

全球主要锂矿资源提取技术： 进展、挑战与未来趋势

普小凡¹, 莫美仙^{1*}, 普夕婷¹, 杨文军¹, 饶磊¹, 王娜²

¹玉溪师范学院地理与国土工程学院, 云南 玉溪

²云南省有色地质局三一三队, 云南 玉溪

收稿日期: 2025年9月25日; 录用日期: 2025年10月28日; 发布日期: 2025年11月10日

摘要

在全球“碳中和”目标驱动下, 锂作为新能源汽车、储能电池的核心原料, 其资源供给与提取技术成为产业发展关键。本文系统梳理全球锂矿资源分布格局, 聚焦卤水型、硬岩型、黏土型三类主流锂矿, 深入分析各类型资源的提取技术进展(含传统工艺与新兴技术), 剖析当前技术面临的技术瓶颈、成本压力、环境风险及政策市场制约, 最终提出绿色低碳化、多技术耦合化、资源综合利用化及智能化的未来发展趋势。研究表明: 卤水提锂以吸附法、膜分离法为主流; 硬岩提锂向高压酸浸、生物浸出转型; 黏土提锂仍处于研发攻坚阶段; 技术共性挑战集中于效率与环保的平衡, 未来需通过技术创新与产业协同, 实现锂资源可持续开发, 为新能源产业链安全提供支撑。

关键词

锂矿资源, 提取技术, 技术进展, 产业挑战, 发展趋势

Global Lithium Resource Extraction Technologies: Advances, Challenges, and Future Trends

Xiaofan Pu¹, Meixian Mo^{1*}, Xiting Pu¹, Wenjun Yang¹, Lei Rao¹, Na Wang²

¹School of Geography and Land Engineering, Yuxi Normal University, Yuxi Yunnan

²Team 313, Yunnan Nonferrous Geological Bureau, Yuxi Yunnan

Received: September 25, 2025; accepted: October 28, 2025; published: November 10, 2025

*通讯作者。

文章引用: 普小凡, 莫美仙, 普夕婷, 杨文军, 饶磊, 王娜. 全球主要锂矿资源提取技术: 进展、挑战与未来趋势[J]. 化学工程与技术, 2025, 15(6): 347-360. DOI: 10.12677/hjct.2025.156032

Abstract

Driven by the global pursuit of carbon neutrality, lithium, a core material for new energy vehicles and energy storage batteries, has become pivotal. This paper comprehensively reviews the global distribution of lithium resources, with a focus on three major types: brine, hard rock, and clay. It delves into the technological advancements in extraction methods for each type, including traditional processes and emerging technologies. The paper also examines the current technological bottlenecks, cost pressures, environmental risks, and policy-market constraints. Future development trends such as green low-carbon approaches, multi-technology integration, comprehensive resource utilization, and smart technologies are proposed. Research findings indicate that brine-type lithium extraction primarily relies on adsorption and membrane separation techniques, while hard rock-type lithium extraction is transitioning to high-pressure acid leaching and bioleaching. Clay-type lithium extraction remains in the research and development phase. A common technical challenge across all types lies in balancing efficiency and environmental protection. Future sustainable development of lithium resources requires technological innovation and industrial synergy to ensure the security of the new energy industry chain.

Keywords

Lithium Resources, Extraction Technologies, Technological Advancements, Industrial Challenges, Development Trends

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景与意义

全球能源转型加速推动新能源产业扩张,锂离子电池需求呈爆发式增长[1]。据国际能源署(IEA)统计,2030 年全球锂需求将达 2020 年的 10 倍以上,2040 年或突破 500 万吨/年(以 Li_2O 计) [2]。锂资源作为“白色石油”,其供给能力直接决定新能源产业竞争力。然而,全球锂矿资源分布不均(南美“锂三角”占盐湖锂储量 60%,澳大利亚占硬岩锂产量 70%),且不同类型锂矿提取技术差异显著,部分技术存在效率低、污染大、成本高等问题。因此,系统研究锂矿提取技术进展与趋势,对突破资源开发瓶颈、保障能源安全、推动“双碳”目标落地具有重要理论与实践意义。

