Pre-pub. on line: www.geojournals.cn/georev

黏土型锂矿床勘查开发过程中的瓶颈问题和若干思考

王辉[1)],张福强[1,2)],张德高[3)],周立坚[1)],赵冠华[1)],廖家隆[1)],闫小敏[1)],
徐惠恒[1)],侯万武[1)],张金剑[1)]吕琪[1)],曾平[1)],卢安康[1)]

1)中国煤炭地质总局广西煤炭地质局,南宁, 530299; 2)中国地质大学,武汉, 430074;
3)中国煤炭地质总局,北京,100038

内容提要:锂作为国家战略性关键紧缺矿产资源,随着现代科技的不断进步,需求量会不断增加。寻找更多的锂矿资源,降低进口依赖度,保障国家资源安全,已是迫在眉睫。黏土型锂矿床作为锂矿的重要类型之一,因分布面积广,资源潜力巨大,越来越受到关注,或可成为锂矿资源的重要补充,既是今后矿产资源勘查的重要方向之一,也是破解锂矿资源紧缺局面的重要途径。黏土型锂矿床已取得不少进展,但也存在一些问题,一定程度上制约了对黏土型锂矿床勘查与开发。通过文献查阅、政府和企业官网的情报收集,结合自身锂矿勘查实践,发现影响和制约黏土型锂矿床勘查与开发的主要问题有 5 个:① 对黏土型锂矿床资源潜力认识不充分,前景不看好,未给予足够重视;② 缺乏指导勘查工作的规范性依据;③ 矿产资源管理与矿业权管理中的不利因素导致勘查力度不足;④ 勘查研究过程对于矿石选冶加工技术性能重视程度不够,工艺流程尚不成熟。特别是经济合理、环境友好型的分离提取技术和工艺流程尚在探索阶段;⑤ 可供勘查评价与找矿预测的超常富集成因机制与找矿模型的基础研究尚不深入。针对以上 5 个问题,提出 5 个方面的思考与建议,以期加快黏土型锂矿床的勘查开发步伐,可望缓解锂矿资源紧缺和供需矛盾紧张现状。① 呼吁地勘行业重视黏土型锂矿床,将黏土型锂矿床按独立的新矿种类型对待。在充分利用煤、铝等勘查老资料进行二次开发的基础上,对异常区进行验证性调查,圈定可供勘查的找矿有利区段或找矿靶区,为黏土型锂矿勘查部署提供依据;② 通过选择有代表性的区块开展勘查开发试验研究和工程示范,尽快研究出台黏土型锂矿床勘查规范,为今后规范黏土型锂矿勘查工作提供作业依据;③ 从矿权现行管理制度出发,按照“公益先行,基金衔接,商业跟进,整装勘查,快速突破”二十字方针,一方面建议国家和地方政府设置专门的地勘基金,加大地勘基金财政投入,形成一批可供进一步勘查的矿产地,一方面建议矿产资源管理部门释放更多的勘查空间,引入更多社会资本,充分调动勘查市场的活力,为国家提供强有力的资源保障;④ 建议加大锂元素不同赋存状态及其不同占比情形下的分离提取试验投入,尽快形成技术可靠、经济合理、环境友好的工艺流程;⑤ 在梳理并聚焦制约勘查评价、开发利用及找矿预测工作的相关科技问题,通过科技攻关,为锂矿勘查开发提供强有力的科技支撑。通过上述主要瓶颈问题的有效解决,以期实现锂矿资源的重大找矿突破,形成一批可供工业规模开发的黏土型锂矿资源基地,继而从根本上解决锂矿资源紧缺现状和高度依赖进口的局面。

关键词:黏土型锂矿;含煤、铝岩系;赋存状态与分离提取;勘查开发研究与示范;勘查评价体系标准

众所周知,随着全球现代科技的不断进步和新兴产业的快速崛起,对关键金属(稀有、稀散、稀土及部分稀贵)矿产的需求也会加速增长。关键金属由于自身所具备的耐高温、耐腐蚀、高强度、光学及电磁性质优良等物化特性,是航空航天、武器装备、电子科技、高端制造、新能源、新材料等重点发展领域和战略新兴产业发展的重要物质基础,构成了现代科技的基石,直接关乎经济社会发展和国家安全(王新宇等,2021)。锂金属作为新兴战略性关键矿产之一,历来就被关注,不仅在各国关键矿产清单的历次更新调整中从未被剔除,反而因新能源汽车市场需求的快速增长,越来越被提到更为重要的位置。

注:本文为国家社科基金重大项目(编号:19ZDA111),中国煤炭地质总局重大科技项目(编号:ZMKJ-2021-ZX03),广西自然科学基金面上项目(编号:2019GXNSFAA185062)的成果。
收稿日期:2022-10-08;改回日期:2022-12-29;网络首发:2023-01-20;责任编辑:高作宇。Doi: 10.16509/j. georeview. 2023.01.023
作者简介:王辉,男,1971 年生,正高级工程师,地球化学专业,从事基础地质、矿产地质方向研究工作;Email:wanghui.rock@163.com。通讯作者:张福强,男,1977 年生,正高级工程师,矿产地质专业,从事矿产地质、煤地质及盆地分析研究;Email:zfq72951@126.com。

锂是最轻的金属元素,其电位最负,电化当量最大。以锂为主要材料的电池具有能量密度大,比功率高的优势,广泛应用于高能电池、电动汽车、风力涡轮、太阳能电池板等脱碳能源领域,被称为“储能金属”。由于自然界不存在可控核聚变反应(D+T ⟶^{4}He+n+17.59 MeV)中所必需的超重氢(T,氚,),而由中子轰击锂可产生超重氢(T)(n +^{6}Li ⟶ T+ ^{4}He+4.8 MeV),因此,锂又被称为“能源金属”、“白色石油”或“高能金属”。随着我国“双碳”目标的提出,绿色新能源产业的迅速崛起,锂发挥着不可或缺的重要作用。随着锂的市场需求量的快速增加,其战略地位和现实社会经济地位迅速凸显。

锂属碱金属元素族,地球含量为 3×10^{-6},地壳含量为 25×10^{-6},属于典型稀有元素。锂元素在自然界主要有四种赋存形式:① 类质同象形式,由于锂的离子半径较小(68 pm),与镁(66 pm)、铁(74 pm)、铝(51 pm)等离子半径相近,可与之形成一定程度的类质同象置换,特别是与镁的结晶化学性质近似,异价类质同象可广泛产生。随着岛状—环状—链状—层状硅酸盐矿物中硅氧四面体结合键力的增强,锂元素的类质同象置换能力也增强,因此黑云母是硅酸盐中浓集和携带锂的主要矿物。② 独立矿物形式,自然界中锂的矿物共有 100 多种,常见矿物有锂辉石含 Li_2O 约 8%、透锂长石含 Li_2O 为 2%~4%、透锂石含 Li_2O 为 2%~4%等。在层状硅酸盐矿物中的通过类质同象置换作用,使得锂的含量增高到一定程度,也可形成单独的锂矿物(锂云母约 3%~5%、铁锂云母约 3%~5%、锂绿泥石 0.8%~4.3%、锂蒙脱石等)。③ 离子吸附形式,即以离子吸附状态存在于蒙脱石、绿泥石、伊利石及高岭石等黏土矿物中。④ 呈离子状态存在于江河湖海及地下水中,其中盐湖卤水含量高其他含锂溶液。前三者是锂的固态赋存形式,最后一种是以可溶盐形式存在。

近十年以来,锂矿一直受到各国的关注,且持续升温,始终是勘查活动的热点矿种,然而新增资源储量却表现乏力。据美国地质调查局(USGS)资料,截止 2021 年底,全球锂金属预测资源量约为 89 Mt,探明储量约 22 Mt(U. S. Geological Survey[1])。锂资源供给以盐湖卤水型锂矿为主,探明的储量占比约 64%,硬岩型锂矿储量占比约 29%,主要是锂辉石、锂云母等,沉积型锂矿储量占比约 7%,主要是各种含锂黏土矿物,如锂蒙脱石、锂绿泥石、伊利石及高岭石等。据 2022 年《中国矿产资源报告》(中华人民共和国自然资源部,2022),截至 2021 年,中国氧化锂(Li_2O)储量为 4.05 Mt。我国锂精矿缺口较大,锂的进口依赖度已超过 75%,进口产品主要为锂辉石精矿(王新宇等,2021)。随着锂产品市场消费的进一步增加,我国锂资源缺口无疑会进一步扩大,进口依赖度会进一步增加。相对于美国而言,我国获取境外锂矿资源的能力有限,经济社会、科技发展及国家安全就会受到影响,甚至是威胁。寻找更多的锂矿资源已是迫在眉睫。

目前,在自然界发现的具有工业价值或潜在工业价值的独立锂矿床,按照矿床的成因类型和容矿岩系特征通常划分 3 个主要类型,即伟晶岩型、卤水型(盐湖卤水型和地下卤水型)和沉积型(火山碎屑岩系型、碎屑岩系型)(王新宇等,2021)。隰弯弯等人(2022)认为锂矿床主要有盐湖卤水型、伟晶岩型、黏土型、锂沸石型、其他卤水型(包括油气田卤水亚类和地热卤水亚类)及离子吸附型 6 种类型(隰弯弯等,2022)。由于黏土矿物本身特有的吸附性,沉积型锂矿床的载锂矿物主要是黏土矿物,因此也称为黏土型锂矿,本文根据黏土岩的成因(成矿母岩)及其邻接沉积(风化)岩石的成生联系,进一步分为碳酸盐黏土型(温汉捷等,2020)、火山岩型黏土型(Richard et al., 1978)、煤系黏土型(孙玉壮等,2014;张福强等,2019;廖家隆等,2020a,2020b,2022)、含铝岩系黏土型(钟海仁等,2019)、含锂花岗伟晶岩/花岗斑岩风化黏土型(姚明等,2016;舒良树等 2021;王登红等,2022),岩盐—盐湖有关黏土型(潘彤等,2022)等 6 个亚类。

