

# 安徽旌德热液蚀变黏土型锂矿成矿过程：黏土矿物的矿物学和年代学制约

赵琪琪<sup>1,2</sup>, 谢卓君<sup>1\*</sup>, 肖景丹<sup>1</sup>, 陶耐<sup>3</sup>, 任廷仙<sup>1</sup>, 夏勇<sup>1</sup>, 王泽鹏<sup>4</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所, 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵州 贵阳 550081
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049
3. 安徽省勘查技术院(安徽省地质矿产勘查局能源勘查中心), 安徽 合肥 230000
4. 贵州省地质矿产勘查开发局一〇五地质大队, 贵州 贵阳 550018

**摘要:** 全球的锂矿主要包括硬岩型、卤水型和黏土型, 其中, 黏土型锂矿主要由风化或风化淋滤作用而形成的。近期在安徽旌德县发现一黏土型锂矿, 为热液蚀变黏土型锂矿, 其成矿过程尚不清楚。本次通过野外调查、主微量元素、LA-ICP-MS 原位微量元素及伊利石 LA-ICP-MS 原位 Rb-Sr 定年等分析, 对旌德锂矿的成矿作用过程和形成时代进行研究。结果显示, 矿石中主要矿物为: 石英、萤石、高岭石、伊利石、绿泥石等, 黏土矿物与萤石、石英密切共生。Li 主要赋存在高岭石和伊利石中, 其中高岭石和伊利石中 Li 含量分别为 6644-8265 ppm 和 5131-7034 ppm。高岭石 LA-ICP-MS 激光剥蚀信号图中无异常 Li 峰值, Li+Al 含量与 Si 含量呈负相关。表明 Li 主要以结构态赋存在高岭石和伊利石中。富 Li 伊利石原位 Rb-Sr 定年结果为  $84.7 \pm 5.3$  Ma, 代表 Li 的成矿时间。旌德锂矿成矿过程为: 晚白垩世 ( $84.7 \pm 5.3$  Ma), 太平洋板块向华南板块俯冲, 形成高分异花岗岩, 释放富 Li、F 等偏酸性成矿流体。在旌德地区, 流体进入北西和北东向断裂, 与花岗闪长岩等发生水-岩反应, 长石、角闪石、黑云母等矿物分解, 形成高岭石、伊利石等黏土矿物和萤石, Li 进入高岭石和伊利石中。本研究为旌德热液蚀变黏土型锂矿床的形成提供了成矿时间约束, 揭示了萤石矿与热液蚀变黏土型锂矿的成因联系, 未来有望在萤石矿区实现锂矿的找矿突破。

**关键词:** 热液蚀变黏土型锂矿、锂矿、热液蚀变、伊利石定年、成矿过程

中图分类号: P611

收稿日期: 2025-12-25

## The Metallogenic Process of Hydrothermal Alteration Clay-type Lithium Ore in Jingde, Anhui Province: Constraints of Clay Minerals Mineralogy and Chronology

基金项目: 本文受中国科学院先导专项 (XDA0430103) 和中国科学院青年创新促进会会员项目 (2022402) 联合资助

作者简介: 赵琪琪 (2001-), 女, 硕士研究生在读, 资源与环境专业, E-mail: zhaqiqi@mail.gyig.ac.cn, ORCID:0009-0003-1797-4119

通讯作者: 谢卓君 (1987-), 男, 研究员, 主要从事热液矿床研究, E-mail: xiezhuojun@mail.gyig.ac.cn.

Zhao Qiqi<sup>1,2</sup>, Xie Zhuojun<sup>1\*</sup>, Xiao Jingdan<sup>1</sup>, Tao Nai<sup>3</sup>, Ren Tingxian<sup>1</sup>, Xia Yong<sup>1</sup>,  
Wang Zepeng<sup>4</sup>

1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, National Key Laboratory of Critical Mineral Metasomatism and Prediction, Guiyang 550081, Guizhou, China
2. School of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Anhui Exploration Technology Institute (Energy Exploration Center of Anhui Bureau of Geology and Mineral Resources), Hefei 230000, Anhui, China
4. Geological and Mineral Exploration and Development Bureau of Guizhou Province, 105 Geological Team, Guiyang 550018, China

**Abstract:** Global lithium deposits are primarily categorized into hard rock-type, brine-type, and clay-type, with the latter predominantly formed by weathering or leaching. A recent discovery in Jingde County, Anhui Province, revealed a hydrothermally altered clay-type lithium deposit, expanding the understanding of clay-type lithium mineralization. But the metallogenic process is not yet clear. This study aims to explore the metallogenic process and formation age of the Jingde lithium deposit through field surveys, major and trace element analyses, LA-ICP-MS in situ trace elements, and illite LA-ICP-MS in situ Rb-Sr dating. The findings indicate that the primary minerals in the ore include quartz, fluorite, kaolinite, illite, chlorite, and others, with clay minerals closely associated with fluorite and quartz. The lithium is predominantly hosted in kaolinite and illite with the content ranges from 6644-8265ppm and 5131-7034 ppm. The LA-ICP-MS signal map of kaolinite does not show any abnormal lithium peaks. Furthermore, a negative correlation is observed between the Li+Al content and the Si content, suggesting that lithium is mainly incorporated into the crystal structure of kaolinite and illite. The in situ Rb-Sr dating of Li-rich illite yields an age of  $84.7\pm 5.3$  Ma, which corresponds to the metallogenic timing of lithium in this deposit. The metallogenic process of the Jingde lithium deposit is as follows: during the Late Cretaceous ( $84.7\pm 5.3$  Ma), the Pacific Plate subducted beneath the South China Plate. This led to the formation of highly differentiated granites that released Li- and F-rich acidic metallogenic fluids. These fluids infiltrated northwest- and northeast-trending faults in the Jingde region, undergoing hydrothermal alteration with granite and diorite. This process caused the breakdown of minerals such as feldspar, hornblende, and biotite, which contributed to the formation of clay minerals like kaolinite and illite, as well as fluorite. And lithium was incorporated into the structures of kaolinite and illite simultaneously. This study

provides a crucial metallogenic age constraint for the formation of the Jingde hydrothermally altered clay-type lithium deposit and elucidates the genetic relationship between fluorite deposits and hydrothermally altered clay-type lithium deposits. It is anticipated that further breakthroughs in lithium prospecting could be achieved in fluorite-rich mining areas in the future.

**Keywords:** hydrothermally altered clay-type lithium deposits, lithium deposits, hydrothermal alteration, illite dating, mineralization process

## 1.引言

锂是新能源和储能领域(如:电动汽车)、可控核聚变“人造太阳”的重要原材料,在国家能源转型以及实现“双碳”目标中有着重要地位(杜晓飞等,2025)。全球锂资源分布高度不均一,目前约73%的锂资源分布在北美洲和南美洲(王核等,2022a)。我国锂矿资源主要集中在新疆、青海、西藏、四川、江西和云南等地,锂资源总量占世界总资源量的10.41%,位于世界第五(王核等,2022a)。但受开采条件和技术等的影响,目前我国许多锂资源无法转化为储量投入使用。因此,寻找新的锂矿是一项迫在眉睫的重要任务。2021年,我国自然资源部将锂纳入“战略性矿产找矿行动(2021—2035年)”主攻矿种。2025年,工业和信息化部等八部门也强调加强矿产资源勘查与利用,锂是重点的对象之一。

全球的锂矿床类型包括硬岩型、卤水型和黏土型三大类(刘雪等,2024)。其中,硬岩型锂矿可进一步细分为伟晶岩型、花岗岩型及隐爆角砾岩型(王核等,2022b)。卤水型锂矿主要包括盐湖型与地下卤水型两种亚类(刘雪等,2024)。当前正在开发的锂矿中,盐湖型与伟晶岩型占据主导地位(王核等,2022b)。黏土型锂矿是近年来才发现并逐渐受到重视的新类型(温汉捷等,2020)。根据其成因,该类锂矿主要包括火山岩黏土型、碳酸盐黏土型以及高岭土风化型三类(Xie et al., 2024)。与传统硬岩型和卤水型锂矿相比,黏土型锂矿通常分布广、规模大且埋藏较浅(任文恺等,2025),因而开采成本低,一旦投入生产,将能快速实现锂资源向工业级锂产品的有效转化。

目前我国的黏土型锂矿以碳酸盐黏土型为主,主要分布在广西、云南、贵州等地,一般与风化壳型铝土矿共生,Li主要赋存在锂蒙脱石中(温汉捷等,2020;张七道

等, 2024)。最近, 在安徽省南部旌德县旌德岩体中发现一黏土型锂矿, 该锂矿在构造背景、成矿作用特征等方面区别于已有黏土型锂矿(郭唯明等, 2019; 温汉捷等, 2020), 表现为: 锂成矿作用发生在中-酸性岩体侵入之后, 围岩和赋矿岩体为燕山期花岗闪长岩; 矿(化)体赋存于构造破碎带内; 岩体本身并不富集 Li; 矿石中矿物组合为石英、黏土矿物、萤石等, 其中 Li 主要赋存在由热液蚀变所形成的黏土矿物中。前人根据其成矿特征, 定名为侵入岩热液蚀变黏土型锂矿(陶耐等, 2024)。目前的勘探表明旌德锂矿成矿潜力较大。但由于该类型锂矿是近些年才发现的, Li 的赋存特征、成矿时代和成矿流体特征等还很不清楚, 严重制约了对该类型锂矿形成机制的正确认识及其找矿部署。

本研究通过对旌德锂矿开展详实的野外调查、主微量元素分析、微区分析、伊利石 LA-ICP-MS 原位 Rb-Sr 定年等研究, 确定了 Li 的赋存矿物及其形成过程, 揭示了 Li 的成矿时代及与区域上构造-岩浆热液事件的关系, 并初步建立其成矿模式。本研究为侵入岩热液蚀变黏土型锂矿提供了关键的成矿时间约束, 为区域上该类型锂矿床的找矿提供了找矿新思路。

## 2. 区域地质背景

安徽南部地区处于多个构造单元交汇处, 在大地构造位置上位于扬子板块东北部, 江南元古代造山带北东端与浙西冲断褶皱带的构造交汇区, 横跨下扬子前陆凹陷带、江南造山带及皖浙褶断带(图 1; 马良等, 2024)。同时, 安徽南部与浙江西北部、江西北部共同构成钦杭结合带(QHMB)(毛景文等, 2011)。该带是扬子板块与华夏古板块在新元古代碰撞拼合形成的巨型构造带, 是中国东部重要的 Cu-Pb-Zn-Au-Ag-W-Mn 等多金属成矿带之一(王世伟等, 2025)。

