0	0.001 7	943	68.4	857	21.2	816	9.5

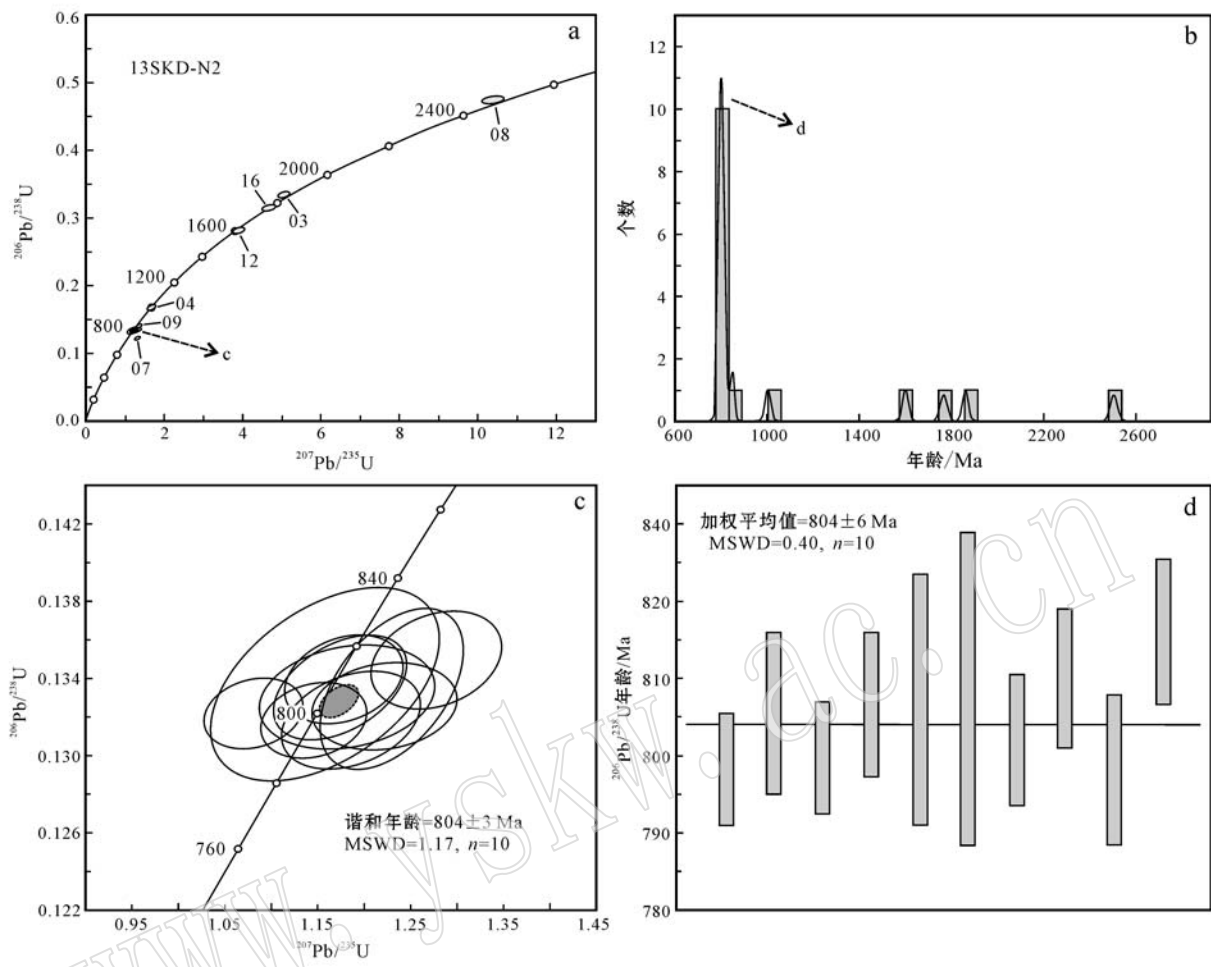


图 5 澄江组玄武岩锆石 U-Pb 测年结果

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia plot and weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of basalts from the Chengjiang Formation

时线年龄 $887 \pm 55 \text{ Ma}$ 完全一致。但 Rb-Sr 同位素体系易受热液蚀变、变质作用等后期热事件的干扰，对测试样品要求严格且误差较大，所以这两个 Rb-Sr 等时线年龄是否可以代表澄江组玄武岩的形成时代存在较大疑问。基性火山岩中锆石的来源较为复杂，既可能有岩浆中自身结晶的锆石，也可能有基性岩浆在上升过程中捕获的围岩锆石(崔玉荣等, 2010; Deng *et al.*, 2013; 任光明等, 2013a; Xu *et al.*, 2013)。本文对澄江组玄武岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究，共获得 16 个有效的 U-Pb 同位素年龄值。图 4 和图 5 显示，年轻一组年龄值的锆石所占比例最大，且棱角分明，内部发育宽缓的板状环带，为玄武岩岩浆的结晶锆石。因此，其加权平均值 $804 \pm 6 \text{ Ma}$ 应该代表了澄江组玄武岩的形成时代。