长期以来,伟晶岩型和卤水型锂矿是各国勘探开发的主要对象。20 世纪 70 年代始,美国对黏土型锂矿开展了不少工作,中国政府曾派代表团前往考察,大多数黏土型锂矿床在形成过程中,因溶液中锂离子浓度较低而未形成独立锂矿物,多以离子吸附形式或者类质同象形式赋存于黏土矿物中,导致锂含量普遍较低,尚不具备独立开发价值,加之“酸浸”分离提取技术在环保方面不过关,难以得到各国政府的重视、矿产地质学者的关注及资本市场的追逐。2012 年,在塞尔维亚的贾达尔(Jadar)盆地发现黏土型锂矿床并被规模开发,揭示了超常富集黏土型锂矿床作为独立矿床进行开发的可能性,从而掀起了各国寻找黏土型锂矿床的极大热情。

据 CBC 金属网和中国锂电网统计数据,2012 至 2020 年间,碳酸锂交易价区间为 4.2 ~16.0 万元/t,平均价格为 7.3 万元/t。其中 2012 年至 2015 年交

易价格相对稳定,为 3.9 ~4.3 万元/t,平均为 4.2 万元/t;2016 年至 2018 年价格上扬,2017 年 11 月达到顶峰,交易价区间为 10 ~16 万元/t,平均为 11.8 万元/t;2018 年 9 月份回落至 7 万元/t,至 2020 年底,价格维持在 5 ~7 万元/t 间。自 2021 年以来,受新能源汽车产/销量的爆发式增长,锂矿资源开发不足,2020 年~2021 年间碳酸锂库存被严重透支,加之市场恐慌性哄抢和囤积居奇等原因,导致供需严重失衡,直接驱动碳酸锂价格一路狂飙。电池级碳酸锂价格 2021 年初的均价为 5.5 万元/t,到 2022 年 3 月均价突破了 50 万元/t,价格暴涨了 809%。随后下调至 46 万元/t,至 9 月份再次突破 50 万元/t。2022 年 11 月 7 日,无锡国内电池级碳酸锂电子盘的现货平均价格为 61.5 万元/t,最高价达到 61.7 万元/t。多数市场分析人士认为,电池级碳酸锂价格今后理性的回落是很有限的,将会长期维持在高位。

勘查研究进展表明,黏土型锂矿床是锂矿重要类型之一,具有分布广,面积大,层位稳定等特点。资源潜力巨大,潜在价值很高,找矿前景乐观,大力投入黏土型锂矿床的找矿勘查与研究工作,切实有效解决好找矿勘查过程中存在的问题,可有望实现锂矿找矿战略重大突破,满足不断增长的市场需求,缓解锂矿供需矛盾,助力实现国家资源安全保障和经济高质量发展的长远目标。据业内人士分析,伴随全球范围内的锂资源抢夺战将会愈演愈烈,找矿、抢矿、锁矿成为众多锂产品企业的必然选择。锂价格的大幅快速上扬和市场的巨大需求,使得一大批低品位"呆矿"的勘查开发成为可能。

1　黏土型锂矿床勘查开发研究现状

1.1　国外勘查开发现状

黏土型锂矿主要分布在北美洲和南美洲,其次是欧洲,其他地区也有少量发现(Tourtelot et al., 1978;于汎等,2019;刘丽君等,2021),如塞尔维亚贾达尔(Jadar)盆地、美国内华达州 McDermitt 火山盆地、美国亚利桑纳州莫哈维县大桑迪地区、美国亚利桑纳州布罗克里克地区、墨西哥西部索诺拉(Sonora)沙漠地区、秘鲁东南部伏尔肯尼(Falchani)地区及蒙古国 Khukh Del 地区等。这些锂矿的勘查结果表明,锂元素来源多与深源火山物质密切相关,主要呈离子吸附态或类质同象形式赋存于次生黏土(岩)层或凝灰岩中。此类矿产具有①成矿时代新、②埋藏浅适宜露天开采、③构造简单、④产状平缓、⑤层位稳定、⑥分布广、⑦厚度大、⑧矿化均匀、⑨资源潜力巨大等特点。

塞尔维亚的贾达尔(Jadar)锂矿容矿岩系为一套新近系中新统湖相火山—沉积岩系,含矿岩层为凝灰岩,矿石矿物为含锂独立矿物—羟硼硅钠锂石[$NaLiSiB_3O_7(OH)$,仅发现于贾达尔盆地,亦称贾达尔石(Jadarite)],该矿物含 Li_2O 含量高达 7.3%(已接近锂辉石中的 Li_2O 含量),Li_2O 矿床平均品位高达 1.8%,是迄今发现的品位最高的黏土型锂矿床。该矿的矿石资源量为 114.6 Mt,Li_2O 资源量约 2.06 Mt,是目前世界范围内发现的众多黏土型锂矿床中唯一规模开采的黏土型锂矿(赵元艺等,2015)。其他已发现黏土型锂矿床或正在进一步勘探过程中,或在开展经济评价及制订开采计划,或研究分离提纯工艺流程,尚未见规模开发利用的正式报道。

美国内华达州的 McDermitt 黏土型锂矿床早在上世纪六十年代发现,是"中新世火山活动与成矿作用的结果,属于典型的火山岩黏土型锂矿床(Richard et al., 1978)。火山口中的大多数黏土层含有 0.01%~0.1%的锂,其锂含量远高于大陆黏土的平均含量(0.006%),来自火山口西部和南部的单个蒙脱石黏土样品含有高达 0.65%的锂。2022 年 7 月 6 日,在澳交所上市的金达利资源公司宣称(Jindalee Resources Limited, 2022):该公司采用边界品位 1000×10^{-6},估算 McDermitt 黏土型锂矿矿石量为 1820 Mt,锂矿床平均品位 1370×10^{-6},Li_2O 资源量为 5.37 Mt,对应碳酸锂当量(LCE)为 13.30 Mt,已是美国最大的锂矿床(中华人民共和国自然资源部网站,2021)。

1981 年美国 Davidson 申请黏土型锂矿选冶专利(Davidson, 1981[2]),通过加入 CaO 或 $CaCO_3$ 并用 H_2O—HCl 蒸气氯化,将 Li 转化为可溶性 LiCl,从黏土型锂矿中回收锂;1987 年美国 Crocker L 研究了选冶锂产品的工艺,采用石灰石—石膏焙烧和选择性氯化从 McDermitt 火山口的蒙脱石型粘土中成功地从粘土中提取锂(Crocker[3])。目前美国黏土型锂矿分离提取主要方法是酸浸法,其一般工艺流程是用不同浓度的硫酸在常温常压下或适当增温条件下进行逐级淋滤分离,最后通过离子交换,得到工业级碳酸锂产品。黏土型锂矿分离提取工艺还在不断优化中,2021 年特斯拉申请了一项名为"从黏土中选择性提取锂"专利,将食用盐作为阳离子源与黏土矿物充分混合后高能磨,然后进行液体浸出,以获得

富含锂的浸出溶液,用以提锂,工艺成本低且环保。

1.2 国内勘查开发现状

国内黏土型锂矿的分布与勘查研究现状表明,中国的黏土型锂矿床以伴生为主(代世峰等,2014,2020;张福强等,2019;温汉捷等,2020;赵越等,2020;刘丽君等,2021;许剑琪,2021;杨瑞东等,2021;邓旭升等,2022;赵蕾等,2022),多产于与含煤、铝沉积岩系中,并赋存于黏土矿物中。相对欧美国家而言,具有①成矿时代老(以 C、P 居多)、②埋藏深度变化大、③构造条件复杂、④矿层产状变化大、⑤地域分布广、⑥找矿空间大、⑦产出的层多厚度小、⑧品位低且变异系数大等特点。锂元素往往是作为煤、铝大宗矿产的伴(共)生有益组分在综合勘查评价过程中被发现,但因多数矿体平均品位普遍未达到综合利用的品位($Li_2O<0.05\%$,$Li<230\times10^{-6}$),难以综合回收利用,长期以来,未引起足够重视。

由于绝大多数地区未投入专门的锂矿勘查工作,因此,除中国西南黔滇地区勘查研究程度较高,处于示范性勘查评价阶段外,其他绝大多数地区尚属找矿空白区,或着仅处于找矿线索、超常富集有利区圈定和资源量远景评价的初级阶段。内蒙古准格尔煤田太原组 6 号主采煤层煤炭资源储量 24000 Mt,按锂含量 147×10^{-6} 估算,锂金属远景资源量 3.53 Mt;山西宁武煤田平朔矿区太原组 9 号煤层资源储量为 3670 Mt,按锂含量 166×10^{-6},锂金属远景资源量 0.61 Mt;贵州北部务川—正安—道真铝土矿集区中二叠统梁山组含铝岩系,锂元素含量为 $429\times10^{-6}\sim725\times10^{-6}$,伴生锂金属资源量为 0.85 Mt;贵州大竹园铝土矿的 81 件钻孔样,61 个钻孔样锂含量大于 260×10^{-6},平均含量 741×10^{-6};重庆南部水江板桥铝土矿伴生锂主要富集在含铝岩系中上部,含锂矿石为铝土矿和高铝黏土岩,平均品位 830×10^{-6};重庆彭水县桑拓坪煤矿伴生锂主要富集在吴家坪组底部不整合面(朱正杰等,2014),含锂矿石为凝灰质铝土岩,锂金属含量 1145×10^{-6}。上述找矿与研究成果,显示了国内黏土型锂矿良好的资源潜力和找矿前景。

近年来,随着锂金属战略性矿产的定位、需求量的不断增长和价格不断攀升,加之贾达尔(Jadar)黏土型锂矿床的成功开发与示范,使得该类矿产的独立开发成为可能。黏土型锂矿越来越受到众多中国政府和矿产学者的重视,在国家重点研发计划中,专门设立有黏土型锂矿方面的科研项目,成为勘查研究的热点方向之一(杜胜江等,2019,2021;马圣钞等,2019;温汉捷等,2019,2020;钟海仁等,2019;王学求等,2020;王新宇等,2021;薛颖瑜等,2021)。温汉捷等在黔滇地区的研究,提出了黏土型锂矿床的成因机制与下伏碳酸盐岩基底的风化—沉积作用密切相关的“碳酸盐黏土型锂矿床新类型”,在国内黏土型锂矿床研究方面具有里程碑意义。目标层位为贵州下石炭统九架炉组(C_1jj)铁铝岩系(凌坤跃等,2019)和云南下二叠统倒石头组(P_1d)含铝岩系中(崔燚等,2022),锂元素主要以离子吸附态赋存于蒙脱石黏土矿物中。在滇中地区开展的碳酸盐黏土型锂矿科研性示范勘查与远景预测评价取得了令人满意的结果:① 在滇中地区探获 Li_2O 资源量 0.34 Mt(锂金属量为 0.16 Mt);② 从玉溪红塔区小石桥到滇中 3800 km^2 范围内,潜在 Li_2O 资源量为 4.89 Mt(锂金属量为 2.27 Mt),Li_2O 平均品位为 0.3%,最高 1.02%,找矿潜力巨大。按照相关评价标准,Li_2O 平均品位 0.2%即有开采价值,小石桥锂矿有望成为世界级锂矿。总之,这一类型锂矿在我国具有分布范围广、层位稳定、资源潜力大、易开采等特点,可望成为我国新的重要的锂金属来源。