1.2. 国内外研究现状

国际上,美国、澳大利亚等国聚焦盐湖提锂技术升级(如直接锂提取 DLE 技术商业化)与硬岩提锂低碳工艺(如澳大利亚 Orocobre 公司高压酸浸项目) [3];中国作为锂消费大国,近年在黏土提锂(江西原位开采试验)、盐湖高镁锂比分离(青海吸附-膜联用技术)领域取得突破[3],但仍面临低品位资源开发难、核心材料(如高性能锂离子筛)依赖进口等问题。现有研究多侧重单一技术优化,缺乏对三类锂矿技术的系统对比与共性挑战分析,且对技术与产业、政策的协同性探讨不足[4]。

1.3. 研究内容与方法

本文以“资源-技术-挑战-趋势”为逻辑主线,研究内容包括:全球锂矿资源分布与储量特征;

卤水型、硬岩型、黏土型锂矿提取技术原理与应用进展；技术面临的多维挑战；未来发展方向。研究方法采用：① 文献研究法，梳理近 10 年国内外核心文献(含 20 篇关键技术文献)，凝练技术演进规律；② 案例分析法，选取典型项目(如青海盐湖、四川伟晶岩矿)验证技术实效；③ 对比分析法，从效率、成本、环保维度量化技术差异。

2. 全球锂矿资源分布与储量

2.1. 主要锂矿资源类型及特征

全球锂矿资源按赋存形态分为三类，核心特征决定提取技术路径(表 1)：

卤水型锂矿：赋存于盐湖、地下卤水，占全球锂资源总量 60%以上，具有成本低(约 3 万元/吨 Li_2CO_3)、资源量大的优势，但高镁锂比(部分盐湖 $\text{Mg/Li} > 50$)导致分离难，且受气候影响大(依赖蒸发)；

硬岩型锂矿：以伟晶岩中的锂辉石、锂云母为主，占全球产量 70%，品位高(Li_2O 1.5%~8%)、技术成熟，但传统工艺能耗高(10 吨标煤/吨锂)、固废量大(100~150 吨/吨锂)；

黏土型锂矿：锂赋存于蒙脱石晶格，全球储量超 2000 万吨(Li_2O)，分布广(中国江西、美国内华达)，但品位低(0.3%~0.8%)、赋存复杂，提取技术仍处于研发阶段。

Table 1. Main types of global lithium resources and their core characteristics

表 1. 全球主要锂矿资源类型及核心特征

资源类型	储量占比	主要矿物/形态	锂品位(Li_2O)	核心优势	关键制约因素
卤水型	60%~65%	盐湖/地下卤水	0.02%~0.15%	成本低、资源量大	高镁锂比、气候依赖强
硬岩型	5%~10%	锂辉石、锂云母	1.5%~8%	品位高、技术成熟	能耗高、固废量大
黏土型	25%~30%	锂蒙脱石	0.3%~0.8%	储量大、露天开采	赋存复杂、浸出效率低

2.2. 全球锂矿资源分布格局

全球锂矿资源呈现“集中化、区域差异化”[5]特征：

美洲地区：南美“锂三角”(智利阿塔卡马、阿根廷翁布瓦巴、玻利维亚乌尤尼)是盐湖锂核心产区[6]，智利阿塔卡马盐湖锂储量超 2000 万吨，采用太阳池蒸发 + 沉淀法提锂，产能占全球盐湖锂的 40%；美国内华达黏土锂矿储量约 500 万吨，雅宝公司开展焙烧 - 浸出试验；

大洋洲：澳大利亚是硬岩锂主产国，格林布什锂矿(锂辉石)年产锂精矿超 100 万吨，采用传统焙烧 - 酸浸工艺[5]；

亚洲地区：中国锂资源储量居全球第六(表 2)，盐湖锂集中于青海(察尔汗、大柴旦)、西藏(扎布耶)，硬岩锂分布于四川(甲基卡)、江西(宜春)，黏土锂以江西宜春为核心；此外，中国锂云母资源丰富(占全球 70%)，但提取难度大[7]。

Table 2. Distribution of global lithium resources (brine, hard rock, clay) and major production projects

表 2. 全球锂资源(卤水、硬岩、黏土)分布及主要生产项目

序号	国家	Li_2O 资源量(含储量) 万 t	全球占比	主要资源类型	开发状态/特点
1	阿根廷	2300 万	20%	卤水型(盐湖)	积极开发中，外资合作活跃
2	玻利维亚	2300 万	20%	卤水型(盐湖)	开发程度低，技术合作需求大
3	美国	1955 万	17%	黏土型 + 卤水型	内华达黏土矿重点开发成熟产区，国有化政策影响

