第 41 卷 第 1 期
2025 年 3 月

华 南 地 质
South China Geology

Vol.41, No.1, 96−108
Mar., 2025

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.01.008

江西九岭复式岩体南缘白水洞花岗岩型锂矿床锂的赋存状态

刘　爽[1], 王水龙[2]

LIU Shuang[1], WANG Shui-Long[2]

1. 江西省地质局生态地质大队, 江西 南昌 330025; 2. 东华理工大学, 江西 南昌 330013
1. Ecological Geology Brigade, Jiangxi Bureau of Geology, Nanchang 330025, Jiangxi, China;
2. East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China

摘要: 白水洞锂矿床是江西九岭复式岩体南缘巨型花岗岩型锂矿集区代表性矿床之一, 以品位高和规模大为特征, 但锂的赋存状态仍缺乏研究。本文通过化学分析、光学显微镜、扫描电镜 (SEM)、电子探针 (EPMA) 和激光剥蚀等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 等方法, 对该矿床矿石矿物组成、矿物的嵌布特征和成矿元素的赋存状态等进行了详细研究。结果表明, 白水洞矿床矿石主要岩性为中细粒钠长石化白云母花岗岩, Li_2O 平均品位 0.51%; 白水洞花岗岩属于过铝质钙碱性系列, 矿石主要含锂矿物为锂白云母和锂云母, 占矿石矿物总量的 18%, 云母中 Li_2O 含量变化较大 (0.821%~5.086%), 还有少量锂赋存在铁锂云母、磷锂铝石和锂绿泥石中, 磷锂铝石含有较高的 Li_2O(平均 9.585%), 但在矿石中分布极不均匀。本研究为后续合理确定选矿工艺提供了参考依据; 白水洞矿床磷锂铝石和锂云母的出现指示甘坊岩体为高度演化的岩体, 因此, 在今后九岭地区的锂矿找矿勘查工作中应关注此类岩体。

关键词: 花岗岩型锂矿; 矿物学; 赋存状态; 白水洞; 九岭

中图分类号: P618.71　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 2097-0013(2025)-01-0096-13

Liu S and Wang S L. 2025. Occurrence of Lithium in the Baishuidong Granite-Hosted Lithium Deposit, Southern Margin of the Jiuling Mountain, Jiangxi Province. *South China Geology,* 41(1): 96−108.

Abstract: The Baishuidong lithium deposit is a representative example within the extensive granitic lithium deposit cluster located on the southern margin of the Jiulian Mountains, characterized by its high grade and large scale, yet the occurrence state of lithium remains unknown. This paper presents a comprehensive study utilizing various methods including chemical analysis, optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), electron probe microanalysis (EPMA), and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) to investigate the ore mineral composition, dissemination characteristics of minerals, and the occurrence state of lithium within this deposit. The findings disclose that the ore-related lithology at Baishuidong is medium-fine-grained albitized muscovite granite, with an average Li_2O grade of 0.51%. The Baishuidong granite is categorized as belonging to the peraluminous calc-alkaline series. The main lithium-bearing minerals in the ore comprise lepidolite and Li-muscovite, which altogether account for

收稿日期: 2025-02-07; **修回日期:** 2025-02-21
基金项目: 江西省科学技术厅“科技+”联合计划项目(2023KDG01005)
第一作者: 刘爽(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质矿产研究, E-mail: 104638894@qq.com

18% of the total ore minerals. Notably, the Li_2O content in mica varies significantly, ranging from 0.821% to 5.086%. Additionally, trace quantities of lithium are detected in zinnwaldite, montebrasite, and cookeite; montebrasite shows a relatively high average Li_2O content of 9.585%, although its distribution within the ore is highly uneven, this provides a reference basis for the subsequent rational determination of the beneficiation process.. The existence of amblygonite and lepidolite in the Baishuidong deposit indicates that the Ganfang pluton is highly evolved. In the future, attention should be paid to such plutons in the lithium ore prospecting and exploration in the Jiuling area.

Key words: granite-hosted lithium deposit; mineralogy; occurrence state; Baishuidong; Jiuling

锂为自然界中最轻的金属，其被应用于核能、特种合金、特种玻璃等领域，尤其广泛应用在锂电池方面，被称为“能源金属”、“高能金属”、“推动世界前进的重要元素”（许志琴等, 2018; 王登红等, 2022; 王核等, 2022）。锂作为国防安全和国家战略防御的关键金属之一，具有至关重要的地位（翟明国, 2019; 国家自然科学基金委员会和中国科学院, 2023）。全球锂矿可分为卤水型、硬岩型和黏土型三种（李建康等, 2014; 刘丽君等, 2017; 王核等, 2022）。目前已发现超过 150 种锂矿物和含锂矿物，其中开采应用最为广泛的锂矿物是锂辉石、锂云母和透锂长石（王秋舒, 2016; 王核等, 2022）。华南地区硬岩型锂矿以“低品位、大吨位、露天开采”为特点（舒良树等, 2021; 陈振宇等, 2023; 郭春丽等, 2024），受到前所未有的关注。

江西省已发现的锂矿主要是硬岩型和卤水型，其中硬岩型以蚀变花岗岩型为主，此外还有伟晶岩型、细晶岩（霏细斑岩）型、云英岩型（周建廷等, 2011; 吴学敏等, 2016; 刘爽等, 2019;马厚明等, 2021; 聂晓亮等, 2022; 王成辉等, 2022; 徐喆等, 2024）。近年来在九岭复式岩体南缘花岗岩型锂矿勘查取得了巨大突破，两轮整装勘查新增总 Li_2O 资源量高达 920.75 万吨（陈祥云等, 2023; 龚敏等, 2023; 徐喆等, 2024）。限于勘探与开发等诸多因素的限制，目前对中低品位花岗岩型锂矿研究程度普遍较低（舒良树等, 2021; 陈振宇等, 2023; 郭春丽等, 2024），尤其是锂的赋存状态研究缺乏。目前仅大港锂矿确定锂主要赋存在锂云母、铁锂云母和含锂白云母中（龚敏等, 2023），锂赋存状态不清楚严重制约了对成矿机制的认识，并影响了后续开发利用。白水洞锂矿床是九岭南缘近年来新探明的花岗岩型锂矿床，该矿床赋矿岩性主要为中细粒钠长石化白云母花岗岩，但锂的赋存状态未开展系统研究。因此，本文以白水洞矿床为研究对象，通过化学成分、光学显微镜、扫描电镜（SEM）、电子探针（EPMA）和激光剥蚀等离子体质谱（LA-ICP-MS）等测试分析，拟查明锂的赋存状态，为该花岗岩型锂矿床成矿作用研究及开发利用提供理论依据。

1 区域地质背景

九岭地区位于扬子地块和华夏地块的汇聚边缘，属于江南造山带的中部，位于宜丰-景德镇深断裂的中部北侧，九岭-高台山台拱的九岭穹断束南部，九岭复式背斜南翼，夹于宜丰-景德镇深大断裂带与铜鼓西向—奉新上富断裂之间（图 1a）（Li X H et al., 2009; Sun J J et al., 2017; Xu L et al., 2024）。区域地层主要有新生界第四系、晚白垩世圭峰群河口组和塘边组、三叠纪安源群紫家冲组、青白口纪双桥山群安东林组、青白口纪下统宜丰岩组。白水洞矿区位于九岭—鄣公山推覆隆起带南西部，九岭复式背斜南翼，处于宜丰-景德镇深大断裂带与铜鼓西向-奉新上富断裂之间。受宜丰-景德镇北东东向深断裂和靖安北北东向大断裂的控制，区内主要发育有北北东向、北东向和北西向三组规模较大的断裂，大都为成矿前构造，其中北北东向、北西向断裂与锂钽铌矿成矿关系更为密切（Sun J J et al., 2017; 马雪等, 2019; 刘冰琪等, 2023; Xu L et al., 2024）。

