

# 滇西双江县清平地区斜长角闪岩年龄与地球化学特征及其对昌宁—孟连洋演化的制约

彭智敏<sup>1</sup>, 关俊雷<sup>1</sup>, 付于真<sup>2</sup>, 胡金锋<sup>3</sup>, 张璋<sup>1</sup>, 王国芝<sup>2</sup>, 任飞<sup>1</sup>, 张向飞<sup>1</sup>

PENG Zhimin<sup>1</sup>, GUAN Junlei<sup>1</sup>, FU Yuzhen<sup>2</sup>, HU Jinfeng<sup>3</sup>, ZHANG Zhang<sup>1</sup>, WANG Guozhi<sup>2</sup>, REN Fei<sup>1</sup>, ZHANG Xiangfei<sup>1</sup>

1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081;

2. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059;

3. 核工业二八〇研究所, 四川 广汉 618300

1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China;

2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

3. Institute No.280, CNNC, Guanghan 618300, Sichuan, China

**摘要:**近年,昌宁—孟连结合带已获得了大量早古生代残余洋壳年龄及与之对应的弧岩浆记录,但晚古生代大洋演化相关的记录较少,缺乏高精度的年代学数据,制约了对昌宁—孟连洋演化的认识。通过对双江县清平地区2件斜长角闪岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年研究,获得<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄加权平均值分别为 442±3 Ma、410±6 Ma、365±6 Ma,其中 410±6 Ma 为继承年龄,其余代表岩浆结晶年龄。斜长角闪岩样品地球化学特征显示,SiO<sub>2</sub>含量为 47.28%~48.18%,平均为 47.90%,K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 值小于 1,具有富钠贫钾的特征。轻稀土元素富集,重稀土元素亏损,富集大离子亲石元素 Ba,高场强元素 Nb、Ta 无明显的亏损,Ti、Zr 呈弱的负异常,总体特征具富集型洋中脊玄武岩的性质。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t = 0.705288 \sim 0.705750$ ,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t = 0.512373 \sim 0.512424$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为 4.01~5.00,平均值 4.72。Sr-Nd-Pb 同位素组成表明,斜长角闪岩岩浆主要来源于富集型地幔(EMII)并具 DUPAL 异常的特征。综合分析认为,清平地区在 442~365 Ma 发育洋盆,表明昌宁—孟连结合带经历了原—古特提斯洋的演化过程。

**关键词:**斜长角闪岩;原—古特提斯;锆石 U-Pb 年龄;Sr-Nd-Pb 同位素;昌宁—孟连结合带

**中图分类号:**P588.12;P597<sup>+</sup>.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)11-1905-15

**Peng Z M, Guan J L, Fu Y Z, Hu J F, Zhang Z, Wang G Z, Ren F, Zhang X F. The evolution of Changning–Menglian Ocean in the Qingping area of Shuangjiang County, western Yunnan: Constraints from age and geochemistry of plagioclase amphibolite. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(11): 1905–1919**

**Abstract:** A large number of data about ages of Early Paleozoic relict oceanic crust and corresponding arc magma records of the Changning–Menglian suture zone in recent years have been obtained. However, there are relatively few records related to the Late Paleozoic oceanic evolution and lack of high-precision chronological data, which severely constrains the understanding of the Changning–Menglian oceanic evolution. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of two plagioclase amphibolite samples in the Qingping region of Shuangjiang County yields the weighted average ages of 442±3 Ma, 410±6 Ma and 365±6 Ma respectively, of which 410±6 Ma is the inheritance age, and the rest represents the magmatic crystallization age. Geochemical characteristics show that the content of SiO<sub>2</sub> is 47.28%~48.18% (sample D6164,  $t=365$  Ma), averaging 47.90%, and the ratio of K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O is less than 1, rich in sodium and poor

收稿日期:2021-06-09;修订日期:2021-09-22

资助项目:国家自然科学基金项目《特提斯构造域地质构造编图及区域对比研究》(批准号:92055314)和中国地质调查局项目《三江造山带昌都—澜沧地区区域地质调查》(编号:DD20190053)、《中国大地构造演化和国际亚洲大地构造图编制》(编号:DD20190363)

作者简介:彭智敏(1978-),男,高级工程师,从事区域地质调查工作。E-mail:pzm20022002@163.com

in potassium. It is characterized by LREE enrichment, HREE depletion, enrichment of large ion lithophile element Ba, no obvious loss of high field strength elements of Nb and Ta, weak negative anomalies of Ti and Zr, indicating the overall characteristics of E-MORB. Sr-Nd-Pb isotopic compositions,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t = 0.705288 \sim 0.705750$ ,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t = 0.512373 \sim 0.512424$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 4.01 \sim 5.00$ , averaging 4.72, indicate that the magma source of amphibolite was mainly derived from the enriched mantle (EMII) with DUPAL anomaly. The comprehensive analysis shows that the ocean basin was developed in the period of 442~365 Ma in the Qingping area, and the Changning Menglian suture zone once experienced the evolution of Proto-Paleo Tethys Ocean.

**Key words:** amphibolite; Proto-Paleo Tethys Ocean; zircon U-Pb age; Sr-Nd-Pb isotopes; Changning-Menglian suture zone

“三江”地区位于青藏高原东南缘,大地构造位置处于特提斯构造域,一直以来都是国内外地质学家关注的热点地区,是研究原-古特提斯构造演化的窗口。众多研究者认为,“三江地区”存在多岛洋构造-古地理格局,昌宁-孟连结合带代表了特提斯主大洋的位置<sup>[1-14]</sup>。昌宁-孟连结合带位于西侧保山地块与东侧临沧-勐海岩浆弧之间,向北延伸被碧罗雪山-崇山变质地块切割,向北西可与龙木错-双湖结合带相连,向南可与泰国清迈结合带相连,一直延伸到马来西亚的文冬-劳勿结合带(图1-a)。以往的研究认为,昌宁-孟连结合带代表的是晚古生代主洋盆<sup>[1-2, 5-7, 15-16]</sup>。近年在铜厂街、南汀河、湾河、清平蛇绿混杂岩中均发现了原特提斯洋壳的物质记录<sup>[17-20]</sup>,以及与原特提斯洋演化相关的岩浆事件<sup>[21-25]</sup>,证实昌宁-孟连结合带存在早古生代洋盆的记录。晚古生代洋盆发育的证据主要来源于区域地质调查报告数据(斜长角闪片岩锆石 U-Pb 年龄)、放射虫硅质岩时代等<sup>①②</sup>,缺少精确的洋壳年代学数据记录,制约了对昌宁-孟连洋演化的认识。

近年,随着地质调查工作的深入,在滇西清平蛇绿混杂岩中发现了出露较好的斜长角闪岩,本文通过对斜长角闪岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素研究,探讨其源区特征及构造背景,为昌宁-孟连洋古生代洋盆演化提供重要信息,对进一步探讨滇西特提斯演化具有重要的意义。

## 1 区域地质概况

昌宁-孟连结合带北起昌宁,沿铜厂街、双江牛井山、澜沧、孟连等一带展布,向南进入泰国、马来半岛境内。西侧为保山地块,东侧为临沧复式岩体(图1-b)。滇西清平蛇绿混杂岩是湾河蛇绿混杂岩的南延,主要出露于大南美、湾河及清平一带,南北延伸约 30 km,宽 0.5~2 km。在大南美一带,西与

早古生代澜沧岩群增生杂岩断层接触,东与临沧复式岩体呈侵入接触关系;在湾河、清平村一带,主要位于临沧复式岩体中,呈侵入接触。湾河-清平蛇绿混杂岩与铜厂街-孟连蛇绿混杂岩同属昌宁-孟连结合带,后期构造、岩浆作用使洋壳物质出露于地表,在清平地区与临沧花岗岩呈侵入接触关系(图1-c)。

近年,在湾河蛇绿混杂岩中发现了一系列的高压变质岩,其原岩具有 OIB(洋岛拉斑玄武岩)、E-MORB(富集型洋中脊玄武岩)的特征<sup>[28-29]</sup>。清平蛇绿混杂岩基质主要为云母片岩、阳起石片岩等;岩块主要为蛇纹石透闪蚀变岩、蚀变橄榄岩、石榴透闪蛇纹石蚀变岩、枕状玄武岩、斜长角闪岩、石英角闪岩等,蛇绿岩套基本单元均有出露。其中,清平以北大吉村附近出露一套斜长角闪岩,围岩主要为云母片岩。斜长角闪岩新鲜面可见明显的定向性,后期石英脉侵入,与暗色矿物具有一致的定向性(图2-a);清平村出露的斜长角闪岩风化面上可见颗粒较大的角闪石颗粒,新鲜面可见矿物明显拉长,具较好的定向性(图2-c)。由于覆盖严重,斜长角闪岩与围岩(基质)之间未见明显的接触关系。

## 2 岩相学特征

大吉村以北斜长角闪岩(D5120)具有不等粒状、柱状变晶结构,片状构造,主要由角闪石(78%)、斜长石(20%)、石英(2%)组成。角闪石呈半自形-他形粒状,具多色性,一般为绿色、浅绿色。粒径大小 0.1~0.5 mm,部分 0.5~1 mm,少部分达 1~1.2 mm,定向分布。斜长石呈他形粒状,粒径大小 0.1~0.3 mm,部分 0.3~0.5 mm,个别可达 0.5~0.75 mm,定向分布,可见聚片双晶、卡钠复合双晶、肖钠双晶,多数被绢云母交代,表面略脏。石英呈他形粒状,大小 0.1~0.2 mm,定向分布。岩石具有一定的蚀变,蚀变矿物主要为绢云母(图2-b)。