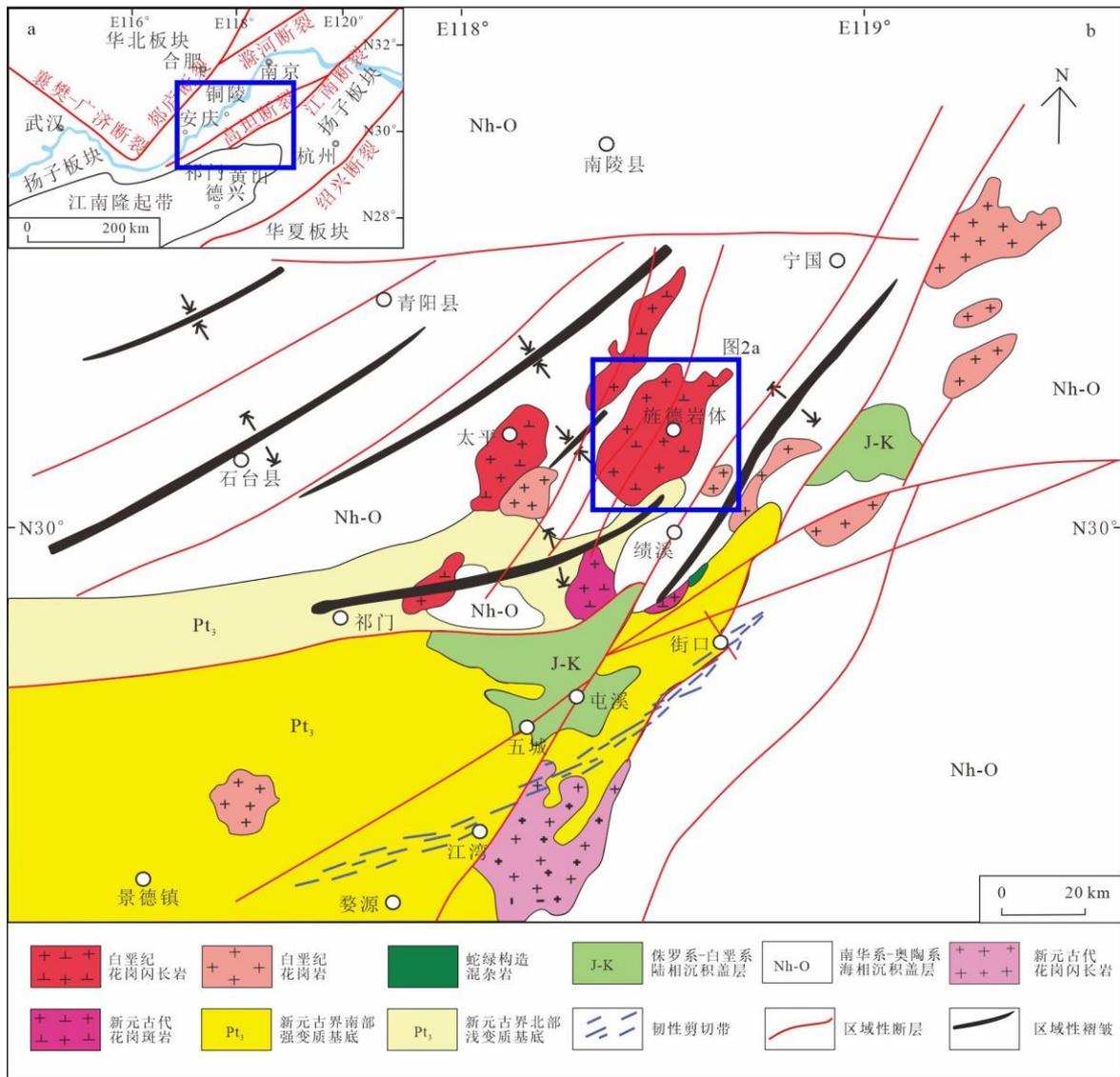


图1 皖南地区大地位置及构造纲要图（据胡军等，2018；郭泳杰等，2022 改）

a 皖南大地构造位置图；b 皖南地区构造纲要图。其中，新元古界南、北基底分界为歙县—祁门断裂带 F3，南侧在加里东期挤压变形环境下形成的一套中高绿片岩相的中等变质岩系，北侧变形环境较弱，变形程度不高，为一套浅变质岩系（胡军等，2018）。

Fig.1 Geographical location and tectonic outline of Southern Anhui region

安徽南部地区出露的地层主要为新元古界南华系至早古生界奥陶系以及中生界侏罗系到白垩系地层（郭泳杰等，2022）。其中，南华系—奥陶系为海相沉积盖层，侏罗系-白垩系为陆相沉积盖层（郭泳杰等，2022）。其中海相沉积盖层以休宁组、蓝田组、皮园村组、宁国组地层为主，岩性主要为砂岩、页岩、粉砂岩等为主，分选磨圆程度好，而陆相沉积盖层则以砂岩、砾岩以及砂砾岩为主，分选磨圆较差（叶龙翔，2023）。

安徽南部地区地质构造演化复杂,先后经历了晋宁、加里东、海西、印支、燕山及喜马拉雅期的构造运动(丁希国等,2018)。多期次的构造运动形成区内强度不同、方向各异的褶皱构造,其中印支早期北东向褶皱为区内最重要的一期褶皱,形成了现今的基本构造格局(丁希国等,2018;杨金龙等,2023)。主要的褶皱有绩溪—宁国墩复背斜、绩溪—宁国墩复背斜的次级褶皱唐川向斜、皇墓背斜等(杨金龙等,2023)。区内断裂发育,主要呈北东、北西向和近南北向分布。北东向为主干断裂,形成于加里东—印支期—燕山早、中期;北西向和近南北向断裂形成于燕山晚期。(丁希国等,2018;杨金龙等,2023)。

区域岩浆活动主要发生在晋宁期和燕山期,形成了20余个花岗岩类岩体(图1;丁希国等,2018)。晋宁期花岗岩主要分布于宣城地区东南部,为英云闪长岩和花岗闪长岩(李伟等,2019)。燕山中、晚期岩浆岩分布广泛,主要为二长花岗岩、花岗闪长岩、闪长玢岩等,多呈岩基状产出,受近东西向和北东向断裂控制。代表性岩体包括伏岭、旌德、榔桥、庙西、仙霞、刘村、姚村等复式岩体,另外还有一系列以岩株状产出(丁宁等,2023)。

区域上发育大量与岩浆活动相关的矿产,主要有钨、锡、钼、铜、金、银等金属矿以及萤石等非金属矿。其中,晋宁期岩浆活动形成的矿产以金、钨、锡为主(杨晓勇等,2010)。燕山期岩浆活动形成的矿产以钨—钼、铜—金、铅—锌—银矿以及萤石矿为主(徐晓春等,2010;李斌等,2015)。燕山晚期是皖南地区重要的萤石矿成矿期(魏国辉等,2024)。

### 3.矿区地质特征

旌德地区夹持于江南断裂带与绩溪断裂之间,具构造过渡带特征(丁希国等,2018;李伟等,2019)。该区发育多期构造—岩浆活动,以燕山期岩浆侵入活动最为强烈。旌德岩体为燕山中期岩浆侵入的产物,侵位于太平—宁国断褶带的上元古界至下元古界地层中(图2a)(陶耐等,2024)。在构造上位于东至—广德复向斜中,旌德—漳前深大断裂切过岩体。岩体内发育多条北东、北西向断裂,并发育多种脉岩,主要岩性为花岗斑岩、细粒钾长花岗岩、细晶岩和伟晶岩(图3f)。

