

# 贵州铝土矿含矿岩系中锂的分布特征及富集机理

金中国<sup>1)</sup>, 郑明泓<sup>1)</sup>, 刘玲<sup>\*1)</sup>, 黄智龙<sup>2)</sup>, 叶霖<sup>2)</sup>, 吴莎<sup>3)</sup>, 曾道国<sup>1)</sup>, 谷静<sup>2)</sup>

1) 贵州省有色金属和核工业地质勘查局, 贵州贵阳, 550005;

2) 中国科学院地球化学研究所, 贵州贵阳, 550081; 3) 贵州大学资源与环境学院, 贵州贵阳, 550025

**内容提要:** 锂是我国关键矿产和高新技术产业发展的战略性资源之一。贵州铝土矿资源丰富, 含铝岩系分布广, 勘查发现铝土矿(岩)中伴生大量的锂资源。研究认为, 全省含铝岩系中 Li 含量高, 变化范围大( $0.55 \times 10^{-6} \sim 2725.03 \times 10^{-6}$ ), 平面上 Li 含量总体呈北东(务正道成矿区)、南西(修文-清镇成矿区)高, 中间(播州-瓮安成矿区)低的分布态势; 剖面上 Li 主要富集在矿系上部的致密状铝土岩(矿)中, Li 含量一般  $> 500 \times 10^{-6}$ , 矿系中土状铝土矿(岩) Li 含量一般  $< 30 \times 10^{-6}$ ; 气候温湿、风化及淋滤作用强的陆相湖泊沉积环境, 有利于高岭石为主的黏土矿物形成及  $\text{Li}^+$  与  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  发生类质同象, 或被吸附进入黏土矿物层间构造同迁移同富集, Li 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量呈正相关关系; 成岩成矿后的次生改造阶段, 古地磁测量及 CIA 显示为炎热潮湿的氧化环境, 随着风化作用及脱硅富铝作用增强, 大量 Li、 $\text{SiO}_2$  流失, 呈现 Li 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量呈负相关、与  $\text{SiO}_2$  含量呈正相关关系, Li 的富集与其地球化学性质、古沉积环境及后生改造作用密切相关; Li 主要来源于高背景的下伏地层, 与铝土矿成矿母岩一致, 部分还可能来源于上覆富 Li 地层; 含铝岩系中 Li 富集特征显示, 锂具有较好的找矿潜力。

**关键词:** 锂资源; 含铝岩系; 分布特征; 富集机理; 找矿潜力; 贵州

锂是最轻的金属, 是中国未来战略性新兴产业发展不可或缺的关键矿产之一(王登红, 2019)。锂也是唯一能与氮在室温下反应生成氮化锂( $\text{Li}_3\text{N}$ )的碱金属, 被称为“21 世纪绿色高能金属”“白色石油”(王秋舒等, 2019)。世界上锂矿床成因类型主要有卤水型、花岗伟晶岩及花岗岩型、沉积型三种, 储量分别占 82%、12% 和 6%(钟海仁等, 2019)。沉积型锂资源作为一种潜在的资源, 其产出多与黏土岩、湖泊沉积物等有关, 是目前尚不具备独立工业开采价值却具有市场潜力的资源(Kesler et al., 2012; Benson et al., 2017; 于枫等, 2019)。近 10 年来, 随着锂资源广泛应用于新能源领域, 国内外需求爆发式增长, 引起专家学者的高度关注, 并对我国锂资源分布、勘查开发及利用现状, 成矿规律、成因机理等进行了大量研究, 取得了丰硕成果(王登红等, 2013, 2019; 李建康, 2014; 刘丽君等, 2017; 翟明国

等, 2019; 温汉捷等, 2020a)。

贵州铝土矿资源丰富, 现保有资源储量 11.26 亿 t(贵州省自然资源公报, 2020), 含铝岩系分布范围大, 并伴生大量的 Li、Ga、Sc、REE 等三稀元素, 在修文一息烽一带的铝土矿中还发现了独立铀矿物及锆元素超常富集(叶霖等, 2008; 龙永珍等, 2019; 龙珍等, 2021)。近年来, 有关专家学者对贵州不同铝土矿区锂的赋存特征、富集规律进行了不同程度研究, 发表了较多研究成果, 进一步丰富和发展了沉积型锂矿成矿理论(金中国等, 2015a, 2018, 2019; 刘平等, 2016; 梁厚鹏, 2018; 崔焱等, 2018; 严爽, 2020; 范宏鹏等, 2021; 龙珍等, 2021), 本文针对贵州含铝岩系中锂的分布特征、富集机理、资源潜力及综合利用进行探讨, 旨在总结分布规律, 促进在铝土矿勘查中进一步加强对共伴生资源的系统评价, 扩大锂、稀土等战略资源找矿空间。同时推动共伴生

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 U1812402)、国家科技支撑计划重点项目(编号 2011BAB04B04)和贵州省优秀科技教育人才省长专项资金项目(黔科教办[2008]02 号)联合资助的成果。

收稿日期: 2021-11-29; 改回日期: 2022-04-08; 网络发表日期: 2022-05-17; 责任编辑: 范宏瑞; 责任编辑: 周健。

作者简介: 金中国, 男, 1965 年生。研究员, 博士生导师, 主要从事矿产勘查与研究。E-mail: gzkjygz@sina.com。

\* 通讯作者: 刘玲, 女, 1983 年生。高级工程师, 主要从事矿产研究。E-mail: 71313369@qq.com。

引用本文: 金中国, 郑明泓, 刘玲, 黄智龙, 叶霖, 吴莎, 曾道国, 谷静. 2023. 贵州铝土矿含矿岩系中锂的分布特征及富集机理. 地质学报, 97(1): 69~81. doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022225.

Jin Zhongguo, Zheng Minghong, Liu Ling, Huang Zhilong, Ye Lin, Wu Sha, Zeng Daoguo, Gu Jing. 2023. Distribution characteristics and enrichment mechanism of lithium in bauxite series in Guizhou Province. Acta Geologica Sinica, 97(1): 69~81.

资源综合利用和评价指标确定的研究,将锂资源尽快转变为高效利用、支撑新兴产业发展的重要矿产。

磁研究显示,早石炭世贵阳附近为北纬 10°±(王俊达等,1998),播州附近为北纬 8°2'±(刘巽锋,1990),

### 1 贵州铝土矿含矿岩系特征

#### 1.1 含矿岩系分布及产出特征

贵州是我国重要的铝土矿成矿区和铝工业基地,铝土矿床主要集中分布于中部—北部的 4 个区域(图 1)。铝土矿含矿岩系主要为下石炭统九架炉组和下二叠统大竹园组,其次为下石炭统—上泥盆统丰源层,仅见于花溪高坡—龙里草原一带。下石炭统九架炉组广泛分布于黔中清镇—黔北播州地区,是贵州分布面积最大、发现铝土矿最早、开发历史最长、探明铝土矿床最多的层位;下二叠统大竹园组分布于黔北务正道地区和黔东凯里—黄平—福泉地区,是目前贵州探明保有铝土矿资源储量最多的层位;丰源层产出矿床少、规模小(贵州省地质调查院,2019)。本次研究主要针对下石炭统九架炉组和下二叠统大竹园组,产于寒武系娄山关组—上石炭统黄龙组的古侵蚀面之上,与上覆及下伏地层均呈假整合接触,主要特征见表 1。

#### 1.2 含矿岩系形成环境及铝土矿床成因

针对贵州含铝岩系形成环境,已有众多学者进行了研究(图 1)。黔中清镇—黔北播州地区九架炉组主要为湖泊沉积,局部见湖泊三角洲相(贵州省地质调查院,2019);龙里—花溪丰源层及凯里—黄平地区大竹园组主要形成于滨湖或湖沼环境(陈庆刚等,2016),务正道地区大竹园组主要为滨浅湖相沉积(金中国等,2013;刘辰生等,2015a,2015b);古地

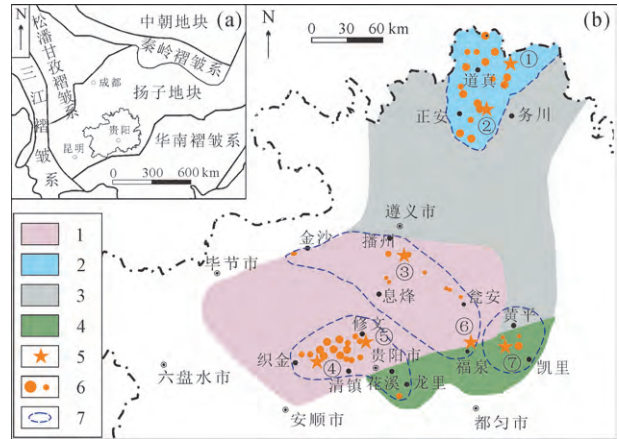


图 1 贵州大地构造位置(a)和铝土矿含矿岩系及其岩相分布图(b)(据贵州省地质调查院,2019 年修编)

Fig. 1 Tectonic location (a), bauxite ore-bearing rock series and facies distribution (b) of Guizhou Province (modified after Guizhou Geological Survey Institute, 2019)  
1—湖泊相; 2—滨浅湖相; 3—铝土矿无矿区; 4—浅湖或湖沼相; 5—典型铝土矿床位置; 6—铝土矿床(点); 7—铝土矿分布区;  
①—务川瓦厂坪矿床; ②—正安新木—晏溪矿床; ③—播州后槽矿床; ④—清镇周刘彭矿床; ⑤—修文小山坝矿床; ⑥—福泉高洞矿床; ⑦—凯里苦李井矿床  
1—lacustrine facies; 2—littoral and shallow lacustrine facies; 3—no bauxite mining area; 4—shallow lake or lacustrine facies; 5—location of typical bauxite deposits; 6—bauxite deposits (dot); 7—distribution area of bauxite; ①—Wuchuan Wachangping deposit; ②—Zhengan Xinmu-Yanxi deposit; ③—Bozhou Houchao deposit; ④—Qingzhen Zhouliupeng deposit; ⑤—Xiwen Xiaoshanba deposit; ⑥—Fuquan Gaodong deposit; ⑦—Kaili Kulijing deposit

