

## 滇东南老君山地区伟晶岩年代学研究及其地质意义

张振发<sup>1,2</sup>, 张 辉<sup>2\*</sup>, 吕正航<sup>2</sup>, 杨海林<sup>1</sup>, 于文修<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 中国科学院 地球化学研究所 地球内部物质高温高压重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

**摘 要:** 利用 LA-ICPMS 和 LA-MC-ICPMS 技术, 对老君山地区 3 条伟晶岩脉进行锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素组成研究。研究显示, 3 条伟晶岩脉的形成时代分别为 209.6 Ma、381.2 Ma 和 389.4 Ma, 形成于晚三叠世和中泥盆世; 其对应的 Hf 同位素组成分别为  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 2.61 \sim 8.63$ 、 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 1.10 \sim 4.96$  和  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -0.11 \sim 12.9$ ; 其对应的二阶段模式年龄分别为  $t_{\text{DM}2} = 694 \sim 1077$  Ma、 $t_{\text{DM}2} = 1060 \sim 1304$  Ma 和  $t_{\text{DM}2} = 558 \sim 1388$  Ma。结合前人对区域中其他伟晶岩中白云母 Ar-Ar 定年研究, 本文提出老君山地区伟晶岩可划分出 3 个主要形成时期: 晚三叠世 209 Ma、中泥盆世 381~389 Ma 和晚侏罗世-早白垩世 140~144 Ma。由于 2 条中泥盆世伟晶岩侵入于老城坡花岗岩中, 不太可能是老城坡花岗岩分异演化残余岩浆固结的产物; 而研究区未见三叠纪 S 型花岗岩, 可以排除晚三叠世伟晶岩脉由 S 型花岗岩残余岩浆分异演化而形成的可能。基于上述, 本文提出老君山地区伟晶岩形成于碰撞后伸展构造背景下古老沉积岩的减压熔融过程, 它对滇东南地区在志留纪-泥盆纪、三叠纪构造-岩浆-成矿事件提供了新的约束。

**关键词:** 锆石 U-Pb 定年; 岩石成因; 伟晶岩; 滇东南

中图分类号: P597 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2018)01-0033-15

**Zircon U-Pb geochronology and the geological significance of pegmatites from the Laojunshan area, Southeastern Yunnan**ZHANG Zhen-fa<sup>1,2</sup>, ZHANG Hui<sup>2\*</sup>, LÜ Zheng-hang<sup>2</sup>, YANG Hai-lin<sup>1</sup> and YU Wen-xiu<sup>1</sup>

1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Key Laboratory of High-Temperature and High-Pressure Study of the Earth's Interior, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

**Abstract:** Zircon U-Pb dating and Hf isotopes of three pegmatites from the Laojunshan area, Southeastern Yunnan, were determined by LA-ICPMS and LA-MC-ICPMS in this paper. The formation ages of the three pegmatites were determined to be 209.6 Ma, 381.2 Ma and 389.4 Ma, respectively, indicating they were formed in the Late Triassic and Middle Devonian. The  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of the three pegmatites were 2.61–8.63, 1.10–4.96 and –0.11–12.9, respectively. And the  $t_{\text{DM}2}$  values of the three pegmatites were 694–1077 Ma, 1060–1304 Ma and 558–1388 Ma, respectively. According to the zircon U-Pb dating of this study combined with the muscovite Ar-Ar dating of a previous study, we put forward that the formation ages of pegmatites in the Laojunshan area can be divided into three main periods: (1) Late Triassic (~209 Ma); (2) Middle Devonian (381–389 Ma); and (3) Late Jurassic-Early Cretaceous (140–144 Ma). Since two Devonian pegmatites intruded into the Laochengpo granite, and no Triassic S-type granite was identified in the studied area, the petrogenesis of two Devonian pegmatites and one Triassic pegmatite associated with differentiation of S-type granites can be excluded. Therefore, we propose that the pegmatites originated from decompressional melting of sedimentary rocks in a post-collision extensional tectonic setting, which provided reliable constraints on Silurian-Devonian and/or Triassic tectonic-magmatic-metallogenic events in the Laojunshan area, Southeastern Yunnan.

**Key words:** Zircon U-Pb dating; petrogenesis; pegmatite; Southeastern Yunnan

收稿日期(Received): 2017-02-25; 改回日期(Revised): 2017-05-08; 接受日期(Accepted): 2017-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(41372104); 新疆有色金属工业(集团)有限责任公司科研项目(2011YSKY-02); 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室开放课题(2008012)

作者简介: 张振发(1988-), 男, 硕士研究生, 矿产勘查与找矿研究方向。E-mail: zhangzhenfa621@163.com

\* 通讯作者(Corresponding author): ZHANG Hui, E-mail: zhanghui@vip.gyig.ac.cn; Tel: +86-851-84398519

## 0 引言

滇东南老君山地区位于华夏板块、扬子板块与印支板块交汇区域,处于哀牢山-红河断裂带东侧和南褶皱系西端<sup>[1]</sup>。区域构造演化复杂,经历多期构造-岩浆-热液事件及其成矿作用,是探讨华南大地构造格局、演化规律及其成矿过程的关键区域之一<sup>[2-3]</sup>。前人研究表明,老君山地区出露一套穹窿状变形-变质岩系,出露于文山-麻栗坡断裂和马关-莲花塘断裂之间,有的学者将其称为南温河变质核杂岩<sup>[4]</sup>,也有学者根据发育在核部的剥离断层系和盖层的叠瓦状正断等构造形迹及其组合特征将其命名为老君山变质核杂岩<sup>[5]</sup>,岩性以片麻状花岗岩为主。该区域存在多期规模较大的岩浆侵入活动,其中形成了以老君山花岗岩体为代表的燕山期花岗岩和南温河花岗岩为代表的加里东期花岗岩<sup>[6-8]</sup>。

锆石 U-Pb 定年结果显示,老君山花岗岩体为晚白垩世花岗岩,其形成时代为 83.3~96.0 Ma<sup>[9-11]</sup>。南温河花岗岩体,又称之为南温河序列(S<sub>3</sub>NW),位于老君山变质核杂岩的东部,可划分为团田单元片麻状、斑状花岗岩(S<sub>3</sub>T)和老城坡单元片麻状中细粒花岗岩(S<sub>3</sub>L)两个不同的岩石单元<sup>[12]</sup>。其中,团田单元全岩 Rb-Sr 年龄为 390 Ma,锆石 U-Pb 年龄为 436 Ma<sup>[13]</sup>;老城坡单元锆石 U-Pb 定年分别获得了 411 Ma<sup>[12]</sup>和 427 Ma<sup>[13]</sup>。

滇东南老君山地区有较多的花岗伟晶岩脉侵入,部分伟晶岩出现了铍矿化<sup>[14]</sup>。这些伟晶岩脉一般沿片理侵入寒武系变质岩中,或与片麻岩花岗呈侵入式接触关系。伟晶岩具有一定分带性,主要矿物包括石英、长石、白云母和电气石,其次有绿柱石、白钨矿、萤石等。据报道,分布于老君山地区的伟晶岩是我国重要的祖母绿产地之一<sup>[15]</sup>。伟晶岩作为一种独立的矿床类型,不但在矿床学上占有不可忽视的地位,而且在示踪大地构造演化的过程中同样具有重要意义<sup>[16]</sup>。但由于缺乏系统可靠的年代学数据,目前不清楚该地区伟晶岩脉形成的时代及其成因。本文利用 LA-ICPMS 技术,对老君山地区出露的 3 条伟晶岩开展锆石 U-Pb 年代学研究,旨在揭示伟晶岩形成时代及与花岗岩的成因关系,并探讨其形成的大地构造背景。

## 1 区域地质背景

区域内地层从老到新依次出露有:下元古界南

秧田组(Pt<sub>1n</sub>)二云片岩、二云石英片岩、石英片岩,洒西岩组(Pt<sub>1s</sub>)黑云变粒岩、条带状变粒岩与石英岩;上元古界新寨岩组(Pt<sub>3x</sub>)灰色白云片岩、二云片岩、黑云石英片岩、二云石英片岩;中寒武统田蓬组(C<sub>2t</sub>)灰白色石英千枚岩,龙哈组(C<sub>2l</sub>)白云质大理岩,以及第四系的冲积和洪积层。元古宇及寒武系地层沿老君山岩体四周成环带状展布。

区域内断裂发育,主要有文山-麻栗坡大断裂、南温河大断裂和马关-都龙大断裂,均呈 NW-SE 走向,延长百余千米。老君山地区是由变质岩、混合岩和花岗岩组成的变质核杂岩。围绕岩体有一系列的近南北向的开阔型次级背斜构造和规模较小的褶皱带分布。

区域内岩浆岩主要包括老君山岩体和南温河花岗岩体。老君山花岗岩体是多阶段侵入的复式岩体,由 3 期次侵入体组成,平面上大体呈椭圆状,东西宽 9 km,南北 14 km,出露面积约 134 km<sup>2</sup>;岩性分别是二云二长花岗岩、中细粒二云母花岗岩、花岗斑岩。南温河花岗岩体,位于老君山变质核杂岩的东部,出露面积约为 245 km<sup>2</sup>。根据岩石组构特征分为团田片麻状、斑状花岗岩(S<sub>3</sub>T)和老城坡片麻状中细粒花岗岩(S<sub>3</sub>L)两个不同的岩石单元<sup>[10]</sup>。其中老城坡花岗岩体出露面积 190 km<sup>2</sup>,为南温河序列晚期次单元,分布于老陶坪-猛洞-金竹山一带,侵入体呈近等轴状-椭圆状,侵位于南秧田组(Pt<sub>1n</sub>)、洒西岩组(Pt<sub>1s</sub>)并超覆于南秧田组(Pt<sub>1n</sub>)之上。

