

韩志轩,王晓龙,赵浩楠等. 2026. 我国南方硬岩型和黏土型锂矿区域地球化学勘查标志. 岩石学报,42(06): 1967-1985, doi: 10.18654/1000-0569/2026.06.02; CSTR: 32089.14. APS-ysxb. 2026.06.02

我国南方硬岩型和黏土型锂矿区域地球化学勘查标志^{*}

韩志轩^{1,2} 王晓龙¹ 赵浩楠¹ 陈开鑫¹ 程志中^{3**} 谢淼⁴ 刘汉粮⁴
HAN ZhiXuan^{1,2}, WANG XiaoLong¹, ZHAO HaoNan¹, CHEN KaiXin¹, CHENG ZhiZhong^{3**}, XIE Miao⁴ and LIU HanLiang⁴

- 1. 桂林理工大学地球科学学院, 桂林 541004
 - 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037
 - 3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037
 - 4. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 天津 300309
 - 1. School of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China
 - 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
 - 3. Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China
 - 4. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Tianjin 300309, China
- 2025-07-23 收稿, 2025-10-09 改回.

Han ZX, Wang XL, Zhao HN, Chen KX, Cheng ZZ, Xie M and Liu HL. 2026. Regional geochemical exploration indicators for hard-rock and clay-type lithium deposits in southern China. Acta Petrologica Sinica, 42(6): 1967-1985, doi: 10.18654/1000-0569/2026.06.02; CSTR: 32089.14. APS-ysxb. 2026.06.02

Abstract Lithium (Li) as a critical mineral in the new energy sector, has become a focal point in mineral exploration and geological research. Southern China represents one of the most significant regions for Li resources. Over the past two decades, substantial breakthroughs have been achieved in the exploration of hard rock-type lithium deposits. Additionally, numerous clay-type lithium mineralizations have been identified in the Yunnan-Guizhou-Guangxi region. However, compared to the extensive studies on ore-forming mechanisms, research on the regional geochemical characteristics of lithium deposits remains relatively limited. This paper utilized 76 elements data of 5244 composite stream sediments from southern China to generate the geochemical map of Li. Using a lower threshold value of 47.7×10^{-6} , 16 anomalies of Li were delineated. Approximately 83% of Li ores are located within these anomalies. Furthermore, 76 elements and 26 geochemical indicators were compiled for granitic, pegmatitic, and clay-type Li ores. By comparing geochemical signatures between mining areas and non-mining areas, combined with random forest-based feature importance analysis, exploration indicators for three types of Li ores were established. For pegmatite-type Li deposits, trace elements such as Li, Be, Rb, Cs, Ta, W, Sn, As, B, P, F, Th, and U are enriched, while Zr and Ti are depleted; the ratios of Li/Y and Li/La are relatively high. For granite-type Li deposits, trace elements such as Li, Be, Cs, Nb, Ta, Bi, W, Sn, Rb, U, F, and B are enriched, while Ti, Co, Ni, V, Sr, Ba, and P are depleted; the ratios Rb/Sr and Nb/Ta, Zr/Hf, K/Rb are high; δEu shows significant negative anomalies. In clay-type Li ore areas, geochemical characteristics include enrichment in trace elements such as Li, Sc, V, Ga, Nb, Th, U, Mo, REE, and Cr; Al_2O_3 and $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ are enriched, with no significant negative δEu anomaly. In summary, the distinctive geochemical indicators for different types of Li deposits can facilitate effective identification of ore-related anomalies.

Key words Southern China; Granite-type Li deposit; Pegmatite-type Li deposit; Clay-type Li deposit; Geochemical exploration indicators

摘 要 锂是新能源领域不可替代的关键金属,已成为矿产勘查和地质研究的热点。我国南方地区的四川、江西、湖南是

^{*} 本文受国家重点研发计划(2024YFC2909904)、中国地质科学院矿产资源研究所基本科研业务费项目(KK2511、KK2409)和自然资源部新一轮找矿突破战略支撑项目(ZKKJ202424)联合资助。
第一作者简介: 韩志轩,男,1987年生,正高级工程师,主要从事矿床与勘查地球化学研究,E-mail: hanzhixuan@glut.edu.cn
^{**} 通讯作者: 程志中,男,1969年生,研究员,主要从事勘查地球化学研究,E-mail: chengzhizhong69@163.com

最重要的锂资源基地。近二十年来,花岗岩、伟晶岩等硬岩型锂矿取得重大找矿突破,此外,滇-黔-桂地区发现大量黏土型锂矿化线索。然而,相比于锂成矿理论的显著进展,不同类型锂矿的区域地球化学特征研究明显不足。本文利用中国南方水系沉积物 76 元素数据,绘制了锂地球化学图。以锂 47.7×10^{-6} 为异常下限,圈定了 16 个锂地球化学省。已知锂成矿带与锂地球化学省空间上相互吻合,约 83% 的已知锂矿位于锂地球化学省内。此外,提取并对比了花岗岩型、伟晶岩型和黏土型锂矿区与非矿区 76 种元素、26 个地球化学指标的差异,结合基于随机森林的指示元素重要性度量结果,建立了不同类型锂矿的区域地球化学勘查标志。伟晶岩型锂矿区微量元素 Li、Be、Rb、Cs、Ta、W、Sn、B 强烈富集,As、P、F、Th、U 相对富集,Zr、Ti 相对亏损;主量元素 Al_2O_3 含量较高, K_2O 含量较低;Li/Y 值较高。花岗岩型锂矿区微量元素 Li、Be、Cs、Nb、Ta、Bi、W、Sn、Rb、U、F、B 相对富集,Ti、Co、Ni、Sr、Ba、V、P 相对亏损;具有较高的 Rb/Sr 和较低的 Nb/Ta、Zr/Hf、K/Rb 值; δEu 显著负异常。黏土型锂矿区域地球化学特征为富集微量元素 Li、Sc、V、Ga、Nb、Th、U、Mo、REE、Cr;主量元素 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 相对富集,无显著的 δEu 负异常。综上,区域化探可以在“以锂找锂”基础上,利用不同类型锂矿的特征性指示元素组合圈定锂找矿远景区。

关键词 中国南方;花岗岩型锂矿;伟晶岩型锂矿;黏土型锂矿;地球化学勘查标志

中图法分类号 P596;P618.71

锂是新能源领域的关键金属(王学求等, 2020; 吴福元等, 2023)。据预测,未来十年我国锂供需形势仍然严峻,2025 年、2030 年和 2035 年国内锂供应量对锂需求量的保障率分别为 28.21%、28.17% 和 35.16%,将长期存在对外依存度过高的问题(张照志等, 2024)。在百年未有之大变局之形式下,持续加强锂矿找矿勘查力度是破解锂资源被“卡脖子”风险的重要举措(Wang *et al.*, 2013; 王登红等, 2022; 王核等, 2022)。我国锂矿类型齐全,可划分为 12 个锂成矿带和 14 个成矿系列,自中国北方→中国中部→中国南方,成矿系列数量依次增加,成矿强度增大(李建康等, 2014)。我国南方地区(本文指云南、四川、重庆、贵州、广西、广东、湖南、湖北、江西、安徽、江苏、浙江和福建等 13 省区市)是开展锂找矿勘查的重点地区(李建康等, 2014)。

我国南方地区锂矿以硬岩型和黏土型为主,往往成群成带分布,花岗岩型锂矿主要分布于江西、湖南、福建、广东,尤以华南腹地的南岭地区最为密集(楼法生等, 2023; 徐喆等, 2023; 尹维青等, 2023; 郭春丽等, 2024);大型伟晶岩型锂矿集中分布于川西松潘-甘孜锂成矿带(肖瑞卿等, 2018; 孙文礼等, 2022; 孔会磊等, 2023; 邱志毅等, 2024);近年来,在我国西南地区发现大量黏土型锂矿化(Lin *et al.*, 2020; 温汉捷等, 2020; 崔焱等, 2022)。总体来看,不同类型锂矿在空间上表现出强烈的区域聚集成矿,研究不同类型锂矿的区域地球化学特征,有望为圈定锂矿集区提供重要线索。不同比例尺的区域地球化学填图可以“快速掌握全局,逐步缩小靶区”。全国地球化学基准计划结果显示,沉积物锂异常与锂矿集区有很好的空间对应关系(王学求等, 2007),但是也存在较多锂异常与矿化无关,而是由高地地质背景引起(Lin *et al.*, 2020)。因此,仅靠锂单元异常可能无法有效识别锂矿区。前人提出可以通过总结不同类型矿床的典型地球化学异常结构模式来有效甄别矿致异常(Shi and Wang, 1995; 龚晶晶等, 2015)。建立各种类型锂矿床或矿田乃至成矿区带的区域地球化学勘查标志,是进行小比例尺大范围成矿预测的重要一环(史长义等, 1996)。

目前,已有较多学者对不同类型锂矿床的成矿理论和矿

床地球化学特征进行了总结(沙小保, 2018; 肖瑞卿等, 2018; 徐云峰等, 2018; 徐喆等, 2023; 郭春丽等, 2024; 李明等, 2024; 王登红等, 2024),但是对于不同类型锂矿,尤其是黏土型锂矿的区域地球化学特征研究甚少。我国南方已开展了水系沉积物 76 元素地球化学填图(程志中等, 2011),积累了高质量、多元素地球化学数据。本文利用中国南方地区 76 元素数据,系统研究了锂异常与锂矿的空间关系,并建立了花岗岩型、伟晶岩型和黏土岩型锂矿的区域地球化学勘查标志,为圈定锂成矿远景区提供理论和数据支撑。

1 中国南方地区锂成矿带概述

锂资源丰富且锂矿集中产出的区域可称为锂成矿带,圈定或划分锂成矿带便于集中力量、快速部署、强化勘探以取得锂矿找矿的突破(李建康等, 2014)。我国南方锂矿分布较为集中,成群成带出现(图 1),且不同成矿带锂矿类型各异,其中川西锂矿带以伟晶岩型锂矿为主,华南锂矿带以花岗岩型锂矿为主,滇黔桂地区以黏土型锂矿为主(李建康等, 2014; 温汉捷等, 2020)。

1.1 松潘-甘孜锂成矿带

松潘-甘孜造山带是特提斯-喜马拉雅造山系的重要组成部分,经历古特提斯与新特提斯两次连续造山事件,形成了复杂的褶皱和活跃的岩浆活动(Roger *et al.*, 2003; Reid *et al.*, 2007)。三叠纪末,扬子、华北和羌塘陆块的碰撞导致大量晚三叠世至早侏罗世花岗岩的形成,这些花岗岩与区内三叠纪稀有金属伟晶岩矿床关系密切(侯江龙等, 2017; Xu *et al.*, 2020; 许志琴等, 2024)。松潘-甘孜造山带内伟晶岩型锂矿集中成片分布,已发现的矿床(点)主要出现在造山带主体的东缘,如甲基卡、可尔因、党坝、扎乌龙等矿床,可划分为石渠-扎乌龙、康定-雅江(甲基卡矿田)、马尔康-金川(可尔因矿田)以及九龙等 4 个稀有金属成矿区(付小方等, 2021)。该锂成矿带矿床分布集中,主要分布在川西高原的

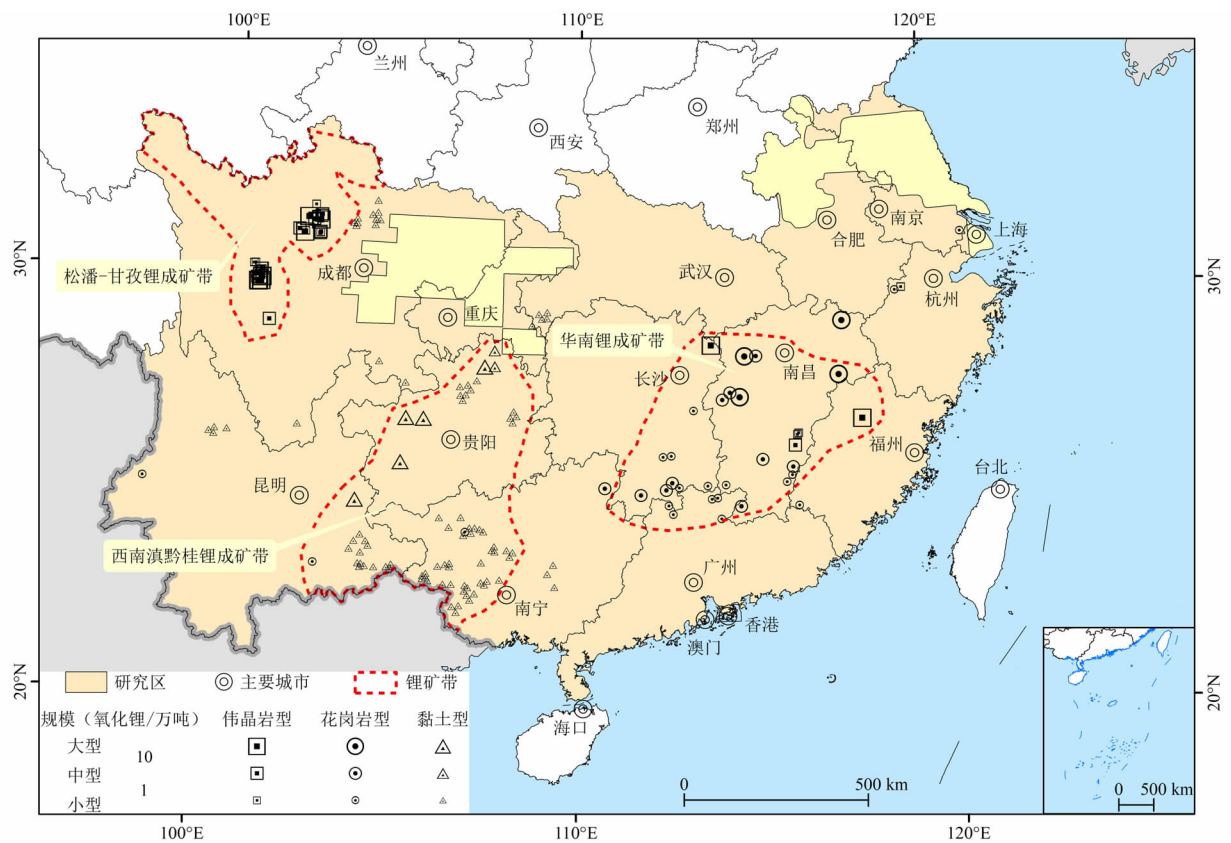


图1 中国南方锂矿分布图

锂矿带据李建康等,2014 修改;黏土型锂矿位置据钟海仁等,2019;花岗岩型和伟晶岩型锂矿据全国矿产地数据库(2021^①). 底图基于自然资源部标准地图服务网站 GS (2016) 1600 号标准地图制作,边界无修改

