

赣中乐安与钨锡多金属矿化有关的山心岩体 地质地球化学特征、锆石 LA-ICP-MS 年龄 及其成矿意义

石连成^{1,2,3)}, 谢财富^{1,2)}, 郭福生¹⁾, 周万蓬¹⁾, 张树明¹⁾, 姜勇彪²⁾, 刘林清²⁾

1) 东华理工大学核资源与环境省部共建重点实验室, 南昌, 330013;
2) 东华理工大学地球科学学院, 南昌, 330013; 3) 核工业航测遥感中心, 石家庄, 050002

内容提要:赣中乐安麻鸡嶂地区产出了一些与钨、锡多金属矿化有关的细粒二云母碱长花岗岩侵入体, 统称为山心单元。本文通过对山心单元进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年, 获得其成岩年龄为 152.5 ± 1.3 Ma, 属晚侏罗世岩浆活动的产物。矿物化学分析表明, 山心单元中的云母属铁白云母(褐黑色云母)和白云母, 长石为钠长石和正长石。山心单元花岗岩富硅富碱过铝, 贫钙、镁, 富集 Rb、Th、Ta 等, Ga/Al 值较高, 亏损 Sr、Ba、Ti、P、Eu 等元素, 稀土配分曲线为“海鸥型”, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -8.9, $T_{2\text{DM}}=1662$ Ma, 地球化学特征与南岭地区铝质 A 型花岗岩相似, 可能是高分异的铝质 A 型花岗岩。其高的 Rb/Sr、Rb/Ba 值, 低的 Nb/Ta、Zr/Hf、K/Rb 值暗示了岩浆演化过程中有挥发分流体参与, 并经历了强烈的分异作用, 是岩浆演化后期的产物。该岩体可能形成于后造山拉张构造背景下, 主要来源于地壳物质的部分熔融, 可能有少量地幔物质的参与。山心花岗岩的含钨特性及其与钨锡成矿时代的一致性, 显示其与钨锡成矿有关, 而山心花岗岩的高分异属性及大量伟晶岩、石英脉和云英岩脉的发育, 暗示深部可能存在大的隐伏岩体, 具有良好的钨锡成矿潜力。

关键词: 地球化学特征; 山心花岗岩体; 铝质 A 型; 燕山期; 赣中

南岭及其邻区中生代大规模的成矿作用主要出现在三个阶段, 即晚三叠世、中一晚侏罗世、早白垩世。且不同的金属成矿作用具有不同的时空分布规律(毛景文等, 2008)。其中钨锡钼多金属成矿作用主要与花岗岩、特别是燕山期花岗岩有关(黄兰椿等, 2013; 裴荣富等, 2009; 陈骏等, 2008; 王汝成等, 2008; 毛景文等, 2007; 丰成友等, 2012)。

赣中地区南村一小都一麻鸡嶂一带在 1952 年就有小规模钨矿和锡矿的开采活动, 从 20 世纪 50 年代后期起, 对该区开展过不同程度的地质矿产调查工作, 并提交了相关地质和矿产报告。但前人并未对该区与钨锡成矿有关的花岗岩进行年代学和地球化学等深入研究工作。笔者等通过 1:5 万乐安县幅区调工作, 在麻鸡嶂一小都一带的乐安复式岩体中解体出燕山期山心单元细粒二云母碱长花岗岩体, 本文通过对山心单元的岩体开展岩石学、矿物化学、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学、全岩主微量

元素及 Sr—Nd—Pb 同位素地球化学的研究, 探讨山心单元的形成时代、岩石成因、成岩构造背景及其与钨锡多金属成矿的关系。

1 区域地质与岩石学特征

研究区位于绍兴—江山—萍乡缝合带南侧、遂川—德兴深断裂东侧、鹰潭—安远大断裂西侧, 位于湘桂赣地块北东缘(图 1)。属宜黄大王山成矿带西南部的乐安南村—谷岗麻鸡嶂钨、钨(铜)多金属矿化区。其东部和南部邻区分别发育了燕山期的大王山和南村花岗岩体, 并产有钨矿或钨锡多金属矿。

区内主要出露各类花岗岩和岩脉, 包括乐安单元($\gamma\gamma\text{D}_1\text{L}$)片麻状中粗粒巨斑状黑云母二长花岗岩、太平单元($\gamma\gamma\text{D}_1\text{T}$)片麻状中细粒少斑黑云母二长花岗岩、王元单元($\gamma\gamma\text{D}_1\text{W}$)片麻状细粒细斑黑云二长花岗岩、横岗单元($\gamma\gamma\text{T}_2\text{H}$)中粗粒含斑—少斑黑云二长花岗岩和山心单元($\chi\rho\gamma\text{J}_3\text{S}$)细粒二云母碱

注: 本文为中国地质调查局地质调查项目(编号 1212011120836, 1212011220248)、国家自然科学基金项目(编号 41172063)及东华理工大学核资源与环境重点实验室开放基金资助项目的成果。
收稿日期: 2014-05-07; 改回日期: 2015-04-13; 责任编辑: 章雨旭。
作者简介: 石连成, 1989 年生。硕士研究生。矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: slchejy@163.com。通讯作者: 谢财富, 1965 年生。博士, 教授。主要从事岩浆岩石学和地球化学研究。Email: cfxie@ecit.cn。

长花岗岩。同时出露较多石英脉和花岗伟晶岩脉、花岗细晶岩脉、云英岩脉。南村—麻鸡嶂矿化区北东部大烟—马带湾里一带出露有少量青白口系库里组浅变质岩系,部分在花岗岩中呈残留体形式存在;库里组下段(Qbk¹)岩性为石榴二云母千枚岩和石榴二云母石英片岩,库里组上段(Qbk²)岩性为绢云母千枚岩和二云母千枚岩。

区内构造较简单,以北东向断裂为主,也有东西向和南北向断裂。东西向和北东向断裂主要表现为硅化破碎带或硅化带,破碎的角砾呈透镜状及眼球状,是区内主要控矿构造;南北向断裂则主要表现为挤压破碎带。区内发育钨、锡、铜等多金属矿化,南西部主要为钼钨矿化、中部主要为钨锡矿化、北东主要为铜矿化。金属矿物主要有辉钼矿、黑钨矿、锡石等。主要蚀变有云英岩化、硅化、绿泥石化和黄铁矿化等。

本文研究的山心单元是从乐安复式岩体中分解

出来的一个独立单元,主要分布于太平乡山心村东及麻鸡嶂南侧,见山心、小都、管坊等 3 个不规则岩株状侵入体和一系列岩脉,面积约 3.1 km²,侵入加里东期乐安单元(图 2a),与印支期横岗单元接触界线未见及;见石英脉、伟晶岩脉、云英岩脉及含辉钼矿黑钨矿石英脉穿插该单元(图 2b)。

山心单元岩性为细粒二云母碱长花岗岩,灰白色,弱风化后浅肉红色(图 2a、b)。块状构造,细粒花岗结构、局部文象结构,粒径主要 0.5~1.5mm,个别可达 3mm。矿物组成:石英 26%~30%;褐黑色云母(铁质白云母)3%±,白云母 1%~2%,云母呈鳞片状;斜长石 27%~33%(An 5~0.26);微斜长石 32%~36%。副矿物含量少,仅见少量磷灰石、锆石、独居石,偶见电气石、石榴石、锐钛矿、榍石(图 2c、d)。岩石局部发育云英岩化。

2 分析测试方法

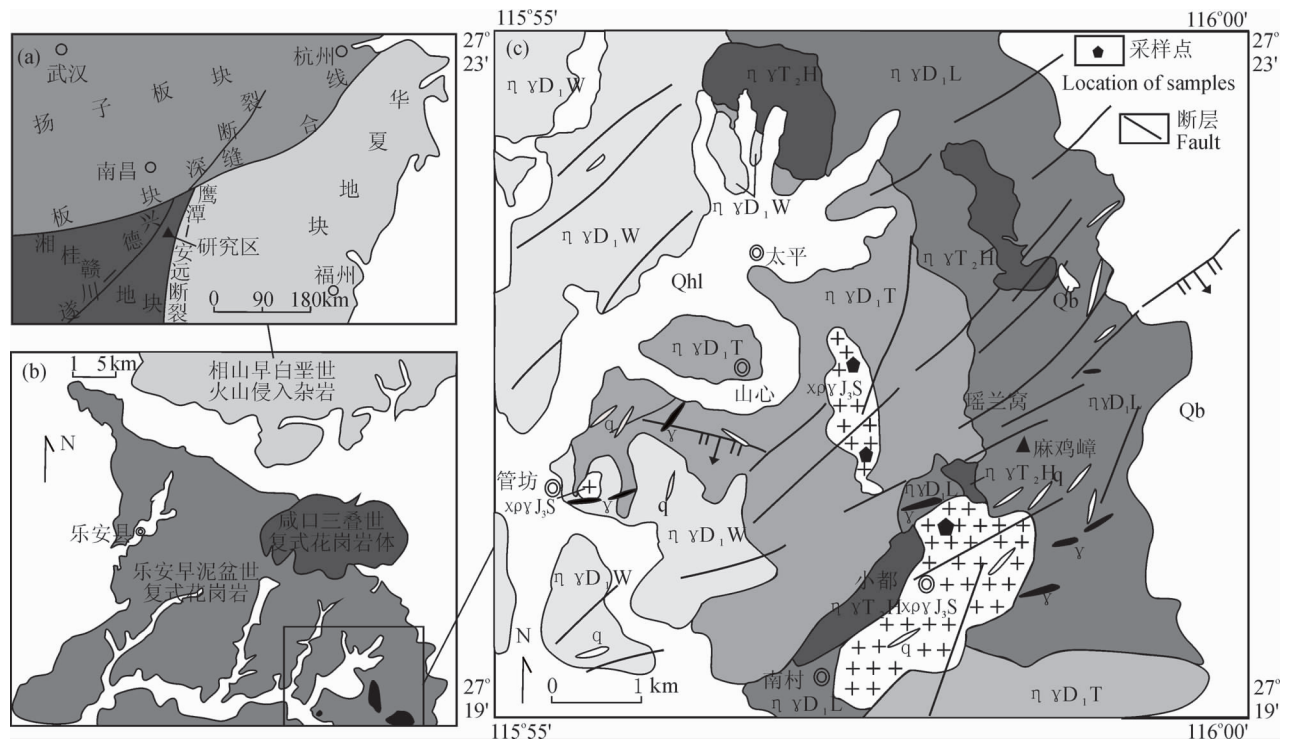


图 1 赣中乐安麻鸡嶂地区地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of the Majizhang area, Le'an, Central Jiangxi Province

