

九嶷山复式岩体成因

张博^{1,2}, 许金梅^{1,2}, 林寿洪², 李斌^{1,2*}, 张乾², 刘湘华^{1,3,4},

刘超云¹, 赖健清¹

1. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 地球科学与信息物理学院, 中南大学, 湖南长沙 410083

2. 紫金矿业集团股份有限公司, 福建 上杭 361008;

3. 广西民族大学, 广西 南宁 530006;

4. 湖南省地球物理地球化学调查所, 湖南 长沙 410014

摘要: 华南地区广泛分布的中生代复式高分异花岗岩体与钨锡稀有金属成矿作用密切相关, 但其分异演化机制的争议限制了对成矿潜力的判别。为深化高分异花岗岩体的成因模型认识, 对湘南九嶷山复式花岗岩体中的各岩体单元开展了系统的全岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学及原位 Hf 同位素分析。结果表明, 砂子岭、金鸡岭和螃蟹木花岗岩体的锆石加权平均年龄分别为 153.0 ± 1.0 Ma、 153.1 ± 0.9 Ma 和 153.8 ± 1.5 Ma, 属于同一期岩浆活动的产物。主微量元素和同位素组成显示, 九嶷山复式花岗岩体主体来源于古老下地壳部分熔融, 源区有少量地幔组分注入, 属板内伸展环境下的 A₂ 型花岗岩。花岗岩体演化符合多级结晶分异过程, 通过瑞利分馏模拟构建九嶷山复式花岗岩体分异演化模型: 初始晶粥在结晶程度 40%-50% 时发生间隙熔体抽取, 残余堆晶形成砂子岭岩体; 被抽取的熔体经进一步向上迁移和分异, 先后侵位形成金鸡岭与螃蟹木岩体。该模型为华南中生代复式岩体的岩浆演化过程及稀有金属富集机制提供了新的约束。

关键词: 九嶷山复式岩体; 锆石; 瑞利分馏模拟; 晶粥模型

中图分类号: P597

收稿日期: 2025-04-08

Petrogenesis of the Jiushishan Composite Pluton in South China

Zhang Bo^{1,2}, Xu Jinmei^{1,2}, Lin Shouhong², Li Bin^{1,2*}, Zhang Qian², Liu Xianghua^{1,3,4},
Liu Chaoyun¹, Lai Jianqing¹

1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Ministry of Education),
School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China

2. Zijin Mining Group Company Limited, Shanghang 361008, Fujian, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi Minzu University, Nanning 530006, Guangxi, China;

4. Geophysical and Geochemical Survey Institute of HuNan, Changsha 410000, Hunan, China

Abstract: The Mesozoic composite plutons widely distributed in South China are closely associated with rare metal mineralization. However, their genetic mechanisms remain highly debated. To constrain the petrogenetic model of such intrusions, this study focuses on the Jiuyishan composite pluton in southern Hunan, employing integrated whole-rock geochemistry, zircon U-Pb geochronology, and in situ Hf isotopic analysis. Zircon U-Pb

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.42073001)

第一作者简介: 张博 (1997-), 男, 博士研究生, 从事岩浆岩成矿作用研究, ORCID: 0009-0008-1549-9904, E-mail: zbo0915@163.com。

通讯作者: 李斌 (1985-), 男, 博士, 教授, 从事矿床地球化学与同位素地球化学研究, E-mail: cutelb@csu.edu.cn。

dating yields weighted mean ages of 153.0 ± 1.0 Ma, 153.1 ± 0.9 Ma, and 153.8 ± 1.5 Ma for the Shaziling, Jinjiling, and Pangxiemu plutons, respectively, indicating their emplacement during the early Yanshanian period. Whole-rock Sr-Nd and zircon Hf isotopic compositions suggest that these rocks were derived primarily from partial melting of ancient lower crust with minor mantle input, and are classified as A₂-type granites formed in an intraplate extensional setting. Based on Rayleigh fractionation modeling of the whole-rock Rb-Sr system, we propose a multi-stage crystallization differentiation model: initial crystal mush underwent melt extraction at 40%-50% crystallinity, with the residual cumulates forming the Shaziling pluton, while the extracted melt subsequently migrated and experienced further differentiation, eventually emplacing as the Jinjiling and Pangxiemu plutons. This model provides new constraints on the magmatic evolution of Mesozoic composite plutons in South China and their implications for rare metal enrichment.

Key words: Jiuyishan composite pluton; Zircon; Rayleigh fractionation modeling; Crystal mush model

引言

复式花岗岩体通常指时空紧密共生、但成分或时代各异的花岗质岩体组合，其成因可包括多期次独立岩浆事件，亦可为同源岩浆经多次分离、上升与侵位所形成的复式岩体（陈晨等，2018；杜日俊等，2019；蒋少涌等，2020）。南岭地区在中生代（165-150 Ma）发育大量由主体与高硅补体花岗岩组成的复式岩体（Mao et al., 2013; Wang et al., 2014; Yuan et al., 2019），其内部成因联系尚不明确。九嶷山复式岩体作为该区规模最大的复式岩体，自西向东主要包括雪花顶、金鸡岭、螃蟹木、砂子岭及西山岩体。尽管前人在年代学、岩石地球化学方面已开展一定工作（付建明等，2005；李剑锋等，2021），但对其内部燕山期各单元火成岩体（砂子岭、金鸡岭、螃蟹木岩体）之间的成因关系仍缺乏系统约束。本研究拟通过高精度同位素与地球化学方法，建立九嶷山复式岩体的岩浆演化序列，为华南复式岩体成因及稀有金属富集机制提供新依据。

1 岩体地质和岩相学特征

九嶷山复式岩体地处南岭东西向构造带中段北缘，大地构造上位于华夏地块西南缘，毗邻扬子地块与华夏地块于新元古代沿 NE-NEE 向江山 - 绍兴断裂带拼合形成的构造对接带（图 1），并处于郴州-临武与耒阳-临武深大断裂的交汇部位。区内出露地层自南华系至新生界均有发育，最老地层为南华系田园岭组；主要地层单元包括震旦系 - 寒武系边缘海盆相砂泥质岩系，以及泥盆系-中三叠统浅海台地相碳酸盐岩建造（李剑锋等，2020）。

砂子岭岩体出露面积约 65 km²，岩性主要包括中细粒花岗闪长岩和斑状黑云母二长花岗岩（付建明等，2005；李剑锋等，2020）。本次研究的斑状黑云母二长花岗岩呈浅灰-黑色，具斑状结构，主要矿物组成为斜长石（20%~25%）、钾长石（30%~35%）、石英（25%~30%）、

黑云母（~10%）及少量角闪石（图 2a, b），副矿物见锆石、磷灰石和钛铁矿。金鸡岭岩体总面积约 350 km²，主体岩性为斑状中粗粒黑云母二长花岗岩，呈浅肉红色-灰白色。岩石主要矿物为石英（30%~40%）、钾长石（25%~45%）、斜长石（15%~30%）和黑云母（5%~10%），副矿物以锆石、金红石和独居石为主。钾长石斑晶发育，粒径多介于 5~25 mm，含量约 5%~10%（图 2d, e）。螃蟹木岩体出露面积约 49 km²，以细粒二长花岗岩为主。矿物组成包括石英（35%~40%）、钾长石（25%~40%）、斜长石（25%~35%）及铁锂云母（5%~10%）（图 2g, h），副矿物主要为锆石、独居石和金红石。石英多呈半自形-它形粒状；钾长石多为自形粒状，常见卡式双晶，部分发生高岭石化和绢云母化；斜长石呈自形粒状，发育聚片双晶。

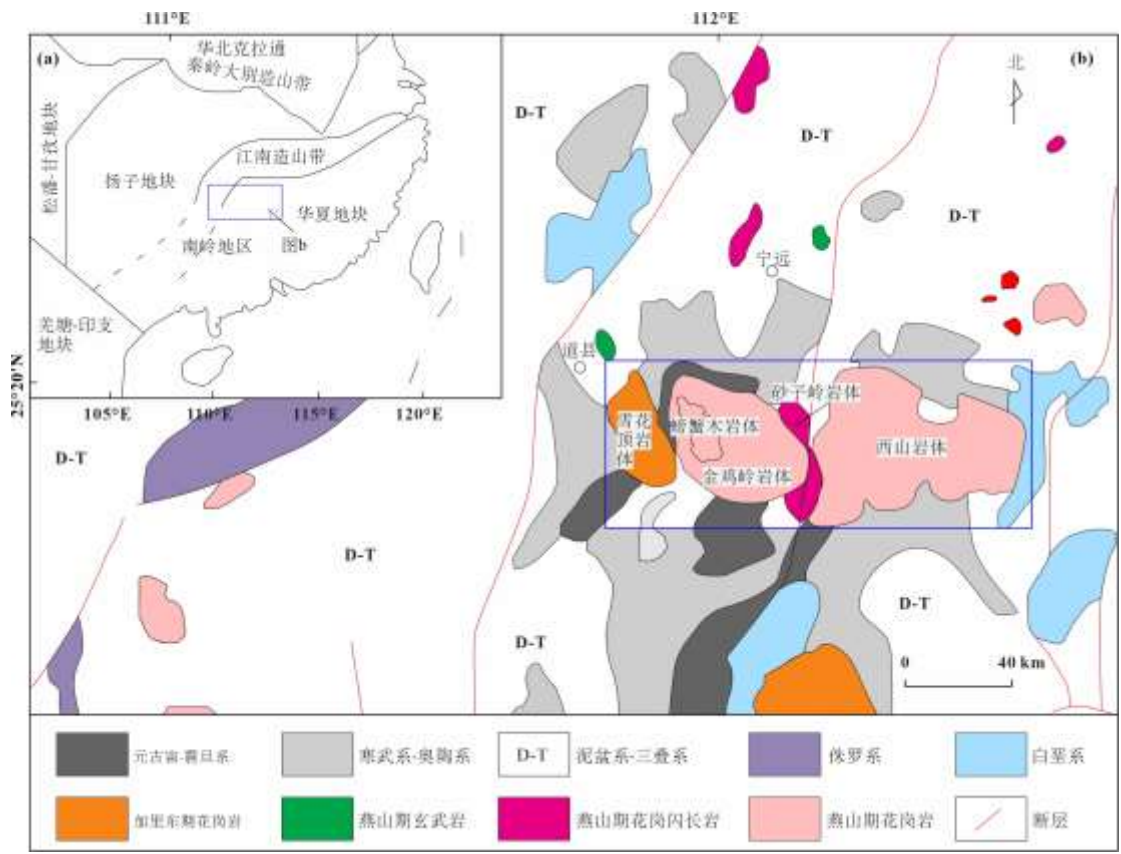


图 1 (a) 大地构造位置图；(b) 南岭地区岩浆岩分布图（据 Shu et al., 2011）

Fig.1 (a) Tectonic Location Map; (b) Distribution Map of Magmatic Rocks in the Nanling Region (modified after Shu et al., 2011)