续表

4	智利	1150 万	10%	卤水型(盐湖)	
5	澳大利亚	920 万	8%	硬岩型(锂辉石)	全球最大硬岩锂生产国
6	中国	690 万	6%	多元化(盐湖 + 硬岩 + 黏土)	盐湖提锂技术进步显著
7	加拿大	575 万	5%	硬岩型+卤水型	新兴产区，勘探活跃
8	德国	345 万	3%	卤水型	欧洲本土资源潜力
9	刚果	345 万	3%	硬岩型	基础设施待完善
10	墨西哥	69 万	0.6%	黏土型	早期勘探阶段
11	捷克	57.5 万	0.5%	硬岩型	历史矿区，重启勘探
12	塞尔维亚	46 万	0.4%	硬岩型(锂辉石)	项目开发受环保争议
13	其他	747.5 万	6.5%	多元化	分散资源，逐步开发
合计		11500 万	100%		

2.3. 储量动态变化及影响因素

全球锂矿探明储量从 2010 年的 1300 万吨增至 2023 年的 3.9 亿吨(Li₂O) [8]，增长主因：① 勘探技术进步(如无人机航测、重力勘探)发现新矿床(如阿根廷 Rincon 盐湖)；② 市场需求驱动，高锂价刺激资源勘探投入；③ 技术升级使低品位资源(如黏土锂)纳入可采储量。但储量稳定性受政策影响显著，如智利 2023 年出台锂矿国有化政策，导致部分企业减产，短期影响全球供给格局[9]。

3. 主要锂矿资源提取技术进展

3.1. 卤水提锂技术

卤水提锂技术按原理分为沉淀法、溶剂萃取法、膜分离法、吸附法(图 1)，近年向“高效分离、低耗环保”升级。

3.1.1. 沉淀法

沉淀法是传统工艺，原理为：通过蒸发浓缩卤水(自然蒸发或强制蒸发)，使 Li⁺浓度提升至 10~30 g/L，再加入 Na₂CO₃ 生成 Li₂CO₃ 沉淀。适用于低镁锂比(Mg/Li < 10)卤水，智利阿塔卡马盐湖 2023 年平均 Mg/Li ≈ 6.4，盐田段 Li₂CO₃ 回收率 68%~72% [10]。生产周期 9~12 个月②高镁锂比卤水需先除镁(加 Ca(OH)₂)，锂损失率超 20%，如中国青海盐湖早期采用该工艺，成本增至 3.5 万元/吨[8]。

3.1.2. 溶剂萃取法

原理为：利用萃取剂(如磷酸二丁酯、β-二酮类)在有机相和水相间的分配差异，选择性萃取 Li⁺，再通过反萃剂(如盐酸)回收 Li⁺。适用于中高浓度卤水(Li⁺ > 1 g/L)，美国 DOW 化学公司在阿根廷盐湖应用该技术，锂回收率 85%~90%，Mg/Li 降至 1 以下[11]。但缺点明显：① 萃取剂毒性大(如磷酸酯类)，溶剂损失率 0.5~1 kg/吨卤水，环保风险高；② 设备投资大(萃取塔、分离罐)，成本 3.8~4.2 万元/吨，难以大规模推广[12]。

3.1.3. 膜分离法

基于膜的选择性透过性实现锂镁分离，分为电渗析、纳滤膜、反渗透三类：

电渗析法：利用离子交换膜对 Li⁺、Mg²⁺的选择透过性，在外加电场作用下实现分离，中国西藏扎布耶盐湖应用该技术，锂回收率 77%，直流电耗 450 kWh·t⁻¹ Li₂CO₃ [13]。