ηγD₁L—乐安单元片麻状中粗粒巨斑黑云母二长花岗岩;ηγD₁T—太平单元片麻状中细粒少斑黑云母二长花岗岩;ηγD₁W—王元单元片麻状细粒细斑黑云母二长花岗岩;ηγT₂H—横岗单元中粗粒含斑—少斑黑云母二长花岗岩;χργJ₃S—山心单元细粒二云母碱长花岗岩;γ—花岗岩脉;Qb—青白口浅变质岩;Qhl—第四系;q—石英脉
ηγD₁L—Gneissic coarse/medium-grained biotite monzonitic granite with giant porphyry in Le'an unit; ηγD₁T—gneissic fine/medium-grained biotite monzonitic granite with little porphyry in Taiping unit; ηγD₁W—gneissic fine-grained biotite monzonitic granite with fine porphyry in Wangyuan unit; ηγT₂H—coarse/medium-grained biotite monzonitic granite with little porphyry in Henggang unit; χργJ₃S—fine-grained two-mica alkali-feldspar granite in Shanxin unit; γ—granite; Qb—Qingbaikouan shallow metamorphic rock; Qhl—Quaternary; q—quartz vein

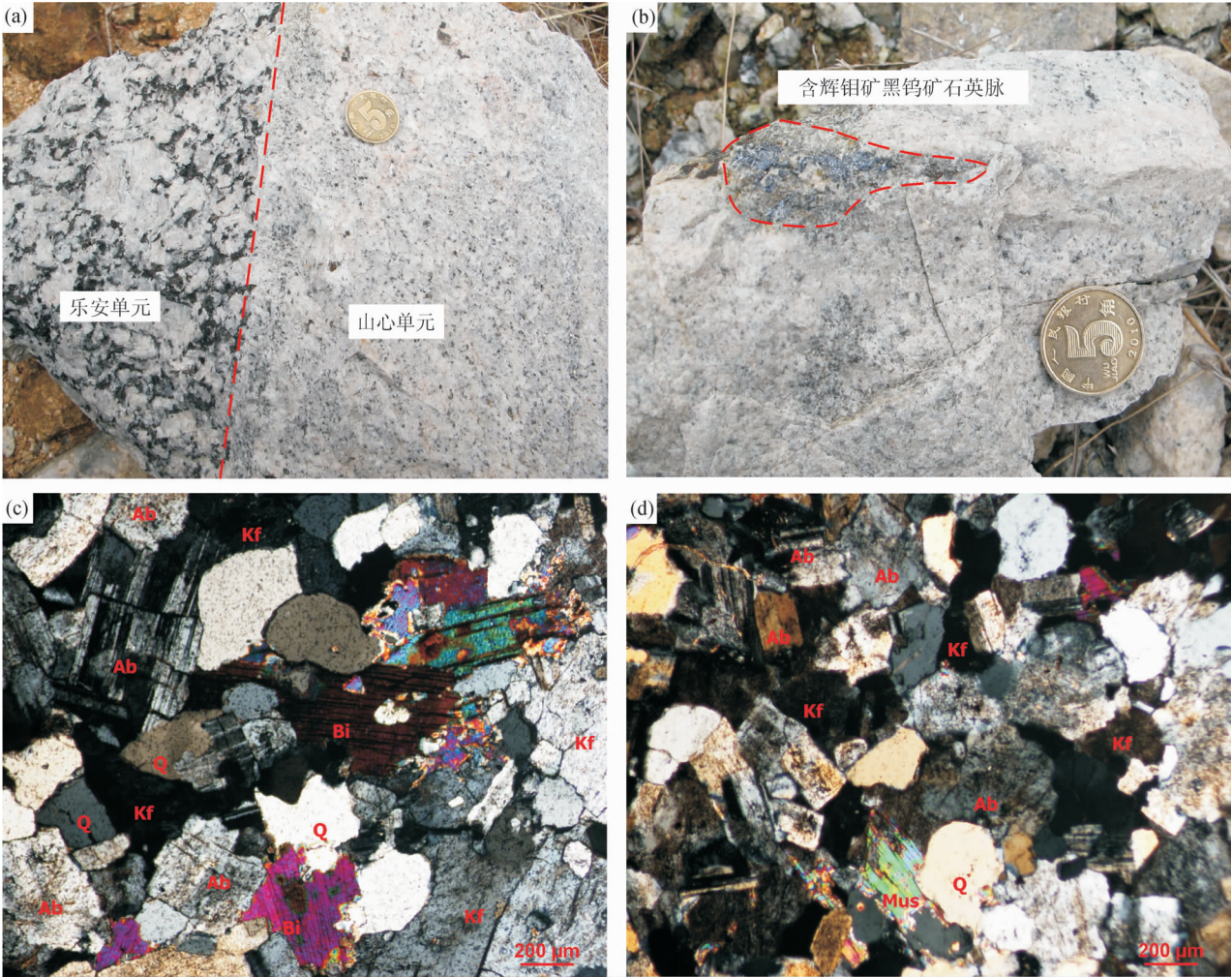


图 2 赣中乐安山心细粒二云母碱长花岗岩野外照片和镜下照片特征
Q—石英;Ab—钠长石;Kf—钾长石;Mus—白云母;Bi—黑云母

Fig. 2 Photographs and microphotographs of the Shanxin fine grained two-mica alkali-feldspar granite, in Le'an, Central Jiangxi Province
Q—Quartz; Ab—albite; Kf—potash feldspar; Mus—muscovite; Bi—biotite

用于锆石测年的细粒二云母碱长花岗岩 T324-1 样品采自山心岩体北部(115°57'16"E, 27°21'3"N), 首先经过破碎、过筛、磁选、重液分离等方法分离出锆石, 然后再在双目镜下挑出晶型较好、透明、无裂隙的锆石约 100 粒。将挑选出来的锆石颗粒用环氧树脂固定在样品靶上, 之后对样品靶表面进行抛光, 直至露出锆石晶体近中心截面。抛光后的锆石样品在东华理工大学核资源与环境省部共建国家重点实验室培育基地的电子显微镜上进行镜下反射光、透射光照像后, 对锆石进行阴极发光 CL 分析。结合阴极发光照相结果观察锆石的内部结构。锆石 U-Pb 定年测试在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室采用 LA-ICP-MS 完成, ICP-

MS 型号为 Agilent7500a 型, 激光剥蚀系统为 New Wave 公司生产的 UP213 固体激光剥蚀系统。质量分馏校正采用标样 GEMOC/GJ-1 (608Ma), 每轮 (RUN) 测试约分析 10 个分析点, 开始和结束前分别分析 GJ-1 标样 2~4 次, 中间分析未知样品 10~12 次, 其中包括 1 次已知年龄的锆石样品 Mud Tank (735Ma)。测试过程中激光束斑的剥蚀孔径为 25 μm, 剥蚀时间 60s, 背景扫描时间 40s, 激光脉冲重复频率 5Hz, 采集 ²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb、²⁰⁸Pb、²³²Th 和 ²³⁸U 的计数来测定年龄。实验原理和详细的测试方法见 Jackson 等 (2004)。ICP-MS 的分析数据通过即时分析软件 GLITTER (Van Achterbergh et al., 2001) 计算获得同位素比值、年龄和误差。普通铅校

锆石或其残留核很少。测点 8 和 21 获得加里东期谐和年龄(435 Ma 和 534Ma), 结合其锆石具自形的晶形及发育韵律环带结构, 且测点位于边部的情况判断, 应为捕虏锆石年龄; 测点 14 和 15 获得约 165Ma 的谐和年龄, 是属于测试误差引起的稍离群

年龄还是属捕获的略早形成的岩浆锆石年龄,还难以判定;测点 18、19、23 的年龄谐和性差,谐和度 117~192,在 U-Pb 谐和图上偏离一致曲线,可能是²⁰⁷Pb 和²⁰⁴Pb 测试误差引起的飘移。其余 17 个测点的年龄谐和性好或较好,落在 U-Pb 谐和图的一致曲线上或靠近一致曲线(图 5a),且²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄群聚分布,介于 149.7~156.1Ma 之间,计算得到的加权平均年龄为 152.5±1.3Ma(*n* = 17, MSWD=0.67)(图 5b),该年龄代表岩体的成岩年龄,属于晚侏罗世。

