

赣南足洞花岗岩岩石成因及重稀土预富集机制探讨

刘 愿, 幸雪连, 夏 睿, 邹 翔

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

赣南地区, 作为我国风化壳型稀土矿床的发现源地, 不仅涵盖了轻、重稀土矿床的各类典型, 而且构成了南岭地区最具代表性的风化壳型稀土矿床聚集区。该区域内, 成矿岩体分布尤为密集。而足洞矿床是一个典型的重稀土钇矿床, 由风化壳所发生的离子吸附过程而形成。本研究系统性地剖析了足洞矿区内及其毗邻花岗岩的锆石U-Pb年代学特征, 旨在揭示其地质演化的时间框架。结合前人研究成果, 探讨足洞花岗岩成岩过程受构造演化的影响以及重稀土预富集机制。综合地质年代学分析表明, 该研究区域所采集的样品其成矿作用发生于164 Ma, 即中侏罗世(Aalenian期)。南岭地区在侏罗世发生了大规模的岩浆活动和成矿作用, 形成了大量的花岗岩以及相关钨锡、铅锌、REE等多金属矿床, 作为南岭地区广泛岩浆成岩与成矿过程的一个环节, 足洞地区的岩浆活动显著。随着古太平洋板块的俯冲后撤, 华南地区进入了一个全面的拉张-伸展构造环境, 正是在这样的地质背景下, 足洞花岗岩得以形成。

关键词

重稀土矿床, U-Pb年代学, 构造演化, 成岩时代, 足洞

Discussion on Petrogenesis and HREE Pre-Enrichment Mechanism of Zudong Granite in Southern Jiangxi Province

Yuan Liu, Xuelian Xing, Rui Xia, Xiang Zou

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

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

文章引用: 刘愿, 幸雪连, 夏睿, 邹翔. 赣南足洞花岗岩岩石成因及重稀土预富集机制探讨[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(4): 424-431. DOI: 10.12677/ag.2025.154043

Abstract

The southern Jiangxi region, being the discovery site of weathering crust-type rare earth deposits in China, not only encompasses various typical light and heavy rare earth element deposits, but also constitutes the most representative weathering crust-type rare earth deposit concentration area in the Nanling region. Within this region, metallogenic rock bodies exhibit particularly dense distribution. The Zudong deposit represents a typical yttrium-rich heavy rare earth element deposit formed through ion adsorption processes within weathering crusts. This study systematically analyzes zircon U-Pb geochronological characteristics of granites within the Zudong mining area and its adjacent regions, aiming to reveal the temporal framework of its geological evolution. Combined with previous research findings, we discuss the influence of tectonic evolution on the diagenetic process of Zudong granite and its heavy rare earth element pre-enrichment mechanism. Comprehensive geochronological analysis indicates that mineralization of the collected samples in the study area occurred at 167 Ma, corresponding to the Middle Jurassic (Aalenian Stage). The Nanling region experienced large-scale magmatic activities and mineralization events during the Jurassic period, forming numerous granites and associated polymetallic deposits including tungsten-tin, lead-zinc, and REE deposits. As part of the extensive magmatic-metallogenic processes in the Nanling region, the magmatic activities in the Zudong area were particularly significant. With the retreat of the Paleo-Pacific Plate subduction, the South China region entered a comprehensive extensional tectonic environment. It was under such a geological background that the Zudong granite was formed.

Keywords

Heavy Rare Earth Element (HREE) Deposits, U-Pb Geochronology, Tectonic Evolution, Diagenetic Age, Zudong

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

稀土是重要的战略资源，近年来，各发达经济体相继制定了稀土矿产发展战略，2017年，美国将稀土金属研究上升为国家战略，前总统特朗普明确提出确保稀土等关键矿种安全可靠供应等，而欧盟随后也启动了关键金属矿产重大计划，随后又针对稀土成矿研究开展了地平线计划等一系列国际合作重大项目。稀土，作为我国传统意义上的优势矿产资源，其资源现状却呈现出不容乐观的态势。究其原因，主要归咎于国内的过度开采行为以及全球范围内其他国家和地区在稀土资源勘查方面所取得的显著进展。这些因素共同作用下，导致我国稀土资源的全球保有量占比已从二十年前的 90%急剧下滑至 2021 年的 36.7% [1]。尽管如此，我国稀土的出口总量仍长期占据全球市场的 90%以上，其中，重稀土元素 Y 的出口占比更是高达 95%。与此同时，美国对重稀土的进口依赖度也高达约 95% [2]。稀土金属，被学术界广泛归类于“关键金属”范畴[3]-[5]，其独特性质使得其在众多领域被誉为“万能之土”。无论是传统产业还是高科技新兴产业，稀土金属都发挥着不可替代的至关重要作用，对国民经济的发展和国家的安全战略具有举足轻重的意义[6] [7]。正因如此，稀土金属的成矿机制研究、有效勘查技术的探索以及高效利用理论的深化，已然成为世界各发达经济体国家战略层面的核心议题[8]。