从元古代至中生代，该区曾经历过多次岩浆

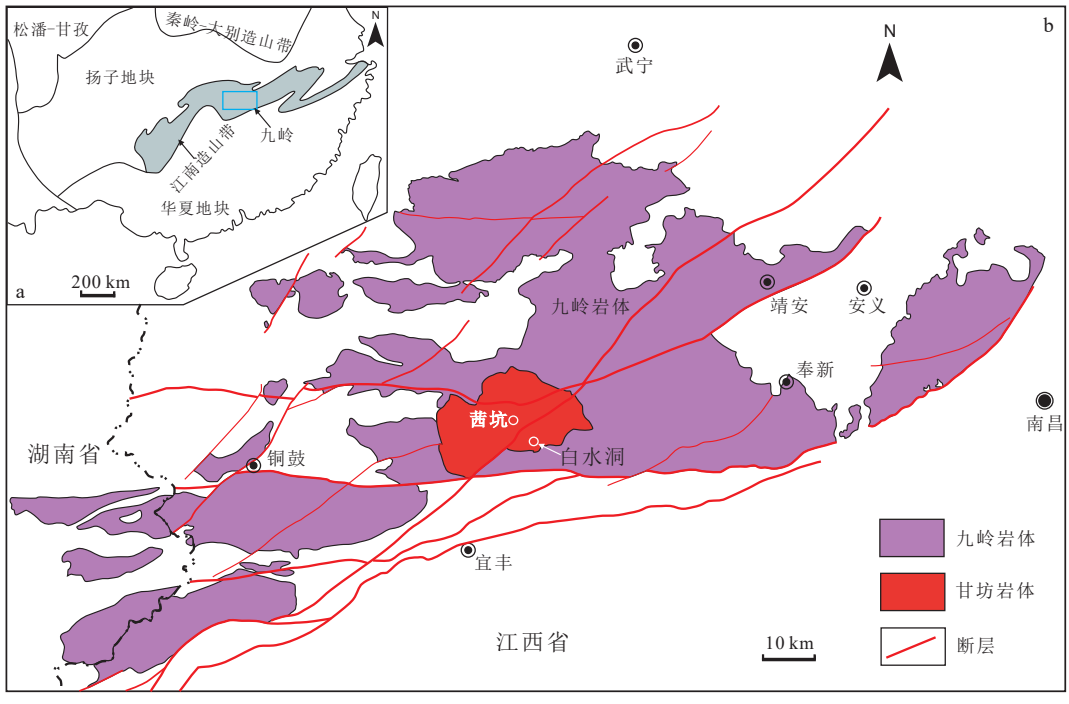

图 1 九岭地区大地构造位置（a）和地质简图（b）

Fig. 1 Simplified geotectonic (a) and geologic map (b) of the Jiuling Area

据 Xu L et al.(2024) 修改

活动(图 1b)，其中晋宁晚期岩浆活动是九岭隆起上的一次规模巨大的岩浆活动，形成了广布的晋宁晚期岩体，其岩性主要为中、粗粒花岗闪长岩、花岗岩。燕山期岩浆活动规模仅次于晋宁晚期岩浆活动，形成的岩体岩性主要为中、粗粒斑状二云母花岗岩。燕山中晚期岩浆活动期次较多，所形成的岩体零星分布于晋宁晚期、燕山早期及青白口系下统宜丰岩组之中，其岩性较复杂，主要有细粒二云母花岗岩，白云母花岗岩及霏细(斑)岩或细晶岩等(钟玉芳等, 2005; Rong W et al., 2017)。目前区内所发现的矿产均与岩浆岩和断裂构造关系密切，以丰富的锂、铷、铌、钽、锡和钨而闻名(黄兰椿和蒋少涌, 2013; Xie L et al., 2019; 聂晓亮等, 2022; 龚敏等, 2023; Ouyang Y P et al., 2023; 徐净等, 2023; Xu Z et al., 2023; Xu L et al., 2024)。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质特征

白水洞矿区(图 2)出露地层简单，主要为第四系岭背组，由分布于区内的一些较低洼地区、山坡、山脊平台及沟谷的残坡积层和冲积层组成。矿区内地质构造较简单，主要受区域褶皱断裂构造控制。

矿区岩浆岩出露广泛，均为燕山期岩浆岩，岩性较复杂，属于甘坊岩体的一部分。燕山早期第二阶段第一次侵入花岗岩广泛分布于矿区西部和北东部，侵入于燕山早期第一阶段岩体中，出露的岩性主要为中粗粒黑云母斑状二长花岗岩、中粒-中粗粒斑状钠长石化白云母花岗岩、中细粒含斑二云母二长花岗岩等。燕山早期第二阶段第三次侵入花岗岩为矿区赋矿母岩，主要分布于矿区中南-西南部，呈岩瘤、岩枝状产出，侵入于燕山早期第二阶段第一、二次侵入花岗岩中，主要岩性为中细粒钠长石化白云母花岗岩。矿区花岗岩蚀变作用以岩浆晚期分异交代用为主，表现为钠长石化、锂云母化，黄玉化、白云母化强烈、普遍。根据矿物相互交代和生成顺序，可分为三期，第一期为钠长石化、锂云母化；第二期为钠长石化、锂云母化；晚期为鳞片状锂云母化。锂钽铌成矿作用主要在第一期交代作用阶段，大量的细晶石、富锰铌钽铁矿产于该期钠长石和锂云母颗粒中，或产于钠长石集合体中。

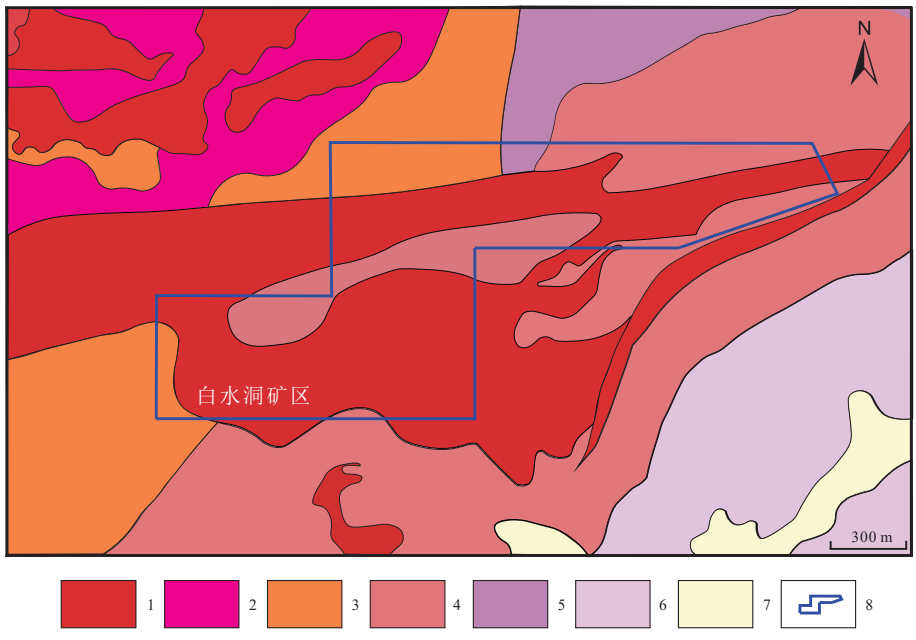

图 2　白水洞锂矿床地质简图

Fig. 2　Geological map of the Baishuidong lithium deposit

1. 中细粒强钠化白云母花岗岩; 2.中细粒白云母二长花岗岩; 3. 中细粒二云母二长花岗岩; 4. 中粗粒似斑状二云母二长花岗岩; 5. 中粗粒黑云母二长花岗岩; 6. 中细粒黑云母花岗闪长岩; 7. 第四系; 8. 矿区界线