3.3 岩石地球化学特征

3.3.1 主量元素特征

山心单元细粒花岗岩的三个样品 T324-1、DK874-3、HSX-04 的主量元素及其相关参数见表 4。结果显示,山心单元花岗岩 3 件样品的 SiO₂ 含

量偏高,为 71.52%~74.72%,平均为 73.63%,全碱 Na₂O+K₂O 含量较高,为 7.9%~9.09%,平均 8.64%,并相对富钾,在 SiO₂-K₂O 图解上落入高钾钙碱性系列(图 7a)。ACNK 为 1.02~1.31(图 7b),平均值为 1.14,但由于 T324-1 样的 Fe₂O₃ 明显高于 FeO,说明其已有较强的风化,该样 Na₂O 含量较低和 A/CNK 值高(1.31)是受风化影响的结果。因此,山心单元整体应为弱过铝质。山心单元分异指数 DI 高,为 91.6~96.1,平均为 94.7,反映岩体经历了高分异演化或者表示其岩浆熔融程度低;TiO₂ 和 P₂O₅ 含量明显偏低,反映岩浆可能经历了钛铁矿和磷灰石等矿物的分离结晶作用(谢磊等,2013)。与世界平均 M 型、I 型、S 型花岗岩相比,山心花岗岩显示出富硅碱、贫铁镁钙的特征,与华南地区晚侏罗世金鸡岭铝质 A 型花岗岩(谢磊等,2013)

表 1 赣中乐安山心花岗岩山心单元云母化学组成电子探针分析结果与结构计算(%)

Table 1 Electron microprobe analyses and structural formula of mica from Shanxin unit, the Shanxin granite in Lēan, Central Jiangxi (%)

岩性	云英岩		细粒二云碱长花岗岩(DK874-3)					云英岩	
分析点号	T325-2.2	3.5	3.1	3.6	3.8	3.9	3.12	T325-2.1	T325-2.3
矿物	白云母		褐黑色云母						
SiO ₂	45.33	48.73	40.61	41.36	42.32	37.65	38.95	41.85	40.66
TiO ₂	0.45	0.01	0.29	0.41	0.38	0.37	0.36	1.15	0.84
Al ₂ O ₃	26.75	33.46	24.15	24.08	24.77	23.64	24.00	23.72	23.33
TFeO	10.38	4.16	16.37	17.00	16.61	17.42	16.84	13.98	14.42
MnO	0.99	0.57	2.13	2.13	2.19	2.20	2.31	1.49	1.51
MgO	1.74	0.00	0.07	0.07	0.06	0.05	0.06	1.89	1.93
CaO	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	0.26	0.19	0.18	0.19	0.22	0.16	0.27	0.20	0.19
K ₂ O	10.11	9.75	8.97	8.93	7.93	9.67	9.59	9.99	10.03
BaO	0.08	0.00	0.07	0.02	0.02	0.00	0.08	0.01	0.02
NiO	0.01	0.05	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02
P ₂ O ₅	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00
Cr ₂ O ₃	0.02	0.02	0.00	0.03	0.02	0.01	0.00	0.02	0.03
总量	96.12	96.96	92.87	94.22	94.51	91.20	92.47	94.33	92.98
基于 22 个氧计算的阳离子系数									
Si	6.33	6.42	6.13	6.15	6.20	5.90	5.98	6.15	6.10
Al ^{IV}	1.67	1.58	1.87	1.85	1.80	2.10	2.02	1.85	1.90
Al ^{VI}	2.74	3.61	2.42	2.37	2.48	2.26	2.32	2.26	2.23
Ti	0.05	0.00	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04	0.13	0.10
Fe ³⁺	1.21	0.46	1.42	1.44	1.61	1.13	1.21	1.37	1.27
Fe ²⁺	0.00	0.00	0.65	0.68	0.42	1.15	0.95	0.35	0.54
Mn	0.12	0.06	0.27	0.27	0.27	0.29	0.30	0.19	0.19
Mg	0.36	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.41	0.43
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.07	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.08	0.06	0.05
K	1.80	1.64	1.73	1.69	1.48	1.93	1.88	1.87	1.92
总量	14.35	13.83	14.58	14.56	14.39	14.87	14.79	14.63	14.73

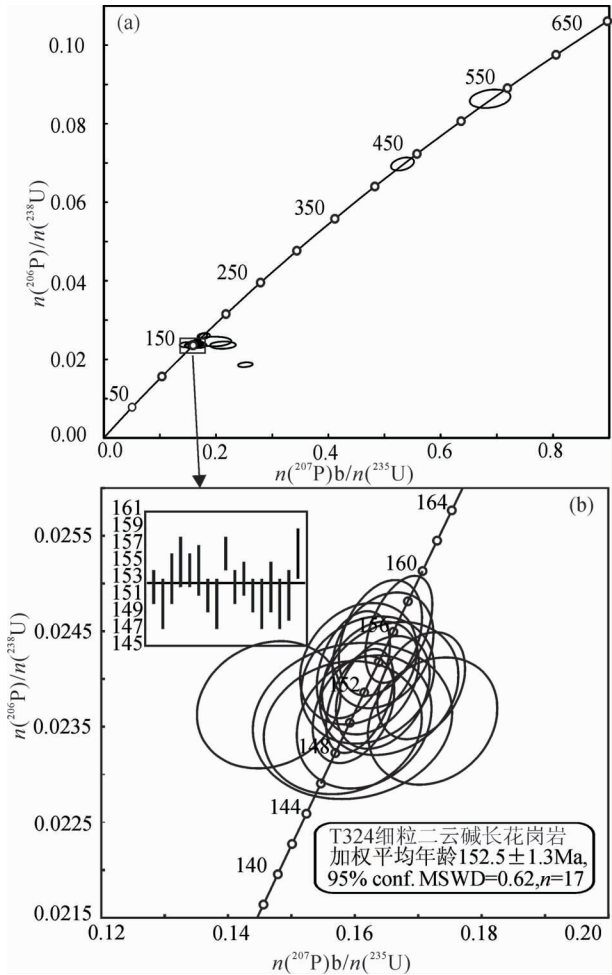


图 5 赣中乐安山心花岗岩 T324-1 样品的
锆石 U-Pb 年龄图及谐和图
Fig. 5 Zircon U-Pb age and its Concordia diagram of
sample T324-1 from Shanxin granite the Shanxin granite
in Le'an, Central Jiangxi

及千里山(全立华,2013)、锡田(周云等,2013;姚远等,2013)等 A 型花岗岩相似。

3.3.2 稀土元素和微量元素特征

山心岩体稀土元素总量 $\Sigma \text{REE} = 88.39 \times 10^{-6} \sim 212.63 \times 10^{-6}$, 平均值为 160.29×10^{-6} , 低于世界典型 A 型花岗岩和南岭 A 型花岗岩的平均值, 但与南岭地区千里山铝质 A 型复式花岗岩体的补体侵入体(朱金初等,2008)相似。其稀土含量偏低可能与岩浆分异演化强烈并与流体相互作用有关。 $\text{LREE}/\text{HREE} = 1.15 \sim 7.64$, $(\text{La}/\text{Yb})_n = 0.51 \sim 7.95$, $(\text{La}/\text{Sm})_n = 0.99 \sim 4.39$, 样品的稀土元素配分曲线整体比较平缓, 轻重稀土总体分馏不明显, 轻稀土元素部分有一定分馏, 负铕异常中等—强烈 ($\delta \text{Eu} = 0.01 \sim 0.44$), 球粒陨石标准化模式图(图



图 6 赣中山心花岗岩 T324-1 样品锆石阴极
发光(CL)图像及年龄测点位置
Fig. 6 Cathode luminescence(CL)image of selected
zircon of Shanxin granite in Le'an, Central Jiangxi

8a)整体显示海鸥型,与典型 A 型花岗岩所特有的配分曲线一致。山心花岗岩的稀土配分曲线与华南同期的金鸡岭和螃蟹木岩体(谢磊等,2013)、千里山岩体(全立华,2013)及锡田复式岩体(周云等,2013;姚远等,2013)等含钨锡铝质 A 型花岗岩相一致。

微量元素及其相关参数见表 5。在微量元素蛛网图中,山心单元总体上富集 Rb、Th、U、Pb、K 等大离子亲石元素(Rb 含量平均值达 600.6×10^{-6}), 亏损 Ba、Sr、P、Ti、Eu 等元素(图 8b), 为典型的低 Sr—Ba 高 Y 花岗岩, 与南岭东段(赣南)的强过铝花岗岩的特征十分相似(孙涛等,2003), 具有壳源花岗岩的特征(Condie, 1997)。山心单元 K/Rb 值低, 平均为 77.24。K/Rb 值通常用来示踪岩浆演化的特征及流体参与程度(Irber, 1999), 山心单元 K/Rb 值小于 100, 说明岩体在演化过程在流体参与下经历了强的分异和自蚀变作用(Taylor and McLennan, 1985; 赵希林等,2013)。其 Rb/Sr 比值高, 平均为 49.41, Rb/Ba 比值为 1.39~68.98, 变化范围比较大, 平均值为 24.04; Nb/Ta 比值较低,