研究区位于云南省麻栗坡县与马关县交接处,文山-麻栗坡大断裂西南侧,越北隆起之北缘,环老君山花岗岩体钨、锡多金属成矿带东部(图 1)。区内出露地层单一,自下而上分别为:洒西岩组下段(Pt<sub>1s</sub><sup>1</sup>),其主要岩性为含夕线石云母石英片岩和二云母斜长片麻岩;洒西岩组中段(Pt<sub>1s</sub><sup>2</sup>),岩性为深灰色二云母片岩、电气石石英变粒岩、黑云母石英变粒岩夹透闪石变粒岩(钙硅酸盐岩石)组成;洒西岩组上段(Pt<sub>1s</sub><sup>3</sup>),岩性为二云片岩-二云石英片岩,部分为二云石英变粒岩,该地层因剥蚀强烈出露不全;第四系(Q),主要发育于缓坡、冲沟和谷地中。山坡上以残坡积为主,其成分由基岩风化破碎的砂土及岩石碎块组成,厚度不等,一般厚 1~3 m。沟谷和坝子中则以冲积和洪积层为主,其成分为变质岩带内的各种大小不等的岩块和泥砂组成,分选性差。

研究区位于老君山岩体穹窿构造东缘的外接触带,断裂构造不发育。研究区出露大面积南温河序

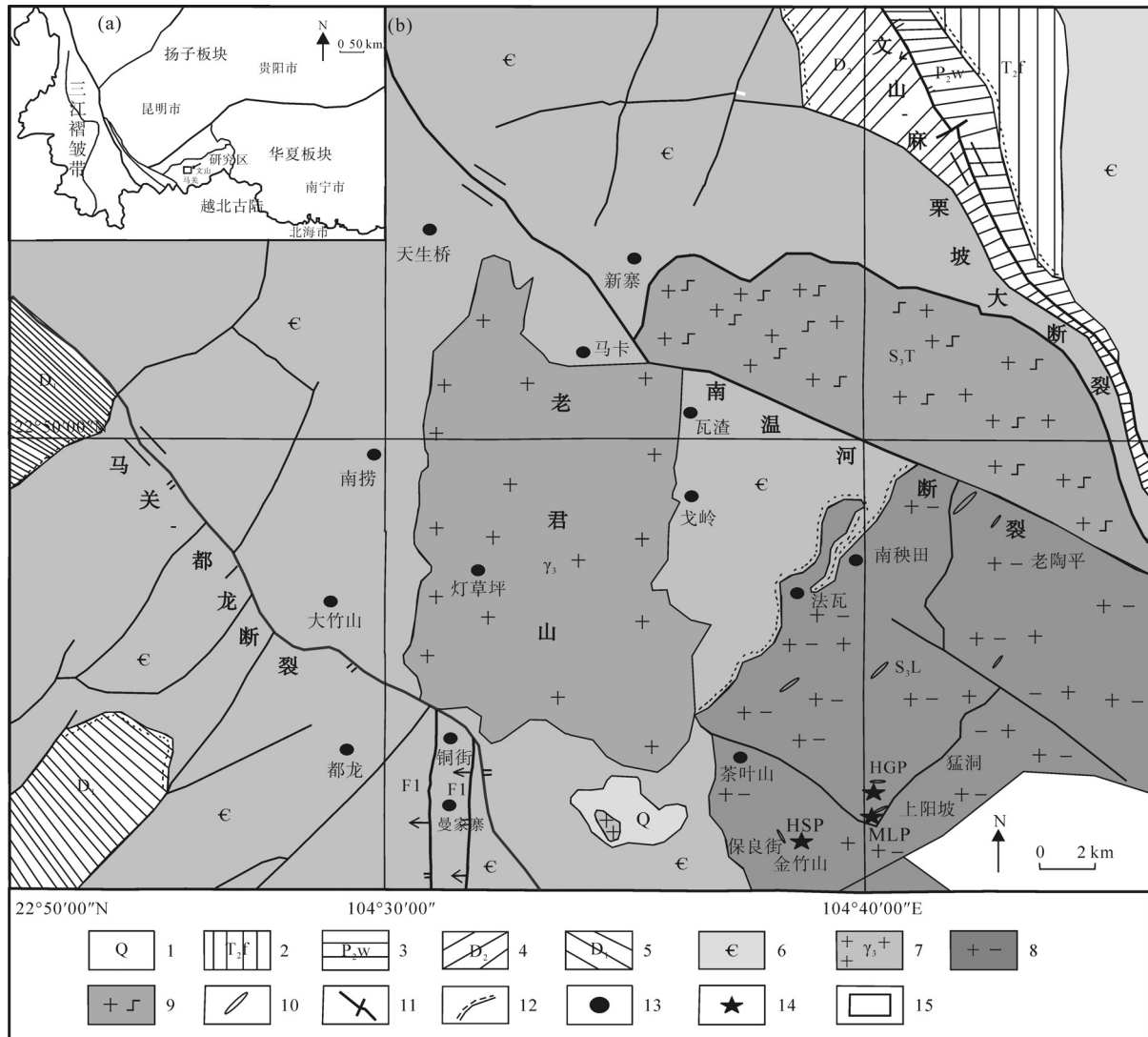


图 1 滇东南老君山地区地质简图(据文献[17]改编)

Fig.1 Geological sketch map of the Laojunshan area in Southeastern Yunnan (revised after reference [17])

1. 第四系; 2. 中三叠统郎组; 3. 上二叠统吴家坪组; 4. 中泥盆统; 5. 下泥盆统; 6. 寒武统; 7. 白垩纪花岗岩; 8. 老城坡花岗岩体; 9. 团田花岗岩体; 10. 伟晶岩脉; 11. 断层; 12. 地质界线; 13. 钨锡矿点; 14. 采样位置; 15. 研究区。

列老城坡晚次单元(S<sub>3</sub>l)花岗岩体, 局部有都龙超单元岩体小规模出露。岩浆岩呈岩株、岩枝、岩瘤产于南温河序列之中心部位, 侵入体形态呈近等轴状-椭圆状, 边部不规则, 小侵入体呈长椭圆状, 主要岩性为黑云母花岗岩。黑云母花岗岩呈灰色, 花岗结构, 块状构造; 颗粒大小多为 0.5~2 mm; 主要造岩矿物为石英、斜长石、黑云母、白云母; 副矿物主要有磁铁矿、锆石、磷灰石等; 可见次生的黏土矿物, 为长石风化所致, 含量小于 1%。区内伟晶岩主要分布在东部戈岭-大丫口-猛洞-保良街一带, 极少量出现于西部南捞一带, 呈脉状产于猛洞岩群、南捞片麻岩及南温河序列内, 少量产于都龙超单元内。伟晶岩脉以平行或斜交围岩面理产出, 展布方向主要为 NNE-NEE, 部分为 NW 向, 常成群出现,

单脉长 10~300 m、宽 0.1~2 m。

## 2 样品采集及分析测试方法

### 2.1 样品采集

本次在茶叶山-上阳坡一线及保良街采集了 3 件伟晶岩样品 (每件样品均大于 10 kg), 具体采样位置参见图 1。3 条伟晶岩脉地质特征描述如下。

马鹿塘伟晶岩脉(样品 MLP-1): 地理坐标为 22°52'52.44"N, 104°40'01.98"E。脉体约宽 5 m, 延伸未知, 产状 235°∠55°, 围岩为黑云母花岗岩。根据矿物组合, 分为 4 个结构带, 分别为: 1) 文象-似文象结构带, 主要由微斜长石(60%)、石英(38%)和少量

细粒白云母(2%)组成,副矿物主要为电气石、石榴子石和锆石等;2)块体微斜长石带,主要为微斜长石(约95%)和少量钠长石(约5%)组成,副矿物主要为电气石、石榴子石等;3)石英-白云母带,由石英(70%)和粗晶白云母(约30%),以及石榴子石和锆石等副矿物组成,此外含有厘米级绿柱石及少量铌钽族矿物;4)石英核带。

黄瓜坡伟晶岩脉(样品 HGP-1):地理坐标为 $22^{\circ}53'14.29''N$ , $104^{\circ}39'59.50''E$ 。脉体宽2~3 m,延伸大于20 m,产状 $280^{\circ}\angle 65^{\circ}$ ,围岩为黑云母花岗岩。该脉体在路边半坡上见露头,从下往山上延伸,逐渐变细,可见分支现象,支脉为石英脉;根据矿物共生组合,可划分出3个结构带,其中:1)文象-似文象结构带,主要由微斜长石(52%)、石英(43%)和少量细粒白云母(5%)组成,副矿物主要为石榴子石和锆石等;2)块体微斜长石带:主要为微斜长石(>90%),少量白云母和石英组成,副矿物主要为锆石、磷灰石等;3)石英核带。

滑石板伟晶岩脉(样品 HSP-1):地理坐标为 $22^{\circ}52'29.71''N$ , $104^{\circ}28'01.98''E$ 。由于植被和第四季沉积物覆盖,脉体仅出露宽约1 m,延伸数米,产状 $350^{\circ}\angle 25^{\circ}$ ,围岩为片麻状黑云母花岗岩。剖面上可见3个结构分带,包括:1)石英-微斜长石-白云母粗粒结构带,主要矿物石英(40%)微斜长石(45%)和白云母(15%)组成,副矿物主要为绿柱石、锆石、磷灰石、石榴子石等,其中绿柱石,六方柱状,浅绿色,大小为 $3\text{ cm}\times 2\text{ cm}$ (长 $\times$ 宽);2)块体微斜长石带,主要为微斜长石(>98%)及少量白云母和石英组成,副矿物主要为锆石、磷灰石等;3)石英核带。

## 2.2 样品分选与制靶

伟晶岩样品进行破碎、重选和磁选后,在双目镜下进行锆石挑纯至98%以上。分选出晶型较好、具代表性的锆石颗粒粘贴在双面胶上,然后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固定后将其抛光至锆石露出一个平面,进而制成样品靶,并进行锆石的阴极发光(CL)成像。

