

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

张七道^{1,2}, 蒋少涌^{1*}, 王微¹, 葛文³

1.中国地质大学(武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室,资源学院,紧缺战略矿产资源协同创新中心,武汉 430074;
2.中国地质调查局 昆明自然资源综合调查中心,昆明 650100; 3.中国地质大学(武汉) 材料与化学学院,武汉 430074

摘要: 沉积岩型锂矿是自然界中最主要的锂矿床之一,我国铝土岩系和煤系地层中沉积黏土型锂矿主要分布在扬子地块西南部和华北地块,该类型锂矿分布广、储量大,对其进行研究对破解我国未来锂资源困局具有重要意义。本文总结了我国铝土岩系和煤系地层中黏土型锂矿的分布状况,锂的赋存状态、来源,以及开发利用现状等方面的研究进展。锂的富集过程主要与风化-沉积作用及火山岩浆活动有关,锂主要来源于火山凝灰岩、早期形成的岩浆岩、黏土岩等富锂基底岩石。锂以锂绿泥石独立矿物或者类质同象/吸附在黏土矿物、三水铝石和勃姆石中。锂的提取流程与锂的赋存状态密切相关。随着实验及工业提锂技术的发展,该类型锂资源具有广阔的前景。

关键词: 沉积黏土型锂矿; 铝土岩系; 煤系地层; 锂赋存状态; 物质来源; 开发利用潜力

中图分类号: P618.71 doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240006

Current status and prospect of researches on sediment-hosted Li deposits in bauxite formations and coal-bearing strata in China

ZHANG Qi-dao^{1,2}, JIANG Shao-yong^{1*}, WANG Wei¹, GE Wen³

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Resources, Collaborative Innovation Center for Exploration of Strategic mineral Resources, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China;
2. Kunming Gener for Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Kunming 650100, China;
3. Faculty of Material Science and Chemistry, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

Abstract: The sediment-hosted Li deposit is one type of the most important lithium deposits found in nature. Sediment-hosted Li deposits in bauxite formations and coal-bearing strata are mainly distributed in the southwestern Yangtze block and the North China block in China. This type of Li-clay deposit is famous for its large reserve, stable strata and wide distribution. Hence, studying this type of Li-clay deposits is of great significance to solve the lithium resource dilemma of China in the future. In this paper, we have summarized the distribution of this type of Li-clay deposits in bauxite formations and coal-bearing strata in China, and have sorted out research progresses on the Li occurrence state, material source, and development and utilization status of the Li-clay deposits. The Li enrichment process is mainly related to the weathering-sedimentation and volcanic magmatism processes, and the lithium was mainly sourced from the Li-rich basement rocks including volcanic tuff, early formed magmatic rock, clay rock and other rocks. Lithium mainly occurred in forms of lithium independent minerals (cookeite), and isomorphic replacement/adsorption in/on clay

收稿编号: 2023-229, 2023-8-12 收到, 2023-10-25 改回

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20220981, DD20220967); 国家自然科学基金资助项目 (42321001)

第一作者简介: 张七道 (1986—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 矿产普查与勘探专业。E-mail: 506676421@qq.com.

*通信作者简介: 蒋少涌 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 矿床学和地球化学。E-mail: shyjiang@cug.edu.cn.

引用此文:

张七道, 蒋少涌, 王微, 葛文. 2024. 铝土岩系和煤系地层中沉积黏土型锂矿床: 研究现状与展望. 矿物岩石地球化学通报, doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240006

Zhang Q D, Jiang S Y, Wang W, Ge W. 2024. Current status and prospect of researches on sediment-hosted Li deposits in bauxite formations and coal-bearing strata in China. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240006

minerals, gibbsite, and boehmite. The Li extraction process is closely related to the occurrence state of lithium. With the development of the experimental and industrial technologies for extracting lithium from Li ores, this type of Li resources has a broad application prospect.

Key words: sediment-hosted Li-clay deposit; bauxite formations; coal-bearing strata; occurrence status; metal source; development and utilization potential

0 引言

锂(Li)具有非常重要的经济价值,是国家战略性新兴产业,被称为21世纪的“能源金属”“白色石油”或“高能金属”。由于全球低碳能源领域(如电动汽车、风力涡轮机和太阳能电池板发电等)对储能锂电池的需求激增,国际上出现了一股“锂热”,我国对锂的需求量也不断增大。我国锂资源对外依存度高,2022年我国碳酸锂进口量达13.6万t(左更等,2023)。因此,进一步摸清国内锂资源家底是破解我国未来锂资源困局的重要举措。

圈层物质循环中内生地质作用对锂等关键金属元素富集有控制作用,同时外生(表生)成矿物质的循环也会导致这些关键金属元素的超常富集(翟明国等,2019;蒋少涌等,2019)。以往我们更多关注层圈物质循环中的内生地质作用,而对表生物质循环形成的相关沉积岩地区锂成矿的信息未引起足够的重视。沉积岩中的黏土型锂矿床是自然界中主要的三种锂矿类型之一(Kesler et al., 2012; 刘丽君等, 2017; Dessemond et al., 2019),作为锂资源的新类型,越来越受到重视。目前,沉积岩中的锂矿床的分类不统一,有多种不同方案(刘丽君等, 2017; 于泓等, 2019; 隰弯弯等, 2023),例如王微等(2024)根据锂矿床的产出环境及岩石组合特征,将其分为两大类,一类是产于铝土岩系地层和煤系地层中的沉积黏土型锂矿,另一类是湖相沉积黏土型锂矿。根据赋矿矿物及与火山岩的关系,后者又可分为三个亚型,即锂沸石型/贾达尔型、火山沉积黏土型和盐湖沉积黏土型。本文主要综述我国产于铝土岩系地层和煤系地层中的沉积黏土型锂矿的地质特征、赋存状态、物质来源和成因机制的最新研究进展,并探讨此类型锂矿的提取技术、开发利用现状和未来发展前景。

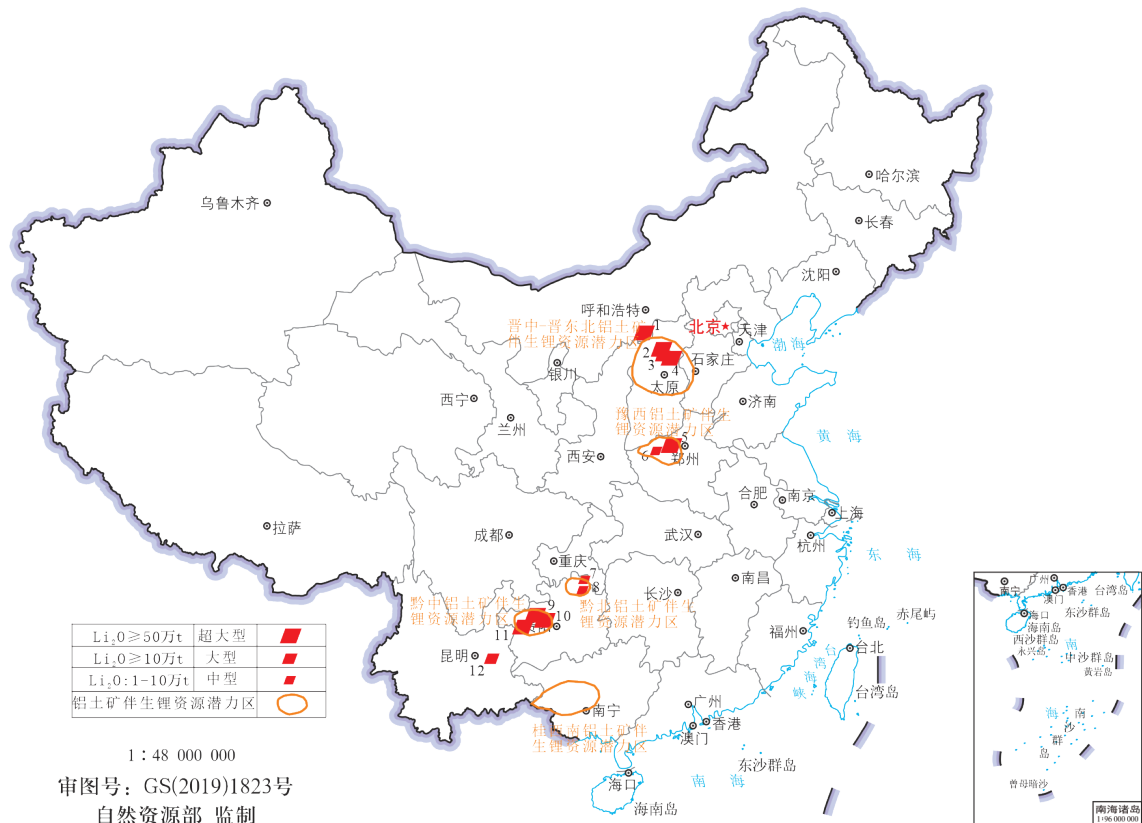
1 铝土岩系和煤系地层中沉积黏土型锂矿的分布特征

近年来,在贵州、云南、广西、重庆、河南、山西等地发现的与铝土矿和煤伴生的锂资源较为丰富,其中不乏含量高、储量大的伴生沉积黏土型锂矿(图1,表

1),且这些矿床的含矿岩系中除锂外,其他关键金属(如Sc、Ga、V、Ti和REE等)也有超常富集,找矿潜力较大(王登红等,2013;邓国仕等,2014;王涛等,2014;温静静等,2016;负孟超等,2017;龙克树等,2019;金中国等,2019;王新彦等,2020;Ling et al., 2020;龙珍等, 2021)。

