

江西龙南稀土花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、 内生矿化特征及成因讨论

赵 芝¹⁾, 王登红¹⁾, 陈振宇¹⁾, 陈郑辉¹⁾, 郑国栋¹⁾, 刘新星²⁾

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) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

摘 要: 江西省龙南地区离子吸附型稀土成矿花岗岩出露广泛, 然而由于缺乏精确的同位素年代学依据, 致使对各岩体的侵位时代、岩石成因等方面的认识存在分歧。本文对足洞、牛坑及半坑花岗岩的风化壳(或基岩)样品进行了 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 定年, 获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为: (168.2 ± 1.2) Ma、 (168.3 ± 1.7) Ma 和 (209.75 ± 0.86) Ma, 表明足洞和牛坑花岗岩体的侵位时代一致, 均形成于燕山期, 晚于寨背—关西岩体(~ 195 Ma), 更晚于印支期侵位的半坑岩体。足洞—牛坑岩体的稀土配分类型为重稀土型, 岩石学、矿物学方面具有相似性, 可能为同源岩浆同期分离结晶的产物; 寨背—关西岩体和半坑岩体的稀土配分类型均为轻稀土型, 岩石学、矿物学方面具相似性, 可能为同源岩浆不同期次形成的产物。而足洞—牛坑岩体与寨背—关西岩体具有不同的稀土矿物组合、稀土配分模式和微量元素特征(寨背—关西花岗岩风化壳的 Zr/Hf 比值($20\sim 60$)大于足洞—牛坑岩体(< 20), 且 Zr/Hf 比值与 Nb/Ta 比值正相关), 可能来自不同的岩浆源区。

关键词: 稀土花岗岩; 锆石年龄; 稀土内生矿化; 岩石成因; 江西龙南

中图分类号: P618.7; P597 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2014.06.07

Zircon U-Pb Age, Endogenic Mineralization and Petrogenesis of Rare Earth Ore-bearing Granite in Longnan, Jiangxi Province

ZHAO Zhi¹⁾, WANG Deng-hong¹⁾, CHEN Zhen-yu¹⁾, CHEN Zheng-hui¹⁾,
ZHENG Guo-dong¹⁾, LIU Xin-xing²⁾

1) Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083

Abstract: Granites related to ion adsorption type rare earth ore deposits are widely exposed in Longnan area, Jiangxi Province. However, there are different views concerning the emplacement age and petrogenesis of the granites due to the lack of accurate isotopic geochronologic data. In this paper, the authors conducted research on the zircon U-Pb chronology of the weathering crust or granite samples from Zudong, Niukeng and Bankeng granites by using Laser Ablation-Multicollector Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (La-MS-ICPMS). Three weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages obtained are (168.2 ± 1.2) Ma, (168.3 ± 1.7) Ma and (209.75 ± 0.86) Ma respectively. These data show that the emplacement ages of the Zudong and Niukeng granites are consistent with each other in consideration of the errors, suggesting the Yanshanian period. The ages are younger than the age of the Zhaibei-Guanxi granite (~ 195 Ma), and are much younger than the age of Bankeng granite which was emplaced during the Indosinian period. The Zudong and Niukeng granites have similar petrologic and

本文由中国地质调查局地质大调查项目“我国离子吸附型稀土战略调查及研究”(编号: 1212011220804)和“南岭岩浆岩成矿专属性”(编号: 1212011120989)联合资助。

收稿日期: 2013-12-30; 改回日期: 2014-08-23。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 赵芝, 女, 1984 年生。博士, 助理研究员。主要从事岩石、矿床地球化学研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: zhaozhi_sun@163.com。

mineralogical characteristics as well as heavy rare earth distribution patterns, implying that they might be products of the same stage of the comagmatic evolution. The Zhaibei-Guanxi and Bankeng granites also have similar petrologic and mineralogical characteristics and light rare earth distribution patterns, suggesting that they might be products of different stages of the comagmatic evolution. A comparison between the Zudong-Niukeng granite and the Zhaibei-Guanxi granite shows that they have different rare earth minerals, rare earth distribution patterns and trace elements characteristics (the Zr/Hf ratios of the weathering crust samples from the Zhaibei-Guanxi granite (20~60) are higher than those of the Zudong-Niukeng granite (<20), and they are positively correlated with the Nb/Ta ratios). It is believed that these granites originated from different magmatic source areas.

Key words: rare earth ore-bearing granite; zircon U-Pb age; endogenic mineralization; petrogenesis; Longnan region

