

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2018025

滇东南震旦—寒武纪沉积岩的碎屑锆石组成 和对扬子—华夏界线的限制

朱光磊, 于津海*, 沈林伟, 周雪瑶

内生矿床成矿机制研究国家重点实验室, 地球科学与工程学院 南京大学, 南京 210023

摘要: 滇东南屏边地区的基底组成一直是个谜。该区域的构造属性对约束扬子地块和华夏地块的西段界线非常重要。本文对出露于该地区的震旦—寒武纪沉积岩进行了碎屑锆石U-Pb-Hf同位素分析。二个样品的锆石U-Pb同位素分析显示这二个地层中的碎屑物质组成相似, 都是以新元古代(700~937 Ma)碎屑物质为主, 构成了~815 Ma的主峰。岩石中都含有少量古—中元古代碎屑物质。屏边群沉积岩样品六个最年轻谐和锆石年龄变化于696~761 Ma, 指示屏边形成于新元古代晚期, 与震旦系相当。屏边地区基底变质沉积岩的碎屑锆石年龄谱为一明显富集新元古代年龄的单峰模式, 不同于华夏地块和印支地块的年龄谱, 而与扬子地块南缘及扬子西缘的沉积岩相似。Hf同位素特征也显示了与扬子地块(尤其是西缘)的亲缘关系。结合其他证据, 本文认为滇东南屏边地区属于扬子地块, 扬子地块与华夏地块分界线的西延部分应该在研究区以南或东南, 而不可能是研究区以北的师宗—弥勒—罗甸断裂。碎屑锆石年龄分布特征还指示屏边群这套浅变质碎屑岩沉积于弧后盆地, 暗示扬子地块西南缘的新元古代俯冲作用可能一直持续到~752 Ma之后。

关键词: 扬子地块—华夏地块边界; 震旦纪沉积岩; 锆石U-Pb-Hf同位素; 滇东南地区

中图分类号: P578.94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7493(2018)05-0658-13

Detrital Zircon Components of Sinian–Cambrian Sedimentary Rocks in SE Yunnan: Constrain on the Boundary between Yangtze and Cathaysia Blocks

ZHU Guanglei, YU Jinhai*, SHEN Linwei, ZHOU Xueyao

State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering,
Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: The basement component of the Pingbian area, SE Yunnan, has not been well studied before. The tectonic attribution of this area is important for constraining the western boundary between the Yangtze and Cathaysia blocks. U–Pb–Hf isotopic compositions of detrital zircons from the Sinian–Cambrian sedimentary rocks in the Pingbian area are used to provide new evidence for determining this boundary. Zircon U–Pb dating results indicate that two sedimentary rocks from the Sinian and Cambrian strata share the similar detritus components. Most of them were formed in Neoproterozoic (700–937 Ma) with an age peak at ~815 Ma. Both sedimentary rocks also contain a small amount of Paleo- to Mesoproterozoic detritus. Six youngest concordant zircons have ages of 696–761 Ma, suggesting that the formation age of the Pingbian Group sedimentary rocks probably formed in the Late Neoproterozoic, equivalent to Sinian time. The Pingbian Group sample shows the unimodal age spectrum with dominant Neoproterozoic detrital zircons, similar to those sedimentary rocks in the southern and western Yangtze Block, but different from the sedimentary rocks in the Cathaysia and Indochina blocks. Hf isotopic characteristics of detrital zircons also suggest the affinity of the Pingbian Group with the Yangtze Block (especially the western margin). According to these data

收稿日期: 2018-03-07; 修回日期: 2018-04-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41330208)资助

作者简介: 朱光磊, 1992年生, 硕士研究生, 主要从事前寒武纪地质研究; E-mail: 2219316386@qq.com

*通讯作者: 于津海, 教授; E-mail: jhyu@nju.edu.cn

and other evidence, we believe that the Pingbian area in SE Yunnan Province belongs to the Yangtze Block. Thus, the western boundary between the Yangtze and Cathaysia blocks should be located at south or southeast of the study area, rather than the Shizong–Mile–Luodian Fault. The detrital zircon age distribution patterns also indicate that the Sinian Pingbian Group was deposited in the back-arc basin, implying that Neoproterozoic subduction along the southwestern margin of the Yangtze Block lasted until ~752 Ma.

Key words: Yangtze/Cathaysia boundary; Sinian sedimentary rock; detrital zircon U–Pb–Hf isotope; Southeastern Yunnan

Corresponding author: YU Jinhai, Professor; jhyu@nju.edu.cn

1 引言

华南板块是由扬子地块和华夏陆块在新元古代拼合而成 (Charvet et al., 1996; Li et al., 1997; Wang et al., 2007)。其拼合带的东段通常被认为是沿绍兴–江山–萍乡断裂带 (图1a), 但拼合带向西延伸的位置却存在多种观点, 如桂北龙胜断裂带 (郭令智等, 1981; 夏斌, 1984; 王鸿祯等, 1986)、荔浦断裂 (刘宝珺等, 1993; 陈懋弘等, 2006)、钦杭结合带 (杨明桂和梅勇文, 1997; 洪大卫等, 2002; 胡肇荣和邓国辉, 2009)、郴州–临武断裂 (Wang et al., 2003, 2010)、凭祥–荔浦–恭城 (陈凌云和张忠伟, 2003)、师宗–弥勒–罗甸断裂 (董云鹏等, 2002; Guo et al., 2009)、吴川–四会断裂 (Zhang and Wang, 2007), 等等。之所以有如此众多的观点, 一方面是因为不同学者依据了不同的地质证据, 而这些证据有些是可能不兼容; 另一方面拼合带的西部延伸区域大多被显生宙以来的沉积物覆盖, 因而缺少关键的地质标志 (舒良树, 2012)。滇东南存在多个世界级大型锡 (钨) 多金属矿床, 如个旧和都龙等矿床。许多学者认为这些大型的锡 (钨) 矿床相似于南岭典型的钨–锡矿床 (毛景文等, 2004; Cheng et al., 2012, 2013), 而且该地区应该具有与华夏地块相似的基底, 因而把滇东南归属于华夏地块。还有一些学者根据地球物理特征与典型扬子地块的不同, 将滇东南、越南北部、广西中西部等地区都归属于华夏地块 (广西省地质矿产局, 1985; Guo et al., 2009)。但是, 另一些学者却认为滇东南应该归属扬子地块或一个独立地体 (吴浩若, 2000; 陈洪德等, 2006; 罗惠麟等, 2009; 刘俊来等,

2011; 张斌辉等, 2015)。

由于滇东南地区很少有前寒武纪地质体出露, 其前寒武纪的地质演化和构造属性一直是个谜。零星的前寒武纪岩石主要出露于中越边境的都龙–麻栗坡一带和屏边地区 (图1b)。新的地质填图和研究显示出露于都龙–麻栗坡地区的南温河早古生代花岗岩之中和周边的猛垌群和新寨组属于新元古代 (刘玉平等, 2006; Guo et al., 2009; Zhou et al., 2018)。而孤立出露于屏边地区的一套沉积岩早期被认为属于前寒武系 (云南省地质矿产局, 1990), 之后就无人对其进行详细研究。然而对滇东南地区前寒武纪地质体组成和构造归属的确定, 不仅对于限定扬子地块与华夏地块西延界线的位置, 而且对于研究华南钨–锡等矿床的成因都具有重要意义。

目前, 沉积岩中碎屑锆石U–Pb年龄和Hf同位素组成已广泛用于识别沉积岩物源及其源区所经历的构造–岩浆事件, 以及不同地块的亲缘关系 (Zhou et al., 2002, 2006; Yu et al., 2008, 2010; Li et al., 2006; Sun et al., 2008, 2009; Zhao et al., 2010; Wang et al., 2010, 2012; 王鹏鸣等, 2012; 王磊等, 2015; 周雪瑶等, 2015)。本文对出露于滇东南屏边地区的浅变质碎屑岩开展系统的碎屑锆石U–Pb–Hf同位素研究, 以确定这些变质岩的组成、形成时代、构造背景以及与华夏或扬子地块的亲缘关系, 从而为厘定扬子地块与华夏地块西南边界的位置提供新的依据。