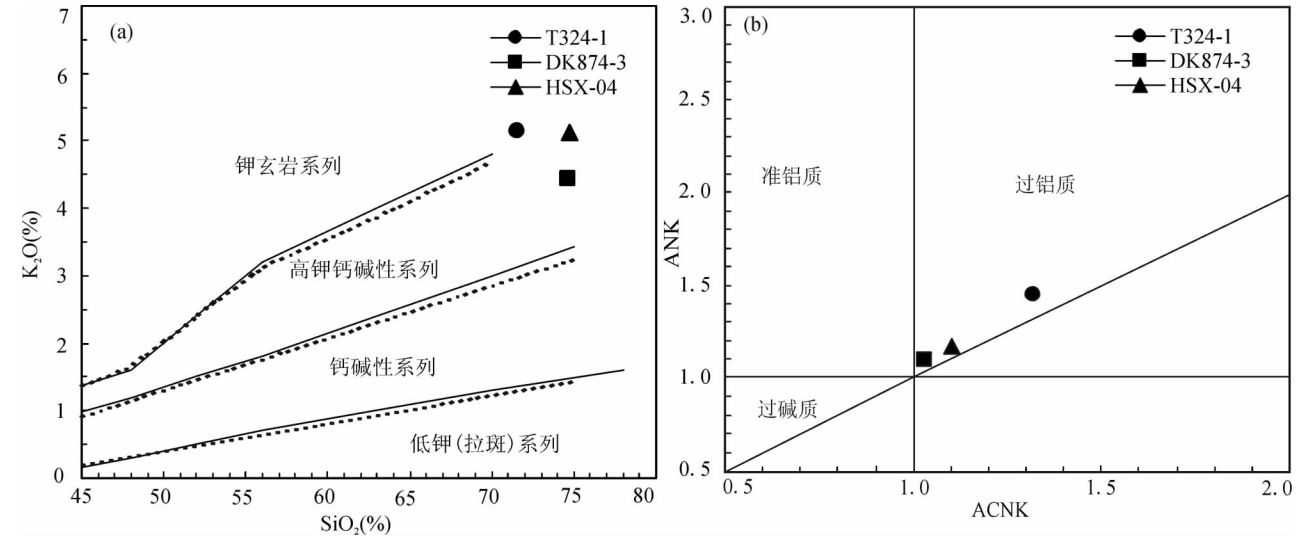


图 7 赣中乐安山心花岗岩稀土元素配分图和微量元素蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)
Fig. 7 Chondrite-normalized REE distribution patterns(a) and Primitive mantle-normalized spider diagram (b) of the Shanxin granites in Le'an, Central Jiangxi (normalization values after Sun and McDonough, 1989)
螃蟹木和金鸡岭数据来自付建明等,2005;锡田数据来自周云等,2013
Data of Pangxiemu and Jinjiling after Fu Jian Ming et al. , 2005; data of Xitian after ZhouYun et al. , 2013

为 0.53~5.79,平均值为 2.66,明显低于正常花岗岩的值(11)(Green, 1995)。鉴于山心单元高 Rb/Sr、高 Rb/Ba、低 Nb/Ta 的特征,其形成过程中可能有富流体相的参与(Green 1995, Altherr, Holl et al. 2000)。

山心单元 Th、U、K 等热能元素含量明显偏高,属高热花岗岩(Kinnaird et al., 1985)。其 Ga/Al 值变化于 1.82~3.69,平均值为 2.84,略大于典型 A 型花岗岩的 Ga/Al 值,部分样品低 Ga/Al 值可能是受到后期蚀变作用的影响。

表 2 赣中乐安山心单元细粒二云碱长花岗岩(DK874-3)长石化学组成电子探针分析结果(%)
Table 2 Electron microprobe analyses of feldspar from the Shanxin granite(DK874-3) in Le'an, Central Jiangxi (%)

点号	3. 2	3. 3	3. 7	3. 10	3. 11	3. 14	3. 4	3. 13
矿物	钠长石	钠长石	钠长石	钠长石	钠长石	钠长石	微斜长石	微斜长石
SiO ₂	69.99	69.96	72.18	70.96	70.41	68.63	63.62	62.88
Al ₂ O ₃	21.24	19.87	21.45	19.99	21.48	20.75	18.30	18.13
CaO	0.65	0.19	0.54	0.05	1.01	0.65	0.01	0.01
Na ₂ O	11.11	11.67	10.12	10.25	11.17	11.43	0.80	0.83
K ₂ O	0.12	0.14	0.16	0.01	0.14	0.19	15.77	15.89
BaO	0.10	0.00	0.04	0.05	0.00	0.00	0.05	0.03
NiO	0.03	0.04	0.00	0.00	0.07	0.02	0.00	0.02
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	0.01	0.03	0.01	0.02	0.00	0.02	0.03	0.00
MnO	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.00	0.01
P ₂ O ₅	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.05
Cr ₂ O ₃	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01
TiO ₂	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.04	0.00	0.00
总量	103.27	101.95	104.50	101.37	104.34	101.74	98.58	97.86
An	3.10	0.88	2.82	0.26	4.73	3.00	0.02	0.04
Ab	96.22	98.32	96.16	99.67	94.51	95.94	7.17	7.31
Or	0.68	0.79	1.02	0.06	0.76	1.07	92.81	92.65

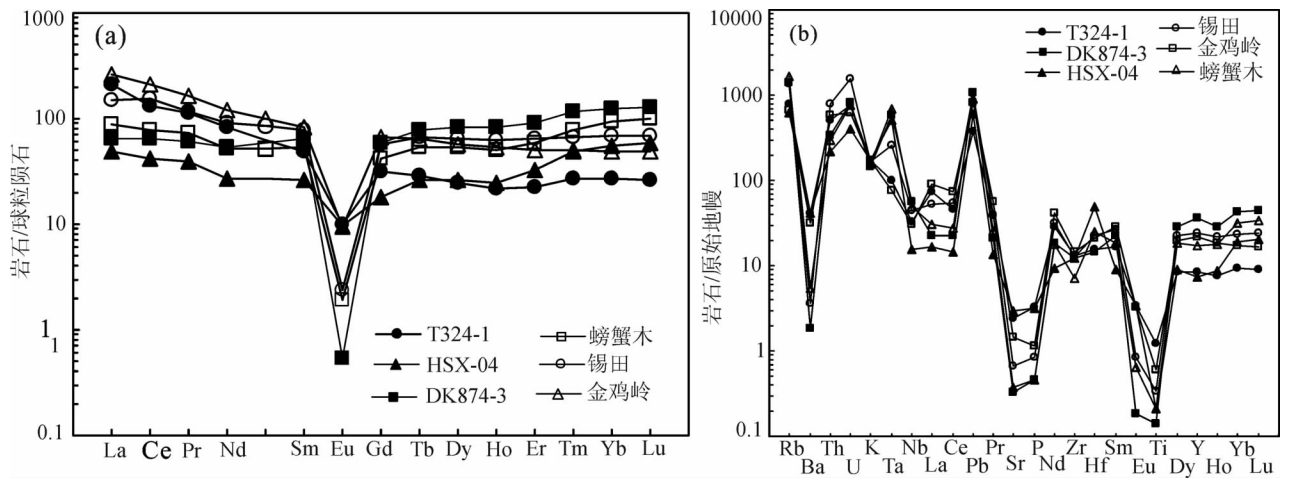


图 8 赣中乐安山心花岗岩稀土元素配分图和微量元素蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

螃蟹木和金鸡岭数据来自付建明等,2005;锡田数据来自周云等,2013

Fig. 8 Chondrite-normalized REE distribution patterns(a) and Primitive mantle-normalized spider diagram (b) of the Shanxin granites in Le'an, Central Jiangxi (normalization values after Sun and McDonough, 1989)
Data of Pangxiemu and Jinjiling after Fu Jian Ming et al. , 2005; data of Xitian after ZhouYun et al. , 2013

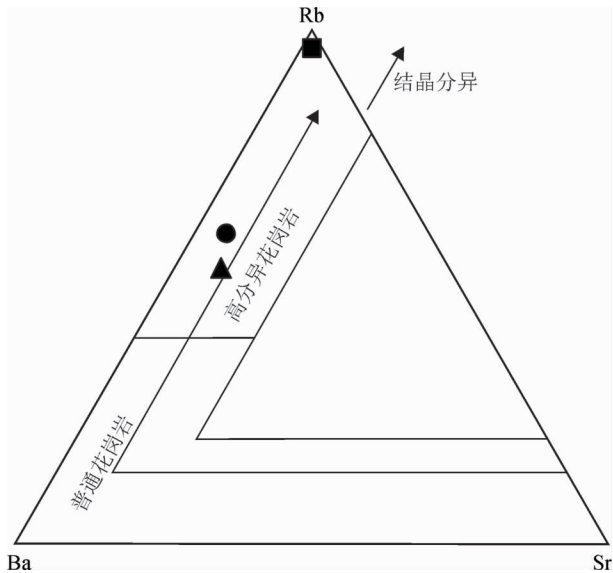


图 9 赣中乐安山心花岗岩的 Rb-Ba-Sr 三元图
(底图据 Bouse and Sokkary,1975)

Fig. 9 Samples Plots in the ternary Rb-Ba-Sr diagram
of the Shanxin granite in Le'an,Central Jiangxi
(modified after Bouse and Sokkary,1975)

3.3.3 同位素特征

对 DK874-3 样品进行了 Sr—Nd 同位素测试,对 T324-1 样的钾长石进行了 Pb 同位素测试(表 6)。由于 DK874-3 的 Rb/Sr 值较高(131.87),岩石的 Sr 同位素组成不具有明确的成因意义(毛建仁

等,2006)。以 152Ma 作为成岩年龄计算得到的 $\epsilon(t)$ 值为 -8.9,利用二阶段模式计算的模式年龄 $T_{2DM}=1662$ Ma,其 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值及 T_{2DM} 值都和湖南锡田含钨锡细粒花岗岩(周云等,2013)相一致。在 $\epsilon_{Nd}(t)-t$ 图解(图略)上,山心花岗岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值位于南岭及其邻区前寒武基底演化域中部。古老的二阶段模式年龄、较大的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 负值及岩体的过铝性和 Ti 的亏损暗示了山心花岗岩可能主要来源于地壳前寒纪基底(赵希林等,2013)。钾长石的铅同位素组成在铅构造演化模式图上(图略)投在地幔与上地壳演化曲线之间且靠近上地壳,说明 Pb 主要来源于上地壳可能有少量地幔物质的参与。

