

赣南关西岩体成因：锆石U-Pb年龄和Sr-Nd同位素约束

吴成凤, 夏 睿, 幸雪连

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2025年3月3日; 录用日期: 2025年4月2日; 发布日期: 2025年4月14日

摘 要

关西岩体位于华南板块, 为讨论关西岩体的岩石成因, 文章进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb定年、岩石地化及Sr-Nd同位素研究。LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素年龄测定结果表明赣南关西岩体的年龄为 199.3 ± 2.6 Ma (MSWD = 1.5, n = 9)。关西花岗岩高硅、富碱, 贫铁、镁、钙, 富集Nb、Ta、Zr、Hf等高场强元素, 具有显著的Eu负异常并强烈亏损Ba、Sr、P、Ti等元素; 具有较高的全岩锆饱和温度($T_{Zr} = 811^{\circ}\text{C} \sim 1074^{\circ}\text{C}$, 平均值为 966°C), $10,000 \times \text{Ga}/\text{Al} > 2.6$, 表明关西岩体为A型花岗岩。关西花岗岩Sr-Nd同位素分析显示具有较低($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i值(0.703518~0.677420)和较高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(0.33~1.09), 强烈的Eu负异常和高Rb/Sr比值, 结合全岩主微量元素特征, 它的源区可能为亏损地幔演化形成的新生地壳。

关键词

关西花岗岩, 锆石U-Pb年龄, Sr-Nd同位素

Genesis of the Guanxi Pluton in Southern Jiangxi: Constraints from Zircon U-Pb Ages and Sr-Nd Isotopes

Chengfeng Wu, Rui Xia, Xuelian Xing

School of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Mar. 3rd, 2025; accepted: Apr. 2nd, 2025; published: Apr. 14th, 2025

Abstract

The Guanxi Pluton is situated within the South China Block. To discuss the petrogenesis of the Guanxi

Pluton, this study conducted LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, petrogeochemical analysis, and Sr-Nd isotopic investigations. LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic age determination results indicate that the age of the Guanxi Pluton in southern Jiangxi is 199.3 ± 2.6 Ma (MSWD = 1.5, n = 9). The Guanxi granite is characterized by high silica and alkali content, low iron, magnesium, and calcium, enrichment in high-field-strength elements such as Nb, Ta, Zr, and Hf, significant Eu negative anomalies, and strong depletion in elements like Ba, Sr, P, and Ti. It exhibits high whole-rock zircon saturation temperatures ($T_{Zr} = 811^{\circ}\text{C} \sim 1074^{\circ}\text{C}$, average of 966°C) and $10,000 \times \text{Ga/Al}$ ratios greater than 2.6, indicating that the Guanxi Pluton is an A-type granite. Sr-Nd isotopic analysis of the Guanxi granite reveals low initial ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i values (0.703518~0.677420) and high $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values (0.33~1.09), along with strong Eu negative anomalies and high Rb/Sr ratios. Combined with the whole-rock major and trace element characteristics, its source region is likely juvenile crust formed through the evolution of depleted mantle.

Keywords

Guanxi Granite, Zircon U-Pb Age, Sr-Nd Isotopes

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 稀土元素作为工业技术原材料之一, 广泛应用于各行各业, 被称作“关键金属”, 然而稀土作为我国的传统优势矿产, 资源现状并不乐观, 中国稀土储量的全球比重已从本世纪初的绝对优势地位发生显著改变。最新数据显示, 截至 2021 年底, 我国稀土资源量所占比例已缩减至 36.7% [1]。

目前, 世界稀土资源主要来源于碳酸岩型和离子吸附型稀土矿床, 离子吸附型稀土矿床是由富稀土的花岗岩、火山岩、变质岩、玄武岩和碳酸岩等岩石经历风化淋积作用而形成的, 其中花岗岩为最主要的成矿母岩[2]。

赣南关西岩体作为花岗岩风化壳离子吸附型轻稀土矿床的原岩, 近年来有诸多学者对其年代学、岩石学、矿物学及地球化学特征进行一定程度的分析[3]-[10]。本文对关西岩体进行了详细剖析, 通过对岩体中岩石的矿物学、岩石学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学、全岩 Sr-Nd 同位素、锆石 Hf 同位素的研究, 并结合区域地质资料及野外地质, 探讨其岩石成因和构造背景, 为深入理解华南早中生代构造-岩浆演化提供新的依据。

