

# 赣南印支期柯树岭花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及成因探讨

郭春丽<sup>1</sup>, 陈毓川<sup>2</sup>, 蔺志永<sup>3</sup>, 楼法生<sup>4</sup>, 曾载淋<sup>5</sup>

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2. 中国地质科学院, 北京 100037; 3. 中国地质调查局, 北京 100037; 4. 江西省地质调查研究院, 江西南昌 330030; 5. 江西省赣南地质调查大队, 江西 赣州 341000)

**摘要:** 利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年方法测得赣南柯树岭-仙鹤塘云英岩-石英脉型钨锡多金属矿床柯树岭区段钻孔中的新鲜花岗岩的成岩年龄为  $251.5 \pm 6.6$  Ma 和  $202 \pm 15$  Ma。柯树岭花岗岩属过铝质高钾钙碱性花岗岩;  $\Sigma\text{REE}$  较低 ( $< 80.16 \times 10^{-6}$ ) 与华南典型含铈钼矿化花岗岩  $\Sigma\text{REE}$  含量低的特点一致, 是岩浆高度分异演化的产物。锆石  $\epsilon\text{Hf}(t)$  值为  $-14.5 \sim -1.3$ , Hf 两阶段模式年龄  $T_{\text{DM2}}$  为  $3.21 \sim 2.55$  Ga, 表明该岩体起源于太古宙地壳物质的部分熔融;  $\text{Al}/(\text{Mg} + \text{Fe}) - \text{Ca}/(\text{Mg} + \text{Fe})$  图解表明该岩体主要来源于变质杂砂岩和变质泥岩的部分熔融, 但也混有一些变质玄武岩和变质英云闪长岩, 两个正的  $\epsilon\text{Hf}(t)$  值 ( $+2.4$  和  $+3.0$ ) 显示岩浆在上升侵位过程中捕获了幔源残留锆石。包括柯树岭在内的华南印支期花岗岩是于后碰撞或碰撞晚期, 在以被动侵位机制为主和挤压应力松弛的间隙环境中侵位的, 为加厚地壳局部熔融的产物。

**关键词:** SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄, 岩石地球化学, 锆石 Hf 同位素, 柯树岭花岗岩, 印支期, 华南

中图分类号: P597; P588.12<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)04-0567-14

## SHRIMP zircon U-Pb dating, geochemistry and zircon Hf isotopic characteristics of granitoids in Keshuling granites, Jiangxi Province and their genetic analysis

GUO Chun-li<sup>1</sup>, CHEN Yu-chuan<sup>2</sup>, LIN Zhi-yong<sup>3</sup>, LOU Fa-sheng<sup>4</sup> and ZENG Zai-lin<sup>5</sup>

(1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. China Geological Survey, Beijing 100037, China; 4. Jiangxi Institute of Geological Survey, Nanchang 410011, China; 5. Gannan Geological Survey Party of Jiangxi Province, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** The Keshuling-Xian'etang greisen-quartz vein type tungsten-tin polymetallic deposit located in Chongyi County of Jiangxi Province is one of the medium-sized tungsten polymetallic deposits in South China. It is closely related to felsic Keshuling granite outcropped in South mining area. SHRIMP zircon U-Pb dating of a fresh granitic sample from the drilling core has yielded ages of  $251.5 \pm 6.6$  Ma and  $202 \pm 15$  Ma. The Keshuling granites fall into the peraluminous, high-K and calc-alkali category revealed by whole rock analysis.  $\text{SiO}_2$ , total alkaline ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and FeO contents of the Keshuling granitic intrusion are 73.51% ~ 74.23%, 6.58% ~ 7.77%, 0.01% ~ 0.07% and 0.49% ~ 0.95% respectively.  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  and A/CNK ratios of the Keshuling granitic intrusion are 1.05 ~ 1.98 and 1.17 ~ 1.60 ( $> 1.1$ ) respectively. The low REE total content

收稿日期: 2010-09-25; 修订日期: 2010-11-30

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(40803008); 国土资源部公益性行业科研专项经费项目(200911007-11); 国土资源大调查项目(1212010781078)

作者简介: 郭春丽(1978-), 女, 汉族, 博士, 助研, 从事花岗岩与相关矿床研究, E-mail: gchunli@126.com

( $\Sigma\text{REE} = 43.98 \times 10^{-6} \sim 80.16 \times 10^{-6}$ ) demonstrates intense differentiation and crystallization at the petrogenic stage, which is the characteristics of typical Nb and Ta-bearing granites in South China. The  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  and  $\delta\text{Eu}$  of the Keshuling granites are 2.53~7.80 and 0.09~0.20 respectively. According to chondrite-normalized REE patterns, the REE of the Keshuling granitoids have "tetrad effect". Granites and pegmatites of "tetrad effect" are crystallization products of residual melting at the last stage of granitic magmatism. Intensive fractional crystallization can result in enrichment of volatile matters ( $\text{H}_2\text{O}$ , F, Cl, B, P), alkali metals (Na, K) and some ore-forming elements (REE, Nb, Ta, Li, Be) in residual melt. In the primitive mantle-normalized trace element spidergram of the Keshuling granites, defective values of Sr, Eu and Ti show that there existed crystallization and separation of feldspars and ilmenites. The  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  and  $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$  ratios of zircons in the Keshuling granitic intrusion are 0.000 373~0.003 818 and  $-0.99 \sim -0.88$  respectively, which are lower than those of the upper crust. The  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  ratios (0.281 819~0.282 600),  $\epsilon\text{Hf}(t)$  values (between  $-14.5$  and  $-1.3$ ) and  $T_{\text{DM2}}$  (3.21~2.55 Ga) are representatives of an Archean crustal reservoir.  $\text{Ca}/(\text{Mg} + \text{Fe}) - \text{Al}/(\text{Mg} + \text{Fe})$  diagram indicates that Triassic granitoids in South China mainly originated from metagreywackes and pelites, with the involvement of a small amount of metamorphic basalts and tonalities. Two positive  $\epsilon\text{Hf}(t)$  values ( $+2.4$  and  $+3.0$ ) of zircons indicate that mantle sourced zircons were captured during the elevation and emplacement of felsic magma. Compared with previous achievements, it is suggested that the Triassic granitic rocks including the Keshuling granites in South China were formed in a post-collisional tectonic setting or at the late stage of syn-orogenic tectonic setting. During the relaxation after extruding process, the felsic magmas were formed by partial melting of thickening crustal materials.

**Key words:** SHRIMP zircon U-Pb ages; geochemistry; Hf isotopic analysis; Keshuling granites; Triassic; South China

与华南燕山期花岗岩相比,印支期花岗岩数量少且分散,整体上呈面状分布,缺少相应的火山岩(周新民 2003; Zhou *et al.*, 2006)。长期以来对华南燕山期花岗岩的研究取得了大量成果(例如:Jahn *et al.*, 1990; Zhou and Li, 2000; Chen *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2003; Zhou *et al.*, 2006)。印支期花岗岩数量较少,出露面积相对较小,且成矿作用比燕山期花岗岩弱,但近年来对该期花岗岩的认识取得了长足的进展(例如:Wang *et al.*, 2002; 孙涛等, 2003; 徐夕生等, 2003; 王岳军等, 2005; Sun *et al.*, 2005; 柏道远等, 2007a, 2007b, 2007c; He *et al.*, 2010)。

柯树岭-仙鹅塘矿床位于赣西南地区,为一黑钨矿锡石硫化物-黄玉云英岩-石英脉型钨锡多金属矿床。柯树岭花岗岩体出露于矿区南部。前人对该矿床的地层、构造、岩浆岩、矿化特征等做了详细描述<sup>①</sup>。本文对该岩体进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年,首次获得了精确的成岩年龄,证实该岩体形成于印支期。通过岩石地球化学、锆石 Hf 同位素的分

析,并结合华南已有印支期花岗岩的资料,探讨了柯树岭花岗岩的源区、演化过程和地球动力学背景。

## 1 赣南地区区域地质

赣南地区大地构造位置隶属于华南加里东褶皱系(图 1a)。区内地层发育较全,除缺失志留系外,自震旦系—第四系均有出露。震旦系—奥陶系主要为一套富含钙质、泥质、碳质及砂泥质的类复理石建造,夹有大量的海底火山喷发物,岩石普遍发生了区域浅变质作用,构成了区内的褶皱基底。震旦系主要分布于区内北东部,寒武系、奥陶系等主要分布于西南部。泥盆系—下三叠统主要为一套海陆交互相、浅海相含钙质碎屑岩、砂页岩、碳酸盐岩,其中泥盆系主要分布于区内中、西及西南部,石炭系—二叠系主要分布于区内晚古生代拗陷盆地内,三叠系分布较为局限,呈零星分布。侏罗系—白垩系主要为陆相红盆沉积及岩浆喷发物,侏罗系主要分布于南部地区,白垩系分布于区内主要断陷盆地内。

① 江西省地质矿产勘查开发局. 江西省崇义县仙鹅塘钨锡矿普查工作设计(2004~2005).