表 1 贵州铝土矿含矿岩系主要特征

Table 1 Main characteristics of bauxite bearing rock series in Guizhou Province

含铝层位	分布区域	上覆地层及主要岩性	下伏地层及主要岩性	铝土矿系主要岩性	矿系/矿体厚度(m)	矿体形态
丰源层 (FYC)	黔中龙里—花溪	下石炭统祥摆组石英砂岩、页岩	上泥盆统者王组灰岩,下石炭统革老河组白云岩	上部为铝质黏土岩,中部为铝土矿(岩),下部为含铁质、铝土质黏土岩	0~5.47/ 0.71~3.37	层状、似层状
下石炭统九架炉组 (C <sub>1j</sub> )	黔中清镇—修文	下石炭统摆佐组白云岩,中二叠统梁山组碳质页岩、砂岩	寒武系明心寺组页岩、金顶山组石英砂岩、清虚洞组至娄山关组白云岩、白云质泥岩	上部为含黄铁矿黏土岩,中部为铝土矿(岩),下部由铁质黏土岩、赤铁矿组成	0~31.18/ 1~16.19	层状、似层状
	黔北播州—瓮安	中二叠统梁山组页岩、砂岩,栖霞组灰岩	中上寒武统娄山关组白云岩,下奥陶统湄潭组页岩、桐梓组粉砂质页岩	上部为含铁质铝土矿(岩)、黏土岩,中部为铝土矿(岩),下部主要为含黄铁矿黏土岩	0.40~109.90/ 0~83.35	似层状、透镜状、漏斗状
下二叠统大竹园组 (P <sub>1d</sub> )	黔北务川—正安—道真	上二叠统梁山组碳质页岩	上石炭统黄龙组灰岩或下志留统韩家店组页岩	中上部为铝质黏土岩、铝土矿(岩)组成,下部为含铁绿泥石岩、黄铁矿黏土岩	0.49~14.52/ 0~11.88	层状、似层状
	黔东凯里—黄平	上二叠统梁山组碳质页岩或栖霞组灰岩	上泥盆统高坡场组白云质灰岩和者王组灰岩	中上部为铝质黏土岩、铝土矿(岩),下部为含黄铁矿黏土岩,见菱铁矿、赤铁矿透镜体	0~31.45/ 0.50~28.80	层状、似层状

认为古气候主要为低纬度炎热潮湿、雨量充沛、植被发育、微生物活动强的亚热—热带环境(廖士范, 1989;高道德,1996;刘平等,2014);在务正道地区与黔中地区气候基本相同,但存在间断性干旱气候(余文超等,2014;杜远生等,2014;金中国等,2018)。综上所述认为,贵州铝土矿含矿岩系主要形成于炎热湿润的气候条件和陆相沉积环境,矿床成因属古风化壳沉积型。

## 2 采样及分析

本次研究对务川瓦厂坪、正安新木—晏溪、清镇周刘彭、凯里苦李井和福泉高洞 5 个矿床的含矿岩系采集样品 114 件、下伏层位 34 件,总计 148 件。样品由中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室测试,其中微量元素采用电感耦合等离子质谱仪分析,常量元素采用 X 射线荧光光谱仪分析。另收集了修文小山坝(叶霖等,2008)、播州后槽(刘平等,2016)两个矿床的 114 件样品资料。

## 3 锂的分布特征

### 3.1 Li 在含矿岩系中的含量及分布特征

表 2 显示, Li 在含铝岩系中主要有以下特征:

(1)各成矿区含铝岩系中 Li 富集程度高,平均含量远大于地壳丰度值  $20 \times 10^{-6}$  (刘英俊等, 1986)、世界黏土岩平均值  $57 \times 10^{-6}$  (Turekian et al., 1961)和全国沉积岩 Li 平均值  $31.45 \times 10^{-6}$  (王学求等, 2020),其中以务正道铝土矿成矿区最为显著,平均含量为  $493.09 \times 10^{-6}$ 。

(2)各矿床中 Li 含量分布极不均匀,变化较大 ( $0.55 \times 10^{-6} \sim 2725.03 \times 10^{-6}$ ),最大相差 4955 倍,如正安新木—晏溪矿床 Li 含量为  $0.55 \times 10^{-6} \sim 1359.87 \times 10^{-6}$ ,相差 2470 倍;务川瓦厂坪矿床 Li 含量为  $1.36 \times 10^{-6} \sim 2725.03 \times 10^{-6}$ ,相差 2004 倍;清镇周刘彭矿床 Li 含量为  $0.26 \times 10^{-6} \sim 634 \times 10^{-6}$ ,相差 2438 倍;修文小山坝和凯里苦李井矿床分别相差 295 倍和 149 倍。

(3)各矿床含铝岩系中 Li 含量普遍具有上部铝土质黏土岩 > 中部铝土矿(岩) > 下部含铁绿泥石岩、铝土质黏土岩的特征,以务川瓦厂坪矿床最明显,上部铝土质黏土岩中 Li 平均含量达  $1132.26 \times 10^{-6}$ 。

(4)务正道铝土矿成矿区 Li 含量在平面上总体具有北高南低、西高东低的特点(金中国等, 2019),且含矿岩系下伏韩家店组的 Li 含量(最大值  $509 \times$

$10^{-6}$ ,均值  $113.20 \times 10^{-6} \sim 134.12 \times 10^{-6}$ )明显高于其他铝土成矿区下伏相应层位,也高于世界页岩 Li 平均含量  $60 \times 10^{-6}$  (Turekian et al., 1961);瓦厂坪矿床中黄龙组灰岩 Li 背景值也较高(最大值  $282 \times 10^{-6}$ ,均值  $75.63 \times 10^{-6}$ ),高于世界碳酸盐岩的 Li 平均含量  $5 \times 10^{-6}$  (Turekian et al., 1961)。

(5)剖面上,在务川瓦厂坪、正安新木—晏溪、凯里苦李井矿床含矿岩系中, Li 含量均具有从上至下逐渐降低的变化趋势(瓦厂坪:  $1132.26 \times 10^{-6} \rightarrow 465.15 \times 10^{-6} \rightarrow 364.35 \times 10^{-6}$ ,新木—晏溪:  $402.94 \times 10^{-6} \rightarrow 356.26 \times 10^{-6} \rightarrow 183.99 \times 10^{-6}$ ,苦李井:  $458.00 \times 10^{-6} \rightarrow 291.14 \times 10^{-6} \rightarrow 257.15 \times 10^{-6}$ ),铝土矿(岩)石类型上, Li 含量具有致密块状铝土矿(岩) > 豆鲕状铝土矿(岩) > 碎屑状铝土矿(岩) > 土状—半土状铝土矿(岩)特征(金中国等, 2018, 2019)。致密块状铝土矿(岩) Li 含量一般  $> 500 \times 10^{-6}$ ,土状—半土状铝土矿(岩) Li 含量一般  $< 30 \times 10^{-6}$ 。

### 3.2 Li 与 $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $TiO_2$ 等主量元素的相关性

从图 2 看出,除凯里苦李井矿床 Li 与  $Al_2O_3$ 、 $TiO_2$  呈弱正相关性外(图 2K-a、K-d),其余各矿床中, Li 均与  $Al_2O_3$ 、 $TiO_2$  呈负相关性(图 2G-a、G-d、WX-a、WX-d、Z-a、Z-d),与  $SiO_2$  呈正相关性(图 2G-b、Z-b、WX-b),以福泉高洞矿床、务川瓦厂坪矿床和正安新木—晏溪矿床较显著(图 2G-a、G-b、G-d、WX-a、WX-b、WX-d);而 Li 与  $Fe_2O_3$  主要呈弱负相关性(图 2G-c、K-c、WX-c),仅清镇周刘彭矿床中 Li 与  $Fe_2O_3$  呈明显的正相关性(图 2Z-c),与黔中铝土矿成矿区常见含铁铝土矿产出有关。此外,全省典型铝土矿床中,  $K_2O+Na_2O$ 、 $CaO$  与 Li 分别呈弱负相关性和弱正相关性(图 3),各矿床含矿岩系中,  $K_2O$ 、 $Na_2O$  和  $CaO$  平均含量均较低,  $K_2O$   $0.07\% \sim 2.94\%$  (均值  $1.23\%$ )、 $Na_2O$   $0.03\% \sim 0.81\%$  (均值  $0.23\%$ )、 $CaO$   $0.08\% \sim 1.93\%$  (均值  $0.48\%$ ),均值总体呈  $K_2O > CaO > Na_2O$  的特征和  $K_2O/Na_2O$  变化范围大 ( $1.00 \sim 75.67$ , 均值  $21.21$ ) 的特点,显示黏土矿物吸附能力与金属离子半径大小呈正相关关系 ( $K^+ 0.133 \text{ nm} > Ca^{2+} 0.099 \text{ nm} > Na^+ 0.097 \text{ nm}$ )。同时,  $Na_2O$  含量(均值  $0.23\%$ )、 $K_2O/Na_2O$  与海相沉积黏土岩(含量约  $3\%$ )、 $K_2O/Na_2O$  ( $0.5 \sim 0.9$ ) 差异大(刘英俊等, 1986),进一步证实贵州全省含铝岩系主要为陆相沉积环境。

图 4 显示,当  $Al_2O_3 < 50\%$ 、 $SiO_2 < 30\%$ 、 $TiO_2 < 2\%$  时,与 Li 含量呈正相关关系(图 4a~c),与崔

焘等(2018)研究黔中地区九架炉组中 Li 的富集规律一致;当  $Al_2O_3 > 50\%$ 、 $SiO_2 > 30\%$ 、 $TiO_2 > 2\%$  时,与 Li 呈负相关关系明显(图 4d~f)。Li 含量  $> 500 \times 10^{-6}$  的样品,其  $Al_2O_3/SiO_2$ 、CIA 分别集中在 0.8~6.0 和 95~98 之间(图 5a、b),当  $Al_2O_3/SiO_2 > 8$ 、 $CIA > 98$  时,Li 含量迅速降低。

## 4 讨论

### 4.1 锂的物质来源

崔焘等(2018)、温汉捷等(2020a)研究指出,黔中地区下石炭统九架炉组及滇中盆地下二叠统倒石头组中锂的超常富集与下伏碳酸盐岩的风化分解、主量元素的大幅度流失有关;凌坤跃等(2021)通过对广西平果上二叠统合山组锂的超常富集机理研究

认为,Li 赋存于含铝岩系上部的黏土岩中,主要以锂绿泥石矿物存在。锂绿泥石可能由成岩过程中伊利石、叶腊石等黏土矿物与富 Li、Mg 滨海浅层地下卤水或孔隙水/地下水反应形成,铝土矿成矿的直接母岩为二叠纪峨眉山玄武岩或长英质岩,而黏土岩则主要与古特提斯二叠纪岩浆弧相关的过铝质或中等分异酸性岩有关。由含铝岩系的形成地质背景、成矿时代、物质来源及 Li 富集特征得出,滇中地区和贵州全省含铝岩系都形成于隆升构造运动背景、陆相沉积环境(金中国等 2013;陈庆刚等,2016;贾永斌等,2020),成矿直接母岩均为沉积岩,Li 主要富集在铝土岩或铝土质黏土岩中,均未见锂矿物,仅铝土矿成矿时代(滇中与黔北务正道、凯里—黄平地区铝土矿成矿时代接近)、成矿母岩时代有差异,而

表 2 贵州典型矿床常量元素(%)及锂元素含量( $\times 10^{-6}$ )

Table 2 Contents of major elements (%) and lithium elements ( $\times 10^{-6}$ ) of typical deposits in Guizhou Province

