



移动阅读

彭杰, 谢渊, 庞维华, 等, 2023. 扬子西缘新元古代裂谷盆地演化的年代学新证据及其意义[J]. 沉积与特提斯地质, 43(2): 452-463. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.06013

PENG J, XIE Y, PANG W H, et al., 2023. New zircon U-Pb chronology of the Neoproterozoic rift basin evolution in the western Yangtze Block and its geological significance[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(2): 452-463. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.06013

扬子西缘新元古代裂谷盆地演化的年代学新证据及其意义

彭杰¹, 谢渊², 庞维华^{2*}, 任光明², 崔晓庄², 任飞², 陈凤霖¹, 刘星宇³

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 3. 长庆油田分公司第一采气厂, 陕西 榆林 718500)

摘要: 扬子西缘康滇裂谷是华南新元古代裂谷系的主要组成部分, 对理解华南新元古代裂谷盆地演化与 Rodinia 超大陆裂解的响应关系具有重要意义。澄江组是康滇裂谷最为典型的沉积充填序列, 其时代的准确限定是解析 Rodinia 超大陆裂解背景下盆地演化的重要前提。本文对滇东北巧家谓姑地区澄江组火山岩开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代学分析, 获得澄江组底部玄武岩年龄 806.4 ± 6.7 Ma 和下部凝灰岩年龄 788.4 ± 5.9 Ma。结合已有年龄数据, 将澄江组沉积时代准确限定为 800~720 Ma, 与开建桥组及陆良组上部为同期异相产物。康滇裂谷的三个次级盆地演化基本同步, 均于 800 Ma 左右开始全面接受沉积, 是 Rodinia 超大陆的裂解的响应。

关键词: 扬子西缘; 新元古代; 澄江组; 锆石 U-Pb 年龄; Rodinia 超大陆

中图分类号: P588.14+5; P588.2

文献标识码: A

New zircon U-Pb chronology of the Neoproterozoic rift basin evolution in the western Yangtze Block and its geological significance

PENG Jie¹, XIE Yuan², PANG Weihua^{2*}, REN Guangming², CUI Xiaozhuang², Ren Fei², CHEN Fenglin¹, LIU Xingyu³

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 3. Gas Mining Plant of Changqing Oilfield Branch, Yulin 718500, China)

Abstract: The Kangdian rift on the western margin of the Yangtze Plateau is one of the main components of the Neoproterozoic rift system in South China, which is of great significance for understanding the response between the evolution of the Neoproterozoic rift basin in South China and the breakup of the Rodinia supercontinent. The Chengjiang Formation is the most typical filling sequence in the Kangdian rift, and the accurate definition of its sedimentary age is an important prerequisite for the interpretation of the basin evolution in the context of the breakup of the Rodinia supercontinent. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the volcanic rocks of the Chengjiang Formation in the Qiaojiaweigou area, northeastern Yunnan, yielded an age of 806.4 ± 6.7 Ma for the basalt at the bottom of the Chengjiang Formation and an age of 788.4 ± 5.9 Ma for the tuff at the bottom. Combined with the available age data, the sedimentary age of the Chengjiang Formation is accurately defined as 800~720 Ma, which is a contemporaneous heterogeneous product with the Kaijianqiao Formation and the upper part of the Luliang Formation. The evolution of the three secondary basins in the Kangdian rift is basically synchronous, and they all began to receive full sedimentation at ~800 Ma, in response to the breakup of

收稿日期: 2021-10-08; 改回日期: 2022-04-15; 责任编辑: 曹华文; 科学编辑: 邓奇

作者简介: 彭杰 (1997—), 男, 硕士研究生, 地质学专业, 研究方向: 构造地质学。E-mail: pengjiecdut@qq.com

通讯作者: 庞维华 (1984—), 女, 高级工程师, 主要从事前寒武纪地质学研究。E-mail: cdweihuapang@qq.com

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41872120、92055314) 和中国地质调查局项目 (DD20221635) 联合资助

the Rodinia supercontinent.

Key words: Yangtze block; Neoproterozoic; Chengjiang Formation; zircon U-Pb age; Rodinia supercontinent

0 引言

新元古代中期(800~720 Ma),伴随着 Rodinia 超大陆裂解,华南广泛发生裂谷活动,形成了华南裂谷系,包括南华裂谷、康滇裂谷和碧口—汉南裂谷(Li et al., 1999, 2002; 王剑, 2000; Wang and Li, 2003; Li et al., 2003a)。其中,康滇裂谷发育于扬子陆块的西缘(图 1a),其演化历史对理解 Rodinia 超大陆的裂解过程具有重要意义(Li et al., 2003b; Zhou et al., 2002a, b, 2006a, b; Wang et al., 2004; Zhao and Cawood, 2012)。依据新元古代裂谷充填发育特征及古地理格局,康滇裂谷盆地被进一步划分为汉源—石棉—德昌盆地和巧家—石屏盆地(李世麟等, 1984; 朱创业, 1989)。由于西昌—喜德地区缺失裂谷充填地层,汉源—石棉—德昌盆地被进一步划分为苏雄次级盆地和德昌次级盆地。最近,康滇裂谷自北向南依次被划分为苏雄次级盆地、德昌次级盆地和滇中次级盆地(付坤荣, 2020; 图 1b)。三个次级裂谷盆地发育不同的新元古代火山—沉积记录。例如,苏雄次级盆地主要由苏雄组、开建桥组和列古六组组成;德昌次级盆地主要由开建桥组和列古六组组成;滇中次级盆地主要为陆良组、澄江组、牛头山组和南沱组(王剑等, 2019)。

前人在古地理格局、盆地演化等方面对上述三个次级盆地开展了较为详细的研究工作(李世麟等, 1984; 朱创业, 1989; 马搏杰, 2019; 付坤荣, 2020)。例如,马搏杰(2019)综合沉积地质学、年代地层学研究提出将康滇裂谷盆地由北至南划分为苏雄盆地、德昌盆地和滇中盆地,并进一步讨论了苏雄盆地和德昌盆地的古地理格局;付坤荣(2020)基于年代地层学、沉积地质学、盆地构造等多方面研究分析了三个次级盆地的时空发育特征和构造古地理演化。然而,在康滇裂谷构造演化研究方面还存在诸多问题,特别是三个次级裂谷盆地是否具有相同的演化历史。因此,本文以滇东澄江组为研究对象,开展了系统的同位素年代学和沉积学研究。目的是准确约束澄江组沉积时限,完善区域地层对比关系,并在此基础上讨论康滇裂谷三个次级盆地的演化历史。