总体来看,黏土型锂矿主要集中在扬子地块西南部和华北地块(图1)。在扬子地块西南部,古生代碳酸盐岩地层不整合面之上大面积分布铝土矿,并且这些铝土岩系地层中还常伴生Li、镓(Ga)、稀土(REE)等关键矿产(胡瑞忠等, 2020),温汉捷等(2020)将其命名为“碳酸盐黏土型锂矿”新类型。在滇中昆明、玉溪、武定、宜良一带,铝土岩系地层主要为下二叠统倒石头组(P_1d),是一套滨海-湖沼相沉积,岩性主要为砂页岩夹灰岩透镜体、铝土矿和劣质煤层。含锂的铝土岩系岩性组合为铝土质黏土岩、铁质黏土岩和铝土矿,一般厚5~20 m,主要矿物有含铝矿石矿物(一水硬铝石、勃姆石)、含锂黏土矿物(蒙脱石、伊利石、高岭石)及少量其他副矿物(如锐钛矿、金红石、锆石、黄铁矿等)。滇中盆地内倒石头组锂主要赋存在铝土岩系黏土岩中,其中 Li_2O 平均含量为0.3%,最高达1.1%。目前在滇中小石桥和观音山2个勘查靶区7.2 km²的范围内经工程控制,已获得 34×10^4 t氧化锂资源量(按照边界品位0.1% Li_2O ,最低工业品位0.2% Li_2O 圈定矿体),达到超大型规模(温汉捷等, 2020)。

贵州地区的富锂铝土岩系为下石炭统九架炉组(C_{4j}),这是贵州地区最重要的铝土矿赋矿层位(Wang et al., 2018)。九架炉组广泛分布于黔中及其邻近地区的贵阳-平坝-普定一线以北,福泉-黄平-遵义以西,其厚度和分布与石炭纪大塘期黔中古岩溶负地形的发育程度密切相关。含锂铝土岩系的岩性组合为铝土质黏土岩、铁质黏土岩和铝土矿。在黔北务正道地区,中二叠统梁山组是该区重要的铝土矿含矿岩系,其中的锂含量高达 2725×10^{-6} ,锂平均含量 569×10^{-6} (金中国等, 2019)。务正道地区大竹园铝土矿伴生锂资源量为62 337.97 t,锂平均含量 741×10^{-6} ,部分钻孔中锂含量大于 600×10^{-6} 的连续矿层厚度可达数米(翁申富等, 2013;王登红等, 2013;金中国等, 2019)。瓦厂坪铝土



1—准格尔煤田伴生锂;2—平朔矿区9[#]煤伴生锂;3—平朔矿区4[#]煤伴生锂;4—平朔矿区11[#]煤伴生锂;5—焦作煤矿伴生锂;6—马行沟铝土矿伴生锂;7—瓦厂坪铝土矿伴生锂;8—大竹园铝土矿伴生锂;9—晴隆沙子镇煤矿伴生锂;10—晴隆全力煤矿伴生锂;11—普安宏发煤矿伴生锂;12—滇中锂矿

图1 中国产于铝土岩系地层和煤系地层中沉积型黏土锂矿潜力分布图(修改自梁厚鹏,2018;范宏鹏等,2021)

Fig.1 Distribution of sediment-hosted Li-clay deposits in bauxite formations and coal-bearing strata in China (modified from Liang,2018;Fan et al.,2021)

表 1 中国沉积型锂矿统计表

Table 1 Statistics of major sediment-hosted lithium deposits in bauxite formations and coal-bearing strata in China

位置	矿床(项目)名称	边界品位/ (μg/g)	平均品位/ (μg/g)	资源量/万t			参考文献
				Li ₂ O	LCE	Li	
贵州省遵义市务川县	大竹园铝土矿	—	740.7	6.2	15.4	2.9	梁厚鹏,2018; 金中国等,2019
贵州省遵义市务川县	瓦厂坪铝土矿	—	877.3	6.9	17.1	3.2	梁厚鹏,2018; 金中国等,2019
河南省洛阳市新安县	马行沟铝土矿	—	—	3.6	8.9	1.7	王瑞江等,2015
云南省玉溪市小石桥	滇中锂矿	464.5	928.9	34.0	84.1	15.8	温汉捷等,2020
山西省宁武煤田平朔矿区	宁武平朔矿区9 [#] 煤	—	152.0	130.5	322.7	60.6	刘帮军等, 2014,2015
山西省宁武煤田平朔矿区	宁武平朔矿区4 [#] 煤	—	128.3	21.5	53.2	10.0	王瑞江等,2015
山西省宁武煤田平朔矿区	宁武平朔矿区11 [#] 煤	—	—	81.9	202.5	38.0	王瑞江等,2015
内蒙古自治区鄂尔多斯市 准格尔煤田	准格尔煤田6 [#] 煤	—	147.0	352.8	872.5	163.9	褚光琛,2015; Sun et al.,2016
河南省焦作市	河南焦作煤矿	—	—	117.7	291.1	54.7	王瑞江等,2015
贵州省黔西南州普安县	普安宏发煤矿	—	15.90	285.4	705.7	132.5	杨瑞东等,2017
贵州省黔西南州晴隆县	晴隆沙子镇煤矿	—	43.90	3803.7	9406.5	1766.7	杨瑞东等,2017
贵州省黔西南州晴隆县	晴隆全力煤矿	—	19.60	852.3	2107.6	395.8	杨瑞东等,2017

注:“—”表示无数据。

矿伴生锂资源69 188 t, 锂平均含量 877×10^{-6} (金中国等, 2019)。贵阳清镇矿集区小山坝铝土矿中伴生的锂含量可达 $204 \times 10^{-6} \sim 608 \times 10^{-6}$, 平均 493×10^{-6} (梁厚鹏, 2018)。

在华北地块, 铝土矿资源集中分布于山西省和河南省 (图1) (孙莉等, 2018)。山西六大矿区铝土矿中的锂含量平均为 209.6×10^{-6} , 黏土岩中锂的含量较高 (平均为 390×10^{-6}) (杨中华, 2012), 其中平陆曹川铝土矿床的灰黑色铝土岩中锂含量高达 8875×10^{-6} (陈平和柴东浩, 1997), 宁武盆地石墙铝土矿含绿泥石铝土岩锂含量可达 1556×10^{-6} , 宽草坪矿区含绿泥石铝土岩锂含量可达 1178×10^{-6} (孙思磊, 2011)。河南嵩箕铝土矿带中伴生锂资源较高, 其中大峪沟黏土岩和登封白坪铝土岩的锂含量分别可达 680×10^{-6} 和 1260×10^{-6} (温静静等, 2016), 而偃师夹沟铝土岩的锂含量最高可达 3641×10^{-6} (袁爱国, 2010)。在三门峡-渑池-新安铝土矿带中, 三门峡王家后黏土岩锂含量为 887×10^{-6} , 渑池料坡铝土岩为 1175×10^{-6} , 而新安张窑院铝土岩锂含量可达 1652×10^{-6} (麻杰磊, 2015)。

我国有5个赋煤区 (西北区、华北区、东北区、华南区、滇藏区), 其中华北石炭系-二叠系含煤岩系和华南-滇藏二叠系含煤岩系中的锂较为富集 (Dai et al., 2006)。位于晋、陕、蒙交界的华北准格尔煤田的6[#]煤层锂平均含量为 147×10^{-6} (褚光琛, 2015; Sun et al., 2016), 锂远景资源量可达352.8万t氧化锂。山西宁武煤田的安太堡露天煤矿和安家岭露天矿区9[#]煤层中锂的平均含量分别为 172×10^{-6} 和 230×10^{-6} , 最高分别为 657×10^{-6} 和 840×10^{-6} (Sun et al., 2010; 衣姝和王金喜, 2014; 李华等, 2014)。平朔矿区9[#]煤中锂的平均含量为 166×10^{-6} 或 152×10^{-6} , 估算的金属锂远景资源量可达55.8~60.9万t, 即119.5~130.5万t氧化锂 (刘帮军和林明月, 2014, 2015); 4[#]煤中伴生锂10万t, 约21.5万t氧化锂; 11[#]煤中伴生锂38.26万t, 约81.88万t氧化锂 (王瑞江等, 2015)。宁武煤田老窑沟煤矿的含煤地层主要为下二叠统-上石炭统太原组和中二叠统山西组。老窑沟5[#]煤中煤和夹矸中的Li平均含量分别为 163.4×10^{-6} 和 214.3×10^{-6} , 虽然夹矸中的Li含量高于煤中的, 但Li在煤中的富集系数却高于夹矸 (李鸿豆等, 2022)。河南焦作地区的黏土矿中金属锂资源量约55万t, 约合氧化锂资源量117.7万t (王瑞江等, 2015)。贵州普安宏发煤矿中的锂平均含量为 15.9×10^{-6} , 氧化锂资源量285.35 t; 晴隆沙子镇煤矿中锂含量平均为 43.9×10^{-6} , 氧化锂资源量为3803.68 t; 晴隆全力煤矿中锂含量平均为 19.6×10^{-6} , 氧化锂资源量为852.25 t (杨瑞东等, 2017)。