区域相关研究资料表明，扬子西缘 $\sim 800 \text{ Ma}$ 发

育大量双峰式岩浆活动。如：① 滇中地区澄江组底部酸性凝灰岩的锆石 U-Pb 年龄为 $800 \pm 5 \text{ Ma}$ (两个年龄的加权平均值)(江新胜等, 2012)；② 川西地区苏雄组双峰式岩浆岩的喷发年龄为 $803 \pm 12 \text{ Ma}$ (Li *et al.*, 2002a)，与开建桥组的底部凝灰岩年龄 $801.3 \pm 7.2 \text{ Ma}$ 完全一致(卓皆文等, 2015)；③ 盐井地区黄水河群玄武岩的成岩年龄为 $799 \pm 8 \text{ Ma}$ (任光明等, 2013a)，与耿元生等(2008)发表的盐井群流纹质凝灰岩年龄 $809 \pm 9 \text{ Ma}$ 基本吻合；④ 最新研究揭示扬子西缘可能存在大量 800 Ma 左右的双峰式侵入岩，如侵位年龄为 $796 \pm 5 \text{ Ma}$ 的同德苦橄质岩墙(Li *et al.*, 2010)和年龄为 $801.1 \pm 6.6 \text{ Ma}$ 的下田坝 A 型花岗岩(武昱东等, 2014)。

实际上，扬子西缘还存在 $\sim 780 \text{ Ma}$ 和 $\sim 750 \text{ Ma}$ 两期规模较小的双峰式岩浆活动，并可能一直持续至华南 Sturtian 冰期启动前。前者主要包括康定地

区同时期侵入的花岗岩和辉绿岩(Li *et al.*, 2003; 林广春等, 2006)、冕宁 A 型花岗岩(Huang *et al.*, 2008)和登相营辉绿岩(任光明等, 2013b); 后者包括康定姑咱花岗岩质体和喜德沙坝辉长岩(Li *et al.*, 2003)。尽管目前仍未见及有关扬子西缘 725 Ma 岩浆岩的报道, 但最近发表的澄江组顶部凝灰岩锆石年龄已表明扬子西缘应该存在 725 Ma 左右的岩浆活动(崔晓庄等, 2013)。可以看出, 扬子西缘可能存在于一个 800~725 Ma 的幕式双峰式岩浆岩带, 而澄江组底部玄武岩和苏雄组火山岩均为 ~800 Ma 双峰式岩浆活动的产物。

此外, 笔者最新获得的巧家谓姑地区澄江组底部玄武岩的锆石 U-Pb 年龄同样为 ~800 Ma(笔者待刊资料), 也进一步支持澄江组底部玄武岩应形成于 800 Ma 左右。因此, 样品 13SKD-N2 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值 804 ± 6 Ma 可以代表武定罗茨地区澄江组底部玄武岩的形成时代。该年龄与江新胜等(2012)报道的澄江组底部凝灰岩年龄完全吻合, 从而进一步限定澄江组的底界年龄为 800 Ma 左右。

4.2 形成动力学机制探讨

目前, 关于扬子西缘新元古代构造环境一直存在两种截然不同的观点: 一种为与 Rodinia 超大陆裂解相关的大陆裂谷环境(如: Li *et al.*, 2002a, 2010; Wang and Li, 2003; 林广春等, 2006, 2008, 2013; Zhu *et al.*, 2007, 2008; Li *et al.*, 2008), 另一种为与板块俯冲相关的弧后盆地环境(如: Zhou *et al.*, 2002, 2006; 杜利林等, 2005, 2006, 2007; Zhao and Zhou, 2007; Zhao *et al.*, 2008)。这两种构造观点的争论焦点之一为与地幔柱有关的基性岩浆岩的出露较为局限。然而, 由于地壳的快速抬升和去顶作用, 往往使得与导致超大陆裂解的地幔柱活动有关的玄武岩很容易被剥蚀(Barovich and Foden, 2000; Li *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2009, 2010), 从而成为邻近沉积盆地的重要物质来源(Barovich and Foden, 2000; Wang *et al.*, 2011)。因此, 本文澄江组玄武岩形成时代的确定为解答扬子西缘康滇裂谷的构造属性问题提供了新的参考资料。