江西龙南地区轻、重稀土矿床类型发育齐全,是华南造山系南岭造山带风化壳离子吸附型稀土矿矿集区(袁忠信等, 2013)内最具代表性的成矿地区之一,也是我国乃至全球重要的重稀土资源生产地。区内密集分布的成矿岩体(如牛坑、足洞、半坑、关西及寨背岩体等)是众稀土矿床形成的物质基础。近二十多年,不少学者对足洞、半坑、关西和寨背岩体的年代学、岩石学、矿物学及地球化学特征进行了一定程度的研究(赣南地质调查大队, 1987; 吴澄宇, 1988; 吴澄宇等, 1992; 黄典豪等, 1988, 1993; 陈培荣等, 1998, 2007; Bao et al., 2008; 章邦桐等, 2011),但是大多数岩体仍缺乏精确的锆石 U-Pb 同位素年代学资料,加上 20 世纪 80 年代定年方法精确度有限,如足洞岩体全岩、长石 Rb-Sr 等时线年龄和锆石 U-Pb 不一致线法测得的年龄分别为 148 Ma 和 124 Ma,相差较大,致使对众岩体的形成时代、岩石成因等方面的认识存在分歧。20 世纪 70 年代初,1:20 万龙南幅将足洞、关西及半坑岩体作为寨背岩基的边缘相,归属于燕山期,这种观点被很多学者沿用至今。80 年代末,赣南地质调查大队(1987)根据野外地质填图将足洞、关西和半坑岩体划分开来,并认为足洞和关西岩体为燕山期不同阶段的独立岩体,关西岩体与半坑岩体可能为同源岩浆。目前,对于牛坑岩体和半坑岩体的侵位时代、稀土内生矿化特征及与足洞、关西、寨背岩体之间是否存在成因联系等问题缺乏深入研究。因此,本文对龙南牛坑、足洞及半坑岩体进行了 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 定年,并结合各岩体稀土内生矿化特征及稀土、微量元素特征,探讨了岩石成因。

龙南地区处于华南造山系南岭造山带赣南隆起,属于 II 级华南成矿省 III 级南岭成矿带的赣南隆起 W-Sn-REE 成矿亚带(徐志刚等, 2008)。赣南地区发育前寒武纪结晶基底,之上沉积震旦—奥陶纪的砂岩、板岩等巨厚岩系,志留纪发生了强烈的构造-热事件,大规模花岗质岩浆侵位。晚泥盆世地层呈角度不整合覆盖在前泥盆纪地层之上(舒良树, 2006a)。晚泥盆世、石炭纪、二叠纪、早三叠世的

地层主要由浅海相碳酸盐岩和泥砂质岩组成,晚三叠世、侏罗纪、白垩纪和古近纪地层主要为陆相碎屑岩-火山岩系(舒良树等, 2006b)。区内出露大面积花岗岩,以发育离子吸附型稀土矿和钨矿为特征(“五层楼”+“地下室”成矿模式)(李建康等, 2013)。

龙南地区出露众多稀土花岗岩体:牛坑、足洞、半坑、关西及寨背岩体等(图 1),它们属于九嶷—大东山—泉州 EW 向中生代花岗岩带的中段(莫柱孙等, 1980)。牛坑岩体位于龙南县南部 6 km 的富坑一带,呈长条状岩瘤产出,岩体规模小,出露面积约 20 km²,主体岩性为中粗粒黑云母钾长花岗岩。岩体东部与白垩系呈断层接触,其余与上古生界侵入接触。足洞岩体又称新圩岩体,位于牛坑岩体东侧约 5 km 处,地表呈似椭圆状,长轴方向为 NE65°,出露面积为 32.5 km²。主要岩性由白云母钾长-碱长花岗岩组成,中间分布少量黑云母钾长花岗岩,两者的界线为渐变过渡。岩体南部与上二叠统含煤地层呈断层接触,与半坑岩体呈侵入接触,接触面上见中性岩脉充填,与关西岩体之间被一小规模花岗斑岩岩株分隔(赣南地质调查大队, 1987)。半坑岩体位于足洞岩体南部,呈不规则的 S 型长条状分布,主要岩性为黑云母钾长花岗岩。岩体东部侵入下古生界,西部被侏罗系覆盖。关西岩体位于足洞岩体东侧,与寨背岩体相连,呈岩基产出,出露面积超过 400 km²,主体岩性为中粗粒黑云母钾长花岗岩。南部侵入并包裹多处辉长岩体,其中最大的辉长岩体称为车步岩体(锆石 U-Pb 年龄为 175 Ma)(贺振宇等, 2007),出露面积约 20 km²。岩体与寒武系浅变质岩、晚加里东期混合岩、海西晚期花岗岩和侏罗系火山岩呈侵入接触。

1 样品采集及分析测定

1.1 样品采集

用于锆石定年的样品 LN-nk3 采自牛坑岩体, LN-jy 采自足洞岩体, LN-xx3 采自半坑岩体,具体位置见图 1。LN-nk3: 为黑云母花岗岩风化壳,样品呈浅肉色(图 2a),为全风化层,中粒状结构,砂状

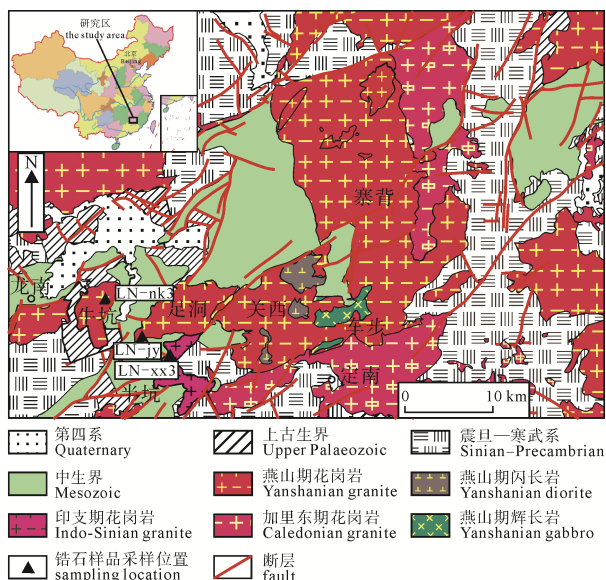


图1 江西龙南地区地质简图
(据江西省重工业局区域地质调查大队, 1970;
江西省地质局区域地质调查大队, 1973 修编)