综上所述, 和铝土岩系黏土型锂矿锂的富集程度相比, 煤系地层中锂的富集程度普遍较低。但由于铝土矿或煤矿储量较大, 锂作为伴生矿产开发利用具有一定的前景。因此, 该类锂矿中锂的赋存状态是开展锂提取工作的重要前提。

2 锂的赋存状态

黏土矿物具有较强的吸附性, 其晶体构造层间含水及一些交换阳离子, 有较高的离子交换容量, 纯净的黏土矿物晶体内部会与外界离子发生置换。不同的黏土矿物, 其吸附和交换能力不同, 因此锂在不同黏土矿物中的赋存形式和含量不同。研究黏土型锂矿中锂的赋存状态直接影响锂的提取流程, 因Li元素是较为活泼的金属元素, 一些常规测试手段及研究方法难以确定锂元素的赋存状态, 因而关于Li的赋存状态的认识目前尚不统一。

2.1 蒙脱石中的锂

早期研究发现, 美国的火山岩黏土型锂矿的主要含锂矿物之一为含镁蒙脱石 (Rytuba and Glanzman, 1979; Glanzman and Rytuba, 1979; Benson et al., 2023), 而蒙脱石也是我国铝土岩系地层中黏土型锂矿的主要赋存矿物之一。温汉捷等 (2020) 通过激光诱导击穿光谱 (LIBS) 测试结合飞行时间二次离子质谱元素面扫描 (ToF-SIMS) 与透射电子显微镜 (TEM) 对贵州九架炉组黏土型锂矿的研究发现, Li与Si、Mg的相关性最强, 其次为Na、K, 而与Ti、Fe、Al等元素的相关性较差, 反映Li的主要赋存矿物应为非晶质黏土矿物且是富镁黏土矿物, 推测Li主要呈吸附形式赋存于黏土岩的蒙脱石相中, 部分进入蒙脱石晶格中。Ling等 (2020) 通过LA-ICP-MS原位分析研究了黔西南地区铝土矿中伴生Li的赋存状态, 结果显示高岭石、伊利石聚集体的平均Li含量远高于水铝石、勃姆石等铝土矿矿物中的, 据此认为Li主要赋存于黏土矿物中; 他们通过扫描电镜能谱 (SEM-EDS) 分析发现, 部分粗粒矿物可转化为蒙脱石 (如蒙皂石), 表明混合在高岭石、伊利石聚集体中的蒙脱石、绿泥石也可能是Li的主要赋存矿物; 通过进一步对比小山坝铝土矿绿泥石和高岭石全岩样品Li含量 (平均分别为 210×10^{-6} 和 390×10^{-6}), 结合Li与MgO、K₂O相关性分析、伊利石聚集体中超过40倍变化的Li含量, 综合蒙脱石矿物晶体性质和硫酸浸出实验, 推断铝土矿伴生Li可能以类质同象的形式富集在蒙脱石中。严爽 (2020) 对黔北新民铝土矿样品进行了XRD分析, 结果显示Li只赋存在高岭石, 而无蒙脱石, 可能与蒙脱石通过固相转变或溶解-再结晶导致黏土矿物间相互转化有关, 相变前Li是以吸附形式赋存于蒙

脱石中。在煤系地层中, 只有俄罗斯远东地区的煤田中的Li是以锂迪开石-蒙脱石形式产出(代俊峰等, 2021)。

2.2 锂绿泥石中的锂

锂绿泥石是我国铝土岩系和煤系地层中重要的含锂独立矿物。宋云华等(1987)通过XRD、X射线粉晶、红外吸收光谱、热分析(差热及失重分析)、透射及扫描电子显微镜、穆斯堡尔谱、电子顺磁共振和化学分析等多种方法研究了河南黏土矿物, 发现锂主要以锂绿泥石的形式存在。钟海仁等(2019)通过元素相关性 & 黏土矿物结构研究, 发现锂和碱及碱土金属元素呈正相关性, 和Zr、Nb等存在特定关系, 锂主要以离子交换和离子吸附形式赋存在高岭石、绿泥石、蒙脱石等黏土矿物中, 同时存在锂的独立矿物(锂绿泥石及锂蒙脱石等)。雷志远(2021)通过XRD实验研究, 表明贵州务正道地区高铝岩系中Li富集的主要矿物是锂绿泥石独立矿物。姚双秋等(2021)和凌坤跃等(2021)利用全岩主量、微量元素组成、XRD和SEM-EDS分析, 发现上覆黏土岩含大量锂绿泥石且与Li含量与其呈显著正相关, 认为广西平果上二叠统合山组黏土岩中锂的主要载体矿物为锂绿泥石。此外, 黏土岩中的锂绿泥石与伊利石、叶蜡石共生且关系密切, 叶蜡石与锂绿泥石($R^2 = -0.95$)、伊利石($R^2 = -0.94$)含量均呈显著负相关, 表明锂绿泥石也可能在成岩过程中由叶蜡石或伊利石与富Li溶液反应形成。崔燚等(2022)以滇中地区典型碳酸盐黏土型锂矿为研究对象, 利用XRD、SEM-EDX 对富锂黏土岩进行矿物学研究的基础上, 采用聚焦离子束(FIB)切片结合飞行时间二次离子质谱仪(TOF-SIMS)的方法分析了富锂黏土岩微米尺度上的元素分布特征, 结果表明, Li的富集区域与Si和Mg吻合, 指示Li的载体矿物为富Mg黏土矿物, 鉴定出富Li矿物为蒙皂石或锂绿泥石。晋城煤田王台铺矿晚石炭世15号煤层中, Zhao等(2018)通过SEM-EDS、全岩锂含量和全岩XRD分析发现, Al/Si原子比在1.2~1.4之间, 赋存矿物不可能是高岭石, 而全岩样品锂含量和XRD定量分析的绿泥石含量高度正相关($R^2 = 0.92$), 因此认为锂主要赋存于锂绿泥石中。而内蒙古管板乌苏煤矿中锂绿泥石和鲕绿泥石是主要的含Li矿物(Dai et al., 2012)。锂绿泥石和含锂绿泥石在草堂煤矿中也被发现(Zhou et al., 2021)。

2.3 高岭石中的锂

据龙珍等(2021)研究, 贵州新民铝土矿矿床中的Li主要赋存于高岭石中, 少量赋存于伊利石(水云母)和残存的三水铝石、勃姆石中。曹泊等(2022)通过反光显微镜、扫描电镜、X射线衍射、X射线荧光光谱、电感耦合等离子质谱等测试方法, 结合碳质泥岩的矿物

学及元素地球化学特征, 发现广西上林合山组高锂的炭质泥岩(Li > 200 μg/g)中Li含量与高岭石含量呈显著正相关($R^2 = 0.85$), 与伊蒙混层呈显著负相关($R^2 = 0.95$), Li小于200 μg/g的碳质泥岩中锂含量与高岭石含量的相关性不明显, 与伊蒙混层呈一定程度的正相关($R^2 = 0.66$), 表明伊蒙混层可能是低锂的碳质泥岩中锂的载体矿物, 高岭石是高锂的碳质泥岩中锂的主要载体矿物。Zou等(2020)研究表明, 重庆东沟煤矿中的高岭石和锂含量呈正相关, 高岭石是锂的主要载体矿物。Sun等(2022)采用ToF-SIMS对安太堡进行原位分析也发现锂赋存于高岭石中。

2.4 硬水铝石中的锂

梁厚鹏(2018)发现贵州小山坝铝土矿中的铝土岩较铝土矿更富集锂, 这与锂易受黏土矿物吸附而呈类质同象置换有关, 因为铝土矿(岩)中伴生锂的赋存形式主要是Li以不成对类质同象替换($Al^{3+} + Li^{+} \rightarrow Si^{4+}$)方式赋存。覃顺桥等(2023)对桂中地区上二叠统合山组中富集的锂研究发现, Li与 Al_2O_3 、CIA均呈正相关, 表明随着沉积岩风化程度、黏土矿物和铝氧化物含量的增大, Li含量不断增加并受黏土矿物或铝氢氧化物含量控制。在Li最富集的铁质铝土岩中, Li与硬水铝石及黏土矿物含量分别呈正相关和负相关, 表明Li的主要载体矿物为硬水铝石, 且可能以类质同象替代为主。

综上所述, 关于沉积型锂的赋存状态主要存在几种认识: 锂的独立矿物(锂绿泥石等)、类质同象或吸附于黏土矿物(高岭石、伊利石和蒙脱石等)、三水铝石和勃姆石。不同岩系、不同地区锂的赋存形式存在差异。有学者认为, 这主要是不同地区黏土矿物的含量不同所致(钟海仁等, 2019), 并在某种条件下黏土矿物间、铝矿物间及二者之间会发生生物相转变, 酸性富Si条件下硬水铝石可转变为后生高岭石, 高岭石脱Si可形成硬水铝石; 碱性环境下富Fe、Mg易形成绿泥石, 富K易形成伊利石; 风化较弱的地表或埋深较浅时易形成蒙脱石(靳平平等, 2018)。蒙脱石会随着成岩作用的进行逐渐转变为伊利石, 进而形成锂伊利石(Ling et al., 2020)。关于铝土岩系和煤系地层中黏土矿物的形成过程还不清楚, 有待进一步研究。

3 锂的来源

铝土矿的成矿物质来源可分为原地-近原地沉积岩源岩(以贵州下石炭统-下二叠统铝土矿为代表)和异地火山活动来源(以广西上二叠统铝土矿为代表)及过渡型(以华北上石炭统铝土矿为代表), 分别代表板块内部、板块边缘及板块周缘造山带环境下的铝土矿成矿物源供给模式(余文超等, 2023)。那么与含铝岩

系伴生的Li的来源是否和铝土矿相同呢?