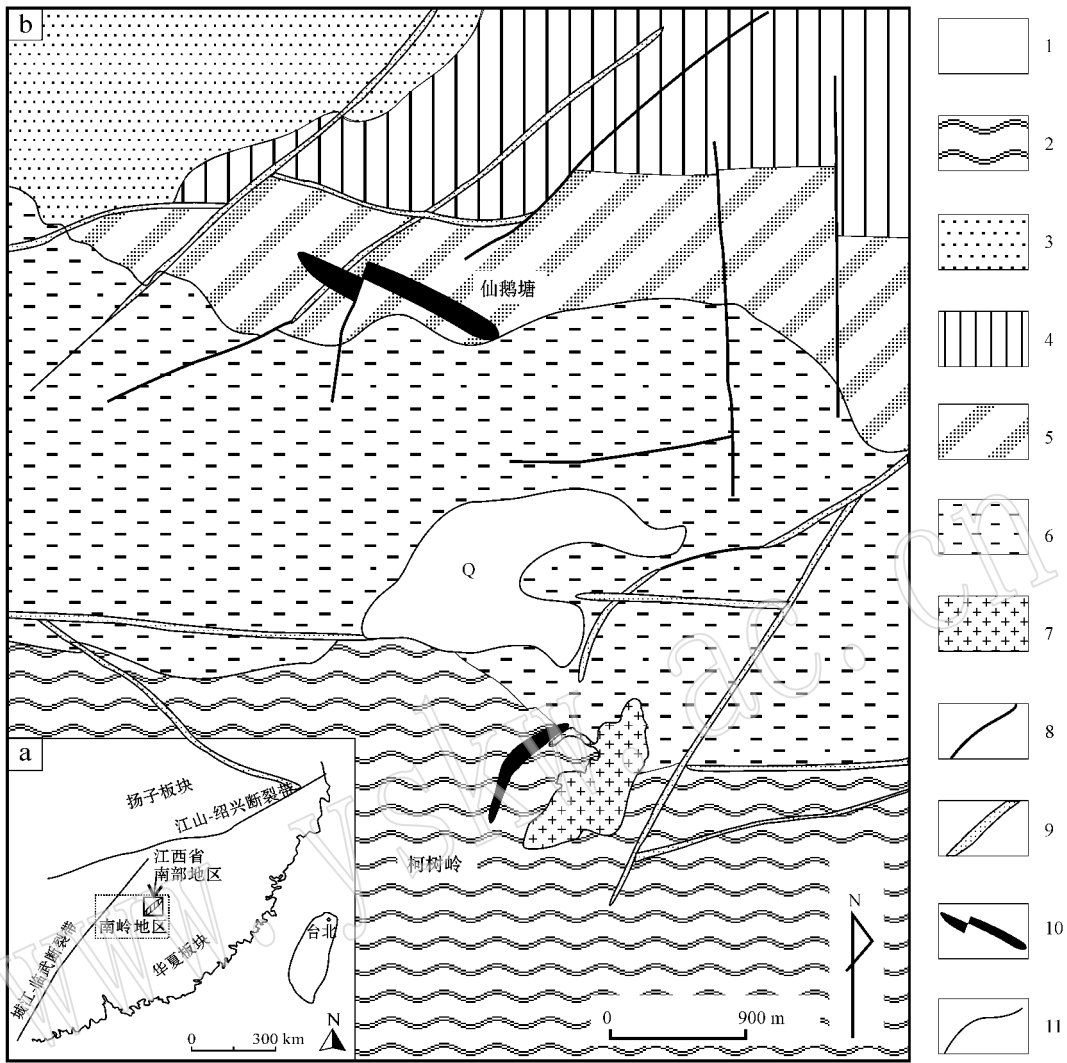


图 1 柯树岭-仙鹅塘钨锡多金属矿区地质简图

Fig. 1 Geological map of the Keshuling-Xian'etang tungsten ore district

1—第四系沉积物；2—上奥陶统黄竹洞组板岩、粉砂质板岩、砂砾岩；3—中寒武统高滩组长石石英砂岩、粉砂质板岩、硅质板岩；4—下寒武统牛角河组含炭板岩、硅质岩；5—上震旦统老虎塘组粉砂岩、含炭板岩、硅质板岩；6—上震旦统坝里组长石石英杂砂岩；7—柯树岭花岗岩；8—断层；9—硅化破碎带；10—矿脉；11—地层界线

1—Quaternary sediments；2—slates, silty slates of upper Ordovician Huangzhudong Formation；3—arkose-quartz sandstones, silty slates of middle Cambrian Gaotan Formation；4—carbon-bearing slates, silicalites of lower Cambrian Niujiache Formaiton；5—siltstone, carbon-bearing slates and slates of upper Sinian (Neoproterozoic) Laohutang Formation；6—arkose-quartz sandstones of upper Sinian (Neoproterozoic) Bali Formation；7—Keshuling granites；8—faults；9—silicified fracture zone；10—ore vein；11—geological boundary

区内岩浆岩分布广泛，加里东期—燕山期均有分布，并以酸性岩类为主，中、基性岩类次之。其中以燕山期岩浆活动最为强烈，岩体遍布全区，岩性主要为黑云母花岗岩、花岗斑岩、花岗闪长岩等，且多为复式岩体。

该区构造格架大体是在加里东褶皱基底之上经历了海西—印支旋回、燕山旋回，长期多阶段构造演

化形成了一系列的 NNE 向、EW 向的深大断裂，由此构成了区内相间出现的隆起带和拗陷带。区内主要的构造形迹有加里东期的褶皱构造，其轴向主要为 NW 向、NE 向，次为近 SN 向等；而燕山期则主要表现为断裂构造，以 NE 向、NNE 向为主，次为 NW 向及 EW 向。燕山期 NE 向的 3 条深大断裂有万安—遂川、兴国—池江、宁都—定南断裂，EW 向 3 条深大

断裂为兴国-石城、大余-会昌、龙南-寻乌断裂。

## 2 柯树岭-仙鹅塘钨锡矿床地质特征

柯树岭-仙鹅塘矿床位于江西省崇义县城西南约16 km处,属崇义县关田乡管辖,地理坐标东经 $114^{\circ}09'00''\sim 114^{\circ}12'00''$ ,北纬 $25^{\circ}36'30''\sim 25^{\circ}39'45''$ ,矿区面积约42 km<sup>2</sup>。如图1b所示,矿区内出露震旦系、寒武系和奥陶系等基底碎屑岩系,沿沟谷、低洼处有少量第四系零星分布。震旦系仅出露上统,分布于工作区中部,与其他地层呈断层接触。根据岩性组合特征,震旦系又分为坝里组长石石英杂砂岩和老虎塘组杂砂岩、砂岩与板岩互层。寒武系主要分布于矿区北部,出露的地层有下统牛角河组杂砂岩与板岩互层和中统高滩组杂砂岩与板岩互层。奥陶系主要分布在矿区的南部,区内仅出露上统黄竹洞组板岩夹粉砂岩、杂砂岩、砂砾岩。本区第四系砾、砂、亚砂土和亚粘土呈冲积层和残坡积层分布于盆地及其边缘、沟、谷等相对低洼处。

矿区内的褶皱构造主要为关田背斜,东西向展布,在矿区内出露其北翼的一部分,即矿区南部的奥陶系为该背斜的北翼的组成部分。该背斜轴长大于24 km,走向近东西,向东倾伏,倾角 $50^{\circ}$ 左右,轴面近于直立,两翼大致对称,夹角大于 $70^{\circ}$ ,属宽缓直立倾伏背斜。本区断裂构造比较发育,成矿裂隙也很复杂。

柯树岭岩体出露于南部的柯树岭矿区(图1b),呈近北东向长条形产出,出露面积0.39 km<sup>2</sup>,侵入上震旦统坝里组及上奥陶统黄竹洞组,岩石类型主要为中细粒黑云母花岗岩。

矿体位于柯树岭岩体的西侧,赋存在奥陶系变质岩中,分区成组平行密集产出,主要矿化面积0.5 km<sup>2</sup>,分布大小石英脉54条,其中具有工业价值的13条,矿脉呈北东、北北东走向,倾向南东,倾角 $60^{\circ}\sim 65^{\circ}$ ,矿脉长100~300 m,脉幅地表一般0.05~0.25 m,矿化深度350~450 m,平均品位WO<sub>3</sub> 0.769%、Sn 1.405%<sup>①</sup>。柯树岭区段矿体脉幅往深部逐渐变大,地表400~450 m标高0.05~0.25 m,至200 m标高0.50~0.80 m,至160 m标高及以下品位最富,可形成大小1 m左右见方钨锡矿砂包。矿区经数十年开采,采出的钨锡精矿约2万吨<sup>①</sup>。

主要金属矿物有黑钨矿、锡石、毒砂、闪锌矿,伴

生黄铜矿、方铅矿、黄铁矿,脉石矿物有石英、黄玉、萤石、方解石等。矿石结构最普遍的有交代结构、交代残留结构、乳滴状交代结构,其次是半自形粒状-交代结构和嵌晶结构。矿石构造常见的有致密块状结构,少量的线状-条带状构造,角砾状、扁豆状构造和晶洞构造。

## 3 分析技术和实验方法

### 3.1 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析

中细粒黑云母花岗岩(KSL-2)采自柯树岭矿区的钻孔中。手标本灰白色微泛肉红色,块状、等粒,斜长石半自形板状,含少量黑云母。显微镜下主要矿物为石英(30%~40%)、碱性长石(20%~30%)、斜长石(15%~20%)和黑云母(<5%)。副矿物有锆石、磷灰石、金红石、锡石、独居石、钛铁矿、榍石、萤石等。斜长石自形板状,具有聚片双晶,有的具有环带结构,碱性长石主要为富钾长石,具有卡式双晶;黑云母片状,褐色有时带绿色,一组极完全解理。样品不含角闪石和白云母。

样品经人工破碎后,按常规重力和磁选分选出锆石,在双目镜下挑选出锆石颗粒,并和标样一起置于环氧树脂做成样品靶,将靶上锆石磨至一半使锆石内部暴露,接着进行锆石透射光、反射光、阴极发光的照相和分析;抛光、清洗、镀金,然后进行SHRIMP定年分析。锆石分选工作在廊坊选矿实验室完成,其他工作在中国地质科学院北京离子探针中心完成。

高分辨率、高灵敏度离子探针质谱计(SHRIMP)锆石原位微区年龄测定中,一次离子流强度约7.5 nA,加速电压约10 kV,样品靶上的离子束斑直径约25~30 μm,质量分辨率约5 000(1%峰高)。所用的标准锆石是SL13和TEM,前者用于校正U含量,后者用于校正年龄(标准值分别为 $238\times 10^{-6}$ 和417 Ma)。由于是年轻样品(新元古代以来的),需要使用<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U年龄,在每测定3个未知样品之间插入1个标准锆石的测定。有关SHRIMP年龄测定的原理和流程已有相关文献予以介绍(Compston *et al.*, 1984, 1992; Cloué-Long *et al.*, 1995; Compston, 1999; Lance *et al.*, 2003a, 2003b; Williams *et al.*, 1984, 1985, 1996; Williams, 1998)北京离子

① 江西省地质矿产勘查开发局. 江西省崇义县仙鹅塘钨锡矿普查工作设计(2004~2005).

