



## 论文

滇西哀牢山地区晚三叠世高  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  花岗岩的构造指示刘汇川<sup>①②③</sup>, 王岳军<sup>①③\*</sup>, 范蔚茗<sup>③</sup>, JianWei ZI<sup>④</sup>, 蔡永丰<sup>③</sup>, 杨光林<sup>⑤</sup>

① 中山大学地球科学系, 广州 510275;

② 云南大学地质系, 昆明 650091;

③ 中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学及地球化学重点实验室, 广州 510640;

④ John De Laeter Center for Isotope Research, Curtin University, Perth 6945, Australia;

⑤ 云南省煤炭地质勘察院, 昆明 650218

\* 联系人, E-mail: wangyuejun@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2013-09-23; 接受日期: 2014-04-11; 网络版发表日期: 2014-10-28

国家自然科学基金项目(批准号: 41190073, 40825009)和中国科学院广州地球化学研究所“135”项目(编号: GIGCAS-135-Y234151001)资助

**摘要** 高  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  花岗岩是研究陆壳生长的有力证据. 哀牢山构造带中段滑石板花岗岩样品激光锆石 U-Pb 年代学、Lu-Hf 同位素和全岩主微量元素、Sr-Nd 同位素分析结果表明其为高硅 ( $\text{SiO}_2=72.66\text{wt}\%\sim 73.70\text{wt}\%$ )、低镁 ( $\text{Mg}^\#=0.28\sim 0.34$ )、弱过铝质 ( $\text{A/CNK}=1.01\sim 1.05$ ) 的高钾钙碱性 I 型花岗岩, 具有正的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 ( $3.28\sim 3.55$ ). 其中两个样品的锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄分别为  $(229.9\pm 2.0)$  和  $(229.3\pm 2.3)$  Ma, 对应的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  分别为  $9.8\sim 12.6$  和  $8.4\sim 13.1$ . 229 Ma 代表了花岗岩结晶年龄, 结合对近年来国内外关于哀牢山深变质杂岩的年代学资料的统计分析, 可以认为哀牢山深变质岩并非前人所认为的是扬子地台前寒武纪结晶基底的一部分, 而是由中元古代、新元古代、海西早期、印支期和喜马拉雅期等不同时代岩石组成的变质杂岩. 滑石板高  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  花岗岩的形成经历了两个阶段: 二叠纪受到流体、熔体交代的地幔楔部分熔融底侵到地壳形成岛弧下地壳; 晚三叠世碰撞后阶段上涌的软流圈地幔热导致新生下地壳重熔. 滑石板高  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  花岗岩记录了哀牢山构造带经历过的一次地壳增生事件.

**关键词**高  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  花岗岩  
晚三叠世  
碰撞后  
哀牢山  
陆壳增生

大陆地壳的增生是通过适当地点从地幔到地球表层传输物质的岩浆过程来实现的 (Albarede, 1998), 主要有两种模式 (Rudnick, 1995): 一种是水平增生, 发生在汇聚板块边缘, 岩浆主要来自俯冲板片的流体、熔体交代的地幔楔和俯冲洋壳; 另一种是垂

向增生, 是地幔来源的玄武质岩浆对地壳的直接补给, 往往与大陆裂解或后碰撞地幔岩浆底侵过程有关. 一直以来对经典造山带 (比如加里东褶皱带和海西褶皱带) 的研究发现花岗岩具有非常富集的 Sm-Nd 和 Lu-Hf 同位素组成, 被解释为古老地壳的重熔

中文引用格式: 刘汇川, 王岳军, 范蔚茗, 等. 2014. 滇西哀牢山地区晚三叠世高  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  花岗岩的构造指示. 中国科学: 地球科学, 44: 2373-2388英文引用格式: Liu H C, Wang Y J, Fan W M, et al. 2014. Petrogenesis and tectonic implications of Late-Triassic high  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  granites in the Ailaoshan tectonic zone (SW China). Science China: Earth Sciences, 57: 2181-2194, doi: 10.1007/s11430-014-4854-z

(Allegre 和 Othman, 1980; Liew 和 Hofmann, 1988; Darbyshire 和 Shepherd, 1994). 这表明现在的大陆地壳主要形成于前寒武纪, 显生宙形成的地壳很少. 近年来, 对显生宙地壳增生最为显著的中亚造山带的研究发现, 该构造带存在大量晚古生代、来源于新生地壳部分熔融的高  $\epsilon_{Nd}(t)-\epsilon_{Hf}(t)$  花岗岩类(Geng 等, 2009; Tang 等, 2012a, 2012b, 2012c). 高  $\epsilon_{Nd}(t)-\epsilon_{Hf}(t)$  花岗岩类为我们研究地壳生长提供一条新的线索.

滇西三江造山带位于特提斯-喜马拉雅构造区与滨太平洋构造区的复合部位, 兼具印支和华南陆块两大构造单元属性, 是研究多个块体相互作用过程与动力学机制的经典地区, 其中哀牢山构造带夹持于思茅-印支地块与扬子板块之间(图 1(a); 云南省地

矿局, 1990; 张旗等, 1996; 钟大赟, 1998; 范蔚茗等, 2009). 目前学术界认为位于亲扬子的思茅地块和亲冈瓦纳的缅甸马地块之间的昌宁-孟连带是古特提斯多岛洋格局的主洋盆遗迹分布区, 代表了古特提斯的主缝合线(从柏林等, 1993; 钟大赟, 1998; Metcalfe, 2002; Wang 等, 2002; Jian 等, 2009a, 2009b; Fan 等, 2010; Wang 等, 2010), 金沙江-哀牢山构造带在晚古生代发育了古特提斯支洋盆或者弧后盆地(魏启荣和沈上越, 1997; Lepvrier 等, 2004; Metcalfe, 2006; Jian 等, 2009a, 2009b; Fan 等, 2010; 刘俊来等, 2011; Zi 等, 2012a). 前人认为哀牢山双变质岩带内的深变质岩系代表了元古代古老地壳的形成时代. 已有研究资料暗示在晚古生代至早中生代哀牢山地区经历了一次

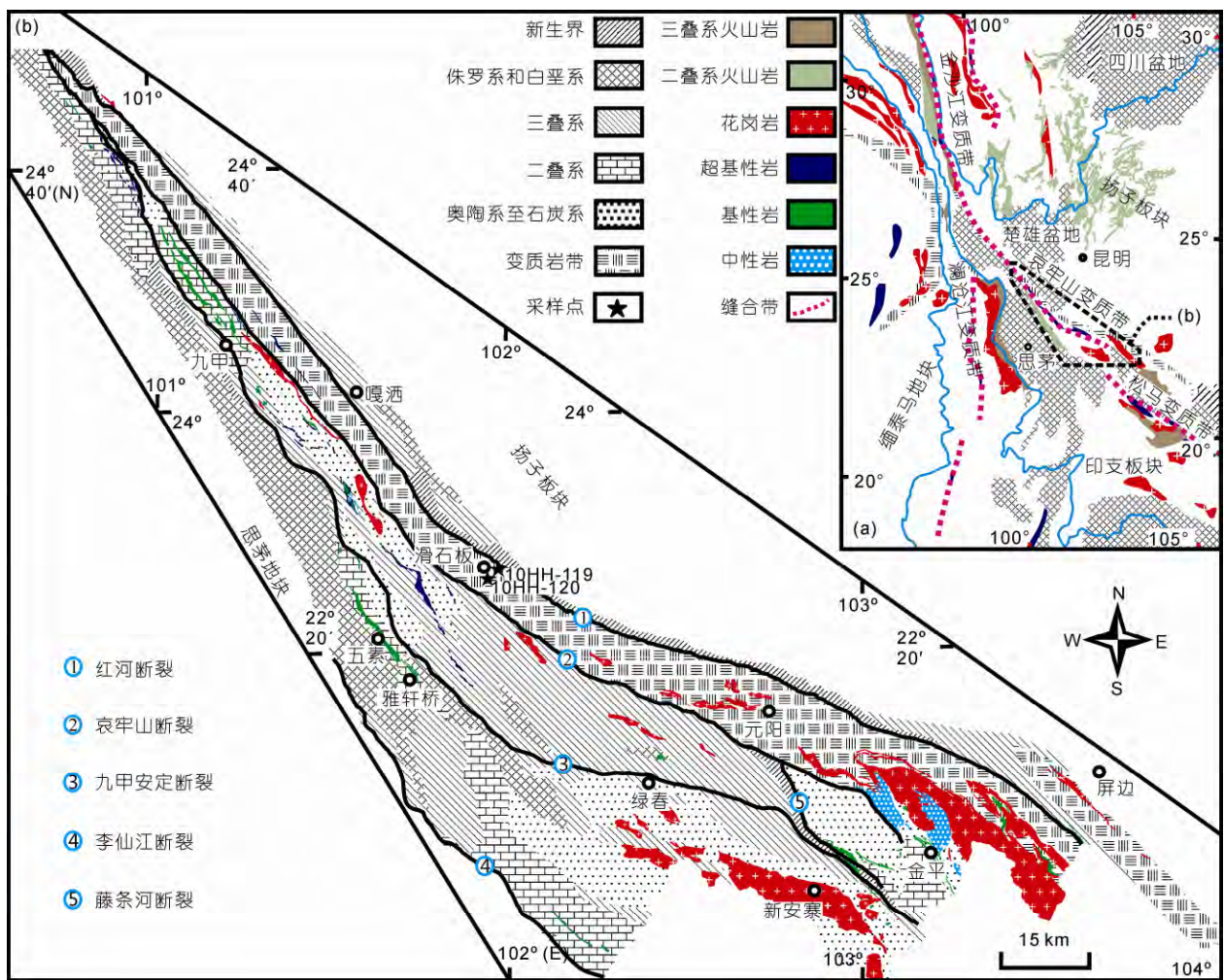


图 1 哀牢山构造带地质简图

(a) 改编自 Zi 等(2013); (b) 改编自云南省地质局 1990 年 1:20 万地质图

显著地壳增生, 即哀牢山支洋盆或者弧后盆地在晚二叠纪至早三叠纪关闭并导致扬子与思茅-印支地块的拼接(Wang 等, 2000; Jian 等, 2009a, 2009b; Zi 等, 2013), 受到俯冲板片的流体、熔体交代的地幔楔和俯冲洋壳熔融形成的岩浆不断加入到地壳中, 形成了弧火山岩, 例如五素玄武岩(Fan 等, 2010)和雅轩桥玄武安山岩(Fan 等, 2010; 刘翠等, 2011), 这种地壳生长的方式以侧向增生为主. Wang 等(2006, 2007)和 Balykin 等(2010)在金平白马寨和越南北部发现了与峨眉山地幔柱有关的超基性侵入体和基性杂岩, 说明哀牢山构造带存在地幔柱这种垂向地壳增生方式. 我们通过系统的野外调查, 在哀牢山中段元江-墨江的滑石板一带识别出了晚三叠世花岗岩, 对其开展了系统的岩石学、精细年代学、锆石 Lu-Hf 同位素组成和地球化学分析, 发现其为高钾钙碱性的 I 型花岗岩, 具有高的正  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  和锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值, 可能记录了区域上的一次地壳生长事件.