清平村斜长角闪岩(D6164)具有不等粒状柱状

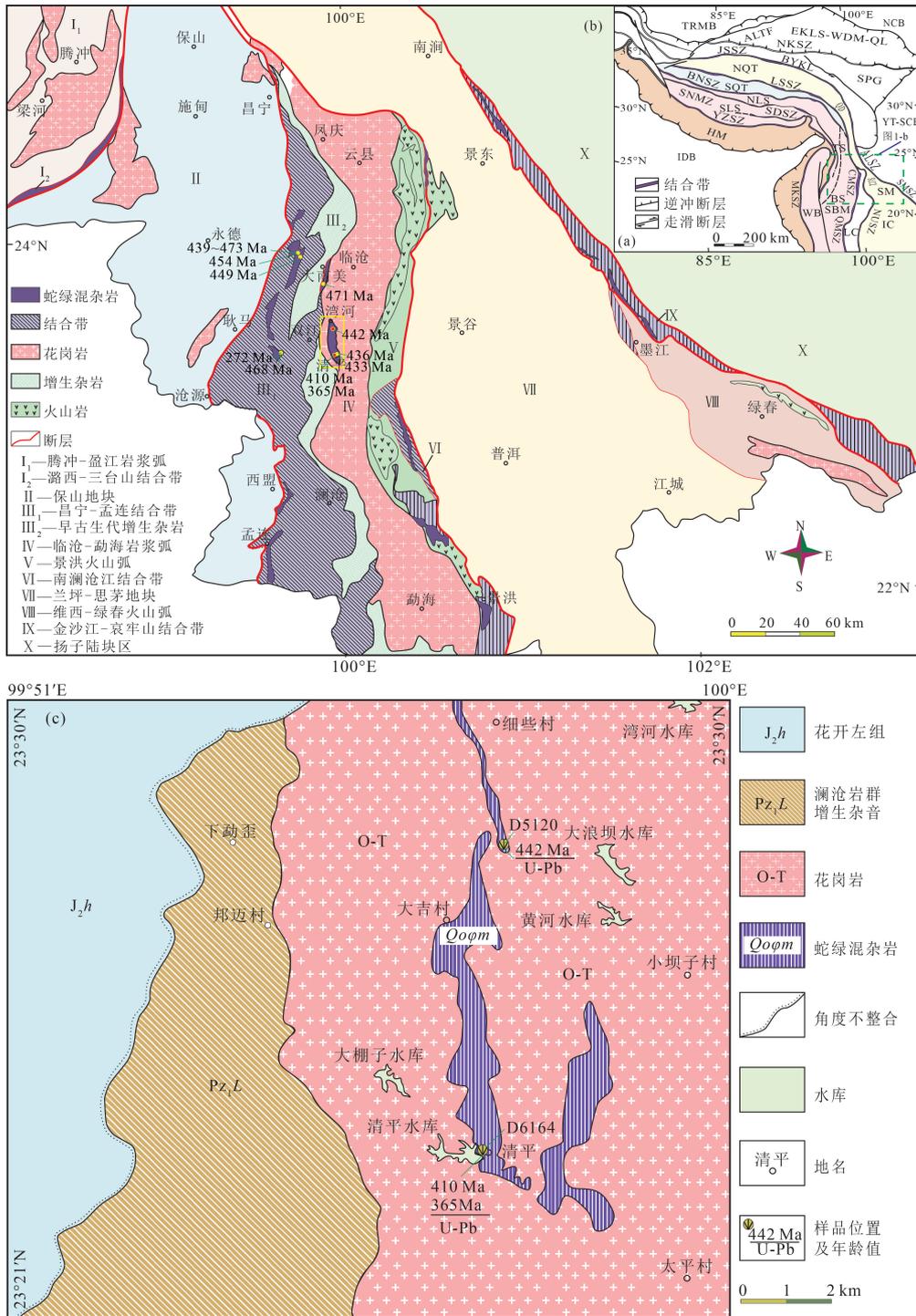


图 1 东特提斯构造图(a,b)和双江县清平地区地质简图(c)  
(图 a 中锆石年龄数据参考文献[17-20,22,27];图 b 据参考文献[26])

Fig. 1 Simplified East Tethys tectonic map(a,b) and geological map(c) of Qingping region, Shuangjiang County  
TRMB—塔里木板块;NCB—华北板块;YT-SCB—扬子-华南板块;IDB—印度板块;EKLS-WDM-QL—东昆仑-柴达木-祁连板块;BYKL—巴颜喀拉板块;SPG—松潘-甘孜板块;NQT-CD-SM-IC—羌北-昌都-思茅-印支板块;SQT-BS-SBM—羌南-保山-掸邦板块;NLS-TC—北拉萨-腾冲板块;SLS—南拉萨板块;HM—喜马拉雅板块;WB—西缅板块;LC—临沧板块;NKSZ—南昆仑结合带;JSSZ-ALSZ-SMSZ—金沙江-哀牢山-松马结合带;LSSZ-CMSZ-QMSZ—龙木错-双湖-昌宁-孟连-清迈结合带;SLCZ-NUSZ—南澜沧-难河-程逸结合带;SNMZ—狮泉河-嘉黎结合带;SDSZ—松多结合带;YZSZ—雅鲁藏布江结合带;MKSZ—密支那结合带;ALTF—阿尔金断裂

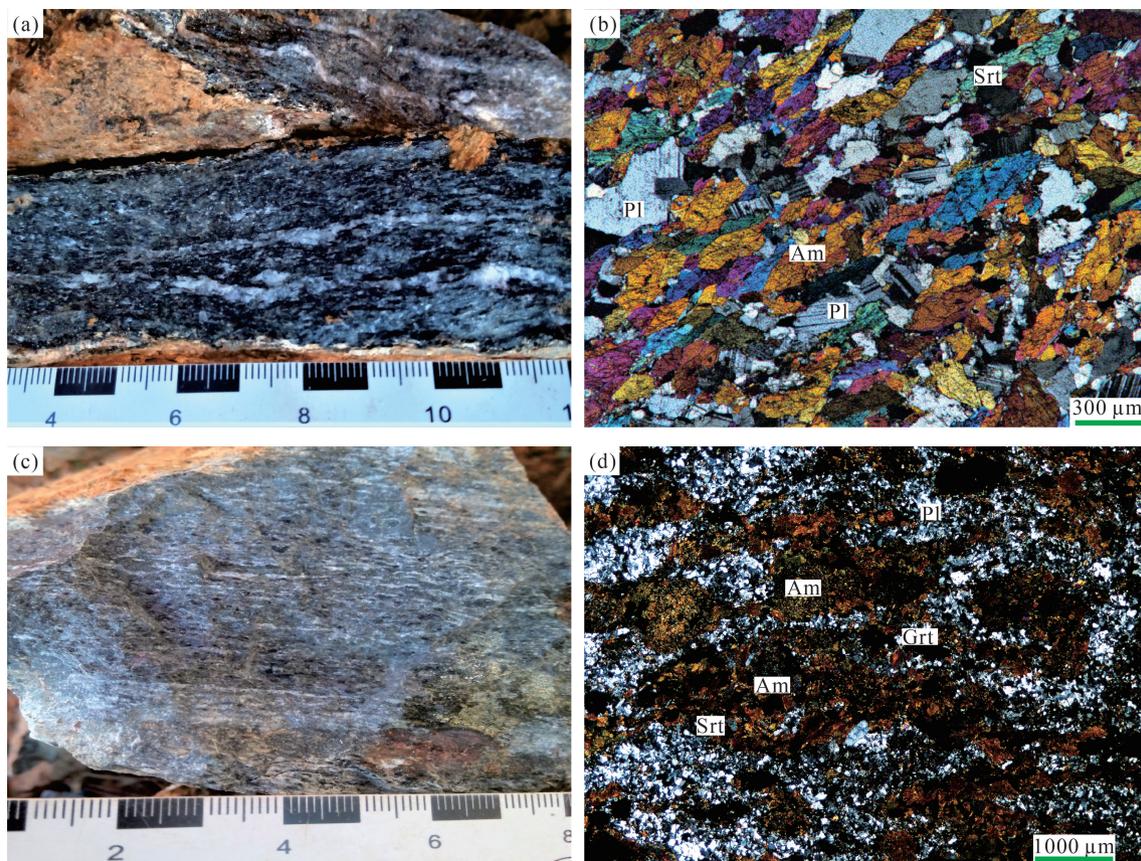


图2 双江县清平地区斜长角闪岩野外露头照片和显微照片

Fig. 2 Outcrop photograph and microstructural photomicrographs of amphibolites in the Qingping region, Shuangjiang County  
Pl—斜长石; Srt—绢云母; Am—角闪石; Grt—石榴子石

变晶结构,片状构造。主要由角闪石(63%)、斜长石(25%)、石英(6%)、石榴子石、帘石和不透明矿物(6%)组成。角闪石多呈他形粒状,少数呈半自形柱状,多数连续定向排列,多色性显著,单偏光下呈浅黄绿-褐色。粒径大小一般为0.2~1.2 mm,少数为0.05~0.2 mm,个别角闪石中包含着石榴子石或磁铁矿包裹体,部分角闪石表面发生绿帘石化。斜长石多呈他形粒状,个别呈半自形板柱状,粒径大小一般为0.5~2 mm,多数表面发生较强烈的高岭土化和绢云母化,少数表面亦发生绿帘石化,个别完全被高岭土和绢云母集合体交代,保留了斜长石的晶形,隐约可见聚片双晶或卡纳复合双晶。石英呈他形粒状,粒径大小一般为0.05~0.15 mm,少数石英中包裹着微晶状角闪石形成包含嵌晶结构。石榴子石多呈粒状,矿物颗粒大小一般为0.1 mm。帘石主要是绿帘石和少量黝帘石,绿帘石多呈他形粒状;黝帘石多呈他形粒状,常与绿帘石共生。不

透明矿物呈他形粒状,黑色不透明,矿物粒径大小为0.2~0.7 mm,推测可能为磁铁矿(图2-d)。

### 3 分析方法

锆石挑选在河北省廊坊市诚信地质服务有限公司实验室完成,按常规方法分选后在双目显微镜下分类挑选,选取代表性的锆石颗粒制成环氧树脂样品靶。透射光、反射光及阴极发光(CL)显微结构照相均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。通过详细分析对比锆石的透射光、反射光和阴极发光照片,挑选出合适的锆石颗粒用于U-Pb年代学测试。

锆石U-Pb同位素定年在武汉上谱分析科技有限责任公司利用LA-ICP-MS分析完成。GeolasPro激光剥蚀系统由COMPexPro 102 ArF 193 nm准分子激光器和MicroLas光学系统组成,ICP-MS型号为Agilent 7700e。激光剥蚀过程中采用氦气作载