十八大以来,我国也从国家层面制定了稀土金属相关发展战略和研究规划,20 世纪七八十年代,我国先后在江西省龙南县足洞、广东省乳源县寨背顶等地发现超大型、中型花岗岩风化壳型重型稀土矿床,逐步成为重型稀土出口大国。但目前重稀土已知资源量远不能满足未来全球发展需求,亟需开展重稀土矿床成矿机制理论研究,指导未来重稀土找矿勘探,保障中国重稀土供给。

足洞矿床位于赣南地区,地处南岭成矿带的重要区域之一,目前世界上重稀土资源几乎全部来自我国南岭风化壳矿床。在成岩过程中已发生的重稀土成矿母岩稀土预富集机制,是揭示中国南岭地区重稀土成矿的关键要素。以重稀土矿床成矿母岩为起点,以花岗岩内重稀土矿化类型和特征为重点,开展重稀土矿床成矿机制理论研究前期研究的基础上,重点解决成矿母岩成岩机制和揭示南岭侏罗纪构造演化与花岗岩源区重稀土富集耦合关系,对未来赣南周边区域的重稀土矿产勘查工作贡献新的科学依据,进而为其后续的找矿实践提供坚实的理论基础,保障中国重稀土供应,具有十分重要的意义。

2. 区域地质背景

矿化系统地质背景

足洞花岗岩风化壳型重稀土矿化系统作为全球规模最大的重稀土资源聚集区[9]-[12],其成矿母岩的形成时代可追溯至中侏罗世(锆石 U-Pb 测年结果为 168 Ma [13])。该研究区域地处华南地质构造域,具体隶属于华南造山系中的赣南隆起区[13]。在成矿域的宏观架构下,该区域被划归为南岭成矿带这一重要构造单元,进而细分为赣南 W-Sn-REE 成矿亚带,其空间分布特征如图 1 所示,此区域在地质构造、成矿机制及矿种分布上均展现出独特的地质属性和成矿潜力。