## 1 地质背景和样品描述

哀牢山构造带总体呈 NW-SE 向北西窄、南东宽展布于云南省中南部, 向东南经元阳和金平县延伸进入越南境内, 向西北经点苍山与金沙江构造带连接(钟大赉, 1998; 董云鹏等, 2000). 该构造带主要由五条主断裂组成, 自北东向南西依次为红河断裂、哀牢山断裂、九甲-安定断裂和李仙江断裂以及南部的藤条河断裂(图 1(b); 云南省地矿局, 1990). 西侧思茅地块志留系和下泥盆统为厚度较大的陆坡深水碎屑连续沉积, 中上泥盆统转变为富含钠质火山碎屑的陆棚-滨海碎屑沉积组合, 石炭系至二叠系的岩性、岩相和沉积类型的变化比较复杂, 西部和东部主要为大陆边缘火山-沉积岩组合, 中部地区则以稳定类型的陆棚碎屑岩组合和台地碳酸盐岩组合为主. 三叠系该区属于德钦-思茅地层区, 下统缺失, 中统零星分布, 上统发育齐全, 晚卡尼期歪古村组( $T_{3w}$ )与下伏二叠系角度不整合接触(云南省地矿局, 1990). 新平向阳山、镇沅老王寨-浪泥塘、双沟等地出露晚泥盆世到早石炭世蛇绿岩套(魏启荣和沈上越, 1995; 简平等, 1998a, 1998b; Yumul 等, 2008; Jian 等, 2009a, 2009b), 墨江五素和雅轩桥等地分布有具有岛弧地球化学特征的玄武岩(287 Ma; Fan 等, 2010)和玄武安山岩(266 Ma; Jian 等, 2009b; Fan 等, 2010). 魏启荣等

(1997)将哀牢山构造带内岩浆岩初步划分为四个火山岩带: 哀牢山洋脊/准洋脊火山岩带、太忠-李仙江带弧火山岩、邓控-五素火山岩带和潘家寨裂谷火山岩带.

哀牢山构造带以双变质带为特征, 以哀牢山左行走滑-逆冲断裂为界分为北东侧的韧性变形强烈的角闪岩相深变质带和南西侧的以脆韧性为主的低绿片岩相浅变质带. 深变质杂岩带的主体为北部的哀牢山群和南部的瑶山群(云南省地矿局, 1990; 王义昭 and 丁俊, 1996; 李宝龙等, 2008), 哀牢山群由一系列角闪岩相-绿片岩相的片麻岩、角闪岩、透辉岩、花岗岩和大理岩等组成(云南省地矿局, 1990), 带内岩石受剪切活动影响强烈, 糜棱岩化较普遍. 西侧的浅变质岩带由古生代-早中生代低绿片岩相片岩、千枚岩、板岩的浅变质碎屑岩和花岗岩组成(图 1(b); 王义昭 and 丁俊, 1996; 钟大赉 1998; 李宝龙等, 2008; Liu 等, 2012). 样品采自元江到墨江公路旁的哀牢山群内(图 1), GPS 位置分别为  $23^{\circ}34'0.04''\text{N}$ ,  $101^{\circ}56'11.7''\text{E}$  和  $23^{\circ}33'55.8''\text{N}$ ,  $101^{\circ}56'03.1''\text{E}$ , 均为花岗岩, 糜棱岩化不明显, 主要矿物组成为石英(30 vol.%~40 vol.%)、斜长石(25 vol.%~30 vol.%)、碱性长石(10 vol.%~15 vol.%)、黑云母(10 vol.%~15 vol.%)、角闪石(5 vol.%左右)(图 2), 副矿物有磁铁矿、锆石、磷灰石、电气石及少量不透明矿物.

## 2 分析方法

选用无蚀变、无矿化的新鲜岩石样品破碎至约 2 mm 大小, 用 5% HCL 浸泡至无气泡以淋滤掉碳酸盐矿物, 烘干后用玛瑙研钵研磨成粒度细于 200 目的粉末, 用于主微量元素和 Sr-Nd 同位素分析, 同时对样品 10HH-119A 和 10HH-120A 通过人工重砂法分选锆石.

全岩主量元素在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室 Rigaku RIX 2000 型荧光光谱仪(XRF)上测定. 样品的含量由 36 种涵盖硅酸盐样品范围的参考标准物质双含量拟合的工作曲线确定, 分析精度优于 2%~5%, 详细实验步骤见李献华等(2005). 微量元素的测试在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室 Perkin-Elmer ELAN 6000 型 ICP-MS 上完成, 大部分元素分析精度好于 5%, 绝大多数好于 10%. 详细分

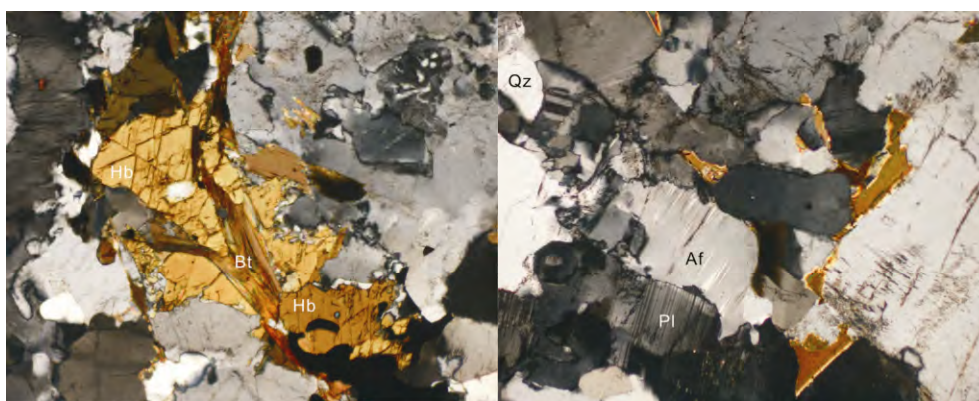


图2 哀牢山构造带晚三叠世花岗岩的显微岩相学特征

Qz, 石英; Pl, 斜长石; Af, 碱性长石; Bt, 黑云母; Hb, 角闪石

析流程参见刘颖等(1996). Sr-Nd 同位素在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室装有九个法拉第杯接收仪和八个电离计数器的 Neptune Plus 多接收电感耦合等离子体质谱仪上测试完成, 详细分析流程参见 Wu 等(2006)和 Yang 等(2006).

锆石阴极发光成像(CL)分析在中国科学院地质与地球物理研究所 CAMECA SX100 型电子探针上进行, 工作条件是 15 kV 加速电压和 15~20 nA 电流. 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室 Neptune 型多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS)、Agilent 7500a 型四极杆电感耦合等离子体质谱仪(Q-ICPMS)和 193 nm 的 ArF 准分子激光系统上进行同时原位测定, 具体分析流程见 Yuan 等(2004)和谢烈文等(2008). 锆石的 U-Pb 同位素比值采用标样 91500 为外部标准校正, 分馏校正和结果的计算利用 GLITTER(ver. 4.0)软件进行(Jackson 等, 2004), 普通 Pb 校正采用 Andersen (2002)介绍的方法, 样品的 U-Pb 年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot(ver. 2.49)程序(Ludwig, 2001).  $\epsilon_{\text{Hf}}$  的计算采用  $^{176}\text{Lu}$  的衰变常数为  $1.867 \times 10^{-10}/\text{a}$ (Scherer 等, 2001), 球粒陨石  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值采用 0.282772,  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值采用 0.0332(Blichert 等, 1997), 以单颗粒锆石 U-Pb 年龄计算  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (早于 1000 Ma 的锆石采用  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄, 其他的锆石采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄). 单阶段 Hf 模式年龄( $T_{\text{DM}}$ )计算时, 亏损地幔  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值采用

0.28325,  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  的比值采用 0.0384(Vervoort 和 Blichert-Toft, 1999). 在两阶段 Hf 模式年龄( $T_{\text{DM}2}$ )计算时, 平均地壳  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值采用 0.015,  $f_{\text{cc}}$  为 -0.55(Griffin 等, 2004).

### 3 地球化学特征

主微量元素和 Sr-Nd 同位素分析测定结果见表 1 和 2, 样品的  $\text{SiO}_2$  含量较高,  $\text{MgO}$  含量较低( $\text{MgO}=0.40 \text{ wt}\% \sim 0.61 \text{ wt}\%$ ),  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值较低(0.81~0.86), 全碱含量较高( $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=7.65 \text{ wt}\% \sim 7.93 \text{ wt}\%$ ), 为高钾钙碱性(图 3(a)), 铝饱和指数(A/CNK)为 1.01~1.05, 小于 1.1(图 3(d)). CIPW 计算结果中标准矿物刚玉分子含量 0.21 vol.%~0.86 vol.%, 小于 1 vol.%, 没有白云母、堇青石和石榴子石, 不同于典型的 S 型花岗岩. 样品具有低的  $\text{FeO}t/\text{MgO}$ (3.4~4.6), 过碱指数 AI(0.76~0.79)小于 0.85, 也不同于 A 型花岗岩. 在原始地幔标准化的微量元素蛛网图(图 4(a))上显示出 Nb, Ta, Ti 和 Sr 强烈负异常, 球粒陨石标准化的稀土元素配分图(图 4(b))上可见轻稀土富集, 重稀土亏损和中等程度 Eu 负异常( $\text{Eu}^*=0.50 \sim 0.70$ ). 样品具有亏损的 Sr-Nd 同位素组成, 对应的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i=0.703492 \sim 0.704440$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=3.28 \sim 3.55$ (表 2). 滑石板花岗岩含有角闪石(图 2), 地球化学特征与澳大利亚 Lachlan 褶皱带内 I 型花岗岩(Hineab 等, 1978; Chappell, 1999)相似(图 3(c)和 5), 因此滑石板花岗岩为高硅低镁弱过铝质高钾钙碱性 I 型花岗岩.

表1 哀牢山构造带中段滑石板花岗岩主微量元素数据

| 样品号                            | 10HH-119A | 10HH-119B | 10HH-120A | 10HH-120B |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 主量元素(wt%)                      |           |           |           |           |
| SiO <sub>2</sub>               | 73.70     | 72.66     | 73.58     | 72.94     |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.29      | 0.30      | 0.37      | 0.38      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.99     | 14.05     | 13.72     | 13.74     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.05      | 2.09      | 2.30      | 2.33      |
| MnO                            | 0.05      | 0.05      | 0.06      | 0.06      |
| MgO                            | 0.40      | 0.45      | 0.58      | 0.61      |
| CaO                            | 1.58      | 1.60      | 1.27      | 1.30      |
| Na <sub>2</sub> O              | 4.21      | 4.38      | 4.29      | 4.14      |
| K <sub>2</sub> O               | 3.44      | 3.56      | 3.48      | 3.56      |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.05      | 0.05      | 0.06      | 0.06      |
| LOI                            | 0.25      | 0.24      | 0.30      | 0.31      |
| 总计                             | 100.01    | 99.42     | 100.02    | 99.42     |
| 微量元素(ppm)                      |           |           |           |           |
| Sc                             | 5.51      | 4.05      | 2.46      | 1.23      |
| Ti                             | 1605      | 1545      | 2041      | 2037      |
| V                              | 13.2      | 14.3      | 20.3      | 18.2      |
| Cr                             | 0.971     | 0.556     | 0.0630    | 0.0770    |
| Co                             | 1.78      | 2.14      | 2.27      | 2.67      |
| Ni                             | 0.907     | 1.01      | 2.02      | 3.84      |
| Cu                             | 0.75      | 1.01      | 1.12      | 3.20      |
| Zn                             | 42.1      | 29.0      | 57.5      | 55.8      |
| Ga                             | 15.3      | 17.1      | 16.4      | 18.7      |
| Ge                             | 1.44      | 1.54      | 1.67      | 1.81      |
| Rb                             | 82.8      | 88.4      | 110       | 123       |
| Sr                             | 108       | 108       | 108       | 110       |
| Y                              | 18.8      | 17.5      | 17.0      | 18.0      |
| Zr                             | 220       | 161       | 253       | 145       |
| Nb                             | 4.72      | 4.86      | 7.21      | 7.76      |
| Cs                             | 0.627     | 0.665     | 1.89      | 1.99      |
| Ba                             | 457       | 5017      | 459       | 512       |
| La                             | 25.8      | 26.1      | 51.6      | 54.5      |
| Ce                             | 51.1      | 52.0      | 92.4      | 99.9      |
| Pr                             | 6.27      | 6.20      | 10.5      | 11.2      |
| Nd                             | 23.3      | 22.7      | 38.3      | 39.9      |
| Sm                             | 4.43      | 4.36      | 6.44      | 6.94      |
| Eu                             | 0.963     | 0.885     | 0.975     | 0.979     |
| Gd                             | 4.04      | 3.97      | 4.91      | 5.17      |
| Tb                             | 0.688     | 0.652     | 0.722     | 0.799     |
| Dy                             | 3.68      | 3.53      | 3.51      | 3.78      |
| Ho                             | 0.712     | 0.697     | 0.656     | 0.704     |
| Er                             | 1.81      | 1.83      | 1.64      | 1.74      |
| Tm                             | 0.273     | 0.249     | 0.241     | 0.227     |
| Yb                             | 1.75      | 1.57      | 1.57      | 1.42      |
| Lu                             | 0.276     | 0.225     | 0.259     | 0.200     |
| Hf                             | 5.97      | 4.55      | 7.22      | 4.07      |
| Ta                             | 0.246     | 0.282     | 0.372     | 0.402     |
| Pb                             | 17.3      | 15.5      | 12.9      | 12.2      |
| Th                             | 6.95      | 6.98      | 11.2      | 12.3      |
| U                              | 0.443     | 0.382     | 0.803     | 0.748     |

## 4 锆石 U-Pb 定年及 Lu-Hf 同位素组成

从两个样品中分选出的锆石均为无色透明或半透明、短柱状自形的晶体. 晶体形态和大小比较均一, 长约 80~150 μm, 长宽比 1:1~2:1, CL 图像显示明显的韵律环带结构(图 6), 为典型的岩浆成因锆石.