气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合,激光剥蚀系统配置有信号平滑装置。U-Pb 同位素定年和微量元素含量处理采用锆石标准 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,每个时间分辨分析数据包括 20~30 s 空白信号和 50 s 样品信号。本次分析的激光束斑和频率分别为 32  $\mu\text{m}$  和 5 Hz。详细的仪器操作和数据处理见参考文献 [30-31]。锆石年龄加权平均值计算和谐和图绘制均采用 Isoplot/Ex\_Ver 3 程序<sup>[32]</sup>。

全岩主量元素分析在自然资源部西南矿产资源监督检测中心采用 XRF 玻璃熔饼法完成,仪器为 AXIOS-X-荧光光谱仪。岩石粉末样品在开展主量元素分析前进行烧失量分析,然后将岩石粉末样品熔融制饼并标记样品名称。对中国标准参考物质 GSR-3 进行了分析,主量元素分析精度和准确度均优于 4%。

全岩微量元素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成。用于 ICP-MS 分析的样品处理如下:①将 200 目样品置于 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干 12 h;②准确称取粉末样品 50 mg 置于 Teflon 溶样弹中;③先后依次缓慢加入 1 mL 高纯  $\text{HNO}_3$  和 1 mL 高纯 HF;④将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于 190 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中加热 24 h 以

上;⑤待溶样弹冷却,开盖后置于 140 $^{\circ}\text{C}$ 电热板上蒸干,然后加入 1 mL  $\text{HNO}_3$  并再次蒸干;⑥加入 1 mL 高纯  $\text{HNO}_3$ 、1 mL MQ 水和 1 mL 内标 In (浓度为 1 ppm),再次将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于 190 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中加热 12 h 以上;⑦将溶液转入聚乙烯料瓶中,并用 2%  $\text{HNO}_3$  稀释至 100 g 以备 ICP-MS 测试。微量元素分析结果的精度和准确度一般优于 5%。

全岩 Sr-Nd-Pb 同位素组成测定在中国科学技术大学同位素地球化学实验室完成。采用阳离子交换树脂 (BioRad AG 50 $\times$ 8) 分离纯化 Rb、Sr 和稀土元素 (REE),采用 HDEHP 萃淋树脂分离纯化 Sm 和 Nd,采用阴离子交换树脂 (BioRad AG 50 $\times$ 8) 分离纯化 Pb。Rb、Sr、Sm、Nd 和 Pb 同位素比值测定在 Finnigan MAT262 固体质谱计上用静态多接收方式进行。同位素比值测量精度均优于 0.003%,详细的同位素分析流程见参考文献 [33]。

## 4 分析结果

### 4.1 锆石 U-Pb 年龄

样品 D5120 锆石颗粒较大,均呈柱状-长柱状自形晶体,长宽比为 1:1~1:3,锆石边部多呈不规则状或港湾状,多数锆石发育较小的增生边。所测锆石整体表现出明显的韵律环带和明暗相间的条带结构,显示典型岩浆锆石的特征 (图 3-a)。

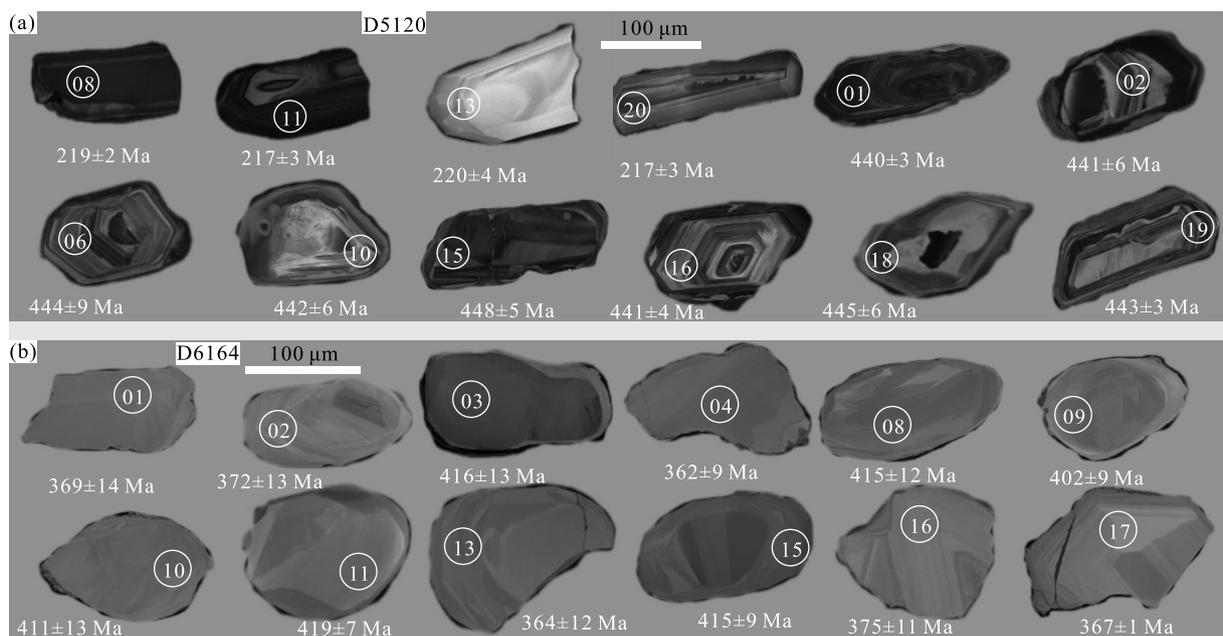


图 3 双江县清平地区斜长角闪岩锆石阴极发光 (CL) 图像及锆石 U-Pb 年龄

Fig. 3 CL images of zircons and U-Pb ages of plagioclase amphibolites in the Qingping region, Shuangjiang County

样品 D5120 获得 20 个数据分析点(表 1)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 217~952 Ma, 其中 8 个测点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 440~448 Ma, 锆石 U 含量为  $309 \times 10^{-6} \sim 1887 \times 10^{-6}$ , Th 含量为  $84 \times 10^{-6} \sim 643 \times 10^{-6}$ , Th/U 值为 0.12~1.07(测点 12 偏低), 平均值 0.48。8 个测点均落在谐和线上或其附近, 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为  $442 \pm 3$  Ma (MSWD=0.19,  $n=8$ ) (图 4-a)。其中 4 个测点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 645~952 Ma, 可能为捕获锆石; 5 个测点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 217~220 Ma, Th/U 值为 0.26~0.81, 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为  $218 \pm 2$  Ma (MSWD=0.17,  $n=5$ ) (图 4-a), 阴极发光图像显示, 锆石呈不同程度退化的岩浆环带结构, 可能受到后期热液变质作用的影响, 其与 Rubin 等<sup>[34]</sup>描述的遭受变质热液作用影响的晚期岩浆锆石结构特征相似(图 3-a)。其锆石稀土元素曲线与年龄加权平均值为  $442 \pm 3$

Ma 的锆石稀土元素配分曲线一致, 二者锆石稀土元素配分曲线均具有岩浆锆石的特征(图 4-b)。

样品 D6164 锆石呈浑圆、椭圆状, 长宽比为 1:1~1:2。锆石呈均匀的灰色或者亮白色, 具弱的环带结构, 边缘普遍发育窄的变质增生边(图 3-b)。

样品 D6164 获得 21 个数据分析点(表 1)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄在 354~557 Ma 之间, 其中 9 个测点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 354~375 Ma, 锆石 U 含量为  $16 \times 10^{-6} \sim 102 \times 10^{-6}$ , Th 含量为  $8 \times 10^{-6} \sim 68 \times 10^{-6}$ , Th/U 值为 0.50~1.01, 平均值 0.71。9 个测点均落在谐和线上或其附近, 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为  $365 \pm 6$  Ma (MSWD=0.76,  $n=9$ ) (图 4-c)。其中 10 个测点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 399~419 Ma, 锆石 U 含量为  $18 \times 10^{-6} \sim 121 \times 10^{-6}$ , Th 含量为  $7 \times 10^{-6} \sim 79 \times 10^{-6}$ , Th/U 值为 0.39~1.07, 平均值 0.64。10 个测点均落在谐和线上或其附近, 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权

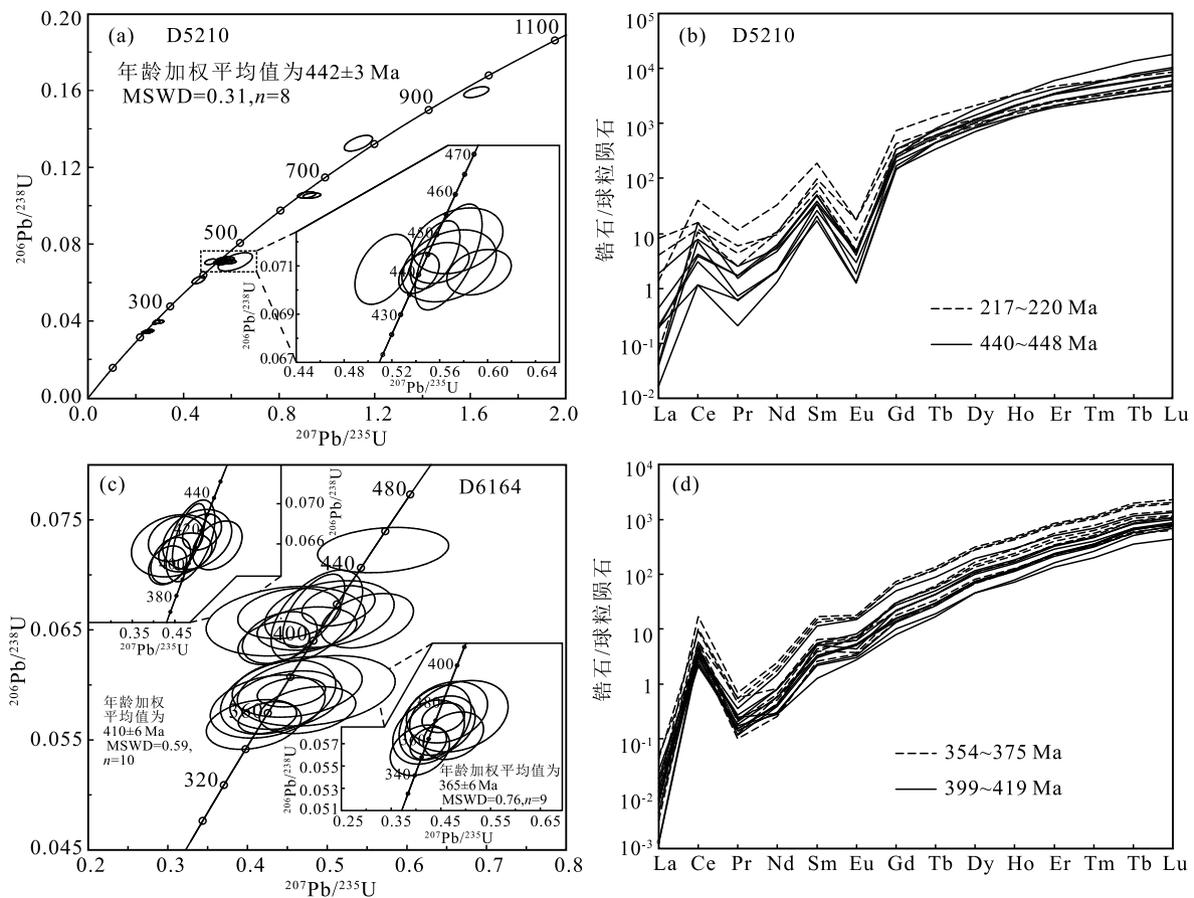


图 4 双江县清平地区斜长角闪岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(a,c)及锆石稀土元素配分型式(b,d)  
(标准化值据参考文献[35])