探针中心用 SHRIMP II 进行锆石原位微区测定的流程及常用实验参数详见宋彪等(2002, 2006) 数据处理采用 Ludwig SQUID 1.02 及 ISOPLOT 3.00 (Ludwig, 2002, 2003), 普通铅一般根据实测<sup>204</sup>Pb 进行校正。有关数据处理的细节, 可参考 Nutman 等(2001), 单次测量的数据点的误差均为 1σ, 采用 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄, 其加权平均值具 95% 的置信度。

### 3.2 主量、微量、稀土元素分析

将新鲜岩石碎成 200 目以下的粉末, 主量、微量、稀土元素在国家地质实验测试中心完成。除 FeO 以外的其他主量元素测试称取样品 0.500 0 g, 用无水四硼酸锂和硝酸铵为氧化剂, 于 1 200℃ 左右熔融制成玻璃片, 使用 X 荧光光谱仪(XRF)测定, 选用不同基体和不同含量的国家一级地球化学标准物质进行测定, 此方法精密度 RSD < 2% ~ 8%, 检测下限为 0.01%。测定 FeO 时, 称取试样 0.100 0 ~ 0.500 0 g (称样量视样品的氧化亚铁含量定) 于聚四氟坩埚中, 加入氢氟酸和硫酸分解样品, 重铬酸钾标准溶液滴定 FeO 含量, 此方法精密度 RSD < 10%, 检测下限为 0.05%。用所测 TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 FeO 含量计算 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量, 公式为:  $w(\text{Fe}_2\text{O}_3) = w(\text{TFe}_2\text{O}_3) - w(\text{FeO}) \times 1.11134$ 。

测定包含稀土元素在内的微量元素时, 称取试样 0.025 0 g 于封闭溶样器的 Teflon 内罐中, 加入 HF、HNO<sub>3</sub> 装入钢套中, 于 190℃ 保温 24 h, 取出冷却后, 在电热板上蒸干, 加入 HNO<sub>3</sub> 再次封闭溶样 3 h, 溶液转入洁净塑料瓶中, 使用热电公司电感耦合等离子质谱(ICP-MS)测定。选用不同基体和不同含量的国家一级地球化学标准物质进行测定, 其方法精密度 RSD < 2% ~ 10%, 检测下限为 0.05 × 10<sup>-6</sup>。

### 3.3 锆石 Hf 同位素分析

在进行 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年的原位置进行 Lu-Hf 同位素分析, 在中国地质科学院矿产资源研究所配有 Newwave UP213nm 激光剥蚀系统的 Neptune 多接受电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS) 上进行。其中 Neptune 型 MC-ICPMS 仪器的基本情况在相关文献中做过详细报道(Xu et al., 2004), MC-ICPMS 的 Lu-Hf 同位素分析采用 Wu 等(2006) 介绍的方法与步骤, 激光剥蚀的斑束依据锆石大小采用直径为 40 μm 或 55 μm, 频率为 20 Hz, 采样方式为单点剥蚀, 以 He 和 Ar 的混和气体作为剥蚀物质的载气, 测试过程中以国际锆石标准 GJ1 为参考物质(Elhoulou et al., 2006), 分析方法详见侯可军等(2007)。<sup>176</sup>Hf 有两个同质异位素 <sup>176</sup>Lu 和 <sup>176</sup>Yb, 其中 <sup>176</sup>Lu 对 <sup>176</sup>Hf 的干扰采用 <sup>176</sup>Lu/<sup>175</sup>Lu = 0.026 58 进行校正, 并假设 Lu 的分馏与 Hf 的分馏情形相同; <sup>176</sup>Yb 对 <sup>176</sup>Hf 的干扰采用实测 Yb 的分馏系数校正, 并假设 <sup>176</sup>Yb/<sup>173</sup>Yb = 0.796 218 (Chu et al., 2002)。

## 4 分析结果

### 4.1 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析结果

样品 KSL-2 共测定了 17 个单颗粒锆石, 共 19 个测点(图 2、表 1)。测点 1.1、13.1 和 17.1 的 Th/U 比值 > 0.4 (表 1), 这 3 颗锆石环带结构清晰, 裂纹不发育, 显示出岩浆成因锆石的特征(Rubatto and Gebauer, 2000; Rubatto and Williams, 2000; Rubatto, 2002)。其他测点的 Th/U 比值为 0.21 ~ 0.01, 且大多数 < 0.1 (表 1), 锆石具有浑圆状的核心, 具有明显的核-幔分界, 且外壳与其内部的生长形状不连续(图 2), 是老核新壳的结构, 暗示后期岩

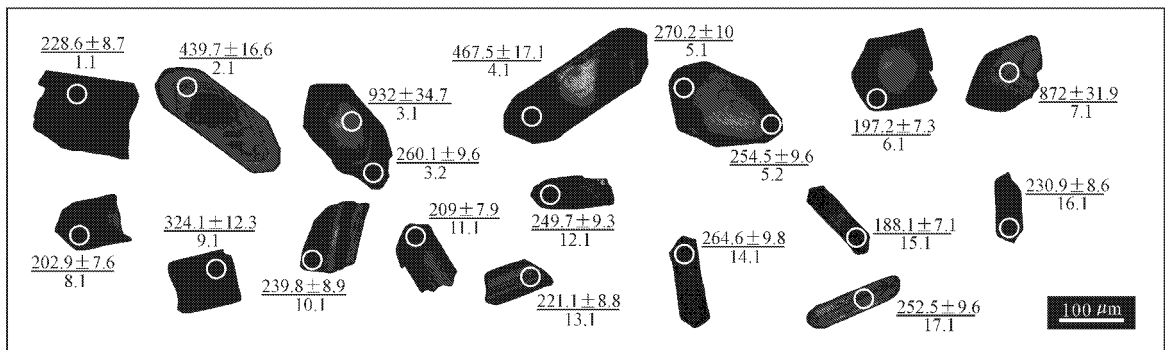


图 2 柯树岭花岗岩的锆石阴极发光图像

Fig. 2 Zircon Cathodoluminescence images of Keshuling granites

表 1 柯树岭花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素定年结果

Table 1 Results of SHRIMP zircon U-Pb dating of Keshuling granites

| 序号 | 点号         | $\tau_{\text{Pb}}/10^{-6}$ |     |                     |      | $^{206}\text{Pb}_c/\%$ | $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ |        | $^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ |        | $^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ |        | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$<br>$\pm 1\sigma$ (Ma) |
|----|------------|----------------------------|-----|---------------------|------|------------------------|---------------------------------------|--------|------------------------------------|--------|------------------------------------|--------|--------------------------------------------------------|
|    |            | U                          | Th  | $^{206}\text{Pb}^*$ | Th/U |                        | 测值                                    | 相对误差/% | 测值                                 | 相对误差/% | 测值                                 | 相对误差/% |                                                        |
| 1  | KSL-2-1.1  | 686                        | 612 | 21.6                | 0.92 | 1.49                   | 0.056 4                               | 8.2    | 0.28                               | 9.1    | 0.036 1                            | 3.9    | 228.6 ± 8.7                                            |
| 2  | KSL-2-2.1  | 214                        | 125 | 13.2                | 0.60 | 1.39                   | 0.058 6                               | 9.1    | 0.57                               | 9.9    | 0.070 6                            | 3.9    | 439.7 ± 16.6                                           |
| 3  | KSL-2-3.1  | 304                        | 132 | 40.9                | 0.45 | 0.60                   | 0.070 6                               | 2.1    | 1.51                               | 4.5    | 0.155 5                            | 4.0    | 932.0 ± 34.7                                           |
| 4  | KSL-2-3.2  | 10 122                     | 192 | 359.9               | 0.02 | 0.54                   | 0.053 8                               | 1.0    | 0.31                               | 3.9    | 0.041 2                            | 3.8    | 260.1 ± 9.6                                            |
| 5  | KSL-2-4.1  | 2 103                      | 418 | 136.1               | 0.21 | 0.19                   | 0.055 6                               | 1.0    | 0.58                               | 3.9    | 0.075 2                            | 3.8    | 467.5 ± 17.1                                           |
| 6  | KSL-2-5.1  | 8 573                      | 246 | 317.2               | 0.03 | 0.60                   | 0.054 2                               | 1.4    | 0.32                               | 4.0    | 0.042 8                            | 3.8    | 270.2 ± 10.0                                           |
| 7  | KSL-2-5.2  | 720                        | 40  | 25.2                | 0.06 | 1.05                   | 0.048 1                               | 5.1    | 0.27                               | 6.4    | 0.040 3                            | 3.8    | 254.5 ± 9.6                                            |
| 8  | KSL-2-6.1  | 21 268                     | 590 | 569.0               | 0.03 | 0.25                   | 0.051 7                               | 1.2    | 0.22                               | 4.0    | 0.031 1                            | 3.8    | 197.2 ± 7.3                                            |
| 9  | KSL-2-7.1  | 572                        | 299 | 71.4                | 0.54 | 0.32                   | 0.075 5                               | 1.4    | 1.51                               | 4.2    | 0.144 8                            | 3.9    | 872.0 ± 31.9                                           |
| 10 | KSL-2-8.1  | 14 214                     | 200 | 391.5               | 0.01 | 0.29                   | 0.052 1                               | 0.9    | 0.23                               | 3.9    | 0.032 0                            | 3.8    | 202.9 ± 7.6                                            |
| 11 | KSL-2-9.1  | 2 024                      | 117 | 90.0                | 0.06 | 0.37                   | 0.053 2                               | 1.5    | 0.38                               | 4.2    | 0.051 6                            | 3.9    | 324.1 ± 12.3                                           |
| 12 | KSL-2-10.1 | 3 780                      | 383 | 123.4               | 0.10 | 0.31                   | 0.050 2                               | 1.6    | 0.26                               | 4.1    | 0.037 9                            | 3.8    | 239.8 ± 8.9                                            |
| 13 | KSL-2-11.1 | 9 434                      | 279 | 268.8               | 0.03 | 0.62                   | 0.050 4                               | 1.2    | 0.23                               | 4.0    | 0.033 0                            | 3.8    | 209.0 ± 7.9                                            |
| 14 | KSL-2-12.1 | 9 777                      | 202 | 334.5               | 0.02 | 0.80                   | 0.051 3                               | 1.8    | 0.28                               | 4.2    | 0.039 5                            | 3.8    | 249.7 ± 9.3                                            |
| 15 | KSL-2-13.1 | 709                        | 286 | 21.6                | 0.42 | 1.46                   | 0.052 9                               | 6.4    | 0.25                               | 7.6    | 0.034 9                            | 4.1    | 221.1 ± 8.8                                            |
| 16 | KSL-2-14.1 | 6 741                      | 241 | 243.4               | 0.04 | 0.30                   | 0.050 1                               | 1.2    | 0.29                               | 4.0    | 0.041 9                            | 3.8    | 264.6 ± 9.8                                            |
| 17 | KSL-2-15.1 | 29 011                     | 318 | 755.1               | 0.01 | 2.29                   | 0.058 7                               | 3.2    | 0.24                               | 5.0    | 0.029 6                            | 3.8    | 188.1 ± 7.1                                            |
| 18 | KSL-2-16.1 | 15 244                     | 291 | 479.3               | 0.02 | 0.34                   | 0.051 2                               | 1.0    | 0.26                               | 3.9    | 0.036 5                            | 3.8    | 230.9 ± 8.6                                            |
| 19 | KSL-2-17.1 | 623                        | 324 | 21.7                | 0.54 | 1.48                   | 0.046 5                               | 10.2   | 0.26                               | 10.9   | 0.040 0                            | 3.9    | 252.5 ± 9.6                                            |

$\text{Pb}_c$  和  $\text{Pb}^*$  分别表示普通铅和放射性铅,应用实测 $^{204}\text{Pb}$ 校正锆石中的普通铅,采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。