两个样品锆石 U-Pb 定年分析结果数据见表 3. 样品 10HH-119A 的锆石 Th 和 U 含量分别为 30.6~300.7 和 91.1~527.4 ppm; 样品 10HH-120A 的锆石 Th 和 U 含量分别为 43.8~138.9 和 68.1~319.7 ppm. Th/U 比值分别为 0.25~0.65 和 0.43~0.65, 均大于 0.1, 进一步表明均为岩浆成因锆石. 样品 10HH-119A 测定了 23 颗锆石, 其中 6 号点明显不协和, 未纳入加权平均年龄的计算, 其余 22 个分析测试点的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 表观年龄为 221.2~239.5 Ma, 加权平均年龄为 (229.9±2.0) Ma(MSWD=1.9; 图 7(a)); 样品 10HH-120A 分析测试了 22 颗锆石, <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 表观年龄为 222.6~240.7 Ma, 加权平均年龄为 (229.3±2.3) Ma(MSWD=0.5, 图 7(b)). 两个年龄在误差范围内高度一致, 229 Ma 代表滑石板花岗岩岩浆结晶年龄.

锆石是适合于 Hf 同位素研究的典型矿物, 因为它有很高的 Hf 含量和同位素封闭温度, 后期的变质作用难以改变其原始的 Hf 同位素组成, 同时它具有低的 <sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 比值, 形成后放射性成因的同位素变化可被忽略, 由年龄不确定性引起的 <sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 比值误差也较为有限(Amelin 等, 1999; 吴福元等, 2007), 对两个样品的锆石 Hf 同位素分析结果见表 4. 样品 10HH-119A 和 10HH-120A 所测的锆石具有非常低的 <sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 比值, 分别介于 0.001665~0.002934 和 0.001363~0.003354, 显示锆石在形成后基本没有放射性成因的 Hf 积累(吴福元等, 2007); <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 比值分别介于 0.282916~0.282998 和 0.282878~0.283007. 以两个样品锆石的加权平均年龄 229.9 和 229.3 Ma 计算出两个样品锆石的 <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 初始比值分别介于 0.282906~0.282987 和 0.282878~0.283007; ε<sub>Hf</sub>(t) 介于 9.8~12.6 和 8.4~13.1(图 8, 表 4); Hf 的单阶模式年龄 T<sub>DM1</sub> 分别介于 376~492 和 352~551 Ma, 平均分别为 443 和 446 Ma; 二阶模式年龄 T<sub>DM2</sub> 分别介于 454~637 Ma 和 423~725 Ma, 平均分别为 560 和 563 Ma.

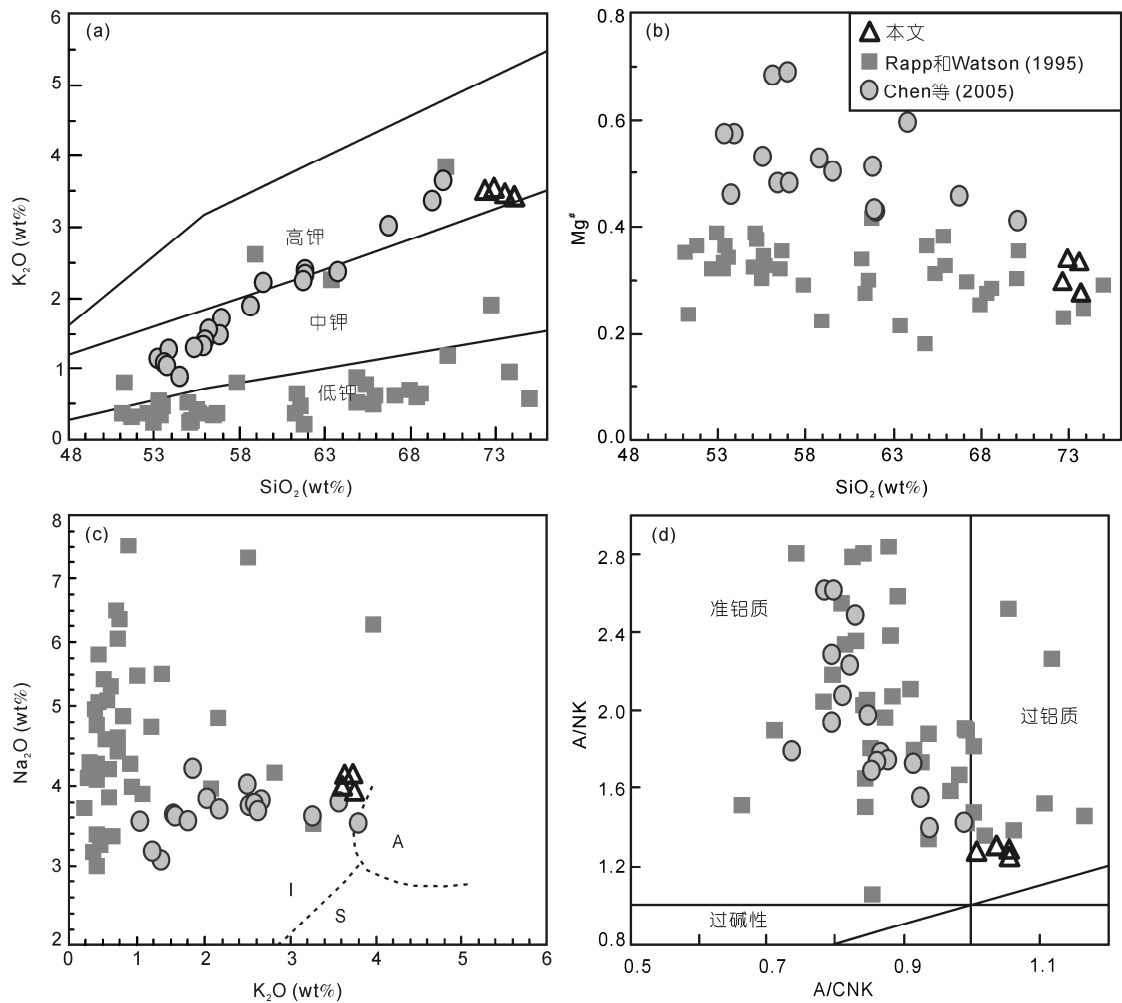


图3  $K_2O$ - $SiO_2$ (a),  $Mg^\#$ - $SiO_2$ (b), 花岗岩  $K_2O$ - $Na_2O$  成因类型(c)和 A/NK-A/CNK(d)图解

(c) 参考 Collins 等(1982),  $Mg^\# = MgO/40.3 / (MgO/40.3 + FeO^t/71.9)$ ,  $A/CNK = Al_2O_3/101.9 / (CaO/56.1 + Na_2O/62.0 + K_2O/94.2)$ ,  $A/NK = Al_2O_3/101.9 / (Na_2O/62.0 + K_2O/94.2)$

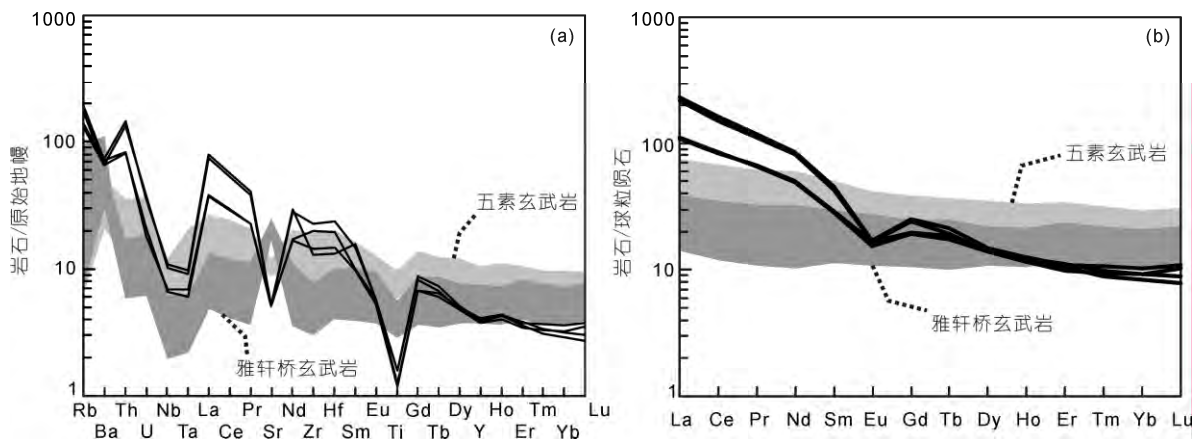


图4 原始地幔标准化的微量元素蛛网图(a)和球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(b)

五素和雅轩桥玄武岩数据引自 Fan 等(2010), 球粒陨石和原始地幔标准化数据引自 Sun 和 McDonough(1989)

表2 哀牢山构造带中段滑石板花岗岩 Sr-Nd 同位素组成

| 样品号       | $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ | $2\sigma$ | $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ | $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ | $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ | $2\sigma$ | $T_{\text{DM}}(\text{Ga})$ | $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ |
|-----------|---------------------------------|---------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------|----------------------------|---------------------------|
| 10HH-119A | 2.222                           | 0.711711                        | 12        | 0.704440                            | 0.1148                            | 0.512697                          | 8         | 0.702                      | 3.55                      |
| 10HH-119B | 2.362                           | 0.711771                        | 10        | 0.704046                            | 0.1162                            | 0.512686                          | 8         | 0.728                      | 3.31                      |
| 10HH-120A | 2.957                           | 0.714053                        | 10        | 0.704379                            | 0.1017                            | 0.512675                          | 9         | 0.649                      | 3.52                      |
| 10HH-120B | 3.260                           | 0.714155                        | 10        | 0.703492                            | 0.1051                            | 0.512668                          | 6         | 0.679                      | 3.28                      |