4 讨论

4.1 山心岩体成岩成矿年龄

本次获得乐安县南村—谷岗麻鸡嶂钼—钨(铜)多金属矿化区内与成矿关系密切的山心细粒二云母碱长花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 152.5 ± 1.3 Ma,与岩体旁侧麻鸡嶂钼钨多金属矿化带辉钼矿 Re-Os 年龄 $157.2 \sim 158.5$ Ma(宋凯琳等,2014)在误差范围内相一致。也与周边与钨矿有关的花岗岩体,如紫云山岩体[成岩年龄为 150 Ma 左右(刘颖,2013)]、浒坑岩体[151.6 ± 2.6 Ma(刘珺等,2008)]相一致,与南岭地区燕山早期花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄主要集中于 150~160 Ma(周新

表 3 赣中乐安山心花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析结果

测点号 (T324-1)	U	Th	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			谐和度
	($\times 10^{-6}$)	比值		1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄 (Ma)	1 σ	年龄 (Ma)	1 σ	年龄 (Ma)	1 σ	年龄 (Ma)	1 σ			
1-1	306	736	0.42	0.0517	0.0014	0.1705	0.0046	0.0004	0.0079	0.00078	271.3	59	159.8	4.0	152.4	2.4	105		
2-1	253	275	0.92	0.0488	0.0026	0.1581	0.0082	0.0005	0.0091	0.00158	139.0	120	149.0	7.2	149.7	2.9	99		
3-1	239	432	0.55	0.049	0.0021	0.162	0.0069	0.0004	0.0068	0.00088	146.7	98	152.5	6.1	152.8	2.8	99		
4-1	181	457	0.40	0.0491	0.0016	0.1644	0.0053	0.0004	0.0057	0.00049	152.1	72	154.6	4.6	154.8	2.5	100		
4-2	616	2152	0.29	0.048	0.0011	0.1598	0.0038	0.0004	0.0063	0.00068	97.7	54	150.5	3.3	153.8	2.3	98		
5-1	181	354	0.51	0.0482	0.0018	0.1606	0.0061	0.0004	0.0055	0.00049	109.3	87	151.2	5.3	153.9	2.6	98		
6-1	465	1548	0.30	0.0489	0.0013	0.1598	0.0043	0.0004	0.0065	0.0008	145.2	59	150.5	3.7	150.9	2.4	100		
7-1	215	243	0.89	0.0492	0.0033	0.1596	0.0104	0.0005	0.0056	0.00072	155.4	149	150.4	9.1	150.1	3.4	100		
8-1	1146	2086	0.55	0.0553	0.0014	0.532	0.0136	0.0011	0.0208	0.0031	425.1	53	433.1	9.0	434.6	6.6	100		
9-1	856	2913	0.29	0.0494	0.001	0.1669	0.0035	0.0004	0.0073	0.00064	166.6	44	156.8	3.0	156.1	2.3	101		
10-1	248	673	0.37	0.05	0.0015	0.1644	0.0049	0.0004	0.0064	0.00056	194.8	66	154.6	4.3	152.0	2.4	102		
11-1	356	532	0.67	0.0491	0.0015	0.1624	0.005	0.0004	0.0062	0.0005	151.3	70	152.8	4.4	153.0	2.5	100		
12-1	1284	2322	0.55	0.0491	0.001	0.1608	0.0035	0.0004	0.0057	0.00042	150.7	46	151.4	3.1	151.4	2.3	100		
13-1	706	1232	0.57	0.0531	0.0021	0.1723	0.0067	0.0004	0.0071	0.00133	331.8	88	161.4	5.8	150.1	2.8	107		
14-1	802	1601	0.50	0.0495	0.0013	0.1769	0.0048	0.0004	0.0064	0.00078	169.3	60	165.4	4.1	165.4	2.6	100		
15-1	278	520	0.53	0.0498	0.002	0.1779	0.0073	0.0005	0.0065	0.00085	185.5	93	166.3	6.3	165.2	3.0	101		
16-1	243	340	0.71	0.0502	0.0022	0.1654	0.0072	0.0005	0.0033	0.00022	203.5	99	155.4	6.3	152.3	2.9	102		
17-1	509	1013	0.50	0.0498	0.0022	0.1615	0.007	0.0005	0.0051	0.00083	187.1	99	152.0	6.1	150.1	2.9	101		
18-1	129	145	0.89	0.0653	0.0048	0.2123	0.0152	0.0006	0.0066	0.00115	784.7	148	195.5	12.7	150.5	3.8	130		
19-1	195	254	0.77	0.0448	0.0023	0.1464	0.0075	0.0004	0.0055	0.00068	0.1	54	138.7	6.6	151.2	2.8	92		
20-1	665	932	0.71	0.0487	0.0013	0.164	0.0043	0.0004	0.0018	0.00009	132.7	59	154.2	3.8	155.6	2.5	99		
21-1	261	280	0.93	0.0579	0.002	0.688	0.024	0.0016	0.0128	0.0015	524.2	75	531.6	14.4	534.0	9.3	100		
22-1	901	965	0.93	0.0981	0.0035	0.2521	0.0087	0.0004	0.0013	0.00007	1587.6	65	228.3	7.0	119.0	2.5	192		
23-1	206	194	1.06	0.0583	0.0062	0.1969	0.0201	0.0008	0.006	0.00145	541.7	217	182.5	17.1	156.4	5.1	117		

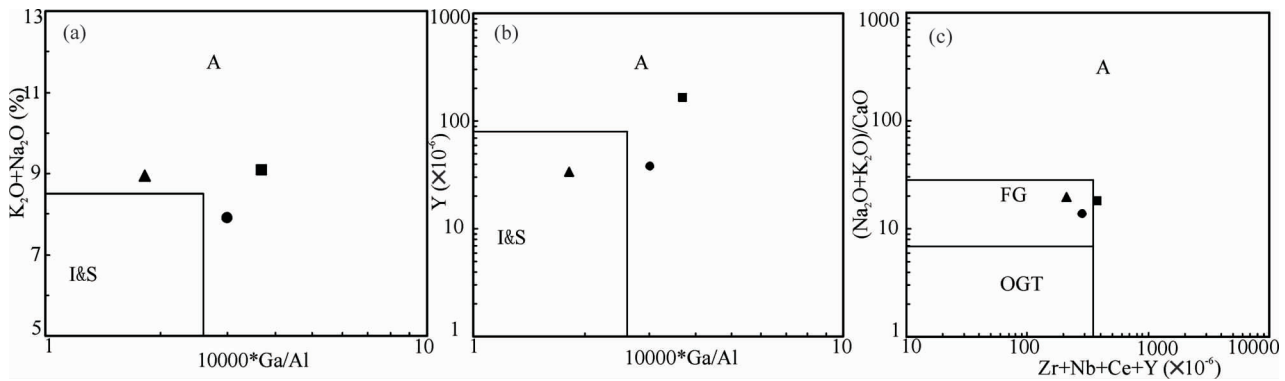


图 10 赣中乐安山心花岗岩 K_2O+Na_2O 和 Y 与 $10000\times Ga/Al$ 图解(a,b)和 $(Na_2O+K_2O)/CaO$ 与 $(Zr+Nb+Ce+Y)$ 图解(c)(据 Whalen et al. , 1987)

Fig. 10 K_2O+Na_2O and Y vs $10000\times Ga/Al$ index plot (a,b) and $(Na_2O+K_2O)/CaO$ vs $(Zr+Nb+Ce+Y)$ classification diagram for the Shanxin granite in Léan, Central Jiangxi (c) (after Whalen et al. , 1987)

FG—分异型的长英质花岗岩;OGT—未分异的 I、S 和 M- 型花岗岩
FG—Fractionated felsic granites; OGT—unfractionated I、S- and M- granities

民,2003)之间相吻合,说明晚侏罗世也是赣中地区一个重要的花岗岩侵位时期。赣中周边地区与花岗岩相关的钨锡钼多金属成矿年龄也主要集中于 150~160Ma 之间,如浒坑钨矿成矿年龄为 150.2 ± 2.2 Ma(刘珺等,2008),徐山钨矿成矿年龄 147 Ma(李光来等,2011),下桐岭钨矿成矿年龄 150.6 ± 1.3 Ma(李光来等,2011),熊家山钼矿成矿年龄 $151.7\sim161.6$ Ma(孟祥金等,2007)。此外,也与南岭地区一些铝质 A 型花岗岩成岩及相关钨锡成矿年龄

主要集中于 144~161 Ma (Li et al. ,2007a,2007b) 相近,属于华南地区中生代大规模成岩成矿作用高峰期的产物(毛景文等,2004;华仁民等,2005)。

4.2 山心花岗岩成因类型

目前国内外最流行的花岗岩成因类型划分方案是分为 I、S、A 和 M 型(如 Chappell and White, 1974; Whalen et al. ,1987; Bonin,2007),King 等(1997)进一步区分出铝质 A 型。虽然对这些不同类型花岗岩的区分标志进行了大量研究(如

表 4 赣中乐安山心花岗岩主量元素分析结果(%)及相关参数

Table 4 Major element compositions(%) of the Shanxin granites the in Léan, Central Jiangxi, and relative parameters