姚双秋等(2021)在桂西平果地区上二叠统合山组(P_3h)底部含铝土矿段的上部碳质泥岩和页岩发现了厚约 1 m 的锂矿化层。对锂元素赋存状况和物质来源研究结果表明,锂元素在风化强度适中的黏土矿化阶段有利于富集,分别以离子吸附态和类质同象形式主要赋存于蒙脱石和绿泥石黏土矿物中,并以后者为主。部分地段锂金属平均品位为 $930\times10^{-6}\sim2465\times10^{-6}$,已到达碳酸盐黏土型锂矿的工业指标要求,具有良好的勘查开发潜力。进一步的研究结果表明,锂来源于下伏碳酸盐岩和晚二叠世的中酸性火山岩。

近年来,中国煤炭地质总局广西煤炭地质局通过勘查示范与研究(廖家隆等,2020a,2020b,2022),在桂中地区上二叠统合山组(P_3h)含煤碳酸盐岩系中发现了锂元素超常富集,并按“三条线”原则对工程基本间距进行了探讨。地表和钻孔取样测试结果表明,合山组赋存 4 层(Ⅰ~Ⅳ)锂异常富集层位,其中Ⅰ号矿化层位于合山组底部的铁铝岩—煤(碳质泥岩)—黏土岩段,是最重要的矿化层位,向上依次为Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ号矿化层。在 11 km^2 的科研勘查示范区内,按照锂元素品位 900×10^{-6} 进行试圈试算,Ⅰ号矿层厚度 1.99 m,平均品位 1579×10^{-6},Ⅲ号矿层厚度 1.05 m,平均品位 956×10^{-6},Li_2O 资

源量合计0.07 Mt,暗示了在广西寻找该类型锂矿的巨大潜力。通过 X 射线衍射分析(XRD)、扫描电镜能谱分析(SEM-EDS)、电子探针显微分析(EPMA)及锂元素分离提取试验辅助分析得知,样品中的矿物成分以富锂黏土矿物为主,其中Ⅰ号矿层以伊利石为主,高矿化地段出现锂绿泥石,Ⅲ号矿层以高岭石为主。锂元素赋存状态为类质同象形式为主(>97%),次为离子吸附形式(<3%)。

近年来,锂元素分离提纯试验得到众多学者的重视。李荣改等人公开的"一种低品位含锂粘土矿提锂方法"简述从低品位含锂粘土矿提锂的方法,则是通过添加硫酸钙、氟化钙、硫酸钠作为助剂,在800℃下对黏土矿进行改性焙烧,再采用 50%的硫酸进行浸出提锂(李荣改等[4])。温汉捷等对锂元素的提取进行了攻关,研发出破碎磨粉—高温焙烧—铁盐溶液离子交换—含锂滤液工艺流程(温汉捷等[5]),并获得了"离子交换法提取碳酸盐粘土型锂矿中锂的方法"发明专利,该流程不仅锂的提取率最高可达 90%,而且实现了具有成本低、效率高、环境友好、工艺简单等特点。李良彬等人公开的"一种含锂黏土提锂的方法"专利,其工艺是将含锂黏土、碳酸钙、硫酸钠、硫酸钾混合造粒后,在 900~1100℃下高温煅烧后,再进行锂的提取(李良彬等[6])。赵中伟等基于含锂黏土矿物大都具有锂离子导电性,研发出一种利用电场的作用,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的绿色高效低耗能方法,并获取了专利(赵中伟等[7])。广西煤炭地质局与中南大学联合开展桂中地区煤系黏土型锂矿分离提纯试验研究(廖家隆等[8]),在高温焙烧活化—硫酸浸出试验研究的基础上,基于"富锂黏土矿预先活化—浸出—除杂"的技术路线,主要进行了"无助剂焙烧—酸浸"、"低温熟化—水浸"、"两段焙烧—水浸"等流程试验,取得了低品位的黏土型锂矿分离提纯新进展。2022 年 8 月,苗耀文等获取了"一种从锂黏土中提取锂的方法"发明专利,采用微波焙烧—水浸法从黏土型锂资源提取锂,浸出剂成本低且提取率高(苗耀文等[9])。

综上,我国黏土型锂矿床主要集中在找矿预测或潜力评价层面上,落脚于找矿远景区圈定或找矿靶区的评价和优选,更多侧重于成矿构造环境、成因机制、矿源及元素赋存状况等基础研究。探获资源量地质可靠程度普遍很低,仅仅是对资源潜力的远景评价,按《固体矿产资源储量分类》(GB/T 17766-2020),绝大多数属于潜在矿产资源。

2　黏土型锂矿床勘查与开发的主要问题

伟晶岩型和卤水型锂矿具有工业价值意义,是勘查与开发主要对象。黏土型锂矿床因品位普遍低,不具开发价值,长期以来,停留在元素赋存状况、成因机制等基础理论研究层面和资源潜力评价的初级阶段。近年来,随着锂矿资源需求的不断增加和价格的不断攀升,使得黏土型锂矿床规模开发成为可能。黏土型锂矿床是锂矿重要类型之一,因具有分布地域广,超常富集面积大,矿化层位稳定等特点,使得该矿的资源潜力巨大,找矿前景乐观。加大黏土型锂矿床的勘查评价投入和分离提取关键技术研发投入,认真梳理并有效解决好找矿勘查过程中存在的问题,可望实现锂矿的找矿重大突破。

2.1　以往煤、铝等矿产综合勘查与评价工作对锂矿的关注度不足

前已叙及,纵使黏土型锂矿床资源潜力惊人,但因黏土型锂矿床尚不具备开采价值,不属于可开发利用的锂矿工业类型,长期以来不能按独立锂矿对待。我国黏土型锂矿床多与煤、铝土矿及黏土岩空间关系密切,因此,锂元素更多地是作为煤或铝土矿的伴生有益元素,在煤、铝及黏土岩等矿产勘查过程中,按照矿产勘查规范综合勘查、综合评价的一般要求而偶然发现的,后续未进行专门的勘查投入和系统评价,仅粗略地开展了资源潜力远景评价。当然,这样的状况是可以理解的,毕竟"能赚钱的石头才是矿"。

即便是作为伴生有益元素在煤、铝等矿产勘查过程中开展综合勘查与评价,也难免有漏矿情形。主要有以下几点原因:① 锂元素超常富集多是煤、铝矿产学者在勘查煤、铝矿产过程中不经意间发现的,长期以来,多是从伴生有益元素角度看待锂元素,未将其作为独立矿产对待。换句话说,如果因煤、铝主矿产资源前景不佳而终止勘查,锂元素的综合评价工作自然就停止了。② 受专业限制,煤、铝勘查工作者对锂矿种敏感度不够,对黏土型锂矿床成矿机理和成矿规律理解不深刻,主观上难以引起重视。③ 在煤、铝等矿产勘查过程中,仅对同体共(伴)生有益元素进行分析测试。锂元素虽多与煤、铝矿产相伴产出,但常产于煤层和铝土矿层的顶、底板的黏土岩层位,空间上与煤、铝形成互补关系,对

于异体共(伴)生的锂元素因不含主矿种而往往忽略了采样,造成找矿线索的遗漏。如桂西平果地区锂元素富集层位为含铝土矿段的上部碳质泥、页岩中,并非与铝土矿层同体共生。④ 勘查过程中只能按照主矿种采样规范要求进行规范采样,但因不同矿种采样的规范要求是有差异的,对于伴生元素而言,样品往往就显得不规范,代表性不强,一定程度地影响了伴生元素的评价,样品测试数量也仅限于满足规范和报告编制的最低要求。⑤ 实验室对主矿种与共(伴)生元素的重视程度往往也有差异,导致主矿元素和伴生有益元素测试数据严谨性也存在差异。⑥ 受探(采)矿权人意愿和资金投入限制,即便发现有锂元素超常富集这样良好的找矿线索,后续也很难开展专门性勘查评价工作。

2.2 缺乏指导勘查工作的规范依据

矿产地质勘查规范是矿产地质勘查工作的基本遵循和作业依据。由于黏土型锂矿床属于锂矿新类型、新层系,因而新近发布的《地质矿产勘查规范 稀有金属》(DZ/T 0203-2020),适合的锂矿类型是碱性花岗岩型锂矿床、花岗伟晶岩型锂矿和卤水型锂矿,不涉及黏土型锂矿床。后者与前三者在矿床成因、成矿作用、含矿地质体(容矿岩系)、矿体规模与产态、矿石组构、元素赋存状况等方面差异迥然,难以参考借用,更不能简单套用。

由于没有针对性的勘查规范作为黏土型锂矿床的勘查依据,且新近发布的《矿产地质勘查规范 稀有金属类》(DZT 0203-2020)也无法参考,导致此类矿产的实际勘查过程中无章可循,遇到这样那样的具体问题在所难免。主要体现在:① 勘查类型不能确定。基于矿床规模、形态、有用组分的均匀程度、厚度稳定程度及构造的影响程度等 5 个因素制约下的勘查类型划分没有依据,而勘查类型划分和确定是勘查工程部署和工程控制矿体的前提和基础。② 基本勘查工程(钻探或坑探)间距无法确定。在不同勘查阶段探求不同地质可靠程度的块段中的各类勘查工程间距的设计没有依据,换句话说,探获资源量的地质可靠程度无法评价,使得勘查工程的设计和实施无章可循。③ 没有一般或参考性工业指标。这就造成普查阶段矿体与围岩认识不清、界线不明,矿体无法圈联,资源量无法估算,勘查工作的基本目标任务难以实现。当然,更高级勘查阶段的工业指标论证也无从谈起;④ 即便勘查单位根据自身的理解,探索性开展了勘查示范工作,由于没有勘查规范作为评审依据,难以通过资源储量的评审与认定,也给矿业权评估和矿权权益金管理工作增加了难度。

