

# 哀牢山构造带两侧上志留统-下泥盆统碎屑锆石 年代学：物源及其构造意义

刘兵兵<sup>1,2</sup>, 彭头平<sup>1,3\*</sup>, 范蔚茗<sup>3,4</sup>, 高剑峰<sup>5</sup>, 方小玉<sup>1,2</sup>, 张靖祎<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院 广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2.中国科学院 大学, 北京 100049; 3.中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 4.中国科学院 青藏高原 研究所, 北京 100101; 5.中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 哀牢山古特提斯洋的打开时限及其缝合带的具体位置对理解哀牢山古特提斯洋构造演化具有非常重要的意义。本文采用碎屑锆石年代学方法, 分析了哀牢山构造带及其两侧不同时期沉积物源的特征及其变化, 解译了其物源差别所指示的哀牢山古特提斯洋打开时限以及缝合带的构造位置。碎屑锆石年代学显示, 哀牢山构造带两侧上志留统碎屑锆石都记录一个~450 Ma 的最年轻的峰值和一个格林威尔期造山事件的年龄群(1100~800 Ma), 以及一个 2600~2400 Ma 的次峰; 不同于上志留统, 构造带东侧下泥盆统碎屑锆石并未出现年轻的~450 Ma 峰值年龄信息, 西侧 U-Pb 年龄分布模式与上志留统一致, 记录~450 Ma 峰值年龄信息, 而且构造带两侧下泥盆统碎屑锆石的 2600~2400 Ma 的峰值明显要强于上志留统。区域上发表的碎屑锆石年代学资料, 也揭示相同的年龄峰值。因此, 综合区域上的其他地质资料, 我们认为哀牢山古特提斯洋的打开时限应该在晚志留世-早泥盆世, 哀牢山断裂带代表了哀牢山洋盆闭合的位置。

**关键词:** 年代学; 碎屑锆石; 晚志留世-早泥盆世; 哀牢山构造带; 古特提斯洋

**中图分类号:** P597; P54 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1552(2017)04-0734-019

## 0 引言

三江特提斯构造带位于横贯欧亚大陆的巨型特提斯构造域东段, 经历了早古生代-中生代冈瓦纳大陆裂解、微地块北向漂移与顺次拼贴的历程, 发育多条代表古特提斯洋盆消逝的缝合带(刘增乾, 1993; Metcalfe, 2002, 2013; Deng et al., 2013)。金沙江-哀牢山缝合带是三江特提斯东缘一条重要的古特提斯缝合带, 其洋盆演化史一直备受关注。哀牢山构造带不仅是一条重要的构造分界线, 分隔着思茅-印支和扬子陆块, 也是新生代以来藏东南大陆

块体挤出、旋转和逃逸的重要通道, 在印度-欧亚大陆碰撞演化过程中起着重要的调节作用, 一直是国内外地学界研究的热点地区(Molnar and Tapponnier, 1975; Schärer et al., 1990; Tapponnier et al., 1990; 季建清, 1998; 钟大赉, 1998; Wang et al., 2001; Metcalfe, 2006; 聂小松等, 2015; Xia et al., 2016)。

前人基于放射虫硅质岩年代学(孙晓猛等, 1995, 2004; Feng and Ye, 1996; Wang et al., 2000a, 2000b)、蛇绿岩套基性-超基性岩及弧岩浆岩锆石 U-Pb 年代学与地球化学等方法(Jian et al., 2009a, 2009b; Fan et al., 2010; Zi et al., 2012a, 2012b), 对金沙江-哀牢山

收稿日期: 2017-01-06; 改回日期: 2017-03-03

项目资助: 国家 973 项目(2014CB440901)、国家基金面上项目(41272126)和百人计划项目(Y5CJ038000)联合资助。

第一作者简介: 刘兵兵(1991-), 男, 硕士研究生, 岩石大地构造学专业。Email: liubing@gig.ac.cn

通信作者: 彭头平(1974-), 男, 研究员, 从事岩石大地构造方面研究。Email: tppeng@gig.ac.cn

洋的开启及其演化过程进行了大量研究,取得了一些重要成果。然而,对于哀牢山洋盆的位置及其打开的时限仍存在争议。如 Metcalfe (2002, 2006) 认为其洋盆所在的位置应为哀牢山断裂带; 一些学者认为其应沿着李仙江断裂带分布 (Chung et al., 1997; Xiao et al., 2003); 还有一些学者则认为可能沿着九甲-安定断裂带分布 (Jian et al., 2009a, 2009b; Wang et al., 2014); 也有学者认为哀牢山-藤条河断裂带也可能代表了哀牢山洋缝合带的位置 (聂小松等, 2015; Xia et al., 2016)。此外,关于哀牢山洋打开机制和时限也存在多种不同的认识。如一些研究者认为金沙江-哀牢山洋形成于石炭纪-二叠纪的昌宁-孟连主洋盆的弧后洋盆 (Metcalfe, 2006, 2013; Fan et al., 2010; Pan et al., 2012); 另一些学者则认为哀牢山洋是古特提斯洋的一个分支洋盆,经历了完整的威尔逊循环,洋盆打开于泥盆纪 (魏启荣等, 1998; 沈上越等, 2000, 2001; 方维萱等, 2002); 也有学者认为哀牢山洋在志留纪就已经发育成一个深水盆地 (聂小松, 2015; Xia et al., 2016)。

由于哀牢山构造带新生代以来经历过强烈的构造-变质变形事件 (Wang et al., 2001), 所以与哀牢山古特提斯洋盆演化有关的重要的构造-岩浆-沉积响应记录已被改造或重置。而锆石是各类成因岩石中常见的副矿物,它广泛形成于中、酸性岩浆岩和中、高级变质岩中,记录了地壳主要的岩浆和变质事件 (Rainbird et al., 1992; 张少兵和郑永飞, 2007)。由于锆石具有极好的抗风化、抗磨蚀和抗热蚀变能力,使得它在沉积循环中不易被破坏。与岩浆岩相比,碎屑沉积岩的一个重要特点是:碎屑沉积岩可以记录一些已被风化剥蚀殆尽现在可能已不存在的岩石信息。盆地沉积的碎屑组分是源区出露岩石的天然混合样品,既是盆地沉积和构造演化的直接证据,也是源区山脉隆升风化、剥蚀、搬运和沉积的产物,记录了造山作用及隆升剥蚀历史的重要信息,也包含了板块拼合和裂解等不同过程的诸多记录 (Rainbird et al., 1992)。因此,碎屑锆石 U-Pb 定年目前已经广泛应用于沉积物源示踪研究,它已经成为揭示造山作用起始时间、碎屑沉积源区性质 (包括时代和组成)、地层不整合面中断时间等源区分析和古地理重建、地球历史演化等强有力的构造指示器和不可缺失的一种方法 (Bruguier et al., 1997; Cawood and Nemchin, 2000; DeCelles et al., 2000; Cawood and Buchan, 2007; Cawood et al., 2012)。本文通过对

哀牢山构造带及其两侧上志留统-下泥盆统碎屑沉积岩中的锆石进行系统的 U-Pb 年代学研究,并与周边及全球潜在的源区年龄信息进行对比分析,以期揭示哀牢山构造带两侧早古生代晚期-晚古生代早期不同地区沉积岩的物源,从而进一步探讨哀牢山洋盆打开的时限及洋盆的可能位置。

## 1 区域地质

哀牢山构造带是滇东、滇西重要的地质分界线,总体呈北西窄、南东宽的扇形 NW-SE 向展布于云南省中南部,向东南经元阳县和金平县延伸进入越南境内,向西北经点苍山与金沙江构造带连接 (钟大贵, 1998; 董云鹏等, 2000), 是我国西部古特提斯构造域的重要组成部分。该构造带主要由五条主断裂组成,自北东向南西依次为红河断裂、哀牢山断裂、藤条河断裂、九甲-安定断裂和李仙江断裂 (图 1b) (云南省地质矿产局, 1990)。大地构造上:一方面它是思茅-印支地块与扬子-华南地块的重要边界,另一方面它属于印度-欧亚碰撞带的东延。该构造带经历了长时期、多阶段不同性质的大地构造环境的变迁,并由不同时代地质单元组合构成结构复杂的构造带 (王冬兵等, 2013)。该区出露最古老的岩石地层为前寒武系哀牢山群和部分瑶山群变质岩系,沿哀牢山山脉分布总体呈 NW-SE 向狭窄条带状延伸,两侧分别被哀牢山断裂和红河断裂所限,北延到南涧县密滴附近,被红河断裂所切,使哀牢山断裂尖灭,南延入越南与范士皈带相连 (王义昭和丁俊, 1996; 王冬兵等, 2013)。该构造带由东西两个变质带构成,即东部的高级变质带和西部的低级变质带。高级变质带由绿片岩相-角闪岩相的片麻岩、角闪岩、大理岩 (甚至部分变质程度达到高角闪岩相) 和花岗岩组成,代表了区域上的哀牢山群,带内因受剪切带活动影响岩石已强烈糜棱岩化。低级变质带由低绿片岩相片岩、千枚岩和板岩组成的浅变质作用的下古生界碎屑岩组成。两者被一逆冲断裂分隔开,断裂大体沿山脉的主脊延伸 (张进江等, 2006)。由于变质变形作用的叠加改造,加之混合岩化强烈,使哀牢山群的原岩面貌和层理特征基本消失,地层层序难以恢复 (王冬兵等, 2013)。因此其层位时代很难精确约束 (云南省地质矿产局, 1990; 王义昭和丁俊, 1996; 翟明国和从柏林, 1996)。

哀牢山构造带内蛇绿岩套发育,主要分布于浅变质岩系中,与其呈断裂接触的围岩涵盖志留系-

下三叠统。蛇绿岩套以双沟地区出露最为完整(长约 30 km, 宽 2 km), 从下至上由 3 个岩石单元组成, 即底部蛇纹石化橄榄岩、中部辉绿岩-辉长岩组合和顶部玄武岩及少量安山质玄武岩等(沈上越等, 1998; Yumul et al., 2008), 形成于 387~328 Ma(Jian et al., 2009a, 2009b)。除此之外, 构造带内沿着哀牢山断裂出露大量变质变形的新元古代岩浆岩, 形成时代为 813~750 Ma(Cai et al., 2014, 2015; Wang et al., 2016)。构造带东西两侧古生代的岩浆作用记录, 目前报道有: 构造带以东的越北-滇东南的 Song Chay-老君山花岗岩质基形成时代为 434~428 Ma (锆石 U-Pb 年龄; Roger et al., 2000; Yan et al., 2006; Peng et al., 2015); 构造带以西的大平掌地区~430 Ma 的英安岩-流纹岩(Lehmann et al., 2013)。构造带两侧的沉积作用特征如下:

1.1 哀牢山断裂带东部地层

断裂带东部地区或右江盆地西北出露的最老地层为寒武系, 下古生界主要分布于南部的文山和建水地区。其中文山地区下古生界出露寒武系和下奥陶统, 缺失中-上奥陶统和志留系。上古生界下泥盆统平行不整合上覆于下奥陶统。泥盆系包括翠峰山

组、坡脚组、芭蕉菁组、古木组、东岗岭组和榴江组(云南省地质矿产局, 1990)。其中下泥盆统翠峰山组由上部的紫红色页岩、中部的白色层状细砂岩和下部的页岩组成, 与下伏的中奥陶统十字铺组呈角度不整合; 坡脚组整合上覆于翠峰山组, 岩性主要为棕黄、灰绿的泥岩和粉砂质泥岩; 芭蕉菁组岩性主要为灰黑的泥灰岩夹白云岩、白云质灰岩, 并整合上覆于坡脚组; 中泥盆统包括古木组和东岗岭组, 古木组由灰黑色中薄层泥灰岩和厚层白云岩互层产出, 东岗岭组由灰色中厚层状灰岩组成; 上泥盆统榴江组在文山地区分为上下两层: 下部为灰色鲕状灰岩, 上部为深灰-灰黑色的含泥质灰岩(云南省地质矿产局, 1990)。