如前所述, 扬子西缘广泛存在 ~800 Ma 双峰式岩浆活动的记录, 本文报道的武定罗茨地区澄江组底部玄武岩年龄为 804 ± 6 Ma, 结合笔者新近获得的巧家谓姑地区澄江组底部玄武岩年龄, 可以确认澄江组玄武岩应该也为该期双峰式岩浆活动的产物。尽管双峰式岩浆可以在不同的构造背景下形

成, 但大陆裂谷环境的基性岩浆岩主要是富碱质的, 且出露面积一般很小(王焰等, 2000)。武定罗茨地区澄江组玄武岩具有高碱($>4\%$)、高钛($>2\%$)的特点(朱创业, 1990), 里特曼指数 σ 均大于 3.3, 显示碱性玄武岩的特征, 而在 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ 岩石分类图解中, 也均落入碱性玄武岩范围(图 3)。在微量元素构造环境判别图解中, 澄江组玄武岩主要落在大陆板块内部区, 具有大陆裂谷碱性玄武岩的性质[参见朱创业(1990)的图 9、图 10]。此外, 澄江组玄武岩出露面积也较为局限, 仅分布于武定罗茨和巧家谓姑一带。因此, 澄江组玄武岩应该是形成于大陆裂谷环境的双峰式岩浆岩的基性端员。

研究表明, 川西地区苏雄组火山岩和武定罗茨地区澄江组玄武岩均明显受西侧安宁河-易门断裂的控制(孙家骢, 1985; 刘鸿允, 1991; 夏文杰等, 1994), 本文报道的澄江组玄武岩年龄与 Li 等(2002a)发表的苏雄组火山岩年龄 803 ± 12 Ma 完全一致, 指示二者应该属于同期岩浆活动的产物。岩石地球化学特征显示, 苏雄组火山岩为一套典型的弱碱性双峰式火山岩, 其中玄武岩类似于夏威夷洋岛玄武岩和埃塞俄比亚大陆溢流玄武岩的碱性玄武岩系列, 来源于未受地壳混染的地幔源区, 应形成于大陆裂谷环境(Li *et al.*, 2002a)。通过详细的岩石学、年代学及地球化学研究, Li 等(2010)研究发现侵入至盐边同德杂岩中的苦橄质岩墙来源于比同期周边洋中脊玄武岩源地幔高 200℃ 的异常高温地幔, 该地幔温度与现代地幔柱相当, 从而认为同德苦橄质岩墙应该是 800 Ma 左右地幔柱岩浆作用的可靠证据。值得注意的是, 最新研究揭示东川下田坝黑云母二长花岗岩的成岩年龄为 801.1 ± 6.6 Ma, 属于典型的 A 型花岗岩, 形成于板内伸展环境(武昱东等, 2014)。这些证据均表明扬子西缘康滇裂谷应为与地幔柱活动有关的大陆裂谷。

此外, 沉积学研究结果也支持扬子西缘康滇裂谷应为大陆裂谷环境。首先, 充填序列明显不同于弧后盆地环境的下粗上细的双层结构特征, 沉积类型也与弧后盆地岛弧一侧发育与火山岩共生的深海浊流沉积, 大陆一侧发育浅海碳酸盐沉积夹风暴流沉积存在明显差异(崔晓庄等, 2014), 例如在武定罗茨地区, 与澄江组玄武岩共生的为近源的冲积扇和辫状河沉积; 其次, 充填样式研究结果揭示康滇裂谷由幼年期的系列同向的小型半地堑盆地群演变为成熟期统一的大型半地堑盆地, 实际上属于上叠滑

脱盆地,这可与东非裂谷系相对比(Zhuo *et al.*, 2013);最后,沉积物源分析结果也显示康滇裂谷南段的沉积物源区应该位于盆地西侧,主要为稳定构造型的碎屑物源,构造背景为被动大陆边缘,并不存在来自岩浆岛弧源区的碎屑物质,同时也指示康滇裂谷不具备弧后盆地物源双向性的特征(崔晓庄等,2014)。