2.3 矿业权设置中的不利因素导致勘查力度不足

我国现行的矿业权出让制度有其积极的一面,既健全了矿产资源有偿使用制度,维护国家矿产资源所有者权益,促进矿产资源保护与合理利用,又通过全面公平公正、公开透明的市场化竞争性出让,充分发挥市场配置资源的决定性作用,但也有不利的一面,那就是一定程度上抑制了勘查市场活力,挫伤了矿业权人找矿的积极性,矿产资源供应与安全保障能力下降。

矿产勘查工作是矿产资源开发利用的前提和保障。矿产勘查伴有不小的投资风险,尤其是在勘查工作的初级阶段。业内普遍认为,除大型沉积矿产外,绝大多数矿产从最初的空白区找矿开始,到最终的建矿投产,勘查的成功率仅为 1%,甚至更低。换而言之,100 个勘查项目中仅有 1 个能转入工业开采阶段。可见不论是从顶层设计,还是政策制定,坚持引导和鼓励勘查,放开勘查市场,激发矿业权人的积极性和地勘行业的活力,找出更多的矿产资源,方能从根本上保障我国资源安全和经济社会的稳定发展。2000 年出台的国土资源部 309 号文《矿业权出让转让管理暂行规定》,将探矿权按矿产资源法规定的自由申请“取得”,改为由政府有限地“设置”和“出让”,人为地营造的探矿权的稀缺性和竞争性。虽然通过市场化竞争最大程度地保证了“出让收益”,但形成了勘查区块设置过少,勘查项目投放不足,大量找矿线索被闲置,找矿空间被人为大幅压缩。一方面众多地勘单位也失去找矿空间,地勘市场持续低迷,一方面又抑制了矿业权人的积极性,市场商业资本被迫转向其他产业。有资料显示,2020 年我国矿产勘查面积仅占国土面积 1.59%,占可开展地质工作面积的 2.19%,相对于加拿大、澳大利亚、美国等矿业发达国家,占比偏小,难以从根本上保障国家矿产资源需求和安全。

2017 年前,探矿权人要缴纳矿业权价款,即对国家出资查明矿产地而缴纳的投资补偿。《矿业权出让收益征收管理暂行办法》(财综[2017]35 号)发布后,把补偿性矿业权价款,调整为国家为实现矿产资源权益而征收的矿业权出让收益,由探矿权人向国家缴纳探矿权出让收益。强调了国家所有者权益而未充分考虑矿业企业权益、企业负担和探矿权人面临的巨大勘查风险。探矿权人勘查投入越多,缴纳的探矿权出让收益金可能越多,且大多数矿业权人在矿产开发获益前是无能力支付矿业权出让收

益,对于由探矿权人出资查明矿产资源形成矿产地有失公允。矿业企业负担的加重,加上勘查投入的资金风险,挫伤了矿业权人风险勘探的积极性,直接导致勘查需求大幅减少,地勘单位找矿空间压缩,勘查任务锐减,生存压力增大,最终导致矿产资源储备不足,矿产资源保障安全面临挑战。事实上,国际上成熟发达矿业国家如加拿大、澳大利亚、美国、秘鲁、南非等国在探矿权阶段不收取权益金,仅在生产环节征收权益金。

我国是全球最大的矿产资源生产和消费国,也是最大的的矿产品进口国。预测到 2035 年,我国新能源矿产的需求都将保持快速增长态势,13 种矿产的需求还有增长空间。矿产资源不能自给自足的态势将长期存在。加大勘查投入,不断扩大找矿成果,迫在眉睫,也势在必行。近年来,随着新一代信息技术、高端装备制造等战略新兴产业的快速发展,我国战略性矿产的需求仍将持续维持在高位,特别是一些用量相对较小的关键战略性矿产(如稀土、钴、锂等)需求还将快速增长。重视勘查、鼓励勘查、放开勘查,加大公益勘查投入,吸引市场资本勘查,不断夯实我国资源家底,对于降低我国资源对外依赖度,从而提高我国战略性矿产资源安全供应能力,全力支撑我国经济实现高质量发展具有重要意义。按照《自然资源部关于推进矿产资源管理改革若干事项的意见》(试行)(自然资规〔2019〕7 号),包括锂在内的 14 个重要关键战略性矿产的矿业权出让登记由自然资源部负责,进一步强调了重要战略性矿产的矿业权管控力度,而在引导与鼓励对关键战略性矿产的勘查,保障资源供给能力方面关注不够。

现行的矿产资源勘查登记管理规定、矿业权出让收益征收暂行管理办法及其矿业权相关政策文件,保证了出让收益,强调的是平等对待市场主体,更好发挥市场配置资源的决定性作用,但如何统筹做好在培育并不断做大勘查市场、引导社会商业资本进入勘查市场、减去企业负担、鼓励和放开勘查市场方面及保障国家矿产资源安全等方面工作,值得深入思考,有待进一步改革调整。

前已叙及,黏土型锂矿是锂矿重要成因类型之一,分布范围广,资源潜力巨大,找矿前景好。通过全面系统地勘查部署,有望实现锂矿资源重要找矿突破,成为锂矿资源的有力接续。然而黏土型锂矿因锂元素含量普遍低,长期以来不具备工业开采价值。随着锂矿价格的快速大幅飙升,使其具备了潜在工业价值与开发的可能。截至目前,黏土型锂矿的经济意义尚不明确。就世界范围而言,除塞尔维亚的贾达尔锂矿含有独立锂矿物(贾达尔石),矿床平均品位高而规模开发,尚未见其他规模开采的正式报道。对于此类经济意义尚不明确的新类型和新层系潜在矿产资源,是否具备工业价值尚不清楚,还需要开展科技攻关、示范研究和反复的工程实践,因此,不宜按照其他成熟的工业矿种,用现行的矿产资源勘查登记管理规定,进行矿业权设置与投放,并征收的矿业权出让收益。再者,矿产勘查本身就有很大的风险,对于新类型和新层系低品位黏土型锂矿而言,风险更是不言而喻的,现行矿业权管理体制下,谁会为尚未纳入工业类型的黏土型锂矿床而冒更大的风险呢?如果不按现行的矿产资源管理和矿业权管理等规定,对于此类新类型矿产,则又处于矿产资源管理的“真空”地带。目前开展的不少的科学勘查研究与工程示范项目,很难受到法律的保护和矿业管理部门的认可。不得不面对这样一种窘境,即一方面明知黏土型锂矿的勘查示范研究与工程实践显得十分必要而迫切,一方面地勘单位和矿山企业却难以名正言顺地开展相关先行先试勘查示范与工程实践。

2.4　矿石加工选冶技术性能重视程度不够

矿石加工选冶技术性能是矿床经济评价中的重要依据和组成部分。按照《矿产勘查矿石加工选冶技术性能实验研究程度要求》(DZ/T 0340-2020),矿石加工选冶技术性能实验研究程度取决于不同的勘查阶段、可选性、资源储量规模等要素。以往勘查工作过程中,一个普遍的问题是,在不同勘查阶段对资源储量重视程度一般高于对矿石加工选冶试验研究程度。

黏土型锂矿床作为可能的锂矿重要工业新类型,一个主要的技术瓶颈就是如何经济稳定、绿色高效地从中分离提纯含量相对较低的锂元素。目前,从黏土型锂矿中分离提纯锂的工艺相对简单,成本相对较低。主要有直接浸出工艺、焙烧—酸浸工艺、助剂混合焙烧—浸出工艺、氯化硫化工艺等(李荣改等,2014;赵元艺,2015;朱丽等,2020b)。一个显著的缺陷是前述提取工艺均存在浸出液酸性强,反应残渣环境污染风险高等破坏生态环境问题。朱丽等提出了焙烧—氯盐浸出工艺(朱丽等,2020a),但浸出率偏低。对于离子吸附型锂元素主流的提取工艺流程是用不同浓度的硫酸在常温常压下或适当增温条件下进行逐级淋滤分离,然后通过离子交换,最终得到工业级碳酸锂产品(图 1)。国内该类试验还

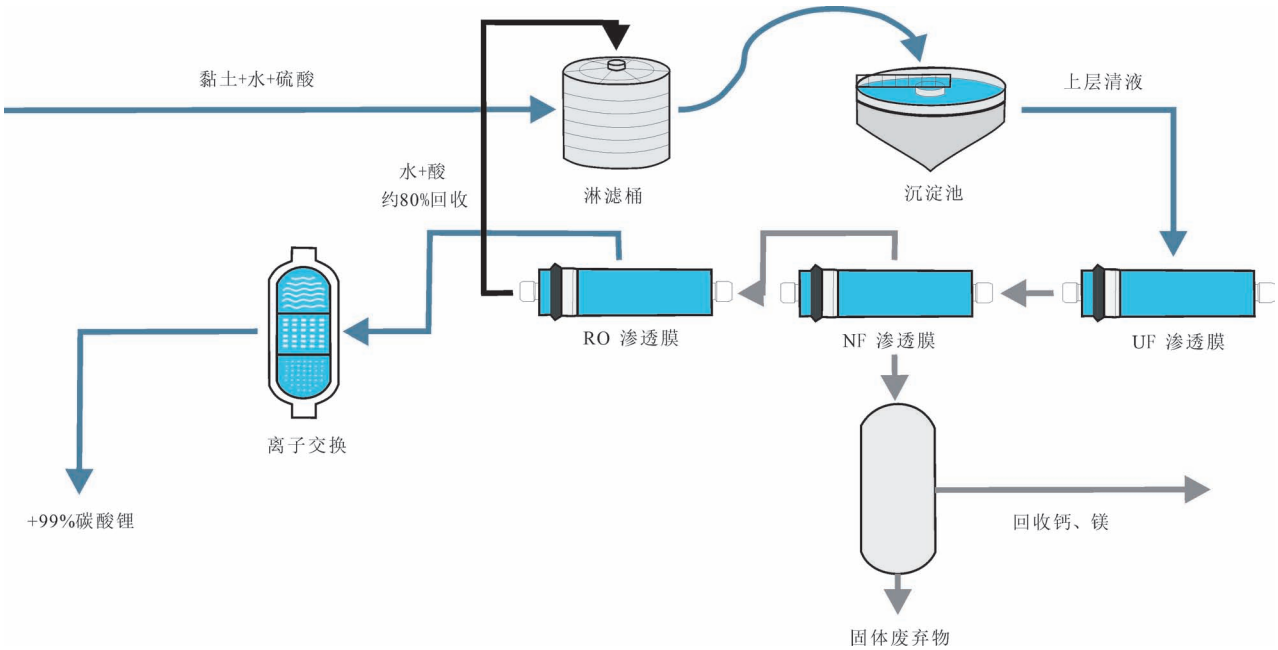


图 1 黏土型锂矿床酸浸回收工艺流程

Fig. 1 Acid leaching recovery technological process of clay-type lithium ore

尚处于实验室流程试验或实验室扩大连续试验阶段,尚无成熟的工艺流程借鉴。

摸清锂元素赋存的黏土矿物类型及其赋存状态(吸附、类质同象替代、独立矿物)对于锂元素的分离提纯方法、工艺流程选择和提取除杂效率分析改进等方面有着重要意义,这也是研究锂元素赋存状况的主要目的之一。然而,多数研究工作与锂元素的分离提纯工艺试验实践工作结合不紧密,甚至完全脱钩,出现两张皮情形。

