

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.01008

孙载波,段向东,朱才,周坤,刘和松,赵江泰,浦涛,赵毅,赵枫,2022. 三江南段勐海布朗山地区浅变质岩系碎屑锆石 U-Pb 定年及其构造意义. 沉积与特提斯地质, 42(4):613-625. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.01008

SUN Z B, DUAN X D, ZHU C, ZHOU K, LIU H S, ZHAO J T, PU T, ZHAO Y, ZHAO F, 2022. LA-ICP-MS U-Pb dating of detrital zircon from low-grade metamorphic rocks and its tectonic significances in the Bulangshan area, Menghai Country, Southern Sanjiang Tectonic Zone. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(4):613-625. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.01008

三江南段勐海布朗山地区浅变质岩系碎屑锆石 U-Pb 定年及其构造意义

孙载波^{1,2}, 段向东^{3*}, 朱才⁴, 周坤⁵, 刘和松⁶,
赵江泰¹, 浦涛¹, 赵毅¹, 赵枫⁷

(1. 云南省地质调查院, 云南 昆明 650216; 2. 自然资源部三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 云南 昆明 650051; 3. 云南省地质调查局, 云南 昆明 650061; 4. 云南省地质矿产勘查开发局第一地质大队, 云南 曲靖 655000; 5. 云南省核工业地质调查院, 云南 昆明 650106; 6. 云南大学地球科学学院, 云南 昆明 650500; 7. 内江师范学院地理与资源科学学院, 四川 内江 641100)

摘要:布朗山位于西南三江南段勐海地区,大面积出露澜沧岩群。澜沧岩群主要由低级变质作用的砂泥质岩石和少量变中基性火山岩组成,其形成时代、物质来源以及地质意义等一系列问题一直存在很多争议。本文选取该地区澜沧岩群上部层位不含变火山岩地层的浅变质岩开展碎屑锆石阴极发光图像分析和 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究,明显的环带和较高的 Th/U 比值表明 4 件浅变质岩的大部分碎屑锆石是岩浆成因。年代学结果显示,该套地层浅变质岩中的锆石记录了与罗迪尼亚、冈瓦纳超大陆拼合及原、古特提斯洋俯冲有关的岩浆作用信息(1182 ~ 1104 Ma, 593 ~ 560 Ma 和 378 ~ 328 Ma),其最年轻的碎屑锆石年龄(328 Ma),暗示该套地层形成不早于早石炭世,而非以往认为的新元古代。结合其岩石组合特征,推测该套晚古生代浅变质岩系可能为泥盆—石炭系南段组。在澜沧岩群的年龄频谱特征图中,年轻的 550 Ma 左右峰期年龄与特提斯喜马拉雅碎屑锆石年龄峰期相同,说明其物源主要为东冈瓦纳北缘的特提斯喜马拉雅构造带,与原特提斯洋和古特提斯洋相关。

关键词:澜沧岩群;浅变质岩系;碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年;晚古生代;勐海布朗山地区

中图分类号:P588.21;P597+3

文献标识码:A

LA-ICP-MS U-Pb dating of detrital zircon from low-grade metamorphic rocks and its tectonic significances in the Bulangshan area, Menghai Country, Southern Sanjiang Tectonic Zone

SUN Zaibo^{1,2}, DUAN Xiangdong^{3*}, ZHU Cai⁴, ZHOU Kun⁵, LIU Hesong⁶,
ZHAO Jiangtai¹, PU Tao¹, ZHAO Yi¹, ZHAO Feng⁷

(1. Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming 650216, China; 2. Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, MNR, Kunming 650051, China 3. Yunnan Geology Survey, Kunming

收稿日期: 2021-10-06; 改回日期: 2021-12-23 责任编辑: 黄春梅

作者简介: 孙载波(1981—),男,正高级工程师,从事区域地质调查与基础地质研究工作, E-mail: ynddyszb@163.com

通讯作者: 段向东(1968—),男,正高级工程师,长期从事地质矿产和基础地质管理工作, E-mail: 1553974947@qq.com

资助项目: 国家自然科学基金项目(92055314、42062005、92055027)、云南省自然资源厅地质勘查基金项目(D2017014)和中国地质调查局项目(DD20160345-02)联合资助

650061, China; 4. 1st Geological Party, Yunnan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Mineral Exploration and Development, Qujing 655000, China; 5. Geological Institute, Geological Bureau of Yunnan Nuclear Industry, Kunming 6500106, China; 6. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China; 7. School of Geography and Resource Science, Neijiang Normal University, Neijiang 641100, China)

Abstract: Bulangshan is located in the Menghai area, southern Sanjiang area of southwestern China, where Lancang Group is exposed. Lancang Group is mainly composed of sandy and muddy rocks with low-grade metamorphism and a small amount of intermediate and basic volcanic rocks. A series of issues about the Lancang Group such as the formation age, material sources and geological significance of the strata have been disputed for a long time. Detrital zircons from the low-grade metamorphic rocks without metavolcanic strata in the upper layer of the Lancang Group were carried out cathodoluminescence image analysis and LA-ICP-MS U-Pb chronology analysis. Clear oscillatory zoning and higher Th/U ratios indicate that most detrital zircons are magmatic origin. The chronological results show that the magmatism events recorded by the zircons were related to the supercontinent assembly of Rodinia and Gondwana and the subduction of the Proto- and Palaeo-Tethyan ocean (1182-1104 Ma, 593-560 Ma and 378-328 Ma), the youngest detrital zircon ages (328 Ma) suggesting that the strata didn't form before the Early Carboniferous, rather than the Neoproterozoic. Combined with the rock assemblage characteristics, it is speculated that the Late Paleozoic low-grade metamorphic rocks may be the Carboniferous Nanduan Formation. In the detrital zircon age spectrum of the Lancang Group, the young peak age is ~550 Ma, which is similar to the Tethys Himalayas. So the materials sources of the Lancang Group maybe mainly come from the northern margin of Eastern Gondwana, and have relationship with the Proto- and Paleoe-Tethys oceans.

Key words: Lancang Group; low-grade metamorphic rocks; detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb data; Late Paleozoic; Bulangshan, Menghai area

0 引言

三江南段位于青藏高原的东南缘,为东特提斯构造域重要组成部分。出露于该区的昌宁-孟连缝合带呈南北向条带状分布,代表了东特提斯主洋盆残余,完整地记录了特提斯洋威尔逊旋回的全过程,为特提斯构造演化方面研究提供了重要的窗口(刘本培等, 1993, 2002; 钟大赉等, 1998; Fang et al., 1994; Wu et al., 1993; 潘桂棠等, 2003, 2020; 李文昌等, 2010; Metcalfe, 2013; 王保弟等, 2018)。在缝合带的东侧分布着大面积的变质杂岩系和临沧花岗岩基,变质杂岩自北向南依次包括崇山岩群、澜沧岩群和大勐龙岩群(周维全和林文信, 1982; 卫管一等, 1984; 罗君烈, 1990; 翟明国等, 1990; 钟大赉, 1998),其中以澜沧岩群分布面积较大;临沧花岗岩基作为东南亚最大的一个复式岩基,与浅变质岩系之间为侵入接触关系,大量同位素年代学资料显示,该岩基主要侵入时代为中—晚三叠世(李兴林, 1996; 刘德利等, 2008; Wang et al., 2010; 孔会磊等, 2012; Dong et al., 2013; 赵枫等, 2018)。近年来,在临沧花岗岩基西侧新发现

(超)高压变质岩残块(李静等, 2015; 孙载波等, 2019, 2021; 彭智敏等, 2019)。对该构造带的研究,无疑对解决昌宁-孟连缝合带原-古特提斯洋复杂的构造演化,具有重要的地质意义。

目前有关澜沧岩群的研究主要集中在双江、澜沧一带,虽取得了一定进展(Fan et al., 2015; 王舫等, 2016; Xing et al., 2017; 毕丽莎等, 2018; Wang et al., 2019; 王慧宁等, 2019; 陈政宇, 2019),但也还存在诸多问题,例如澜沧岩群的进一步分解、各岩石组形成时代、物质来源以及所代表的大地构造意义等,还不是特别清楚。锆石具有很强的抗风化和很高的封闭温度,其内部的 U-Pb 同位素体系在较高的封闭温度下得以保存,尤其是碎屑锆石内部的年龄记录,限定沉积地层的时代,同时追踪地层的物源源区,是良好的指示矿物(Gehrels et al., 2003, 2011; Liu et al., 2015)。因此,本研究选取勐海布朗山地区澜沧岩群浅变质岩系为研究对象,对其代表性样品进行岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素测试,旨在约束该套浅变质地层顶底时代和物源特征,探讨滇西地区原特提斯沉积-建造演化。