建水地区下古生界出露有中-下寒武统、下奥陶统和中-上志留统, 其中下奥陶统汤池组角度不整合上覆于中寒武统双龙潭组, 中-上志留统平行不整合上覆于下奥陶统巧家组。而下泥盆统整合上覆于上志留统。志留系出露有中志留统的马龙群和上志留统的玉龙寺群。马龙群主要由灰黑色钙质页岩、粉砂岩、泥质灰岩组成, 平行不整合上覆于下

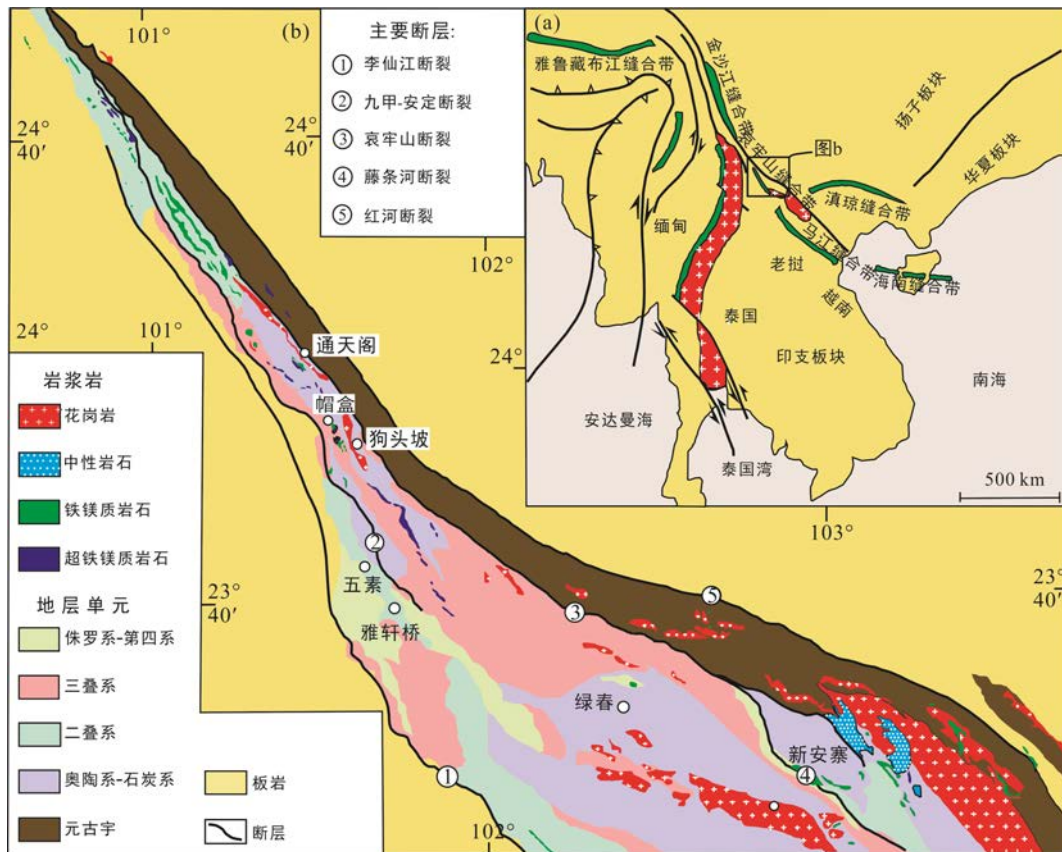


图 1 研究区大地构造略图  
Fig.1 Tectonic map of the study area

表1 采样位置  
Table 1 Locations of samples

样号	地点	地层	岩性	经纬度
YJ-13-2	文山(哀牢山断裂带东侧)	D <sub>1</sub>	粉砂岩	N23°15.147', E104°26.091'
YJ-17	文山(哀牢山断裂带东侧)	D <sub>1</sub>	粉砂岩	N23°06.087', E104°20.292'
YJ-28	墨江(哀牢山断裂带西侧)	D <sub>1</sub>	粉砂岩	N23°33.182', E101°37.671'
YJ-31	墨江(哀牢山断裂带西侧)	D <sub>2</sub>	硬砂岩	N23°39.067', E101°34.426'
YJ-33	墨江(哀牢山断裂带西侧)	S <sub>3</sub>	砂岩	N23°27.749', E101°38.654'
YJ-65	元江(哀牢山断裂带东侧)	S <sub>3</sub>	砂岩	N23°32.733', E102°11.630'
YJ-67	镇源(哀牢山断裂带西侧)	S <sub>2</sub>	砂岩	N23°56.237', E101°27.823'

奥陶统巧家组; 玉龙寺群主要为灰黑、灰黄色泥质页岩、粉砂质页岩, 整合上覆于马龙群(云南省地质矿产局, 1990)。泥盆系主要有下泥盆统的翠峰山组、中泥盆统郁江组(或坡脚组)和东岗岭组, 以及上泥盆统一打得组、石关山组和驮山组。其中翠峰山组主要岩性为灰白、黄白色石英砂岩, 与下伏上志留统玉龙寺群呈整合接触; 坡脚组主要岩性为灰白、灰绿色石英砂岩、粉砂岩, 整合上覆于翠峰山组; 东岗岭组的岩石类型自下而上主要为南盘江段的灰色灰岩及白云岩, 双阱段黄白、灰色石英砂岩, 曲靖段的灰色灰岩及白云岩, 并与坡脚组呈整合接触(云南省地质矿产局, 1990)。

### 1.2 哀牢山断裂带西部地层

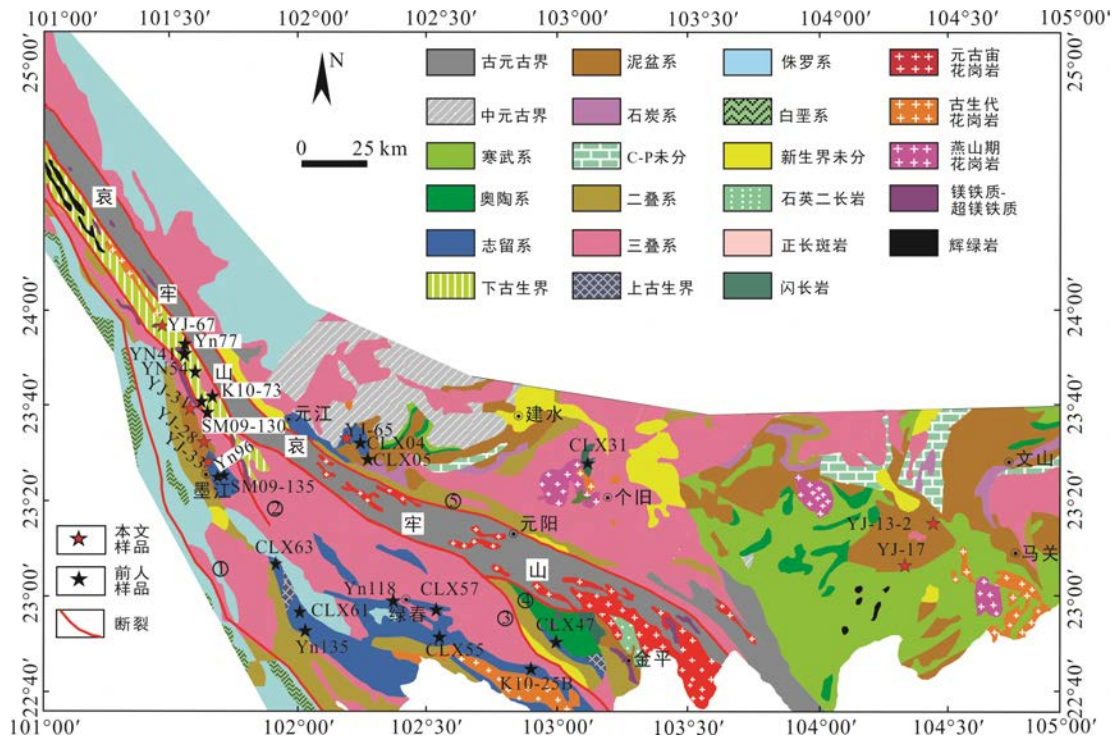
断裂带以西出露的最老地层为下奥陶统, 广泛出露于绿春-元阳地区。奥陶系和中-下志留统主要出露于该区南部金平-元阳地区, 在奥陶系和志留系之间呈平行不整合接触, 下志留统不整合上覆于上奥陶统。而在墨江地区志留系以断层接触上覆于元古宇变质基底(云南省地质矿产局, 1990)。泥盆系在金平-元阳地区缺失下泥盆统, 中-上泥盆统不整合上覆于中志留统; 而在墨江地区, 下泥盆统整合上覆于上志留统, 缺失上泥盆统(云南省地质矿产局, 1990)。岩性特征上, 下志留统由粉砂质板岩、石英砂岩、细粒长石石英砂岩和粉砂岩组成; 而中志留统以细粒石英砂岩、粉砂岩为主, 与粉砂质板岩不等厚互层, 和下志留统整合接触; 上志留统由硅质岩以及黑色页岩组成, 与中志留统整合接触(云南省地质矿产局, 1990)。下泥盆统包括倮红组、大中寨组、龙别组和南边山组, 底部的倮红组是一套黑色薄层状泥灰岩、藻硅质岩夹页岩; 大中寨组为灰绿、黑色页岩、炭质页岩与灰白色薄层状细粒砂岩、粉砂岩; 龙别组则分为上下两层: 下部为灰色、深灰色薄层泥灰岩、黑色硅质岩, 上部为黑色泥页岩和粉砂岩, 含竹节石化石; 南边山组为一套局部含植物化石

的碎屑岩夹碳酸盐岩、硅质岩组合并整合上覆于龙别组(图 3)(孙硕, 2013)。

## 2 分析方法

野外每个样品采集约 5 kg 新鲜岩石样品(采样位置见表 1、图 2、3), 再经过机械破碎、淘洗、磁选和重液分选出锆石, 然后在双目镜下每个样品随机挑选 200 粒晶形完好、透明干净、无裂隙的锆石, 固定在双面胶排列好, 以环氧树脂充填固结制成锆石靶, 抛光直至其内部结构显露。已经抛光好的样品靶进行透/反射光照相, 随后使用配备在电子扫描电镜和电子探针仪上的阴极发光仪进行锆石阴极发光图像分析。以上工作均是为分析时避开破裂或含有包裹体的位置, 并区分锆石不同期次形成的环带结构, 选取合理的锆石颗粒和分析点位进行 U-Pb 年代学分析做准备。

锆石 U-Pb 同位素定年在香港大学地球科学系利用配备有 193 nm 激光剥蚀系统(Resolution M-50, Resonetics LLC, USA)的 Nu Plasma HR MC-ICPMS (Nu Instruments, UK)仪器分析完成。分析过程中, 激光束斑直径为 40 μm。样品经剥蚀后, 采用氦气作载气, 氩气为补偿气并混合少量的氮气以调节灵敏度。U-Pb 同位素定年过程中, 采用锆石标准 91500 和 GJ 作为标样, 每分析 5 个样品点就分析 2 次 91500 标样和 1 次 GJ 标样用以同位素分馏校正, 确保数据的准确性和可靠性, 详细的分析方法见 Xia et al. (2011)。采用 ICP-MSDataCal 软件处理分析数据(包括对样品和空白信号的选择仪器、灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值等参数的设置以及年龄计算等), 具体过程和流程见 Liu et al. (2008)。利用 Andersen (2002)的方法进行普通 Pb 校正。所得锆石 U-Pb 年龄谱和图和年龄频谱图由 Isoplot 3.0 软件绘制而成(Ludwig, 2003)。分析结果见表 2(由于数据较多, 印刷版表 2 略, 具体数据见网络电子版)。