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams(a,c) of zircons and chondrite-normalized REE patterns(b,d) of plagioclase amphibolites in the Qingping region, Shuangjiang County

平均值为  $410 \pm 6$  Ma (MSWD = 0.59,  $n = 10$ ) (图 4-c)。2 组年龄相差 45 Ma, 因此认为 410 Ma 是继承年龄。测点 07、12 锆石结构复杂, 可能为混合年龄。

#### 4.2 地球化学特征

清平地区斜长角闪岩 (D6164) 岩石主量、微量和稀土元素分析结果见表 2。样品烧失量为 0.80%~1.40%, 平均值为 1.06%, 表明岩石发生了一定程度的蚀变。 $\text{SiO}_2$  含量为 47.28%~48.18%, 平均值为 47.90%, 具有基性岩的特征。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  为 14.41%~15.99%,  $\text{MgO}$  为 5.19%~7.81%, 平均值为 6.18%,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值皆小于 1, 为 0.09~0.12, 具有富钠贫钾的特点;  $\text{TiO}_2$  为 1.87%~2.69%, 平均值为 2.19%;  $\text{P}_2\text{O}_5$  为 0.21%~0.36%, 平均值为 0.29%。 $\text{Mg}^\#$  值为 40.59~52.07, 平均值为 45.77, 属分异演化程度中等的岩浆。从以上岩石化学特征看, 该基性岩具有富铝、钠, 贫钾的特征。由于样品有一定程度的蚀变, 采用抗蚀变元素  $\text{Nb}/\text{Y}-\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.0001$  及  $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.0001-\text{SiO}_2$  图解进行分类判别<sup>[36]</sup> (图 5)。所有样品点均落在亚碱性玄武岩区域。

斜长角闪岩稀土元素总量 ( $\Sigma\text{REE}$ ) 为  $81.96 \times 10^{-6}$ ~ $110.15 \times 10^{-6}$ ,  $\text{LREE}/\text{HREE}$  值为 2.28~2.90, 轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值为 2.41~3.00, 轻、重稀土元素分馏明显。 $\delta\text{Eu}$  值为 0.92~1.27, 总体无明显的 Eu 异常, 仅样品 D6164-H1 有轻微的正异常, 表明岩浆源区未发生明显的斜长石的分离结晶作用。在稀土元素配分曲线 (图 6-a) 中,

所有曲线形态近乎一致, 位于典型 E-MORB 曲线与 OIB 曲线之间<sup>[35]</sup>。在原始地幔标准化微量元素蛛网图 (图 6-b) 中, 大离子亲石元素 Ba 明显富集, 高场强元素 Th 表现为明显的负异常, Ti、Zr 弱负异常, Nb、Ta 基本无异常, 曲线总体特征与 E-MORB 曲线类似<sup>[35]</sup>。

#### 4.3 Sr-Nd-Pb 同位素特征

对样品 D6164 进行了 Sr、Nd、Pb 全岩同位素分析, 分析结果见表 3。以 365 Ma 作为 Sr、Nd、Pb 同位素的校正年龄。5 件样品的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值为 0.705288~0.705750, 平均值为 0.705534, 高于大西洋、印度洋和太平洋的 N-MORB (正常型洋中脊玄武岩, 0.70229~0.70316) 和 E-MORB (0.70280~0.70334) 值<sup>[37]</sup>, 与区域上干龙塘、弄巴蛇绿混杂岩中的玄武岩及清平地区斜长角闪岩近似<sup>[20, 38]</sup>。 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  值在 0.512373~0.512424 之间, 平均值为 0.512409, 均低于典型大西洋、印度洋和太平洋的 N-MORB 和 E-MORB 的值<sup>[37]</sup>。 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为 4.01~5.00, 平均值为 4.72, 与区域上干龙塘、弄巴蛇绿混杂岩中的玄武岩  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 (4.91~7.34) 接近<sup>[38]</sup>。其二阶段 Nd 模式年龄变化较小, 为 657~725 Ma, 平均值 676 Ma。

样品  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 18.518~18.772;  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 15.741~15.758;  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 38.873~38.990, 均与典型的 E-MORB 的值相近<sup>[37]</sup>, 反映其具有富集地幔的特征。

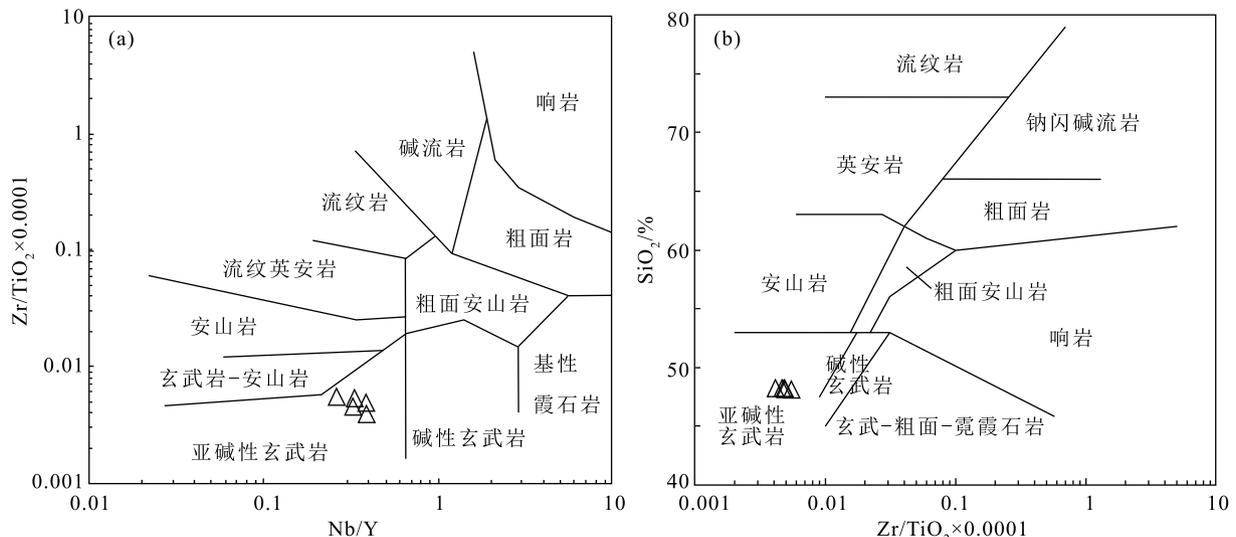


图 5 双江县清平地区斜长角闪岩  $\text{Nb}/\text{Y}-\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.0001$  (a) 及  $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.0001-\text{SiO}_2$  (b) 岩石分类图解

Fig. 5  $\text{Nb}/\text{Y}-\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.0001$  (a) and  $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.0001-\text{SiO}_2$  (b) diagrams of plagioclase amphibolites in the Qingping region, Shuangjiang County

表1 双江县清平地区斜长角闪岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 测试结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb data of plagioclase amphibolites in the Qingping region, Shuangjiang County