1 区域地质背景

昌宁-孟连缝合带北起昌宁,经双江、铜厂街、老厂南至孟连,分隔着亲冈瓦纳的滇缅马地块(保山地块)和亲华夏大陆的印支地块(思茅地块),是三江特提斯构造域代表性的古特提斯闭合后主洋盆残余(钟大赉, 1998; Feng, 2002; Feng et al., 2004, 2008; Metcalfe, 2006, 2013a, 2013b, 2021; Sone et al., 2008; Wang et al., 2013; Fan et al., 2015; Wang et al., 2017; 耿全如等, 2021)(图 1a)。滇西三江构造域包括保山地块、澜沧群沉积岩、临沧复合岩基/云县-景洪火山岩带、思茅地块和华南地块。澜沧岩群位于澜沧江断裂以西,北起凤庆县,经云县、临沧、双江和澜沧县,向南至西双版纳州勐海县,呈长条状分布,并南延出国境(图 1b)。云南区测队(1965)创名于澜沧县,将其时代划为寒武纪。主要岩石为绢云石英片岩、绢云微晶片岩、千枚岩和板岩等,局部含有硅质岩夹层。原岩为含长石石英砂岩、长石石英砂岩、泥质砂岩、粉砂岩、

页岩、炭质页岩等,具复理石特征。总体上仅相当于浅-中等变质程度。前人将澜沧群进一步划分并保留了 5 个岩石地层单位,时代为晚元古代,自下而上为:南木岭组、勐井山组、曼来组、惠民组、南坑组。

勐海布朗山地区位于滇西昌宁-孟连缝合带东南端,往南延伸进入缅甸境内。1:20 万勐海幅、勐马幅区域地质调查报告(1979),共划分了 4 个组、6 个岩性段:阿克组下段(Pta^1)、上段(Pta^2),南勒组($Ptnl$),巴夜组下段(Ptb^1)、上段(Ptb^2)和南木岭组下段($Ptnm^1$)、上段($Ptnm^2$),根据昆明地校雷作淇(1982)在澜沧惠民一带惠民组上部层位采获的微古植物化石,将其时代置于元古代;1:25 万勐海幅(2012),根据相关研究资料,将该地区澜沧岩群划分了 4 个岩组:南木岭岩组(Pt_2n)、勐井山岩组(Pt_2m)、曼来岩组(Pt_2m)和惠民岩组(Pt_2h),根据区域地质资料,将其时代置于中元古代。近年来,云南省地质调查院(2020)^①在该地区开展了 1:5 万区域地质调查,通过详细野外地质填图和室内研究,

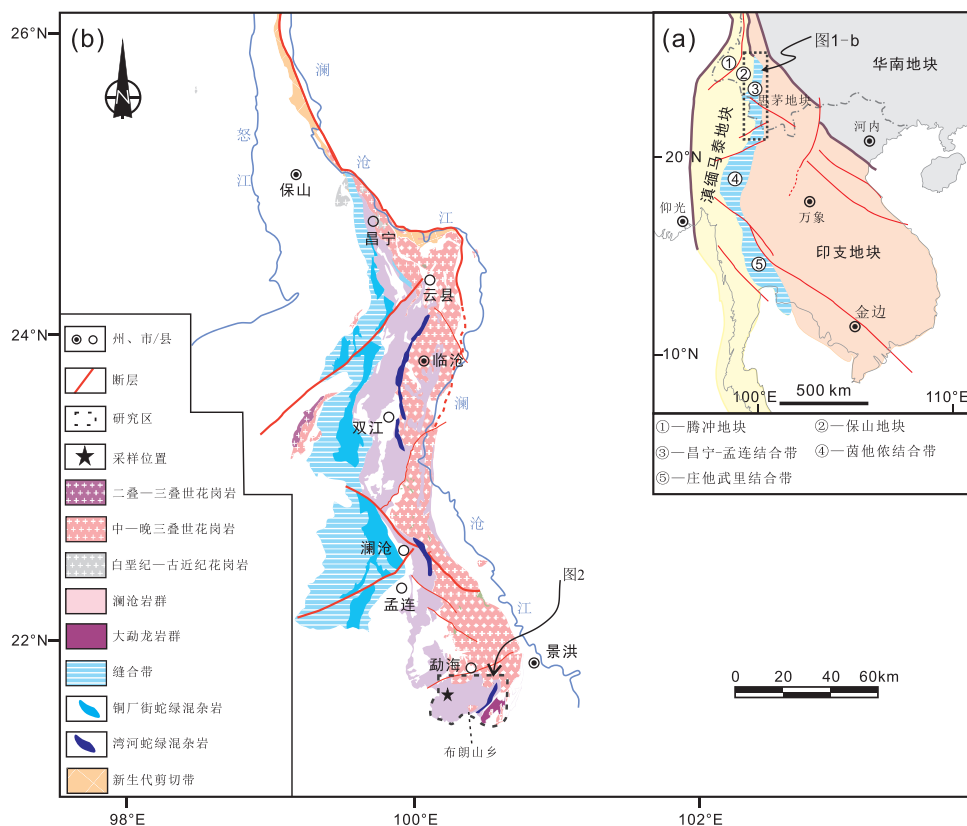


图 1 东南亚大地构造分布图(a;据 Sone and Metcalfe, 2008);三江保山和昌宁-孟连缝合带地质简图(b;据 Burchfiel and Chen, 2013; Li et al., 2015 修改)

Fig. 1 Tectonic framework of the southeastern Asia (a; modified from Sone and Metcalfe, 2008) and simplified geological map of the Baoshan and Changning-Menglian suture zone (b; modified from Burchfiel and Chen, 2013; Li et al., 2015)

发现该地区主要由大面积澜沧岩群、布朗山花岗岩和湾河蛇绿混杂岩组成,地质构造较为复杂。按岩石组合特征并结合同位素年代学资料,将该地区澜沧岩群分解为五个岩组:青白口纪南木岭岩组(Qbn)、南华纪勐井山岩组(Nhmi)、震旦一下奥陶统曼来岩组(Z-O₁ml)、中—上奥陶统惠民岩组(O_{2,3}h)和志留系南坑河岩组(Snk.)。由于该地区变火山岩夹层较少,对各套地层时代的约束带来了一定困难,目前仅在曼来岩组内获得2件变火山岩同位素年龄,分别为:472.5 Ma和465.5 Ma(孙载波等,2021),其他岩组均缺少相关年代学资料,本次所采集的4件浅变质岩样品均位于靠上部层位的南坑河岩组内,具体采样位置如图2所示。

2 岩石(相)学特征

样品 BLS-85-2 为片理化变质石英砂岩,灰白色,具变余中粗粒砂状碎屑结构,条痕条纹状定向构造(图3a),主要由石英(55%)、绢云母(15%)和长英质(25%)组成,含少量黑云母(5%)。石英呈微透镜状—浑圆状(图3b),趋于定向,微碎裂化;绢云母呈隐晶片状,微网纹状聚集;长英质矿物呈隐微粒状,微网纹状聚集。

样品 D0263-1-1 为片理化石英岩,灰白色,岩石具粒状变晶结构,片状构造,主要由石英(97%)组成,含少量绢云母(1%)和铁氧化物(2%),偶见锆石,石英颗粒粒度大小不等,具微弱的定向性,绢云