名称	取样位置及性质/件数	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$Fe_2O_3$	$K_2O$	$Na_2O$	$CaO$	$TiO_2$	Li	CIA
瓦厂坪矿床	$P_1d^3$ 铝土岩/9	31.40~51.40 (42.45)	27.07~47.30 (37.94)	0.60~5.05 (2.37)	0.18~1.72 (0.52)	0.28~1.29 (0.66)	0.15~1.53 (0.68)	0.78~1.76 (1.14)	208~2725.03 (1132.26)	90.51~97.56 (96.16)
	$P_1d^2$ 铝土矿/12	40.00~75.86 (60.23)	4.10~27.04 (15.36)	0.82~16.27 (4.79)	0.02~0.76 (0.20)	0.12~1.03 (0.43)	0.20~1.70 (0.78)	1.18~3.18 (2.11)	1.36~2004.65 (465.15)	94.65~99.64 (98.19)
	$P_1d^1$ 绿泥石岩/11	25.03~38.39 (33.64)	24.79~43.60 (38.76)	1.31~38.29 (12.34)	0.17~5.89 (1.01)	0.32~1.20 (0.67)	0.3~1.59 (1.07)	0.31~1.16 (0.77)	36.16~910.88 (364.35)	78.80~97.83 (93.65)
	$P_1d$ 均值/32	25.03~75.86 (46.09)	4.10~47.30 (29.76)	0.6~32.89 (6.70)	0.02~5.89 (0.57)	0.12~1.29 (0.58)	0.15~1.70 (0.88)	0.31~3.18 (1.39)	1.36~2725.03 (643.31)	78.80~99.64 (96.06)
	$C_2h$ 灰岩/8	0.12~1.88 (0.48)	0.27~4.87 (1.71)	0.23~5.58 (1.43)	0.02~0.08 (0.04)	0.06~0.26 (0.17)	48.03~55.74 (53.36)	0.02~0.08 (0.04)	0.59~281.59 (75.63)	
	$S_1hj$ 页岩/7	14.14~24.00 (18.97)	58.58~66.16 (61.86)	6.47~7.88 (7.41)	0.30~4.53 (2.44)	0.33~0.84 (0.51)	1.18~2.65 (1.68)	0.25~0.47 (0.33)	9.65~509.88 (113.20)	
正安新木晏溪矿床	$P_1d^3$ 铝土岩/2	32.68~36.56 (34.62)	39.23~43.96 (41.59)	3.75~7.00 (5.38)	3.56~4.72 (4.14)	0.71~1.18 (0.95)	0.17~1.93 (1.05)	0.57~0.89 (0.73)	258.00~547.88 (402.94)	84.66~86.72 (85.69)
	$P_1d^2$ 铝土矿/18	44.75~77.50 (66.69)	1.60~26.63 (9.68)	0.71~10.68 (4.05)	0.04~1.34 (0.45)	0.16~1.73 (0.80)	0.11~1.34 (0.49)	0.86~3.25 (2.71)	0.55~1359.87 (356.26)	95.15~99.53 (97.71)
	$P_1d^1$ 铝土质页岩/7	26.20~38.43 (32.71)	24.89~43.85 (38.99)	2.65~33.43 (10.79)	0.24~4.67 (2.41)	0.36~1.21 (0.80)	0.15~0.889 (0.48)	0.38~1.05 (0.76)	0.72~629.93 (183.99)	84.36~95.74 (89.96)
	$P_1d$ 均值/27	26.20~77.50 (55.51)	1.60~43.96 (19.64)	0.71~33.43 (5.90)	0.04~4.72 (1.26)	0.16~1.73 (0.81)	0.11~1.93 (0.53)	0.38~3.25 (2.06)	0.55~1359.87 (315.06)	84.36~99.53 (94.61)
	$C_2h$ 灰岩/3	0.10~1.20 (0.47)	0.24~1.85 (0.91)	0.21~0.42 (0.30)	0.03~0.17 (0.10)	0.18~0.23 (0.20)	53.62~55.27 (54.65)	0.03 (0.04)	0.60~3.23 (1.91)	
	$S_1hj$ 泥岩、页岩/7	15.16~20.68 (17.44)	51.66~66.27 (59.52)	4.17~8.55 (5.54)	1.85~3.80 (2.87)	0.25~0.91 (0.59)	0.49~2.79 (1.44)	0.20~0.36 (0.31)	1.25~586 (133.96)	
清镇周刘彭矿床	$C_1jj^3$ 铝土岩/3	35.70~39.90 (37.23)	24.70~39.20 (34.33)	1.15~14.35 (6.09)	4.78~8.71 (7.02)	0.07~0.09 (0.08)	0.31~0.35 (0.33)	1.37~2.21 (1.75)	95.9~553 (291.3)	78.51~87.89 (82.70)
	$C_1jj^2$ 铝土矿/9	43.26~76.91 (60.14)	2.27~23.50 (12.01)	0.31~21.20 (12.96)	0.39~5.13 (2.35)	0.03~0.08 (0.05)	0.09~0.59 (0.23)	1.84~3.28 (2.52)	0.26~634 (120.01)	91.69~99.35 (96.40)
	$C_1jj^1$ 铁质铝土岩/1	37.60	12.00	14.70	2.00	0.06	5.28	1.84	146.00	94.66
	$C_1jj^1$ 赤铁矿/4	7.55~29.73 (17.07)	9.15~39.10 (18.23)	31.90~56.00 (45.15)	0.04~0.55 (0.22)	0.01~0.03 (0.02)	0.79~5.52 (3.04)	0.38~2.21 (1.01)	64.60~538 (236.65)	97.99~99.35 (98.71)
	$C_1jj$ 均值/17	7.55~76.91 (43.02)	2.27~39.20 (16.51)	0.31~56.00 (15.28)	0.04~8.71 (2.74)	0.01~0.09 (0.04)	0.09~5.52 (1.93)	0.38~3.28 (1.88)	0.26~634 (173.69)	78.51~99.35 (93.47)
	$C_{3-4ls}$ 白云岩/1	1.51	1.12	3.95	0.10	0.01	28.70	0.06	37.90	

续表 2

名称	取样位置及性质/件数	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Li	CIA
修文小山坡矿床	土状铝土矿/4	70.04~76.58 (74.10)	4.09~9.26 (6.01)	0.24~0.77 (0.52)	0.03~0.21 (0.09)	0.05~0.17 (0.10)	0.20~1.12 (0.65)	3.62~4.10 (3.81)	2.61~8.62 (4.70)	99.22~99.82 (99.62)
	其他铝土矿/3	51.13~71.37 (61.42)	9.61~19.60 (13.24)	0.26~20.28 (6.70)	0.04~0.17 (0.09)	0.04~0.17 (0.09)	0.15~0.63 (0.36)	1.95~3.76 (3.08)	69.68~421.16 297.51	98.95~99.86 (99.47)
	铝土质黏土岩/6	30.30~51.95 (38.87)	30.26~47.27 (42.20)	0.50~6.99 (2.41)	0.04~0.07 (0.05)	0.05~0.08 (0.06)	0.14~0.56 (0.29)	1.12~2.14 (1.64)	204.02~770.87 (497.51)	99.34~99.68 (99.53)
	C <sub>1</sub> jj 均值/13	30.30~76.58 (54.92)	4.09~47.27 (24.38)	0.24~20.28 (2.89)	0.03~0.21 (0.07)	0.04~0.17 (0.08)	0.14~1.12 (0.43)	1.12~4.10 (2.64)	2.61~770.87 (266.53)	98.95~99.86 (99.55)
	C <sub>3-4</sub> ls 强风化白云岩/4	1.82~6.77 (4.15)	1.99~7.71 (4.94)	0.65~4.78 (2.33)	0.03~0.25 (0.13)	0.06~0.12 (0.09)	39.14~48.24 (44.29)	0.02~0.12 (0.08)	2.22~31.60 (13.29)	82.89~95.90 (91.06)
凯里苦李井矿床	P <sub>1</sub> d <sup>3</sup> 铝土岩/2	42.69~48.40 (45.55)	28.30~33.70 (33.00)	1.08~5.08 (3.08)	0.02~0.21 (0.12)	0.03~0.06 (0.05)	0.07~0.35 (0.21)	1.98~2.03 (2.01)	288~628 (458)	98.64~99.71 (99.17)
	P <sub>1</sub> d <sup>2</sup> 铝土矿(岩)/16	34.79~79.80 (52.50)	0.75~44.70 (27.48)	0.47~5.69 (1.74)	0.01~1.18 (0.14)	0.03~0.06 (0.05)	0.02~0.20 (0.08)	1.36~3.63 (2.29)	4.21~556 (291.14)	96.45~99.89 (99.39)
	P <sub>1</sub> d <sup>1</sup> 铁质黏土岩/8	20.56~38.90 (32.10)	22.00~44.80 (35.15)	0.98~33.90 (11.51)	0.01~1.70 (0.58)	0.02~0.05 (0.03)	0.04~0.25 (0.09)	0.88~2.05 (1.39)	129~513 (257.13)	94.15~99.72 97.79
	P <sub>1</sub> d 均值/26	20.56~79.80 (46.29)	0.75~44.80 (29.40)	0.47~33.90 (4.88)	0.01~1.70 (0.27)	0.02~0.06 (0.04)	0.02~0.35 (0.08)	0.88~3.63 1.99	4.21~628 (279.16)	94.15~99.89 (98.99)
	D <sub>3</sub> p 白云质灰岩/6	3.32	4.02	2.02	0.42	0.03	49.01	0.04	8.13	
福泉高洞矿床	C <sub>1</sub> jj <sup>3</sup> 铝土岩/4	32.79~39.72 (36.29)	27.50~39.10 (33.28)	5.22~18.50 (11.66)	0.34~1.78 (1.19)	0.02~0.03 (0.03)	0.07~0.28 (0.17)	1.56~3.33 (2.32)	292~505 (361)	95.41~98.85 (96.78)
	C <sub>1</sub> jj <sup>2</sup> 铝土矿/4	49.34~65.97 (57.60)	4.10~25.20 (11.33)	5.86~20.90 (11.74)	0.04~0.64 (0.26)	0.02~0.04 (0.03)	0.04~1.30 (0.48)	2.56~5.03 (3.48)	15.9~315 (97.9)	98.64~99.85 (99.44)
	C <sub>1</sub> jj <sup>1</sup> 铁质铝土岩/4	34.21~40.53 (37.49)	22.90~40.70 (32.77)	6.10~20.60 (12.77)	0.23~2.63 (1.29)	0.02~0.05 (0.03)	0.05~0.62 (0.34)	1.74~2.65 (2.18)	160~406 (270.8)	92.61~99.27 96.46
	C <sub>1</sub> jj 均值/12	32.79~65.97 (43.74)	4.10~40.70 (25.79)	5.22~20.90 (12.06)	0.04~2.63 (0.91)	0.02~0.05 (0.03)	0.04~0.62 (0.24)	1.56~5.03 (2.66)	15.90~505 (243.20)	92.61~99.85 (97.56)
	D <sub>3</sub> p 白云质灰岩/2	0.16~0.59 (0.38)	1.30~3.50 (2.40)	0.10~5.70 (2.90)	0.07~0.18 (0.13)	0.01	35.00~53.88 (44.44)	0.02~0.03 (0.02)	1.23~1.35 (1.29)	
播州后槽矿床	半土状铝土矿/32	73.81	5.13	1.85	0.94	0.02	—	—	28.22	98.69
	其他类型铝土矿/30	65.63	11.26	3.88	2.08	0.03	0.13	2.91	73.00	96.84
	铝土质黏土岩/35	32.74	35.67	10.26	5.51	0.05	—	—	229.74	85.30
	C <sub>1</sub> jj 均值/97	56.46	18.04	5.51	2.94	0.03	0.37	2.26	114.00	94.95