2.5 可供勘查评价与找矿预测的超常富集成因机制与找矿模型的基础研究尚不深入

近年来,黏土型锂矿床受到越来越多矿产学者的关注。对于黏土型锂矿床的黏土矿物成因、锂元素超常富集机理与富集成矿作用过程、载体矿物、赋存状况、沉积物源及成矿物质来源等成矿理论相关的基础地质科学问题不断取得新进展。不足之处是,沉积成矿期物源区构造属性和沉积区精细的岩相古地理与沉积环境空间配置关系研究程度不足,使得目前的成矿理论与成矿规律研究成果过于宏观,难以直接转化为可指导小尺度精准预测的综合找矿模型。

目前,我国黏土型锂矿床有利区或找锂矿靶区多是在勘查煤、铝土矿和黏土矿过程中,通过共(伴)生有益矿产的综合评价而发现的。黏土型锂矿成矿理论如何转换为清晰的找矿思维和明确的找矿方向,找矿模型如何精准预测找矿靶区,有力指导找矿工作,尚在摸索阶段。

我国黏土型锂矿床一方面在空间上多与煤、铝矿产相伴产出,常产于煤层、铝土矿层的顶底板,与煤、铝形成互补关系,另一方面也有自身特点,以不同形式赋存于黏土矿物中,除原有成熟的煤、铝矿勘查技术方法外,还应结合黏土型锂矿床自身特点建立起一套针对性强的高效勘查技术方法体系。

3 问题思考与讨论

3.1 拓展找矿空间,加大黏土型锂矿勘查评价力度

锂金属既属于国家战略性新兴矿产,也属于关键矿产资源,直接关乎国家科技进步、新兴产业高质量发展和国家安全。随着近年来新能源汽车的飞速发展,全世界锂的需求量也快速增加,各国均对锂矿资源给予更高关注,我国也不例外。可以看出,未来的大国间的科技竞赛在很大程度上将集中于对包括锂在内的关键战略矿产资源的博弈。我国锂矿资源保障仍显不足,进口依赖度处于高位,国家资源安全受到严重影响。积极寻找更多的锂矿产地,储备更多的锂矿资源是解决国内乃至世界锂资源短缺的根本出路。黏土型锂矿床是锂矿重要类型之一,因其

分布范围广,资源潜力巨大,具有非常好的勘查开发前景,有望成为未来锂矿资源勘查开发的重要类型。基于以上认识,地勘单位应在黏土型锂矿国家重点研发计划新进展和成果转化的基础上,进一步提高专业的敏感性、行业的前瞻性,站在国家发展战略、国家资源保障能力和国家安全的高度,充分认识黏土型锂矿床的重要性,密切关注国外该类矿的勘查开发利用研究和工程示范新进展。通过科技攻关与反复工程实践,待锂矿单独开发利用的条件成熟时,及时将黏土型锂矿床列为独立的新矿种类型。具体措施建议有以下4条:

(1)建议由中国地质调查局牵头,组织煤炭、地矿、有色等地勘系统,对以往煤、铝土矿勘查资料和相关化探资料进行二次开发,系统梳理伴生锂元素评价资料,发现富集异常找矿线索,圈定超常富集有利区或找矿靶区。

(2)建议在今后的煤、铝土矿及(偏)碱性花岗岩/酸性火山岩有关风化黏土岩矿勘查开发过程中注重锂元素的综合勘查评价。

(3)建议在新的一轮找矿突破战略行动中,对新发现的锂元素超富异常地段予以重点关注,必要时安排专门性勘查评价示范工作。

(4)我国是由多个(微)地块在长期的地质历史发展过程中俯冲碰撞—拼接镶嵌而成的,构造背景复杂、岩浆活动强烈、成锂矿条件优越。今后地勘工作中不仅要关注传统的花岗岩型、花岗伟晶岩型锂矿和煤、铝关系密切的黏土型锂矿床新类型,还要关注类似国外的火山岩有关黏土型锂矿床的寻找。

3.2　通过勘查示范与工程实践,尽快形成黏土型锂矿勘查规范和评价体系

前已叙及,矿产地质勘查规范是矿产地质勘查的必要前提和工作指导,贯穿矿产地质勘查的全过程。换而言之,没有矿产地质勘查规范,矿产资源勘查就没有了规范和依据,勘查工作和找矿成果也无法得到认定,系统的勘查部署难以实施,后续的开发利用也就失去了资源供给保障。

黏土型锂矿床资源潜力巨大,找矿前景良好,随着需求量的不断增大和价格的不断攀升,大规模商业开发已成为可能,有望成为锂矿重要工业类型。在有黏土型锂矿地质勘查规范的基础上,通过一系列科技攻关、全面的调查评价、系统的勘查部署及专门的勘查投入,有望获取更多找矿成果,真正实现锂矿资源的重大找矿突破。可见,黏土型锂矿地质勘查规范是在全国范围内系统开展的黏土型锂矿勘查评价工作的必要条件和先行基础性工作。因此,在反复的工程实践的基础上,通过归纳总结,尽快出台黏土型锂矿地质勘查规范已是迫在眉睫。

建议自然资源部地质勘查管理司牵头,由全国自然资源和国土空间规划标准技术委员会(SAC/TC 93)会同自然资源部矿产资源储量评审中心组织实施,联合相关地勘科研单位、矿山设计单位、选冶生产科研单位及矿山企业,结合锂矿产品价格现状与走势预测,在政府允许的找矿空间范围内,优选有代表性的找矿靶区,开展科学性勘查研究示范、工业提取与除杂试验及试探—试圈试算—试采试选工程实践,从勘查开发的反复实践中归纳总结可在全国范围内试行的黏土型锂矿地质勘查规范。在此基础上,通过后续的勘查评价工作实践,不断发现规范中存在问题,不断修订完善规范,保证黏土型锂矿床勘查工作有章可循、有据可依。为黏土型锂矿勘查工作部署、勘查项目设置,全面系统开展黏土型锂矿床找矿突破战略行动打好基础,做好铺垫。

3.3　从矿产资源与矿业权管理层面主动引导勘查和鼓励勘查

前已叙及,有限的探矿权设置与市场竞争性出让,形成充分激烈的竞争局面,在最大程度保证了国家出让收益的同时,但也带来勘查市场的低迷、勘查单位和矿业企业的积极性的下跌、商业勘查资金失去兴趣另投它处等负面影响。应当从国家政策层面正面引导和鼓励黏土型锂矿勘查活动,吸引商业性勘查风险投入,激活勘查市场活力,提升国内关键矿产供给能力,保障国家矿产资源安全。因此现行的矿业权管理规定与办法需要修订调整,统筹兼顾国家所有者权益和探矿权人权益,统筹兼顾勘查市场公平有序和勘查空间保障充分,努力在二者间找到最佳平衡点,方能推动我国矿业走上良性发展的道路。特别是对于低品位的黏土型锂矿,锂元素分离提纯工艺处于探索阶段,国内尚无开发成功先例和工程示范,其经济意义尚不明确,还不能确定是否有工业开采价值,在管理上应区别于其他成熟矿产资源,不能简单地套用现行的矿产资源管理与矿权管理等规定。提出以下几点建议:

(1)建议行业主管部门发挥基础性公益性先行性作用,在新一轮找矿战略突破行动中,高度重视黏土型锂矿新矿种,加大黏土型锂矿勘查研究投入与引导。在科学性勘查研究与开发利用工程示范引领的基础上,通过以往煤、铝等矿产成果资料的全面梳理和二次开发等途径,开展黏土型锂矿资源潜力评

价,继而系统部署新型黏土型锂矿相关的基础研究与勘查评价工作,既争取新型黏土型锂矿的找矿新突破,又尽可能降低商业勘查技术风险和资金风险。

(2)借鉴国际上矿业发达国家的矿业权管理先进经验,完善我国矿业权登记管理规定。建议对于尚不成熟未纳入工业类型的新型黏土型锂矿,将找矿普查工作作为非排他性勘查,实行政府备案制管理,最大限度地开放普查找矿空间,并通过市场出让流转保障矿业企业找矿成果权益,鼓励自由找矿,到详查阶段再设立矿权;或是在现行矿业权管理办法的基础上,变有限设置"出让"为自由申请"取得",释放更多找矿空间,鼓励社会地勘资本的介入,充分发挥市场主体作用,调动商业风险勘查的积极性,与地勘基金一起掀起黏土型锂矿的勘查热潮。

(3)如果新型黏土型锂矿通过大量勘查开发研究与工程实践示范,可以确定其具备工业开采价值和经济意义,建议可在现行矿业权登记管理规定下,通过释放地调成果和地勘基金找矿成果,面向市场设置和投放更多的黏土型锂矿探矿权,通过进一步勘查投入,形成更多勘查程度高的矿产地。建议调整矿业权出让收益现行管理办法,尽可能减少探矿权人负担,使其轻装上阵,将有限资金集中投入风险性勘查工作中,以探获更多黏土型锂矿的找矿成果。