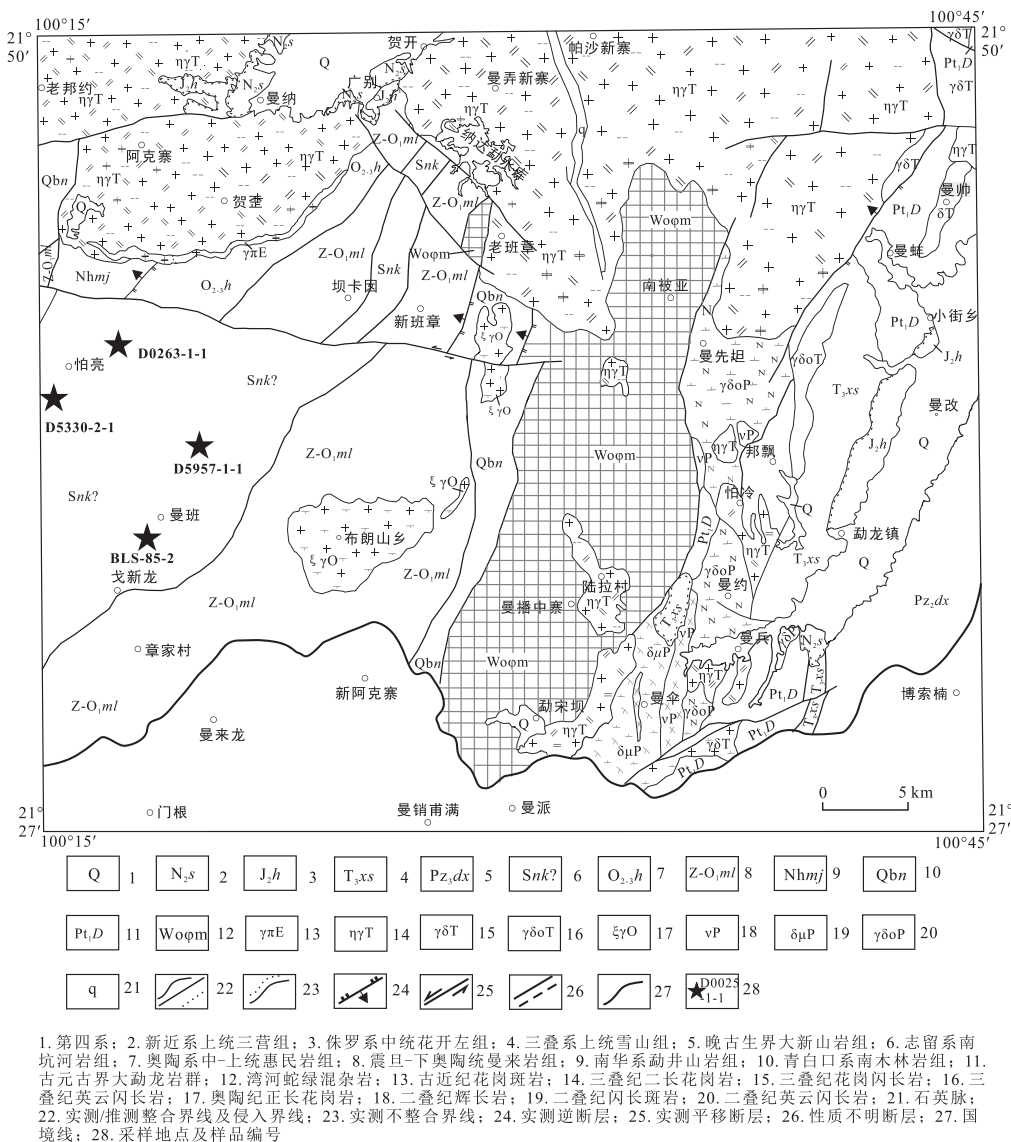
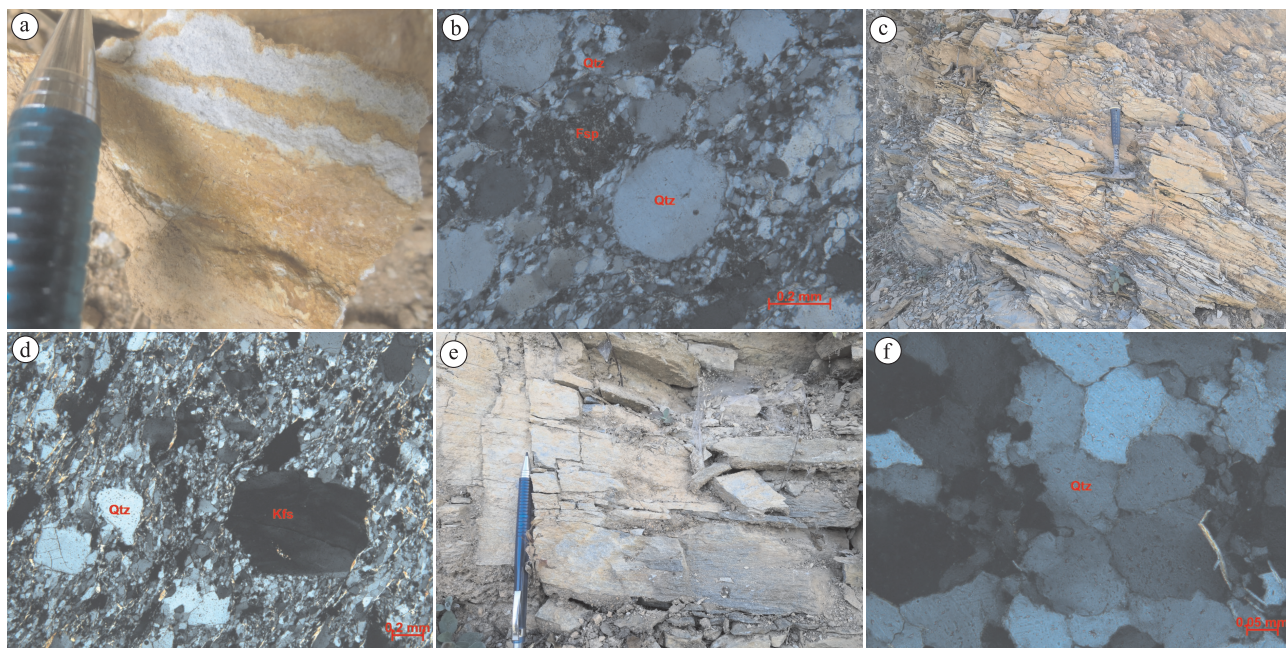


图2 研究区地质简图(据云南省地质调查院,2020^①修改)

Fig.2 Geological sketch map of the study area (modified from Yunnan Institute of Geological Survey,2020)



a. 浅灰白色浅变质石英砂岩野外宏观露头特征;b. 中粗粒石英颗粒呈微透镜状—浑圆状;c. 劈理化凝灰质球粒状石英岩野外宏观露头特征;d. 钾长石晶屑不同程度的保留半自形板状外形特征;e. 褶劈理化球粒状石英岩野外宏观露头特征;f. 石英砂屑局部形成的三联点平衡结构。Qtz—石英;Fsp—长石;Kfs—钾长石

图3 布朗山浅变质岩野外及显微结构照片

Fig. 3 Field and microstructure photos of low-grade metamorphic rocks in the Bulangshan area

母呈显微鳞片状,定向分布。

样品 D5330-2-1 为劈理化凝灰质球粒状石英砂岩,浅灰色,球粒状砂屑结构,块状构造(图 3c),主要由石英砂屑(68%)组成,含一定量的钾长石晶屑(20%)和少量蚀变斜长石晶屑(5%),由黏土矿物胶结,呈孔隙式胶结—颗粒支撑组构。其中部分粒度较粗(中粗粒)石英砂屑圆度较好,呈圆状,粒度较细(粗粉砂级)石英砂屑多呈不规则状。钾长石晶屑新鲜、干净,形状不规则,部分不同程度地保留原半自形板状外形特征(图 3d),粒径多在中粗砂范围内。斜长石晶屑已不同程度地绿帘石化,形状不规则,部分不同程度地保留原半自形板状外形特征,为凝灰碎屑。

样品 D5957-1-1 为褶劈理化球粒状石英砂岩,浅灰白色,球粒状砂屑结构,块状构造(图 3e),主要由石英砂屑(87%)组成,含少量的钾长石晶屑(3%)和斜长石晶屑(5%),由黏土矿物胶结,呈孔隙式胶结—颗粒支撑组构。其中部分粒度较粗(中粗粒)石英砂屑圆度较好,呈圆状,粒度较细(粗粉砂级)石英砂屑形状极不规则、新鲜、干净,局部构成三联点平衡结构(图 3f),可能为盆内沉积石英岩层破碎形成的碎屑岩。

3 分析测试方法

锆石由河北省廊坊诚信地质服务有限公司代为挑选制靶。首先将每件样品进行破碎、清洗、烘干和筛选,采用磁选和重液分离及双目镜下人工挑选,获得相对完整的锆石颗粒约 400 粒。锆石制靶后,进行锆石阴极发光照相(CL),以观察其内部结构。锆石阴极发光(CL)照相在武汉上谱分析科技有限责任公司完成,详细仪器参数见王伟等,2021。

样品 BLS-85-2、D0263-1-1、D5330-2-1 和 D5957-1-1 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 原位定年和微量元素含量在武汉上谱分析测试有限公司进行。详细的仪器参数和分析流程见 Zong et al. (2017)。实验分析过程中选取的激光束斑和频率分别为 30 μm 和 5 Hz。实验处理采用锆石标准 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。锆石年龄和微量元素分析采用软件 ICPMSDataCal 完成(Liu et al., 2010a, 2010b),U-Pb 年龄计算使用 Isoplot/Ex_ver3 (Ludwig, 2003)。所有分析结果见附表 1*。

* 数据资料请联系编辑部获取或登录网址 https://cjttsdz.ijournals.cn/ch/reader/issue_browser.aspx

主量元素、微量元素在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。主量元素采用日本理学 PrimusII X 射线荧光光谱仪(XRF)分析完成;微量元素利用 Agilent 7700e ICP-MS 等离子质谱仪分析完成。详细的实验步骤和流程参照王冬兵等(2021)。

锆石原位 Lu-Hf 同位素组成分析是在阴极发光(CL)图像和锆石 U-Pb 定年基础上进行的。锆石 Lu-Hf 同位素原位分析所用的测试仪器为 Neptune Plus 多接受器电感耦合等离子质谱仪(MC-ICP-MS),利用 193nm FX 激光器对锆石进行剥蚀,激光剥蚀的束斑直径为 32 μm ,能量密度为 10 ~ 11 J/cm²,频率为 8 ~ 10 Hz。详细仪器操作条件和分析方法同文献(Hu et al., 2012)。分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、同位素质量分馏校正)采用软件 ICPMSDataCal 完成(Griffin et al., 2000; Söderlund et al., 2004; Liu et al., 2010a, 2010b)。