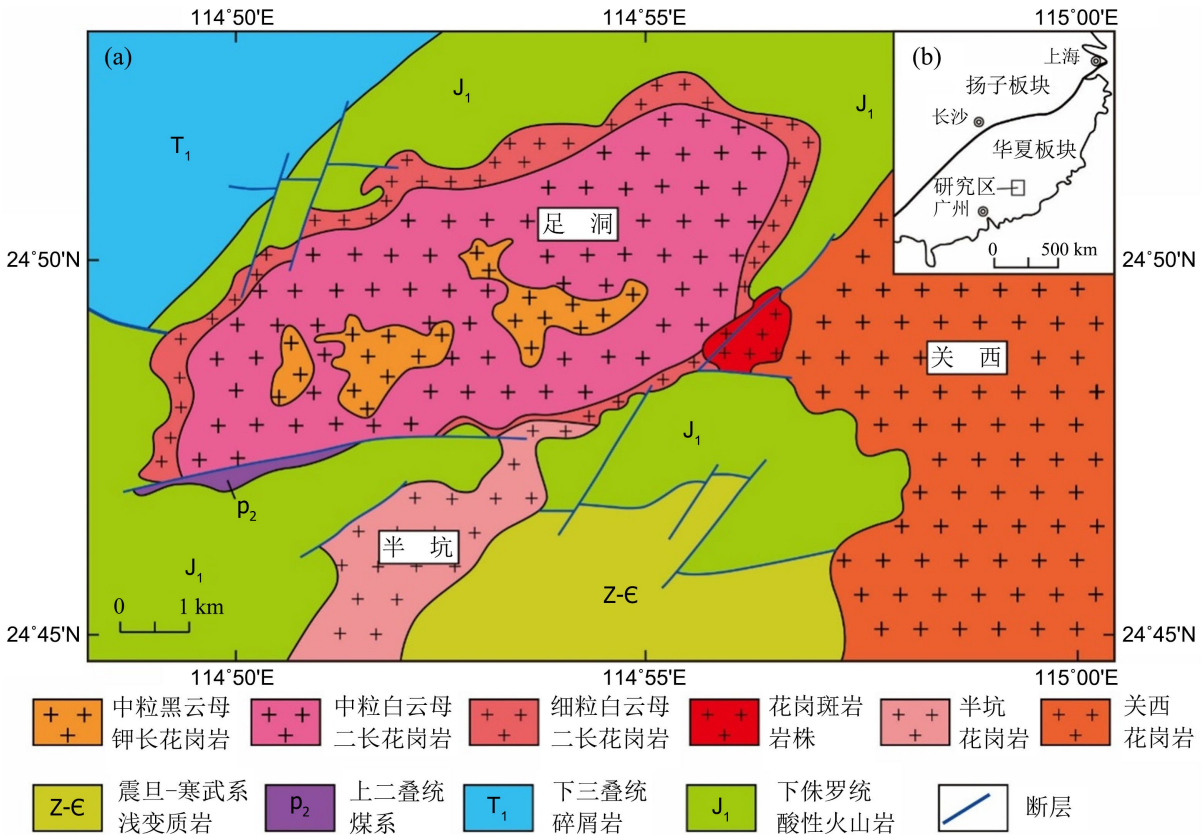


Figure 1. Geological schematic map (a) and tectonic location map (b) of Zudong-Kansai area, southern Gannan
图 1. 赣南足洞-关西地区地质简图 (a) 及大地构造位置图 (b)

足洞花岗岩与围岩的接触界面形态呈现显著的空间异质性, 总体以缓倾斜产状为特征。该区域内部经历了多期次的构造变形作用, 形成了复杂的构造形迹组合。其优势展布方向主要表现为近 EW 向、NE 向及 NNE 向, 局部存在少量 NW 向的压性断裂构造。构造格局分异明显: 北北东向与北西向断裂构成区域构造格架, 近东西向断裂主要集中分布于岩体南缘, 而北东向断裂则限定于岩体东南部, 反映了区域构造应力场的多期次演化特征。该区域南部与晚二叠统含煤地层以断层形式相接, 同时与半坑岩体展现出侵入接触的特征。岩体南缘发育的晚二叠世含煤建造以断层接触关系与花岗岩相接, 同时与半坑岩体呈现典型的侵入接触特征[14]。足洞岩体呈现类菱形几何形态, 其西缘分布的伟晶岩脉及细晶-伟晶岩过渡型岩脉未见显著稀有或稀土元素矿化现, 且该岩体侵位过程中未诱发显著的围岩挤压变形, 亦缺乏爆破角砾岩等岩浆隐爆产物, 表明该岩体可能经历了被动侵位过程。

3. 样品与分析结果

3.1. 岩石样品分析

本研究样品采集于足洞矿区外围的二长花岗岩体。岩相学特征显示, 该岩体呈灰白-肉红双色特征, 色率 < 15%, 发育典型的半自形中粗粒镶嵌结构及块状构造, 局部可见绢英岩化、绿帘石化及高岭土化等热液蚀变现象。岩石矿物组成定量分析表明, 斜长石(35~40 vol%)、钾长石(25~30 vol%)、石英(20~25 vol%)构成主要矿物相, 白云母(其体积百分比介于 8%~12%之间)和黑云母(体积百分比范围为 2%~6%)为次要矿物。副矿物则以磷灰石、锆石等磷酸盐类矿物为主导, 同时, 少量磷钇矿、硅铈钇矿以及氟碳钙钇矿等具有代表性的稀土元素副矿物亦相伴而生。