务正道地区含铝岩系基底地层下志留统韩家店组(S_1hj)泥、页岩和零星分布的上石炭统黄龙组(C_2h)白云岩、灰岩是区内铝土矿最直接的物源,而韩家店组泥页岩是最主要的物质来源(刘平,2007;杜远生等,2013)。温汉捷等(2020)对贵州九架炉组和云南中部下二叠统倒石头组的锂超常富集的黏土岩研究显示,富锂黏土岩与下伏碳酸盐岩中的不活动元素对(如Zr-Hf和Nb-Ta)具有很好的线性相关关系,且与下伏碳酸盐岩关系密切。微量元素蛛网图和稀土元素配分模式图也与下伏碳酸盐岩极为相似,反映出明显的继承关系,认为成矿物质来自基底的不纯碳酸盐岩,碳酸盐岩风化-沉积作用是富锂黏土岩形成的主要机制。金中国等(2023)通过对贵州铝土矿含矿岩系中锂的研究,认为Li主要来源于与铝土矿成母岩一致的高背景下伏地层,上覆富Li地层也有部分贡献。

雷志远(2021)对务正道典型铝土矿矿床剖面的地球化学研究表明,该矿床的(Sm/Nd)-(Eu/Eu*)、Ni-Cr、Nb/Ta的高比值特征与玄武岩质岩石一致, Li同位素与川西甲基卡伟晶岩型Li矿床相似, Li的来源应为基性岩浆岩和岩浆岩型锂矿床。严爽(2020)根据Cr/Ni、Zr/Ti、Nb/Ta比值认为黔北新民铝土矿中的锂为多来源,与下伏地层韩家店组泥页岩有一定关系,最终物源可能为新元古代-中元古代岩浆岩。许箭琪(2021)发现桂西上二叠统领薨组合山组的同期异相地层采取的凝灰岩样品的锂含量较高(70~200 $\mu\text{g/g}$ 不等),认为火山灰为锂在黏土岩中富集提供了充足的物源。钟海仁等(2019)通过碎屑锆石年龄与相应地质事件的对比,认为富锂的沉积型铝土矿(岩)初始物质来源与大型构造-岩浆活动及之后的风化沉积作用密切相关,岩浆岩需要经过长时间的风化剥蚀作用才能提供Li,(中酸性)的富锂岩浆岩可能是锂元素的最初物源。Deng等(2010)研究表明,广西西部的铝土矿碎屑锆石的U-Pb年龄集中在256和261 Ma,其物源主要为峨眉山玄

武岩,少量为下伏碳酸盐岩。

上述研究表明,锂与铝土矿成矿物质具有相同的物源,锂可能源自铝硅酸盐风化,黏土岩基底的泥质灰岩、泥页岩、白云岩等(原地-近原地沉积岩源岩),以及早期形成的岩浆岩、凝灰岩经风化、剥蚀和搬运提供(异地火山活动来源)(图2)。

我国富锂煤矿在地理位置上与铝土矿的分布位置有一定的重合(图1)。富锂煤中锂的来源受限于物源区的地质属性和地质构造演化特征。我国北方地区富煤层中锂可能来源于富锂煤层盆地周围的新太古代钾长花岗岩和/或与之共生的本溪组风化壳铝土矿(Dai et al.,2006;Sun et al.,2016;Zhao et al.,2019),如内蒙古准格尔煤田和山西宁武煤田富锂煤的锂同位素特征均显示煤层中的锂源自阴山古陆花岗岩,夹矸中的锂源自本溪组铝土矿或二者为混合来源(He et al.,2020)。我国西南地区富锂煤层的元素地球化学指标,如 TiO_2 vs. Al_2O_3 、Nb/Ta、U/Th、Zr/Hf等,均反映其中的锂与玄武岩的风化剥蚀和峨眉山大火成岩有关联(Dai et al.,2014)。此外,有研究者通过对内蒙古准格尔煤田6号煤层、宁武盆地9号煤层、大青山煤田、四川盆地晚三叠世须家河组的研究,还发现成煤期都有热液活动,深部来源的(岩浆)热液或富挥发分的流体或变质流体沿基底断裂进入含煤盆地,流体自身携带或从围岩中淋滤出大量的关键金属元素进入含煤盆地并富集,并认为后生阶段的热液活动是煤中锂富集的主要控制因素(Dai et al.,2008;Sun et al.,2013;Zhou et al.,2021)。

4 沉积黏土型锂矿开发利用潜力评价

铝土岩系和煤系地层中黏土型锂矿的黏土矿物粒度小、锂含量低,独立锂矿物较难形成、Li多以离子吸附或类质同象形式存在,共生矿物种类复杂(如一水铝石、勃姆石、黄铁矿、食盐、石膏、方解石等)。因此,锂矿中锂的赋存矿物、赋存形式、共生矿物的差异性决定了后续提取浸出工艺和净化除杂过程。

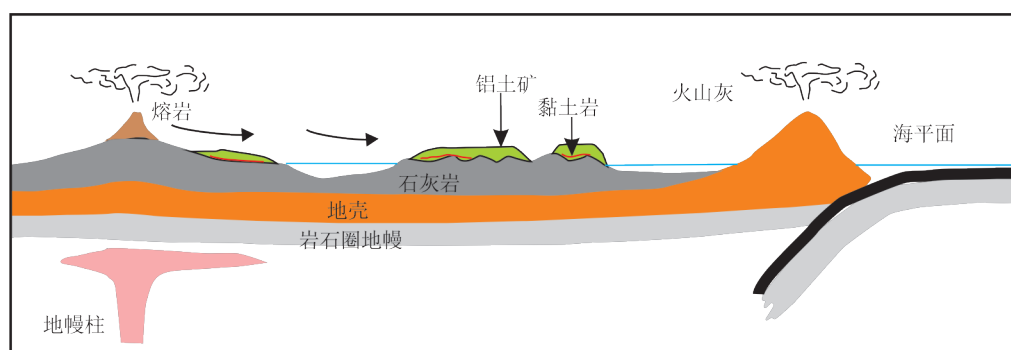


图2 铝土岩系沉积黏土型锂矿成矿模式图(修改自 Liu et al.,2023)

Fig.2 The model for the formation of sediment-hosted Li-clay deposits in bauxite formations (modified from Liu et al.,2023)

国外与湖相沉积盆地有关的火山岩黏土型锂矿中的富锂矿物主要为富镁蒙脱石、伊利石,其化学组成具有低Al高Mg的特征(Benson et al.,2023)。我国铝土岩系中富锂矿物主要为蒙脱石、伊利石、绿泥石等硅铝质和含铁硅铝质黏土矿物,其化学成分具有Al和Si含量接近、Mg含量低的特征。而含铝岩系中锂的提取方法和过程与火山岩黏土型是不用的。我国目前对铝土岩系中锂的提取主要采用(助剂)焙烧法-酸浸出法和焙烧-离子交换法。宋云华等(1987)使用盐酸-稀硫酸-氢氧化钠溶液等多种介质在25~100℃条件下对河南黏土岩中的锂进行阳离子交换实验,发现被交换下来的锂含量极少,由此认为黏土岩中的锂不是呈离子状态被吸附。李荣改等(2014)采用硫酸钙、氟化钙、硫酸钠与原矿(2mm)混合,于800℃焙烧2h后,用50%的硫酸以液固比3:1在20℃浸出1h,锂的浸出率可达95.32%。任方涛和张杰(2013)对黔中铝质岩中的锂矿采用焙烧-酸浸出法进行浸出实验,得到浸出率可达95.35%,浸出的最佳条件为矿样粒度小于75 μm ,焙烧温度800℃,反应时间2h,反应温度60℃,质量分数10%的盐酸与矿粉体积质量比为4mL/g。同样,碳酸盐黏土型锂矿在焙烧温度600℃,焙烧时间1h,硫酸浓度20%,液固比5mL/g,反应温度80℃,反应时间1h的实验条件下,锂的浸出率可达80%以上(Gu et al.,2020a,2020b)。吴林等(2016)利用氢氟酸对息烽-修文铝质岩中富集的锂进行浸取试验,在75℃和常温(25℃),液固比8:1,HF体积分数为17%,以300 r/min的搅拌强度下反应15min,锂浸出率分别为98.73%和83.80%。然而,以上方法均使用焙烧、硫酸、盐酸、氢氟酸,对环境友好性差。近年来,温汉捷等(2019)采用破碎磨粉-高温焙烧-铁盐溶液离子交换-含锂滤液工艺流程,不仅使锂的提取率最高可达90%,而且具有低成本、高效率、环境友好、工艺简单等特点。赵中伟等(2021)采用电化学方法强制锂离子移动富集,直接从黏土型锂矿中提取锂,该方法绿色高效低耗能,对环境友好。

煤系地层中的锂主要是从粉煤灰和煤矸石中提取,因为锂等关键金属多为难挥发性元素。富含关键金属的煤经燃烧后,金属在粉煤灰和煤矸石中富集(康超等,2023),主要采用“单一/复合活化-碱熔/酸浸-吸附法提取。煤矸石活性较低,直接加酸浸出提取稀有金属的回收率往往极低,需采用热处理、插层、碱处理、添加化学助剂等方式改变晶体结构,才能提高浸出率,再采用溶剂萃取、吸附、沉淀、离子交换等方法从浸出液中提取稀有金属(康超等,2023)。例如成俊伟等(2019)添加碳酸钠助剂焙烧活化矸石,促进晶相转化,提高锂浸出率,再将活化后的矸石置于盐酸溶液中

