

doi: 10.12029/gc20230523002

刘雪, 王春连, 刘学龙, 刘殿鹤, 颜开, 刘思晗, 刘延亭. 2024. 中国锂矿床主要类型特征、分布情况及开发利用现状[J]. 中国地质, 51(3): 811–832.

Liu Xue, Wang Chunlian, Liu Xuelong, Liu Dianhe, Yan Kai, Liu Sihan, Liu Yanting. 2024. Main types, distribution, development and utilization of lithium deposits in China[J]. Geology in China, 51(3): 811–832(in Chinese with English abstract).

# 中国锂矿床主要类型特征、分布情况及开发利用现状

刘雪<sup>1,2</sup>, 王春连<sup>2</sup>, 刘学龙<sup>1</sup>, 刘殿鹤<sup>2,3</sup>, 颜开<sup>2</sup>, 刘思晗<sup>2,4</sup>, 刘延亭<sup>2,5</sup>

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 4. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100; 5. 东华理工大学地球科学学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:**【研究目的】随着科技的进步, 近几年来, 市场上对绿色能源和矿产资源的需求日益激增, 锂作为一种核心战略关键金属矿产, 相关勘探与研究已成为矿产勘查和地质研究的热点。【研究方法】本文基于前人研究, 按照统计分析原则, 对国内锂资源主要类型、分布情况与开发利用现状进行梳理和总结。【研究结果】中国锂矿床类型主要分为硬岩型、卤水型及黏土型。资源分布比较集中, 其中硬岩型锂矿主要分布在四川、江西、湖南、新疆等地区, 卤水型锂矿主要分布在青海、西藏和湖北等地区。目前, 硬岩型锂矿中的花岗伟晶岩型锂矿因其矿石品位高, 开采技术较成熟而成为国内锂资源供给的重要来源; 卤水型锂矿资源量大, 但生产周期长; 黏土型锂矿发现较晚, 研究时间短, 尚未实现规模化利用, 但已有锂资源的分布格局和现实需求。【结论】从总体上看, 中国锂矿资源存在供需关系失衡、资源进口依存度高的问题, 目前国内外新能源汽车工业、移动能源存储技术以及国家绿色能源产业发展迅速, 对锂矿资源的需求在未来长期内增长势头明显, 要想在锂矿这种全球稀缺战略性资源上取得话语权, 就有必要对中国现有的锂矿资源进行重新评估, 摸清资源家底, 加大对新型锂矿资源的调查研究与勘探开发研究力度。

**关键词:** 锂矿床; 卤水型; 黏土型; 开发潜力; 矿产勘查工程

**创新点:** (1) 系统梳理了中国锂矿床的分布情况; (2) 总结了国内锂矿的资源利用现状, 预测了未来锂矿的开发潜力。

中图分类号: P618.71 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2024)03–0811–22

## Main types, distribution, development and utilization of lithium deposits in China

LIU Xue<sup>1,2</sup>, WANG Chunlian<sup>2</sup>, LIU Xuelong<sup>1</sup>, LIU Dianhe<sup>2,3</sup>, YAN Kai<sup>2</sup>,  
LIU Sihan<sup>2,4</sup>, LIU Yanting<sup>2,5</sup>

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 2. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 4. Key

收稿日期: 2023–05–23; 改回日期: 2023–11–08

基金项目: 国家自然科学基金项目(U20A2092, 42002106, 41907262, 41502089)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(KK2005)、成矿作用与资源评价重点实验室开放基金(ZS2207)及中国地质调查局项目(DD20230056, DD20190606, DD20221684, DD20230291)联合资助。

作者简介: 刘雪, 女, 1999 年生, 硕士生, 地球化学专业; E-mail: liu18968294128@163.com。

通讯作者: 王春连, 男, 1983 年生, 博士, 研究员, 主要从事沉积学及矿床学方面的研究工作; E-mail: wangchunlian312@163.com。

Laboratory of Oil and Gas Resources and Exploration Technology, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China; 5. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

**Abstract:** This paper is the result of mineral exploration engineering.

**[Objective]** With the development of science and technology, the market demand for green energy mineral resources has been increasing in recent years, and lithium as a core strategic metal resource, related exploration and research has become a hot spot for mineral exploration and geological research. **[Methods]** Based on previous research, this paper compares and summarizes the main types, distribution and development and utilization of lithium resources in China according to the principle of statistical analysis.

**[Results]** Lithium ores in China are mainly classified into hard rock type, brine type and clay type lithium ores. The distribution of lithium resources is relatively concentrated, among which hard rock-type lithium ore is mainly distributed in Sichuan, Jiangxi, Hunan, Xinjiang and other regions, and the salt lake brine-type lithium ore is distributed in Qinghai, Tibet and Hubei and other regions. At present, granite pegmatite lithium ore is an important source of domestic lithium supply because of its high ore grade and easy mining. Brine-type lithium ore has large resources, but the lithium extraction technology is relatively complex; clay-type lithium ore was discovered late and has not been exploited on a large scale, but there is a distribution pattern and realistic demand for lithium resources. **[Conclusions]** On the whole, there is an imbalance between supply and demand of lithium resources in China and a high dependence on resource imports. At present, the new energy automobile industry, mobile energy storage technology and the national green energy industry are developing rapidly at home and abroad, and the demand for lithium resources will grow significantly in the long term. In order to gain a say in this global scarce strategic resource, it is necessary to re-evaluate the existing lithium resources in China, map out the resource base, and increase the research and exploration and development of new lithium resources.

**Key words:** lithium deposits; brine type; clay type; development potential; mineral exploration engineering

**Highlights:** (1) The distribution of lithium deposits in China is systematically sorted out; (2) The current status of resource utilization of lithium ores in China is summarized, and the future development potential of lithium ores is predicted.

**About the first author:** LIU Xue, female, born in 1999, master candidate, majors in geochemistry; E-mail: liu18968294128@163.com.

**About the corresponding author:** WANG Chunlian, male, born in 1983, doctor, researcher, engaged in the research of sedimentology and mineral deposit; E-mail: wangchunlian312@163.com.

**Fund support:** Supported by National Science Foundation of China (No.U20A2092, No.42002106, No.41907262, No.41502089), Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. KK2005), Open Fund for Key Laboratory of Metallogenic Processes and Resource Evaluation (No.ZS2207), the projects of China Geological Survey (No.DD20230056, No.DD20190606, No.DD20221684, No.DD20230291).

## 1 引 言

锂是自然界最轻的金属元素,具备质地软、比热大、电离电势和极化系数大等一系列优良特性,在新能源电池、玻璃、润滑剂、陶瓷、医药、农业、冶金、电子技术以及核工业等领域都有广泛应用(王高尚, 2001; 申军和戴斌联, 2009; 李建康等, 2014; 表 1)。同时锂具有重要的战略价值,尤其近几年在新能源领域应用范围不断扩大,如电池工业、特种工程塑料等,因此,锂被誉为“21 世纪新能源”(李建康等, 2006a, 2014)。目前已发现的锂矿物

超过 150 种,其中常见的仅 28 种,包括锂磷铝石、锂云母、透锂长石、锂辉石、铁锂云母、锂皂石、羟硼硅钠锂石(贾达尔锂硼矿物)等(赵元艺等, 2015; Kudryavtsev, 2016)。这些矿物中最常见的为云母类矿物锂云母( $\text{KLi}_{1.5}\text{Al}_{1.5}[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}](\text{F}, \text{OH})_2$ )和辉石类矿物锂辉石( $\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ ),这两种是当前固体锂矿最主要的赋存矿物(邢凯等, 2023)。目前,随着新能源汽车等产业对锂离子的需求量迅速增长,世界范围内对锂资源的消费量也在以每年更快的速度增长,尽管中国拥有丰富的锂矿资源(翁梅茂和杨丹, 2018; 熊欣等, 2019),但主要为硬岩型和高

表 1 锂资源的应用领域、实例及优缺点 (据王秀莲等, 2001; 何生丽, 2001; 孙中刚等, 2012; 杨卉芃等, 2019)

Table 1 Applications, examples and advantages and disadvantages of lithium resources (after Wang Xiulian et al., 2001; He Shengli, 2001; Sun Zhonggang et al., 2012; Yang Huipeng et al., 2019)

应用领域	应用实例	优缺点
新能源	锂电池是非常重要的储能技术, 在下游产品中常分为两类: 动力电池和3C电子产品, 动力电池应用在电动乘用车、电动客车以及电动物流车、电动船等, 3C电子产品主要用于小型电子设备, 移动通讯设备, 便携式电脑等	锂电池具有高能量密度, 质量轻, 体积小, 使用寿命长, 性能好, 无污染等优点。随着新能源的倡导与发展, 锂电池有非常大的市场
新材料	有机金属, 是一种具有碳金属键的物质, 被用来形成有机化合物的碳-碳骨架, 是有机合成中的重要原料, 尤其在高效合成药物中间体有广泛的应用。在金属有机化合物中, 有机锂的反应活性非常高, 因此应用最多	有机锂不稳定, 且参加的反应往往是非常迅速的, 并且伴随着强放热过程, 在传统的间歇釜反应器中很难控制
军工航天	航空航天领域中常用的锂材料为铝锂合金, 广泛应用于许多民用飞机和先进的战斗机。此外, 锂及其化合物的燃烧度高、速度快、火焰宽、发热量大, 经常被用作火箭、飞机或潜艇的高能燃料	铝锂合金密度低、疲劳性能好、耐腐蚀, 已是现代航空航天器材设计中最具竞争力的材料之一, 拥有广阔的应用前景
生物医药	锂是人体中的一种微量元素, 如果人体缺少了锂, 就会引起痴呆, 狂躁, 发育不良等症状, 在医药方面, 锂还能改善人体的造血功能, 增强人体的免疫机能。锂有调节中枢神经活性的功能, 以及镇静、安神、抑制心理障碍、预防心血管疾病等功效	锂的治疗剂量和毒性剂量之间差距相对较窄, 锂浓度过高可导致中毒, 出现严重不良反应和多系统功能障碍, 严重可能致命
民用储能	风光发电站储能、离网储能、家庭储能、微网储能、个体户及工业园区储能、备用电源、通信基站、数据中心、特种设备, 户外电源等	模块化的储能系统, 安装简易, 可自主扩容, 可并机扩容实现三相输出, 可设置光伏、市电、电池优先供电
农业领域	锂对棉花、马铃薯等部分作物有一定增产作用。锂还能制造“锂盐肥料”, 防治西红柿腐烂和小麦锈穗病	应用面积小, 只是在探索实验阶段, 目前市场需求量不大
核工业	核聚变的本质是氘和氚的反应, 锂不仅可以作为制备氚的原材料, 同时也是一种在反应中很好的冷凝剂	同位素锂6无核裂变产物, 不会造成辐射污染, 且反应后能量可用于发电

Mg/Li 比的盐湖卤水型, 由于环保要求、生产成本与开采技术等相关问题, 制约了中国锂矿大规模的开发与利用(王春连等, 2020), 目前绝大多数工业级碳酸锂依赖进口(张驰等, 2017)。

近年来, 锂作为全球重要的新兴关键性矿产之一, 被中国、美国、日本和欧盟等世界各主要经济体列为战略性或关键矿产, 各国愈加重视锂资源安全供应(邢凯等, 2023), 锂资源的重要性在世界范围内不断提高。世界上的锂资源很丰富, 但是在分布上和需求上都比较集中。目前, 利用盐湖卤水法提取锂已成为世界上最主要提锂的技术。然而, 由于高品质的盐湖资源稀缺, 盐湖卤水提取锂困难, 其核心技术被世界锂业巨头所垄断, 导致了锂业市场的高度集中(王学评等, 2014)。

## 2 锂矿床主要类型、中国锂资源分布情况及典型锂矿床

### 2.1 主要类型

很多学者从不同角度对锂矿床的类型进行了

划分, Bradley et al.(2017)将世界范围内的锂矿床分为 3 种类型: 卤水型、硬岩型和黏土型。卤水型进一步细分为盐湖卤水型和地下卤水型, 在全球锂矿资源占比分别为 58%、6%; 硬岩型可细分为花岗伟晶岩型、花岗岩型, 全球总占比为 26%; 黏土型占比较低, 约为 10%。李建康等(2014)根据其成因和形态将锂矿划分为硬岩锂矿和卤水锂矿, 将硬岩锂矿进一步划分为花岗(伟晶)岩型、云英岩型、黏土(沉积)型和湖相沉积型; 卤水锂矿分为大陆盐湖型、地热卤水型和油田卤水型。吴西顺等(2014)根据锂的赋存状态和开发特征分为卤水型、伟晶岩型、沉积岩型等 3 类, 其中卤水型矿床主要为大陆盐湖卤水; 沉积岩型主要包括黏土型和湖相沉积型。隰弯弯等(2023)将全球锂矿划分为 6 种类型, 分别为盐湖卤水型、伟晶岩型(包括相关的花岗岩型及云英岩型)、黏土型、锂沸石型、其他卤水型(包含油气田卤水和地热卤水两种亚类)和离子吸附型。综合前人研究, 本文采取 Bradley 的分类方法, 将锂矿床分为硬岩型锂矿、卤水型锂矿、黏土型锂矿 3 种类型。表 2 列举了中国超大型、大型锂矿床的时空分

表 2 中国超大型、大型锂矿床 (据郑喜玉, 2002; 费光春等, 2020; 王核等, 2022)

Table 2 Ultra-large and large lithium deposits in China (after Zheng Xiyu, 2002; Fei Guangchun et al., 2020; Wang He et al., 2022)

类型	矿床名称	产地	规模	时代	优点	缺点
伟晶岩型/ 锂辉石	甲基卡矿田新三号脉 (X03)	四川雅江县	超大型	印支晚期	规模大、埋藏浅、品位较高	锂产业规模小, 产能低; 受生态环境限制较大, 影响产量及生产规模; 基础设施建设较为落后, 且较为分散;
	甲基卡矿田N.134脉	四川雅江县	大型	印支晚期及燕山早期	规模大、易采易选、品位较高	技术相对落后, 生产模式粗放, 回收利用率低, 伴生矿石浪费较为严重。
	甲基卡矿田木绒	四川雅江县	超大型	燕山早期		
	甲基卡矿田措拉	四川雅江县	大型			
	甲基卡矿田德扯弄巴	四川雅江县	大型	燕山早期		
	甲基卡矿田烧炭沟	四川雅江县	超大型			
	容须卡	四川道孚县	中型	燕山早期		
	可尔因矿田李家沟	四川金川县	超大型	印支晚期	锂辉石为主, 铍、铌钽和锡不发育; 规模巨大	产状普遍较陡; 分带性不发育; 地表地质条件差, 工作困难, 有可能出现漏矿
	可尔因矿田党坝	四川马尔康县	超大型	燕山早期		
		扎乌龙	四川石渠县	中型	燕山早期	
	琼嘉岗	喜马拉雅	预测超大型	喜山期	预测资源量大, 找矿潜力大	生态脆弱, 自然条件恶劣, 开采成本大
	可可托海3号脉	新疆富蕴县	中型	印支晚期及燕山早期		
	大红柳滩	新疆和田县	中型	印支晚期		
	大红柳滩南、卡拉、盘龙山	新疆和田县白龙山	超大型	印支晚期及燕山早期		
	正冲	湖南道县	大型			
花岗岩型/ 锂云母	宜春钽铌矿 (414矿)	江西宜春	超大型	燕山晚期		矿区经过多年开发利用, 保有资源储量已严重不足
	松树岗	江西横峰县	超大型	燕山期		
	大港	江西宜丰	大型	燕山期	找矿潜力大	
	同安	江西宜丰	大型	燕山期		
	化山	江西宜丰	大型			
隐爆角砾岩型/ 锂云母	维拉斯托锡锂多金属矿床	内蒙古	大型			
地下卤水型	江汉盆地	湖北	超大型	中新生代		
盐湖卤水型/ 碳酸盐型	扎布耶盐湖	西藏	超大型		易于提取, 开发利用成本低	
	结则茶卡	西藏	超大型		规模较大且禀赋优异	受限于自然条件开发难度较大, 产能增长缓慢
盐湖卤水型/ 硫酸盐型	龙木错	西藏	超大型		储量巨大, 品位高, 杂质比较少	
	扎仓茶卡	西藏	大型			
	麻米错	西藏	大型			
	西台吉乃尔湖	青海	超大型			
	东台吉乃尔湖	青海	超大型			
	一里坪湖	青海	超大型		储量巨大	品位较低
盐湖卤水型/ 氯化物型	察尔汗湖	青海	超大型			