测点号	含量/ $10^6$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Th	U		$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
D5120															
D5120-01	310	1887	0.16	0.0555	0.0011	0.5425	0.0111	0.0707	0.0006	432	46	440	7	440	3
D5120-02	204	510	0.40	0.0526	0.0015	0.5131	0.0158	0.0709	0.0010	309	67	421	11	441	6
D5120-03	293	368	0.80	0.0617	0.0019	1.1312	0.0390	0.1326	0.0027	665	65	768	19	802	15
D5120-04	408	392	1.04	0.0624	0.0016	0.9149	0.0250	0.1057	0.0011	687	54	660	13	648	6
D5120-05	392	457	0.86	0.0644	0.0016	0.9365	0.0244	0.1053	0.0009	754	54	671	13	645	5
D5120-06	84	710	0.12	0.0572	0.0014	0.5673	0.0185	0.0714	0.0015	498	54	456	12	444	9
D5120-07	286	596	0.48	0.0536	0.0021	0.2525	0.0095	0.0344	0.0004	354	89	229	8	218	2
D5120-08	1697	2092	0.81	0.0533	0.0018	0.2542	0.0081	0.0346	0.0004	343	76	230	7	219	2
D5120-09	48	529	0.09	0.0541	0.0025	0.2960	0.0139	0.0396	0.0006	376	73	263	11	250	4
D5120-10	204	327	0.62	0.0584	0.0028	0.5677	0.0260	0.0710	0.0010	543	110	457	17	442	6
D5120-11	304	1152	0.26	0.0496	0.0013	0.2341	0.0066	0.0342	0.0004	176	58	214	5	217	3
D5120-18	75	437	0.17	0.0539	0.0016	0.4622	0.0177	0.0614	0.0013	369	69	386	12	384	8
D5120-13	84	151	0.56	0.0544	0.0032	0.2540	0.0136	0.0348	0.0006	387	133	230	11	220	4
D5120-14	87	869	0.10	0.0524	0.0018	0.2862	0.0100	0.0396	0.0008	306	78	256	8	250	5
D5120-16	139	309	0.45	0.0576	0.0025	0.5748	0.0250	0.0720	0.0009	522	97	461	16	448	5
D5120-15	167	317	0.53	0.0605	0.0019	0.5928	0.0178	0.0707	0.0006	620	67	473	11	441	4
D5120-17	101	417	0.24	0.0735	0.0015	1.6254	0.0347	0.1591	0.0018	1028	73	980	13	952	10
D5120-12	102	1455	0.07	0.0559	0.0012	0.5562	0.0137	0.0715	0.0009	450	14	449	9	445	6
D5120-19	643	601	1.07	0.0568	0.0016	0.5598	0.0162	0.0711	0.0006	483	65	451	11	443	3
D5120-20	498	959	0.52	0.0526	0.0017	0.2516	0.0094	0.0343	0.0004	309	74	228	8	217	3
D6164															
D6164-01	10	18	0.55	0.0642	0.0092	0.4385	0.0477	0.0589	0.0022	750	308	369	33.7	369	14
D6164-02	8	16	0.50	0.0675	0.0122	0.4863	0.0653	0.0595	0.0021	854	385	402	44.6	372	13
D6164-03	63	121	0.51	0.0535	0.0028	0.4832	0.0256	0.0667	0.0022	350	116	400	17.5	416	13
D6164-04	28	32	0.85	0.0616	0.0066	0.4753	0.0400	0.0577	0.0014	657	232	395	27.5	362	9
D6164-05	19	29	0.65	0.0616	0.0052	0.5502	0.0384	0.0658	0.0016	657	183	445	25.1	411	10
D6164-06	29	57	0.51	0.0499	0.0037	0.4330	0.0296	0.0638	0.0013	191	170	365	21.0	399	8
D6164-07	47	45	1.05	0.0560	0.0054	0.5703	0.0543	0.0723	0.0014	454	210	458	35.1	450	8
D6164-08	11	20	0.57	0.0643	0.0091	0.5029	0.0536	0.0664	0.0020	754	296	414	36.2	415	12
D6164-09	37	38	0.97	0.0519	0.0043	0.4404	0.0309	0.0643	0.0016	280	193	371	21.8	402	9
D6164-10	7	18	0.39	0.0522	0.0080	0.4479	0.0659	0.0658	0.0021	300	309	376	46.2	411	13
D6164-11	79	74	1.07	0.0551	0.0033	0.5141	0.0303	0.0672	0.0012	417	131	421	20.3	419	7
D6164-12	3	8	0.45	0.0799	0.0167	0.6458	0.1125	0.0903	0.0232	1194	422	506	69.4	557	137
D6164-13	13	25	0.51	0.0580	0.0073	0.4254	0.0476	0.0580	0.0019	532	280	360	33.9	364	12
D6164-14	20	41	0.50	0.0578	0.0048	0.4869	0.0379	0.0663	0.0027	520	183	403	25.9	414	17
D6164-15	31	50	0.61	0.0510	0.0049	0.4524	0.0426	0.0665	0.0015	243	225	379	29.8	415	9
D6164-16	20	20	1.01	0.0571	0.0075	0.4624	0.0539	0.0598	0.0018	494	293	386	37.4	375	11
D6164-17	17	19	0.92	0.0591	0.0071	0.4485	0.0465	0.0586	0.0018	569	265	376	32.6	367	11
D6164-18	21	24	0.86	0.0576	0.0074	0.4079	0.0394	0.0564	0.0015	522	281	347	28.4	354	9
D6164-19	68	102	0.67	0.0561	0.0034	0.4550	0.0282	0.0593	0.0009	457	132	381	19.7	372	5
D6164-20	46	81	0.56	0.0548	0.0032	0.4250	0.0242	0.0570	0.0010	406	99.1	360	17.2	358	6
D6164-21	24	42	0.58	0.0549	0.0053	0.4747	0.0413	0.0651	0.0013	409	218	394	28.4	407	8

表 2 双江县清平地区斜长角闪岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 2 Major, trace element and REE analyses of plagioclase amphibolites in the Qingping region, Shuangjiang County

样品号	D6164-H1	D6164-H2	D6164-H3	D6164-H4	D6164-H5	样品号	D6164-H1	D6164-H2	D6164-H3	D6164-H4	D6164-H5
SiO <sub>2</sub>	47.28	47.98	48.00	48.18	48.05	Nb	13.8	15.9	17.7	12.4	11.3
TiO <sub>2</sub>	2.07	2.33	2.69	1.98	1.87	Cs	0.19	0.26	0.58	0.45	0.37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.41	15.33	15.88	15.82	15.99	Ba	92.3	134	120	119	188
TFeO	12.84	12.18	13.57	13.10	13.12	La	12.9	14.7	15.2	13.4	12.1
MnO	0.20	0.20	0.21	0.22	0.21	Ce	31.7	37.2	38.8	33.5	25.8
MgO	7.81	6.40	5.19	5.60	5.88	Pr	4.44	5.38	5.51	4.76	4.20
CaO	11.09	10.10	8.44	9.34	9.68	Nd	21.7	26.1	26.9	22.8	19.8
Na <sub>2</sub> O	2.79	3.34	4.02	3.81	3.37	Sm	6.27	6.81	7.35	6.00	5.29
K <sub>2</sub> O	0.32	0.34	0.38	0.40	0.41	Eu	2.82	2.23	2.36	1.95	1.88
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.21	0.29	0.36	0.33	0.24	Gd	7.36	7.68	8.31	6.77	6.71
烧失量	0.90	0.80	0.89	1.32	1.40	Tb	1.29	1.25	1.35	1.07	1.11
总计	99.91	99.28	99.63	100.11	100.21	Dy	7.78	7.62	8.38	6.61	7.10
Sc	45.2	37.0	35.5	33.6	42.9	Ho	1.54	1.51	1.64	1.36	1.44
V	370	307	351	309	309	Er	4.27	4.15	4.47	3.68	4.03
Cr	96.1	80.7	39.8	36.3	49.1	Tm	0.59	0.55	0.60	0.52	0.54
Co	35.5	41.6	45.1	42.2	41.2	Yb	3.85	3.53	3.89	3.34	3.53
Ni	71.6	50.7	40.9	39.2	43.0	Lu	0.55	0.53	0.59	0.50	0.53
Ga	21.0	20.1	22.1	20.5	20.4	Hf	3.25	3.37	3.40	2.81	3.12
Rb	3.73	5.00	7.03	6.81	6.57	Ta	0.70	0.86	1.00	0.67	0.67
Sr	216	323	298	357	312	Pb	1.39	1.72	2.68	5.22	5.10
Y	42.3	41.5	45.7	38.0	43.7	Th	0.36	0.22	0.22	0.36	0.19
Zr	111	112	108	91.3	102	U	0.19	0.10	0.09	0.11	0.07

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10<sup>-6</sup>

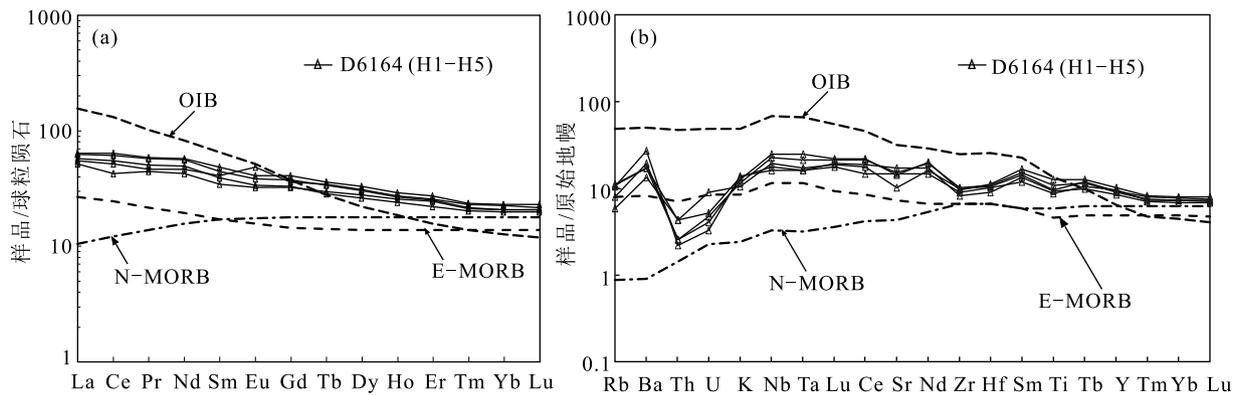


图 6 双江县清平地区斜长角闪岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)及原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace multi-element patterns (b) of plagioclase amphibolites in the Qingping region, Shuangjiang County

N-MORB—正常型洋中脊玄武岩;E-MORB—富集型洋中脊玄武岩;OIB—洋岛拉斑玄武岩;标准化值均据参考文献[35]

表3 双江县清平斜长角闪岩 Sr-Nd-Pb 同位素组成

Table 3 Sr-Nd-Pb isotopic composition of plagioclase amphibolites in the Qingping region, Shuangjiang County

样品	D6164-H1	D6164-H2	D6164-H3	D6164-H4	D6164-H5	样品	D6164-H1	D6164-H2	D6164-H3	D6164-H4	D6164-H5
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	18.772	18.610	18.525	18.550	18.518	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.050	0.045	0.068	0.055	0.061
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	15.745	15.758	15.741	15.748	15.741	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.705849	0.705835	0.706104	0.705726	0.705604
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	38.990	38.972	38.873	38.934	38.878	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$	0.705589	0.705603	0.705750	0.705439	0.705288
$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$	18.259	18.393	18.400	18.471	18.466	$\text{Sm}/10^{-6}$	6.27	6.81	7.35	6.00	5.29
$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$	15.718	15.746	15.735	15.744	15.738	$\text{Nd}/10^{-6}$	21.69	26.11	26.91	22.81	19.75
$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$	38.676	38.817	38.774	38.851	38.833	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1749	0.1577	0.1651	0.1590	0.1620
$\Delta 7/4\text{Pb}$	21.9657	24.9571	24.2265	24.6202	24.2879	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512842	0.512797	0.512815	0.512753	0.512797
$\Delta 8/4\text{Pb}$	66.8514	84.5058	84.9155	88.0477	86.3261	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t$	0.512424	0.512420	0.512420	0.512373	0.512410
$\text{Rb}/10^{-6}$	3.73	5.00	7.03	6.81	6.57	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	5.00	4.92	4.93	4.01	4.72
$\text{Sr}/10^{-6}$	216	323	298	357	312						