Fig. 1 Lithium deposits in southern China

The Li metallogenic belts were modified after Li *et al.* , 2014; The locations of clay-type Li deposits were modified after Zhong *et al.* , 2019; The locations of granitic and pegmatitic Li deposits were cited from the National Mineral Dataset (2021). The base map was generated based without modifications of boundarie on the standard map GS (2016) 1600 from the standard map service website of the Ministry of Natural Resources

康定、石渠、金川和马尔康等地;矿石品位较高,并伴生或共生有多种有益组分可综合利用(李建康等,2007)。甲基卡锂矿床产于具有巴罗式“低/中压-高温”变质组合的三叠纪复理石围岩中,片麻岩穹窿与该区伟晶岩型锂矿床的成因关系密切(许志琴等,2023)。区内含矿伟晶岩多呈全脉锂矿化,微晶-细晶锂辉石占70%,多数伟晶岩脉发育微晶毛发状-细晶粒状-中粗粒梳状相间的韵律式带状构造(付小方等,2021)。矿区出露地层为三叠系西康群,属于经区域变质和接触变质而形成的黑云石英片岩、二云母石英片岩和红柱石、十字石石英片岩等中浅变质岩系。印支期含锂二云母花岗岩株沿甲基卡短轴背斜侵入。围绕花岗岩内外接触带派生出一系列花岗伟晶岩脉,其中已发现含Li、Be、Nb、Ta伟晶岩矿脉114条,为特大型花岗伟晶岩型稀有金属矿床,共生的BeO等稀有金属的储量也达到了大型规模(刘涛,2022)。伟晶岩脉的空间分布和地球化学特征表明,伟晶岩

型锂矿床的形成受花岗岩源区、部分熔融程度、结晶分异、岩浆热液交代的控制(Romer *et al.* , 2014)。

邱志毅等(2024)通过对比松潘-甘孜造山带三叠纪含矿与不含矿花岗岩的地球化学数据,发现含矿花岗岩具高硅(平均71.57%)、富锂(Li含量 $>100 \times 10^{-6}$)和弱过铝质-过铝质(A/CNK为1.04~1.63)特征,相对较低的Ba、Sr含量和Zr/Hf、Nb/Ta值,以及相对较高的Rb含量和Rb/Sr值。

1.2 华南锂成矿带

华南是我国最重要的稀有金属成矿带之一,从早古生代以来特别到中生代强烈的构造运动及相伴随的岩浆活动,对内生稀有元素成矿起着主要作用,稀有元素成矿一般发生在经历多期活动的晚期岩体之中,成矿时代以中生代晚侏罗世-早白垩世期为主(李建康等,2014)。花岗岩型锂矿的锂品位相对较低(王核等,2022),含锂矿物主要为锂云母和铁

① 全国矿产地数据库: 2021. <http://www.ngac.org.cn/DataSpecial/mineral.html>

锂云母, 云母的 Li_2O 含量范围变化较大, 从 0.01% 到 11.68%, 绝大多数集中在 1.91% ~ 4.40% (郭春丽等, 2024)。花岗岩型锂矿的成矿作用具多阶段性, 往往形成与 W-Sn-Nb-Ta-Be-Cs 等多种成矿元素共生的多金属矿床, 锂富集在花岗岩体顶部和边缘的热液蚀变带或伟晶岩脉中, 常呈似层状和脉状产出, 与钠长石化、云英岩化和锂云母化关系密切 (李晓峰等, 2021)。花岗岩体从下至上逐渐从黑云母二长花岗岩演变为锂云母钠长石花岗岩, 锂一般在强钠长石化花岗岩和云英岩中高度富集。黑云母二长花岗岩→含锂云母钠长花岗岩→云英岩岩浆分异程度逐步增加, 且逐渐从熔体过渡到熔体-流体共存体系 (郭春丽等, 2024)。宜春雅山 414 矿床为该类型矿床的典型代表 (Yin *et al.*, 1995; Pollard, 2021), 主要矿化岩体为雅山复式花岗岩体, 锂矿属于钽铌矿的伴生矿, 钽铌锂矿主要发育在雅山蚀变花岗岩的顶部, Li_2O 平均品位为 0.39% ~ 0.78% (王核等, 2022)。雅山复式花岗岩体与一般花岗岩相比锂富集 11.5 倍, 它以富碱 (高钠) 为特点, 除富含 Ta、Nb、Li 等金属元素外, 还富含 F、B 等挥发组分 (李建康等, 2014)。这些稀有金属和挥发组分, 随着岩浆的分异和残余岩浆的上侵, 逐渐向岩体顶部富集, 形成富含挥发组分和碱金属组分的晚期岩浆, 晚期花岗岩以富钠长石、锂云母和黄玉为主要特征 (朱金初等, 2002)。

华南锂矿带以花岗岩型锂矿为主, 但也存在伟晶岩型锂矿, 主要分布在武夷造山带和江南造山带, 以福建南平伟晶岩型锂矿床、江西广昌伟晶岩型锂辉石锂矿床和湖南传梓源锂矿床等为代表。伟晶岩多为钠长石化锂辉石伟晶岩, 锂常与铌、钽、铍、铯等稀有金属矿共生 (Rao *et al.*, 2017; Tang *et al.*, 2017)。伟晶岩主要分布在花岗岩的外接触带, 呈脉状、带状充填在构造裂隙带和片理带中, 空间上呈串珠状展布 (舒良树等, 2021)。

1.3 西南滇黔桂锂成矿带

黏土型锂矿作为新类型的锂矿资源, 越来越受到重视 (Kesler *et al.*, 2012; 于涛等, 2019)。李建康等 (2014) 划分的 12 个成锂带中未包含我国西南滇黔桂地区的黏土型锂矿带, 该锂成矿带是近十余年发现的。区内锂矿主要赋存于沉积地层中, 且具有分布广、储量大和开采成本低等特点, 有望成为解决我国锂资源供应短缺的关键突破口 (Lin *et al.*, 2020; Su *et al.*, 2025; 温汉捷等, 2020; 崔燚等, 2022)。我国西南地区的多数黏土型锂矿与铝土矿和煤矿相伴生, 黏土型锂矿中锂的赋存状态直接关系到锂的提取 (Ling *et al.*, 2021; 崔燚等, 2022)。火山岩黏土型锂矿中的锂主要赋存在蒙皂石族矿物的晶格中, 属于结构锂 (Benson *et al.*, 2017); 碳酸盐岩黏土型锂矿的锂主要赋存在蒙脱石等黏土矿物的层间, 属于吸附型锂 (温汉捷等, 2020; 张佳慧等, 2025); 贾达尔锂矿床中的锂则是以独立矿物存在于羟硼硅钠锂石 (Bowell *et al.*, 2020; 王核等, 2022)。乔宇等 (2023)

初步研究了我国西南滇黔桂地区水系沉积物地球化学特征, 发现区内锂含量明显高于全国水系沉积物锂的背景值, 暗示该区有较大的锂成矿潜力。利用区域化探数据圈定了 9 处锂异常, 与已知的富锂铝土矿和富锂煤矿分布吻合较好。

2 数据来源与数据处理

2.1 数据来源

本论文所涉及的地球化学数据均来自中国南方 76 元素地球化学填图计划。我国于 20 世纪 70 年代末开展了全国区域化探扫面计划, 每 1km^2 采集 1 ~ 2 个水系沉积物样品。至 90 年代末期, 已完成中国南方 13 个省市及自治区的采样工作, 覆盖面积达 230 万 km^2 。以往受限于分析技术和经费, 只分析了 39 元素, 很多稀有稀散元素并未分析。为获得中国南方地区 76 元素含量数据, 中国地质调查局组织实施了中国南方 76 元素地球化学填图项目。该项目主要利用全国区域化探扫面计划的副样, 按照每 1 : 5 万图幅 (约 400km^2) 一个组合样的密度, 从约 300 万件水系沉积物组合成 5244 件分析组合样。图 2 展示了组合样品的中心点位。样品组合过程、Li 等元素的分析方法和质量控制结果等详细内容可参考《中国南方地球化学图集》(程志中等, 2011)。

2.2 数据处理与分析

2.2.1 地球化学图制图

本文使用 Surfer 与 ArcGIS 联合绘制 Li 地球化学图 (图 3), 选择 kriging 插值法对数据网格化, 按累积频率 P0、P2.5、P7.5、P15、P25、P35.5、P50、P62.5、P75、P85、P92.5、P97.5 和 P100 进行色阶分级。将累积频率为 P85 处的值作为地球化学块体的异常下限, 并且将 P85、P92.5、P97.5 对应的分析值作为异常三级浓度分界线, 对应 Li 含量分别为 47.7×10^{-6} 、 54.4×10^{-6} 、 78.9×10^{-6} 。坐标系选择 WGS_1984 坐标系和 UTM 投影, 中心经度为 111°E , 投影带数为 49。

2.2.2 锂矿区和非矿区地球化学信息提取

了解不同类型锂矿区域地球化学特征, 更好的圈定矿致异常, 我们收集了中国南方已发现的典型锂矿床 86 个, 其中大型 18 个、中型 25 个、小型 43 个。将收集的锂矿分为伟晶岩型、花岗岩型及黏土型。在已知矿床附近 (以矿床位置为中心、10km 为半径的范围内) 提取 Li、Be、Rb、Cs、W、Sn、Nb、Ta、As、Mo、Sc、Bi、Ba、Sr、Ga、Ge、Zr、Hf、Th、U、Ti、Co、Ni、V、Cr、B、P、F 等 28 个微量元素, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 SiO_2 、 Na_2O 、 K_2O 等 6 个主量元素, Nb/Ta、Zr/Hf、Rb/Sr、Li/Y、Li/La、LREE/HREE 等 6 个比值及 δEu 、 δCe 、CIA 共 43 项地球化学参数信息。我们首先使用中国南方水系沉积物 5244 件分析组合样数据, 在 ArcGIS 中使用克里金插值法绘制了各主、微量及元素比值等地球化学图, 然后使用空间分析功能中的多值提取至点功能将各主、微量及元素比值等参数值分别提

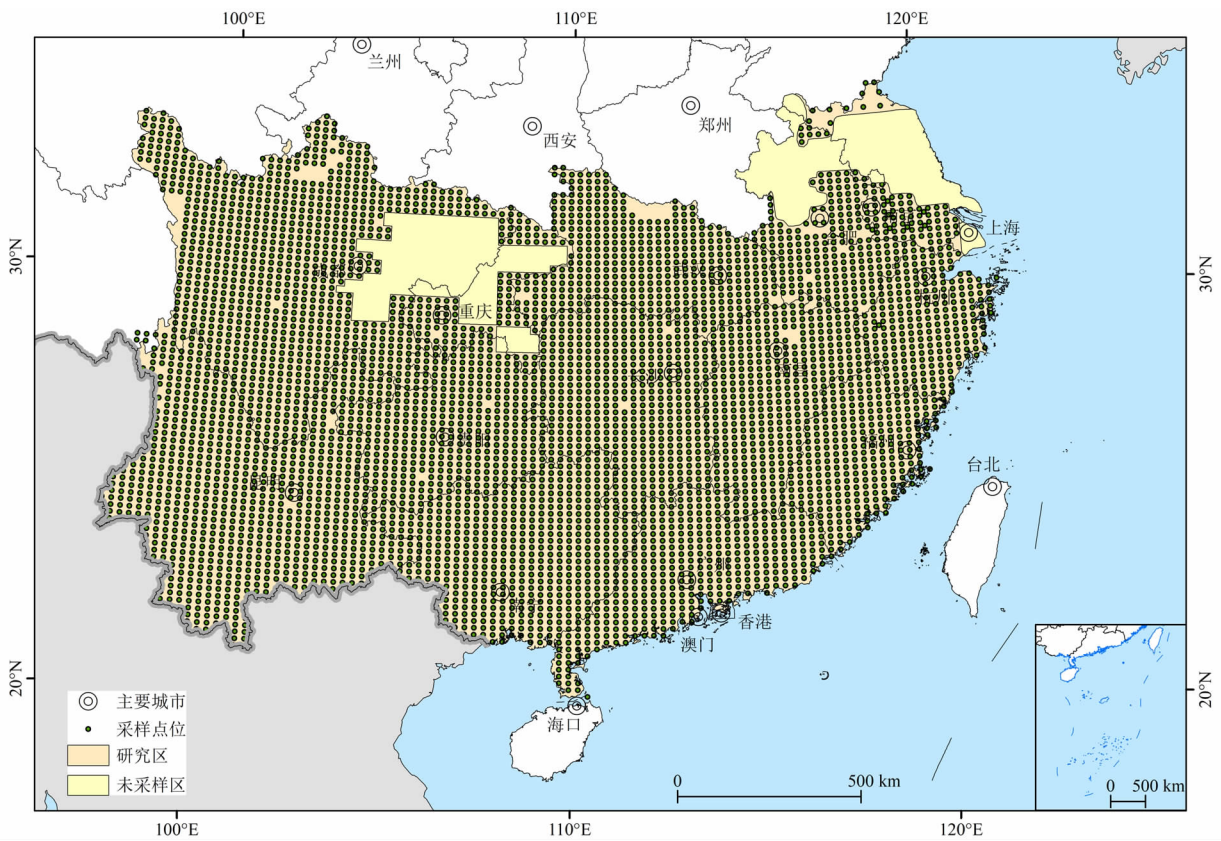


图2 中国南方水系沉积物分析组合样点位分布图(N=5244)
Fig.2 The sampling locations of combined analytical stream sediments in southern China (N=5244)

取到矿区和非矿区(研究区除已知矿床范围之外的区域)上。最终整理出伟晶岩型锂矿数据 10145 条(矿区数据 5046 条),花岗岩型锂矿数据 10377 条(矿区数据 5315 条),黏土型锂矿数据 9300 条(矿区数据 4323 条)。

2.2.3 锂矿地球化学勘查标志筛选

利用直方图筛选标志性元素 为了更加直观的反映成矿指示元素含量值特征,使用上述提取的 43 项地球化学参数数据(伟晶岩型锂矿区数据 5046 条、花岗岩型锂矿区数据 5315 条、黏土型锂矿区数据 4323 条),结合中国南方 5244 件组合样数据,使用 Origin 软件绘制出相应直方图,根据直方图判断不同类型锂矿相关元素的高低,初步筛选特征性元素。

基于随机森林模型评价标志性元素重要性 使用上述提取的 43 项地球化学参数数据,将矿区数据作为反映各类型锂矿的特征数据加入训练集,经过多次迭代计算并去除与该类型锂矿相关性较小的地球化学参数(重要性度量值小于 0.01),得到不同指示元素对相应锂矿的重要性,各参数的重要性度量值之和为 1。伟晶岩型锂矿和花岗岩型锂矿涉及 34 项地球化学指标,黏土型锂矿涉及 26 项地球化学指标。