2.2 矿体特征

白水洞锂矿区共圈定锂矿体 4 个(V1、V2、V3 和 V4), 均赋存于燕山早期第二阶段第三次侵入的花岗岩顶部。矿体呈似层状分布, 矿体间距一般在 10 ~ 50 m, 最大 90 m, 矿体产状平缓, 延展稳定(图 3), Li_2O 品位一般在 0.3% ~ 0.7% 之间, 平均品位 0.51%, 目前累计查明矿石量为 802.42 万吨。

2.3 矿石特征

矿石具较强钠长石化, 颜色为灰白色, 花岗结构, 块状构造(图 4)。矿石矿物成分与母岩矿物成分基本相似, 只是有用组分相对富集, 主要组成矿物为钠长石(40%±)、石英(30%±)、斜长石(10%±)、钾长石(8%±)、白云母(10%±)、萤石(2%±)。钠长石呈板条状, 长径 0.2 ~ 1.2 mm, 沿石英及其它矿物边部向内交代, 具聚片双晶, 受应力作用垂直长轴发育少量裂纹。石英呈它形粒状, 粒径 0.5 ~ 3.5 mm, 其中以细粒居多, 次为中粒, 受应力作用发育波状消光及少量平直状裂纹, 切穿晶体。斜长石呈半自形-自形板状, 长径为 0.2 ~ 2.5 mm, 具卡式-钠长石双晶, 受钠长石交代、白云母轻微交代。钾长石受钠长石交代, 呈它形粒状残留, 长径 0.2 ~ 3.0 mm, 具卡式双晶, 发育强粘土化, 晶体内混浊不清。白云母按产状可分为两类: (1)较大片状, 片径 0.50 ~ 2.5 mm, 为原生及次生白云母, 与钠长石共同交代原岩产出; (2)较小叶片状, 片径 0.02 ~ 0.1 mm, 呈鳞片状集合体产出, 多与黏土化钾长石伴生。

3 样品采集及测试方法

测试样品采自白水洞矿区, 由国土资源部南昌矿产资源监督检测中心完成样品破碎缩分, 并完成矿石多元素和 MLA 矿物自动分析。

将样品磨制成探针片在偏光显微镜下对其进行观察描述, 并对其进行扫描电镜、电子探针和激光剥蚀等离子体质谱分析。显微镜、扫描电镜(SEM)、电子探针(EPMA)、激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室完成。矿物显微观察和背散射图像观察应用 Zeiss Sigma 300 VP 场发射扫描电子显微镜, 分辨率: 1.2 nm @15 kV 和 2.2 nm @1kV, 放大倍数: 10 ~ 1 000 000, 加速电压: 0.02 ~ 30 kV, 探针电流: 4 pA ~ 20 nA, 低真空范围: 2 ~ 133 Pa, 配备牛津 Ultim Max100 能谱仪。能谱面扫描和线

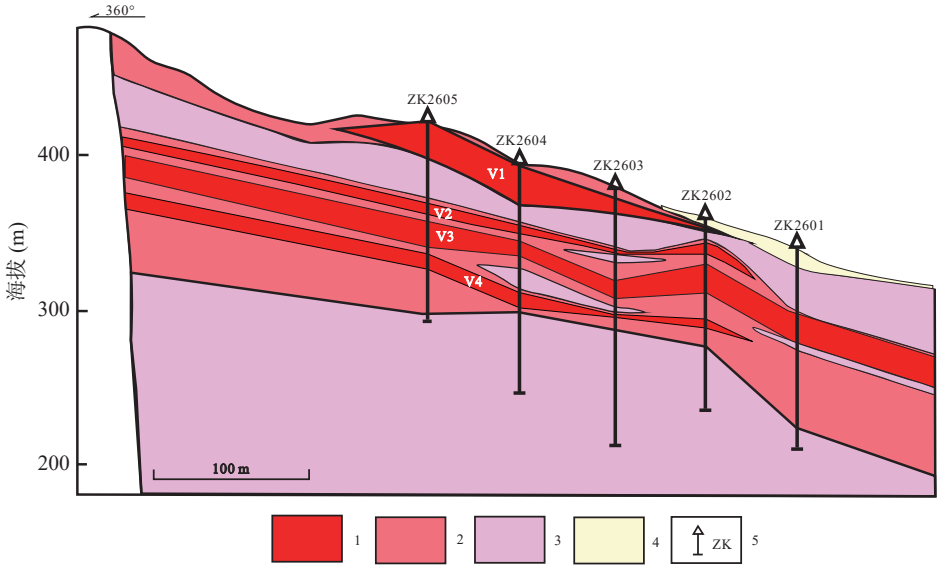

图 3 白水洞锂矿床 26 号勘探线剖面图

Fig. 3 Geological map of the Line 26 cross-section in the Baishuidong lithium deposit

1. 锂矿体; 2. 锂矿化体; 3. 中细粒二云母二长花岗岩; 4. 第四系; 5. 钻孔位置及编号

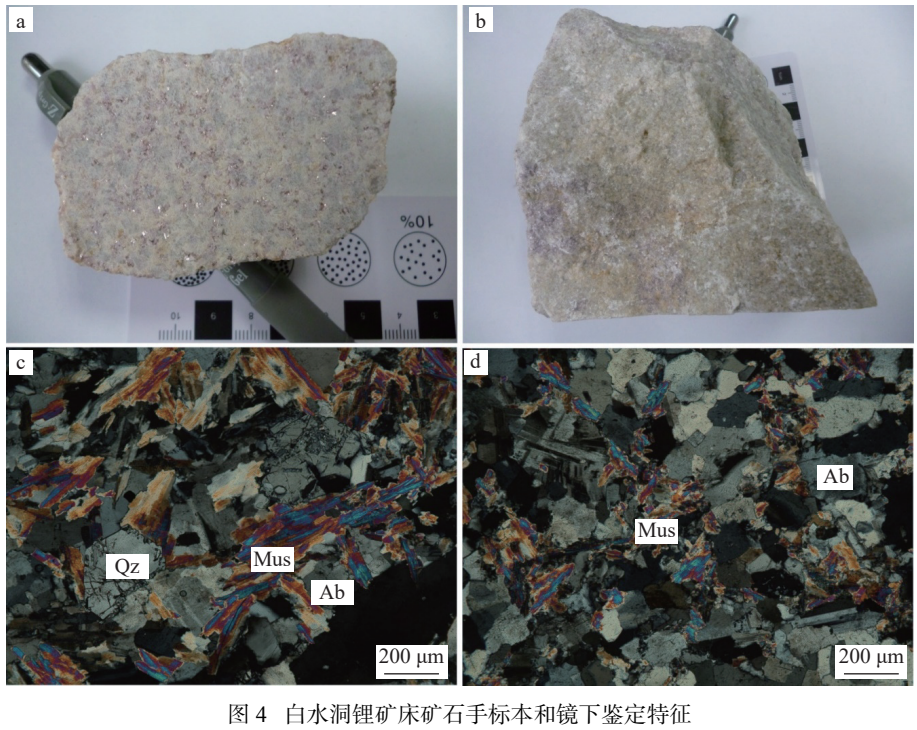

图 4 白水洞锂矿床矿石手标本和镜下鉴定特征

Fig. 4 Photos and microscopic identification of the muscovite granite ores in the Baishuidong lithium deposit

Ab.钠长石; Mus.白云母; Qz.石英

扫描使用牛津 Ultim Max100 能谱仪完成。矿物的元素含量定量分析选择日本电子 JEOL JXA-8530 F Plus 场发射电子探针，实验条件设置为加速电压 15 kV，探针电流为 20 nA，分析束斑直径为 1 μm。利用激光剥蚀等离子体质谱法（LA-ICP-MS）对矿物进行了原位锂含量分析，仪器型号为配备 NWR 193He 纳秒激光剥蚀器（LA）的 PE NexION 1000 电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS）。实验采用氦气作为载气，氩气作为补偿气，通过混合器与载气混合后进入 ICP 系统。试验条件选择激光束斑直径为 50 μm，激光能量密度为 7.5 mJ/cm^2，脉冲频率为 6 Hz。