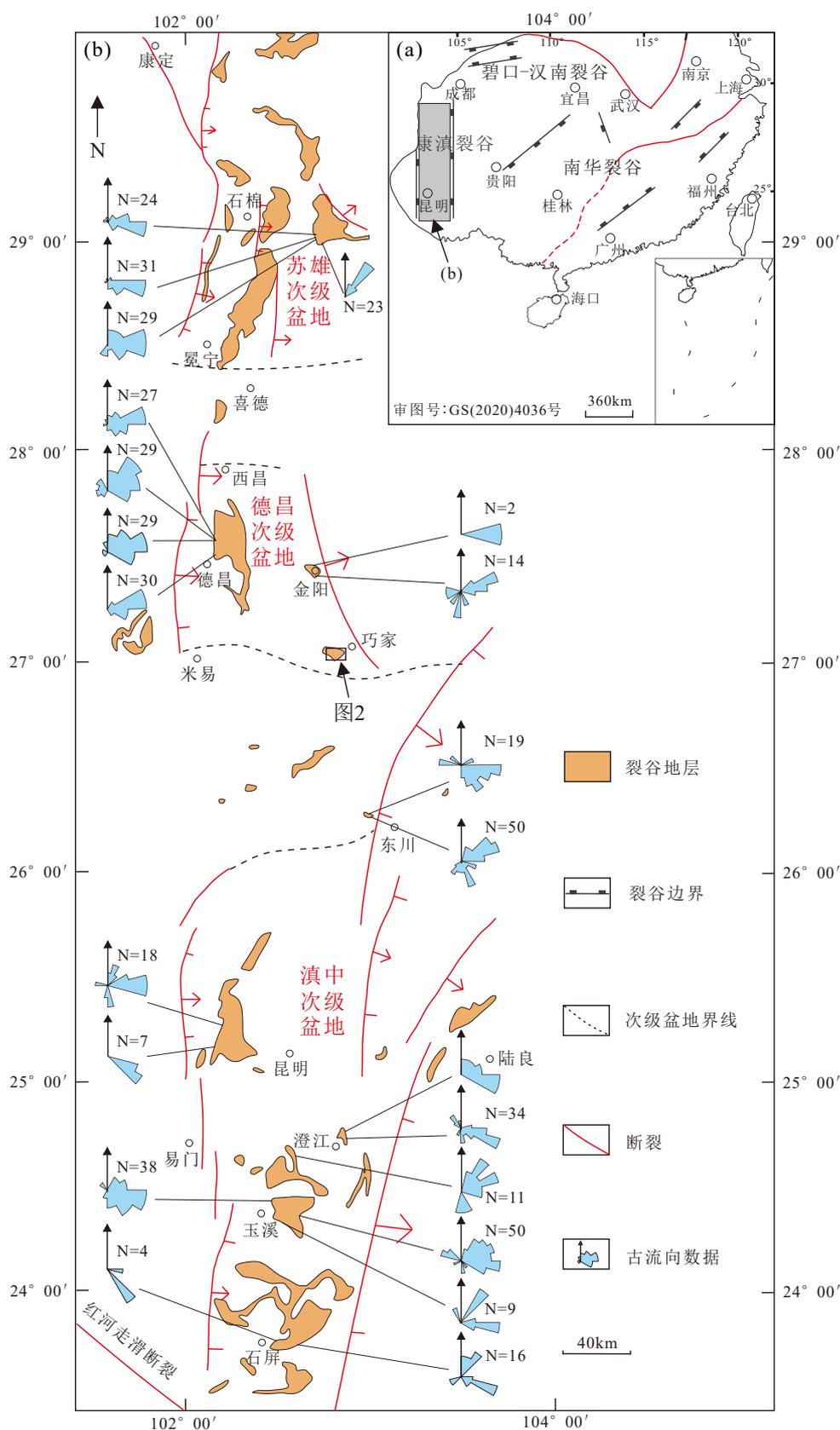
1 区域地质概况及采样层位

扬子西缘康滇裂谷盆地呈南—北向展布,西以安宁河—易门断裂为界,东以甘洛—小江断裂为界(王剑, 2000; Li et al., 2002, 2008; Wang and Li, 2003; Wang et al., 2009, 2011)。盆地基底主要由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;裂谷充填体主要由澄江组、陆良组、牛头山组、开建桥组、黄水河群、盐井群、南沱组及列古六组组成(王剑等, 2019);裂谷盖层则主要为陡山沱组和灯影组(崔晓庄等, 2014)。

澄江组主要分布于康滇裂谷盆地南段元谋—绿汁江—元江以东的滇中地区(图 1b),与下伏地层呈角度不整合接触,与上覆南沱组冰碛岩或更年轻地层呈不整合接触,局部与牛头山组呈整合接触(云南省地质矿产局, 1990; 孙家聪, 1985; 《中国地层典》编委会, 1996)。澄江组以紫红色、灰紫色中厚层—块状中、细粒长石石英砂岩、岩屑砂岩为主,普遍发育交错层理、波痕等沉积构造。局部地区夹火山岩,在武定罗茨地区,其下部发育灰绿色玄武岩、粗安岩及少量凝灰岩;在巧家渭姑地区,下部为灰绿色块状杏仁状橄榄玄武岩、紫红色石英砂岩及夹凝灰岩夹层,上部为紫红色中粗砂岩、泥质粉砂岩。

本文研究区位于滇东北巧家地区,澄江组主要出露于东坪背斜、谓姑复式背斜的核部,出露面积约 13 km²(图 2)。研究剖面位于谓姑背斜核部殷家梁子一带,澄江组与下伏地层昆阳群板岩主要呈断层接触,局部显示为角度不整合接触,与上覆地层震旦系灯影组呈不整合接触(云南省地质矿产局, 1989^①)。自下而上,岩石组合依次为紫红色石英砂岩、浅灰色玄武岩、灰绿色凝灰岩、紫红色中粗粒石英砂岩夹泥质粉砂岩(图 2)。

两件样品均采自云南巧家谓姑地区澄江组剖面(图 2)。其中,11CJB-N1 为玄武岩,采样层位距澄江组与昆阳群角度不整合面仅十余米, GPS 坐标为 27°04.02'N; 103°16.50'E。玄武岩(11CJB-N1)新鲜面为浅灰色,岩石具斑状结构,发育杏仁构造(图 3a)。斑晶由辉石及少量斜长石组成。辉石呈半自形—它形粒状,粒径为 0.24~1.50 mm,最大者



(古流向数据来源: 王剑等, 2019; 马搏杰, 2019; 付坤荣, 2020)

图 1 扬子西缘新元古代康滇裂谷盆地地区划示意图 (据付坤荣, 2020 修改)

Fig. 1 Diagram of the Kangdian rift basin system in the western Yangtze block (modified from Fu Kunrong, 2020)