## 2.3 分析测试方法

分析测试工作在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。锆石 U-Pb 同位素测定是在激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICPMS)上完成的,193 nm ArF 准分子激光剥

蚀系统由德国哥廷根 Lamda Physik 公司制造,型号为 GeoLasPro。电感耦合等离子体质谱由日本东京安捷伦公司制造,型号为 Agilent 7700x。准分子激光发生器产生的深紫外光束经匀化光路聚焦于锆石表面,能量密度为 $10\text{ J/cm}^2$ ,束斑直径为44  $\mu\text{m}$ ,频率为5 Hz,剥蚀信号采集时间60 s,气溶胶由氦气送入 ICP-MS 完成测试。测试过程中以标准锆石 91500 为外标,校正仪器质量歧视与元素分馏;以标准锆石 GJ-1 与 Plešovice 为盲样,监控 U-Pb 定年数据质量;以 NIST SRM 610 为外标,以 Si 为内标,标定锆石中的 Pb 元素含量,以 Zr 为内标,标定锆石中其余元素含量<sup>[18-19]</sup>。原始的测试数据经过 ICPMSDataCal 软件离线处理完成<sup>[18,20]</sup>。年龄计算和谐和图的绘制采用 Isoplot (3.0)程序完成<sup>[21]</sup>。普通铅校正参考 Andersen 方法完成<sup>[22]</sup>。

锆石 Hf 同位素原位分析使用的是 LA-MC-ICPMS (多接收激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪)。所用仪器是 Nu Plasma 多接收器等离子质谱仪(MC-ICPMS)和 UP-213 型激光器。详细的仪器参数,分析流程和干扰校正方法详见唐红峰等<sup>[23]</sup>。其中,对每0.2 s 积分时间的单个数据点进行 $^{176}\text{Yb}$ 干扰扣除时, $\text{Yb}$ 的质量歧视因子 $\beta_{\text{Yb}}$ 由对应时间测定的单个 $^{173}\text{Yb}/^{171}\text{Yb}$ 比值计算。使用的激光频率为5 Hz,束斑直径是60  $\mu\text{m}$ ,能量密度为4~6  $\text{J/cm}^2$ ,用氦气(流速0.60~0.85 L/min)作载气,在激光器后面用一个“Y”字形的三通将激光剥蚀物与氦气(流速1.10~1.15 L/min)混合后通入等离子质谱仪。国际标准锆石 91500 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测定结果为 $0.282306\pm 34$  (2SD, $n=55$ )。单阶段 Hf 模式年龄( $t_{\text{DM1}}$ )计算时,亏损地幔的值采用 Vervoort 和 Blichert-Toft 的结果<sup>[24]</sup>。

## 3 分析结果

### 3.1 伟晶岩锆石 CL 特征及 U-Pb 年龄

马鹿塘伟晶岩脉(样品 MLP-1):锆石粒径为150~250  $\mu\text{m}$ ,呈半自形,大多数锆石阴极发光较弱,局部微区有较强的阴极发光(图2a)。锆石中 Pb 含量为50.5~413  $\mu\text{g/g}$ ,U 含量为1687~13878  $\mu\text{g/g}$ ,Th 含量为35.2~891  $\mu\text{g/g}$ ,Th/U 比值为0.02~0.06(表1)。19个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布较集中,且谐和度高, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 $(209.6\pm 2.0)\text{ Ma}$  (MSWD=0.18),代表了该脉体的侵入年龄(图3a)。

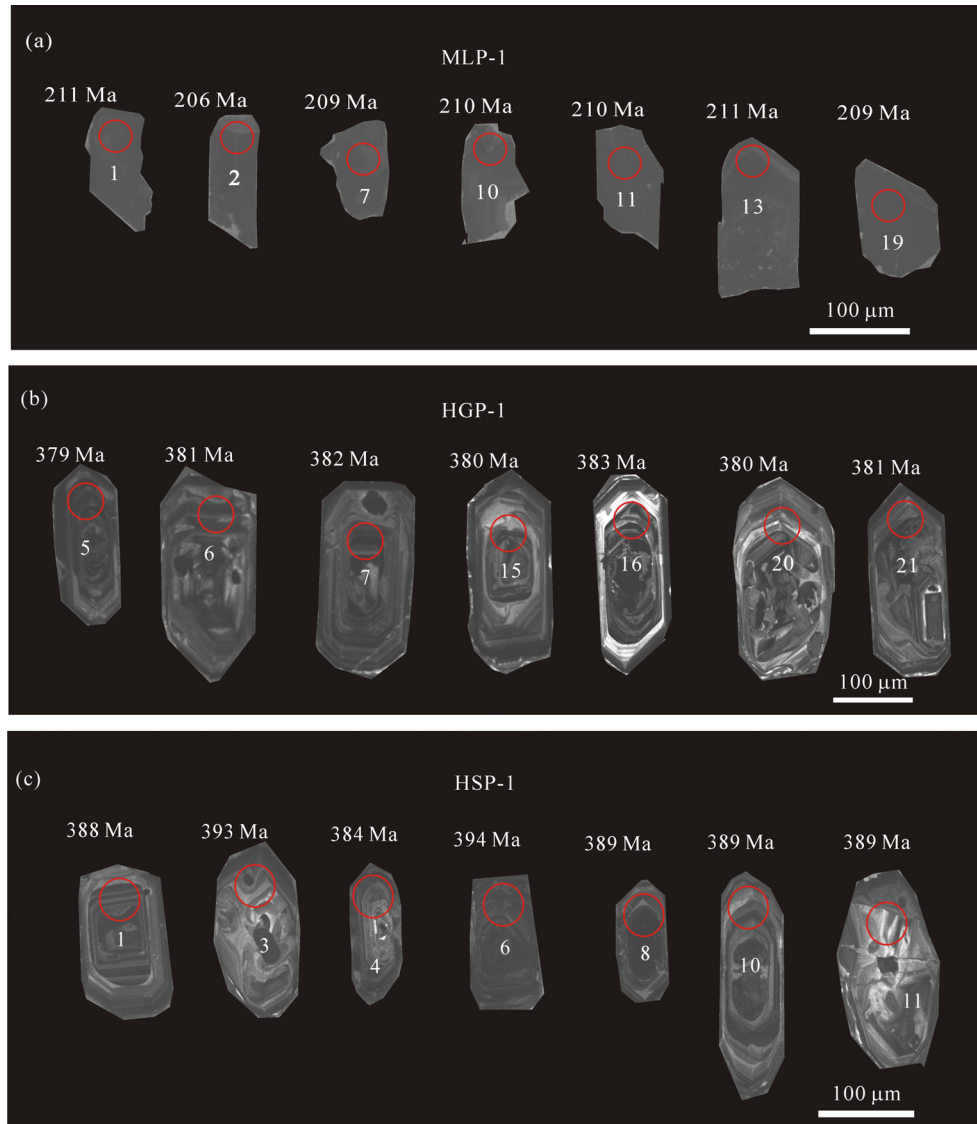


图 2 伟晶岩中代表性锆石的阴极发光特征

Fig.2 Cathodoluminescence images of representative zircons from the pegmatites  
其中圆圈代表激光剥蚀位置。

Circles represent the spot locations of laser alteration.

黄瓜坡伟晶岩脉(样品 HGP-1): 锆石粒径为 250~300  $\mu\text{m}$ , 晶形完整, 晶棱清晰锐利, 为自形四方双锥, 在阴极发光图像中锆石内部发育较好的震荡环带或扇形环带结构, 大多数锆石阴极发光较弱, 少数锆石或局部微区显示有较强的阴极发光(图 2b)。锆石中 Pb 含量为 62.0~222  $\mu\text{g/g}$ , U 含量为 869~3539  $\mu\text{g/g}$ , Th 含量为 200~2205  $\mu\text{g/g}$ , Th/U 比值为 0.15~1.10 (表 1)。23 个测点  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄分布较集中, 且谐和度高,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄值为 (381.2 $\pm$ 3.3) Ma (MSWD = 0.055), 代表了该脉体的侵入年龄(图 3b)。

滑石板伟晶岩脉(样品 HSP-1): 锆石粒径为 150~300  $\mu\text{m}$ , 晶形完整, 晶棱清晰锐利, 为自形四

方双锥, 在阴极发光图像中锆石晶体内部发育较好的震荡环带或扇形环带结构, 大多数锆石阴极发光较弱, 局部微区有较强的阴极发光(图 2c)。锆石中 Pb 含量为 59.9~397  $\mu\text{g/g}$ , U 含量为 901~5771  $\mu\text{g/g}$ , Th 含量为 138~1904  $\mu\text{g/g}$ , Th/U 比值为 0.12~0.57 (表 1)。11 个测点  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄分布较集中, 且谐和度高,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄值为(389.4 $\pm$ 4.9) Ma (MSWD = 0.024), 代表了该脉体的侵入年龄(图 3c)。

### 3.2 伟晶岩锆石 Hf 同位素组成

利用 LA-MC-ICPMS 技术开展锆石铪同位素分析的测点均选自进行锆石 U-Pb 定年的剥蚀点附近。针对样品 MLP-1、HGP-1 和 HSP-1, 根据已测定锆

表 1 利用 LA-ICPMS 测定的伟晶岩锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 1 U-Pb isotopic analyses of zircons from the pegmatites (determined by LA-ICPMS)