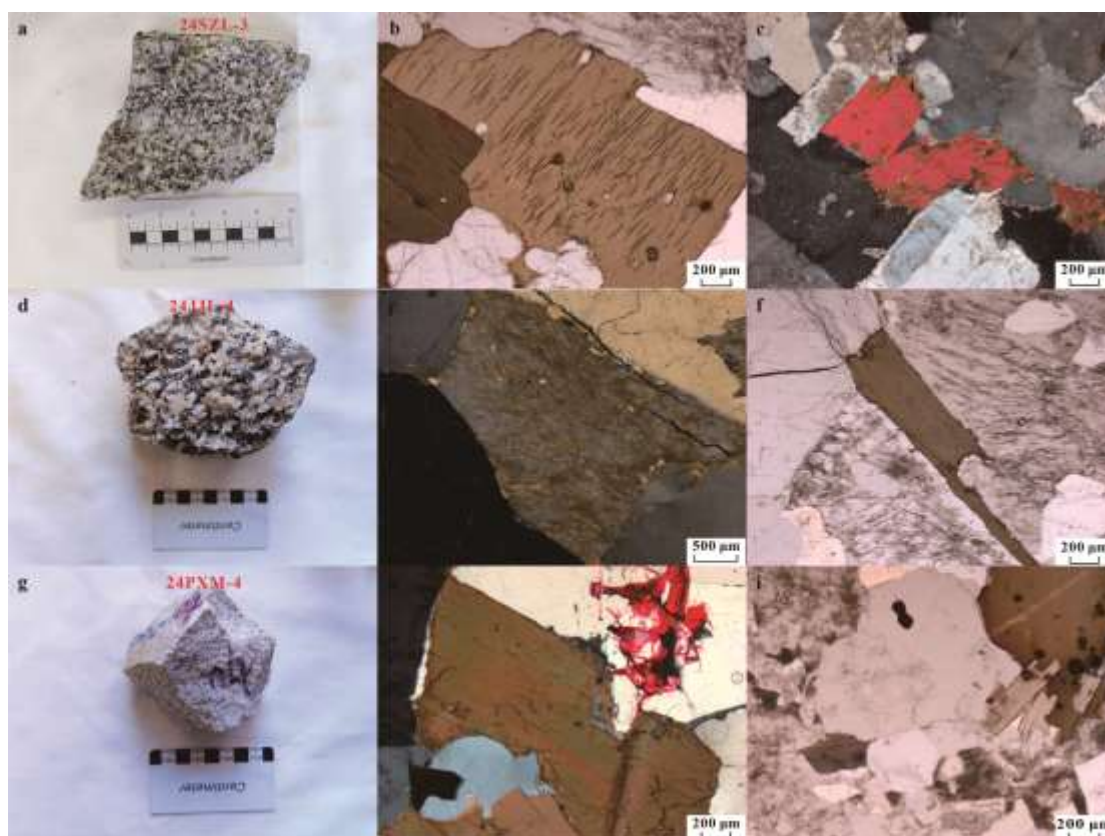


图2 砂子岭、金鸡岭和螃蟹木样品手标本和显微照片 (a) 砂子岭花岗岩样品 24SZL-3 手标本; (b) 砂子岭花岗岩样品 24SZL-22 手标本; (c) 砂子岭花岗岩样品 24SZL-3 显微照片; (d) 金鸡岭花岗岩样品 24JJL-4 手标本; (e) 金鸡岭花岗岩样品 24JJL-48 手标本; (f) 金鸡岭花岗岩样品 24JJL-4 显微照片; (g) 螃蟹木岩体样品 24PXM-4 手标本; (h) 螃蟹木岩体样品 24PXM-22 手标本; (i) 螃蟹木岩体样品 24PXM-22 显微照片

Fig.2 Hand specimens and micrographs of samples from Shaziling, Jinjiling, and Pangxiemu pluton. (a) Hand specimen of granite sample 24SZL-3 from Shaziling pluton; (b) Hand specimen of granite sample 24SZL-22 from Shaziling pluton; (c) Micrograph of granite sample 24SZL-3 from Shaziling pluton; (d) Hand specimen of granite sample 24JJL-4 from Jinjiling pluton; (e) Hand specimen of granite sample 24JJL-48 from Jinjiling pluton; (f) Micrograph of granite sample 24JJL-4 from Jinjiling pluton; (g) Hand specimen of granite sample 24PXM-4 from Pangxiemu pluton; (h) Hand specimen of granite sample 24PXM-22 from Pangxiemu pluton; (i) Micrograph of granite sample 24PXM-22 from Pangxiemu pluton.

2 测试方法

本次研究的样品均为新鲜花岗岩。全岩主微量元素分析在澳实分析检测(广州)有限公司完成。样品经切割制片后,选取新鲜部分破碎,并使用振动玛瑙研磨机研磨至200目。主量元素采用X射线荧光光谱(XRF)法测定:将样品粉末与偏硼酸锂-四硼酸锂混合熔剂(添加硝酸锂作为氧化剂)熔融,浇铸成铂金熔片后上机测试。烧失量(LOI)经1000°C灼烧后测定,元素含量依据灼烧前后质量变化及XRF结果计算得出。微量元素使用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析:取适量样品熔融后冷却,以硝酸-盐酸-氢氟酸混合酸溶解,并上机测定。分析过程中采用标准物质监控数据质量,主量元素分析准确度优于5%,大多数

微量元素分析准确度在 5%-10%之间。

锆石分选于廊坊诚信地质服务有限公司完成。首先通过磁选与重液分离初步富集，后在双目显微镜下人工挑选晶形完整、透明度高的颗粒。为避免污染，实验全程在洁净环境中进行，设备在使用间隙均经纯水清洗并充分风干。锆石颗粒置于环氧树脂靶中抛光至暴露内部结构，并于重庆宇劲科技服务有限公司采用扫描电镜（SEM）阴极发光（CL）技术观察其内部结构。

锆石 U-Pb 定年工作在南京聚谱检测科技有限公司完成，使用 Analyte Excite 型 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统（Teledyne Cetac Technologies）与 Agilent 7700x 型四极杆 ICP-MS（Agilent Technologies）联机。激光束斑直径为 35 μm ，能量密度为 6.0 J/cm²，频率 8 Hz，单点剥蚀时长 40 秒，载气为高纯氦。以标准锆石 91500 为外标校正仪器质量歧视与分馏效应，GJ-1 为未知样监控数据质量。微量元素含量以 NIST SRM 610 为外标，分别以 Si 和 Zr 为内标计算 Pb 及其他元素含量。原始数据经 ICPMSDataCal 处理，U-Pb 年龄采用 LaDating（v1.5）计算，普通铅校正使用 ComPbcorr#3_18 程序，年龄计算与图解生成采用 Isoplot 4.15 完成。在 U-Pb 定年基础上，选取谐和度高的锆石颗粒进行 Hf 同位素分析，使用同一激光剥蚀系统与 Nu Plasma II 型多接收器 ICP-MS（MC-ICP-MS，Nu Instruments）联机测试。激光束斑直径为 50 μm ，能量密度 6.0 J/cm²，频率 8 Hz，剥蚀时间 40 秒。每分析 10 粒样品锆石插入 2 粒标准锆石（GJ-1、91500、Plešovice、Mud Tank、Penglai）进行质量监控。Hf 同位素数据处理中，以 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.7325$ 校正质量歧视（ β_{Hf} ）；根据实测 $^{172}\text{Yb}/^{173}\text{Yb}$ 计算 Yb 的歧视因子 β_{Yb} ，并按 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.5887$ 扣除 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的同质异位干扰；假定 $\beta_{\text{Lu}} = \beta_{\text{Hf}}$ ，采用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.02655$ 扣除 ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的干扰。