3.4 加大锂元素的经济绿色高效分离提纯工艺流程研究力度

虽然锂元素的分离提纯方法较多、工艺相对简单、浸出率高,但成熟的工艺流程并未形成,目前仍处于实验室工艺流程试验或实验室扩大连续试验阶段。目前主流的方法是高温焙烧活化—酸浸法,此法环境安全风险较大;因锂元素分散,且品位普遍较低,预富集效果不明显,分离提纯成本比锂辉石矿和盐湖卤水型锂矿成本高。一定程度上讲,锂的分离提纯成为制约低品位黏土型锂矿床商业勘查与规模开发的主要瓶颈问题。因此,更经济、更成熟、更高效、更环保的分离提取与除杂工艺流程亟待突破。建议以下几点:

(1)黏土型锂矿床尚未进入商业规模开发利用阶段,目前还未纳入锂矿工业类型。建议依据中央全面深化改革委员会会议审议通过的《关于健全社会主义市场经济条件下关键核心技术攻关新型举国体制的意见》,由科学技术部、自然资源部、工业与信息化部联合组织,构建多个黏土型锂矿选冶关键技术产学研联合体,采用新冠疫苗多条平行技术研发方式,共同快速攻关,突破相关技术瓶颈。

(2)分离提纯工艺与锂元素的赋存状况有密切关系,建议以分离提取工艺研究为目的,加强矿(化)层中锂元素载体矿物类型、矿物特征、矿物成因、元素赋存状况、富集机理及富集作用过程等基础研究,支撑锂分离提纯工艺流程的实验室试验和工业试验研究。

(3)建议地勘单位在勘查工作过程中,要注重加强矿石加工选冶技术性能试验研究,按《矿产勘查矿石加工选冶技术性能试验研究程度要求》(DZ/T 0340-2020)要求积极开展勘查区内相应勘查阶段的试验研究。

3.5 创新成矿理论研究,更好转化为找矿思维

相对于花岗伟晶岩型、卤水型等工业类型锂矿,黏土型锂矿的研究成果相对较少。近年来,随着国家层面对锂矿的重视,特别是新能源汽车产业的快速发展,锂矿资源需求量不断扩大,价格的不断攀升,黏土型锂矿床受到越来越多的矿产学者的关注,获取了诸多新进展,并不同程度地指导了找矿工作。主要体现在以下 3 个方面:

(1)以地球化学为主要手段,结合区域构造背景,从大尺度上宏观分析锂元素富集背景、时空分布特征、富集规律和成因机制,并提出了宏观找矿方向和区域重点找矿层位。

(2)针对富锂黏土,开展 X 射线衍射分析、扫描电镜能谱分析(SEM-EDS)、电子探针显微分析(EPMA)分析,研究黏土矿物与锂的赋存状况,一定程度地指导了锂元素浸出富集与除杂工艺流程试验。

(3)在已发现锂元素超常富集地段,采取对比的研究思路,运用层序地层学、沉积环境与沉积相序分析、岩石地球化学、元素地球化学及稀土微量地球化学等为主要研究手段,研究了锂元素及其载体矿物的来源、构造—岩浆事件与成矿间的耦合关系、成矿前的矿源物质预富集、成矿期沉积环境与古地理重建、成因机制、控制条件及富集作用过程。在解决矿床成因机制重大地质科学问题的同时,也部分地转换为总体找矿思维和大尺度宏观找矿方向,一定程度的指导了找矿工程实践。

一个不争的事实是,黏土型锂矿往往不是在黏土型锂矿成矿理论和找矿模型的指导下发现的。因此,可供精细预测含锂矿有利区的或找矿靶区的小尺度矿床模式与高精度的找矿模型,还有待于在今后的研究工作中进一步完善。建议在最新的成矿理

论指导下,充分利用以往资料,从沉积环境分析入手,从源—运—储—保要素出发,编制成矿期岩相古地理图,分析有利于锂元素沉淀富集的沉积体系,总结空间分布特征,积极转化为具体的找矿思维和找矿方向,精确预测和圈定含矿有利区或找矿靶区,不断拓展找矿空间,更好指导今后找矿工作。

4　结论

(1)黏土型锂矿床是锂矿重要成因类型之一,分布范围广、找矿空间大、资源潜力巨大,具有十分乐观的勘查开发前景。随着新能源汽车产业的持续升温,锂矿资源需求量的增加,价格也是持续上扬,为黏土型锂矿勘查开发带来可能。如能引起主管行业的足够重视,并有效解决勘查开发过程中的诸多瓶颈问题,黏土型锂矿床就有望转为独立新矿种,并实现重大找矿突破,成为未来锂矿资源勘查、开发的重要类型和方向,继而从根本上保障国家资源安全。

(2)在重新认识和足够重视黏土型锂矿的基础上,通过勘查开发的科技攻关、引领示范及反复实践,归纳总结矿产地质勘查规范与勘查评价标准体系。行业主管部门发挥基础性、公益性、先行性作用,加大新型黏土型锂矿调查评价、勘查投入及分离提纯工艺试验。在探矿权管理和相关政策方面,统筹兼顾国家权益和企业权益,调动勘查市场活力,引导更多的商业资金介入,激发商业勘查积极性,共同实现黏土型锂矿床重大找矿突破。

(3)呼吁国家级和和省级科技管理部门给予黏土型锂矿床以高度重视,设立国家级和省级“黏土型锂矿床先导性勘查开发关键核心理论技术研究与示范”科技重大专项。以成矿机制与元素赋存状况、勘查评价技术标准体系、高效勘查技术方法体系、分离提纯选矿等重大地质科技问题为攻关目标,联合该产业链相关的地质勘查单位、矿山设计单位、高校及科研院所开展科技攻关,为实现黏土型锂矿勘查开发重要突破提供强有力的科技支撑。

致谢:感谢审稿专家提供的宝贵建议和辛勤的工作。

注　释　/　Notes

❶U. S. Geological Survey. 2022. Mineral Commodity Summaries. https://pubs. er. usgs. gov/publication/mcs2022 - lithium. pdf, https://doi. org/10. 3133/mcs2022

❷ Davidson C F. Recovery of lithium from low-grade ores: US04285914A[P]. 1981-08-25

❸ Crocker L, Lien R H. 1987. Lithium and its recovery from low-grade nevada clays. Bulletin [R/OL]. https://digital. library. unt. edu/ark:/67531/metadc12832/

❹ 李荣改,宋翔宇,徐靖,李翠芬,周新民,高志,李志伟,冯艳丽,颜芝,李彦令,耿彬,孙红林,张旭芳,李伟. 一种低品位含锂粘土矿提锂方法:CN103849761B[P]. 2016-05-18.

❺ 温汉捷,顾汉念,朱丽,罗重光,杜胜江. 离子交换法提取碳酸盐粘土型锂矿中锂的方法:CN 110358934A [P]. 2019-10-22.

❻ 李良彬,陈超,郁兴国,彭琴,艾刚华,王彬,付晓春,高贵彦,周峰,朱志全,肖成,廖海,林亮,陈荣华,何文琪,李晶,钱攀,杨斌愚. 一种含锂黏土提锂的方法:CN111893318A[P]. 2020-11-06.

❼ 赵中伟,何利华,雷云涛,刘旭恒,孙丰龙. 一种从黏土型锂矿中提取锂的方法:CN113549775A [P]. 2021-10-26.

❽ 廖家隆,唐胜群,于永善,侯万武,蒋林青. 一种从黏土型锂矿中提取锂的方法. CN114684834A [P]. 2022-07-01.

❾ 苗耀文,李长东,乔延超,李波,陈若葵,阮丁山. 一种从锂黏土中提取锂的方法:CN114959253A [P]. 2022-08-30.

参　考　文　献　/　References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

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. 岩石学报,38(7):2080~2094.

代世峰,任德贻,周义平,Vladimir VSeredin,李大华,张名泉,James C Hower,Colin R Ward,王西勃,赵蕾,宋晓林. 2014. 煤型稀有金属矿床:成因类型、赋存状态和利用评价. 煤炭学报,39(8):1707~1715.

代世峰,赵蕾,魏强,宋晓林,王文峰,刘晶晶,段飘飘. 2020. 中国煤系中关键金属资源:富集类型与分布. 科学通报,65 (33):3715~3729.

邓旭升,余文超,杜远生,杜威,熊兴国,曾禹人,龙建喜,张晗彬,符宏斌,何犇,卢树藩,罗香建. 2022. 贵州狮溪铝土岩型锂资源的发现及意义. 地质论评,68(5):2022102001.

杜胜江,温汉捷,朱传威,罗重光,周正兵,杨志明,陈建书,朱勋. 2019. 扬子板块西缘稀散金属超常富集的地球化学背景. 岩石学报,35(11):3355~3369.

杜胜江,温汉捷,罗重光. 2021. 滇黔地区古风化-沉积型铌多金属矿床物源示踪:来自玄武岩中榍石的启示. 古地理学报,23(4):871~872.

廖家隆,张福强,韦梦蝶,梁兴东. 2020a. 广西晚二叠世典型聚煤盆地中锂、镓丰度及富集因素. 煤田地质与勘探,48(1):77~84.

廖家隆,韦梦蝶,梁兴东. 2020b. 广西晚二叠世合山组聚煤盆地中锂资源特征分析. 中国煤炭地质,32(9):122~127.

廖家隆,李宝庆,张福强,庄新国. 2022. 广西晚二叠世煤系沉积型锂矿研究现状及展望. 中国煤炭地质,34(10):9~14.

凌坤跃,温汉捷,张正伟,朱笑青,汤好书. 2019. 白云岩风化剖面元素地球化学特征:对黔中九架炉组“三稀金属”富集机制的启示. 岩石学报,35(11):3385~3397.

李荣改,宋翔宇,高志,冯艳丽,李志伟. 2014. 河南某地低品位含锂黏土矿提锂新工艺研究. 矿冶工程, 34(6):81~84.

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.

马圣钞,王登红,孙艳,李超,钟海仁. 2019. 我国西南部 T1/T2 粘土岩地质年代学、地球化学特征及其对粘土型锂矿的找矿意义. 地球科学,44(2):427~440.