布及优缺点。

### 2.1.1 硬岩型锂矿

#### (1) 花岗伟晶岩型锂矿

花岗伟晶岩广泛分布于全球各板块汇聚造山的构造旋回中, 是世界上锂、铌、铍、钽、铷、铯、钫、锆等稀有金属资源的主要来源 (Tkachev, 2011;

McCauley and Bradley, 2014)。根据Černý and Ercit. (2005)的伟晶岩分类方法, 中国的稀有金属花岗岩以 LCT 型为主, 其中锂辉石伟晶岩占主导地位, 目前只在湖北省通城县发现过透锂长石型伟晶岩 (张如柏, 1985), 滇西北贡山县存在铁锂云母型伟晶岩 (刘丽君等, 2017)。花岗伟晶岩型锂矿具有分布范

围广(图 1)、资源量大的特点,是中国硬岩型锂资源的主要开发对象。LCT 型伟晶岩是全球重要的 Li 元素储库之一,主要侵位于(250~350 Ma)的大陆上地壳,其成岩时代为(3040~7 Ma),此类矿床从太古宙到新生代各时代均有发育,成岩峰期与潘吉亚,冈瓦纳,哥伦比亚和凯诺兰等超大陆的存在时期具有良好的耦合度(孙文礼等, 2022)。中国的花岗伟晶岩型锂矿在空间分布上比较集中,主要分布区为阿尔泰地区、松潘—甘孜—西昆仑地区、喜马拉雅地区、阿尔金—柴北缘地区、秦岭地区、江南地区、武夷—云开地区,成矿时期主要集中在三叠纪(张辉等, 2021; 孔会磊等, 2023)。其中,新疆阿尔泰造山带的伟晶岩享誉世界,其产出的绿柱石重达 32 t、锂辉石长达 12 m,微斜长石晶体重达 20 t;可可托海 3 号脉更是以其完整的内部分带结构而闻名遐迩(邹天人和李庆昌, 2006)。松潘—甘孜—西昆仑巨型稀有金属伟晶岩成矿带东西跨度约 3000 km,氧化锂资源量有望超过 1000 万 t(Wang et al.,

2017),组成了亚洲锂腰带(李建康等, 2019)。

(2)花岗岩型锂矿

花岗岩型锂矿常呈层状和脉状产出,和铌钽铍钽等稀有金属元素共生形成多金属矿床。因其规模大、采矿难度小而呈现出显著规模效应(Che et al., 2019)。中国的花岗岩型锂矿主要分布在武夷、南岭、江南和兴蒙等造山带上(王核等, 2022),形成时代集中在加里东、印支、燕山三个时期,在时间和空间上与侏罗纪晚期—白垩纪早期的构造—岩浆作用有一定关系(舒良树等, 2021)。华南陆块在燕山期曾经历过一系列的活动,伴随着侏罗纪—早白垩世发生的板内挤压、碎裂与地壳深部熔融,造成了大量的花岗岩体侵入,并形成了一个大型的构造—岩浆活动带(张岳桥等, 2012)。花岗伟晶岩型、花岗岩型稀有金属矿床在不同的构造—岩浆旋回中,在相对稳定而又封闭的构造条件下,其成矿峰期为燕山期(李建康等, 2014)。花岗岩型锂矿的含锂矿物以锂云母和锂瓷石为主,矿床的规模很大,但是

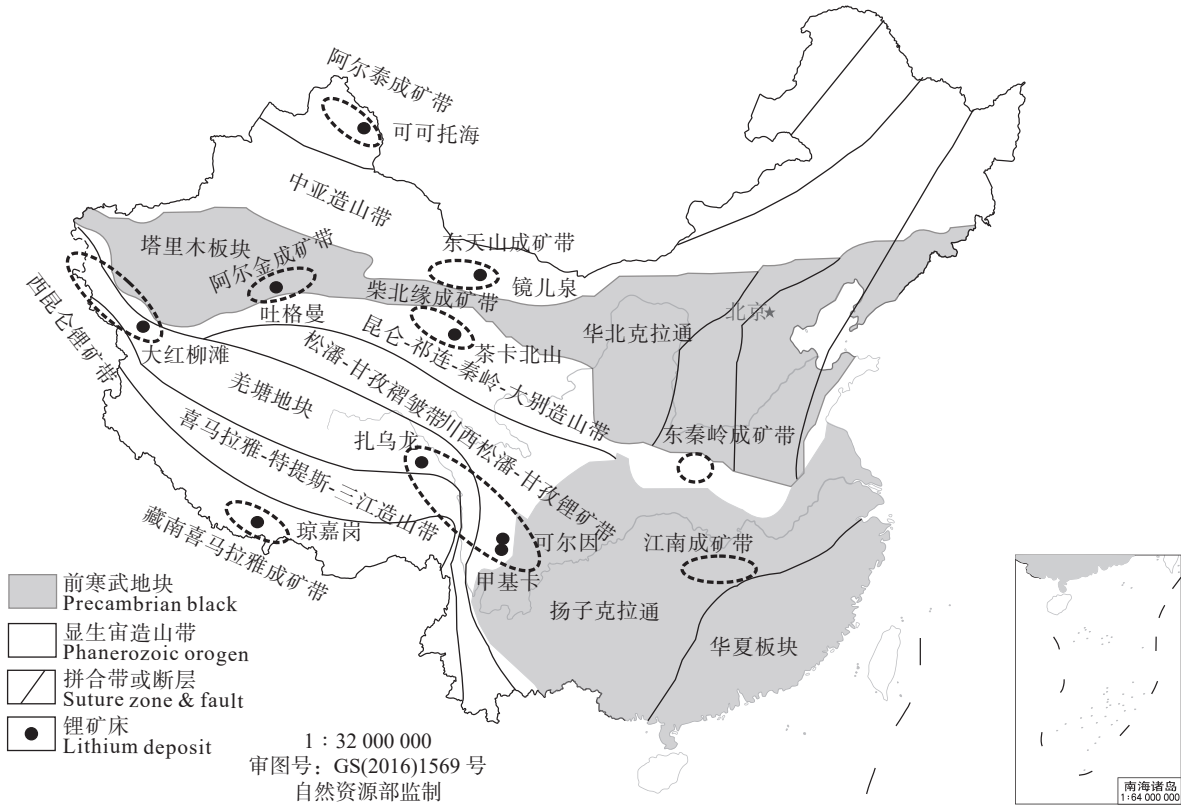


图 1 中国主要伟晶岩型锂矿床及成矿带分布图(据毛景文等, 2019; 孔会磊等, 2023)

Fig.1 Sketch map of major pegmatite-type Li deposits and metallogenic belts in China (after Mao Jingwen et al., 2019; Kong Huilei et al., 2023)

品位却比较低。所以,花岗岩中的锂资源经常被用在低端的玻璃、陶瓷工业中(王核等, 2022)。

### 2.1.2 卤水型锂矿

卤水矿床具有资源量大的特点,即使是最大的伟晶岩矿床,如澳大利亚的 Greenbushs 和刚果民主共和国的 Manono-Kitolo,估计其资源量也只相当于一个普通的卤水矿床(Kesler et al., 2012)。卤水锂资源在全球的分布极不均衡(Naumov and Naumova, 2010),中国青藏高原与南美洲安第斯高原是世界上盐湖卤水锂资源最丰富、储量最大的两个地区。全球范围内的盐湖卤水型锂矿,在南北纬 30°~40°的温带干旱气候区和 20°~30°的热带干旱气候区均有广泛的分布,这些矿床大多位于降水稀少,日照强烈,蒸发大,干旱少雨的荒漠气候带内的封闭汇水盆地中,这样的地理环境使得卤水中的溶质锂能够自然富集浓缩(高峰等, 2011; 宋彭生等, 2011)。盐湖卤水锂矿中的锂元素主要来自于岩浆喷发以及地热水,因此,它们通常发现于新生代构造运动比较活跃的地区。例如:碰撞带微裂谷和山间盆地、板块大陆边缘火山弧后盆地、板块转换断裂带等区域(郑绵平, 2001)。与地表盐湖卤水的形成环境类似,深层富锂卤水发育地层通常是在干旱的古环境古气候条件下形成的,古海(湖)水在强烈的蒸发浓缩作用下发生咸化,最终演变成深部卤水。根据国内外学者的现代海水浓缩实验结果,锂元素在卤水中的浓度随时间延长基本呈直线上升趋势,越来越多地累积在卤水中,当到达共结点时,卤水中的锂元素浓度约为原始海水的 260 倍(陈郁华, 1983)。青藏高原是中国卤水型锂矿的最大产地,其中青海、西藏占据了全国约 80% 的锂资源(郑绵平和刘喜方, 2007)。目前,青海省已经初步探明的氯化锂储量位居全国第一,中国最大的锂资源产地为青海察尔汗盐湖(潘彤等, 2022)。

#### (1) 大陆盐湖型锂矿

盐湖卤水型锂矿是一种在含盐的地下水中溶解了大量的锂从而形成的矿床,其中锂以晶间卤水、孔隙卤水和表层卤水形式存在。全球资源丰富,但分布极其不均匀,它的形成与气候地理,地质构造,成矿物质来源等多方面的因素有关(王秋舒等, 2015)。盐湖卤水型锂矿的形成主要有以下 6 个条件:干旱的气候、有盐湖分布的封闭盆地、火

山或地热活动、构造导致的沉陷、充足的锂来源、长期的浓缩富集(Munk et al., 2016; 图 2)。中国的盐湖卤水型锂矿资源主要分布在青藏高原地区,其中青海柴达木盆地内的察尔汗、一里坪、东台吉乃尔、西台吉乃尔和西藏的扎布耶、当雄错等盐湖,资源总量达到千万吨级别,占中国卤水锂资源总量的 80% (高世扬, 2000; 刘喜方等, 2007; 展大鹏等, 2010)。

青藏高原的富锂盐湖群,从南到北,气候逐渐变得干旱,水化学类型也从碳酸盐到硫酸盐,再到氯化物转变(高春亮等, 2020)。其中,碳酸盐型主要集中于藏北西部的扎布耶盐湖和东部的班戈—杜佳里盐湖中,锂资源量分别为 837 万 t 和 50 万 t(赵元艺, 2003),扎布耶盐湖中产出的扎布耶石和锂菱镁矿是中国发现的含锂新矿物(宣之强等, 2016)。硫酸盐型锂矿集中分布于柴达木盆地和藏北碳酸盐型锂资源带北部,柴达木盆地目前已知的有 11 个硫酸盐型盐湖锂已达工业品位,东台吉乃尔湖的锂矿储量为 55 万 t,藏北高原盐湖锂矿储量以扎仓茶卡为主,鄂雅错和毕洛错为主,其锂矿储量为 29.8 万 t、4.2 万 t 和 0.7 万 t(赵元艺, 2003)。氯化物型盐湖卤水锂资源集中分布在藏北无人区以及青海可可西里地区(郑绵平和刘喜方, 2007)。

#### (2) 地下卤水型锂矿

地热卤水锂矿指的是富含锂、硼、钾等元素的温热卤水溶液,这些温热流体除了具有热能价值之外,还是锂的潜在来源之一。根据统计,该类型全球资源量约 168 万 t(隰弯弯等, 2023)。中国深层卤水锂矿资源主要分布在于四川盆地、柴达木盆地、江汉盆地等沉积盆地(王登红等, 2022)。地下卤水对环境要求苛刻且各地产出环境不同,但产出途径大致可以分为原生卤水和次生卤水,原生卤水主要有两种不同类型,如吉泰盆地内卤水是在白垩世早期气候温湿的条件下,卤水物质汇集到湖盆中,后期在较为干旱的气候条件下蒸发浓缩形成的卤水。在山东潍坊北部地区,海水经潮汐作用而发生下渗,蒸发浓缩形成地下卤水(王松涛等, 2008; 王钊越, 2018; 廖达军等, 2019; 马厚明等, 2021)。次生卤水主要受火山活动的影响,深层地下水淋滤出火山岩中的 K、Na、Li、Rb、Cs 等离子,随后受地层压力影响,富锂流体沿着深大断裂向上运移,最终赋存于裂隙发育、孔隙度大的断层裂隙或储层中。

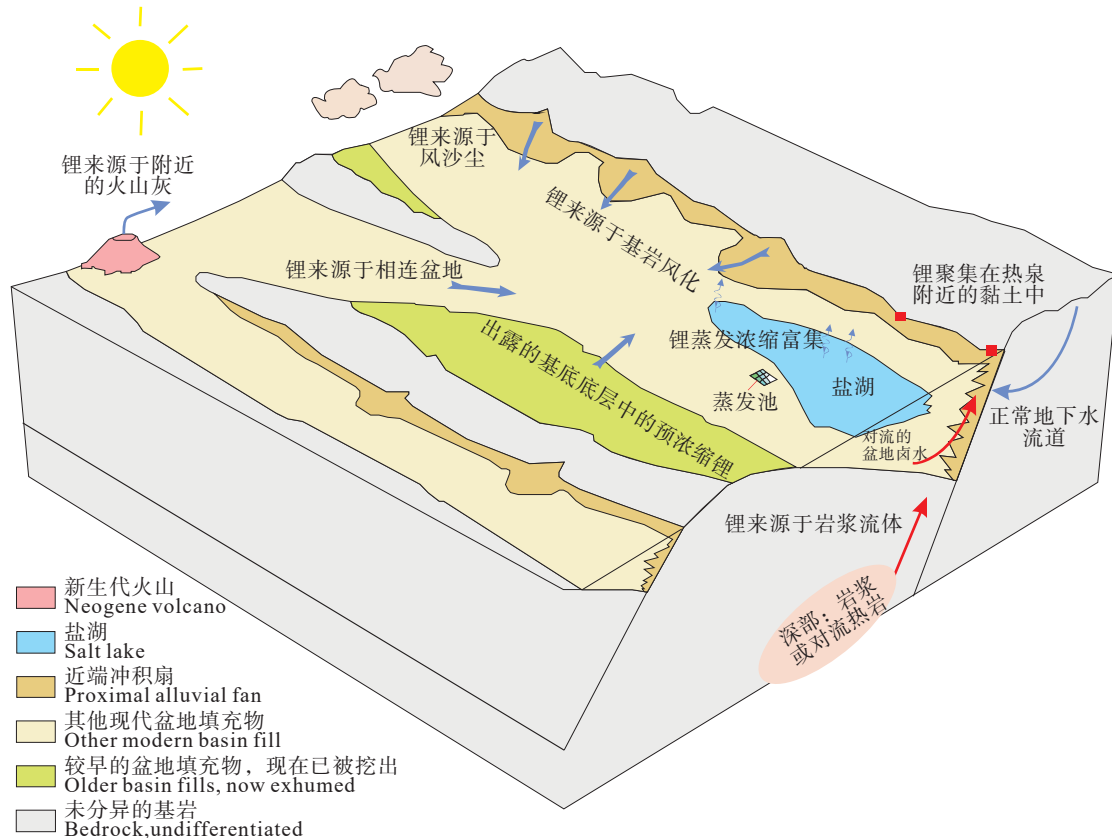


图 2 盐湖卤水型锂矿成矿模式示意图(据 Bradley et al., 2013)  
Fig.2 Schematic deposit model of salt lake lithium brines (after Bradley et al., 2013)