注： $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值根据  $t = 365 \text{ Ma}$  计算； $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t = (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{sample}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_m \times (e^{\lambda t} - 1)$ ； $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}(t)} - 1] \times 10^4$ ； $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}(t)} = 0.512638 - 0.1967 \times (e^{\lambda t} - 1)$ 。  $\lambda_{\text{Sm-Nd}} = 6.54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$ 。  $\Delta 7/4\text{Pb} = [(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{样品}} - 0.1084(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{样品}} - 13.491] \times 100$ ； $\Delta 8/4\text{Pb} = [(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{样品}} - 1.209(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{样品}} - 15.627] \times 100$

## 5 讨论

### 5.1 岩石成因及源区性质

D6164-H1~H5 这 5 件样品的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$  值在 0.705288 ~ 0.705750 之间, 平均值为 0.705534,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t$  值在 0.512373 ~ 0.512424 之间, 平均值为 0.512409。铅同位素值均与典型的 E-MORB 的值相近<sup>[37]</sup>。  $\Delta 8/4\text{Pb} = 66.85 \sim 88.05$ ,  $\Delta 7/4\text{Pb} = 21.97 \sim 24.29$ , 均满足 DUPAL 的条件 ( $\Delta 8/4\text{Pb} > 60$ ,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t > 0.7050$ ;  $\Delta 7/4\text{Pb} > 3$ ,  $\Delta 8/4\text{Pb} > 10$ )<sup>[39-40]</sup>, 说明昌宁-孟连结合带双江清平地区在晚志留世—泥盆纪存在与现今印度洋一致的 DUPAL 异常地幔域。在  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  同位素相关图上, 样品点集中分布于 DM 端元和 EM II 端元之间, 有向 EM II 过渡的趋势 (图 7-a)。在 Nb/Yb-TiO<sub>2</sub>/Yb 图解 (图 7-b) 上<sup>[41]</sup>, 所有样品点集中在 E-MORB 区域, 表明岩石源区可能与地幔柱发生过相互作用或起源于富集地幔的低程度部分熔融作用。 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为 4.01~5.00, 平均值为 4.72, 均为正值。综合分析认为, 斜长角闪岩起源于富集型地幔源区。

斜长角闪岩 SiO<sub>2</sub> 含量为 47.28% ~ 48.18% (平均值为 47.90%), MgO 为 5.19% ~ 7.81% (平均值为 6.18%), 反映了贫 Si 富 Mg 基性岩的特征。Cr 含量较低 ( $36 \times 10^{-6} \sim 96 \times 10^{-6}$ ), 说明原始岩浆受到的地壳混染较小, 主要是原始岩浆发生了尖晶石、单

斜辉石、石榴子石等矿物相的分离结晶作用的影响。 $\text{Mg}^\#$  值为 40.59~52.07 (平均值为 45.77), 说明原始岩浆具有幔源岩浆特征, 其上升过程中经历的结晶分异程度较低。

地球化学分析结果显示, 微量元素富集大离子亲石元素 Ba, 高场强元素 Nb、Ta 无明显的异常, Ti、Zr 呈弱的负异常。一般来说, 高场元素在蚀变和变质作用过程中具有较好的稳定性, 高场元素的亏损一般指受到地壳混染或流体交代作用的影响。地壳混染程度通常通过不同微量元素比值来衡量, 斜长角闪岩的  $(\text{Th}/\text{Yb})_{\text{PM}}$  值为 0.31 ~ 0.63, 远低于上地壳和下地壳的值 (28, 4.6)<sup>[42]</sup>, Zr/Nb 值介于 6.11 ~ 8.99 之间, 远低于 N-MORB (30), 与 E-MORB 接近 (10), 小于大陆地壳比值 (16.2)<sup>[37, 43]</sup>。陆壳相对富集 U 而亏损 Nb, Nb/U 值为 34~80, 说明无明显的地壳混染。Th 在海水蚀变和变质过程中非常稳定, 但容易受到地壳混染的影响, 中、上地壳 Th 值非常高, 如果遭受到地壳物质的混染, 斜长角闪岩的 Th 值会明显增高, 而斜长角闪岩中 Th 值非常低 (0.19~0.36), 在微量元素蛛网图 (图 6-b) 上表现为明显的负异常, 因此, 总的来说无地壳混染作用。

综合地球化学特征、Sr-Nd-Pb 同位素分析认为, 清平斜长角闪岩起源于富集地幔源区, 经历了较低的结晶分异, 未受地壳混染作用影响。

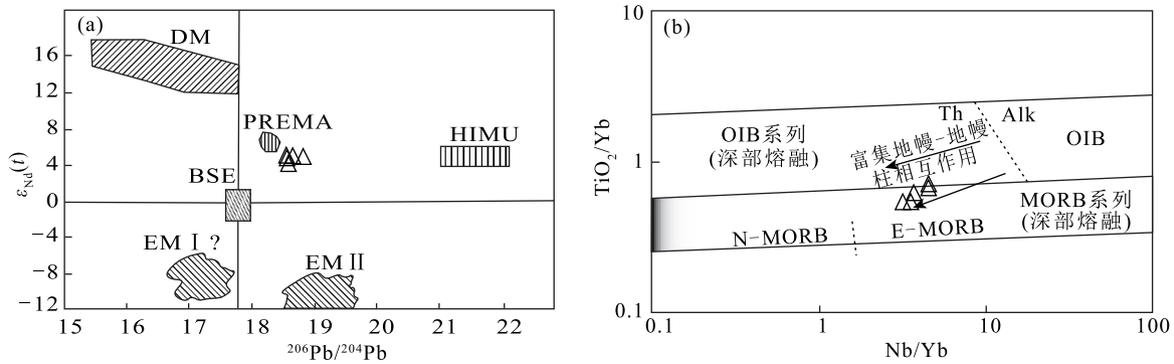


图 7 双江县清平地区斜长角闪岩<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb-ε<sub>Nd</sub>(t) (a) 同位素图解及 Nb/Yb-TiO<sub>2</sub>/Yb 图解 (b)

Fig. 7 Diagrams of <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb-ε<sub>Nd</sub>(t) (a) and Nb/Yb-TiO<sub>2</sub>/Yb (b) of plagioclase amphibolites in the Qingping region, Shuangjiang County

DM—亏损地幔;PREMA—经常观测到的普通地幔;BSE—全硅酸盐地球;EM I、EM II—富集地幔 I 和 II;HIMU—具有高 U/Pb 值的地幔; N-MORB—正常型洋中脊玄武岩;E-MORB—富集型洋中脊玄武岩;OIB—洋岛拉斑玄武岩

### 5.2 昌宁-孟连结合带清平地区原-古特提斯洋残余洋壳

样品 D5120 的 8 个测点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄为 440~448 Ma, 年龄加权平均值为 442±3 Ma, Th/U 值为 0.12~1.07 (测点 12 偏低), 平均值 0.48。5 个测点<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄为 217~220 Ma, Th/U 值为 0.26~0.81, 其<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄加权平均值为 218±2 Ma (MSWD=0.17, n=5), 二者锆石稀土元素配分图均具有岩浆锆石特征。年龄加权平均值为 218±2 Ma 的锆石阴极发光图像显示规则的外形, 呈柱状—长柱状, 总体特征与 Rubin 等<sup>[34]</sup>描述的受变质热液作用影响的晚期岩浆锆石结构特征相似, 可能与临沧岩体在 220 Ma 左右大规模的岩浆事件有关<sup>[44-45]</sup>。因此笔者认为, 442±3 Ma 代表岩浆结晶的时代为晚奥陶世—早志留世, 与区域上铜厂街蛇绿混杂岩中洋岛型玄武岩年龄 (449 Ma)<sup>[18]</sup>、南汀河蛇绿混杂岩中具 N-MORB 的堆晶辉长岩的年龄 (439~444 Ma) 一致<sup>[17]</sup>。

样品 D6164 具有 2 组 U-Pb 年龄, 一组 10 个测点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄为 399~419 Ma, 年龄加权平均值为 410±6 Ma, 其与大中河地区与特提斯俯冲消减有关的岩浆弧时代一致<sup>[21]</sup>; 另一组 9 个测点的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄为 354~375 Ma, 年龄加权平均值为 365±6 Ma。二者之间相差 45 Ma。从锆石 CL 图像及 Th/U 值看, 2 组年龄值所测锆石均具有岩浆锆石的特征。结合锆石稀土元素配分曲线分析, 2 组年龄值的锆石稀土元素配分曲线基本一致, 均显示

岩浆锆石的特征。410 Ma 的锆石 CL 图像显示, 锆石呈浑圆状、椭圆状、短柱状及棱角状, 发育环带结构, 具有扇状特征, 也具有典型基性岩浆锆石的特征, 代表了早期基性岩浆事件。因此, 笔者认为 410±6 Ma 为继承年龄, 可能是岩浆上升过程中穿过基性洋壳时捕获的锆石, 时代与昌宁-孟连洋俯冲增生形成的蓝片岩的变质年龄一致<sup>[46]</sup>, 其可能代表了早期形成的洋壳年龄。365±6 Ma 为斜长角闪岩的最终结晶年龄, 与云南景洪南光地区与特提斯演化有关的弧火山岩浆时代一致<sup>[47]</sup>。岩石地球化学分析结果表明, 其总体特征与 E-MORB 类似 (图 6), 高场强元素无明显的异常。在构造环境判别图 (图 8) 上, 显示具有富集型大洋中脊玄武岩 (E-MORB) 的属性。年代学和地球化学特征表明, 昌宁-孟连结合带清平地区在 365 Ma 有洋盆发育。

### 5.3 昌宁-孟连结合带原特提斯洋演化时限

特提斯一直以来是研究的热点和讨论的对象, 其构造演化阶段也存在多种划分方法, 本文主要采用原特提斯 (震旦纪—志留纪)、古特提斯 (泥盆纪—中三叠世)、新特提斯 (晚三叠世—始新世) 三阶段划分法<sup>[48]</sup>。滇西特提斯构造演化一直是国内外研究者关注的焦点, 尤其是原-古特提斯的形成与演化, 更是地质学家长期探求的科学问题。