2. 区域地质背景

研究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[11]。赣南地区发育前寒武纪结晶基底, 其上面为沉积震旦-奥陶纪的砂岩、板岩等巨厚岩系, 晚泥盆世地层呈角度不整合覆盖于前泥盆纪地层上[12]。志留纪发育有剧烈构造-热事件, 形成规模巨大的花岗质岩浆侵位; 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[13] [14]。

关西岩体位于赣南地区, 侵位于赣南晚加里东隆起带南部, 受 EW 向和 NNE 向断裂控制, 呈岩基状产出, 出露面积超过 400 km^2 , 与晚侏罗世足洞岩体被一侏罗纪花岗斑岩岩株隔开, 为不同时期不同异源岩浆结晶的产物(见图 1)。关西岩体花岗岩呈浅肉红色, 中-粗粒结构至似斑状结构, 块状构造, 主要由

钾长石(约 45%)、石英(约 17%)、斜长石(约 14%)和少量黑云母(约 5%)组成。根据其地质特征,镜下岩石定名为黑云母碱长花岗岩。根据其地质特征,镜下岩石定名为黑云母碱长花岗岩。

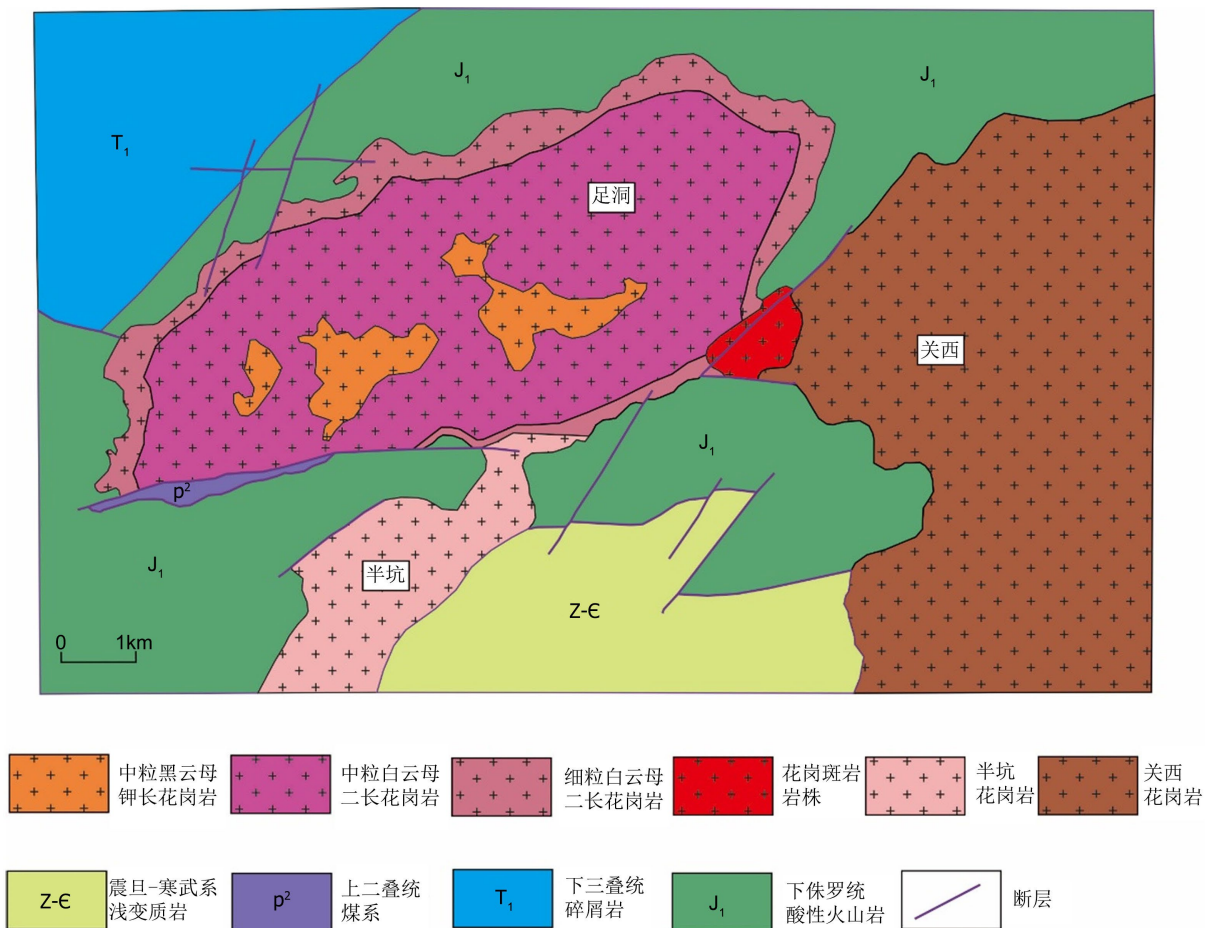


Figure 1. Geological map of the Guanxi granitic pluton [5]
图 1. 关西花岗岩地质图[5]

3. 分析方法与结果