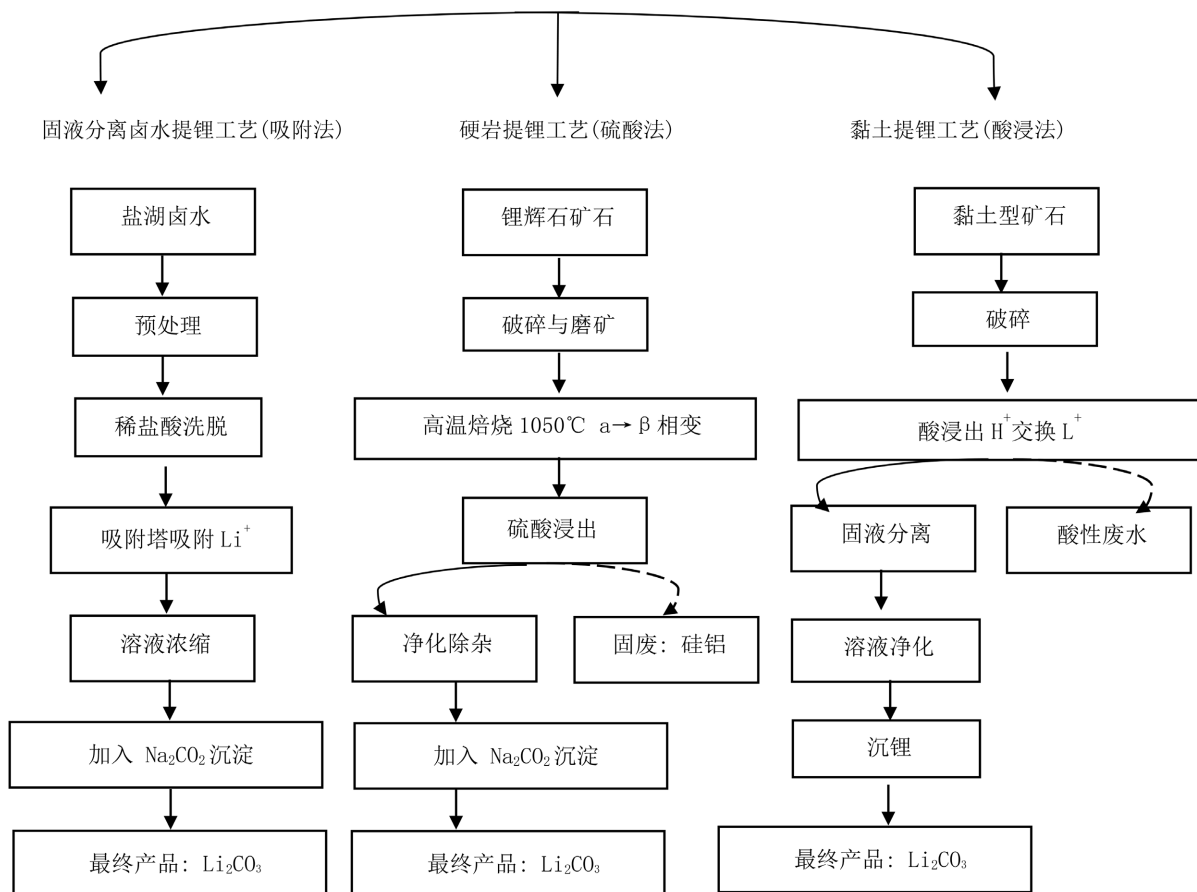


Figure 1. Typical extraction process flowchart of lithium resources

图 1. 锂矿资源典型提取工艺链流程图

纳滤膜法: 截留 Mg^{2+} (二价离子), 允许 Li^+ (一价离子) 透过, 以色列 Sorek 公司新型纳滤膜在 $\text{Mg}/\text{Li} = 50$ 的卤水中, 锂渗透率 90%、镁截留率 95%, 但膜污染导致通量下降 30% (运行 3 个月) [14], 需定期清洗;

反渗透法: 通过高压浓缩卤水, 减少蒸发量, 适用于高海拔盐湖(如西藏), 可缩短生产周期至 3~4 个月 [15], 但能耗高(800~1000 kWh/吨 Li_2CO_3), 成本 3.2~3.6 万元/吨。

3.1.4. 吸附法

利用锂离子筛(如 MnO_2 基、钛酸锂基材料)对 Li^+ 的选择性吸附, 原理为: 吸附剂在卤水中吸附 Li^+ , 再用稀盐酸洗脱得到高浓度 Li^+ 溶液(5~10 g/L)。该技术适用于高镁锂比($\text{Mg}/\text{Li} > 30$)卤水, 中国青海大柴旦盐湖采用 MnO_2 锂离子筛, 锂回收率 85%~90%, Mg/Li 降至 0.5 以下, 成本 2.8~3.2 万元/吨, 是当前国内盐湖提锂主流技术。近年研究聚焦吸附剂改性, 如目前工业级 MnO_2 吸附容量 28~35 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 实验室 Al^{3+} 掺杂后可达 42 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ [16], 但循环寿命仍限制在 80~100 次。已在青海中试项目验证。