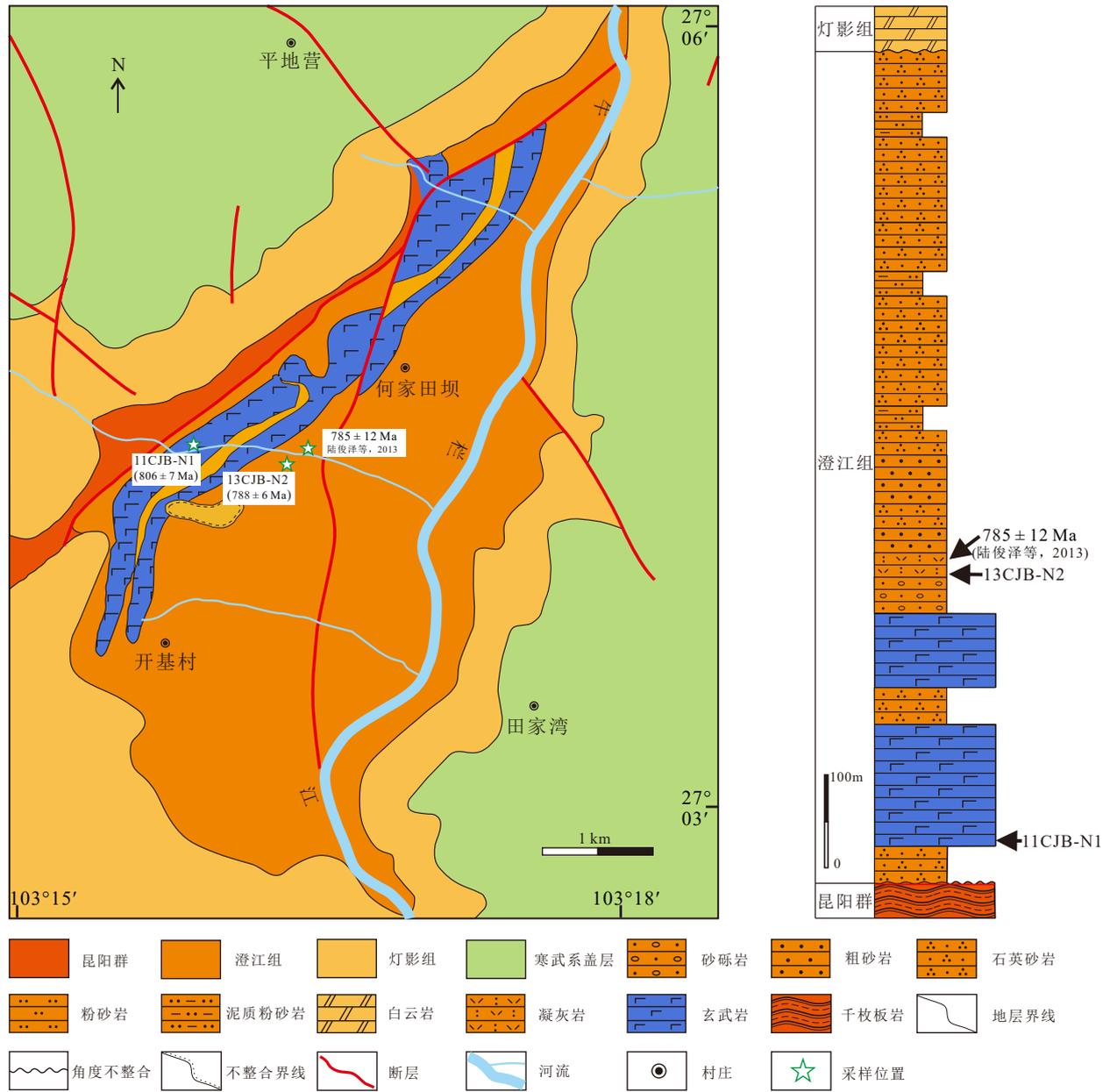


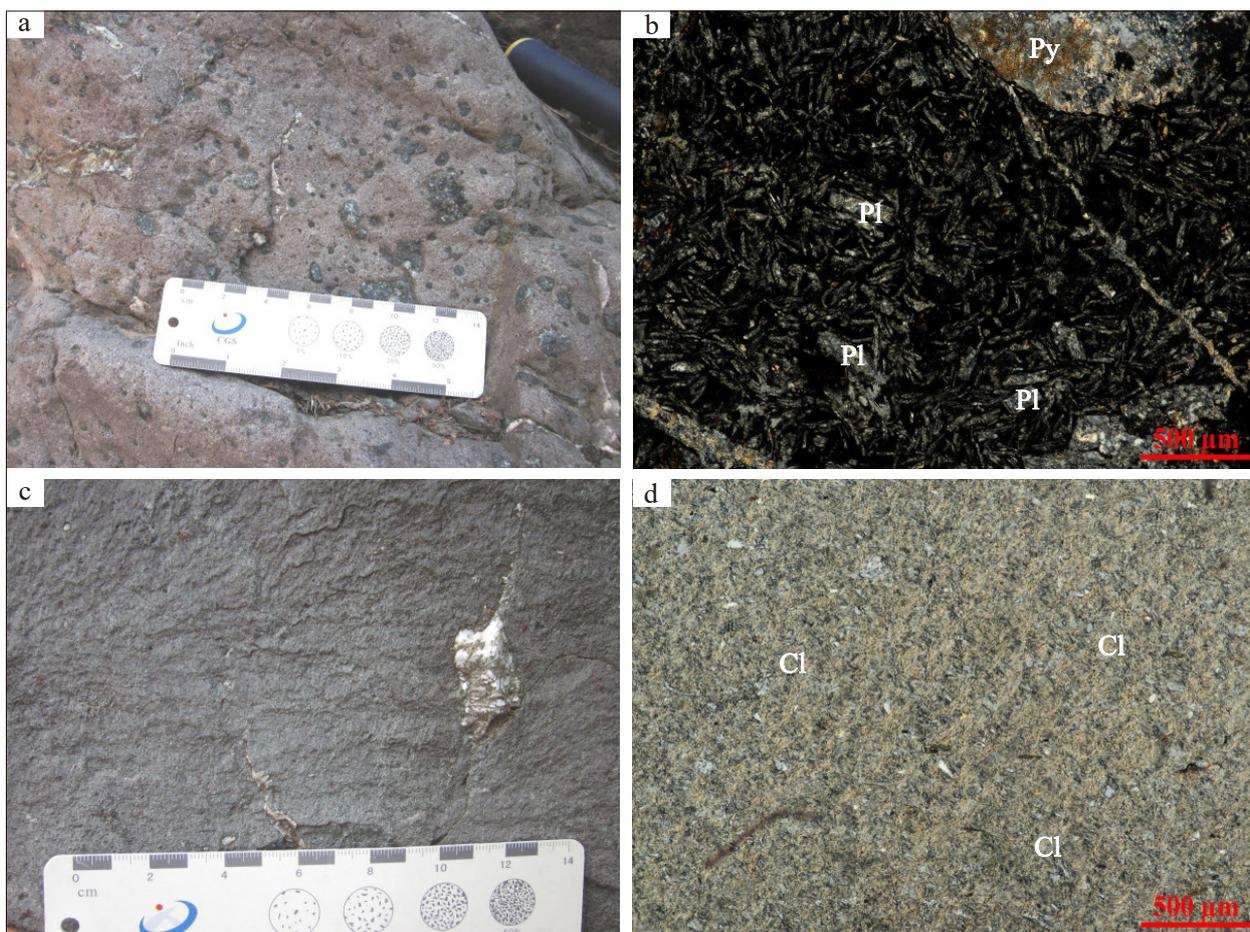
图 2 巧家地区澄江组地质简图及剖面柱状图 (据云南省地质矿产局, 1989 修改)

Fig. 2 Simplified geological map and section histogram of the Chengjiang Formation in Qiaojia area (modified from 云南省地质矿产局, 1989)

4.00 mm×2.00 mm, 部分发育强烈绿泥石化, 同时斑晶辉石暗化边现象明显, 含量约 12%。斜长石呈薄板状, 粒径约 0.20~0.30 mm, 可见聚片双晶, 含量约 4%。基质具间粒结构(图 3b)。13CJB-N2 为凝灰岩, 采样层位距澄江组与昆阳群角度不整合面 300 余米, GPS 坐标为 27°04.02' N, 103°16.45' E。新鲜面呈灰绿色(图 3c), 具凝灰结构(图 3d)。火山碎屑物以玻屑为主, 含少量晶屑, 玻屑具半定向排列, 碎屑总量约 70% 以上。胶结物由黏土矿物组成, 含量为约 30%。