4 分析结果

4.1 矿石化学成分分析

4 件矿石元素分析结果见表 1。矿石中主要有用元素为锂，矿石的主量元素具有以下地球化学特征：①SiO_2 含量较高，为 69.87% ~ 73.06%，TAS 图解中样品均投点在典型花岗岩范围内（图 5a）；②富铝，Al_2O_3 为 14.90% ~ 17.21%，在 A/CNK-ANK 图解（图 5b）中样品均投点在强过铝质区域内；③碱含量中等，Na_2O 为 3.52% ~ 4.97%，K_2O 为 3.25% ~ 3.63%，全碱（Na_2O+K_2O）为 6.77% ~ 8.41%，由 SiO_2-K_2O 图解（图 5c）和 A.R.-SiO_2 图解（图 5d）可知，样品为高钾钙碱性系列；④贫钙、钛，CaO 介于 0.33% ~ 0.76% 之间，TiO_2 极低；⑤Li_2O 含量均值为 0.51%，平均品位较高。

表 1　白水洞锂矿床矿石化学成分分析结果（%）

Table 1　Chemical composition results（%）of ores from the Baishuidong lithium deposit

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	TFe_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	Li_2O
BSD-1	72.95	0.02	14.96	1.12	0.33	3.52	3.25	0.65
BSD-2	72.23	0.02	14.90	1.30	0.76	3.64	3.63	0.49
BSD-3	69.87	0.02	17.21	1.00	0.34	4.97	3.44	0.40
BSD-4	73.06	0.02	15.30	1.00	0.19	4.22	3.40	0.50

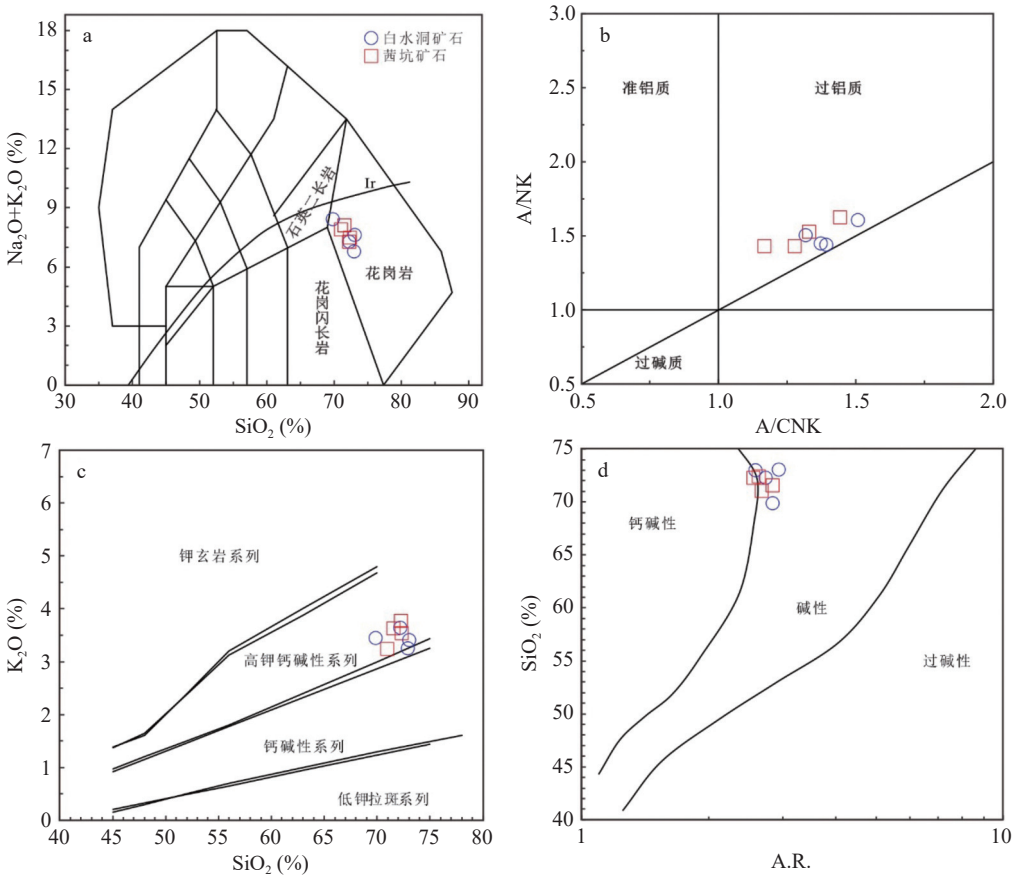

图 5　白水洞锂矿床矿石 SiO_2-(K_2O+Na_2O) 图解 (a)、A/CNK-A/NK 图解 (b)、SiO_2-K_2O 图解 (c) 和 A.R.-SiO_2 图解 (d)

Fig. 5　SiO_2-(K_2O+Na_2O) diagram (a), A/CNK-A/NK plot (b), SiO_2-K_2O plot (c) and A.R.-SiO_2 plot (d) of ores from the Baishuidong lithium deposit

图中蓝色圆形点样品为本文数据；红色正方形样品点为茜坑矿床资料，据聂晓亮等（2022）；A/NK= Al_2O_3 / (Na_2O+K_2O)；A/CNK= Al_2O_3 / ($CaO+Na_2O+K_2O$)；A.R.= {w(Al_2O_3) + w(CaO) + w(Na_2O) + w(K_2O)} / {w(Al_2O_3) + w(CaO) – [w(Na_2O) + w(K_2O)]}

4.2 矿石矿物组成

采用 MLA 矿物自动定量检测系统测定矿石的矿物组成及含量(表 2),白水洞锂矿床矿石锂矿物以锂白云母为主,其次为锂云母,少量锂绿泥石,微量磷锂铝石。锂云母和锂白云母含量比例约为 1∶5.5。矿石中铌钽矿物含量极少,有铌钽锰矿、锡锰钽矿和细晶石;铍矿物主要为硅铍石;锡矿物为锡石。硫化物极少,仅有极少量黄铁矿;脉石矿物主要由钠长石、石英、钾长石组成,少量黄玉、磷灰石、绿泥石等。

锂云母和锂白云母呈片状集合体嵌布于石英、长石之间,少数锂白云母包含于长石中(图 4、图 6)。锂云母与锂白云母之间呈交代连生关系,可见锂云母交代锂白云母,连生界面平直或呈港湾状。在矿石中常见锂云母蚀变为锂绿泥石和绿泥石,或见锂绿泥石呈脉状穿插于矿石中(图 6)。磷锂铝石嵌布于石英、长石之间,分布极其不均匀(图 6)。

4.3 锂的赋存状态

4.3.1 云母类矿物特征

背散射电子图像显示白水洞矿床矿石中的云母普遍存在成分环带结构(图 6、图 7)。云母环带

表 2 白水洞锂矿床矿石矿物组成及含量

Table 2 Mineral composition and content of the Baishuidong lithium deposit

矿物	含量(%)	矿物	含量(%)	矿物	含量(%)
石英	33.6482	磷锂铝石	0.0122	磷铁锰矿	0.0117
钠长石	32.8744	硅铍石	0.0261	锆石	0.0064
锂白云母	15.0890	高岭石	0.0127	硬锰矿	0.0357
钾长石	12.4005	锡锰钽矿	0.0002	硬钾矿	0.0878
锂云母	2.7697	细晶石	0.0001	黄铁矿	0.0084
锂绿泥石	1.6991	锡石	0.0114	其他	0.2702
磷灰石	0.6847	铌钽锰矿	0.0005	合计	100.0000
绿泥石	0.1607	萤石	0.0037		
黄玉	0.1651	磷铝锰矿	0.0231		