李仙江断裂； 九甲-安定断裂； 藤条河断裂； 哀牢山断裂； 红河断裂。

图 2 研究区地层分布图以及采样位置图(修改自 Xia et al., 2016)

Fig.2 Geological map of the study area with sampling sites

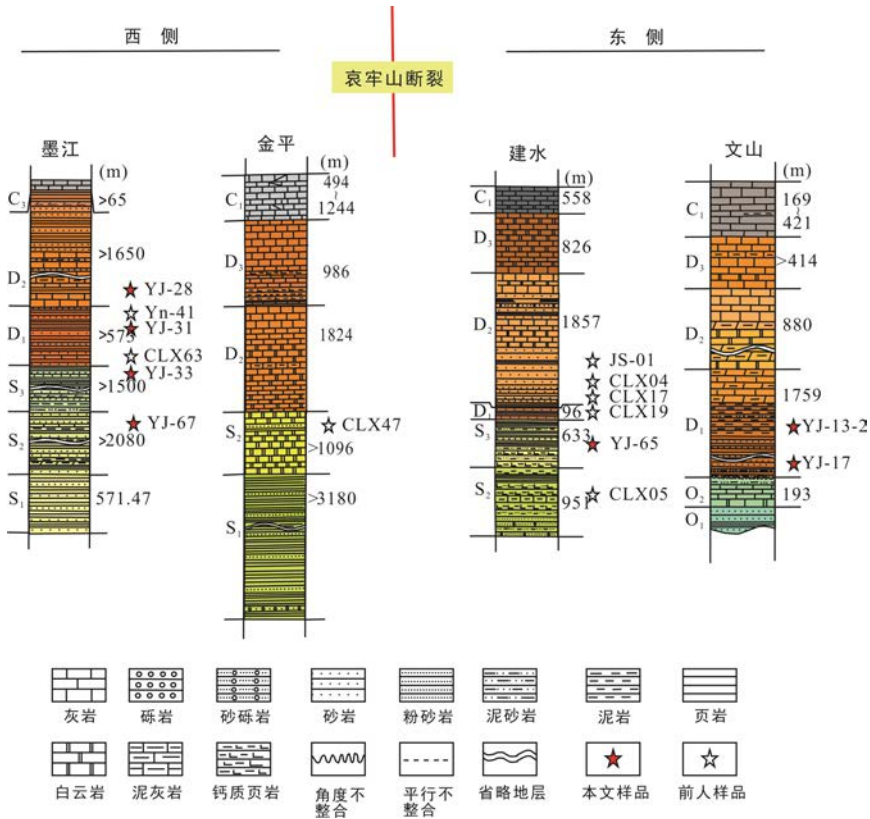


图 3 哀牢山断裂带两侧上志留统和下泥盆统地层柱状图以及采样示意图(改自云南省地质矿产局, 1990, 前人样品分别来自 Burrett et al., 2014; Xia et al., 2016)

Fig.3 Stratigraphic columns of the Upper Silurian and Lower Devonian strata both sides of the Ailaoshan Fault

### 3 分析结果

#### 3.1 锆石特征

透射光照片显示大部分锆石呈浅褐色, 部分呈粉红色或者红色, 或者无色, 透明到半透明。部分锆石颗粒具有长柱状, 多呈自形, 粒径约为 50~150  $\mu\text{m}$ , 其长宽比约为 1 到 3。大部分锆石的颗粒呈次棱角状到次圆状, 表明其经历过较长距离的搬运, 且在搬运过程中受到磨蚀。大多数锆石颗粒 CL 图像显示规则的韵律生长振荡环带(图 4), 少数呈带状。个别颗粒整体较亮, 显示其内部成分较为均一, 少数颗粒具核边结构或核幔边结构。绝大部分锆石  $\text{Th}/\text{U}>0.1$ (表 2), 结合其典型的韵律振荡环带 CL 图像, 暗示其为岩浆成因(Hoskin and Schaltegger, 2003; 吴元保和郑永飞, 2004)。

#### 3.2 锆石年龄组成特征

本文将谐和度在 90%~110%的年龄数据视为有效数据, 考虑到年轻的锆石  $^{207}\text{Pb}$  累积较少, 锆石年龄小于 1000 Ma 时使用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄, 大于 1000 Ma 时使用  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄(Gehrels et al., 2006)。样品 YJ-13-2 得到 58 组数据, 样品 YJ-17 得到 48 组数据, 样品 YJ-28 得到 56 组数据, 样品 YJ-31 得到 54 组数据, 样品 YJ-33 得到 57 组数据, 样品 YJ-65 有 43

组数据, 样品 YJ-67 有 48 组数据。在 U-Pb 年龄谐和图中(图 5、6), 几乎所有点都分布在谐和线上或靠近谐和曲线, 表明大部分锆石没有明显的铅丢失, 亦即没有遭受明显的后期热事件改造。

##### 3.2.1 哀牢山断裂带东侧

上志留统( $S_3$ )砂岩样品 YJ-65 共 43 个有效年龄数据, 分布在 449~3189 Ma 之间(表 2), 主要集中在 4 个年龄组, 分别为: 449~473 Ma, 682~1132 Ma, 1405~1464 Ma, 1673~2336 Ma(图 5e, f)。其中有 31 颗锆石年龄分布于 449~1464 Ma 之间, 占总数的 66%。在年龄频谱图上显示出一个主要峰值年龄为 452 Ma, 以及两个次峰年龄分别为 805 Ma 和 876 Ma(图 5f)。

下泥盆统( $D_1$ )两个砂岩样品(YJ-17 和 YJ-13-2)共 106 个有效分析点, 分别给出了 520~2466 Ma 和 518~3114 Ma 变化范围(表 2)。在年龄频谱上, 样品 YJ-17 显示出 3 个比较明显的分布区间(图 5c, d), 分别为: 520~1256 Ma, 1498~1533 Ma, 1802~2466 Ma, 样品 YJ-13-2 则显示出 5 组比较明显的分布区间(图 5a, b), 分别为: 518~817 Ma, 947~1140 Ma, 1284~1473 Ma, 1659~1861 Ma, 2365~2472 Ma。两个样品具有相似的年龄主峰和次峰, 分别为 1014 Ma 和 654 Ma 以及 1034 Ma 和 630 Ma。其中两个样品年龄介于 520~1256 Ma 之间的样品占统计总数的 76%。



图 4 部分碎屑锆石 CL 照片(圆圈和数字代表分析位置和 U-Pb 年龄; 束斑直径为 40  $\mu\text{m}$ )

Fig. 4 CL images of selected detrital zircon grains

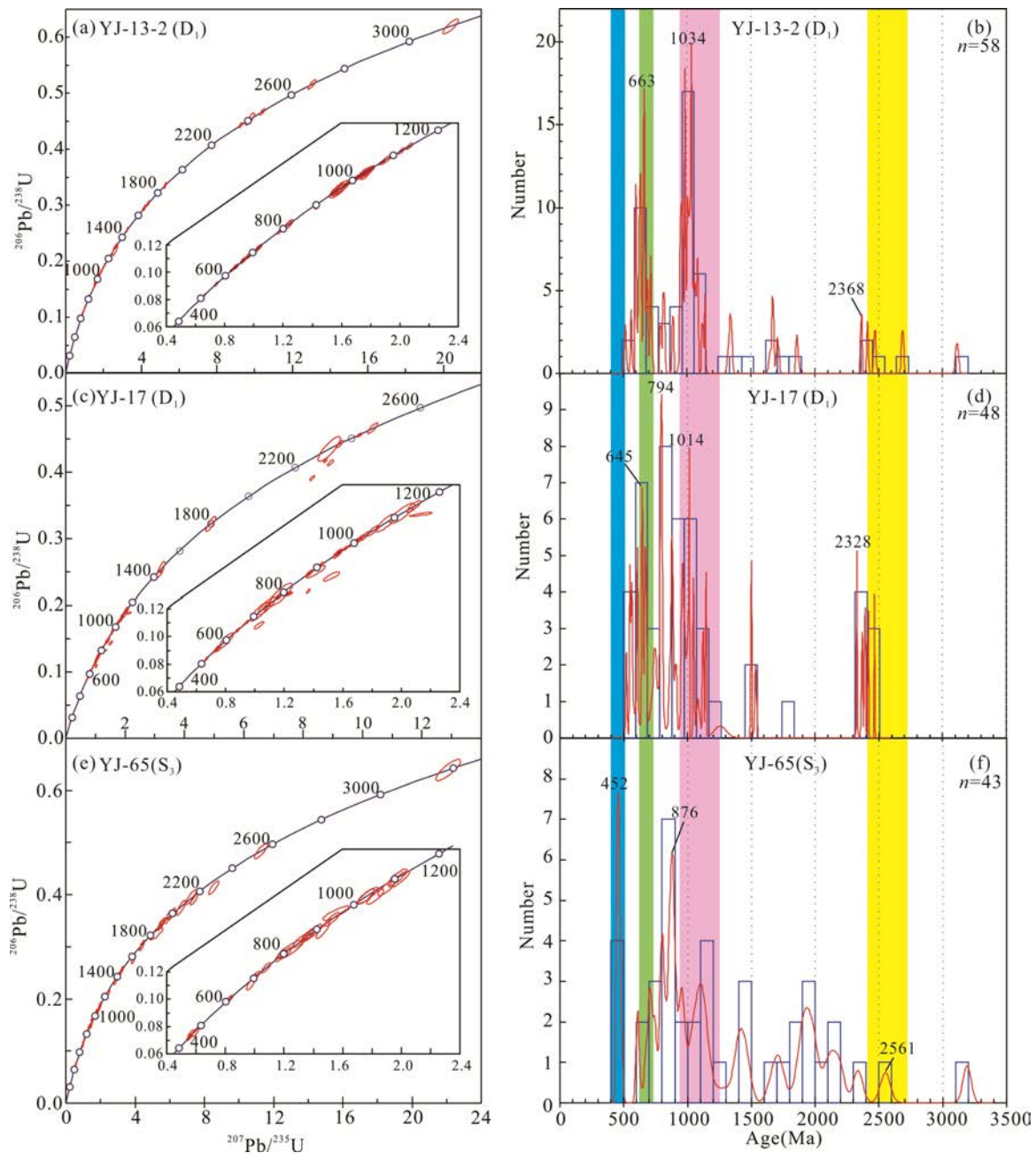


图 5 哀牢山断裂带东侧上志留统-下泥盆统碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图(a, c, e)和年龄频谱图(b, d, f)

Fig.5 U-Pb concordia (a, c, e) and frequency plots (b, d, f) of detrital zircon grains in the Upper Silurian-Lower Devonian strata the east side of the Ailaoshan Fault

### 3.2.2 哀牢山断裂带西侧

中志留统( $S_2$ )砂岩样品 YJ-67 共 48 个有效分析点的年龄结果分布在 420~2736 Ma 之间(表 2), 最年轻的年龄为 420 Ma, 对应地层的沉积时间——中志留世。该样品的年龄主要集中分布在 4 个年龄组: 420~601 Ma, 914~1255 Ma, 1306~1805 Ma, 2131~2518 Ma(图 6g, h); 最高的年龄峰值为 422 Ma, 次要年龄峰值为 982 Ma。年龄分布于 420~1255 Ma 之间的样品占统计总数的 68%。