2 分析方法

样品前期处理在廊坊岩拓地质服务有限公司完成, 制靶、阴极发光 (CL) 图像分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。详细的操作步骤如下: 将新鲜玄武岩样品(11CJB-N1)与凝灰岩样品(13CJB-N2)粉碎至 200 目以下, 反复淘洗; 采用重液分离与电磁分离的方法筛选锆石, 利用人工重砂方法收集锆石; 在双目镜下挑选出晶型较好、无裂



矿物名称缩写: Pl—斜长石; Py—辉石; Cl—黏土矿物

图3 巧家地区澄江组玄武岩、凝灰岩野外露头及显微照片

Fig. 3 Outcrop photographs and microphotographs of basalt and tuff of Chengjiang Formation in Qiaojia area

缝和明显包裹体的锆石颗粒,用环氧树脂将其固定,打磨抛光、制成样靶;利用反射光、透射光显微照相和阴极发光(CL)对锆石进行图像分析。

锆石 U-Pb 定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)完成。本次实验采用 GeolasPro 激光剥蚀系统、Agilent 7700e 型 ICP-MS 等仪器。激光束斑为 $32\ \mu\text{m}$ 。具体的操作流程见 Liu 等(2010)。选取锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正。采用 ICPMSDataCal 完成数据离线处理工作(Liu et al., 2010)。采用 Isoplot/Ex_ver3 完成锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算工作(Ludwig et al., 2003)。

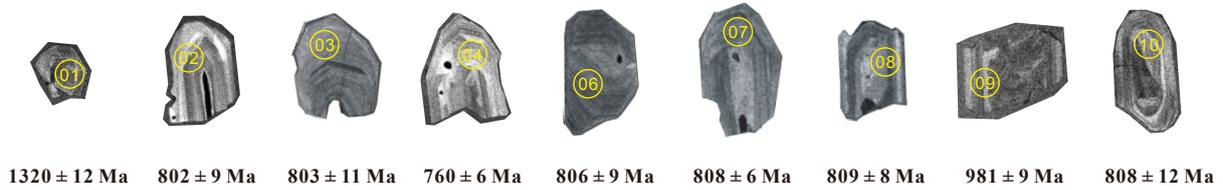
3 分析结果

玄武岩样品 11CJB-N1 中的锆石颗粒大小不等,多呈半自形至自形柱状,少数为板片状,长 $100\sim 150\ \mu\text{m}$,长宽比为 $1:1\sim 2:1$ 。锆石 CL 图像显示其多呈较均匀的内部结构,部分可见弱的振荡环带,具基性岩浆锆石特征(图 4)。锆石 U 含量为 $(237\sim 252)\times 10^{-6}$, Th 含量为 $(100\sim 323)\times 10^{-6}$, Th/U 比值介于 $0.39\sim 0.76$,指示其为岩浆成因(吴元保等, 2004)。对样品 11CJB-N1 中 10 颗锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析,共获得 9 组谐和度大于 90% 的年龄数据(附表 1^{*})。

测点 01 的谐和度较低,未参与年龄计算;测点 05 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 $552\pm 6.1\text{Ma}$,明显偏离了其余数据点,故该点未参与年龄计算;测点 04、

*数据资料联系编辑部或者登录本刊网站获取。

11CJB-N1



13CJB-N2

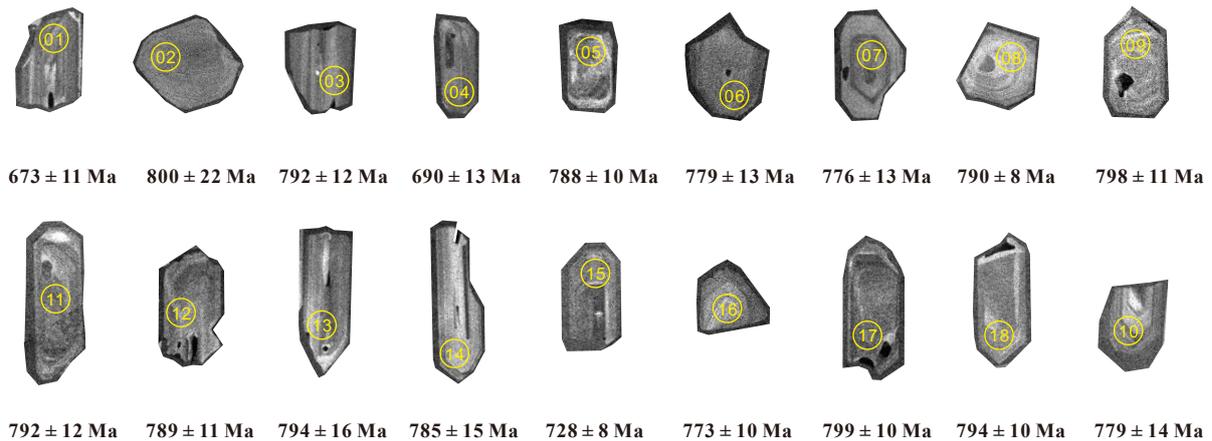


图 4 澄江组玄武岩样品(11CJB-N1)和凝灰岩样品(13CJB-N2)的代表性锆石 CL 图像

Fig. 4 Representative Zircon CL image for basalt samples (11CJB-N1) and tuff samples (13CJB-N2) in the Chengjiang Formation

09 的年龄值明显偏离谐和线,可能是 Pb 丢失导致,因此该 2 点也未参与计算。其余 6 个测点具有谐和且一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,其加权平均值 $806.4 \pm 6.7 \text{ Ma}$ (MSWD=0.12)(图 5a),可基本代表巧家地区澄江组底部玄武岩的形成年龄。

凝灰岩样品 13CJB-N2 中的锆石晶形完好,多数呈自形长柱状(图 4),长 150~250 μm ,晶体长宽比为 2:1~3:1。测点处无裂隙和包裹体。多数锆石发育振荡环带和韵律结构,少数呈均一结构(图 4)。U 含量为 $(163\sim 494)\times 10^{-6}$, Th 含量为 $(85\sim 351)\times 10^{-6}$, Th/U 比值介于 0.37~0.81,表明其为岩浆成因(吴元保等,2004)。对样品 13CJB-N2 的 18 颗代表性锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析,共获得 18 组谐和度大于 90% 的年龄数据(附表 1^{*})。其中,测点 01、04、15 的年龄值明显偏离谐和线,可能是 Pb 有所丢失的原因,因此未参与计算;其余 15 个测点具有谐和且一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,其加权平均值为 $788.4 \pm 5.9 \text{ Ma}$ (MSWD=0.53)(图 5b),可代表巧家地区澄江组下部凝灰岩的形成年龄。