点号	Pb ( $\mu\text{g/g}$ )	Th ( $\mu\text{g/g}$ )	U ( $\mu\text{g/g}$ )	Th/U	同位素比值				同位素年龄(Ma)						
					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
MLP-1															
1	157	172	5440	0.03	0.0012	0.2323	0.0056	0.0333	0.0007	209	56	212	5	211	4
2	95	105	3190	0.03	0.0014	0.2458	0.0066	0.0325	0.0007	391	59	223	5	206	4
3	98	95	3315	0.03	0.0014	0.2388	0.0066	0.0324	0.0007	328	61	217	5	206	4
4	230	272	7721	0.04	0.0012	0.2441	0.0059	0.0333	0.0007	322	52	222	5	211	5
5	64	42	2257	0.02	0.0012	0.2243	0.0057	0.0328	0.0007	161	59	205	5	208	4
6	90	69	3069	0.02	0.0013	0.2378	0.0060	0.0329	0.0007	283	55	217	5	209	4
7	239	307	8138	0.04	0.0012	0.2300	0.0055	0.0330	0.0007	198	56	210	5	209	4
8	112	150	3776	0.04	0.0014	0.2440	0.0062	0.0329	0.0007	343	57	222	5	208	4
9	86	68	2930	0.02	0.0013	0.2394	0.0060	0.0328	0.0007	302	62	218	5	208	4
10	149	158	4829	0.03	0.0013	0.2554	0.0064	0.0331	0.0007	433	54	231	5	210	4
11	102	67	3542	0.02	0.0013	0.2366	0.0060	0.0331	0.0007	257	62	216	5	210	4
12	413	891	13787	0.06	0.0012	0.2470	0.0061	0.0333	0.0007	345	52	224	5	211	5
13	366	534	12590	0.04	0.0012	0.2374	0.0058	0.0332	0.0007	254	56	216	5	211	5
14	88	81	3037	0.03	0.0013	0.2399	0.0059	0.0332	0.0007	280	62	218	5	211	4
15	326	627	10871	0.06	0.0013	0.2477	0.0060	0.0333	0.0007	343	54	225	5	211	4
16	105	84	3642	0.02	0.0012	0.2364	0.0057	0.0335	0.0007	232	56	215	5	212	5
17	70	48	2414	0.02	0.0013	0.2399	0.0061	0.0335	0.0007	261	53	218	5	213	5
18	300	487	10101	0.05	0.0012	0.2471	0.0059	0.0332	0.0007	346	49	224	5	210	4
19	50	35	1687	0.02	0.0015	0.2504	0.0070	0.0330	0.0007	395	63	227	6	209	5
HGP-1															
1	143	565	2270	0.25	0.0015	0.4900	0.0132	0.0612	0.0013	517	56	405	9	383	8
2	141	701	2217	0.32	0.0014	0.4864	0.0123	0.0611	0.0013	509	54	402	8	382	8
3	117	515	1724	0.30	0.0015	0.5070	0.0130	0.0610	0.0013	611	56	416	9	382	8
4	144	2205	2009	1.10	0.0015	0.4925	0.0132	0.0607	0.0013	546	56	407	9	380	8
5	165	871	2473	0.35	0.0015	0.4917	0.0122	0.0606	0.0013	546	56	406	8	379	8
6	118	790	1633	0.48	0.0014	0.4747	0.0122	0.0608	0.0013	457	28	394	8	381	8
7	118	478	1876	0.25	0.0015	0.4797	0.0126	0.0611	0.0013	478	57	398	9	382	8
8	871	2473	1640	0.29	0.0015	0.4951	0.0127	0.0614	0.0013	532	57	408	9	384	8
9	77	282	1230	0.23	0.0015	0.4771	0.0129	0.0612	0.0013	454	64	396	9	383	8

(续表 1)

点号	Pb (μg/g)	Th (μg/g)	U (μg/g)	Th/U	同位素比值				同位素年龄(Ma)						
					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$			
10	103	402	1631	0.25	0.0580	0.0015	0.4950	0.0127	0.0613	0.0013	56	408	9	383	8
11	88	415	1364	0.30	0.0577	0.0015	0.4883	0.0125	0.0608	0.0013	57	404	9	381	8
12	78	200	1363	0.15	0.0569	0.0014	0.4776	0.0117	0.0604	0.0013	54	396	8	378	8
13	97	389	1558	0.25	0.0556	0.0014	0.4733	0.0118	0.0612	0.0013	58	393	8	383	8
14	102	278	1784	0.16	0.0574	0.0014	0.4886	0.0126	0.0612	0.0013	54	404	9	383	8
15	82	377	1259	0.30	0.0553	0.0013	0.4664	0.0113	0.0607	0.0013	54	389	8	380	8
16	62	348	869	0.40	0.0596	0.0016	0.5070	0.0150	0.0612	0.0014	64	416	10	383	9
17	88	360	1294	0.28	0.0592	0.0016	0.5041	0.0131	0.0613	0.0013	57	414	9	383	8
18	82	350	1245	0.28	0.0568	0.0014	0.4792	0.0117	0.0608	0.0013	83	398	8	381	8
19	223	988	3539	0.28	0.0564	0.0014	0.4735	0.0121	0.0603	0.0013	54	394	8	377	8
20	103	830	1332	0.62	0.0535	0.0013	0.4511	0.0111	0.0607	0.0013	53	378	8	380	8
21	129	694	1951	0.36	0.0549	0.0013	0.4647	0.0111	0.0609	0.0013	54	388	8	381	8
22	154	814	2281	0.36	0.0542	0.0013	0.4604	0.0111	0.0610	0.0013	56	385	8	382	8
23	83	309	1330	0.23	0.0541	0.0014	0.4549	0.0116	0.0604	0.0013	57	381	8	378	8
HSP-1															
1	397	1717	5771	0.3	0.0565	0.0027	0.4831	0.0205	0.0620	0.0013	108	400	14	388	8
2	207	1469	2590	0.57	0.0584	0.0038	0.4906	0.0295	0.0610	0.0014	145	405	20	381	9
3	294	1905	3905	0.49	0.0565	0.0030	0.4891	0.0237	0.0628	0.0014	121	404	16	393	8
4	261	1675	3165	0.53	0.0549	0.0043	0.4653	0.0343	0.0614	0.0014	178	388	24	384	9
5	101	138	1631	0.08	0.0642	0.0017	0.5648	0.0145	0.0633	0.0014	25	455	9	396	8
6	103	328	1528	0.21	0.0637	0.0017	0.5561	0.0144	0.0630	0.0014	24	449	9	394	9
7	224	1319	3078	0.43	0.0587	0.0031	0.5039	0.0242	0.0623	0.0014	118	414	16	389	8
8	118	486	1830	0.27	0.0532	0.0024	0.4559	0.0177	0.0621	0.0013	103	381	12	389	8
9	318	1667	4577	0.36	0.0565	0.0027	0.4846	0.0209	0.0622	0.0013	109	401	14	389	8
10	60	262	901	0.29	0.0562	0.0015	0.4841	0.0129	0.0623	0.0014	26	401	9	389	9
11	108	226	1817	0.12	0.0557	0.0021	0.4783	0.0151	0.0622	0.0013	86	397	10	389	8

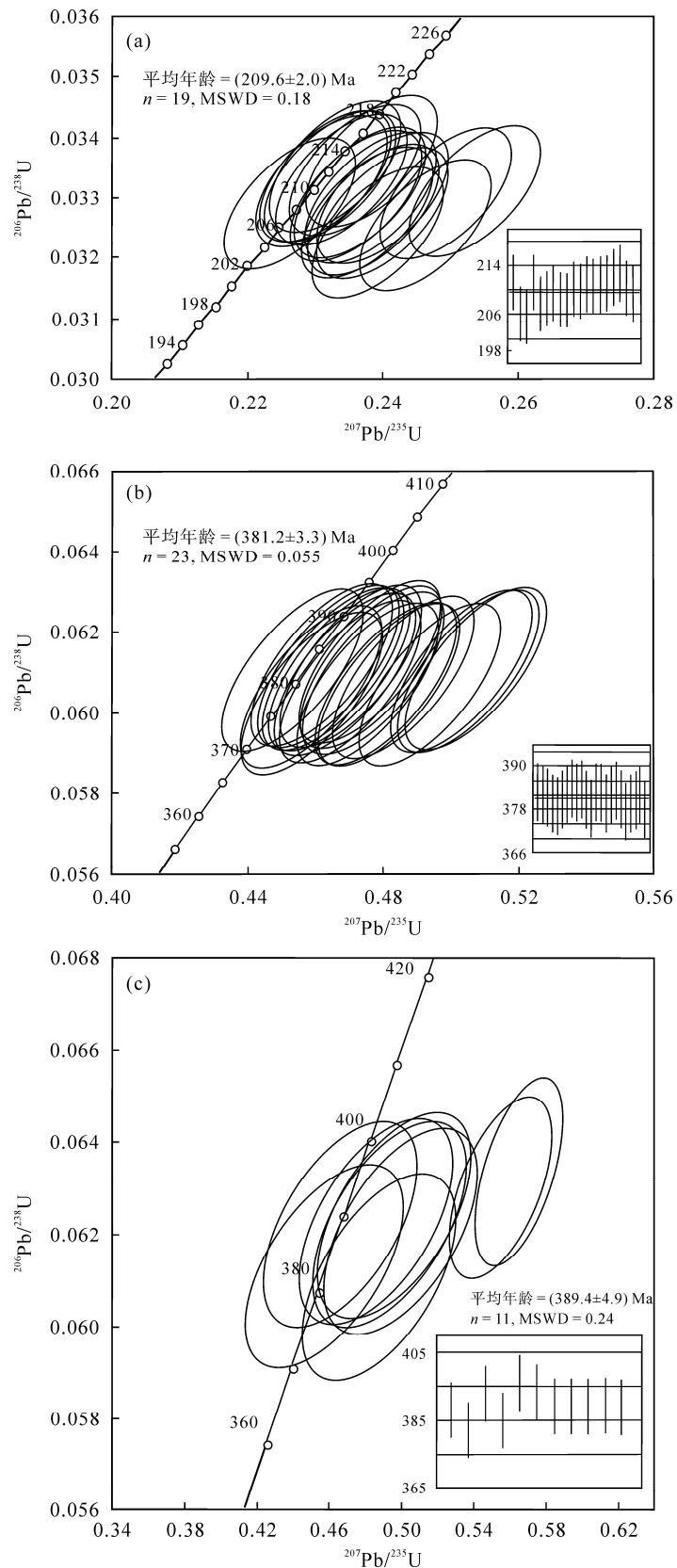


图3 伟晶岩锆石 U-Pb 年龄谐和图解

Fig.3 U-Pb concordia diagrams of zircons from the pegmatites  
(a) MLP-1; (b) HGP-1; (c) HSP-1.