浆包裹早期核心,并环绕核心生长。测点 3.1 年龄为  $932.0 \pm 34.7$  Ma, 7.1 为  $872.0 \pm 31.9$  Ma, 该两粒锆石的打点位置都是锆石的核心部位,可能是深部岩浆上升过程中捕获的残留锆石。测点 2.1 的年龄为  $439.7 \pm 16.6$  Ma, 测点 4.1 为  $467.5 \pm 17.1$  Ma, 点 9.1 为  $324.1 \pm 12.3$  Ma, 从测点位置来看可能是核部与边部的混合年龄。上述 5 个年龄数据没有参与最终的加权平均年龄计算。其余 14 个点的年龄可明显分成两组(图 3): 其中 8 个测点(包括点 3.2、5.1、6.1、10.1、12.1、14.1、16.1、17.1)获得  $251.5 \pm 6.6$  Ma (MSWD = 2.0) 的加权平均年龄, 6 个测点(包括点 1.1、6.1、8.1、11.1、13.1、15.1) 获得  $202 \pm 15$  Ma (MSWD = 2.5) 的加权平均年龄。从图 2 来看, 这些锆石颗粒具有同样的 CL 图像特征而不容易区分。但是这两组年龄也不是同一岩浆过程不同结晶阶段的产物, 因为岩浆的冷凝凝固过程时间最多也就 1 Ma, 岩浆不可能结晶约 50 Ma 那么长的时间。因此, 这两个年龄暗示该岩体在印支期至少经历了两次岩浆活动。

#### 4.2 主量、微量、稀土元素分析结果

岩石化学成分见表 2。柯树岭花岗岩的  $\text{SiO}_2$  含量为 73.51% ~ 74.23%, 全碱含量( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ )

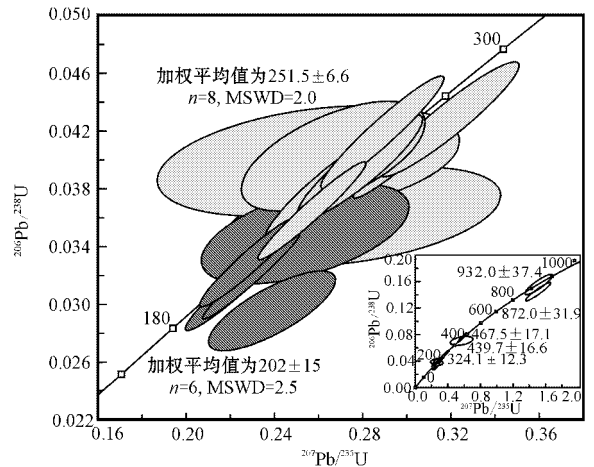


图 3 柯树岭花岗岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图  
Fig. 3 Zircon  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  concordia diagram of Keshuling granites

为 6.58% ~ 7.77%,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.05 \sim 1.98$ ,  $\text{A}/\text{CNK} = 1.17 \sim 1.60$  ( $> 1.1$ ),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量为 0.01% ~ 0.07%,  $\text{FeO}$  含量为 0.49% ~ 0.95%。岩体属过铝质高钾钙碱性花岗岩类(图 4, 图 5)。柯树岭花岗岩  $\Sigma\text{REE}$  含量  $43.98 \times 10^{-6} \sim 80.16 \times 10^{-6}$ ,  $\delta\text{Eu} = 0.09 \sim 0.20$  ( $\text{La}/\text{Yb}$ ) $_N = 2.53 \sim 7.80$ 。柯树岭花岗

表 2 柯树岭花岗岩的主要元素(  $w_B/\%$  )和微量元素(  $w_B/10^{-6}$  )化学成分  
Table 2 Major(  $w_B/\%$  ) and trace(  $w_B/10^{-6}$  ) element compositions of Keshuling granites

| 样品号   | SiO <sub>2</sub>                   | TiO <sub>2</sub>                   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO    | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO   | MgO   | MnO   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | LOI   | Total                |
|-------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|--------|-------------------|------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------------------------------|-------|----------------------|
| KSL02 | 74.23                              | 0.07                               | 14.52                          | 0.65   | 3.3               | 4.47             | 0.01                           | 0.49  | 0.2   | 0.03  | 0.21                          | 1.32  | 99.5                 |
| KSL03 | 73.51                              | 0.16                               | 14.89                          | 0.51   | 2.21              | 4.37             | 0.17                           | 0.95  | 0.42  | 0.09  | 0.27                          | 1.87  | 99.42                |
| 样品号   | K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O | A/CNK                          | Li     | Be                | Ga               | Rb                             | Sr    | Zr    | Nb    | Cs                            | Ba    | Hf                   |
| KSL02 | 7.77                               | 1.35                               | 1.27                           | 202.69 | 14.35             | 23.9             | 505.4                          | 56.26 | 49.73 | 20    | 34.13                         | 72.28 | 1.96                 |
| KSL03 | 6.58                               | 1.98                               | 1.6                            | 140.44 | 5.0               | 30.34            | 591.35                         | 37.95 | 81.45 | 31.22 | 48.21                         | 56.6  | 3.29                 |
| 样品号   | Ta                                 | Pb                                 | Bi                             | Th     | U                 | Y                | Rb/Sr                          | Nb/Ta | Hf/Zr | La    | Ce                            | Pr    | Nd                   |
| KSL02 | 4.13                               | 81.48                              | 4.06                           | 6.26   | 23.25             | 11.29            | 8.98                           | 4.84  | 0.04  | 8.26  | 17.44                         | 1.98  | 7.62                 |
| KSL03 | 9.8                                | 25.81                              | 5.55                           | 11.02  | 47.67             | 31.54            | 15.58                          | 3.19  | 0.04  | 13.17 | 28.37                         | 3.36  | 13.09                |
| 样品号   | Sm                                 | Eu                                 | Gd                             | Tb     | Dy                | Ho               | Er                             | Tm    | Yb    | Lu    | ΣREE                          | δEu   | (La/Yb) <sub>N</sub> |
| KSL02 | 1.95                               | 0.13                               | 1.97                           | 0.33   | 2                 | 0.37             | 0.93                           | 0.13  | 0.76  | 0.11  | 43.98                         | 0.2   | 7.8                  |
| KSL03 | 3.28                               | 0.1                                | 3.67                           | 0.76   | 5.13              | 1.11             | 3.25                           | 0.52  | 3.73  | 0.62  | 80.16                         | 0.09  | 2.53                 |

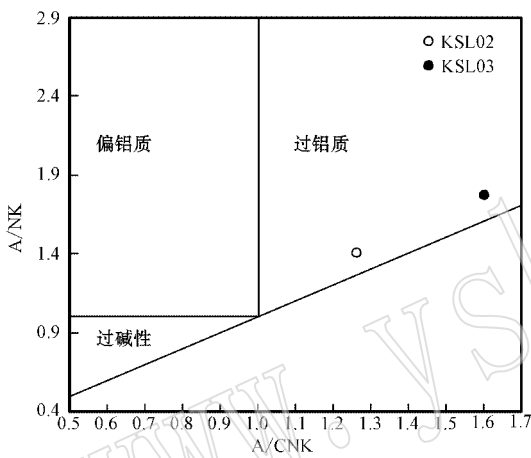


图 4 柯树岭花岗岩的 A/NK - A/CNK 图解  
Fig. 4 A/NK versus A/CNK diagram of Keshuling granites

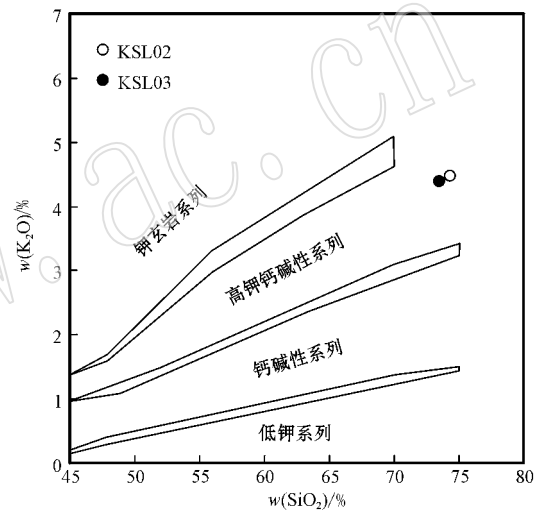


图 5 柯树岭花岗岩的 K<sub>2</sub>O - SiO<sub>2</sub> 图解  
(Morrison, 1980)

Fig. 5 SiO<sub>2</sub> versus K<sub>2</sub>O diagram of Keshuling granites  
(after Morrison, 1980)

岩具有强烈的 Eu 负异常,呈“海鸥式”分布(图 6),有明显 Sr、Eu、Ti 的负异常(图 7),表明长石类矿物、钛铁矿发生了结晶分离作用。

### 4.3 锆石 Hf 同位素分析结果

柯树岭花岗岩的锆石 Hf 同位素分析结果见表 3。该岩体中锆石的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.000373\sim 0.003818$ ,  $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}=-0.99\sim -0.88$ , 低于上地壳( $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0093$ ,  $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}=-0.72$ ) 的值(Vervoort and Patchett, 1996)。锆石的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值为  $0.281819\sim 0.282600$ , 其  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为负值( $-14.5\sim -1.3$ ), Hf 两阶段模式年龄 =  $3.21\sim 2.55$  Ga, 表明该岩石主要来源于太古宙地壳岩石的部分熔融。但是, 点 2.1 和点 3.1 其对应的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为正值( $+2.4$  和  $+3.0$ )。

## 5 讨论

### 5.1 柯树岭钨锡矿床成岩成矿时代

柯树岭岩体表现为钨锡矿化, 并伴有少量铋钼矿化, 是柯树岭钨锡多金属矿床的成矿母岩<sup>①</sup>。刘善宝等(2008)测得柯树岭矿区石英脉中白云母的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  坪年龄是  $158.8\pm 1.2$  Ma, 表明成矿年龄为燕山期晚侏罗世。但本次 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果表明该岩体是印支期( $251.5\pm 6.6$  Ma 和  $202\pm 15$  Ma) 的产物。推断柯树岭岩体是一个复式岩

① 江西省地质矿产勘查开发局. 江西省崇义县仙鹅塘钨锡矿普查工作设计(2004~2005).