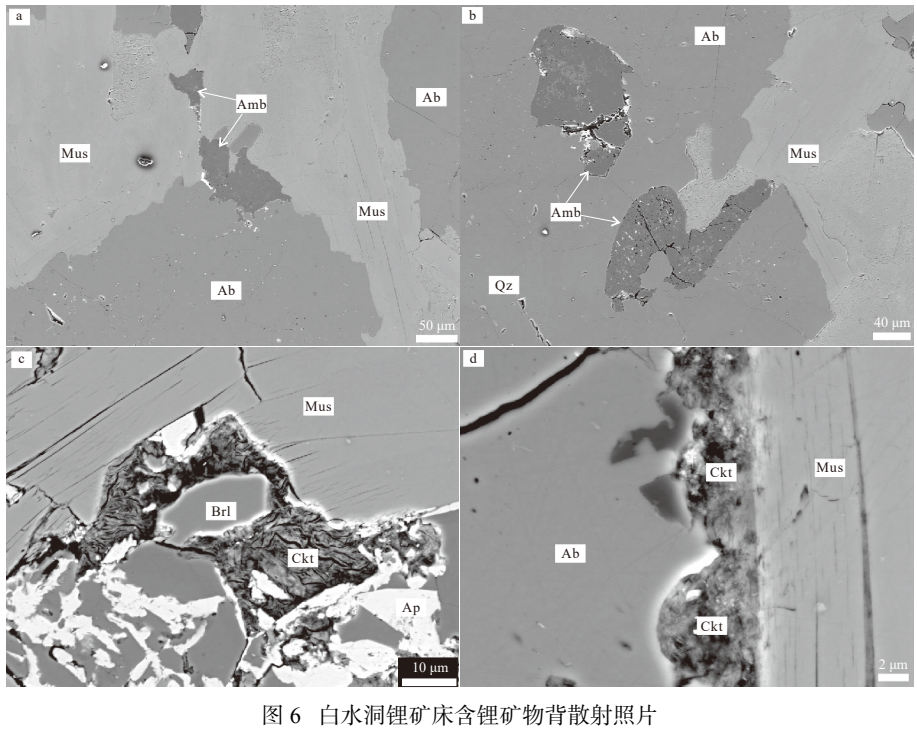

图 6 白水洞锂矿床含锂矿物背散射照片

Fig. 6 BSE images of Li-bearing minerals from the Baishuidong lithium deposit

Ab.钠长石;Qz.石英;Mus.白云母;Ap.磷灰石;Amb.磷锂铝石;Ckt.锂绿泥石;Brl.绿柱石

结构包含了清晰的核部和边部, 边部背散射电子图像比核部亮, 表示核部成分的总体质量数较小(图 7)。通过能谱面扫描和线扫描(图 7、图 8), 可以清晰看出, 蚀变环带 F 含量明显增加, Mn 也有少量增加, Al 含量降低。

白水洞矿床矿石中的云母电子探针检测结果见表 3。云母根据 Tischendorf et al.(1997)分类方法, 主要有锂云母、锂白云母和铁锂云母(图 9)。综合表 2 数据, 主要是锂云母和锂白云母, 铁锂云母较少; 锂云母 Li_2O 含量均值为 5.034%, 锂白云母 Li_2O 含量均值为 0.871%, 铁锂云母 Li_2O 含量均值为 3.415%, 不同云母中 Li_2O 含量变化较大。

4.3.2 磷锂铝石矿物特征

磷锂铝石在矿石中分布不均匀, 粒径变化较大(1 μm ~ 100 μm), 一般以不规则状包裹在钠长

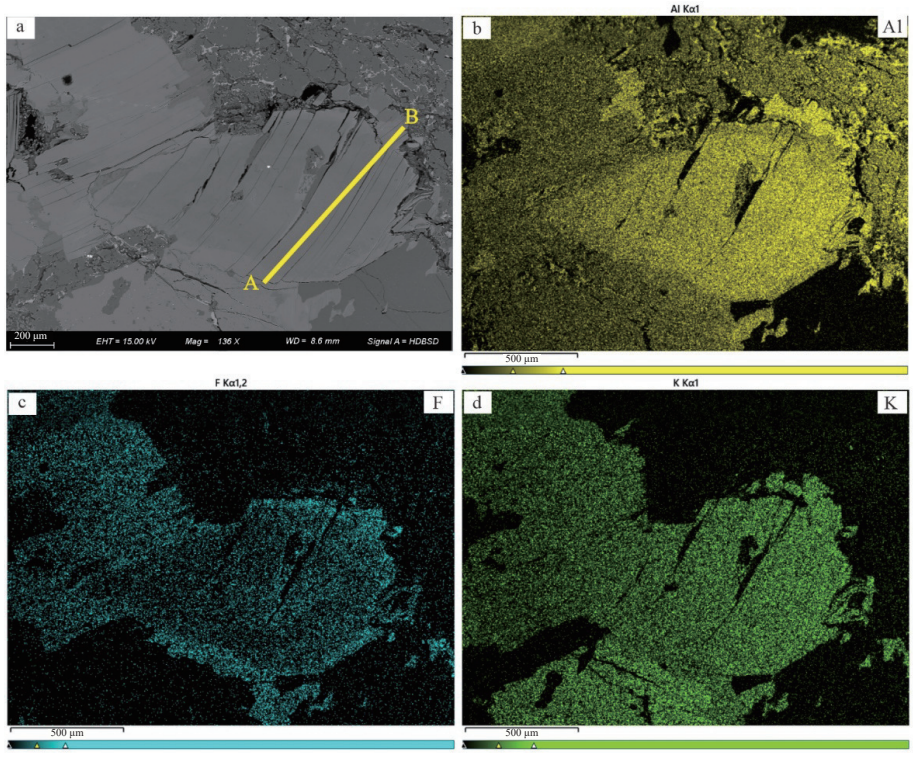

图 7　白水洞矿床矿石中锂云母能谱面扫描结果

Fig. 7　EDS mapping of Li-bearing muscovite from Baishuidong deposit

a.云母背散射图像; b.Al 元素; c.F 元素; d.K 元素. 能谱面扫描图下方的色柱: 右侧色彩指示高计数, 左侧色彩指示低计数

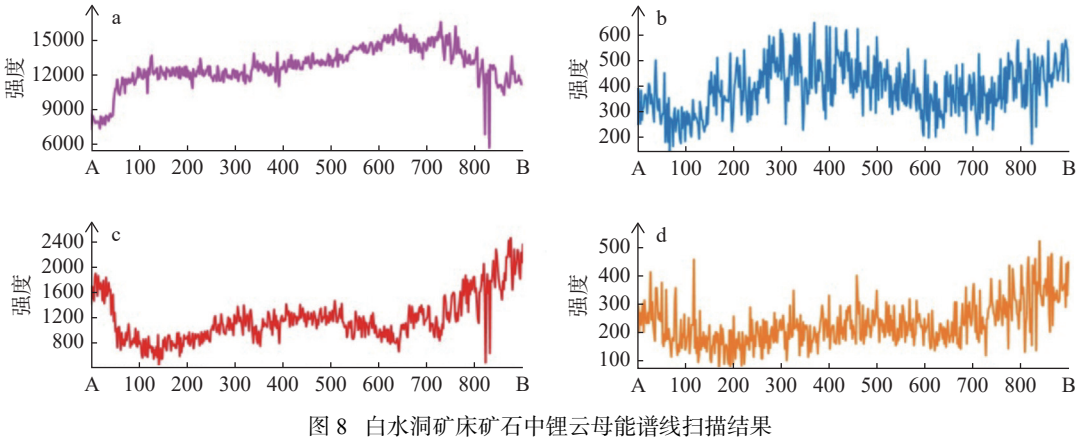

图 8　白水洞矿床矿石中锂云母能谱线扫描结果

Fig. 8　EDS line scanning of Li-bearing muscovite from Baishuidong deposit

a.Al 元素; b.Fe 元素; c.F 元素; d.Mn 元素; 能谱线扫描位置为图 7a 中的 A-B

表 3 白水洞锂矿床矿物化学成分分析结果（%）表

Table 3 Chemical compositions (%) of minerals from the Baishuidong lithium deposit