石 U-Pb 年龄, 并结合锆石 CL 特征, 本次选取每个样品中的 10 颗锆石进行 Hf 同位素测试, 分析结果见表 2。

样品 MLP-1: 10 个测点给出了较一致的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值, 变化于 0.282745~0.282888 之间。根据样品的结晶年龄(210 Ma), 计算得出的  $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$  值为 2.61~8.63, 对应的模式年龄  $t_{\text{DM2}}$  为 694~1077 Ma。

样品 HGP-1: 10 个测点给出了较一致的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值, 变化于 0.282577~0.282687 之间。根据样品的结晶年龄(381 Ma), 计算得出的  $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$  值变化于 1.10~4.96 范围, 对应的模式年龄  $t_{\text{DM2}}$  位于

1060~1304 Ma 之间。

样品 HSP-1: 10 个测点给出的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值, 变化于 0.282536~0.282902 之间。根据样品的结晶年龄(389 Ma), 计算得出的  $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$  值变化于 -0.11~12.9 范围, 对应的模式年龄  $t_{\text{DM2}}$  位于 558~1388 Ma 之间。

## 4 讨论

### 4.1 滇东南钨-锡多金属成矿带中伟晶岩形成时代

锆石 U-Pb 定年结果表明, 马鹿塘伟晶岩脉形成

表 2 老君山地区伟晶岩脉锆石 Hf 同位素组成(LA-MC-ICPMS)

Table 2 Zircon Hf isotopic compositions of pegmatites in the Laojunshan (determined by LA-MC-ICPMS)

点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1 $\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1 $\sigma$	$t$ (Ma)	$\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$	1 $\sigma$	$t_{\text{DM2}}$ (Ma)	1 $\sigma$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
MLP-1											
1	0.083982	0.004105	0.000102	0.282886	0.000012	209	8.63	0.4	694	28	-1.000
2	0.038719	0.002113	0.000036	0.282849	0.000010	209	6.74	0.4	815	24	-0.876
3	0.045602	0.002379	0.000024	0.282837	0.000010	209	6.59	0.4	824	24	-0.936
4	0.042113	0.002312	0.000065	0.282818	0.000010	209	5.87	0.4	870	23	-0.928
5	0.013144	0.000772	0.000006	0.282849	0.000009	209	7.00	0.3	798	21	-0.930
6	0.035143	0.002550	0.000005	0.282888	0.000008	209	8.59	0.3	697	19	-0.977
7	0.027141	0.001679	0.000064	0.282849	0.000008	209	6.95	0.3	801	19	-0.923
8	0.013621	0.000907	0.000002	0.282860	0.000008	209	7.47	0.3	768	18	-0.949
9	0.135580	0.007534	0.000072	0.282776	0.000016	209	4.59	0.6	951	38	-0.973
10	0.102556	0.005076	0.000133	0.282745	0.000016	209	2.61	0.5	1077	36	-0.773
HGP-1											
1	0.034648	0.001410	0.000013	0.282603	0.000037	380	1.10	1.3	1304	87	-0.847
2	0.041944	0.001788	0.000016	0.282577	0.000037	380	1.11	1.3	1303	86	-0.958
3	0.024059	0.001060	0.000010	0.282606	0.000029	380	2.04	1.0	1244	67	-0.946
4	0.031188	0.001252	0.000019	0.282624	0.000023	380	2.85	0.8	1193	54	-0.968
5	0.044536	0.001728	0.000013	0.282671	0.000018	380	4.46	0.6	1091	41	-0.962
6	0.042623	0.001649	0.000011	0.282631	0.000017	380	2.95	0.6	1187	39	-0.948
7	0.022966	0.000907	0.000020	0.282687	0.000016	380	4.96	0.6	1060	37	-0.950
8	0.064760	0.002501	0.000054	0.282619	0.000016	380	2.72	0.6	1201	37	-0.967
9	0.040898	0.001569	0.000018	0.282662	0.000015	380	3.84	0.5	1130	36	-0.925
10	0.023965	0.000971	0.000017	0.282656	0.000014	380	3.88	0.5	1128	34	-0.953
HSP-1											
1	0.035229	0.001371	0.000033	0.282536	0.000028	390	-0.11	1.0	1388	66	-0.959
3	0.038390	0.001515	0.000031	0.282588	0.000027	390	2.06	0.9	1250	63	-1.000
4	0.036393	0.001406	0.000047	0.282638	0.000026	390	3.44	0.9	1163	60	-0.954
5	0.063798	0.002745	0.000048	0.282810	0.000025	390	9.57	0.9	774	57	-0.958
6	0.020283	0.000942	0.000008	0.282767	0.000023	390	7.70	0.8	893	54	-0.917
7	0.048362	0.002309	0.000058	0.282902	0.000023	390	12.9	0.8	558	54	-0.972
8	0.022456	0.000906	0.000022	0.282610	0.000023	390	2.25	0.8	1239	53	-0.930
9	0.063859	0.002472	0.000018	0.282551	0.000022	390	0.55	0.8	1346	52	-0.973
10	0.092790	0.004906	0.000081	0.282892	0.000012	390	12.2	0.4	606	29	-0.926

于三叠纪,形成时代为(209.6±2.0) Ma,而黄瓜坡伟晶岩脉、滑石板伟晶岩脉形成于中泥盆世,形成时代分别为(381.2±3.3) Ma、(389.4±4.9) Ma。已有的研究显示,侵入于黑云闪长片麻岩中的保良街伟晶岩脉以及侵入于黑云斜长片麻岩中的上阳坡伟晶岩脉,获得白云母 Ar-Ar 坪年龄分别为(140.8±1.7) Ma 和(143.9±1.2) Ma,反等时线年龄分别为(140.3±4.2) Ma 和(144.0±2.1) Ma,形成于早白垩世<sup>[25]</sup>。由此可见,该地区可至少划分出3期伟晶岩,由老至新它们分别形成于中泥盆世、晚三叠世和晚侏罗世-早白垩世。

#### 4.2 伟晶岩成因及对滇东南构造-岩浆-成矿作用的制约

近年来,锆石 U-Pb 定年结果显示,华南地区分布有大量加里东期花岗岩,形成时代为 393~460 Ma,主要集中在 420~445 Ma 之间,以 435 Ma 为峰值<sup>[26]</sup>;而有的学者认为形成时代为 390~480 Ma,峰期为 400~430 Ma,大多数为过铝质 S 型花岗岩<sup>[27]</sup>,不同于板块俯冲、碰撞形成的岛弧花岗岩。而该地区的花岗岩形成时代为 390~427 Ma,且为 S 型花岗岩,表明与华南加里东期花岗岩应为同一时期岩浆作用的产物。越来越多的研究报道了加里东期花岗岩及其相关的成矿作用。南捞片麻岩位于老君山岩体附近呈“U”型大量出露,基本探明了南温河钨矿矿床底板为南捞片麻岩,产状稳定,延长大于 5 km。而通过利用不同的同位素年龄定年方法<sup>[4,28-29]</sup>,认为南捞片麻岩为加里东期岩浆-热事件产物。并且通过对南捞矿区 12 个白钨矿样品利用 Sm-Nd 同位素定年,测得其年龄为(411.0±4.1)~(445±39) Ma<sup>[30]</sup>,表明老君山地区早期成矿可能与加里东期岩浆活动有关。位于粤北钨矿集区的梅子窝钨矿床,对其下部花岗岩进行了锆石 U-Pb 定年,结果显示其年龄为 423~438 Ma,属于加里东期<sup>[31]</sup>;广西德保夕卡岩型铜锡矿床中辉钨矿 Re-Os 同位素模式年龄为 429~440 Ma,而含矿石英脉 Re-Os 同位素模式年龄为(435.0±2.5) Ma,表明该地区在晚奥陶世-早志留世发生过成矿作用,是华南加里东运动的产物<sup>[32]</sup>;桂北地区的牛塘界夕卡岩型白钨矿床与牛塘界花岗岩体有关,利用锆石 U-Pb 定年确定了该地区花岗岩的形成时代为(421.0±2.4) Ma<sup>[33]</sup>。华南地区是我国金属矿产资源丰富的地区,这些金属的成矿作用都与花岗岩类有密切的成因联系。而加里东期的花岗岩类在强度和广度上仅次于燕山期花岗岩<sup>[34]</sup>。

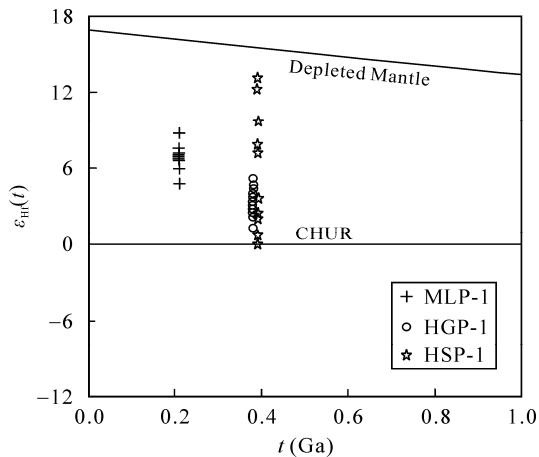
对南秧田白钨矿的同位素定年,获得全岩 Rb-Sr 法年龄为(214.3±15.6) Ma<sup>[35]</sup>和辉钨矿利用 Re-Os 年龄为(209.1±3.3)~(214.1±3.1) Ma<sup>[36]</sup>。对新寨锡矿床矿化围岩和矿石中与锡石矿物共生的白云母和白云母利用 K-Ar 定年,得到其成矿年龄为 203~226 Ma<sup>[37]</sup>;而利用锡石共生的金云母利用 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 阶段加热方法进行定年,测得金云母 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄为(209.5±1.1) Ma<sup>[36]</sup>。上述矿床的成矿时代与老城坡马鹿塘伟晶岩脉形成时代相近,暗示老君山地区存在印支期成岩及成矿作用。