上志留统( $S_3$ )砂岩样品 YJ-33 所有 57 个分析点的年龄变化于 423~3499 Ma 之间(表 2)。在年龄频谱图上显示出 5 组较明显的分布区间(图 6e, f), 分别为: 423~667 Ma, 772~1407 Ma, 1573~1806 Ma, 2067~2221 Ma, 2400~2528 Ma; 其主要峰值年龄为 447 Ma, 次要年龄峰值为 964 Ma。年龄分布于 423~1407 Ma 之间的样品占统计总数的 80%。

下泥盆统( $D_1$ )砂岩样品 YJ-28 和中泥盆统( $D_2$ )砂岩样品 YJ-31 分别给出了 56 和 54 个有效测年结果,

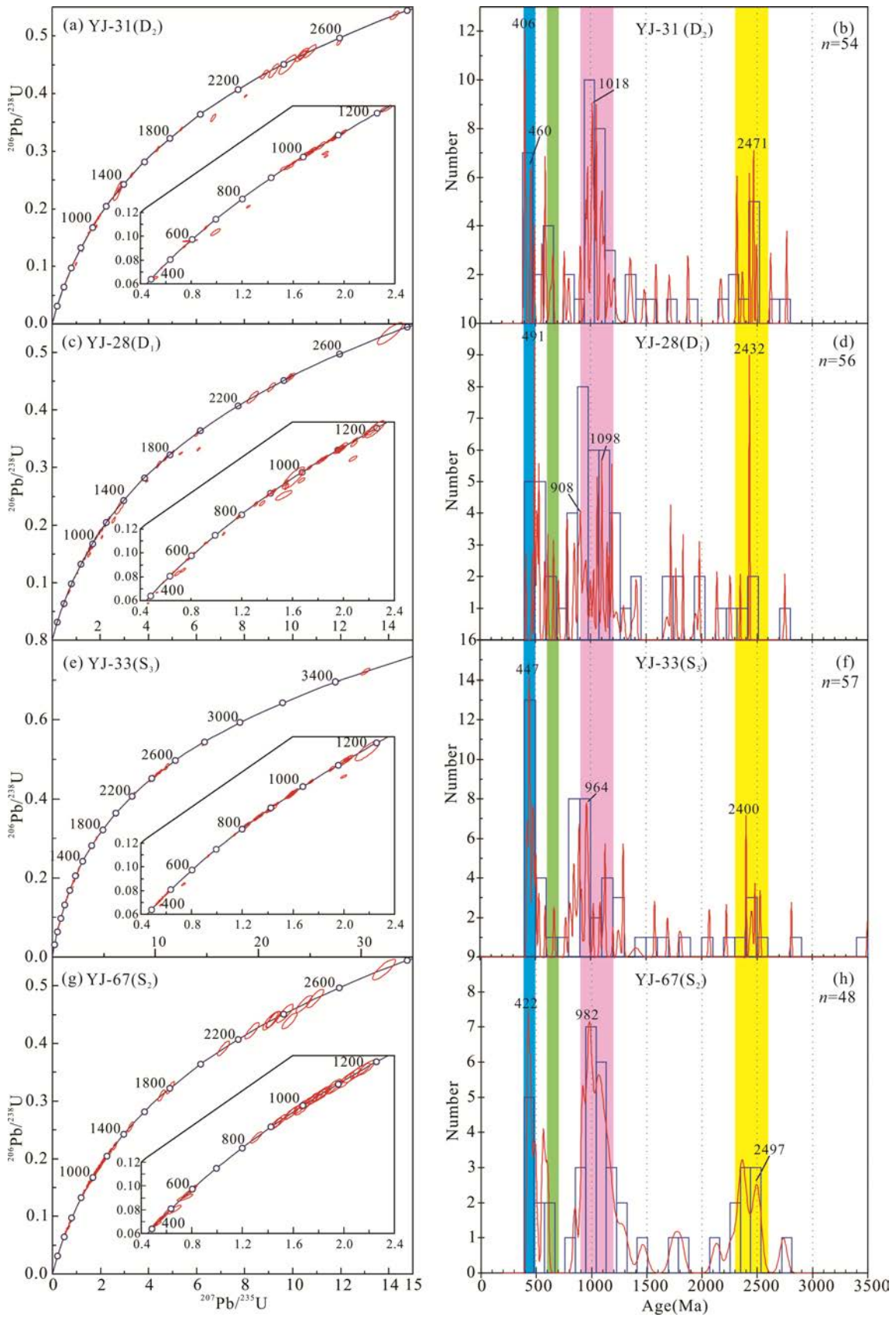


图 6 哀牢山断裂带西侧中志留统-中泥盆统碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图(a, c, e, g)和年龄频谱图(b, d, f, h)

Fig.6 U-Pb concordia diagrams (a, c, e, g) and frequency plots (b, d, f, h) of detrital zircon grains in the Middle Silurian-Middle Devonian stratat the west side of the Ailaoshan Fault



并给出了两个相似的年龄变化范围: 417~2752 Ma 和 402~2768 Ma(表 2)。年龄频谱图上, 两个样品也都显示出相似的 5 组较明显的分布区间(图 6a~d), 前者为: 417~584 Ma, 613~813 Ma, 890~1485 Ma, 1718~1979 Ma, 2259~2752 Ma, 后者为 402~493 Ma, 562~801 Ma, 907~1209 Ma, 1355~2173 Ma, 2317~2768 Ma; 其主要峰值年龄和次峰年龄分别为 491 Ma 和 1098 Ma 以及 406 Ma 和 1018 Ma。两个样品所有分析结果介于 402~1385 Ma 之间的样品占统计总数的 70%。

#### 4 源区分析

哀牢山断裂带两侧上志留统和下泥盆统碎屑锆石 U-Pb 年龄数据的统计显示, 所有样品都给出一个明显对应格林威尔期造山事件(Grenville Orogenic Event: 1300~900 Ma)的峰期年龄群(图 5, 6, 7)。与格林威尔造山事件有关的岩浆作用, 特别是 1100~900 Ma 的岩浆岩, 目前在扬子和华夏地块的周缘地区已经被大量报道。如扬子地块西缘的昆阳群上部黑山头组的凝灰岩中获得了  $995 \pm 15$  Ma 和  $1032 \pm 9$  Ma 锆石 U-Pb 年龄(Greentree et al., 2006; Zhang et al., 2007), 会理群天宝山组中的变质火山岩给出了  $1028 \pm 9$  Ma 锆石 U-Pb 年龄(耿元生等, 2007); 华夏地块的赣东北蛇绿岩及相关的花岗质岩石给出了 968~890 Ma 的峰期年龄(Li et al., 1994, 1997; Li and Li, 2003; Ye et al., 2007; Gao et al., 2009), 云开变质杂岩中变质火成岩给出了 1040~920 Ma 的锆石 U-Pb 原岩形成年龄(覃小峰等, 2006; Zhang et al., 2012a) 以及南岭地区流纹岩和花岗质片麻岩分别给出了  $972 \pm 8$  Ma 的锆石 U-Pb 年龄(Shu et al., 2008)。因此, 扬子地块周缘造山带及华夏地块内与格林威尔期造山事件有关岩浆岩的再循环可能是研究区该期岩浆锆石的重要物源之一。

其次, 不同时代碎屑锆石给出了一个~450 Ma 最年轻的峰值年龄。其中哀牢山两侧上志留统样品都给出了最年轻的~450 Ma 年龄峰, 460~420 Ma 该年龄段锆石均显示近源的棱角状自形晶特征, 表明其具近源沉积的特征, 可能为来自于华南内部的武夷-云开(或广西)陆内造山作用的岩浆锆石。研究显示, 加里东期的岩浆岩特别是 460~400 Ma 的花岗岩大面积出现在华夏地块的武夷-云开造山带或广西造山带(陆松年, 2004; Wan et al., 2007, 2010; Wang et al., 2007, 2011, 2012, 2013; 沈渭洲等, 2008; 张芳容等,

2009; Li et al., 2010; Zhang et al., 2012b; Huang et al., 2013; Zhao et al., 2013; Peng et al., 2015)。此外, 思茅地块西缘大中河地区 421~401 Ma 类似弧的岩浆活动(毛晓长等, 2012)、大平掌地区 429 Ma 的英安岩-流纹岩和老挝 Sang Khom 和 Pak Chom 地区 434~428 Ma 的流纹质凝灰岩(Khositanont et al., 2008; 汝珊珊等, 2012; Lehmann et al., 2013; 聂小松, 2015; Xia et al., 2016), 以及思茅-越西北地区 440~400 Ma 的 Song Chay-老君山花岗岩体(Yan et al., 2006; Guo et al., 2009; Peng et al., 2015), 这些岩浆岩也可能为其提供重要的物源。结合最年轻的峰值年龄为~450 Ma 的特征, 年轻碎屑锆石的物源可能主要来自华南内部加里东期花岗岩的剥蚀。而哀牢山断裂带两侧下泥盆统碎屑沉积记录了迥然不同的最年轻的峰值年龄, 断裂带西侧最年轻的峰值年龄为 400~490 Ma (图 6b, d), 而东侧则显示出略微较老的~670 Ma 年龄峰值(图 5b, d 和 7f), 近似于全球泛非事件(670~500 Ma; Kelsey et al., 2008; Balintoni et al., 2010; Myrow et al., 2010; Burrett et al., 2014), 暗示从下泥盆统开始断裂带两侧物源存在明显差异。西侧基本记录了与志留系相似的年轻年龄段信息, 这些 490~400 Ma 年轻锆石 CL 图像都显示棱角状到半棱角状近源搬运特征(图 4), 而且 Truong Son 地块 Phuoc Son 金矿区最近也发现了 490~400 Ma 锆石(Manaka et al., 2014; Gardner et al., 2017), 所以本文认为哀牢山断裂带西侧下泥盆统的年轻碎屑锆石可能不是源于下伏地层的再循环, 而是来源于思茅-印支板块内部。而东侧出现最年轻的峰值年龄为泛非期事件记录, 考虑到整个华南陆块目前并未发现泛非造山事件岩浆作用的产物, 而在扬子和华夏地块及其周边的下古生界中却有记录(Wang et al., 2010; Xu et al., 2012, 2013, 2014a, 2014b)。因此, 其来源可能是周边块体泛非造山事件产物的再循环。断裂带东侧-扬子西缘下泥盆统的物源也主要以再循环为主。不同于志留系, 华南陆内加里东期岩浆岩不再为扬子西缘提供物源。

除了上述明显的峰值特征, 所有碎屑锆石展示出另一个明显的共同特征, 都记录了次峰 2.6~2.2 Ga 的年龄群信息(图 5, 6, 7), 与该年龄信息相关的岩浆作用目前仅仅在各大陆块的碎屑沉积中有报道(Myrow et al., 2010), 在我国扬子和华夏地块的新元古代和早古生代地层的碎屑锆石中也同样记录有该年龄群的信息(于津海等, 2006, 2007, 2009; Wang et al., 2010; Xu et al., 2013)。因此, 该年龄段的碎屑锆石很可能是