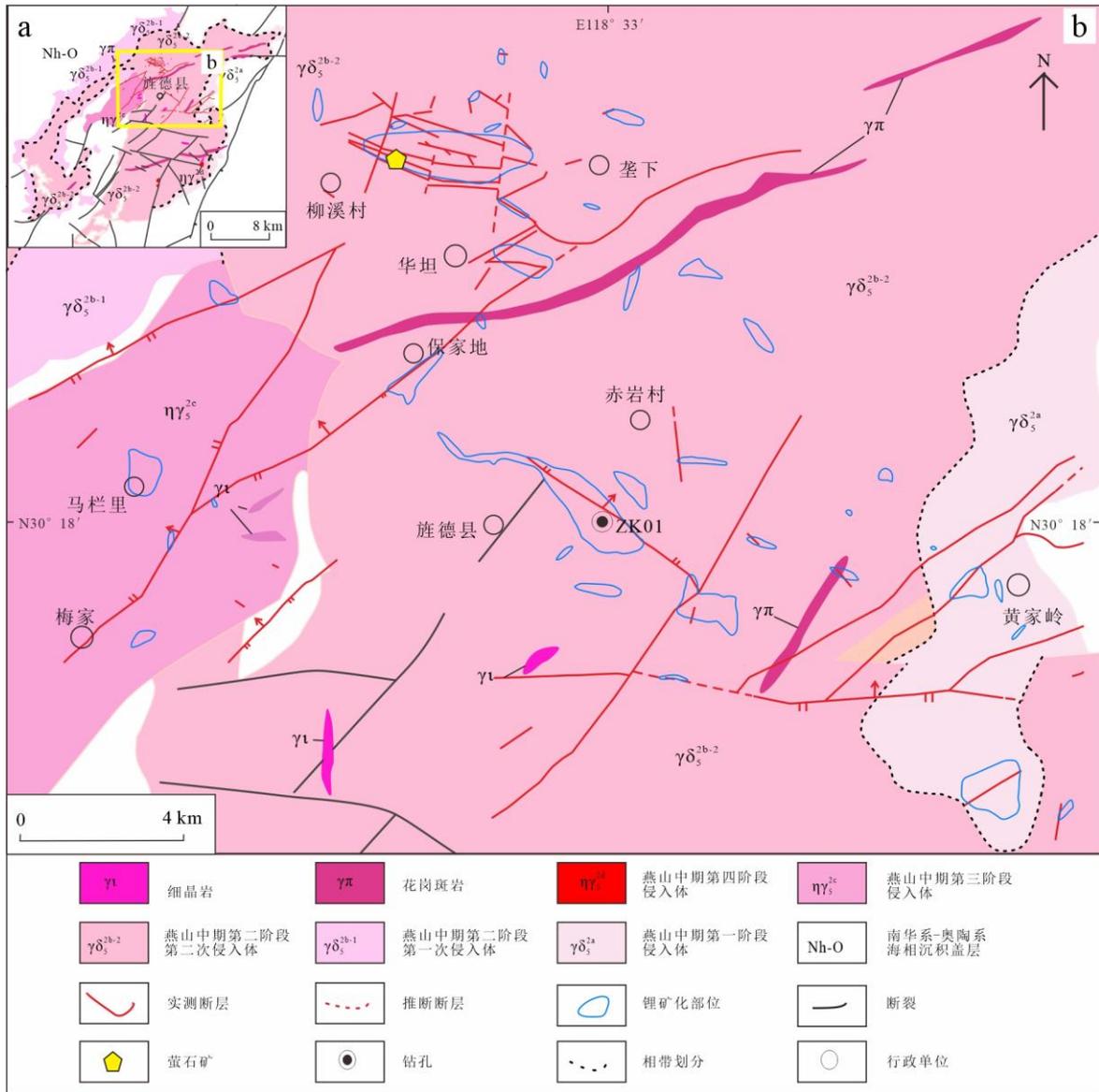


图2 旌德锂矿地质图（据陶耐等，2024改）

a 旌德岩体地质图；b 研究区地质图。

Fig.2 Geological map of Jingde lithium deposit

旌德岩体出露面积约 450 km<sup>2</sup>。岩体主要包含五期侵入体（图 2a,b），依次为燕山中期第一阶段侵入体（ $\gamma_5^{2a}$ ），岩性为细粒黑云母含斑花岗闪长岩；燕山中期第二阶段第一次侵入体（ $\gamma_5^{2b-1}$ ），岩性为中粒黑云母含斑花岗闪长岩；燕山中期第二阶段第二次侵入体（ $\gamma_5^{2b-2}$ ），岩性为粗粒黑云母含斑花岗闪长岩；燕山中期第三阶段侵入体（ $\eta_3^{2c}$ ），岩性为黑云母二长花岗岩；燕山中期第四阶段侵入体（ $\eta_4^{2d}$ ），岩性为钾长花岗岩（陶耐等，2024）。锂矿化在各期次侵入岩内均有分布，但主要分布于燕山中期第二阶段第一次和第二次侵入体内（陶耐等，2024）。



图3 锂矿化野外特征图

a 锂矿化蚀变带，宽约 2-3 m，上层风化严重被植被覆盖；b 断裂下盘锂矿化蚀变，见多条石英脉和石英-萤石脉；c 石英脉，宽约 2-3 cm，位于断裂下盘，两侧发育锂矿化；d 锂矿化表层风化呈土黄色，新鲜面呈蓝色；e 锂矿石中含石英脉，脉宽约 2-3 cm；f 破碎的细晶岩脉，宽约 30 cm，围岩为已风化的花岗闪长岩。

Fig.3 Field characteristics of lithium mineralization

矿体主要受北西和北东向断裂构造控制，赋存于构造破碎带内（图 3）。赋矿岩石主要为花岗闪长岩和钾长花岗闪长岩。新鲜花岗闪长岩呈灰白色或浅灰色，主要的矿物组成为斜长石（50%~60%）、石英（20%~25%）、钾长石（10%~15%）和黑云母（5%~10%）等。钾长花岗闪长岩呈肉红色，主要矿物为石英（20%~25%）、钾长石（30%~35%）、斜长石（25%~30%）、黑云母（5%~10%）。矿化后岩石呈蓝色或浅蓝色（图 3d,e），发育大量黏土矿物（图 4）。矿体风化后，表面多为黄色或黄褐色。矿化部位发育有大量石英-萤石脉（图 3b,c,e；图 5）。在锂矿区范围内，有一小型萤石矿床，目前正在开采中（图 2b）。

矿物名称	成矿前期	成矿期
钾长石	—————	
斜长石	—————	
角闪石	—————	
黑云母	—————	
石英	—————	—————
萤石		—————
高岭石		—————
伊利石		—————
绿泥石		—————

图 4 旌德热液蚀变黏土型锂矿矿物生成顺序图

Fig.4 Sequence diagram of mineral formation in Jindeng lithium ore with hydrothermal alteration clay

## 4.样品特征及分析方法

### 4.1 样品采集

本次研究按岩性变化、矿化蚀变重点采样的原则，共采集钻孔、萤石矿区采场和地表样品 94 个。其中钻孔样品 49 个，采自 ZK01、ZK02、ZK03 钻孔；萤石矿区采场样品 19 个，包括 13 个萤石样品和 6 个锂矿化样品；地表样品 26 个。选取 30 件典型样品进行研究，包括 24 件钻孔样品和 6 件与萤石共生矿石样品。依次进行了岩相学观察、全岩主微量元素分析、高岭石 LA-ICP-MS（激光剥蚀—电感耦合等离子体—质谱仪）原位微量元素分析，以及伊利石 LA-ICP-MS 原位 Rb-Sr 定年分析。其中，伊利石 Rb-Sr 定年实验在广州市拓岩检测技术有限公司完成，其他实验均在中国科学院地球化学研究所关键矿产成矿与预测全国重点实验室完成。

### 4.2 分析方法

#### 4.2.1 岩相学观察

主要为光学显微镜和扫描电镜分析。其中，光学显微镜仪器型号为 LeicaDM4P。

在光学显微镜观察基础上，利用场发射扫描电镜（型号 JSM-7800F）进行进一步显微观察，同时利用搭载在扫描电镜上的 X 射线能谱分析仪（EDAXApollo XL）进行成分分析，确定矿物的种类及其显微结构特征。

#### 4.2.2 全岩主、微量分析

主量元素分析所用仪器为 Thermo Fisher X 射线荧光光谱仪，型号为 ARL Perform X 4200。前处理及流程为：将样品碎至 200 目以下。加入助燃物，充分混合后放于自动熔炼仪中熔融。待熔融物重新凝固形成扁平玻璃片，再用 X 荧光光谱分析。微量元素分析所用仪器为 Plasma Quant MS Elite 型等离子体质谱仪。前处理及流程为：将样品碎至 200 目以下。取 50 mg 粉末样品、1 ml HF、1 mol HNO<sub>3</sub> 置于坩埚中，将坩埚放入钢套内密封加热进行消解。冷却后蒸干，蒸干后加入 1 ml HNO<sub>3</sub> 继续蒸干。接着加入 200 ng Rh 内标溶液、2 ml HNO<sub>3</sub>、2 ml 去离子水，置于坩埚中继续加热 5 h。冷却后摇匀并取 0.4 ml 溶液用纯水定容至 10 ml。最后用电感耦合等离子质谱仪（ICP-MS）测定。

#### 4.2.3 高岭石 LA-ICP-MS 原位微量元素分析

高岭石 LA-ICP-MS 原位微量元素分析采用的激光剥蚀系统为 GeoLasPro 193nm ArF 准分子激光器，电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）为 Agilent7900。激光剥蚀过程中采用氦气载气、氩气为补偿气，并加入少量氮气提高灵敏度。含量计算采用多外标加 Si 做内标法对元素含量进行定量计算。未参与校正的 CGSG-1 和 CGSG-2 为质量监控样。对分析数据的离线处理采用软件 ICPMSDataCal 完成。

#### 4.2.4 伊利石 LA-ICP-MS 原位 Rb-Sr 定年

伊利石 LA-ICP-MS 原位 Rb-Sr 定年分析采用的仪器为 NWR 193 nm ArF 准分子激光烧蚀系统与 iCAP TQ 00108 多重四级杆质谱仪联用。简要流程为：样品在高纯氦气环境中进行激光剥蚀，并由氩气载入 ICP-MS。为抑制干扰，实验选用氮气作为反应气体，其可选择性地与 Sr<sup>+</sup> 反应生成 SrO<sup>+</sup>，而与 Rb<sup>+</sup> 不反应。正式分析前，系统以 0.25 mL/min 的 N<sub>2</sub>O 冲洗 2 h 以确保稳定。采用 NIST SRM 610 进行校准。所有原始数据最终通过内部 Excel 宏程序进行离线处理。详细的仪器和分析条件按照 Gorojovsky 和 Alard（2019）、Wang 等（2022）中描述的方法设置。

## 5.数据结果

### 5.1 钻孔剖面特征

本研究对 ZK01、ZK02、ZK03 三个钻孔进行了详细观察和分析。赋矿岩石主要为花岗闪长岩。总体来看，矿体 ( $\text{Li}_2\text{O} > 1000\text{ppm}$  为边界品位；温汉捷等，2020) 位置较分散，其中，钻孔 ZK01 共发育 6 段矿体，主要集中在 60-170 m 处，矿体厚度为 1-9 m。钻孔 ZK02 发育 8 段矿体，分布较分散，矿体厚度 1-11 m。钻孔 ZK03 发育 4 段矿体，主要在近地表位置，矿体厚度为 0.9-5 m。

本研究重点对钻孔 ZK01 中采集的样品进行分析。该钻孔揭露的岩性主要为花岗闪长岩 (约 270 m) 和钾化/钾长花岗闪长岩 (约 130 m)。发育的 6 段锂矿体分别位于 63.19—70.38 m (岩性为花岗闪长岩)，118.32—121.13 m (岩性为花岗闪长岩)，126.92—132.32 m (岩性为钾长花岗闪长岩)，138.84—139.44 m (岩性为钾长花岗闪长岩)，140.24—151.6 m (岩性为花岗闪长岩)，以及 160.68—164.04 m (岩性为花岗闪长岩) 处 (图 6)。

矿(化)体赋存在断裂带中，且多发育石英—萤石脉 (图 5)，脉宽从 0.5—5 cm 不等。沿着石英—萤石脉往两侧，黏土矿物含量逐渐减少，矿化程度逐渐减弱 (图 5a, b)。另外，在钻孔 ZK01 的 160—210 m 处，发育两条辉绿岩脉，内部亦发育数条石英—萤石细脉 (图 5c)。