由于 LCT 型伟晶岩(同 Li-Be-Nb-Ta-Cs 矿床相关的伟晶岩)与 S 型过铝质花岗岩具有成因联系,因此,许多学者倾向性认为伟晶岩是花岗岩岩浆演化晚期的残余岩浆固结的产物<sup>[38-40]</sup>。此外,西方学者推测出露于地表的伟晶岩脉与深部埋藏的花岗岩体有成因联系<sup>[41-46]</sup>。而基于对新疆阿尔泰伟晶岩的研究<sup>[47]</sup>,提出碰撞后构造体制由挤压转换为伸展,导致加厚地壳物质减压熔融形成。针对滇东南地区,由于黄瓜坡伟晶岩、滑石板伟晶岩形成年龄略小于老城坡片麻状花岗岩,且侵入于老城坡花岗岩中,因此,不太可能是老城坡花岗岩分异演化残余岩浆固结的产物。而马鹿塘伟晶岩脉形成于晚三叠世,但截至目前,研究区未见存在晚三叠世 S 型花岗岩的研究报道,由此可以排除马鹿塘伟晶岩脉由 S 型花岗岩残余岩浆分异演化而形成的可能。基于以上分析,我们认为老君山地区伟晶岩的成因与碰撞后构造背景有关。伟晶岩形成于碰撞后由挤压转换为伸展的构造背景,对滇东南地区在志留纪-泥盆纪、三叠纪构造-岩浆-成矿事件提供了新的约束。

#### 4.3 老君山伟晶岩形成物源及大地构造背景

本次研究的老君山地区伟晶岩脉钨同位素组成特征如下:

马鹿塘伟晶岩(MLP-1)中锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  和  $t_{\text{DM2}}$  值分别为 2.61~8.63 和 694~1077 Ma (表 2),在  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $t$  图解中,投点分布于“Depleted Mantle”和“CHUR”线之间(图 4),表明岩浆源于壳-幔混合的源区。黄瓜坡伟晶岩(HGP-1)锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  和  $t_{\text{DM2}}$  值分别为 1.10~4.96 和 1060~1304 Ma (表 2),在  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $t$  图解中,投点较马鹿塘伟晶岩更接近 CHUR 线(图 4),表明岩物源为壳-幔混源但幔源物质比例稍低于马鹿塘伟晶岩。滑石板伟晶岩(HSP-1)锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  和  $t_{\text{DM2}}$  值分别为-0.11~12.9 和 558~1388 Ma (表 2),表明伟晶岩物源为壳-

图 4 伟晶岩锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  与结晶年龄相关图Fig.4 Comparison diagram of  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $t$  for zircons of pegmatite

幔混源。但较前两者显示更宽的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  和  $t_{\text{DM2}}$  变化范围, 可能反映其初始岩浆混合均一性较差且其形成温度低于前两者。虽然三条伟晶岩的 Hf 同位素组成有所差异, 但正的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值和古老的模式年龄  $t_{\text{DM2}}$  皆反映伟晶岩物源为壳-幔混源, 可能为含有幔源物质的中下地壳部分熔融, 或者古老壳源物质和新生幔源物质共同作用的结果。

滇东南老君山地区位于扬子板块与华夏板块的交界处, 该地区在新元古代早期出现了扬子板块与华夏板块俯冲碰撞, 并且新元古代中期(850~800 Ma)则转入后碰撞阶段<sup>[48]</sup>; 新元古代晚期(800~680 Ma)扬子板块与华夏板块处于伸展构造背景, 其构造环境从大陆裂解向陆内裂谷沉积阶段转化, 先前拼合在一起的扬子板块与华夏板块沿着前拼合带发生了裂解<sup>[49]</sup>。华南板块与华北板块的俯冲碰撞, 诱发了扬子板块与华夏板块的陆内碰撞, 进而引起了志留纪-泥盆纪(450~400 Ma)的加里东构造热事件<sup>[50]</sup>。而老君山地区地处华夏板块最西缘, 处于扬子板块碰撞的前锋带, 在 440~400 Ma 发育一起发生碰撞造山运动, 并伴随着南温河花岗岩的侵入。滇东南老君山地区缺乏志留系地层, 而使得奥陶系地层和泥盆系地层呈不整合关系接触, 此类角度不整合在华南地区普遍存在, 表明这是华南加里东运动的结果<sup>[51]</sup>。此外老君山地区发育早-中泥盆世(398~387 Ma)的岩浆作用事件, 整个华南地区处于构造伸展区域背景下<sup>[52]</sup>。伟晶岩的成岩年龄略晚于主造山时代<sup>[53]</sup>, 因此伟晶岩在很大程度上记录了后碰撞岩浆作用的重要信息。黄瓜坡伟晶岩、滑石板伟晶岩形成年龄略小于老城坡花岗岩, 但侵入于老城坡花岗岩中, 是碰撞后构造体制由挤压转换为伸展, 导致加厚地壳物质减

压熔融形成的。这与世界范围内多数花岗伟晶岩脉形成的构造背景较一致, 而我国的阿尔泰地区伟晶岩脉也已形成于此构造背景<sup>[47,54-55]</sup>。

老君山变质核杂岩在 250~220 Ma 之间, 由于幔源物质在华南板块内部广泛的侵入和随之而来的印支板块与华南板块陆陆碰撞, 使得老君山地区处于同造山的地壳增厚挤压阶段<sup>[56]</sup>, 并且暗示在印支期陆陆碰撞之后, 华南陆块西端印支期(230 Ma)陆内造山带可能先后经历了推覆-剪切作用和碰撞后造山后阶段(210 Ma), 老君山变质核杂岩力学体制由挤压向伸展转变, 研究区处于造山后期地壳减薄阶段<sup>[57]</sup>。老城坡花岗岩及早古生代地层在 230 Ma 遭受强烈的变形变质作用, 并处于强烈的挤压环境, 此外该地区没有发现同时代的 S 型花岗岩存在, 故马鹿塘伟晶岩脉(209 Ma)很可能是伸展背景下泥质岩减压熔融形成的。老君山地区在 214~209 Ma 发育一次持续时间长, 强度大的岩浆活动和成矿事件<sup>[58]</sup>。马鹿塘伟晶岩脉、南秧田白钨矿和新寨锡矿即为该期成矿事件的表现。

## 5 结 论

通过对老君山地区伟晶岩锆石 U-Pb 年代学研究, 并结合前人的研究成果, 可以得出以下结论:

(1) 晶岩锆石 U-Pb 定年结果显示, 滇东南地区可划分出至少 3 期伟晶岩, 由老至新它们分别形成于中泥盆世、晚三叠世和晚侏罗世-早白垩世。

(2) 马鹿塘伟晶岩脉形成于晚三叠世, 与南秧田白钨矿、新寨锡矿形成于同一期成矿作用, 表明老君山地区存在印支期成矿作用。

(3) 黄瓜坡伟晶岩、滑石板伟晶岩形成年龄略小于老城坡花岗岩, 但侵入于老城坡花岗岩中, 因此, 不太可能是花岗岩分异演化残余岩浆固结的产物。

(4) 老君山地区伟晶岩的成因与碰撞后构造背景有关, 其形成时代有效制约了滇东南地区在志留纪-泥盆纪、三叠纪构造-岩浆-成矿事件。

### 参考文献(References):

- [1] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1982: 1-737.  
Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of Yunnan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982: 1-737 (in Chinese).
- [2] Zhong D L, Wu G Y, Ji J P, Ding L. Discovery of ophiolite in Southeastern Yunnan, China[J]. Chinese Sci Bull, 1999, 44(1):