3 结果

3.1 全岩主量元素特征

砂子岭、金鸡岭和螃蟹木岩体全岩主量元素测试分析结果见附表 1。金鸡岭岩体和螃蟹木岩体 SiO₂ 含量为 72.86%-76.82%，全碱含量（Na₂O+K₂O）为 7.42%-9.24%，总体表现出高硅富碱特征，并具有较低的 CaO（0.26%-1.52%）、MgO（0.06%-0.41%）、FeO^T（0.64%-3.02%）、TiO₂（0.01%-0.36%）和 P₂O₅（0.01%-0.10%）。在 TAS 图解中，两类花岗岩均落在亚碱性花岗岩区域（图 3a）。全岩铝饱和指数 A/CNK 在 1.00-1.24 范围内，A/NK 在 1.05-1.30 范围内，在 A/CNK-A/NK 图解中（图 3b），样品落入过铝质花岗岩区域内。砂子岭岩体 SiO₂ 含量为 65.89%-69.89%，全碱含量为 5.86%-7.92%，相比于金鸡岭和螃蟹木岩

体, 砂子岭岩体全碱含量更低, 但具有相对较高的 CaO (0.46%-2.95%)、 MgO (0.44%-1.22%)、 FeO^{T} (4.09%-6.91%)、 TiO_2 (0.45%-0.92%) 和 P_2O_5 (0.16%-0.31%)。在 TAS 图解中, 大部分样品落在花岗闪长岩区域 (图 3a)。全岩铝饱和指数 A/CNK 在 0.89-1.80 范围内, A/NK 在 1.41-2.02 范围内, 在 A/CNK - A/NK 图解中 (图 3b), 样品大部分落入准铝质花岗岩区域内。

图3 九嶷山复式岩体 (a) TAS 分类图 (据 Middlemost, 1994); (b) A/CNK-A/NK 图 (据 Maniar and Piccoli, 1989)

3.2 全岩微量和稀土元素特征

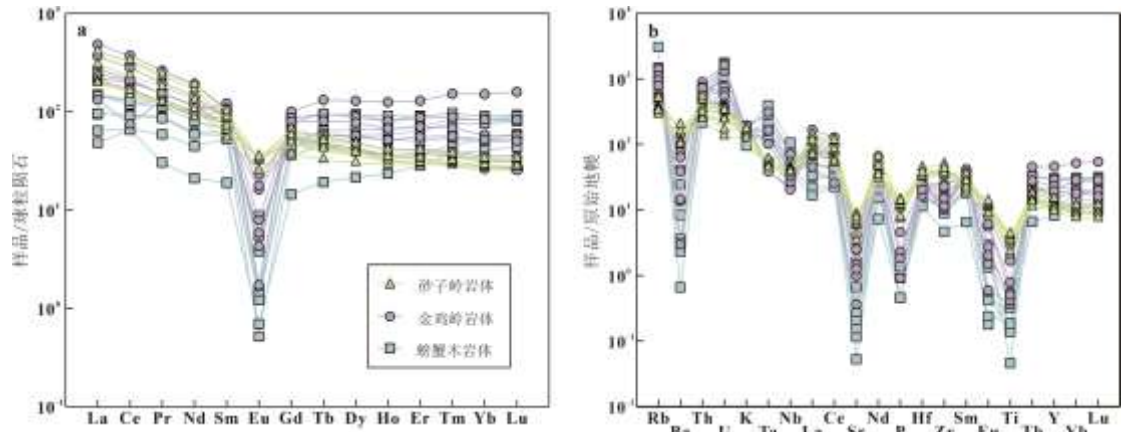


图 4 (a) 砂子岭、金鸡岭岩体和螃蟹木岩体的球粒陨石标准化稀土元素配分图; (b) 砂子岭、金鸡岭岩体和螃蟹木岩体的原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 4 (a) Chondrite-normalized rare earth element (REE) patterns of the Shaziling, Jinjiling, and Pangxiemu plutons; (b) Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams of the Shaziling, Jinjiling, and Pangxiemu plutons.

3.3 锆石 U-Pb 定年及微量元素组成

本次研究选取砂子岭岩体 (24SZL-22)、金鸡岭岩体 (24JL-15) 和螃蟹木岩体 (24PXM-14) 三件样品进行锆石 U-Pb 定年及微量元素分析, 相关分析结果见表 2 和表 3。前人研究表明, 对年龄较小 (<1.0 Ga) 的锆石使用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄更加准确, 对年龄较大的锆石一般采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 (Griffin et al., 2004)。因此, 本次对年轻的锆石采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。砂子岭岩体锆石颗粒自形程度较好, 长 50-200 μm , 长宽比约为 1:1-3:1, 可见明显的震荡环带, 少数锆石颗粒内部颜色较暗 (图 5)。对其中 21 颗锆石进行分析, 20 颗锆石得出一致的年龄, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 153.0 ± 1.0 Ma (MSWD=0.1) (图 7)。稀土元素总量变化范围较大 ($\Sigma\text{REE}=460 \times 10^{-6}$ - 944×10^{-6}), 重稀土 HREE 含量范围为 455×10^{-6} - 926×10^{-6} 。金鸡岭岩体锆石颗粒自形程度较好, 长约 80-300 μm , 长宽比约为 1:1~4:1, 可见明显的震荡环带 (图 5)。对其中 20 颗锆石进行分析, 所有测试点均落在谐和线上或附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 153.1 ± 0.9 Ma (MSWD=0.3) (图 7)。稀土元素总量变化范围较大 ($\Sigma\text{REE}=465 \times 10^{-6}$ - 1276×10^{-6}), 重稀土 HREE 含量范围为 455×10^{-6} - 1250×10^{-6} 。螃蟹木岩体锆石颗粒以半自形-自形为主, 长约 100-200 μm , 长宽比约为 1:1-2:1。大多数锆石颗粒颜色较暗, 比较模糊, 内部呈现海绵状或斑状等特征, 这些锆石可能是由于高 U 导致的放射性破坏 (Wang et al., 2014), 圈点测年已避开 (图 5)。对其中 20 颗锆石进行分析, 15 颗锆石呈现出高度一致的谐和年龄, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 153.8 ± 1.5 Ma (MSWD=1.6) (图 7)。稀土元素总量变化范围较大 ($\Sigma\text{REE}=598 \times 10^{-6}$ - 1403×10^{-6}), 重稀土 HREE 含量范围为

582×10^{-6} - 1377×10^{-6} 。

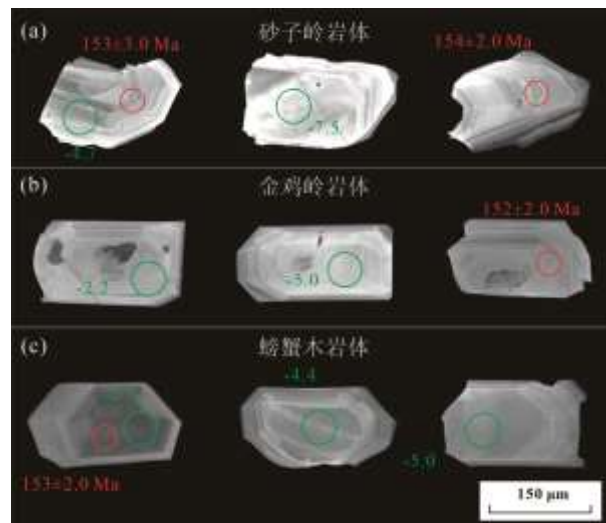


图 5 代表性锆石阴极发光 CL 图像 (a) 砂子岭岩体样品; (b) 金鸡岭岩体样品; (c) 螃蟹木岩体样品;图中红色圆圈 (直径为 $35 \mu\text{m}$) 和绿色圆圈 (直径为 $45 \mu\text{m}$) 分别表示锆石的 U-Pb 年龄和 Hf 同位素测点位置

Fig. 5 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons (a) Samples from Shaziling pluton; (b) Samples from Jinjiling pluton; (c) Samples from Pangxiemu pluton; Red circles indicate the U-Pb dating locations, and green circles indicate the positions for Hf isotope analysis.