矿物	Li_2O	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2	MnO	TiO_2	TFeO	P_2O_5	F
磷锂铝石	9.545	-	-	0.013	0.001	35.742	0	0.014	0.006	0.001	51.315	2.007
	9.623	0.007	-	0.012	0.017	35.116	0.063	0.035	-	-	49.862	1.921
	9.587	0.042	-	0.012	-	36.064	0.024	-	-	-	50.907	1.759
云母	5.006	10.118	0.300	0.045	-	22.788	52.61	0.523	-	0.015	0.026	6.808
	5.086	10.081	0.307	0.019	-	23.377	52.411	0.673	0.011	0.035	0.009	6.889
	5.009	10.138	0.319	0.028	-	23.694	51.963	0.676	-	0.061	0.025	6.811
	0.874	10.102	0.483	0.058	0.001	32.790	45.611	0.405	0.044	1.978	0.023	1.825
	0.917	9.962	0.633	0.055	0.023	32.594	45.313	0.327	0.051	2.657	0.018	1.892
	0.821	9.719	0.549	0.040	-	30.151	42.607	0.354	0.071	2.944	0.027	1.742
	3.172	8.868	0.182	0.640	0.640	21.840	43.440	0.914	-	11.344	0.047	4.826
	3.146	9.227	0.198	0.680	0.680	21.777	43.537	0.940	-	10.967	0.021	4.796
	3.927	9.544	0.119	0.743	0.743	22.146	44.424	0.897	0.074	10.877	0.008	4.968
锂绿泥石	2.860	0.045	0.027	0.048	0.038	44.775	37.672	-	-	0.128	-	-
	2.860	0.071	0.026	0.003	0.043	43.625	37.346	0.026	-	0.134	-	-
	2.860	0.111	-	0.007	0.066	43.408	36.243	0.013	-	0.368	0.041	0.119
石英	0.008	0.036	0.124	0.015	0.006	0.147	100.802	-	-	0.017	0.008	-
	0.006	0.006	0.010	0.003	0.005	0.098	101.624	-	-	0.014	-	-
	0.003	0.006	0.010	-	-	0.055	101.736	0.018	-	-	0.024	-
钠长石	0.001	0.096	10.984	0.133	-	19.819	68.443	0.021	-	-	0.480	-
	0.002	0.109	11.222	0.162	-	19.647	68.245	-	0.010	-	0.440	-
	0.001	0.074	11.159	0.310	0.009	19.054	69.063	0.034	-	-	0.250	-
钾长石	0.008	16.363	0.274	-	-	17.752	64.254	-	0.001	0.018	0.028	-
	0.012	16.277	0.325	0.081	-	18.036	63.865	0.008	-	-	0.219	-
	0.005	16.158	0.251	-	-	17.317	62.466	-	-	0.021	0.060	-

注：由于电子探针不能检测Li元素，Li_2O含量由激光剥蚀等离子质谱(LA-ICP-MS)测试得到；锂绿泥石由于颗粒太小，Li_2O含量为根据标准矿物计算所得；“-”表示低于检出限.

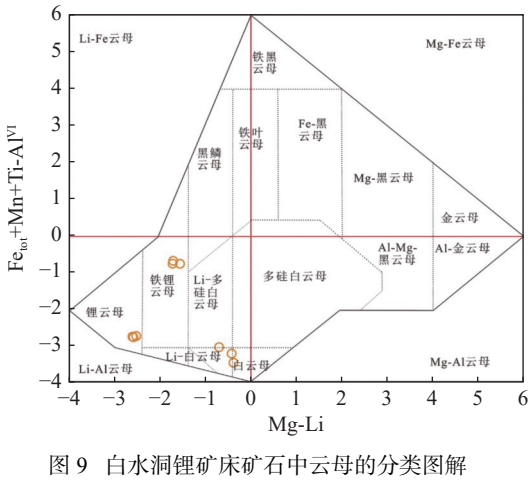

图 9 白水洞锂矿床矿石中云母的分类图解

Fig. 9 Classification diagram of micas from the Baishuidong lithium deposit

底图据 Tischendorf et al.(1997)

石中，或出现在钠长石、白云母的边缘（图 6a、6b）。从表 3 可以看出：磷锂铝石中 P_2O_5 含量均值为 50.695%，Al_2O_3 含量均值为 35.641%，Li_2O 含量均值为 9.585%，F 含量均值为 1.896%，其余元素含量较少。磷锂铝石中 F 含量远远小于理想含量（12.9%），因此矿石中的磷锂铝石为羟磷锂铝石（文中统一称为磷锂铝石）。

4.3.3 锂绿泥石矿物特征

锂绿泥石，LiAl（OH_6）{$Al_2[AlSi_3O_{13}(OH)_4]$}，理论上含 Li_2O 约 3.12%，属单斜品系，为二八面体型绿泥石，晶体呈假六方板状，常呈鳞片状集合体（周伟等，2024）。其为黏土型锂矿的主要锂矿物之一（凌坤跃等，2021；崔燚等，2022），在花岗岩型锂矿床中报道较少（Xu L et al., 2024）。白水洞矿区矿石中锂绿泥石为云母蚀变产物，其化学组成见表 3。锂绿泥石粒度普遍较小（小于 5 μm），主要分布于云母和钠长石的矿物间隙中（图 6c、6d），呈鳞片状集合体，在显微镜下较难观察到。

4.3.4 其他矿物

据表 2 和表 3，矿石中石英、钠长石、钾长石等其他矿物基本不含锂，对全岩锂含量的贡献极低。

5 讨论

5.1 云母型锂矿的工艺矿物学指标

由于矿石性质差异，不同类型锂矿石选矿工艺区别极大(梁冬云和李波, 2015)。中国是全球少有的卤水型、硬岩型和黏土型三类锂矿床均有的国家，锂主要从盐湖锂(盐湖型)、锂辉石(伟晶岩型)和锂云母(花岗岩型)中提取，其中盐湖锂资源储量占全国总量的 70%，硬岩型锂矿资源共占 30%(马哲和李建武, 2018; 王核等, 2022; 郭春丽等, 2024)。硬岩型锂矿资源主要分为伟晶岩型和花岗岩型两大类，其中的锂矿物主要有锂辉石、锂云母、磷铝锂石、透锂长石和铁锂云母(王汝成等, 2019; 陈振宇等, 2023;张遵遵等, 2023)。近年来，花岗岩型锂矿的资源量占比正稳步上升(王汝成等, 2019; 陈振宇等, 2023; 张遵遵等, 2023)。尽管花岗岩型锂矿存在品位低、选矿成本高的劣势，但凭借其规模大、可露天开采的优势，以及铷、铯等伴生资源的综合利用潜力，已成为我国参与国际锂资源竞争的重要对象(舒良树等, 2021; 吴福元等, 2023; 郭春丽等, 2024)。随着锂云母提锂技术的不断突破(贾贵斌等, 2024; 杨泓等, 2024; 张锦程等, 2024)，花岗岩型锂矿成为锂资源重要的类型之一，此类锂资源的高效开发利用有助于保障我国锂资源安全。