2 地质背景和样品描述

研究区位于哀牢山–红河走滑剪切带东南段和华南板块的西南缘 (图1a)。该区出露元古代到新

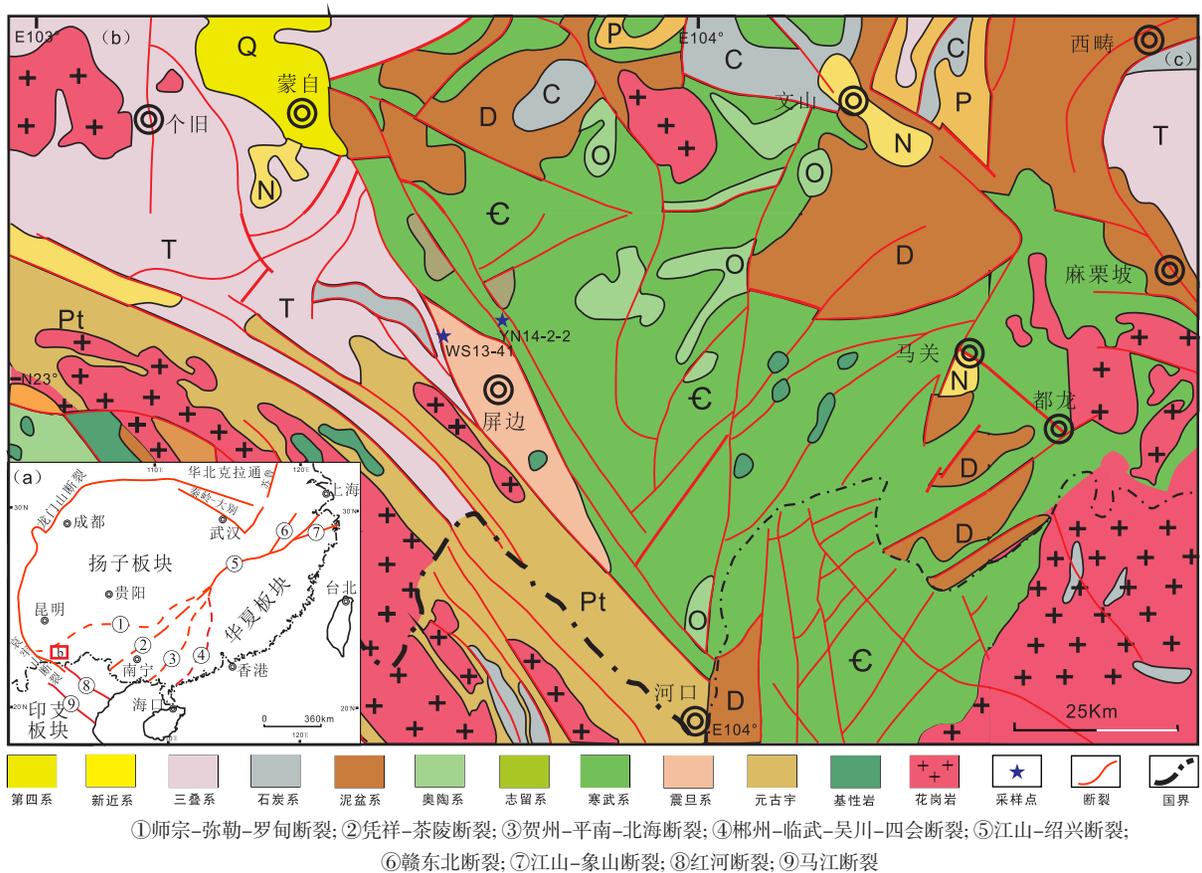


图1 华南构造简图(a)及屏边地区地质简图及采样位置(b) (据云南省地质图修改)
Fig. 1 Tectonic sketch of South China (a) and Geological map of the Pingbian area and sampling locations (b)

生代的地质,但以古生代地层为主(图1b)。前寒武纪地层主要是沿哀牢山-红河剪切带出露的哀牢山群和剪切带东侧的屏边群。哀牢山群是一套混合岩化强烈的深变质岩系,呈NW-SE向带状延伸。屏边群是一套浅变质碎屑沉积岩。1964年云南省地质局区域地质测量队命名屏边群并将其归属前寒武系。云南省地质矿产局(1990, 1996)将屏边群划分为3个岩性段:下部为灰绿色绢云千枚岩及粉砂质绢云千枚岩夹浅黄色石英粉砂岩和极少的白云岩条带;中上部为灰绿、深灰色绢云板岩、粉砂绢云板岩与灰色细砂岩、粉砂岩呈韵律性互层,夹多层含砾板岩;上部为灰黑、黄色绢云板岩、粉砂绢云板岩夹灰白色石英粉砂岩。曹仁关和陆瑞芳(1992)根据岩性特征和微古植物化石,将屏边地区这套地层分为震旦系(白打旗组、六差塘组、咪咪底组、新现河组、大深沟组)和前震旦系。震旦系中包含三层冰碛岩地层,其中新现河组可与湖北西部748 Ma的莲沱组对比,而咪咪底组可与湖南西

北部728 Ma的湘锰组对比。屏边群顶部被早寒武世浪木桥组底砾岩平行不整合覆盖。因为哀牢山群位于大型构造剪切带中,且经受了中高级变质作用改造,岩性特征与剪切带以外的明显不同,故其来源不易确定。因此,本次研究选择剪切带以东华南板块范畴内的基底变质岩进行研究。根据野外地层单元及地层接触关系,本次研究的样品包括一个震旦系沉积岩(WS13-41)和一个寒武系沉积岩(YN14-2-2)。样品WS13-41具有较强的片理化,重结晶弱,为千枚状粉砂质板岩。局部见少量细砂质碎屑,主要由石英和弱蚀变的斜长石组成,填隙物呈定向分布(图2)。样品YN14-2-2为含砾细砂岩,钙质含量较高;少量细小的砾石(约2%)颗粒直径约4~6 mm。该样品的变质作用和变形特征都较弱。

3 分析方法

锆石样品是经过岩石的粉碎、淘洗、浮选、

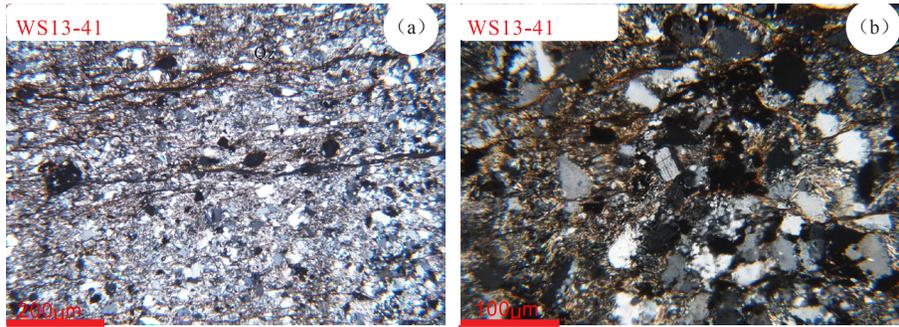


图2 屏边群变质沉积岩的显微照片

Fig. 2 Micrographs of sedimentary rock WS13-41 in Pingbian Group

磁选和重液分离等传统分选技术获得。在双目镜下随机挑选出晶形、透明度、颜色等不同特征的颗粒,用环氧树脂固定后,磨蚀并抛光至锆石中心出露。对锆石颗粒进行透射光和阴极发光(CL)图像分析以获得其外部形态和内部结构特征。锆石CL图像分析和U-Pb-Hf同位素分析都是在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成。

CL图像分析是在配有Gatan Mono CL的JEOLJXA-8800M电子探针显微分析仪上完成。锆石U-Pb年龄测定工作是在带有激光熔蚀装置的Agilent HP 7500 ICP-MS分析仪上进行。激光束斑直径设为30 μm,频率为5 Hz。样品剥蚀后采用He气作为载气,并在进入ICP-MS之前混入Ar气。每个测试流程的开始和结尾均测试2个GJ标样,其间一般夹10~12个待测样品点。另外分析一个锆石标样Mud Tank (732±5 Ma, Black, 1978) 作为内标以监测仪器的稳定性和分析结果的可靠性。分析数据使用GLITTER (ver. 4.4) 程序处理后获得U-Pb同位素比值和年龄。普通Pb校正采用Andersen (2002) 的方法进行。对²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄<1000 Ma的锆石,采用²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄为该锆石结晶年龄;对>1000 Ma的锆石,则采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄。用ISOPLOT 4.15程序 (Ludwig, 2001) 对分析结果进行U-Pb谐和图的绘制和加权平均年龄的计算。