3.2. 硬岩(伟晶岩)锂矿提取技术

伟晶岩型锂矿因品位高(Li_2O 1.0%~2.5%)、储量大、分布集中(如澳大利亚格林布什、中国甲基卡)而占据全球锂资源供给的主导地位 [17]。然而, 传统硫酸法能耗高、固废量大, 石灰石烧结法回收率低, 已难以满足“双碳”战略下绿色低碳发展的需求 [18]。因此, 系统梳理伟晶岩型锂矿的提取技术现状, 对推

动我国锂资源安全与产业升级具有重要现实意义(表 3)。

Table 3. Comparison of main extraction technologies for pegmatite-type lithium ore
表 3. 伟晶岩型锂矿主要提取技术对比

工艺	核心流程/条件	主要优点	主要缺点
硫酸法	1050℃ 相变→250℃~300℃ 硫酸化焙烧→浸出→净化→沉锂	工艺成熟、扩产快、回收率高	高能耗、高酸耗、设备腐蚀、固废量大
氯化法	约 900℃ 与 CaCl ₂ 共焙烧→挥发 LiCl 冷凝回收→电解	流程短、试剂廉价、可得高纯金属锂	炉气腐蚀性强、LiCl 收集难、材质要求高、未规模化
石灰石烧结法	1000℃~1200℃ 与 CaCO ₃ 共烧→溶出→碳化沉锂	步骤简单、成本低	回收率低、焙烧周期长、固废体积大、蒸发能耗高
高压酸浸法	150℃~250℃、2~3 MPa 硫酸直接浸出，无需焙烧	能耗降低 60%、回收率高、废气废渣显著减少	设备投资高、高压防腐要求严、除杂复杂
生物浸出法	30℃、pH ≈ 2，氧化亚铁硫杆菌代谢产酸浸出	能耗极低、环境友好	浸出周期长、微生物耐 Li ⁺ 上限低、尚处试点阶段

3.2.1. 硫酸法

硫酸法是锂辉石提锂主流工艺，流程为：① 高温焙烧(1050℃)使 α -锂辉石相变生成 β -锂辉石(结构疏松)；② 用浓硫酸浸出(250~300℃)，进行硫酸化焙烧，使锂转化为可溶性 Li_2SO_4 ，再经过浸出得到 Li_2SO_4 溶液；③ 净化除杂(加入石灰粉来中和过量的 Li_2SO_4 ，并且调节 pH 至中性，来除去浸出液中的 Fe、Ca 和 Mg 等杂质)；④ 沉锂(加 Na_2CO_3 生成 Li_2CO_3)。其优势在于工艺成熟、生产周期、扩产周期都较短、回收率高(85%~90%)，已在中国四川、澳大利亚 Greenbushes、加拿大 Tanco 等矿山实现万吨级规模应用 [19] [20]；澳大利亚格林布什锂矿采用该工艺，年产 Li_2CO_3 12 万吨，锂回收率 88%~92%。但缺点突出：① 综合能耗 1500~1800 $\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$ 精矿， CO_2 排放 8.0~8.5 $\text{t}\cdot\text{t}^{-1}$ Li_2CO_3 。② 硫酸用量大(1.5 吨/吨矿)，设备腐蚀严重(需钛合金反应釜)；③ 固废(硅铝渣)产生量 120 吨/吨锂，堆存占用土地。

3.2.2. 氯化法

利用钾、钠、铵或钙的氯化物作为氯化剂，将矿石中的锂及其他有价金属转化为氯化物气体，继而通过分馏技术分离并收集氯化锂，以最终提取金属或其化合物。将锂辉石与氯化钙混合焙烧(温度为 900℃ 左右)，生成 LiCl(挥发性)，通过冷凝回收 LiCl，再电解制备金属锂。此工艺虽具有流程简单、试剂廉价的优点，但因反应炉气腐蚀性极强，故对氯化锂气体的收集与分离技术和设备要求非常高，且焙烧产生 Cl_2 气体(需尾气处理)，仅用于高纯度金属锂生产(如电池级锂)，未大规模推广 [19]。