4 讨论

4.1 澄江组地层时代的新约束

澄江组为发育在晋宁运动不整合面之上、澄江运动不整合面之下的一套碎屑沉积(刘鸿允,1991),其地层时代的厘定对于完善扬子西缘新元古代地层格架、约束康滇裂谷盆地开启时间具有重要意义(崔晓庄等,2013)。在滇东北巧家地区,陆俊泽等(2013)曾在新店乡谓姑村澄江组中部凝灰岩夹层中获得了 $785 \pm 12 \text{ Ma}$ 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄,这与本文获得的相近层位的凝灰岩锆石 U-Pb 年龄 $788.4 \pm 5.9 \text{ Ma}$ 相吻合,指示澄江组沉积时代下限要早于 ca. 790 Ma。然而,由于采样层位距离澄江组与昆阳群的不整合界面较远,不能很好地限定巧家地区澄江组的底界年龄。本文玄武岩样品 11CJB-N1 采自澄江组底界(距下伏昆阳群角度不整合面仅十余米),且锆石颗粒具有典型的基性岩浆锆石特征,以及较高的 Th/U 值(0.39~0.76),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $806.4 \pm 6.7 \text{ Ma}$,指示巧家地区澄江组沉积年龄下限约为 800 Ma。

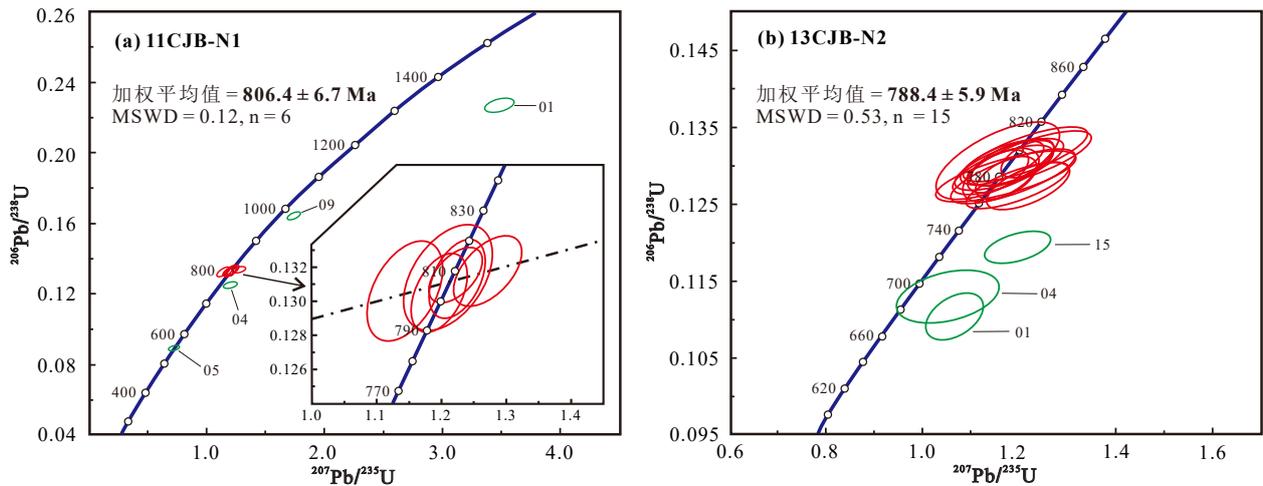


图5 澄江组玄武岩样品(11CJB-N1)和凝灰岩样品(13CJB-N2)的锆石U-Pb年龄谐和图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram for basalt samples (11CJB-N1) and tuff samples (13CJB-N2) in the Chengjiang Formation

区域上,东川中河地区澄江组下部、金阳地区澄江组中下部凝灰岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 803.1 ± 8.7 Ma 和 797.8 ± 8.2 Ma(江新胜等, 2012), 与云南武定罗茨地区澄江组底部玄武岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 804 ± 6 Ma 相一致(崔晓庄等, 2015)。此外,晋宁王家湾澄江组底部砂岩中最年轻一组碎屑锆石 U-Pb 年龄值为 804.5 ± 5.4 Ma(刘石磊等, 2020)。值得注意的是, Li et al.(2003a)在峨山花岗岩中获得的 819 ± 8 Ma 的年龄数据也为澄江组地层时代下限(800 Ma)提供了间接约束。综合本文数据及区域上已发表的年代学数据,基本可确定本区澄江组沉积下限年龄约为 800 Ma。

崔晓庄等(2013)在云南澄江县城北澄江组顶部凝灰岩夹层获得的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 725 ± 11 Ma, 与刘军平等(2019)对滇中易门地区澄江组顶部凝灰岩夹层获得的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 723 ± 11.6 Ma 相吻合,表明澄江组沉积上限年龄为 720 Ma 左右。综上所述,澄江组沉积时限应为 800~720 Ma。

4.2 区域地层对比的再厘定

澄江组主体岩性为紫红色中细—中粗粒长石砂岩、岩屑砂岩夹灰绿色泥质粉砂岩、砂砾岩,发育不对称波痕、大型单向斜层理、槽状及楔状交错层理等(图 6)。自西向东澄江组沉积相由冲积扇、扇三角洲平原相过渡为扇三角洲前缘(刘石磊等, 2020),古水流方向为南东东向(图 1b)。陆良组上

段是一套扇三角洲前缘相沉积(王剑等, 2019),岩性为灰—灰紫色岩屑砂岩夹灰绿色泥质粉砂岩及泥岩,发育交错层理,古水流方向为东向(卓皆文等, 2013)。开建桥组为辫状河相沉积,岩石组合以紫红色中—粗粒长石石英砂岩、砂砾岩为主,偶夹薄层凝灰岩,存在多个由粗变细的正韵律,发育板状、槽状及楔状层理(图 6),古水流方向为北北东向(付坤荣, 2020)。因此,澄江组、陆良组上段、开建桥组岩性组合、沉积构造、古流向均大体一致(图 1b)。

近年来,一系列澄江组及相关地层精确年龄数据的发表指示澄江组、陆良组上段及开建桥组可能为同时异相沉积(图 7)。例如,开建桥组底部凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 801.3 ± 7.2 Ma(卓皆文等, 2015),顶部凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 717.1 ± 6.8 Ma(江卓斐, 2016),从而限定开建桥组的地层时代应该为 800~720 Ma 左右。滇东陆良组上段底部凝灰岩中获得的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 805 ± 14 Ma(卓皆文等, 2013),尽管陆良组沉积上限尚未确定,但区域地质研究表明,在澄江—寻甸地区,澄江组整合于牛头山组灰绿色泥质粉砂岩及页岩之下,在牛头山地区陆良组也整合于牛头山组之下(刘鸿允, 1991)。因此,澄江组、开建桥组、陆良组上段可以直接对比(图 7)。

4.3 新元古代康滇裂谷盆地演化

新元古代康滇裂谷盆地为一个轴线南北延伸且极性向东南的半地堑盆地(王剑等, 2019)。依据



a. 厚层状长石石英砂岩，澄江组（澄江县城北）； b. 发育不对称流水波痕的长石砂岩（转石），澄江组（东川中河）； c. 发育大型交错层理的长石石英砂岩，澄江组（东川中河）； d. 发育同生泥砾和交错层理的岩屑长石砂岩，开建桥组（德昌大高桥）； e. 发育平行层理和交错层理的长石砂岩，开建桥组（金口河贡安乡）； f. 发育交错层理的长石砂岩，开建桥组（金口河贡安乡）。

图6 扬子西缘新元古代澄江组及开建桥组的典型露头照片

Fig. 6 Typical outcrop photographs of Chengjiang Formation and Kaijianqiao Formation in the western Yangtze block