4 锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 同位素分析

4.1 锆石结构

CL 阴极发光图下显示 4 件样品锆石大部分呈

它形浑圆状和椭圆形,磨圆度相对较好,表明其经历了一定距离的搬运磨蚀作用或经历了再旋回沉积作用,部分锆石具有中等磨圆且较自形,表明沉积物源较近。锆石颗粒长轴 100 ~ 150 μm ,短轴在 50 ~ 100 μm 之间,长宽比在 1:1 ~ 1:3 之间。锆石阴极发光图像显示,锆石具有不同类型的内部结构特征,部分具有清晰的岩浆振荡环带,少部分锆石环带较弱或无环带,表明物源的复杂性和多样性(图 4)。锆石的 U 含量变化于 14×10^{-6} ~ 1586×10^{-6} 之间,Th 的含量变化于 5×10^{-6} ~ 1651×10^{-6} 之间,Th/U 比值均大于 0.1(附表 2*)。结合锆石结构具有明显的振荡环带和 >0.1 的 Th/U 比值,表明澜沧群碎屑锆石具有典型的岩浆锆石特点。有 7 颗具有明亮的无震荡环带锆石具有明显低的 Th/U 比值(<0.1),暗示他们可能是变质锆石(Hoskin and Ireland 2000)。

4.2 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年

样品 BLS85-2-1 的 50 个分析点除 17 号点谐和度较低(81%)偏离谐和线外,其余都在 92% 以上,落在谐和线附近(图 5),年龄范围为 328 ~ 3203 Ma,最年轻 1 颗锆石年龄为 328 ± 4 Ma,其他锆石年龄均大于 430 Ma。综合的年龄频谱图显示(图 5a),

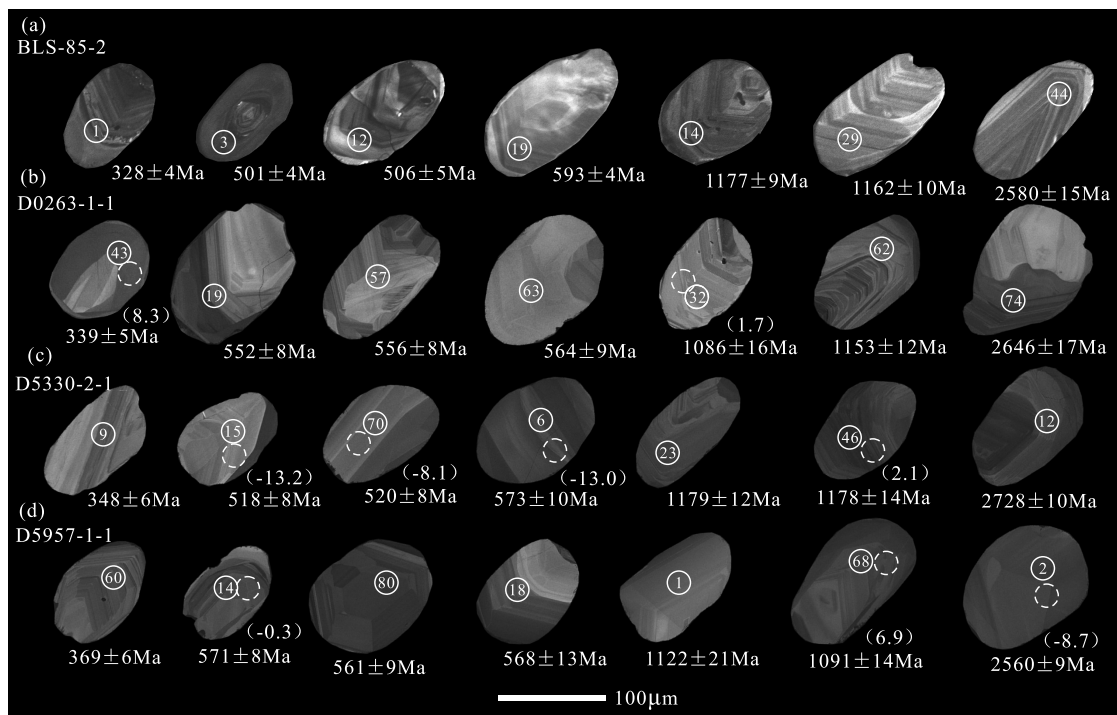


图 4 布朗山地区浅变质岩部分碎屑锆石阴极发光图像(实线圆圈和数字代表锆石 U-Pb 分析点和锆石编号,虚线圆圈代表 Hf 分析点,括号内数字为 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值)

Fig. 4 Cathodoluminescence images of detrital zircons from low-grade metamorphic rocks in the Bulangshan area

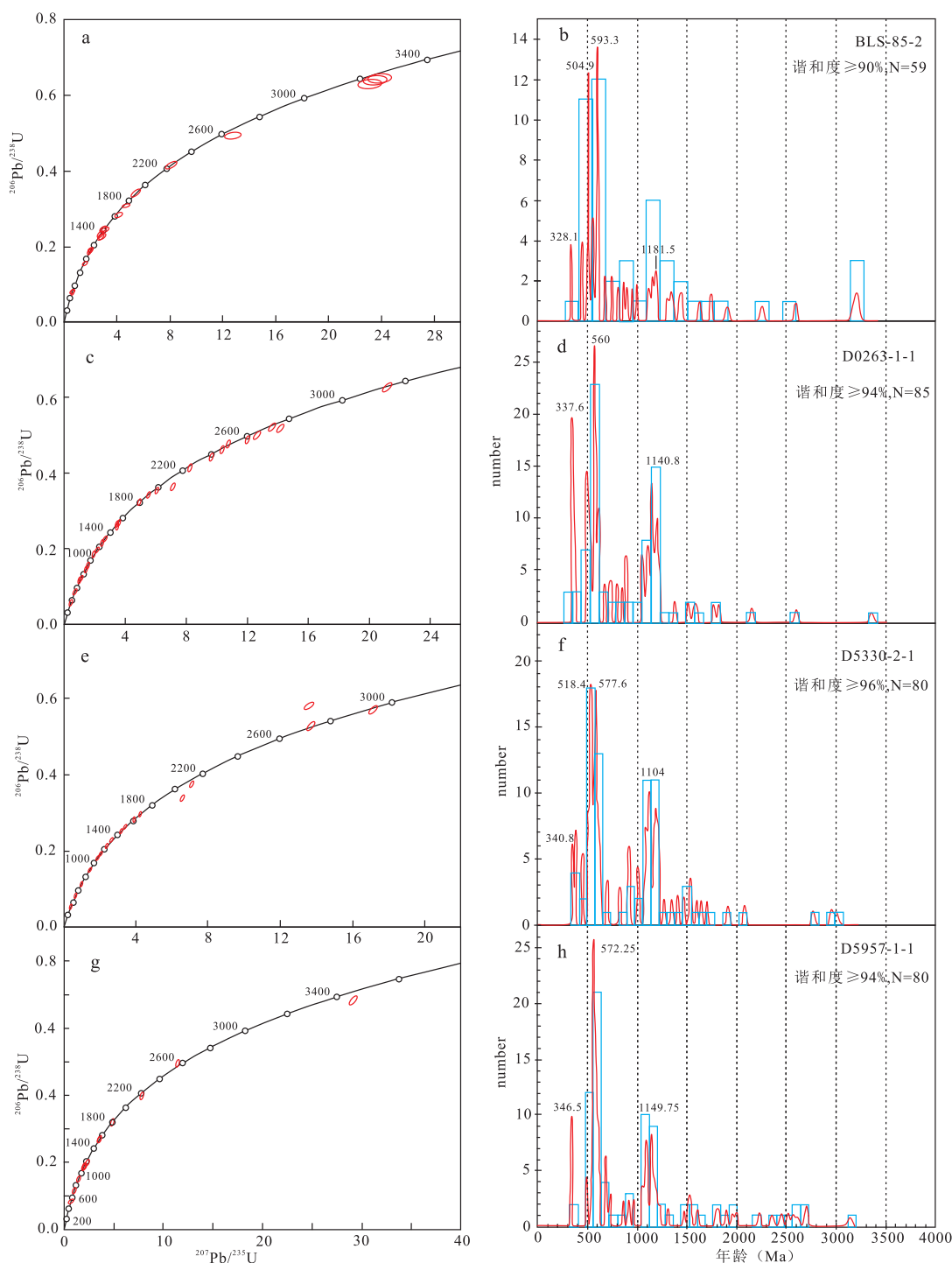


图5 布朗山地区浅变质岩碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图(a、c、e、g)和年龄频谱图(b、d、f、h)