中国的地下卤水锂主要在罗布泊、柴达木盆地、四川盆地、江汉盆地和吉泰盆地集中分布(韩积斌等, 2018; 王春连等, 2020; 袁寰宇等, 2021; 常政等, 2022)。作为一种重要的锂资源, 地下富锂卤水还没被完全开发利用, 勘探潜力巨大(陈小伟等, 2016)。

油气田卤水是油田和天然气等物质的伴生卤水, 含有油、气、水和其他杂质, 富集多种微量元素, 如锂、铷、铯等(徐凯等, 2021)。国内的油田卤水多属于氯化钙型, 镁锂比低, 硼含量高, 主要分布在柴达木盆地、四川盆地、江汉盆地等沉积盆地。柴达木盆地的南翼山区块油田水中各井的锂含量在 200~254 mg/L, 四川盆地在川 25 井锂含量高达 323 mg/L, 其他井的锂含量在 66~96 mg/L, 江汉盆地的各井采出锂含量集中在 52~65 mg/L(穆延宗等, 2016; 刘成林等, 2021)。

### 2.1.3 黏土型锂矿

黏土型锂矿也被称之为沉积型锂矿或非正规锂矿, 具有分布广、储量大的特点(Kesler et al.,

2012; Benson et al., 2017), 目前占世界锂资源总量低于 3% (Dessemond et al., 2019), 主要分布于美国、墨西哥、塞尔维亚等国家。可划分为两种类型, 一种是碎屑沉积物或者火山灰通过热液蚀变或高盐度的卤水淋滤而形成的(Kesler et al., 2012; Benson et al., 2017; Bowell et al., 2020; 图 3), 被称为“热液蚀变黏土型锂矿床”(Munk et al., 2016); 另一种是产于碳酸盐岩不整合面之上, 与其风化-沉积作用密切相关相关的“碳酸盐黏土型锂矿”(温汉捷等, 2020)。黏土矿物可能是通过两个途径富集锂: ①锂在黏土矿物上吸附(Bauer and Velde, 2014); ②在成岩阶段, 富锂流体与较早形成的黏土矿物发生反应, 生成单矿物锂(例如锂绿泥石)(Zhao et al., 2018)。近几年, 在西南地区发现了大量的黏土型锂矿, 云南、贵州、广西地区的成矿潜力巨大, 在云南玉溪以及贵州务川都有发现(朱丽等, 2020)。

#### (1) 火山岩黏土型锂矿

火山岩黏土型锂矿的成因与火山活动有关, 火

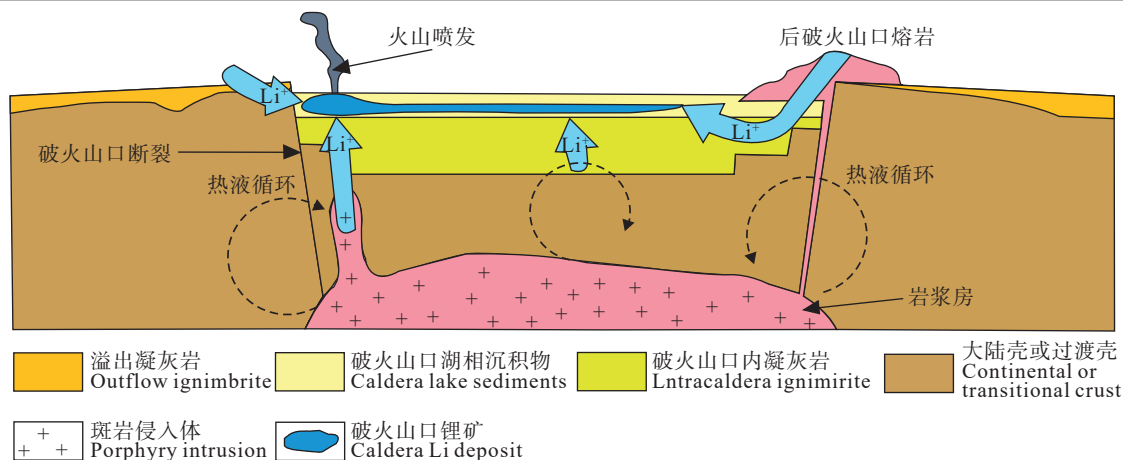


图3 沉积型锂资源成矿物质来源及形成模式图(据 Benson et al., 2017)

Fig.3 Source and forming model of sedimentary lithium-forming materials (after Benson et al., 2017)

山灰中的锂在卤水和热液的共同影响下浸出,之后锂元素在火山口的湖相沉积物的黏土中长期富集,形成火山岩黏土型锂矿。在火山岩黏土型锂矿中,锂主要赋存于硅镁质黏土矿物中,如蒙皂石族,或者伊利石的晶格中(Castor and Henry, 2020),属于结构锂。由硅氧四面体和镁氧八面体构成的层状结构,在锂氧八面体中,锂能够取代一部分镁,除此之外,还有石英等不含铝的硅质矿物(朱丽等, 2020)。

### (2) 碳酸盐黏土型锂矿

在碳酸盐黏土型锂矿中,锂元素以吸附态为主,在诸如蒙脱石之类的黏土矿物层间赋存(温汉捷等, 2020),属于吸附型锂。其中含硅铝质黏土矿物(如蒙脱石族矿物)是由硅氧四面体和铝氧八面体组成的层状结构,锂元素主要赋存于层间,为一种特殊的吸附状态(朱丽等, 2020)。当前中国已知的沉积型锂资源主要是含锂的凝灰岩和黏土岩,尤其是近年来在华南地区新发现了大量的碳酸盐黏土型锂矿(崔焱等, 2018; 温汉捷等, 2020)。该类型的锂矿床具有储量大、开采成本低等特点,将成为中国锂矿资源开发的又一重要方向(崔焱等, 2022)。

目前,已发现的沉积型锂矿床主要分布于北美洲,少数分布在南美洲和欧洲。中国该类型的锂矿多与铝土矿、煤伴生,尚没有独立开发利用(刘丽君等, 2019)。伴生沉积型锂矿中锂的赋存状态直接关系到锂的提取,从伴生沉积型锂矿中提锂耗能高、投入高、产出低(王涛等, 2014),所以在传统锂

矿中该类型所占比例并不高。然而,自2012年在塞尔维亚贾达尔(Jadar)盆地中发现了一种富含锂元素的羟硼硅酸钠矿物后,沉积型锂矿也具有了独立开发的可能(刘丽君等, 2017)。在中国,与铝土矿和煤相伴生的锂资源是相当丰富的,在这些锂资源中,也有大量含量较高、储量巨大的伴生型沉积型锂矿,准噶尔煤田位于华北地台,地处晋陕蒙边界,其锂资源储量约为352.8万t。此外,在山西、贵州、重庆、四川,一些铝土矿和煤矿中也有相当数量的锂资源(于沅等, 2019; 图4)。随着开采技术的进步以及近年来国内外对沉积型锂矿床的研究,沉积型锂资源可能将成为锂矿资源找矿突破的新方向。

## 2.2 国内主要锂矿床

表3列举了本次分类中中国各种类型的典型锂矿床。

### 2.2.1 硬岩型锂矿

#### (1) 花岗伟晶岩型锂矿

甲基卡花岗伟晶岩型锂矿位于四川省甘孜州,地处川西青藏高原东段,康定、道孚、雅江三县的交界地带,海拔4300~4500 m,面积约为60 km<sup>2</sup>,矿脉规模大、埋藏浅、品位高,是亚洲规模最大的伟晶岩型锂矿床(王登红和付小方, 2013; 付小方等, 2014; 郝雪峰等, 2015; 刘丽君等, 2016),该矿床地处松潘—甘孜造山带雅江被动陆缘中央褶皱—推覆带的中段,位于雅江构造—岩浆穹形变质岩体的内部(许志琴等, 1992; 侯玮和付小方, 2002; 付小方等,

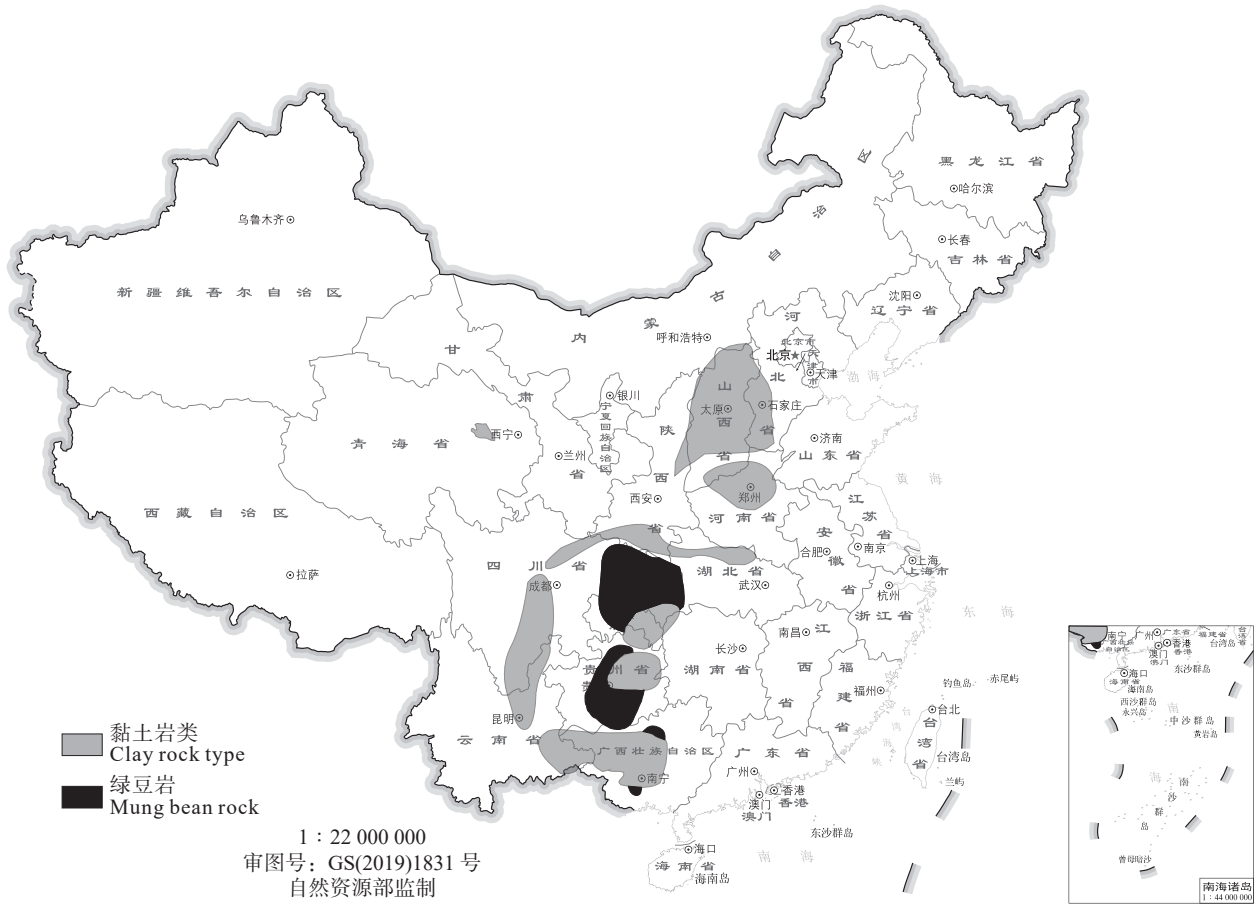


图 4 中国铝土矿床及伴生沉积型锂矿潜在分布范围(据钟海仁等, 2019; 马圣钞等, 2019 修改)

Fig.4 Potential distribution of major bauxite deposits and sedimentary lithium deposits in China (modified from Zhong Hairen et al., 2019; Ma Shengchao et al., 2019)

表 3 锂矿分类及典型矿床

Table 3 Classification and typical deposits of lithium ore		
一级类型	二级类型	典型矿床
硬岩型	花岗岩型	江西宜春414
	伟晶岩型	四川雅江甲基卡
卤水型	盐湖型	西藏扎布耶盐湖
	地下卤水型	江汉盆地
黏土型	—	柴达木盆地

2015), 伟晶岩型氧化锂资源储量超过 200 万 t, 位居世界前列(纪德宝等, 2021)。甲基卡含矿伟晶岩是在松潘—甘孜大陆内造山运动接近尾声时的三叠纪晚期形成的, 属于印支运动末期, 是一个相对稳定的、连续的演化时期, 再加上所处的封闭的穹状构造环境, 为其提供了一个很好的容矿构造, 因此才有了该超大型锂矿床(李名则等, 2018)。对于甲基卡稀有金属伟晶岩矿床的成矿机理目前存在两种不同的认识: 一种是岩浆结晶分异<sup>①</sup>; 另一种是岩浆液态不混溶(李建康, 2006a, b)。当前, 学术界

普遍认为该矿床为岩浆液不混溶的产物。以二云母花岗岩体和伟晶岩为研究对象, 对其 Li 同位素、包裹体和 C-H-O 同位素进行了研究(李建康等, 2008), 表明该矿区的含矿伟晶岩成岩成矿流体主要来源于花岗质岩浆的不混溶, 其成因与岩浆活动关系密切(Thomas and Davidson., 2012; 侯江龙等, 2018)。锂元素在甲基卡矿床中主要赋存于锂辉石, 可在锂云母、磷锂铝石和铁锰锂磷酸盐矿物中发现少量, 其余则分散于白云母中(涂其军等, 2019)。甲基卡矿脉是 20 世纪 50 年代第一次被发现的, 经过对其不同程度的调查、勘探和研究, 到现在为止, 已经发现并评价了以甲基卡矿床为代表的 2 个超大型、4 个大型共 6 个锂矿床, 组成了一个超大型锂资源矿集区。

科尔因矿床位于特提斯成矿域的东段, 北东面与秦岭—祁连山—昆仑山成矿域相邻。属金川—

丹巴亚云母亚成矿带中的金川—可尔因型锂成矿带,地处松潘—甘孜造山带北缘,自西向南,形成一个三角带,成矿条件十分有利(彭杰和邹林, 2021)。矿田中已有 11 处探矿权,包括 2 个四川省地勘基金项目,另有 5 处已达详细勘查水平。经数十年的地质勘查工作,已探明李家沟为超大型锂伟晶岩型矿床,党坝为大型锂伟晶岩型矿床,此外,还有集沐、业隆、加达、观音桥等中小型锂矿床(杨岳清等, 2023)。根据“四川省金川县李家沟锂辉石矿资源查核报告”显示,李家沟锂辉石矿床已获得采矿权,锂资源总量约为 50.22 万 t。党坝、业龙沟、热达门等正在进行详细勘察和勘探,资源储量将不断扩大,其中,党坝已查明的资源储量 333 及以上级别的至少可达 66 万 t(王登红等, 2017)。四川省地质矿产勘查开发局化探队和马尔康金鑫矿业有限公司预测<sup>②</sup>,李家沟、党坝、热达门、业隆沟、瓦英矿区  $\text{Li}_2\text{O}$  的远景资源量超过 700 万 t。