潘彤,陈建洲,张添福. 2022. 中国聚宝盆柴达木盆地首次发现黏土型锂矿 具备巨大找矿前景. [N/OL]. 中国新闻网,[2022-09-21 21:40:02] http://www. chinanews. com. cn/cj/2022/09-21/9857776.

shtml.
舒良树,朱文斌,许志琴. 2021. 华南花岗岩型锂矿地质背景与成矿条件. 地质学报,95(10):3099~3114.
孙玉壮,赵存良,李彦恒,王金喜. 2014. 煤中某些伴生金属元素的综合利用指标探讨. 煤炭学报,39(04):744~748. DOI:10. 13225/j. cnki. jccs. 2013. 1718.
王登红,代鸿章,刘善宝,李建康,王成辉,娄德波,杨岳清,李鹏. 2022. 中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势. 地质力学学报,28 (5):743~764
王新宇,李杰,凌坤跃,付伟,张起钻,杨志强,吴祥珂. 2021. 广西土壤和水系沉积物锂元素时空分布及找矿预测. 桂林理工大学学报,41(1):27~33.
王学求,刘汉粮,王玮,周建,张必敏,徐善法. 2020. 中国锂矿地球化学背景与空间分布:远景区预测. 地球学报,41(6):797~806.
温汉捷,周正兵,朱传威,罗重光,王大钊,杜胜江,李晓峰,陈懋弘,李红谊. 2019. 稀散金属超常富集的主要科学问题. 岩石学报,35(11):3271~3291.
温汉捷,罗重光,杜胜江,于文修,顾汉念,凌坤跃,崔燚,李阳,杨季华. 2020. 碳酸盐黏土型锂资源的发现及意义. 科学通报,65(1):53~59.
隰弯弯,赵宇浩,倪培,姚春彦,朱意萍,郑璐,姚仲友,王天刚. 2022. 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,1-21[2022-10-20]. DOI:10. 19826/j. cnki. 1009-3850. 2022. 04002.
许箭琪. 2021. 桂西二叠系含铝岩系中锂的超常富集机制研究. 导师:庞保成. 桂林:桂林理工大学硕士论文.
薛颖瑜,刘海洋,孙卫东. 2021. 锂的地球化学性质与富集机理. 大地构造与成矿,45(6):1202~1215.
杨瑞东,郑禄林,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、锂金属元素. 地质论评,67(5):67051543-67051544.
姚明,缪秉魁,苑鸿庆,章涛,严松,粟阳扬. 2016. 广西巴马花岗斑岩型稀有金属矿床地质特征及找矿方向. 桂林理工大学学报,36(1):131~136.
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.
于洐,王登红,于扬,刘铸,高娟琴,仲佳爱,秦燕. 2019. 国内外主要沉积型锂矿分布及勘查开发现状. 岩矿测试,38(3):354~364.
张福强,廖家隆,赵冠华,周立坚. 2019. 广西煤系共伴生矿产资源特征及开发现状研究. 中国煤炭地质,31(5):1~5+11.
赵蕾,王西勃,代世峰. 2022. 煤系中的锂矿产:赋存分布、成矿与资源潜力. 煤炭学报,47(5):1750~1760.
赵元艺,符家骏,李运. 2015. 塞尔维亚贾达尔盆地超大型锂硼矿床. 地质论评,61(1):34~44.
赵越,温汉捷,罗重光,徐林. 2019. 滇黔地区碳酸盐岩黏土型锂矿的地球化学特征与指示意义. 中国矿物岩石地球化学学会矿床地球化学专业委员会、中国地质学会矿床地质专业委员会、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. 第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集. 中国贵州贵阳:《矿物学报》编辑部:203
中华人民共和国自然资源部. 2022. 2022 中国矿产资源报告. 北京:地质出版社:6.
中华人民共和国自然资源部网站. 2021. 麦克德米特成为美国最大锂矿床[N/OL]. https://geoglobal. mnr. gov. cn/zx/kcykf/ztjz/202104/t20210412_7900863. htm
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.
朱丽,杨永琼,顾汉念,郭腾飞,温汉捷. 2020a. 黏土型锂矿中锂的浸出试验. 有色金属(冶炼部分),(11):35~40.
朱丽,顾汉念,杨永琼,郭腾飞,温汉捷,王宁,罗重光. 2020b. 黏土型锂矿资源提锂工艺研究进展. 轻金属,(12):8~13.
朱正杰,双燕,刘军,向宇,毛玲玲. 2014. 渝东南地区晚二叠世吴家坪组煤层底部凝灰岩地球化学特征及成因. 矿床地质,(S1):2.
Cui Yi, Wen Hanjie, Yu Wenxiu, Luo Chongguang, Du Shengjiang, Ling Kunyue, Xu Fei, Yang Jihua. 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.
Dai Shifeng, Ren Deyi, Zhou Yiping, Vladimir V S, Li Dahua, Zhang Mingquan, James C H, Colin R W, Wang Xibo. 2014. Coal-hosted rare metal deposits:Genetic types, modes of occurrence, and utilization evaluation. Journal of China Coal Society, 39(8): 1707~1715.
Dai Shifeng, Zhao Lei, Wei Qiang, Song Xiaolin, Wang Wenfeng, Liu Jingjing, Duan Piaopiao. 2020&. Resources of critical metals in coal-bearing sequences in China: Enrichment types and distribution. Chin Sci Bull, 65(33): 3715~3729.
Deng Xusheng, Yu Wenchao, Du Yuansheng, Du Wei, Xiong Xingguo, Zeng Yuren, Long Jianxi, Zhang Hanbin, Fu Hongbin, He Ben, Lu Shufan, Luo Xiangjian. 2022. Discovery and significance of Shixi bauxitite-type lithium deposit in Guizhou Province. Geological Review, 68(5): 2022102001.
Du Shengjiang, Wen Hanjie, Luo Chongguang. 2021#. Source tracing of ancient weatherized - sedimentary niobium polymetallic deposits in Yunnan and Guizhou: Inspiration from sphene in basalt. Journal Of Palaeogeography, 23(4): 871~872.
Du Shengjiang, Wen Hanjie, ZhuChuanwei, Luo Chongguang, Zhou Zhengbing, Yang Zhiming, Chen Jianshu, Zhu Xun. 2019. Geochemical background on the super-richening of disperse metal elements on the western margin of the Yangtze plate. Acta Petrologica Sinica, 35(11): 3355~3369.
JINDALEE Resources Limited. 2021. Strong lithium intercepts from drilling at McDermitt US. [R/OL] https://www. jindalee. net/site/pdf/eb63f38e-f950-4601-a0ab-a222341b7b67/Strong-lithium-intercepts-from-drilling-at-McDermitt-US. pdf
Liao Jialong, Zhang Fuqiang, Wei Mengdie, Ling Xingdong. 2020&. Lithium and gallium abundance and enrichment factors in typical Late Permian coal-accumulating basin in Guangxi. Coal Geology & Exploration, 48(1): 77~84.
Liao Jialong, Wei Mengdie, Ling Xingdong. 2020&. Analysis on Late Permian Heshan Formation Coal Accumulation Basin Lithium Resource Features in Guangxi. Coal Geology of China, 32(9): 122~127.
Liao Jialong, Li Baoqing, Zhang Fuqiang, Zhuang Xinguo. 2022&. Research status and prospect of sedimentary Lithium resources of Late Permian coal measure in Guangxi [J]. Coal Geology of China, 34(10): 9~14.
Ling Kunyue, Wen Hanjie, Zhang Zhengwei, Zhu Xiaoqing, Tang Haoshu. 2019&. Geochemical characteristics of dolomite weathering profiles and revelations to enrichment mechanism of trace elements in the Jiujialu Formation, central Guizhou Province. Acta Petrologica Sinica, 35(11): 3385~3397.
Li Ronggai, Song Xiangyu, Gao Zhi, Feng Yanli, Li Zhiwei. 2014&. New Technology for Extracting Li from Low-grade Lithium-bearing Clay. Mining and Metallurgical Engineering, 34(6): 81~84.
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.
Ma Shengchao, Wang Denghong, Sun Yan, Li Chao, Zhong Hairen. 2019&. Geochronology and Geochemical Characteristics of Lower-

Middle Triassic Clay Rock and Their Significances for Prospecting Clay-Type Lithium Deposit. Earth Science, 44(2): 427~440.

Ministry of Natural Resources, PRC. 2022#. 2022 China Mineral Resources. Beijing: Geological Publishing House: 6.

Ministry of Natural Resources, PRC. 2021#. McDermitt Becomes the Largest Lithium Deposit in the United States [N/OL]. https://geoglobal.mnr.gov.cn/zx/kcykf/ztjz/202104/t20210412_7900863.htm.

Pan Ton, Chen Jianzhou, Zhang Tianfu. 2022#. Clay type lithium deposit discovered for the first time in Qaidam Basin, a treasure basin in China, has great prospecting prospects[N/OL]. Chinanews. 2022-09-21 21:40. http://www.chinanews.com.cn/cj/2022/09-21/9857776.shtml.

Richard K G, Mccarthy J H, James J R. 1978. Lithium in the McDermitt caldera, Nevada and Oregon. Energy, 3(3):347~353.

Shu Liangshu, Zhu Wenbin, Xu Zhiqin. 2021&. Geological settings and metallogenic conditions of the granite- type lithium ore deposits in South China. Acta Geologica Sinica, 95(10): 3099~3114.

Sun Yuzhuang, Zhao Cunliang, Li Yanheng, Wang Jinxi. 2014&. Minimum mining grade of the selected trace elements in Chinese coal. Journal of China Coal Society, 39(4): 744~748.

Tourtelot H A, Brenner-Tourtelot E F. Lithium, 1978. a preliminary survey of its mineral occurrence in flint clay and related rock types in the United States. Energy, 3(3): 263~272.

Wang Denghong, Dai Hongzhang, Liu Shangbao, Li Jiankang, Wang Chenghui, Lou Debo, Yang Yueqing, Li Peng. 2022&. New progress and trend in ten aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China in the past decade. Journal of Geomechanics, 28(5): 743　764.

Wang Xinyu, Li Jie, Ling Kunyue, Fu Wei, Zhang Qizuan, Yang Zhiqiang, Wu Xiangke. 2021&. Temporal spatial distribution of lithium in soils and drainage sediments and ore-prospecting significance in Guangxi. Journal of Guilin University of Technology, 41(1): 27~33.

Wang Xueqiu, Liu Hanliang, Wang Wei, Zhou Jian, Zhang Bimin, Xu Shanfa. 2019&. Geochemical Abundance and Spatial Distribution of Lithium in China: Implications for Potential Prospects. Acta Geoscientica Sinica, 41(6): 797~806.