样品号	T324-1	DK874-3	HSX-04	平均值	样品号	T324-1	DK874-3	HSX-04	平均值
SiO ₂	71.52	74.65	74.72	73.63	Q	34.04	29.29	31.78	31.70
TiO ₂	0.27	0.03	0.05	0.12	An	2.21	2.04	1.82	2.02
Al ₂ O ₃	14.68	13.77	13.93	14.13	Ab	23.77	39.64	32.62	32.01
Fe ₂ O ₃	1.85	0.48	0.19	0.84	Or	30.92	26.32	30.54	29.26
FeO	0.80	0.70	0.50	0.67	C	3.85	0.57	1.45	1.96
MnO	0.07	0.11	0.05	0.08	Hy	2.74	1.22	1.26	1.74
MgO	0.54	0.07	0.19	0.27	Il	0.52	0.06	0.09	0.22
CaO	0.58	0.50	0.46	0.51	Mt	1.71	0.7	0.28	0.90
Na ₂ O	2.76	4.66	3.82	3.75	Ap	0.17	0.02	0.16	0.12
K ₂ O	5.14	4.43	5.12	4.90	Cc	0.09	0.14		0.12
P ₂ O ₅	0.07	0.01	0.07	0.05	DI	91.6	96.1	96.1	94.7
H ₂ O+	0.04	0.06		0.05	K ₂ O+Na ₂ O	7.90	9.09	8.94	8.64
CO ₂	1.53	0.42		0.98	ACNK	1.32	1.03	1.10	1.15
烧失	1.47	0.42	0.78	0.89	K ₂ O/Na ₂ O	1.86	0.95	1.34	1.38
总量	99.85	99.89	99.86	99.87	FeOt/MgO	4.56	16.17	3.55	8.10
AR	1.57	4.51	2.13	2.80	CaO/Na ₂ O	0.21	0.11	0.12	0.15
TZr(℃)	779	761	766	768	Al ₂ O ₃ /TiO ₂	54.37	459.00	309.56	274.31

注: $T_{Zr}=12900/(2.95+0.85\times M+\ln D_{Zr})$, zircon/melt)(Watson and Harrison, 1983), $D_{Zr}=\omega(Zr, \text{zircon})/\omega(Zr, \text{melt})=49600/\text{全岩中的锆含量}-273.5$; $M=[n(Na)+n(K)+2n(Ca)]/[n(Al)+n(Si)]$ (阳离子数比率)。

Chappell and White, 1992; Whalen et al., 1987; Landenberger and Collins, 1996; Clemens, 2003)。但有时仍难以将它们有效区分,特别是对于经历了高度的分异结晶、矿物成分趋近于低共结的花岗岩更是如此(Wu Fu Yuan et al., 2003; Li Xian Hua et al., 2007a)。比如,高度结晶分异的 I 型花岗岩可以与 S 型花岗岩一样具有相似的过铝质特征(Chappell, 1999);高分异的 S 型花岗岩具有与 A 型花岗岩富集 Nb、Ga、Zn 和 Sc 相近的特征(Champion and Bultitude, 2013)。

在区别普通花岗岩和高分异花岗岩的 Sr—Rb—Ba 图解(图 9)(El Bouse and El Sokkary, 1975)中,山心花岗岩样品点均落在高分异型区间。山心花岗岩是一种高钾钙碱性过铝质花岗岩(图 7a、b,表 4),主量元素富硅碱,贫镁钙等化学成分特征与华南地区金鸡岭(付建明等, 2005)、千里山(全立华, 2013)等岩体的铝质 A 型花岗岩相似。稀土

元素总量($88.39\times10^{-6}\sim212.63\times10^{-6}$)和高场强元素总量 Zr+Nb+Ce+Y($209.4\times10^{-6}\sim380.1\times10^{-6}$)较高,但是平均值略低于典型 A 型花岗岩 REE(250×10^{-6})和 HFSE(350×10^{-6})(Whalen et al., 1987)。不同的花岗岩类型往往具有不同的稀土配分型式,且在岩浆结晶分异过程中,稀土含量虽然总体上往往降低,但配分型式基本一致。山心花岗岩具有 A 型花岗岩常具有的"海鸥型"稀土配分模式。其 $10000\times\text{Ga}/\text{Al}$ 值变化于 1.82~3.69,平均值为 2.84,略大于典型 A 型花岗岩的 Ga/Al 值,在判别 A 型花岗岩与非 A 型花岗岩的多种图解中,样品点多数落在 A 型花岗岩和高分异花岗岩区域内(图 10),部分样品由于低 $10000\times\text{Ga}/\text{Al}$ 和 Zr+Nb+Ce+Y 值没有落入 A 型区域,是由于强烈的分异结晶作用、流体作用、蚀变作用的影响下, Ga、Zr、Ce、Nb 等元素含量明显降低的结果。综合山心单元的岩石矿物学与地球化学特点,并与南岭地区

表 5 赣中乐安山心花岗岩微量元素和稀土元素组成($\times10^{-6}$)

Table 5 Trace and rare earth element compositions of the Shanxin granites in Lēan, Central Jiangxi($\times10^{-6}$)

样品号	T324-1	DK874-3	HSX-04	平均值	样品号	T324-1	DK874-3	HSX-04	平均值
La	50.22	15.31	11.60	25.71	Rb	506.3	896.7	399	600.67
Ce	80.14	39.91	25.60	48.55	Ba	287.5	13	288	196.17
Pr	10.79	5.85	3.70	6.78	Th	43.17	28.37	18.4	29.98
Nd	38.92	24.99	12.70	25.54	U	16.19	17.36	8.46	14.00
Sm	7.38	10.02	4.07	7.16	Ta	4.053	24.16	21.1	16.44
Eu	0.57	0.03	0.57	0.39	Nb	23.46	39.88	11.2	24.85
Gd	6.47	12.24	3.71	7.47	Sr	51	6.8	61.9	39.90
Tb	1.08	2.96	0.98	1.67	Zr	144.8	136.8	139	140.20
Dy	6.20	20.97	6.65	11.27	Hf	4.83	4.56	15	8.13
Ho	1.23	4.69	1.41	2.44	Y	38.09	163.51	33.6	78.40
Er	3.74	15.25	5.35	8.11	Pb	26.89	77.07	42.1	48.69
Tm	0.68	2.97	1.26	1.64	Ga	23.32	26.86	13.4	21.19
Yb	4.53	21.42	9.27	11.74	Zn	109.1	42.11	32.6	61.27
Lu	0.68	3.26	1.52	1.82	Ni	3.89	2.64	2.41	2.98
ΣREE	212.63	179.86	88.39	160.29	V	13.53	0.84	6.18	6.85
δEu	0.25	0.01	0.44	0.23	Cr	11.9	18.1	5.65	11.88
LREE/HREE	7.64	1.15	1.93	3.57	Co	2.14	0.70	1.27	1.37
(La/Yb) _n	7.95	0.51	0.90	3.12	Li	50.92	330.9	62.3	148.04
(La/Sm) _n	4.39	0.99	1.84	2.41	Cu	51.72	6.87	29.5	29.36
(Gd/Yb) _n	1.18	0.47	0.33	0.66	Cs	18.34	42.38	15.3	25.34
Zr/Hf	30	30	9.27	23.09	Sc	4.47	8.55	2.95	5.32
Rb/Sr	9.93	131.87	6.45	49.41	Be	9.452	22.65	67.7	33.27
Rb/Ba	1.76	68.98	1.39	24.04	W	7.95	53.16	15.3	25.47
Ba/Rb	0.57	0.01	0.72	0.43	Sn	34.52	39.46	2.2	25.39
Rb/Zr	3.50	6.55	2.87	4.31	Mo	1.93	2.63	2.87	2.48
K/Rb	84.28	41.01	106.53	77.27	Au	0.38	0.50	3.2	1.36
Nb/Ta	5.79	1.65	0.53	2.66	Ag	0.11	0.15	0.12	0.13
10000Ga/Al	3.00	3.69	1.82	2.84	Bi	5.70	28.35	2.77	12.27
Zr+Nb+Ce+Y	286.49	380.10	209.40	292.00	Sb	0.14	0.11	0.08	0.11

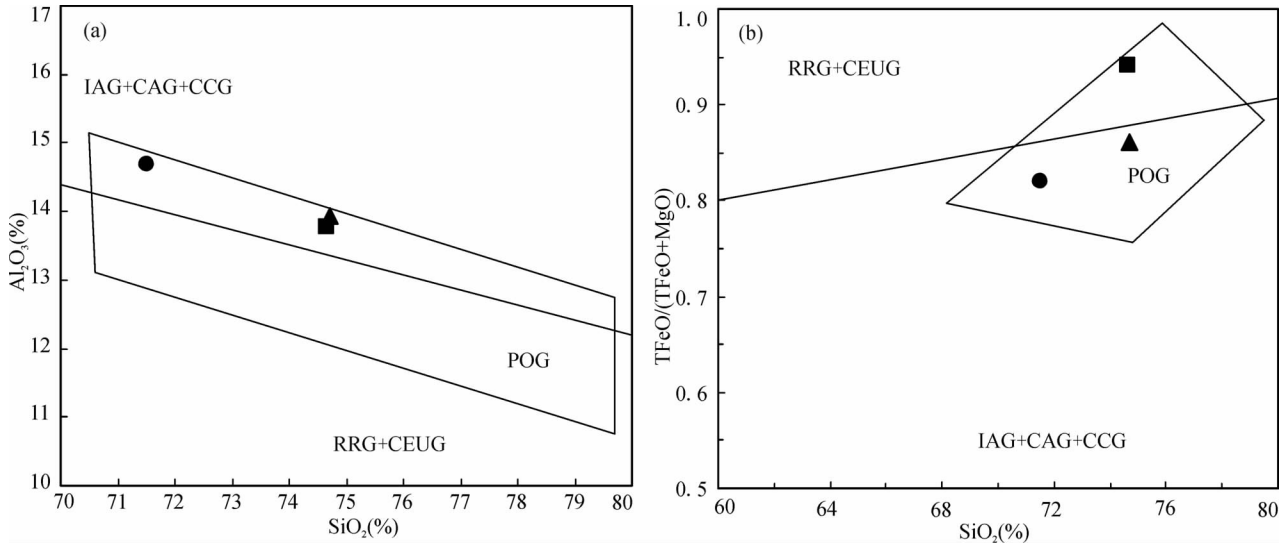


图 11 赣中乐安山心花岗岩构造环境判别图解(底图据 Maniar and Piccoli,1989)