3.2. 分析方法与技术参数

锆石 U-Pb 同位素年代学研究采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱联用技术(LA-ICP-MS), 测试工作由桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室完成。实验系统配置包含: Agilent 7500a 型四级杆质谱仪与 NewWave UP213 固态激光器联用平台, 激光波长 213 nm, 实验工作参数设置为脉冲频率 6 Hz、能量密度 10 J/cm²、束斑直径 32 μm。实验过程严格遵循 Liu 等建立的标准化分析流程, 采用 GEMOC 国际标准物质 GJ-1 (609 ± 5 Ma)进行质量分馏校正。原始质谱数据通过 GLITTER 4.4 实时分析软件完成基线校正与同位素比值计算, 采用 ICPMSDataCal 10.8 完成年龄计算与误差分析。为保障数据可信度, 同步使用 Temora (416.8 ± 1.3 Ma)和 Plesovice (337.1 ± 0.4 Ma)标准锆石进行质量监控, 所有标样分析误差均控制在 1%置信区间。微量元素分馏校正采用 NIST SRM 610 玻璃标准物质, 有效消除基体效应影响[15], 最终年龄计算采用 Isoplot v4.15 软件构建 U-Pb 谐和图并计算加权平均年龄[16]。

3.3. 年代学研究成果

综合分析获得 21 个有效测点数据, 锆石 206Pb/238U 年龄频率分布呈现显著集中趋势, 经统计处理, 本研究获得 206Pb/238U 加权平均年龄为 164 ± 1.2 Ma (MSWD = 1.6) (如图 2), 该数据有效指示赣南足洞岩体的岩浆结晶时代为中侏罗世。这一精确的年代学证据为华南中生代构造-岩浆事件序列的厘定提供了新的制约条件。

4. 综合讨论

4.1. 锆石形成年代学对岩浆的约束

中生代侏罗纪岩浆作用在华南陆块演化中具有双重地质效应: 一方面通过热动力学机制诱发南岭基底地壳物质发生选择性熔融, 另一方面通过结晶分异过程实现稀土元素的初级富集。锆石作为具有超高

封闭温度(>900℃)的副矿物,其晶体内部保存的 U-Pb 同位素系统不仅能够限定研究区岩浆结晶事件的时代坐标,还可以推测区域岩浆活动序列与重稀土成矿作用的时空耦合规律,并反映母岩的成因演化过程。