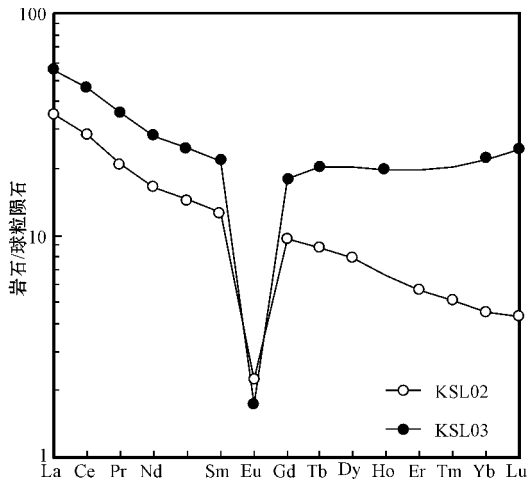


图 6 柯树岭花岗岩的稀土元素球粒陨石标准化分布型式图 (球粒陨石数据应用 Sun 和 McDonough, 1989)  
Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of Keshuling granites (after Sun and McDonough, 1989)

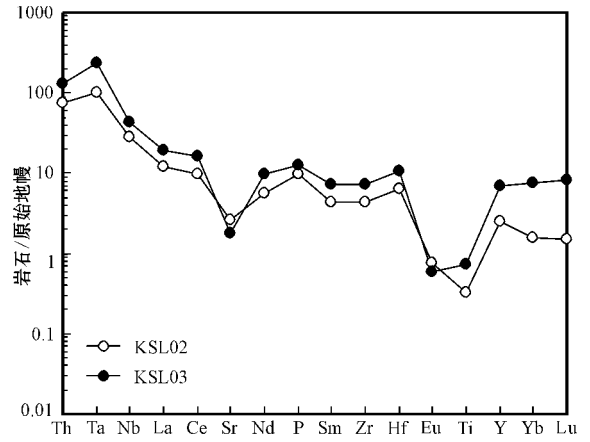


图 7 柯树岭花岗岩的微量元素原始地幔标准化分布型式图(原始地幔数据应用 Sun 和 McDonough, 1989)  
Fig. 7 Primitive mantle-normalized trace element spidergram of Keshuling granites (after Sun and McDonough, 1989)

表 3 柯树岭花岗岩的锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon Hf isotopic compositions of Keshuling granites

| 序号 | 点号         | 年龄 /Ma | <sup>176</sup> Yb/ <sup>177</sup> Hf | <sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf | <sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf | 2σ        | <sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf <sub>i</sub> | εHf(0) | εHf(t) | T <sub>DM1</sub> /Ma | T <sub>DM2</sub> /Ma | f <sub>Lu/Hf</sub> |
|----|------------|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------|--------|--------|----------------------|----------------------|--------------------|
| 01 | KSL-2-1.1  | 229    | 0.064 188                            | 0.001 314                            | 0.282 600                            | 0.000 032 | 0.282 594                                         | -6.1   | -1.3   | 932                  | 3 211                | -0.96              |
| 02 | KSL-2-2.1  | 440    | 0.031 689                            | 0.000 803                            | 0.282 589                            | 0.000 028 | 0.282 582                                         | -6.5   | +3.0   | 935                  | 2 734                | -0.98              |
| 03 | KSL-2-3.1  | 932    | 0.018 052                            | 0.000 430                            | 0.282 264                            | 0.000 019 | 0.282 257                                         | -18.0  | +2.4   | 1 374                | 2 561                | -0.99              |
| 04 | KSL-2-3.2  | 260    | 0.069 480                            | 0.001 840                            | 0.282 293                            | 0.000 017 | 0.282 284                                         | -16.9  | -11.5  | 1 385                | 2 829                | -0.94              |
| 05 | KSL-2-4.1  | 468    | 0.088 042                            | 0.001 967                            | 0.282 420                            | 0.000 022 | 0.282 403                                         | -12.4  | -2.8   | 1 207                | 2 807                | -0.94              |
| 06 | KSL-2-5.1  | 270    | 0.053 754                            | 0.001 166                            | 0.282 284                            | 0.000 017 | 0.282 278                                         | -17.3  | -11.6  | 1 374                | 2 658                | -0.96              |
| 07 | KSL-2-5.2  | 255    | 0.041 021                            | 0.000 947                            | 0.282 306                            | 0.000 028 | 0.282 302                                         | -16.5  | -11.0  | 1 334                | 2 848                | -0.97              |
| 08 | KSL-2-6.1  | 197    | 0.099 002                            | 0.002 667                            | 0.282 320                            | 0.000 025 | 0.282 310                                         | -16.0  | -12.0  | 1 378                | 2 642                | -0.92              |
| 09 | KSL-2-7.1  | 872    | 0.015 826                            | 0.000 373                            | 0.281 819                            | 0.000 029 | 0.281 813                                         | -33.7  | -14.7  | 1 981                | 2 678                | -0.99              |
| 10 | KSL-2-8.1  | 203    | 0.106 343                            | 0.002 586                            | 0.282 343                            | 0.000 021 | 0.282 333                                         | -15.2  | -11.1  | 1 341                | 3 072                | -0.92              |
| 11 | KSL-2-9.1  | 324    | 0.078 386                            | 0.001 909                            | 0.282 284                            | 0.000 023 | 0.282 272                                         | -17.3  | -10.6  | 1 401                | 2 719                | -0.94              |
| 12 | KSL-2-10.1 | 240    | 0.075 317                            | 0.002 000                            | 0.282 500                            | 0.000 031 | 0.282 491                                         | -9.6   | -4.7   | 1 094                | 2 854                | -0.94              |
| 13 | KSL-2-11.1 | 209    | 0.095 438                            | 0.002 473                            | 0.282 274                            | 0.000 025 | 0.282 265                                         | -17.6  | -13.4  | 1 437                | 2 703                | -0.93              |
| 14 | KSL-2-12.1 | 250    | 0.081 579                            | 0.002 266                            | 0.282 261                            | 0.000 024 | 0.282 250                                         | -18.1  | -13.0  | 1 448                | 2 558                | -0.93              |
| 15 | KSL-2-13.1 | 221    | 0.039 722                            | 0.001 186                            | 0.282 445                            | 0.000 033 | 0.282 440                                         | -11.6  | -6.9   | 1 147                | 2 706                | -0.96              |
| 16 | KSL-2-14.1 | 265    | 0.110 083                            | 0.003 094                            | 0.282 213                            | 0.000 030 | 0.282 198                                         | -19.8  | -14.5  | 1 552                | 2 768                | -0.91              |
| 17 | KSL-2-15.1 | 188    | 0.129 218                            | 0.003 818                            | 0.282 327                            | 0.000 033 | 0.282 313                                         | -15.8  | -12.1  | 1 413                | 2 545                | -0.88              |
| 18 | KSL-2-16.1 | 231    | 0.107 113                            | 0.003 165                            | 0.282 379                            | 0.000 033 | 0.282 365                                         | -13.9  | -9.3   | 1 309                | 2 850                | -0.90              |
| 19 | KSL-2-17.1 | 253    | 0.085 431                            | 0.002 396                            | 0.282 288                            | 0.000 033 | 0.282 276                                         | -17.1  | -12.0  | 1 414                | 2 895                | -0.93              |

$\epsilon Hf(0) = [(^{176}Hf/^{177}Hf)_s / (^{176}Hf/^{177}Hf)_{CHUR} - 1] \times 10\,000$ ;  $\epsilon Hf(t) = \{ [(^{176}Hf/^{177}Hf)_s - (^{176}Lu/^{177}Hf)_s \times (e^{\lambda t} - 1)] / [ (^{176}Hf/^{177}Hf)_{CHUR} - (^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1 \} \times 10\,000$ ;  $T_{Hf1} = 1/\lambda \times \{ 1 + [ (^{176}Hf/^{177}Hf)_s - (^{176}Hf/^{177}Hf)_{DM} ] / [ (^{176}Lu/^{177}Hf)_s - (^{176}Lu/^{177}Hf)_{DM} ] \}$ ;  $T_{Hf2} = T_{Hf1} - (T_{Hf1} - t) [ (f_{CC} - f_S) / (f_{CC} - f_{DM}) ]$ ;  $f_{Lu/Hf} = ( (^{176}Lu/^{177}Hf)_s / (^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR} - 1 ) / [ (^{176}Lu/^{177}Hf)_s / (^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR} - 1 ]$  其中  $(^{176}Lu/^{177}Hf)_s$  和  $(^{176}Hf/^{177}Hf)_s$  为样品测定值  $(^{176}Lu/^{177}Hf)_{CHUR} = 0.0322$ ,  $(^{176}Hf/^{177}Hf)_{CHUR} = 0.282772$ ,  $(^{176}Lu/^{177}Hf)_{DM} = 0.0384$ ,  $(^{176}Hf/^{177}Hf)_{DM} = 0.28325$ ;  $f_{CC}$ ,  $f_S$ ,  $f_{DM}$  分别为大陆地壳、样品和亏损地幔的  $f_{Lu/Hf}$ ,  $t$  为样品形成时间,  $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} a^{-1}$ .



体,印支期和燕山期都有岩浆活动,但只在燕山期发生产成矿作用。但是,距柯树岭钨锡矿床北部 4 km~5 km 同为石英脉型钨锡矿的仙鹅塘钨锡矿床<sup>①</sup>(图 1)的成矿作用也发生在印支期,其含矿石英脉中的白云母 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 坪年龄成矿年龄为 231.4 ± 2.4 Ma(刘善宝等,2008)。而且,南岭地区印支-燕山期复式花岗岩体也有类似的成岩成矿年龄,例如湖南锡田锡多金属矿早期主体花岗岩形成于晚三叠世(228 Ma),晚期花岗岩为形成于晚侏罗世(155 Ma)(马铁球等,2005),成矿年龄为 157 Ma~156 Ma(马丽艳等,2008);湖南荷花坪锡多金属矿床早期含锡矽卡岩矿石形成于 224 Ma,晚期锡石-硫化物型矿石形成于 142 Ma 之后(蔡明海等,2006)。而且,野外也可见到石英脉型矿化直接与柯树岭岩体接触的现象,柯树岭岩体顶部云英岩化蚀变带也可见到辉钼矿、硫化物等矿化现象,因此,推断柯树岭钨锡矿床至少有两期成岩成矿作用,分别发生在印支期和燕山期。

### 5.2 柯树岭-仙鹅塘钨锡矿床岩浆源区特征及演化过程

柯树岭花岗岩的  $\Sigma$ REE 很低( $< 80.16 \times 10^{-6}$ ),轻重稀土元素之间的分馏不明显,具有 Eu 的极低负异常,并显示出“四分组效应”(tetrad effect)特点。稀土元素“四分组效应”指的是以 Nd/Pm、Gd/Ho/Er 为分界点,每 4 个元素为 1 组构成 4 条曲线,最初是由 Peppard 等(1969)在纯化学体系液-液(有机相 HCl、HBr、LiBr 水相)萃取时发现的。赵振华等(1992)发现华南稀有金属花岗岩具有稀土元素“四分组效应”(4 条上凸线)。具有这种特征的花岗岩和伟晶岩是花岗岩浆作用最晚阶段残余熔体结晶的产物,强烈的分离结晶作用可以导致挥发分 H<sub>2</sub>O、F、Cl、B、P 和碱金属 Na、K 及 REE、Nb、Ta、Zr、Be 等成矿元素在残余熔体中高度富集,为最终产生岩浆-热液共存过渡体系和流体/熔体相互作用以及稀有、稀土矿床的形成提供了必要的物质基础(Zhao *et al.*, 2002)。