近年的地质调查与研究揭示, 昌宁-孟连结合带是原-古特提斯最终消亡的残迹, 一系列原特提斯洋演化残余洋壳被发现, 至少在 471~473 Ma 大洋已开始俯冲消减, 一直持续到晚志留世—早泥盆

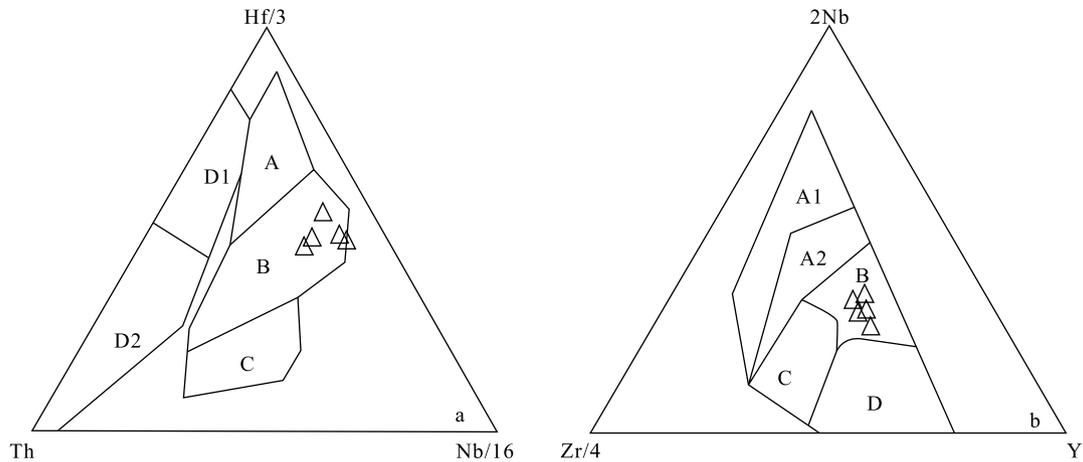


图8 双江县清平地区斜长角闪岩环境构造图解

Fig. 8 Environmental structure diagrams of plagioclase amphibolites in the Qingping region, Shuangjiang County  
 A—N-MORB; B—E-MORB; C—板内玄武岩; D1—岛弧拉斑玄武岩; D2—岛弧钙碱性玄武岩; A1—板内碱性玄武岩;  
 A2—板内碱性玄武岩板内拉斑玄武岩; B—E-MORB; C—板内拉斑玄武岩火山弧玄武岩; D—N-MORB 火山弧玄武岩

世<sup>[17-20]</sup>,相应地在滇西地区也发现与原特提斯洋俯冲消减有关的早古生代岩浆岩记录。牛井山蛇绿混杂岩 O 型埃达克岩的锆石 U-Pb 年龄为 468 Ma<sup>[22]</sup>;南汀河地区与原特提斯洋俯冲消减有关的英云闪长岩的年龄为 454 Ma<sup>[49]</sup>;惠民地区 3 件变质火山岩的年龄分别为 456±3 Ma、456±7 Ma 和 459±14 Ma,具有典型的与俯冲有关的弧火山岩特征<sup>[24]</sup>;栗义和惠民地区的变质火山岩年龄为 454 Ma、462 Ma,成分与高镁安山岩相当,并具有弧火山岩的特征<sup>[25]</sup>;双江地区变酸性岩的年龄为 476 Ma,具有弧岩浆的特征,与原特提斯洋向东俯冲消减有关<sup>[50]</sup>。在昌宁-孟连结合带以东的临沧复式岩基中存在具有岛弧性质的片麻状花岗岩,锆石 U-Pb 年龄为 477 Ma、466 Ma<sup>[23]</sup>;晚志留世—早泥盆世大平掌、大中河地区发育一套岛弧型中基性-中酸性火山岩(421~429 Ma),其为原特提斯大洋向东俯冲消减作用形成的大陆边缘岩浆弧<sup>[21,51]</sup>。位于昌宁-孟连结合带以东的澜沧岩群沉积时代为早古生代,其原始沉积环境可能为一套复理石的沉积、大陆斜坡相的沉积,变质变形强烈,为昌宁-孟连原-古特提斯洋向东俯冲消减形成的早古生代构造增生杂岩<sup>[52-53]</sup>。其中,在邦丙地区澜沧岩群中发育代表冷洋壳深俯冲作用形成的榴辉岩,榴辉岩的形成、演化在一定程度上反映了特提斯洋盆的发展、演化过程<sup>[54]</sup>。

因此,笔者在清平地区斜长角闪岩中获得的

442±3 Ma 年龄值,与区域原特提斯洋洋壳年龄及原特提斯洋俯冲消减有关的弧岩浆年龄、沉积时代一致,证实了昌宁-孟连原特提斯洋的存在。

#### 5.4 昌宁-孟连结合带古特提斯洋演化时限

已有研究资料表明,昌宁-孟连结合带出露一套泥盆纪—二叠纪洋盆地层系统,泥盆纪具有大洋沉积岩石组合的有温泉组(Dw)、曼信组(Dm),温泉组以碎屑岩为主,夹少量的硅质岩;曼信组岩石组合为玄武岩、碎屑岩及硅质岩,区域上岩性组合存在一定的差异,总体变质变形较弱。泥盆纪—石炭纪南段组的岩性组合、沉积背景、变质变形特征差异性较大,整体变质较弱,局部变形较强,至少有 2 期明显的构造叠加改造,局部发育不完整的鲍马序列。石炭纪—二叠纪(平掌组—鱼塘寨组—大名山组)发育典型的洋岛—海山组合<sup>[2,55]</sup>。二叠纪拉巴组整体表现为远洋硅-泥沉积组合,局部夹变基性岩(变玄武岩)、变砂岩构造透镜体,其变砂岩透镜体中局部发育典型的鲍马序列。众多研究者对结合带内放射虫硅质岩进行了研究,放射虫硅质岩时代为早泥盆世—中三叠世<sup>[10,56-61]</sup>,硅质岩地球化学特征显示 2 种不同的沉积环境:靠近斜坡—大陆边缘的沉积环境<sup>[58-60,62]</sup>、深海洋盆的沉积环境<sup>[2,63]</sup>。因此,从沉积角度看,昌宁-孟连洋的确存在晚古生代洋盆。

关于晚古生代洋盆演化的时限,其时代多来源于化石方面的证据,高精度洋壳年龄较少。昌宁-

孟连结合带蛇绿岩中变辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 264~270 Ma<sup>[8]</sup>;铜厂街蛇绿岩中辉长岩的角闪石 K-Ar 等时线年龄为 385 Ma<sup>[46]</sup>;牛井山地区 N-MORB 型辉长岩锆石 U-Pb 年龄为 272 Ma<sup>[27]</sup>,说明中二叠世局部还存在洋的扩张作用。其余晚古生代洋壳年龄均来自区域地质调查报告,干龙塘地区斜长角闪片岩锆石 U-Pb 年龄为 331 Ma、334 Ma、349 Ma、313~349 Ma 及 381 Ma<sup>①②</sup>。位于其东的临沧-勐海岩浆弧及大中河岩浆弧,由于受到昌宁-孟连洋向东的俯冲消减作用,发育一系列的与俯冲消减有关的岩浆记录(269~418 Ma)<sup>[21, 48, 64-65]</sup>。早—中三叠世,由于昌宁-孟连洋发生大规模的俯冲消减作用,洋盆逐渐消亡,局部存在残留海盆地。晚三叠世,古特提斯洋俯冲消减结束,洋盆闭合,然后进入弧-陆、陆-陆碰撞造山过程,盆山转换阶段以局部发育晚三叠世三岔河组磨拉石建造不整合覆盖于区域上蛇绿混杂岩为标志,并在昌宁-孟连结合带东侧发育大规模的岩浆活动<sup>[64-65]</sup>。

因此,笔者在清平斜长角闪岩中获得的 442±6 Ma、365±6 Ma 年龄值与区域古特提斯洋洋壳时代、洋盆沉积记录一致,证实昌宁-孟连结合带存在晚古生代洋盆。综上所述,昌宁-孟连结合带原特提斯、古特提斯洋壳残余、洋盆沉积记录共存,榴辉岩及一系列古生代岩浆弧的发现,表明昌宁-孟连结合带代表了一个连续演化的原-古特提斯大洋。

## 6 结 论

(1) 锆石 U-Pb 定年结果表明,双江清平地区斜长角闪岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 442 Ma、410 Ma、365 Ma,其中 410 Ma 为继承锆石年龄。说明昌宁-孟连结合带发育古生代洋盆。

(2) 斜长角闪岩轻稀土元素富集,重稀土元素亏损,轻、重稀土元素分馏明显,地球化学特征显示具 E-MORB 的性质。斜长角闪岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为 4.01~5.00,平均值为 4.72,说明源于富集型地幔。