浸出4h提锂,又经萃取除铁、沉淀提铝后,用自制H型离子筛吸附回收溶液中 Li^+ ,锂回收率达99%以上。粉煤灰中锂提取首先进行研磨、过筛等处理,再加助剂焙烧(钠化焙烧、钙化焙烧、铵法烧结、混合助剂焙烧、硫酸烧结、氟化物助剂烧结等),使粉煤灰中稳定的硅铝键得到有效破坏,铝变为较活泼状态,非晶相中的锂被活化,硅铝晶格内的锂被释放出来,然后向熟料中加酸或碱进行浸出,使有价金属以离子的形式转移到溶液中,最后,对浸出液进行除杂富集,提取富集母液中有价金属(薄朋慧等,2019)。目前,从粉煤灰浸出液中提取锂的方法主要为吸附法(程芳琴等,2017),不同阳离子树脂(凝胶)和阳离子树脂(大孔)对锂离子吸附也具有影响(侯永茹等,2015)。

目前沉积黏土型锂矿中的锂提取多处于实验阶段。综合来看,锂的提取比传统类型锂矿中锂的提取工艺复杂、耗能高、投入大、产出少。目前大部分沉积型锂矿还处于勘探阶段,开发利用程度较低,生产矿区较少(许志琴等,2021)。但该类型锂矿是自然界中重要的锂资源,具有分布面积大、产出层位稳定、厚度大、储量较大等优点(胡瑞忠等,2020),有可能成为中国锂资源开发利用的一个重要发展方向(王登红等,2013;温汉捷等,2020;范宏鹏等,2021)。随着实验及工业提锂技术的不断进步,该类型锂矿具有广阔的开发利用前景。

5 结论

铝土岩系和煤系地层中锂的富集过程主要与风化-沉积作用及火山岩浆活动有关。物质来源多样,有原地-近原地沉积岩源岩(如铝硅酸盐、黏土岩、基底的泥质灰岩、泥页岩、白云岩等)和异地来源(凝灰岩,早期形成的岩浆岩经风化、剥蚀和搬运等)。锂的赋存状态主要有锂的独立矿物(锂绿泥石等),类质同象和/或吸附于黏土矿物(高岭石、伊利石和蒙脱石等)、三水铝石和勃姆石等。目前该类型锂矿中锂的提取多限于实验阶段,锂的提取比传统锂矿类型工艺复杂、耗能较高。

作者贡献声明: 张七道,数据获取、分析与总结,资料收集与整理,论文初稿撰写;蒋少涌,项目负责,数据分析与总结,论文修改与定稿;王微,数据获取,资料收集与整理,论文修改;葛文,数据获取,资料收集与整理,论文修改。

利益冲突声明: 作者保证本文无利益冲突。

参考文献 (References):

- Benson T R, Coble M A, Dilles J H. 2023. Hydrothermal enrichment of lithium in intracaldera illite-bearing claystones. *Science Advances*, 9(35):

eadh8183

- 薄朋慧, 吴士豪, 王炎, 徐飞, 李神勇, 秦身钧. 2019. 粉煤灰中有价金属元素铝、镓、锂活化浸出提取研究进展. *应用化工*, 48(8): 1924–1929 [Bo P H, Wu S H, Wang Y, Xu F, Li S Y, Qin S J. 2019. Research progress of activated leaching and extraction of valuable aluminum, gallium and lithium metal elements from fly ash. *Applied Chemical Industry*, 48(8): 1924–1929 (in Chinese with English abstract)]
- 曹泊, 秦云虎, 朱士飞, 傅雪海, 徐辉, 宗师. 2022. 广西上林合山组炭质泥岩中锂和稀土元素的成因及富集机制. *煤炭学报*, 47(5): 1851–1864 [Cao B, Qin Y H, Zhu S F, Fu X H, Xu H, Zong S. 2022. Origin and enrichment mechanism of lithium and rare earth elements in carbonaceous mudstone of Heshan Formation, Shanglin, Guangxi. *Journal of China Coal Society*, 47(5): 1851–1864 (in Chinese with English abstract)]
- 陈平, 柴浩. 1997. 山西地块石炭纪铝土矿沉积地球化学研究. 太原: 山西科学技术出版社 [Chen P, Chai D H. 1997. *Sedimentary Geochemistry of Carboniferous Bauxite Deposit in Shanxi Massif*. Taiyuan: Shanxi Scientific & Technical Publishers(in Chinese)]
- 程芳琴, 王波, 成怀刚. 2017. 粉煤灰提取高附加值元素的技术现状及进展. *无机盐工业*, 49(2): 1–4 [Cheng F Q, Wang B, Cheng H G. 2017. Research progress of extracting high added value elements from fly ash. *Inorganic Chemicals Industry*, 49(2): 1–4 (in Chinese with English abstract)]
- 成俊伟, 任卫国, 王建成, 韩丽娜, 常丽萍, 鲍卫仁. 2019. 吸附法提取煤矸石中锂的工艺. *化工进展*, 38(8): 3589–3595 [Cheng J W, Ren W G, Wang J C, Han L N, Chang L P, Bao W R. 2019. Extraction of lithium from coal gangue by manganese ion sieve adsorption. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 38(8): 3589–3595 (in Chinese with English abstract)]
- 褚光琛. 2015. 准格尔煤田煤中稀有金属富集机理的实验模拟(硕士学位论文). 邯郸: 河北工程大学 [Chu G C. 2015. *Simulated Experiment on Enrichment Mechanism of Rare Metal in Coal of Jungar Coalfield* (Dissertation). Hebei University of Engineering, Handan (in Chinese with English abstract)]
- 崔焱, 温汉捷, 于文修, 罗重光, 杜胜江, 凌坤跃, 徐飞, 杨季华. 2022. 滇中下二叠统倒石头组富锂黏土岩系锂的赋存状态及富集机制研究. *岩石学报*, 38(7): 2080–2094 [Cui Y, Wen H J, Yu W X, Luo C G, Du S J, Ling K Y, Xu F, Yang J H. 2022. Study on the occurrence state and enrichment mechanism of lithium in lithium-rich clay rock series of the Daoshitou Formation of Lower Permian in Central Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 38(7): 2080–2094 (in Chinese with English abstract)]
- 代俊峰, 李增华, 许德如, 邓腾, 赵磊, 张鑫, 王水龙, 张健, 孔令涛, 尚培. 2021. 煤型关键金属矿产研究进展. *大地构造与成矿学*, 45(5): 963–982 [Dai J F, Li Z H, Xu D R, Deng T, Zhao L, Zhang X, Wang S L, Zhang J, Kong L T, Shang P. 2021. Coal-hosted critical metal deposits: A review. *Geotectonica et Metallogenia*, 45(5): 963–982 (in Chinese with English abstract)]
- Dai S F, Li D, Chou C L, Zhao L, Zhang Y, Ren D Y, Ma Y W, Sun Y Y. 2008. Mineralogy and geochemistry of boehmite-rich coals: New insights from the Haerwusu Surface Mine, Jungar Coalfield, Inner Mongolia, China. *International Journal of Coal Geology*, 74(3–4): 185–202
- Dai S F, Li T, Seredin V V, Ward C R, Hower J C, Zhou Y P, Zhang M Q, Song X L, Song W J, Zhao C L. 2014. Origin of minerals and elements in the Late Permian coals, tonsteins, and host rocks of the Xinde Mine, Xuanwei, eastern Yunnan, China. *International Journal of Coal Geology*, 121: 53–78
- Dai S F, Wang X B, Seredin V V, Hower J C, Ward C R, O'Keefe J M K, Huang W H, Li T, Li X, Liu H D, Xue W F, Zhao L X. 2012. Petrology, mineralogy, and geochemistry of the Ge-rich coal from the Wulantuga Ge ore deposit, Inner Mongolia, China: New data and genetic implications. *International Journal of Coal Geology*, 90–91: 72–99
- Dai S F, Zeng R S, Sun Y Z. 2006. Enrichment of arsenic, antimony, mercury, and thallium in a Late Permian anthracite from Xingren, Guizhou, Southwest China. *International Journal of Coal Geology*, 66(3): 217–226
- 邓国仕, 李军敏, 杨桂花, 赵晓东, 陈莉, 陈阳, 吕涛. 2014. 渝南水江板桥铝土矿区锂的分布规律及其影响因素研究. *中国矿业*, 23(3): 72–79 [Deng G S, Li J M, Yang G H, Zhao X D, Chen L, Chen Y, Lv T. 2014. Distribution law of Lithium and its influencing factors in Shuijiangbanqiao bauxite mining area, Southern Chongqing. *China Mining Magazine*, 23(3): 72–79 (in Chinese with English abstract)]
- Deng J, Wang Q F, Yang S J, Liu X F, Zhang Q Z, Yang L Q, Yang Y H. 2010. Genetic relationship between the Emeishan plume and the bauxite deposits in Western Guangxi, China: Constraints from U–Pb and Lu–Hf isotopes of the detrital zircons in bauxite ores. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(5–6): 412–424
- Dessemond C, Lajoie-Leroux F, Soucy G, Laroche N, Magnan J F. 2019. Spodumene: The lithium market, resources and processes. *Minerals*, 9(6): 334
- 杜远生, 周琦, 金中国, 凌文黎, 张雄华, 喻建新, 汪小妹, 余文超, 黄兴, 崔滔, 雷志远, 翁申富, 吴波, 覃永军, 曹建州, 彭先红, 张震, 邓虎. 2013. 黔北务正道地区铝土矿基础地质与成矿作用研究进展. *地质科技情报*, 32(1): 1–6 [Du Y S, Zhou Q, Jin Z G, Ling W L, Zhang X H, Yu J X, Wang X M, Yu W C, Huang X, Cui T, Lei Z Y, Weng S F, Wu B, Qin Y J, Cao J Z, Peng X H, Zhang Z, Deng H. 2013. Advances in basic geology and metallogenic regularity study of bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province. *Geological Science and Technology Information*, 32(1): 1–6 (in Chinese with English abstract)]
- 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(S1): 382–390 [Fan H P, Ye L, Huang Z L. 2021. The associated lithium resource in bauxite(bauxite-bearing rock). *Acta Mineralogica Sinica*, 41 (S1): 382–390 (in Chinese with English abstract)]
- Glanzman R, Rytuba J. 1979. Zeolite-clay mineral zonation of volcanoclastic sediments within the McDermitt caldera complex of Nevada and Oregon
- Gu H N, Guo T F, Wen H J, Luo C G, Cui Y, Du S J, Wang N. 2020. Leaching efficiency of sulfuric acid on selective lithium leachability from bauxitic clastone. *Minerals Engineering*, 145: 106076
- Gu H N, Li W Y, Li Z H, Guo T F, Wen H J, Wang N. 2020. Leaching behavior of lithium from bauxite residue using acetic acid. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37(2): 443–451
- He H T, Wang J X, Xing L C, Zhao S S, He M Y, Zhao C L, Sun Y Z. 2020. Enrichment mechanisms of lithium in the No. 6 coal seam from the Guanbanwusu Mine, Inner Mongolia, China: Explanations based on Li isotope values and density functional theory calculations. *Journal of Geochemical Exploration*, 213: 106510
- 侯永茹, 李彦恒, 代红, 侯晓琪. 2015. 用吸附法从粉煤灰碱性溶液里提取