柯树岭花岗岩的 Rb/Sr = 7.86~57.63,显著高于中国东部上地壳的平均值(0.31,高山等,1999),Nb/Ta = 1.43~4.84,明显低于地壳平均值(12.22,陈小明等,2002),暗示花岗质岩浆具有壳源的特征。绝大多数锆石的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为负值(-14.5~-1.3),

Hf 两阶段模式年龄为 3.21~2.55 Ga,表明源岩主要来源于中新太古代地壳物质的部分熔融。进一步利用 Al/(Mg+Fe)-Ca/(Mg+Fe)图解(图 8)判别华南地区印支期花岗岩主要来源于变质杂砂岩和变质泥岩的部分熔融,但也混有一些变质玄武岩和变质英云闪长岩。

虽然华南的过铝质花岗岩在岩相学和岩石化学上充分显示壳源(Sun *et al.*, 2005)的基本特点,而且在这些花岗岩体中很少见到地幔岩浆侵入作用的“暗色包体”或“基性岩脉”,故它们被认为是壳源重熔的产物。但是锆石的 CL 图像(图 2)和详细的 Hf 同位素分析表明,锆石颗粒内部包裹了老锆石,且新

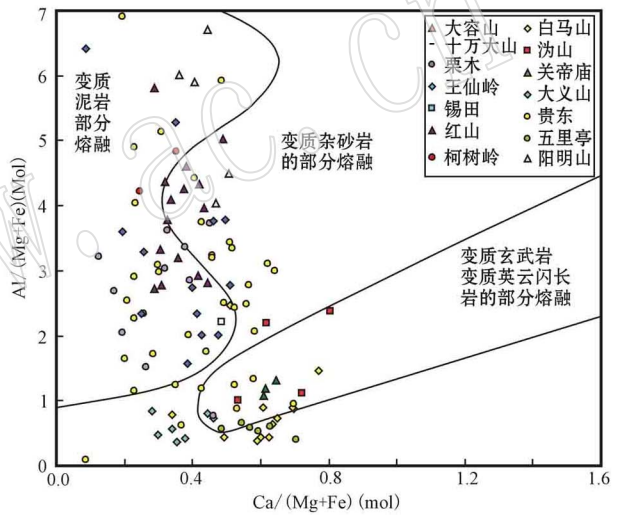


图 8 华南印支期花岗质岩石 Al/(Mg+Fe) - Ca/(Mg+Fe)图解(Altherr 等, 2000)

Fig. 8 Al/(Mg+Fe) versus Ca/(Mg+Fe) diagram of the Triassic representative granites (after Altherr *et al.*, 2000) 数据引自: 白马山(陈卫锋等, 2007), 浔山、关帝庙(王岳军等, 2005), 大义山(伍光英等, 2005), 贵东(李建红等, 2004), 五里亭(邱检生等, 2004), 阳明山(陈卫锋等, 2006), 大方山(祁昌实等, 2007), 栗木(林德松, 1985), 王仙岭(柏道远等, 2006), 锡田(马铁球等, 2005), 红山(赵蕾等, 2004)

Date sources: Baimashan (Chen Weifeng *et al.*, 2007), Weishan and Guandimiao (Wang Yuejun *et al.*, 2005), Dayishan (Wu Guangying *et al.*, 2005), Guidong (Li Jianhong *et al.*, 2004), Wuliting (Qiu Jiansheng *et al.*, 2004), Yangmingshan (Chen Weifeng *et al.*, 2006), Darongshan-Shiwandashan (Qi Changshi *et al.*, 2007), Limu (Lin Desong *et al.*, 1985), Wangxianling (Bai Daoyuan *et al.*, 2006), Xitian (Ma Tieqiu *et al.*, 2005), Hongshan (Zhao Lei *et al.*, 2004)

① 江西省地质矿产勘查开发局, 江西省崇义县仙鹅塘钨锡矿普查工作设计(2004~2005)。

形成的锆石显示出多阶段生长的环带,记录了岩浆形成的年代和成分信息。表3中点2.1和点3.1的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为正值(+2.4和+3.0),这两个点投在“亏损地幔”线和“球粒陨石”线之间(图9)。如图2所示,点3.1是锆石中包裹的核的年龄( $932.0 \pm 34.7 \text{ Ma}$ ),点2.1是核-幔混合年龄( $439.7 \pm 16.6 \text{ Ma}$ ),暗示印支期形成的锆石中包裹了来源于幔源岩浆的锆石。

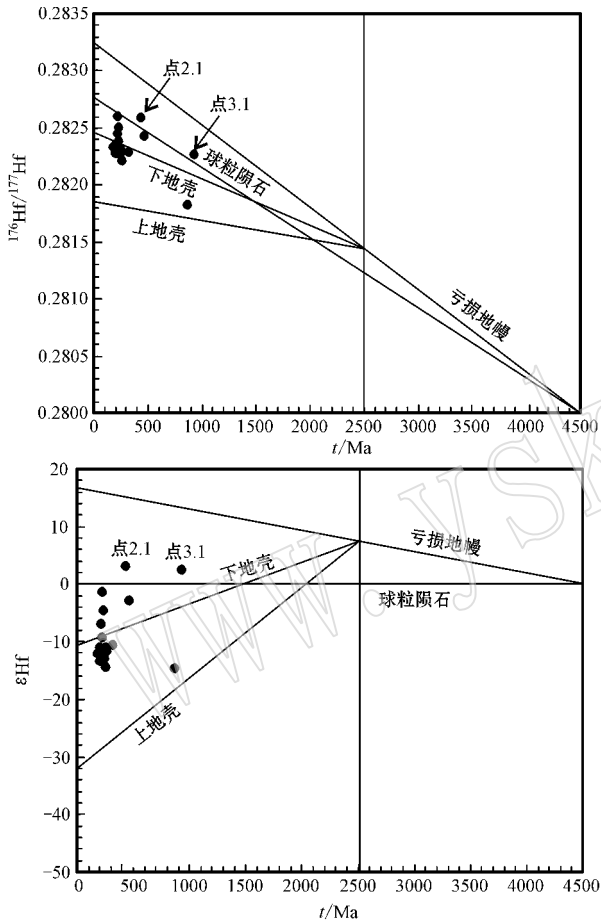


图9 柯树岭花岗岩的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} - t$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}} - t$ 图解

Fig. 9  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  versus  $t$  and  $\epsilon_{\text{Hf}}$  versus  $t$  diagrams of Keshuling granites

这两颗锆石具较高 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值有3种可能性:①该时期很可能存在幔源岩浆的底侵作用,为地壳物质的部分熔融提供了热量,不可避免地使得少量幔源岩浆加入到花岗质岩浆中去;②花岗质岩浆的源区主要以沉积物为主,但也夹杂一些玄武质火山岩,玄武质火山岩残留的锆石导致了部分锆石正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的存在;③地壳物质熔融形成花岗质岩浆,岩浆上

升侵位过程中混染了一些基性岩石,基性岩石中的锆石导致了正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的存在。 $\text{Hf}$ 的模式年龄为 $3.21 \sim 2.55 \text{ Ga}$ ,表明岩浆起源于中新太古界地壳,但锆石点2.1的U-Pb年龄为 $932 \pm 34.7 \text{ Ma}$ ,如果是①幔源岩浆的底侵作用,那么锆石的年龄应该与主体印支期花岗岩同期;如果是②残留的基性锆石,那么锆石的年龄应该与中新太古代基底同期。因此推断为第3种可能性,即起源于中新太古代沉积岩的熔融岩浆在上升过程中混染了基性岩石,因此导致了部分锆石正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的存在。

### 5.3 华南印支期花岗岩形成的地球动力学背景

华南印支运动可能始于中二叠世( $267 \sim 262 \text{ Ma}$ ) (Li *et al.*, 2006),华南(包括华夏和扬子)地块和印支板块拼合的峰期发生在 $258 \sim 243 \text{ Ma}$  (Lepvrier *et al.*, 1997; Nam, 1998; Nam *et al.*, 2001; Lan *et al.*, 2000a, 2000b; Carter *et al.*, 2001; Maluski *et al.*, 2001),这一碰撞不仅使得印支板块和华南地块之间发生碰撞 (Sun *et al.*, 2005),而且还使华南大陆与华北大陆碰撞对接形成秦岭造山带 (Carter *et al.*, 2001)。云开大山东麓的3条推覆构造带的形成于 $255 \sim 229 \text{ Ma}$ 期间 (邵建国等, 1995),扬子板块北缘安徽三界蓝片岩带形成于 $245 \text{ Ma}$  (李曙光等, 1993),秦岭-大别-苏鲁超高压变质带主要形成于 $240 \sim 220 \text{ Ma}$  (Li *et al.*, 1993; 刘福来等, 2004)均表明早中三叠世存在广泛的印支事件且陆壳叠置作用强烈。梁新权等(2005)对十万大山盆地的研究发现华南在早三叠世至中三叠世时期以挤压为主,晚三叠世开始进入伸展期。Patiao Dounce等(1990)研究显示地壳在加厚 $20 \sim 10 \text{ Ma}$ 的时间间隔内会发生热-应力的松弛作用,进入地壳伸展阶段,地壳减压熔融,从而形成花岗质岩浆。包括柯树岭在内的华南印支期花岗岩是于后碰撞或碰撞晚期在被动侵位机制为主和挤压应力松弛的间隙环境下侵位的,为加厚地壳局部熔融的产物。

## 6 结论

(1) 利用SHRIMP锆石U-Pb法,首次测得柯树岭花岗岩体为印支期的产物。 $251.5 \pm 6.6 \text{ Ma}$ 和 $202 \pm 15 \text{ Ma}$ 两个年龄表明该岩体在印支期至少有两次岩浆活动。

(2) 柯树岭花岗岩属过铝质高钾钙碱性花岗岩类,主要来源于中新太古代地壳物质的部分熔融,源

岩主要是沉积岩,但也夹杂了玄武质火山岩。熔融岩浆在上升过程中混染了基性岩石,因此导致了部分锆石正  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值的存在。

(3) 包括柯树岭在内的华南印支期花岗岩是于后碰撞或碰撞晚期在被动侵位机制为主和挤压应力松弛环境下侵位的,为加厚地壳局部熔融的产物。

致谢 中国地质科学院离子探针实验室王彦斌研究员在 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析过程中给予指导,中国地质科学院国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室侯可军在锆石 Hf 同位素分析过程中给予帮助,在此一并致谢!