锆石Lu-Hf同位素原位分析是在带激光剥蚀的多接收等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)上完成。实验以He作为载气,激光束斑直径为44 μm,剥蚀频率为10 Hz。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 计算采用的¹⁷⁶Lu的衰变常数 1.865×10^{-11} (Scherer et al., 2001), 球粒陨石¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282772, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.0332 (Blichert

et al., 1997)。亏损地幔Hf模式年龄(t_{DM}^1)采用¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.283251, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.0384 (Vervoort and Blichert., 1999) 计算,二阶段Hf模式年龄(t_{DM}^2)采用平均大陆壳¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.015 计算 (Griffin et al., 2002)。

4 分析结果

4.1 锆石U-Pb年龄

样品WS13-41中锆石颗粒大小一般为50 μm × 100 μm,呈半自形,部分棱角被圆化;内部多具振荡环带,少量具冷杉叶状结构(图3a-d)。所有锆石颗粒的Th/U比值>0.4(附表1, 见文后链接,下同),结合内部结果,说明它们大多是岩浆成因的。93颗锆石的U-Pb定年结果显示,绝大多数分析点均落在谐和线上或附近(图4)。碎屑锆石年龄主要集中在新元古代,少量古元古代和中元古代。一颗最年轻的谐和锆石年龄是696 Ma,稍老的5颗谐和锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄变化于738~761 Ma,得到加权平均年龄752±7 Ma。3个古元古代锆石年龄变化于1861~1883 Ma,其²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb加权平均年龄为1866±70 Ma。样品中最老锆石的谐和年龄是2330±36 Ma(附表1)。在年龄直方图上,该样品显现一个~815 Ma主峰和1825 Ma及一个2300 Ma弱峰(图5a)。

样品YN14-2-2中的锆石大小是(50~100) μm × (30~50) μm,多为自形一半自形短柱状,指示其近距离的搬运沉积。CL图像显示这些锆石多具清晰的振荡环带(图3f, g),部分具有面状结构(图3e, h)。绝大多数锆石的Th/U比值>0.4(附表1),也说明它们大多是岩浆成因的。根据CL图像,选取了61颗锆石进行了锆石U-Pb定年。这

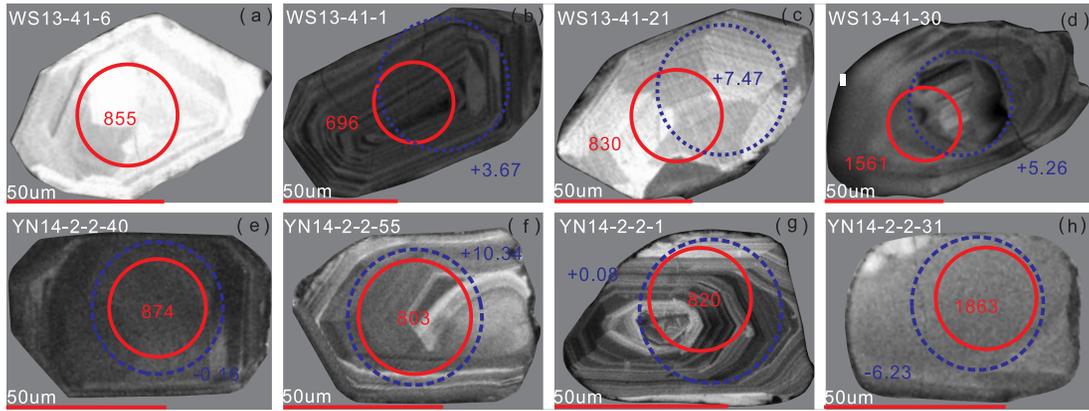


图3 屏边地区震旦纪—寒武纪沉积岩中碎屑锆石的阴极发光 (CL) 图像

Fig. 3 CL images of detrital zircons from Sinian-Cambrian sedimentary rocks in Pingbian area

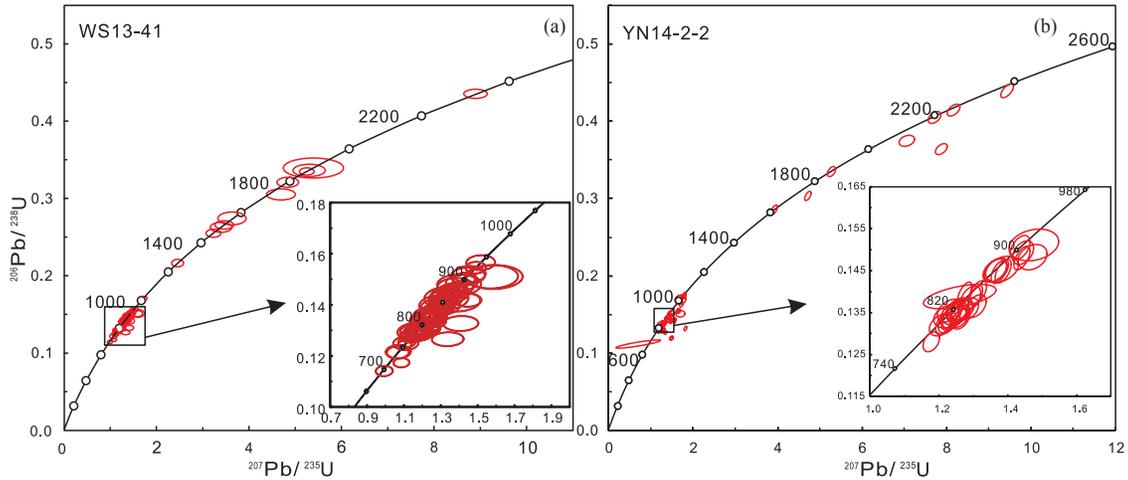


图4 碎屑锆石U-Pb年龄谐和图

Fig. 4 U-Pb Concordia plots for detrital zircons

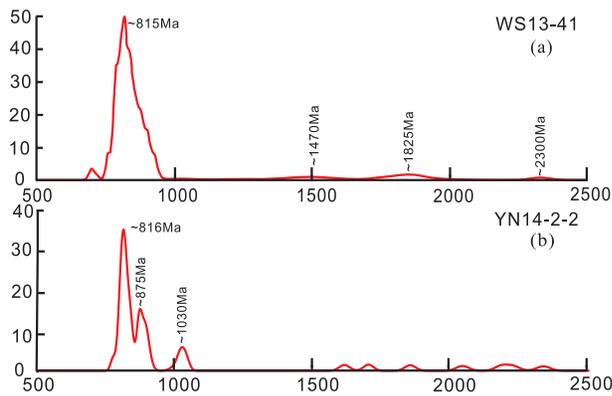


图5 震旦纪—寒武纪沉积岩中碎屑锆石年龄谱

Fig. 5 Age spectra of detrital zircons from the Sinian-Cambrian sedimentary rocks

些分析点均落在谐和线上或附近 (图4), 其年龄变化于777~2347 Ma。与样品WS13-41相似, 年龄主要集中在新元古代, 出现了~816 Ma的主峰以及875 Ma和1030 Ma两个弱峰 (图5b)。样

品中最年轻的谐和锆石年龄为 777 ± 9 Ma (附表1), 15颗较年轻的锆石的平均年龄是 813 ± 5 Ma (MSWD=0.54)。样品中只有少量中—古元古代的碎屑锆石。

4.2 锆石Hf同位素组成

对样品WS13-41中43颗锆石的Hf同位素分析结果显示, 它们的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分布在0.281228~0.282648之间, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于-9.89~+15.0 (图6, 附表2见文后链接, 下同)。大多数锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为正值, 只有14颗锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值小于0。在 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 对年龄的投影图上 (图6), 4颗 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值最低的古元古代锆石构成了一条演化线, 交于亏损地幔于~3.1 Ga, 指示它们的母岩浆很可能起源于一个~3.1 Ga的古老地壳。该演化线的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.019$, 大于平均地壳的0.015 (图6), 说明源区成分偏基性。新元古代 (700~950 Ma) 锆石展示了最大的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变