Fig. 5 U-Pb age concordia (a、c、e、g) and frequency plots (b、d、f、h) of detrital zircon grains from the low-grade metamorphic rocks in the Bulangshan area

该样品存在 522 ~ 499 Ma、603 ~ 583 Ma 和 1190 ~ 1101 Ma 三个集中区,所有锆石的 Th/U 比值范围变化较大,为 0.10 ~ 7.23。

样品 D0263-1-1 的 85 个分析点谐和度都在 93% 以上,均落在谐和线附近,年龄范围为 3133 ~

336 Ma,除两颗最年轻的锆石(336 Ma、339 Ma)外,其他锆石年龄均大于 484 Ma。总体上,该样品所有年龄展示出两个主要年龄群,564 ~ 551 Ma 和 1185 ~ 1043 Ma(图 5a),所有锆石的 Th/U 比值范围变化较大,为 0.01 ~ 2.97。样品 D5330-2-1 的 80 个分析

结果谐和度都在 91% 以上,均落在谐和线附近,年龄范围为 341 ~ 2966 Ma,除 4 颗年轻锆石(341 Ma、348 Ma、359 Ma、371 Ma)外,其他锆石年龄均大于 448 Ma。所有年龄呈现出三个主要年龄群,520 ~ 496 Ma、582 ~ 562 Ma 和 1196 ~ 1059 Ma(图 5a),他们的 Th/U 比值范围变化较大,为 0.01 ~ 2.01。

样品 D5957-1-1 的 80 个分析点结果谐和度都在 93% 以上,均落在谐和线附近,年龄范围为 349 ~ 2599 Ma,除 4 颗年轻锆石(349 Ma、369 Ma、373 Ma、378 Ma)外,其他锆石年龄均大于 490 Ma。所有年龄结果显示两个主要的年龄群,579 ~ 561 Ma 和 1225 ~ 1047 Ma(图 5h),其 Th/U 比值变化范围变化较大,为 0.10 ~ 3.37。

4.3 锆石 Lu-Hf 同位素

对 3 件样品(D0263-1-1、D5330-2-1 和 D5957-1-1)中与 U-Pb 定年测点相同点或结构相似的部位,且谐和度大于 90% 的锆石开展 Hf 同位素测试,分析结果如附表 2 所示。所有锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 均小于 0.002,显示出 ^{177}Hf 的低放射成因。根据各自锆石 U-Pb 年龄值计算 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 、 t_{DM} 和 $t_{2\text{DM}}$ 值。

样品 D0263 的 20 个 Hf 同位素分析显示, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围为 0.281136 ~ 0.282834。其中碎屑锆石年龄 2503 ~ 336 Ma 的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -15.3 和 9.6,一阶段模式年龄 t_{DM} 值为 2988 ~ 570 Ma,二阶段模式年龄 $t_{2\text{DM}}$ 值为 3286 ~ 731 Ma。

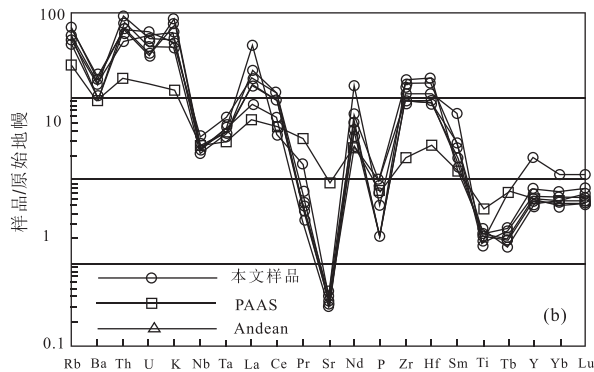
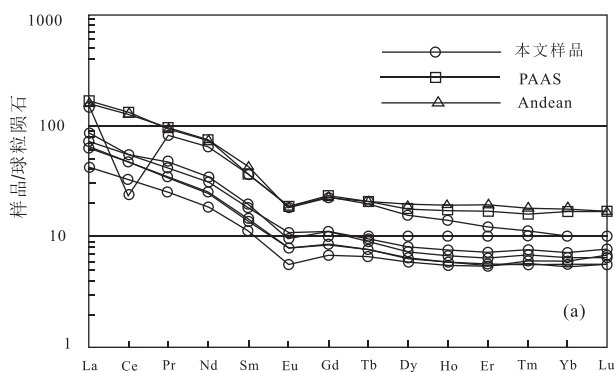
样品 D5330 的 20 个 Hf 同位素分析给出 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.281810 ~ 0.282353。碎屑锆石年龄 1579 ~ 359 Ma 的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -21.9 和 8.1,一阶段模式年龄 t_{DM} 值为 1983 ~ 868 Ma,二阶段模式年

龄 $t_{2\text{DM}}$ 值为 2864 ~ 1152 Ma。

对样品 D5957 进行了 20 个锆石点的 Hf 同位素分析,其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围为 0.280918 ~ 0.282469。其中年龄为 2560 ~ 346 Ma 的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -21.4 和 7.3,一阶段模式年龄 t_{DM} 值为 3169 ~ 1100 Ma,二阶段模式年龄 $t_{2\text{DM}}$ 值为 3538 ~ 1486 Ma。

5 岩石地球化学特征

全岩主量元素和微量元素分析结果见附表 3*。4 件样品 $w(\text{SiO}_2)$ 较高,变化于 92.30% ~ 94.49%, $w(\text{TiO}_2)$ 变化于 0.18% ~ 0.24%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 变化于 2.71% ~ 4.15%, $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 变化于 0.33% ~ 0.86%, $w(\text{FeO})$ 变化于 0.18% ~ 0.50%, $w(\text{MgO})$ 变化于 0.21% ~ 0.33%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 变化于 0.68% ~ 1.19%, $w(\text{MnO})$ (0 ~ 0.02%), $w(\text{CaO})$ (0.04% ~ 0.05%), $w(\text{Na}_2\text{O})$ (0.01% ~ 0.06%) 和 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ (0.01% ~ 0.03%) 含量较低,与岩石主要矿物为石英、钾长石和少量绢云母一致。4 件样品 LREE 富集 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 6.64 \sim 13.30$, HREE 相对亏损,分馏程度低 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.11 \sim 2.24$, Eu 负异常明显 $\delta\text{Eu} = 0.62 \sim 0.73$, 稀土配分曲线展示出轻稀土富集,重稀土相对平缓,与澳大利亚晚太古代沉积岩(PAAS, McLennan, 1989) 及活动大陆边缘和大陆岛弧杂砂岩稀土配分曲线一致(图 6a)。在微量元素蛛网图上,与 PAAS 相比, Th、U、K、Zr、Hf 等元素明显富集,而 Sr 元素亏损程度较高,其他元素则基本一致(图 6b)。



PAAS—后太古代澳大利亚沉积岩平均值(据 McLennan, 1989); Andean—安第斯型活动大陆边缘弧沉积岩平均值(据 McLennan, 1989)

图 6 布朗山地区浅变质岩稀土配分模式图和微量元素蛛网图(据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spider gram of the low-grade metamorphic rocks in the Bulangshan area (after Sun and McDonough, 1989)

锆石具有较强的抗风化能力,可以保存原岩的基本信息,长英质岩浆区形成的锆石具有明显的振荡环带,而基性岩浆源区的锆石成分环带明显。布朗山地区浅变质岩大部分碎屑锆石具有明显的成分振荡环带,表明其物源岩浆源区以长英质岩浆为主。全岩的 $V/(V+Ni)$ 比值是判别氧化还原环境的重要标志(Lewan, 1984),正常海相沉积物平均 $V/(V+Ni) \leq 0.5$,当 $V/(V+Ni)$ 比值大于 0.8 时,表明沉积岩固结时海水中含有一定量的 H_2S ,沉积物位于还原环境下沉淀(Hatch and Leventhal, 1992)。布朗山地区浅变质岩的全岩成分中 $V/(V+Ni)$ 在 0.81~0.87 之间,指示该套浅变质岩系是在较深且还原的海水条件下形成。综上所述,布朗山地区浅变质岩原岩均属海相沉积岩类。