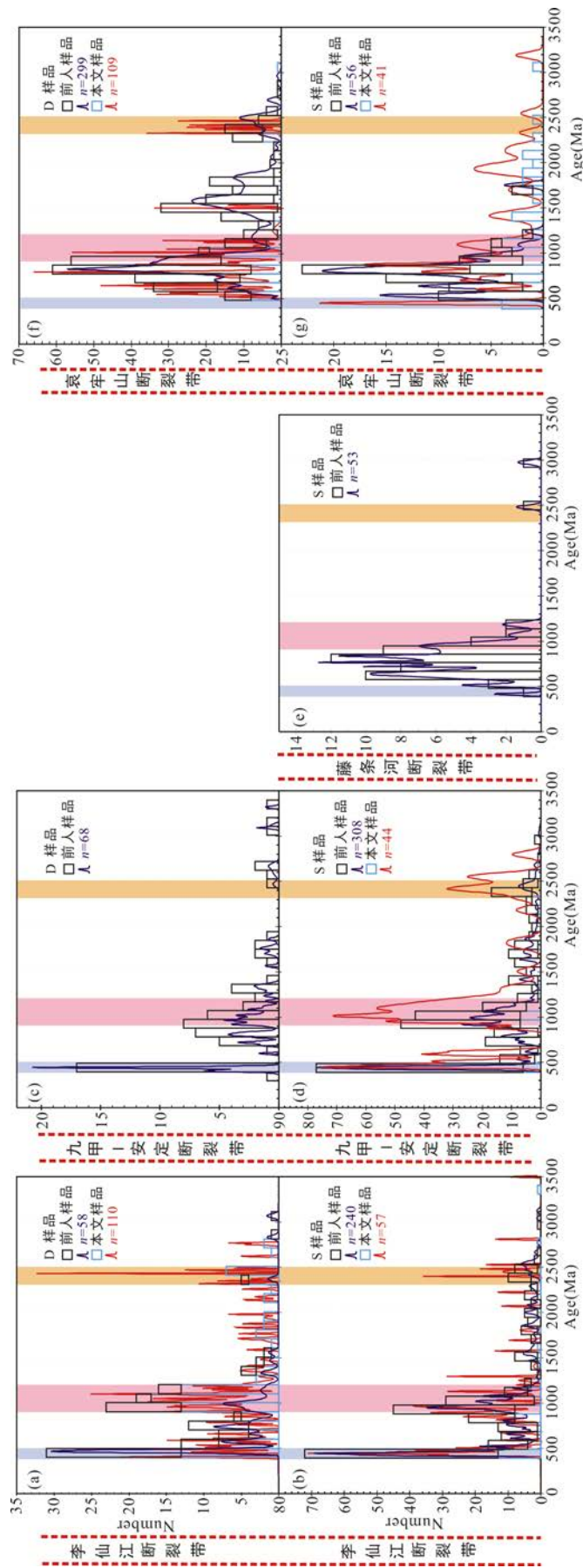


图 7 哀牢山构造带及其两侧碎屑锆石年龄频谱对比图(部分数据来源于 Lai, 2012; Burrett et al., 2014; Xia et al., 2016)  
 Fig.7 Age distribution patterns of detrital zircon grains

周边古老地层再循环的产物。此外,一些新元古代(900~700 Ma)的年龄信息也同样记录在所有样品中,特别是扬子西缘的样品出现明显的峰值(图 6、7)。扬子南缘的江南造山带(王丽娟等, 2008; 柏道远等, 2011; Zhao, 2015)和西缘的攀西-汉南弧(Zhou et al., 2002; Duan et al., 2011, 2012)有大量该时期的岩浆岩报道,特别是中酸性岩石。事实上,哀牢山断裂带内目前也揭示出大量该时期的岩浆岩(Cai et al., 2014, 2015; Wang et al., 2016)。因此,这些碎屑锆石可能记录的是扬子周缘新元古代岩浆事件。

此外,哀牢山断裂带两侧上志留统的碎屑锆石均记录有极少量古太古代(>3.2 Ga)的年龄信息,如东侧样品 YJ-65 最老的年龄为~3.2 Ga,西侧样品 YJ-33 最老的年龄则达到~3.5 Ga(图 5、6)。这些锆石的外部结构显示出较好的经过长距离搬运的磨圆(图 4),至少暗示并非是研究区近源剥蚀的结果。事实上,已有研究显示,在扬子地块北缘大量揭露了古太古代的岩浆事件,如崆岭地区>3.2 Ga 的 TTG 片麻岩(Gao et al., 1999, 2011; Qiu et al., 2000)。此外,少量新太古代~2.6 Ga 的年龄信息也被揭露出来(表 2、图 6),这些锆石外部结构特征也显示其很可能经历了一次或多次搬运和再循环过程,至少说明并非是研究区基底岩石的剥蚀产物。实际上,如此的岩浆作用信息最近在扬子地块北缘地区已经有报道,如胡集地区~2.6 Ga 花岗质岩石(Wang et al., 2013; Zhou et al., 2015)。因此,扬子北缘太古宙岩浆岩的剥蚀有可能为哀牢山断裂带两侧上志留统-下泥盆统的太古宙碎屑锆石提供物源。

## 5 哀牢山洋盆的打开时限

关于哀牢山洋盆的属性及其打开时限目前还存在不同的认识,一些研究者认为哀牢山洋是由昌宁-孟连-清迈古特提斯主洋盆北向俯冲引起的弧后裂谷盆地,存在于石炭纪-二叠纪(Wang et al., 2000; Metcalfe, 2006, 2013; Pan et al., 2012);也有研究者认为哀牢山洋是一个大西洋型的古特提斯分支洋盆,它经历了志留纪的大陆裂谷,晚泥盆世-早石炭世的洋底扩张以及二叠纪俯冲消减作用(Jian et al., 2009a, 2009b; Lai et al., 2012, 2014a, 2004b)。还有部分研究者认为哀牢山断裂带及扬子西缘的古生界沉积形成于扬子板块的被动大陆边缘(云南省地质矿产局, 1990; 钟大赉, 1998; Wang et al., 2000)。

对哀牢山断裂带及其两侧上志留统-下泥盆统

碎屑锆石有效的 U-Pb 年代学数据统计发现,哀牢山构造带及其两侧志留系都记录了 400~500 Ma 的年龄峰值群信息。虽然构造带东侧扬子西缘的研究样品较少,但是,在紧邻扬子西缘的地区也普遍记录了该期岩浆事件,如龙门山(~442 Ma; Chen et al., 2016)、贵州道真(Gu et al., 2013)、广西玉林(~446 Ma)和湖南洞口县(431 Ma 和 440 Ma)(Yao et al., 2015)。构造带及其两侧上志留统样品相同的年龄分布模式,暗示在晚志留世思茅-印支地块和扬子地块西缘具有相同的物源,二者之间并未有阻断物质交换的深水盆地出现。相反,哀牢山断裂带两侧下泥盆统的碎屑锆石则展示出不同的年龄频谱特征,如东侧下泥盆统的碎屑锆石明显缺失 400~500 Ma 年轻峰值年龄信息(图 7f),说明早泥盆世开始哀牢山断裂带两侧的物源存在差异。事实上,结合区域上已发表的碎屑锆石年代学数据(图 7),亦可发现相似的特征,即哀牢山断裂带西侧中-下泥盆统碎屑锆石具有明显相似的年龄频谱特征,特别是都具有一个年轻的 400~470 Ma 年龄群组,而哀牢山断裂带东侧下泥盆统碎屑锆石缺失年轻的 400~500 Ma 年龄群组。哀牢山断裂带两侧上志留统-下泥盆统沉积碎屑物源的差别可能暗示早泥盆世哀牢山断裂带存在一个深水盆地,导致盆地两侧早泥盆世沉积物源存在明显差异。

事实上,最近聂小松(2015)和 Xia et al. (2016)也针对哀牢山构造带不同地区下古生界顶部-上古生界底部的碎屑锆石进行了系统研究,他们基于扬子西缘与哀牢山断裂带西侧志留系-泥盆系碎屑锆石年龄频谱都存在不同的峰值特征,特别是哀牢山断裂带西侧出现了东侧不具有的年轻的~450 Ma 峰值,认为洋盆最晚打开于早志留世。而我们本次的研究进一步揭示,事实上哀牢山断裂带东侧-扬子地块西缘的上志留统碎屑锆石也出现了与断裂带西侧相似的年轻的年龄峰值(~450 Ma; 图 7b, g)。综合对比整个哀牢山构造带及其两侧志留系和泥盆系的沉积特征发现,构造带略北的两侧地层明显存在相似的沉积特征,如墨江幅和建水幅 1:200000 地质图显示两个地区同样存在中上志留统-下泥盆统连续沉积,而且志留系沉积岩相学特征上也非常相似,具有较深水陆缘碎屑沉积组合,其综合的年龄频谱特征也展示非常相似的峰值特征,暗示它们具有相同沉积环境和沉积物源。很显然,我们新的研究结果并不支持早志留世已经形成宽阔的哀牢山洋盆(聂小松, 2015; Xia et al., 2016)。尤为重要的是,近年来在金沙江-哀牢山断裂带内的潘家寨和书宋地区分

别发现了一些与大陆裂谷有关, 年龄为 439~403 Ma 火山碎屑岩和角闪岩(Jian et al., 2009a, 2009b; Lai et al., 2014a), 表明大陆裂谷作用发生在晚志留世-早泥盆世。而 Lai et al. (2014a)在双沟地区蛇绿岩带中的斜长花岗岩中(锆石 U-Pb 年龄为 364 Ma)发现了几颗  $405 \pm 6.6$  Ma 继承锆石, 则进一步表明哀牢山构造带早泥盆世晚期已经存在一个开阔的大洋。因此, 哀牢山洋盆的打开时限应该限定在晚志留世-早泥盆世。

## 6 缝合带的位置

哀牢山构造带由于受到多期强烈变形变质作用的影响, 特别是新生代多期次强烈的构造-变质变形事件的改造, 致使早期的构造-岩浆-沉积记录发生强烈的挤压、变形和位错, 对于哀牢山构造带内古特提斯洋闭合形成的缝合带位置也一直存在争议(图 1、2)。一些研究者基于哀牢山断裂为一深大断裂且两侧的岩浆、地层、构造作用存在明显的差别, 认为哀牢山断裂是古生代洋盆的缝合带(Leloup et al., 1995; Metcalfe, 2002); 部分学者考虑到哀牢山断裂带以西的金平-沱江地区有~260 Ma 的峨眉山玄武岩出露, 将缝合带的位置定位于哀牢山断裂以西约 100 km 的李仙江断裂(Chung et al., 1997; Xiao et al., 2003; Wang et al., 2007)。此外, 也有人基于九甲-安定断裂的北部与哀牢山洋残片的蛇绿岩带重合, 将九甲-安定断裂定义为缝合带的位置(云南省地质矿产局, 1990; 沈上越等, 1998; Jian et al., 2009a, 2009b; Wang et al., 2014)。最近, 聂小松(2015)和 Xia et al. (2016)通过对哀牢山构造带志留系-泥盆系碎屑锆石年龄频谱特征和碎屑电气石 B 同位素的研究, 认为哀牢山-藤条河断裂是哀牢山古特提斯洋缝合带的位置。

目前在哀牢山-藤条河以西地区识别出更多与峨眉山地幔柱同时期的岩浆岩, 如绿春仰宗流纹斑岩岩体及侵入其中的岩脉(赵德军等, 2013)和墨江扭只二长花岗斑岩岩体(孙崇波等, 2016)的锆石 U-Pb 定年分别给出了  $263.1 \pm 2.3$  Ma,  $260.0 \pm 1.7$  Ma 和  $263.5 \pm 1.7$  Ma, 且地球化学上显示碰撞/碰撞后型岩浆岩的特征。因此, 如果这些岩浆岩的产生与峨眉山地幔柱有关, 说明地幔柱作用的范围波及到藤条河以西的思茅地块东缘古特提斯洋区域, 也就暗示哀牢山洋盆在中二叠世晚期已经闭合。即使这些酸性岩浆岩不代表地幔柱的产物, 碰撞型岩浆岩的出