Fig. 11 Tectonic environment discrimination diagrams for the Shanxin granite in Le'an, Central Jiangxi (after Maniar and Piccoli,1989)

IAG—岛弧花岗岩;CAG—大陆弧花岗岩;CCG—陆陆碰撞花岗岩;POG—后造山花岗岩;RRG—裂谷有关花岗岩;
CEUG—大陆抬升花岗岩 IAG—*island arc granites*; CAG—*continental arc grnites*;CCG—*continental collision granites*;
POG—*post-orogenic granites*;RRG—*rift related granites*;CEUG—*continental epirogenic uplift granites*

同时期的金鸡岭、螃蟹木、千里山、锡田等铝质 A 型花岗岩对比,山心花岗岩可能为高分异的铝质 A 型花岗岩。

4.4 构造背景

前人对华南大规模的燕山期岩浆活动及其成矿作用开展了大量的研究工作(毛景文等,2004,2008;华仁民等,2005,2010),并对燕山期大地构造背景提出了不同的认识,但对于晚中生代华南地区发育多期次伸展作用基本达成共识(李献华,1999)。晚中生代华南地区的多期次伸展作用,存在两种不同的划分方案:李献华(1999)划分出 5 次花岗岩侵位事件、谢桂青(2003)提出华南地区的岩石圈伸展出现于 3 个主要阶段。山心岩体形成于晚侏罗世(约 153Ma),对应于李献华(1999)划分的 164~153Ma 阶段和谢桂青(2003)划分的 180~155Ma 阶

段的伸展构造背景。刘颖(2013)提出赣中地区的紫云山岩体(U-Pb 年龄 153~158Ma)形成于陆内造山向板内伸展过渡的后造山构造背景;刘珺等(2008)提出武功山地区浒坑岩体(U-Pb 年龄 151.6±2.6Ma)形成于岩石圈伸展减薄环境,山心岩体与上述岩体具有一致的成岩时间,可能也具有相同的伸展构造背景。在 Maniar and Piccoli,(1989)的主量元素构造环境判别图解(图 11)上,山心花岗岩所有样品都落于后造山花岗岩区域中;在 Pearce et. al,(1984)的微量元素构造环境判别图解中(图 12),样品点落入板内区或靠近板内区,所以山心岩体可能形成于碰撞造山向板内伸展拉张转换的后造山构造背景。

4.5 与钨锡多金属成矿关系

山心花岗岩与麻鸡嶂钨锡多金属矿化区在空间

表 6 赣中乐安山心花岗岩 Sr-Nd-Pb 同位素组成

Table 6 Sr-Nd-Pb isotopic compositions of the Shanxin granite in Le'an, Central Jiangxi

样品号	年龄(Ma)	Sm($\times 10^{-6}$)		Nd($\times 10^{-6}$)		$n(^{147}\text{Sm})/n(^{144}\text{Nd})$		$n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})\pm\sigma$		$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$T_{2\text{DM}}(\text{Ma})$
DK874-3	152	10.02		24.99		0.2425		0.51223 $\pm$ 0.000012		-8.9	1662
样品号	年龄(Ma)	Rb ($\times 10^{-6}$)		Sr($\times 10^{-6}$)		$n(^{87}\text{Rb})/n(^{86}\text{Sr})$		$n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})\pm\sigma$			
DK874-3	152	896.7		6.8		381.5590368		2.63939 $\pm$ 0.000465			
单元及岩性	样号	样品名	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	表面年龄(Ma)		Φ 值	μ 值	Th/U	
山心花岗岩	T324-1	钾长石	18.178 $\pm$ 1	15.598 $\pm$ 1	38.580 $\pm$ 2	333		0.598	9.49	3.92	

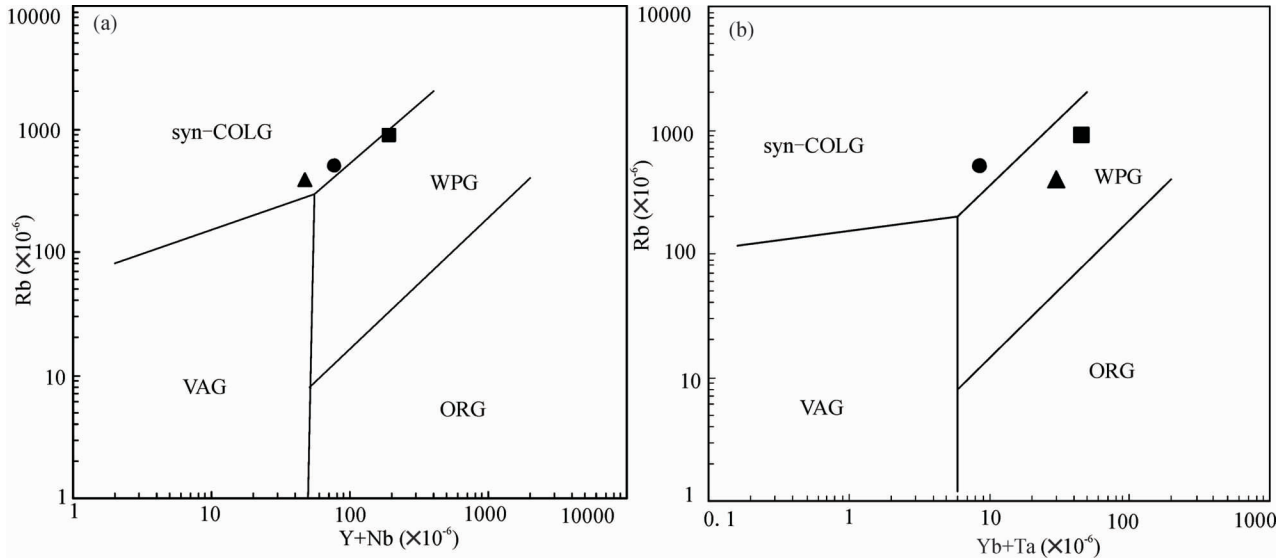


图 12 山心花岗岩 Rb—(Y+Nb)和 Rb—(Yb+Ta)构造环境判别图解(底图据 Pearce et. al,1984)

Fig. 12 Rb—(Y+Nb) and Rb—(Yb+Ta) tectonic environment discrimination diagrams for Shanxin granite(after Pearce et. al,1984)

syn-COLG—同碰撞花岗岩;WPG—板内花岗岩;VAG—火山弧花岗岩;ORG—大洋脊花岗岩

syn-COLG—syn-collision granites;WPG—within plate granites;VAG—volcanic arc granites;ORG—ocean ridge granites

上相伴,在成岩成矿时间上一致,暗示了岩体与钨锡多金属矿具有密切的成因联系。

大量高分异长英质岩脉的出现可能对寻找隐伏岩体和矿体具有重要的意义(谢磊等,2013)。山心单元岩浆演化晚期的高分异花岗岩的特性及其内部和周围发育较多石英脉、花岗伟晶岩脉、花岗细晶岩脉、云英岩脉等长英质岩脉现象,暗示其深部可能存在较大的燕山期隐伏岩体。

山心细粒二云母花岗岩富硅碱,贫镁钙,轻重稀土分异不明显、强烈的负锶异常,配分曲线呈"海鸥型"的地球化学特征与含钨花岗岩和含钨锡花岗岩(陈骏等,2008)基本一致。在 Nb-Y-Ce 和 (Zr+Nb+Ce+Y)-(Ba+Sr)-Rb(陈骏等,2008)等不同类型的含矿花岗岩地球化学成分判别图上(图略),山心花岗岩落入含钨花岗岩和含钨锡花岗岩区域。基于元素在岩浆演化不同阶段迁移特性,元素之间的相关系数和比值可能对花岗岩的成矿潜力有一定的指示作用。山心花岗岩的 Ba/Rb 平均值为 0.42, Rb/Zr 值为 2.87~6.55,暗示它可能为富钨花岗岩(黄兰椿等,2013)。

综上所述,山心单元深部可能有较好的钨锡钼多金属成矿潜力。

5 结论

(1)赣中乐安山心单元细粒二云母碱长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 $152.5 \pm 1.3 \text{ Ma}$ ($n=17$, MSWD=0.67),形成于晚侏罗世,与南岭地区主要的钨锡多金属成矿花岗岩形成时代一致(165~150Ma)。

(2)山心花岗岩富硅、碱,过铝,贫钙、镁,富集 Rb、Th、U、K、Ta 等,亏损 Sr、Ba、Ti、P、Eu 等元素,稀土配分曲线为"海鸥型",地球化学特征与铝质 A 型花岗岩相似。可能是岩浆演化后期高分异的铝质 A 型花岗岩。

(3)Sm-Nd-Pb 同位素研究表明,山心花岗岩主要来源于地壳物质的部分熔融,可能有少量地幔物质的参与;可能形成于碰撞造山向板内伸展拉张转换的后造山构造背景。

(4)山心岩体与钨锡多金属矿化具有密切成因联系,其深部可能存在较大的隐伏岩体并具有良好的成矿潜力。

参 考 文 献

- 陈骏,陆建军,陈卫锋,王汝成,马东升,朱金初,张文兰,季峻峰.
2008. 南岭地区钨锡钼钽花岗岩及其成矿作用. 高校地质学报,
14(4),3~17.