(3) 昌宁-孟连结合带发育早古生代、晚古生代洋盆,表明其经历了原-古特提斯洋的演化过程。

**致谢:**参加工作以来,笔者非常有幸认识了潘桂棠老师,无论是生活还是工作中,潘老师都给予了笔者极大的帮助,不仅是工作的导师,也是生活的导师,使笔者在专业技术和思想上均有了极大的

提高,一直对潘老师充满了敬意和感激。2021 年是潘老师 80 岁华诞,也是他从事地质工作 60 周年,在此祝潘老师健康长寿。

## 参考文献

- [1] 刘本培,冯庆来,Chonglakmani C,等.滇西古特提斯多岛洋的结构及其南北延伸[J].地学前缘,2002,9(3): 161-171.
- [2] 刘本培,冯庆来,方念乔,等.滇西南昌宁-孟连带和澜沧江带古特提斯多岛洋构造演化[J].地球科学-中国地质大学学报,1993,18(5): 529-539.
- [3] 潘桂棠,陈智樑,李兴振,等.东特提斯多弧-盆系统演化模式[J].岩相古地理,1996,16(2): 52-65.
- [4] 潘桂棠,王立全,李荣社,等.多岛弧盆系构造模式:认识大陆地质的关键[J].沉积与特提斯地质,2012,32(3): 1-4.
- [5] 钟大赉.滇川西部古特提斯造山带[M].北京:科学出版社,1998: 56-170.
- [6] 莫宣学,路凤香,沈上越,等.三江特提斯火山作用与成矿[M].地质出版社,1993: 1-205.
- [7] 崔春龙,曾允孚,段丽兰,等.滇西昌宁-孟连带存在一个古生代大洋吗?[J].沉积学报,1999,17(2): 176-182.
- [8] Jian P, Liu D Y, Kröner A, et al. 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[J]. Lithos, 2009, 113(3/4): 767-784.
- [9] 王立全,潘桂棠,李才,等.藏北羌塘中部果干加山早古生代堆晶辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄——兼论原-古特提斯洋的演化[J].地质通报,2008,27(12): 2045-2056.
- [10] 李文昌,潘桂棠,侯增谦,等.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,2010: 1-107.
- [11] Pan G T, Wang L Q, Li R S, et al. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 53(7): 3-14.
- [12] 邓军,王庆飞,李龚健.复合造山和复合成矿系统:三江特提斯例析[J].岩石学报,2016,32(8): 2225-2247.
- [13] 邓军,王长明,李龚健.三江特提斯叠加成矿作用样式及过程[J].岩石学报,2012,28(5): 639-648.
- [14] Wang B D, Wang L Q, Pan G T, et al. U-Pb Zircon dating of Early Paleozoic gabbro from the Nantinghe ophiolite in the Changning-Menglian Suture Zone and its geological implication [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(8): 920-930.
- [15] Metcalfe I. Gondwanaland origin, dispersion, and accretion of East and Southeast Asian continental terranes [J]. Journal of South American Earth Sciences, 1994, 7(3/4): 333-347.
- [16] 王义昭.滇西昌宁-孟连带南部孟连-曼信地区晚古生代地层若干问题[J].地质论评,2005,51(1): 1-10.
- [17] 王保弟,王立全,潘桂棠,等.昌宁-孟连结合带南汀河早古生代辉长岩锆石年代学及地质意义[J].科学通报,2013,58(4): 344-354.
- [18] 孙载波,曾文涛,周坤,等.昌宁-孟连结合带奥陶纪洋岛玄武岩的识别及其构造意义——来自地球化学和锆石 U-Pb 年龄的证

- 据[J].地质通报,2017,36(10): 1760-1771.
- [19] 刘桂春,孙载波,曾文涛,等.滇西双江县勐库地区湾河蛇绿混杂岩的形成时代、岩石地球化学特征及地质意义[J].岩石矿物学杂志,2017,36(2): 163-174.
- [20] 彭智敏,付于真,王国芝,等.昌宁-孟连结合带清平地区斜长角闪岩锆石年代学及 Sr-Nd-Hf 同位素研究[J].地质学报,2020,94(2): 511-526.
- [21] 毛晓长,王立全,李冰,等.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[J].岩石学报,2012,28(5): 1517-1528.
- [22] 王冬兵,罗亮,唐渊,等.昌宁-孟连结合带牛井山早古生代埃达克岩锆石 U-Pb 年龄、岩石成因及其地质意义[J].岩石学报,2016,32(8): 2317-2329.
- [23] 彭智敏,张辑,关俊雷,等.滇西“三江”地区临沧花岗岩基早—中奥陶世花岗岩质片麻岩的发现及其意义[J].地球科学,2018,43(8): 2571-2585.
- [24] Nie X M, Feng Q L, Qian X, et al. 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, 2015, 28(2): 757-768.
- [25] Xing X W, Wang Y J, Cawood P A, et al. Early Paleozoic accretionary orogenesis along northern margin of Gondwana constrained by high-Mg metagneous rocks, SW Yunnan[J]. International Journal of Earth Sciences, 2017, 106(5): 1469-1486.
- [26] Xu Z Q, Dilek Y, Cao H, et al. Paleo-Tethyan evolution of Tibet as recorded in the East Cimmerides and West Cathaysides[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 105: 320-337.
- [27] 王冬兵,罗亮,唐渊,等.昌宁-孟连结合带斜长角闪岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J].沉积与特提斯地质,2017,37(4): 17-28.
- [28] 孙载波,李静,周坤,等.滇西双江县勐库地区退变质榴辉岩的岩石地球化学特征及其地质意义[J].现代地质,2017,31(4): 746-756.
- [29] 李静,孙载波,黄亮,等.滇西勐库退变质榴辉岩的 P-T-t 轨迹及地质意义[J].岩石学报,2015,33(7): 2285-2301.
- [30] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. 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, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [31] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [32] Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003: 1-70.
- [33] Chen F K, Li X H, Wang X L, et al. Zircon age and Nd-Hf isotopic composition of the Yunnan Tethyan Belt, Southwestern China [J]. International Journal of Earth Sciences, 2007, 96(6): 1179-1194.
- [34] Ruben J N, Henri C D, Price J G. Hydrothermal zircons and zircon overgrowths, Sierra Blanca Peaks, Texas [J]. American Mineralogist, 1989, 74: 865-869.
- [35] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, London Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [36] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. Chemical Geology, 1997, 20: 325-343.
- [37] Saunders A D, Norry M J, Tarney J. Origin of MORB and chemically depleted mantled mantle reservoirs: trace element constraints [J]. Journal of Petrology, 1988, 1: 415-445.
- [38] 赖绍聪,秦江峰,李学军,等.昌宁-孟连缝合带干龙塘-弄巴蛇绿岩地球化学及 Sr-Nd-Pb 同位素组成研究[J].岩石学报,2010,26(11): 3195-3205.
- [39] Hart S R. Heterogeneous mantle domains: signatures, genesis and mixing chronologies [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1988, 90(3): 273-296.
- [40] 邢光福,沈渭洲,王德滋,等.南极乔治王岛中—新生代岩浆岩 Sr-Nd-Pb 同位素组成及源区特征[J].岩石学报,1997,13(4): 473-487.
- [41] Pearce J A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust [J]. Lithos, 2008, 100(1/4): 14-48.
- [42] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution, examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks [J]. Journal of Geology, 1985, 94: 632-633.
- [43] Wilson M. Igneous Petrogenesis. A global tectonic approach [M]. London: Unwin Hyman, 1989: 153-190.
- [44] 廖世勇,尹福光,王冬兵,等.滇西“三江”地区临沧花岗岩基中三叠世碱长花岗岩的发现及其意义[J].岩石矿物学杂志,2014,33(1): 1-12.
- [45] 赵枫,李龚健,张鹏飞,等.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, 2018, 34(5): 1397-1412.
- [46] 从柏林,吴根耀,张旗,等.中国滇西古特提斯构造带岩石大地构造演化[J].中国科学: B 辑,1993,23(11): 1201-1207.
- [47] Nie X M, Feng Q L, Metcalfe I, et al. Discovery of a Late Devonian magmatic arc in the southern Lancangjiang Zone, Western Yunnan: Geochemical and zircon U-Pb geochronological constraints on the evolution of Tethyan Ocean Basins in SW China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 118: 32-50.
- [48] 潘桂棠,陈智梁,李兴振,等.东特提斯地质构造形成演化 [M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [49] 吴喆,王保弟,王冬兵,等.昌宁-孟连缝合带南汀河早古生代埃达克岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 地球科学, 2020, 45(8): 3003-3013.
- [50] 韩文文,彭智敏,张辑,等.滇西澜沧岩群钠长浅粒岩锆石 U-Pb 测年、Hf 同位素组成及构造意义 [J]. 地质学报, 2020, 94(4): 1282-1294.
- [51] Lehmann B, Zhao X F, Zhou M F, et al. Mid-Silurian back-arc spreading at the northeastern margin of Gondwana: the Dapingzhang dacite-hosted massive sulfide deposit, Lancangjiang zone, southwestern Yunnan, China [J]. Gondwana Research, 2013, 24(2): 648-663.
- [52] 王保弟,王立全,王冬兵,等.三江昌宁-孟连带原-古特提斯构造

- 演化[J].地球科学,2018,43(8): 2527-2550.
- [53] 彭智敏,王保弟,胡金锋,等.云南滇西地区早古生代增生杂岩的厘定及其意义——基于 1:5 万文东幅地质调查的新认识[J].中国地质, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200408.1619.002.html>.2020.
- [54] 彭智敏,王国芝,王保弟,等.云南邦丙澜沧岩群中发现蓝闪石榴辉岩[J].成都理工大学学报(自然科学版),2019,46(5): 639-640.
- [55] 任飞,潘桂棠,尹福光,等.西南三江地区洋板块地层特征及其构造演化[J].沉积与特提斯地质,2017,37(4): 40-47.
- [56] 冯庆来,叶玫,章正军.滇西早石炭世放射虫化石[J].微体古生物学报,1997,14(1): 79-92.
- [57] 段向东,张志斌,王伟,等.滇西南耿马地区泥盆纪牙形石的发现[J].地质通报,2003,22(3): 182-185.
- [58] 张凡,冯庆来,段向东,等.滇西南昌宁-孟连构造带西带研究初探——以耿马弄巴剖面为例[J].地质科技情报,2006,25(3): 13-20.
- [59] 杨文强,冯庆来,段向东.滇西南昌宁-孟连构造带晚泥盆世枕状玄武岩和层状硅质岩的特征[J].地质通报,2007,26(6): 739-747.
- [60] 王冬兵,唐渊,罗亮,等.昌宁-孟连结合带弄巴地区泥盆系、石炭系的时代及沉积环境:放射虫、碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素约束[J].地球科学,2020,45(8): 2989-3002.
- [61] 罗亮,谢韬,王冬兵,等.昌宁-孟连结合带中三叠世含放射虫硅质岩地层的古特提斯意义[J].地球科学,2020,45(8): 3014-3027.
- [62] 张振芳,冯庆来,方念乔,等.滇西南昌宁-孟连带三叠纪牡音河组硅质岩地球化学特征及沉积环境[J].地球科学,2001,26(5): 449-455.
- [63] 丁林,钟大赉.滇西昌宁-孟连带古特提斯洋硅质岩稀土元素和铈异常特征[J].中国科学(B 辑),1995,25(1): 93-100.
- [64] 彭头平,王岳军,范蔚茗,等.澜沧江南段早中生代酸性火成岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及构造意义[J].中国科学(D 辑),2006,36(2): 123-132.
- [65] 孔会磊,董国臣,莫宣学,等.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,2012,28(5): 1438-1452.
- ① 云南省地质调查院.1:25 万临沧县幅、滚龙幅区域地质调查报告.2003.
- ② 云南省地质调查院.1:25 万凤庆县幅区域地质调查报告.2008.