- 36-40.
- [3] 吴根耀. 滇桂交界区印支期前陆褶皱冲断带[J]. 地质科学, 2001, 36(1): 64-71.  
Wu Gen-yao. Indosinian foreland fold-and-thrust belt bordering Yunnan and Guangxi, China[J]. Chinese J Geol, 2001, 36(1): 64-71 (in Chinese with English abstract).
- [4] 张世涛, 冯明刚, 吕伟. 滇东南南温河变质核杂岩解析[J]. 中国区域地质, 1998, 17(4): 390-397.  
Zhang Shi-tao, Feng Ming-gang, Lü Wei. Analysis of the Nanwenhe metamorphic core complex in southeastern Yunnan[J]. Reg Geol China, 1998, 17(4): 390-397 (in Chinese with English abstract).
- [5] 李东旭, 徐顺山. 变质核杂岩的旋扭成因: 滇东南老君山变质核杂岩的构造解析[J]. 地质论评, 2000, 46(2): 113-119.  
Li Dong-xu, Xu Shun-shan. Rotation-shearing genesis of metamorphic core complex — Structural analysis of metamorphic core complex in Laojunshan, southeastern Yunnan Province[J]. Geol Rev, 2000, 46(2): 113-119 (in Chinese with English abstract).
- [6] 刘玉平, 叶霖, 李朝阳, 宋彪, 李铁胜, 郭利果, 皮道会. 滇东南发现新元古代岩浆岩: SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学证据[J]. 2006, 岩石学报, 22(4): 916-926.  
Liu Yu-ping, Ye Lin, Li Chao-yang, Song Biao, Li Tie-sheng, Guo Li-guo, Pi Dao-hui. Discovery of the Neoproterozoic magmatics in southeastern Yunnan: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating and litho-geochemistry[J]. Acta Petrol Sinica, 2006, 22(4): 916-926 (in Chinese with English abstract).
- [7] 谭筱虹, 李志均, 杜再飞. 滇东南南温河地区深变质岩中似层状白钨矿[J]. 云南地质, 2010, 29(4): 382-387.  
Tan Xiao-hong, Li Zhi-jun, Du Zai-fei. On the stratoid scheelite of kata-metamorphite in Nanwenhe of SE Yunnan[J]. Geol Yunnan, 2010, 29(4): 382-387 (in Chinese with English abstract).
- [8] 官容生. 滇东南构造岩浆带花岗岩体的含矿性讨论[J]. 矿物岩石, 1991, 11(1): 92-101.  
Guan Rong-sheng. An approach of mineralization of granite mass in the structure tectonic magmatic belt in the Southeast of Yunnan[J]. Mineral Petrol, 1991, 11(1): 92-101 (in Chinese with English abstract).
- [9] 刘玉平, 李正祥, 李惠民, 郭利果, 徐伟, 叶霖, 李朝阳, 皮道会. 都龙锡锌矿床锡石和锆石 U-Pb 年代学——滇东南白垩纪大规模花岗岩成矿事件[J]. 岩石学报, 2007, 23(5): 967-976.  
Liu Yu-ping, Li Zheng-xiang, Li Hui-min, Guo Li-guo, Xu Wei, Ye Lin, Li Chao-yang, Pi Dao-hui. U-Pb geochronology of cassite and zircon from the Dulong Sn-Zn deposit: Evidence for Cretaceous large-scale granitic magmatism and mineralization events in southeastern Yunnan Province, China[J]. Acta Petrol Sinica, 2007, 23(5): 967-976 (in Chinese with English abstract).
- [10] 刘艳宾, 莫宣学, 张达, 阙朝阳, 狄永军, 蒲兴明, 程国顺, 马慧慧. 滇东南老君山地区晚白垩世花岗岩的成因[J]. 岩石学报, 2014, 30(11): 3271-3286.  
Liu Yan-bin, Mo Xuan-xue, Zhang Da, Que Chao-yang, Di Yong-jun, Pu Xing-ming, Cheng Guo-shun, Ma Hui-hui. Petrogenesis of the Late Cretaceous granite discovered in the Laojunshan region, southeastern Yunnan Province[J]. Acta Petrol Sinica, 2014, 30(11): 3271-3286 (in Chinese with English abstract).
- [11] 张斌辉, 丁俊, 任光明, 张林奎, 石洪召. 云南马关老君山花岗岩的年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 地质学报, 2012, 86(4): 587-601.  
Zhang Bin-hui, Ding Jun, Ren Guang-ming, Zhang Lin-kui, Shi Hong-zhao. Geochronology and geochemical characteristics of the Laojunshan granites in Maguan County, Yunnan Province, and its geological implications[J]. Acta Geol Sinica, 2012, 86(4): 587-601 (in Chinese with English abstract).
- [12] 云南地质矿产勘查开发局区域地质矿产调查大队. 区域地质报告[R]. 玉溪: 云南地质矿产勘查开发局区域地质矿产调查大队, 1999: 1-146.  
Regional Geological Survey, Yunnan Bureau of Geosurvey and Development. Regional Geological Report[R]. Yuxi: Regional Geological Survey, Yunnan Bureau of Geosurvey and Development, 1999: 1-146 (in Chinese).
- [13] Xu B, Jiang S Y, Hofmann A W, Wang R, Yang S Y, Zhao K D. Geochronology and geochemical constraints on petrogenesis of Early Paleozoic granites from the Laojunshan district in Yunnan Province of South China[J]. Gondwana Res, 2016, 29(1): 248-263.
- [14] 蔡德坤. 滇东南老君山花岗岩类岩石的形成演化与锡、钨的矿化富集作用[J]. 云南地质, 1983, 2(2): 102-113.  
Cai De-kun. The formation and evolution of Laojunshan granitoid rocks in southeastern Yunnan and the mineralization and enrichment of tin and tungsten[J]. Geol Yunnan, 1983, 2(2): 102-113 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张良钜, 兰延. 云南祖母绿的矿床地质及宝石学特征[J]. 矿物学报, 1999, 19(2): 189-197.  
Zhang Liang-ju, Lan Yan. Gemological characteristics and deposit geology of Yunnan emerald[J]. Acta Mineral Sinica, 1999, 19(2): 189-197 (in Chinese with English abstract).
- [16] 王登红, 邹天人, 徐志刚, 余金杰, 付小方. 伟晶岩矿床示踪造山过程的研究进展[J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 614-620.  
Wang Deng-hong, Zou Tian-ren, Xu Zhi-gang, Yu Jin-jie, Fu Xiao-fang. Advance in the study of using pegmatite deposits as the tracer of orogenic process[J]. Adv Earth Sci, 2004, 19(4): 614-620 (in Chinese with English abstract).
- [17] 马慧慧. 滇东南老君山花岗岩岩石学与地球化学及其构造意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013: 1-62.  
Ma Hui-hui. Petrology and geochemical characteristics of Laojunshan granite in Southeast Yunnan and its tectonic significance[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013: 1-62 (in Chinese with English abstract).
- [18] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, Gao C G, Gao S, Xu J, Chen H H. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. Chinese Sci Bull, 2010, 55(15): 1535-1546.
- [19] Hu Z C, Liu Y S, Chen L, Zhou L, Li M, Zong K Q, Zhu L Y,

- Gao S. Contrasting matrix induced elemental fractionation in NIST SRM and rock glasses during laser ablation ICP-MS analysis at high spatial resolution[J]. *Anal At Spectrom*, 2011, 26(2): 425–430.
- [20] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. 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 from Mantle Xenoliths[J]. *J Petrol*, 2010, 51(1/2): 537–571.
- [21] Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[R]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 4(1): 1–71.
- [22] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ [J]. *Chem Geol*, 2002, 192(1): 59–79.
- [23] 唐红峰, 赵志琦, 黄荣生, 韩宇捷, 苏玉平. 新疆东准噶尔 A 型花岗岩的锆石 Hf 同位素初步研究[J]. *矿物学报*, 2008, 28(4): 335–342.  
Tang Hong-feng, Zhao Zhi-qi, Huang Rong-sheng, Han Yu-jie, Su Yu-ping. Primary Hf isotopic study on zircons from the A-type granites in eastern Junggar of Xinjiang, Northwest China[J]. *Acta Mineral Sinica*, 2008, 28(4): 335–342 (in Chinese with English abstract).
- [24] Griffin W, Pearson N, Belousova E, Jackson S, Van Acherbergh E, O'reilly S Y, Shee S. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64(1): 133–147.
- [25] 李健康, 王登红, 李华芹, 陈郑辉, 梅玉苹. 云南老君山矿集区的晚侏罗世-早白垩世成矿事件[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2013, 38(5): 1023–1036.  
Li Jian-kang, Wang Deng-hong, Li Hua-qin, Chen Zheng-hui, Mei Yu-ping. Late Jurassic-Early Cretaceous mineralization in the Laojunshan ore concentration area, Yunnan Province[J]. *Earth Sci J China Univ Geosci*, 2013, 38(5): 1023–1036 (in Chinese with English abstract).
- [26] 胡艳华, 顾明光, 徐岩, 余盛强, 王加恩, 贺跃. 浙江诸暨地区陈蔡群加里东期变质年龄的确认及其地质意义[J]. *地质通报*, 2011, 30(11): 1661–1670.  
Hu Yan-hua, Gu Ming-guang, Xu Yan, Yu Sheng-qiang, Wang Jia-en, He Yue. The confirmation of the age of Caledonian Chencai group in Zhuji area of Zhejiang Province and its geological significance[J]. *Geol Bull China*, 2011, 30(11): 1661–1670 (in Chinese with English abstract).
- [27] 苏良树. 华南泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东造山带[J]. *高校地质学报*, 2006, 12(4): 418–431.  
Su Liang-shu. Predevonian tectonic evolution of south China from Cathaysian Block to Caledonian Period Folded organic belt[J]. *Geol J China Univ*, 2006, 12(4): 418–431 (in Chinese with English abstract).
- [28] Roger F, Leloup P H, Jolivet M, Lacassin R, Trinh P T, Brunel M, Seward D. Long and complex thermal history of the Song Chay metamorphic dome (Northern Vietnam) by multi-system geochronology[J]. *Tectonophysics*, 2000, 321(4): 449–466.
- [29] 颜丹平, 周美夫, 王焰, 汪昌亮, 赵太平. 都龙 Song Chay 变质穹隆体变形与构造年代——南海盆地北缘早期扩张作用始于华南地块张裂的证据[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2005, 30(4): 402–412.  
Yan Dan-ping, Zhou Mei-fu, Wang Yan, Wang Chang-liang, Zhao Tai-ping. Structural styles and chronological evidences from Dulong Song Chay tectonic dome: Earlier spreading of south China Sea Basin due to Late Mesozoic to Early Cenozoic extension of south China block[J]. *Earth Sci J China Univ Geosci*, 2005, 30(4): 402–412 (in Chinese with English abstract).
- [30] 缪应里, 陈智明, 涂长寿, 朱加景. 滇东南老君山南捞铜钨矿床地质特征及成因探讨[J]. *地球学报*, 2013, 34(1): 65–70.  
Miao Ying-li, Chen Zhi-ming, Tu Chang-shou, Zhu Jia-jing. Geological characteristics and genesis of the Nanlao Cu-W deposit in Laojunshan area, Southeastern Yunnan Province[J]. *Acta Geosci Sinica*, 2013, 34(1): 65–70 (in Chinese with English abstract).
- [31] 翟伟, 孙晓明, 邬云山, 孙红英, 华仁民, 杨永强, 李文铅, 李社弘. 粤北梅子窝钨矿区隐伏花岗岩闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄与  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  成矿年龄及其地质意义[J]. *高校地质学报*, 2010, 16(2): 177–185.  
Zhai Wei, Sun Xiao-ming, Wu Yun-shan, Sun Hong-ying, Hua Ren-min, Yang Yong-qiang, Li Wen-qian, Li She-hong. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the buried granodiorite and muscovite  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of mineralization and geological implications of Meiziwo tungsten deposit, Northern Guangdong Province, China[J]. *Geol J China Univ*, 2010, 16(2): 177–185 (in Chinese with English abstract).
- [32] 王永磊, 王登红, 张长青, 屈文俊, 胡艳春. 广西德保锡矿床辉钨矿 Re-Os 同位素定年及对加里东期成矿的探讨[J]. *矿床地质*, 2010, 29(5): 881–889.  
Wang Yong-lei, Wang Deng-hong, Zhang Chang-qing, Qu Wen-jun, Hu Yan-chun. Molybdenite Re-Os isochron age of Debao Cu-Sn deposit in Guangxi and relation to Caledonian mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(5): 881–889 (in Chinese with English abstract).
- [33] 汪金榜, 唐怀禹. 广西牛塘界白钨矿床地质特征及成因的探讨[J]. *广西地质*, 1988 (1): 11–18.  
Wang Jin-bang, Tang Huai-yu. Discussion on the geology and genesis of Niutangjie scheelite deposit in Guangxi[J]. *Geol Guangxi*, 1988 (1): 11–18 (in Chinese with English abstract).
- [34] 孙涛. 新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. *地质通报*, 2006, 23(3): 332–335.  
Sun Tao. A new map showing the distribution of granites in South China and its explanatory notes [J]. *Geol Bull China*, 2006, 25(3): 332–335 (in Chinese with English abstract).
- [35] 曾志刚, 李朝阳, 刘玉平, 涂光焱. 老君山成矿区变质成因矽卡岩的地质地球化学特征[J]. *矿物学报*, 1999, 19(1): 95–99.  
Zeng Zhi-gang, Li Chao-yang, Liu Yu-ping, Tu Guang-zhi. Geology and geochemistry of metamorphogenic skarn from Laojunshan metallogenic Province[J]. *Acta Mineral Sinica*, 1999, 19(1): 48–55 (in Chinese with English abstract).
- [36] 冯佳睿. 云南麻栗坡南秧田钨矿床成矿流体特征与成矿作用[D]. 北京: 中国地质科学院, 2011.  
Feng Jia-rui. The ore-forming fluid metallogenesis of Nan-