- 丰成友,张德全,项新葵,李大新,瞿泓澄,刘建楠,肖晔. 2012. 赣西北大湖塘钨矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其意义. 岩石学报, 28(12): 74~84.
- 付建明,马昌前,谢才富,张业明,彭松柏. 2005. 湖南金鸡岭铝质 A 型花岗岩的厘定及构造环境分析. 地球化学, 34(3): 215~226.
- 华仁民,陈培荣,张文兰,陆建军. 2005. 论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用. 矿床地质, 24(2): 15~23.
- 华仁民,李光来,张文兰,胡东泉,陈培荣,陈卫锋,王旭东. 2010. 华南钨和锡大规模成矿作用的差异及其原因初探. 矿床地质, 29(1): 12~26.
- 黄兰椿,蒋少涌. 2013. 江西大湖塘富钨花岗岩斑岩年代学、地球化学特征及成因研究. 岩石学报, 29(12): 4323~4325.
- 李光来,华仁民,黄小娥,韦星林,屈文俊,王旭东. 2011. 赣中下桐岭钨矿辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义. 矿床地质, 30(6): 116~125.
- 李光来,华仁民,韦星林,王旭东,黄小娥. 2011. 江西中部徐山钨铜矿床单颗粒白云母 Rb-Sr 等时线定年及其地质意义. 地球科学, 36(2): 282~288.
- 李献华. 1999. 华南白垩纪岩浆活动与岩石圈伸展——地质年代学与地球化学限制. 北京: 科学出版社, 264~275.
- 李建华. 2013. 华南中生代大地构造过程. 导师: 李廷栋. 中国地质科学院. 博士学位论文.
- 刘珏,毛景文,叶会寿,谢桂青,杨国强,章伟. 2008. 江西省武功山地区浒坑花岗岩的锆石 U-Pb 定年及元素地球化学特征. 岩石学报, 24(8): 151~160.
- 刘珏,叶会寿,谢桂青,杨国强,章伟. 2008. 江西省武功山地区浒坑钨矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义. 地质学报, 82(11): 120~127.
- 刘颖. 2013. 江西省玉华山地区紫云山岩体年代学、地球化学特征及地质意义. 导师: 潘家永. 东华理工大学. 硕士学位论文.
- 毛景文,谢桂青,郭春丽,陈毓川. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景. 岩石学报, 23(10): 11~20.
- 毛景文,谢桂青,郭春丽,袁顺达,程彦博,陈毓川. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. 高校地质学报, 14(4): 54~70.
- 毛景文,谢桂青,李晓峰,张长青,梅燕雄. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展. 地学前缘, 11(1): 46~56.
- 孟祥金,侯增谦,董光裕,刘建光,屈文俊,杨竹森,左力艳,万禄进,肖茂章. 2007. 江西金溪熊家山钨矿床特征及其 Re-Os 年龄. 地质学报, 81(7): 946~951.
- 裴荣富,王永磊,王浩琳. 2009. 南岭钨锡多金属矿床成矿系列与构造岩浆侵位接触构造动力成矿专属. 中国地质, 36(3): 5~11.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征. 地质通报, 31(7): 23~41.
- 宋凯琳,张树明,魏正宇,张良. 2014. 赣中麻鸡嶂钨多金属矿化带辉钼矿 Re-Os 年龄及意义. 东华理工大学学报(自然科学版), 37(1): 21~25.
- 全立华. 2013. 湖南郴州千里山含钨锡金属花岗岩岩石成因及成矿模式探讨. 导师: 汪洋. 中国地质大学(北京). 硕士学位论文.
- 王汝成,朱金初,张文兰,谢磊,于阿朋,车旭东. 2008. 南岭地区钨锡花岗岩的成矿矿物学: 概念与实例. 高校地质学报, 14(4): 29~39.
- 谢磊,王汝成,朱金初,陆建军,张文兰,车旭东,章荣清,黄芳芳. 2013. 湘南矿集区长英质岩脉的特征及其成矿、找矿意义. 岩石学报, 29(12): 4261~4280.
- 姚远,陈骏,陆建军,章荣清. 2013. 湘东锡田 A 型花岗岩的年代学、Hf 同位素、地球化学特征及其地质意义. 矿床地质, 32(3): 13~34.
- 赵希林,毛建仁,刘凯,叶海敏,王开虎. 2013. 赣南与钨锡矿化有关的九曲二云母花岗岩的形成时代及其岩石成因初探. 地质论评, 59(1): 85~98.
- 周云,梁新权,梁细荣,伍式崇,蒋英,温淑女,蔡永丰. 2013. 湖南锡田含 W—Sn A 型花岗岩年代学与地球化学特征. 大地构造与成矿, 37(3): 511~529.
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考. 高校地质学报, 9(4): 64~73.
- Altherr R, Holl A and Hegner E. 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). Lithos, 50(1): 51~73.
- Champion D C and Bultitude R J. 2013. The geochemical and Sr—Nd isotopic characteristics of Paleozoic fractionated S-types granites of north Queensland: Implications for S-type granite petrogenesis. Lithos, 162~163: 37~56.
- Chappell B and White A. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 83(1~2): 1~26.
- Chappell B W and White A J R. 2001. Two contrasting granite types; 25 years later. Australian Journal of Earth Sciences, 48(4): 489~499.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. Geology, 20(7): 641~644.
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust—mantle system. Chemical Geology, 120(3): 347~359.
- Irber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63(3): 489~508.
- Kalsbeek F, Jepsen H F and Nutman A P. 2001. From source migmatites to plutons; tracking the origin of ca. 435 Ma S-type granites in the East Greenland Caledonian orogen. Lithos, 57(1): 1~21.
- King P L, White A J R, Chappell B W and Allen C M. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. Journal of Petrology, 38(3): 371~391.
- Koester E, Pawley A R, Fernandes L, Porcher C and Soliani E. 2002. Experimental melting of cordierite gneiss and the petrogenesis of syntranscurrent peraluminous granites in southern Brazil. Journal of Petrology, 43(8): 1595~1616.
- Li Xian Hua, Liu Dun Yi, Sun Min, Li Wu Xian, Liang Xi Rong and Liu Ying. 2004. Precise Sm—Nd and U-Pb isotopic dating of the super-giant Shizhuyuan polymetallic deposit and its host granite, Southeast China. Geol Mag, 141(2): 225~231.
- Li Xian Hua, Li Zheng Xian, Li Wu Xian, Liu Ying, Yuan Chao, Wei Gang Jian and Qi Chang Shi. 2007a. U-Pb zircon, geochemical and Sr—Nd—Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? Lithos, 96(1~2): 86~204.
- Li Xian Hua, Li Wu Xian and Li Zheng Xian. 2007b. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian

granitoids in the Nanling Range, South China. Chinese Science Bulletin, 52(14):1873~1885.

Miller C F, McDowell S M and Mapes R W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. Geology, 31(6): 529~532.

Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. Geological Soc America Bulletin, 101(5): 635~643.

Patchett P, White W, Feldmann H, Kielinczuk S and Hofmann A. 1984. Hafnium/rare earth element fractionation in the sedimentary system and crustal recycling into the Earth's mantle, Earth and Planetary Science Letters, 69(2): 365~378.

Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. Earth and Planetary Science Letters, 64(2): 295~304.

Wu Fu Yuan, Yang Yue Heng, Xie Lie Wen, Yang Jin Hui and Xu Ping. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in the U-Pb geochronology. Chemical Geology, 234 (1~2):105~126.

Geological, Geochemical Characteristics and LA-ICP-MS Dating of the Shanxin Plutons Related to Tungsten—Tin—Polymetallic Mineralization, Le'an Central Jiangxi and Its Mineralization Significance

SHI Liancheng^{1,2,3)}, XIE Caifu^{1,2)}, GUO Fusheng¹⁾, ZHOU Wanpeng¹⁾,
ZHANG Shuming¹⁾, JIANG Yongbiao²⁾, LIU Linqing²⁾

1)Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, Ministry of Education,
East China Institute of Technology, Nanchang, 330013;

2)School of Earth Science, East China Institute of Technology, Nanchang, 330013;

3)Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang, 050002

Abstract: Shanxin granite intrusion is located in the Majizhang area, Le'an, Central Jiangxi Province, where Mo-W-Sn poly-metallic mineralization occurs. Through precise LA-ICP-MS U-Pb dating of zircon from Shanxin fine two-mica alkali-feldspar granite, the crystallization age of the intrusion was determined to be 152.5 ± 1.3 Ma, corresponding to Late Jurassic era. The results of mineral chemistry indicate that micas are muscovite and ferrimuscovite, feldspars are albite and orthoclase. The and feladspars are all alkali feldspar. The granties are characterized by high in silicon, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ aluminum, low in calcium and magnesium, slightly to strongly peraluminous. The granites also show strong depletion of Sr, Ba, Ti, P and Eu, enrichment of Rb, Th, Ta and LREE, high Ga/Al and strong negative Eu anomaly. The chondrite-normalized patterns of rare earth elements are in seagull forms. The characteristics of the Shanxin granite are similar to that of aluminous A-type granite of the Nanling area. The Shanxin fine-granited granite is of A-type. The characteristics of high Rb/Sr and Rb/Ba ratios, low Nb/Ta, Zr/Hf and K/Rb ratios indicate that the magma experienced a strong fractional crystallization process and fluid process. Its $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ value is -8.9 and the calculated two-stage modle age of Nd isotope is 1662Ma, suggesting that the magma derived from the partial melting of old continental crust rocks. Combined with the previous research results, the granites of Shanxin unit might form in post-orogenic tectonic environment that is the transition from collision orogenic to intraplate extension. The development of abundant faults and felsic dykes and the W-bearing granite suggest that there may be a large concealed rock which might have good potential for tungsten—tin mineralization.

Key words: Sinian (Ediacaran); Cambrian; South China; siliceous rock; geochemistry; sedimentary environment