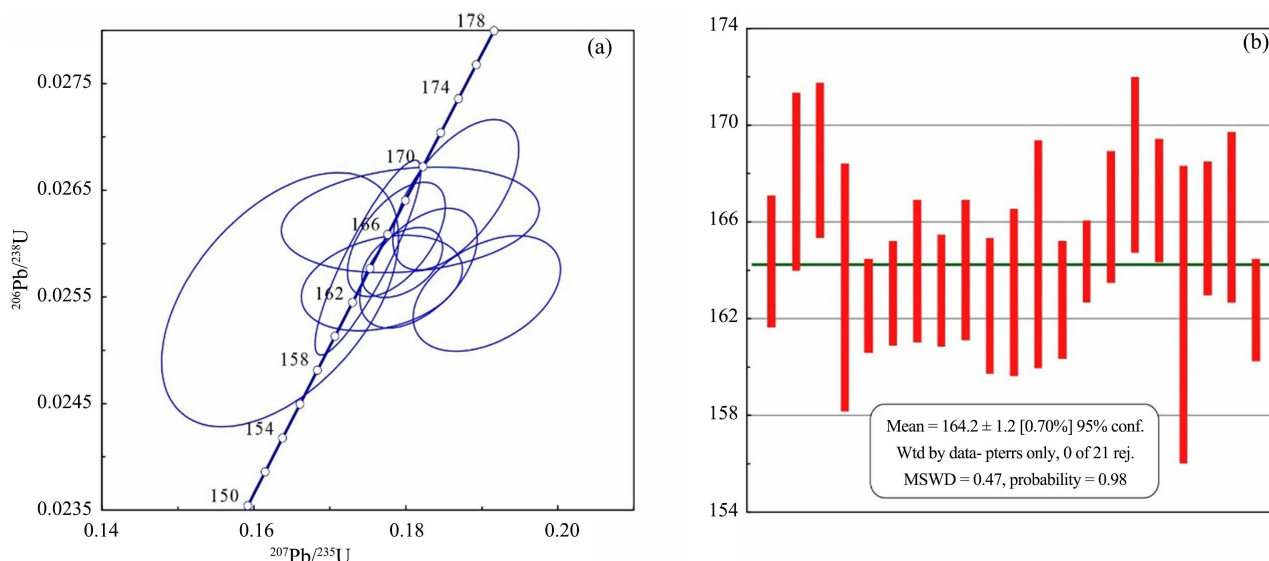


Figure 2. U-Pb age concordance of zircon in Zudong volcanic rock

图 2. 足洞火山岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

赣南足洞复式岩体相的形成时代为 164 ± 1.3 Ma (MSWD = 0.82), 精确对应中侏罗世岩浆活动高峰期, 该成岩时代的特征与华南地区在燕山运动早期(160~150 Ma)所经历的大规模钨锡多金属成矿事件以及花岗质岩浆的侵位高峰期展现出明显的时间连贯性, 这一现象表明其背后的动力学机制很可能受到了古太平洋板块俯冲后撤所引发的弧后伸展体制的显著影响。从构造-岩浆耦合的角度和同位素地球化学示踪结果分析, 岩浆源区以华夏地块元古宙变质基底的部分熔融为主导, 幔源组分的贡献相对有限, 这一特征与南岭强过铝质花岗岩的成因模式高度吻合——即富泥质源岩在封闭体系下通过白云母-黑云母连续脱水熔融形成初始熔体。

4.2. 构造-岩浆协同演化与稀土成矿的动力学联系

作为华南板块重要的构造单元边界, 南岭构造带呈近 EW 向展布于扬子克拉通、江南造山带及华夏地块三大构造单元结合部位[17][18]。该构造带不仅是华南重要的地貌-气候分界线, 更记录了新元古代至中生代多期构造-热事件的复合型造山带。前人研究成果显示, 中生代时期该区域同时受到特提斯构造域远程挤压效应与太平洋板块俯冲作用的联合控制, 形成了独特的陆内造山-伸展转换体系。

南岭区域风化壳型稀土矿床的成矿母岩主要形成于侏罗纪至早白垩世构造体制转型阶段。足洞花岗岩的侵位过程与古太平洋板块俯冲回撤所诱发的岩石圈伸展减薄事件存在明显的成因关联。在此过程中, 幔源基性岩浆的底侵效应为壳源熔融提供了额外的热能供给, 而软流圈物质的上涌进一步加剧了地壳的重熔程度[19]。此外, 岩石圈的伸展减薄还引发了地壳的伸展变形和部分熔融, 营造了有利于稀土元素富集的地质背景。这种壳幔相互作用机制在岩石地球化学特征上表现为: 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要分布在 -12.5 至 -8.3 区间, 指示以古老地壳物质(1.8~2.1 Ga)熔融为主, 但存在约 5%~10% 的幔源组分混入。这种特殊的壳幔混合源区不仅为稀土元素初始富集提供了物质基础, 其形成的富挥发分岩浆体系更有利于稀土元素在岩浆-热液过渡阶段的活化迁移[20]。此外, 区域上广泛发育的独居石(CePO_4)、磷钇矿(YPO_4)等稀土副矿物, 以及岩浆高分异演化过程中流体/熔体的相互作用, 共同构成了稀土元素超常富集的关键控制因素。

4.3. 热液作用对稀土元素地球化学的制约

作为镧系元素家族成员,稀土元素(REE)虽然具有相近的离子半径和化学性质,但在岩浆演化过程中可产生显著的配分差异。中国稀土资源具有显著的地域分异特征,碳酸岩型矿床集中赋存着全国约 98% 的工业储量,而中-重稀土元素则特异地富集于碱性花岗岩成因矿床[1] [21]。此类地球化学分带性与岩浆体系演化过程中的温压条件及流体活动存在成因联系:典型代表如足洞岩体以中细粒花岗结构为特征,通常形成于多期次复式岩体的晚期侵入阶段,与之形成对照的是,轻稀土优势岩体多发育于岩浆房核部的早期结晶序列[22]。研究证实,白云鄂博矿床稀土富集受外来流体交代控制[23],且热液蚀变是关键富集机制。硅质组分在热液中通过增强硫酸盐络合溶解度,显著促进稀土迁移[24] [25],此外,硅质富集的碳酸岩岩浆在结晶分异中更利于重稀土矿物析出[26]。