3 我国南方水系沉积物锂异常与锂矿的关系

据统计,我国南方地区水系沉积物锂含量 $5.5 \times 10^{-6} \sim 247 \times 10^{-6}$,中位值(背景值)为 34.1×10^{-6} ,平均值为 35.8×10^{-6} ,高于全国水系沉积物锂含量背景值 30.0×10^{-6} (史长义等, 2016)。从全球尺度来看,中国南方水系沉积物锂含量平均值也显著高于欧洲水系沉积物 (27.5×10^{-6} , Reimann *et al.*, 2018)、美国土壤 (27.0×10^{-6} , Smith *et al.*, 2013)和澳大利亚河口沉积物 (8.74×10^{-6} , De Caritat *et al.*, 2018)。总体上中国南方为高锂区,暗示区内锂成矿潜力较大。

图 3 为锂的地球化学图,以锂含量 47.7×10^{-6} 为异常下限圈定了 16 个高锂异常区(锂地球化学省),各异常详细信息列于表 1。与锂矿集中分布类似,高锂异常区也成片集中分布,主要集中分布在四川(Li-01、Li-02、Li-03)、湖北(Li-04、Li-05)、湖南(Li-10、Li-12、Li-13、Li-14)、江西(Li-11、Li-14、Li-15)以及滇黔桂地区(Li-06、Li-07、Li-08、Li-09)。此外,广东中部和北部(Li-12、Li-14)、安徽南部(Li-16)、江苏西部及福建西部有零星分布。

续表 1
Continued Table 1

锂异常 编号	异常面积 (km ²)	地质背景		典型矿床及矿化组合	
		平均值	中位值 (×10 ⁻⁶)	极大值	
Li-10	23852	54.7	52.3	94.4	湖南仁里-传梓源 Li-Be-Nb-Ta
异常区位于鄂湘赣三省交界的幕阜山地区,出露地层主要为新元古代冷家溪群和少量第四纪沉积物,幕阜山复式花岗岩体主要由黑云母花岗岩长岩、黑云母二长花岗岩、二云母二长花岗岩、白云母花岗岩和伟晶岩脉组成。此外,幕阜山花岗岩体内部和外缘围岩接触带内发育有大量花岗岩伟晶岩脉,部分岩脉富含 Li-Nb-Ta 等元素形成稀有金属矿床(李乐广等,2019)					
Li-11	4078	78.8	66.4	243	江西宜丰大港 Li-Nb-Ta-Sn、宜丰同安 Li-Be-Nb-Ta-Rb-Cs、洞上 Li-Be-Nb-Ta
异常区位于江西九岭南缘宜丰-奉新锂矿田,矿田外围出露地层主要有新元古界宜丰岩组(周建廷等,2012),主要为绿片岩-钠长绢云片岩-变余凝灰质细砂岩-砂质千枚岩建造夹细碧角斑岩建造;双桥山群厚度巨大(>4km),自下而上可分为横浦组、计林组、安乐林组和修水组,相邻各组之间均为连续沉积。安乐林组主要分布在北西部,岩性为变余砂岩、变余砂岩-粉砂质板岩等变质建造。矿田为岩浆岩分布区,与锂矿成矿相关的为燕山期甘坊复式岩体,包括甘坊岩体、古阳寨岩体、武堂岩体和白水洞岩体(郭春丽等,2024)					
Li-12	34204	55.5	52.2	134	湖南尖峰岭 Nb-Ta-Li-Sn、道县正冲 Li-Rb
异常区位于南岭成矿带,该带地层属于新元古代南岭地体,主要由泥砂质岩石组成,夹流纹质火山岩,基底岩石中亲石元素丰度高;发育早中生代和晚中生代 S 型花岗岩,钠长石化、云英岩化蚀变强烈(文春华等,2016)					
Li-13	4435	68.2	65.9	102	广西恭城栗木 Li-Be-Nb-Ta-Sn
异常区位于桂北资源县,锂异常与桂东北花岗岩(猫儿山,越城岭岩体)具有良好的对应关系,主要为黑云二长花岗岩,内部发育上千条伟晶岩脉(王新宇等,2021)					
Li-14	15468	61.7	58.2	101	江西大余漂塘 W-Li-Be-Nb-Ta-In-Se-Sc
同 Li-12					
Li-15	19102	56.8	55.3	92.0	江西石城县姜坑里 Rb-Li-Nb-Ta、海罗岭 Rb-Nb-Ta-Li-Zr、宁都河源 Li-Nb-Ta、于都上坪 W-Li-Rb-Cs
异常区位于赣南宁都-石城地区,属武夷山成矿带。区域上出露地层主要有青白口系周潭岩组、南华系万源岩组、南华系-震旦系洪山组、寒武系外管坑组和白垩系茅店组。区内岩浆活动强烈,加里东期花岗岩岩性为斑状黑云母二长花岗岩,呈岩基状产出(如会同、营上、驿前岩体)。燕山期花岗岩分为侏罗纪和白垩纪两期,其中侏罗纪花岗岩岩性为二长花岗岩和花岗岩长岩等,呈岩株状产出;白垩纪花岗岩岩性为中粒斑状黑云母二长花岗岩和中细粒黑云母二长花岗岩,呈小岩株、岩瘤状产出。此外,区域内还见有岩脉侵入,如花岗斑岩脉、伟晶岩脉、花岗岩脉、石英脉、闪长(玢)岩脉和辉绿岩脉等(郭春丽等,2024)					
Li-16	5329	52.5	51.7	63.1	江西横峰松树岗 Nb-Ta-Li、横峰黄山 Nb-Ta-Li
异常区位于江西上饶市横峰县,地处赣东北深大断裂南东侧,灵山岩体西侧。出露地层主要有南华系莲沱组、南沱组、震旦系陡山沱组、震旦-寒武系皮园村组,岩性主要为砂质千枚岩、砂质板岩、粉砂质板岩等浅变质岩与不纯的灰岩。与成矿有关的岩浆岩为松树岗岩体,是灵山复式岩体边缘过渡相的组成部分,其次发育少量花岗岩斑岩、云斜煌斑岩和闪长岩等脉岩。松树岗岩体为一隐伏岩体,岩性主要为角闪黑云母花岗岩、中细粒黑云母花岗岩、钠长石化花岗岩、中细粒正长花岗岩和似伟晶岩(舒良树等,2021)					

注:锂异常编号对应图 3

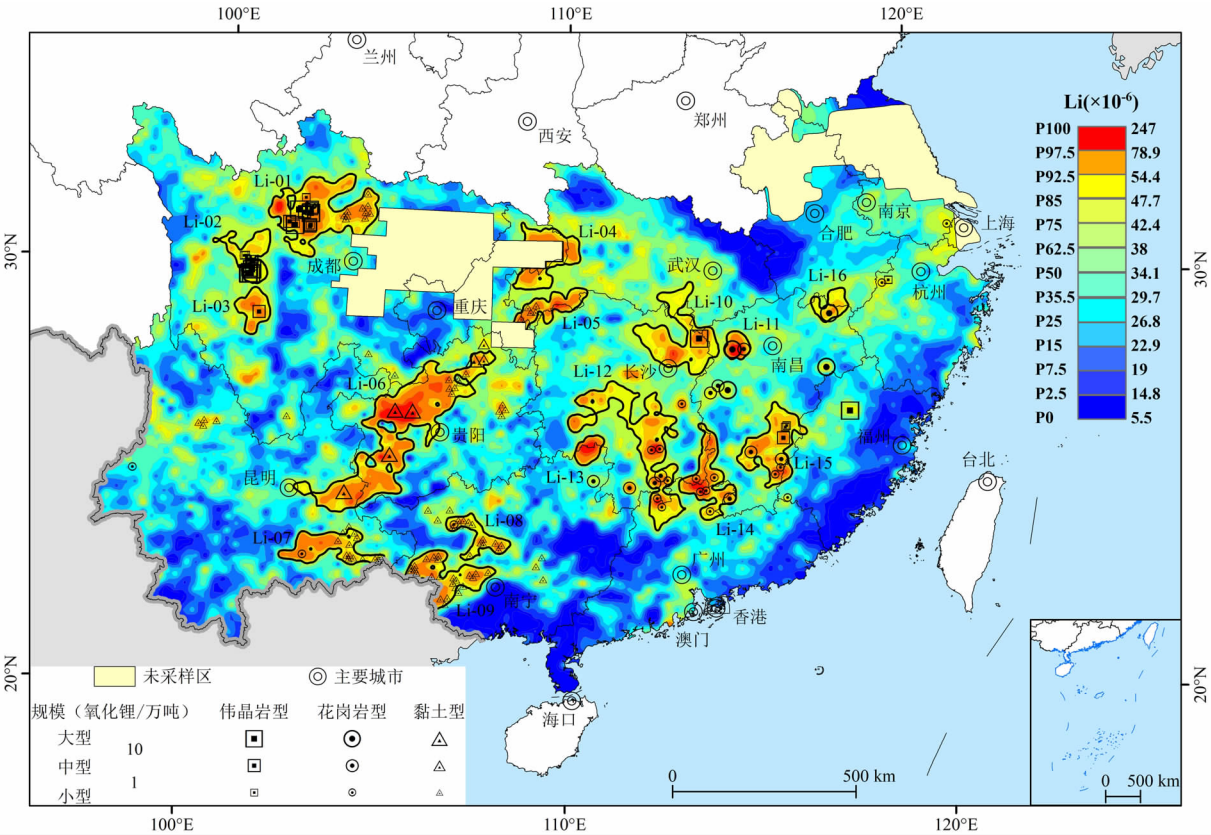


图3 中国南方水系沉积物锂元素地球化学图
Fig. 3 Geochemical counter map of lithium in stream sediments in southern China

中国南方已知锂矿床与高锂异常在空间上基本吻合(图3)。区内已知矿床规模达到大型以上的锂矿床有18个,落在高锂异常区内的有15个;中型锂矿床25个,21个落在高锂异常区内;小型锂矿床43个,36个落在高锂异常区内;大量黏土型锂矿化点也落在高锂异常内。总体上看,约83%的锂矿床落在高异常区内。伟晶岩型锂矿主要分布在Li-01、Li-02、Li-03、Li-10和Li-15中;花岗岩型锂矿主要分布在Li-11、Li-12、Li-14、Li-15和Li-16中;黏土型锂矿主要分布在Li-05、Li-06、Li-07、Li-08和Li-09中,此外这些区域常见铝土矿伴生锂矿化(钟海仁等, 2019)。以上结果说明,可以利用水系沉积物低密度地球化学填图圈定锂异常,进而有效识别锂成矿远景区,即实现“以锂找锂”。虽然80%以上的锂矿床落在高锂异常区内,但也存在锂异常内未发现锂矿化的情况(如Li-04和Li-13)。这可能是由于锂矿的成矿浓集系数较低,导致其形成的分散晕异常衬度也较低,无法从富锂岩石风化形成的高锂地球化学异常中识别出矿致异常。除此之外,由于不同类型锂矿锂异常强度接近,因此无法仅根据锂含量判断潜在锂矿类型,这也是“以锂找锂”面临的困难。鉴于此,有必要建立不同类型锂矿床的区域地球化学标志,以有效甄别锂的矿致异常。

4 中国南方锂矿区域地球化学特征

4.1 地球化学参数特征

表2列出了三种类型锂矿矿区和非矿区地球化学参数统计特征。对于伟晶岩型锂矿,矿区水系沉积物锂含量在 $36.7 \times 10^{-6} \sim 235 \times 10^{-6}$,中位数为 55.1×10^{-6} ,算术平均值为 56.2×10^{-6} 。矿区微量元素Li、Be、Rb、Cs、W、Sn、Ta的平均值均大于非矿区和中国南方水系沉积物平均值(表2),显示出不同程度的富集,而且平均值均大于中位数,暗示这些元素可能存在矿化引起的极值(公维国等, 2013)。除此之外,Ga、Th、U、B、F、Li/Y、Li/La在矿区内也相对富集,而Zr则相对贫化。

花岗岩型锂矿区水系沉积物Li含量变化范围为 $27.6 \times 10^{-6} \sim 235 \times 10^{-6}$,平均值为 58.7×10^{-6} 。矿区含量平均值大于非矿区的微量元素有Li、Be、Bi、W、Sn、Cs、Nb、Ta、Rb、U、F、B,而Ti、Co、Ni、Sr、Ba、V、P等含量低于非矿区(表2)。矿区内Rb/Sr较高,Nb/Ta、Zr/Hf及 δEu 较低。

对于黏土型锂矿,矿区水系沉积物锂含量的最小值为 18.8×10^{-6} ,最大值为 154×10^{-6} ,平均值为 54.1×10^{-6} ,略高于中国西南滇黔桂地区水系沉积物锂含量的平均值为

表2 中国南方三类锂矿区和非矿区水系沉积物地球化学参数表

Table 2 Geochemical parameters of stream sediments for three types of Li deposits in southern China