#### (2) 花岗岩型锂矿

雅山 414 矿床位于江西省西部素有“亚洲锂都”之称的宜春市境内,锂矿资源丰富,氧化锂保有资源储量超 100 万 t,是“亚洲锂都”的重要组成部分(杨明桂等, 2015; 林忠良等, 2020)。矿床处于扬子地块和华夏地块拼接部位的钦杭成矿带中,成矿作用发生于燕山晚期早白垩世(130 Ma)造山构造岩浆活动背景下,花岗质岩浆经历了多次结晶分异作用,在岩株的突起顶部,岩浆后期及期后发生交代作用形成钽铌矿(刘爽等, 2019; 龙细友等, 2021)。414 矿床为花岗岩型矿床,通过花岗岩化及碱质交代作用将变质岩就地改造而成(王成发, 1986)。花岗岩体从上到下划分为细粒白云母花岗岩、中粒二云母花岗岩和粗粒黑云母花岗岩 3 个岩相带,其中细粒白云母花岗岩又分为强钠长石化带、中钠长石化带和弱钠长石化带 3 个蚀变带(勾鸿忠和彭世金, 1991)。矿石矿物有钽铌矿、细晶石、含钽锡石和锂云母,钽为主要矿产,锂为伴生矿,  $\text{Li}_2\text{O}$  品位较低(平均 0.886%)(张玲和林德松, 2004; 张苏江等, 2020)。该矿床主要赋锂矿物为锂云母、锂瓷石,通常用于制作玻璃、陶瓷等(倪文祯和邱长伟, 2021)。随着云母提锂技术的持续突破,锂云母现在已经可以进行大规模的提锂,未来,云母提锂将逐步成为锂资源供给中重要的一极(王核,

2022)。在目前锂价不断攀升的情况下,低品位硬岩型锂矿的开采也有了一定的外在条件,特别是宜春 414 矿床目前正处于迅速消耗中,因此,如何激活锂矿资源,发现新的花岗岩型锂矿已刻不容缓(王登红等, 2022)。

#### 2.2.2 卤水型锂矿

##### (1) 盐湖卤水型锂矿

扎布耶盐湖地处青藏高原腹地,呈南北向延伸的条状,分南北两个湖(刘成林等, 2021),锂资源主要存在于湖表卤水和晶间卤水及南湖干盐湖中。北湖湖表卤水折合  $\text{LiCl}$  含量 0.46%~0.59%,南湖湖表卤水折合  $\text{LiCl}$  含量 0.12%~0.8%,晶间卤水锂品位约 1.0%(曹文虎和吴禅, 2004)。其卤水矿化度波动于 300~450 g/L, pH 值为 8.7~9.5。该湖为世界罕见的综合性盐湖,除富含 Li、B、K 元素外,还特别富含 Br、Rb、Cs 等元素(郑绵平等, 1990)。湖中盐类矿物主要有石盐、钾石盐、硼砂、水碱、芒硝等,固体锂矿主要以扎布耶石( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ )矿物的形式赋存在石盐中,或以细晶状态与单斜钠钙石、氯碳酸钠镁石等矿物共生于黏土碳酸盐层中,  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  含量为 0.35%~0.7%,局部可高达 6.71%(曹文虎和吴禅, 2004)。扎布耶盐湖的锂资源总量( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ )约 241 万 t,已经达到超大型锂矿规模,其中,卤水锂资源量约 60 万 t(赵元艺, 2003)。扎布耶盐湖是目前世界上唯一产天然碳酸锂的盐湖,因此在世界盐湖锂资源研究与开发方面有着重要的意义。

察尔汗盐湖位于柴达木盆地的中南部,海拔约 2600 m,是世界罕见的、固液并存的大型第四纪内陆盐湖,固体矿以钾镁盐矿和石盐矿为主,锂硼等矿物在地层中富集度差;液相卤水中含  $\text{KCl}$ 、 $\text{MgCl}_2$ 、 $\text{LiCl}$ 、 $\text{B}_2\text{O}_3$ 、 $\text{NaCl}$  等多种矿物组分(李庆香, 2020)。该区域的盐类沉积形成于上更新世末至全新世,东西长 168 km,南北宽 20~40 km,面积为 5856  $\text{km}^2$ ,含盐系的厚度普遍在 40~55 m,最大可达 70 m 以上,大致呈东西向展布的“哑铃状”,由西至东逐渐减薄,根据沉积特征,自西向东可以划分为别勒滩、达布逊、察尔汗、霍布逊 4 个连续区段(刘成林等, 2021)。矿区的锂资源主要分布在西采区、中采区和东采区 3 个采区的地下卤水和达布逊湖的湖水中,其中西采区地下卤水  $\text{LiCl}$  含量相对较高,锂资源量较大(李庆香, 2020)。

## (2) 地下卤水型锂矿

江汉盆地是沿中扬子板块北缘发育的一个中—新生代盆地, 是华南地区已知蕴藏最大规模富锂卤水的盆地(余小灿等, 2021), 江汉盆地卤水资源丰富, 分布面积广泛, 富锂卤水主要赋存于江陵凹陷沙市组—新沟嘴组和潜江凹陷潜江组两套盐系地层中, 卤水矿化度高, 不仅蕴藏着丰富的钾锂资源, 铷、铯、溴、碘、硼元素也已达工业或综合利用品位(刘成林等, 2016)。江汉盆地在古新世沙市组到早始新世新沟嘴组沉积时期的气候环境整体特征为高温干旱, 这对古盐湖的蒸发作用有利, 同时火山活动提供了大量的钾、锂元素, 从而利于钾锂卤水的富集。江陵凹陷盐湖的沉积特点, 导致了其地层中储存着大量的卤水, 而最大的储集体就是砂岩中的孔隙, 由于构造运动而形成的大量泥岩以及火成岩中的裂隙, 也是储存卤水的一个重要场所(王春连等, 2018)。江陵凹陷中的卤水埋深大, 温度、盐度高, 变质程度高, 卤水中  $\text{LiCl}$  浓度超过  $300 \text{ mg/L}$ , 达工业品位两倍, 属于“液态型富钾锂矿”, 估算江陵凹陷整装勘查区内工程控制的深层卤水  $\text{Li}_2\text{O}$  预测资源量 120.9 万 t, 综合利用价值高(李瑞琴等, 2013; 刘成林等, 2016)。研究表明, 江陵凹陷和潜江凹陷卤水中的锂元素含量远高于盐湖盐类矿产资源综合利用品位, 具有较高的工业及综合利用价值(陈新军和李倩文, 2021)。

### 2.2.3 黏土型锂矿

在国家重点研发计划支持下, 中国西南地区一类新的黏土型锂资源被逐渐发现和认识。目前发现的锂超常富集的黏土岩层位主要包括贵州下石炭统九架炉组( $C_{1j}$ )和云南中部下二叠统倒石头组( $P_1d$ )。贵州地区的九架炉组形成于早石炭世大塘期, 是一套以黏土岩为主, 相伴产生有铝土质黏土岩、铁质黏土岩、铝土矿、黄铁矿的岩性组合。局部夹有煤线, 一般厚度 10~20 m, 是贵州省重要的铝土矿赋矿层位(Wang et al., 2018)。云南地区的下二叠统倒石头组( $P_1d$ )形成于早二叠世时期, 主要为一套滨海—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, 厚 5~20 m, 为滇中铝土矿的重要产出层位。两套富锂层系(九架炉组和倒石头组)虽然形成时代不一样, 但岩性却较相似。根据其岩性和结构特点, 剖面自下而上发育

有: (1) 铝土质黏土岩, 局部含铁质; (2) 致密状铝土质黏土岩; (3) 豆鲕状铝土质黏土岩; (4) 疏松土状黏土岩。其中致密状铝土质黏土岩和豆鲕状铝土质黏土岩是锂最为富集的有利岩性。研究表明, 九架炉组和倒石头组的绝大多数岩石样品达到了铝土矿中锂综合利用的指标( $\text{Li}_2\text{O} \geq 500 \mu\text{g/g}$ )。云南滇中盆地内的下二叠统倒石头组富锂黏土岩中  $\text{Li}_2\text{O}$  平均含量为 0.3% 左右, 最高达 1.1%(王新宇等, 2021)。底部以白云岩为主的碳酸盐岩的  $\text{Li}_2\text{O}$  含量一般为 20~50  $\mu\text{g/g}$ , 分布面积广、厚度较稳定, 具有提供锂的良好物质基础(温汉捷等, 2020)。

### (1) 火山岩黏土型锂矿

重庆、四川、贵州等地区的下、中三叠统界线( $T_1/T_2$ )附近发育一套与火山喷发沉积有关的黏土岩层, 其锂含量区域性富集, 年龄与早—中三叠世界限年龄相近(247.2 Ma), 为中酸性火山喷发—沉积岩经黏土化蚀变作用后的产物。 $T_1/T_2$  界线黏土岩相对富集 Li、Rb、W、Sn、Bi、Th、U 等微量元素, Li 元素含量变化范围为  $64.5 \times 10^{-6} \sim 481 \times 10^{-6}$ 。 $T_1/T_2$  界线黏土岩中 Li 含量与中酸性岩浆作用明显, 界限黏土岩年龄越晚, 其锂含量均值越高(马圣钡等, 2019)。

### (2) 碳酸盐黏土型锂矿

中国碳酸盐黏土型锂矿床的成矿时代相对较老, 为二叠纪或石炭纪(Wang et al., 2013; 温汉捷等, 2020), 富锂黏土岩在山西、贵州、河南、广西等地都有发现(Wang et al., 2013)。其中, 滇中地区的富锂地层属下二叠统倒石头组( $P_1d$ ), 主要分布于滇中的昆明、玉溪、武定、宜良一带, 是一套以滨海—湖沼相为主的地层, 岩性主要为砂页岩夹灰岩透镜体、铝土矿、黏土岩和劣质煤层, 厚度一般为 5~20 m(崔银亮等, 2018)。富锂岩系发育于碳酸盐岩不整合面之上, 形成于古气候温暖潮湿的低纬度区。该区锂的载体矿物主要为富镁黏土矿物蒙皂石或锂绿泥石(崔焱等, 2022)。

黏土型矿石品位低, 开采费用低廉。与锂辉石相比, 黏土型的品位只有 0.4%, 与花岗岩伟晶岩型相差甚远, 它的优点是容易开采, 低剥采比, 不需要爆破, 所以前期的开采成本相对低廉。目前的问题是, 还没有从黏土中提取锂的商业化案例, 并且还

存在着技术壁垒、回收率和质量等方面的问题。随着锂资源需求的持续高涨,中国黏土型锂矿资源的开发利用已经进入了可研发阶段。

### 2.3 分布情况

中国的锂矿资源储量丰富,据中国地质调查局数据显示,截至 2020 年底,中国锂资源储量约 810 万 t LCE(Lithium Carbonate Equivalent, 碳酸锂当量),60.5% 的固体矿石锂和 86.8% 的液体卤水锂集中分布在川西、新疆北部及青藏高原等海拔较高、自然条件较恶劣、生态环境脆弱的西部地区(图 5)。阿尔泰—阿尔金地区,西昆仑—川西地区,喜马拉雅地区,东秦岭—南岭地区,均有花岗伟晶岩型锂矿床产出;武夷造山带、南岭造山带、江南造山带和兴蒙造山带是花岗岩型锂矿床的重要发源地(王核等, 2022);盐湖卤水型锂矿主要分布在青藏高原(郑绵平, 2001),包括西藏中北部和柴达木盆地盐湖,卤水锂(LiCl)资源量为 2330 万 t(刘成林等,

2021);地下卤水型锂矿主要分布于柴达木盆地、吉泰盆地、江汉盆地内的潜江凹陷和江陵凹陷等地区。黏土型锂矿主要集中在云南、贵州以及广西等地区,成矿潜力巨大。近期在柴达木盆地首次发现黏土型锂矿,资源量大,品位较高(宫宏宇, 2022)。

中国硬岩型锂矿床在时间和空间分布上呈现出一定规律,北方成矿期老,南方成矿期新;北方主要为海西期,南方主要为燕山期,其次是印支期。截至目前,发现并勘探的超大型、大中型锂成矿区带包括:(1)华南成矿区,主要矿床类型为花岗岩型、蚀变花岗岩型(舒良树等, 2021),如特大型江西宜春钽铌锂矿床;(2)阿尔泰山南缘成矿区:主要矿床类型为花岗伟晶岩型锂铍铌矿床,代表性矿床有新疆富蕴县可可托海锂铍铌矿、柯鲁木特锂铍铌矿等(张驰等, 2017);(3)川西伟晶岩密集成矿区带,在四川西部康定、石渠、金川和马尔康等地分布有大量而密集的稀有金属伟晶岩矿脉,并形成

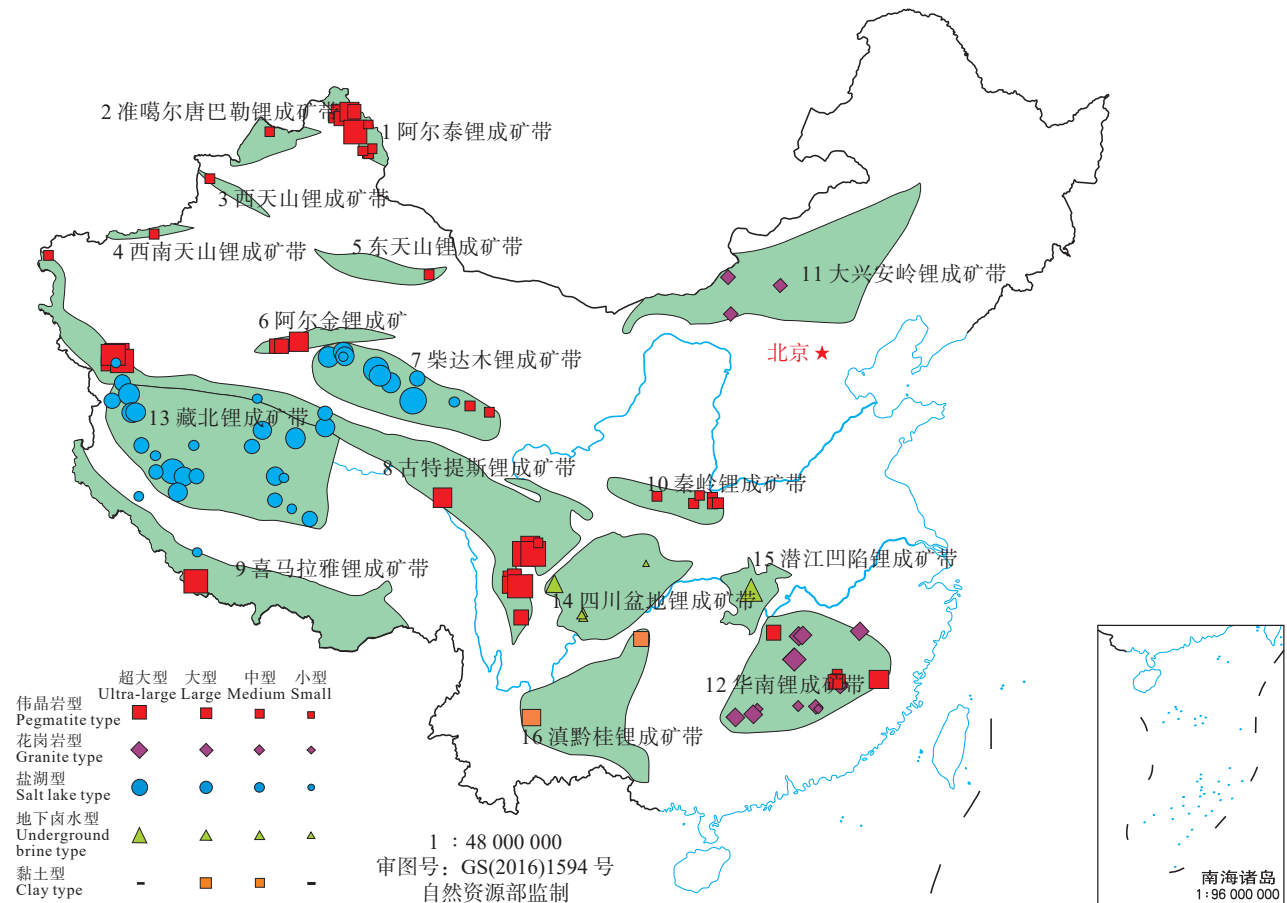


图 5 中国主要锂矿床分布图(据王核等, 2022 修改)  
Fig.5 Distribution map of major lithium deposits in China (modified from Wang He et al., 2022)