现也同样暗示哀牢山洋盆在其南部已经闭合。故中二叠世晚期, 峨眉山地幔柱作用导致扬子西缘大规模的玄武岩喷发事件(Xiao et al., 2003), 也有可能跨过哀牢山洋(即缝合带)影响到金平地区。这可能与世界上其他地区证实的地幔柱与造山相互作用例子相似(Macera et al., 2008)。因此, 仅凭与峨眉山地幔柱有关的玄武岩出现在哀牢山断裂带以西的金平-沱江地区无法有效约束缝合带的位置。此外, 考虑到区域岩石地层构造-变质变形特征, 即九甲-安定断裂与哀牢山断裂间由构造混杂岩和古生代浅变质岩组成, 而以西地区岩石地层几乎未变质(胡云中等, 1995; 阙梅英等, 1998); 九甲-安定断裂作为一条逆冲(由东向西推覆)深大断裂, 逆冲作用一直持续到燕山晚期-喜山期, 断裂上盘蛇绿混杂岩带称为外来岩系, 而下盘晚三叠世歪古村山前拗陷磨拉石建造为原地岩系(刘英俊等, 1984)。以上这些特征均表明, 九甲-安定断裂作为缝合带的位置显然不合适。至于前人把藤条河断裂作为缝合带的位置, 其主要证据来自于断裂两侧志留系碎屑锆石的年龄频谱的差别, 即断裂东侧志留系碎屑锆石缺乏断裂西侧志留系碎屑锆石记录的最年轻的~450 Ma 的年龄峰值信息(聂小松, 2015; Xia et al., 2016)。而我们进一步的研究显示, 哀牢山断裂东侧上志留统碎屑锆石也同样记录了~450 Ma 峰值年龄信息, 具有与西侧志留系一致的年龄信息(图 5~7), 与聂小松(2015)和 Xia et al. (2016)的结论不一致。结合缝合带双变质带产出于哀牢山断裂两侧的特征, 即东侧以红柱石-堇青石及蓝晶石-十字石-石榴石典型矿物组合的高中温-低中压变质带, 西侧则是以蓝闪石-黑硬绿泥石为典型矿物组合的低中温-高中压变质带(段新华和赵鸿, 1981)。很明显, 哀牢山断裂应该是缝合带的位置所在。

## 7 结 论

(1) 志留系-泥盆系碎屑锆石 U-Pb 年龄频谱图显示, 哀牢山断裂带东西两侧上志留统和下泥盆统碎屑锆石具有基本相似的峰值特征, 如两个明显的格林威尔造山事件或 Rodinia 超大陆拼合(2600~2500 Ma)和裂解事件(1200~750 Ma)的岩浆峰值年龄。其中构造带及其两侧上志留统都记录了最年轻的华南陆内武夷-云开或广西造山作用的 460~400 Ma 年龄群信息, 而从下泥盆统开始, 断裂带东侧并未出现类似上志留统的年轻的年龄群信息, 而西侧依然记录有相同

的年轻峰值年龄。志留系-泥盆系的沉积主要以近源搬运和再循环为主。

(2) 哀牢山构造带及其两侧上志留统-下泥盆统碎屑锆石年龄频谱特征的变化, 暗示晚志留世-早泥盆世两侧地层沉积物源发生了明显变化, 揭示了哀牢山古特提斯洋盆的打开时限为晚志留世-早泥盆世。

(3) 哀牢山深大断裂的位置应该是哀牢山古特提斯洋缝合带的位置。

致谢: 毛永生硕士在野外考察和样品收集期间给予了帮助, 中国地质大学(武汉)杜远生教授和另一位匿名审稿人认真审阅了本文并提出了宝贵的意见, 在此一并表示衷心的感谢!

#### 参考文献(References):

柏道远, 贾宝华, 钟响, 贾朋远, 刘耀荣, 马铁球. 2011. 雪峰造山带新元古代构造演化框架. 沉积与特提斯地质, 31(3): 78-87.

董云鹏, 朱炳泉, 常向阳, 邓尚贤. 2000. 哀牢山缝合带中两类火山岩地球化学特征及其构造意义. 地球化学, 29(01): 6-13.

段新华, 赵鸿. 1981. 论哀牢山-藤条河断裂——古板块俯冲带. 地质学报, (4): 258-267.

方维萱, 胡瑞忠, 谢桂青, 苏文超. 2002. 云南哀牢山地区构造岩石地层单元及其构造演化. 大地构造与成矿学, 26(1): 28-36.

耿元生, 杨崇辉, 杜利林, 王新社, 任留东, 周喜文. 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. 地质论评, 53(4): 556-563.

胡云中, 唐尚鹤, 王海平, 邓坚. 1995. 哀牢山金矿地质. 北京: 地质出版社: 1-278.

季建清. 1998. 腾冲地块西缘岛弧地体中发现洋壳残片. 地学前缘, 5(3): 50.

刘翠, 邓晋福, 刘俊来, 石耀霖. 2011. 哀牢山构造岩浆带晚二叠世-早三叠世火山岩特征及其构造环境. 岩石学报, 27(12): 3590-3602.

刘汇川, 王岳军, 蔡永丰, 马莉燕, 邢晓婉, 范蔚茗. 2013. 哀牢山构造带新安寨晚二叠世末期过铝质花岗岩锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成研究. 大地构造与成矿学, 37(1): 87-98.

刘汇川, 王岳军, 范蔚茗, Zi J W, 蔡永丰, 杨光林. 2014. 滇西哀牢山地区晚三叠世高  $\epsilon_{(Nd)}(t)$ - $\epsilon_{(Hf)}(t)$  花岗岩的构造指示. 中国科学: 地球科学, 44(11): 2373-2388.

刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1984. 元素地球化学. 北京: 科学出版社: 1-548.

刘增乾. 1993. 三江地区构造岩浆带的划分与矿产分布规律. 北京: 地质出版社: 1-243.

陆松年. 2004. 初论“泛华夏造山作用”与加里东和泛非造山作用的对比. 地质通报, 23(9-10): 952-958.

毛晓长, 王立全, 李冰, 王保弟, 王冬兵, 尹福光, 孙志明. 2012. 云县-景谷火山弧带大中河晚志留世火山岩的发现及其地质意义. 岩石学报, 28(5): 1517-1528.

聂小松. 2015. 哀牢山构造带及邻区古生代碎屑沉积物源示踪及其大地构造意义. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所硕士学位论文: 1-51.

聂小松, 夏小平, 张乐, 任钟元, 李玲. 2015. 碎屑电气石的 LA-MC-ICPMS 硼同位素原位微区分析及其源区示踪: 以哀牢山构造带为例. 地球化学, 44(5): 438-449.

阙梅英, 程敦模, 张立生, 夏文杰, 朱创业. 1998. 兰坪思茅盆地铜矿床. 北京: 地质出版社: 1-27.

覃小锋, 潘元明, 李江, 李容森, 周府生, 胡贵昂, 钟锋运. 2006. 桂东南云开地区变质杂岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学. 地质通报, 25(5): 553-559.

汝珊珊, 李峰, 吴静, 李进宝, 汪德文, 黄应才. 2012. 云南大平掌铜多金属矿区花岗闪长斑岩地球化学特征及年代学研究. 岩石矿物学杂志, 31(4): 531-540.

沈上越, 魏启荣, 程蕙兰, 莫宣学. 1998. “三江”哀牢山带蛇绿岩特征研究. 岩石矿物学杂志, 17(1): 1-8.

沈上越, 魏启荣, 程蕙兰, 莫宣学. 2000. 云南哀牢山带两类硅质岩特征. 科学通报, 45(9): 988-992.

沈上越, 魏启荣, 程蕙兰, 莫宣学. 2001. “三江”地区哀牢山带两类硅质岩特征及大地构造意义. 岩石矿物学杂志, 20(1): 42-46.

沈渭洲, 张芳荣, 舒良树, 王丽娟, 向磊. 2008. 江西宁冈岩体的形成时代、地球化学特征及其构造意义. 岩石学报, 24(10): 2244-2254.

孙崇波, 李忠权, 王道永, 许远平, 李友余. 2016. 哀牢山构造带南段扭只二长花岗斑岩地球化学特征及其锆石 U-Pb 年代学研究. 中国地质, 43(1): 111-119.

孙硕. 2013. 滇西兰坪盆地东缘晚古生代海平面变化和沉积演化. 北京: 中国地质大学硕士学位论文: 1-87.

孙晓猛, 简平. 2004. 滇川西部金沙江古特提斯洋的威尔逊旋回. 地质论评, 50(4): 343-350.

孙晓猛, 聂泽同, 梁定益. 1995. 滇西北金沙江带硅质岩沉积环境的确定及大地构造意义. 地质论评, 41(2): 175-178.