盆地内裂谷体时空发育特征及构造古地理格局, 康滇裂谷自北向南依次被划分为苏雄次级盆地、德昌次级盆地和滇中次级盆地(李世麟等, 1984; 朱创

业, 1989; 付坤荣, 2020)。裂谷充填序列特征显示, 在苏雄次级盆地, 开建桥组火山岩屑砂岩、砂砾岩假整合于苏雄组基性玄武岩与酸性流纹岩之上; 在

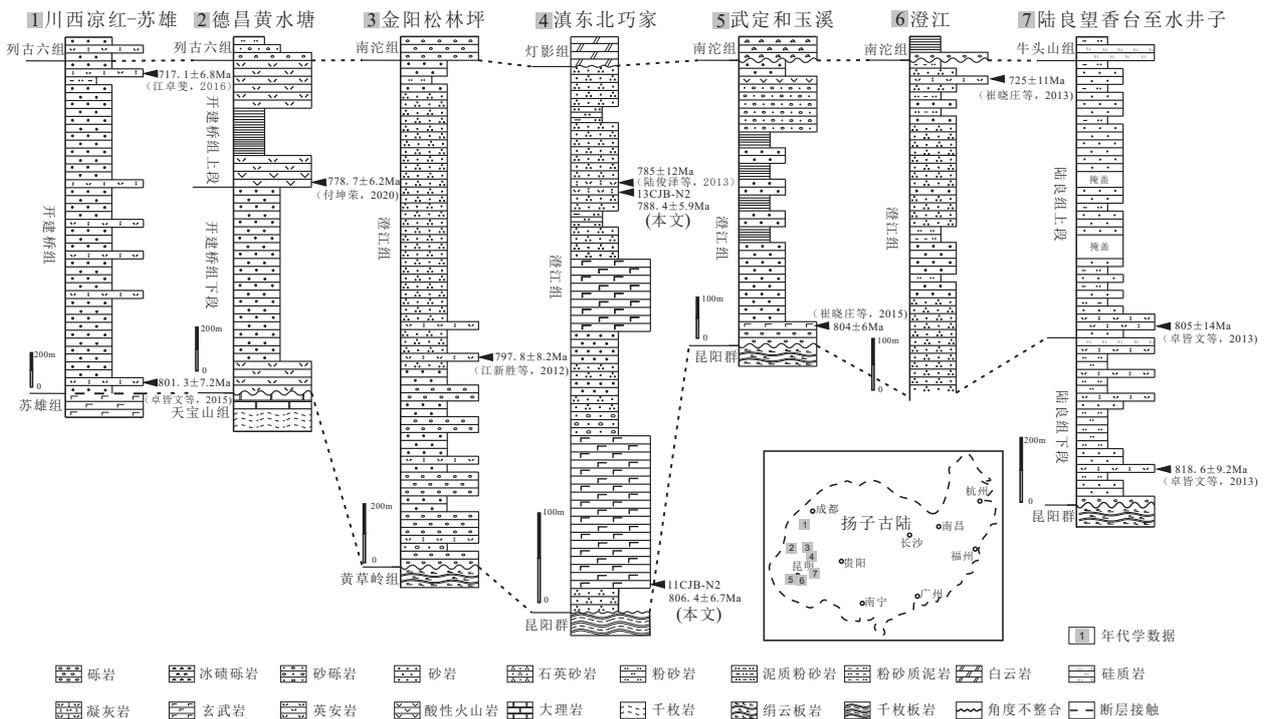


图7 扬子西缘新元古代康滇裂谷盆地澄江组及相关地层对比关系

Fig. 7 Schematic diagram of Chengjiang Formation and related strata correlation in Neoproterozoic Kangdian rift basin, western Yangtze block

德昌次级盆地, 开建桥组角度不整合于会理群天宝山组之上, 平行不整合或假整合于列古六组之下; 在滇中次级盆地边缘区, 澄江组角度不整合于昆阳群之上, 沉积盆地澄江组与早期沉积的柳坝塘组呈不整合接触, 在盆地中心陆良组上段(澄江组相当层)与陆良组下段为连续沉积(崔晓庄等, 2014)。

沉积相及物源分析表明三个次级盆地均具有西高东低的古地理格局, 物源均来自裂谷西侧。其中, 苏雄、德昌次级盆地中开建桥组主要为一套辫状河相沉积(图6), 具有近东的古流向(图1b), 物源均来自裂谷西侧新元古代早期火山岩带区域(马搏杰, 2019); 滇中次级盆地中澄江组自西向东由冲积扇相沉积过渡为扇三角洲相沉积, 陆良组自西向东由辫状河流相沉积过渡为滨岸相沉积(刘石磊等, 2020; 卓皆文等, 2013), 均指示总体向东的古流向, 这与古流向分析结果大体一致(图1b), 物源分析表明其物源主要为裂谷西侧新元古代岩浆岩, 其次为中元古代东川群(高永娟等, 2021)。此外, 岩石学分析结果表明三个次级盆地中沉积充填序列均具有典型近源搬运的特征(江卓斐等, 2016; 王剑等, 2019; 高永娟等, 2021)。如前所述, 澄江组与开建

桥组可直接对比, 其沉积时限均大致为 800~720 Ma(图7)。因此, 三个次级盆地均在 ca. 800 Ma 开始全面接受沉积, 自此康滇裂谷盆地进入裂谷盆地成熟期(王剑等, 2019)。

新元古代中期(800~780 Ma)被认为是 Rodinia 超大陆进入初始裂谷作用的时期(Jing et al., 2021), 在该时期产生的裂谷相关岩浆活动被广泛记录在其他大陆上。例如, 塔里木地块西北部 807 Ma 的阿克苏岩脉群(Zhang et al., 1999)及北部的 800 Ma OIB 型基性岩脉和 802 Ma 超基性岩脉(Zhang et al., 2010; 2012); 马达加斯加中东部形成于板内环境的 Ambatondrazaka 辉长岩(797~772 Ma; Zhou et al., 2015); 劳伦西部约 780 Ma 的 Gunbarrel 岩浆事件(Park et al., 1995; Harlan et al., 2003); 澳大利亚东南部 Tasmania 在 780 Ma 期间的裂谷相关岩浆活动(Calver et al., 2013), 以及随后出现的板内花岗岩侵位(Black et al., 1997; Turner et al., 1998; Mulder et al., 2020); 印度南部 Madurai 地块中大量的 800~780 Ma A 型花岗岩, 也认为其形成于与裂谷有关的岩浆活动(Ghosh et al., 2004; Plavsa et al., 2012; Brandt et al., 2014)。此外, 印度东南部 EGB(Eastern Ghats Belt)中的 800~780 Ma 构造变

质事件(Bose et al., 2016; Chatterjee et al., 2017; Dasgupta et al., 2017; Ranjan et al., 2018)、华南和印度克拉通中具有裂谷特征的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 记录(Wang et al., 2017), 均被认为是 Rodinia 超大陆的初始裂解的记录。总的来说, 我们认为扬子地块西缘康滇裂谷盆地在 800 Ma 期间经历了全面裂谷作用, 可能是同时期 Rodinia 超大陆的初始裂解的响应。

5 结论

(1) 滇东北巧家谓姑地区澄江组中部凝灰岩样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 788.4 ± 5.9 Ma (MSWD=0.53), 底部玄武岩样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 806.4 ± 6.7 Ma (MSWD=0.12), 进一步限定澄江组地层时代下限年龄为 800Ma 左右。

(2) 结合区域年龄数据, 澄江组的地层时代为 800~720 Ma, 与陆良组上段、开建桥组可以直接对比。

(3) 新元古代中期, 苏雄次级盆地、德昌次级盆地和滇中次级盆地演化基本同步, 均于 800 Ma 左右开始全面接受沉积, 是 Rodinia 超大陆裂解的沉积响应。

致谢: 江新胜研究员、卓皆文博士、熊国庆博士和陆俊泽工程师在前期野外工作过程中提供帮助, 刘石磊博士对论文初稿提出宝贵意见, 两位审稿专家及编辑部提出了许多建设性的意见和建议, 在此一并表示衷心的感谢。

注释:

① 云南省地质矿产局, 1989. 区域地质调查报告 (1:5×10⁴) 龙头山幅. 11-13.