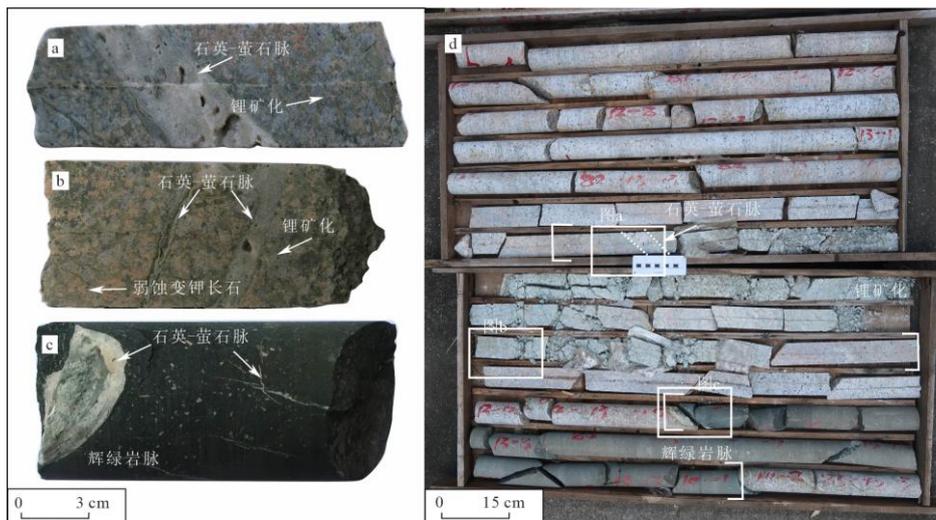


图 5 旌德锂矿钻孔 154-168 m 特征图

a 矿石中见石英-萤石脉，脉宽约 3-4 cm；b 钾长花岗闪长岩，内发育两条石英-萤石脉，岩体部分矿化；c 辉绿

岩脉体内发育有细小的石英-萤石脉；d 钻孔 ZK01 深度 154-168 m 段岩心样品，主要岩性为花岗闪长岩，160-164 m 段发育锂矿化，长度约 3-4 m，165-168 m 段发育辉绿岩脉，长度约 2 m，整段岩心样品多处见石英-萤石脉。

Fig.5 Feature of 154-168m of drill holes in Jingde lithium deposit

对钻孔 ZK01 的主要矿化段（60—155 m）进行进一步地球化学分析（图 6）。结果显示，未蚀变（或蚀变很弱）岩石中 Li 含量较低，最高为 66 ppm（Li<sub>2</sub>O 约为 142 ppm）；蚀变岩石中 Li 含量从数十到几百不等，最高为 349 ppm（Li<sub>2</sub>O 约为 750 ppm）；而矿体段 Li 含量为 1200-1500 ppm（Li<sub>2</sub>O 约 2580-3225ppm）。

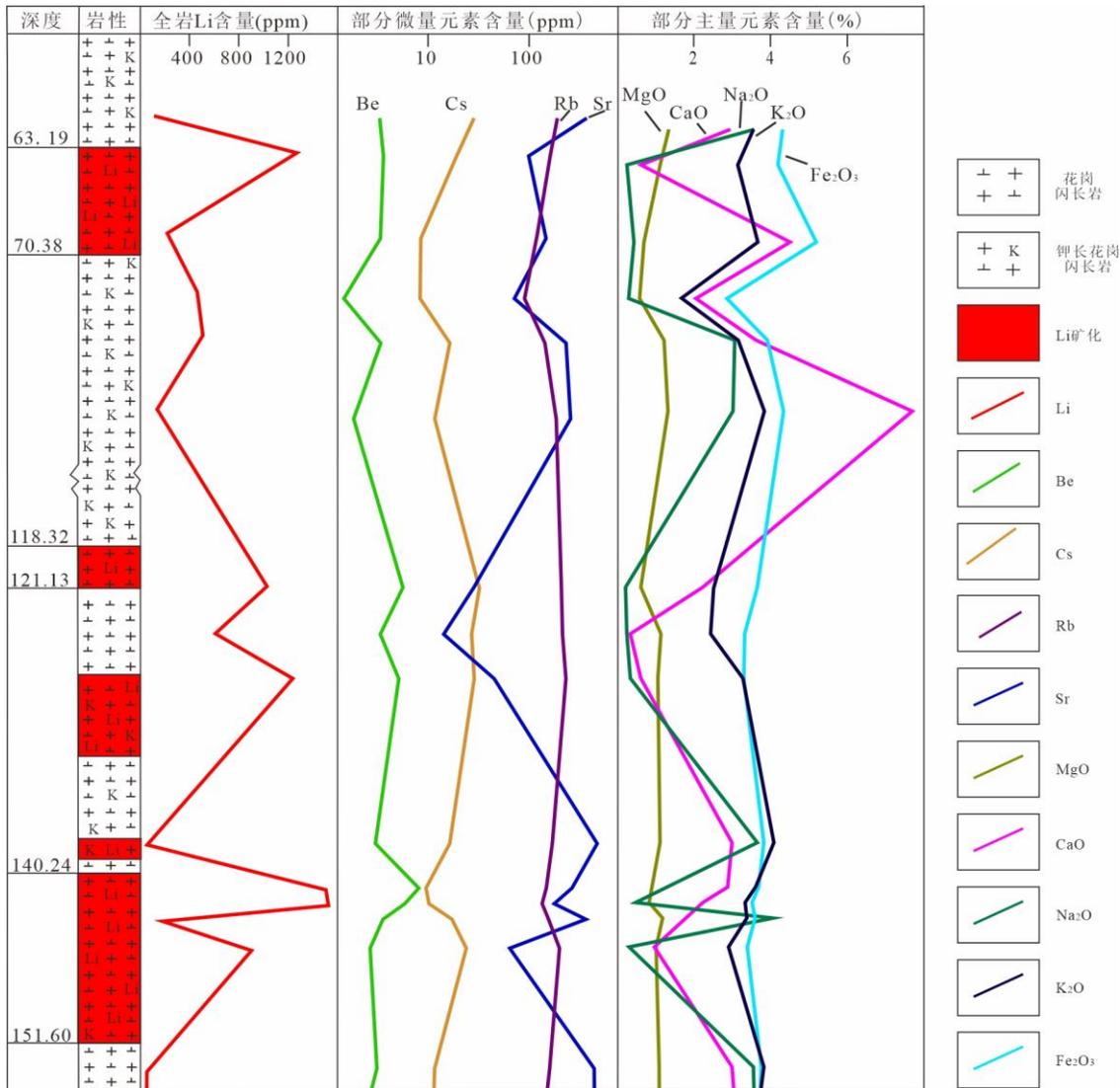


图 6 钻孔 ZK01 60—155m 段岩性特征、特征元素含量变化图

该段共发育 5 段锂矿体。矿化段岩性主要为花岗闪长岩，样品中其他元素含量随 Li 含量变化而发生变化；原始数据见附表 1。

Fig.6 Lithologic characteristics and characteristic element content variation of the drill hole ZK01 (60-155m)

全岩主微量分析结果显示，主量成分  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  含量较低，且与 Li 呈弱负相关趋势（图 6）。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  含量最高，且较为稳定，Li 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  呈正相关趋势（图 7a），与  $\text{SiO}_2$  未表现出明显的相关性（图 7b）。微量元素 Cs 和 Be 含量较低，Cs 与 Li 含量呈弱负相关趋势，Be 与 Li 呈弱正相关趋势（图 6）。Sr 含量较高，与 Li 呈现负相关趋势（图 7f）。

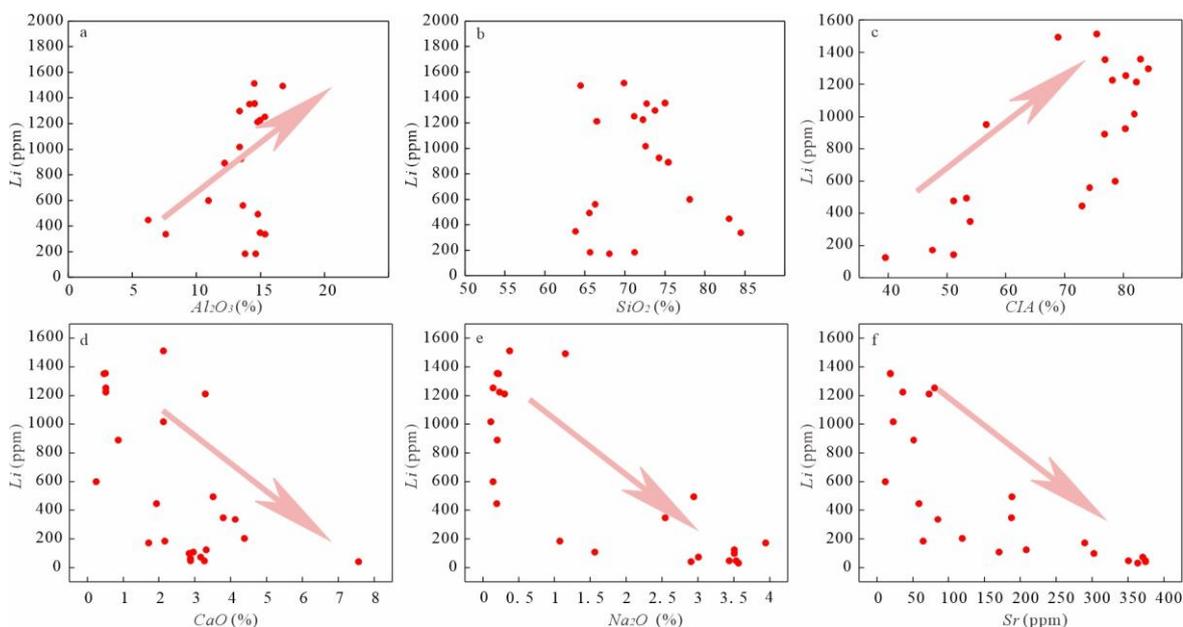


图 7 全岩 Li 含量与特征元素相关性图

a 全岩 Li 含量与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  具有正相关趋势 ( $R^2 = 0.18$ )；b 全岩 Li 含量与  $\text{SiO}_2$  相关性较弱；c 全岩 Li 含量与 CIA（化学蚀变指数）具有正相关趋势 ( $R^2 = 0.33$ )；d 全岩 Li 含量与  $\text{CaO}$  具有负相关趋势 ( $R^2 = 0.25$ )；e 全岩 Li 含量与  $\text{Na}_2\text{O}$  具有负相关趋势 ( $R^2 = 0.29$ )；f 全岩 Li 含量与 Sr 具有负相关趋势 ( $R^2 = 0.12$ )；原始数

据见附表 1。

Fig.7 Correlation diagram of Li content of total rock with characteristic elements

## 5.2 富 Li 黏土矿物岩相学及地球化学特征

富 Li 黏土矿物主要呈浅蓝色或蓝绿色（图 8a, b），单偏光镜下呈浅黄褐色，正交偏光镜下呈灰蓝色（图 8c）。黏土矿物大小从  $200\ \mu\text{m}$  至  $2\ \text{mm}$  不等（图 8c-e, i-j），且多与石英、萤石共生（图 8c, k-l）。