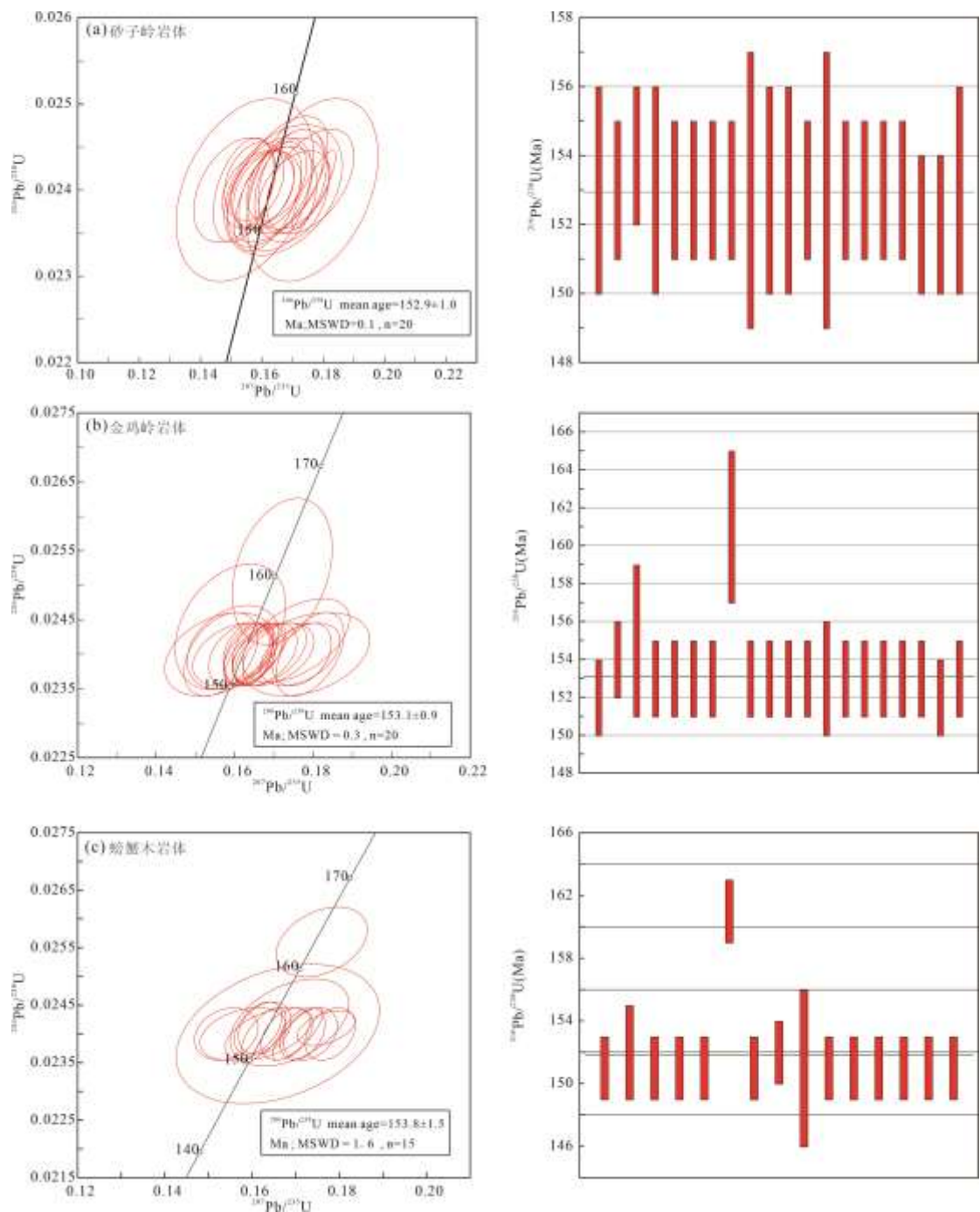


图 6 九嶷山复式岩体代表性锆石 U-Pb 年龄谐和图; (a) 砂子岭岩体样品; (b) 金鸡岭岩体样品; (c) 螃蟹木岩体样品

Fig. 6 U-Pb concordia diagrams of representative zircon U-Pb ages from the Jiuyishan Composite Pluton; (a): Samples from the Shaziling pluton; (b): Samples from the Jinjiling pluton; (c): Samples from the Pangxiemu pluton.

3.4 锆石 Hf 同位素特征

砂子岭、金鸡岭和螃蟹木岩体锆石 Hf 同位素测试分析结果见附表 4。砂子岭岩体花岗岩 10 个测点及前人数据显示, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的范围为 -14.2~4.8, 平均值为 -4.58, 显示多峰特征 (图

7b); 二阶段模式年龄 t_{DM2} 值在 0.89 Ga~2.10 Ga, 平均值为 1.49 Ga。金鸡岭岩体 10 个测点及综合前人数据表明, $\epsilon_{Hf}(t)$ 的范围为-7.1~-2.2, 平均值为-5.0; 二阶段模式年龄 t_{DM2} 值在 1.34 Ga~1.65 Ga, 平均值为 1.52 Ga, 显示双峰特征。螃蟹木岩体 10 个测点及已有数据表明, $\epsilon_{Hf}(t)$ 的范围为-7.3~-2.5, 平均值为-5.0, 二阶段模式年龄 t_{DM2} 值在 1.36 Ga~1.66 Ga, 平均值为 1.52 Ga, 显示单峰特征。

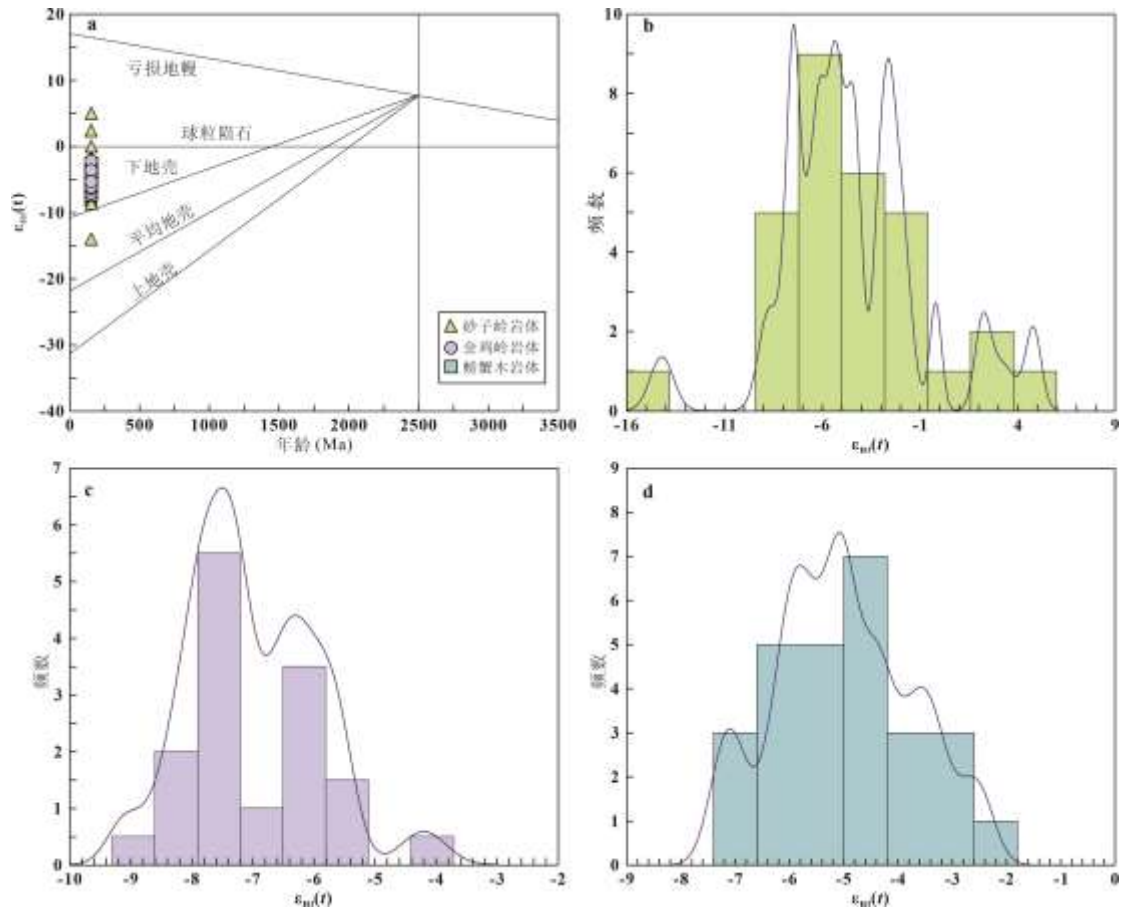


图 7 (a) 九嶷山复式岩体锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ -t 图; $\epsilon_{Hf}(t)$ 值的直方图 (b) 砂子岭岩体样品, (c) 金鸡岭岩体样品和 (d) 螃蟹木岩体样品

Fig. 7 (a) Zircon $\epsilon_{Hf}(t)$ -t diagrams of the Jiuyishan Composite Pluton; Histograms of $\epsilon_{Hf}(t)$ values of (b): Samples from the Shaziling pluton, (c): Samples from the Jinjiling pluton and (d): Samples from the Pangxiemu pluton.

4 讨论

4.1 成岩时代及地质意义

前人对九嶷山复式岩体已开展一系列同位素年代学研究, 其测试成果汇总于附表 7。锆石因其较高的封闭温度及较强的抗风化能力, 能够有效保存地质历史信息, 是 U-Pb 定年中最常用的副矿物。本次研究中锆石样品显示明显的 Ce 正异常及 Eu 负异常, 其主量元素组成、稀土元素配分模式及典型的振荡环带结构, 均与典型的岩浆锆石特征一致, 指示其为岩

浆成因 (Hoskin, 2005; Schaltegger, 2007; Wang et al., 2024)。本文采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年方法, 对砂子岭、金鸡岭和螃蟹木岩体中的花岗岩进行测定, 获得的加权平均年龄分别为 153.0 ± 1.0 Ma、 153.1 ± 0.9 Ma、 153.8 ± 1.5 Ma (图 6)。这些高精度定年结果与前人数据在误差范围内高度吻合, 共同限定了九嶷山复式岩体的主体形成时代为燕山早期。

南岭地区是全球范围内重要的 W-Sn 及稀有金属 (Nb-Ta-Li-Be-Cs 等) 成矿带, 其成矿时代高度集中, 主要发生于中生代, 尤其是燕山早期 (晚侏罗世-早白垩世) 为成矿高峰期 (Hu et al., 2012)。九嶷山复式岩体中花岗岩的成岩年龄与区域大规模 W-Sn 及稀有金属成矿事件的时代高度一致, 表明该岩体是同期岩浆-成矿系统的关键组成部分 (邓平等, 2012)。这一时代框架有效响应了华南中生代构造体制转换及古太平洋板块俯冲背景下的深部动力学过程, 揭示了大规模金属富集事件与岩浆分异演化之间的成因联系, 为理解区域成岩-成矿地球动力学背景提供了重要年代学约束 (Li and Li, 2007)。