元素	伟晶岩型锂矿		花岗岩型锂矿		黏土型锂矿		中国南方平均值
	矿区	非矿区	矿区	非矿区	矿区	非矿区	
Li	56.2(37.0~80.4)	35.8	58.7(27.6~235)	35.5	54.1(18.8~154)	35.3	34.0
Be	3.35(1.82~9.69)	2.35	4.80(1.69~17.5)	2.31	2.58(1.28~4.12)	2.35	2.20
Rb	145(108~278)	113	197(78.2~441)	112	106(41.3~178)	114	105
Cs	12.2(7.85~27.5)	8.87	17.3(7.30~73.7)	8.74	11.4(3.69~26.2)	8.81	8.20
W	7.27(1.33~115)	3.61	16.9(0.99~131)	3.42	3.14(0.96~16.0)	3.66	2.10
Sn	12.0(2.62~397)	5.75	17.7(2.36~95.7)	5.58	4.45(1.57~20.3)	5.82	3.60
Nb	19.8(13.8~29.0)	20.0	21.9(14.5~36.2)	20.0	23.7(13.9~38.0)	19.9	18.6
Ta	1.69(1.15~2.69)	1.66	2.51(1.21~5.26)	1.65	1.79(0.93~2.85)	1.66	1.40
As	29.5(1.67~394)	16.4	25.5(1.54~251)	16.3	28.4(3.74~137)	16.1	13.1
Mo	1.11(0.33~6.97)	1.35	1.67(0.36~8.78)	1.34	1.76(0.20~6.56)	1.33	1.10
Sc	11.9(7.49~20.4)	11.7	9.69(6.72~18.2)	11.7	15.8(9.60~22.5)	11.5	11.1
Bi	1.39(0.30~28.1)	0.74	2.62(0.15~22.4)	0.71	0.63(0.19~4.06)	0.75	0.39
Ba	504(230~2543)	468	439(164~4763)	469	381(128~3346)	471	429
Sr	116(36.0~418)	87.8	50.6(23.7~126)	88.5	72.8(34.1~249)	88.6	77.0
Ga	19.5(15.5~32.9)	17.3	20.0(11.3~32.4)	17.3	20.3(12.6~32.4)	17.2	17.1
Ge	1.48(0.90~2.01)	1.43	1.54(1.11~2.14)	1.43	1.51(0.82~2.26)	1.43	1.42
Zr	290(193~596)	341	372(207~889)	340	339(158~681)	340	320
Hf	8.22(6.19~14.5)	9.38	11.0(6.65~19.9)	9.35	8.36(5.27~11.9)	9.41	8.30
Th	16.8(9.20~47.7)	15.8	24.7(9.80~64.6)	15.7	17.6(9.20~31.6)	15.8	13.3
U	4.55(2.10~13.2)	3.96	6.52(2.10~18.2)	3.92	4.72(1.40~11.0)	3.90	3.50
Ti	4970(3012~10534)	5410	4273(2224~8760)	5425	7455(4100~19669)	5341	4600
Co	14.8(8.10~32.7)	14.7	11.1(3.70~25.4)	14.7	20.8(8.60~41.7)	14.5	13.3
Ni	32.0(11.7~85.3)	32.6	24.9(10.2~80.8)	33.0	52.0(23.3~114)	32.0	29.0
V	103(42.7~269)	106	77.9(28.1~225)	106	161(76.2~366)	104	91.0
Cr	76.2(28.0~168)	78.8	58.5(29.1~162)	79.1	127(53.8~252)	77.2	67.0
B	95.1(30.0~207)	61.3	78.1(14.1~323)	61.3	80.1(25.3~143)	61.0	60.0
P	724(329~1060)	637	498(319~1093)	640	833(388~1325)	632	601
F	681(348~1426)	570	652(363~1880)	570	785(442~1402)	564	527
Nb/Ta	11.8(6.60~18.2)	13.1	9.50(3.20~18.1)	13.2	13.5(9.45~19.8)	13.1	13.1
Zr/Hf	36.4(27.7~44.6)	37.4	34.3(26.3~44.5)	37.4	39.6(29.9~55.4)	37.3	37.3
Rb/Sr	1.80(0.39~5.36)	1.86	4.55(0.94~17.6)	1.82	1.66(0.39~4.10)	1.87	1.86
Li/Y	1.87(1.01~4.80)	1.22	1.68(0.43~11.6)	1.22	1.35(0.39~5.48)	1.23	1.23
Li/La	1.03(0.36~1.71)	0.83	1.23(0.32~7.34)	1.11	0.97(0.32~3.60)	0.83	0.83
δCe	0.97(0.92~1.09)	1.03	1.06(0.91~1.21)	1.03	0.98(0.88~1.16)	1.03	1.03
δEu	0.63(0.45~0.71)	0.64	0.54(0.38~0.68)	0.64	0.67(0.53~0.80)	0.64	0.64
LREE/HREE	4.40(2.92~8.29)	3.70	3.63(1.93~11.5)	3.70	3.34(2.08~5.72)	3.72	3.70
Al ₂ O ₃	15.3(12.0~19.3)	13.9	14.4(10.8~18.1)	13.9	15.6(12.2~20.5)	13.8	13.8
Fe ₂ O ₃ ^T	5.33(3.53~10.1)	5.34	4.35(2.92~8.15)	5.36	7.27(4.40~13.1)	5.28	4.80
MgO	1.42(0.61~2.27)	1.23	0.80(0.38~2.27)	1.24	1.31(0.47~2.99)	1.23	1.10
SiO ₂	61.5(49.9~71.7)	64.7	67.1(57.1~76.1)	64.6	60.2(47.4~72.4)	64.8	64.9
Na ₂ O	1.04(0.25~1.70)	0.68	0.43(0.16~1.46)	0.69	0.35(0.09~1.74)	0.69	0.60
K ₂ O	2.94(1.88~4.05)	2.3	2.72(1.60~4.44)	2.34	1.99(0.85~3.34)	2.36	2.30
CIA	75.5(66.7~92.0)	78.6	80.2(68.7~90.3)	78.5	84.6(65.6~95.9)	78.3	78.4

注：矿区数据一栏中括号内为变化范围；Al₂O₃、Fe₂O₃^T、MgO、SiO₂、Na₂O、K₂O 等主量元素单位为 wt%，Nb/Ta 等元素比值、CIA、δEu、δCe 均无量纲，其他微量元素单位为 ×10⁻⁶；中国南方水系沉积物平均值引自程志中等(2011)

46.7 × 10⁻⁶ (乔宇等, 2023)。矿区含量平均值大于非矿区的微量元素有 Li、Nb、Th、U、Ga、As、Mo、Sc、Ti、V、Cr、Ni、F、P，而 Sr、Ba 则相反。从主量元素看，矿区相对富集 Al₂O₃、Fe₂O₃^T，相对亏损 SiO₂、Na₂O。此外，黏土型锂矿区的风化指

数(CIA)显著高于花岗岩型和伟晶岩型锂矿区。

4.2 地球化学参数重要性度量

将以上总结出的 34 种主、微量元素含量及元素含量比

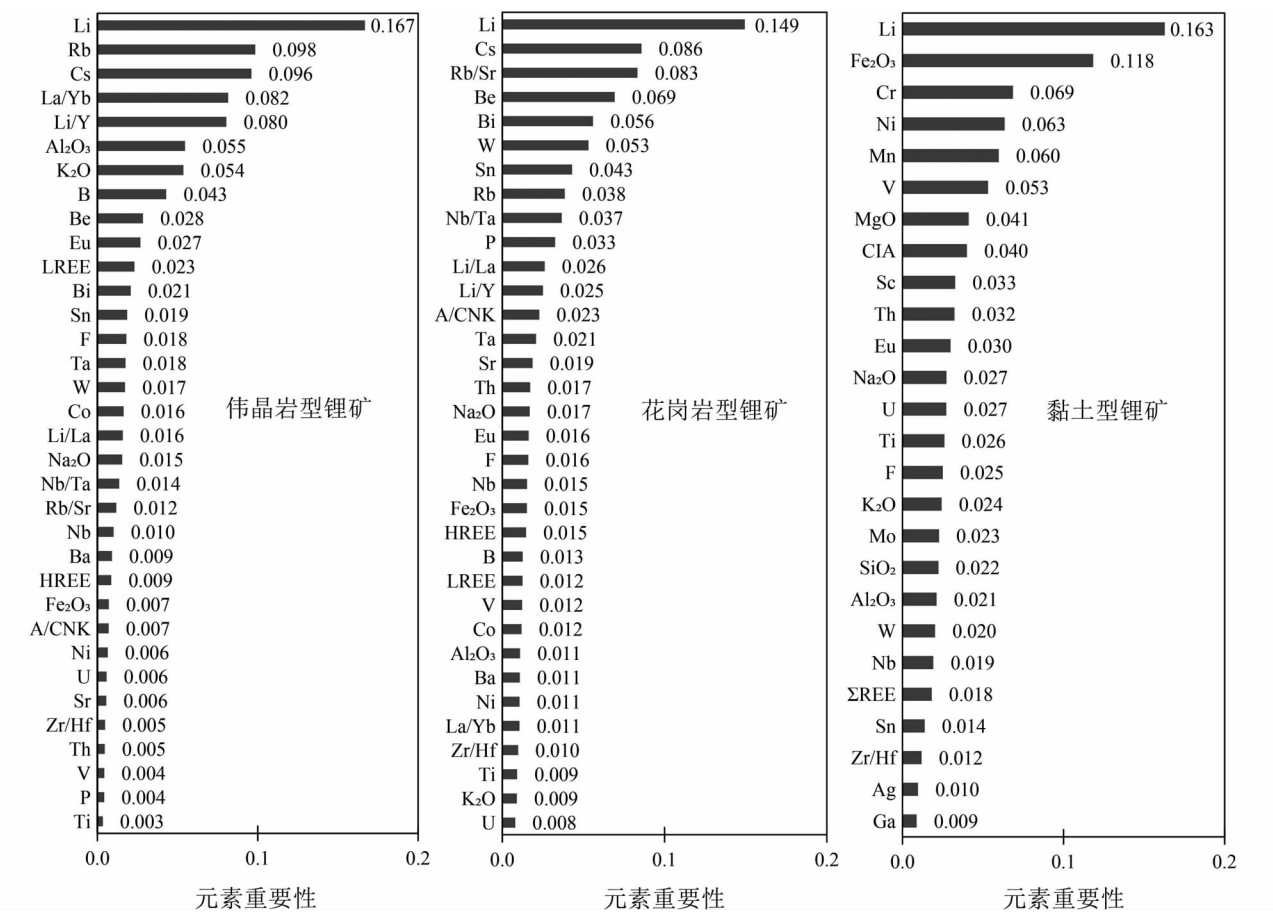


图 4 基于随机森林的伟晶岩型、花岗岩型、黏土型锂矿区域地球化学指示元素重要性度量

Fig. 4 Importance measurements of geochemical indicators of three types of Li deposits with random forest method

值作为伟晶岩型和花岗岩型锂矿的特征变量,不同类型锂矿的特征变量的重要性见图 4。伟晶岩型锂矿中,除 Li 的贡献值最高外,Rb、Cs、La/Yb、Li/Y、Al₂O₃、K₂O、B 等特征也具有 较高的贡献值(特征重要度 > 0.04);花岗岩型锂矿中,除 Li 的贡献值最高外,Cs、Rb/Sr、Be、Bi、W、Sn 等特征也具有 较高的贡献值(特征重要度 > 0.04);黏土型锂矿中,除 Li 的贡献值最高外,Fe₂O₃^T、Cr、Ni、Mn、V、CIA 等也具有 较高的贡献值(特征重要度 > 0.04)。

5 讨论

5.1 不同类型锂矿区域地球化学勘查标志

5.1.1 伟晶岩型锂矿区域地球化学勘查标志

前人对伟晶岩型锂矿开展了大量矿床地球化学和区域地球化学调查研究。甲基卡矿区水系沉积物 Li 含量介于 0.25 × 10⁻⁶ ~ 717 × 10⁻⁶ 之间,平均为 42.5 × 10⁻⁶;1 : 1 万土壤地球化学测量显示 Li、Be、Rb、Cs、Sn、Ta、Nb 等 7 种元素的均值明显高于全国土壤平均值,富集系数大于 1.5 的元素有 Be、Cs、Li、Sn、Ta,主成矿元素 Li 含量大于 200 × 10⁻⁶ (肖瑞

卿等, 2018);李家沟矿区 1 : 5 万水系沉积物异常元素组合为 Li、Be、Cs、Rb、Nb、Ta、W、Sn,以 Li、Be、Cs 为主的地球化学特征(罗伟等, 2018);金川县业隆沟锂矿区 1 : 5 万水系沉积物及 1 : 1 万土壤均显著富集 Li、Be、Sn、Nb、Ta、Cs、Rb,而相对亏损 Ba、Zr、Sr、Th 等元素(宫以栋等, 2023);观音桥地区 1 : 1 万土壤地球化学对锂矿具有指示作用的元素为 Li、Be、Nb、Ta 等(李明等, 2024);观音桥锂矿区地球化学找矿标志为 Li、Be、W、Sn、Nb、Bi 的综合异常(秦乐, 2020);党坝矿区富集 Li、Nb、Ta、Cs、Be、Sn(谭华等, 2023);打枪沟锂铍矿区富集 Cs、Rb、U、Ta 等,亏损 Ba、Sr、Nb 和 Zr 等(陈燃等, 2024);传梓源矿床锂辉石伟晶岩和钠长石伟晶中强烈富集 Rb、U、Li、Nb、Ta 元素,亏损 Ba、Sr、Ti 元素(文春华等, 2016);江西广昌县头陂式花岗伟晶岩型锂矿区含锂辉石伟晶岩均分布于以 Li 大于 60.0 × 10⁻⁶ 所圈定的异常范围内(周建廷等, 2012)。除此之外,前人对伟晶岩型锂矿区相关的花岗岩进行了全岩地球化学分析,其主量元素表现出高硅、富铝、富碱、贫钙的特征,A/CNK 值均大于 1.1,含锂较高,稀土元素含量与正常花岗岩相当,δEu 弱负异常,属中钾-高钾钙碱性强过铝质 S 型花岗岩(Chappell and White, 1974; 文春华等, 2016; 罗伟等, 2021; 谭洪旗等, 2022; 宫以栋

等, 2023; 邱志毅等, 2024)。由于赋矿伟晶岩经历了高度岩浆演化, 强烈结晶分异作用导致伟晶岩脉稀土含量极低(一般小于 20×10^{-6}), δEu 显著负异常, Nb/Ta 和 Zr/Hf 值较低(文春华等, 2016; 徐云峰等, 2016; 罗伟等, 2018)。因此, 伟晶岩型锂矿区大比例尺土壤地球化学测量获得的 Li/La 或 Li/Y 值可以有效圈定伟晶岩脉。但是由于含锂伟晶岩脉地表出露面积较小, 而与成矿相关的大面积分布的花岗岩和地层总稀土含量并不低。因此, 小比例尺低密度地球化学填图中的水系沉积物不能完全继承伟晶岩的极高 Li/Y 值。同样的, 伟晶岩型矿区仅显示较弱 Nb/Ta、Zr/Hf 和 δEu 负异常。

综上所述, 伟晶岩型锂矿区域地球化学勘查标志为微量元素 Li、Be、Rb、Cs、W、Sn、Ta、Ga、B、P、F、Th、U 相对富集, Zr、Ti 相对亏损; 主量元素 Al_2O_3 含量较高; Li/La 和 Li/Y 值较高, Nb/Ta、Zr/Hf 弱负异常, δEu 具弱的负异常。基于随机森林特征重要性度量获得的伟晶岩型锂矿指示元素组合 Li-Be-Cs-Ta-Rb-W-Sn-Li/Y 与 LCT 型伟晶岩型锂矿的地球化学特征一致(Černý, 1991)。