富 Li 黏土矿物非单一矿物，而是由高岭石、伊利石等组成的黏土矿物集合体。其中，高岭石含量最高、颗粒较大且自形程度较高（图 8d, e）；伊利石一般分布于高岭石边部或内部缝隙中，颗粒较小；绿泥石主要以单矿物形式存在，颗粒大小为 1-2

mm (图 8g, h)。在一宽约 100  $\mu\text{m}$  的石英脉内部, 见伊利石和蒙脱石集合体, 颗粒大小约 20  $\mu\text{m}$  (图 8f)。此外, 黏土矿物中还发育少量方解石和黄铁矿 (图 8i)。

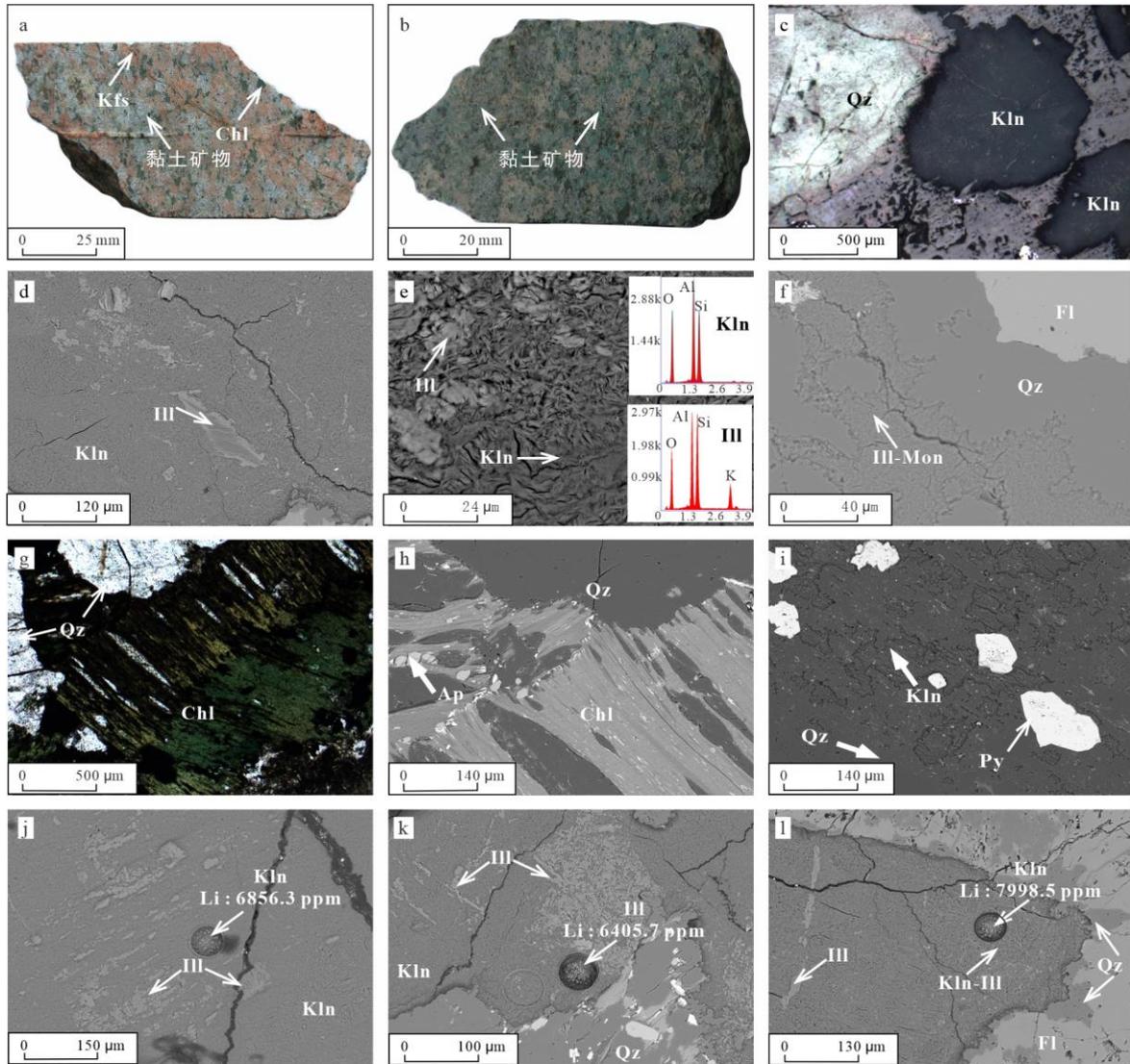


图 8 旌德锂矿手标本及黏土矿物特征

a 钾长花岗闪长岩, 部分发生蚀变; b 锂矿化花岗闪长岩含大量蓝绿色黏土矿物; c 高岭石与石英共生; d-e 高岭石和伊利石以集合体形式存在, 主要为高岭石; f 伊利石-蒙脱石-石英-萤石脉; g-h 绿泥石与石英共生; i 高岭石、石英、黄铁矿共生; j 高岭石伊利石以集合体形式存在; k-l 高岭石、伊利石与石英、萤石共生; 图 e 中谱峰图为该点矿物的 EDS 能谱图; 图 j-l 中黑色圆点为 LA-ICP-MS 分析坑, 其锂含量已标注在图中 (c, g 为显微镜单偏光照片, d-f, h-l 为扫描电镜背散射照片); 矿物注释: Ill-伊利石; Kln-高岭石; Mon-蒙脱石; Qz-石英; Fl-萤石; Chl-绿泥石; Ap-磷灰石; Py-黄铁矿。

Fig8 Microscopic characteristics of hand specimens and clay minerals from the Jingde lithium deposit

对全岩 Li 含量较高的样品中的黏土矿物进行 LA-ICP-MS 微量元素分析, 结果显

示，高岭石中 Li 元素含量为 6644-8265 ppm ( $\text{Li}_2\text{O}$ : 14284-17769 ppm)，伊利石中的 Li 元素含量为 5131-7034 ppm ( $\text{Li}_2\text{O}$ : 11031-15123 ppm)。高岭石的 LA 积分图显示，矿物中 Al、Si、Li 等元素的信号平稳，未见异常峰值（图 9a）。课题组前期研究结果表明其他矿物，如黑云母、斜长石、钠长石、角闪石等，其 Li 含量普遍很低（图 10）。

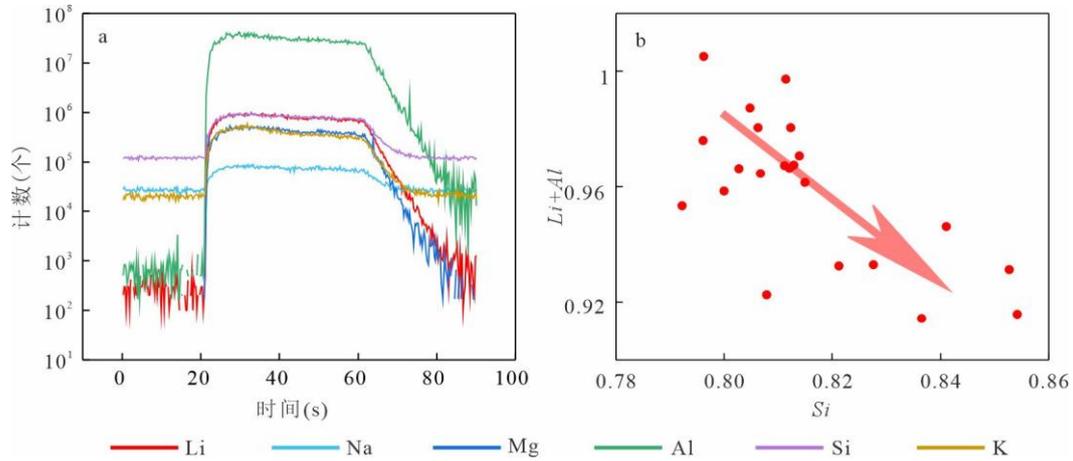


图 9 高岭石的 LA-ICP-MS 剥蚀信号及元素相关性图

a 高岭石 LA-ICP-MS 剥蚀信号，Li、Al、Si 元素信号平稳且特征相似；b 高岭石中 Li+Al 与 Si 含量呈负相关性；图 b 中的数据见附表 2。

Fig.9 LA-ICP-MS etching signals and element correlation diagram of kaolinite

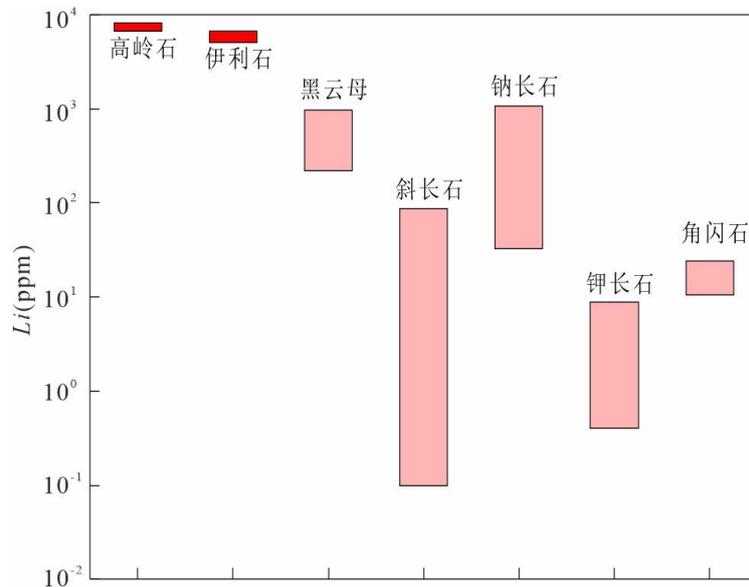


图 10 旌德锂矿各矿物中 Li 含量对比

高岭石和伊利石中的 Li 含量远高于黑云母、斜长石、钠长石、钾长石和角闪石中 Li 含量。高岭石、伊利石中 Li 含量数据见附表 2；黑云母、斜长石、钠长石、钾长石、角闪石中 Li 含量数据来自陶耐等，2024。