关于足洞花岗岩重稀土富集机制,学界存在多维度解释体系。黄典豪(1989)在其开创性研究中指出,足洞岩体的重稀土富集特征可归因于岩浆结晶晚期阶段发生的钠氟流体自交代过程,该地球化学作用促使易风化重稀土矿物相的结晶析出[27]。Li 等学者(2017)通过岩浆热力学模拟证实,花岗质岩浆体系的晚期结晶分异作用及其伴生的热液蚀变过程是母岩重稀土元素超常富集的关键控制因素[9]。Xu 研究团队(2017)则提出了创新性的碳酸盐流体渗透交代理论,强调外来富 CO_3^{2-} 流体的水岩反应对重稀土元素活化迁移的决定性影响[10]。矿物学证据显示,足洞岩体内普遍发育的次生白云母交代原生黑云母现象,伴随特征的萤石-氟碳钙钇矿共生组合[28],这一典型的岩浆热液过渡相矿物组合为深部流体参与成矿过程提供了直接岩石学证据。岩相学观察与微区成分分析共同揭示,岩浆体系演化后期的热液活动不仅改造了矿物组成,更通过复杂的元素配分机制实现了稀土元素的选择性富集。足洞岩体的地球化学特征显示其属于典型过铝质 S 型花岗岩,具有高硅、强负锆异常及轻稀土相对富集等特点,指示其形成于低程度部分熔融环境,源区可能为富黏土质变质沉积岩系。岩浆演化早期经历斜长石 + 钾长石 + 黑云母的分异结晶作用,导致残余熔体中高场强元素(包括 HREE)逐步富集。在岩浆-热液过渡阶段,富 F-Cl 挥发分的流体相出溶显著改变了熔体的物理化学参数:① 低氧逸度条件($f\text{O}_2 \approx \text{NNO} - 1.5$)有利于 REE^{3+} 稳定存在;② F-与 REE^{3+} 形成稳定络合物(如 $[\text{REF}]^{2+}$),Cl-则促进稀土氯络合物迁移;③ 钠长石化、云英岩化等自交代作用形成次生孔隙,为稀土矿物沉淀提供容矿空间。近期实验岩石学研究证实,岩浆氧逸度($f\text{O}_2$)、熔体聚合度(NBO/T)及流体组成等多参数耦合,共同控制着稀土元素的溶解-迁移-沉淀过程。足洞岩体内部发育的钠长石-萤石-磷钇矿矿物组合,正是这种多阶段流体活动的直接岩相学证据,揭示了岩浆晚期热液过程对重稀土最终成矿的决定性作用。

5. 结论

赣南足洞花岗岩的形成年代为 164 Ma 中侏罗世,暗示其可能形成于古太平洋板块俯冲后撤诱发的岩石圈伸展减薄,软流圈上涌及幔源熔体底侵为壳源熔融提供了热动力条件,使华南地区处于全面拉张-伸展的构造背景下。该构造体制驱动了南岭地区晚侏罗世地壳重熔,通过岩浆分异与流体-熔体相互作用最终使得 HREE 的选择性富集。尽管存在少量幔源组分混染的迹象(壳幔混合源区),但幔源直接贡献有限,岩浆主体未受俯冲板片物质直接输入影响,成岩过程主要受控于陆内壳源熔融机制,说明足洞花岗岩重稀土预富集是构造-岩浆-流体多因素耦合的产物。

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, 2020, 65(33): 3794-3808.
- [2] Gulley, A.L., Nassar, N.T. and Xun, S. (2018) China, the United States, and Competition for Resources that Enable