4.2 花岗岩类型归属

传统上, 花岗岩可划分为 I 型与 S 型, 其分类主要依据源岩性质: I 型源自变火成岩, 而 S 型花岗岩则以变沉积岩为主要物源 (Chappel and White, 2001)。与之不同, A 型花岗岩由 Loiselle and Wones (1979) 提出, 其判别基于碱性 (Alkaline)、贫水 (Anhydrous) 及非造山 (Anorogenic) 特征, 并不强调源岩组成。地球化学上, A 型花岗岩以高 FeO^T/MgO 、Ga、Zr、Nb 和 Y 含量, 以及显著亏损 Sr、Ba、Ti 和 P 为特征。常用判别指标包括 $10000\text{Ga}/\text{Al} \geq 2.6$ 、 $\text{Zr} \geq 250$ ppm 和 $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y} \geq 350$ ppm (Collins et al., 1982; Bonin, 2007)。本次研究表明, 九嶷山复式岩体花岗岩具有较高 FeO^T/MgO 比值, 介于 5.66~17.75 之间, 平均值为 10.1, 明显高于全球典型 M 型 (平均 2.37)、I 型 (平均 2.27) 和 S 型花岗岩 (平均 2.38), 而与 A 型花岗岩范围 (4.16~35.3) 高度吻合 (Whalen et al., 1987)。稀土元素配分模式及微量元素蛛网图均显示其显著亏损 Sr、Ba、Ti 和 P。在 Zr-10000Ga/Al 图解中, 砂子岭、金鸡岭和螃蟹木岩体的代表性样品 (除螃蟹木岩体一件样品外) 均落入 A 型花岗岩范围; 在 $(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ -10000Ga/Al 判别图中, 上述样品 (一件螃蟹木岩体样品除外) 也一致落于 A 型花岗岩区域内 (图 8)。A 型花岗岩通常形成于高温环境中, 区别于相对低温环境的 I 型和 S 型花岗岩。全岩 Zr 饱和温度计算表明, 砂子岭、金鸡岭和螃蟹木岩体平均温度分别为 869°C、805°C 和 766°C; 锆石 Ti 温度计结果则分别为 781°C、736°C 和 728°C, 这些温度估值整体处于高温范围, 符合 A 型花岗岩特征。副矿物锆石的微量元素组成可有效示踪岩浆源区属性 (Chu et al., 2009)。已有研究表明: I 型花岗岩锆石通常具有低 Pb 含量及高

Th/Pb 比值；S 型花岗岩锆石则以高 Pb 含量、低 Th/Pb 比值为特征；A 型花岗岩锆石相应参数介于二者之间（Wang et al., 2012）。本研究中，砂子岭岩体锆石 Pb 含量为 3.44-11.8 ppm，Th 为 55.7-151 ppm；金鸡岭岩体 Pb 为 3.25-13.1 ppm，Th 为 82.7-195 ppm；螃蟹木岩体 Pb 为 3.78-28.2 ppm，Th 为 110-193 ppm。这些地球化学特征均落在 I 型与 S 型花岗岩锆石成分范围之间，与典型 A 型花岗岩锆石组成一致（图 8c）。综合主微量元素地球化学指标、岩浆温度估算结果及锆石微量元素特征，九嶷山复式岩体中的花岗岩应属于分异型 A 型花岗岩，而非 I 型或 S 型花岗岩（付建明等，2005；李剑锋等，2020）。

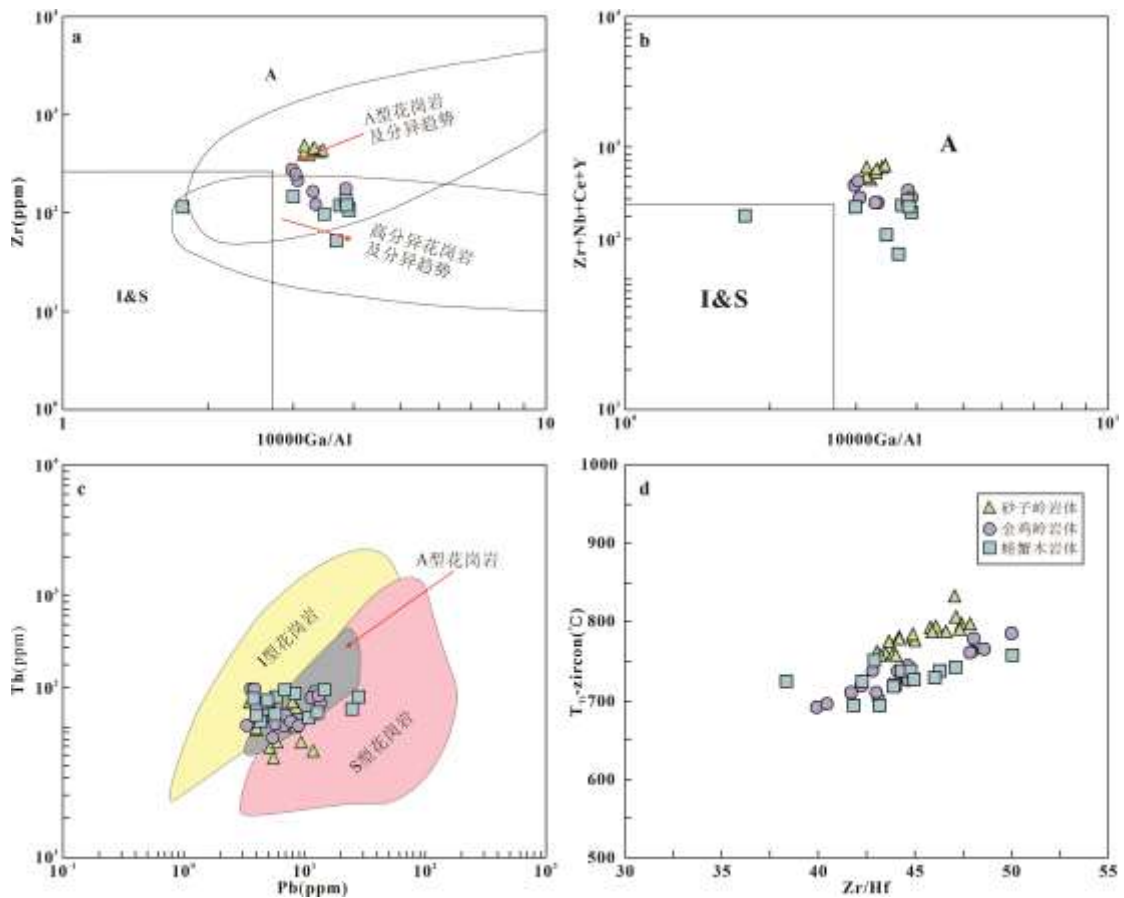


图 8 (a) 全岩 Zr-10000Ga/Al 图解；(b) 全岩 (Zr+Nb+Ce+Y)-10000Ga/Al 图解；(c) 锆石 Th-Pb 图解；(d) 锆石 $T_{\text{Ti-zircon}}-\text{Zr/Hf}$ 图解

Fig. 8 (a) whole-rock Zr-10000Ga/Al diagram; (b) whole-rock (Zr+Nb+Ce+Y)-10000Ga/Al diagram; (c) zircon Th-Pb diagram; (d) zircon $T_{\text{Ti-zircon}}-\text{Zr/Hf}$ diagram.

根据 Eby (1992) 提出的分类方案，A 型花岗岩可进一步划分为 A₁ 和 A₂ 两种亚类，其分类主要取决于地球化学特征、构造背景与源区性质：A₁ 型花岗岩通常形成于大陆裂谷或板内非造山环境，可能来源于洋岛玄武质类似的软流圈地幔部分熔融产生的熔体经历高分异演化；A₂ 型花岗岩则多形成于后碰撞或弧后伸展等造山期后构造转换阶段，其源区通常为遭受幔源组分加入或先前俯冲改造的陆壳物质。在 Nb-Y-Ce 和 Nb-Y-3Ga 判别图解中，砂子

岭、金鸡岭和螃蟹木岩体的样品均落入 A₂ 型花岗岩区域（图 9）。综上所述，九嶷山复式岩体应归属于 A₂ 亚类的 A 型花岗岩。另外在 Ta-Yb 和 Rb-(Y+Nb) 图解中，砂子岭、金鸡岭和螃蟹木花岗岩也均落在板内花岗岩区域内（图 9c, d），说明这三个岩体形成于板内伸展环境。