大型、特大型锂矿床,如康定甲基卡锂矿、金川地区锂矿。

中国花岗伟晶岩锂矿已有约 740 万 t 的氧化锂 ( $\text{Li}_2\text{O}$ ) 资源, 占中国锂资源总量的 37.68%。在花岗岩型锂矿中, 氧化锂 ( $\text{Li}_2\text{O}$ ) 的资源量大约有 308 万 t, 占全国可利用锂资源量的 15.74% (王核等, 2022)。卤水锂矿在世界探明的总资源量中占比达 65%, 具有易于开采, 成本较低的特性, 其锂盐产品占总锂盐产品的 75% 左右 (刘成林等, 2021)。数据表明, 2020 年中国生产碳酸锂的原料来源于矿石提锂的比重占四分之三, 而盐湖提锂仅占 26%, 但是在成本上盐湖提锂仅为矿石提锂的一半 (漆贵财等, 2018), 而且相较于硬岩锂矿床, 盐湖卤水资源丰富, 所以总体上来说盐湖卤水提锂比矿石提锂不管是在成本上还是在资源上都有优势。但是各盐湖卤水的成分不同, 这就导致了盐湖之间提锂技术不通用, 从而阻碍了盐湖提锂的发展, 且西部地区生态脆弱、环境恶劣, 也加大了盐湖提锂的难度。若上述问题得到解决, 盐湖提锂将成为锂工业的主导方向。

### 3 国内锂矿资源利用现状及开发潜力

#### 3.1 资源利用现状

截至 2023 年 1 月, USGS 发布的全球锂矿储量和产量统计数据显示, 目前已查明的锂资源总量约为 9800 万 t (图 6)。其中, 中国已查明的锂资源量为 680 万 t, 储量为 200 万 t, 全球锂产量从 2021 年的 10.7 万 t 增加至 2022 年约 13 万 t, 增加了 21%, 中国锂生产量 2021 年为 1.4 万 t, 2022 年为 1.9 万 t, 增长了 35.7%。为了应对锂离子电池市场的强劲需求和锂价格上涨。2022 年全球锂消费量估计为 13.4 万 t, 比 2021 年的 9.5 万 t 增加了 41% (不包括美国产量)。

虽然中国锂矿床的类型较多, 但当前, 中国已探明的锂矿资源主要有花岗岩型、花岗伟晶岩型和盐湖卤水型, 这 3 种类型的锂矿都已得到不同程度的开采。除了上述 3 种类型以外, 其他新型锂矿如黏土型锂矿、深层地下卤水型锂矿目前尚无开采利用 (王核等, 2022)。盐湖卤水型锂 ( $\text{LiCl}$ ) 资源量约为 2596 万 t (表 4), 折合金属锂资源量为 425.01 万 t, 占全国资源量的 46.58%。

伟晶岩型锂矿预测  $\text{Li}_2\text{O}$  资源量约 740 万 t, 折

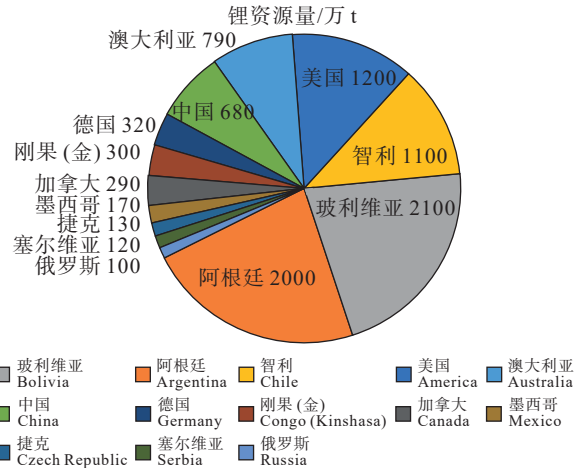


图 6 全球已查明锂资源量 (USGS, 2023)  
Fig.6 Global Identified Lithium Resources (USGS, 2023)

合金属锂资源量为 343.75 万 t, 占全国锂资源量的 37.68%; 花岗岩型锂矿  $\text{Li}_2\text{O}$  资源量约 308 万 t, 折合金属锂资源量为 143.63 万 t, 占全国可利用锂资源量的 15.74% (姜贞贞等, 2021)。目前, 四川锂矿有采矿权的矿山一共有 6 个 (表 5)。

除四川外, 西昆仑锂矿的成矿潜力也很大, 截至目前, 大红柳滩中型锂矿床已经取得采矿权; 白龙山 509 道班西锂矿床正在进行一期勘探, 仅在已经选定的首采区就探获  $\text{Li}_2\text{O}$  资源量 82 万 t, 目前该矿床正在进行选场、道路等基础设施建设, 采矿权在补齐整个探矿区的储量后就可以获得, 预计将在 2023 年正式开采 (王核等, 2022)。

目前, 绝大多数锂矿区的工作程度较低或者尚未完成勘探, 虽然有资源量方面的数据报道, 甚至已经在开采, 但尚未达到法定要求程度, 如: 四川甲基卡新三号脉新增氧化锂资源量  $64.31 \times 10^4$  t (王登红等, 2022); 在内蒙古地区发现了  $35.72 \times 10^4$  t  $\text{Li}_2\text{O}$  资源、品位 1.28% 的维拉斯托锂云母锂矿, 荣获中国地质协会 2018 年度 10 项重大发现。据初步估计, 新疆大红柳滩锂矿床已达超大型; 江西宜春地区发现的含锂云母的低品位氧化锂资源约  $258 \times 10^4$  t, 还需要进一步加强研究力度, 对其进行验证 (王登红等, 2022)。

#### 3.2 国内锂矿开发潜力

随着新能源产业的蓬勃发展, 世界范围内掀起了锂矿勘探热潮, 查明的锂资源量显著增长, 各类锂矿勘探都取得了突破性进展, 尤其是盐湖卤水

表4 中国主要盐湖锂矿床概况

Table 4 Overview of major salt lake lithium deposits in China

开采公司	盐湖 (液体矿)	锂浓度/(mg/L)	镁锂比	所在地区	锂资源量 (LCE)/万t	现有产能/ (万t/年)	拟建产能/ (万t/年)
西藏矿业	扎布耶	970~1120	0.01	中国西藏	184	1	1.2
藏格控股 蓝科锂业 盐湖比亚迪	察尔汗	10~191	1577		1049	1	2
						-	3
青海东台吉乃尔 锂资源股份	东台吉乃尔	440~850	36.4	中国青海	249	2	-
中信国安 五矿盐湖 兴华理盐	西台吉乃尔 一里坪 大柴旦	265~310 210 160	67.9 16 125		269 165 30	3 1 1	2 - -

注: 数据来源于长江有色金属网, <https://www.ccmn.cn/yszs/195156>。

表5 四川已取得采矿权的锂矿床状态

Table 5 Status of lithium deposits with mining rights obtained in Sichuan

矿床名称	状态
康定甲基卡	正在开采
德扯弄巴	已停产
雅江措拉	储备资源, 尚未开采
阿坝李家沟	在建
马尔康党坝	已停产
业隆沟	正在开采

型、伟晶岩型和黏土型(刘丽君等, 2019), 铝土矿中的锂的受关注程度也在不断提高(王登红等, 2013)。

李建康等(2014)和陈毓川等(2015)将中国的成锂带划分为12个: 唐巴勒、阿尔泰、东天山、西天山、藏北、西昆仑、柴达木、松潘—甘孜、秦岭、四川盆地、潜江凹陷以及华南成锂(区)带。截至目前, 除唐巴勒等个别区带尚未取得进展外, 大部分成锂带已取得了新的找矿进展。例如, 华南成锂区幕阜山矿集区新发现了黄柏山型锂辉石矿(李建康等, 2021), 松潘—甘孜成锂带可尔因矿集区新发现了加达、加达南等锂辉石矿床, 在柴达木盆地成锂区的南侧北侧都有新发现的锂矿, 其中, 北缘有茶卡北山、石乃亥, 南缘昆仑成矿带有阿达滩、金水口及哈图等锂矿, 这些锂矿床工作程度低但潜力大, 具有较高的勘探价值(王登红等, 2022)。

在过去的十几年里, 又相继发现了阿尔金成矿带, 喜马拉雅成矿带, 班戈—腾冲成矿带, 突泉—翁牛特成矿带等新的锂成矿带(王登红等, 2022)。找矿结果显示, 在阿尔金地区、喜马拉雅地区和冈底斯地区和大兴安岭西段, 应将该地区作为一个新的成锂区。其中, 阿尔金成锂带内有塔格曼(Tagman), 沙锂沟(又名瓦石峡谷南), 塔木切、塔什

达坂, 阿克亚、阿亚克东, 塔什达坂北、塔西, 库木萨依西等伟晶岩锂多金属矿床; 在内蒙古克什克腾旗大兴安岭西边坡锂矿区, 发现了一个规模巨大的维拉斯托锂云母矿, 工作程度相对较高(李泊洋等, 2018); 在喜马拉雅琼嘉岗(实际地名穷家岗)发现的锂矿, 预测超大型, 开发利用前景很大(秦克章等, 2021), 但是目前的工作还不够, 还需要增加投入继续进行调查。喜马拉雅成矿带西段的穷家岗(琼嘉岗)、东段的库局、库拉岗日以及冈底斯的腾美杰等地, 都已经发现了锂辉石等稀有金属的矿石滚石, 尤其是琼嘉岗, 其富矿石中锂辉石超过70%(赵俊兴等, 2021)。如果在锂的化探异常区发现锂辉石矿石滚石或者残坡积物, 其找矿意义重大(王学求等, 2020)。随着全球气温升高, 冰川消融, 雪线上移, “露头型”锂矿在西昆仑的大红柳滩地区和藏南的喜马拉雅等未勘查过的区域, 同样存在着很大的可能性, 这一点需要引起足够的重视。

目前, 中国深部卤水锂矿资源的开发利用也已提上了日程。国内油气巨头中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团有限公司在绿色低碳转型的过程中逐渐担负起了深部卤水型锂矿勘探开发的重任。中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团有限公司在开展深部卤水型锂矿开发方面具有巨大优势: (1)拥有先进的物探技术以及较强的野外采集及室内分析能力, 可实现矿产勘探到开发的全流程操作; (2)拥有大量、详实的地球物理、岩心和深层卤水等资料; (3)卤水型锂矿与油气资源伴生, 石油公司的油气开采基础设施可直接用于深部卤水型锂矿勘探开发, “油(气)卤兼探”可能成为今后一段时间内深部卤水型锂矿开发的重要形式。

在寻找高品位锂矿石这件事情上,学术界存在着两种截然相反的观点。第一种“往上走”。中国科学院地质所青藏高原科考小组在喜马拉雅—琼嘉岗一带发现了一个超大规模的锂矿床,它是喜马拉雅地区第一个有工业应用价值的伟晶岩型锂矿。该矿区蕴藏着 101.25 万 t 氧化锂,琼嘉岗锂矿具备了较好的开发条件。然而,目前该类矿产资源的开发利用还存在一些问题,如:生态环境脆弱、环境恶劣、资源消耗大等。第二种则是“往下走”。也就是目前国家实施的“三深”工程,其中最重要的一条就是寻找深部富锂卤水。另外,如果沉积性锂矿可以工业化开采,环境保护问题得以解决,豫西—晋南、川滇黔等地的锂资源,数量上很有可能比花岗伟晶岩型、花岗岩型锂矿更多(王登红等, 2022)。

## 4 结 论

(1) 本文将中国锂矿分为 3 种类型: 硬岩型、卤水型和黏土型, 硬岩型又分为花岗岩型和花岗伟晶岩型, 卤水型分为大陆盐湖型和地下卤水型, 其中花岗伟晶岩型和大陆盐湖型在我国应用最为广泛。

(2) 中国锂资源分布比较集中, 90% 左右的锂资源分布在西部地区, 硬岩型锂矿主要分布在四川、江西、湖南、新疆等地区, 卤水型锂矿分布在青海、西藏和湖北等地区。成矿时代从太古宙到新生代都有发育。中国已开发利用的锂矿品位较低, 目前开采的锂资源主要为硬岩锂, 矿石类型主要为锂辉石和锂云母。卤水锂基本上没有得到工业规模利用, 主要原因是青海盐湖卤水中镁含量较高, 对于高镁锂比型盐湖卤水的提锂工艺, 至今仍存在有技术和设备的问题。

(3) 为使中国锂资源得到更好的发展, 建议在完成现有矿区开发利用任务的基础上, 加快寻找新的锂资源成矿区, 对黏土型、地下卤水型及高镁锂比盐湖卤水型等新型锂矿资源加大研究力度, 争取研发出效率高、清洁、成本低的提锂方法。

## 注释

① 唐国凡, 吴盛先. 1984. 四川省康定县甲基卡花岗伟晶岩锂矿床地质研究报告 [R]. 西昌: 四川省地质矿产勘查开发局攀西地质队.

② 四川省地质矿产勘查开发局化探队, 马尔康金鑫矿业有限公

司. 2015. 四川省马尔康县党坝矿区锂矿补充详查及资源储量核实报告 [R]. 成都: 四川省地质矿产勘查局.