References

- Bose S, Das K, Torimoto J, et al., 2016. Evolution of the Chilka Lake granulite complex, northern Eastern Ghats Belt, India: First evidence of ~780 Ma decompression of the deep crust and its implication on the India-Antarctica correlation[J]. *Lithos*, 263: 161 – 189.
- Black L P, Seymour D B, Corbett K D, et al., 1997. Dating Tasmania's oldest geological events[J]. In: Canberra, ACT: Australian Geological Survey Organisation Record, 15: 57.
- Brandt S, Raith M M, Schenk V, et al., 2014. Crustal evolution of the Southern Granulite Terrane, south India: New geochronological and geochemical data for felsic orthogneisses and granites[J]. *Precambrian Research*, 246: 91 – 122.
- Calver C R, Meffre S, Everard J L., 2013. Felsic porphyry sills in Surprise bay formation near Currie, King island, dated at ~775 Ma (LA- ICPMS, U-Pb on zircon) [M]. Hobart, TAS: Tasmanian Geological Survey Record, 10.
- Chatterjee A, Das K, Bose S, et al., 2017. Zircon U-Pb SHRIMP and monazite EPMA U-Th-total Pb geochronology of granulites of the western boundary, Eastern Ghats Belt, India: a new possibility for Neoproterozoic exhumation history[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 457 (1) : 105 – 140.
- Cui X Z, Jiang X S, Wang J, 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 X Z, Jiang X S, Wang, J, 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 X Z, Jiang X S, Wang J, et al., 2015. New evidence for the formation age of basalts from the lowermost Chengjiang Formation in the western Yangtze Block and its geological implications[J]. *Mineralogy and Petrology*, 34 (1) : 1 – 13 (in Chinese with English abstract).
- Dasgupta S, Bose S, Bhowmik S K, et al., 2017. The Eastern Ghats Belt, India, in the context of supercontinent assembly[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 457 (1) : 87 – 104.
- Fu K R. 2020. Dating of the key formations, sedimentary geological characteristics and the tectonic significance of rift filling sequence in Kangdian Rift[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Gao Y J, Lin S L, Qin Y D, et al., 2021. U-Pb age and Hf isotope composition of detrital zircons from the Chengjiang Formation in Dongchuan area, Yunnan Province of the western Yangtze Block and its constraints on provenance and crustal evolution[J]. *Geological Bulletin of China*. 40 (11) : 1943 – 1956 (in Chinese with English abstract).
- Ghosh J G, deWit M J, Zartman R E. 2004. Age and tectonic evolution of Neoproterozoic ductile shear zones in the Southern Granulite Terrain of India, with implications for Gondwana studies[J]. *Tectonics*, 23 (3) : 1 – 38.
- Harlan S S, Heaman L M, LeCheminant A N, et al., 2003. Gunbarrel mafic magmatic event: a key 780 Ma time marker for Rodinia plate reconstructions[J]. *Geology*, 31 (12) : 1053 – 1056.
- Jiang X S, Wang J, Cui X Z, 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: 1815 – 1826 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Z F. 2016. Onset time and periods of the Neoproterozoic glaciers in western Yangtze Block and the tectonic-lithofacies palaeogeography[D]. China University of Geosciences (Beijing)

- (in Chinese with English abstract) .
- Jing X Q, Evans D A, Yang Z Y, et al., 2021. Inverted South China: A novel configuration for Rodinia and its breakup[J]. *Geology*, 49 (4) : 463 – 467 .
- Li S L, Zheng F M, 1984. The lithological characteristics and sedimentary environments of Sinian in Southwest Sichuan[J]. *Journal of Chengdu Institute of Geology*, S1: 50 – 79+93 – 95 (in Chinese with English abstract) .
- Li X H, Li Z X, Zhou H W, et al., 2002. 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 (1-2) : 135 – 154 .
- Li X H, Li Z X, Ge W C, et al., 2003a. Neoproterozoic granitoids in South China: crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? [J]. *Precambrian Research*, 122 (1-4) : 45 – 83 .
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al., 1999. The breakup of Rodinia: did it start with a mantle plume beneath South China? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 173 (3) : 0 – 181 .
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al., 2003b. 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 (1) : 85 – 109 .
- Li Z X, 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 .
- Liu H Y, 1991. Sinian System in China [M]. Beijing: Science Press, 1-388 (in Chinese with English abstract) .
- Liu J P, Xia C X, Sun, B D, et al., 2019. Tuffs from the Neoproterozoic Chengjiang Formation in the Yimen region, central Yunnan: Zircon U-Pb dating and its geological implications[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 39 (1) : 14 – 21 (in Chinese with English abstract).
- Liu S L, Cui X Z, Wang C L, et al., 2020. New sedimentological and geochronological evidence for mid-Neoproterozoic rifting in western Yangtze Block, South China. *Earth Science*, 45 (8) : 3082 – 3093 (in Chinese with English abstract) .
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, 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) : 1535 – 1546 .
- Lu J Z, Jiang X S, Wang J, et al., 2013. SHIMP zircon U-Pb age and its geological significance of Neoproterozoic Chengjiang Formation in Qiaojia area, Northeast Yunnan[J]. *J Mineral Petrol*, 33 (2) : 65 – 71 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R 2003. User 's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication. No. 4.
- Ma B J, 2019. Onset Time and Periods of the Neoproterozoic Glaciers in Western Yangtze Block and the Tectonic-lithofacies Palaeogeograph[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract) .
- Mulder J A, Everard J L, Cumming G, et al., 2020. Neoproterozoic opening of the Pacific Ocean recorded by multi-stage rifting in Tasmania, Australia[J]. *Earth-Science Reviews*, 201: 103041.
- Park J K, Buchan K L, Harlan S S., 1995. A proposed giant radiating dyke swarm fragmented by the separation of Laurentia and Australia based on paleomagnetism of ca. 780 Ma mafic intrusions in western North America[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 132 (1-4) : 129 – 139 .
- Plavsa D, Collins A S, Foden J F, et al., 2012. Delineating crustal domains in Peninsular India: age and chemistry of orthopyroxene-bearing felsic gneisses in the Madurai Block[J]. *Precambrian Research*, 198: 77 – 93 .
- Ranjan S, Upadhyay D, Abhinay K, et al., 2018. Zircon geochronology of deformed alkaline rocks along the Eastern Ghats Belt margin: India-Antarctica connection and the Enderbia continent[J]. *Precambrian Research*, 310: 407 – 424 .
- Sun J C, 1985. Discovery of the volcanic rock series in the Chengjiang Formation at Luoci area and discussion on the age of the basal limit of the Sinian system, Yunnan[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 4: 354 – 363 (in Chinese with English abstract).
- Turner N J, Black L P, Kamperman M, 1998. Dating of Neoproterozoic and Cambrian orogenies in Tasmania[J]. *Aust. J. Earth Sci*, 45: 789 – 806 .
- Wang J, Li Z X, 2003. History of Neoproterozoic rift basins in South China: implications for Rodinia break-up[J]. *Precambrian Research*, 122 (1-4) : 141 – 158 .
- Wang J, 2000. Evolution of the Neoproterozoic rift basin in South China: Implications for the disintegration of Rodinia[M]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract) .
- Wang J, Jiang X S, Zhuo J W, et al., 2019. Neoproterozoic rift basin evolution and lithofacies paleogeography in South China[M]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract) .
- Wang W, Cawood P A, Zhou M F, et al., 2017. Low $\delta^{18}\text{O}$ rhyolites from the Malani igneous suite: A positive test for South China and NW India linkage in Rodinia[J]. *Geophysical Research Letters*, 44 (20) : 10 – 298 .
- Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, et al., 2004. Geochemistry of the Mesoproterozoic basic-acid rocks from Hunan Province, South China: implications for the evolution of the western Jiangnan orogen[J]. *Precambrian Research*, 135 (1-2) : 79 – 103 .
- Wang X C, Li X H, Li W X, 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 X C, Li Z X, Li X H, 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 .
- Wu Y B, Zheng Y F, 2004. Zircon genetic mineralogy and its constraints on U-Pb age interpretation[J]. *Chinese science bulletin*, 49 (16) : 1589 – 1604 (in Chinese with English abstract).
- Geology and Mineral Resources Bureau of Yunnan Province, 1990. Regional geology of Yunnan Province [M]. Beijing: Geological