4.3 捕获锆石的指示意义

本文共获得了样品 13SKD-N2 的 16 个有效的 U-Pb 同位素年龄值。其中,年龄值较老的 6 颗锆石应为岩浆上升过程中捕获的通道围岩的岩浆锆石,年龄值范围为 851~2 437 Ma。结合最新区域相关研究资料,笔者认为:① 最老一颗锆石的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄值为 2437 ± 32 Ma,与东川群碎屑锆石年龄谱具有 2.5 Ga 左右的峰值相吻合(Zhao *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2013),指示扬子西缘于 2.5 Ga 左右存在一期重要的岩浆事件;② 3 颗古元古代晚期的锆石²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄值介于 $1\,628 \pm 37$ Ma~ $1\,792 \pm 31$ Ma 之间,与扬子西缘 1.8~1.6 Ga 期间的大规模裂解事件相符合(尹福光等,2012),该时期区域内广泛发育非造山岩浆作用(Zhao *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2013; 王子正等,2013; 郭阳等,2014),可能与 Columbia 超大陆的初始裂解有关;③ 另外 2 颗锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值分别为 $1\,003 \pm 12$ Ma 和 851 ± 9 Ma,前者与扬子西缘存在格林威尔期岩浆活动记录相一致(Zhang *et al.*, 2007; 耿元生等,2007; 杨崇辉等,2009; Chen *et al.*, 2014),后者则可以作为扬子西缘新元古代最早的板内非造山岩浆活动的旁证(Li *et al.*, 2002b),二者应分别与 Rodinia 超大陆的聚合和初始裂解有关。

5 结论

(1) 对云南武定罗茨地区澄江组底部玄武岩进行了锆石 U-Pb 定年,获得了 16 个有效的 U-Pb 同位素年龄值。其中,年轻的 10 个²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值加权平均值为 804 ± 6 Ma (MSWD = 0.40),代表了澄江组底部玄武岩的形成时代,从而进一步限定澄江组底界年龄应为 800 Ma 左右。

(2) 武定罗茨地区澄江组底部玄武岩与川西地区苏雄组火山岩属于同期岩浆活动的产物,均为扬子西缘可能存在的 800~725 Ma 的幕式双峰式岩浆岩带的重要组成部分,应形成于与新元古代 Rodinia 超大陆裂解有关的大陆裂谷环境。

(3) 6 颗捕获锆石的年龄值范围为 851~2 437 Ma,指示扬子西缘可能存在 2.5 Ga、1.8~1.6 Ga 及 1.0 Ga 等数期重要的区域构造-热事件。

致谢 岩矿鉴定工作得到了成都地质调查中心闵际坤研究员和廖世勇博士的帮助,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年工作得到了中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室胡兆初教授的指导,两位审稿专家提出诸多宝贵修改意见,谨致谢忱。

References

- Barovich K M and Foden J. 2000. A Neoproterozoic flood basalt province in southern central Australia: geochemical and Nd isotope evidence from basin fill[J]. *Precambrian Research*, 100: 213~234.
- Chen Weiterry, Sun Weihua, Wang Wei, *et al.* 2014. "Grenvillian" intra-plate mafic magmatism in the southwestern Yangtze Block, SW China[J]. *Precambrian Research*, 242: 138~153.
- Chen Weiterry, Zhou Meifu and Zhao Xinfu. 2013. Late Paleoproterozoic sedimentary and mafic rocks in the Hekou area, SW China: Implication for the reconstruction of the Yangtze Block in Columbia [J]. *Precambrian Research*, 231: 61~77.
- Cui Xiaozhuang, Jiang Xinsheng, Wang Jian, *et al.* 2013. Zircon U-Pb geochronology for the stratotype section of the Neoproterozoic Chengjiang Formation in Central Yunnan and its geological significance[J]. *Geoscience*, 27(3): 547~556(in Chinese with English abstract).
- Cui Xiaozhuang, Jiang Xinsheng, Wang Jian, *et al.* 2014. Filling Sequence and Evolution Model of the Neoproterozoic Rift Basin in central Yunnan Province, South China: Response to the Breakup of Rodinia Supercontinent[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(3): 399~409(in Chinese with English abstract).
- Cui Xiaozhuang, Jiang Xinsheng, Wang Jian, *et al.* 2015. New zircon U-Pb geochronological results for the Danzhou Group from the northern Guangxi Province and their implications for Neoproterozoic rifting stages in South China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, in press(in Chinese with English abstract).
- Cui Yurong, Xie Zhi, Chen Jiangfeng, *et al.* 2010. SHRIMP U-Pb Dating of Zircons from the Late Mesozoic Basalts in Eastern Zhejiang Province and Its Geological Significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 16(2): 198~212(in Chinese with English abstract).
- Chinese Stratum Thesaurus Editorial Board. 1996. Chinese Stratum Thesaurus: Neoproterozoic [M]. Beijing: Geological Publishing