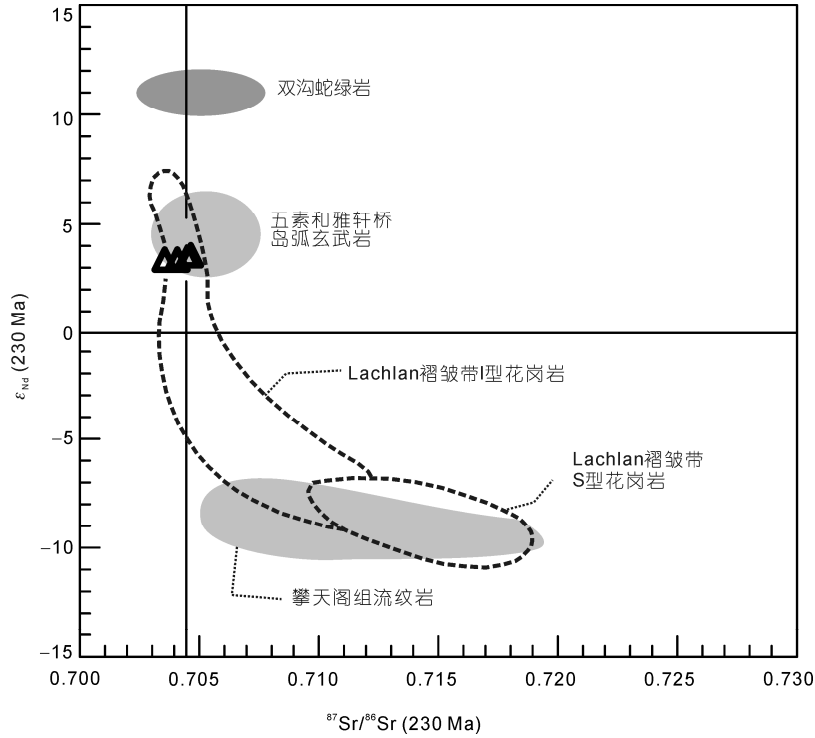


图5 Sr-Nd 同位素关系图解

双沟蛇绿岩投图数据引自 Xu 和 Castillo(2004), 五素和雅轩桥玄武岩投图数据引自 Fan 等(2010), 攀天阁流纹岩投图数据引自 Zi 等(2012c), Lachlan 褶皱带 I 和 S 型花岗岩投图数据引自 Healy 等(2004)

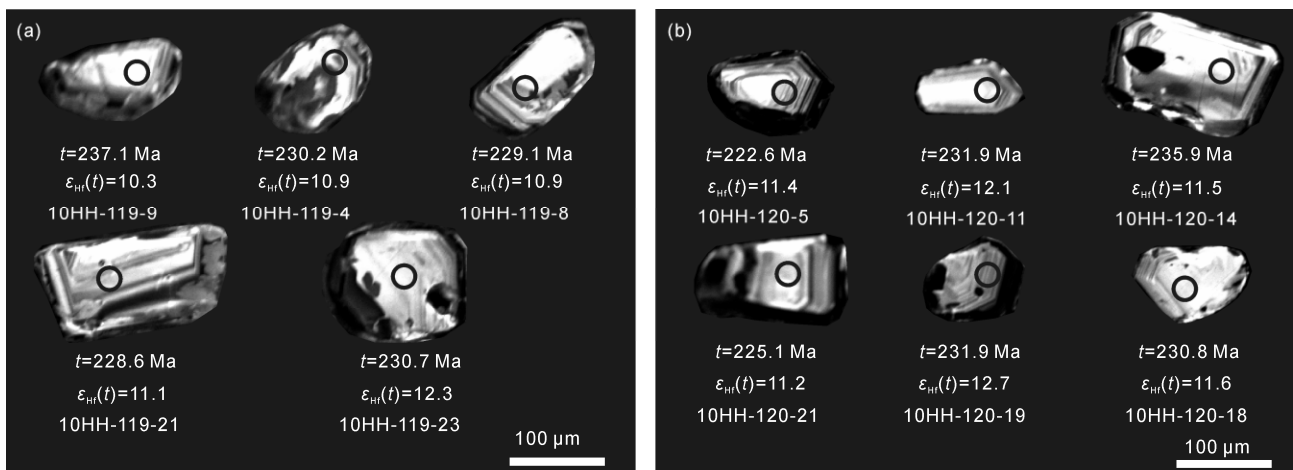


图6 代表性锆石的阴极发光照片

表 3 哀牢山构造带中段滑石板花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄数据(Ma)

| 分析点       | Th<br>(ppm) | U<br>(ppm) | Th/U | Ti<br>(ppm) | $T_{Ti-Zircon}$<br>(°C) | $Pb^{207}/Pb^{206}$ |            | $Pb^{207}/U^{235}$ |            | $Pb^{206}/U^{238}$ |            | $Pb^{207}/Pb^{206}$ |            | $Pb^{206}/U^{238}$ |            | $Pb^{207}/U^{235}$ |            |
|-----------|-------------|------------|------|-------------|-------------------------|---------------------|------------|--------------------|------------|--------------------|------------|---------------------|------------|--------------------|------------|--------------------|------------|
|           |             |            |      |             |                         | 比值                  | 1 $\sigma$ | 比值                 | 1 $\sigma$ | 比值                 | 1 $\sigma$ | 年龄                  | 1 $\sigma$ | 年龄                 | 1 $\sigma$ | 年龄                 | 1 $\sigma$ |
| 10HH-119A |             |            |      |             |                         |                     |            |                    |            |                    |            |                     |            |                    |            |                    |            |
| 01        | 87          | 154        | 0.56 | 375         | 747                     | 0.05445             | 0.00621    | 0.27634            | 0.03072    | 0.03680            | 0.00107    | 389.6               | 237.7      | 233.0              | 6.7        | 247.7              | 24.4       |
| 02        | 43          | 91         | 0.48 | 337         | 725                     | 0.04995             | 0.01004    | 0.25741            | 0.05032    | 0.03737            | 0.00188    | 192.6               | 410.6      | 236.5              | 11.7       | 232.6              | 40.6       |
| 03        | 76          | 140        | 0.55 | 352         | 752                     | 0.05402             | 0.00528    | 0.27615            | 0.02614    | 0.03707            | 0.00104    | 371.7               | 206.6      | 234.7              | 6.5        | 247.6              | 20.8       |
| 04        | 257         | 527        | 0.49 | 323         | 743                     | 0.05463             | 0.00468    | 0.27394            | 0.02240    | 0.03636            | 0.00105    | 397.1               | 181.4      | 230.2              | 6.5        | 245.8              | 17.9       |
| 05        | 77          | 149        | 0.52 | 359         | 739                     | 0.05138             | 0.00581    | 0.26099            | 0.02858    | 0.03684            | 0.00116    | 257.8               | 240.4      | 233.2              | 7.2        | 235.5              | 23.0       |
| 06        | 62          | 244        | 0.25 | 357         | 726                     | 0.06289             | 0.00712    | 0.29216            | 0.03168    | 0.03369            | 0.00121    | 704.5               | 224.3      | 213.6              | 7.5        | 260.3              | 24.9       |
| 07        | 75          | 124        | 0.61 | 366         | 734                     | 0.05285             | 0.00433    | 0.27074            | 0.02146    | 0.03715            | 0.00090    | 322.4               | 175.7      | 235.1              | 5.6        | 243.3              | 17.2       |
| 08        | 89          | 180        | 0.50 | 371         | 732                     | 0.05390             | 0.00538    | 0.26889            | 0.02578    | 0.03618            | 0.00112    | 366.8               | 210.7      | 229.1              | 7.0        | 241.8              | 20.6       |
| 09        | 68          | 104        | 0.65 | 389         | 733                     | 0.05134             | 0.00723    | 0.26527            | 0.03611    | 0.03747            | 0.00146    | 256.2               | 294.8      | 237.1              | 9.1        | 238.9              | 29.0       |
| 10        | 138         | 239        | 0.58 | 373         | 736                     | 0.05159             | 0.00322    | 0.26238            | 0.01571    | 0.03688            | 0.00080    | 267.4               | 137.4      | 233.5              | 4.9        | 236.6              | 12.6       |
| 11        | 66          | 178        | 0.37 | 356         | 750                     | 0.04753             | 0.00570    | 0.23340            | 0.02718    | 0.03561            | 0.00112    | 75.2                | 263.2      | 225.6              | 7.0        | 213.0              | 22.4       |
| 12        | 232         | 397        | 0.58 | 350         | 741                     | 0.05006             | 0.00351    | 0.24378            | 0.01644    | 0.03531            | 0.00081    | 198.0               | 155.2      | 223.7              | 5.0        | 221.5              | 13.4       |
| 13        | 70          | 142        | 0.50 | 360         | 748                     | 0.05399             | 0.00508    | 0.25982            | 0.02364    | 0.03490            | 0.00096    | 370.3               | 199.3      | 221.2              | 6.0        | 234.5              | 19.1       |
| 14        | 60          | 93         | 0.64 | 357         | 721                     | 0.05282             | 0.00754    | 0.26528            | 0.03671    | 0.03642            | 0.00139    | 320.8               | 295.4      | 230.6              | 8.6        | 238.9              | 29.5       |
| 15        | 245         | 525        | 0.47 | 349         | 757                     | 0.05494             | 0.00215    | 0.27601            | 0.01031    | 0.03643            | 0.00058    | 409.8               | 84.6       | 230.7              | 3.6        | 247.5              | 8.2        |
| 16        | 110         | 201        | 0.55 | 315         | 803                     | 0.05658             | 0.00652    | 0.27437            | 0.03032    | 0.03516            | 0.00126    | 474.5               | 237.0      | 222.8              | 7.8        | 246.2              | 24.2       |
| 17        | 85          | 149        | 0.57 | 350         | 753                     | 0.05155             | 0.00501    | 0.25862            | 0.02420    | 0.03638            | 0.00108    | 265.4               | 208.2      | 230.4              | 6.7        | 233.6              | 19.5       |
| 18        | 89          | 164        | 0.55 | 321         | 749                     | 0.05197             | 0.00724    | 0.27132            | 0.03639    | 0.03786            | 0.00156    | 284.2               | 290.8      | 239.5              | 9.7        | 243.7              | 29.1       |
| 19        | 301         | 526        | 0.57 | 377         | 746                     | 0.05700             | 0.00293    | 0.28262            | 0.01384    | 0.03596            | 0.00071    | 490.8               | 110.3      | 227.7              | 4.4        | 252.7              | 11.0       |
| 20        | 70          | 150        | 0.47 | 348         | 738                     | 0.05886             | 0.00855    | 0.28723            | 0.04024    | 0.03539            | 0.00148    | 561.9               | 288.7      | 224.2              | 9.2        | 256.4              | 31.7       |
| 21        | 37          | 120        | 0.31 | 438         | 743                     | 0.05076             | 0.00815    | 0.25267            | 0.03878    | 0.03610            | 0.00182    | 230.1               | 333.6      | 228.6              | 11.3       | 228.7              | 31.4       |
| 22        | 69          | 108        | 0.64 | 328         | 724                     | 0.05537             | 0.00842    | 0.27765            | 0.04105    | 0.03637            | 0.00141    | 427.1               | 307.7      | 230.3              | 8.7        | 248.8              | 32.6       |
| 23        | 62          | 124        | 0.50 | 387         | 747                     | 0.05411             | 0.00770    | 0.27186            | 0.03710    | 0.03644            | 0.00158    | 375.5               | 292.0      | 230.7              | 9.9        | 244.2              | 29.6       |
| 10HH-120A |             |            |      |             |                         |                     |            |                    |            |                    |            |                     |            |                    |            |                    |            |
| 01        | 99          | 203        | 0.49 | 403         | 747                     | 0.04684             | 0.00870    | 0.23909            | 0.04321    | 0.03703            | 0.00171    | 40.8                | 392.8      | 234.4              | 10.6       | 217.7              | 35.4       |
| 02        | 66          | 104        | 0.64 | 320         | 725                     | 0.04609             | 0.01766    | 0.23375            | 0.08725    | 0.03679            | 0.00339    | 2.3                 | 731.2      | 232.9              | 21.1       | 213.3              | 71.8       |
| 03        | 116         | 197        | 0.59 | 427         | 752                     | 0.04740             | 0.01021    | 0.24137            | 0.05034    | 0.03694            | 0.00212    | 68.9                | 445.7      | 233.9              | 13.2       | 219.5              | 41.2       |
| 04        | 70          | 114        | 0.61 | 389         | 743                     | 0.04827             | 0.02217    | 0.23850            | 0.10640    | 0.03585            | 0.00411    | 112.7               | 828.6      | 227.0              | 25.6       | 217.2              | 87.2       |
| 05        | 73          | 165        | 0.44 | 370         | 739                     | 0.05692             | 0.00799    | 0.27563            | 0.03715    | 0.03514            | 0.00149    | 487.6               | 283.5      | 222.6              | 9.3        | 247.2              | 29.6       |
| 06        | 110         | 204        | 0.54 | 322         | 726                     | 0.05567             | 0.00776    | 0.27901            | 0.03741    | 0.03636            | 0.00151    | 438.9               | 283.8      | 230.3              | 9.4        | 249.9              | 29.7       |
| 07        | 126         | 226        | 0.56 | 354         | 734                     | 0.05102             | 0.00853    | 0.25724            | 0.04144    | 0.03658            | 0.00177    | 241.6               | 345.6      | 231.6              | 11.0       | 232.4              | 33.5       |
| 08        | 74          | 115        | 0.64 | 344         | 732                     | 0.05700             | 0.01256    | 0.28298            | 0.06090    | 0.03602            | 0.00182    | 490.9               | 424.5      | 228.1              | 11.3       | 253.0              | 48.2       |
| 09        | 55          | 98         | 0.56 | 347         | 733                     | 0.05521             | 0.01072    | 0.27874            | 0.05265    | 0.03663            | 0.00177    | 420.6               | 383.6      | 231.9              | 11.0       | 249.7              | 41.8       |
| 10        | 57          | 101        | 0.56 | 359         | 736                     | 0.05227             | 0.01206    | 0.25923            | 0.05852    | 0.03598            | 0.00184    | 297.3               | 455.3      | 227.9              | 11.5       | 234.0              | 47.2       |
| 11        | 86          | 167        | 0.52 | 418         | 750                     | 0.05477             | 0.00918    | 0.27653            | 0.04461    | 0.03663            | 0.00180    | 402.9               | 337.2      | 231.9              | 11.2       | 247.9              | 35.5       |
| 12        | 126         | 201        | 0.63 | 380         | 741                     | 0.06068             | 0.01076    | 0.30233            | 0.05122    | 0.03616            | 0.00203    | 627.8               | 342.3      | 229.0              | 12.7       | 268.2              | 39.9       |
| 13        | 139         | 320        | 0.43 | 410         | 748                     | 0.04835             | 0.00627    | 0.24522            | 0.03056    | 0.03680            | 0.00143    | 116.4               | 280.1      | 233.0              | 8.9        | 222.7              | 24.9       |
| 14        | 74          | 129        | 0.57 | 305         | 721                     | 0.05283             | 0.03062    | 0.27134            | 0.15310    | 0.03727            | 0.00522    | 321.3               | 958.3      | 235.9              | 32.4       | 243.8              | 122.3      |
| 15        | 86          | 134        | 0.64 | 450         | 757                     | 0.05113             | 0.01741    | 0.24951            | 0.08220    | 0.03541            | 0.00320    | 246.8               | 638.1      | 224.3              | 19.9       | 226.2              | 66.8       |
| 16        | 44          | 72         | 0.61 | 715         | 803                     | 0.05751             | 0.01333    | 0.27880            | 0.06216    | 0.03518            | 0.00237    | 510.9               | 442.1      | 222.9              | 14.8       | 249.7              | 49.4       |
| 17        | 82          | 173        | 0.47 | 431         | 753                     | 0.05552             | 0.00613    | 0.27541            | 0.02928    | 0.03600            | 0.00118    | 433.0               | 228.9      | 228.0              | 7.3        | 247.0              | 23.3       |
| 18        | 65          | 110        | 0.59 | 415         | 749                     | 0.05238             | 0.01174    | 0.26316            | 0.05742    | 0.03646            | 0.00201    | 302.0               | 443.6      | 230.8              | 12.5       | 237.2              | 46.2       |
| 19        | 69          | 134        | 0.51 | 401         | 746                     | 0.06172             | 0.01201    | 0.31149            | 0.05749    | 0.03663            | 0.00241    | 664.3               | 369.7      | 231.9              | 15.0       | 275.3              | 44.5       |
| 20        | 71          | 116        | 0.62 | 366         | 738                     | 0.05295             | 0.00779    | 0.26103            | 0.03753    | 0.03578            | 0.00123    | 326.6               | 303.4      | 226.6              | 7.6        | 235.5              | 30.2       |
| 21        | 118         | 185        | 0.64 | 388         | 743                     | 0.05528             | 0.00692    | 0.27071            | 0.03262    | 0.03554            | 0.00132    | 423.4               | 257.7      | 225.1              | 8.2        | 243.3              | 26.1       |
| 22        | 44          | 68         | 0.65 | 315         | 724                     | 0.07016             | 0.01601    | 0.36772            | 0.08111    | 0.03804            | 0.00235    | 933.0               | 408.9      | 240.7              | 14.6       | 318.0              | 60.2       |