Fig.10 Comparison of Li content in various minerals of Jingde lithium deposit

### 5.3 伊利石 Rb-Sr 定年结果

首先通过光学显微镜和扫描电镜分析确定黏土矿物的类型和大小,然后利用 LA-ICP-MS 确定伊利石中 Li 的含量,最后选择富 Li 且颗粒大小满足定年要求的伊利石 ( $>50\mu\text{m}$ ) 进行 LA-ICP-MS 原位 Rb-Sr 定年分析(图 11a, b)。本次共分析 60 个点,其中,  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  比值为 0.4979-362.1729,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值为 0.7091-2.4441。所有数据在 Rb-Sr 等时线图上呈现出良好的线性分布关系 (MSWD=1.1), 定年结果为  $84.7\pm 5.3$  Ma (图 11c)。

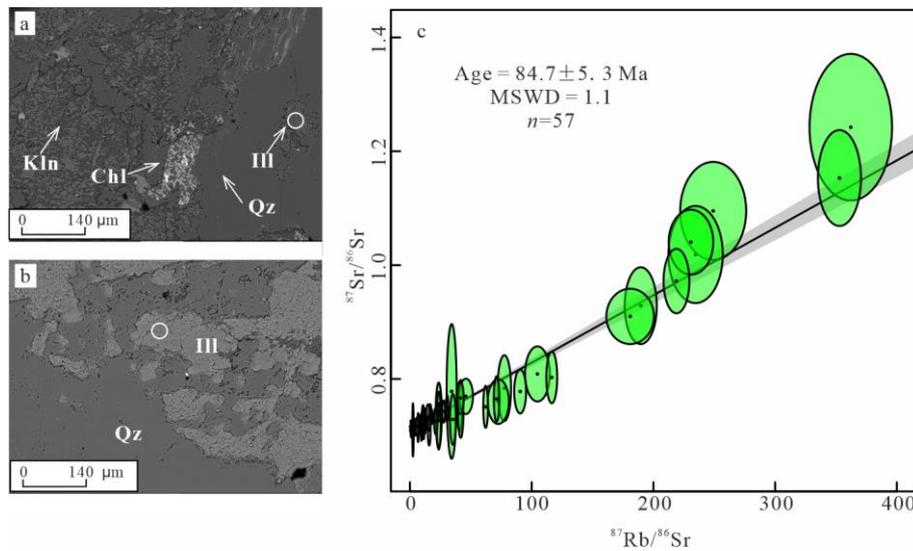


图 11 伊利石原位 Rb-Sr 定年结果

a,b 伊利石特征及 LA-ICP-MS 定年分析位置; c 伊利石 Rb-Sr 定年结果为  $84.7\pm 5.3\text{Ma}$ ; 原始数据见附表 3; 矿物注释: Ill-伊利石; Kln-高岭石; Qz-石英; Chl-绿泥石。

Fig.11 In-situ Rb-Sr dating results of illite

## 6. 讨论

### 6.1 旌德锂矿黏土矿物的成因及与 Li 的关系

显微观察和分析表明,矿石中的黏土矿物主要为高岭石,其次为伊利石及少量绿泥石,它们大多以集合体形式产出。对比未蚀变岩石和矿化岩石,矿化岩石中角闪石和黑云母均已蚀变,部分蚀变产物(如绿泥石)仍保留原矿物的假象结构(图 8g); 大部分长石已蚀变,偶见少量钾长石、钠长石残留。

主微量元素分析表明 Li 含量与多组化学指标和元素呈现不同的相关趋势，其中 Li 含量化学蚀变指数 (CIA)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量具有正相关趋势 (图 7a, c)，而与 CaO、Na<sub>2</sub>O、Sr 等具有负相关趋势 (图 7d-f)，表明在锂矿化过程中原岩经历了强烈的水-岩反应。长石、黑云母、角闪石等富 Si、Ca、Na、Sr 的矿物大量分解，Si、Ca、Na、Sr 等元素迁出，同时 Li 迁入，形成富 Li 黏土矿物。鉴于旌德岩体 Li 含量普遍低于 100 ppm，且岩体没有发生变质或强烈的淋滤作用，因而认为成矿所需要的 Li 主要由成矿流体从外部带来。

单矿物 Li 含量分析表明高岭石和伊利石中 Li 含量分别为 6644-8265 ppm 和 5131-7034 ppm，而其他矿物如黑云母、角闪石、斜长石等中 Li 含量普遍低于 500 ppm (图 10)。因此，旌德锂矿中的 Li 主要赋存在高岭石和伊利石中。

Li 在黏土矿物中通常有两种赋存状态：吸附态和结构态 (类质同相替换) (崔焱等, 2022; 陶耐等, 2024)。通常，吸附态 Li 会非均匀地分布于黏土矿物的表面及层间，而以类质同象替换形式进入矿物晶格内的 Li 则分布均匀，因而利用 LA-ICP-MS 信号图谱及元素相关性分析可以区别 Li 的两种赋存状态 (Chen et al., 2022; 张征峰等, 2025)。本次研究高岭石的 LA-ICP-MS 激光剥蚀信号图中，Li 的信号平稳，无异常峰值 (图 9a)，表明 Li 主要以类质同象的形式存在于黏土矿物晶格中。此外，黏土矿物中 Li 和 Al 的总含量与 Si 呈负相关 (图 9b)，这是由于富锂黏土矿物中 Al<sup>3+</sup> 和 Si<sup>4+</sup> 发生了相互置换，Al<sup>3+</sup> 置换 Si<sup>4+</sup> 的同时，Li<sup>+</sup> 进入矿物中，以保持电价平衡 (Li<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup> → Si<sup>4+</sup>) (钟海仁等, 2019; 陶耐等, 2024)。

## 6.2 旌德锂矿的成矿时代和构造背景

前已论述，旌德锂矿中的 Li 主要赋存在黏土矿物中，因此富 Li 黏土矿物的形成时间就代表了锂矿成矿时间。本次研究对富 Li 伊利石进行了 LA-ICP-MS 原位 Rb-Sr 定年，结果为 84.7±5.3 Ma (图 11c)，为晚白垩世，该年龄代表了旌德锂矿的成矿时间。由于锂的成矿年龄 (84.7 Ma) 与岩体的成岩年龄 (~141 Ma; 李斌等, 2015) 差距较大，说明旌德岩体本身只是赋矿岩石，与锂的成矿没有直接成因关系。值得指出的是旌德锂矿发育大量的石英-萤石脉，且沿脉向两侧 Li 矿化逐渐减弱 (图 8f)，表明锂成矿和萤石脉形成于同一成矿流体。此外，在旌德锂矿矿区内就发育有萤石矿 (图 2b)，其萤石矿中 Li 含量亦较高 (最高 1299 ppm)，进一步说明 Li 和萤石的

共成因关系。

华南地区在晚白垩世处于太平洋板块向华南板块持续俯冲的构造背景（王世伟等，2025）。区域上，旌德地区该时期火成岩未见报道，但在皖南姚家塔地区发育同期热液萤石矿床（成矿年龄： $98\pm 19$  Ma，马良等，2024）。此外，在与皖南相邻，同属钦杭成矿带的浙江、福建等地，有大量晚白垩世岩浆活动（秦社彩等，2010），并发育与这些岩浆活动有成因联系的热液萤石矿床（如：浙江武义萤石矿田，通过萤石 Sm-Nd、萤石裂变径迹法测得其成矿年龄： $80-90$  Ma；邹灏等，2016）。部分萤石矿床中亦发育高岭石、绿泥石等黏土化蚀变，并富集 Li（如：浙江一萤石尾矿的矿样中  $\text{Li}_2\text{O}$  含量平均约为 0.52%；付强等，2022）。综上认为，旌德锂矿和区域上的同期萤石矿受控于同一构造背景，它们可能是同一区域岩浆热液作用的产物。

### 6.3 旌德锂矿成矿过程

前已论述，旌德锂矿与萤石矿为同一热液作用的产物，说明成矿流体富含 Li、F 等成矿元素。高岭石-伊利石-绿泥石蚀变矿物组合表明成矿流体为中-低温偏酸性流体（Zhao et al., 2023; Ueda and Sampei, 2024; Hong et al., 2025）。晚白垩世，华南地区处于太平洋板块俯冲阶段（Li et al., 2019）。俯冲背景下的局部伸展作用形成了高分异花岗岩岩浆（张延青，2022）。随着高分异岩浆的持续演化，释放富 Li、F 的成矿流体。在中-低温酸性条件下，流体中的 Li 与 F 络合形成 Li-F 络合物，促进 Li 随流体运移（Yan et al., 2023）。随着 pH 改变或流体温度降低，Li-F 络合物稳定性降低，并发生解离（Wang et al., 2021）， $\text{Li}^+$  进入到黏土矿物，F 与  $\text{Ca}^{2+}$  结合，形成了区域上的岩浆热液型萤石矿床和热液蚀变黏土型锂矿。

在旌德地区，富 Li、F 等成矿流体沿深大断裂运移，并进入北西和北东向断裂带中，与两侧花岗闪长岩等发生水-岩反应。岩体内长石、角闪石、黑云母等易蚀变矿物发生分解，K、Na、Ca、Mg 等碱金属和碱土金属元素释放到流体中。Al、Si、K 等组分重组形成高岭石、伊利石等黏土矿物，Li 进入到黏土矿物晶格中，形成锂矿体。同时，F 与 Ca 相结合，形成萤石矿体（图 12）。

综上所述，热液蚀变黏土型锂矿与其他黏土型锂矿显著不同。主要体现在：（1）Li 主要来自外部成矿流体；（2）成矿期矿物组合为石英-高岭石-伊利石-萤石，Li 主要以结构态赋存在高岭石和伊利石中；（3）成矿过程的核心为水-岩交代反应，成