注:播州后槽矿床数据来源于刘平等(2016);“均值”表示含铝岩系的平均含量;“—”表示未收集到数据;括号内数值为平均值;CIA=[Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)]×100,并采用 McLennan et al. (1993)提出方法进行校正。

广西平果地区铝土矿形成与峨眉山大火成岩省岩浆活动密切相关,海相沉积环境,成矿时代较晚,成矿母岩为岩浆岩,见绿泥石矿物,与贵州及滇中地区差异较大。

已有研究成果显示,贵州铝土矿成矿的物源主要来自下伏地层的风化、搬运、再沉积,下伏地层为铝土矿成矿的近源母岩,而含铝岩系的物源为来自新元古代—中元古代富含中酸性岩浆岩的基底地层(Gu Jing et al., 2013; 金中国等, 2013; 黄智龙等, 2014; 刘平等, 2020)。据研究(刘英俊等, 1986),中酸性的花岗闪长岩及花岗岩中 Li 含量相对高,分别为 30×10<sup>-6</sup>~55×10<sup>-6</sup>和 30×10<sup>-6</sup>~50×10<sup>-6</sup>,在花岗伟晶

岩中含量最富集,为 2700×10<sup>-6</sup>~9000×10<sup>-6</sup>。贵州基底地层受武陵期—加里东期造山运动影响,多次褶皱隆起并伴随岩浆活动,使含铝岩系下伏地层遭受上亿年剥蚀,为高背景富锂含铝岩系形成准备了丰富物源。务正道地区含铝岩系中 Li 含量高,与下伏韩家店组(113.20×10<sup>-6</sup>~134.12×10<sup>-6</sup>)、黄龙组(1.90×10<sup>-6</sup>~75.63×10<sup>-6</sup>)背景高密切相关。同时,在贵州与相邻四川、重庆的下一中三叠统及上二叠统煤系地层分布广,其中,下一中三叠统地层中富 Li 绿岩发育, Li 含量高,为 257×10<sup>-6</sup>~663×10<sup>-6</sup>(孙艳等, 2018),上二叠统煤系地层中 Li 含量也较高,为 37×10<sup>-6</sup>~347×10<sup>-6</sup>,平均 198.83×10<sup>-6</sup>(杨瑞东等,

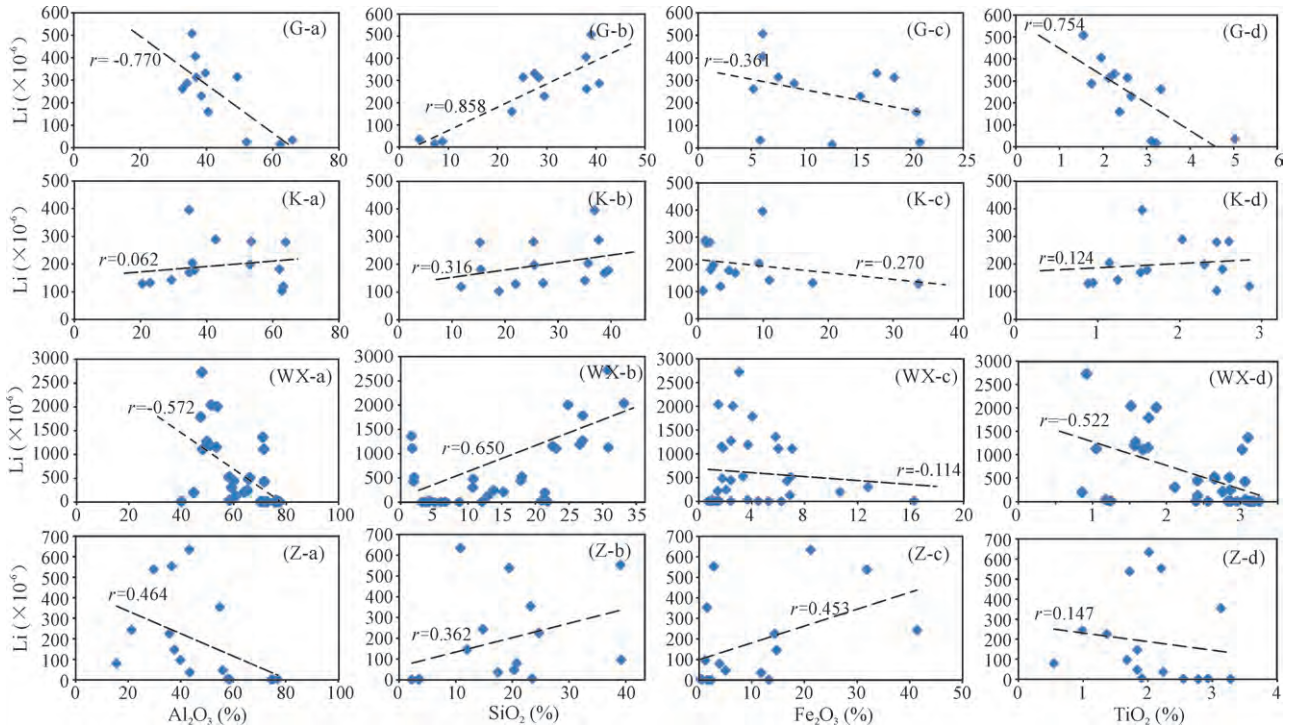


图 2 贵州典型铝土矿床 Li 与  $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $TiO_2$  相关性图

Fig 2 Correlation between Li and  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$  of the typical bauxite deposits in Guizhou Province

G—高洞矿床;K—苦力井矿床;WX—瓦厂坪+新木-晏溪矿床;Z—周刘彭矿床

G—Gaodong deposit; K—Kulijing deposit; WX—Wachangping and Xinmu-Yanxi deposit; Z—Zhouliupeng deposit

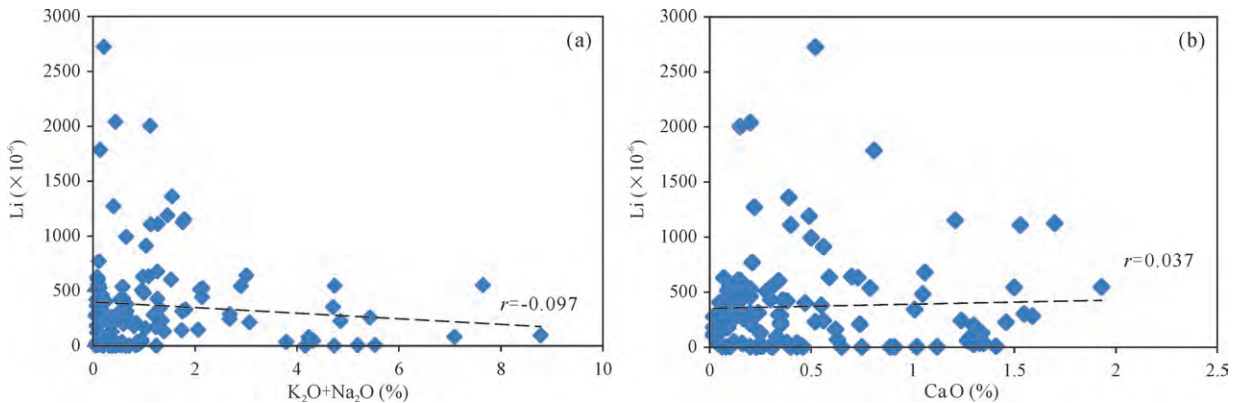


图 3 贵州典型铝土矿床 Li 与  $K_2O+Na_2O$  (a)、CaO (b) 相关性图

Fig 3 Correlation between Li and  $K_2O+Na_2O$  (a), CaO (b) of the typical bauxite deposits in Guizhou Province

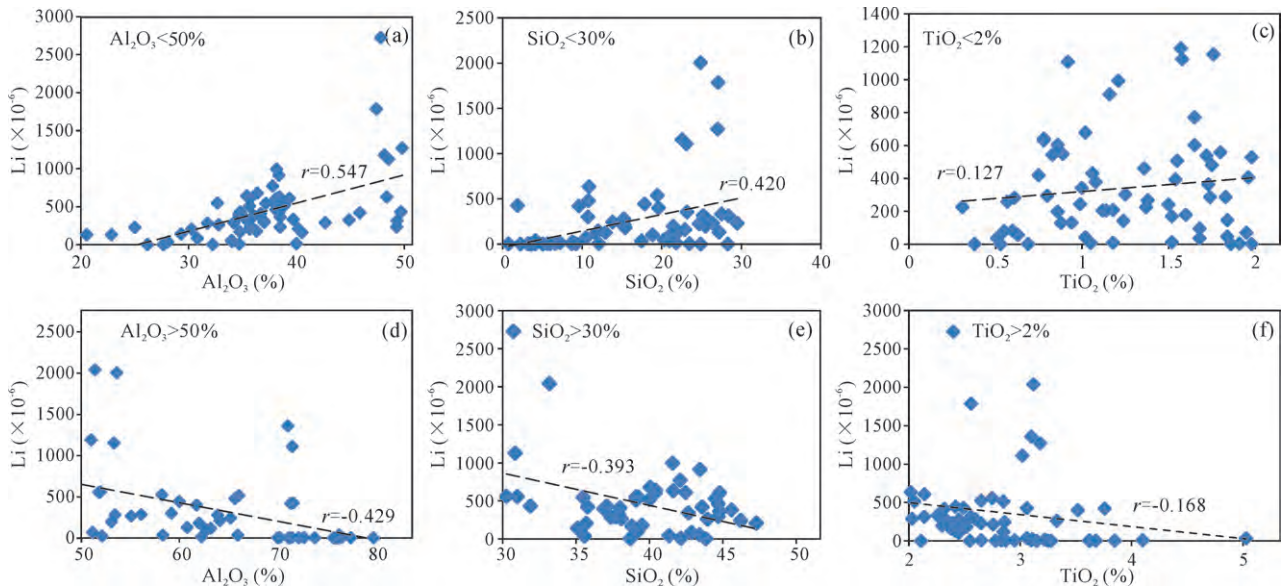
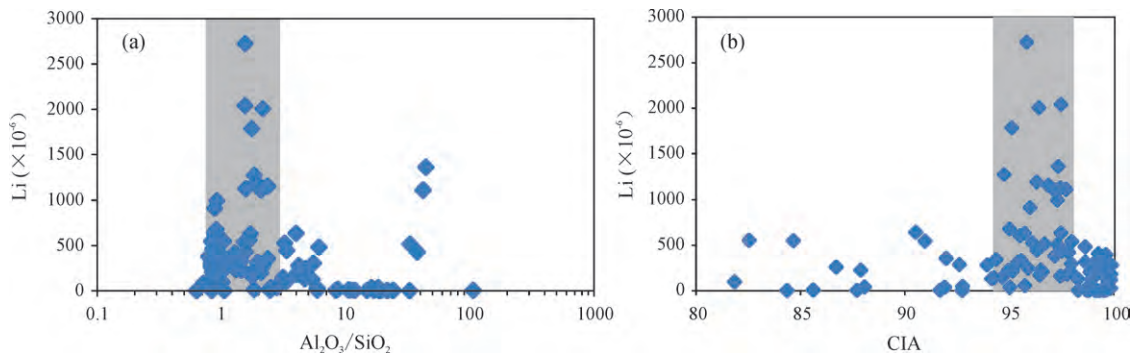
2021)。Li 的地球化学性质活泼,在断层构造的联通作用下,形成较好的导水系统,为 Li 的淋滤迁移再富集及地表水/层间水向下渗透、萃取围岩中 Li 创造了条件,富集机理与广西苹果地区黏土岩中富锂可能有相似之处,故含铝岩系中 Li 除主要来自下伏地层外,部分还可能来源于上覆地层。