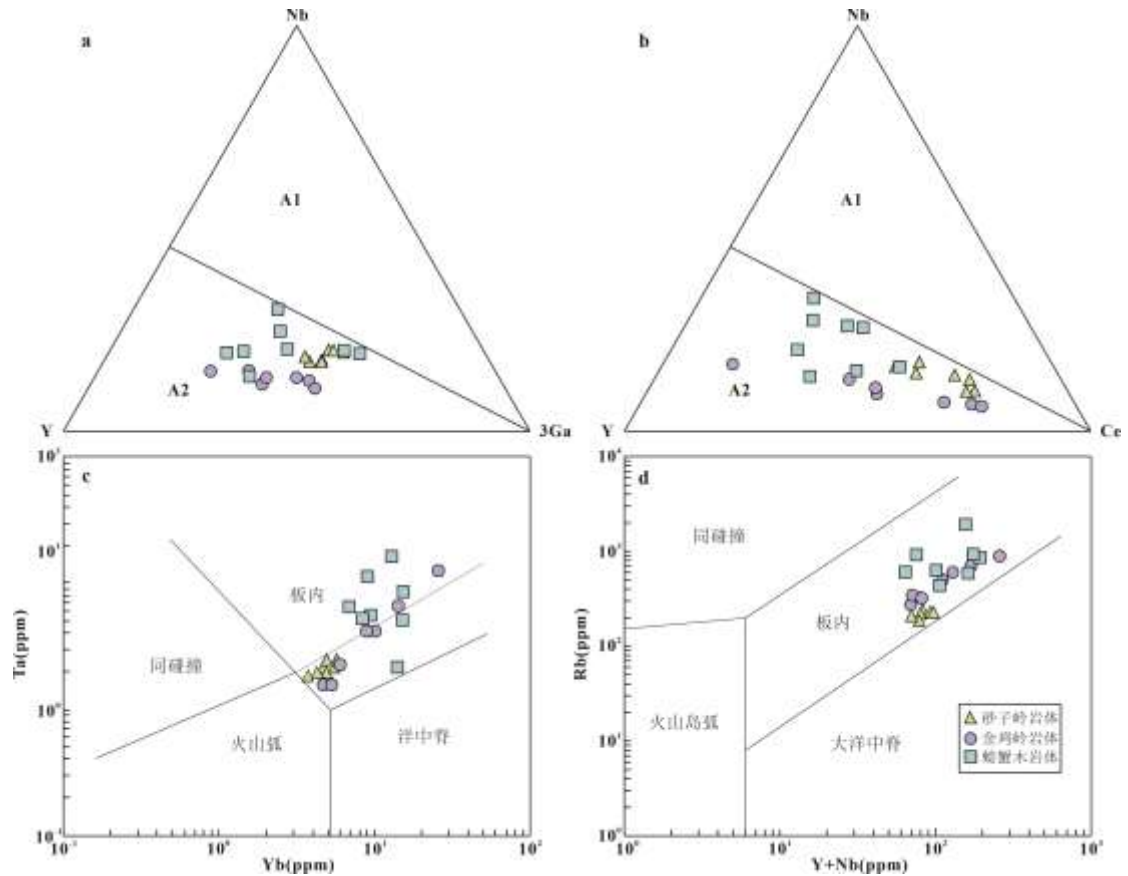


图 9 (a) Nb-Y-3Ga 图解; (b) Nb-Y-Ce 图解 (据 Eby, 1992); (c) Ta-Yb 图解; (d) Rb-(Y+Nb) 图解

Fig. 9 (a) Nb-Y-3Ga diagram; (b) Nb-Y-Ce diagram; (c) Ta-Yb diagram; (d) Rb-(Y+Nb) diagram

4.3 源区特征

锆石作为花岗岩中常见的副矿物，因其具有较高的同位素封闭温度及极低的 Lu/Hf 比值，能够有效记录原始岩浆的 Hf 同位素组成，为探讨岩石成因与源区性质提供关键地球化学约束。本次研究表明，砂子岭岩体锆石的 Hf 同位素组成具有显著的非均一性， $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围较大 (-14.2~4.8)，对应的二阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 主要集中于 0.89~2.1 Ga；而金鸡岭和螃蟹木岩体则表现出相对均一的 Hf 同位素组成，其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 -7.1~-2.2 和 -7.3~-2.5，相应的二阶段模式年龄分别集中于 1.3~1.6 Ga 和 1.4~1.7 Ga。

所有分析锆石均显示典型的岩浆成因稀土配分模式，表明其 Hf 同位素体系未受到后期热液作用的显著改造（图 10）。结合前人 Sr-Nd 同位素研究结果，岩体在侵位过程中未遭受强烈的地壳同化混染（李剑锋等，2021）。因此，锆石 Hf 同位素组成的差异应主要归因于岩浆源区自身的性质。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解中，样品主要分布于亏损地幔与古老下地壳演化线之

间，表明其成岩物质应以中元古代古老下地壳成分为主体。值得注意的是，砂子岭岩体中测点（12D72-06）显示出较高的初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值（0.282816）及正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值，为幔源物质的加入提供了直接证据。砂子岭岩体锆石 Hf 同位素组成呈多峰分布特征（图 7），揭示其源区存在显著的多元性（Veeravinantanakul et al., 2021）；而金鸡岭和螃蟹木岩体则呈单峰分布，显示其源区相对均一。这一特征表明，从砂子岭岩体到金鸡岭、螃蟹木岩体，岩浆系统可能经历了充分的岩浆演化，使早期由幔源物质加入所引发成分不均一性逐渐消除，最终形成成分相对均一的熔体。

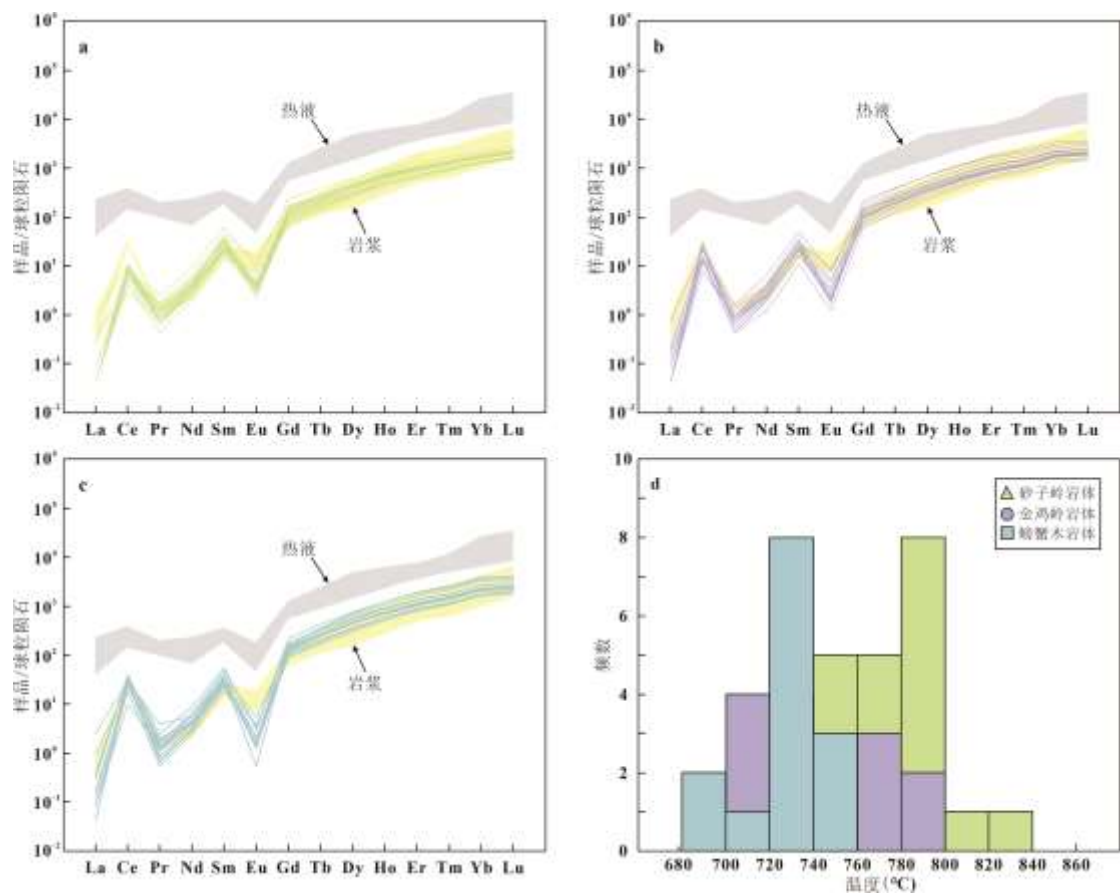


图 10 (a) 砂子岭岩体锆石球粒陨石标准化稀土元素配分图；(b) 金鸡岭岩体锆石球粒陨石标准化稀土元素配分图；(c) 螃蟹木岩体锆石球粒陨石标准化稀土元素配分图；(d) 锆石温度直方频率图

Fig. 10 (a) Chondrite-normalized REE distribution patterns of zircons from the Shaziling pluton; (b) Chondrite-normalized REE distribution patterns of zircons from the Jinjiling pluton; (c) Chondrite-normalized REE distribution patterns of zircons from the Pangxiemu pluton; (d) Histogram of zircon saturation temperature.

在 160-150 Ma 期间，南岭地区处于古太平洋板块俯冲体系由挤压向伸展转换的关键时期。随着俯冲板块的破裂、分层与回撤，岩石圈发生显著伸展减薄，诱发软流圈地幔上涌及幔源热流的注入，导致南岭地区古老下地壳基底发生大规模部分熔融，形成了大规模的花岗岩体（Mao et al., 2013）。砂子岭、金鸡岭和螃蟹木岩体的成岩年龄恰好对应于该板内伸展背景，进一步支持其形成受到地幔物质显著影响的观点。综上所述，九嶷山复式岩体应共同起