矿流体沿断裂运移并与围岩发生水—岩交代反应形成黏土矿物，Li 进入到黏土矿物晶格中沉淀成矿（陶耐等，2024）。

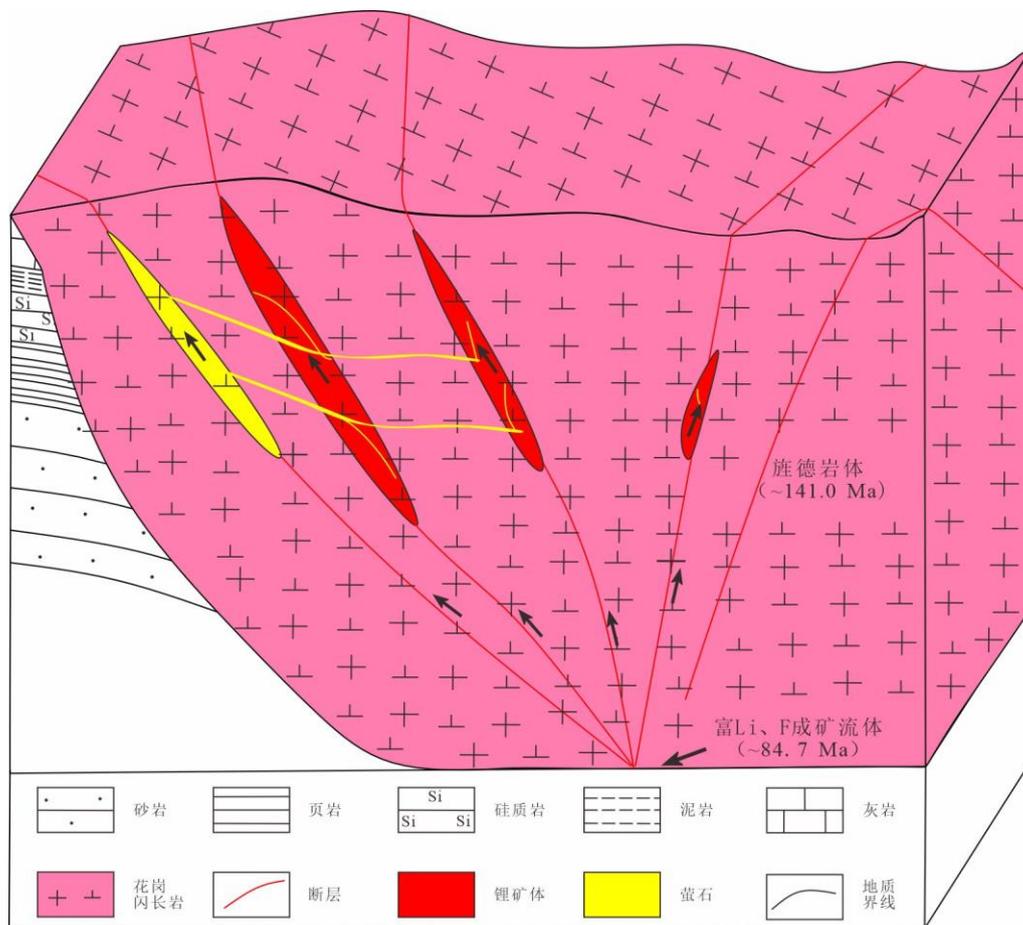


图 12 旌德锂矿成矿模式图

晚白垩世，富 Li、F 等成矿流体沿深大断裂运移，进入北西和北东向断裂，流体与两侧花岗闪长岩发生水—岩反应，形成锂矿体和萤石矿体。

Fig.12 Metallogenic model of Jingde lithium deposit

## 7.结论和意义

- 1.旌德侵入岩热液蚀变黏土型锂矿中黏土矿物组合为高岭石、伊利石及少量绿泥石，Li 主要以结构态的形式赋存于高岭石、伊利石等黏土矿物中，以高岭石为主。
- 2.富 Li 伊利石的形成年龄为  $84.7 \pm 5.3 \text{ Ma}$ ，表明旌德锂矿的成矿时间为  $84.7 \pm 5.3 \text{ Ma}$ ，为晚白垩世。
- 3.在旌德地区，富 Li、F 中低温偏酸性流体进入北西和北东向断裂，并与两侧花岗闪长岩等岩石发生水—岩反应，长石、角闪石、黑云母等矿物发生分解，形成高岭

石、伊利石、绿泥石等黏土矿物及萤石，Li 主要进入到高岭石、伊利石中。

4.本研究确定了旌德锂矿的成矿时间、Li 的赋存矿物和赋存状态，并制约了锂矿的成矿过程，为旌德及邻区热液蚀变黏土型锂矿床的形成提供了成矿时间约束。同时，本研究揭示了热液蚀变黏土型锂矿与区域上热液型萤石矿之间的可能成因联系，为该类型锂矿床的找矿勘查提供了新方向，未来有望在萤石矿区实现热液蚀变黏土型锂矿的找矿突破。

## 致谢

感谢中国科学院地球化学研究所关键矿产成矿与预测全国重点实验室董少花老师在 SEM 分析、杨淑勤老师和周波老师在主微量元素分析、唐燕文老师和韩俊杰老师在 LA-ICP-MS 分析上的指导，感谢广州拓岩检测技术有限公司尹向阳老师在定年数据处理上的指导，感谢两位匿名审稿人对本文的指导。本文受中国科学院先导专项（XDA0430103）和中国科学院青年创新促进会会员项目（2022402）联合资助。

## 参考文献

- Chen,P.W.,Liu,B.,Long,Z.,et al.,2022.Ore Genesis of the Sadaigoumen Porphyry Mo Deposit,North China Craton:Constraints from Pyrite Trace Element and Lead Isotope Analyses.*Ore Geology Reviews*,142.doi:10.1016/J.OREGEOREV.2022.104698.
- Ding,N.,Chen,F.,Tang,C.,et al.,2023.Metallogenic Characteristics and Metallogenic Specificity of Magmatic Rocks in the Yanshanian Period in Southern Anhui.*Anhui Geology*,33(03):193-197.(in Chinese with English abstract).
- Ding,X.G.,Wang,K.Y.,Li,W.,et al.,2018.Discovery of Tungsten-bearing Xenoliths in the Jingde Intrusion in Southern Anhui and its Prospecting Significance.*Anhui Geology*, 28(01):23-26.(in Chinese with English abstract).
- Du,X.F.,Wang,H.,Li,B.,et al.,2025.Research and significance of “anti watermelon” elbaite from the Huanglongling lithium pegmatite deposit in Altyn, Xinjiang.*Acta Geologica Sinica*,99(09):3060-3071.doi:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024582.(in Chinese with English abstract).
- Fu,Q.,Wang,Q.,Wen,L.G.,2022.Occurrence State and Potential Recycling Evaluation of

Lithium from Fluorite Tailings.*Conservation and Utilization of Mineral Resources*,42(6):141-145.doi:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.06.017.(in Chinese with English abstract).

Gorojovsky,L.;Alard,O.,2020.Optimisation of Laser and Mass Spectrometer Parameters for the:In Situ Analysis of Rb/Sr Ratios by LA-ICP-MS/MS.*Journal of Analytical Atomic Spectrometry*,35 (10),2322–2336.https://doi.org/10.1039/d0ja00308e.

Guo,Y.J.,Wei,G.H.,Wang,K.Y.,et al.,2022.Geological Characteristics and Minerogenetic Condition of the Qingluoshan Tungsten Deposit,in South Anhui Province.*Mineral Exploration*,13(Z1):220-228.doi:10.20008/j.kckc.202203007.(in Chinese with English abstract).

Hong,T.,Jiang,Z.L.,Gao,Y.B.,et al.,2025.Paragenetic Sequence of Li-Minerals in the 509 Daobanxi Lithium Pegmatite Deposit,Northwestern China:Implications for Lithium Mineralization in LCT-Type Pegmatites.*Journal of Earth Science*,36(06):2526-2545.

Hu,J.,Yu,X.Q.,ZengY.,et al.,2018.Discussion on the Differences and Causes of Neoproterozoic Basement Metamorphism-deformation on Both Sides of the Xian-Qimen Fault Zone.*Geological Review*,64(06):1339-1355.(in Chinese).

Li,B.,Zhang,Z.Z.,Wu,M.A.,et al.,2015.LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age and Molybdenite Re-Os Dating of the Dawujian W-Mo Polymetallic Deposit,Ningguo,Anhui Province.*Geological Bulletin of China*,34(2/3):569-578.(in Chinese with English abstract).

Li,S.Z.,Yang,S.,Li,X.Y.,et al.,2019.Mesozoic Tectono-magmatic Response in the East Asian Ocean-continent Connection Zone to Subduction of the Paleo-Pacific Plate.*Earth-Science Reviews*,19291-137.doi:10.1016/j.earscirev.2019.03.003.

Li,W.,Ding,X.G.,Wang,K.Y.,2019.Geological Characteristics of Tungsten Deposit in Lishanjian Area,Jingde County,Anhui Province.*China Metal Bulletin*,(01):284-288.(in Chinese).

Liu,X.,Wang,C.L.,Liu,X.L.,et al.,2024.Main Types,Distribution,Development and Utilization of Lithium Deposits in China.*Geology in China*,51(3):811-832.(in Chinese with English abstract).

Ma,L.,Li,J.H.,Jia,G.Q.,et al.,2024.Geological Characteristics and Metallogenic Age of the Yaojiata Fluorite Deposit in Southern Anhui.*Anhui Geology*,34(03):197-202.(in Chinese

with English abstract).

Mao,J.W.,Chen,M.H.,Yuan,S.D.,et al.,2011.Geological Characteristics of the Qinhang (or Shihang) Metallogenic Belt in South China and Spatial Temporal Distribution Regularity of Mineral Deposits.*Acta Geologica Sinica*,85(05):636-658.(in Chinese with English abstract).

Qin,S.C.,Fan,W.M.,Guo,F.,et al.,2010.Petrogenesis of the Late Mesozoic Diabase Dikes in Zhejiang and Fujian Provinces:Chronological from Ar-Ar Dating and Geochemical Constraints.*Acta Petrologica Sinica*,26(11):3295-3306.(in Chinese with English abstract).

Ren,W.K.,Liu,Z.K.,Wang,Q.Y.,et al.,2025.Research Progress on the Important Characteristics,Metallogenic Conditions and Formation Mechanism of Clay-type Lithium Deposits and Resource Extraction Technology.*Journal of Salt Lake Research*,33(04):69-90.(in Chinese with English abstract).

Tao,N.,Xie,Z.J.,Ren,T.X.,et al.,2024.Discovery of the Intrusive Hydrothermal Altered Clay-type Lithium Mineralization in Southern Anhui Province and its Geological Significance.*Acta Petrologica Sinica*,40(09):2653-2663.(in Chinese with English abstract).

Ueda,H.,Sampei,Y.,2024.Intermittent Hydrothermal Alteration and Silicification of Black Mudstones Found in the Middle to Upper Miocene Yagen Formation,Shimokita Peninsula,Northeast Japan.*Island Arc*,33(1):e12518-e12518.doi:10.1111/IAR.12518.