锆石采用重砂法分选,并用环氧树脂胶结、抛光,制成样品靶。制作完成的锆石靶在显微镜下进行透射光和反射光的观察和拍照,分析锆石的颜色、晶型、裂隙和包裹体等外观特征。然后进行阴极发光(CL)图像分析,进一步研究锆石的内部结构特征,CL 图像拍摄在南京顺科检测科技有限公司完成。锆石 U-Pb 定年测试在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室进行,测试仪器为激光电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS),仪器型号为 Agilent 7500,搭载 193 nm ArF 准分子激光器 GeoLas HD 激光系统,具体工作参数为:激光脉冲频率 6 Hz,脉冲能量密度 10 J/cm²,溶蚀微区直径为 32 μm,仪器设置及分析流程参照 Liu *et al.* [14]。对关西岩体 GX22-04 样品进行锆石 U-Pb 定年,锆石阴极发光图像多呈透明或浅黄色,柱状到长柱状,自行程度较好,振动环带明显。锆石 Th/U 比值变化范围为 0.55~0.85 之间,表现出岩浆锆石的特征。该样品的 9 个点数据在协和曲线图上呈现出很好的一致性,对其进行加权平均计算获得 199.3 ± 2.6 Ma (MSWD = 2.6) 的结晶年龄,由于锆石具有较高的封闭温度,其 U-Pb 体系封闭与成岩基本同时,表明关西岩体侵位于早侏罗世(见图 2)。

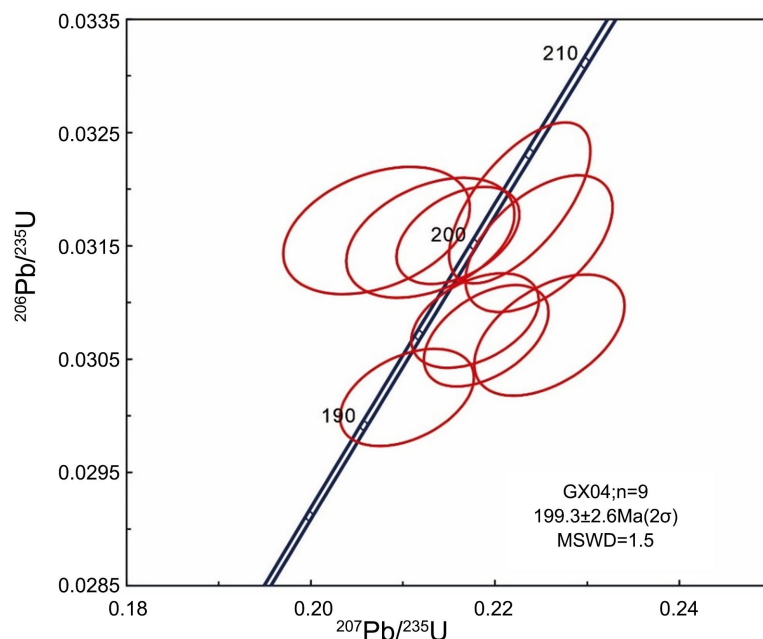


Figure 2. LA-ICP-MS U-Pb concordia plots of zircons from the Guanxi granites
图 2. 关西花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年谐和图