## 4.2 锂的富集机理

### 4.2.1 地球化学性质对锂富集的约束

锂是典型的亲岩元素,广泛赋存于硅酸盐矿物

中,地壳中锂除以类质同象形式出现外,可以形成独立的锂矿物,如透锂石、锂辉石、磷锂铝石等。由于  $Li^+$  的离子半径(0.068 nm)与  $Mg^{2+}$  (0.066 nm)、 $Al^{3+}$  (0.051 nm)、 $Fe^{2+}$  (0.074 nm)、 $Fe^{3+}$  (0.064 nm) 相近,Li 与 Mg、Al 结晶化学性质相似,因此在铁镁硅酸盐和铝硅酸盐矿物中常以类质同象置换,且大部分锂矿物常与铝共生。在表生作用下,部分 Li 可从矿物晶格中析出  $Li^+$  离子与卤族元素化合成可溶盐迁移流失,但易被黏土矿物吸附,故在风化壳的黏土质

图 4 贵州典型铝土矿床 Li 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$  相关性图Fig 4 Correlation between Li and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  of the typical bauxite deposits in Guizhou Province图 5 贵州典型铝土矿床 Li 与  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  (a)、CIA (b) 关系图Fig 5 Correlation between Li and  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  (a), CIA (b) of the typical bauxite deposits in Guizhou Province

矿物中含量较高(刘英俊等,1986)。铝土矿(岩)中高岭石、蒙脱石、绿泥石、伊利石等黏土矿物丰富,且主要以高岭石为主(张正伟等,2012;李玉娇等,2014;金中国等,2015b;梁厚鹏,2018;陈健等,2021),这些黏土矿物具有层状的硅酸盐构造,利于 Li 在矿物中被吸附或进行类质同象,如黏土矿物中可能存在  $\text{Li}^+ + \text{Al}^{3+} \rightarrow \text{Si}^{4+}$  和  $\text{Li}^+ + \text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Al}^{3+}$  的异价类质同象(钟海仁等,2019)。加之黏土矿物结晶微小(1~2  $\mu\text{m}$ ),表面积大,利于  $\text{Li}^+$  等金属阳离子被吸附赋存于矿物的层间结构中富集(Vigier et al., 2008;黄智龙等,2014)。Zhang Yusong et al. (2019)通过矿物相研究初步证实,贵州铝土矿中锂主要以类质同象置换的方式赋存于高岭石、伊利石等黏土矿物中,占比达 87.23%~97.12%。王涛(2014)对重庆银矿垭口铝土矿床研究发现, Li 与 Fe 含量存在一定的

负相关关系,  $\text{Li}^+$  可能以类质同像替代  $\text{Fe}^{2+}$ 。这些证据表明,含铝岩系中 Li 的富集与其地球化学性质密切相关。

#### 4.2.2 古沉积环境对锂富集的约束

前述贵州铝土矿含铝岩系主要形成于黔中古陆、黔北古陆边缘的陆相淡水湖泊环境,特殊的环境不仅为铝土矿的形成提供丰富的物质来源,也为铝土矿(岩)中伴生 Li 富集提供大量物源。古赤道北纬  $8^\circ \sim 12^\circ$  附近雨量充沛、炎热潮湿的深时气候,有利于微生物活动及有机质腐烂,释放出大量腐殖酸、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  而形成酸性介质环境,在  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  共同作用下,促进铝硅酸盐矿物水解,游离出碱金属和碱土金属( $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ) 盐基。随着风化剥蚀作用的持续及在地表水径流作用下,风化物迁移、搬运过程中大量盐基流失,并对酸性介质环境进

行中和,形成氧化条件下的弱酸—中性环境。进入淡水湖泊沉积环境后,沉积成岩成矿期逐步形成氧化→弱氧化→还原,弱酸—弱碱性水体环境,有利于黏土矿物形成。试验研究表明(金章东,2011),中性—弱碱性水体有利于Li、Rb等稀有元素更容易向钾长石、钠长石、高岭土等矿物迁移富集。随着早期黏土化、脱硅、富铝作用增强,加之黏土矿物对Li有较强的富集作用,大量Li被黏土矿物最大程度地吸附或与富Al矿物类质同象富集(刘光华,1987;金中国等,2018;龙珍等,2021),这可能是铝土矿成矿早期Al、Li含量呈正相关性的主要原因。

#### 4.2.3 成岩成矿后的改造作用约束

表2显示,7个典型矿床含铝岩系的化学蚀变指数(CIA)均>93,表明含铝岩系源岩经历了炎热潮湿的热带气候条件下的强烈风化作用,铝土矿(岩)及黏土矿物等是强风化作用的产物,以修文小山坝矿床最为显著,CIA达99.55,符合矿床含铝岩系埋藏浅、部分为露天矿的客观实际。清镇周刘彭矿床CIA相对低,与其全为隐伏矿产出、后期保存较好有关。较高的CIA值也表明成岩成矿时期的排水条件好,强烈风化作用促使大量硅酸盐分解形成黏土矿物(Huntington et al., 2000)。在黏土岩体系中,Ca主要赋存于绿泥石中,K主要赋存于伊利石、明矾石中;Na主要赋存于斜长石以及蒙脱石中(冯志刚等,2013)。伊利石、蒙脱石、绿泥石形成于气候寒冷、淋滤作用弱的碱性环境,而高岭石的出现指示气候温湿、风化及淋滤作用强的酸性环境(鲁春霞,1997;汤艳杰,2002)。在成岩成矿后期,沉积形成的含铝岩系在局部构造隆升氧化作用及古水文地质系统的淋滤作用下,其中的黄铁矿等硫化物氧化演变为酸性环境,导致伊利石晶层间 $K^+$ 和蒙脱石晶层间 $Na^+$ 的淋滤流失,促使伊利石、蒙脱石等黏土矿物向高岭石转化(洪汉烈,2010),形成目前所见大量以高岭石为主的黏土矿物,而Li继续富集在高岭石等黏土矿物中,显示Li与K、Na含量呈负相关性(图3a)。绿泥石主要产于含铝岩系下部,为成岩成矿早期产物,该时期Li与Al同迁移、同富集,含量呈正相关性,而Ca赋存在绿泥中,Ca与Li含量呈弱正相关性符合含铝岩系形成的演化规律(图3b)。随着地表或浅表氧化作用、淋滤作用及脱硅、富铝作用增强,大量Li被淋滤流失,半土状、土状优质铝土矿形成(杜远生等,2014;余文超等,2014;崔燧等,2018)。

依据Grant(1986)质量平衡方程,以务川瓦厂

坪矿床为例,对铝土矿成矿过程中Li的迁移富集、贫化特征进行了研究(表3)(金中国等,2011),从韩家店组页岩(Li含量 $38.6 \times 10^{-6}$ )风化形成铝土质黏土岩阶段(Li $910.88 \times 10^{-6}$ ),Li的迁移量最大,达 $965.81 \times 10^{-6}$ ,其次为铝土质黏土岩至块状铝土矿(岩)(Li $1785.04 \times 10^{-6}$ )形成阶段,Li的迁移量为 $816 \times 10^{-6}$ ,而在块状铝土矿至土状铝土矿(Li $480.55 \times 10^{-6}$ )形成阶段,Li的迁移量为 $-1314.35 \times 10^{-6}$ ,表明黏土化阶段,Li随脱硅、富铝作用同迁移、同富集,与Al含量呈正相关;至成岩成矿早期阶段Li的类质同象、黏土矿物吸附作用最强,富集程度最高,与Al含量呈典型的正相关关系;至次生淋滤改造阶段,铝土矿物成熟度过高,黏土矿物含量减少,大量Li被淋滤流失亏损,Li与Al含量呈典型的负相关关系。

表3 瓦厂坪矿床Li含量迁移特征表( $\times 10^{-6}$ )  
Table 3 Migration characteristics of Li content in Wachangping deposit ( $\times 10^{-6}$ )

含Li介质	Li	迁移量	K	计算公式及说明
S <sub>1</sub> h <sub>j</sub> 页岩	38.59			$\Delta C_i = (C_i^f / K) - C_i^i$ $C_i^i$ 、 $C_i^f$ 为元素迁移前后含量,K为Grant图求得的斜率系数
铝土质黏土岩	910.88	965.81	0.907	
块状铝土矿(岩)	1785.04	815.93	1.034	
土状铝土矿	480.55	-1314.35	1.022	

#### 4.3 锂资源潜力及综合利用探讨

##### 4.3.1 锂资源潜力

渝南—黔中铝土矿成矿带位于渝—黔地球化学成矿省的核心区(王学求等,2020),特别是黔中地区Li背景高,异常面积大,浓集中心显著,显示巨大找矿潜力。由于目前国内外对沉积型锂矿及铝土矿共伴生锂资源勘查尚未有评价规范,仅见美国对克莱顿谷(Clayton Valley)矿床、墨西哥对索诺拉(Sonora)锂矿床分别采用边界品位Li: $300 \times 10^{-6}$ 和 $1000 \times 10^{-6} \sim 1500 \times 10^{-6}$ ,平均品位: $860 \times 10^{-6} \sim 867 \times 10^{-6}$ 和 $2650 \times 10^{-6} \sim 3480 \times 10^{-6}$ 进行了碳酸锂资源量估算(于枫等,2019)。前述贵州务正道及黔中铝土矿成矿区Li主要富集在含铝岩系中上部的致密块状铝土矿(岩)或铝土质黏土岩中(表2),仅少量赋存于矿系中部的低品位铝土矿石内,与滇中地区十分相似(温汉捷等,2020a)。近年调查研究发现,在金沙黑达、修文洒坪等矿区的含铝岩系中未发现较好铝土矿产出,但Li强烈富集,Li含量分别达