- House, 1~117(in Chinese).
- Deng Qi, Wang Jian, Wang Zhengjiang, *et al.* 2013. Continental flood basalts of the Huashan Group, northern margin of the Yangtze block-implications for the breakup of Rodinia[J]. *International Geology Review*, 55(15): 1 865~1 884.
- Du Lilin, Geng Yuansheng, Yang Chonghui, *et al.* 2005. Geochemistry and SHRIMP U-Pb Zircon Chronology of Basalts from the Yanbian Group in the Western Yangtze Block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 805~813(in Chinese with English abstract).
- Du Lilin, Geng Yuansheng, Yang Chonghui, *et al.* 2006. The stipulation of Neoproterozoic TTG in western Yangtze block and its significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(4): 273~281(in Chinese with English abstract).
- Du Lilin, Geng Yuansheng, Yang Chonghui, *et al.* 2007. New Understanding on Kangding Group on Western Margin of Yangtze Block: Evidence from Geochemistry and Chronology[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1 562~1 577(in Chinese with English abstract).
- Du Lilin, Guo Jinghui, Nutman Allen P, *et al.* 2014. Implications for Rodinia reconstructions for the initiation of Neoproterozoic subduction at ~860 Ma on the western margin of the Yangtze Block: Evidence from the Guandaoshan Pluton[J]. *Lithos*, 196~197: 67~82.
- Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Du Lilin, *et al.* 2007. Chronology and Tectonic Environment of Tianbaoshan Formation: New Evidence from Zircon SHRIMP U-Pb age and Geochemistry[J]. *Geological Review*, 53(4): 323~330(in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, *et al.* 2008. Metamorphic Basement Evolution Along the Western Margin of the Yangtze Block[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~202(in Chinese).
- Guo Yang, Wang Shengwei, Sun Xiaoming, *et al.* 2014. Zircon U-Pb Age of the Paleoproterozoic Diabase from the Yinachang Iron-copper Deposit, Yunnan Province, and its Geological Implication[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(1): 208~215(in Chinese with English abstract).
- Hu Shiling, Liu Hongyun and Lao Qiuyuan. 1991. New Geochronology of Sinian System[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 4: 325~336(in Chinese with English abstract).
- Huang Xiaolong, Xu Yigang, Li Xianhua, *et al.* 2008. Petrogenesis and tectonic implications of Neoproterozoic, highly fractionated A-type granites from Mianning, South China[J]. *Precambrian Research*, 165: 190~204.
- Jiang Xinsheng, Wang Jian, Cui Xiaozhuang, *et al.* 2012. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of the Neoproterozoic Chengjiang Formation in central Yunnan Province (SW China) and its geological significance[J]. *Sci. China: Earth Sci.*, 55: 1 815~1 826.
- Li Huaikun, Zhang Chuanlin, Yao Chunyan, *et al.* 2013. U-Pb zircon age and Hf isotope compositions of Mesoproterozoic sedimentary strata on the western margin of the Yangtze massif[J]. *Science China: Earth Sciences*, 56: 628~639.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, *et al.* 2002a. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: implications for the initial rifting of Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 113: 135~154.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, *et al.* 2002b. SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Nd isotope of the Guandaoshan pluton in SW Sichuan: Petrogenesis and tectonic significance[J]. *Science in China (Series D)*, 46(S1): 73~83.
- Li Xianhua, Zhu Weiguang, Zhong Hong, *et al.* 2010. The Tongde Picritic Dikes in the Western Yangtze Block: Evidence for Ca. 800 Ma Mantle Plume Magmatism in South China during the Breakup of Rodinia[J]. *The Journal of Geology*, 118(5): 509~522.
- Li Zhengxiang, Li Xianhua, Kinny P D, *et al.* 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 122: 85~109.
- Li Zhengxiang, Bogdanova S V, Collins A S, *et al.* 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis[J]. *Precambrian Research*, 160: 179~210.
- Lin Guangchun. 2008. Petrochemical characteristics of Wasigou complex in western Yangtze block: petrogenetic and tectonic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(5): 398~404(in Chinese with English abstract).
- Lin Guangchun. 2013. Petrogenesis and tectonic significance of the Neoproterozoic Danba metabasalt in western Yangtze block[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(4): 485~495(in Chinese with English abstract).
- Lin Guangchun, Li Xianhua and Li Wuxian. 2006. SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Nd-Hf isotope of Neoproterozoic mafic dyke swarms in western Sichuan: petrogenesis and tectonic significance[J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 36(7): 630~645(in Chinese with English abstract).
- Liu Hongyun. 1991. Sinian System of China[M]. Beijing: Science Press, 1~388(in Chinese).
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257:

- 34~43.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, *et al.* 2010. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 55(15): 1 535~1 546.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth Science Review, 37: 215~224.
- Ren Guangming, Pang Weihua, Sun Zhiming, *et al.* 2013a. Zircon SHRIMP U-Pb dating of basalt from Huangshuihe Group on the western margin of the Yangtze block and its geological significance[J]. Geology in China, 40(4): 1 007~1 015(in Chinese with English abstract).
- Ren Guangming, Pang Weihua, Sun Zhiming, *et al.* 2013b. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of mafic dyke swarms in Dengxiangying Group on west margin of Yangtze Block, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 40(1): 66~79(in Chinese with English abstract).
- Sun Jiacong. 1985. Discovery of the volcanic rock series in the Chengjiang Formation an Luoci area and Discussion on the age of the Basal limit of the Sinan System, Yunnan[J]. Scientia Geologica Sinica, 4: 354~363(in Chinese with English abstract).
- Sun Weihua and Zhou Meifu. 2008. The ~860 Ma, Cordilleran-type Guandaoshan dioritic pluton in the Yangtze Block, SW China: implications for the origin of Neoproterozoic magmatism[J]. The Journal of Geology, 116: 238~253.
- Wang Jian. 2000. Neoproterozoic Rifting History of South China: Significance to Rodinia Breakup[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~146(in Chinese with English abstract).
- Wang Jian and Li Zhengxiang. 2003. History of Neoproterozoic rift basins in South China: implications for Rodinia break-up[J]. Precambrian Research, 122: 141~158.
- Wang Xuance, Li Xianhua, Li Wuxian, *et al.* 2009. Variable involvements of mantle plumes in the genesis of mid-Neoproterozoic basaltic rocks in South China: A review[J]. Gondwana Research, 15: 381~395.
- Wang Xuance, Li Xianhua, Li Zhengxiang, *et al.* 2010. The Willouran basic province of South Australia: Its relation to the Guibei large igneous province in South China and the breakup of Rodinia[J]. Lithos, 119: 569~584.
- Wang Xuance, Li Zhengxiang, Li Xianhua, *et al.* 2011. Geochemical and Hf-Nd isotope data of Nanhua rift sedimentary and volcanoclastic rocks indicate a Neoproterozoic continental flood basalt provenance[J]. Lithos, 127: 427~440.
- Wang Yan, Qian Qing, Liu Liang, *et al.* 2000. Major geochemical characteristics of bimodal volcanic rocks in different geochemical environments[J]. Acta Petrologica Sinica, 16(2): 169~173(in Chinese with English abstract).
- Wang Zizheng, Guo Yang, Yangbin, *et al.* 2013. Discovery of the 1.73 Ga Haizi Anorogenic Type Granite in the Western Margin of Yangtze Craton, and Its Geological Significance[J]. Acta Geologica Sinica, 87(7): 931~942(in Chinese with English abstract).
- Wu Yudong, Wang Zongqi, Luo Jinhai, *et al.* 2014. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemistry of Xiatianba A-type granites in Dongchuan, Northeast Yunnan, and their tectonic significance[J]. Geological Bulletin of China, 33(6): 860~873(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genetic mineralogy study of zircons and its constraints on the interpretations of U-Pb ages[J]. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1 589~1 604(in Chinese).
- Xia Wenjie, Du Senguan, Xu Xinhuan, *et al.* 1995. Sinian Lithofacies, Paleogeography and Mineralization in South China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~109(in Chinese with English abstract).
- Xu Bei, Zou Haibo, Chen Yan, *et al.* 2013. The Sugetbrak basalts from northwestern Tarim Block of northwest China: Geochronology, geochemistry and implications for Rodinia breakup and ice age in the Late Neoproterozoic[J]. Precambrian Research, 236: 214~226.
- Yang Chonghui, Geng Yuansheng, Du Lilin, *et al.* 2009. The identification of the Grenvillian granite on the western margin of the Yangtze Block and its geological implications[J]. Geology in China, 36(3): 647~657(in Chinese with English abstract).
- Yin Fuguang, Wang Dongbing, Sun Zhiming, *et al.* 2012. Columbia supercontinent: New insights from the western margin of the Yangtze landmass[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 32(3): 31~40(in Chinese with English abstract).
- Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources. 1990. Regional Geology of Yunnan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 236~255(in Chinese with English abstract).
- Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources. 1996. Stratigraphy (Lithostratic) of Yunnan Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~100(in Chinese).
- Zhang Chuanheng, Gao Linzhi, Wu Zhenjie, *et al.* 2007. SHRIMP U-Pb zircon age of tuff from the Kunyang Group in central Yunnan: Evidence for Grenvillian orogeny in South China[J]. Chinese Science Bulletin, 52(11): 1 517~1 525.
- Zhao Guochun and Cawood P A. 2012. Precambrian geology of China[J]. Precambrian Research, 222~223: 13~54.
- Zhao Junhong and Zhou Meifu. 2007. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW

- China): Implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle[J]. *Precambrian Research*, 152: 27~47.
- Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Li Jianwei, *et al.* 2008. Association of Neoproterozoic A- and I-type granites in South China: Implications for generation of A-type granites in a subduction-related environment[J]. *Chemical Geology*, 257: 1~15.
- Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Li Jianwei, *et al.* 2010. Late Paleoproterozoic to early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China: Implications for tectonic evolution of the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*, 182: 57~69.
- Zhou Meifu, Yan Danping, Kennedy A K, *et al.* 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 51~67.
- Zhou Meifu, Ma Yuxiao, Yan Danping, *et al.* 2006. The Yanbian Terrane (Southern Sichuan Province, SW China): A Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*, 144: 19~38.
- Zhu Chuangye. 1990. The sedimentary facies and tectonic setting of early Sinian in Niutoushan region, eastern Yunnan[J]. *J. Chengdu College Geol.*, 16: 59~66(in Chinese with English abstract).
- Zhu Weiguang, Zhong Hong, Li Xianhua, *et al.* 2007. ^{40}Ar - ^{39}Ar age, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes of the Neoproterozoic Lengshuiqing Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic complex, SW China[J]. *Precambrian Research*, 155: 98~124.
- Zhu Weiguang, Zhong Hong, Li Xianhua, *et al.* 2008. SHRIMP zircon U-Pb geochronology, elemental, and Nd isotopic geochemistry of the Neoproterozoic mafic dykes in the Yanbian area, SW China[J]. *Precambrian Research*, 164: 66~85.
- Zhuo Jiewen, Jiang Xinsheng, Wang Jian, *et al.* 2013. Opening time and filling pattern of the Neoproterozoic Kangdian Rift Basin, western Yangtze Continent, South China[J]. *Sci. China: Earth Sci.*, 56(10): 1 664~1 676.
- Zhuo Jiewen, Jiang Xinsheng, Wang Jian, *et al.* 2015. SHRIMP U-Pb age of tuff from the Neoproterozoic Kaijianqiao Formation and its geological significance[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, in press(in Chinese with English abstract).
- 崔晓庄, 江新胜, 王 剑, 等. 2014. 滇中新元古代裂谷盆地充填序列及演化模式: 对 Rodinia 超大陆裂解的响应[J]. *沉积学报*, 32(3): 399~409.
- 崔晓庄, 江新胜, 王 剑, 等. 2015. 桂北地区丹洲群锆石 U-Pb 年代学新结果及对华南新元古代裂谷作用期次的启示[J]. *大地构造与成矿学*(待刊).
- 崔玉荣, 谢 智, 陈江峰, 等. 2010. 浙东晚中生代玄武岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义[J]. *高校地质学报*, 16(2): 198~212.
- 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 等. 2005. 扬子地台西缘盐边群玄武质岩石地球化学特征及 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. *地质学报*, 79(6): 805~813.
- 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 等. 2006. 扬子地台西缘新元古代 TTG 的厘定及其意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 25(4): 273~281.
- 杜利林, 耿元生, 杨崇辉, 等. 2007. 扬子地台西缘康定群的再认识: 来自地球化学和年代学证据[J]. *地质学报*, 81(11): 1 562~1 577.
- 耿元生, 杨崇辉, 杜利林, 等. 2007. 天宝山组形成时代和形成环境——锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和地球化学证据[J]. *地质论评*, 53(4): 323~330.
- 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 等. 2008. 扬子地台西缘变质基底演化[M]. 北京: 地质出版社, 1~202.
- 郭 阳, 王生伟, 孙晓明, 等. 2014. 云南省武定县迤纳厂铁铜矿區古元古代辉绿岩锆石的 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 38(1): 208~215.
- 胡世玲, 刘鸿允, 劳秋元. 1991. 震旦系地质年代学新研究[J]. *地质科学*, 4: 325~336.
- 江新胜, 王 剑, 崔晓庄, 等. 2012. 滇中新元古代澄江组锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究及其地质意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 42(10): 1 496~1 507.
- 林广春. 2008. 扬子西缘瓦斯沟花岗岩的元素-Nd 同位素地球化学——岩石成因与构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 27(5): 398~404.
- 林广春. 2013. 川西丹巴地区新元古代变质玄武岩成因及构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 32(4): 485~495.
- 林广春, 李献华, 李武显. 2006. 川西新元古代基性岩墙群的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、元素和 Nd-Hf 同位素地球化学: 岩石成因与构造意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 36(7): 630~645.
- 刘鸿允. 1991. 中国震旦系[M]. 北京: 科学出版社, 1~388.
- 任光明, 庞维华, 孙志明, 等. 2013a. 扬子西缘黄水河群玄武岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. *中国地质*, 40(4): 1 007~1 015.
- 任光明, 庞维华, 孙志明, 等. 2013b. 扬子西缘登相营群基性岩墙锆石 U-Pb 年代学及岩石地球化学特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 40(1): 66~79.