表4 哀牢山构造带中段滑石板花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 Lu-Hf 同位素数据

| 分析点       | 年龄(Ma) | $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | $2\sigma$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ | $\epsilon_{\text{Hf}}(0)$ | $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ | $T_{\text{DM}}(\text{Ma})$ | $T_{\text{DM}}^{\text{C}}(\text{Ma})$ | $f_{\text{Lu/Hf}}$ |
|-----------|--------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| 10HH-119A |        |                                   |                                   |                                   |           |                                     |                           |                           |                            |                                       |                    |
| 01        | 229.9  | 0.071679                          | 0.002514                          | 0.282934                          | 0.000016  | 0.282924                            | 5.7                       | 10.4                      | 469.5                      | 597.4                                 | -0.92              |
| 02        | 229.9  | 0.051852                          | 0.001854                          | 0.282974                          | 0.000014  | 0.282966                            | 7.1                       | 11.9                      | 403.8                      | 501.4                                 | -0.94              |
| 03        | 229.9  | 0.061812                          | 0.002187                          | 0.282943                          | 0.000014  | 0.282934                            | 6.1                       | 10.8                      | 452.5                      | 574.4                                 | -0.93              |
| 04        | 229.9  | 0.067339                          | 0.002537                          | 0.282949                          | 0.000015  | 0.282939                            | 6.3                       | 10.9                      | 447.5                      | 563.3                                 | -0.92              |
| 05        | 229.9  | 0.048782                          | 0.001741                          | 0.282960                          | 0.000014  | 0.282952                            | 6.6                       | 11.4                      | 423.1                      | 532.5                                 | -0.95              |
| 06        | 229.9  | 0.057979                          | 0.002081                          | 0.282952                          | 0.000016  | 0.282943                            | 6.4                       | 11.1                      | 438.5                      | 553.7                                 | -0.94              |
| 07        | 229.9  | 0.073740                          | 0.002566                          | 0.282934                          | 0.000015  | 0.282923                            | 5.7                       | 10.4                      | 471.2                      | 599.5                                 | -0.92              |
| 08        | 229.9  | 0.052755                          | 0.001872                          | 0.282937                          | 0.000013  | 0.282929                            | 5.8                       | 10.6                      | 457.3                      | 584.8                                 | -0.94              |
| 09        | 229.9  | 0.072943                          | 0.002515                          | 0.282998                          | 0.000015  | 0.282987                            | 8.0                       | 12.6                      | 375.9                      | 453.8                                 | -0.92              |
| 10        | 229.9  | 0.073555                          | 0.002541                          | 0.282968                          | 0.000017  | 0.282957                            | 6.9                       | 11.6                      | 419.6                      | 520.6                                 | -0.92              |
| 11        | 229.9  | 0.069493                          | 0.002458                          | 0.282919                          | 0.000014  | 0.282909                            | 5.2                       | 9.9                       | 491.2                      | 631.3                                 | -0.93              |
| 12        | 229.9  | 0.054550                          | 0.001919                          | 0.282954                          | 0.000013  | 0.282946                            | 6.4                       | 11.2                      | 432.8                      | 546.2                                 | -0.94              |
| 13        | 229.9  | 0.062442                          | 0.002184                          | 0.282916                          | 0.000016  | 0.282906                            | 5.1                       | 9.8                       | 492.5                      | 636.3                                 | -0.93              |
| 14        | 229.9  | 0.083829                          | 0.002934                          | 0.282945                          | 0.000015  | 0.282932                            | 6.1                       | 10.7                      | 459.1                      | 577.3                                 | -0.91              |
| 15        | 229.9  | 0.066687                          | 0.002470                          | 0.282948                          | 0.000013  | 0.282938                            | 6.2                       | 10.9                      | 448.4                      | 565.4                                 | -0.93              |
| 16        | 229.9  | 0.064411                          | 0.002265                          | 0.282955                          | 0.000014  | 0.282945                            | 6.5                       | 11.2                      | 436.7                      | 549.2                                 | -0.93              |
| 17        | 229.9  | 0.065209                          | 0.002302                          | 0.282948                          | 0.000016  | 0.282938                            | 6.2                       | 10.9                      | 447.4                      | 565.4                                 | -0.93              |
| 18        | 229.9  | 0.059743                          | 0.002099                          | 0.282944                          | 0.000013  | 0.282935                            | 6.1                       | 10.8                      | 449.5                      | 570.5                                 | -0.94              |
| 19        | 229.9  | 0.071619                          | 0.002592                          | 0.282931                          | 0.000013  | 0.282920                            | 5.6                       | 10.3                      | 475.8                      | 606.1                                 | -0.92              |
| 20        | 229.9  | 0.059243                          | 0.002083                          | 0.282935                          | 0.000013  | 0.282926                            | 5.8                       | 10.5                      | 463.5                      | 592.4                                 | -0.94              |
| 21        | 229.9  | 0.044985                          | 0.001665                          | 0.282951                          | 0.000014  | 0.282944                            | 6.3                       | 11.1                      | 434.8                      | 551.6                                 | -0.95              |
| 22        | 229.9  | 0.066359                          | 0.002312                          | 0.282955                          | 0.000015  | 0.282945                            | 6.5                       | 11.2                      | 435.9                      | 547.6                                 | -0.93              |
| 23        | 229.9  | 0.050404                          | 0.001792                          | 0.282985                          | 0.000013  | 0.282977                            | 7.5                       | 12.3                      | 387.1                      | 475.8                                 | -0.95              |
| 10HH-120A |        |                                   |                                   |                                   |           |                                     |                           |                           |                            |                                       |                    |
| 01        | 229.3  | 0.050215                          | 0.001803                          | 0.282914                          | 0.000020  | 0.282907                            | 5.0                       | 9.8                       | 489                        | 636                                   | -0.95              |
| 02        | 229.3  | 0.098606                          | 0.003354                          | 0.282932                          | 0.000025  | 0.282917                            | 5.6                       | 10.2                      | 485                        | 612                                   | -0.90              |
| 03        | 229.3  | 0.090454                          | 0.003165                          | 0.282912                          | 0.000021  | 0.282898                            | 4.9                       | 9.5                       | 512                        | 655                                   | -0.90              |
| 04        | 229.3  | 0.037334                          | 0.001400                          | 0.283007                          | 0.000018  | 0.283001                            | 8.3                       | 13.1                      | 352                        | 423                                   | -0.96              |
| 05        | 229.3  | 0.036522                          | 0.001363                          | 0.282958                          | 0.000018  | 0.282952                            | 6.6                       | 11.4                      | 421                        | 533                                   | -0.96              |
| 06        | 229.3  | 0.075658                          | 0.002624                          | 0.282954                          | 0.000023  | 0.282942                            | 6.4                       | 11.1                      | 442                        | 555                                   | -0.92              |
| 07        | 229.3  | 0.085436                          | 0.002935                          | 0.282953                          | 0.000023  | 0.282940                            | 6.4                       | 11.0                      | 447                        | 560                                   | -0.91              |
| 08        | 229.3  | 0.091109                          | 0.003110                          | 0.282944                          | 0.000022  | 0.282931                            | 6.1                       | 10.7                      | 463                        | 581                                   | -0.91              |
| 09        | 229.3  | 0.068606                          | 0.002376                          | 0.282892                          | 0.000023  | 0.282882                            | 4.2                       | 8.9                       | 531                        | 693                                   | -0.93              |
| 10        | 229.3  | 0.075617                          | 0.002636                          | 0.282939                          | 0.000024  | 0.282928                            | 5.9                       | 10.5                      | 465                        | 589                                   | -0.92              |
| 11        | 229.3  | 0.054265                          | 0.001925                          | 0.282980                          | 0.000019  | 0.282972                            | 7.3                       | 12.1                      | 396                        | 489                                   | -0.94              |
| 12        | 229.3  | 0.067958                          | 0.002349                          | 0.282878                          | 0.000021  | 0.282867                            | 3.7                       | 8.4                       | 551                        | 725                                   | -0.93              |
| 13        | 229.3  | 0.051072                          | 0.001826                          | 0.282955                          | 0.000029  | 0.282947                            | 6.5                       | 11.2                      | 430                        | 544                                   | -0.94              |
| 14        | 229.3  | 0.090911                          | 0.003261                          | 0.282969                          | 0.000027  | 0.282955                            | 7.0                       | 11.5                      | 426                        | 525                                   | -0.90              |
| 15        | 229.3  | 0.057632                          | 0.002093                          | 0.282950                          | 0.000021  | 0.282941                            | 6.3                       | 11.0                      | 441                        | 558                                   | -0.94              |
| 16        | 229.3  | 0.064647                          | 0.002286                          | 0.282940                          | 0.000025  | 0.282930                            | 5.9                       | 10.6                      | 458                        | 583                                   | -0.93              |
| 17        | 229.3  | 0.058081                          | 0.002068                          | 0.282965                          | 0.000020  | 0.282956                            | 6.8                       | 11.5                      | 420                        | 525                                   | -0.94              |
| 18        | 229.3  | 0.075222                          | 0.002595                          | 0.282970                          | 0.000021  | 0.282959                            | 7.0                       | 11.6                      | 418                        | 517                                   | -0.92              |
| 19        | 229.3  | 0.049038                          | 0.001738                          | 0.282997                          | 0.000019  | 0.282989                            | 7.9                       | 12.7                      | 369                        | 449                                   | -0.95              |
| 20        | 229.3  | 0.077129                          | 0.002639                          | 0.282936                          | 0.000020  | 0.282925                            | 5.8                       | 10.4                      | 468                        | 595                                   | -0.92              |
| 21        | 229.3  | 0.069068                          | 0.002431                          | 0.282957                          | 0.000020  | 0.282947                            | 6.6                       | 11.2                      | 435                        | 545                                   | -0.93              |
| 22        | 229.3  | 0.083982                          | 0.002875                          | 0.282990                          | 0.000023  | 0.282978                            | 7.7                       | 12.3                      | 391                        | 475                                   | -0.91              |