3450.00 $\times 10^{-6}$  ( $\text{Li}_2\text{O}$  7392.86 $\times 10^{-6}$ )、2041.45 $\times 10^{-6}$  ( $\text{Li}_2\text{O}$  4371.43 $\times 10^{-6}$ ) (崔燚等, 2018), 此富集特征显示, 若加强含铝岩系锂资源的综合评价, 特别是对地表未见铝土矿产出地段的调查评价, 可能有新的锂富集区发现, 有望扩大资源潜力。

#### 4.3.2 综合利用前景探讨

目前全球已发现的沉积型锂矿床主要分布在美洲和欧洲, 由于受锂的赋存状态、生产工艺研究程度等因素制约, 仅美国、墨西哥等国进行开发利用。其中美国对克莱顿谷 (Clayton Valley)、大桑迪 (Big Sandy) 黏土岩型锂矿床采用常压下不同浓度的硫酸对矿石进行淋滤 $\rightarrow$ 逐级过滤回收 $\rightarrow$ 离子交换提取碳酸锂; 墨西哥对索诺拉 (Sonora) 黏土岩型锂矿床采用物理预浓缩 $\rightarrow$ 硫酸钠混合原矿高温焙烧 $\rightarrow$ 湿法冶金生成  $\text{Li}_2\text{SO}_4$  $\rightarrow$ 提纯处理生成纯度大于 99.5% 的电池级  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  产品 (钟海仁等, 2019)。

中国贵州含铝岩系中伴生的锂资源在成因、赋存状态与欧美沉积型锂矿床可能有较大差异, 故有关学者在不断研究探索提锂工艺。任方涛等 (2013) 开展黔中地区铝质岩中锂的分离富集时, 将粒度  $< 75 \mu\text{m}$  的原样在 500~800 $^\circ\text{C}$  高温焙烧 $\rightarrow$ 在 60 $^\circ\text{C}$  条件下与质量分数 10% 的盐酸 (固液比 1:4) 反应 2 h, 获得锂浸出率可达 66%~95%。Wu Lin et al (2016) 对息烽—修文铝质岩浸取锂时, 在 75 $^\circ\text{C}$  条件下使用固液比 1:8 的氢氟酸处理样品, 在 300 r/min 的搅拌强度下反应 15 min, 得到锂浸出率为 55%~99%。温汉捷等 (2020b) 对滇中盆地含铝岩系中锂资源采用样品磨细粒度小于 165  $\mu\text{m}$ , 焙烧 450~800 $^\circ\text{C}$ 、加入三价铁盐 (硫酸铁、氯化铁或硝酸铁 1 种, 质量分数为 5%~20%) 进行离子交换工艺试验, 锂的提取率为 60%~90%。这些实验初步研究表明, 含铝岩系中锂资源是可以提取的, 但存在样品采集重量小、试验样品用量少、不同锂含量的样品试验研究对比少等共性问题, 其试验结果代表性、经济性、可信度有待进一步研究证实。因此, 加强工艺矿物学研究, 规范采集样品开展实验室、扩大实验室、半工业试验研究及工业指标论证, 科学、客观评价锂资源量开发利用前景, 有望将含铝岩系中锂资源转变为可利用的矿产。

## 5 结论

(1) 贵州含铝岩系中 Li 含量高, 变化范围大, 平面上 Li 含量总体呈北东、南西成矿区高, 中间成矿区低的分布态势, 剖面上 Li 主要富集在矿系上部的

致密状铝土岩 (矿) 中。

(2) 气候温湿、风化及淋滤作用强的陆相湖泊沉积环境, 利于高岭石为主的黏土矿物形成, 最大程度促进  $\text{Li}^+$  与  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  发生类质同象, 或被黏土矿物吸附富集。随着脱硅富铝作用增强, 大量 Li 流失而导致在高品位的铝土矿中贫化。

(3) Li 主要来源于高背景的下伏地层, 与铝土矿成矿母岩一致, 部分还可能来源于上覆富 Li 地层。Li 的富集程度与成矿母岩背景高低密切相关。

(4) Li 在含铝岩系中富集特征显示, 锂资源具有较好找矿潜力。加强工艺矿物学研究和实验室、扩大实验室研究及工业指标论证, 有望将含铝岩系中锂资源转变为可利用的矿产。

致谢: 对两名审稿专家提出的宝贵修改意见表示衷心感谢!

## References

- Benson T R, Coble M A, Rytuba J J, Mahood G A. 2017. Lithium enrichment in intracontinental rhyolite magmas leads to Li deposits in caldera basins. *Nature Communications*, 8(1): 270.
- Chen Jian, Xiang Zhenzhong, Wan Bin, Wu Long, Wan Jiang, Wu Tao, Zhou Enze, Zhao Longqiao, Yang Ruchun, Gu Jing. 2021. The distribution characteristics of associated elements in bauxite ores and bauxite-bearing rocks of the Datian bauxite deposit in the eastern Guizhou, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 41(4/5): 485~493 (in Chinese with English abstract).
- Chen Qinggang, Chen Qun, Dai Xiaoyan. 2016. Discussion of metallogenic epoch of bauxite deposit in central Guizhou. *Guizhou Geology*, 33(2): 101~107 (in Chinese with English abstract).
- Cui Yi, Luo Chongguang, Xu Lin, Zhang Hai, Deng Mingguo, Gu Hannian, Meng Yong, Qing Chaojian, Wen Hanjie. 2018. Weathering origin and enrichment of lithium in clay rocks of the Jiujialu Formation, Central Guizhou Province, Southwest China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 37(4): 696~704 (in Chinese with English abstract).
- Du Yansheng, Zhou Qi, Jin Zhongguo, Ling Wenli, Wang Xiaomei, Yu Wenchao, Cui Tao, Lei Zhiyuan, Weng Shenfu, Wu Bo, Tan Yongjun, Cao Jianzhou, Peng Xianhong, Zhang Zhen, Deng Hu. 2014. Mineralization model for the Early Permian bauxite deposits in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province. *Journal of Palaeogeography*, 16(1): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Fan Hongpeng, Ye Lin, Huang Zhilong. 2021. The associated lithium resource in bauxite (bauxite-bearing rock). *Acta Mineralogica Sinica*, 41(4/5): 382~390 (in Chinese with English abstract).
- Feng Zhigang, Ma Qiang, Li Shipeng, Wang Shijie, Huang Wei, Liu Jiang, Shi Wenge. 2013. Weathering mechanism of rock-soil interface in weathering profile derived from carbonate rocks: Preliminary study of leaching simulation in rock powder layer. *Acta Geologica Sinica*, 87(1): 119~132 (in Chinese with English abstract).
- Gao Daode. 1996. A genetic model for sedimentary type of bauxites deposits in central Guizhou. *Guizhou Geology*, 13(2): 166~171 (in Chinese with English abstract).
- Grant J A. 1986. The isocon diagram: A simple solution to Gresens's equation for metasomatic alteration. *Economic Geology*, 81: 1976~1982.

- Guizhou Provincial Natural Resources Bureau. 2020. Natural Resources Statistical Bulletin of Guizhou Province, 18~24 (in Chinese with English abstract).
- Guizhou Provincial Geological Survey Institute. 2019. Mineral Geology of Guizhou Province (Bauxite). Beijing: Geological Publishing House, 1~428 (in Chinese).
- Gu Jing, Huang Zhilong, Fan Hongping, Ye Lin, Jin Zhongguo. 2013. Provenance of lateritic bauxite deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province, China; LA-ICP-MS and SIMS U-Pb dating of detrital zircons. *Journal of Asian Earth Sciences*, 70-71: 265~282.
- Hong Hanlie. 2010. A review on paleoclimate interpretation of clay minerals. *Geological Science and Technology Information*, 29 (1): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zhilong, Jin Zhongguo, Xiang Xianli, Gu Jing, Wu Guohui, Chen Xinglong, Su Zhiliang, Zhao Yuanyou, Ye Lin, Zou Lin. 2014. Metallogenic Theory and Prediction of Bauxite Deposits in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen Area, Northern Guizhou Province, China. Beijing: Science Press, 1~241 (in Chinese).
- Huntington T G. 2000. The potential for calcium depletion in forest ecosystems of southeastern United States; Review and analysis. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(2): 623~638.
- Jia Yongbin, Yu Wenxiu, Wen Hanjie, Luo Chongguang, Yang Guangshu, Yang Yang, Cui Yi. 2020. Geochemical characteristics and sedimentary environment of Li-rich clay rocks at the southern margin of the central Yunnan basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 10.14027/j.issn.1000-0550.2021.076 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhangdong. 2011. Composition, origin and environmental interpretation of minerals in lake sediments and recent progress. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 33(1): 34~44+77 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhongguo, Xiang Xianli, Huang Zhilong, Liu Ling. 2011. Regularities of elements migration in the Wachangping bauxite deposit in Wuchuan County, northern Guizhou Province. *Geology and Prospecting*, 47(6): 957~966 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhongguo, Huang Zhilong, Liu Ling, Chen Xinglong, Bao Miao. 2013. Study on Metallogenic Regularities of the Bauxite Deposits in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen Area, Northern Guizhou. Beijing: Geological Publishing House, 1~152 (in Chinese).
- Jin Zhongguo, Zhou Jiayi, Huang Zhilong, Dai Longsheng, Xie Xi, Peng Song, Gu Jing. 2015a. The distribution of associated elements Li, Sc and Ga in the typical bauxite deposits over the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen bauxite ore district, northern Guizhou Province. *Geology in China*, 42(6): 1910~1918 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhongguo, Zhou Jiayi, Huang Zhilong, Xie Xi, Gu Jing, Liu Ling, Xiang Xianli, Zou Lin, Han Ying, Dai Longsheng, Peng Song. 2015b. Mineralogic characteristics of the bauxite deposit in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 89(8): 1458~1470 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhongguo, Liu Chensheng, Zou Lin, Zheng Minghong, Zhang Li, Han Ying. 2018. Geochemical evidence of sedimentary environment of Permian bauxite in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Guizhou Province. *Acta Geologica Sinica*, 92(4): 817~827 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhongguo, Liu Ling, Huang Zhilong, Liu Chensheng, Zheng Minghong, Gu Jing, Zou Ling, Wang Lin. 2019. Occurrence state, enrichment mechanism and resource potential of rare earth, rare metal and rare-scattered elements in ore-bearing rocks in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen bauxite deposit, Guizhou Province. *Acta Geologica Sinica*, 93(11): 2847~2861 (in Chinese with English abstract).
- Kesler S E, Gruber P W, Medina P A, Keoleian G A, Everson M P, Wallington T J. 2012. Global lithium resources; Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geology Reviews*, 48(5): 55~69.
- Li Jiankang, Liu Xifang, Wang Denghong. 2014. The metallogenic regularity of lithium deposit in China. *Acta Geologica Sinica*, 88 (12): 2269~2283 (in Chinese with English abstract).
- Li Yujiao, Zhang Zhengwei, Zhou Lingjie, Wu Chengquan. 2014. Mineralogical and geochemistry feature of Zunyi bauxite deposit, Guizhou Province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 34 (2): 234~246 (in Chinese with English abstract).
- Liang Houpeng. 2018. Investigate the occurrence characteristics and enrichment mechanism of the bauxite and aluminized clay rock associated lithium resources to Xiaoshanba bauxite in Guizhou. Master's thesis of Guizhou University, 1~61 (in Chinese).
- Liao Shifan. 1989. A research on the paleogeographic and ore-forming conditions for Early Carboniferous paleo-weathered crust bauxite deposits in Guizhou, Sichuan, Hunan and Hubei. *Acta Geologica Sinica*, 63 (2): 148 ~ 157 (in Chinese with English abstract).
- Ling Kunyao, Wen Hanjie, Zhang Qizuan, Luo Chongguang, Gu Hannian, Du Shengjiang, Yu Wenxiu. 2021. Super-enrichment of lithium and niobium in the upper Permian Heshan Formation in Pingguo, Guangxi, China. *Science China: Earth Sciences*, 51, doi: 10.1360/SSTe-2020-0140 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chensheng, Jin Zhongguo, Guo Jianhua. 2015a. Facies analysis of sedimentary bauxite deposition in freshwater of Wuzhengdao in northern Guizhou. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 46 (3): 962~969 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chensheng, Jin Zhongguo, Guo Jianhua. 2015b. Sequence stratigraphy of bauxite deposition in Wuzhengdao area in northern Guizhou. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 25(1): 179~189 (in Chinese with English abstract).
- Liu Guanghua. 1987. Study of the relationship between characteristics of clay minerals and depositional environments. *Acta Sedimentologica Sinica*, 5(1): 48~57 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lijun, Wang Denghong, Liu Xifang, Li Jiankang, Dai Hongzhang, Yan Weidong. 2017. The main types, distribution features and present situation of exploration and development for domestic and foreign lithium mine. *Geology in China*, 44 (2): 263~278 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ping, Liao Youchang. 2014. Regional metallogenic model and prospecting criteria of sedimentary bauxite deposits in central Guizhou-southern Chongqing region. *Geology in China*, 41(6): 2063~2082 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ping, Liao Youchang, Zhang Yajing. 2016. Sedimentary characteristics of sedimentary bauxite and ore-bearing rock series in corroded depression; A case study of the Houcao mining area in Zunyi. *Geology in China*, 43(2): 546~563 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ping, Han Zhonghua, Liao Youchang, Nie Kun. 2020. Regional distribution characteristics and material sources of trace elements in ore-bearing rock series of bauxite in central Guizhou—southern Chongqing. *Guizhou Geology*, 37(1): 1~13 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xunfeng. 1990. Discussions on the genesis for paleokarst lateritic bauxite in northern Guizhou. *Acta Geologica Sinica*, 64(3): 238~247 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, Wang Henian, Chu Tongqing, Zhang Jingon. 1986. *Geochemistry of the Elements*. Beijing: Science Press, 1~386 (in Chinese).
- Long Yongzhen, Chi Guoxiang, Liu Jianping, Jin Zhongguo, Dai Tangen. 2017. Trace and rare earth elements constraints on the sources of the Yunfeng paleo-karstic bauxite deposit in the Xiuwen-Qingzhen area, Guizhou, China. *Ore Geology Reviews*, 91: 404~418.
- Long Yongzhen, Chi Guoxiang, Gu Xiangping, Dai Tangen. 2019. Discovery of uranium minerals in Yunfeng bauxite deposit, Guizhou Province. *Mineral Deposits*, 38(1): 170~180.