附中文参考文献

崔晓庄, 江新胜, 王 剑, 等. 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[J]. *现代地质*, 27(3): 547~556.

孙家骥. 1985. 云南罗茨澄江组下部火山岩系的发现与震旦系底界年龄的讨论[J]. 地质科学, 4: 354~363.

王 剑. 2000. 华南新元古代裂谷盆地演化——兼论与 Rodinia 解体的关系[M]. 北京: 地质出版社, 1~146.

王 焰, 钱 青, 刘 良, 等. 2000. 不同构造环境中双峰式火山岩的主要特征[J]. 岩石学报, 16(2): 169~173.

王子正, 郭 阳, 杨 斌, 等. 2013. 扬子克拉通西缘 1.73 Ga 非造山型花岗岩的发现及其地质意义[J]. 地质学报, 87(7): 931~942.

武显东, 王宗起, 罗金海, 等. 2014. 滇东北东川下田坝 A 型花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 地质通报, 33(6): 860~873.

吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1 589~1 604.

夏文杰, 杜森官, 徐新煌, 等. 1994. 中国南方震旦纪岩相古地理与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1~109.

杨崇辉, 耿元生, 杜利林, 等. 2009. 扬子地块西缘 Grenville 期花岗岩的厘定及其地质意义[J]. 中国地质, 36(3): 647~657.

尹福光, 王冬兵, 孙志明, 等. 2012. 哥伦比亚超大陆在扬子陆块西缘的探秘[J]. 沉积与特提斯地质, 32(3): 31~40.

云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 236~255.

云南省地质矿产局. 1996. 云南省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~100.

《中国地层典》编委会. 1996. 中国地层典——新元古界[M]. 北京: 地质出版社, 1~117.

朱创业. 1990. 滇东牛头山地区早震旦世沉积相及大地构造环境[J]. 成都地质学院学报, 16: 59~66.

卓皆文, 江新胜, 王 剑, 等. 2015. 川西新元古代开建桥组底部沉凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 矿物岩石(待刊).

《岩石矿物学杂志》荣获“2014 中国最具国际影响力学术期刊”称号

2014 年 12 月 16 日,《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社、中国学术文献国际评价研究中心和清华大学图书馆正式联合发布最新《中国学术期刊影响因子年报》,我刊再次入选“2014 中国最具国际影响力学术期刊”。对中国学术期刊进行国际影响力综合分析研究的该项评选自 2012 年开始。2014 年度的评选利用 CAJ-IJCR2014,对中国(大陆)正式出版的具有 CN 刊号、连续 3 年及以上正常出版、国际他引影响因子大于 0.01、国际他引总被引频次大于 20、所发表的文献 50% 以上为研究论文的期刊在前一年度表现出来的国际影响力进行了分析和评价,定义期刊国际影响力指数(CI)并按 CI 降序排列,在全部 4 727 种(其中科技期刊 3 489 种,人文社科期刊 1 238 种)备选期刊中依序分别按 TOP 5% 和 TOP 5%~10% 各选出 175 种科技期刊、60 种人文社科期刊,列入“中国最具国际影响力学术期刊”和“中国国际影响力优秀学术期刊”的名单。

以下是获得“2014 中国最具国际影响力学术期刊”的部分地学类期刊名称及其各项指标:

序号	刊名	国际影响力 指数(CI)	国际他引 频次	国际他引 影响因子	序号	刊名	国际影响力 指数(CI)	国际他引 频次	国际他引 影响因子
1	Chinese Science Bulletin	509.224	8 582	1.115	10	地质论评	94.426	971	0.267
2	岩石学报	272.441	3 094	0.636	11	地球化学	80.315	759	0.309
3	Acta Geologica Sinica	195.658	1 933	0.699	12	地球科学	79.484	787	0.260
4	地质学报	194.323	1 973	0.634	13	矿床地质	79.189	713	0.350
5	Geoscience Frontiers	159.023	357	2.224	14	中国科学:地球科学	78.902	897	0.113
6	Science China Earth Sciences	150.607	908	1.259	15	高校地质学报	70.079	679	0.247
7	科学通报	149.719	1 775	0.172	16	地球学报	69.886	651	0.280
8	地学前缘	138.792	1 444	0.390	17	岩石矿物学杂志	61.265	496	0.343
9	地质通报	129.712	1 336	0.377	18	地质科学	60.875	658	0.126