Fig. 1 Simplified geological map of Longnan area, Jiangxi Province (modified after The Regional Geological Survey Team of the Jiangxi Heavy Industry Bureau, 1970; The Regional Geological Survey Team of Jiangxi Geological Bureau, 1973)

构造, 主要为粘土矿物和少量石英、长石。LN-jy: 为白云母花岗岩风化壳, 呈灰白色, 为半风化层, 保持了基岩的结构和构造, 但矿物多被风化, 一捏便碎, 中粗粒粒状结构, 块状构造(图 2b)。LN-xx3: 黑云母钾长花岗岩(图 2c), 样品呈肉红色, 文象结构发育, 块状构造, 主要由石英(25%)、微斜长石+条纹长石(40%)、斜长石(20%)及黑云母组成(5%)。条纹长石呈粗粒大晶体, 他形为主, 钠长石条纹呈细脉状、线状定向排列; 斜长石呈板柱状, 局部发育钠长石环带; 黑云母较集中分布, 内见较多磁铁矿; 石英呈他形粒状, 多分布在条纹长石内部, 大小不一, 形成文象结构。副矿物中磁铁矿较多, 可见锆石、磷灰石和褐帘石。岩石具有钾长石化, 主要是条纹长石内部可见斜长石形成变斑晶。

1.2 样品测定

锆石样品的年龄测试工作是在中国地质科学

院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成, 所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。实验中激光剥蚀斑束直径为 25 μm , 频率为 10 Hz, 能量密度为 2.5 J/cm², 以 He 为载气。锆石年龄谐和图用 Isoplot 3.0 程序完成, 测试数据、加权平均年龄的误差均为 1 σ 。锆石加权平均年龄采用 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄。详细的实验测试过程参见侯可军等(2009)。

风化壳样品的稀土元素分析测试由中国地质科学院国家地质实验测试中心测定完成, 采用等离子质谱分析方法(ICP-MS), 实验仪器为 X-Series 型电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo 公司), 分析误差小于 5%。样品经过烘干后人工过筛至 200 目。

1.3 锆石测年结果

足洞岩体(LN-jy): 用于分析测试的锆石均呈自形晶, 多为短柱状, 粒径多在 100 μm 左右, 长宽比介于 2:1 之间(图 3), 具有清晰、致密的韵律环带结构, Th/U 比值介于 0.12~1.12 之间, 仅个别锆石 Th/U 比值小于 0.4, 多显示岩浆成因特征。20 个测点的年龄显示, 无论是锆石的核部(如点 3、18 等)还是边部(如 1、9 等), 其 U-Pb 年龄基本一致。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中(图 4a), 11 颗锆石年龄位于谐和线上, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为(168.2 $\pm$ 1.2) Ma (MSWD=1.3), 该年龄代表岩体的侵位年龄。

牛坑岩体(LN-nk3): 锆石均呈自形晶, 多为细长条状, 粒径多在 100 μm 左右, 长宽比介于 3:1 之间(图 3), 具有清晰、致密的韵律环带结构, Th/U 比值介于 0.3~1.0 之间, 仅个别锆石 Th/U 比值小于 0.4, 多显示岩浆成因特征。在锆石谐和年龄图解中(图 4b), 13 颗锆石年龄位于谐和线上, 其 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为(168.3 $\pm$ 1.7) Ma (MSWD=1.4), 该年龄为岩体的侵位年龄。

半坑岩体(LN-xx3): 用于分析测试的锆石均呈自形晶, 多为短柱状, 粒径多在 100 μm 左右, 长宽比介于 2:1 之间(图 3), 具有清晰、致密的韵律环带结构, Th/U 比值介于 0.56~1.36 之间, 显示岩浆成因



图2 样品的野外地质特征

Fig. 2 Field geological characteristics of dating samples

a-牛坑黑云母钾长花岗岩风化壳; b-足洞白云母钾长-碱长花岗岩风化壳; c-半坑黑云母钾长花岗岩

a-field geological characteristics of Niukeng biotite moyite weathering crust; b-field geological characteristics of Zudong muscovite K-feldspar-alkali feldspar granite weathering crust; c-field geological characteristics of Bankeng biotite moyite weathering crust