3.2.3. 石灰石烧结法

石灰石烧结法通过将低品位锂辉石与 CaCO_3 在 1000℃~1200℃ 高温共烧，使锂以 LiAlSiO_4 形式转化为可溶性 LiOH，随后碳化沉淀获得 LiCO_3 。石灰法步骤简单，适用性强，但浸出液中锂含量回收率较低、焙烧法能耗较高，最终提锂回收率较低；此外，大量 CaCO_3 的加入使得固废体积进一步增加，蒸发能耗大，锂的回收率低，设备维护困难 [20]。中国江西宜春某项目采用该工艺，锂回收率 75%~80%，优点是资源利用率高(同步回收 K_2CO_3)，但焙烧周期长(4~6 小时)，能耗 600 $\text{kWh}/\text{吨矿}$ ，成本 3.8~4.2 万元/吨 Li_2CO_3 。

3.2.4. 新型低碳工艺

近年硬岩提锂聚焦高压酸浸与生物浸出：

高压酸浸法: 在 150℃~250℃、2~3 MPa 条件下, 用硫酸直接浸出锂辉石, 无需焙烧, 能耗降低 60% (480 kWh/吨矿), 锂回收率 90%, 澳大利亚 Orocobre 公司应用该技术, 成本降至 3.2 万元/吨 Li_2CO_3 , 但设备投资高(比传统工艺多 30%) [21]; 酸法提锂具有高回收率的优势, 但是整体难, 锂易被混盐夹带, 且流程中产生废气和大量废工艺流程复杂, 成本高, 生产过程中杂质高, 除杂困渣污染环境。

生物浸出法: 利用氧化亚铁硫杆菌代谢产生的 H_2SO_4 溶解 Li^+ , 实验室条件下(30℃, pH=2)锂云母浸出率 75%, 能耗仅 100 kWh/吨矿, 环保性强, 但浸出周期长(15 天), 微生物耐高 Li^+ 能力弱($\text{Li}^+ > 2 \text{ g/L}$ 时活性下降 40%), 中国科学院团队通过基因改造微生物, 将周期缩短至 10 天, 浸出率提升至 80% [22], 进入小试阶段。

3.3. 黏土提锂技术

黏土提锂技术仍处于研发阶段, 核心是破坏黏土矿物结构、分离 Li^+ 与杂质, 主流技术为酸浸法、焙烧水浸法、焙烧离子交换浸出法、原位开采法、外电场强化、超声波强化(表 4)。

3.3.1. 酸浸法

酸浸出法是指在黏土型锂矿中直接添加酸作为浸出剂而提取锂的工艺。酸浸出法通过酸溶液破坏黏土型锂矿的晶体结构, 酸溶液中的 H^+ 与黏土型锂矿中的 Li^+ 发生离子交换, 使锂以可溶性盐(如 Li_2O_4) 的形式转移至溶液中, 并通过后续处理实现锂的提取[23]。

3.3.2. 焙烧水浸法

焙烧水浸法是指在矿石中加入一定量的助焙剂并焙烧, 随后用水进行浸出的方法, 其常见的助焙剂碳酸盐、氢氧化物、氯化物、石灰石等天然原料或工业副产品。其中石灰石石膏作为助焙剂氧化效果最好[24]。

3.3.3. 焙烧离子交换浸出法

焙烧离子交换法是先将样品进行焙烧, 然后加入盐溶液或酸, 使其在盐溶液或酸性溶液中与其他离子交换锂来提取锂。在浸出和焙烧过程中, 高岭石层状结构没有受到破坏。在焙烧过程中, 高岭石转变为偏高岭石。在浸出过程中, 高岭石表面的 Al-O 结构被破坏, Li^+ 被 H^+ 离子取代而被浸出。

3.3.4. 原位开采法

近年来, 王高峰等人提出了一种直接从离子吸附型矿物中提取稀土的方法, 即电动开采技术。主要利用提取剂将矿物中呈离子吸附态的稀土交换到溶液或水膜中, 此外提取剂还可提高土壤体系的导电性。随后在电动现象作用下将稀土离子定向移动到电极端元从而实现富集[25]。