全岩主微量元素分析在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室进行。主量元素采用 X 射线荧光光谱法(XRF)分析,仪器型号为 ZSX Primus II。测试前加热样品至 1000℃测量每个样品的烧失量(LOI),然后称取 0.7 g 焙烧后的样品和 7.0 g 硼酸锂混合物,经过高温熔融制成玻璃融片,分析各元素含量,分析精度优于 0.5%。微量元素地球化学分析依托 Agilent 7500cx 型高分辨电感耦合等离子体质谱系统(ICP-MS)开展,使用 USGS 标准 BHVO、AGV、W-2 和 G-2 以及国家岩石标样 GSR-1、GSR-2、GSR-3 来校正所测元素的含量,分析精度通常优于 2%~5%。分析结果显示关西花岗岩主量元素总体呈高硅、富碱,贫铁、镁、钙的特点。 SiO_2 含量偏高,为典型的酸性岩。据 Harker 图解可大致看出, Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 与 SiO_2 呈显著负相关关系,表明岩浆在演化过程中发生了明显的分异作用。基于 K_2O - SiO_2 构造地球化学判别图解,研究样品投点群集分布于高钾钙碱性区域, A/NK-A/CNK 判别图解上投影点落于铝质-过铝质区域。TAS 图落在花岗岩区。综上所述,关西岩体为铝质高钾钙碱性岩石。

锆石原位 Lu-Hf 同位素分析在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室完成,实验使用的激光剥蚀系统为 193 nm ArF 激光器 GeoLas HD, MC-ICP-MS 型号为 Neptune Plus。具体工作参数为:激光脉冲频率 6 Hz,脉冲能量 10 J/cm²,溶蚀孔径 24 μm。在计算 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值时, ^{176}Lu 的衰变常数采用 $1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ [15], $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的计算采用 Bouvier *et al.*推荐的球粒陨石 Hf 同位素值,即 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0336$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282785$ [16]。Hf 模式年龄计算中,亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 现在值采用 0.28325, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.0384,模式年龄采用平均地壳的 $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_C = 0.015$ [17]。用于 Lu-Hf 同位素分析的锆石与用于 U-Pb 定年的锆石相同,且选取 CL 图像特征完全一致的临近或对应区域进行测试。关西 GX22-04 样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化于+3.42~+7.52,对应的两阶段 Hf 模式年龄为 0.88~1.02 Ga。

本文对 GX22-01、GX22-02、GX22-03、GX22-04 四个样品进行 Sr-Nd 同位素分析,测量仪器为 Nu Plasma II MC-ICP-MS (Nu Instruments),进样方式采用 DSN-100 膜去溶(干法)。全岩 Sr-Nd 同位素分析结果显示,关西花岗岩具有较低 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值,其变化范围为(0.703518~0.677420)和较高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(0.33~1.09)(见表 1)。

Table 1. Sm-Nd isotopic compositions and parameters of the Guanxi granites
表 1. 关西花岗岩 Sm-Nd 同位素测定结果及 Nd、Sr 同位素参数

样品	Sr ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$T_{2\text{DM}} \text{ (Ma)}$
GX01	66.58	312.2	0.0848	0.512548	0.0000037	0.703518	1.09	893
GX02	17.23	17.14	0.1137	0.512549	0.0000043	0.677420	0.37	951
GX03	37.08	192.3	0.1246	0.512566	0.0000045	0.699941	0.43	946
GX04	42.76	162.7	0.1392	0.512567	0.0000044	0.702120	0.33	954

4. 讨论

4.1. 成岩时代

关于赣南关西岩体的侵位年龄有以下几种不同观点：(1) 吴典豪等人测得关西岩体锆石 U-Pb 不一致法线年龄为 170 Ma，与全岩 Rb-Sr 等时线年龄(176 Ma)基本相同[4] [5]。(2) He 等人在 2017 年测得关西岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $198.8 \pm 1.4 \text{ Ma}$ [3]；(3) 杨玉元在 2024 年测得关西岩体为碱性长石花岗岩，其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $190.0 \pm 0.7 \text{ Ma}$ [2]。