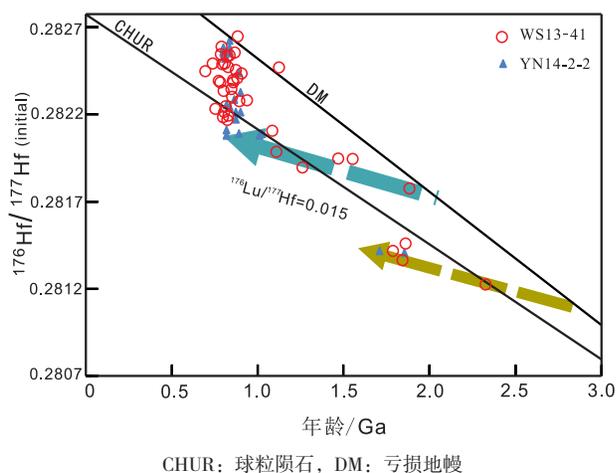


图6 锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 与U-Pb年龄图

Fig. 6 Hf-isotope compositions of the detrital zircons

化,且大多数(>75%)是正值,少量的负值也只是略低于CHUR值(附表2,图6),说明新元古代岩浆岩的源区以新生地壳组分为主或直接起源于亏损地幔。具有最低 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 的新元古代锆石与一些中元古代和古元古代锆石具有相似的模式年龄(~2.1 Ga)(图6),指示它们的母岩浆很可能起源于~2.1 Ga地壳。

样品YN14-2-2中25颗锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分布在0.281424~0.282634之间, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值也具有大的变化范围(-9.57~+13.7)(图6,附表2)。与样品WS13-41中的锆石Hf同位素类似,两颗古元古代锆石落在与样品WS13-41中古元古代锆石相似的演化线上(图6),而新元古代锆石的Hf同位素也落在样品WS13-41中新元古代锆石Hf同位素变化范围内。

5 讨论

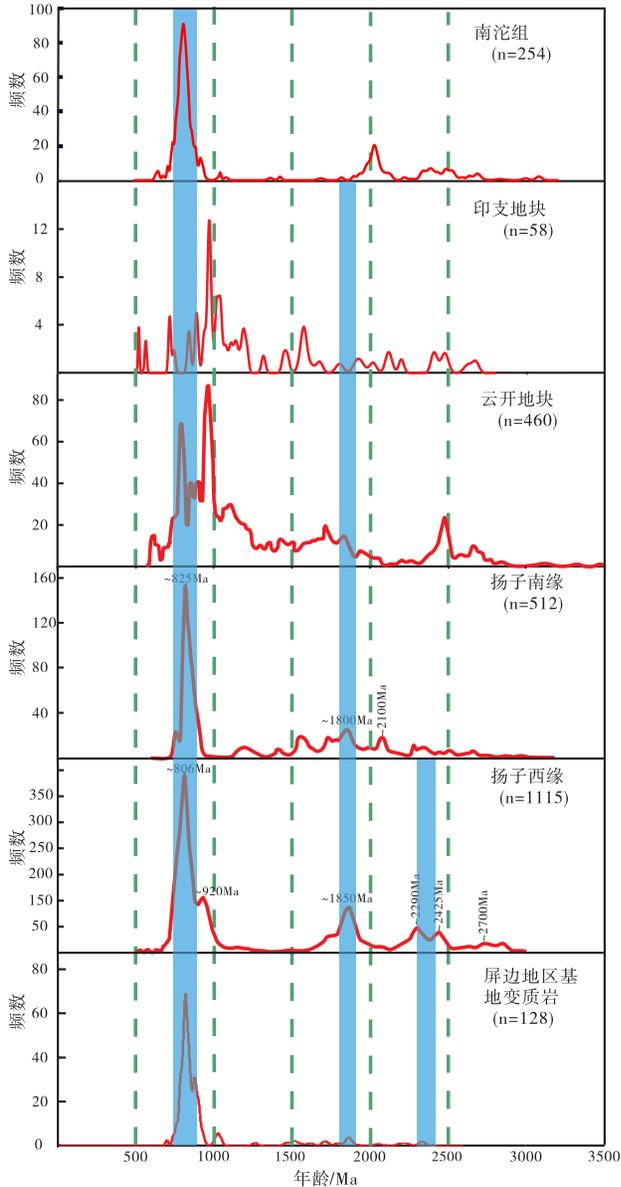
5.1 基底变质岩的形成时代

屏边群是滇东南重要的前寒武纪变质沉积岩,由于缺乏精确的年代学数据,屏边群的时代一直没有很好的限定。本次研究获得的屏边群沉积岩(WS13-41)中最年轻碎屑锆石的峰值年龄为 752 ± 7 Ma,表明屏边群的沉积时代应该不早于 752 ± 7 Ma。该套地层被早寒武世沉积岩覆盖,因此这套沉积岩应该形成于新元古代晚期,这与地质填图建立其为震旦系地层基本吻合。研究区寒武系地层发育,样品YN14-2-2采自寒武纪浪木桥组地层出露范围。云南省地质矿产局区根据岩性、含矿性及层序与滇东渔户村组(寒武系)的对

比,将其划归寒武系底部(云南省区域地质志,1990)。该样品具有与震旦系沉积岩样品WS13-41相似的碎屑锆石年龄谱和Hf同位素特征(图5,6),说明寒武纪早期的沉积岩与下伏震旦系地层分享相似的物源区。但是,研究区寒武系样品(YN14-2-2)的最年轻一颗碎屑锆石年龄是777 Ma,最年轻的峰值为813 Ma。造成这种现象的一种原因可能是物源区上部岩层被剥蚀成为震旦系地层,而中下岩层被剥蚀形成寒武系地层,其中中下岩层包含较多更老的物质。样品YN14-2-2中更多古老的物质支持这种推测。另一种可能的原因是样品分析数据点不足,目前对获得最大沉积年龄所需锆石数目还存在争论,Dodson等(1988)认为随机60颗粒分析即可,而Vermeesch(2004)认为至少需要117颗锆石。样品YN14-2-2的分析颗粒少于样品WS13-41,有可能忽略了年龄较小的颗粒。但是,从分析颗粒数和年轻锆石在样品WS13-41的比例来看,后一种可能性更小。

屏边群新元古代晚期的沉积时代大致与扬子地块的观音崖组、列古六组、澄江组、陡山沱组、南沱组的沉积时代相当(Sun et al., 2009; Wang et al., 2012),晚于扬子地块南缘广泛出露的四堡群(~812 Ma, Wang et al., 2006)、梵净山群(~800 Ma, Wang et al., 2010)和板溪群(~802 Ma, 高林志等, 2011)等相应地层。这说明屏边地区与扬子南缘和西缘在新元古代存在广泛的沉积盆地。研究区位于NS向康滇裂谷和NEE向南华裂谷两大盆地的交汇部位,且它们形成时代相当,因此,研究区盆地的形成可能与康滇裂谷、南华裂谷有关。

扬子地区广泛发育新元古代晚期的冰期地层,前人对此开展过大量相关工作(Zhou et al., 2004; Zhang et al., 2005, 2008),其中以三峡地区的南沱组最为典型代表。而在华夏地块内至今未有确切的新元古代晚期冰碛岩的报道。Liu等(2008)和胡蓉等(2016)曾对扬子地块北部三峡地区南沱组冰碛岩开展锆石U-Pb年代学工作,得到最年轻锆石的年龄为600~706 Ma,这与屏边群的沉积时代相当。这些冰碛岩中最主要的一组锆石年龄也集中于900~700 Ma,与屏边群的碎屑锆石年龄谱相似(图7)。屏边群的中上段存在多层含砾板岩(曹仁关和陆瑞芳,1992;云南省



数据来源: 扬子西缘 (Zhou et al., 2002, 2006; Sun et al., 2009; Zhao et al., 2010; Wang et al., 2012); 云开地区 (Yu et al., 2010; Wang Y et al., 2007, 2011; Wan et al., 2010; 周雪瑶等, 2015; 王磊等, 2015); 扬子南缘 (Wang et al., 2006; Wang et al., 2010; Wang W et al., 2016); 印支数据 (Wang C et al., 2016); 南沱组 (胡蓉等, 2016; Pi and Jiang, 2016)

图7 不同地块碎屑锆石年龄谱对比图

Fig. 7 Comparison of U-Pb age spectra of detrital zircons from different blocks

地质矿产局, 1990; 1996)。本次野外工作, 笔者也在屏边群中发现含砾变质粉砂岩或板岩。可见其中砾石杂乱堆积, 大小不一, 但磨圆度都较好。砾石大小以及与基质的大小相差悬殊, 与冰碛岩相似 (野外露头较差, 且风化很强, 故无法准确判断)。这些都说明屏边群很可能也形成于扬子地块发育的这期冰期。

5.2 沉积盆地的物源区和构造意义

据Hoffman (1991) 的Rodinia超大陆重建图, 研究区归属的扬子地块与华夏地块和印支地块等在新元古代相连或相邻, 所以研究区的物源区可能是扬子地块本身、华夏地块或印支地块。将新元古代屏边群和寒武纪浪木桥组碎屑沉积岩的碎屑锆石年龄谱与扬子地块、华夏地块和印支地块的年龄谱进行对比, 可以揭示其碎屑物质来源和与其他陆块的亲缘性。