## References

- Bauer A, Velde B D. 2014. *Geochemistry at the Earth's Surface* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 56–58.
- Benson T R, Coble M A, Rytuba J J, Mahood G A. 2017. Lithium enrichment in intracontinental rhyolite magmas leads to Li deposits in Cal-dera basins[J]. *Nature Communications*, 8: 270.
- Bowell R J, Lagos L, de los Hoyos C R, Declercq J. 2020. Classification and characteristics of natural lithium resources[J]. *Elements*, 16(4): 259–264.
- Bradley D C, Munk L, Jochens H, Hynek S, Labay, K A. 2013. A Preliminary Deposit Model for Lithium Brines[R]. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.
- Bradley D C, Stillings L L, Jaskula B W, Munk L, McCauley A D. 2017. Lithium, Chapter K of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply[R]. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.
- Cao Wenhui, Wu Chan. 2004. *Brine Resources and Their Comprehensive Utilization Technology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–316(in Chinese with English abstract).
- Castor S B, Henry C D. 2020. Lithium-rich claystone in the McDermitt Caldera, Nevada, USA: Geologic, mineralogical, and geochemical characteristics and possible origin[J]. *Minerals*, 10(1): 68.
- Černý P, Ercit T S. 2005. The classification of granitic pegmatites revisited[J]. *The Canadian Mineralogist*, 43(6): 2005–2026.
- Chang Zheng, Yuan Xiaolong, Liu Wanping, Li Mengling, Miao Weiliang, Cheng Huaide, Bu Di, Zhang Hao, Zhang Xiyang. 2022. Study on the response mechanism of solid potassium salt dissolution to solvent injection rate in Chalhan Salt Lake[J]. *Journal of Earth Sciences*, 43(3): 287–294 (in Chinese with English abstract).
- Che X D, Wang R C, Wu F Y, Zhu Z Y, Zhang W L, Hu H, Zhang D. 2019. Episodic Nb–Ta mineralization in South China: Constraints from in situ LA–ICP–MS columbite–tantalite U–Pb dating[J]. *Ore Geology Reviews*, 105: 71–85.
- Chen Xiaowei, Zhou Kenken, Mou Chuanlong, Li Xiaoguang, Ma Hongzheng, Wu Hao, Li Zhidan. 2016. Analysis on the potential of underground brine-type lithium resources in typical halogen storage structures in Sichuan Basin[J]. *Light Metals*, (10): 7–11 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xinjun, Li Qianwen. 2021. Characteristics and development prospects of lithium resources in brine in Jiangnan Basin[J]. *Land Resources Information*, (11): 44–49 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yuchuan, Pei Rongfu, Wang Denghong, Wang Pingan. 2015. On the natural classification of mineral deposits—IV on the mineralization series of mineral deposits[J]. *Mineral Deposit Geology*, 34(6): 1092–1106 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yuhua. 1983. Salt precipitation sequences and distribution patterns of some trace elements during evaporation of yellow

- seawater at a constant temperature of 25°C[J]. *Acta Geologica Sinica*, (4): 379–390 (in Chinese).
- Cui Yi, Luo Chongguang, Xu Lin, Zhang Hai, Deng Mingguo, Gu Hannian, Meng Yong, Qin Zhaojian, Wen Hanjie. 2018. Weathering genesis and lithium enrichment pattern of lithium-rich claystone systems in the Jiujia Furnace Formation, Qianzhong[J]. *Mineral and Rock Geochemistry Bulletin*, 37(4): 696–704 (in Chinese with English abstract).
- Cui Yi, Wen Hanjie, Yu Wenxiu, Luo Chongguang, Du Shengjiang, Ling Kunyue, Xu Fei, Yang Jihua. 2022. Fugacity and enrichment mechanism of lithium in lithium-rich clay rock systems of the Lower Permian Inverted Stone Formation, Central Yunnan[J]. *Journal of Petrology*, 38(7): 2080–2094 (in Chinese with English abstract).
- Cui Yinliang, Zhou Jiayi, Huang Zhilong, Luo Kai, Nian Hongliang, Ye Lin, Li Zhenli. 2018. Geology, geochemistry and ore genesis of the Fule Pb–Zn deposit, Yunnan Province, Southwest China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(1): 194–206 (in Chinese with English abstract).
- Dessemond C, Lajoie-Leroux F, Soucy G, Laroche N, Magnan J F. 2019. Spodumene: The lithium market, resources and processes[J]. *Minerals*, 9(6): 334–351.
- Fei Guangchun, Yang Zheng, Yang Jiayi, Luo Wei, Deng Yun, Lai Yutao, Tao Xinxin, Zheng Zhen, Tang Wenchun, Li Jian. 2020. Limiting the age of mineralization of granitic pegmatite-type rare metal deposits at Dangba, Markang, Sichuan: Evidence from LA–MC–ICP–MS cassiterite U–Pb dating[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(3): 836–849 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xiaofang, Hou Liwei, Wang Denghong, Yuan Linping, Liang Bin, Hao Xuefeng, Pan Meng. 2014. Results of mineral investigation and evaluation of methylka lithium pyroxene ore in Ganzi, Sichuan[J]. *China Geological Survey*, 1(3): 37–43 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xiaofang, Yuan Linping, Wang Denhong, Hou Liwei, Pan Meng, Hao Xuefeng, Liang Bin, Tang Yi. 2015. Metallogenic characteristics and exploration model of the new No. 3 rare metal vein in the Sichuan Mecca ore field[J]. *Mineral Deposits*, 34(6): 1172–1186 (in Chinese with English abstract).
- Gao Chunliang, Yu Junqing, Min Xiuyun, Cheng Aiyong, Zhang Lisa. 2020. Global distribution characteristics of lithium brine deposits in saline lakes and their controlling factors[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 28(4): 48–55 (in Chinese with English abstract).
- Gao Feng, Zheng Mianping, Nie Zhen, Liu Jianhua, Song Pengsheng. 2011. Brine Lithium Resource in the salt lake and advances in its exploitation[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 32(4): 483–492 (in Chinese with English abstract).
- Gao Shiyang. 2000. Lithium salt development and environment in Qinghai Salt Lake[J]. *Journal of Salt Lake Research*, (1): 17–23 (in Chinese with English abstract).
- Gong Hongyu. 2022. First clay-based lithium discovery in the Qaidam Basin, China's treasure basin, with great prospect of mineralization[EB/OL]. *China News Network*. <https://www.chinanews.com.cn/cj/2022/09-21/9857776.shtml>.
- Gou Hongzhong, Peng Shijin. 1991. Overview of comprehensive utilization of Yichun tantalum-niobium mine[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, (5): 23–25 (in Chinese with English abstract).
- Han Jibin, Xu Jianxin, Liu Jubo, Zhong Yi, Xu Kai, Ma Haizhou. 2018. Progress of underground brine hydrogeology research[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 26(4): 79–84, 90 (in Chinese with English abstract).
- Hao Xuefeng, Fu Xiaofang, Liang Bin, Yuan Linping, Pan Meng, Tang Yi. 2015. Age and significance of the formation of the Methaca granite and the New III vein in western Sichuan[J]. *Mineral Deposits*, 34(6): 1199–1208 (in Chinese with English abstract).
- He Shengli. 2001. A preliminary study on the application of lithium in agriculture[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, (2): 72–75 (in Chinese with English abstract).
- Hou J L, Li J K, Wang D H, Chen Z Y, Zhao H, Li C. 2018. The composition and metallogenic significance of micas from Jiajika Two-Mica granite, Sichuan Province[J]. *Earth Science*, 43(6): 2042–2054.
- Hou Wei, Fu Xiaofang. 2002. The Dome Shaped Metamorphic Geology of the Eastern Margin of the Songpan–Ganzi Orogenic Belt [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 5–98(in Chinese with English abstract).
- Ji Debao, Li Yufeng, Xiang Yunyan, Du Jinrui. 2021. Geological characteristics and mineralization mechanism of the methaca pegmatite-type lithium deposit in western Sichuan[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, (1): 14–17 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zhenzhen, Liu Gaoling, Zhuoma Quxi, Li Mingli. 2021. The current situation of lithium industry in Tibetan salt lake under the current supply and demand of lithium resources in China and suggestions for countermeasures[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 29(3): 104–110 (in Chinese with English abstract).
- Kesler S E, Gruber P W, Medina P A, Gregory A, Keoleian C, Mark P. Everson D, Timothy J. Wallington D. 2012. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, (48): 55–69.
- Kong Huilei, Li Wenyuan, Ren Guangli, Li Kan, Wang Zhihua, Zhao Xinmin, Zhang Jiangwei, Peng Suxia. 2023. Status of research on pegmatite-type lithium deposits and their prospectivity in western China[J]. *Northwestern Geology*, 56(1): 11–30 (in Chinese with English abstract).
- Kudryavtsev P. 2016. Lithium in nature, application, methods of extraction (review)[J]. *Scientific Israel: Technological Advantages*, 18(3): 63–83.
- Li Boyang, Jiang Dawei, Fu Xu, Wang Lei, Gao Shuqi, Fan Zhiyong, Wang Kexiang, Hujiejiletu. 2018. Geological characteristics of lithium polymetallic deposits in the Velasto mining area of Inner Mongolia and the significance of mineral search[J]. *Mineral Exploration*, 9(6): 1185–1191 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Li Peng, Wang Denghong, Li Xingjie. 2019. A review of niobium and tantalum metallogenic regularity in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 64: 1545–1566 (in Chinese).
- Li Jiankang, Li Peng, Yan Qinggao, Liu Qiang, Xiong Xin. 2021. Research history and development of granitic pegmatites in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 2996–3016 (in Chinese

- with English abstract).
- Li Jiankang, Liu Xifang, Wang Denghong. 2014. Outline of lithium mineralization pattern in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2269–2283 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Wang Denghong, Liu Shanbao, Ying Lijuan, Wang Chenghui, Chen Dongliang. 2008. SRXRF analysis of fluid inclusions in pegmatite type deposits in western Sichuan[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(3): 332–337 (in Chinese).
- Li Jiankang, Wang Denghong, Zhang Dehui, Fu Xiaofang. 2006a. Source of metallogenic fluids for the metaka pegmatite lithium-polymetallic deposits in Sichuan[J]. *Journal of Petrographic Mineralogy*, (1): 45–52 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Wang Denghong, Zhang Dehui, Fu Xiaofang. 2006b. The discovery of silicate daughter mineral-bearing inclusions in the Jiajika pegmatite deposit, western Sichuan, and its significance[J]. *Mineral deposits*, (S1): 131–134 (in Chinese with English abstract).
- Li Mingze, Qin Yulong, Li Zheng, Xu Yunfeng, Wu Wenhui, Liu Wei, Ye Yakang, Zhou Xiong. 2018. Geochemical characteristics of two-mica granite and granite pegmatite in Jiajika area, western Sichuan, and their geological implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(3): 366–378 (in Chinese with English abstract).
- Li Qingxiang. 2020. Prospective analysis of lithium brine resource extraction in the lithium-rich region of Chalhán Salt Lake[J]. *Chemical Enterprise Management*, (24): 135–136 (in Chinese with English abstract).
- Li Ruiqin, Liu Chenglin, Chen Man, Chen Yongzhi, Wang Chunlian. 2013. Exploration of salt precipitation by cooling in deep potassium-rich brine wells in Jiangling Depression[J]. *Salt Lake Research*, 21(1): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Liao Dajun, Ouyang Bin, Zhang Dongliang, Zhu Wentao. 2019. Preliminary study on the geological background of lithium-bearing brine ore formation in Taihe Depression, Jitai Basin, Jiangxi Province[J]. *World Nonferrous Metals*, (23): 178–179 (in Chinese with English abstract).
- Lin Zhongliang, Zhang Lianxiang, Wu Zhihao, Ding Liang, Long Shanyou. 2020. Characteristics of lithium deposits in Yifeng–Fengxin area of Jiangxi Province and their mineralization pattern[J]. *China Metal Bulletin*, (1): 34–36 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Yu Xiaochan, Yuan Xueyin, Li Ruiqin, Yao Fujun, Shen Lijian, Li Qiang, Zhao Yuanyi. 2021. Characteristics, distribution patterns and metallogenic dynamics of brine-type lithium ores in saline lakes around the world[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(7): 2009–2029 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Yu Xiaocan, Zhao Yanjun, Wang Jiuyi, Wang Licheng, Xu Haiming, Li Jian, Wang Chunlian. 2016. A preliminary investigation on the regional metallogenic background and mineralization of liquid potassium and lithium resources in the South China Land mass[J]. *Mineral Deposits*, 35(6): 1119–1143 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lijun, Wang Denghong, Gao Juanqin, Yu Feng, Wang Wei. 2019. New breakthroughs in foreign lithium ore search (2017–2018) and implications for key mineral exploration in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1479–1488 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lijun, Wang Denghong, Liu Xifang, Li Jiankang, Dai Hongzhang, Yan Weidong. 2017. Main types, distribution characteristics and exploration and development status of lithium ores at home and abroad[J]. *Geology in China*, 44(2): 263–278 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lijun, Wang Denghong, Yang Yueqing, Fu Xiaofang, Hao Xuefeng, Pan Meng, Tang Yi, Chen Zhenyu. 2016. Preliminary study on the metallogenic characteristics of rare metal veins in Sichuan Methaca Xin III[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(1): 50–59 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shuang, Wang Shuilong, Xing Xinlong, Wang Longfei, Zhang Ye. 2019. Distribution of lithium resources, deposit types and prospect finding in Jiangxi Province[J]. *Resources Environment & Engineering*, 33(2): 195–198, 207 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xifang, Zheng Mianping, Qi Wen. 2007. Study on the source of ore-forming material of super-large B and Li deposits in Zabuye Salt Lake, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, (12): 1709–1715 (in Chinese with English abstract).
- Long Xiyu, Chen Zhengqian, Liu Zhijun, Zhang Lianxiang. 2021. Comparative analysis of tantalum–niobium mineralization characteristics of Yashan 414 and Lingshan Pine Gang, Jiangxi[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 44(3): 239–248 (in Chinese with English abstract).
- Ma Houming, Lai Zhijian, Yan Xinhua, Liao Shaoping, Tian Liming. 2021. Geochemical characteristics and prospective analysis of lithium brine deposits in the Jitai Basin, Jiangxi[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(5): 617–627 (in Chinese with English abstract).
- Ma Shengchao, Wang Denghong, Sun Yan, Li Chao, Zhong Hairan. 2019. Geochronology and geochemical characteristics of Lower–Middle Triassic clay rock and their significances for prospecting clay-type lithium deposit[J]. *Earth Science*, 44(2): 427–440 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Yuan Shunda, Xie Guiqing, Song Shiwei, Zhou Qi, Gao Yongbao, Liu Xiang, Fu Xiaofang, Cao Jing, Zeng Zailin, Li Tongguo, Fan Xiyin. 2019. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st century[J]. *Mineral Deposits*, 38(5): 935–969 (in Chinese with English abstract).
- McCaughey A, Bradley D C. 2014. Global age distribution of granitic pegmatites[J]. *The Canadian Mineralogist*, 52(2): 18–190.
- Mu Yanzong, Nie Zhen, Bu Lingzhong, Wang Yunsheng, Wu Qian. 2016. Progress in study of potash resources of oil (gas) field brine in China[J]. *Advances in Earth Science*, 31(2): 147–160 (in Chinese with English abstract).
- Munk L A, Hynek S A, Bradley D C, Boutt d, Labay k, Jochens H. 2016. Lithium brines: A global perspective[J]. *Reviews in Economic Geology*, (18): 339–365.
- Naumov A V, Naumova M A. 2010. Modern state of the world lithium market[J]. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 51(4): 324–330.
- Ni Wenyi, Qiu Changwei. 2021. Non-ferrous metals industry: A complete resource review of Yichun Mica 22[R]. Shanghai: Guojin Securities (in Chinese).