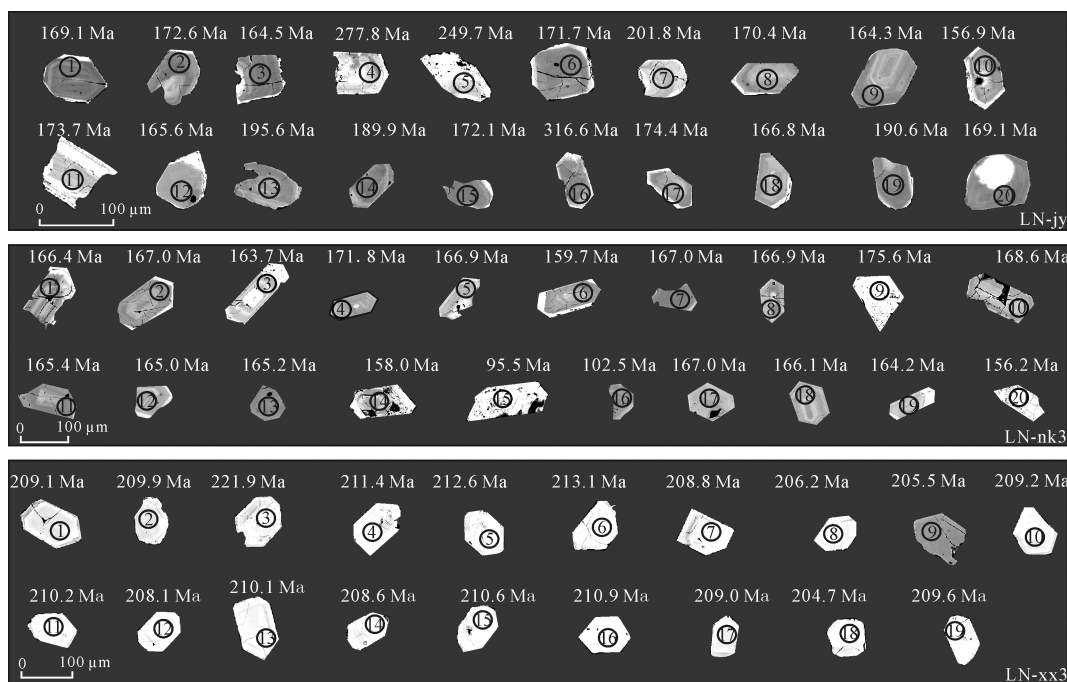


图3 样品的锆石阴极发光图像

Fig. 3 Cathodoluminescence images of analyzed zircons

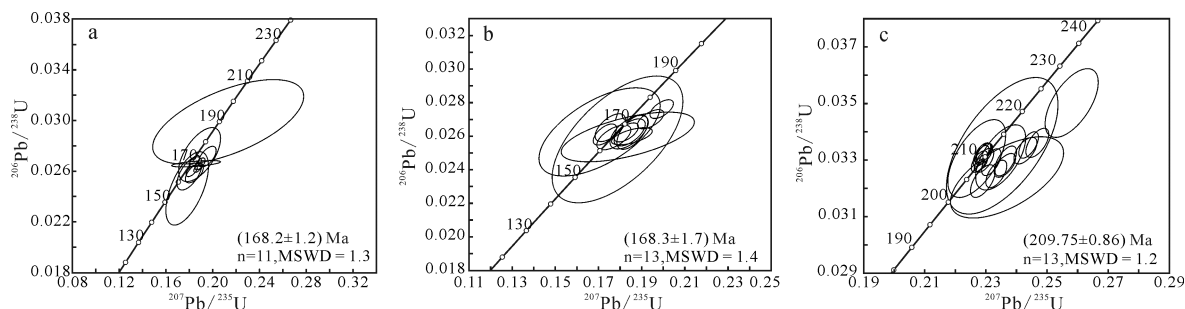


图4 样品 LN-jy(a)、LN-nk3(b)、LN-xx3(c)的锆石 U-Pb 年龄谐和图解

Fig. 4 Concordia diagrams of zircon U-Pb isotopes of sample LN-jy(a), LN-nk3(b) and LN-xx3(c)

特征。在锆石谐和年龄图解中(图 4c), 13 颗锆石的年龄位于谐和线上, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(209.75 \pm 0.86) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=1.2$), 该年龄为花岗岩的侵位年龄。

1.4 稀土元素特征

足洞风化壳样品的稀土含量明显高于母岩(为 2.8 倍), 但继承了母岩的稀土配分模式, 为重稀土配分型, 具有 Eu 的负异常, 与牛坑岩体风化壳样品具有几乎一致的配分曲线(图 5)。足洞周边水体受风化壳稀土配分特征影响, 也显示富集重稀土的特征(罗建美等, 2007)。寨背黑云母钾长花岗岩与关西黑云母钾长花岗岩具有一致的稀土配分模式, 均为轻稀土型。寨背岩体风化壳的稀土配分类型继承了母岩特征, 且与半坑岩体风化壳的稀土配分模式相似(图 6)。

2 讨论

2.1 龙南地区稀土花岗岩的侵位关系

关于龙南稀土花岗岩的侵位关系一直存在两种

观点: (1)足洞、关西及半坑岩体为寨背岩体的边缘相, 牛坑岩体与它们同为燕山期第二阶段岩浆活动的产物(江西省重工业局区域地质调查大队, 1970); (2)足洞岩体全岩、长石的 Rb-Sr 等时线年龄为 148 Ma, 锆石 U-Pb 不一致线年龄为 124 Ma; 半坑岩体的全岩 K-Ar 同位素表面年龄为 154 Ma; 关西岩体锆石 U-Pb 不一致线法年龄为 170 Ma, 与全岩 Rb-Sr 等时线年龄(176 Ma)基本相同(赣南地质调查大队, 1987; 黄典豪等, 1989)。寨背岩体的全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 $(176 \pm 10) \text{ Ma}$ (陈培荣等, 1998), SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 171.6 Ma(Li et al., 2003), 章邦桐等(2011)认为寨背花岗岩基由于放射性元素的质量分数较高、出露面积较大等原因, 导致其侵位—结晶时差较大, 反演计算得出的侵位年龄为 195.2 Ma。除了寨背岩体, 区域上花岗岩侵位—结晶时差较大的岩体还有花山—姑婆山岩体(章邦桐等, 2012)。