3.3.5. 外电场强化

利用脉冲电压提取锂是在黏土型锂矿两侧设立阳极区和阴极区, 向阳极区插入阳极, 向阴极区插入阴极; 并在阳极区附近加入插层剂, 然后向设定的阳极和阴极施加脉冲电压(脉冲占比为 30%~90%), 利用形成的外电场(电场强度 0.1~5.0 V/cm)驱动黏土型锂矿层间域中的锂离子沿电场方向迁移, 逐步脱离载体矿物颗粒, 进入溶液并富集于设有收集剂的阴极区。所述插层、收集剂为溶液、凝胶、固体中的一种或几种[26]。

3.3.6. 超声波强化

超声波强化是将黏土型锂矿破碎、球磨得到矿粉(0.031~0.15 mm), 将矿粉与锂离子交换液(浓度为 1~4 mol/L 的氯化物溶液)混合制备成浆料, 对液固比 2~10 的浆料进行超声强化(超声工作频率 20~25 kHz)浸出锂, 固液分离得锂提取液及浸出渣(锂浸出率为 90%), 然后用萃取剂对锂提取液进行萃取得锂负载有机相和萃余液。采用反萃剂对负载有机相进行反萃, 得到富锂溶液及反萃有机相, 再对富锂溶液进行除油

净化处理得到氯化锂溶液。

Table 4. Main processes for lithium extraction from clay-type lithium ore
表 4. 粘土型锂矿提锂主要工艺

工艺名称	优点	缺点
酸浸法	效率高、成本低、流程简单	杂质多、腐蚀设备、环保风险高
焙烧 - 水浸法	回收率高、环保性好、助剂来源广	能耗高、杂质引入、工艺复杂
焙烧 - 离子交换法	浸出率高、适用性广	能耗高、时间长、后续处理复杂
原位开采技术	高效、环保、成本低、无需挖掘	仅适用于吸附型锂、技术尚未成熟
外电场强化	绿色环保、工艺简单、矿石结构破坏小	仅适用于离子吸附型锂、技术成熟度可能不高
超声波强化	提取效率高、速率快、缩短反应时间	仅适用于离子吸附型锂、能耗与设备成本较高

3.4. 新兴技术探索

在全球“双碳”目标推动及低品位锂资源开发需求加剧的背景下，传统单一提取技术已难以同时满足效率提升、成本控制与环保合规的多重要求，开发并应用新兴提锂技术成为突破当前锂资源开发瓶颈、保障新能源产业链安全的关键方向。为系统厘清各类新兴技术的发展现状、核心特性与应用潜力，下文通过两个表格展开具体分析：其一从技术成熟度、环保性/成本效益及适配资源类型等维度，对主流新兴技术的综合性能进行量化与对比(表 5)；其二聚焦跨类型技术协同应用场景，梳理不同技术组合在资源适配性与效率优化方面的优势(图 2)，以为后续锂矿提取技术路线的科学选择、工艺改进及产业化落地提供数据支撑与决策参考。

Table 5. Evaluation of technical maturity and environmental friendliness of main lithium ore extraction technologies
表 5. 主要锂矿提取技术的技术成熟度与环境友好性评估

技术名称	技术成熟度	环保性/成本效益	技术类型	系列号
卤水 - 沉淀法	0.85	0.45	卤水型	1
卤水 - 吸附法	0.80	0.80	卤水型	1
卤水 - 膜分离	0.70	0.70	卤水型	1
硬岩 - 硫酸法	0.90	0.30	硬岩型	2
硬岩 - 高压酸浸	0.60	0.65	硬岩型	2
硬岩 - 生物浸出	0.30	0.75	硬岩型	2
黏土 - 酸浸法	0.35	0.50	黏土型	3
黏土 - 原位开采	0.20	0.80	黏土型	3
直接锂提取(DLE)	0.55	0.85	新兴技术	4
电化学提锂	0.25	0.70	新兴技术	4

3.4.1. 直接锂提取(DLE)技术

DLE 技术无需蒸发浓缩，直接从低浓度卤水($\text{Li}^+ < 0.1 \text{ g/L}$)中提取 Li^+ ，分为吸附型、膜型、萃取型三类。美国 IBAT 公司开发的吸附型 DLE 技术，在犹他州盐湖应用，锂回收率 85%，生产周期缩短至 1~2 个月，成本 3 万元/吨[27]，较传统沉淀法降低 20%；加拿大 E3 Lithium 公司膜型 DLE 技术，锂回收率