- yangtian tungsten deposit in Malipo, Yunnan Province, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [37] 王学焜. 麻栗坡新寨锡矿床地质地球化学特征[J]. 云南地质, 1994, 13(1): 1-16.  
Wang Xue-kun. Geological-geochemical characteristics of Xinzhai tin deposit in Malipo [J]. Geol Yunnan, 1994, 13(1): 1-16 (in Chinese with English abstract).
- [38] Černý P, Meintzer R E. Fertile granites in the Archean and Proterozoic fields of rare-element pegmatites: Crustal environment, geochemistry, and petrogenetic relationships[M]//Taylor R P, Strong D F. Recent Advances in the Geology of Granite-Related Mineral Deposits. Montreal: CIMM Spec Publ, 1988, 39: 170-206.
- [39] Černý P, Ercit T S. Mineralogy of niobium and tantalum: Crystal chemical relationships, paragenetic aspects and their economic implications[M]//Möller P, Černý P, Saupé F. Lanthanides, Tantalum and Niobium. Berlin: Springer, 1989: 27-79.
- [40] Černý P. Exploration strategy and methods for pegmatite deposits of tantalum [M]//Möller P, Černý P, Saupé F. Lanthanides, Tantalum and Niobium. Berlin: Springer, 1989: 274-302.
- [41] Jahns R H, Burnham C W. Experimental studies of pegmatite genesis: I. A model for the derivation and crystallization of granitic pegmatites [J]. Econ Geol, 1969, 64(8): 843-864.
- [42] Norton J J. Sequence of mineral assemblages in differentiated granitic pegmatites [J]. Econ Geol, 1983, 78(5): 854-874.
- [43] Jolliff B, Papike J, Shearer C. Petrogenetic relationships between pegmatite and granite based on geochemistry of muscovite in pegmatite wall zones, Black Hills, South Dakota, USA[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1992, 56(5): 1915-1939.
- [44] Webster J D, Thomas R, Rhede D, Förster H-J, Seltmann R. Melt inclusions in quartz from an evolved peraluminous pegmatite: Geochemical evidence for strong tin enrichment in fluorine-rich and phosphorus-rich residual liquids[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1997, 61(13): 2589-2604.
- [45] London D. Internal differentiation of rare-element pegmatites: A synthesis of recent research[J]. Geol Soc Am Spec Paper, 1990, 246: 35-50.
- [46] Fuertes-Fuente M, Martín-Izard A, Boiron M C, Viñuela J M. P-T path and fluid evolution in the Franqueira granitic pegmatite, central Galicia, Northwestern Spain[J]. Can Mineral, 2000, 38(5): 1163-1175.
- [47] Lv Z H, Zhang H, Tang Y, Guan S J. Petrogenesis and magmatic-hydrothermal evolution time limitation of Kelumute No.112 pegmatite in Altay, Northwestern China: Evidence from zircon U-Pb Hf isotopes [J]. Lithos, 2012, 154: 374-391.
- [48] Wang D Z, Zhou X M, Xu X. Types and genetic model of Precambrian granitoids of South China [J]. J SE Asian Earth Sci, 1989, 3(1/4): 255-261.
- [49] 苏良树. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1035-1053.  
Shu Liang-shu. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. Geol Bull China, 2012, 31(7): 1035-1053.
- [50] 黄孔文. 滇东南老君山地区南捞片麻岩地球化学和年代学及其构造意义[D]. 北京: 中国地质大学, 2013: 1-72.  
Huang Kong-wen. Geochemistry and geochronology characteristics of Nanlao geneisses in southeast Yunnan and its tectonic significance[J]. Beijing: China University of Geosciences, 2013, 1-72 (in Chinese with English abstract).
- [51] Vladimirov A G, Vystavnoi S A, Titov A V, Rudnev S N, Dergachev V B, Annikova I Yu, Tikunov Yu V. Petrology of the Early Mesozoic rare-metal granites of the southern Gorny Altai [J]. Geol Geofiz (Russ Geol Geophys), 1998, 39(7): 901-916 (909-925).
- [52] 胡艳华, 钱俊峰, 褚先尧, 徐岩, 顾明光, 李建锋. 华南加里东运动研究综述及其性质探讨[J]. 科技通报, 2012, 28(11): 42-48.  
Hu Yan-hua, Qian Jun-feng, Zhu Xian-yao, Xu Yan, Gu Ming-gang, Li Jian-feng. The overview and origin analysis for the Caledonian movement in the south China block[J]. Bull Sci Technol, 2012, 28(11): 42-48 (in Chinese with English abstract).
- [53] Zagorsky V Y, Vladimirov A G, Makagon V M, Kuznetsova L G, Smirnov S Z, D'yachkov B A, Annikova I Y, Shokalsky S P, Uvarov A N. Large fields of spodumene pegmatites in the settings of rifting and postcollisional shear-pull-apart dislocations of continental lithosphere [J]. Russian Geology and Geophysics, 2014, 55(2): 237-251.
- [54] 马占龙, 张辉, 唐勇, 吕正航, 张鑫, 赵景宇. 新疆卡鲁安矿区伟晶岩锆石 U-Pb 定年、铪同位素组成及其与哈龙花岗岩成因关系研究[J]. 地球化学, 2015, 44(1): 9-26.  
Ma Zhan-long, Zhang Hui, Tang Yong, Lü Zheng-hang, Zhang Xin, Zhao Jing-yu. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of pegmatites from the Kaluan mining area in the Altay, Xinjiang and their genetic relationship with the Halong granite[J]. Geochimica, 2015, 44(1): 9-26 (in Chinese with English abstract).
- [55] 陈剑锋. 阿尔泰 3 号脉缓倾斜部分的形成和演化[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2011: 1-87.  
Chen Jian-feng. Geochemistry of the plate part in Altai No.3 pegmatite and its formation and evolution[D]. Guiyang: Guiyang Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2011: 1-87 (in Chinese with English abstract).
- [56] 郭利果. 滇东南老君山变质核杂岩地球化学和年代学初步研究[D]. 贵阳: 中国科学院贵阳地球化学研究所, 2006: 1-126.  
Guo Li-guo. Primary research on geochemistry and geochronology of the Laojunshan metamorphic core complex, southeastern Yunnan[D]. Guiyang: Guiyang Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2006: 1-126 (in Chinese with English abstract).
- [57] 徐伟. 滇东南南温河花岗岩地球化学与年代学研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2007: 1-74.  
Xu Wei. A primary study of geochronology and Geochemistry of the Nanwenhe granite in southeastern Yunan [D]. Guiyang:

Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2007: 1-74 (in Chinese with English abstract).

- [58] 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富, 李超. 滇东南老君山地区印支期成矿事件初探——以新寨锡矿床和南秧田钨矿床为例[J]. 矿产地质, 2011, 30(1): 57-73.

Feng Jia-rui, Mao Jing-wen, Pei Rong-fu, Li Chao. A tentative discussion on Indosinian ore-forming events in Laojunshan area of southeastern Yunnan: A case study of Xinzhai tin deposit and Nanyangtian tungsten deposit[J]. Mineral Deposits, 2011, 30(1): 57-73 (in Chinese with English abstract).