本文锆石 U-Pb 测年结果表明, 足洞与牛坑岩体具有一致的锆石 U-Pb 年龄, 均为 168 Ma; 半坑

岩体锆石 U-Pb 年龄为 209 Ma。考虑到足洞和半坑岩体受较强的蚀变作用, Rb-Sr、K-Ar 很难保持封闭体系, 其年龄可信度相对较差。其次足洞、牛坑和半坑岩体出露面积均较小、侵位相对较浅(牛坑、足洞岩体均为岩浆高度演化分异的产物, 侵位浅于分异程度相对较低的寨背岩体), 侵位-结晶时差较小, 认为锆石的结晶年龄代表了各自岩体的侵位年龄。关西和寨背岩体无论是全岩 Rb-Sr 等时线年龄还是锆石 U-Pb 年龄几乎一致, 为同一岩体。可见, 龙南地区稀土岩体的侵位顺序为: 半坑岩体(209 Ma)、寨背—关西岩体(约 195 Ma)、足洞—牛坑岩体(168 Ma)。

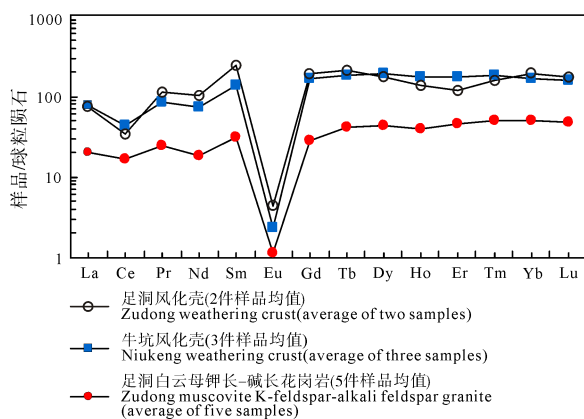


图 5 重稀土型花岗岩及风化壳的球粒陨石标准化 REE 配分模式

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of HREE type granite and weathering crust samples

足洞花岗岩数据引自吴澄宇, 1988;

球粒陨石数据引自 Taylor et al., 1985

Data of Zudong granite and chondrite after WU, 1988; and Taylor et al., 1985; respectively

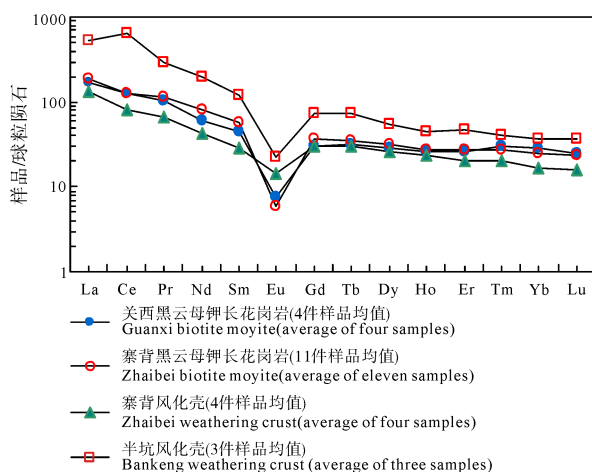


图 6 轻稀土型花岗岩及风化壳球粒陨石标准化 REE 配分模式

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of LREE type granite and weathering crust samples

关西花岗岩数据引自吴澄宇, 1988; 寨背花岗岩引自陈培荣等, 2007; 球粒陨石数据引自 Taylor et al., 1985

Data of Guanxi, Zhaibei granite and chondrite after WU, 1988; CHEN et al., 2007; and Taylor et al., 1985; respectively

2.2 龙南地区岩浆演化与内生稀土矿化特征

足洞岩体主要为白云母钾长-碱长花岗岩及少量黑云母钾长花岗岩, 前者是后者交代作用的产物, 牛坑岩体岩性以黑云母钾长花岗岩为主。足洞白云母钾长-碱长花岗岩, 副矿物组合为氟碳钙钇矿-硅铍钇矿-萤石-锆石, 稀土矿化与萤石-碳酸盐化密切相关; 足洞和牛坑黑云母钾长花岗岩的副矿物组合几乎一致, 均为锆石-独居石-磷钇矿, 少量的硅铍钇矿、氟碳钙钇矿等, 且岩体风化壳的稀土配分模式几乎一致。因此, 无论从岩体的侵位时代还是岩石类型、稀土矿物组合及风化壳稀土配分特征, 足洞和半坑岩体均具有相似性, 它们很可能为同源岩浆同期分离结晶的产物。

寨背和关西岩体岩性均以黑云母钾长花岗岩为主, 副矿物以磁铁矿、钛铁矿、榍石、锆石、褐帘石、磷灰石为主, 磁铁矿远大于钛铁矿, 稀土矿化主要以发育榍石-褐帘石-磷灰石为特征。岩石的