源于中元古代古老下地壳基底，其 Hf 同位素组成的差异主要反映地幔物质对成岩过程的影响。

4.4 九嶷山复式岩体成因

九嶷山复式岩体的成因机制主要包括以下三种模式：（1）幔源基性与壳源花岗质岩浆混合；（2）多批次部分熔融与就位；（3）同源岩浆结晶分异作用。锆石 Hf 和全岩 Sr-Nd 同位素组成指示，该复式岩体均起源于中元古代古老下地壳基底，并伴有幔源组分的少量加入，因此可排除幔源-壳源岩浆混合成因。此外，砂子岭、金鸡岭和螃蟹木岩体的锆石 U-Pb 加权平均年龄分别为 153.0 ± 1.0 Ma、 153.1 ± 0.9 Ma、 153.8 ± 1.5 Ma，属同一岩浆事件产物，不支持多批次熔融-就位模式。近年来的研究认为，高硅花岗岩可经由晶粥熔体的萃取与分离形成（Bachmann et al., 2004; Schaen et al., 2017）。多项地球化学证据支持九嶷山复式岩体属同一母岩经晶粥结晶分异作用形成的连续演化形成的成因机制：（1）全岩主量元素：SiO₂ 含量从砂子岭岩体（65.89~69.10 wt%，平均值为 67.82 wt%）经金鸡岭岩体（72.86~75.09 wt%，平均值为 74.28 wt%）和螃蟹木岩体（73.71~76.82 wt%，平均值为 75.99 wt%）显著升高；铝饱和度（A/CNK）从弱过铝质（均值 1.01）增至强过铝质（均值 1.14）；分异指数（DI）自 78.5 递增至 94.3，一致指示岩浆演化程度持续增强；（2）全岩微量元素：Zr/Hf 比值从砂子岭（38.9~41.5，平均值 39.9）经金鸡岭（15.0~35.7，平均值 27.3）降至螃蟹木（12.0~24.1，平均值 18.9）显著降低，反映锆石等副矿物的分离；Eu 负异常逐渐增强（Eu[#]值从 0.55 降至 0.05），表明斜长石持续结晶分离；（3）岩浆温度连续下降：全岩 Zr 饱和温度从砂子岭（855~882℃，均值 869℃）经金鸡岭（776~837℃，均值 805℃）降至螃蟹木岩体（710~799℃，均值 766℃）；锆石 Ti 温度计结果与之吻合，显示从砂子岭（756~831℃，均值 781℃）经金鸡岭（693~787℃，均值 736℃）降至螃蟹木（693~758℃，均值 728℃），揭示岩浆体系在分异过程中持续冷却；（4）同位素源区一致性：锆石 Hf 同位素表明九嶷山复式岩体均源自于中元古代下地壳基底，具有共同的源区特征。上述主量、微量、温度和同位素证据共同表明，九嶷山复式岩体为同一期母岩浆在晶粥系统中经历结晶分异的产物，其成分变化主要受控于晶体-熔体分离效率。

瑞利分馏模拟为九嶷山复式岩体的晶粥模型提供了定量约束。本次研究选取 Rb、Sr 元素开展模拟计算，矿物分配系数见附表 5。采用两种模式进行模拟：（1）模式一以演化程度最低的砂子岭岩体样品（24SZL-14）作为初始熔体，设定矿物组合为钾长石（35%）、斜长石（25%）、石英（25%）、黑云母（10%）和角闪石（5%）。模拟结果表明，金鸡岭岩体可

由砂子岭初始熔体经 20%-60%结晶分异形成；然而，要形成高硅螃蟹木岩体（24PXM-4，DI=95.66），则需 70-80%以上的极端分异程度，这一过程在地质上难以实现（Song et al., 2018）。因此，螃蟹木岩体并非直接源自砂子岭熔体的连续分异。我们认为砂子岭岩体代表残余的晶粥体，包含堆晶矿物与残留熔体；金鸡岭熔体自该晶粥体中抽取而出，经历了 40%-50%的结晶分异，该比例在地质过程中较为合理。（2）模式二将金鸡岭岩体视为螃蟹木岩体的母熔体。选取金鸡岭岩体中具有代表性成分的样品（24JIL-66，DI=93.57）作为初始熔体，矿物组合石英（35%）、钾长石（30%）、斜长石（30%）及黑云母（5%）。模拟表明，螃蟹木岩体可由金鸡岭熔体经约 60%的结晶分异形成，该过程在地质上可行（图 11）。

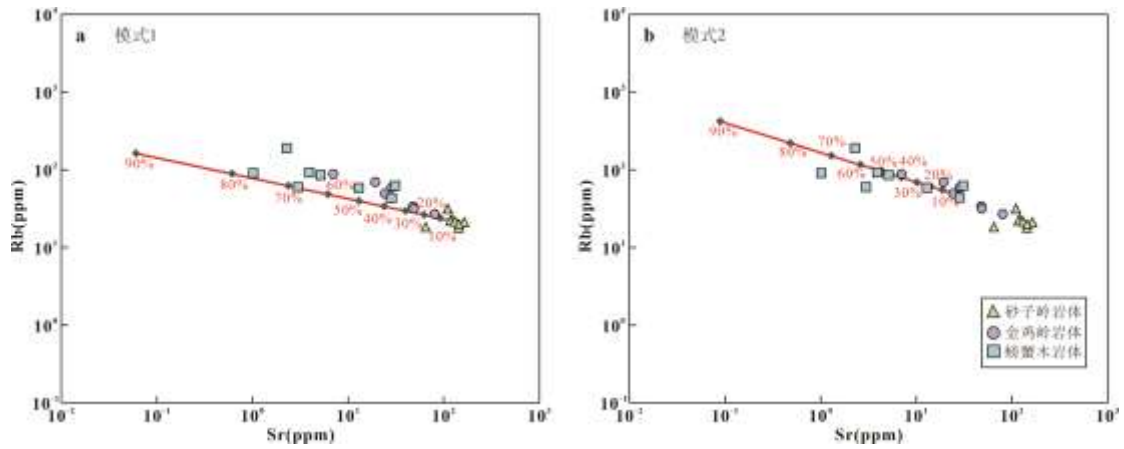


图 11 九嶷山复式岩体结晶分异模拟图

Fig. 11 Crystallization differentiation modeling diagram for the Jiuyishan composite pluton.

基于上述地球化学约束与模拟结果，本文构建九嶷山复式岩体成因模型如下：燕山早期（160-150 Ma），古太平洋板块以低角度向欧亚大陆南缘持续俯冲，引发岩石圈伸展及软流圈上涌，导致九嶷山地区古构造带重新活化（Mao et al., 2013; 李剑锋等，2020）。幔源基性岩浆底侵促使中元古代下地壳发生部分熔融，形成花岗质母岩浆。该母岩将侵位于中上地壳后，经历冷却并转化为晶粥系统。随着结晶分异作用的进行，当晶粥体中晶体分数达到 40%-50%时，发生熔体抽取事件。抽取后的残余相（包括堆晶体和残余熔体）共同构成砂子岭岩体；而被萃取的熔体向上迁移，在浅部岩浆房中经历进一步的结晶分异，形成金鸡岭岩体。该熔体最终又经约 60%的高度分异，形成极端高硅螃蟹木岩体（图 12）。

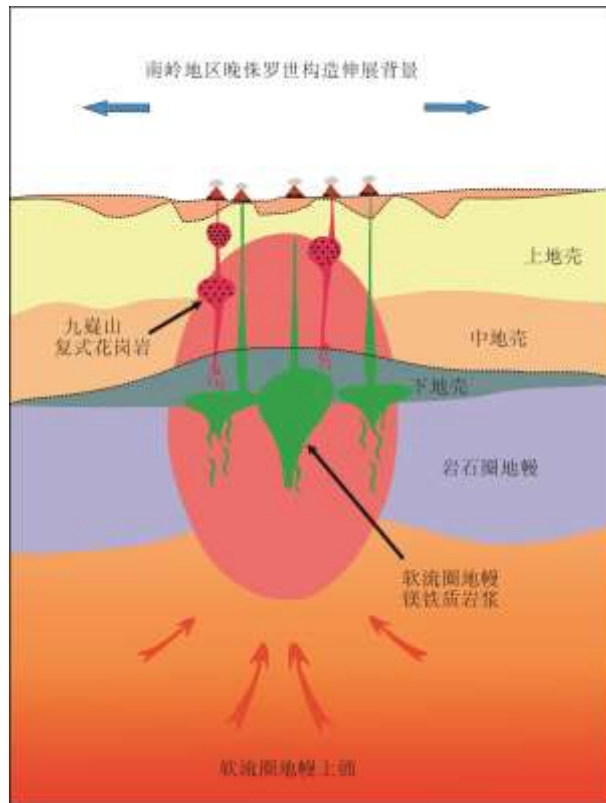


图 12 九嶷山复式岩体成因模拟图

Fig. 12 Modeling diagram for the Genesis of the Jiuyishan composite pluton.

5 结论

(1) 砂子岭、金鸡岭及螃蟹木岩体的花岗岩形成年龄集中于 160~150 Ma，属于燕山早期岩浆活动的产物。属于燕山早期岩浆活动的产物。与前人研究成果一致。结合南岭地区区域地质构造背景，认为九嶷山复式岩体形成于古太平洋板块俯冲后撤所引发的板内伸展环境。

(2) 全岩 Sr-Nd 与锆石 Hf 同位素结果显示，砂子岭、金鸡岭及螃蟹木花岗岩源自古老下地壳，并混有少量地幔组分。

(3) 基于全岩 Rb-Sr 瑞利分馏模拟结果，九嶷山复式岩体成因模式为：花岗质岩浆侵入位于中上地壳后，经冷却并发生原地结晶分异。当晶粥体结晶程度达 40%-50%时，间隙熔体被抽取。残余堆晶形成砂子岭岩体；而被抽取的熔体向上迁移并持续经历结晶分异，最终形成金鸡岭和螃蟹木岩体。

参考文献

- [1] Bachmann, O., Bergantz, G., W., 2004. On the origin of crystal-poor rhyolites: extracted from batholithic crystal mushes. *Journal of Petrology*, 45(8): 1565-1582. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh019>.