- 锂. 粉煤灰综合利用, 28(3): 10–11, 16 [Hou Y R, Li Y H, Dai H, Hou X Q. 2015. Experimental study on lithium extraction from fly ash alkaline solution by absorption method. *Fly Ash Comprehensive Utilization*, 28(3): 10–11, 16 (in Chinese with English abstract)]
- 胡瑞忠, 温汉捷, 叶霖, 陈伟, 夏勇, 樊海峰, 黄勇, 朱经经, 付山岭. 2020. 扬子地块西南部关键金属元素成矿作用. *科学通报*, 65(33): 3700–3714 [Hu R Z, Wen H J, Ye L, Chen W, Xia Y, Fan H F, Huang Y, Zhu J J, Fu S L. 2020. Metallogeny of critical metals in the Southwestern Yangtze Block. *Chinese Science Bulletin*, 65(33): 3700–3714 (in Chinese with English abstract)]
- 蒋少涌, 温汉捷, 许成, 王焰, 苏慧敏, 孙卫东. 2019. 关键金属元素的多圈层循环与富集机理: 主要科学问题及未来研究方向. *中国科学基金*, 33(2): 112–118 [Jiang S Y, Wen H J, Xu C, Wang Y, Su H M, Sun W D. 2019. Earth sphere cycling and enrichment mechanism of critical metals: Major scientific issues for future research. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 33(2): 112–118 (in Chinese with English abstract)]
- 靳平平, 欧成华, 马中高, 李丹, 任玉金, 赵永富. 2018. 蒙脱石与相关黏土矿物的演变规律及其对页岩气开发的影响. *石油物探*, 57(3): 344–355 [Jin P P, Ou C H, Ma Z G, Li D, Ren Y J, Zhao Y F. 2018. Evolution of montmorillonite and its related clay minerals and their effects on shale gas development. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 57(3): 344–355 (in Chinese with English abstract)]
- 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 [Jin Z G, Liu L, Huang Z L, Liu C S, Zheng M H, Gu J, Zou L, Wang L. 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)]
- 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 [Jin Z G, Zheng M H, Liu L, Huang Z L, Ye L, Wu S, Zeng D G, Gu J. 2023. Distribution characteristics and enrichment mechanism of lithium in bauxite series in Guizhou Province. *Acta Geologica Sinica*, 97(1): 69–81 (in Chinese with English abstract)]
- 康超, 乔金鹏, 杨胜超, 彭超, 付元鹏, 刘斌, 刘建荣, Tatiana Aleksandrova, 段晨龙. 2023. 煤矸石中有关关键金属活化提取研究进展. *化工学报*, 74(7): 2783–2799 [Kang C, Qiao J P, Yang S C, Peng C, Fu Y P, Liu B, Liu J R, Aleksandrova T, Duan C L. 2023. Research progress on activation extraction of valuable metals in coal gangue. *CIESC Journal*, 74(7): 2783–2799 (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: 55–69
- 雷志远. 2021. 贵州务正道地区高铝岩系锂的存在形式和富集机制(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学 [Lei Z Y. 2021. Existence Form and Enrichment Mechanism of Lithium in Bauxitic Rocks of the Wuzhengdao Belt, Northern Guizhou(Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract)]
- 李鸿豆, 左贵彬, 田泽奇, 郭旭, 王军燕, 郭文牧, 肖林. 2022. 山西宁武煤田老窑沟富锂煤的矿物学特征及其成因. *矿物岩石地球化学通报*, 41(3): 587–598 [Li H D, Zuo G B, Tian Z Q, Guo X, Wang J Y, Guo W M, Xiao L. 2022. Mineralogical characteristics and genesis of the Laoyaogou lithium-rich coal in the Ningwu Coalfield, Shanxi Province, China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 41(3): 587–598 (in Chinese with English abstract)]
- 李华, 许霞, 杨恺. 2014. 山西平朔矿区4号煤中锂、镓资源成矿地质特征研究. *中国煤炭地质*, 26(12): 17–19 [Li H, Xu X, Yang K. 2014. Lithium and gallium resources metallogenic geological characteristics in coal No.4, pingshuo mining area, Shanxi. *Coal Geology of China*, 26(12): 17–19 (in Chinese with English abstract)]
- 李荣改, 宋翔宇, 高志, 冯艳丽, 李志伟. 2014. 河南某地低品位含锂粘土矿提锂新工艺研究. *矿冶工程*, 34(6): 81–84 [Li R G, Song X Y, Gao Z, Feng Y L, Li Z W. 2014. New technology for extracting Li from low-grade lithium-bearing clay. *Mining and Metallurgical Engineering*, 34(6): 81–84 (in Chinese with English abstract)]
- 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(硕士学位论文). 贵阳: 贵州大学 [Liang H P. 2018. Investigate the Occurrence Characteristics and Enrichment Mechanism of the Bauxite and Aluminized Clay Rock Associated Lithium Resources to Xiaoshanba Bauxite in Guizhou(Dissertation). Guizhou University, Guiyang (in Chinese with English abstract)]
- 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(6): 853–873 [Ling K Y, Wen H J, Zhang Q Z, Luo C G, Gu H N, Du S J, Yu W X. 2021. Super-enrichment of lithium and niobium in the upper Permian Heshan formation in Pingguo, Guangxi, China. *Scientia Sinica (Terra)*, 51(6): 853–873 (in Chinese)]
- Ling K Y, Tang H S, Zhang Z W, Wen H J. 2020. Host minerals of Li–Ga–V–rare earth elements in Carboniferous karstic bauxites in southwest China. *Ore Geology Reviews*, 119: 103325
- 刘帮军, 林明月. 2014. 宁武煤田平朔矿区9号煤中锂的富集机理. *地质与勘探*, 50(6): 1070–1075 [Liu B J, Lin M Y. 2014. Enrichment mechanism of lithium in coal seam No. 9 of the pingshuo mining district, Ningwu Coalfield. *Geology and Exploration*, 50(6): 1070–1075 (in Chinese with English abstract)]
- 刘帮军, 林明月. 2015. 山西平朔矿区9#煤中锂的富集机理及物源研究. *煤炭技术*, 34(8): 115–117 [Liu B J, Lin M Y. 2015. Enrichment mechanism and material sources of lithium in Li-bearing coal seam No.9 from pingshuo mining district of Shanxi Province. *Coal Technology*, 34(8): 115–117 (in Chinese with English abstract)]
- 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、分布特点及勘查发现现状. *中国地质*, 44(2): 263–278 [Liu L J, Wang D H, Liu X F, Li J K, Dai H Z, Yan W D. 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)]
- 刘平. 2007. 黔北务—正—道地区铝土矿地质概要. *地质与勘探*, 43(5): 29–33 [Liu P. 2007. Bauxite geology in the Wuchuan-Zhengan-Daozhen area, northern Guizhou. *Geology and Prospecting*, 43(5): 29–33 (in Chinese with English abstract)]
- Liu X F, Wang Q F, Peng Y B, Yin R S, Ma Y, Zhao L H, Zhang S Q. 2022.