本文对关西花岗岩 GX04 样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学测试，其结果显示的锆石 U-Pb 协和年龄为 $199.3 \pm 2.6 \text{ Ma}$ ($n = 9$, $\text{MSWD} = 2.6$)，锆石成因为岩浆锆石，年龄数据可代表关西岩体的侵位年龄，表明关西花岗岩的侵位时代为早侏罗世，丰富了中国东南部早侏罗世岩浆活动的高精度年龄数据。

关于华南地区早侏罗世的动力学机制一直备受争议。目前主要存在以下几种观点：(1) 华南地区缺少早侏罗世的岩浆岩，即 205 Ma~180 Ma 为岩浆活动的“间歇期”，被认为是古特提斯构造域和古太平洋构造域的转换期[18]；(2) 与古太平洋板块俯冲无关或受其影响不大，更主要是一种板内造山作用的延续，是印支造山运动后的后造山伸展[19]；(3) 构造域转换前移论则提出，华南板块自早侏罗世已完全进入太平洋构造运动主导期，其构造域转换节点应早于该地质时段[20] [21]。

随着调查工作的不断进行，越来越多的华南早侏罗世岩浆岩被识别，主要发育 A 型花岗岩、双峰式侵入岩、双峰式火山岩和碱性玄武岩、碱性正长岩、基性岩墙群等岩石组合，以及本文侵位于早侏罗世的关西花岗岩(~199 Ma)，表明华南早侏罗世并非两大构造域转换过程中的岩浆活动“间歇期”，且该时期总体处于伸展的构造背景下[18] [20]-[22]。陈培荣等认为此岩石组合是继印支造山运动以后的一种后造山大陆裂解地球动力背景下的产物[23]。谢昕等和刘潜等认为古太平洋板块的俯冲于早侏罗世开始，板片并没有俯冲延伸至南岭地区，没有影响到上地幔的性质，且在南岭带的中至东段，岩石圈减薄作用相对剧烈，大量软流圈地幔上涌，下地壳物质熔融，形成岩浆温度高、源区深度较深的 A 型花岗岩，因此这些岩浆岩仍表现为板内岩浆岩的特征[20] [21]。上述观点与关西花岗岩具有高全岩 Zr 饱和温度、呈板内花岗岩特征相吻合。

4.2. 岩浆来源

元素地球化学研究表明，关西花岗岩高硅，贫铁、镁、钙，强烈亏损 Ba、Sr、P、Ti 等元素，表明其岩浆分异演化程度较高(见图 3)。在主量元素 Harker 图解中，全岩 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 与 SiO_2 呈显著负相关关系，表明岩浆演化过程可能发生了辉石、角闪石、斜长石、磷灰石、钛铁矿等矿物的分离结晶。具有较高的全岩锆饱和温度($T_{\text{Zr}} = 811^\circ\text{C} \sim 1074^\circ\text{C}$ ，平均值为 966°C)， $10,000 \times \text{Ga}/\text{Al} > 2.6$ ，表明关西岩体为 A 型花岗岩[24]-[26]。在 $(\text{Nb} + \text{Y})$ -Rb 图解中所有样品全部投影于板内花岗岩范围，表明关西花岗岩具有板内构造环境特质[27] [28]。