5.1.2 花岗岩型锂矿区域地球化学勘查标志

花岗岩型锂矿的成矿作用具多阶段性的特点, 往往形成与 W-Sn-Nb-Ta-Be-Cs 等多种成矿元素共生的多金属矿床(李晓峰等, 2021)。从统计结果(表 2)来看, 花岗岩型锂矿区水系沉积物 Li、Be、Bi、W、Sn、Cs、Nb、Ta、Rb、U、F、B、P 表现为正异常, Ti、Co、Ni、Sr、Ba、V 表现为负异常。江西宜春甘坊矿田花岗岩型锂矿区水系沉积物和土壤地球化学异常元素组合以 Li、Ta、Nb、Rb、Cs、F、B、P 为主, 与我们统计的区域正异常元素组合基本一致, 当 $\text{Li} \geq 800 \times 10^{-6}$ 时可认定为锂矿体赋存区(尹维青等, 2023)。茜坑花岗岩富集 K、Cs、Rb、Th、U、Pb、F、Li、W、Sn、Nb, 尤其强烈富集 Li、Nb、W 及挥发分 F, 而相对亏损 Sr、Ba、Ti 及 REE(聂晓亮等, 2022)。从元素比值来看, 宜春 414 矿床自深部到浅部, Rb/Sr 和 Rb/Ba 不断增大, 而 Nb/Ta 和 Zr/Hf 则不断减小, 钠长石花岗岩带 Rb/Sr 迅速增大, Nb/Ta 迅速减小(李胜虎, 2015); 栗木矿区钠长石花岗岩和似伟晶岩显著富集 Li 和 F, Rb/Sr、Rb/Ba 在钠长石花岗岩和伟晶岩中较大, 而 Nb/Ta 和 Zr/Hf 的值较小(李胜虎, 2015); 茜坑花岗岩 Nb/Ta 变化范围为 1.12 ~ 2.60, Zr/Hf 值为 12.35 ~ 13.40, 显著低于中国大陆地壳 Nb/Ta 和 Zr/Hf 平均值(11.88 和 86.67)(聂晓亮等, 2022)。海罗岭锂矿中 Li 矿化富集程度与 F 含量呈明显的正相关(Badanina *et al.*, 2004), 与稀土总量、K/Rb 值呈负相关(徐喆等, 2023)。本文统计的花岗岩型锂矿区也具有较高 Rb/Sr 和较低的 Nb/Ta、Zr/Hf、K/Rb 值, δEu 为负异常(表 2), 这主要是由于花岗岩型锂矿的成矿花岗岩均为高分异花岗岩, 高度岩浆结晶分异演化和流体交代导致了以上特殊的地球化学特征, 且成矿花岗岩的特征被水系沉积物所继承。

随机森林特征重要性度量结果显示, 对于花岗岩型锂矿, 除 Li 的贡献值最高外, Cs、Rb/Sr、Be、Bi、W、Sn 等特征也

具有较高的贡献值(图 4)。因此, 花岗岩型锂矿区域地球化学勘查标志为微量元素 Li、Be、Bi、W、Sn、Cs、Nb、Ta、Rb、U、F、B 相对富集, Ti、Co、Ni、Sr、Ba、V、P 相对亏损; 具有较高的 Rb/Sr 和较低的 Nb/Ta、Zr/Hf、K/Rb。

5.1.3 黏土型锂矿区域地球化学标志

王学求等(2020)利用全国地球化学基准数据在西南湘黔滇桂地区圈定出巨型锂地球化学域, 该区域发育大面积富锂的铝土矿、炭质泥页岩/煤层、黏土岩等, 是黏土型锂矿的有利产出层位, 具有较大的找矿潜力。中国西南滇黔桂地区发现大量锂异常的泥页岩(均值 52.6×10^{-6})、灰岩(均值 20.6×10^{-6})和白云岩(均值 28.5×10^{-6})(乔宇等, 2023), 锂含量远超中国东部出露地壳岩石锂丰度(鄯明才等, 1997)。例如, 贵州九架炉组黏土岩锂含量范围为 $2.7 \times 10^{-6} \sim 1144 \times 10^{-6}$ (平均值为 153×10^{-6}), 铝质黏土岩锂含量为 577×10^{-6} , 炭质泥岩锂含量为 57.3×10^{-6} ; 云南倒石头组黏土岩锂含量范围为 $35.8 \times 10^{-6} \sim 1467 \times 10^{-6}$ (平均值为 528×10^{-6}), 铝质黏土岩中锂含量范围为 $628 \times 10^{-6} \sim 1786 \times 10^{-6}$ (平均值为 1009×10^{-6}), 炭质泥岩锂含量范围为 $146 \times 10^{-6} \sim 215 \times 10^{-6}$ (平均值为 178×10^{-6}), 铝土矿中锂含量为 30.5×10^{-6} (王亚平, 2024)。目前, 在滇黔桂地区发现的与铝土矿伴生的锂矿化较多, 其中不乏含量高、储量大的伴生沉积黏土型锂矿, 如大竹园铝土矿、瓦厂坪铝土矿、滇中锂矿等(张七道等, 2024)。当铝土矿(岩) SiO_2 介于 25% ~ 45%, Al_2O_3 介于 35% ~ 55% 时, 锂含量最高。锂和碱及碱土金属元素呈正相关, 和 Zr、Nb 等稳定元素也存在相关关系(Wang *et al.*, 2013; 钟海仁等, 2019)。贵州务川大竹园铝土矿极强烈富集 Li、Cd、Sb; 强烈富集 Mo、Pb; 富集 Sc、V、Zr、Zn、Cr、Ga、Th、Be、Nb、U; 贫化 Rb、Sr、Ba(雷志远等, 2012)。普安、晴隆煤矿煤层中有相似的微量元素异常特征, 明显富集 Li、Sc、V、Cr、Co、Ge、As、Nb、Mo、W 和 U(杨瑞东等, 2017)。马圣钞等(2019)统计发现富锂黏土岩中 Li 含量与 MgO 、 Al_2O_3 、Ga、Th、Ta、Sn 呈正相关关系, 这与本文统计得到的黏土型锂矿区特征元素组合一致。

据随机森林特征重要性度量, 黏土型锂矿区域地球化学指标中 Li 的贡献值最高, Fe_2O_3^T 、Cr、Ni、Mn、V、 MgO 、CIA 等也具有较高的贡献值。综合上述研究结果, 黏土型锂矿区域地球化学勘查标志为富集 Li、Sc、V、Ga、Nb、Th、U、Mo、Cr, 相对亏损 Rb、Sr、Ba、W、Sn, 主量元素 Al_2O_3 和 Fe_2O_3^T 富集。

5.2 不同类型锂矿区域地球化学特征对比

花岗岩型锂矿和伟晶岩型锂矿均与富锂的高分异花岗岩密切相关, 因此二者表现出相似的区域地球化学特征(图 5), 但是由于两者的地质背景、矿物组合、矿体出露规模、风化剥蚀条件存在差异, 导致不同指示元素在两类锂矿的富集程度存在一定差异。伟晶岩型锂矿的含锂矿物包括锂辉石、锂云母、透锂长石、磷铝锂石、锂霞石等, 以锂辉石为主(Bradley *et al.*, 2016)。成矿伟晶岩的矿物组合为: 锂辉石、

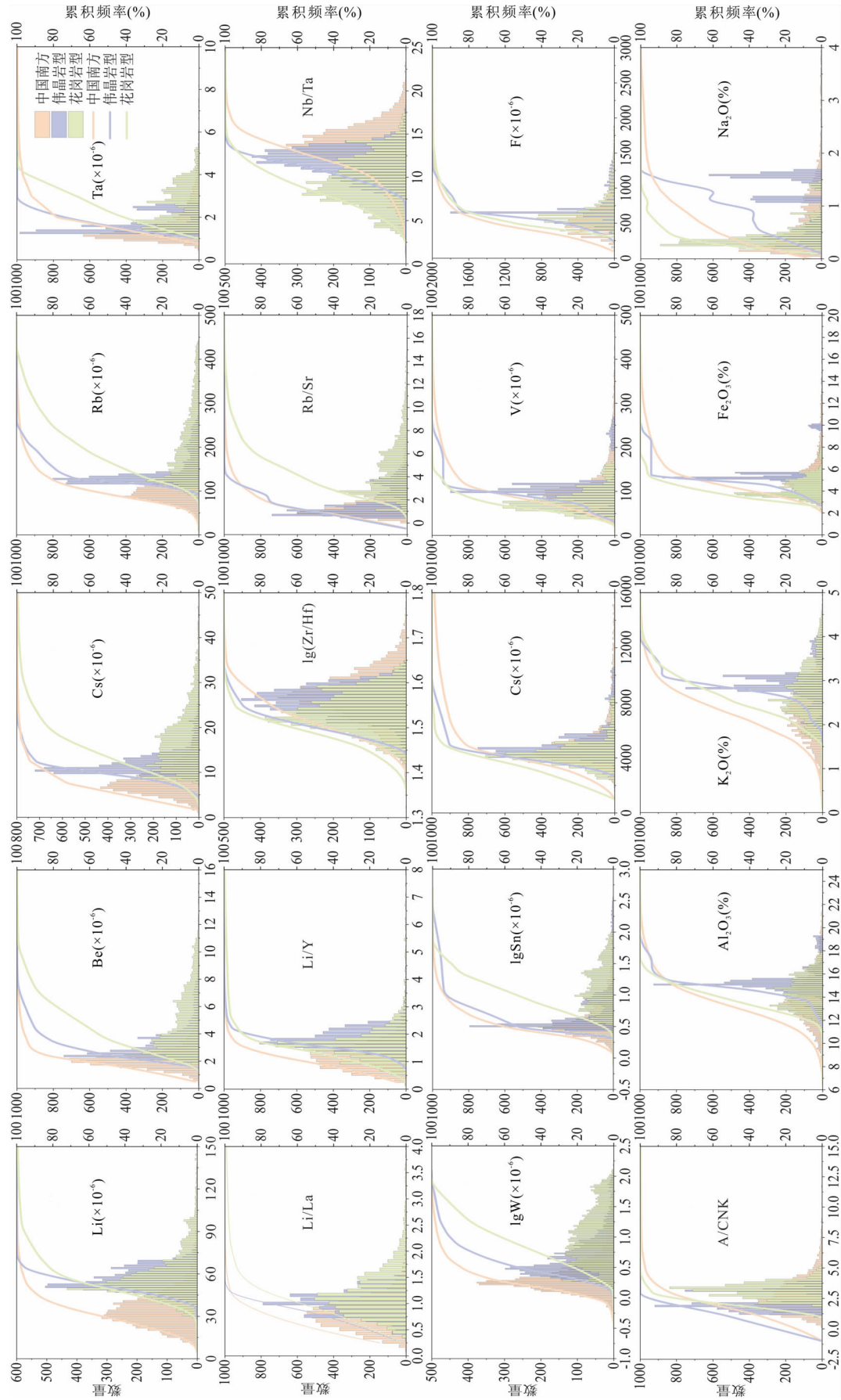


图 5 中国南方伟晶岩型锂矿和花岗岩型锂矿区域地球化学指标累积频率直方图

Fig. 5 Histograms of representative geochemical indicators for granite-type and pegmatite-type Li deposits in southern China

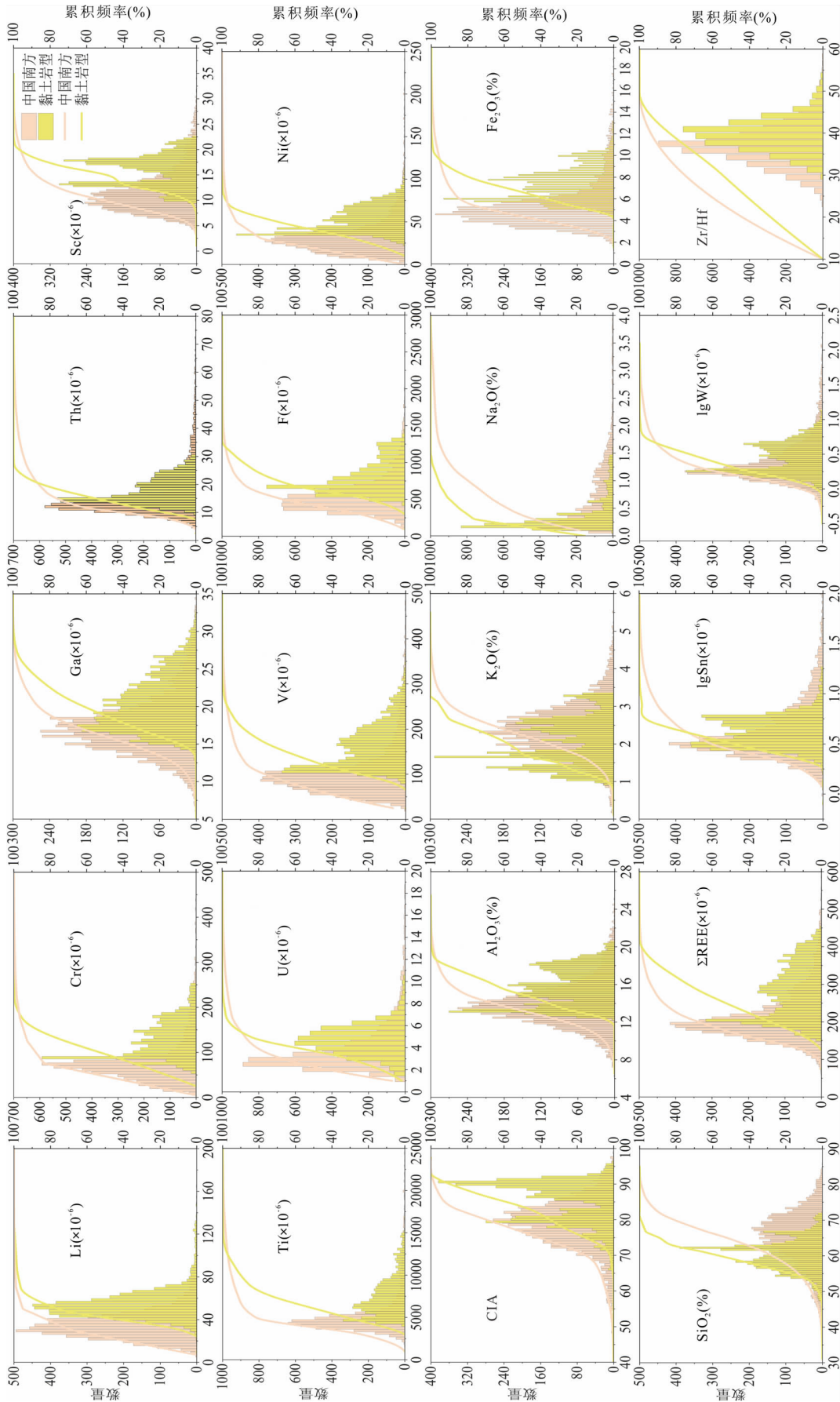


图6 中国南方黏土型锂矿区域地球化学指标累积频率直方图
Fig. 6 Histograms of representative geochemical indicators for clay-type Li deposits in southern China