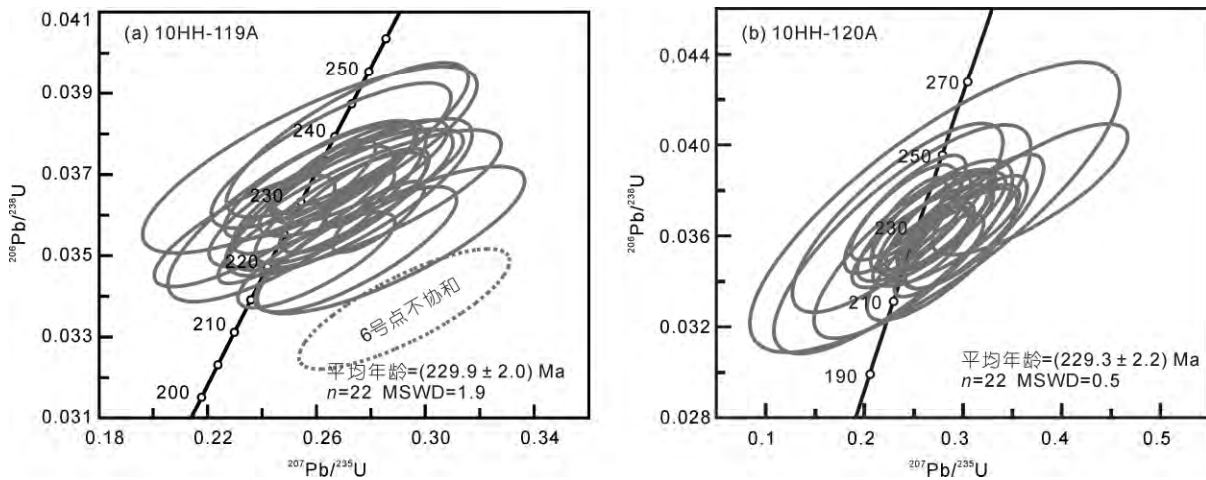


图 7 哀牢山构造带中段滑石板花岗岩样品的锆石 U-Pb 年龄谐和图

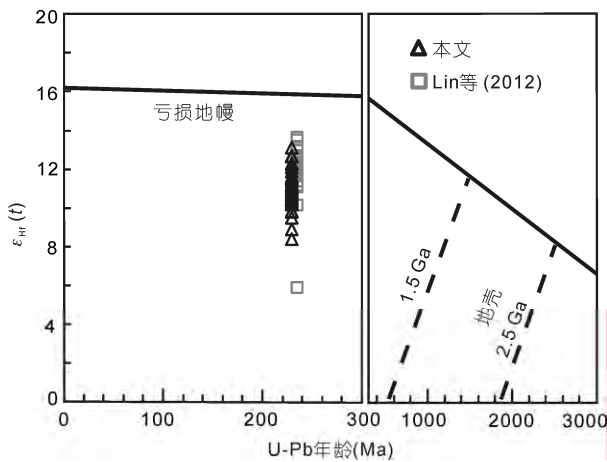


图 8 哀牢山构造带中段花岗岩锆石  $\epsilon_{Hf}(t)$ - $t$  图解

亏损地幔和地壳 Hf 演化线引自 Yang 等(2007)和 Griffin 等(2004)

## 5 讨论

### 5.1 哀牢山深变质带内岩石形成时代的思考

哀牢山深变质杂岩带(即哀牢山群)一直被认为形成于元古代,是扬子地台结晶基底的一部分(翟明国等, 1990; 钟大赉, 1998). 随着近年研究的深入,发现其岩石组成及时代属性可能远比最初的认识要复杂. 例如,李宝龙等(2008)和戚学祥等(2010)先后在哀牢山中段发现了 247.2~250.2 Ma 的糜棱岩化花岗岩和 239.8 Ma 的黑云母花岗闪长质片麻岩,张玉泉等(2004)在金平识别出了 247.9 Ma 的糜棱岩化碱性花岗岩,李宝龙等(2008)在北侧点苍山深变质带发现了闪长质糜棱岩(233 Ma), Qi 等(2012)在哀牢山南

段大平厘定出了新元古代(769~873 Ma)角闪辉长岩和花岗闪长岩(761~829 Ma),刘俊来等(2008)报道了点苍山新元古代花岗质岩脉(842.5 和 833 Ma),同时变质带内还有大量新生代火成岩的报道. 本文的高钾钙碱性 I 型花岗岩出露在深变质带内,代表本区晚三叠世一次岩浆活动,说明哀牢山深变质杂岩带中含有晚三叠世岩浆作用记录. 作者统计了国内外学者对哀牢山群和点苍山群岩石开展的锆石 U-Pb 年代学分析测试点共计 609 个,除去继承锆石和变质锆石,剩余 449 个年龄的频谱图(图 9)具有四个峰值,分别为新元古代(~773 Ma)、早石炭世(~353 Ma)、三叠纪(~239 Ma)和新生代(~29 Ma). 除此之外,前人报道的 Sm-Nd, Rb-Sr 和 Pb-Pb 等时线年龄主要集中在 1300~1600 Ma (翟明国等, 1990; 邹日等, 1997; 钟大赉, 1998; 沙绍礼等, 1999). 因此哀牢山深变质带应该是包含中元古代、新元古代、海西运动早期、印支期和喜马拉雅期等多期次岩石的杂岩. 这套杂岩在 17~30 Ma 左右开始受到红河-哀牢山左旋走滑断裂的改造(Cao 等, 2011).

### 5.2 滑石板高 $\epsilon_{Nd}(t)$ - $\epsilon_{Hf}(t)$ 花岗岩的成因

两个样品锆石 Th/U 比值和 CL 图像说明其为典型的岩浆成因锆石,利用 Ferry 等(2007)提出的锆石钛饱和温度计算得到的平均温度分别为 735 和 743°C. 因为样品含有大量石英,而不含有金红石,所以计算时  $\alpha_{SiO_2}=1.0$ ,  $\alpha_{TiO_2}=0.5$ (Watson 等, 2006; Wang 等, 2012),该温度代表了滑石板花岗岩中锆石结晶的最高温度(Wang 等, 2012).

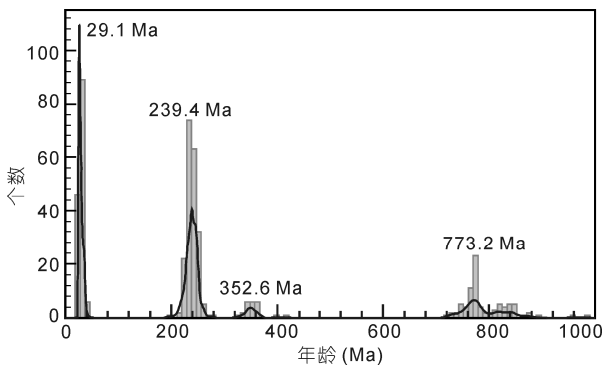


图9 哀牢山深变质杂岩带锆石 U-Pb 年龄谱系图

数据来源于张玉泉等(2004); 李宝龙等(2008); 刘俊来等(2008); 戚学祥等(2010); Cao 等(2012); Lin 等(2012); Qi 等(2012)和本文

按照 Barbarin(1999)的花岗岩分类方案, 这套花岗岩是富含角闪石钙碱性花岗岩(ACG), 这类花岗岩有两种来源: (1) 幔源低钾玄武质岩浆的分离结晶 (Barth 等, 1995); (2) 亚碱性变质玄武岩的部分熔融 (Rapp 和 Watson, 1995). 一般认为大量的基性母岩浆才能分离结晶出少量酸性岩(Gunnarsson 等, 1998; Peccerillo 等, 2003), 在哀牢山地区并没有晚三叠世幔源玄武岩大量出露, 也没有发现过渡的中性岩, 所以滑石板花岗岩不会来源于幔源玄武质岩浆的分离结晶. Rapp 等(1995)的实验表明玄武质角闪岩相脱水熔融可以形成中酸性熔体, 在 8~12 kbar 压力下残余麻粒岩相, 在 12~32 kbar 压力下残余含石榴子石麻粒岩相到榴辉岩相, 但是无论在什么压力条件下形成的熔体 MgO 含量都非常低, 镁指数( $Mg^{\#}$ )均小于 0.4(图 3(b)), 滑石板花岗岩镁指数为 0.28~0.34. 样品锆石具有异常亏损的 Lu-Hf 和 Sm-Nd 同位素组成和年轻 Hf 二阶段模式年龄(423~725 Ma), 因此其源岩应该是新生的亚碱性变质玄武岩. Chen 等(2005)对西准格尔克拉玛依高镁( $Mg^{\#}=0.48\sim0.63$ )杂岩(图 3)的研究认为其形成于岩石圈地幔的部分熔融, 滑石板花岗岩地化特征与之完全不同, 说明其源岩不应直接来源于岩石圈地幔. 我们注意到在哀牢山构造带出露的双沟蛇绿岩(340 Ma)Sm-Nd 同位素非常亏损( $\epsilon_{Nd}=7.9\sim13.5$ ; Xu 和 Castillo, 2004), 五素(287 Ma)和雅轩桥(265~249 Ma)岛弧玄武岩也具有亏损的 Sm-Nd 同位素值( $\epsilon_{Nd}=3.52\sim5.54$ , Fan 等, 2010), 滑石板花岗岩的 Sr-Nd 同位素组成与五素和雅轩桥岛弧玄武岩相似(图 5), 微量元素 Nb, Ta 和中稀土元素含量也与五素和雅轩桥玄武岩相近(图 4). 在早三叠世

哀牢山支洋盆或者弧后盆地已经闭合(Jian 等, 2009a, 2009b; Zi 等, 2012b, 2012c; 刘汇川等, 2013), 晚三叠世的滑石板花岗岩源岩不可能是俯冲的洋壳. 此外研究区没有比滑石板花岗岩稍早(中三叠世)或者同期中基性岩浆岩的分布, 说明滑石板花岗岩源岩也不可能是在三叠纪形成. 因此其源区应该是二叠纪受到流体、熔体交代的地幔楔部分熔融底侵到下地壳形成的岛弧下地壳.