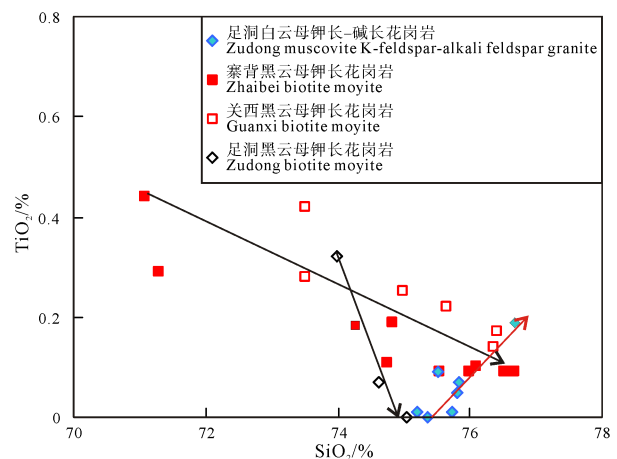


图 7 花岗岩样品 SiO_2 - TiO_2 图解

Fig. 7 SiO_2 versus TiO_2 correlation diagram of granite samples

关西岩体数据引自吴澄宇, 1988; 寨背岩体引自陈培荣等, 2007

Data of Guanxi, Zhaibei granite after WU, 1988; CHEN et al., 2007; respectively

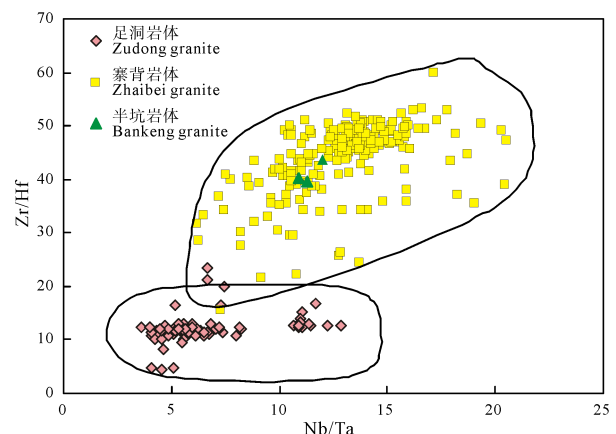


图 8 风化壳样品 Nb-Ta-Zr/Hf 比值图解

Fig. 8 Zr/Hf versus Nb-Ta correlation diagram of weathering crust samples

稀土配分类型均属于轻稀土型, 亦为同源岩浆同期分离结晶的产物。半坑岩体的侵位时代早于寨背—关西岩体, 但它们具有相似的岩石类型——黑云母钾长花岗岩, 和一致的稀土配分类型, 推测可能与寨背—关西岩体为同源岩浆。

寨背—关西岩体与足洞—牛坑岩体, 除了稀土矿化特征截然不同外, 主量元素也存在差异。以 SiO_2 - TiO_2 图解为例(图 7), 寨背—关西黑云母钾长花岗岩的 TiO_2 含量随 SiO_2 含量增高而降低的趋势较为缓慢, 显示同源岩浆演化特征。而足洞黑云母钾长花岗岩的 TiO_2 含量随 SiO_2 含量增高快速降低, 显示与寨背—关西岩体不同的演化趋势。白云母钾长-碱长花岗岩由于受蚀变作用的影响, 二者呈正相关性, 暗示有新矿物形成。

两岩体之间的微量元素亦存在显著差异。Zr、Hf、Nb、Ta 均为相对稳定的元素, 即使在风化过程中 Zr/Hf、Nb/Ta 比值也基本保持不变(Middelburg et al., 1988; 马英军等, 1999; Panahi et al., 2000)。在 Zr/Hf-Nb/Ta 比值图解中(图 8), 半坑和寨背花岗岩风化壳的 Nb/Ta、Zr/Hf 比值偏高(20~60), 且两比值呈正相关性。而足洞花岗岩风化壳, 随 Nb/Ta 比值的快速增长, Zr/Hf 比值基本不变, 且小于 20, 反映出足洞花岗岩的岩浆分异演化程度高于寨背花岗岩。足洞花岗岩与寨背—关西花岗岩的 SiO_2 含量相近, 很难为同源岩浆分异的产物。由此认为, 足洞—牛坑岩体与寨背—关西岩体为两个独立岩浆房演化形成的产物。

3 结论

本文对龙南地区稀土花岗岩进行了锆石 U-Pb 测年, 结果表明: 半坑岩体侵位于印支期(209 Ma), 足洞—牛坑岩体侵位于燕山期(168 Ma), 晚于邻区的寨背—关西岩体(约 195 Ma)。足洞—牛坑花岗岩的稀土内生矿化以重稀土为特征, 为同源岩浆同期高度分异演化的产物。寨背—关西花岗岩与半坑花岗岩的稀土内生矿化则以轻稀土为特征, 可能为同源岩浆不同阶段侵位形成。而足洞—牛坑花岗岩与寨背—关西花岗岩则为两个独立岩浆房演化形成的产物。

致谢: 衷心感谢中国地质科学院矿产资源研究所袁忠信和白鸽研究员对本文的修改提供了宝贵意见, 感谢他们在稀土矿床研究方面的悉心指导!