铌钽铁矿、锂云母、绿柱石、锡石、钾长石、钠长石、白云母(庞博等, 2015; 秦乐, 2020)。而花岗岩型锂矿的含锂矿物主要为锂云母和铁锂云母(Roda *et al.*, 2007; Munk *et al.*, 2018; Ellis *et al.*, 2022; Troch *et al.*, 2022), 锂富集在花岗岩体顶部和边缘的热液蚀变带(李晓峰等, 2021), 随着蚀变程度加强, 锂云母、磷锂铝石、锂电气石、铁锂云母、铌钽锰矿、钽锰矿、富磷锰铁矿、细晶石、磷铝猛矿、含钽锡石、独居石、羟磷铍钙石、铯沸石、绿柱石及铯榴石等矿物出现(李胜虎, 2015; 徐喆等, 2023)。两者矿物组成相似是其共同富集 Li、Be、Cs、Nb、Ta、Rb 的主要原因。伟晶岩型锂矿的锂品位一般高于花岗岩型锂矿, 但是花岗岩型锂矿以岩体形式产出, 出露面积大, 而伟晶岩型锂矿以岩脉形式产出, 出露面积小, 产出形式的差异导致两者在区域上具有相似的 Li 含量。伟晶岩型锂矿由于演化程度更高, 矿石内稀土含量极低(一般低于 20.0×10^{-6}), 矿石富 Li 贫 Y 的特征使得高 Li/Y 值成为伟晶岩型锂矿的典型区域地球化学特征。花岗岩型锂矿和伟晶岩型锂矿均经历了高度岩浆演化和结晶分异过程(孙文礼等, 2022; 吴福元等, 2023), 因此均具有高 Rb/Sr 和低 Nb/Ta、Zr/Hf 的地球化学特征(张睿泽和左仁广, 2025)。花岗岩型锂矿集中于华南地区, 华南地区是全球最大的钨锡成矿省, 发育大量钨锡矿, 同时出露大面积富 W、Sn 的高分异花岗岩和地层, Mo 和 Bi 往往作为钨锡矿的共生元素出现; 而伟晶岩型锂矿主要集中于川西地区, 出露地层以三叠系变沉积岩为主。因此, 花岗岩型锂矿区 W、Sn、Mo、Bi 等元素显著高于伟晶岩型锂矿区。有研究发现伟晶岩型锂矿成矿流体中除富集 Li、Na、K、Cs、Rb 等碱性元素外, 还富集 As、B 等挥发性元素(Wang *et al.*, 2023)。经统计, 伟晶岩型锂矿区 As 和 B 的平均值分别为 29.5×10^{-6} 和 95.0×10^{-6} , 显著高于华南水系沉积物的背景值(表 2)。因此, 伟晶岩型锂矿区更富集 As、B。表生过程对区域地球化学特征也有一定影响。花岗岩和伟晶岩型锂矿的矿床均富集 K_2O 、 Na_2O (London, 2018)。但是伟晶岩锂矿主要位于川西高寒地区, 化学风化作用较弱(CIA 为 75.5), 而花岗岩型锂矿集中于风化作用较强的华南地区(CIA 为 80.2), 风化过程中钾钠淋失程度的差异致使伟晶岩型锂矿区的 K_2O 、 Na_2O 含量高于花岗岩型锂矿区。

黏土型锂矿与花岗岩型和伟晶岩型锂矿除共同富锂外, 其他区域地球化学特征差异显著(图 6)。黏土型锂矿为表生沉积型矿床, 常与铝土矿伴生(钟海仁等, 2019; 张七道等, 2024)。黏土型锂矿经历了较强的风化作用, 其区内水系沉积物 CIA 平均值高达 84.6(表 2), 显著高于花岗岩型和伟晶岩型锂矿。在风化作用下, 黏土型锂矿会经历强烈的去硅、钠、钾、钙和富铁、铝的过程, 导致黏土型锂矿的矿物组合以黏土矿物和富铁铝矿物为主(邓洁等, 2025)。因此, 除了 Li 富集外, 黏土型锂矿的 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 ^T 含量较高, 亲铝元素 Ga 和亲铁元素 Cr、Ni、Co、V 等含量也较高; 而 K_2O 、 Na_2O 、Rb、Sr 等易溶元素淋失, 含量相对较低。黏土岩母岩以亏损

稀有金属元素的碳酸盐岩、酸性火山岩和基性岩为主, 导致 W、Sn 等稀有金属元素含量亦较低。此外, 黏土岩中 REE 含量较高, 因此其 Li/Y 和 Li/La 值明显低于伟晶岩型锂矿。

综合来看, 花岗岩型和伟晶岩型锂矿区域地球化学特征上均相对富集 Li、Be、Bi、W、Sn、Cs、Nb、Ta、Rb、U、F、B, 有较高的 Rb/Sr 和较低的 Nb/Ta、Zr/Hf、K/Rb, 但是, 花岗岩型锂矿区的 Be、Ta、Rb、W、Sn、Mo、Bi、U 含量更高, 而 K_2O 、 Na_2O 、P、Sr、 δEu 、Nb/Ta、Zr/Hf 更低; 伟晶岩型锂矿更富集 As、B。除均富 Li 外, 黏土型锂矿表现出与花岗岩型锂矿和伟晶岩型锂矿完全不同的区域地球化学特征, 其相对富集 Sc、V、Ga、Nb、Th、U、Mo、Cr、REE, 相对亏损 W、Sn、Rb、Sr、Ba, 且 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 ^T 富集。三类锂矿区域地球化学标志的差异为利用区域地球化学调查圈定不同类型锂矿奠定了理论基础和数据支撑。

6 结论

本文利用中国南方 76 元素地球化学填图项目获得的地球化学数据库, 分析了南方地区锂地球化学异常和锂矿的关系, 总结了三类锂矿的区域地球化学标志及其差异。结果显示中国南方地区为锂的高背景区, 暗示区内锂成矿潜力较高。以锂含量 47.7×10^{-6} 为异常下限圈定了 16 个高锂异常区, 约 83% 的已知锂矿床位于高锂异常区内。三种类型锂矿均有显著而独特的区域地球化学勘查标志, 伟晶岩型锂矿区 Li、Be、Rb、Cs、Ta、W、Sn、As、B、P、F、Th、U 相对富集, Zr、Ti 相对亏损, Al_2O_3 含量较高, Li/Y 值较高; 花岗岩型锂矿区 Li、Be、Cs、Nb、Ta、Bi、W、Sn、Rb、U、F、B 相对富集, Ti、Co、Ni、Sr、Ba、V、P 相对亏损, 具有较高的 Rb/Sr 和较低的 Nb/Ta、Zr/Hf、K/Rb、 δEu 显著负异常; 黏土型锂矿区富集微量元素 Li、Sc、V、Ga、Nb、Th、U、Mo、Cr、REE, 相对亏损 W、Sn、Rb、Sr、Ba, 富集主量元素 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 ^T。不同类型锂矿的区域地球化学特征与矿床成因、矿石矿物组合、地质背景、矿体出露规模、表生风化条件等密切相关。本研究为利用低密度地球化学填图圈定不同类型锂矿找矿远景区奠定了理论和数据基础。

致谢 中国南方 76 元素地球化学填图项目得到相关省份地调单位的大力支持, 向全体参与该项目的工作人员表示诚挚谢意。路昊天、董政男同学在数据整理和制图方面提供了帮助。两位审稿人和编辑提出了诸多有益修改意见, 提高了本文的准确性、逻辑性和可读性, 在此表示感谢。

References

- Badanina EV, Veksler IV, Thomas R, Sryitso LF and Trumbull RB. 2004. Magmatic evolution of Li-F, rare-metal granites: A case study of melt inclusions in the Khangilay complex, Eastern Transbaikalia (Russia). *Chemical Geology*, 210(1-4): 113-133

- Benson TR, Coble MA, Rytuba JJ and Mahood GA. 2017. Lithium enrichment in intracontinental rhyolite magmas leads to Li deposits in caldera basins. *Nature Communications*, 8: 270
- Bowell RJ, Lagos L, de los Hoyos CR and Declercq J. 2020. Classification and characteristics of natural lithium resources. *Elements*, 16(4): 259-264
- Bradley D, Shea E, Buchwaldt R, Bowring S, Benowitz J, O'Sullivan P and McCauley A. 2016. Geochronology and tectonic context of lithium-cesium-tantalum pegmatites in the Appalachians. *The Canadian Mineralogist*, 54(4): 945-969
- Černý P. 1991. Fertile granites of Precambrian rare-element pegmatite fields: Is geochemistry controlled by tectonic setting or source lithologies? *Precambrian Research*, 51(1-4): 429-468
- Chappell BW and White AJR. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173-174
- Chen R, Wei HG and Yao D. 2024. Geochemical characteristics and geological significance of the Tiaogongsuo pegmatite in the southeastern margin of the Songpan-Ganza Orogenic Belt. *West-China Exploration Engineering*, 36(4): 72-77 (in Chinese)
- Chen YC, Pei RF, Wang DH and Huang F. 2022. A discussion on minerogenetic series of mineral deposits (VIII). *Acta Geologica Sinica*, 96(1): 123-130 (in Chinese with English abstract)
- Cheng ZZ, Xie XJ, Pan HJ, Yang R and Shang YT. 2011. Abundance of elements in stream sediment in South China. *Earth Science Frontiers*, 18(5): 289-295 (in Chinese with English abstract)
- Cui Y, Wen HJ, Yu WX, Luo CG, Du SJ, Ling YK, Xu F and Yang JH. 2022. Study on the occurrence state and enrichment mechanism of lithium in lithium-rich clay rock series of the Daoshitou Formation of Lower Permian in Central Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7): 2080-2094 (in Chinese with English abstract)
- De Caritat P, Reimann C, Smith DB and Wang X. 2018. Chemical elements in the environment: Multi-element geochemical datasets from continental- to national-scale surveys on four continents. *Applied Geochemistry*, 89: 150-159
- Deng J, Ling KY, Zhao HN and Wen HJ. 2025. An in-situ microanalytical method for studying lithium occurrence state of the clay-type lithium deposit. *Acta Mineralogica Sinica*, 45(3): 525-531 (in Chinese with English abstract)
- Du WY, Li YM, Zhou B, Fan C, Zeng XH, Liu J, Liu SX, Liu L, Liu WW, Wei SH, Jiang WM and Jiang ZY. 2022. Mineralization characteristics and prospecting potential of clay-type lithium in southwestern Hubei. *Resources Environment & Engineering*, 36(5): 562-571 (in Chinese with English abstract)
- Ellis BS, Neukampf J, Bachmann O, Harris C, Forni F, Magna T, Laurent O and Ulmer P. 2022. Biotite as a recorder of an exsolved Li-rich volatile phase in upper-crustal silicic magma reservoirs. *Geology*, 50(4): 481-485
- Fu XF, Huang T, Zou FG, Ling B, Hao XF, Yang R, Pan M and Tang Y. 2021. Ore-controlling mechanism and deep prospecting direction of Jiajika-like lithium mines. *Acta Geologica Sinica*, 95(3): 791-808 (in Chinese with English abstract)
- Gong JJ, Li FL, Zhang S and Cui F. 2015. Delineating anomalies using similarity coefficients based on element assemblage characteristics: An example of the Nanling area. *Geology and Exploration*, 51(2): 312-322 (in Chinese with English abstract)
- Gong WG, Li XW, Wei HF, Wei XY and Nie CY. 2013. Soil geochemistry characteristics and prospecting potential of Shiwuliqiao gold deposit in Heilongjiang Province. *Gold*, 34(4): 19-24 (in Chinese with English abstract)
- Gong YD, Gui L, Wu YH, Liao ZH and Tang R. 2023. Geochemical characteristics of the Yeloggou lithium mine in Jinchuan County, Sichuan Province. *Acta Geologica Sichuan*, 43(3): 528-536 (in Chinese with English abstract)
- Guo CL, Zhang BW, Zheng Y, Xu JQ, Zhao QQ, Yan JY, Zhou R, Fu W and Huang K. 2024. Granite-type lithium deposits in China: Important characteristics, metallogenic conditions, and genetic mechanism. *Acta Petrologica Sinica*, 40(2): 347-403 (in Chinese with English abstract)
- Hou JL, Li JK, Wang DH, Chen ZY, Dai HZ and Liu IJ. 2017. Geochemical characteristics and geological significance of biotite in granite bodies of Jiajika lithium mine, Sichuan Province. *Gold Science and Technology*, 25(6): 1-8 (in Chinese with English abstract)
- Kesler SE, Gruber PW, Medina PA, Keoleian GA, Everson MP and Wallington TJ. 2012. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geology Reviews*, 48: 55-69
- Kong HL, Li WY, Ren GL, Li K, Wang ZH, Zhao XM, Zhang JW and Peng SX. 2023. Research status of pegmatite-hosted Li deposits and their exploration prospect in West China. *Northwestern Geology*, 56(1): 11-30 (in Chinese with English abstract)
- Lei ZY, Wang DH, Li PG and Weng SF. 2012. Analyses on geochemical characteristics of trace elements of Dazhuyuan bauxite deposit in Wuchuan. *Guizhou Geology*, 29(4): 249-258 (in Chinese with English abstract)
- Li JK, Liu BS, Wang DH and Fu XF. 2007. Metallogenic epoch of Xubaoding W-Sn-Be deposit in northwest Sichuan and its tectonic tracing significance. *Mineral Deposits*, 26(5): 557-562 (in Chinese with English abstract)
- Li JK, Liu XF and Wang DH. 2014. The metallogenic regularity of lithium deposit in China. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2269-2283 (in Chinese with English abstract)
- Li LG, Wang LX, Tian Y, Ma CQ and Zhou FC. 2019. Petrogenesis and rare-metal mineralization of the Mufushan granitic pegmatite, South China: Insights from in situ mineral analysis. *Earth Science*, 44(7): 2532-2560 (in Chinese with English abstract)
- Li M, Dai HZ, Ding XP, Zhu HY, Wang X and Yang TY. 2024. Soil geochemical characteristics and lithium ore prospecting direction in the Guanyinqiao area of western Sichuan. *Mineral Exploration*, 15(8): 1456-1465 (in Chinese with English abstract)
- Li SH. 2015. Ore-forming mechanisms and prospecting models of typical granite type rare metal deposits in South China. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract)
- Li XF, Wei XL, Zhu YT, Li ZF and Deng XC. 2021. Rare metal deposits in South China: Types, characteristics, distribution and tectonic setting. *Acta Petrologica Sinica*, 37(12): 3591-3614 (in Chinese with English abstract)
- Lin Y, Pollard PJ, Hu SX and Taylor RG. 1995. Geologic and geochemical characteristics of the Yichun Ta-Nb-Li deposit, Jiangxi Province, South China. *Economic Geology*, 90(3): 577-585
- Lin YJ, Zheng MP, Zhang YS, Xing EY, Redfern SAT, Xu JM, Zhong JA and Niu XS. 2020. Mineralogical and geochemical characteristics of Triassic lithium-rich K-bentonite deposits in Xiejiaocao Section, South China. *Minerals*, 10(1): 69
- Ling KY, Wen HJ, Zhang QZ, Luo CG, Gu HN, Du SJ and Yu WX. 2021. Super-enrichment of lithium and niobium in the Upper Permian Heshan Formation in Pingguo, Guangxi, China. *Science China (Earth Sciences)*, 64(5): 753-772
- Liu T. 2022. The comparative study on metallogenic mechanism of hard-rock-type lithium deposits in Jiajika, Sichuan and Kaluan, Xinjiang. Master Degree Thesis. Fuzhou: East China University of Technology (in Chinese with English abstract)
- London D. 2018. Ore-forming processes within granitic pegmatites. *Ore Geology Reviews*, 101: 349-383
- Lou FS, Xu Z, Huang H and Xiong YY. 2023. Geological characteristics and prospecting significance of low grade super large granite mica-type lithium deposits in Jiangxi Province. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 46(5): 425-436 (in Chinese with English abstract)
- Luo W, Li YG, Luo KJ, Yue XY, Tang S and Yang B. 2018. Anomaly evaluation and prospecting prediction of 1: 50000 stream sediment survey in Keeryin Area, Sichuan Province. *Science Technology and Engineering*, 18(9): 56-62 (in Chinese with English abstract)
- Luo W, Yang B, Gu CH, Li J and Pang LW. 2021. The geological characteristics and ore indicators of Lijiagou super-large spodumene