- Pan Tong, Li Shanping, Wang Tao, Han Guang, Jia Jiantuan. 2022. Metallogenic characteristics and prospecting potential of lithium deposits in Qinghai Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(5): 1827–1854 (in Chinese).
- Peng Jie, Zou Lin. 2021. Prospecting prospects in the periphery of Keeryin Area, Sichuan[J]. *World Nonferrous Metals*, 568(4): 50–51 (in Chinese with English abstract).
- Qi Guicai, Hai Chunxi, Zhou Yuan. 2018. Progress in lithium extraction using manganese oxide lithium ion sieve adsorbents[J]. *Functional materials*, 49 (11): 11023–11032 (in Chinese).
- Qin Kezhang, Zhao Junxing, He Changtong, Shi Ruizhe. 2021. Discovery and significance of ultra-large pegmatitic lithium ore in Qiongiagang, Himalaya[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3277–3286 (in Chinese with English abstract).
- Shen Jun, Dai Binlian. 2009. Development and utilization of lithium brine resources in the Salt Lake and its prospects[J]. *Industrial Minerals & Processing*, (4): 1–4 (in Chinese with English abstract).
- Shu Liangshu, Zhu Wen Bin, Xu Zhi Qin. 2021. Geological background and mineralization conditions of granite-type lithium ore in South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 3099–3114 (in Chinese with English abstract).
- Song Pengsheng, Li Wu, Sun Bai, Nie Zhen, Bu Lingzhong, Wang Yunsheng. 2011. Recent development on comprehensive utilization of salt lake resources[J]. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 27(5): 801–815 (in Chinese with English abstract).
- Sun Wenli, Liu Yi, Zhang Zhaowei. 2022. Research progress on petrogenesis of LCT-type granitic pegmatite and lithium enrichment mechanism[J]. *Northwestern Geology*, 55(2): 35–55 (in Chinese with English abstract).
- Sun Zhonggang, Guo Xuan, Liu Hongbing, Bao Pengli, Chen Jie, Zhou Wenlong. 2012. Advanced manufacturing technology of aluminum-lithium alloy and its development trend[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, (5): 60–63 (in Chinese with English abstract).
- Thomas R, Davidson P. 2012. Water in granite and pegmatite-forming melts[J]. *Ore Geology Reviews*, (46): 32–46.
- Tkachev A V. 2011. Evolution of metallogeny of granitic pegmatites associated with orogens throughout geological time[J]. *Geological Society London Special Publications*, (350): 7–23.
- Tu Qijun, Li Jiankang, Wang Gang, Ma Hongchao. 2019. Comparison of the metallogenic role of major pegmatite-type lithium pyroxene deposits in western China and prospects for mineralization[J]. *Geological Survey of China*, 6(6): 35–47 (in Chinese with English abstract).
- USGS. 2023. Mineral commodity summaries 2023[R]. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.
- Wang Chengfa. 1986. Discussion of the genesis of the 414 deposit[J]. *Mineral Deposits*, (2): 85–96 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chunlian, Huang Hua, Wang Jiuyi, Xu Haiming, Yu Xiaocan, Gao Chao, Meng Lingyang, Cai Pengrui, Yan Kai, Fang Jingling. 2018. Geological characteristics and reservoir formation model of potassium-rich lithium brine field in Jiangling Depression[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1630–1646 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chunlian, Liu Lihong, Li Qiang, Meng Lingyang, Liu Chenglin, Zhang Yuanyuan, Wang Jiuyi, Yu Xiaocan, Yan Kai. 2020. Geochemical characteristics and genesis of lithium-potassium mineral source area in the Jitai Basin, Jiangxi[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(1): 65–84 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Dai Hongzhang, Liu Shanbao, Li Jiankang, Wang Chenghui, Lou Debo, Yang Yueqing, Li Peng. 2022. Ten new trends in lithium exploration practices and theoretical research in China over the past decade[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 743–764 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Fu Xiaofang. 2013. Breakthroughs in periphery prospecting for lithium ore in the Jiajika, Sichuan[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 32(6): 987 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Li P G, Qu W J, Yin L J, Zhao Z, Lei Z Y, Wen S F. 2013. Discovery and preliminary study of the high tungsten and lithium contents in the Dazhuyuan bauxite deposit, Guizhou, China[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 56(1): 145–152.
- Wang Denghong, Liu Lijun, Dai Hongzhang, Liu Shanbao, Hou Jianglong, Wu Xishun. 2017. Discussion on particularity and prospecting direction of large and super-large spodumene deposits[J]. *Earth Science*, 42(12): 2243–2257 (in Chinese with English abstract).
- Wang Gaoshang. 2001. Impact of the development of lithium extraction technology in the salt lake on the global lithium mining industry: Reflections on the changes in the world lithium mining industry[J]. *Resources & Industries*, (5): 37–38 (in Chinese with English abstract).
- Wang He, Huang Liang, Bai Hongyang, Wang Kunyu, Wang Zhenhong, Gao Hao, Zhou Jinsheng, Qin Yan, Wang Yan. 2022. The main lithium resources in China. The main types, distribution and exploitation of lithium resources in China: A review and outlook[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 46(5): 848–866 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiushu, Qiu Jingzhi, Shao Henan, Xu Hong. 2015. Analysis on metallogenic characteristic and resource potential of salt lake brine lithium deposits in the global[J]. *China Mining Magazine*, 24(11): 82–88 (in Chinese with English abstract).
- Wang R X, Wang Q F, Huang Y X, Yang S J, Liu X F, Zhou Q. 2018. Combined tectonic and paleogeographic controls on the genesis of bauxite in the Early Carboniferous to Permian Central Yangtze Island[J]. *Ore Geology Reviews: Journal for Comprehensive Studies of Ore Genesis and Ore Exploration*, (101): 468–480.
- Wang Songtao, Gao Meixia, Fu Junhe. 2008. Geological features and mineralization rules of underground brine ore in coastal Weifang, Shandong[J]. *Mineral Deposits*, (5): 631–637 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Zhao Xiaodong, Li Junmin, Lü Tao. 2014. Distribution characteristics of lithium bauxite at Chongqing Silver Mine Pass[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 29(4): 541–545 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xinyu, Li Jie, Ling Kunyue, Fu Wei, Zhang Qizuan, Yang Zhiqiang, Wu Xiangke. 2021. Temporal and spatial distribution of lithium elements in soil and water sediments of Guangxi and prospecting prediction[J]. *Journal of Guilin University of*

- Technology, 41(1): 27–33(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiulian, Li Jinli, Zhang Mingjie. 2001. The 21st century energy metal–lithium metal in nuclear fusion reaction[J]. *Gold Journal*, (4): 249–252 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xueping, Chai Xinxia, Cui Wenjuan. 2014. Exploitation and utilization of global lithium resources: trends and our responses[J]. *China Mining Magazine*, 23(6): 10–13 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xueqiu, Liu Hanliao, Wang Wei, Zhou Jian, Zhang Bimin, Xu Shanfa. 2020. Geochemical background and spatial distribution of lithium ore in China: prospective area prediction[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(6): 797–806 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhaoyue. 2018. Applications of lithium metal and its market[J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 41(S1): 56–58 (in Chinese with English abstract).
- Wen Hanjie, Luo Chongguang, Du Shengjiang, Yu Wenxiu, Gu Hannian, Ling Kunyue, Cui Shen, Li Yang, Yang Jihua. 2020. Discovery and significance of carbonate clay-based lithium resources[J]. *Science Bulletin*, 65(1): 53–59 (in Chinese with English abstract).
- Weng Meimao, Yang Dan. 2018. Changes in lithium-boron isotope fractionation during water-rock reactions[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 37(1): 128–142 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xishun, Huang Wenbin, Du Xiaohui, Li Li. 2014. Study on the types and patterns of lithium deposit mineralization in the world[J]. *Mineral Deposits*, 33(S1): 1197–1198 (in Chinese with English abstract).
- Xi Wanwan, Zhao Yuhao, Ni Pei, Yao Chunyan, Zhu Yiping, Zheng Lu, Yao Zhongyou, Wang Tiangang. 2023. Analysis of the main types, characteristics, spatial and temporal distribution and mineral search potential of lithium ores[J]. *Sedimentary and Tethys Geology*, 43(1): 19–35 (in Chinese with English abstract).
- Xing Kai, Zhu Qing, Ren Junping, Zou Xiehua, Niu Maolin, Liu Junan, Xiao Yang. 2023. Research on the characteristics and market development trend of global lithium resources[J]. *Geological Bulletin of China*, 42(8): 1402–1421 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Xin, Li Jiankang, Wang Denghong, Liu Lijun, Dai Hongzhang. 2019. Study of melt and fluid inclusion solid-phase material in methaca granitic pegmatite-type lithium deposits in western Sichuan[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(2): 241–253 (in Chinese with English abstract).
- Xu Kai, Xu Jianxin, Chang Zheng, Han Jibin, Li Yangshan, Gao Xuefeng, Zhao Weiyong. 2021. Hydrochemical and hydroxyl isotope geochemical characteristics of brines in the South Yishan Oilfield, Qaidam Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 29(4): 43–51 (in Chinese).
- Xu Zhiqin, Hou Liwei, Wang Zongxiu, Fu Xiaofang, Huang Minghua. 1992. *Mountain Building Processes in the Songpan-Ganzi Orogenic Belt, China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–89 (in Chinese with English abstract).
- Xuan Zhiqiang, Liu Chenglin, Liu Baokun. 2016. Review of Quaternary salt lake deposits and salt mineral assemblages in China[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 38(4): 250–254 (in Chinese with English abstract).
- Yang Huipeng, Liu Lin, Ding Guofeng. 2019. Present situation and development trend of lithium resources in the world[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 39(5): 26–40 (in Chinese with English abstract).
- Yang Minggui, Wu Fujiang, Song Zhirui, Lü Shaojun. 2015. Ganbei: A window on the geology of southern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(2): 222–233 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yueqing, Liu Shanbao, Wang Denghong, Dai Hongzhang, Liu Lijun, Li Xin. 2023. Discussion on the difference of metallogenic characteristics and genesis of the Jiajika and Keeryin rare metals ore fields in Western Sichuan[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 44(3): 419–433 (in Chinese with English abstract).
- Yu Feng, Wang Denghong, Yu Yang, Liu Zhu, Gao Juanqin, Zhong Jia'ai, Qin Yan. 2019. Distribution and exploration and development status of major sedimentary lithium ores at home and abroad[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 38(3): 354–364 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xiaocan, Liu Chenglin, Wang Chunlian, Xu Haiming, Zhao Yanjun, Huang Hua, Li Ruiqin. 2021. Genesis and resource exploration progress of large lithium-rich brine deposits in the Jiangnan Basin: An overview[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(1): 107–123 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Huanyu, Wu Liran. 2021. Analysis of the current situation and progress of underground brine mining and comprehensive utilization in China[J]. *Sichuan Chemical Industry*, 24(3): 18–21 (in Chinese with English abstract).
- Zhan Dapeng, Yu Junqing, Gao Chunliang, Zhang Lisa, Cheng Aiyong. 2010. Hydrogeochemical conditions for the formation of lithium brine resources in four brine lakes of the Qaidam Basin[J]. *Journal Lake Sciences*, 22(5): 783–792 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chi, Xiao Lin, Zhang Zisheng, Yang Yuanyuan. 2017. A review of the main types, geological characteristics and metallogenic patterns of lithium deposits[J]. *Low Carbon World*, (16): 33–34 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hui, Lü Zhenghang, Tang Yong. 2021. Overview of LCT type pegmatite and its genesis of lithium ore genesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 2955–2970 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ling, Lin Desong. 2004. Analysis of the current status of rare metal resources in China[J]. *Geology and Exploration*, (1): 26–30 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Rubai. 1985. Petalite has been found in lithium pegmatite in Hubei Province[J]. *Chinese Science Bulletin*, (11): 852–854 (in Chinese).
- Zhang Sujiang, Cui Liwei, Kong Linghu, Jiang Ailing, Li Jianbo. 2020. Overview of domestic and foreign lithium resources and their distribution[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 10(10): 95–104 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Jianhua, Cui Jianjun, Shi Wei, Su Jinbao, Li Yong. 2012. New progress of Mesozoic geotectonics in South China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(3): 257–279 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Junxing, He Changtong, Qin Kezhang, Shi Ruizhe, Liu Xiaochi,

- Hu Fangyang, Yu Kelong, Sun Zhenghao. 2021. Formation age, source area characteristics and differentiation of ultramafic pegmatitic lithium ores in Qiongiagang, Himalaya[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3325–3347 (in Chinese with English abstract).
- 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–NH<sub>4</sub>–illite–pyrophyllite–chlorite assemblage in a marine-influenced anthracite and associated strata from the Jincheng Coalfield, Qinshui Basin, northern China[J]. *International Journal of Coal Geology*, (185): 61–78.
- Zhao Yuanyi. 2003. Saline lake lithium resources of China and its exploitation[J]. *Mineral Deposits*, 22(1): 99–106 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yuanyi, Fu Jiajun, Li Yun. 2015. Super large lithium and boron deposit in the Jadar Basin, Serbia[J]. *Geological Review*, (1): 34–44 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Mianping. 2001. On salt lakes in China[J]. *Geology of Mineral Deposits*, (2): 181–189, 128 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Mianping, Liu Xifang. 2007. Lithium resources in China[J]. *Advanced Materials Industry*, (8): 13–16 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Mianping, Zheng Yuan, Liu Jie. 1990. New Discovery of Salt Lakes and geothermal deposits in the Qinghai Tibet plateau[J]. *Journal of the Chinese Academy of Geological Sciences*, (1): 151 (in Chinese).
- Zheng Xiyu. 2002. *China Salt Lake Journal*[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- 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[J]. *Mineral deposits*, 38(4): 898–916 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Li, Gu Hannian, Yang Yongqiong, Wen Hanjie, Wang Ning, Luo Chongguang. 2020. Progress of lithium extraction process from clay-based lithium resources[J]. *Light Metals*, (12): 8–13 (in Chinese with English abstract).
- Zou Tianren, Li Qingchang. 2006. Rare and Rare Earth Metal Deposits in Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–284 (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 曹文虎, 吴禅. 2004. 卤水资源及其综合利用技术[M]. 北京: 地质出版社, 1–316.
- 常政, 袁小龙, 刘万平, 李梦玲, 苗卫良, 程怀德, 卜迪, 张昊, 张西营. 2022. 察尔汗盐湖固体钾盐溶解对溶剂注入速率响应机制研究[J]. *地球学报*, 43(3): 287–294.
- 陈小炜, 周恩恩, 牟传龙, 李效广, 马红嫄, 伍皓, 李志丹. 2016. 浅析四川盆地典型储卤构造地下卤水型锂资源潜力[J]. *轻金属*, (10): 7–11.
- 陈新军, 李倩文. 2021. 江汉盆地卤水锂资源特征及开发利用前景[J]. *国土资源情报*, (11): 44–49.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红, 王平安. 2015. 论矿床的自然分类—四论矿床的成矿系列问题[J]. *矿床地质*, 34(6): 1092–1106.
- 陈郁华. 1983. 黄海水 25℃ 恒温蒸发时的析盐序列及某些微量元素分布规律[J]. *地质学报*, (4): 379–390.
- 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[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 37(4): 696–704.
- 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[J]. *岩石学报*, 38(7): 2080–2094.
- 崔银亮, 周家喜, 黄智龙, 罗开, 念红良, 叶霖, 李珍立. 2018. 云南富乐铅锌矿床地质、地球化学及成因[J]. *岩石学报*, 34(1): 194–206.
- 费光春, 杨峥, 杨继忆, 罗伟, 邓运, 赖宇涛, 陶鑫鑫, 郑砾, 唐文春, 李剑. 2020. 四川马尔康党坝花岗岩伟晶岩型稀有金属矿床成矿时代的限定: 来自 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 定年的证据[J]. *地质学报*, 94(3): 836–849.
- 付小方, 侯立玮, 王登红, 袁瀚平, 梁斌, 郝雪峰, 潘蒙. 2014. 四川甘孜甲基卡锂辉石矿矿产调查评价成果[J]. *中国地质调查*, 1(3): 37–43.
- 付小方, 袁瀚平, 王登红, 侯立玮, 潘蒙, 郝雪峰, 梁斌, 唐屹. 2015. 四川甲基卡矿田新三号稀有金属矿脉的成矿特征与勘查模型[J]. *矿床地质*, 34(6): 1172–1186.
- 高春亮, 余俊清, 闵秀云, 成艾颖, 张丽莎. 2020. 全球盐湖卤水锂矿床的分布特征及其控制因素[J]. *盐湖研究*, 28(4): 48–55.
- 高峰, 郑绵平, 七贞, 刘建华, 宋彭生. 2011. 盐湖卤水锂资源及其开发进展[J]. *地球学报*, 32(4): 483–492.
- 高世扬. 2000. 青海盐湖锂盐开发与环境[J]. *盐湖研究*, (1): 17–23.
- 宫宏宇. 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[EB/OL]. 中国新闻网. <https://www.chinanews.com.cn/cj/2022/09-21/9857776.shtml>.
- 勾鸿忠, 彭世金. 1991. 宜春钽铌矿综合利用概况[J]. *矿产综合利用*, (5): 2325.
- 韩积斌, 许建新, 刘久波, 钟翼, 徐凯, 马海州. 2018. 地下卤水水文地质研究进展[J]. *盐湖研究*, 26(4): 79–84, 90.
- 郝雪峰, 付小方, 梁斌, 袁瀚平, 潘蒙, 唐屹. 2015. 川西甲基卡花岗岩和新三号矿脉的形成时代及意义[J]. *矿床地质*, 34(6): 1199–1208.
- 何生丽. 2001. 锂在农业上应用研究初探[J]. *新疆农业科学*, (2): 72–75.
- 侯江龙, 李建康, 王登红, 陈振宇, 赵鸿, 李超. 2018. 四川甲基卡锂矿床花岗岩体中云母类矿物的元素组成对矿床成矿条件的指示[J]. *地球科学*, 43(S2): 119–134.
- 侯玮, 付小方. 2002. 松潘-甘孜造山带东缘穹隆状变质地质体[M]. 成都: 四川大学出版社, 5–98.
- 纪德宝, 栗豫丰, 向云燕, 杜金锐. 2021. 川西甲基卡伟晶岩型锂矿床地质特征及成矿机制研究[J]. *四川有色金属*, (1): 14–17.
- 姜贞贞, 刘高令, 卓玛曲西, 李明礼. 2021. 我国锂资源供需现状下西藏盐湖锂产业现状及对策建议[J]. *盐湖研究*, 29(3): 104–110.
- 孔会磊, 李文渊, 任广利, 李侃, 王志华, 赵辛敏, 张江伟, 彭素霞. 2023. 伟晶岩型锂矿床研究现状及其在中国西部的找矿前景[J]. *西北地质*, 56(1): 11–30.
- 李泊洋, 姜大伟, 付旭, 王磊, 高树起, 樊志勇, 王可祥, 胡格吉乐吐. 2018. 内蒙古维拉斯托矿区锂多金属矿床地质特征及找矿意义[J]. *矿产勘查*, 9(6): 1185–1191.
- 李建康, 李鹏, 王登红, 李兴杰. 2019. 中国钽铌矿成矿规律[J]. *科学通报*, 64(15): 1545–1566.