- Long Zhen, Fu Yong, He Wei, Tang Bo, Long Keshu, Liu Yangand, Wang Tianshun. 2021. Geochemical characteristics and enrichment mechanism of Li in Xinmin bauxite deposit, Guizhou. *Mineral Deposits*, 40(4): 873~890 (in Chinese with English abstract).
- Lu Chunxia. 1997. Clay minerals as indicators of paleoenvironment. *Journal of Desert Research*, 17(4): 456~460.
- McLennan S M, Hemming S R, McDaniel D K, Hanson G N. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. *Special Paper of the Geological Society of America*, 284: 21~40.
- Ren Fangtao, Zhang Jie. 2013. Chemical separation and enrichment of lithium in aluminous rock in Central Guizhou. *Inorganic Chemicals Industry*, 45(3): 19~21 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yan, Wang Denghong, Gao Yun, Han Jingyi, Ma Shengchao, Fan Xingtao, Gu Wenhui, Zhang Lihong. 2018. Geochemical characteristics of lithium-rich mung bean rocks in Tongliang County, Chongqing. *Acta Petrologia et Mineralogica*, 37(3): 395~403 (in Chinese with English abstract).
- Tang Yanjie, Jia Jianye, Xie Xiande. 2002. Environment significance of clay minerals. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 337~344 (in Chinese with English abstract).
- Turekian K K, Wedepohl K H. 1961. Distribution of the element in some major units of the earth's crust. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 72.
- Vigier N, Decarreau A, Millot R, Carignan J, Petit S, France-Lanord C. 2008. Quantifying Li isotope fractionation during smectite formation and implications for the Li cycle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(3): 780~792.
- Wang Denghong. 2019. Study on critical mineral resources: significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1190~1209 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Li Peigang, Qu Wenjun, Lei Zhiyuan, Liao Youchang. 2013. Discovery and preliminary study of the high tungsten and lithium contents in the Dazhuyuan bauxite deposit, Guizhou, China. *Science China: Earth Sciences*, 43(1): 44~51 (in Chinese).
- Wang Denghong, Liu Shanbao, Yu Yang, Wang Chenghui, Sun Yan, Dai Hongzhang, Li Jiankang, Dai Jingjing, Wang Yuxian, Zhao Ting, Ma Shenchao, Liu Lijun. 2019. Exploration progress and development suggestion for the large scale mining base of strategic critical mineral resources in western Sichuan. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1444~1453 (in Chinese with English abstract).
- Wang Junda, Li Huamei. 1998. Carboniferous paleo-latitude and bauxite deposit of central Guizhou Province. *Geochimica*, 27(6): 575~578 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiushu, Yuan Chunhua. 2019. The global supply situation of lithium ore and suggestions on resources security in China. *China Mining Magazine*, 28(5): 1~6 (in Chinese).
- Wang Tao, Zhao Xiaodong, Li Junmin, Lü Tao. 2014. Distribution characteristics of lithium in Yinkuangyakou bauxite deposit, Chongqing. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 29(4): 541~545 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xueqiu, Liu Hanliang, Wang Wei, Zhou Jian, Zhang Bimin, Xu Shanfa. 2020. Geochemical abundance and spatial distribution of lithium in China: Implications for potential prospects. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(6): 797~806 (in Chinese with English abstract).
- Wen Hanjie, Luo Chongguang, Du Shengjiang, Yu Wenxiu, Gu Hannian, Ling Kunyao, Cui Yi, Li Yang, Yang Jihua. 2020a. Carbonate-hosted clay-type lithium deposit and its prospecting significance. *Chinese Science Bulletin*, 65(1): 53~59 (in Chinese with English abstract).
- Wen Hanjie, Gu Hannian, Zhu Li, Luo Chongguang, Du Shengjiang. 2020b. Method for extracting lithium from carbonate clay type lithium ore by ion exchange method. *China National Intellectual Property Administration*, ZI201910788413.3, 05-12 (in Chinese with English abstract).
- Wu Lin, Zhang Jie, Wang Jianrui, Mao Ruiyong. 2016. Study on leaching and enrichment of lithium in aluminum rock. *Inorganic Chemicals Industry*, 48(5): 24~26 (in Chinese with English abstract).
- Yan Shuang. 2020. Enrichment of lithium from Xinmin bauxite in northern Guizhou and its indication of lithium isotope. Master's thesis of Guizhou University, 1~56 (in Chinese with English abstract).
- Yang Ruidong, Zheng Lulin, Cheng Wei, Gao Junbo, Chen Jun, Sun Baichuan, Zhang Yan. 2021. Rare earth and lithium elements enrichment found in Late Permian coals in Tongzi-Jinsha area, northern Guizhou Province. *Geological Review*, 67(5): 1543~1544 (in Chinese with English abstract).
- Ye Lin, Pan Ziping, Cheng Zengtao. 2008. The regularizes of distribution of associated elements in Xiaoshanba bauxite deposit, Guizhou. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(2): 105~111 (in Chinese with English abstract).
- Yu Feng, Wang Denghong, Yu Yang, Liu Tao, Gao Juanqing, Zhong Jiaai, Qing Yan. 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).
- Yu Wenchao, Du Yuansheng, Zhou Qi, Jin Zhongguo, Wang Xiaomei, Cui Tao. 2014. Palaeoclimate of the Early Permian: Evidence from characteristics of bauxite beds in Wuchuan-Zheng'an-Dozhen area, northern Guizhou Province. *Journal of Palaeogeography*, 16(1): 30~40 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Wu Fuyuan, Hu Ruzhong, Jiang Shaoyong, Li Wenchang, Wang Rucheng, Wang Denghong, Qi Tao, Qin Kezhang, Wen Hanjie. 2019. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues. *Science Foundation in China*, (2): 106~111 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yusong, Zhang Jie. 2019. Study on the occurrence state of lithium in low-grade diasporic bauxite from central Guizhou Province, China. *JOM*, 71(12): 4594~4599.
- Zhang Zhengwei, Li Yujiao, Zhou Lingjie, Wu Chengquan. 2012. Coal-bauxite-iron structure and geochemical features of bauxite ore-bearing rock series in southeast Guizhou. *Acta Geologica Sinica*, 86(7): 1119~1131 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Hairen, Sun Yan, Yang Yueqing, Wang Denghong, Huang Fan, Zhao Zhi. 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).

## 参 考 文 献

- 陈健, 向震中, 万斌, 吴龙, 万将, 吴涛, 周恩泽, 赵龙桥, 杨如春, 谷静. 2021. 黔东大田铝土矿(岩)伴生元素分布特征. *矿物学报*, 41(4/5): 485~493.
- 陈庆刚, 陈群, 戴晓燕. 2016. 黔中地区铝土矿成矿时代探讨. *贵州地质*, 33(2): 101~107.
- 崔焱, 罗重光, 徐林, 张海, 邓明国, 顾汉念, 孟勇, 秦朝建, 温汉捷. 2018. 黔中九架炉组富锂黏土岩系的风化成因及锂的富集规律. *矿物岩石地球化学通报*, 37(4): 696~704.
- 杜远生, 周琦, 金中国, 凌文黎, 汪小妹, 余文超, 崔滔, 雷志远, 翁申富, 吴波, 覃永军, 曹建州, 彭先红, 张震, 邓虎. 2014. 黔北务正道地区早二叠世铝土矿成矿模式. *古地理学报*, 16(1): 1~8.
- 范宏鹏, 叶霖, 黄智龙. 2021. 铝土矿(岩)中伴生的锂资源. *矿物学报*, 41(4/5): 382~390.
- 冯志刚, 马强, 李石朋, 王世杰, 黄伟, 刘江, 史文革. 2013. 碳酸盐岩风化壳岩-土界面风化作用机制: 对岩层淋溶模拟的初步研究. *地质学报*, 87(1): 119~132.
- 高道德. 1996. 黔中沉积型铝土矿成矿模式. *贵州地质*, 13(2): 166~171.