参考文献:

陈培荣, 章邦桐, 陈卫锋. 2007. 寨背-陂头岩体[M]//周新民. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化. 北京: 科学出版社: 566-576.

陈培荣, 章邦桐, 孔兴功, 蔡笔聪, 凌洪飞, 倪琦生. 1998. 赣南

寨背 A 型花岗岩体的地球化学特征及其构造地质意义[J]. 岩石学报, 14(3): 289-298.

赣南地质调查大队. 1987. 龙南足洞花岗岩风化壳离子吸附型重稀土矿[R]. 赣州: 赣南地质调查大队.

贺振宇, 徐夕生, 陈荣, 邢光福. 2007. 赣南中侏罗世正长岩-辉长岩的起源及其地质意义[J]. 岩石学报, 23(6): 1457-1469.

侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICPMS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4): 481-492.

黄典豪, 吴澄宇, 韩久竹, 张巧大. 1989. 江西足洞和关西花岗岩体的铀—铅、钍—铀体系同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, (1): 37-48.

黄典豪, 吴澄宇, 韩久竹. 1988. 江西足洞和关西花岗岩的稀土元素地球化学及矿化特征[J]. 地质学报, (4): 311-328.

黄典豪, 吴澄宇, 韩久竹. 1993. 江西足洞和关西花岗岩的岩石学、稀土元素地球化学及成岩机制[J]. 中国地质科学院院报, (27-28): 69-94.

江西省地质局区域地质调查大队. 1973. 1:20 万寻乌幅区域地质调查报告和地质图[R]. 江西南昌: 江西省地质局区域地质调查大队.

江西省重工业局区域地质调查大队. 1970. 1:20 万龙南幅区域地质调查报告和地质图[R]. 南昌: 江西省重工业局区域地质调查大队.

李建康, 王登红, 梁婷, 许以明, 张怡军, 梁华英, 卢焕章, 赵斌, 李建国, 屈文俊, 周四春, 王汝成, 韦龙明, 林锦福. 2013. 南岭区域成矿与深部探测的研究进展及其对西藏钨锡找矿的指示[J]. 地球学报, 34(1): 58-74.

罗建美, 季宏兵, 霍永伟. 2007. 赣南小流域水体中稀土元素的地球化学特征[J]. 地球学报, 28(5): 438-445.

马英军, 刘从强. 1999. 化学风化作用过程中的微量元素地球化学——以江西龙南黑云母花岗岩风化壳为例[J]. 科学通报, 44(2): 2433-2437.

莫柱孙, 叶伯丹, 潘维祖, 汪绍年, 庄锦良, 高秉璋, 刘金全, 刘文章. 1980. 南岭花岗岩地质学[M]. 北京: 地质出版社.

舒良树. 2006a. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东造山带[J]. 高校地质学报, 12(4): 418-431.

舒良树, 周新民, 邓平, 余心起. 2006b. 南岭构造带的基本地质特征[J]. 地质论评, 52(2): 251-265.

吴澄宇, 白鸽, 黄典豪. 1992. 南岭富重稀土花岗岩类的特征和意义[J]. 中国地质科学院院报, (25): 43-58.

吴澄宇. 1988. 赣南粤北地区风化壳离子吸附型稀土矿床研究[D]. 北京: 中国地质科学院.

徐志刚, 陈毓川, 王登红, 陈郑辉, 李厚民. 2008. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京: 地质出版社.

袁忠信, 李建康, 王登红, 郑国栋, 娄德波, 陈郑辉, 赵芝, 于扬. 2013. 中国稀土矿床成矿规律[M]. 北京: 地质出版社.

章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 陈培荣. 2011. 南岭寨背和陂头花岗岩基属印支期侵位的岩浆动力学证据及构造意义[J]. 地质找矿论丛, 26(2): 119-130.

章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 陈培荣. 2012. 南岭花山和姑婆山花岗岩基属印支期侵位——来自花岗岩熔体冷却-结晶和放射成因热计算的依据[J]. 地质学报, 86(7): 1031-1046.

References:

BAO Zhi-wei, ZHAO Zhen-hua. 2008. Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in south China[J]. Ore Geology Reviews, (33): 519-535.

CHEN Pei-rong, ZHANG Bang-tong, CHEN Wei-feng. The Zhaibei-Pitou granites[M]//ZHOU Xin-min. Evolution of the