Wang,C.,Alard,O.,Lai,Y.J.,et al.,2022.Advances in In-Situ Rb-Sr Dating Using LA-ICP-MS/MS:Applications to Igneous Rocks of All Ages and to the Identification of Unrecognized Metamorphic Events.*Chemical Geology*,610,121073.<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.121073>.

Wang,H.,Gao,H,Wang,S.M.,et al.,2022.U-Pb Geochronology,Hf Isotope Composition and Geological Significance of Zircon and Niobium-tantalum Iron Ore in Lithium-beryllium Rare Metal Pegmatite,Muji Area,Western Kunlun Mountains,Xinjiang.*Acta Petrologica Sinica*,38(07):1937-1951.(in Chinese with English abstract).

Wang,H.,Huang,L.,Bai,H.Y.,et al.,2022.Types,Distribution,Development and Utilization of Lithium Mineral Resources in China:Review and Perspective.*Geotectonica et Metallogenia*,46(05):848-866.doi:10.16539/j.ddgzycx.2022.05.002.(in Chinese with English abstract).

Wang,Q.,Zhao,Z.H.,Jian,P.,et al.,2005.Chronology of Cretaceous A-type Granitoids or

Alkaline Intrusive Rocks in the Hinterland, South China: Constraints for Late-Mesozoic Tectonic Evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3):795-808. doi:10.3969/j.issn.1000-0569.2005.03.019. (in Chinese with English abstract).

Wang, S.W., Zhou, T.F., Fan, Y., et al., 2025. Deep Processes and Spatio-temporal Evolution of the Yanshanian Mineral Systems in the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt and the Qin-Hang Metallogenic Belt. *Science China Earth Sciences*, 55(06):1792-1816. (in Chinese).

Wang T.H., Zhang X.Y., Liu X.D., et al., 2021. A Molecular Dynamics Study of Li Speciation in Hydrothermal Fluids and Silicate Melts. *Chemical Geology*, 584, doi:10.1016/J.CHEMGEO.2021.120528.

Wei, G.H., Cai, X.B., Du, Y.D., et al., 2024. Metallogenic Geological Characteristics and Prospecting Direction of Fluorite Deposits in Xuancheng Area, Anhui Province. *Modern Mining*, 40(08):28-35. (in Chinese with English abstract).

Wen, H.J., Luo, C.G., Du, S.J., et al., 2020. Carbonate-hosted Clay-type Lithium Deposit and its Prospecting Significance. *Science Bulletin*, 65(01):53-59. (in Chinese with English abstract).

Xie, R.Q., Zhao, Z.H., Tong, X., et al., 2024. Review of the Research on the Development and Utilization of Clay-type Lithium Resources. *Particuology*, 87

Xu, X.C., Yin, T., Lou, J.W., et al., 2010. Origin of Dongguashan Stratabound Cu-Au Skarn Deposit in Tongling: Restriction of Sulfur Isotope. *Acta Petrologica Sinica*, 26(09):2739-2750. doi:CNKI:SUN:YSXB.0.2010-09-019. (in Chinese with English abstract).

Yang, J.L., Wei, G.H., Shi, L., 2023. Analysis of Geological Features and Prospecting Potential of Fluorite Ore in Xuancheng Area. *Resources Information and Engineering*, 38(04):9-13. doi:10.19534/j.cnki.zyxygc.2023.04.012. (in Chinese with English abstract).

Yan S., Sun T., Cai Y.F., et al., 2023. Mechanisms of Lithium Enrichment and Metallogenesis in a Simulated Montmorillonite-Fluid System. *Langmuir : the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 39(36), doi:10.1021/ACS.LANGMUIR.3C01298.

Yang, X.Y., Li, S., Sun, W.D., et al., 2010. Petrological and Metallogenic Geochemical Study of the Dengjia Tungsten-Molybdenum Deposit in Southern Anhui. *Mineral Deposits*, 29(S1):315-316. (in Chinese).

Ye, L.X., 2023. A Comparative Study between Skarn-type W-Mo and W-Cu Mineralization

Systems in Jiangnan Tungsten Metallogenic Belt, China. doi:10.27101/d.cnki.ghfgu.2023.000087. (in Chinese with English abstract).

Zhang Q. D., Jiang S. Y., Wang W., et al., 2024. Lithium Deposits in Sedimentary Clay-type Formations within Bauxite and Coal-bearing Strata: Current Research Status and Prospects. *Mineralogy, Petrology and Geochemistry Bulletin*, 43(01):90-101.

Zhang, Y. Q., 2022. Chronology, Geochronology, Geochemistry and its Geological Significance of the Late Mesozoic Volcanic-Intrusive Rocks in the Dachen Island, Zhejiang Province (Dissertation). Zhejiang University, Zhejiang (in Chinese with English abstract).

Zhang Z. F., Li N., Fan X. L., et al., 2025. Preliminary Study on the Occurrence State of Lithium in the Clay-type Lithium Deposit of Ertanggou, East Tianshan. *Earth Sciences*, 50(02):585-595. (in Chinese with English abstract).

Zhao, L. H., Liu, X. F., Wang, Q. F., et al., 2023. Genetic Mechanism of Super-large Karst Bauxite in the Northern North China Craton: Constrained by Diaspore In-situ Compositional Analysis and Pyrite Sulfur Isotopic Compositions. *Chemical Geology*, 622. doi:10.1016/J.CHEMGEO.2023.121388.

Zhao, W. G., Yu, Y. L., Zheng, G. W., 2008. Geological Feature and Genetic Discussion of the Feishukeng (Chinese Torreya Pit) Gold Deposit, Jixi County, Anhui Province. *Anhui Geology*, (03):169-174. (in Chinese with English abstract).

Zhong, H. R., Sun, Y., Yang, Y. Q., et al., 2019. Bauxite (Aluminum)-type Lithium Resources and Analysis of its Development and Utilization Potential. *Mineral Deposits*, 38(04):898-916. doi:10.16111/j.0258-7106.2019.04.014. (in Chinese with English abstract).

Zou, H., Zhang, Q., Bao, L., et al., 2016. Geological Characteristics and ESR Dating of Xiachen Fluorite Deposit in Tiantai Basin, Zhejiang, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 43(01):86-94. (in Chinese with English abstract).

## 中文参考文献

丁宁, 陈芳, 汤诚, 2023. 皖南地区燕山期成矿特征及岩浆岩成矿专属性. *安徽地质*, 33(03):193-197.

丁希国, 王克友, 李伟, 等, 2018. 皖南旌德岩体中含钨捕虏体的发现及找矿意义. *安徽地质*, 28(01):23-26.

杜晓飞, 王核, 李斌, 等, 2025. 新疆阿尔金黄龙岭伟晶岩型锂矿床“反西瓜”锂电气石研究

及意义.地质学报,99(09):3060-3071.

付强,王清,温利刚,2022.某萤石尾矿中锂的赋存状态及回收工艺分析.矿产保护与利用,42(6):141-145.

郭泳杰,魏国辉,王克友,等,2022.皖南青罗山钨矿床地质特征及成矿条件分析.矿产勘查,13(Z1):220-228.

胡军,余心起,曾严,等,2018.歙县—祁门断裂带南北两侧新元古代基底变质—变形差异及成因探讨.地质论评,64(06):1339-1355.

李斌,张赞赞,吴明安,等,2015.皖南宁国大坞尖钨钼矿床成岩成矿年龄——以花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄为依据.地质通报,34(Z1):569-578.

李伟,丁希国,王克友,2019.安徽省旌德县梨山尖地区钨矿地质特征.中国金属通报,(01):284-288.

刘雪,王春连,刘学龙,等,2024.中国锂矿床主要类型特征、分布情况及开发利用现状.中国地质,51(3):811-832.

马良,李加好,贾国庆,等,2024.皖南姚家塔萤石矿床地质特征及成矿时代研究.安徽地质,34(03):197-202.

毛景文,陈懋弘,袁顺达,等,2011.华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律.地质学报,85(05):636-658.

秦社彩,范蔚茗,郭锋,等,2010.浙闽晚中生代辉绿岩脉的岩石成因:年代学与地球化学制约.岩石学报,26(11):3295-3306.

任文恺,刘志康,王青云,等,2025.黏土型锂矿床重要特征、成矿条件和形成机制及其资源提取技术研究进展.盐湖研究,33(04):69-90.

陶耐,谢卓君,任廷仙,等,2024.安徽南部侵入岩热液蚀变黏土型锂矿化的发现及地质意义.岩石学报,40(09):2653-2663.

王核,高昊,王赛蒙,等,2022.新疆西昆仑木吉地区锂铍稀有金属伟晶岩锆石及铌钽铁矿 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义.岩石学报,38(07):1937-1951.

王核,黄亮,白洪阳,等,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(05):848-866.

王世伟,周涛发,范裕,等,2025.长江中下游成矿带和钦杭成矿带燕山期成矿系统的深部过程与时空演化.中国科学:地球科学,55(06):1792-1816.

魏国辉,蔡晓兵,杜玉雕,等,2024.安徽宣城地区萤石矿成矿地质特征及找矿方向.现代

矿业,40(08):28-35.

温汉捷,罗重光,杜胜江,等,2020.碳酸盐黏土型锂资源的发现及意义.科学通报,65(01):53-59.

徐晓春,尹滔,楼金伟,等,2010.铜陵冬瓜山层控矽卡岩型铜金矿床的成因机制:硫同位素制约.岩石学报,26(09):2739-2750.

杨金龙,魏国辉,石磊,2023.安徽省宣城地区萤石矿地质特征与找矿潜力分析.资源信息与工程,38(04):9-13.

杨晓勇,李双,孙卫东,等,2010.皖南邓家钨钼矿岩石学及成矿地球化学研究.矿床地质,29(S1):315-316.

叶龙翔,2023.江南钨矿带矽卡岩型钨-钼矿床和钨-铜矿床成矿作用对比研究(博士学位论文).安徽:合肥工业大学.

张七道,蒋少涌,王微,等,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(01):90-101.

张延青,2022.浙江大陈岛晚中生代火山-侵入岩的年代学、地球化学特征及其地质意义(硕士学位论文).浙江:浙江大学

张征峰,李诺,范香莲,等,2025.东天山二塘沟黏土型锂矿锂的赋存状态初探.地球科学,50(02):585-595.

钟海仁,孙艳,杨岳清,等,2019.铝土矿(岩)型锂资源及其开发利用潜力.矿床地质,38(04):898-916.

邹灏,张强,包浪,等,2016.浙江天台盆地下陈萤石矿床地质特征及 ESR 年代学.成都理工大学学报(自然科学版),43(01):86-94.