王冬兵, 唐渊, 廖世勇, 尹福光, 孙志明, 王立全, 王保

- 弟. 2013. 滇西哀牢山变质岩系锆石U-Pb定年及其地质意义. *岩石学报*, 29(4): 1261-1278.
- 王丽娟, 于津海, O'Reilly S Y, Griffin W L, 孙涛, 魏震洋, 舒良树, 蒋少涌. 2008. 华夏南部可能存在Grenville期造山作用: 来自基底变质岩中锆石U-Pb定年及Lu-Hf同位素信息. *科学通报*, 53(14): 1680-1692.
- 王义昭, 丁俊. 1996. 云南哀牢山中深变质岩系构造变形特征及演变. *特提斯地质*, (20): 52-69.
- 魏启荣, 沈上越, 莫宣学. 1998. 哀牢山硅质岩特征及其意义. *地质科技情报*, 17(2): 29-34.
- 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. *科学通报*, 49(16): 1589-1595.
- 谢桂青, 苏文超. 2002. 云南哀牢山地区构造岩石地层单元及其构造演化. *大地构造与成矿学*, 26(1): 28-36.
- 于津海, O'Reilly S Y, 王丽娟, Griffin W L, 蒋少涌, 王汝成, 徐夕生. 2007. 华夏地块古老物质的发现和前寒武纪地壳的形成. *科学通报*, 52(1): 11-18.
- 于津海, 王丽娟, O'Reilly S Y, 舒良树, 孙涛. 2009. 赣南存在古元古代基底: 来自上犹陡水煌斑岩中捕虏锆石的U-Pb-Hf同位素证据. *科学通报*, 54(7): 898-905.
- 于津海, 王丽娟, 周新民, 蒋少涌, 王汝成, 徐夕生, 邱检生. 2006. 粤东北基底变质岩的组成和形成时代. *地球科学*, 31(1): 38-48.
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志. 北京: 地质出版社: 1-658.
- 翟明国, 从柏林. 1996. 苏鲁-大别山变质带岩石大地构造学. *中国科学(D辑)*, 26(3): 258-264.
- 张芳荣, 舒良树, 王德滋, 于津海, 沈渭洲. 2009. 华南东段加里东期花岗岩类形成构造背景探讨. *地学前缘*, 16(1): 248-260.
- 张进江, 钟大赉, 桑海清, 周勇. 2006. 哀牢山-红河构造带古新世以来多期活动的构造、年代学证据. *地质科学*, 41(2): 278.
- 张少兵, 郑永飞. 2007. 扬子陆核的生长和再造: 锆石U-Pb年龄和Hf同位素研究. *岩石学报*, 23(2): 393-402.
- 赵德军, 陈洪德, 邓江红, 王道永. 2013. 哀牢山造山带南段仰宗岩体地球化学特征及其构造环境. *矿物岩石*, 33(1): 60-68.
- 钟大赉. 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社: 1-231.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192(1): 59-79.
- Balintoni I, Balica C, Ducea M N, Zaharial L, Chen F K, Cliveti M, Hann H P, Li L Q and Ghergari L. 2010. Late Cambrian-Ordovician northeastern Gondwanan terranes in the basement of the Apuseni Mountains, Romania. *Journal of the Geological Society*, 167(6): 1131-1145.
- Bruguier O, Lancelot J R and Malavieille J. 1997. U-Pb dating on single detrital zircon grains from the Triassic Songpan-Ganze flysch (Central China): Provenance and tectonic correlations. *Earth and Planetary Science Letters*, 152(1): 217-231.
- Burrett C, Zaw K, Meffre S, Lai C K, Khositanont S, Chaodumrong P, Udchachone M, Ekins S and Halpin J. 2014. The configuration of Greater Gondwana-evidence from LA-ICP-MS, U-Pb geochronology of detrital zircons from the Palaeozoic and Mesozoic of Southeast Asia and China. *Gondwana Research*, 26(1): 31-51.
- Cai F L, Ding L, Yao W, Laskowski A K, Xu Q, Zhang J E and Sein K. 2015. Provenance and tectonic evolution of Lower Paleozoic-Upper Mesozoic strata from Sibumasu terrane, Myanmar. *Gondwana Research*, 41: 325-336.
- Cai Y F, Wang Y J, Cawood P A, Fan W M, Liu H C, Xing X W and Zhang Y Z. 2014. Neoproterozoic subduction along the Ailaoshan zone, South China: Geochronological and geochemical evidence from amphibolite. *Precambrian Research*, 245: 13-28.
- Cai Y F, Wang Y J, Cawood P A, Zhang Y Z and Zhang A M. 2015. Neoproterozoic crustal growth of the Southern Yangtze Block: Geochemical and zircon U-Pb geochronological and Lu-Hf isotopic evidence of Neoproterozoic diorite from the Ailaoshan zone. *Precambrian Research*, 266: 137-149.
- Cawood P A and Buchan C. 2007. Linking accretionary orogenesis with supercontinent assembly. *Earth-Science Reviews*, 82(3): 217-256.
- Cawood P A, Hawkesworth C J and Dhuime B. 2012. Detrital zircon record and tectonic setting. *Geology*, 40(10): 875-878.
- Cawood P A and Nemchin A A. 2000. Provenance record of a rift basin: U/Pb ages of detrital zircons from the Perth Basin, Western Australia. *Sedimentary Geology*, 134(3): 209-234.
- Chen Q, Sun M, Long X P, Zhao G C and Yuan C. 2016. U-Pb ages and Hf isotopic record of zircons from the late Neoproterozoic and Silurian-Devonian sedimentary rocks of the western Yangtze Block: Implications for its tectonic evolution and continental affinity.

- Gondwana Research*, 31: 184–199.
- Chung S L, Lee T Y, Lo C H, Wang P L, Chen C Y, Yem N T, Hoa T T and Wu G Y. 1997. Intraplate extension prior to continental extrusion along the Ailao Shan–Red River shear zone. *Geology*, 25(4): 311–314.
- DeCelles P G, Gehrels G E, Quade J, LaReau B and Spurlin M. 2000. Tectonic implications of U-Pb zircon ages of the Himalayan orogenic belt in Nepal. *Science*, 288: 497–499.
- Deng J, Hou Z Q and Mo X X. 2013. Morphology characteristics and chemistry composition of pyrite of Laowangzhai gold deposit in the Ailaoshan orogenic belt, SW China. *Canadian Mineralogist*, 31: 1–17.
- Duan L, Meng Q R, Wu G L, Ma S X and Li L. 2012. Detrital zircon evidence for the linkage of the South China block with Gondwanaland in early Palaeozoic time. *Geological Magazine*, 149(6): 1124–1131.
- Duan L, Meng Q R, Zhang L C and Liu X M. 2011. Tracing the position of the South China block in Gondwana: U-Pb ages and Hf isotopes of Devonian detrital zircons. *Gondwana Research*, 19: 141–149.
- Fan W M, Wang Y J, Zhang A M, Zhang F F and Zhang Y Z. 2010. Permian arc-back-arc basin development along the Ailaoshan tectonic zone: Geochemical, isotopic and geo-chronological evidence from the Mojiang volcanic rocks, Southwest China. *Lithos*, 119(3–4): 553–568.
- Feng Q L and Ye M. 1996. Radiolarian stratigraphy of Devonian through Middle Triassic in southwestern Yunnan // Long X. Devonian to Triassic Tethys in Western Yunnan, China. Wuhan: China University of Geosciences Press: 15–22.
- Gao J, Klemd R, Long L L, Xiong X M and Qian Q. 2009. Adakitic signature formed by fractional crystallization: An interpretation for the Neoproterozoic meta-plagiogranites of the NE Jiangxi ophiolitic mélangé belt, South China. *Lithos*, 110: 277–293.
- Gao S, Ling W L, Qiu Y M, Zhou L, Hartmann G and Simon K. 1999. Contrasting geo-chemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(13): 2071–2088.
- Gao S, Yang J, Zhou L, Li M, Hu Z C, Guo J L, Yuan H L, Gong H J, Xiao G Q and Wei J Q. 2011. Age and growth of the Archean Kongling terrain, South China, with emphasis on 3.3 Ga granitoid gneisses. *American Journal of Science*, 311(2): 153–182.
- Gehrels G E, Valencia V and Pullen A. 2006. Detrital zircon geochronology by laserablation multicollector ICPMS at the Arizona Laser-Chron Center // Olszewski T and Huff W. Geochronology: Emerging Opportunities: Philadelphia, Pennsylvania, Paleontological Society Short Course: 1–10.
- Greentree M R, Li Z X, Li X H and Wu H. 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: 79–100.
- Gu J, Huang Z L, Fan H P, Lin Y and Jin Z G. 2013. Provenance of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan–Zheng’an–Daozhen area, Northern Guizhou Province, China: LA-ICP-MS and SIMS U-Pb dating of detrital zircons. *Journal of Asian Earth Sciences*, 70: 265–282.
- Guo L G, Liu Y P, Li C Y, Xu W and Ye L. 2009. SHRIMP zircon U-Pb geochronology and lithogeochemistry of Caledonian Granites from the Laojunshan area, southeastern Yunnan province, China: Implications for the collision between the Yangtze and Cathaysia blocks. *Geochemical Journal*, 43: 101–122.
- Hoskin P W O and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27–62.
- Huang X L, Yu Y, Li J, Tong L X and Chen L L. 2013. Geochronology and petrogenesis of the early Paleozoic I-type granite in the Taishan area, South China: Middle-lower crustal melting during orogenic collapse. *Lithos*, 177: 268–284.
- Jian P, Liu D Y, Kröner A, Zhang Q, Wang Y Z, Sun X M and Zhang W. 2009a. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (I): Geochemistry of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks. *Lithos*, 113: 748–766.
- Jian P, Liu D Y, Kröner A, Zhang Q, Wang Y Z, Sun X M and Zhang W. 2009b. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (II): Insights from zircon ages of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks and generation of the Emeishan CFB province.

- Lithos*, 113: 767–784.
- Kelsey D, Wade B, Collins M, Hand C, Sealing C and Netting A. 2008. Discovery of a Neoproterozoic basin in the Prydz belt in East Antarctica and its implications for Gondwana assembly and ultrahigh temperature metamorphism. *Precambrian Research*, 161: 355–388.
- Khositanont S, Panjasawatwong Y, Ounchanum P, Thanasuthipitak T, Zaw K and Meffre S. 2008. Petrochemistry and zircon age determination of Loei–Phetchabun volcanic rocks // Proceedings of the International Symposia on Geoscience Resources and Environments of Asian Terranes (GREAT), 4th IGCP. 516: 272–278.
- Lai C K. 2012. Tectonic evolution of the Ailaoshan Fold Belt in SW Yunnan, China. ARC Centre of Excellence in Ore Deposits (CODES). Hobart: University of Tasmania: 1–244.
- Lai C K, Meffre S, Crawford A J, Zaw K, Xue C D and Halpin J A. 2014b. The Western Ailaoshan Volcanic Belts and their SE Asia connection: A new tectonic model for the Eastern Indochina Block. *Gondwana Research*, 26: 52–74.
- Lai C K, Meffre S, Crawford A J, Zaw K, Xue C D, Halpin J A and Salam A. 2014a. The Central Ailaoshan ophiolite and modern analogs. *Gondwana Research*, 26: 75–88.
- Lehmann B, Zhao X F, Zhou M F, Du A D, Mao J W, Zeng P S, Henjes-Kunst F and Hepe K. 2013. Mid-Silurian back-arc spreading at the northeastern margin of Gondwana: The Dapingzhang dacite-hosted massive sulfide deposit, Lancangjiang zone, southwestern Yunnan, China. *Gondwana Research*, 24: 648–663.
- Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, Schärer U, Zhong D, Liu X, Zhang L, Ji S and Trinh P T. 1995. The Ailaoshan–Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 251: 3–84.
- Li X H. 1997. Timing of the Cathaysia Block formation: Constraints from SHRIMP U–Pb zircon geochronology. *Episodes*, 20: 188–192.
- Li X H, Li Z X, Ge W C, Zhou H W, Li W X, Liu Y and Wingate M T D. 2003. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca.825 Ma? *Precambrian Research*, 122: 45–83.
- Li X H, Zhou G Q, Zhao J X, Fanning C M and Compston W. 1994. SHRIMP ion microprobe zircon U–Pb age and Sm–Nd isotopic characteristics of the NE Jiangxi ophiolite and its tectonic implications. *Chinese Journal of Geochemistry*, 13: 317–325.
- Li Z X, Li X H, Wartho J A, Clark C, Li W X, Zhang C L and Bao C M. 2010. Magmatic and metamorphic events during the early Paleozoic Wuyi–Yunkai orogeny, southeastern South China: New age constraints and pressure-temperature conditions. *Geological Society of America Bulletin*, 122(5–6): 772–793.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Gunther D, Xu J, Gao C G and Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of an hydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43.
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Centre Special Publication, 4: 74.
- Metcalfe I. 2002. Permian tectonic framework and palaeogeography of SE Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20: 551–566.
- Metcalfe I. 2006. Palaeozoic and Mesozoic tectonic evolution and palaeogeography of East Asian crustal fragments: The Korean Peninsula in context. *Gondwana Research*, 9: 24–46.
- Metcalfe I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1–33.
- Molnar P and Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. *Science*, 189(4201): 419–426.
- Myrow P M, Hughes N C, Goodge J W, Fanning C M, Williams I S, Peng S and Pogue K R. 2010. Extraordinary transport and mixing of sediment across Himalayan central Gondwana during the Cambrian–Ordovician. *Geological Society of America Bulletin*, 122(9–10): 1660–1670.
- Pan G T, Wang L Q, Li R S, Yuan S H, Ji W H, Yin F G, Zhang W P and Wang B D. 2012. Tectonic evolution of the Qinghai–Tibet Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3–14.
- Peng T P, Fan W M, Zhao G C, Peng B X, Xia X P and Mao Y S. 2015. Petrogenesis of the early Paleozoic strongly peraluminous granites in the Western South China Block and its tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 98: 399–420.
- Qiu Y M, Gao S, McNaughton N J, Groves D I and Ling W. 2000. First evidence of >3.2 Ga continental crust in the