- Late Mesozoic granite in the Nanling region and lithosphere dynamics. Beijing: Science Press: 566-576(in Chinese).
- CHEN Pei-rong, ZHANG Bang-tong, KONG Xing-gong, CAI Bi-cong, LING Hong-fei, NI Qi-sheng. 1998. Geochemical characteristics and tectonic implication of Zhaibei A-type granitic intrusives in South Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 289-298(in Chinese with English abstract).
- Geological Survey Team of Gannan. 1987. The Zudong Ion-adsorbed type of heavy rare earth deposit in Longnan county, Jiangxi Province[R]. Ganzhou: Geological Survey Team of Gannan(in Chinese).
- HE Zheng-yu, XU Xi-sheng, CHEN Rong, XING Guang-fu. 2007. Genesis of middle Jurassic syenite-gabbro in southern Jiangxi province and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1457-1469(in Chinese with English abstract).
- HOU Ke-jun, LI Yan-he, TIAN You-rong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multiion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481-492(in Chinese with English abstract).
- HUANG Dian-hao, WU Cheng-yu, HAN Jiu-zhu, ZHANG Qiao-da. 1989. Characteristics of isotopic systematics of U-Pb and Rb-Sr and their Geological implications for Zudong and Guanxi granitic intrusives, Longnan county Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (1): 37-48(in Chinese with English abstract).
- HUANG Dian-hao, WU Cheng-yu, HAN Jiu-zhu. 1993. Petrology, REE geochemistry and rock-forming mechanism of the Zudong and Guanxi granites, Jiangxi[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, (27-28): 69-94(in Chinese with English abstract).
- HUANG Dian-hao, WU Cheng-yu, HAN Jiu-zhu. 1988. REE geochemistry and mineralization characteristics of the Zudong and Guanxi granites, Jiangxi Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, (4): 311-328(in Chinese with English abstract).
- LI Jian-kang, WANG Deng-hong, LIANG Ting, XU Yi-ming, ZHANG Yi-jun, LIANG Hua-ying, LU Huan-zhang, ZHAO Bin, LI Jian-guo, QU Wen-jun, ZHOU Si-chun, WANG Ru-cheng, WEI Long-ming, LIN Jin-fu. 2013. Progress of Research on Metallogenic Regularity and Deep Exploration in Nanling Region and Its Indication for W-Sn Exploration in Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(1): 58-74(in Chinese with English abstract).
- LI Xian-hua, CHEN Zhi-gang, LIU Dun-yi. 2003. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from Southern Jiangxi Province, SE China: Age, origin, and tectonic significance[J]. *International Geology Review*, 45: 898-921.
- LUO Jian-mei, JI Hong-bing, HUO Yong-wei. 2007. Geochemical characteristics of rare earth elements in the water body of the Ganjiang river, Southern Jiangxi[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(5): 438-445(in Chinese with English abstract).
- MA Ying-jun, LIU Cong-qiang. 1999. Trace element geochemistry during chemical weathering—As exemplified by the weathered crust of granite, Longnan, Jiangxi[J]. *Chinese Science Bulletin*, 44(24): 2260-2263.
- MIDDELBURG J J, VAN DER W C H, WOITTEZ J R W. 1988. Chemical processes affecting the mobility of major, minor and trace elements during weathering of granitic rocks[J]. *Chemical Geology*, 68: 253-273.
- MO Zhu-sun, YE Bo-dan, PAN Wei-zu, WANG Shao-nian, ZHUANG Jin-liang, GAO Bing-zhang, LIU Jin-quan, LIU Wen-zhang. 1980. Nanling granite geology[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- PANAHI A, YOUNG G M, RAINBIRD R H. 2000. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Ville Marie, Québec, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(13): 2199-2220.
- SHU Liang-shu, ZHOU Xin-min, DENG Ping, YU Xin-qi. 2006b. Principal geological features of Nanling tectonic belt, South China[J]. *Geological Review*, 52(2): 251-265(in Chinese with English abstract).
- SHU Liang-shu. 2006b. Predevonian tectonic evolution of South China: from cathaysian block to Caledonian period folded orogenic belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 418-431(in Chinese with English abstract).
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell.
- The Regional Geological Survey Team of Jiangxi Geological Bureau. 1973. Regional Report and Map of the Geological Survey for the Xunwu sheet at the of 1: 200000[R]. Nanchang: The Regional Geological Survey Team of Jiangxi Province Geological Bureau(in Chinese).
- The Regional Geological Survey Team of the Jiangxi Heavy Industry Bureau. 1970. Regional Report and Map of the Geological Survey for the Longnan sheet at the of 1: 200000[R]. Nanchang, Jiangxi: The Regional Geological Survey Team of the Jiangxi Heavy Industry Bureau(in Chinese).
- WU Cheng-yu, BAI Ge, HUANG Dian-hao. 1992. Characteristics and significance of HREE-rich granitoids of the Nanling Mountain area[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, (25): 43-58(in Chinese with English abstract).
- WU Cheng-yu. 1988. The Study of ion-adsorbed type of rare earth deposits in weathering crust from South Jiangxi and North Guangdong Provinces[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- XU Zhi-gang, CHEN yu-chuang, WANG Deng-hong, CHEN Zheng-hui, LI Hou-min. 2008. China metallogenic zonation scheme[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- YUAN Zhong-xin, LI Jian-kang, WANG Deng-hong, ZHENG Guo-dong, LOU De-bo, CHEN Zheng-hui, ZHAO Zhi, YU Yang. 2013. China's rare earth deposits metallogenic regularity[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHANG Bang-tong, WU Jun-qi, LING Hong-fei, CHEN Pei-rong. 2011. Magma-dynamic evidence for Indosinian cycle emplacement of the Zhaibei and Pitou granite batholiths of Nanling range in south China and the tectonic implication[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 26(2): 119-130(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Bang-tong, WU Jun-qi, LING Hong-fei, CHEN Pei-rong. 2012. Indosinian emplacement of the Huashan-Guposhan granite batholiths in Western Nanling Range: Evidence from cooling-crystallization and radiogenic heat calculation of granite melt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(7):1031-1046(in Chinese with English abstract).