- Intensified and apace bauxitization over the paleo-karstic surface linked to volcanism. *GSA Bulletin*, 135 (5–6): 1187–1205
- 龙克树, 付勇, 龙珍, 田精林, 郑军. 2019. 全球铝土矿中稀土和钪的资源潜力分析. *地质学报*, 93(6): 1279–1295 [Long K S, Fu Y, Long Z, Tian J L, Zheng J. 2019. Resource potential analysis of REE and Sc in global bauxite. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1279–1295 (in Chinese with English abstract)]
- 龙珍, 付勇, 何伟, 唐波, 龙克树, 刘阳, 王天顺. 2021. 贵州新民铝土矿矿床Li的地球化学特征与富集机制探究. *矿床地质*, 40(4): 873–890 [Long Z, Fu Y, He W, Tang B, Long K S, Liu Y, Wang T S. 2021. Geochemical characteristics and enrichment mechanism of Li in Xinmin bauxite deposit, Guizhou. *Mineral Deposits*, 40(4): 873–890 (in Chinese with English abstract)]
- 麻杰磊. 2015. 渑池铝土矿物质组成与富集规律研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京) [Ma J L. 2015. The Material Composition and Enrichment Regularity of Mianchi Bauxite Field, Henan Province, China (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract)]
- 覃顺桥, 雷美荣, 凌坤跃, 温汉捷. 2023. 桂中地区上二叠统合山组关键金属分布富集特征. *矿物岩石地球化学通报*, 42(1): 157–166 [Qin S Q, Lei M R, Ling K Y, Wen H J. 2023. Distribution and enrichment characteristics of critical metals in the upper Permian Heshan formation in the central Guangxi. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 42(1): 157–166 (in Chinese with English abstract)]
- 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 [Ren F T, Zhang J. 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)]
- Rytuba J, Glanzman R. 1978. Relation of mercury, uranium, and lithium deposits to the McDermitt caldera complex, Nevada-Oregon
- 宋云华, 沈丽璞, 张乃嫻, 彭昭瑞, 郭可战. 1987. 河南某粘土矿(岩)中粘土矿物及其稀土、锂等元素的初步研究. *中国科学 (B辑 化学 生物学 农学 医学 地学)*, 17(2): 204–213 [Song Y H, Shen L P, Zhang N X, Peng Z R, Guo K Z. 1987. Preliminary study on clay minerals and their rare earth and lithium elements in a clay mine (rock) in Henan Province. *Science in China, SerB*, 17(2): 204–213 (in Chinese)]
- Sun B L, Zeng F G, Moore T A, Rodrigues S, Liu C, Wang G Q. 2022. Geochemistry of two high-lithium content coal seams, Shanxi Province, China. *International Journal of Coal Geology*, 260: 104059
- 孙莉, 肖克炎, 姜德波. 2018. 中国铝土矿资源潜力预测评价. *地学前缘*, 25(3): 82–94 [Sun L, Xiao K Y, Lou D B. 2018. Mineral prospectivity of bauxite resources in China. *Earth Science Frontiers*, 25(3): 82–94 (in Chinese with English abstract)]
- 孙思磊. 2011. 山西北武县宽草坪铝土矿床地质与地球化学特征研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京) [Sun S L. 2011. Geologoical and Geochemical Characteristics of Kuancaoping Bauxite Deposit in Ningwu County, Shanxi Province(Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract)]
- Sun Y Z, Li Y H, Zhao C L, Lin M Y, Wang J X, Qin S J. 2010. Concentrations of lithium in Chinese coals. *Energy Exploration & Exploitation*, 28(2): 97–104
- Sun Y Z, Zhao C L, Qin S J, Xiao L, Li Z S, Lin M Y. 2016. Occurrence of some valuable elements in the unique ‘high-aluminium coals’ from the Jungar coalfield, China. *Ore Geology Reviews*, 72: 659–668
- Sun Y Z, Zhao C L, Zhang J Y, Yang J J, Zhang Y Z, Yuan Y, Xu J, Duan D J. 2013. Concentrations of valuable elements of the coals from the pingshuo mining district, Ningwu Coalfield, northern China. *Energy Exploration & Exploitation*, 31(5): 727–744
- 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 [Wang D H, Li P G, Qu W J, Lei Z Y, Liao Y C. 2013. Discovery and comprehensive evaluation of tungsten and lithium in Dazhuyuan bauxite mine, Guizhou Province. *Scientia Sinica (Terrae)*, 43(1): 44–51 (in Chinese)]
- 王瑞江, 王登红, 李建康, 孙艳, 李德先, 郭春丽. 2015. 稀有稀土稀散矿产资源及其开发利用. 北京: 地质出版社 [Wang R J, Wang D H, Li J K, Sun Y, Li D X, Guo C L. 2015. Rare Rare Earth Mineral Resources and Their Development and Utilization. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese)]
- Wang R, Wang Q, Huang Y, Yang S, Liu X, Zhou Q. 2018. Combined tectonic and paleogeographic controls on the genesis of bauxite in the Early Carboniferous to Permian Central Yangtze Island. *Ore Geology Reviews*, 101: 468–480
- 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 [Wang T, Zhao X D, Li J M, Lv T. 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)]
- 王微, 蒋少涌, 葛文, 张七道, 刘桐, 张行凯. 2024. 湖相沉积黏土型锂矿主要地质特征及成因机理. *矿物岩石地球化学通报*, 43, doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240001 [Wang W, Jiang S Y, Ge W, Zhang Q D, Liu T, Zhang X K. 2024. Geological characteristics and genetic mechanism of the lacustrine sedimentary clay type lithium deposit. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 43, doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240001 (in Chinese with English abstract)]
- 王新彦, 张荣臻, 杨松林, 刘百顺. 2020. 河南渑池地区铝土矿工艺矿物学及锂的赋存状态研究. *矿产综合利用*, (6): 163–170 [Wang X Y, Zhang R Z, Yang S L, Liu B S. 2020. Studying on the process mineralogy and existing state of lithium in bauxite ore from Mianchi district, Henan Province. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, (6): 163–170 (in Chinese with English abstract)]
- 温汉捷, 顾汉念, 朱丽, 罗重光, 杜胜江. 2019-10-22. 离子交换法提取碳酸盐粘土型锂矿中锂的方法: 中国, CN110358934A [Wen H J, Gu H N, Zhu L, Luo C G, Du S J. 2019-10-22. ion exchange method for extraction of carbonate lithium from clay-type lithium ores: China, CN110358934A]
- 温汉捷, 罗重光, 杜胜江, 于文修, 顾汉念, 凌坤跃, 崔隼, 李阳, 杨季华. 2020. 碳酸盐粘土型锂资源的发现及意义. *科学通报*, 65(1): 53–59 [Wen H J, Luo N, Du S J, Yu W X, Gu H N, Ling K Y, Cui Y, Li Y, Yang J H. 2020. Carbonate-hosted clay-type lithium deposit and its prospecting significance. *Chinese Science Bulletin*, 65(1): 53–59 (in Chinese with English abstract)]
- 温静静, 梁涛, 卢仁, 王莉. 2016. 河南省嵩箕地区铝土矿Li、Ti、Zr、Ga、Nb和LREE的矿化分析. *矿产与地质*, 30(2): 216–222 [Wen J J, Liang T, Lu R, Wang L. 2016. Mineralization of Li, Ti, Zr, Ga, Nb and LREE of bauxite deposits in Songji area of Henan. *Mineral Resources and*