## References

Altherr R, Holl A, Hegner E, *et al.* 2000. High-potassium, calc-alkaline plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany) [J]. *Lithos*, 50: 51~73.

Bai Daoyuan, Chen Jiancheng, Ma Tiejie, *et al.* 2006. Geochemical characteristics of Wangxianling granitic pluton and its constraints on Late Indosinian tectonic setting of Southeast Hunan [J]. *Geochimica*, 35(2): 113~125 (in Chinese with English abstract).

Bai Daoyuan, Jia Baohua, Li Jindong, *et al.* 2007a. Important significance of regional tectonic regime to metallogenic capacity of Indosinian and Early Yanshanian granites in southeastern Hunan: A case study of Qianlishan and Wangxianling pluton [J]. *Mineral Deposits*, 26(5): 487~500 (in Chinese with English abstract).

Bai Daoyuan, Jia Baohua, Ma Tiejie, *et al.* 2007c. Relationship of petrogeochemical characteristics to metallogenic capacity differences between Indosinian and Early Yanshanian granites in southeastern Hunan [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(5): 387~398 (in Chinese with English abstract).

Bai Daoyuan, Zhou Liang, Ma Tiejie, *et al.* 2007b. Genesis and tectonic setting of Indosinian granites in southeast Hunan [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(3): 197~212 (in Chinese with English abstract).

Cai Minghai, Chen Kaixu, Qu Wenjun, *et al.* 2006. Geological characteristics and Re-Os dating of molybdenites in Hehuaping tin-poly-metallic deposit, southern Hunan province [J]. *Mineral Deposits*, 25(3): 263~268 (in Chinese with English abstract).

Carter A, Roques D and Bristow C. 2001. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermo-tectonism (Indosinian orogeny) in Vietnam [J]. *Geology*, 29: 211~214.

Chen Weifeng, Chen Peirong, Huang Hongye, *et al.* 2007. Chronological and geochemical studies of granite and enclave in Baimashan pluton, Hunan, South China [J]. *Science in China (Series D)*, 50(11): 1606~1627.

Chen Weifeng, Chen Peirong, Zhou Xinmin, *et al.* 2006. Single-zircon La-ICP-MS U-Pb dating of the Yangmingshan granitic pluton in Hunan, South China and its petrogenetic study [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 1065~1077 (in Chinese with English abstract).

Chen Xiaoming, Wang Rucheng, Liu Changshi, *et al.* 2002. Isotopic dating and genesis for Fogang biotite granites of Conghua area, Guangdong province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 8(3): 293~307 (in Chinese with English abstract).

Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, *et al.* 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: an evaluation of isobaric interference corrections [J]. *J. Anal. At. Spectrom.* 17: 1567~1574.

Claué-Long J C, Compston W, Roberts J, *et al.* 1995. Two carboniferous ages: A comparison of SHRIMP zircon dating with conventional zircon ages and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  analysis [A]. *Geochronology time scales and global stratigraphic correlation* [C]. SEPM Special Publication, 3~21.

Compston W. 1999. Geological age by instrumental analysis: The 29th Halmund Lecture [J]. *Mineral Mag*, 63: 297~311.

Compston W, Williams I S and Meyer C. 1984. U-Pb geochronology of zircons from lunar breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe [J]. *J. Geophys. Res.*, 89 (Supp.): B325~B334.

Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, *et al.* 1992. Zircon U-Pb ages for the early Cambrian time scale [J]. *J. Geol. Soc.*, 149: 171~184.

Elhoul S, Belousova E, Griffin W L, *et al.* 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta (Supp.)*, A158.

Gao Shan, Luo Tingchuan, Zhang Benren, *et al.* 1999. Structure and composition of the continental crust in East China [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 42(2): 129~140.

He Zhenyu, Xu Xisheng and Niu Yaoling. 2010. Petrogenesis and tectonic significance of a Mesozoic granite-syenite-gabbro association from inland South China [J]. *Lithos*, 119: 621~641.

Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595~2604 (in Chinese with English abstract).

Jahn B M, Zhou X H and Li J L. 1990. Formation and tectonic evolution of southeastern China and Taiwan: Isotopic and geochemical constraints [J]. *Tectonophysics*, 183: 145~160.

Lan C Y, Chung S L, Long T V, *et al.* 2000b. Geochemical and Sr-Nd isotopic constraints from the Kontum massif, central Vietnam on the crustal evolution of the Indochina block [J]. *Precambrian Research*, 122: 7~27.

Lan C Y, Chung S L, Shen J J S, *et al.* 2000a. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of granitic rocks from northern Vietnam [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 18: 267~280.

Lance P Black, Sandra L Kamo, Charlotte M Allen, *et al.* 2003a. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb

- geochronology [ J ]. *Chem. Geol.* , 200 : 155~170.
- Lance P Black , Sandra L Kamo , Ian S Williams , *et al.* 2003b. The application of SHRIMP to Phanerozoic geochronology : A critical appraisal of four zircon standards [ J ]. *Chem. Geol.* , 200 : 171~188.
- Lepvrier C , Maluski H , van Vuong N , *et al.* 1997. Indosinian NW-trending shear zones within the Truong Son belt ( Vietnam ) :  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  Triassic ages and Cretaceous to Cenozoic overprints [ J ]. *Tectonophysics* , 283 : 105~128.
- Li Jianhong , Wei Sanyuan , Liang liang , *et al.* 2004. Geologic-geochemical characteristics of Guidong granitic massif and recognition of geo-tectonic environment at the time of its emplacement [ J ]. *Uranium Geology* , 20( 6 ) : 321~329 ( in Chinese with English abstract ).
- Li Shuguang , Liu Deliang and Chen Yizhi. 1993. Time of the blueschist belt formation in central China [ J ]. *Scientia Geologica Sinica* , 28 ( 1 ) : 21~27 ( in Chinese with English abstract ).
- Li Shuguang , Xiao Yilin , Liu Deliang , *et al.* 1993. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites : Timing and processes [ J ]. *Chemical Geology* , 109 : 89~111.
- Li Xianhua , Li Zhengxiang , Li Wuxian , *et al.* 2006. Initiation of the indosinian orogeny in South China : Evidence for a permian magmatic arc on the Hainan island [ J ]. *Journal of Geology* , 114 : 341~353.
- Liang Xinquan , Li Xianhua , Qiu Yuanxi , *et al.* 2005. Indosinian collisional orogeny : Evidence from structural and sedimentary geology in Shiwandashan basin , South China [ J ]. *Geotectonica et Metallogenia* , 29( 1 ) : 99~112 ( in Chinese with English abstract ).
- Lin Desong. 1985. Rare earth element distributing pattern of granite in Limu deposit [ J ]. *Journal of Mineral and Geology Institute* , ( 4 ) : 109~116 ( in Chinese ).
- Liu Fulai , Xu Zhiqin , Yang Jingsui , *et al.* 2004. Geochemical characteristics and UHP metamorphism of granitic gneisses in the main drilling hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project and its adjacent area [ J ]. *Acta Petrologica Sinica* , 20( 1 ) : 9~26 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu Shanbao , Wang Denghong , Chen Yuchuan , *et al.* 2008.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages of muscovite from different types tungsten-bearing quartz veins in the Chong-Yu-You concentrated mineral area in Gannan region and its geological significance [ J ]. *Acta Geologica Sinica* , 82 ( 7 ) : 932~940 ( in Chinese with English abstract ).
- Ludwig K R. 2002. SQUID 1. 02 , a User 's Manual [ M ]. Berkeley Geochronology Center Special Publication 2.
- Ludwig K R. 2003. User 's Manual for Isoplot 3. 00 : a geochronological toolkit for Microsoft Excel [ M ]. Berkeley Geochronology Center Special Publication 4.
- Ma Liyan , Fu Jianming , Wu Shichong , *et al.* 2008.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  isotopic dating of the Longshang tin-polymetallic deposit , Xitian orefield , eastern Hunan [ J ]. *Geology in China* , 35( 4 ) : 706~713 ( in Chinese with English abstract ).
- Ma Tieqiu , Bai Daoyuan , Kuang Jun , *et al.* 2005. Zircon SHRIMP dating of the Xitian granite pluton , Chaling , southeastern Hunan , and its geological significance [ J ]. *Geological Bulletin of China* , 24 : 415~419 ( in Chinese with English abstract ).
- Maluski H , Lepvrier C , Jolivet L , *et al.* 2001. Ar-Ar and fission-track ages in the Song Chay Massif : Early Triassic and Cenozoic tectonics in northern Vietnam [ J ]. *Journal of Asian Earth Science* , 19 : 233~248.
- Morrison G W. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association [ J ]. *Lithos* , 13 : 97~108.
- Nam T N. 1998. Thermotectonic events from Early Proterozoic to Miocene in the Indochina craton : Implication of K-Ar ages in Vietnam [ J ]. *Journal of Asian Earth Science* , 16 : 475~484.
- Nam T N , Sano Y , Terada K , *et al.* 2001. First SHRIMP U-Pb zircon dating of granulites from the Kontum massif ( Vietnam ) and tectonothermal implications [ J ]. *Journal of Asian Earth Science* , 19 : 77~84.
- Nutman A P , Green D H , Cook C A , *et al.* 2001. SHRIMP U-Pb zircon dating of the exhumation of the Lizard peridotite and its emplacement over crustal rocks : constraints for tectonic models [ J ]. *Journal of the Geological Society , London* , 158 : 809~820.
- Patião Dounce A E , Humphreys E D and Johnston A D. 1990. Anatexis and metamorphism in tectonically thickened continental crust exemplified by the Sevier hinterland , western North America [ J ]. *Earth Planet Science Letter* , 97 : 290~315.
- Peppard D F , Mason G W and Lewey S. 1969. A tetrad effect in the liquid-liquid extraction ordering of lanthanides ( III ) [ J ]. *J. Inorg Nucl. Chem.* , 31 : 2271~2272.
- Qi Changshi , Deng Xiguang , Li Wuxian , *et al.* 2007. Origin of the Darongshan-Shiwandashan S-type granitoid belt from southeastern Guangxi : geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints [ J ]. *Acta Petrologica Sinica* , 23( 2 ) : 403~412 ( in Chinese with English abstract ).
- Qiu Jiansheng , McInnes B I A , Xu Xisheng , *et al.* 2004. Zircon ELA-ICP-MS dating for Wuliting pluton at Dajishan , southern Jiangxi and new recognition about its relation to tungsten mineralization [ J ]. *Geological Review* , 50( 2 ) : 125~133 ( in Chinese with English abstract ).
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry : Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism [ J ]. *Chemical Geology* , 184 : 123~138.
- Rubatto D and Gebauer D. 2000. Use of Cathodoluminescence for U-Pb Zircon Dating by IOM Microprobe : Some Examples from the Western Alps. *Cathodoluminescence in Geosciences* [ M ]. Heidelberg Germany , Springer-Verlag , 373~400.
- Rubatto D and Williams I S. 2000. Imaging trace element geochemistry and mineral inclusions : Linking U-Pb ages with metamorphic conditions [ J ]. *EOS* , 21 : 25.
- Shao Jianguo , Peng Shaomei and Peng Songbai. 1995.  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  isochron dating for peripheral faults of Yunkai massif [ J ]. *Guangdong Geology* , 10( 2 ) : 34~40 ( in Chinese with English abstract ).
- Song Biao , Zhang Shuanhong , Wang Yanbin , *et al.* 2006. Avoidance of systematic bias of SHRIMP zircon U-Pb dating : Necessity of