Wen Hanjie, Gu Hannian, Zhu Li, Luo Chongguang, Du Shengjian. 2020#. Extraction of lithium from carbonate clay lithium ore by ion exchange method:, CN110358934A.

Wen Hanjie, Zhou Zhengbing, Zhu Chuanwei, Luo Chongguang, Ling Kunyue, Wang Dazhao, Du Shengjiang, Li Xiaofeng, Chen Maohong, Li Hongyi. 2019&. Critical scientific issues of super-enrichment of dispersed metals. Acta Petrologica Sinica, 35(11): 3271~3291.

Wen Hanjie, Luo Chongguang, Du Shengjiang, Yu Wenxiu, Gu Hannian, Ling Kunyue, Cui Yi, Li Yang, Yang Jihua. 2020&. Carbonate-hosted clay-type lithium deposit and its prospecting significance. Chin Sci Bull, 65(1): 53~59.

Xi Wangwang, Zhao Yuhao, Ni Pei, Yao Cunyan, Zhu Yiping, Zheng Lu, Yao Zhongyou, Wang Tiangang. 2022&. Main types, characteristics, distributions, and prospecting potential of lithium deposits. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 1~21[2022-10-20]. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04002.

Xu Jianqi. 2021&. Supernormal Enrichment Mechanism of Lithium in Bauxite Series in Permian, Western Guangxi. Tutor: PANG Baocheng. Guilin: Guilin University of Technology.

Xue Yingyu, Liu Haiyang, Sun Weidong. 2021&. The Geochemical Properties and Enrichment Mechanism of Lithium. Geotectonica et Metallogenia, 45(6): 1202~1215.

Yang Ruidong, Zheng Lulin, Cheng Wei, Gao Junbo, Chen Jun, Sun Baichuan, Zhang Yan. 2021#. Rare earth and lithium elements enrichmemt found in Late Permian coals in Tongzi—Jinsha area, Northern Guizhou Province. Geological Review, 67(5): 67051543-67051544.

Yao Ming, Miao Bingkui, Yuan Hongqing, Zhang Tao, Yan Song, Su Yangyang. 2016&. Geological characteristics and prospecting of granitic porphyry type rare metal deposit in Bama, Guangxi. Journal of Guilin University of Technology, 36(1): 131~136.

Yao Shuangqiu, Pang Chongjin, Wen Shunv, Liang Hang, Lu Guanghui, Yin Benchun, Qin Feng, Luo Qiaohua. 2021&. Li-rich Claystone in the Upper Permian Heshan Formation in Western Guangxi and its Prospecting Significance. Geotectonica et Metallogenia, (4505): 951~962.

Yu Feng, Wang Denghong, Yu Yang, Liu Zhu, Gao Juanqin, Zhong Jiaai Qin Yan. 2019&. The Distribution and Exploration Status of Domestic and Foreign Sedimentary-type Lithium Deposits. Rock and Mineral Analysis, 38(3): 354~364.

Zhang Fuqiang, Liao Jialong, Zhao Guanhua, Zhou Lijian. 2019& Coal Measures Associated and Accompanying Mineral Resources Features and Exploitation Status in Guangxi. Coal Geology of China, 31(05): 1~5+11.

Zhao Lei, Wang Xibo, Dai Shifeng. 2022&. Lithium resources in coal-bearing strata: Occurrence, mineralization, and resource potential. Journal of China Coal Society, 47(5): 1750~1760.

Zhao Yuanyi, Fu Jiajun, Li Yun. 2015&. Super Large Lithium and Boron Deposit in Jadar Basin, Serbia. Geological Review, 61(1): 34~44.

Zhao Yue, Wen Hanjie, Luo Chongguang, Xu Lin. 2020#. Geochemical Characteristics and Indicative Significance of Carbonate Clay Lithium Ore in Yunnan and Guizhou. Special Topic 4 of Abstracts of the Ninth National Symposium on Metallogenic Theory and Prospecting Methods. Metallogenic Operations and Prospecting of Key Metals (Dispersed, Rare and Rare Earth Elements).

Zhao Yue, Wen Hanjie, Luo Chongguang, Xu Lin. 2019#. Geochemical characteristics and indicative significance of carbonate clay type lithium deposits in Yunnan Guizhou region. Special Committee on Deposit Geochemistry of the Chinese Society of Mineral and Rock Geochemistry, Special Committee on Deposit Geology of the Chinese Geological Society State Key Laboratory of Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. Abstract of the 9th National Symposium on Metallogenic Theory and Prospecting Methods. Guiyang, Guizhou, China: Journal of Minerals Editorial Department: 203

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.

Zhu Li, Yang Yongqion, Gu Hannian, Guo Tengfei, Wen Hanjie. 2020a&. Study on Leaching of Lithium from Clay—type Lithium Deposit. Nonferrous Meitals, (Extractive Metallurgy) (11): 35~40.

Zhu Li, Gu Hannian, Yang Yongqion, Guo Tengfei, Wen Hanjie, Wang Ning, Luo Chongguang. 2020b&. Research progress in lithium extraction from clay type lithium ore resources. Lightmetal, (12): 8~13.

Zhu Zhengjie, Shuang Yan, Liu Jun, Xiang Yu, Mao Lingling. 2014. Geochemical Characteristics and Genesis of Tuff at the Bottom of Coal Seam of Late Permian Wujiaping Formation in Southeast Chongqing [J]. Deposit Geology (S1), 2(in Chinese).

The bottleneck problem and some thoughts on the process of exploration and development of clay-type lithium deposit

Wang Hui[1], Zhang Fuqiang[1,2], Zhang Degao[3], Zhao Guanhua[1], Liao Jialong[1], Zhou Lijian[1], Yan Xiaomin[1], Xu Huiheng[1], Hou Wanwu[1], Zhang Jinjiang[1], LV Qi[1], ZENG Ping[1], LU Ankang[1]

1). *China National Administration of Coal Geology Guangxi Administration of Coal Geology*, *Nanning*, 530299;

2). *China University of Geosciences*, *Wuhan*, 430047;

3). *China National Administration of Coal Geology*, *Beijing*, 100038

Abstract: Lithium is a key international and domestic strategic shortage of mineral resources, the traditional brine-type lithium, hard rock-type lithium deposits cannot meet the growing demand of modern high-tech industry. The clay-type lithium deposit distribution area is wide, with huge resource potential has not been effectively developed, which is a major topic concerned by the industry(objectives). Through consulted literatures, collected information on government and enterprise official websites, combined with our own lithium exploration practicing (methods), it is found that there are five main problems affecting and restricting the exploration and development of clay-type lithium deposits: ① The resource potential of clayey lithium deposits is not fully understood, the prospect is not promising, and insufficient attention is not paid to it. ② The lack of normative basis to guide the exploration work. ③ The unfavorable factors of mineral resources management and mining rights management lead to insufficient exploration. ④ In the process of exploration and research, the technical performance of ore separation, metallurgy and processing is not paid enough attention, and the technological process is not mature, especially the economical and environmentally friendly separation and extraction technology and process are still in the exploration stage. ⑤ The basic research on the genetic mechanism and prospecting model of supernormal enrichment which can be used for exploration evaluation and prospecting prediction is still not thorough.

In view of the above five problems, five aspects of thinking and suggestions are put forward in order to accelerate the pace of exploration and development of clayey lithium deposits, which is expected to alleviate the shortage of lithium resources and the tension between supply and demand. ① The geological prospecting industry should pay more attention to clayey lithium deposits and treat them as independent new mineral types. On the basis of making full use of the old exploration data such as coal and aluminum for secondary development, the verification survey is carried out on the abnormal areas, and the favorable ore-prospecting areas or ore-prospecting targets are delineated to provide the basis for the exploration and deployment of clayey lithium ore. ② Through the selection of representative blocks to carry out exploration and development test research and engineering demonstration, study and issue the clay lithium deposit exploration standards as soon as possible, to provide a standard for the future clay lithium ore exploration work. ③ Proceeding from the current mining right management system, in accordance with the two-cross principle of "public welfare first, fund linkage, commercial follow-up, complete exploration and rapid breakthrough", on one hand, it is suggested that the national and local governments set up special geological prospecting funds, increase the financial input of geological prospecting funds, and form a batch of mineral production areas for further exploration. On the other hand, it is suggested that the mineral resources management departments release more exploration space. Introduce more social capital, fully mobilize the vitality of the exploration market, and provide a strong resource guarantee for the country. ④ It is suggested to increase the experimental investment of separation and extraction under different lithium occurrence states and different proportions, so as to form a technically reliable, economically reasonable and environmentally friendly technological process as soon as possible. ⑤ The fifth is to sort out and focus on the relevant scientific and technological issues that restrict the exploration evaluation, development and utilization and prospecting prediction, and to provide

strong scientific and technological support for the exploration and development of lithium ore through scientific and technological breakthroughs(results).

The above major bottleneck problems need the concerted efforts of the government, enterprises and scientific research universities to put forward solutions and measures in order to achieve an important breakthrough in the exploration strategy of lithium resources, form a batch of clay lithium deposit resource bases for industrial scale development, and then fundamentally solve the shortage of lithium resources and the situation of high dependence on imports.

Keywords: clay-type lithium ore; coal bearing and aluminum rock series; occurrence state and separation extraction; exploration and development research and demonstration; exploration evaluation system standard

Acknowledgements: This research was supported by the major project of the National Social Science Fund "Research on the Risk Governance Mechanism of China's Strategic Three Rare Mineral Resources Supply" (No. 192DA111), the major scientific research project of the China Coal Geology Administration "Research on the Key Technologies for the Exploration and Development of Coal Measures Mineral Resources" (No. ZMKJ-2021-ZX03), and the general project of the Guangxi Natural Science Fund "Research on the Mineralization and Evolution of Lithium in Guangxi Coal Gathering Basin" (No. 2019GXNSFAA185062)

First and corresponding author: WANG Hui, male, born in 1971, is mainly engaged in basic geology and mineral geology; Email: wanghui. rock@163. com

Corresponding author: ZHANG Fuqian, male, born in 1977, senior engineer, is mainly engaged in drilling engineering, basic geology and mineral geology; Email: zfq72951@126. com

Manuscript received on: 2022-10-08; Accepted on: 2022-12-29; Network published on: 2023-01-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2023. 01. 023　　**Edited by**: GAO Zuoyu