- Publishing House, 236-255 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C L, Yang D S, Wang H Y, et al., 2010. Neoproterozoic Mafic Dykes and Basalts in the Southern Margin of Tarim, Northwest China: Age, Geochemistry and Geodynamic Implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84 (3): 549-562.
- Zhang C L, Zou H B, Wang H Y, et al., 2012. Multiple phases of the Neoproterozoic igneous activity in Quruqtagh of the northeastern Tarim Block, NW China: Interaction between plate subduction and mantle plume?[J]. *Precambrian Research*, 222-223: 488-502.
- Zhang L F, Jiang W B, Wei C J, et al., 1999. Discovery of deerite from the Aksu Precambrian blueschist terrane and its geological significance[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 42 (3): 233-239.
- Zhao G C, Cawood P A, 2012. Precambrian geology of China [J]. *Precambrian Research*, 222-223: 13-54.
- 《Chinese Stratigraphic Code》Editor Board, 1996. Neoproterozoic Strata [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-117 (in Chinese with English abstract).
- Zhou J L, Shao S, Luo Z H, et al., 2015. Geochronology and geochemistry of Cryogenian gabbros from the Ambatondrazaka area, east-central Madagascar: Implications for Madagascar-India correlation and Rodinia paleogeography[J]. *Precambrian Research*, 256: 256-270.
- Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, et al., 2002a. 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 M F, Kennedy A K, Sun M, et al., 2002b. Neoproterozoic Arc-Related Mafic Intrusions along the Northern Margin of South China: Implications for the Accretion of Rodinia[J]. *The Journal of Geology*, 110: 611-618.
- Zhou M F, Yan D P, Wang C L, et al., 2006a. Subduction-related origin of the 750 Ma Xuelongbao adakitic complex (Sichuan Province, China): implications for the tectonic setting of the giant Neoproterozoic magmatic event in South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 248: 286-300.
- Zhou M F, Ma Y X, Yan D P, et al., 2006b. 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 C Y, 1989. The sequences of filling and tectonic evolution of Qiaojia-Shiping basin, Yunnan During early Sinian[J]. *Journal of Chengdu Collage of Geology*, (3): 59-66+130 (in Chinese with English abstract).
- Zhuo J W, Jiang X S, Wang J, et al., 2013. Opening time and filling pattern of the Neoproterozoic Kangdian Rift Basin, western Yangtze Continent, South China. *Science China: Earth Sciences*, 43 (12): 1952-1963 (in Chinese with English abstract).
- Zhuo J W, Jiang X S, Wang J, et al., 2015. Zircon SHRIMP U-Pb age at the bottom of Neoproterozoic Kaijianqiao Formation in western Sichuan, and its geological implication. *J Mineral Petrol*, 35 (1): 91-99 (in Chinese with English abstract).

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.
- 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. 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[J]. *岩石矿物学杂志*, 34 (1): 1-13.
- 付坤荣, 2020. 康滇裂谷充填序列关键层位定年、沉积地质特征及其大地构造意义[D]. 中国地质大学(北京).
- 高永娟, 林仕良, 秦雅东, 等, 2021. 扬子陆块西缘云南东川地区澄江组碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其对物源和地壳演化的约束[J]. *地质通报*, 40 (11): 1943-1956.
- 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): 1496-1507.
- 江卓斐, 2016. 扬子西缘新元古代冰川启动时间、期次及其构造-岩相古地理演化[D]. 中国地质大学(北京).
- 李世麟, 郑发模, 1984. 四川西南部震旦系研究. 四川西南部震旦系的岩性特征及沉积环境[J]. *成都地质学院学报*, S1: 50-79+93-95.
- 刘鸿允, 1991. 中国震旦系[M]. 北京: 科学出版社, 1-388.
- 刘军平, 夏彩香, 孙柏东, 等, 2019. 滇中易门地区新元古代澄江组凝灰岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 39 (1): 14-21.
- 刘石磊, 崔晓庄, 汪长林, 等, 2020. 扬子西缘新元古代中期裂谷作用: 来自年代学与沉积学的新证据[J]. *中国科学: 地球科学*, 45 (8): 3082-3093.
- 陆俊泽, 江新胜, 王剑, 等, 2013. 滇东北巧家地区新元古界澄江组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *矿物岩石*, 33 (2): 65-71.
- 马博杰, 2019. 康滇北部开建桥组沉积地质特征及其盆地动力学意义[D]. 中国地质大学(北京).
- 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[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: 科学出版社, 1-131.
- 王剑, 江新胜, 卓皆文, 等, 2019. 华南新元古代裂谷盆地演化与岩相古地理[M]. 北京: 科学出版社.
- 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): 1589-1604.
- 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.
- 《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, 1989. 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*, (3): 59-66+130.
- 卓皆文, 江新胜, 王剑, 等, 2013. 华南扬子古大陆西缘新元古代康滇裂谷盆地的开启时间与充填样式[J]. *中国科学: 地球科学*, 43 (12): 1952-1963.
- 卓皆文, 江新胜, 王剑, 等, 2015. 川西新元古界开建桥组底部凝灰岩锆石 SHRIMP-U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *矿物岩石*, 35 (1): 91-99.