大多数学者认为华南与特提斯 (印支) 的分界线是金沙江-哀牢山-马江缝合带 (Wu et al., 2017; 及其中的参考文献), 研究区以及扬子西缘广泛分布的新元古代岩浆活动无一例外均分布在金沙江-哀牢山以东。而沿哀牢山分布的前寒武纪岩石, 包括新元古代侵入岩, 也很可能属于扬子板块而不是印支板块 (Chen et al., 2017)。此外, 研究区与印支地块的年龄谱截然不同 (图7), 也说明研究区的物源区不可能是印支地块。Yu等 (2010) 将华夏地块划分为武夷地体和云开-南岭地体。武夷地体以强烈的古元古代~1.85 Ga和新元古代0.8~0.7 Ga岩浆活动为特征, 屏边群碎屑锆石的主峰时代和Hf同位素特征与其有一定的相似。但屏边群和浪木桥组沉积岩都显示单一的年龄峰值, 且新元古代碎屑锆石大多自形一半自形, 说明碎屑物质不可能来自于遥远的东华夏武夷地体。云开-南岭地体新元古代一早古生代沉积岩以富含Grenville期0.9~1.2 Ga和新太古代~2.5 Ga碎屑锆石为特征 (Yu et al., 2008, 2010; 王丽娟等, 2008; Yao et al., 2011), 与屏边地区基底变质岩的年龄谱特点明显不同 (图7), 说明研究区沉积岩的碎屑物也不可能来自西华夏的南岭-云开地体。

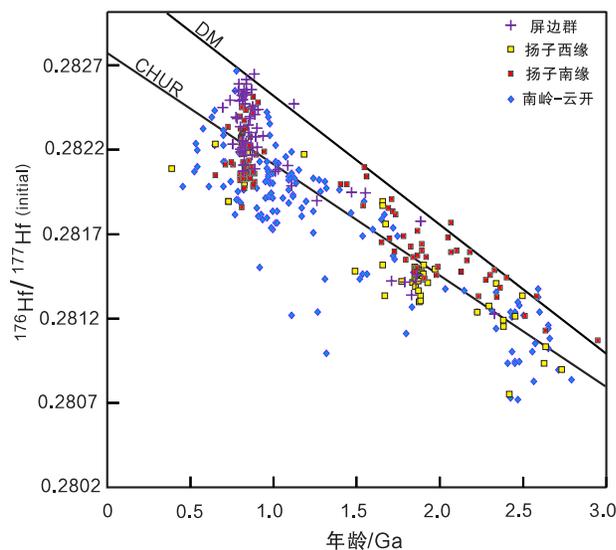
新元古代晚期屏边群和寒武纪早期浪木桥组沉积岩都以富集新元古代碎屑锆石为特征, 而扬子地块周缘广泛发育着新元古代岩浆活动 (Zhou et al., 2002, 2006; Li et al., 2003; Li et al., 2005; Wang et al., 2008; Zhu et al., 2006; 郑永飞, 2004)。屏边群和浪木桥组沉积岩具有的碎屑锆石年龄峰值 (~815 Ma) 也与扬子地块周缘发育的新元古代岩浆活动一致。如滇东南瑶山群眼球状花岗质糜棱岩和片麻岩花岗岩的结晶年龄分别是 826 ± 6.2 Ma和748~801 Ma (李宝龙等, 2012)。在扬子地块

西缘有四川的高家村闪长岩 (806 ± 4 Ma) 和冷水箐闪长岩 (806 ± 4 Ma, Zhou et al., 2006), 同德辉长岩 (813 ± 4 Ma, Sinclair, 2001), 云南峨山花岗岩 (819 ± 8 Ma, Li et al., 2003) 和格宗花岗岩 (864 ± 8 Ma, Zhou et al., 2002) 等。而在江南造山带西端的桂北地区分布有 $819 \sim 823$ Ma 本洞花岗岩、 $826 \sim 804$ Ma 三防花岗岩, 以及 824 ± 4 Ma 元宝山花岗岩, 824 ± 13 Ma 东马花岗岩, 835.8 ± 2.5 Ma 寨滚花岗岩和 794.2 ± 8.1 Ma 田棚花岗岩 (Li, 1999; Wang et al., 2006)。这些火成岩中锆石和研究区碎屑锆石特征相似, 而且扬子西缘和扬子南缘新元古代年龄峰值 (图7) 和 Hf 同位素特征 (具有大量正值 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的新元古代锆石) 也与屏边群和浪木桥组中的新元古代锆石完全一致 (图8)。此外, 扬子地块南缘桂北地区丹洲群中那些最低 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ 的新元古代锆石也具有与研究区相似的模式年龄 (~ 2.0 Ga; Wang et al., 2013), 也指示与研究区有物质上的联系。因此, 屏边地区这些碎屑物质最可能来自扬子地块同时代的火成岩。扬子西缘一些新元古代沉积岩中还有 ~ 920 Ma 的峰值年龄 (图7), 这期岩浆活动可能与四堡期岩浆弧有关 (Li et al., 2006)。通过对比不同时代的新元古代沉积岩的碎屑组成 (Sun et al., 2009; Li et al., 2006; Wang et al., 2012), 我们发现该年龄峰值只出现在较老

> 750 Ma 的地层中, 而震旦—寒武纪等较年轻的沉积岩中不含这组碎屑锆石, 指示沉积构造环境发生了一定的改变, 导致了物源区的改变。

屏边地区这些沉积岩中还含有少量古元古代 (~ 1825 Ma) 碎屑锆石。这一年龄的岩浆事件主要发育于东华夏地块的武夷地体以及扬子地块北缘 (凌文黎和高山, 2000; Peng et al., 2009; Zhang et al., 2006; Zhang et al., 2011; Yu et al., 2009)。前已述及, 屏边地区的碎屑物质不可能来自遥远的东华夏地块。但扬子地块北部的古元古代的岩浆活动及变质作用主要发生 ~ 2.0 Ga, 只有少量 ~ 1.85 Ga 岩浆的活动 (Qiu et al., 2000; Zhang et al., 2006, 2006b; Zheng et al., 2006; Yin et al., 2013; Li et al., 2014), 而且这些岩石中古元古代锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ 明显低于本文两个样品中的古元古代锆石, 说明研究区的古元古代锆石也不可能来自扬子地块北缘。尽管在扬子板块西缘和西南缘没有古元古代 (~ 1.85 Ga) 岩浆岩或变质岩的出露, 但这些地区的一些沉积岩均含有这组年龄的碎屑锆石, 如扬子地块西缘的昆阳群 (Sun et al., 2009; Wang et al., 2012)、因民组 (Wang et al., 2012) 和东川群 (Zhao et al., 2010) 以及西南缘桂北的四堡群 (Wang et al., 2007; Wang et al., 2012)。其中扬子西缘的古元古代锆石的 Hf 同位素特征与研究区的古元古代锆石尤为相似, 说明研究区的古元古代碎屑物质来自与扬子地块西缘沉积岩相似的物源区或者是这些元古代沉积岩的再循环。此外, 研究区样品缺失新太古代碎屑锆石, 这也与扬子地块西缘沉积岩中缺失新太古代碎屑锆石一致 (李献华等, 2012)。所有这些都说明研究区与扬子西缘相似, 两者具有更密切的亲缘关系。

扬子地块和华夏地块边界在绍兴—江山—萍乡带以西的延伸位置一直没有很好的限定, 这直接影响对江南造山带演化以及造山后岩浆—盆地属性的认识 (李献华等, 2012)。罗惠麟等 (2009) 和张斌辉等 (2015) 根据滇东南马关—麻栗坡地区的研究, 将马关—麻栗坡划归扬子地块; 吴浩若 (2000) 和陈洪德等 (2006) 通过对华南盆地演化的研究也认为滇东南属于扬子地块。然而, 另一部分学者却将研究区划归华夏地块 (董云鹏等, 2002; Guo et al., 2009)。董云



数据来源: 扬子西缘(Wang et al., 2012); 扬子南缘(Wang et al., 2010); 南岭—云开(Yu et al., 2010; Yao et al., 2011)

图8 不同地块碎屑锆石Hf同位素对比
Fig. 8 Hf-isotope compositions of detrital zircons from the sedimentary rocks in different blocks