- staged calibrations [ J ]. *Rock and Mineral Analysis*, 25( 1 ): 9-14.
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, *et al.* 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating [ J ]. *Geological Review*, 48 ( Supp. ): 26-30 ( in Chinese with English abstract ).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [ A ]. Saunders A D and Norry M J., *Magmatism in the Ocean Basins* [ C ]. Geological Society Special Publications, 42: 313-345.
- Sun Tao, Zhou Xinmin, Chen Peirong, *et al.* 2005. Strongly peraluminous granites of Mesozoic in Eastern Nanling Range, southern China: Petrogenesis and implications for tectonics [ J ]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 48( 2 ): 165-174.
- Vervoort J D and Patchett P J. 1996. Behavior of hafnium and neodymium isotopes in the crust: Constraints from Precambrian crustally derived granites [ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60: 3 717-3 733.
- Wang Yuejun, Fan Weiming, Guo Feng, *et al.* 2003. Geochemistry of Mesozoic mafic rocks adjacent to the Chenzhou-Linwu fault, South China: Implication for the lithosphere boundary between the Yangtze and Cathysia blocks [ J ]. *International Geological Review*, 45: 263-286.
- Wang Yuejun, Fan Weiming, Liang Xinquan, *et al.* 2005. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of Indosinian granites in Hunan province and its petrogenetic implications [ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 50 ( 13 ): 1 395-1 403.
- Wang Yuejun, Zhang Y H, Fan Weiming, *et al.* 2002. Numerical modeling of the formation of Indo-Sinian peraluminous granitoids in Hunan province: Basaltic underplating versus tectonic thickening [ J ]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 45( 11 ): 1 042-1 056.
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe [ A ]. McKibben M A, Shanks III W C and Ridley W L. *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes* [ C ]. *Reviews in Economic Geology*, 7: 1-35.
- Williams I S, Buick I S and Cartwright I. 1996. An extended episode of early Mesoproterozoic metamorphic fluid flow in the Reynolds Range, central Australia [ J ]. *J. Metamorph. Geol.*, 14: 29-47.
- Williams I S, Compston W, Black L P, *et al.* 1984. Unsupported radiogenic Pb in zircon: A cause of anomalously high Pb-Pb, U-Pb and Th-Pb ages [ J ]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 88: 322-327.
- Williams I S, Kinny P D, Black L P, *et al.* 1985. Dating Archaean zircon by Ion microprobe-new light on an old problem [ A ]. Burke K and Ashwell L D. *Workshop on the Early Earth: The interval from Accretion to the Older Archaean* [ C ]. LPI Tech. Rpt. 85-01, Lunar and Planetary Institute, Houston: 84-86.
- Wu Fuyuan, Yang Yueheng, Xie Liewen, *et al.* 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology [ J ]. *Chem. Geol.*, 234: 105-126.
- Wu Guangying, Pan Zhongfang, Li Jindong, *et al.* 2005. Geological and geochemical characteristics of the Dayishan granitoids in southern Hu'nan and their relations to mineralization [ J ]. *Geology in China*, 33( 3 ): 434-442 ( in Chinese with English abstract ).
- Xu Ping, Wu Fuyuan, Xie Liewen, *et al.* 2004. Hf isotopic compositions of the standard zircons for U-Pb dating [ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 49( 15 ): 1 642-1 648.
- Xu Xisheng, Deng Ping, S Y O'Reilly, *et al.* 2003. LAM-ICPMS U-Pb single zircon dating of the Guidong complex ( SE China ) and its petrogenetic significance [ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 48( 17 ): 1 892-1 899.
- Zhao Lei, Yu Jinhai and Xie Lei. 2004. Geochemistry and origin of the Hongshan topaz-bearing leucogranites in southwestern Fujian province [ J ]. *Geochimica*, 33( 4 ): 372-386 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhao Zhenhua, Masuda Akimasa and Shabani M B. 1992. Tetrad effects of rare-earth elements in rare-metal granites [ J ]. *Geochimica*, ( 3 ): 221-233 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Han Xiaodong, *et al.* 2002. Controls on the REE tetrad effect in granites: Evidence from the Qianlishan and Baerzhe granites, China [ J ]. *Geochemical Journal*, 36: 527-543.
- Zhou Xinmin. 2003. My thinking about granite geneses of South China [ J ]. *Geological Journal of China Universities*, 9( 4 ): 556-565 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhou Xinmin and Li Wuxian. 2000. Origin of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [ J ]. *Tectonophysics*, 326( 3-4 ): 269-287.
- Zhou Xinmin, Sun Tao, Shen Weizhou, *et al.* 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution [ J ]. *Episodes*, 29( 1 ): 26-33.

## 附中文参考文献

- 柏道远, 陈建成, 马铁球, 等. 2006. 王仙岭岩体地质地球化学特征及其对湘东南印支晚期构造环境的制约 [ J ]. *地球化学*, 35( 2 ): 113-125.
- 柏道远, 贾宝华, 李金冬, 等. 2007a. 区域构造体制对湘东南印支期与燕山早期花岗岩成矿能力的重要意义——以千里山岩体和王仙岭岩体为例 [ J ]. *矿床地质*, 26( 5 ): 487-500.
- 柏道远, 贾宝华, 马铁球, 等. 2007c. 湘东南印支期与燕山早期花岗岩成矿能力差异与岩石地球化学特征关系探讨 [ J ]. *岩石矿物学杂志*, 26( 5 ): 387-398.
- 柏道远, 周亮, 马铁球, 等. 2007b. 湘东南印支期花岗岩成因及构造背景 [ J ]. *岩石矿物学杂志*, 26( 3 ): 197-212.
- 蔡明海, 陈凯旭, 屈文俊, 等. 2006. 湘南荷花坪西多金属矿床地质及辉钼矿 Re-Os 测年 [ J ]. *矿床地质*, 25( 3 ): 263-268.
- 陈卫锋, 陈培荣, 周新民, 等. 2006. 湖南阳明山岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成因研究 [ J ]. *地质学报*, 80( 7 ): 1 065-1 077.
- 陈卫锋, 陈培荣, 黄宏业, 等. 2007. 湖南白马山岩体花岗岩及其包体的年代学和地球化学研究 [ J ]. *中国科学(D 辑)*, 37( 7 ): 873-893.
- 陈小明, 王汝成, 刘昌实, 等. 2002. 广东从化佛冈(主体)黑云母花

- 岗岩定年和成因[J]. 高校地质学报, 8(3): 293~307.
- 高山, 骆庭川, 张本仁, 等. 1999. 中国东部地壳的结构和组成[J]. 中国科学(D辑), 29(3): 204~213.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 23(10): 2 595~2 604.
- 李建红, 卫三元, 梁良, 等. 2004. 贵东岩体地质地球化学特征及其形成的构造环境识别[J]. 铀矿地质, 20(6): 321~329.
- 李曙光, 刘德良, 陈移之, 等. 1993. 中国中部蓝片岩的形成时代[J]. 地质科学, 28(1): 21~27.
- 梁新权, 李献华, 邱元禧, 等. 2005. 华南印支期碰撞造山-十万大山盆地构造和沉积学研究[J]. 大地构造与成矿学, 29: 99~112.
- 林德松. 1985. 栗木矿田花岗岩的稀土分布模式[J]. 矿产地质研究院学报, (4): 109~116.
- 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等. 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔及周边地区花岗质片麻岩的地球化学性质和超高压变质作用标志的识别[J]. 岩石学报, 20(1): 9~26.
- 刘善宝, 王登红, 陈毓川, 等. 2008. 赣南崇义-大余-上犹矿集区不同类型含矿石英中白云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 82(7): 932~940.
- 马丽艳, 付建明, 伍式崇, 等. 2008. 湘东锡田垄上锡多金属矿床的<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 同位素定年研究[J]. 中国地质, 35(4): 706~713.
- 马铁球, 柏道远, 邝军, 等. 2005. 湘东南茶陵地区锡田岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 24: 415~419.
- 祁昌实, 邓希光, 李武显, 等. 2007. 桂东南大容山-十万大山 S 型花岗岩带的成因: 地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约[J]. 岩石学报, 23(2): 403~412.
- 邱检生, McInnes B I A, 徐夕生, 等. 2004. 赣南大吉山五里亭岩体的锆石 ELA-ICP-MS 定年及其与钨成矿关系的新认识[J]. 地质论评, 50(2): 125~133.
- 宋彪, 张拴宏, 王彦斌, 等. 2006. 锆石 SHRIMP 年龄测定数据处理时系统偏差的避免——标准锆石分段校正的必要性[J]. 岩矿测试, 25(1): 9~14.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 48(增刊): 26~30.
- 孙涛, 周新民, 陈培荣, 等. 2003. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义[J]. 中国科学(D辑), 33(12): 1 209~1 218.
- 邵建国, 彭少梅, 彭松柏. 1995. 云开地块周边断裂带<sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar 等时线定年[J]. 广东地质, 10(2): 34~40.
- 王岳军, 范蔚茗, 梁新权, 等. 2005. 湖南印支期花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其成因启示[J]. 科学通报, 50(12): 1 259~1 266.
- 伍光英, 潘仲芳, 李金冬, 等. 2005. 湖南大义山花岗岩地质地球化学特征及其与成矿的关系[J]. 中国地质, 32(3): 434~442.
- 徐夕生, 邓平, S Y O'Reilly, 等. 2003. 华南贵东杂岩体单颗粒锆石激光探针 ICPMS U-Pb 定年及其成岩意义[J]. 科学通报, 48(12): 1 328~1 334.
- 赵蕾, 于海津, 谢磊. 2004. 闽西南红山含黄玉浅色花岗岩地球化学特征和成因[J]. 地球化学, 33(4): 372~386.
- 赵振华, 增田彰正, Shabani M B. 1992. 稀有金属花岗岩的稀土元素四分组效应[J]. 地球化学, (3): 221~233.
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. 高校地质学报, 9(4): 556~565.