随着全球锂资源需求的不断增长，锂云母及其含锂矿物的提锂技术受到广泛的关注(何飞等, 2022)。选矿是提高云母品位和质量、实现高档次应用从而提升利用价值的重要前提。云母的选矿方法，一般根据矿石的矿物组成、赋存状态和嵌布特征来确定，利用云母与矿石中其他矿物的物理化学性质差异，从而找到一种合适的选矿工艺除杂提纯(方霖等, 2015)。影响花岗岩型锂矿价值的主要矿物学指标是“主要工业矿物”、“主要目的组分的平衡配分”及“目的矿物工艺粒度”三项(陈振宇等, 2023)。综合前述分析，影响白水洞锂矿选锂的因素有 3 个方面：①矿石平均品位 0.51%，主要工业矿物为锂白云母和锂云母，云母中 Li_2O 平均含量为 3.11%，达到可选指标(谢添等, 2022; 罗仙平等, 2023)；②矿石中云母普遍含铁，且具不同程度的磁性，可以通过强磁选预富集云母，提高云母精矿的锂含量，但也会丢失部分含铁较低的云母，降低了锂的回收率；③矿石中云母嵌布粒度较粗，在粗磨的条件下可获较高的解离度。精细开发利用该类锂资源，还需要开展更全面的选矿试验研究(谢添等, 2022; 罗仙平等, 2023)。白水洞矿床的矿物组成及锂赋存状态研究为合理确定选矿工艺提供了参考依据。

此外，对于白水洞矿床发现的磷锂铝石和锂绿泥石，由于总体含量低，暂时未能利用。但是磷锂铝石是已知的氧化锂含量最高的天然锂矿物，高于常见的锂辉石(Li_2O 含量 7%)。江西多地已有磷锂铝石矿物的报道(Huang X L et al., 2002; 王成辉等, 2022; 刘泽等, 2023)。锂绿泥石也是一种含锂矿物(Li_2O 理论值 2.86%)，多地也有锂绿泥石的报道(郭唯明等, 2019; 凌坤跃等, 2021)。已经有不少学者在探索磷锂铝石和锂绿泥石的资源化利用(黄光柱等, 2019; 孔令安等, 2022; 彭科淇等,2023; 胡德志, 2024)，未来将成为传统锂矿资源的重要补充，为市场提供稳定且不可或缺的锂资源供应力量。

5.2 对岩体演化和找矿勘查的启示

当稀有金属元素在花岗岩中富集并达到工业品位时，该花岗岩便为稀有金属花岗岩，形成花岗岩型稀有金属矿床(吴福元等, 2017)，该成岩成矿的过程多与高度分异演化的岩浆活动有关，通常在分异后期，稀有金属元素在岩体中富集(吴福元等, 2017)。在岩浆演化和稀有金属富集的过程中，云母被作为重要的指示矿物(王汝成等, 2019)。其中一些元素含量或者元素比值伴随着岩浆演化会发生变化，如 Li、Rb、Cs、F 等元素随着演化分异程度的增加而升高，花岗质岩浆的结晶分异作用会导致其在云母中含量升高，黑云母或白云母会向铁锂云母、锂白云母、锂云母的方向演化(王汝成等, 2019)，锂云母是高分异花岗岩重要的矿物标志(吴福元等, 2017)。磷锂铝石一般出现在稀有金属花岗岩和伟晶岩中，磷锂铝石的出现一般代表着岩浆晚期，同时也代表着体系中磷和锂的富集(黄小龙等, 2001; 徐遥辰等,

2019)，磷锂铝石的出现可以成为岩浆演化晚期标志(刘泽等, 2023)。白水洞矿床矿石中磷锂铝石和锂云母说明了甘坊岩体为高度演化的岩体，且在岩浆晚期体系中富集 P、Li 等组分。

江西发现多处与花岗岩相关的稀有金属矿床，如宜春 414 铌钽锂矿床，白水洞、大港、大湖塘等锂矿床(陈祥云等, 2023; 龚敏等, 2023; 徐喆等, 2024)。研究表明，这些矿床普遍具多期次成矿特征，成矿岩体为多期岩浆作用产物(吴福元等, 2017)。今后九岭地区找矿勘查工作中应关注不同时代岩体是否存在高分异现象，研究其是否存在锂矿化作用，拓展区域锂矿勘探范围。

6 结论

(1) 九岭复式岩体南缘白水洞锂矿床矿石中 Li_2O 平均品位为 0.51%，含锂矿物主要为锂云母、锂白云母，次为锂绿泥石、磷锂铝石，少量铁锂云母。云母中 Li_2O 含量变化较大(0.821%～5.086%)。

(2) 白水洞矿床磷锂铝石和锂云母的出现指示甘坊岩体为高度演化的岩体。今后在九岭地区的锂矿找矿勘查工作中应关注此类岩体。

参考文献：

陈祥云,吴俊华,唐维新,谢春华,龚 敏,王光辉,周雪桂,高原,周先军,邓茂春,李艳军,聂晓亮,赖长金,张福神,李仁泽,张家琪,魏俊浩.2023.赣西地区新探明巨量花岗岩型锂矿资源 [J]. 地球科学,48(10):3957-3960.

陈振宇,李建康,周振华,高永宝,李 鹏.2023.硬岩型锂-铍-铌-钽资源工艺矿物学评价指标体系 [J]. 岩石学报,39(7):1887-1907.

崔 燚,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 [J]. 岩石学报,38(7):2080-2094.

方 霖,郭珍旭,刘长淼,张坤.2015.云母矿物浮选研究进展 [J]. 中国矿业,24(3):131-136.

龚 敏,吴俊华,季 浩,徐敏林,况二龙,姜宝亮,李国猛,李艳军.2023.赣西大港花岗岩型锂矿床锂赋存状态及成岩成矿年代学 [J]. 地球科学,48(12):4370-4386.

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 [J]. 岩石学报,40(2):347-403.

郭唯明,王登红,李 鹏,李建康,舒志明,张文胜,李 超.2019.Sb-Li 组合:罕见的矿化组合及锂的赋存状态 [J]. 地质学报,93(6):1296-1308.

国家自然科学基金委员会,中国科学院. 2023. 中国学科发展战略·花岗岩成因与成矿机制 [M]. 北京:科学出版社.

何 飞,高利坤,饶 兵,沈海榕,彭科波,高广言,张 明.2022.从锂云母中提锂及综合利用的研究进展 [J]. 矿产综合利用,(5):82-89.

胡德志. 2024. 磷锂铝石中有价组元梯级提取新技术基础研究 [D]. 北京科技大学博士学位论文.

黄光柱,王 君,赵 强.2019.磷锂铝石制备碳酸锂的工艺研究 [J]. 磷肥与复肥,34(11):7-9.

黄兰椿,蒋少涌.2013.江西大湖塘富钨花岗斑岩年代学、地球化学特征及成因研究 [J]. 岩石学报,29(12):4323-4335.

黄小龙,王汝成,陈小明,刘昌实.2001.江西雅山富氟高磷花岗岩中的磷酸盐矿物及其成因意义 [J]. 地质论评,(05):542-550.

贾贵斌,宋小鹏,彭启行,喻天健.2024.锂云母提锂工艺的研究进展 [J]. 化工技术与开发,53(11):37-41+60.

孔令安,李正要,钟振宇,马巧焕.2022.黏土型锂矿硫酸铵焙烧—酸浸提锂 [J]. 有色金属工程,12(12):66-72.

李建康,刘喜方,王登红.2014.中国锂矿成矿规律概要 [J]. 地质学报,88(12):2269-2283.

梁冬云,李 波,编著. 2015. 稀有金属矿工艺矿物学 [M]. 北京:冶金工业出版社.

凌坤跃,温汉捷,张起钻,罗重光,顾汉念,杜胜江,于文修.2021.广西平果上二叠统合山组关键金属锂和铌的超常富集与成因 [J]. 中国科学:地球科学,51(6):853-873.

刘冰琪,于津海,蒋 威,蔡元峰.2023.赣北双桥山群变沉积岩的地球化学特征及与钨多金属成矿的关系 [J]. 地质学报,97(2):433-447.

刘丽君,王登红,刘喜方,李建康,代鸿章,闫卫东.2017.国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状 [J]. 中国地质,44(2):263-278.