- deposit in Jinchuan County, Western Sichuan. *Sichuan Nonferrous Metals*, (2): 16-18, 21 (in Chinese with English abstract)
- Ma SC, Wang DH, Sun Y, Li C and Zhong HR. 2019. Geochronology and geochemical characteristics of lower-middle Triassic clay rock and their significances for prospecting clay-type lithium deposit. *Earth Science*, 44(2): 427-440 (in Chinese with English abstract)
- Munk LA, Boutt DF, Hynek SA and Moran BJ. 2018. Hydrogeochemical fluxes and processes contributing to the formation of lithium-enriched brines in a hyper-arid continental basin. *Chemical Geology*, 493: 37-57
- Nie XL, Wang SL, Liu S and Xu L. 2022. Geological and geochemical characteristics of the Xikeng lithium deposit and the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology of lepidolite of the deposit in Jiangxi Province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 42(3): 285-294 (in Chinese with English abstract)
- Pang B, Gu CH, Li LB, Luo W and Li J. 2015. Geological characteristics and genesis of the spodumene deposit in Dangba, Barkam, Sichuan Province. *Sichuan Nonferrous Metals*, (4): 31-34 (in Chinese with English abstract)
- Pollard PJ. 2021. The Yichun Ta-Sn-Li deposit, South China: Evidence for extreme chemical fractionation in F-Li-P-rich magma. *Economic Geology*, 116(2): 453-469
- Qiao Y, Wang XQ, Han ZX, Liu FT, Yan TT, Wang Q and Wu H. 2023. Temporal and spatial distribution characteristics of lithium geochemistry and prospecting prediction in the key resource prospecting new area of Yunnan, Guizhou, and Guangxi in Southwest China. *Acta Geologica Sinica*, 97(6): 1828-1847 (in Chinese with English abstract)
- Qin Y. 2020. Geological characteristics and metallogenic conditions of spodumene deposit in Guanyinqiao, Jinchuan County, Sichuan Province. Master Degree Thesis. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract)
- Qiu ZY, Li S, Dai M, Cui XD and Deng M. 2024. Geochemical characteristics of Triassic granites in the Songpan-Ganzi orogenic belt and its implication for lithium mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 40(12): 3876-3890 (in Chinese with English abstract)
- Rao C, Wang RC, Yang YQ, Hatert F, Xia QK, Yue XG and Wang WMY. 2017. Insights into post-magmatic metasomatism and Li circulation in granitic systems from phosphate minerals of the Nanping No. 31 pegmatite (SE China). *Ore Geology Reviews*, 91: 864-876
- Reid A, Wilson CJL, Shun L, Pearson N and Belousova E. 2007. Mesozoic plutons of the Yidun Arc, SW China: U/Pb geochronology and Hf isotopic signature. *Ore Geology Reviews*, 31(1-4): 88-106
- Reimann C, Fabian K, Birke M, Filzmoser P, Demetriades A, Négrel P, Oorts K, Matschullat J, De Caritat P and The GEMAS Project Team. 2018. GEMAS: Establishing geochemical background and threshold for 53 chemical elements in European agricultural soil. *Applied Geochemistry*, 88: 302-318
- Roda E, Keller P, Pesquera A and Fontan F. 2007. Micas of the muscovite-lepidolite series from Karibib pegmatites, Namibia. *Mineralogical Magazine*, 71(1): 41-62
- Roger F, Arnaud N, Gilder S, Tapponnier P, Jolivet M, Brunel M, Malavieille J, Xu ZQ and Yang JS. 2003. Geochronological and geochemical constraints on Mesozoic suturing in east central Tibet. *Tectonics*, 22(4): 1037
- Romer RL, Meixner A and Förster HJ. 2014. Lithium and boron in late-orogenic granites-Isotopic fingerprints for the source of crustal melts? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 131: 98-114
- Sha XB. 2018. Mineralization types and elemental composition characteristics of the rare metal field in western Sichuan Jiajika. Master Degree Thesis. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract)
- Shi CY and Wang CF. 1995. Regional geochemical secondary negative anomalies and their significance. *Journal of Geochemical Exploration*, 55(1-3): 11-23
- Shi CY, Zhang JH and Huang XM. 1996. Regional geological-geochemical anomaly structural model of the Zijinshan continental volcanic copper-gold orefield. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 20(3): 180-188 (in Chinese with English abstract)
- Shi CY, Liang M and Feng B. 2016. Average background values of 39 chemical elements in stream sediments of China. *Earth Science*, 41(2): 234-251 (in Chinese with English abstract)
- Shu LS, Zhu WB and Xu ZQ. 2021. Geological settings and metallogenic conditions of the granite-type lithium ore deposits in South China. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 3099-3114 (in Chinese with English abstract)
- Smith DB, Cannon WF, Woodruff LG, Solano F, Kilburn JE and Fey DL. 2013. Geochemical and mineralogical data for soils of the conterminous United States. Reston, VA: U.S. Geological Survey
- Su R, Lin YJ, Huang WH, Jowitt SM and Putzolu F. 2025. Machine learning uncovers provenance of source rocks for volcano-sedimentary lithium mineralization in South China. *Ore Geology Reviews*, 186: 106808
- Sun WL, Liu Y and Zhang ZW. 2022. Research progress on petrogenesis of LCT-type granitic pegmatite and lithium enrichment mechanism. *Northwestern Geology*, 55(2): 35-55 (in Chinese with English abstract)
- Tan H, Fei GC, Cai YH, Zhu HP, Luo XL, Hui ZQ, Yuan YW, Li TR and Yun H. 2023. Geochemical characteristics and significance of pegmatites in the middle and south belts of the Dangba rare-metal deposit in Ke'erlyn orefield, Sichuan Province. *Mineralogy and Petrology*, 43(1): 61-72 (in Chinese with English abstract)
- Tan HQ, Zhu ZM, Zhou X and Hu JL. 2022. Two periods rare metal mineralization of the pegmatite in Jiulong Area, Western Sichuan. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, (1): 15-24 (in Chinese with English abstract)
- Tang Y, Zhao JY, Zhang H, Cai DW, Lv ZH, Liu YL and Zhang X. 2017. Precise columbite-(Fe) and zircon U-Pb dating of the Nanping No. 31 pegmatite vein in northeastern Cathaysia Block, SE China. *Ore Geology Reviews*, 83: 300-311
- Troch J, Huber C and Bachmann O. 2022. The physical and chemical evolution of magmatic fluids in near-solidus silicic magma reservoirs: Implications for the formation of pegmatites. *American Mineralogist*, 107(2): 190-205
- Wang DH, Li PG, Qu WJ, Yin LJ, Zhao Z, Lei ZY and Wen SF. 2013. Discovery and preliminary study of the high tungsten and lithium contents in the Dazhuyuan bauxite deposit, Guizhou, China. *Science China (Earth Sciences)*, 56(1): 145-152
- Wang DH, Dai HZ, Liu SB, Li JK, Wang CH, Lou DB, Yang YQ and Li P. 2022. New progress and trend in ten aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China in the past decade. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 743-764 (in Chinese with English abstract)
- Wang DH, Dai HZ, Liu SB, Wang CH, Li JK, Li P, Chen ZH, Yu Y, Qin JH, Sun Y, Lou DB and Yao FJ. 2024. The "multi-cycle, deep circulation, integration of internal and external" theory of lithium deposits and its prospecting applications in China. *Acta Geologica Sinica*, 98(3): 889-897 (in Chinese with English abstract)
- Wang GG, Zheng FB, Ni P, Wu YW, Qi WX and Li ZA. 2023. Fluid properties and ore-forming process of the giant Jiajika pegmatite Li deposit, western China. *Ore Geology Reviews*, 160: 105613
- Wang H, Huang L, Bai HY, Wang KY, Wang ZH, Gao H, Zhou JS, Qin Y and Wang Y. 2022. Types, distribution, development and utilization of lithium mineral resources in China: Review and perspective. *Geotectonica et Metallogenia*, 46(5): 848-866 (in Chinese with English abstract)
- Wang XQ, Shen WJ, Zhang BM, Nie LS, Chi QH and Xu SF. 2007. Relationship of geochemical blocks and ore districts: Examples from Eastern Tianshan metallogenic belt, Xinjiang, China. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 116-123 (in Chinese with English abstract)
- Wang XQ, Liu HL, Wang W, Zhou J, Zhang BM and Xu SF. 2020. Geochemical abundance and spatial distribution of lithium in China: Implications for potential prospects. *Acta Geoscientia Sinica*, 41(6): 797-806 (in Chinese with English abstract)

- Wang XY, Li J, Ling KY, Fu W, Zhang QZ, Yang ZQ and Wu XK. 2021. Temporal spatial distribution of lithium in soils and drainage sediments and ore-prospecting significance in Guangxi. *Journal of Guilin University of Technology*, 41 (1): 27-33 (in Chinese with English abstract)
- Wang YP. 2024. The occurrence forms and enrichment mechanisms of lithium in Carbonate-hosted clay-type lithium deposit in the Yunnan-Guizhou region, China. Master Degree Thesis. Qinghai: Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract)
- Wen CH, Chen JF, Luo XY and Li SM. 2016. Geochemical features of the chuanziyuan rare metal pegmatite in northeastern Hunan, China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35 (1): 171-177 (in Chinese with English abstract)
- Wen HJ, Luo CG, Du SJ, Yu WX, Gu HN, Ling KY, Cui Y, Li Y and Yang JH. 2020. Carbonate-hosted clay-type lithium deposit and its prospecting significance. *Chinese Science Bulletin*, 65 (1): 53-59 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Guo CL, Hu FY, Liu XC, Zhao JX, Li XF and Qin KZ. 2023. Petrogenesis of the highly fractionated granites and their mineralizations in Nanling Range, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 39 (1): 1-36 (in Chinese with English abstract)
- Xiao RQ, Zhao C, Fu XF, Hao XF, Yuan LP, Pan M, Tang Y and Wang W. 2018. A geological-geochemical prospecting model of the Jiajika lithium deposit in Garze, Sichuan. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 42 (6): 1156-1165 (in Chinese with English abstract)
- Xu YF, Qin YL and Wang XF. 2016. Petrogeochemical anomalies and prospecting for the Jiajika rare-metal granitic pegmatite deposit. *Acta Geologica Sichuan*, 36 (1): 139-143 (in Chinese with English abstract)
- Xu YF, Wang XF, Hu CY, Qin YL and Zhou XM. 2018. Prospecting potential of rare metal and 1: 50000 stream sediment geochemical characteristics in Jiajika area in Sichuan Province. *Metal Mine*, (2): 121-130 (in Chinese with English abstract)
- Xu Z, Zhang Y, Pan JY, Zhang FR, Lou FS, Peng LL, Zhou Y and He B. 2023. Petrogeochemical and geochronological characteristics of Hailuoling granite-type niobium-tantalum deposit in Shicheng, Jiangxi Province and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 97 (6): 1874-1899 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Fu XF, Wang RC, Li GW, Zheng YL, Zhao ZB and Lian DY. 2020. Generation of lithium-bearing pegmatite deposits within the Songpan-Ganze orogenic belt, East Tibet. *Lithos*, 354-355: 105281
- Xu ZQ, Zhu WB, Zheng BH, Li GW, Wei HZ, Zhang RQ, Che XD, Li WQ, Wang GG, Gao JG and Yan HY. 2023. New ore-controlling theory of "multilayered domal granitic sheets" of the Jiajika pegmatite-type lithium deposit: The major discoveries of the "Jiajika Pegmatite-type Lithium Deposit Scientific Drilling Project (JSD)". *Acta Geologica Sinica*, 97 (10): 3133-3146 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Zhu WB, Zheng BH, Li GW, Wei HZ, Gao JG, Shu LS, Zhang RQ, Che XD, Wang GG, Li WQ, Wei GY, Peng HT and Huang Y. 2024. Completion of the scientific drilling for the pegmatitic lithium deposit in western Sichuan: A project to investigate the metallogenic mechanism of the pegmatitic type lithium deposit. *Acta Geologica Sinica*, 98 (10): 3169-3171 (in Chinese with English abstract)
- Yan MC, Chi QH, Gu TX, Wang CS. 1997. Chemical compositions of continental crust and rocks in eastern China. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 21 (6): 451-459 (in Chinese with English abstract)
- Yang RD, Cheng W, Gao JB, Chen J, Tao ZP, Wei HR, Shen ML and Li SB. 2017. U, Li, Nb and V element enrichment of coal seams and potential resource evaluation in Southwest Guizhou. *Guizhou Geology*, 34 (2): 77-81, 96 (in Chinese with English abstract)
- Yin WQ, Liu CZ and Dong J. 2023. Geological characteristics and prospecting model of granite type lithium deposits in Ganfang ore field, Yichun City of Jiangxi. *Mineral Resources and Geology*, 37 (6): 1191-1202 (in Chinese with English abstract)
- Yu F, Wang DH, Yu Y, Liu Z, Gao JQ, Zhong JA and Qin Y. 2019. The distribution and exploration status of domestic and foreign sedimentary-type lithium deposits. *Rock and Mineral Analysis*, 38 (3): 354-364 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JH, Yan Z, Fu Y, Wang DH, Chen H, Xiang ZJ, Fu CL and Xue CD. 2025. Sedimentary environments and mechanisms of lithium enrichment in claystone of the Lower Permian Liangshan Formation in the Liuzhi area, western Guizhou Province, SW China. *Acta Petrologica Sinica*, 41 (7): 2260-2278 (in Chinese with English abstract)
- Zhang QD, Jiang SY, Wang W and Ge W. 2024. Current status and prospect of researches on sediment-hosted Li deposits in bauxite formations and coal-bearing strata in China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 43 (1): 90-101 (in Chinese with English abstract)
- Zhang RZ and Zuo RG. 2025. Comparison of the geochemical characteristics of highly fractionated granites in South China and the Himalaya. *Acta Petrologica Sinica*, 41 (4): 1424-1441 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZZ, Pan ZS and Che D. 2024. Analysis of lithium supply and demand situation based on lithium deposits and resources characteristics from 2024 to 2035, China. *China Mining Magazine*, 33 (6): 26-44 (in Chinese with English abstract)
- Zhong HR, Sun Y, Yang YQ, Wang DH, Huang F and Zhao Z. 2019. Bauxite (aluminum)-type lithium resources and analysis of its development and utilization potential. *Mineral Deposits*, 38 (4): 898-916 (in Chinese with English abstract)
- Zhou JT, Wang XY, Li ZM and Long W. 2012. Geological characteristics and metallogenic mechanism of the Toupai granitic pegmatite type spodumene deposit in Guangchang County, Jiangxi Province. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science)*, 35 (4): 378-387 (in Chinese with English abstract)
- Zhu JC, Zhang PH, Rao B, Li FC and Xiong XL. 2002. Anatomy and inspiration of Yichun rare metal granite and Keketuohai rare metal pegmatite. *Mineral Deposits*, 21 (Suppl. 1): 841-844 (in Chinese)