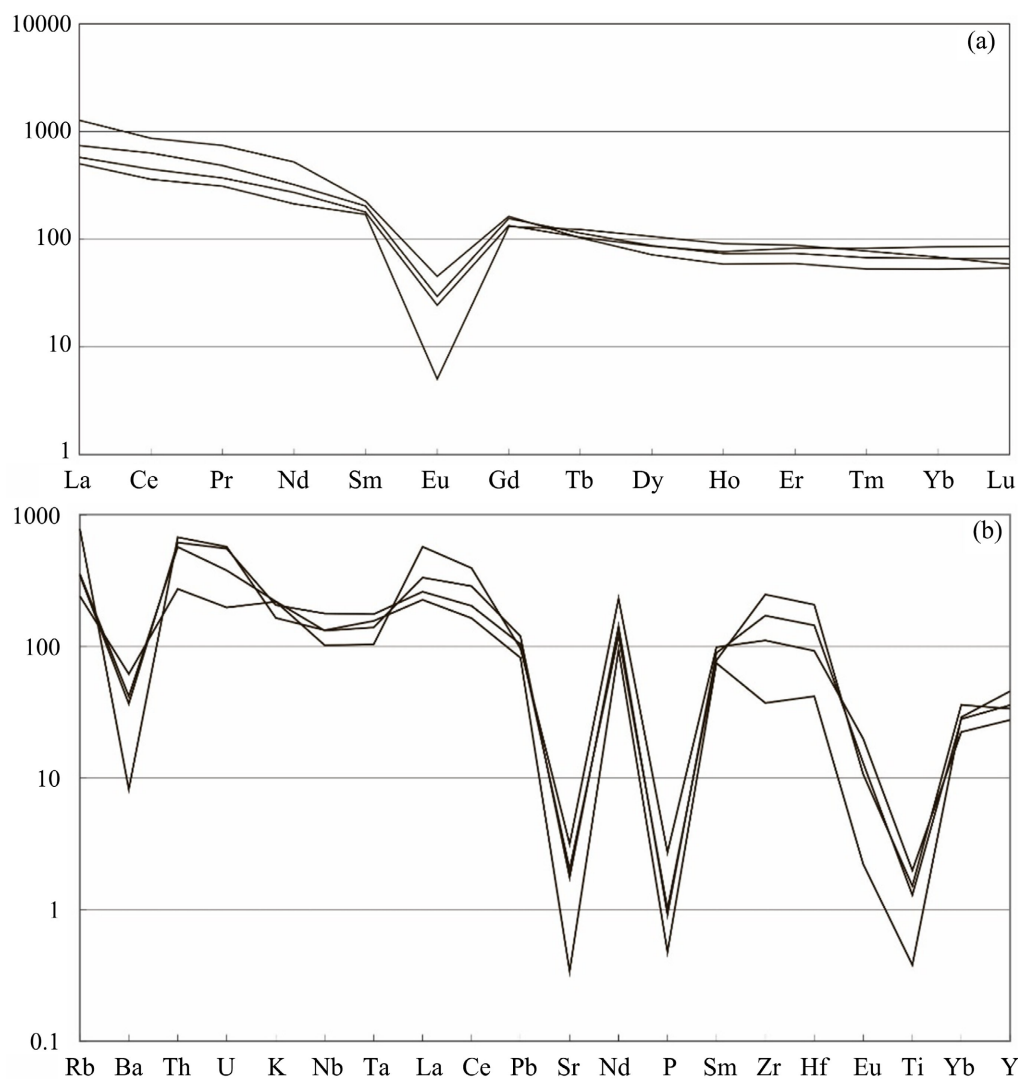


Figure 3. (a) Chondrite-normalized REE patterns and (b) mantle-normalized spidergrams of the Guanxi granites
图 3. 关西花岗岩(a) 球粒陨石标准化稀土配分图, (b) 原始地幔标准化蛛网图

关于 A 型花岗岩的成因主要有以下几种认识：① 幔源碱性玄武质或拉斑质岩浆的高度分异[29]；② 幔源岩浆和壳源岩浆的混合[30]；③ 地壳物质的部分熔融[31]。

关西花岗岩的物源是探讨关西花岗岩成因的核心问题之一。目前关西花岗岩岩浆源区的研究较为薄弱，已有研究大多认为其源区为地壳物[2] [3] [5] [7]，可见前人研究大多依据全岩地球化学组成，而缺乏同位素方面的证据。

由于锆石具有较高的封闭温度和较强的抗风化能力，常作为 U-Pb 测年重要的副矿物，锆石受放射性 ^{176}Lu 同位素影响较小，锆石 Hf 同位素可很好的约束源区性质[32]。关西花岗岩 GX22-04 样品锆石 Hf 同位素数据统计结果显示：锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为正值，范围在 +3.42~+7.52 之间，地壳两阶段模式年龄 $T_{\text{DM2}}(\text{Hf})$ 值为 0.88~1.02 Ga，明显亏损于地壳基底 Hf 同位素演化区域，表明其源区有亏损物质的加入。研究发现基性成分的岩浆分离结晶仅能产生少量(约 5%)中酸性物质，而关西花岗岩出露面积大于 400 km²，不可能主要来自地幔物质的分异，表明关西花岗岩源区的亏损物质主要来自地壳，其地壳源区可能为亏损地幔演化形成的新生地壳。此外，Sr-Nd 同位素分析结果显示关西花岗岩具有较低($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值，较高的