- Emerging Technologies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **115**, 4111-4115. <https://doi.org/10.1073/pnas.1717152115>
- [3] 王登红. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1189-1209.
 - [4] Dushyantha, N., Batapola, N., Ilankoon, I.M.S.K., Rohitha, S., Premasiri, R., Abeysinghe, B., *et al.* (2020) The Story of Rare Earth Elements (REEs): Occurrences, Global Distribution, Genesis, Geology, Mineralogy and Global Production. *Ore Geology Reviews*, **122**, Article 103521. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103521>
 - [5] Shi, A., Xu, C., Chakhmouradian, A.R., Smith, M.P., Kynicky, J., Fan, C., *et al.* (2022) Nanostructure Reveals REE Mineral Crystallization Mechanisms in Granites from a Heavy REE Deposit, South China. *American Mineralogist*, **107**, 2261-2271. <https://doi.org/10.2138/am-2022-8309>
 - [6] 蒋少涌, 温汉捷, 许成, 王焰, 苏慧敏, 孙卫东. 关键金属元素的多圈层循环与富集机理: 主要科学问题及未来研究方向[J]. 中国科学基金, 2019, 33(2): 112-118.
 - [7] 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 蒋少涌, 李文昌, 王汝成, 王登红, 齐涛, 秦克章, 温汉捷. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题[J]. 中国科学基金, 2019, 33(2): 106-111.
 - [8] 陈骏. 关键金属超常富集成矿和高效利用[J]. 科技导报, 2019, 37(24): 1.
 - [9] Li, Y.H.M., Zhao, W.W. and Zhou, M. (2017) Nature of Parent Rocks, Mineralization Styles and Ore Genesis of Regolith-Hosted REE Deposits in South China: An Integrated Genetic Model. *Journal of Asian Earth Sciences*, **148**, 65-95. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2017.08.004>
 - [10] Xu, C., Kynický, J., Smith, M.P., Kopriva, A., Brtnický, M., Urubek, T., *et al.* (2017) Origin of Heavy Rare Earth Mineralization in South China. *Nature Communications*, **8**, Article No. 14598. <https://doi.org/10.1038/ncomms14598>
 - [11] Balaram, V. (2022) Rare Earth Element Deposits: Sources, and Exploration Strategies. *Journal of the Geological Society of India*, **98**, 1210-1216. <https://doi.org/10.1007/s12594-022-2154-3>
 - [12] Li, M.Y.H. and Zhou, M. (2020) The Role of Clay Minerals in Formation of the Regolith-Hosted Heavy Rare Earth Element Deposits. *American Mineralogist*, **105**, 92-108. <https://doi.org/10.2138/am-2020-7061>
 - [13] 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): 719-725.
 - [14] 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): 311-328.
 - [15] 黄超, 王浩, 师文贝, 等. 云母 Rb-Sr 等时线年龄原位微区 LA-ICP-MS/MS 测定[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(11): 2648-2668.
 - [16] 张刚, 王辉, 扈志勇, 等. 长江中下游地区中生代“蝴蝶结”形态的构造成因研究: 来自殷店-马垅剪切带的证据[J]. 地质科学, 2023, 58(3): 723-763.
 - [17] 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[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1-683.
 - [18] 徐先兵, 梁承华, 陈家驹, 徐亚东. 南岭构造带基础地质特征与成矿地质背景[J]. 地球科学, 2021, 46(4): 1133-1150.
 - [19] 谢银财. 湘南宝山铅锌多金属矿区花岗闪长斑岩成因及成矿物质来源研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京大学, 2013.
 - [20] 刘涛. 赣东北灵山岩体岩浆-热液演化与铌钽成矿机制研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2023.
 - [21] 范宏瑞, 牛贺才, 李晓春, 杨奎峰, 杨占峰, 王其伟. 中国内生稀土矿床类型、成矿规律与资源展望[J]. 科学通报, 2020, 65(33), 3778-3793.
 - [22] 周美夫, 李欣禧, 王振朝, 李晓春, 刘嘉成. 风化壳型稀土和钽矿床成矿过程的研究进展和展望[J]. 科学通报, 2020, 65(33): 3809-3824.
 - [23] Deng, M., Xu, C., Song, W., Tang, H., Liu, Y., Zhang, Q., *et al.* (2017) REE Mineralization in the Bayan Obo Deposit, China: Evidence from Mineral Paragenesis. *Ore Geology Reviews*, **91**, 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.10.018>
 - [24] Cui, H., Zhong, R., Xie, Y., Yuan, X., Liu, W., Brugger, J., *et al.* (2019) Forming Sulfate- and REE-Rich Fluids in the Presence of Quartz. *Geology*, **48**, 145-148. <https://doi.org/10.1130/g46893.1>
 - [25] Anenburg, M., Mavrogenes, J.A., Frigo, C. and Wall, F. (2020) Rare Earth Element Mobility in and around Carbonatites Controlled by Sodium, Potassium, and Silica. *Science Advances*, **6**, eabb6570. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb6570>
 - [26] Song, W., Xu, C., Smith, M.P., Kynicky, J., Huang, K., Wei, C., *et al.* (2016) Origin of Unusual HREE-Mo-Rich

Carbonatites in the Qinling Orogen, China. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 37377. <https://doi.org/10.1038/srep37377>

- [27] 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.
- [28] 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(Z1): 69-94.