鹏等(2002)根据滇东火山岩地球化学研究提出师宗-弥勒-罗甸断裂是扬子和华夏地块的西部界线(图1a)。而且一些矿床地质学家也将研究区划归华夏地块(毛景文等, 2008; 杨宗喜等, 2008; Cheng and Mao., 2010; Cheng et al., 2012, 2013; Feng et al., 2013; Xu et al., 2015)。上述物源分析表明, 直至寒武纪, 研究区均接受来自扬子地块的碎屑物质, 与扬子地块周缘(特别是西缘)具有相似的特征, 而没有明显的来自华夏地块的物质。因此, 研究区最可能属于扬子地块。这样, 华夏地块和扬子地块拼合带的西南界线一定位于研究区以南, 而不可能是研究区以北的师宗-弥勒-罗甸断裂(董云鹏等, 2002; Guo et al., 2009)。这一认识也表明个旧和都龙等超大型Sn-W矿床的成矿物质很可能就是来自于扬子地块基底。

5.3 沉积构造环境的变化

扬子周缘新元古代时期的构造背景一直存在争议。Li等(2003)提出扬子周缘新元古代岩浆活动是造成Rodinia超大陆裂解的地幔柱活动的产物。Zhou等(2002)认为745~830 Ma沿扬子西缘存在大洋俯冲作用。而Zheng等(2007)提出板块俯冲-裂谷模式, 认为新元古代发生了弧-陆碰撞、拉张垮塌、大陆裂谷的构造演化过程。Sun等(2008, 2009)综合新元古沉积岩地球化学和同位素证据及扬子西缘存在740~860 Ma连续的岩浆活动认为扬子西缘在740~1000 Ma发生了连续的俯冲作用, 最后在~740 Ma转变为被动大陆边缘开始沉积震旦纪地层。

沉积岩可以形成于不同的沉积环境, 指示不同的构造背景。沉积岩的不同特征被用来限定它们沉积盆地的性质。其中Cawood等(2012)曾提出利用碎屑锆石年龄分布特征识别沉积岩的沉积构造背景, 将沉积盆地的构造背景分为三种类型:(A)聚敛板块边界、(B)碰撞造山背景和(C)伸展构造背景。在Cawood等(2012)提出的判别图中, 屏边群变质沉积岩的频率曲线落入聚敛板块边界区域(图9)。屏边群沉积年龄与年轻碎屑锆石年龄相近, 且该部分碎屑锆石占绝大多数, 显示了典型聚敛板块边缘的特征, 而相悖于碰撞造山背景和伸展构造背景。聚敛构造环境从海沟延伸到弧后盆地, 包括位于俯冲带

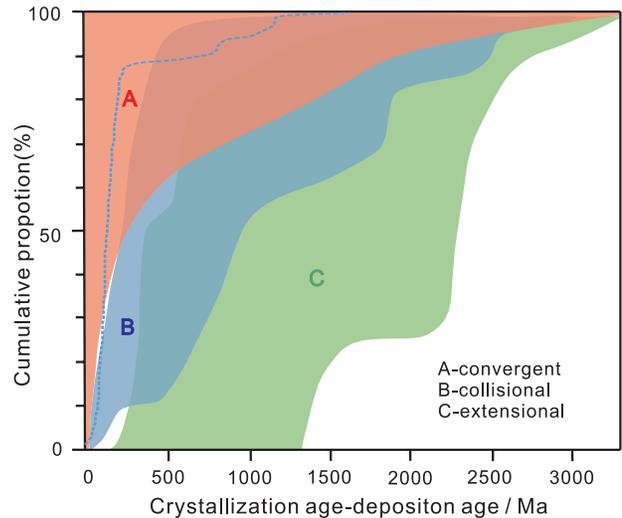


图9 碎屑锆石CA-DA构造环境判别图

Fig. 9 Discrimination of the tectonic setting of sedimentary rocks based on age distribution of the detrital zircons (after Cawood et al., 2012)

上部的盆地, 可以分为弧前、海沟和弧后盆地三种类型, 其中弧前、海沟具单一的锆石年龄峰, 而弧后盆地除具有单一的锆石年龄峰外, 还包含了更多古老的物质。屏边群沉积岩除新元古代单一峰值外, 还含有少量古老的碎屑物质。物源分析表明这些古老碎屑物质可能与新元古代碎屑物质具有不同的来源, 指示沉积环境更可能为弧后盆地。碎屑锆石有大量记录但同年龄岩石出露缺少的现象可能与聚敛板块边缘易形成大量岩浆岩但又不易保存的背景特征有关(Scholl and Von, 2009)。大陆岛弧包括弧前、弧间和弧后盆地(Bhatia, 1983), 而弧前、弧间以强烈变形和高级变质作用为特征。研究区样品的变质变形特征较弱, 且以火成岩物源为主, 也支持弧后盆地的构造环境。

Sun等(2009)认为扬子地块西缘新元古代沉积岩记录了大规模的大陆弧特征, 在~740 Ma转变为被动大陆边缘。作者的研究显示屏边地区的晚新元古代沉积岩在<752 Ma也显示出大陆弧的特征, 与扬子地块西缘构造背景相吻合。研究区寒武纪样品YN14-2-2具有与晚新元古代沉积岩相似的物源, 暗示研究区同扬子地块其他地区不同, 虽然发生构造环境转换, 但其物源区没有明显的改变。但是早寒武世沉积岩与下伏屏边群地层之间的底砾岩说明两者之间存在沉积间断, 只是间

断后早古生代的沉积物依然来自相同的源区,或者是下伏地层物质再循环的产物。

6 结论

(1) 滇东南屏边地区屏边群形成于新元古代晚期(<752 Ma),且也包含冰碛岩,其形成时代与震旦系相当。

(2) 震旦—寒武纪沉积岩具有相似的碎屑物质组成,主要由新元古代碎屑物组成,峰期年龄为 ~ 815 Ma,含少量古—中元古代碎屑物质。这些沉积岩的碎屑锆石年龄谱与扬子地块西缘和西南缘新元古代沉积岩的相似,且碎屑锆石的Hf同位素特征显示与扬子地块西缘具更密切的关系。这些都说明滇东南屏边地区属于扬子地块,扬子地块与华夏地块的分界线应在研究区的东南,而不可能是北部的师宗—弥勒—罗甸断裂。

(3) 屏边地区震旦纪沉积岩沉积于弧后盆地,暗示扬子地块西南缘(研究区)的与俯冲相关的沉积构造背景一直可以持续到 ~ 752 Ma以后。早寒武世沉积岩与下伏震旦纪之间存在沉积间断,但构造环境转换并没有造成物源区的明显改变。

致谢: 本研究得到国家自然科学基金重点项目(41330208)的资助。感谢张春辉同学共同参与了野外考察和采样。感谢武兵先生和杨涛博士在锆石U—Pb定年和Hf同位素分析中给予的帮助。

附表1, 2: <http://geology.nju.edu.cn/UserFiles/File/朱光磊-附表.pdf>

参考文献 (References)

曹仁关, 陆瑞芳. 1992. 滇东南屏边地区震旦系的划分与对比[J]. 云南地质, (4): 330–335.

陈洪德, 侯明才, 许效松, 等. 2006. 加里东期华南的盆地演化与层序格架[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 33(1): 1–8.

陈凌云, 张忠伟. 2003. 加里东期扬子板块与南华活动带在广西境内分界线的探讨[J]. 南方国土资源, (12): 8–19.

陈懋弘, 梁金城, 张桂林, 等. 2006. 加里东期扬子板块与华夏板块西南段分界线的岩相古地理制约[J]. 高校地质学报, 12(1): 111–122.

董云鹏, 朱炳泉, 常向阳, 等. 2002. 滇东师宗—弥勒带北段基性火山岩地球化学及其对华南大陆构造格局的制约[J]. 岩石学报, 18(1): 37–46.

高林志, 陈峻, 丁孝忠, 等. 2011. 湘东北岳阳地区冷家溪群和板

溪群凝灰岩 SHRIMP 锆石 U—Pb 年龄——对武陵运动的制约[J]. 地质通报, 31(7): 1001–1008.

广西省地质矿产局. 1985. 广西壮族自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.

郭令智, 施央申, 马瑞士. 1981. 板块构造与成矿作用[J]. 地质与勘探, 17(9): 1–6.

洪大卫, 谢锡林, 张季生. 2002. 试析杭州—诸广山—花山高 ϵ Nd 值花岗岩带的地质意义[J]. 地质通报, 21(6): 348–354.

胡肇荣, 邓国辉. 2009. 钦—杭接合带之构造特征[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 32(2): 114–122.