$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 且 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值大于 0, 表明关西花岗岩来源于亏损物质。综上, 关西花岗岩的物源可能主要为具有板内构造环境特质的亏损地幔演化形成的新生地壳由于幔源岩浆的底侵作用造成的分离结晶作用而形成的岩浆。

5. 结论

关西花岗岩形成于约 199 Ma, 岩浆侵位时代为早侏罗世, 具有较高的全岩锆饱和温度($T_{\text{Zr}} = 811^{\circ}\text{C} \sim 1074^{\circ}\text{C}$, 平均值为 966°C), $10,000 \times \text{Ga}/\text{Al} > 2.6$, 表明关西岩体为 A 型花岗岩。结合较高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值, 表明关西花岗岩的物源可能主要为具有板内构造环境特质的亏损地幔演化形成的新生地壳由于幔源岩浆的底侵作用造成的分离结晶作用而形成的岩浆。

参考文献

- [1] 谢玉玲, 夏加明, 崔凯, 曲云伟, 梁培, 钟日晨. 中国碳酸岩型稀土矿床: 时空分布与成矿过程[J]. 科学通报, 2022, 65(33): 3794-808.
- [2] 杨玉元, 李宁波, 姜玉航, 赵旭. 离子吸附型轻稀土和重稀土矿床成矿母岩地球化学特征对比研究: 以关西和大埠花岗岩体为例[J]. 大地构造与成矿学, 2024, 48(2): 232-247.
- [3] He, C., Xu, C., Zhao, Z., Kynicky, J., Song, W. and Wang, L. (2017) Petrogenesis and Mineralization of Ree-Rich Granites in Qingxi and Guanxi, Nanling Region, South China. *Ore Geology Reviews*, **81**, 309-325. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.10.021>
- [4] 赣南地质调查大队. 足洞花岗岩风化壳离子吸附型重稀土矿[J]. 江西省地质矿产局赣南地质调查大队, 1987.
- [5] 黄典豪. 江西足洞和关西花岗岩体的铀-铅、铷-锶体系同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 1989, 5(1): 37-48.
- [6] 黄典豪, 吴澄宇, 韩久竹. 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, 1988(4): 311-28.
- [7] 黄典豪, 吴澄宇, 韩久竹. 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, 1993, 14(2): 69-94.
- [8] 吴澄宇. 赣南粤北地区风化壳离子吸附型稀土矿床研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 1988.
- [9] 吴澄宇, 白鸽, 黄典豪, 朱正书. 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, 1992, 13(1): 17.
- [10] 赵芝, 王登红, 陈振宇, 陈郑辉, 郑国栋, 刘新星. 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[J]. 地球学报, 2014, 35(6): 719-25.
- [11] 徐志刚. 中国成矿区带划分方案[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- [12] 舒良树. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带[J]. 高校地质学报, 2006, 12(4): 418-431
- [13] 李建康, 王登红, 梁婷, 等. 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, 2013, 34(1): 58-74.
- [14] Liu, Y., Gao, S., Hu, Z., Gao, C., Zong, K. and Wang, D. (2009) Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, **51**, 537-571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- [15] Söderlund, U., Patchett, P.J., Vervoort, J.D. and Isachsen, C.E. (2004) The ^{176}Lu Decay Constant Determined by Lu-Hf and U-Pb Isotope Systematics of Precambrian Mafic Intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, **219**, 311-324. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(04\)00012-3](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(04)00012-3)
- [16] Bouvier, A., Vervoort, J.D. and Patchett, P.J. (2008) The Lu-Hf and Sm-Nd Isotopic Composition of CHUR: Constraints from Unequilibrated Chondrites and Implications for the Bulk Composition of Terrestrial Planets. *Earth and Planetary Science Letters*, **273**, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.010>
- [17] Griffin, W.L., Pearson, N.J., Belousova, E., Jackson, S.E., van Achterbergh, E., O'Reilly, S.Y., et al. (2000) The Hf Isotope Composition of Cratonic Mantle: LAM-MC-ICPMS Analysis of Zircon Megacrysts in Kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **64**, 133-147. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(99\)00343-9](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(99)00343-9)
- [18] Zhou, X., Sun, T., Shen, W., Shu, L. and Niu, Y. (2006) Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Volcanic Rocks in South China: A Response to Tectonic Evolution. *Episodes*, **29**, 26-33. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2006/v29i1/004>
- [19] 贾小辉, 李响, 杨文强. 华南早侏罗世花岗质侵入体的岩石成因及构造背景——兼论其关键金属成矿作用[J].