### 5.3 构造指示

在哀牢山构造带内, 刘翠等(2011)在绿春发现了形成于 247.3 Ma 的由岛弧向陆陆碰撞过渡背景的流纹岩; 戚学祥等(2010)报道了哀牢山中上部具同碰撞环境地球化学指标的 250.2 和 247.2 Ma 的花岗岩. 哀牢山构造带北部的金沙江构造带内攀天阁组流纹岩(247~246 Ma, 其 Sr-Nd 同位素组成见图 5), 被认为形成于陆陆或者陆弧同碰撞环境(Zi 等, 2012c). 南段的越南北部昆嵩杂岩中石榴石花岗岩(242.8 Ma)也被认为是同碰撞花岗岩(Owada 等, 2006). 另外, 在越南北部存在一系列右旋走滑剪切带. 其中的角闪石、黑云母和白云母的  $^{40}Ar/^{39}Ar$  坪年龄集中在 240~250 Ma (Lepvrier 等, 1997; Nagy 等, 2001; Lepvrier 等, 2004; Maluski 等, 2005; Owada 等, 2007), 高级变质岩的锆石变质年龄集中在 245~250 Ma. 因此哀牢山古特提斯支洋盆或者弧后盆地在早三叠世早期已经基本闭合, 扬子板块与思茅-印支板块开始碰撞. Jian 等(2009b)对大龙凯基性和超基性侵入岩的研究认为其形成于 245.6 Ma, 北部金沙江崔依比组双峰式火山岩形成于 245~237 Ma(Zi 等, 2012c), 这些说明在中三叠世该区可能已经开始向造山后伸展环境转化.

高钾钙碱性 I 型花岗岩主要产于两种构造背景 (Roberts 和 Clemens, 1993): 一种是类似于安第斯山的大陆弧背景, 另一种是类似于喀里多尼亚的碰撞后构造环境. 思茅地块与扬子板块在早三叠世就已经开始碰撞, 这套 I 型花岗岩不可能是大陆弧成因, 时序上对应于碰撞后阶段. 兰坪-绿春地区晚三叠世卡尼阶上部歪古村组( $T_3w$ )与下伏二叠系角度不整合接触(云南省地矿局, 1990), 也说明滇西地区在晚三叠世已转化为碰撞后的伸展环境.

晚三叠世研究区及其周边地区发育了广泛的岩浆作用, 例如点苍山花岗质糜棱岩(233 Ma; 李宝龙等, 2008)、金沙江贡卡花岗岩闪长岩(232 Ma; 高睿等,

2010)、金沙江羊拉花岗闪长岩(229.6 Ma; 高睿等, 2010)、金沙江北吾花岗闪长岩(233.9 Ma; Zhu 等, 2011)、金沙江里农二长花岗岩(233.1 Ma; Zhu 等, 2011)、金沙江路农花岗闪长岩(231 Ma; Zhu 等, 2011)、金沙江鲁甸花岗闪长岩和二长岩(231~214 Ma; Zi 等, 2013)、澜沧江临沧岩体北段黑云母二长花岗岩(229.4 Ma; 彭头平等, 2006)、南段黑云母二长花岗岩(230.4 Ma; 彭头平等, 2006)、澜沧江忙坏组上段流纹岩(231 Ma; 彭头平等, 2006; 范蔚茗等, 2009)、腾冲-梁和地区二云母花岗岩(234.1 Ma; 李再会等, 2010)等, 这些中酸性火成岩大都被认为是古老地壳重熔的产物. 本文滑石板花岗岩与它们不同, 具有高的正  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值, 源于新生的岛弧下地壳. Lin 等(2012) 在点苍山也识别出了 234.5 Ma 高的正  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  片麻岩(图 8), 其成因应与滑石板花岗岩相似. Rapp 等(1995)的实验表明变质玄武岩熔融的最低温度为 1000°C, 地壳加厚和中下地壳的放射性元素生热显然无法产生这么高的温度, 那么基性岛弧下地壳熔融的热源来自哪里呢?

板块在消减带向下俯冲时, 玄武质的板片由绿片岩相经角闪岩相转变为榴辉岩相, 榴辉岩的密度很大, 超过了软流圈地幔的浮力, 就会发生板片断裂, 随后上涌的高温软流圈地幔加热中下地壳, 产生大量中酸性岩浆(Atherton 和 Ghani, 2002). 正如前面讨论的在研究区分布有大量集中在 229~234 Ma 的火成岩. 因此, 我们认为研究区晚三叠世的这次岩浆活动可能与碰撞后板片断裂有关. 板片断裂上涌的软流圈地幔提供的热量造成二叠纪新生岛弧下地壳和古老地壳物质的熔融, 形成了金沙江-哀牢山构造带集中在 229~234 Ma 中酸性火成岩, 其中的高  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  滑石

板花岗岩很好的记录了该区早期(二叠纪)的地壳增生事件. 哀牢山构造带在晚古生代至早中生代是古特提斯支洋盆或者弧后盆地, 与中亚造山带等世界著名的显生宙地壳增生地区相比规模较小, 且受到后期喜马拉雅运动的强烈改造, 所以区域上地壳生长的火成岩记录有限, 本文高的正  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  花岗岩的发现可能为我们研究滇西地区乃至整个扬子板块西缘显生宙地壳增生寻找到了一个突破口.

## 6 结论

(1) 哀牢山中段滑石板花岗岩为高硅低镁弱过铝的高钾钙碱性 I 型花岗岩. 锆石 U-Pb 定年分别得到了(229.9±2.0)和(229.3±2.3) Ma 的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄, 代表了滑石板花岗岩结晶年龄. 样品具有异常亏损的锆石 Lu-Hf 和全岩 Sm-Nd 同位素组成以及年轻的同位素模式年龄, 对应的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=11.0\sim 10.9$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=3.28\sim 3.55$ .

(2) 统计分析近年来国内外学者对哀牢山深变质带的年代学研究成果, 发现其并非前人认为的扬子台地结晶基地的一部分, 而是包含了中元古代、新元古代、海西早期、印支期和喜马拉雅期等多期次岩石的变质杂岩.

(3) 哀牢山地区于晚三叠世早期已经转化为碰撞后伸展环境, 滑石板高  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  花岗岩的形成经历了两个阶段: 二叠纪受到流体、熔体交代的地幔楔部分熔融底侵到下地壳形成岛弧下地壳; 晚三叠世碰撞后阶段上涌的软流圈地幔热导致新生岛弧下地壳重熔. 滑石板高  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  花岗岩记录了哀牢山构造带的一次地壳增生事件.

**致谢** 感谢中国科学院广州地球化学研究所郭峰研究员、夏小平研究员和彭头平副研究员在野外和论文写作过程中给予的大力帮助, 感谢评审专家提出的宝贵意见.

## 参考文献

- 从柏林, 吴根耀, 张旗, 等. 1993. 中国滇西古特提斯构造带岩石大地构造演化. 中国科学 B 辑, 23: 1201-1207
- 董云鹏, 朱炳泉, 常向阳, 等. 2000. 哀牢山缝合带中两类火山岩地球化学特征及其构造意义. 地球化学, 29: 6-13
- 范蔚茗, 彭头平, 王岳军. 2009. 滇西古特提斯俯冲-碰撞过程的岩浆作用记录. 地学前缘, 16: 291-302
- 高睿, 肖龙, 何琦, 等. 2010. 滇西维西-德钦一带花岗岩年代学、地球化学和岩石成因. 地球科学, 35: 186-200
- 简平, 汪啸风, 何龙清, 等. 1998a. 中国西南哀牢山蛇绿岩同位素地质年代学及大地构造意义. 华南地质与矿产, 1: 1-11
- 简平, 汪啸风, 何龙清, 等. 1998b. 云南新平县双沟蛇绿岩 U-Pb 年代学初步研究. 岩石学报, 14: 207-211
- 李宝龙, 季建清, 付孝悦, 等. 2008. 滇西点苍山-哀牢山变质岩系锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. 岩石学报, 24: 2322-2330

- 刘翠, 邓晋福, 刘俊来, 等. 2011. 哀牢山构造岩浆带晚二叠世-早三叠世火山岩特征及其构造环境. 岩石学报, 27: 3590-3602
- 刘汇川, 王岳军, 蔡永丰, 等. 2013. 哀牢山构造带新安寨晚二叠世末期过铝质花岗岩锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成研究. 大地构造与成矿学, 37: 87-98
- 刘俊来, 唐渊, 宋志杰, 等. 2011. 滇西哀牢山构造带: 结构与演化. 吉林大学学报(地球科学版), 41: 1285-1303
- 刘俊来, 王安建, 曹淑云, 等. 2008. 滇西点苍山杂岩中混合岩的地质年代学分析及其区域构造内涵. 岩石学报, 24: 0413-0420
- 李献华, 祁昌实, 刘颖, 等. 2005. 扬子块体西缘新元古代双峰式火山岩成因:Hf 同位素和 Fe/Mn 新制约. 科学通报, 50: 2155-2160
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. 地球化学, 25: 552-558
- 李再会, 林仕良, 丛峰, 等. 2010. 滇西腾-梁地块印支造山事件——花岗岩的锆石 U-Pb 年代学和岩石学证据. 岩石矿物学杂志, 29: 298-312
- 彭头平, 王岳军, 范蔚茗, 等. 2006. 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. 中国科学 D 辑: 地球科学, 36: 123-132
- 戚学祥, 朱路华, 李化启, 等. 2010. 青藏高原东缘哀牢山-金沙江构造带糜棱状花岗岩的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其构造意义. 地质学报, 84: 357-369
- 沙绍礼, 包俊跃, 金亚昌, 等. 1999. 点苍山变质带同位素年代学研究新进展. 云南地质, 18: 63-36
- 王义昭, 丁俊. 1996. 云南哀牢山中深变质岩系构造变形特征及演变. 特提斯地质, 20: 52-69
- 魏启荣, 沈上越. 1995. 哀牢山北段老王寨-浪泥塘一带蛇绿岩的形成环境. 特提斯地质, 19: 57-70
- 魏启荣, 沈上越. 1997. “三江”地区哀牢山西侧三类弧火山岩特征. 地质科技情报, 16: 13-18
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23: 185-220
- 谢烈文, 张艳斌, 张辉煌, 等. 2008. 锆石/斜锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素以及微量元素成分的同时原位测定. 科学通报, 53: 220-228
- 云南省地矿局. 1990. 云南省区域地质志. 北京: 地质出版社. 178-352
- 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. 岩石学报, 6: 1-11
- 张旗, 周德进, 赵大升, 等. 1996. 滇西古特提斯造山带的威尔逊旋回: 岩浆活动记录和深部过程讨论. 岩石学报, 12: 17-29
- 张玉泉, 夏斌, 梁华英, 等. 2004. 云南大平糜棱岩化碱性花岗岩的锆石特征及其地质意义. 高校地质学报, 10: 378-384
- 钟大赉. 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社. 1-231
- 邹日, 朱炳泉, 孙大中, 等. 1997. 红河成矿带壳幔演化与成矿作用的年代学研究. 地球化学, 26: 46-56
- Albarede F. 1998. The growth of continental crust. *Tectonophysics*, 296: 1-14
- Allegre C J, Othman D B. 1980. Nd-Sr isotopic relationship in granitoid rocks and continental-crust development—a chemical approach to orogenesis. *Nature*, 286: 335-342
- Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, et al. 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. *Nature*, 399: 252-255
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report Pb-204. *Chem Geol*, 192: 59-79
- Atherton M P, Ghani A A. 2002. Slab breakoff: A model for Caledonian, Late Granite syn-collisional magmatism in the orthotectonic (metamorphic) zone of Scotland and Donegal, Ireland. *Lithos*, 62: 65-85
- Balykin P A, Polyakov G V, Izokh A E, et al. 2010. Geochemistry and petrogenesis of Permian ultramafic-mafic complexes of the Jinping-Song Da rift (southeastern Asia). *Russ Geol Geophys*, 51: 611-624
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605-626
- Barth A P, Wooden J L, Tosdal R M, et al. 1995. Crustal contamination in the petrogenesis of a calc-alkalic rock series-Josephine Mountain intrusion, California. *Geol Soc Am Bull*, 107: 201-212
- Blichert T J, Chauvel C, Albarede F. 1997. Separation of Hf and Lu for high-precision isotope analysis of rock samples by magnetic sector multiple collector ICP-MS. *Contrib Mineral Petrol*, 127: 248-260
- Cao S Y, Liu J L, Leiss B, et al. 2011. Oligo-Miocene shearing along the Ailao Shan-Red River shear zone: Constraints from structural analysis and zircon U/Pb geochronology of magmatic rocks in the Diancang Shan massif, SE Tibet, China. *Gondwana Res*, 19: 975-993
- Cao S Y, Liu J L, Leiss B, et al. 2012. Initiation of left-lateral deformation along the Ailao Shan-Red River shear zone: New microstructural, textural, and geochronological constraints from the Diancang Shan metamorphic massif, SW Yunnan, China. *Int Geol Rev*, 54: 348-367
- Chappell B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 46: 535-551
- Chen B, Arakawa Y. 2005. Elemental and Nd-Sr isotopic geochemistry of granitoids from the West Junggar foldbelt (NW China), with implications for Phanerozoic continental growth. *Geochim Cosmochim Acta*, 69: 1307-1320

- Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. 1982. Nature and origin of A-type Granites with particular reference to southeastern Australia. *Contrib Mineral Petrol*, 80: 189–200
- Darbyshire D P F, Shepherd T J. 1994. Nd and Sr isotope constraints on the origin of the Cornubian batholith, Sw England. *J Geol Soc London*, 151: 795–802
- Fan W M, Wang Y J, Zhang A M, et al. 2010. Permian arc-back-arc basin development along the Ailaoshan tectonic zone: Geochemical, isotopic and geochronological evidence from the Mojiang volcanic rocks, Southwest China. *Lithos*, 119: 553–568
- Ferry J M, Watson E B. 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. *Contrib Mineral Petrol*, 154: 429–437
- Geng H Y, Sun M, Yuan C, et al. 2009. Geochemical, Sr-Nd and zircon U-Pb-Hf isotopic studies of Late Carboniferous magmatism in the West Junggar, Xinjiang: Implications for ridge subduction? *Chem Geol*, 266: 364–389
- Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, et al. 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgam Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons. *Precambrian Res*, 131: 231–282
- Gunnarsson B, Marsh B D, Taylor H P. 1998. Generation of Icelandic rhyolites: Silicic lavas from the Torfajokull central volcano. *J Volcanol Geoth Res*, 83: 1–45
- Healy B, Collins W J, Richards S W. 2004. A hybrid origin for Lachlan S-type granites: The Murrumbidgee batholith example. *Lithos*, 78: 197–216
- Hineab R, Williams I S, Chappelle B W, et al. 1978. Contrasts between I- and S-type granitoids of the Kosciusko batholith. *J Geol Soc Aust*, 25: 219–234
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chem Geol*, 211: 47–69
- Jian P, Liu D Y, Kroner A, et al. 2009a. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys orogen in southwest China (I): Geochemistry of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks. *Lithos*, 113: 748–766
- Jian P, Liu D Y, Kroner A, et al. 2009b. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (II): Insights from zircon ages of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks and generation of the Emeishan CFB province. *Lithos*, 113: 767–784
- Lepvrier C, Maluski H, Van Tich V, et al. 2004. The Early Triassic Indosinian orogeny in Vietnam (Truong Son Belt and Kontum Massif): implications for the geodynamic evolution of Indochina. *Tectonophysics*, 393: 87–118
- Lepvrier C, Maluski H, Van Vuong N, et al. 1997. Indosinian NW-trending shear zones within the Truong Son belt (Vietnam) Ar-40-Ar-39 Triassic ages and Cretaceous to Cenozoic overprints. *Tectonophysics*, 283: 105–127
- Liew T C, Hofmann A W. 1988. Precambrian crustal components, plutonic associations, plate environment of the hercynian fold belt of Central-Europe - indications from a Nd and Sr Isotopic Study. *Contrib Mineral Petrol*, 98: 129–138
- Lin T H, Chung S L, Chiu H Y, et al. 2012. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints from the Ailao Shan-Red River shear zone on the tectonic and crustal evolution of southwestern China. *Chem Geol*, 291: 23–37
- Liu J L, Tang Y, Tran M D, et al. 2012. The nature of the Ailao Shan-Red River (ASRR) shear zone: Constraints from structural, microstructural and fabric analyses of metamorphic rocks from the Diancang Shan, Ailao Shan and Day Nui Con Voi massifs. *J Asian Earth Sci*, 47: 231–251
- Ludwig K R. 2001. *Squid 1.02: A User Manual*. Berkeley: Berkeley Geochronological Center Special Publication. 1–219
- Maluski H, Lepvrier C, Leyreloupa A, et al. 2005.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  geochronology of the charnockites and granulites of the Kan Nack complex, Kontum Massif, Vietnam. *J Asian Earth Sci*, 25: 653–677
- Metcalfe I. 2002. Permian tectonic framework and palaeogeography of SE Asia. *J Asian Earth Sci*, 20: 551–566
- Metcalfe I. 2006. Paleozoic and Mesozoic tectonic evolution and palaeogeography of East Asian crustal fragments: The Korean Peninsula in context. *Gondwana Res*, 9: 24–46
- Nagy E A, Maluski H, Lepvrier C, et al. 2001. Geodynamic significance of the Kontum massif in central Vietnam: Composite (40)Ar/(39)Ar and U-Pb ages from Paleozoic to Triassic. *J Geol*, 109: 755–770
- Owada M, Osanai Y, Hokada T, et al. 2006. Timing of metamorphism and formation of garnet granite in the Kontum Massif, central Vietnam: Evidence from monazite EMP dating. *J Mine Petrol Sci*, 101: 324–328
- Owada M, Osanai Y, Nakano N, et al. 2007. Crustal anatexis and formation of two types of granitic magmas in the Kontum massif, central Vietnam: Implications for magma processes in collision zones. *Gondwana Res*, 12: 428–437

- Peccerillo A, Barberio M R, Yirgu G, et al. 2003. Relationships between mafic and peralkaline silicic magmatism in continental rift settings: A petrological, geochemical and isotopic study of the Gedemsa volcano, central Ethiopian rift. *J Petrol*, 44: 2003–2032
- Qi X X, Zeng L S, Zhu L H, et al. 2012. Zircon U-Pb and Lu-Hf isotopic systematics of the Daping plutonic rocks: Implications for the Neoproterozoic tectonic evolution of the northeastern margin of the Indochina block, Southwest China. *Gondwana Res*, 21: 180–193
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32-kbar—Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *J Petrol*, 36: 891–931
- Roberts M P, Clemens J D. 1993. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-Type granitoids. *Geology*, 21: 825–828
- Rudnick R L. 1995. Making continental-crust. *Nature*, 378: 571–578
- Scherer E, Munker C, Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium-hafnium clock. *Science*, 293: 683–687
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and process. *Geol Soc Spec Publ London*, 42: 313–345
- Tang G J, Wang Q, Wyman D A, et al. 2012a. Recycling oceanic crust for continental crustal growth: Sr-Nd-Hf isotope evidence from granitoids in the western Junggar region, NW China. *Lithos*, 128: 73–83
- Tang G J, Wang Q, Wyman D A, et al. 2012b. Late Carboniferous high epsilon (Nd)(t)-epsilon (Hf)(t) granitoids, enclaves and dikes in western Junggar, NW China: Ridge-subduction-related magmatism and crustal growth. *Lithos*, 140: 86–102
- Tang G J, Wyman D A, Wang Q, et al. 2012c. Asthenosphere-lithosphere interaction triggered by a slab window during ridge subduction: Trace element and Sr-Nd-Hf-Os isotopic evidence from Late Carboniferous tholeiites in the western Junggar area (NW China). *Earth Planet Sci Lett*, 329: 84–96
- Vervoort J D, Blichert-Toft J. 1999. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time. *Geochim Cosmochim Acta*, 63: 533–556
- Wang C Y, Zhou M F, Keays R R. 2006. Geochemical constraints on the origin of the Permian Baimazhai mafic-ultramafic intrusion, SW China. *Contrib Mineral Petrol*, 152: 309–321
- Wang C Y, Zhou M F, Qi L. 2007. Permian flood basalts and mafic intrusions in the Jinping (SW China) Song Da (northern Vietnam) district: Mantle sources, crustal contamination and sulfide segregation. *Chem Geol*, 243: 317–343
- Wang Q, Chung S L, Li X H, et al. 2012. Crustal melting and flow beneath Northern Tibet: Evidence from Mid-Miocene to quaternary strongly peraluminous rhyolites in the southern Kunlun Range. *J Petrol*, 53: 2523–2566
- Wang X D, Shi G R, Sugiyama T. 2002. Permian of West Yunnan, Southwest China: A biostratigraphic synthesis. *J Asian Earth Sci*, 20: 647–656
- Wang X F, Metcalfe I, Jian P, et al. 2000. The Jinshajiang-Ailaoshan Suture Zone, China: Tectonostratigraphy, age and evolution. *J Asian Earth Sci*, 18: 675–690
- 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. *Lithos*, 120: 529–546
- Watson E B, Wark D A, Thomas J B. 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contrib Mineral Petrol*, 151: 413–433
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, et al. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chem Geol*, 234: 105–126
- Xu J F, Castillo P R. 2004. Geochemical and Nd-Pb isotopic characteristics of the Tethyan asthenosphere: Implications for the origin of the Indian Ocean mantle domain. *Tectonophysics*, 393: 9–27
- Yang J H, Wu F Y, Shao J A, et al. 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth Planet Sci Lett*, 246: 336–352
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, et al. 2007. Tracing magma mixing in granite genesis: *In situ* U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircons. *Contrib Mineral Petrol*, 153: 177–190
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostand Geoanal Res*, 28: 353–370
- Yumul G P, Zhou M F, Wang C Y, et al. 2008. Geology and geochemistry of the Shuanggou ophiolite (Ailao Shan ophiolitic belt), Yunnan Province, SW China: Evidence for a slow-spreading oceanic basin origin. *J Asian Earth Sci*, 32: 385–395
- Zhu J J, Hu R Z, Bi X W, et al. 2011. Zircon U-Pb ages, Hf-O isotopes and whole-rock Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of granitoids in the Jinshajiang suture zone, SW China: Constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the Paleo-Tethys Ocean. *Lithos*, 126: 248–264

- Zi J W, Cawood P A, Fan W M, et al. 2012a. Contrasting rift and subduction-related plagiogranites in the Jinshajiang ophiolitic melange, southwest China, and implications for the Paleo-Tethys. *Tectonics*, 31: 1–18
- Zi J W, Cawood P A, Fan W M, et al. 2012b. Generation of Early Indosinian enriched mantle-derived granitoid pluton in the Sanjiang Orogen (SW China) in response to closure of the Paleo-Tethys. *Lithos*, 140: 166–182
- Zi J W, Cawood P A, Fan W M, et al. 2012c. Triassic collision in the Paleo-Tethys Ocean constrained by volcanic activity in SW China. *Lithos*, 144: 145–160
- Zi J W, Cawood P A, Fan W M, et al. 2013. Late Permian-Triassic magmatic evolution in the Jinshajiang orogenic belt, SW China and implications for orogenic processes following closure of the Paleo-Tethys. *Am J Sci*, 313: 81–112