刘 爽,王水龙,邢新龙,汪龙飞,张 也.2019.江西省锂矿资源分布、矿床类型及找矿前景 [J]. 资源环境与工程,33(2):195-198,207.

罗仙平,杨志兆,张永兵,胡 鑫,杨思琦,周贺鹏.2023.宜春锂云母矿矿物学特征与选矿原则工艺的确定 [J]. 稀有金属,47(10):1398-1411.

刘 泽,陈振宇,王成辉.2023.赣西北狮子岭花岗岩型锂-钽矿床的矿物学特征及成矿机制 [J]. 岩石学报,39(7):2045-2062.

马厚明,赖志坚,鄢新华,廖绍平,田立明.2021.江西吉泰盆地卤水锂矿床地球化学特征及远景分析 [J]. 地球学报,42(5):617-627.

马 雪,高天山,周效华,钱迈平,李 云,朱清波,靳国栋,洪文涛,余明刚.2019.江南造山带东段新元古代双桥山群沉积环境分析 [J]. 地层学杂志,43(03):295-305.

马 哲,李建武.2018.中国锂资源供应体系研究:现状、问题与建议 [J]. 中国矿业,27(10):1-7.

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$^{40}Ar/^{39}Ar$年代学研究 [J]. 矿物学报,42(3):285-294.

彭科淇,周瑞仙,钱 鑫.2023.某黏土型锂矿中锂浸出试验研究 [J]. 黄金,44(12):47-50.

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 [J]. 地质学报,95(10):3099-3114.

王成辉,王登红,刘善宝,许建祥,秦锦华,秦 燕,刘金宇,赵正,冯文杰,刘战庆,赵如意,郭春丽.2022.赣南石雷钨锡矿云英岩型锂矿找矿新发现及其区域成矿潜力分析 [J]. 中国地质,49(6):1834-1844.

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 [J]. 地质力学学报,28(5):743-764.

王 核,黄 亮,白洪阳,王堃宇,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 [J]. 大地构造与成矿学,46(5):848-866.

王秋舒.2016.全球锂矿资源勘查开发及供需形势分析 [J]. 中国矿业,25(3):11-15,24.

王汝成,谢 磊,诸泽颖,胡 欢.2019.云母:花岗岩-伟晶岩稀有金属成矿作用的重要标志矿物 [J]. 岩石学报,35(1):69-75.

吴福元,郭春丽,胡方涣,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 [J]. 岩石学报,39(1):1-36.

吴福元,刘小驰,纪伟强,王佳敏,杨 雷.2017.高分异花岗岩的识别与研究 [J]. 中国科学:地球科学,47(7):745-765.

吴学敏,周敏娟,罗喜成,周建廷.2016.江西西北部锂及稀有金属成矿条件及找矿潜力分析 [J]. 华东地质,37(04):275-283.

谢 添,杨思琦,杨志兆,张永兵,罗仙平.2022.江西宜丰圳口里低品位锂瓷石矿选矿试验研究 [J]. 有色金属科学与工程,13(6):113-118.

徐 净,侯文达,王力圆,赵太平,陈素余,田立明.2023.稀有金属花岗岩结晶分异过程中铷的富集与成矿:来自江西甘坊岩体的矿物学证据 [J]. 地质学报,97(11):3766-3792.

徐遥辰,卢 奂,饶 灿. 2019.新疆阿尔泰协库斯特伟晶岩中锂的矿物学行为及其启示 [J]. 高校地质学报,25(3):321-332.

徐 喆,张芳荣,张福神,楼法生,张 勇,潘家永,吴正昌,贺彬,周 渝,符海明.2024.江西硬岩型锂矿类型划分及其找矿启示 [J]. 华东地质,45(1):62-77.

许志琴,王汝成,赵中宝,付小方.2018.试论中国大陆“硬岩型”大型锂矿带的构造背景 [J]. 地质学报,92(6):1091-1106.

杨 泓,钟 巍,钟发平,赵佳慧,李 栋,张 磊,郭学益.2024.锂云母提锂技术研究进展 [J]. 过程工程学报,24(11):1251-1262.

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.2019.战略性关键金属矿产资源:现状与问题 [J]. 中国科学基金,33(2):106-111.

张锦程,张秀峰,谭秀民,伊跃军,张利珍.2024.锂云母选矿及提锂进展综述 [J]. 矿产保护与利用,2024,44(5):68-74.

张遵遵,卢友月,付建明,杨长明,于玉帅,夏 杰,谭娟娟,蔺东永.2023.南岭大义山地区锂铷矿化特征、赋存状态及找矿评价 [J]. 华南地质,39(2):333-348.

钟玉芳,马昌前,佘振兵,林广春,续海金,王人镜,杨坤光,刘强.2005.江西九岭花岗岩类复式岩基锆石 SHRIMP U-Pb 年代学 [J]. 地球科学,(6):685-691.

周建廷,王国斌,何淑芳,范爱春.2011.江西宜丰地区甘坊岩体成岩成矿作用分析 [J]. 东华理工大学学报 (自然科学版),34(4):345-351+358.

周 伟,张嘉升,祁晓鹏,徐 磊,杨 杰.2024.X 射线衍射和 TIMA 研究陕南镇巴地区富锂黏土岩的矿物组成及锂的赋存状态 [J]. 岩矿测试,43(1):76-86.

Huang X L, Wang R C, Chen X M, Hu H, Liu C S. 2002. Vertical variations in the mineralogy of the Yichun topaz–lepidolite granite, Jiangxi Province, southern China[J]. The Canadian Mineralogist, 40(4): 1047-1068.

Li X H, Li W X, Li Z X, Lo C H, Wang J, Ye M F, Yang Y H. 2009. Amalgamation between the Yangtze and

Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMPU-Pb zircon ages, geochemistry and Nd-Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks[J]. Precambrian Research, 174: 117-128.

Ouyang Y P, Zeng R L, Meng D L, Li T F, Wei J. 2023. Geochronology and geochemistry characteristics of Dongcao muscovite granite in the Yifeng area, Jiangxi Province, China: Implications for petrogenesis and mineralization[J]. Minerals, 13(4): 503.

Rong W, Zhang S B, Zheng Y F. 2017. Back-reaction of peritectic garnet as an explanation for the origin of mafic enclaves in S-type granite from the Jiuling batholith in South China[J]. Journal of Petrology, 58(3): 569-598.

Sun J J, Shu L S, Santosh M, Wang L S. 2017. Neoproterozoic tectonic evolution of the Jiuling terrane in the central Jiangnan orogenic belt (South China): Constraints from magmatic suites[J]. Precambrian Research, 302: 279-297.

Tischendorf G, Gottesmann B, Förster H J, Trumbull R B. 1997. On Li-bearing micas: estimating Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation[J]. Mineralogical Magazine, 61(409): 809-834.

Xie L, Liu Y, Wang R C, Hu H, Che Xu D, Xiang L. 2019. Li–Nb–Ta mineralization in the Jurassic Yifeng granite-aplite intrusion within the Neoproterozoic Jiuling batholith, south China: A fluid-rich and quenching ore-forming process[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 185: 104047.

Xu L, Wang S L, Xu J B, Wang H, Chao W W, Lu W N, Zhou B, Yang S, Hu N N. 2024. Lithium occurrences and enrichment of granite regolith-hosted Li deposits in Jiangxi Province, South China: An example of the Xikeng Li deposit[J]. Ore Geology Reviews, 169: 106104.

Xu Z, Zhang Y, Pan J L, Zhang F S, Xia F, Wu Z C, Han S C, Liu G Q, Zhong F J, Zhang X T, Liu Y, Yan J, Zhang F R. 2023. In situ LA–ICP–MS analyses of muscovite: Constraints on granite-type Li mineralization in northwestern Jiangxi, South China[J]. Ore Geology Reviews, 156: 105402.