6 讨论

6.1 沉积时限

有关澜沧岩群的沉积时代长期存在着争论,1965 年命名时,云南地质局区测队董致中、王自廉根据牙形刺、微古植物,将其时代归为寒武纪或早寒武世;部分学者根据古藻类和微古植物化石,将其划为古元古代(云南省地质矿产局, 1990);卫管一等(1984)将采集的古藻类和微古植物化石认定为古元古代,可能部分属于寒武纪。近年来,有学者对澜沧岩群内变火山岩和浅变质碎屑岩样品进行锆石同位素年代学研究,分别获得火山岩 482~454 Ma 的形成年龄和碎屑岩 465~452 Ma 的最小年龄峰值(Nie et al. 2015; Xing et al., 2017; 王舫等, 2017; 李灿峰, 2018; 徐云飞等, 2018; 陈政宇, 2019),其时代应为早古生代。关于该带内变火山岩的岩石地球化学特征也比较复杂,耿马大兴一带的变火山岩为一套大洋低钾拉斑玄武岩,具典型洋中脊玄武岩的特征(云南省地质调查院, 2017^②);栗义小黑江一带的蓝片岩,岩石地球化学显示典型洋岛玄武岩(Wang et al., 2019; Fan et al., 2015)特征;澜沧上允—惠民一带的变火山岩,显示的是与原特提斯洋俯冲相关的岛弧或活动大陆边缘的构造背景(Nie et al., 2015; Xing et al., 2017)。由于布朗山地区澜沧岩群变火山岩较少,仅在曼来岩组中获得 2 件变火山岩的锆石 U-Pb 年龄为 472.5 Ma 和 465.5 Ma(孙载波等, 2021),其他几套地层均缺乏可靠的古生物化石与同位素年代学证据。最年轻的碎屑锆石年龄在沉积岩中可以代表

地层的最老年龄(Andersen, 2005)。本次碎屑锆石的 U-Pb 测年研究样品全部采于靠上部层位的南坑河岩组内,4 件浅变质岩中最年轻的碎屑锆石年龄峰值为 ca. 328 Ma,说明该套地层的形成时代应该不早于 ca. 328 Ma,可能属于晚古生代南段组(DCn),并非志留系南坑河岩组(Snk.)。

6.2 盆地物源区

锆石 Lu-Hf 同位素研究结果表明,年龄在 2.4~2.6 Ga 的 4 颗锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 和二阶段模式年龄分别为 -1.7~-8.1 和 3.1~3.5 Ga,表明沉积物源的岩浆源区有古老地壳成分的加入。年龄集中在 1.2~1.9 Ga 的锆石(9 颗), $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 -5.4~8.7,指示物源的岩浆源区是新生地壳和古老地壳的混合源区。2 个主要年龄峰值 570 Ma 和 1140 Ma 碎屑锆石年龄变化于 580~489 Ma 和 1178~944 Ma, $\epsilon_{Hf}(t)$ 值变化于 -0.3~-21.9 和 -5.4~6.9,其中超过 80% 的颗粒为负值,表明在新元古代时期源区为古老地壳的组分(图 7)。

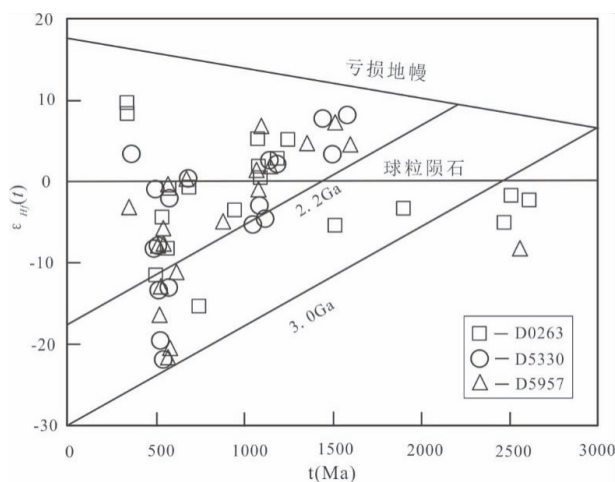


图 7 布朗山地区浅变质岩碎屑锆石年龄- $\epsilon_{Hf}(t)$ 图解
Fig. 7 U-Pb age (Ma) vs. $\epsilon_{Hf}(t)$ diagram of the low-grade metamorphic rocks in the Bulangshan area

碎屑锆石的 U-Pb 年龄频谱是讨论沉积物源和盆地分析的必要手段。本次研究选取布朗山地区 4 件浅变质岩石进行锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素测试。碎屑锆石年龄变化明显,图 4 显示碎屑锆石年龄主要集中分布于 590~560 Ma 和 1225~1043 Ma, 590~560 Ma 岩浆作用对应于东、西冈瓦纳等地块碰撞拼合的泛非事件, 1225~1043 Ma 的成岩活动与全球格林威尔造山期相当,暗示了澜沧群的物质来源主要为泛非期和罗迪尼亚超大陆聚合-裂解

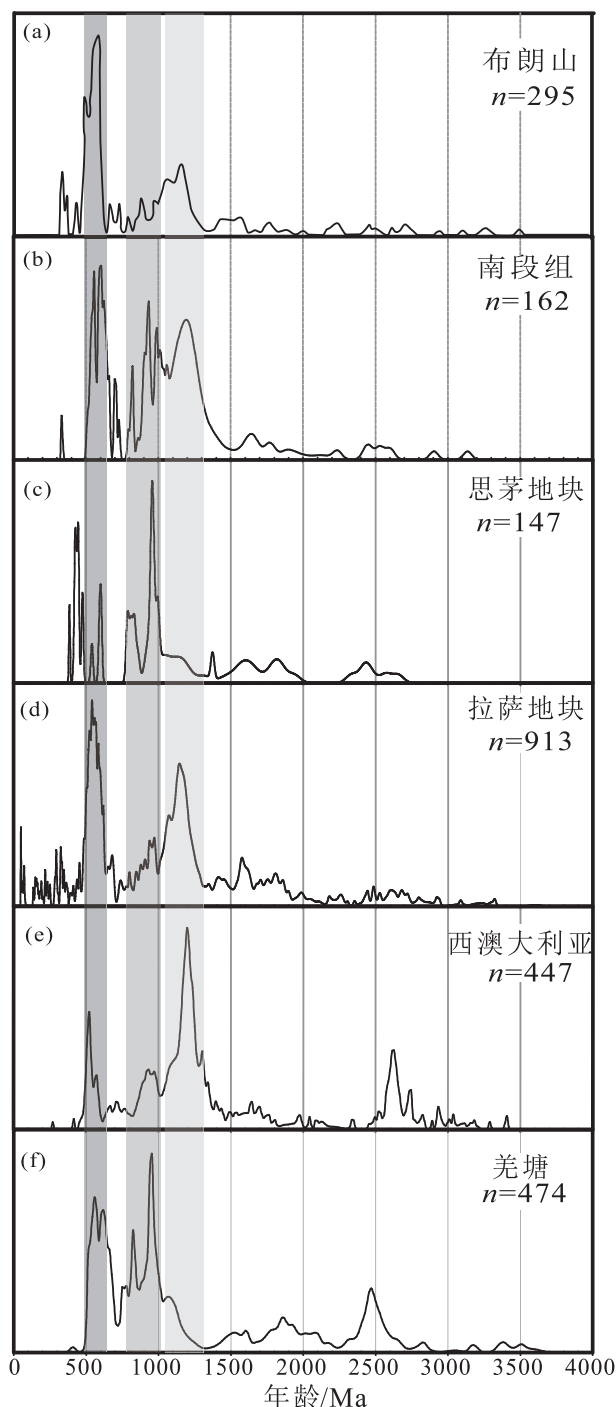


图8 布朗山地区浅变质岩(a)与临沧地块南段组(b)(刘桂春等, 2017)、思茅地块(c)(Wang et al., 2014)、拉萨地块(d)(Zhu et al., 2012)、西澳大利亚(e)(Cawood and Nemchin, 2000)、羌塘(f)(Zhu et al., 2012)碎屑锆石年龄谱系图

Fig. 8 Relative U-Pb age probability for detrital zircons of different area including the Bulangshan (a), Nanduan (b), Simao Block (c), Lhasa Block (d), West Australia (e) and Qiangtang (f)

过程中的岩浆活动。结合前人的研究,值得注意的是 590 ~ 560 Ma 和 1225 ~ 1043 Ma 的年龄峰值与羌塘地块的年龄模式一致,表明具有共同的源区。590 ~ 560 Ma 年龄峰值来自冈瓦纳的昆加造山带和印度北部造山带,1225 ~ 1043 Ma 的年龄峰值与南段组和保山地块的年龄模式一致,表明其物质源区为东冈瓦纳北缘(Liu et al., 2020)。

6.3 古地理位置

碎屑锆石样品采自临沧地体中澜沧群的变质地层,前人对临沧地体的归属存在一定的争议,究竟是来源于思茅地块的大陆弧还是一个独立的大陆地块,至今尚未有定论(Liu et al., 2020)。沉积体系中的碎屑锆石年龄频谱是重建大地构造背景、建立古大陆构造演化和判别不同大陆间亲缘关系的最有效方法之一(Li et al., 2018)。将布朗山地区碎屑锆石年龄频谱与思茅地块泥盆—石炭纪碎屑锆石年龄频谱对比(图8),发现两者存在较大的差异,布朗山地区碎屑锆石年龄峰值为 590 ~ 560 Ma 和 1225 ~ 1043 Ma,而思茅地块碎屑锆石年龄主要集中在 447 Ma 和 964 Ma(Wang et al., 2014),表明两者具有不同的物源供给,但思茅地块碎屑岩与滇西孟连芒信南段组建组剖面碎屑岩锆石年龄峰值(曾文涛等, 2017)较相似。