- Yangtze craton of south China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics. *Geology*, 28: 11–14.
- Rainbird R H, Heaman L M and Young G. 1992. Sampling Laurentia: Detrital zircon geochronology offers evidence for an extensive Neoproterozoic river system originating from the Grenville orogen. *Geology*, 20: 351–354.
- Schärer U, Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, Zhong D L and Ji S C. 1990. Intraplate tectonics in Asia: A precise age for large-scale Miocene movement along the Ailao Shan–Red River shear zone, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 97(1–2): 65–77.
- Shu L S, Deng P, Yu J H, Wang Y B and Jiang S Y. 2008. The age and tectonic environment of the rhyolitic rocks on the western side of Wuyi Mountain, South China. *Science China: Earth Sciences*, 51(8): 1053–1063.
- Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, Schärer U, Zhong D L, Wu H W, Liu X H, Ji S C, Zhang L S and Zhong J Y. 1990. The Ailaoshan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China. *Nature*, 343(6257): 431–437.
- Wan Y S, Liu D Y, Wilde S M, Cao J J, Chen B, Dong C Y, Song B and Du L L. 2010. Evolution of the Yunkai Terrane, south China: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating, geochemistry and Nd isotope. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(2): 140–153.
- Wan Y S, Liu D Y, Xu M H, Zhuang J M, Song B, Shi Y R and Du L L. 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology and geochemistry of metavolcanic and metasedimentary rocks in northwestern Fujian, Cathaysia block, China: Tectonic implications and the need to redefine lithostratigraphic units. *Gondwana Research*, 12(1–2): 66–183.
- Wang C, Liang X Q, Foster D A, Fu J G, Jiang Y, Dong C G, Zhou Y, Wen S N and Quayn P V. 2016. Detrital zircon U-Pb geochronology, Lu-Hf isotopes and REE geochemistry constrains on the provenance and tectonic setting of Indochina Block in the Paleozoic. *Tectonophysics*, 677: 125–134.
- Wang J H, Yin A, Harrison T M, Grove M, Zhang Y Q and Xie G H. 2001. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 188: 123–133.
- Wang Q F, Deng J, Li C S, Li G J, Qiao L and Yu Y. 2014. The boundary between the Simao and Yangtze blocks and their locations in Gondwana and Rodinia: Constraints from detrital and inherited zircons. *Gondwana Research*, 26: 438–448.
- Wang X F, Metcalfe I, Jian P, He L Q and Wang C S. 2000a. The Jinshajiang–Ailaoshan suture zone, China: Tectonostratigraphy, age and evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18: 675–690.
- Wang X F, Metcalfe I, Jian P, He L Q and Wang C S. 2000b. The Jinshajiang suture zone: Tectono-stratigraphic subdivision and revision of age. *Science in China (Series D)*, 43(1): 10–22.
- Wang Y J, Fan W M, Zhao G C, Ji S C and Peng T P. 2007. Zircon U-Pb geochronology of gneissic rocks in the Yunkai massif and its implication on the Caledonian event in the South China Block. *Gondwana Research*, 12(4): 404–416.
- Wang Y J, Wu C M, Zhang A M, Fan W M, Zhang Y H, Zhang Y Z, Peng T P and Yin C Q. 2012. Kwanghsian and Indosinian reworking of the eastern South China Block: Constraints on zircon U-Pb geochronology and metamorphism of amphibolites and granulites. *Lithos*, 150: 227–242.
- Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, Zhang Y H and Zhang Y Z. 2013. Origin of paleosubduction-modified mantle for Silurian gabbro in the Cathaysia Block: Geochronological and geochemical evidence. *Lithos*, 160: 37–54.
- Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, Zhao G C, Zhang G W, Zhang Y Z, Zhang F F and Li S Z. 2011. Kwanghsian crustal anatexis within the eastern South China Block: Geochemical, zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic fingerprints from the gneissoid granites of Wugong and Wuyi–Yunkai Domains. *Lithos*, 127: 239–260.
- Wang Y J, Zhang F F, Fan W M, Zhang G W, Chen S Y, Cawood P A and Zhang A M. 2010. Tectonic setting of the South China Block in the early Paleozoic: Resolving intracontinental and ocean closure models from detrital zircon U-Pb geochronology. *Tectonics*, 29(6): 1–16.
- Wang Y J, Zhou Y Z, Cai Y F, Liu H C, Zhang Y Z and Fan W M. 2016. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of the Ailaoshan granitic and migmatite rocks and its implications on Neoproterozoic subduction along the SW Yangtze Block. *Precambrian Research*, 283: 106–124.
- Xia X P, Nie X S, Lai C K, Wang Y J, Long X P and Meffre S. 2016. Where was the Ailaoshan Ocean and when did

- it open: A perspective based on detrital zircon U-Pb age and Hf isotope evidence. *Gondwana Research*, 36: 488–502.
- Xia X P, Sun M, Geng H Y, Sun Y L, Wang Y J and Zhao G C. 2011. Quasi-simultaneous determination of U-Pb and Hf isotope compositions of zircon by excimer laser-ablation multiple-collector ICPMS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(9): 1868–1871.
- Xiao L, Xu Y G, Chung S L, He B and Mei H. 2003. Chemostratigraphic Correlation of Upper Permian Lavas from Yunnan Province, China: Extent of the Emeishan Large Igneous Province. *International Geology Review*, (45): 753–766.
- Xu Y J, Cawood P A, Du Y S, Hu L S, Yu W C, Zhu Y H and Li W C. 2013. Linking south China to northern Australia and India on the margin of Gondwana: Constraints from detrital zircon U-Pb and Hf isotopes in Cambrian strata. *Tectonics*, 32: 1547–1558.
- Xu Y J, Cawood P A, Du Y S, Zhong Z Q and Hughes N C. 2014a. Terminal suturing of Gondwana along the southern margin of South China Craton: Evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopes in Cambrian and Ordovician strata, Hainan Island. *Tectonics*, 33(12): 2490–2504.
- Xu Y J, Cawood P A, Du Y S, Zhong Z Q and Hughes N C. 2014b. Early Paleozoic orogenesis along Gondwana's northern margin constrained by provenance data from South China. *Tectonophysics*, 636: 40–51.
- Xu Y J, Du Y S, Cawood P A, Zhu Y H, Li W C and Yu W C. 2012. Detrital zircon provenance of Upper Ordovician and Silurian strata in the northeastern Yangtze Block: Response to orogenesis in south China. *Sedimentary Geology*, 267: 63–72.
- Yan D P, Zhou M F, Wang Y C and Xia B. 2006. Structural and geochronological constraints on the tectonic evolution of the Dulong–Song Chay tectonic dome in Yunnan province, SW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(4–6): 332–353.
- Yao W H, Li Z X, Li W X, Su L and Yang J H. 2015. Detrital provenance evolution of the Ediacaran–Silurian Nanhua foreland basin, South China. *Gondwana Research*, 28(4): 1449–1465.
- Ye M F, Li X H, Li W X, Liu Y and Li Z X. 2007. SHRIMP zircon U-Pb geochronological and whole-rock geochemical evidence for an early Neoproterozoic Sibaoian magmatic arc along the southeastern margin of the Yangtze Block. *Gondwana Research*, 12: 144–156.
- Yumul G P, Zhou M F, Wang C Y, Zhao T P and Dimalanta C B. 2008. Geology and geochemistry of the Shuanggou ophiolite (Ailaoshan ophiolitic belt), Yunnan Province, SW China: Evidence for a slow spreading oceanic basin origin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5–6): 385–395.
- Zhang A M, Wang Y J, Fan W M, Zhang Y Z and Yang J. 2012a. Earliest Neoproterozoic (ca. 1.0 Ga) arc-back-arc basin nature along the northern Yunkai domain of the Cathaysia block: Geochronological and geochemical evidence from the metabasite. *Precambrian Research*, 220: 217–233.
- Zhang C H, Gao L Z, Wu Z J, Shi X Y, Yan Q R and Li D J. 2007. SHRIMP U-Pb zircon age of tuff from the Kunyang group in central Yunnan: Evidence for Grenvillian orogeny in south China. *Chinese Science Bulletin*, 52: 1517–1525.
- Zhang F F, Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, Zhang Y Z and Zi J W. 2012b. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of Middle Paleozoic (Kwanghsian) massive granites in the eastern South China Block. *Lithos*, 150: 188–208.
- Zhao G C. 2015. Jiangnan Orogen in South China: Developing from divergent double subduction. *Gondwana Research*, 27(3): 1173–1180.
- Zhao K D, Jiang S Y, Sun T, Chen W F, Ling H F and Chen P R. 2013. Zircon U-Pb dating, trace element and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry of Paleozoic granites in the Miao'ershan–Yuechengling batholith, South China: Implication for petrogenesis and tectonic-magmatic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 244–264.
- Zhou G Y, Wu Y B, Gao S, Yang J Z, Zheng J P, Qin Z W, Wang H and Yang S H. 2015. The 2.65 Ga A-type granite in the northeastern Yangtze craton: Petrogenesis and geological implications. *Precambrian Research*, 258: 247–259.
- Zhou M F, Kennedy A K, Sun M, Malpas and Lesher C M. 2002. Neoproterozoic arc-related mafic intrusions along the northern margin of South China: Implications for the accretion of Rodinia. *The Journal of Geology*, 110(5): 611–618.
- Zi J W, Cawood P A, Fan W M, Wang Y J, Eric Tohver and McCuaig T C. 2012b. Generation of Early Indosinian enriched mantle-derived granitoid pluton in the

Sanjiang Orogen (SW China) in response to closure of the Paleo-Tethys. *Lithos*, 140: 166–182.  
Zi J W, Cawood P A, Fan W M, Wang Y J, Tohver E,

McCuaig T C and Peng T P. 2012a. Triassic collision in the Paleo-Tethys Ocean constrained by volcanic activity in SW China. *Lithos*, 144: 145–160.

## Geochronology of Detrital Zircon from the Upper Silurian–Lower Devonian Sedimentary Rocks at both Sides of the Ailaoshan Tectonic Zone: Provenance and Geological Significance

LIU Bingbing<sup>1,2</sup>, PENG Touping<sup>1,3\*</sup>, FAN Weiming<sup>3,4</sup>, GAO Jianfeng<sup>5</sup>,  
FANG Xiaoyu<sup>1,2</sup> and ZHANG Jingyi<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China; 4. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 5. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China)

**Abstract:** Constraining the precise time of opening and location of the suture of the Ailaoshan Paleotethys is crucial to better understand the tectonic evolution of the whole Paleotethys in Southwest China. In this contribution, we carried out a systematic U-Pb analysis of detrital zircon to provide insights into the provenance of sedimentary materials, temporal variation, and their geological significance. The dating results of detrital zircon grains from the Upper Silurian–Lower Devonian sedimentary sandstones from both sides of the Ailaoshan tectonic zone show that all the Upper Silurian detrital zircon grains are characterized by a similar youngest age peak at ca. 450 Ma and two subordinate age populations including the Greenville orogenic events (1100–800 Ma) and the 2600–2400 Ma age group. Detrital zircon grains in the Lower Devonian rocks gave similar age populations with an exception of those from the east side of the Ailaoshan tectonic zone lack the youngest age peak at ca. 450 Ma. In addition, the detrital zircon grains in the Lower Devonian rocks display age peak at 2600–2400 Ma more significant than the Upper Silurian ones. By comparison with the published dating data of detrital zircon, a common characteristic with same age populations has also been revealed. Integration with the regional geological data, we propose that the opening of the Ailaoshan Paleotethys Ocean took place during the Late Silurian to Early Devonian and the Ailaoshan Fault should represent the location of the Paleotethys suture zone.

**Keywords:** geochronology; detrital zircon; the Late Silurian–Early Devonian; Ailaoshan tectonic zone; Paleotethys