- 华南地质, 2023, 39(2): 186-202.
- [20] 谢昕, 徐夕生, 邹海波, 蒋少涌, 张明, 邱检生. 中国东南部晚中生代大规模岩浆作用序幕: J2 早期玄武岩[J]. 中国科学(D 辑), 2005, 35(7): 587-605.
- [21] 刘潜, 于津海, 苏斌, 王勤, 唐红峰, 许海, 崔翔. 福建锦城 187Ma 花岗岩的发现——对华南沿海早侏罗世构造演化的制约[J]. 岩石学报, 2011, 27(12): 3575-3589.
- [22] Jiang, Y., Wang, G., Liu, Z., Ni, C., Qing, L. and Zhang, Q. (2015) Repeated Slab Advance-Retreat of the Palaeo-Pacific Plate Underneath SE China. *International Geology Review*, **57**, 472-491. <https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1017775>
- [23] 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 陆建军, 范春方. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2002, 32(4): 279-289.
- [24] Collins, W.J., Beams, S.D., White, A.J.R. and Chappell, B.W. (1982) Nature and Origin of A-Type Granites with Particular Reference to Southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **80**, 189-200. <https://doi.org/10.1007/bf00374895>
- [25] Whalen, J.B., Currie, K.L. and Chappell, B.W. (1987) A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **95**, 407-419. <https://doi.org/10.1007/bf00402202>
- [26] Nardi, L.V.S. and de Fatima Bitencourt, M. (2009) A-Type Granitic Rocks in Post-Collisional Settings in Southernmost Brazil: Their Classification and Relationship with Tectonics and Magmatic Series. *The Canadian Mineralogist*, **47**, 1493-1503. <https://doi.org/10.3749/canmin.47.6.1493>
- [27] Eby, G.N. (1990) The A-Type Granitoids: A Review of Their Occurrence and Chemical Characteristics and Speculations on Their Petrogenesis. *Lithos*, **26**, 115-134. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(90\)90043-z](https://doi.org/10.1016/0024-4937(90)90043-z)
- [28] Eby, G.N. (1992) Chemical Subdivision of the A-Type Granitoids: Petrogenetic and Tectonic Implications. *Geology*, **20**, 641-644. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0641:csotat>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0641:csotat>2.3.co;2)
- [29] Turner, S.P., Foden, J.D. and Morrison, R.S. (1992) Derivation of Some A-Type Magmas by Fractionation of Basaltic Magma: An Example from the Padthaway Ridge, South Australia. *Lithos*, **28**, 151-179. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(92\)90029-x](https://doi.org/10.1016/0024-4937(92)90029-x)
- [30] Yang, J., Wu, F., Chung, S., Wilde, S.A. and Chu, M. (2006) A Hybrid Origin for the Qianshan A-Type Granite, North-east China: Geochemical and Sr-Nd-Hf Isotopic Evidence. *Lithos*, **89**, 89-106. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2005.10.002>
- [31] Huang, H.Q., Li, X.H., Li, W.X. and Li, Z.X. (2011) Formation of High 18O Fayalite-Bearing A-Type Granite by High-Temperature Melting of Granulitic Metasedimentary Rocks, Southern China. *Geology*, **39**, 903-906. <https://doi.org/10.1130/g32080.1>
- [32] Griffin, W.L., Wang, X., Jackson, S.E., Pearson, N.J., O'Reilly, S.Y., Xu, X., *et al.* (2002) Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: *In-Situ* Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, **61**, 237-269. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(02)00082-8)