结合前人发表的碎屑锆石年龄和岩浆岩证据,拉萨、羌塘、保山和腾冲地块均具有东冈瓦纳北缘的亲性和,同时,伴随着原特提斯洋向南的俯冲作用,拉萨、羌塘、保山和腾冲地块发育了早古生代的岩浆活动(510 ~ 460 Ma)和寒武纪—奥陶纪存在的角度不整合(Ding et al., 2015; Dong et al., 2013; Hu et al., 2015; Wang et al., 2012; Zhao et al., 2014; Zhu et al., 2012; Li et al., 2014, 2015)。岛弧火山岩同时期在澜沧岩群中广泛发育(Nie et al., 2015; Xing et al., 2017)。综上所述,布朗山地区浅变质岩中碎屑锆石为异地来源并且物源比较复杂,可能来自东印度板块东冈瓦纳北缘特提斯喜马拉雅造山带,与原特提斯和古特提斯大洋演化相关。

7 结论

(1) 布朗山地区浅变质岩最年轻的碎屑锆石年龄为 328 Ma 左右,该年龄限定了其沉积时代应该不早于早石炭世,说明该套浅变质地层并非志留系南坑河岩组,可能为泥盆—石炭系南段组。

(2) 布朗山地区浅变质岩碎屑锆石主要是岩浆

成因的,2 个主要年龄区间分别为 576 ~ 489 Ma 和 1178 ~ 1052 Ma,对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 -21.9 ~ -0.3 和 -5.4 ~ 6.9。表明这两个阶段物质源区分别来自古老地壳物质的重熔和新生地壳组分的参与。

(3) 布朗山地区浅变质岩的物源可能来自东冈瓦纳北缘的特提斯喜马拉雅构造带。

致谢:河北廊坊诚信地质服务有限公司帮助完成锆石样品的挑选工作;武汉上谱分析测试有限公司完成年代学数据和主量、微量和稀土元素的分析测试工作;论文撰写过程中得到中国科学院广州地球化学研究所彭头平研究员的悉心指导;两名审稿专家和期刊编委对稿件的建设性意见和建议提升了论文质量,在此一并表示诚挚的感谢。

注释:

- ①云南省地质调查院,2020. 1:50000 曼各、小街、大勐龙、万纳兰、勐宋坝幅区域地质调查报告[R]
- ②云南省地质调查院,2017. 1:50000 香竹林、勐勇、勐撒、懂过等七幅区域地质矿产调查报告[R]

参考文献(References):

- Andersen T, 2005. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: Limiting conditions from statistics and numerical simulation [J]. *Chemical Geology*, 216(3-4): 249-270.
- Burchfiel B C, Chen Z L, 2013. Tectonics of the southeastern Tibetan plateau and its adjacent foreland [J]. *Boulder, Colorado: Geological Society of American*. 210: 1-164.
- Cawood P A, Nemchin A A, 2000. Provenance record of a rift basin: U-Pb ages of detrital zircons from the Perth Basin, Western Australia [J]. *Sedimentary Geology*, 134(3-4): 209-234.
- Ding H X, Zhang Z M, Dong X, et al., 2015. Cambrian ultrapotassic rhyolites from the Lhasa terrane, south Tibet: Evidence for Andean-type magmatism along the northern active margin of Gondwana [J]. *Gondwana Research*, 27(4): 1616-1629.
- Dong M L, Dong G C, Mo X X, et al., 2013. Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of granites in the Baoshan Block, Western Yunnan: Implications for Early Paleozoic evolution along the Gondwana margin [J]. *Lithos*, 179: 36-47.
- Fan W M, Wang Y J, Zhang Y H, et al., 2015. Paleotethyan subduction process revealed from Triassic blueschists in the Lancang tectonic belt of Southwest China [J]. *Tectonophysics*, 662: 95-108.
- Fang N Q, Liu B P, Feng Q L, et al., 1994. Late Palaeozoic and Triassic deep-water deposits and tectonic evolution of the Palaeotethys in the Changning-Menglian and Lancangjiang belts, southwestern Yunnan [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 9(4): 363-374.
- Feng Q L, 2002. Stratigraphy of volcanic rocks in the Changning-Menglian belt in Southwestern Yunnan, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20: 657-664.
- Feng Q L, Chongpan C, Dietrich H, et al., 2004. Long-lived Paleotethyan pelagic remnant inside Shan-Thai block: evidence from radiolarian biostratigraphy [J]. *Sciences in China (Series D: Earth Sciences)*, 47: 1113-1119.
- Feng Q L, Yang W Q, Shen S Y, et al., 2008. The Permian seamount stratigraphic sequence in Chiang Mai, North Thailand and its tectogeographic significance [J]. *Sciences in China (Series D: Earth Sciences)*, 51: 1768-1775.
- Gehrels G E, DeCelles P G, Martin A, et al., 2003. Initiation of the Himalayan orogen as an Early Paleozoic thin-skinned thrust belt [J]. *GSA Today*, 13(9): 4-9.
- Gehrels G E, Yin A, Wang X F, 2003. Detrital-zircon geochronology of the northeastern Tibetan plateau [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 115(7): 881-896.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al., 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133-147.
- Hatch J R, Leventhal J S., 1992. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark shale member of the Dennis Limestone, Wabaunsee Country, Kansan, USA [J]. *Chemical Geology*, 99: 65-82.
- Hoskin P W O, Ireland T R, 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator [J]. *Geology*, 28(7): 627-630.
- Hu Z C, Zhang W, Liu Y S, et al., 2015. "Wave" signal smoothing and mercury removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS analysis: application to lead isotope analysis [J]. *Analytical Chemistry*, 87: 1152-1157.
- Hu Z C, Liu Y S, Gao S, et al., 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 27(9): 1391-1399.
- Hu P Y, Zhai Q G, Jahn B, et al., 2015. Early Ordovician granites from the South Qiangtang terrane, northern Tibet: Implications for the early Paleozoic tectonic evolution along the Gondwanan proto-Tethyan margin [J]. *Lithos*, 220/223: 318-338.
- Lewan M D, 1984. Factors controlling the proportionality of vanadium to nickel in crude oils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 2231-2238.
- Li S Z, Zhao S J, Liu X, et al., 2018. Closure of the Proto-Tethys Ocean and Early Paleozoic amalgamation of microcontinental blocks in East Asia [J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 37-75.
- Li D P, Luo Z H, Chen Y L, et al., 2014. Deciphering the origin of the