- 李建康, 李鹏, 严清高, 刘强, 熊欣. 2021. 中国花岗伟晶岩的研究历程及发展态势[J]. 地质学报, 95(10): 2996-3016.
- 李建康, 刘喜方, 王登红. 2014. 中国锂矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 88(12): 2269-2283.
- 李建康, 王登红, 刘善宝, 应立娟, 王成辉, 陈栋梁. 2008. 川西伟晶岩型矿床中流体包裹体的 SRXRF 分析[J]. 大地构造与成矿学, 32(3): 332-337.
- 李建康, 王登红, 张德会, 付小方. 2006a. 四川甲基卡伟晶岩型锂多金属矿床成矿流体来源研究[J]. 岩石矿物学杂志, (1): 45-52.
- 李建康, 王登红, 张德会, 付小方. 2006b. 川西甲基卡伟晶岩型矿床中含硅酸盐矿物包裹体的发现及其意义[J]. 矿床地质, (S1): 131-134.
- 李名则, 秦宇龙, 李峥, 徐云峰, 武文辉, 刘伟, 叶亚康, 周雄. 2018. 川西甲基卡二云母花岗岩与伟晶岩脉地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 37(3): 366-378.
- 李庆香. 2020. 察尔汗盐湖富锂区域卤水锂资源开采前瞻分析[J]. 化工管理, (24): 135-136.
- 李瑞琴, 刘成林, 陈侠, 陈永志, 王春连. 2013. 江陵凹陷深层富钾卤水井内降温析盐情况探讨[J]. 盐湖研究, 21(1): 1-6.
- 廖达军, 欧阳斌, 张栋梁, 朱文韬. 2019. 江西省吉泰盆地泰和凹陷含锂卤水成矿地质背景初步研究[J]. 世界有色金属, (23): 178-179.
- 林忠良, 张连湘, 巫志豪, 丁亮, 龙细友. 2020. 江西省宜丰-奉新地区锂矿床特征及其成矿规律研究[J]. 中国金属通报, (1): 34-36.
- 刘成林, 余小灿, 袁学银, 李瑞琴, 姚佛军, 沈立建, 李强, 赵元艺. 2021. 世界盐湖卤水型锂矿特征、分布规律与成矿动力模型[J]. 地质学报, 95(7): 2009-2029.
- 刘成林, 余小灿, 赵艳军, 王九一, 王立成, 徐海明, 李坚, 王春连. 2016. 华南陆块液体钾、锂资源的区域成矿背景与成矿作用初探[J]. 矿床地质, 35(6): 1119-1143.
- 刘丽君, 王登红, 高娟琴, 于飒, 王伟. 2019. 国外锂矿找矿的新突破(2017-2018年)及对我国关键矿产勘查的启示[J]. 地质学报, 93(6): 1479-1488.
- 刘丽君, 王登红, 刘喜方, 李建康, 代鸿章, 闫卫东. 2017. 国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状[J]. 中国地质, 44(2): 263-278.
- 刘丽君, 王登红, 杨岳清, 付小方, 郝雪峰, 潘蒙, 唐屹, 陈振宇. 2016. 四川甲基卡新三号稀有金属矿脉成矿特征的初步研究[J]. 桂林理工大学学报, 36(1): 50-59.
- 刘爽, 王水龙, 邢新龙, 汪龙飞, 张也. 2019. 江西省锂矿资源分布、矿床类型及找矿前景[J]. 资源环境与工程, 33(2): 195-198, 207.
- 刘喜方, 郑绵平, 齐文. 2007. 西藏扎布耶盐湖超大型 B、Li 矿床成矿物质来源研究[J]. 地质学报, (12): 1709-1715.
- 龙细友, 陈正钱, 刘志军, 张连湘. 2021. 江西雅山 414 和灵山松树岗钽铌矿成矿特征对比分析研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 44(3): 239-248.
- 马厚明, 赖志坚, 鄢新华, 廖绍平, 田立明. 2021. 江西吉泰盆地卤水锂矿床地球化学特征及远景分析[J]. 地球学报, 42(5): 617-627.
- 马圣钊, 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[J]. 地球科学, 44(2): 427-440.
- 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 宋世伟, 周琦, 高永宝, 刘翔, 付小方, 曹晶, 曾载淋, 李通国, 樊锡银. 2019. 21 世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展[J]. 矿床地质, 38(5): 935-969.
- 穆延宗, 卮贞, 卜令忠, 王云生, 伍倩. 2016. 我国油(气)田水钾资源研究进展[J]. 地球科学进展, 31(2): 147-160.
- 倪文祎, 邱长伟. 2021. 有色金属行业: 宜春云母 22 矿资源全梳理[R]. 上海: 国金证券.
- 潘彤, 李善平, 王涛, 韩光, 贾建团. 2022. 青海锂矿成矿特征及找矿潜力[J]. 地质学报, 96(5): 1827-1854.
- 彭杰, 邹林. 2021. 四川可尔因地区锂矿床构造环境及外围找矿前景分析[J]. 世界有色金属, (568): 50-51.
- 漆贵财, 海春喜, 周园. 2018. 锰氧化物锂离子筛型吸附剂提锂进展[J]. 功能材料, 49(11): 11023-11032.
- 秦克章, 赵俊兴, 何畅通, 施睿哲. 2021. 喜马拉雅琼嘉岗超大型伟晶岩型锂矿的发现及意义[J]. 岩石学报, 37(11): 3277-3286.
- 申军, 戴斌联. 2009. 盐湖卤水锂矿资源开发利用及其展望[J]. 化工矿物与加工, (4): 1-4.
- 舒良树, 朱文斌, 许志琴. 2021. 华南花岗岩型锂矿地质背景与成矿条件[J]. 地质学报, 95(10): 3099-3114.
- 宋彭生, 李武, 孙柏, 卮贞, 卜令忠, 王云生. 2011. 盐湖资源开发利用进展[J]. 无机化学学报, 27(5): 801-815.
- 孙文礼, 刘益, 张照伟. 2022. LCT 型花岗岩伟晶岩岩石成因和锂富集机制研究进展[J]. 西北地质, 55(2): 35-55.
- 孙中刚, 郭旋, 刘红兵, 鲍鹏里, 陈洁, 周文龙. 2012. 铝锂合金先进制造技术及其发展趋势[J]. 航空制造技术, (5): 60-63.
- 涂其军, 李建康, 王刚, 马宏超. 2019. 中国西部主要伟晶岩型锂辉石矿床成矿作用对比及找矿前景[J]. 中国地质调查, 6(6): 35-47.
- 王成发. 1986. 对 414 矿床成因的讨论[J]. 矿床地质, (2): 85-96.
- 王春连, 黄华, 王九一, 徐海明, 余小灿, 高超, 孟令阳, 蔡芑睿, 颜开, 方景玲. 2018. 江陵凹陷富钾锂卤水矿田地质特征及成藏模式研究[J]. 地质学报, 92(8): 1630-1646.
- 王春连, 刘丽红, 李强, 孟令阳, 刘成林, 张媛媛, 王九一, 余小灿, 颜开. 2020. 江西吉泰盆地卤水型锂钾矿物源区岩石地球化学特征及成因分析[J]. 岩石矿物学杂志, 39(1): 65-84.
- 王登红, 付小方. 2013. 四川甲基卡外围锂矿找矿取得突破[J]. 岩矿测试, 32(6): 987.
- 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[J]. 中国科学: 地球科学, 43(1): 44-51.
- 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 李建康, 王成辉, 娄德波, 杨岳清, 李鹏. 2022. 中国锂矿十年来勘查实践和理论研究的十个方面新进展新趋势[J]. 地质力学学报, 28(5): 743-764.
- 王登红, 刘丽君, 代鸿章, 刘善宝, 侯江龙, 吴西顺. 2017. 试论国内外大型超大型锂辉石矿床的特殊性与找矿方向[J]. 地球科学, 42(12): 2243-2257.
- 王高尚. 2001. 盐湖提锂技术发展对全球锂矿业的影响——由世界锂矿业变革引发的思考[J]. 资源与产业, (5): 37-38.
- 王核, 黄亮, 白洪阳, 王堃宇, 王振宏, 高昊, 周金胜, 秦艳, 王焰. 2022. 中国锂资源的主要类型、分布和开发利用现状: 评述和展望[J]. 大地构造与成矿学, 46(5): 848-866.
- 王秋舒, 邱景智, 邵鹤楠, 许虹. 2015. 全球盐湖卤水型锂矿床成矿特征与资源潜力分析[J]. 中国矿业, 24(11): 82-88.
- 王松涛, 高美霞, 傅俊鹤. 2008. 山东潍坊沿海地下卤水矿地质特征及成矿规律[J]. 矿床地质, (5): 631-637.
- 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[J]. 地质找矿论丛, 29(4): 541-545.
- 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[J]. 桂林理工大学学报, 41(1): 27-33.
- 王秀莲, 李金丽, 张明杰. 2001. 21 世纪的能源金属—金属锂在核聚变反应中的应用[J]. 黄金学报, (4): 249-252.
- 王学评, 柴新夏, 崔文娟. 2014. 全球锂资源开发利用的现状与思考[J]. 中国矿业, 23(6): 10-13.
- 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[J]. 地球学报, 41(6): 797-806.
- 王钊越. 2018. 金属锂的应用及其市场[J]. 新疆有色金属, 41(S1): 56-58.
- 温汉捷, 罗重光, 杜胜江, 于文修, 顾汉念, 凌坤跃, 崔毅, 李阳, 杨季华. 2020. 碳酸盐黏土型锂资源的发现及意义[J]. 科学通报, 65(1): 53-59.
- 翁梅茂, 杨丹. 2018. 水-岩反应过程中的锂硼同位素分馏变化规律[J]. 岩石矿物学杂志, 37(1): 128-142.
- 吴西顺, 黄文斌, 杜晓慧, 李莉. 2014. 世界锂矿床成矿类型及模式研究[J]. 矿床地质, 33(S1): 1197-1198.
- 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[J]. 沉积与特提斯地质, 43(1): 19-35.
- 邢凯, 朱清, 任军平, 邹谢华, 牛茂林, 刘君安, 肖阳. 2023. 全球锂资源特征及市场发展态势分析[J]. 地质通报, 42(8): 1402-1421.
- 熊欣, 李建康, 王登红, 刘丽君, 代洪章. 2019. 川西甲基卡花岗岩伟晶岩型锂矿床中熔体、流体包裹体固相物质研究[J]. 岩石矿物学杂志, 38(2): 241-253.
- 徐凯, 许建新, 常政, 韩积斌, 李阳山, 高雪峰, 赵为永. 柴达木盆地南翼山油田卤水水化学及氢氧同位素地球化学特征[J]. 2021. 盐湖研究, 29(4): 43-51.
- 许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 付小方, 黄明华. 1992. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社, 1-89.
- 宣之强, 刘成林, 刘宝坤. 2016. 中国第四纪盐湖矿床及盐类矿物组合综述[J]. 化工矿产地质, 38(4): 250-254.
- 杨卉芄, 柳林, 丁国峰. 2019. 全球锂矿资源现状及发展趋势[J]. 矿产保护与利用, 39(5): 26-40.
- 杨明桂, 吴富江, 宋志瑞, 吕少俊. 2015. 赣北: 华南地质之窗[J]. 地质学报, 89(2): 222-233.
- 杨岳清, 刘善宝, 王登红, 代鸿章, 刘丽君, 李鑫. 2023. 川西甲基卡和可尔因矿田稀有金属成矿特征差异性及其成因探讨[J]. 地球学报, 44(3): 419-433.
- 于枫, 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[J]. 岩矿测试, 38(3): 354-364.
- 余小灿, 刘成林, 王春连, 徐海明, 赵艳军, 黄华, 李瑞琴. 2021. 江汉盆地大型富锂卤水矿床成因与资源勘查进展: 综述[J]. 地质前缘, 29(1): 107-123.
- 袁寰宇, 吴立冉. 2021. 我国地下卤水开采、综合利用的现状与进展分析[J]. 四川化工, 24(3): 18-21.
- 展大鹏, 余俊清, 高春亮, 张丽莎, 成艾颖. 2010. 柴达木盆地四盐湖卤水锂资源形成的水文地球化学条件[J]. 湖泊科学, 22(5): 783-792.
- 张驰, 肖琳, 张自生, 杨媛媛. 2017. 锂矿床主要类型、地质特征与成矿模式综述[J]. 低碳世界, (16): 33-34.
- 张辉, 吕正航, 唐勇. 2021. LCT 型伟晶岩及其锂矿床成因概述[J]. 地质学报, 95(10): 2955-2970.
- 张玲, 林德松. 2004. 我国稀有金属资源现状分析[J]. 地质与勘探, (1): 26-30.
- 张如柏. 1985. 湖北锂伟晶岩中发现透锂长石[J]. 科学通报, (11): 852-854.
- 张苏江, 崔立伟, 孔令湖, 姜爱玲, 李建波. 2020. 国内外锂矿资源及其分布概述[J]. 有色金属工程, 10(10): 95-104.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 崔建军, 施伟, 苏金宝, 李勇. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展[J]. 地球学报, 33(3): 257-279.
- 赵俊兴, 何畅通, 秦克章, 施睿哲, 刘小驰, 胡方决, 余可龙, 孙政浩. 2021. 喜马拉雅琼嘉岗超大型伟晶岩锂矿的形成时代、源区特征及分异特征[J]. 岩石学报, 37(11): 3325-3347.
- 赵元艺. 2003. 中国盐湖锂资源及其开发进程[J]. 矿床地质, (1): 99-106.
- 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[J]. 地质论评, (1): 34-44.
- 郑绵平. 2001. 论中国盐湖[J]. 矿床地质, (2): 181-189, 128.
- 郑绵平, 刘喜方. 2007. 中国的锂资源[J]. 新材料产业, (8): 13-16.
- 郑绵平, 郑元, 刘杰. 1990. 青藏高原盐湖及地热矿床的新发现[J]. 中国地质科学院院报, (1): 151.
- 郑喜玉. 2002. 中国盐湖志[M]. 北京: 科学出版社.
- 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[J]. 矿床地质, 38(4): 898-916.
- 朱丽, 顾汉念, 杨永琼, 温汉捷, 王宁, 罗重光. 2020. 黏土型锂矿资源提锂工艺研究进展[J]. 轻金属, (12): 8-13.
- 邹天人, 李庆昌. 2006. 中国新疆稀有及稀土金属矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1-284.