胡蓉, 李双庆, 王伟, 等. 2016. 扬子北部三峡地区南沱组冰碛岩的物源特征: 锆石年龄和地球化学证据[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 41(10): 1630–1654.

李宝龙, 季建清, 王丹丹, 等. 2012. 滇南新元古代的岩浆作用: 来自瑶山群深变质岩SHRIMP锆石U—Pb年代学证据[J]. 地质学报, 86(10): 1584–1591.

李献华, 李武显, 何斌. 2012. 华南陆块的形成与Rodinia超大陆聚合—裂解—观察、解释与检验[J]. 矿物岩石地球化学通报, 31(6): 543–559.

凌文黎, 高山. 2000. 扬子陆核古元古代晚期构造热事件与扬子克拉通演化[J]. 科学通报, 45(21): 2343–2348.

刘宝珺, 许效松, 潘杏南, 等. 1993. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社.

刘俊来, 唐渊, 宋志杰, 等. 2011. 滇西哀牢山构造带: 结构与演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(5): 1285–1303.

刘玉平, 叶霖, 李朝阳, 等. 2006. 滇东南发现新元古代岩浆岩: SHRIMP 锆石 U—Pb 年代学和岩石地球化学证据[J]. 岩石学报, 22(4): 916–926.

罗惠麟, 胡世学, 侯蜀光, 等. 2009. 滇东南寒武纪地层及三叶虫动物群[M]. 昆明: 云南科技出版社.

毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. 地质前缘, 11(1): 45–55.

毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境[J]. 高校地质学报, 14(4): 510–526.

舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7): 1035–1053.

吴浩若. 2000. 广西加里东运动构造古地理问题[J]. 古地理学报, 2(1): 70–76.

王鸿祯, 杨巍然, 刘本培. 1986. 华南地区古大陆边缘构造史[M]. 武汉: 武汉地质学院出版社.

王磊, 龙文国, 徐德明, 等. 2015. 云开地区变质基底锆石 U—Pb 年代学及对华夏地块Grenvillian事件的指示[J]. 地质前缘, 22(2): 25–40.

王丽娟, 于津海, 孙涛, 等. 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[J]. 科学通报, 53(14): 1680–1692.

- 王鹏鸣, 于津海, 孙涛, 等. 2012. 湘东新元古代沉积岩的地球化学和碎屑锆石年代学特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 28(12): 3841-3857.
- 夏斌. 1984. 广西龙胜元古代二种不同成因蛇绿岩岩石地球化学及侵位方式研[J]. 南京大学学报(自然科学版), (3): 554-566.
- 杨明桂, 梅勇文. 1997. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征[J]. 华南地质与矿产, 3: 52-59.
- 杨宗喜, 毛景文, 陈懋弘, 等. 2008. 云南个旧卡房砂卡岩型铜(锡)矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 24(8): 1937-1944.
- 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.
- 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.
- 张斌辉, 张林奎, 康建威. 2015. 云南马关—麻栗坡地区早寒武世地层的识别及意义[J]. 云南地质, 34(1): 333-339.
- 周雪瑶, 于津海, 王丽娟, 等. 2015. 粤西云开地区基底变质岩的组成和形成[J]. 岩石学报, 31(3): 855-882.
- 郑永飞. 2004. 新元古代超大陆构型中华南的位置[J]. 科学通报, 49(8): 715-717.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79.
- Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones [J]. *The Journal of Geology*, 91(6): 611-627.
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 148(1-2): 243-258.
- Black L P. 1978. The age of the mud tank carbonatite, strangways range, northern territory [J]. *J. Aust. Geol. Geophys.*, 3: 227-232.
- Cawood P A, Hawkesworth C J and Dhuime B. 2012. Detrital zircon record and tectonic setting [J]. *Geology*, 40(10): 875-878.
- Charvet J, Shu L, Shi Y, et al. 1996. The building of south China: collision of Yangzi and Cathaysia blocks, problems and tentative answers [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 13(3-5): 223-235.
- Chen X, Liu J, Fan W, et al. 2017. Neoproterozoic granitoids along the Ailao Shan-Red River belt: Zircon U-Pb geochronology Hf isotope analysis and tectonic implications [J]. *Precambrian Research*, 299: 244-263.
- Cheng Y and Mao J. 2010. Age and geochemistry of granites in Gejiu area Yunnan Province SW China: constraints on their petrogenesis and tectonic setting [J]. *Lithos*, 120(3): 258-276.
- Cheng Y, Spandler C, Mao J, et al. 2012. Granite gabbro and mafic microgranular enclaves in the Gejiu area Yunnan Province China: a case of two-stage mixing of crust-and mantle-derived magmas [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 164(4): 659-676.
- Cheng Y, Mao J and Spandler C. 2013. Petrogenesis and geodynamic implications of the Gejiu igneous complex in the western Cathaysia block South China [J]. *Lithos*, 175: 213-229.
- Dodson M H, Compston W, Williams I S, et al. 1988. A search for ancient detrital zircons in Zimbabwean sediments [J]. *Journal of the Geological Society*, 145(6): 977-983.
- Feng J, Mao J and Pei R. 2013. Ages and geochemistry of Laojunshan granites in southeastern Yunnan China: implications for W-Sn polymetallic ore deposits [J]. *Mineralogy and Petrology*, 107(4): 573-589.
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. 2002. Zircon chemistry and magma mixing SE China: in-situ analysis of Hf isotopes Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. *Lithos*, 61(3-4): 237-269.
- Guo L, Liu Y, Li C, et al. 2009. SHRIMP zircon U-Pb geochronology and litho-geochemistry of Caledonian Granites from the Laojunshan area southeastern Yunnan province China: Implications for the collision between the Yangtze and Cathaysia blocks [J]. *Geochemical Journal*, 43(2): 101-122.
- Hoffman P F. 1991. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out [J]. *Science*, 252 (5011): 1409-1412.
- Li X H, Zhao J X, McCulloch M T, et al. 1997. Geochemical and Sm-Nd isotopic study of Neoproterozoic ophiolites from southeastern China: petrogenesis and tectonic implications [J]. *Precambrian Research*, 81(1-2): 129-144.
- Li X H. 1999. U-Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze Block: timing of Neoproterozoic Jinning Orogeny in SE China and implications for Rodinia Assembly [J]. *Precambrian Research*, 97(1): 43-57.
- Li X H, Li Z X, Ge W, et al. 2003. Neoproterozoic granitoids in South China: crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma [J]. *Precambrian Research*, 122(1-4): 45-83.
- Li X H, Qi C, Liu Y, et al. 2005. Petrogenesis of the Neoproterozoic bimodal volcanic rocks along the western margin of the Yangtze Block: new constraints from Hf isotopes and Fe/Mn ratios [J]. *Chinese Science Bulletin*, 50(21): 2481-2486.
- Li X H, Li Z X, Sinclair J A, et al. 2006. Revisiting the "Yanbian Terrane": implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze Block South China [J]. *Precambrian Research*, 151(1-2): 14-30.
- Li L M, Lin S, Davis D W, et al. 2014. Geochronology and geochemistry of igneous rocks from the Kongling terrane: Implications for Mesoarchean to Paleoproterozoic crustal evolution of the Yangtze Block [J]. *Precambrian Research*, 255: 30-47.
- Li Z X, Li X H, 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(1-4): 85-109.
- Liu X, Gao S, Diwu C, et al. 2008. Precambrian crustal growth of Yangtze