- Tengchong block, west Yunnan; Evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopes of Carboniferous strata [J]. *Tectonophysics*, 2014; 614: 66–77.
- Li D P, Chen Y, Hou K J, et al., 2015. Detrital zircon record of Paleozoic and Mesozoic meta-sedimentary strata in the eastern part of the Baoshan block; Implications of their provenance and the tectonic evolution of the southeastern margin of the Tibetan plateau [J]. *Lithos*, 227: 194–204.
- Lin J, Liu Y S, Yang Y H, et al., 2016. Calibration and correction of LA-ICP-MS and LA-ICP-MS analyses for element contents and isotopic ratios. *Solid Earth Sciences*, 1: 5–27.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al., 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 51: 537–571.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al., 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546.
- Liu B B, Peng T P, Fan W F, et al., 2020. Tectonic Evolution and Paleoposition of the Baoshan and Lincang Blocks of West Yunnan During the Paleozoic [J]. *Tectonics*, 36(7): 1175–1187.
- Liu P J, Li X H, Chen S M, et al., 2015. New SIMS U-Pb zircon and its constraint on the beginning of the Nantuo glaciation [J]. *Science Bulletin*, 60(10): 958–963.
- McLennan S M, 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks; Influence of provenance and sedimentary processes. In: Lipin B. R. and McKay G. A. (eds.), *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements* [J]. *Reviews in Mineralogy*, 21: 169–200.
- Metcalfe I, 2006. Paleozoic and Mesozoic tectonic evolution and palaeogeography of East Asian crustal fragments; the Korean Peninsula in context [J]. *Gondwana Research*, 9: 24–46.
- Metcalfe I, 2013a. Gondwana dispersion and Asian accretion; Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1–33.
- Metcalfe I, 2013b. Tectonic evolution of the Malay Peninsula [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76: 195–213.
- Metcalfe I, 2021. Multiple Tethyan ocean basins and orogenic belts in Asia [J]. *Gondwana Research*, 100: 87–130.
- Nie X M, Feng Q L, Qian X, et al., 2015. Magmatic record of Prototethyan evolution in SW Yunnan, China; Geochemical, zircon U-Pb geochronological and Lu-Hf isotopic evidence from the Huimin metavolcanic rocks in the southern Lancangjiang zone [J]. *Gondwana Research*, 28(2): 757–768.
- Sun S S, McDonough W F, 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D. (Ed.), *Magmatism in Ocean Basins*. Special Publication, Geological Society, London, 42, 313–345.
- Sone M, Metcalfe I, 2008. Parallel Tethyan Sutures in mainland SE Asia; New insights for Palaeo-Tethys closure and implications for the Indosinian orogeny [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(2–3): 166–179.
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, et al., 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3–4): 311–324.
- Wang F, Liu F L, Schert H P, et al., 2019. Paleo-Tethyan tectonic evolution of Lancangjiang metamorphic complex; Evidence from SHRIMP U-Pb zircon dating and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotope geochronology of blueschists in Xiaoheijiang-Xiayun area, Southeastern Tibetan Plateau [J]. *Gondwana Research*, 65: 142–155.
- Wang X X, Zhang J J, Santosh M, et al., 2012. Andean-type orogeny in the Himalayas of south Tibet; implications for early Paleozoic tectonics along the Indian margin of Gondwana [J]. *Lithos*, 154: 248–262.
- Wang Y J, Zhang A M, Fan W M, et al., 2010. Petrogenesis of Late Triassic post-collisional basaltic rocks of the Lancangjiang tectonic zone, Southwest China, and tectonic implications for the evolution of the eastern Paleotethys; geochronological and geochemical constraints [J]. *Lithos*, 119: 553–568.
- Wang Y J, Fan W M, Zhang G W, et al., 2013. Phanerozoic tectonics of the South China Block; key observations and controversies [J]. *Gondwana Research*, 23: 1273–1305.
- Wang Q F, Deng J, Li C, et al., 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(2): 438–448.
- Weis D, Kiffer B, Hanano D, et al., 2007. Hf isotope compositions of U. S. Geological Survey reference materials [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 8: Q06006.
- Wu G Y, 1993. Late Paleozoic Tectonic Framework and Paleotethyan Evolution in Western Yunnan, China [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2(2): 129–140.
- Xing X W, Wang Y J, Cawood P A, et al., 2017. Early Paleozoic accretionary orogenesis along northern margin of Gondwana constrained by high-Mg metaigneous rocks, SW Yunnan. *International Journal of Earth Sciences*, 106(5): 1469–1486.
- Yang T N, Zhang H R, Liu Y X, et al., 2011. Permo-Triassic arc magmatism in Central Tibet; evidence from zircon U-Pb geochronology, Hf isotopes, rare earth elements, and bulk geochemistry [J]. *Chemical Geology*, 284: 270–282.
- Zhao S W, Lai S C, Qin J F, et al., 2014. Zircon U-Pb ages, geochemistry, and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic compositions of the Pinghe pluton, Southwest China; implications for the evolution of the early Palaeozoic Proto-Tethys in Southeast Asia [J]. *International Geology Review*, 56(7): 885–904.
- Zhang R Y, Cong B L, Maruyama S, et al., 1993. Metamorphism and tectonic evolution of the Lancang paired metamorphic belts, southwestern China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 11(4): 605–619.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al., 2012. Cambrian bimodal volcanism in the Lhasa Terrane, southern Tibet; Record of an early

- Paleozoic Ande-an-type magmatic arc in the Australian pro-Tethyan margin[J]. *Chemical Geology*, 328: 290–308.
- Zong K Q, Klemm R, Yuan Y, et al., 2017. The assembly of Rodinia: The correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB) [J]. *Precambrian Research*, 290: 32–48.
- 毕丽莎, 梁晓, 王根厚, 等, 2018. 滇西澜沧江构造带中—南段澜沧岩群变质变形期次及 Ar-Ar 年代学约束[J]. *地球科学*, 43(9): 3252–3266.
- 陈政宇, 2019. 昌宁—孟连带澜沧岩群时代厘定[D]. 硕士学位论文. 昆明: 昆明理工大学, 17–30.
- 耿全如, 李文昌, 王立全, 等, 2021. 特提斯中西段古生代洋陆格局与构造演化[J]. *沉积与特提斯地质*, 41(2): 297–315.
- 孔会磊, 董国臣, 莫宣学, 等, 2012. 滇西三江地区临沧花岗岩的岩石成因——地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束[J]. *岩石学报*, 28(5): 1438–1452.
- 雷作淇, 1982. 云南澜沧群微古植物群的发现及其意义[J]. *地层学杂志*, (4): 281–285.
- 李文昌, 潘桂棠, 候增谦, 等, 2010. 西南“三江”多岛弧盆—碰撞造山成矿理论与勘查技术[M]. 北京: 地质出版社, 92–104.
- 李静, 孙载波, 徐桂香, 等, 2015. 滇西双江县勐库地区榴闪岩的发现与厘定[J]. *矿物学报*, 35(4): 421–424.
- 刘本培, 冯庆来, 方念乔, 等, 1993. 滇西南昌宁—孟连带和澜沧江古特提斯多岛洋构造演化[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 18(5): 529–539.
- 刘本培, 冯庆来, Chonglakmani C, 等, 2002. 滇西古特提斯多岛洋的结构及其南北延伸[J]. *地学前缘*, 9(3): 161–171.
- 李兴林, 1996. 临沧复式花岗岩基的基本特征及形成环境的研究[J]. *云南地质*, 8(3/4): 205–212.
- 李灿峰, 2018. 滇西澜沧惠民地区惠民岩组岩石地球化学特征及构造环境[D]. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学, 31–34.
- 刘德利, 刘继顺, 张彩华, 等, 2008. 滇西南澜沧江结合的带北段云县花岗岩的地质特征及形成环境[J]. *岩石矿物学杂志*, 27(1): 23–31.
- 罗君烈, 1990. 滇西特提斯造山带的演化及基本特征[J]. *云南地质*, 9(4): 247–290.
- 潘桂棠, 徐强, 候增谦, 等, 2003. 西南“三江”多岛弧造山过程、成矿系统与资源评价[M]. 北京: 地质出版社, 1–420.
- 潘桂棠, 王立全, 耿全如, 等, 2020. 班公湖—双湖—怒江—昌宁—孟连对接带时空结构——特提斯大洋地质及演化问题[J]. *沉积与特提斯地质*, 40(3): 1–19.
- 彭智敏, 王国芝, 王保弟, 等, 2019. 云南邦丙澜沧岩群中发现蓝闪石榴岩[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 46(5): 639–640.
- 孙载波, 胡绍斌, 周坤, 等, 2019. 滇西澜沧谦迈地区榴辉岩岩石学、矿物学特征及变质演化 p - T 轨迹[J]. *地质通报*, 38(7): 1105–1115.
- 孙载波, 周坤, 周家喜, 等, 2021. 三江南段勐海布朗山地区早古生代变火成岩岩石成因及其大地构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 45(3): 958–963.
- 王舫, 刘福来, 冀磊, 等, 2016. 澜沧江杂岩带小黑江—上允地区蓝片岩的成因及变质演化[J]. *岩石矿物学杂志*, 35(5): 804–820.
- 王舫, 刘福来, 冀磊, 等, 2017. 澜沧江杂岩带澜沧群浅变质岩系碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其构造意义[J]. *岩石学报*, 30(9): 2725–2738.
- 王保弟, 王立全, 王冬兵, 等, 2018. 三江昌宁—孟连带原—古特提斯构造演化[J]. *地球科学*, 43(8): 2527–2550.
- 王慧宁, 刘福来, 冀磊, 等, 2019. 昌宁—孟连杂岩带澜沧岩群的岩石学、地球化学和变质演化及其对古特提斯构造演化的启示[J]. *岩石学报*, 35(6): 1773–1799.
- 卫管一, 冯国荣, 罗再文, 等, 1984. 滇西澜沧群、崇山群地层层序及其火山作用和变质作用[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*(2): 12–20.
- 徐云飞, 丛峰, 刘军平, 等, 2018. 滇西澜沧岩群碎屑锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 38(2): 103–112.
- 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.
- 赵靖, 钟大赉, 王毅, 1994. 滇西澜沧变质带变质作用和变形作用的关系[J]. *岩石学报*, 10(1): 27–40.
- 赵枫, 李龚健, 张鹏飞, 等, 2018. 西南三江临沧花岗岩基成因与构造启示: 元素地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束[J]. *岩石学报*, 34(5): 1397–1412.
- 曾文涛, 刘桂春, 冯庆来, 等, 2017. 临沧地体亲缘性及南段组物源——来自泥盆纪—石炭纪南段组碎屑锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. *地质通报*, 36(7): 1175–1187.
- 翟明国, 从柏林, 乔广生, 等, 1990. 中国滇西南造山带变质岩的 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素年代学[J]. *岩石学报*, 6(4): 1–11.
- 周维全, 林文信, 1982. 澜沧江变质带南段蓝闪石片岩特征[J]. *中国区域地质志*(2): 76–85.
- 赵靖, 钟大赉, 王毅, 1994. 滇西澜沧变质带变质作用和变形作用的关系[J]. *岩石学报*, 10(1): 27–40.
- 钟大赉, 1998. 川滇西部古特提斯造山带[M]. 北京: 科学出版社, 1–231.