- Geology, 30(2): 216–222 (in Chinese with English abstract)]
- 翁申富, 雷志远, 陈海, 赵爽, 冉英, 王希文, 葛辰. 2013. 务正道铝土矿基底古地貌与矿石品质的关系: 以务川大竹园铝土矿床为例. 地质与勘探, 49(2): 195–204 [Weng S F, Lei Z Y, Chen H, Zhao S, Ran Y, Wang X W, Ge C. 2013. Relationship between basal paleogeomorphology and bauxite ore quality in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area: An example from the dazhuyuan bauxite ore deposit. *Geology and Exploration*, 49(2): 195–204 (in Chinese with English abstract)]
- 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 [Wu L, Zhang J, Wang J R, Mao R Y. 2016. Study on leaching and enrichment of lithium in aluminum rock. *Inorganic Chemicals Industry*, 48(5): 24–26 (in Chinese with English abstract)]
- 隰弯弯, 赵宇浩, 倪培, 姚春彦, 朱意萍, 郑璐, 姚仲友, 王天刚. 2023. 锂矿主要类型、特征、时空分布及找矿潜力分析. 沉积与特提斯地质, 43(1): 19–35 [Xi W W, Zhao Y H, Ni P, Yao C Y, Zhu Y P, Zheng L, Yao Z Y, Wang T G. 2023. Main types, characteristics, distributions, and prospecting potential of lithium deposits. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 43(1): 19–35 (in Chinese with English abstract)]
- 许箭琪. 2021. 桂西二叠系含铝岩系中锂的超常富集机制研究(硕士学位论文). 桂林: 桂林理工大学 [Xu J Q. 2021. Supernormal Enrichment Mechanism of Lithium in Bauxite Series in Permian, Western Guangxi (Dissertation). Guilin University of Technology, Guilin (in Chinese with English abstract)]
- 许志琴, 朱文斌, 郑碧海, 舒良树, 李广伟, 车旭东, 秦宇龙. 2021. 新能源锂矿战略与大陆动力学研究: 纪念南京大学地球科学与工程学院100周年华诞. 地质学报, 95(10): 2937–2954 [Xu Z Q, Zhu W B, Zheng B H, Shu L S, Li G W, Che X D, Qin Y L. 2021. New energy strategy for lithium resource and the continental dynamics research—Celebrating the centenary of the School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 2937–2954 (in Chinese with English abstract)]
- 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(硕士学位论文). 贵阳: 贵州大学 [Yan S. 2020. Enrichment of Lithium from Xinmin Bauxite in Northern Guizhou and Its Indication of Lithium Isotope (Dissertation). Guizhou University, Guiyang (in Chinese with English abstract)]
- 杨瑞东, 程伟, 高军波, 陈军, 陶振鹏, 魏怀瑞, 沈明联, 李士彬. 2017. 黔西南煤层中铈、钍、钷和铀元素富集与潜在资源评价. 贵州地质, 34(2): 77–81, 96 [Yang R D, Cheng W, Gao J B, Chen J, Tao Z P, Wei H R, Shen M L, Li S B. 2017. U, Li, Nb and V element enrichment of coal seams and potential resource evaluation in southwest Guizhou. *Guizhou Geology*, 34(2): 77–81, 96 (in Chinese with English abstract)]
- 杨中华. 2012. 山西省铝(粘)土矿综合利用研究(博士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京) [Yang Z H. 2012. Study on the Comprehensive Exploitation and Utilization of Bauxite (Clay) Deposits in Shanxi Province, China (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract)]
- 姚双秋, 庞崇进, 温淑女, 梁航, 卢光辉, 尹本纯, 覃丰, 罗桥花. 2021. 桂西上二叠统合山组富锂黏土岩的发现及意义. 大地构造与成矿学, 45(5): 951–962 [Yao S Q, Pang C J, Wen S N, Liang H, Lu G H, Yin B C, Qin F, Luo Q H. 2021. Li-rich claystone in the upper Permian Heshan formation in western Guangxi and its prospecting significance. *Geotectonics et Metallogenia*, 45(5): 951–962 (in Chinese with English abstract)]
- 衣妹, 王金喜. 2014. 安家岭9号煤中锂的赋存状态和富集因素分析. 煤炭与化工, 37(9): 7–10 [Yi S, Wang J X. 2014. Lithium occurrences and enrichment factor law in No. 9 coal seam of anjialing mine. *Coal and Chemical Industry*, 37(9): 7–10 (in Chinese with English abstract)]
- 于泓, 王登红, 于扬, 刘铸, 高娟琴, 仲佳爱, 秦燕. 2019. 国内外主要沉积型锂矿分布及勘查开发现状. 岩矿测试, 38(3): 354–364 [Yu F, Wang D H, Yu Y, Liu Z, Gao J Q, Zhong J A, Qin Y. 2019. The distribution and exploration status of domestic and foreign sedimentary-type lithium deposits. *Rock and Mineral Analysis*, 38(3): 354–364 (in Chinese with English abstract)]
- 余文超, 杜远生, 周锦涛, 成龙, 邓旭升, 戴贤铎, 庞大卫, 翁申富, 雷志远, 李沛刚, 陈群. 2023. 中国铝土矿成矿作用的物质来源与深时环境因素: 进展与讨论. 地质学报, 97(9): 3056–3074 [Yu W C, Du Y S, Zhou J T, Cheng L, Deng X S, Dai X D, Pang D W, Weng S F, Lei Z Y, Li P G, Chen Q. 2023. Provenance and deep-time environmental factors for bauxitization in China: Progress and discussion. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 3056–3074 (in Chinese with English abstract)]
- 袁爱国. 2010. 河南省铝土矿资源分布与开发策略(博士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京) [Yuan A G. 2010. Resource Distribution and Exploitation Strategy of the Bauxite Deposits in the Henan Province, China (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract)]
- 袁孟超, 王凤宇, 林伟, 李英奎. 2017. 山西平陆县东部与铝土矿共伴生的“三稀”矿产特征. 矿产勘查, 8(5): 772–781 [Yun M C, Wang F Y, Lin W, Li Y K. 2017. Characteristics of three types of rare earth mineral resources associated with bauxite deposit in the eastern Pinglu, Shanxi. *Mineral Exploration*, 8(5): 772–781 (in Chinese with English abstract)]
- 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, 33(2): 106–111 [Zhai M G, Wu F Y, Hu R Z, Jiang S Y, Li W C, Wang R C, Wang D H, Qi T, Qin K Z, Wen H J. 2019. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 33(2): 106–111 (in Chinese with English abstract)]
- Zhao L, Dai S F, Nechaev V P, Nechaeva E V, Graham I T, French D. 2019. Enrichment origin of critical elements (Li and rare earth elements) and a Mo-U-Se-Re assemblage in Pennsylvanian anthracite from the Jincheng Coalfield, southeastern Qinshui Basin, northern China. *Ore Geology Reviews*, 115: 103184
- Zhao L, Ward C R, French D, Graham I T, Dai S F, Yang C, Xie P P, Zhang S Y. 2018. Origin of a kaolinite-NH₄-illite-pyrophyllite-chlorite assemblage in a marine-influenced anthracite and associated strata from the Jincheng Coalfield, Qinshui Basin, Northern China. *International Journal of Coal Geology*, 185: 61–78
- 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 [Zhong H R, Sun Y, Yang Y Q, Wang D H, Huang F, Zhao Z. 2019. Bauxite(aluminum)-type lithium resources and analysis of its development and utilization potential. *Mineral Deposits*, 38(4): 898–916 (in Chinese with English abstract)]
- 赵中伟, 何利华, 雷云涛, 刘旭恒, 孙丰龙. 2021-10-26. 一种从黏土型锂矿中提取锂的方法: 中国, CN113549775A [ZHAO Z W, HE L H, LEI Y T,

LIU X H, SUN F L. 2021-10-26. A method for extracting lithium from clay-type lithium ores: China, CN113549775A]

Zhou M X, Zhao L, Wang X B, Nechaev V P, French D, Spiro B F, Graham I T, Hower J C, Dai S F. 2021. Mineralogy and geochemistry of the Late Triassic coal from the Caotang mine, northeastern Sichuan Basin, China, with emphasis on the enrichment of the critical element lithium. *Ore Geology Reviews*, 139: 104582

左更, 李晓杰, 陈甲斌, 吴越. 2023. 我国金属矿产资源保供体系布局的思考. *中国国土资源经济*, <https://doi.org/10.19676/j.cnki.1672-6995.000914> [Zuo G, Li X J, Chen J B, Sun Q. 2023. Thoughts on the Layout of China's Metallic Mineral Resources Supply System. China's metal and mineral resources security system. *China Land Resources Economy*, <https://doi.org/10.19676/j.cnki.1672-6995.000914>]

Zou J H, Cheng L F, Guo Y C, Wang Z C, Tian H M, Li T. 2020. Mineralogical and geochemical characteristics of lithium and rare earth elements in high-sulfur coal from the Donggou Mine, Chongqing, southwestern China. *Minerals*, 10(7): 627

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 张兴春)

·学会之声·

中国矿物岩石地球化学学会2023年第四季度新会员发展公告

经秘书长审核,以下34名同志为本会2023年10月1日至12月31日发展的新会员。自公布之日起承认其会籍,接受学会的服务。

中国矿物岩石地球化学学会
2024年1月1日

姓 名	性别	工作单位	会员登记号
夏志鹏	男	桂林理工大学	S130006732S
李云国	男	中国科学技术大学	S130007271S
马荣林	男	中国科学院广州地球化学研究所	S130007557S
刘建强	男	西北大学	S130008023S
姜福杰	男	中国石油大学(北京)	S130009325S
高 庭	男	中国科学院地球化学研究所	S130012163S
王思诺	男	安徽理工大学	S130012179S
肖志斌	男	中国石油大学(华东)	S130012180S
李东生	男	漳州市中扬物业服务有限公司诏安分公司(南洋新加坡)	S130012190S
徐超文	男	中国地震局地震预测研究所	S130012192S
费宏展	男	浙江大学	S130012193S
宋凡浩	男	中国环境科学研究院	S130012194S
张振杰	男	中国地质大学(北京)	S130012196S
郑佳浩	男	福州大学	S130012197S
杜 尧	男	中国地质大学(武汉)	S130012198S
王慧宁	女	中国地质科学院地质研究所	S130012200S
叶坤辉	男	中国电科32所(电科数字)	S130012202S
杨升宇	男	中国石油大学(华东)	S130012204S
庞雄奇	男	中国石油大学(北京)	S130012205S
张 鹏	男	中国地质大学(武汉)	S130012206S
李建森	男	中国科学院青海盐湖研究所	S130012207S
潘 波	男	昆明理工大学	S130012209S
赵 建	男	中国海洋大学	S130012210S
徐 亮	男	中国科学院广州地球化学研究所	S130212174S
芮会超	男	中国科学院广州地球化学研究所	S130212181S
龚 政	男	中国科学院广州地球化学研究所	S130212189S
刘晓云	女	中国海洋大学	S130312211S
韩金生	男	中国地质大学(武汉)	S131112201S
周金胜	男	中国科学院广州地球化学研究所	S131112208S
刘月高	男	中国科学院深海科学与工程研究所	S131212191S
王小均	男	西北大学	S131212199S
祝红丽	女	中国科学院海洋研究所	S131512195S
吴洋洋	男	贵州师范学院	S132212166S
张 舟	男	浙江大学地球科学学院	S132412173S