- Craton as revealed by detrital zircon studies [J]. *American Journal of Science*, 308(4): 421–468.
- Ludwig K R. 2001. Isoplot/Ex rev. 2.49: a geochronological toolkit for Microsoft Excel [A]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1a: 58.
- Peng M, Wu Y, Wang J, et al. 2009. Paleoproterozoic mafic dyke from Kongling terrain in the Yangtze Craton and its implication [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(6): 1098–1104.
- Pi D H and Jiang S Y. 2016. U–Pb dating of zircons from tuff layer sandstone and tillite samples in the uppermost Liantuo Formation and the lowermost Nantuo Formation in Three Gorges area South China [J]. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 76(1): 103–109.
- Qiu Y M, Gao S, McNaughton N J, et al. 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 [J]. *Geology*, 28(1): 11–14.
- Scherer E, Münker C and Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium–hafnium clock [J]. *Science*, 293 (5530): 683–687.
- Scholl D W and Von Huene R. 2009. Implications of estimated magmatic additions and recycling losses at the subduction zones of accretionary (non-collisional) and collisional (suturing) orogens [J]. *Geological Society London Special Publications*, 318(1): 105–125.
- Sinclair J A. 2001. Petrology Geochemistry and Geochronology of the “Yanbian Ophiolite Suite” South China: Implications for the Western Extension of the Sibao Orogen [M]. Honours Thesis, The University of Western Australia, Perth (plus appendixes): 69.
- Sun W H, Zhou M F, Yan D P, et al. 2008. Provenance and tectonic setting of the Neoproterozoic Yanbian Group western Yangtze Block (SW China) [J]. *Precambrian Research*, 167(1–2): 213–236.
- Sun W H, Zhou M F, Gao J F, et al. 2009. Detrital zircon U–Pb geochronological and Lu–Hf isotopic constraints on the Precambrian magmatic and crustal evolution of the western Yangtze Block SW China [J]. *Precambrian Research*, 172(1–2): 99–126.
- Vervoort J D and Blichert-Toft J. 1999. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3): 533–556.
- Vermeesch P. 2004. How many grains are needed for a provenance study [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 224: 441–451
- Wan Y, Liu D, Wilde S A, et al. 2010. Evolution of the Yunkai Terrane South China: evidence from SHRIMP zircon U–Pb dating geochemistry and Nd isotope [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(2): 140–153.
- Wang C, Liang X, Foster D A, et al. 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 [J]. *Tectonophysics*, 677: 125–134.
- Wang D, Wang X L, Zhou J C, et al. 2013. Unraveling the Precambrian crustal evolution by Neoproterozoic conglomerates, Jiangnan orogen: U–Pb and Hf isotopes of detrital zircons [J]. *Precambrian Research*, 233, 223–236.
- Wang L J, Griffin W L, Yu J H, et al. 2010. Precambrian Crustal Evolution of the Yangtze Block Tracked by Detrital Zircons from Neoproterozoic Sedimentary Rocks [J]. *Precambrian Research*, 177(1–2): 131–141.
- Wang L J, Yu J H, Griffin W L, et al. 2012. Early crustal evolution in the western Yangtze Block: evidence from U–Pb and Lu–Hf isotopes on detrital zircons from sedimentary rocks [J]. *Precambrian Research*, 222: 368–385.
- Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, et al. 2006. LA–ICP–MS U–Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi South China: Implications for tectonic evolution [J]. *Precambrian Research*, 145(1–2): 111–130.
- Wang X L, Zhou J C, Griffin W A, et al. 2007. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks [J]. *Precambrian Research*, 159(1–2): 117–131.
- Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, et al. 2008. Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic mafic rocks from western Hunan South China: implications for petrogenesis and post-orogenic extension [J]. *Geological Magazine*, 145(2): 215–233.
- Wang Y J, Fan W M, Guo F, et al. 2003. Geochemistry of Mesozoic mafic rocks adjacent to the Chenzhou–Linwu fault, South China: Implications for the lithospheric boundary between the Yangtze and Cathaysia blocks [J]. *International Geology Review*, 45(3): 263–286
- Wang Y J, Zhang F, Fan W, et al. 2010. Tectonic setting of the South China Block in the early Paleozoic: Resolving intracontinental and ocean closure models from detrital zircon U–Pb geochronology [J]. *Tectonics*, 29(6): <https://doi.org/10.1029/2010TC002750>
- Wang Y, Fan W, Zhao G, et al. 2007. Zircon U–Pb geochronology of gneissic rocks in the Yunkai massif and its implications on the Caledonian event in the South China Block [J]. *Gondwana Research*, 12(4): 404–416.
- Wang Y, Zhang A, Fan W, et al. 2011. Kwangsiian 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 [J]. *Lithos*, 127(1–2): 239–260.
- Wang W, Zhou M F, Yan D P, et al. 2012. Depositional age provenance and tectonic setting of the Neoproterozoic Sibao Group southeastern Yangtze Block South China [J]. *Precambrian Research*, 192: 107–124.
- Wang W, Zhou M F, Zhao J H, et al. 2016. Neoproterozoic active continental margin in the southeastern Yangtze Block of South China: Evidence from the ca. 830–810 Ma sedimentary strata [J]. *Sedimentary Geology*, 342: 254–267.

- Wu W, Liu J, Chen X, et al. 2017. Zircon U–Pb ages Hf isotope data and tectonic implications of Early–Middle Triassic granitoids in the Ailaoshan high-grade metamorphic belt of Southeast Tibet [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 106(3): 875–897.
- Xu B, Jiang S Y, Wang R, et al. 2015. Late Cretaceous granites from the giant Dulong Sn-polymetallic ore district in Yunnan Province South China: Geochronology geochemistry mineral chemistry and Nd–Hf isotopic compositions [J]. *Lithos*, 218: 54–72.
- Yao J, Shu L and Santosh M. 2011. Detrital zircon U–Pb geochronology Hf-isotopes and geochemistry—new clues for the Precambrian crustal evolution of Cathaysia Block, South China [J]. *Gondwana Research*, 20: 553–567.
- Yu J H, O’Reilly S Y, Wang L, et al. 2008. Where was South China in the Rodinia supercontinent? evidence from U–Pb geochronology and Hf isotopes of detrital zircons [J]. *Precambrian Research*, 164(1–2): 1–15.
- Yu J H, Wang L, Griffin W L, et al. 2009. A Paleoproterozoic orogeny recorded in a long-lived cratonic remnant (Wuyishan terrane), eastern Cathaysia Block, China. *Precambrian Research*, 174: 347–363.
- Yu J H, O’Reilly S Y, Wang L, et al. 2010. Components and episodic growth of Precambrian crust in the Cathaysia Block South China: evidence from U–Pb ages and Hf isotopes of zircons in Neoproterozoic sediments [J]. *Precambrian Research*, 181(1–4): 97–114.
- Yin C, Lin S, Davis D W, et al. 2013. 2.1–1.85 Ga tectonic events in the Yangtze Block South China: petrological and geochronological evidence from the Kongling Complex and implications for the reconstruction of supercontinent Columbia [J]. *Lithos*, 182: 200–210.
- Zhang L, Ma C, Wang L, et al. 2011. Discovery of Paleoproterozoic rapakivi granite on the northern margin of the Yangtze block and its geological significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 56(3): 306–318.
- Zhang S, Jiang G, Zhang J, et al. 2005. U–Pb sensitive high-resolution ion microprobe ages from the Doushantuo Formation in south China: Constraints on late Neoproterozoic glaciations [J]. *Geology*, 33(6): 473–476.
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. 2006. Zircon isotope evidence for ≥ 3.5 Ga continental crust in the Yangtze craton of China [J]. *Precambrian Research*, 146(1–2): 16–34.
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. 2006b. Zircon U–Pb age and Hf–O isotope evidence for Paleoproterozoic metamorphic event in South China [J]. *Precambrian Research*, 151(3–4): 265–288.
- Zhang S, Jiang G and Han Y. 2008. The age of the Nantuo Formation and Nantuo glaciation in South China [J]. *Terra Nova*, 20(4): 289–294.
- Zhang Z and Wang Y. 2007. Crustal structure and contact relationship revealed from deep seismic sounding data in South China [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 165(1): 114–126.
- Zhao X F, Zhou M F, Li J, 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(1–2): 57–69.
- Zheng J, Griffin W L, O’Reilly S Y, et al. 2006. Widespread Archean basement beneath the Yangtze craton [J]. *Geology*, 34(6): 417–420.
- Zheng Y F, Zhang S B, Zhao Z F, et al. 2007. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China: implications for growth and reworking of continental crust [J]. *Lithos*, 96(1–2): 127–150.
- Zhou C, Tucker R, Xiao S, et al. 2004. New constraints on the ages of Neoproterozoic glaciations in south China [J]. *Geology*, 32(5): 437–440.
- Zhou M F, Yan D P, 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(1–2): 51–67.
- Zhou M F, Ma Y, Yan D P, 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(1–2): 19–38.
- Zhou X Y, Yu J H, O’Reilly S Y, et al. 2018. Component variation in the late Neoproterozoic to Cambrian sedimentary rocks of SW China–NE Vietnam and its tectonic significance [J]. *Precambrian Research*, 308: 92–110.
- Zhu W G, Zhong H, Deng H L, et al. 2006. SHRIMP zircon U–Pb age geochemistry and Nd–Sr isotopes of the Gaojiacun mafic–ultramafic intrusive complex Southwest China [J]. *International Geology Review*, 48(7): 650–668.