- [2] Bonin B. A-type granites and related rocks: evolution of a concept, problems and prospects. *Lithos*, 2007, 97(1-2): 1-29. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.12.007>.
- [3] Chappell, B., W., White., A., J., R., 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. *Trans R Soc Edinburgh: Earth Sci. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 83(1-2). <https://doi.org/10.1130/SPE272-p1>.
- [4] Chu M F, Wang K L, Griffin W L, et al. Apatite composition: tracing petrogenetic processes in Transhimalayan granitoids. *Journal of Petrology*, 2009, 50(10): 1829-1855. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp054>.
- [5] Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to mineralogy and petrology*, 1982, 80(2): 189-200. <https://doi.org/10.1007/BF00374895>.
- [6] Eby, G., N., 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20(7): 641-644.
- [7] Glazner, A.F., Coleman, D.S., and Bartley, J.M., 2008, The tenuous connection between highsilica rhyolites and granodiorite plutons. *Geology*, v. 36, p. 183–186. <https://doi.org/10.1130/G24496A.1>.
- [8] Griffin, W., L., Belousova, E., A., Shee, S., R., et al. 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U–Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons. *Precambrian Research*, 131(3-4): 231-282. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2003.12.011>.
- [9] Hoskin, P.W.O., 2005. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3):637-648. doi:10.1016/j.gca.2004.07.006.
- [10] Hu, R.Z., Bi, X.W., Jiang, G.H., Chen, H.W., Peng, J.T., Qi, Y.Q., Wu, L.Y., Wei, W.F., 2012. Mantle-derived noble gases in ore-forming fluids of the granite-related Yaogangxian tungsten deposit, Southeastern China. *Mineralium Deposita*, 47(6):623-632. doi: 10.1007/s00126-011-0396-x.
- [11] Li, J., Huang, X.L., He, P.L., Li, W.X., Yu, Y., Chen, L.L., 2015. In situ analyses of micas in the Yashan granite, South China: Constraints on magmatic and hydrothermal evolutions of W and Ta-Nb bearing granites. *Ore Geology Reviews*, 65:793-810. doi:10.1016/j.oregeorev.2014.09.028.
- [12] Li, Z.X., Li, X.H., 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2):179-182. doi:10.1130/G23193A.1.
- [13] Loiselle, M., C., Wones, D., R., 1979. Characteristics of anorogenic granites. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 11: 468.
- [14] Ludwig, K., R., 2003. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Special publication no.4. Berkeley Geochronology center.
- [15] Maniar, P., D., Piccoli, P., M., 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635-643.
- [16] Mao, J., W., Cheng, Y., B., Chen, M., H., et al. 2013. Major types and time–space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings. *Mineralium Deposita*, 48(3):267-294. doi: 10.1007/s00126-012-0446-z.
- [17] Middlemost, E., A., K., 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 37(3-4): 215-224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252 \(94\) 90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252 (94) 90029-9).
- [18] Patiño, Douce., A., E., 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? *Geological Society, London, Special Publications*, 168(1): 55-75. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.168.01.05>.
- [19] Pearce, J., A., Harris, N., B., W., Tindle, A., G., 1984 Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>.
- [20] Schaen, A., J., Cottle, J., M., Singer, B., S., et al. 2017. Complementary crystal accumulation and rhyolite melt segregation in a late Miocene Andean pluton. *Geology*, 45(9): 835-838. <https://doi.org/10.1130/G39167.1>.
- [21] Schaltegger, U., 2007. Hydrothermal zircon. *Elements*, 3(1):51-79. doi: 10.2113/gselements.3.1.51.
- [22] Shu, X., J., Wang, X., L., Sun, T., et al. 2011. Trace elements, U-Pb ages and Hf isotopes of zircons from Mesozoic granites in the western Nanling Range, South China: implications for petrogenesis and W-Sn mineralization. *Lithos*, 127(3-4): 468-482.

- <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.09.019>.
- [23] Song, S., W., Mao, J., W., Zhu, Y., F., et al. 2018. Partial-melting of fertile metasedimentary rocks controlling the ore formation in the Jiangnan porphyry-skarn tungsten belt, south China: A case study at the giant Zhuxi W-Cu skarn deposit. *Lithos*, 304: 180-199. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.02.002>.
- [24] Veeravananakul A, Takahashi R, Agangi A, et al. Zircon Hf - isotope constraints on the formation of metallic mineral deposits in Thailand. *Resource Geology*, 2021, 71(4): 436-469. <https://doi.org/10.1111/rge.12276>.
- [25] Vervoort, J., D., Patchett, P., J., Soderlund, U., et al. 2004. Isotopic composition of Yb and the determination of Lu concentrations and Lu/Hf by isotope dilution using MC-ICPMS. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 5, 1-15. <https://doi.org/10.1029/2004GC000721>.
- [26] Wang, Y., Gao, P., Sun, G.C., Mayne, M.J., Zhang, J., Yin, C.Q., Qian, J.H., 2024. Zircon Hf isotope behavior during the magmatic-hydrothermal processes: A case study from the Yashan pluton, South China. *Lithos*, 14:470-471. doi:10.1016/j.lithos.2024.107519.
- [27] Wang, Z., Q., Chen, B., Ma, X., H., 2014. Petrogenesis of the Late Mesozoic Guposhan composite plutons from the Nanling Range, South China: implications for W-Sn mineralization. *American Journal of Science*, 314(1): 235-277. <https://doi.org/10.2475/01.2014.07>.
- [28] Wang Q, Zhu D C, Zhao Z D, et al. 2012. Magmatic zircons from I-, S-and A-type granitoids in Tibet: Trace element characteristics and their application to detrital zircon provenance study. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 53: 59-66. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2011.07.027>.
- [29] Whalen, J.B., Currie, K.L. & Chappell, B.W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib Mineral Petrol* 95, 407-419 (1987). <https://doi.org/10.1007/BF00402202>.
- [30] Yuan, S., D., Williams-Jones, A., E., Romer, R., L., et al. 2024. Protolith-related thermal controls on the decoupling of Sn and W in Sn-W metallogenic provinces: Insights from the Nanling region, China. *Economic Geology*, v.114, no. 5, pp. 1005-1012. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4669>.
- [31] Ye, X., Li, B., Tan, D. et al. Lithium Isotope Analytical Methods and Implications for Rare-Metal Mineralization in Granite-Pegmatite Systems: An Overview. *J. Earth Sci.* 35, 1878-1894 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12583-023-1972-1>.
- [32] Zhao, K., D., Jiang, S., Y., Chen, W., F., et al. 2014. Mineralogy, geochemistry and ore genesis of the Dawan uranium deposit in southern Hunan Province, South China. *Journal of Geochemical Exploration*, 138: 59-71. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.12.009>.
- [33] 陈晨, 丁兴, 李睿, 等, 2018. 从物理视角看花岗岩岩浆在非运移过程中的结晶分异[J].中国科学:地球科学, 48(03): 261-275. Chen C, Ding X, Li R, Zhang W Q, Ouyang D J, Yang L, Sun W D. 2018. Crystal fractionation of granitic magma during its non-transport processes:A physics-based perspective. *Science China Earth Sciences*, 61: 190-204, <https://doi.org/10.1007/s11430-016-9120-y> (in Chinese).
- [34] 邓平, 任纪舜, 凌洪飞, 等, 2012. 诸广山南体印支期花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. 科学通报, 57(14): 1231-1241. Deng P, Ren J S, Ling H F, et al. SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications for Indosinian granitoids of southern Zhuguangshan granitic composite, South China. *Chin Sci Bull*, 2012, 57, doi: 10.1007/s11434-011-4951-8 (in Chinese).
- [35] 杜日俊, 赖健清, 欧权, 等. 2019. 湘南金鸡岭辉绿岩脉的岩石成因及动力学意义. 地质学报, 93(08): 1998-2019. Du R J, Lai J Q, OU Q, et al. 2019. Petrogenesis of the Jinjiling diabasic dikes in southern Hunan and its dynamic significance. *Acta Geologica Sinica*, 93(8): 1998-2019 (in Chinese with English abstract).
- [36] 付建明, 马昌前, 谢才富, 等. 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, (03): 215-226. Fu J M, Ma C Q, Xie C F, et al. 2005. Ascertainment of the Jinjiling aluminous A-type granite, Hunan Province and its tectonic settings. *Geochimica*. (03): 215-226 (in Chinese with English abstract).
- [37] 蒋少涌, 赵葵东, 姜海, 等. 2020. 中国钨锡矿床时空分布规律、地质特征与成矿机制研究进展. 科学通报, 65(33): 3730-3745. Jiang S Y, Zhao K D, Jiang H, et al. 2020. Spatiotemporal distribution, geological characteristics and metallogenic mechanism of

tungsten and tin deposits in China: An overview. *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 3730–3745, doi: 10.1360/TB-2020-0221 (in Chinese with English abstract).

- [38] 李剑锋, 付建明, 马昌前, 等. 2020. 南岭九嶷山地区砂子岭岩体成因与构造属性: 来自锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学及 Sr、Nd、Hf 同位素证据. *地球科学*, 45(02): 374-388.

Li J F, Fu J M, Ma C Q, et al. Petrogenesis and Tectonic Setting of the Shaziling Pluton in Jiuyishan Area, Nanling: Evidence from Zircon U-Pb Geochronology, Petrogeochemistry, and Sr-Nd-Hf Isotopes. *Earth Science*, 45(02):374-388 (in Chinese with English abstract).

- [39] 李剑锋, 付建明, 马昌前, 等. 2021. 南岭金鸡岭岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义. *地球科学*, 46(04): 1231-1247.

Li J F, Fu J M, Ma C Q, et al. Zircon U-Pb Ages, Geochemical Characteristics and Geological Significance of Jinjiling Pluton in Nanling. *Earth Science*, 46(04):1231-1274 (in Chinese with English abstract).

- [40] 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究. *中国科学:地球科学*, 47(07):745-765.

Wu F Y, Liu X C, Ji W Q, Wang J M, Yang L. 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research. *Science China Earth Sciences*, 60:1201–1219, doi: 10.1007/s11430-016-5139-1 (in Chinese).