附中文参考文献

- 陈燃, 魏洪刚, 姚丹. 2024. 松潘-甘孜造山带东南缘打枪沟伟晶岩地球化学特征及其地质意义. *西部探矿工程*, 36 (4): 72-77
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红, 黄凡. 2022. 八论矿床的成矿系列. *地质学报*, 96 (1): 123-130
- 程志中, 谢学锦, 潘含江, 杨榕, 商云海. 2011. 中国南方地区水系沉积物中元素丰度. *地学前缘*, 18 (5): 289-295
- 崔斌, 温汉捷, 于文修, 罗重光, 杜胜江, 凌坤跃, 徐飞, 杨季华. 2022. 滇中下二叠统倒石头组富锂黏土岩系锂的赋存状态及富集机制研究. *岩石学报*, 38 (7): 2080-2094
- 邓洁, 凌坤跃, 赵浩男, 温汉捷. 2025. 黏土型锂矿锂元素赋存状态微区原位分析方法. *矿物学报*, 45 (3): 525-531
- 杜文洋, 李一鸣, 周豹, 范川, 曾小华, 刘嘉, 刘圣鑫, 刘雷, 刘文文, 魏四华, 江为民, 姜志勇. 2022. 鄂西南地区黏土型锂矿化特征及找矿前景浅析. *资源环境与工程*, 36 (5): 562-571
- 付小方, 黄韬, 邹付戈, 梁斌, 郝雪峰, 杨荣, 潘熤, 唐屹. 2021. 甲基卡式锂矿田控矿作用与深部找矿方向. *地质学报*, 95 (3): 791-808
- 龚晶晶, 李方林, 张爽, 崔放. 2015. 基于元素组合特征的相似性系数法圈定异常——以南岭地区为例. *地质与勘探*, 51 (2): 312-322
- 公维国, 李向文, 魏海峰, 魏小勇, 聂春雨. 2013. 黑龙江十五里桥金矿区土壤地球化学特征及找矿方向. *黄金*, 34 (4): 19-24

- 宫以栋, 桂林, 吴延海, 廖芝华, 唐瑞. 2023. 四川金川县业隆沟锂矿区地球化学特征. 四川地质学报, 43(3): 528-536
- 郭春丽, 张斌武, 郑义, 许箭琪, 赵迁迁, 闫金禹, 周睿, 符伟, 黄可. 2024. 中国花岗岩型锂矿床:重要特征、成矿条件及形成机制. 岩石学报, 40(2): 347-403
- 侯江龙, 李建康, 王登红, 陈振宇, 代鸿章, 刘丽君. 2017. 四川甲基卡锂矿区花岗岩体中黑云母的地球化学特征及其地质意义. 黄金科学技术, 25(6): 1-8
- 孔会磊, 李文渊, 任广利, 李侃, 王志华, 赵辛敏, 张江伟, 彭素霞. 2023. 伟晶岩型锂矿床研究现状及其在中国西部的找矿前景. 西北地质, 56(1): 11-30
- 雷志远, 王登红, 李沛刚, 翁申富. 2012. 务川大竹园铝土矿床微量元素地球化学特征分析. 贵州地质, 29(4): 249-258
- 李建康, 刘善宝, 王登红, 付小方. 2007. 川西北雪宝顶钨锡铍矿床的成矿年代及其构造示踪意义. 矿床地质, 26(5): 557-562
- 李建康, 刘喜方, 王登红. 2014. 中国锂矿成矿规律概要. 地质学报, 88(12): 2269-2283
- 李乐广, 王连训, 田洋, 马昌前, 周芳春. 2019. 华南幕阜山花岗岩伟晶岩的矿物化学特征及指示意义. 地球科学, 44(7): 2532-2560
- 李明, 代鸿章, 丁晓平, 朱海洋, 王学, 杨天雨. 2024. 川西观音桥地区土壤地球化学特征及锂矿找矿方向. 矿产勘查, 15(8): 1456-1465
- 李胜虎. 2015. 华南典型花岗岩型稀有金属矿床的成矿机制与找矿模式研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学
- 李晓峰, 韦星林, 朱艺婷, 李祖福, 邓宣驰. 2021. 华南稀有金属矿床:类型、特点、时空分布与背景. 岩石学报, 37(12): 3591-3614
- 刘涛. 2022. 四川甲基卡与新疆卡鲁安硬岩型锂矿床成矿机制对比研究. 硕士学位论文. 抚州: 东华理工大学
- 楼法生, 徐喆, 黄贺, 熊燕云, 楼法生, 徐喆, 黄贺, 熊燕云. 2023. 江西低品位超大型花岗岩云母型锂矿地质特征及找矿意义. 东华理工大学学报(自然科学版), 46(5): 425-436
- 罗伟, 李佑国, 罗开杰, 岳相元, 唐爽, 杨波. 2018. 川西可尔因地区1:5万水系沉积物测量异常评价及找矿预测. 科学技术与工程, 18(9): 56-62
- 罗伟, 杨波, 古城会, 李剑, 庞良武. 2021. 川西金川县李家沟超大型锂辉石矿床的地质特征及找矿标志. 四川有色金属, (2): 16-18+21
- 马圣钞, 王登红, 孙艳, 李超, 钟海仁. 2019. 我国西南部 T_1/T_2 粘土岩地质年代学、地球化学特征及其对粘土型锂矿的找矿意义. 地球科学, 44(2): 427-440
- 聂晓亮, 王水龙, 刘爽, 徐林. 2022. 江西茜坑锂矿床地质地球化学特征与锂云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学研究. 矿物学报, 42(3): 285-294
- 庞博, 古城会, 李良波, 罗伟, 李剑. 2015. 四川省马尔康党坝锂辉石矿床地质特征及成因研究. 四川有色金属, (4): 31-34
- 乔宇, 王学求, 韩志轩, 刘福田, 严桃桃, 王强, 吴慧. 2023. 中国西南滇黔桂关键资源远景新区锂地球化学时空分布特征及找矿预测. 地质学报, 97(6): 1828-1847
- 秦乐. 2020. 四川省金川县观音桥锂辉石矿床地质特征及成矿地质条件分析. 硕士学位论文. 成都: 成都理工大学
- 邱志毅, 李舫, 戴梦, 崔祥蝶, 邓敏. 2024. 松潘-甘孜造山带三叠纪花岗岩地球化学特征及其对锂的成矿意义. 岩石学报, 40(12): 3876-3890
- 沙小保. 2018. 川西甲基卡稀有金属矿田矿化类型及元素组合特征研究. 硕士学位论文. 成都: 成都理工大学
- 史长义, 张金华, 黄笑梅. 1996. 福建紫金山陆相火山岩型 Cu-Au 矿田区域地质地球化学异常结构模式. 物探与化探, 20(3): 180-188
- 史长义, 梁萌, 冯斌. 2016. 中国水系沉积物 39 种元素系列背景值. 地球科学, 41(2): 234-251
- 舒良树, 朱文斌, 许志琴. 2021. 华南花岗岩型锂矿地质背景与成矿条件. 地质学报, 95(10): 3099-3114
- 孙文礼, 刘益, 张照伟. 2022. LCT 型花岗岩伟晶岩岩石成因和锂富集机制研究进展. 西北地质, 55(2): 35-55
- 谭洪旗, 朱志敏, 周雄, 胡军亮. 2022. 川西九龙地区两期伟晶岩型稀有金属成矿作用. 矿产综合利用, (1): 15-24
- 谭华, 费光春, 蔡云华, 朱汇派, 罗小龙, 回子奇, 袁彦伟, 李天瑞, 恽虎. 2023. 四川可尔因矿田党坝稀有金属矿床中带和南带伟晶岩地球化学特征及地质意义. 矿物岩石, 43(1): 61-72
- 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 李建康, 王成辉, 娄德波, 杨岳清, 李鹏. 2022. 中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势. 地质力学学报, 28(5): 743-764
- 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 王成辉, 李建康, 李鹏, 陈郑辉, 于扬, 秦锦华, 孙艳, 娄德波, 姚佛军. 2024. 中国锂矿的多旋回深循环内外生一体化成矿理论及其找矿应用. 地质学报, 98(3): 889-897
- 王核, 黄亮, 白洪阳, 王望宇, 王振宏, 高昊, 周金胜, 秦艳, 王焰. 2022. 中国锂资源的主要类型、分布和开发利用现状:评述和展望. 大地构造与成矿学, 46(5): 848-866
- 王新宇, 李杰, 凌坤跃, 付伟, 张起钻, 杨志强, 吴祥珂. 2021. 广西土壤和水系沉积物锂元素时空分布及找矿预测. 桂林理工大学学报, 41(1): 27-33
- 王学求, 申伍军, 张必敏, 聂兰仕, 迟清华, 徐善法. 2007. 地球化学块体与大型矿集区的关系——以东天山为例. 地学前缘, 14(5): 116-123
- 王学求, 刘汉粮, 王玮, 周建, 张必敏, 徐善法. 2020. 中国锂矿地球化学背景与空间分布:远景区预测. 地球学报, 41(6): 797-806
- 王亚平. 2024. 滇黔地区碳酸盐黏土型锂矿中锂的赋存形式与富集机制. 硕士学位论文. 西宁: 中国科学院青海盐湖研究所
- 温汉捷, 罗重光, 杜胜江, 于文修, 顾汉念, 凌坤跃, 崔赓, 李阳, 杨季华. 2020. 碳酸盐黏土型锂资源的发现及意义. 科学通报, 65(1): 53-59
- 文春华, 陈剑锋, 罗小亚, 李胜苗. 2016. 湘东北梓沅源稀有金属花岗岩伟晶岩地球化学特征. 矿物岩石地球化学通报, 35(1): 171-177
- 吴福元, 郭春丽, 胡方泐, 刘小驰, 赵俊兴, 李晓峰, 秦克章. 2023. 南岭高分异花岗岩成岩与成矿. 岩石学报, 39(1): 1-36
- 肖瑞卿, 赵春, 付小方, 郝雪峰, 袁茜平, 潘蒙, 唐屹, 王伟. 2018. 四川甘孜甲基卡锂矿地质-地球化学特征和找矿标志. 物探与化

探, 42(6): 1156-1165

徐云峰, 秦宇龙, 王显锋. 2016. 四川甲基卡矿床土壤地球化学特征及找矿. 四川地质学报, 36(1): 139-143

徐云峰, 王显锋, 胡朝云, 秦宇龙, 周雪梅. 2018. 四川甲基卡地区1:5万水系沉积物地球化学特征及稀有金属找矿远景. 金属矿山, (2): 121-130

徐喆, 张勇, 潘家永, 张芳荣, 楼法生, 彭琳琳, 周渝, 贺彬. 2023. 江西石城海罗岭花岗岩型铌钽矿床岩石地球化学、年代学特征及其地质意义. 地质学报, 97(6): 1874-1899

许志琴, 朱文斌, 郑碧海, 李广伟, 魏海珍, 章荣清, 车旭东, 李伟强, 王国光, 高建国, 闫浩瑜. 2023. 川西甲基卡伟晶岩型锂矿的“多层次穹状花岗岩席”控矿新理论——记“川西甲基卡锂矿科学钻探”创新成果. 地质学报, 97(10): 3133-3146

许志琴, 朱文斌, 郑碧海, 李广伟, 魏海珍, 高建国, 舒良树, 章荣清, 车旭东, 王国光, 李伟强, 魏广祎, 彭弘韬, 黄煜. 2024. 川西伟晶岩型锂矿科学钻探工程竣工——为建立伟晶岩型锂矿成矿理论提供科学依据. 地质学报, 98(10): 3169-3171

鄯明才, 迟清华, 顾铁新, 王春书. 1997. 中国东部地壳元素丰度与岩石平均化学组成研究. 物探与化探, 21(6): 451-459

杨瑞东, 程伟, 高军波, 陈军, 陶振鹏, 魏怀瑞, 沈明联, 李士彬. 2017. 黔西南煤层中铌、铀、钒和锂元素富集与潜在资源评价. 贵州地质, 34(2): 77-81, 96

尹维青, 刘成忠, 董菁. 2023. 江西宜春甘坊矿田花岗岩型锂矿床地质特征及找矿模型. 矿产与地质, 37(6): 1191-1202

于泓, 王登红, 于扬, 刘铸, 高娟琴, 仲佳爱, 秦燕. 2019. 国内外主要沉积型锂矿分布及勘查开发现状. 岩矿测试, 38(3): 354-364

张佳慧, 闫臻, 付勇, 王登红, 陈慧, 向忠金, 付长垒, 薛传东. 2025. 黔西六枝地区梁山组沉积环境与锂在黏土岩中的富集机制. 岩石学报, 41(7): 2260-2278

张七道, 蒋少涌, 王微, 葛文. 2024. 铝土岩系和煤系地层中沉积黏土型锂矿床: 研究现状与展望. 矿物岩石地球化学通报, 43(1): 90-101

张睿泽, 左仁广. 2025. 华南和喜马拉雅高分异花岗岩地球化学特征对比分析. 岩石学报, 41(4): 1424-1441

张照志, 潘昭帅, 车东. 2024. 基于中国锂矿床及资源特征的2024-2035年锂供需形势分析. 中国矿业, 33(6): 26-44

钟海仁, 孙艳, 杨岳清, 王登红, 黄凡, 赵芝. 2019. 铝土矿(岩)型锂资源及其开发利用潜力. 矿床地质, 38(4): 898-916

周建廷, 王小颖, 李自敏, 龙悟. 2012. 江西省广昌县头陂花岗伟晶岩型锂辉石矿矿床地质特征及其成矿机制探讨. 东华理工大学学报(自然科学版), 35(4): 378-387

朱金初, 张佩华, 饶冰, 李福春, 熊小林. 2002. 宜春稀有矿化花岗岩与可可托海稀有矿化伟晶岩的异同剖析和启迪. 矿床地质, 21(增1): 841-844