- 贵州省地质调查院. 2019. 中国矿产地质志·贵州卷·铝土矿. 北京: 地质出版社, 1~428.
- 贵州省自然资源厅. 2020. 贵州省自然资源公报. 18~24.
- 洪汉烈. 2020. 黏土矿物古气候意义研究的现状与展望. 地质科技情报, 29(1): 1~8.
- 黄智龙, 金中国, 向贤礼, 谷静, 武国辉, 陈兴龙, 苏之良, 赵远由, 叶霖, 邹林. 2014. 黔北务正道铝土矿成矿理论与预测. 北京: 科学出版社, 1~241.
- 贾永斌, 于文修, 温汉捷, 罗重光, 杨光树, 杨洋, 崔焱. 2020. 滇中盆地南缘富锂黏土岩地球化学特征及沉积环境初探. 沉积学报, 10.14027/j.issn.1000-0550.2021.076.
- 金章东. 2011. 湖泊沉积物的矿物组成、成因、环境指示及研究进展. 地球科学与环境学报, 33(1): 34~44, 77.
- 金中国, 向贤礼, 黄智龙, 刘玲. 2011. 黔北务川瓦厂坪铝土矿床元素迁移规律研究. 地质与勘探, 47(6): 957~966.
- 金中国, 黄志龙, 刘玲, 陈兴龙, 鲍森. 2013. 黔北务正道地区铝土矿成矿规律研究. 北京: 地质出版社, 1~152.
- 金中国, 周家喜, 黄智龙, 代龙省, 谢榭, 彭松, 谷静. 2015a. 黔北务正道地区典型铝土矿床伴生有益元素 锂、镓和钽分布规律. 中国地质, 42(6): 1910~1918.
- 金中国, 周家喜, 黄智龙, 谢榭, 谷静, 刘玲, 向贤礼, 邹林, 韩英, 代龙省, 彭松. 2015b. 黔北务正道地区铝土矿床的矿物学特征. 地质学报, 89(8): 1458~1470.
- 金中国, 刘辰生, 邹林, 郑明泓, 张力, 韩英. 2018. 贵州务正道地区二叠纪铝土矿沉积环境地球化学证据. 地质学报, 92(4): 817~827.
- 金中国, 刘玲, 黄智龙, 刘辰生, 郑明泓, 谷静, 邹林, 王林. 2019. 贵州务正道地区铝土矿含矿岩系中三稀元素赋存状态、富集机理及资源潜力. 地质学报, 93(11): 2847~2861.
- 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.
- 李玉娇, 张正伟, 周灵洁, 吴承泉. 2014. 贵州省遵义铝土矿矿物学及地球化学特征. 矿物学报, 34(2): 234~246.
- 梁厚鹏. 2018. 贵州小山坝铝土矿伴生锂赋存特征及富集机理探讨. 贵州大学硕士学位论文, 1~61.
- 廖士范. 1989. 黔川湘鄂早石炭世古风化壳铝土矿床的古地理与成矿条件的研究. 地质学报, 63(2): 148~158.
- 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铈的超常富集与成因. 中国科学: 地球科学, 51, doi: 10.1360/SSTe-2020-0140.
- 刘辰生, 金中国, 郭建华. 2015a. 黔北务正道地区淡水沉积型铝土矿床沉积相. 中南大学学报(自然科学版), 46(3): 962~969.
- 刘辰生, 金中国, 郭建华. 2015b. 黔北务正道地区沉积型铝土矿床层序地层学. 中国有色金属学报, 25(1): 179~189.
- 刘光华. 1987. 黏土矿物特征与沉积环境关系的初步探讨. 沉积学报, 5(1): 48~57.
- 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. 中国地质, 44(2): 263~278.
- 刘平, 廖友常. 2014. 黔中-渝南沉积型铝土矿区域成矿模式及找矿模型. 中国地质, 41(6): 2063~2082.
- 刘平, 廖友常, 张雅静. 2016. 沉积型铝土矿及其含矿岩系在溶蚀洼地中的沉积特征——以遵义后槽矿区为例. 中国地质, 43(2): 546~563.
- 刘平, 韩忠华, 廖友常, 聂坤. 2020. 黔中—渝南铝土矿含矿岩系微量元素区域分布特征及物质来源探讨. 贵州地质, 37(1): 1~13.
- 刘巽锋. 1990. 论黔北铝土矿的古喀斯特-红土型成因. 地质学报, (3): 232~247.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1986. 元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1~386.
- 龙永珍, 池国祥, 谷湘平, 戴塔. 2019. 贵州云峰铝土矿中铀矿物的发现. 矿床地质, 38(1): 170~180.
- 龙珍, 付勇, 何伟, 唐波, 龙克树, 刘阳, 王天顺. 2021. 贵州新民铝土矿床 Li 的地球化学特征与富集机制探究. 矿床地质, 40(4): 873~890.
- 鲁春霞. 1997. 黏土矿物在古环境研究中的指示作用. 中国沙漠, 17(4): 456~460.
- 任方涛, 张杰. 2013. 黔中地区铝质岩中锂的化学分离富集研究. 无机盐工业, 45(3): 19~21.
- 孙艳, 王登红, 高允, 韩景仪, 马圣钊, 樊兴涛, 顾文帅, 张丽红. 2018. 重庆铜梁地区富锂绿豆岩地球化学特征. 岩石矿物学杂志, 37(3): 395~403.
- 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 2002. 黏土矿物的环境意义. 地质前缘, 9(2): 337~344.
- 王登红. 2019. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向. 地质学报, 93(6): 1190~1209.
- 王登红, 李沛刚, 屈文俊, 雷志远, 廖友常. 2013. 贵州大竹园铝土矿中钨和锂的发现与综合评价. 中国科学: 地球科学, 43(1): 44~51.
- 王登红, 刘善宝, 于扬, 王成辉, 孙艳, 代鸿章, 李建康, 代晶晶, 王裕先, 赵汀, 马圣钊, 刘丽君. 2019. 川西大型战略性新兴产业矿产基地勘查进展及其开发利用研究. 地质学报, 93(6): 1444~1453.
- 王俊达, 李华梅. 1998. 贵州石炭纪古纬度与铝土矿. 地球化学, 27(6): 575~578.
- 王秋舒, 元春华. 2019. 全球锂矿供应形势及我国资源安全保障建议. 中国矿业, 28(5): 1~6.
- 王涛, 赵晓东, 李军敏, 吕涛. 2014. 重庆银矿垭口铝土矿锂的分布特征. 地质找矿论丛, 29(4): 541~545.
- 王学求, 刘汉根, 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.
- 温汉捷, 罗重光, 杜胜江, 于文修, 顾汉念, 凌坤跃, 崔焱, 李阳, 杨季华. 2020a. 碳酸盐黏土型锂资源的发现及意义. 科学通报, 65(1): 53~59.
- 温汉捷, 顾汉念, 朱丽, 罗重光, 杜胜江. 2020b. 离子交换法提取碳酸盐黏土型锂矿中锂的方法. 中华人民共和国国家知识产权局, ZL201910788413.3.05-12.
- 吴林, 张杰, 王建蕊, 毛瑞勇. 2016. 铝质岩中锂的浸出富集实验研究. 无机盐工业, 48(5): 24~26.
- 严爽. 2020. 黔北新民铝土矿锂的富集规律及其锂同位素指示意义. 贵州大学硕士学位论文, 1~56.
- 杨瑞东, 郑绿林, 程伟, 高军波, 陈军, 孙百川, 张衍. 2021. 黔北桐梓—金沙一带发现晚二叠世煤富集稀土、锂金属元. 地质论评, 67(5): 1543~1544.
- 叶霖, 潘自平, 程增涛. 2008. 贵州修文小山坝铝土矿中镓等伴生元素分布规律研究. 矿物学报, 28(2): 105~111.
- 于飒, 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.
- 余文超, 杜远生, 周琦, 金中国, 汪小妹, 崔滔. 2014. 黔北务正道地区铝土矿层特征及其反映的早二叠世古气候. 古地理学报, 16(1): 30~40.
- 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. 中国科学基金, (2): 106~111.
- 张正伟, 李玉娇, 周灵洁, 吴承泉. 2012. 黔东南铝土矿含矿岩系“煤-铝-铁结构”及地球化学特征. 地质学报, 86(7): 1119~1131.
- 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.

## Distribution characteristics and enrichment mechanism of lithium in bauxite series in Guizhou Province

JIN Zhongguo<sup>1)</sup>, ZHENG Minghong<sup>1)</sup>, LIU Ling<sup>\*1)</sup>, HUANG Zhilong<sup>2)</sup>,  
YE Lin<sup>2)</sup>, WU Sha<sup>3)</sup>, ZENG Daoguo<sup>1)</sup>, GU Jing<sup>2)</sup>

1) *Guizhou Nonferrous Metal and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau, Guizhou, Guiyang 550005, China;*

2) *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy Sciences, Guiyang, Guizhou 550081, China;*

3) *College of Resources and Environment, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China*

*\* Corresponding author: 71313369@qq.com*

### Abstract

Lithium is one of the strategic resources for the development of high-tech industries in China. Guizhou is rich in bauxite resources and widely distributed aluminiferous rock series. It is found that a large number of lithium resources are associated with bauxite (rock). The results show that the content of Li is high, with a wide variation range ( $0.55 \times 10^{-6} \sim 2725.03 \times 10^{-6}$ ), in the aluminiferous rock series. In the plane, the content of Li is generally high in the northeast (Wuzhengdao metallogenic area), high in the southwest (Xiuwen-Qingzhen metallogenic area), and low in the middle (Bozhou-Wengan metallogenic area). In the profile, Li is mainly concentrated in the dense bauxite (ore) in the upper part of the ore system where it is generally higher than  $500 \times 10^{-6}$ , and generally less than  $30 \times 10^{-6}$  in the middle-earth bauxite (rock) of the ore system. The continental lacustrine sedimentary environment with warm and humid climate, weathering and strong leachate is conducive not only to the formation of clay minerals mainly composed of kaolinite, but also to the occurrence of  $\text{Li}^+$  with  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$  that are absorbed into the structure between clay mineral layers with migration and enrichment. Li was positively correlated with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content. In the secondary transformation stage after diagenesis and mineralization, paleomagnetic survey and CIA showed that the oxidation environment was hot and humid. With the enhancement of weathering, desilication and aluminum enrichment, a large amount of Li and  $\text{SiO}_2$  are lost, showing a negative correlation between Li and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content and a positive correlation between Li and  $\text{SiO}_2$  content. The enrichment of Li is closely related to geochemical properties, paleosedimentary environment and epigenetic transformation. Li is mainly derived from the underlying strata with high background, which is consistent with the parent rock of bauxite mineralization. Part of Li may also be derived from the overlying strata rich in Li. The enrichment characteristics of Li in aluminous rock series show that lithium has good prospecting potential.

**Key words:** lithium resources; aluminiferous rock series; distribution characteristics; enrichment mechanism; prospecting potential; Guizhou