90% [28], 已实现商业化试点(产能 1000 吨/年)。DLE 技术适用于高纬度、低蒸发量盐湖(如加拿大萨斯喀彻温省盐湖), 突破传统蒸发法对气候的依赖, 未来有望成为盐湖提锂主流方向之一。

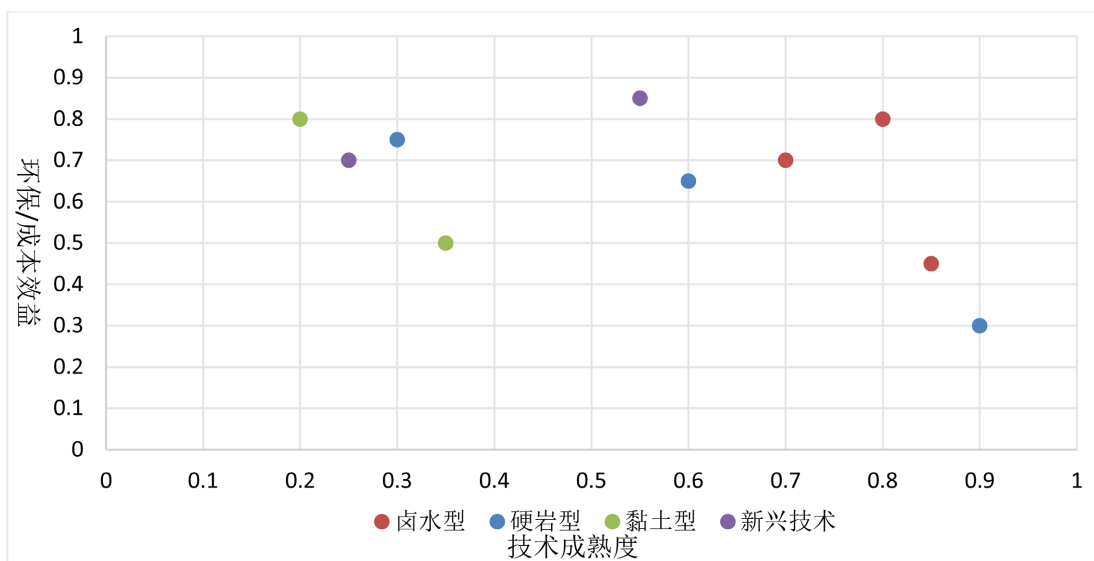


Figure 2. Matrix diagram of lithium extraction technology maturity-environmental protection/cost

图 2. 锂提取技术成熟度 - 环保/成本矩阵图

3.4.2. 生物提锂技术

生物提锂利用微生物(细菌、真菌)的代谢活动溶解锂矿物, 分为直接作用(微生物分泌有机酸溶解 Li^+)与间接作用(微生物氧化硫化矿生成硫酸溶解 Li^+)两类。目前研究集中于锂云母与黏土矿提锂:

细菌提锂: 氧化亚铁硫杆菌在 30°C 、 $\text{pH} = 2.0$ 条件下, 可通过氧化 FeS_2 生成 H_2SO_4 , 对锂云母的浸出率达 75%, 但浸出周期长达 15 天, 且高浓度 Li^+ ($>2 \text{ g/L}$) 会抑制细菌活性;

真菌提锂: 黑曲霉分泌的柠檬酸、草酸可直接溶解黏土矿中的 Li^+ , 中国矿业大学试验显示, 在液固比 10:1、 30°C 条件下浸出 7 天, 黏土矿锂浸出率达 68%, 且真菌对杂质离子(Al^{3+} , Fe^{3+})吸附能力弱, 后续净化成本低[29]。

生物提锂具有能耗低($100\sim 200 \text{ kWh/吨矿}$)、环保性强(无废气排放)的优势, 但目前仍处于实验室与小试阶段, 规模化应用需突破“浸出周期长、微生物耐受性差”两大瓶颈。

3.4.3. 电化学提锂技术

电化学提锂基于电极对 Li^+ 的选择性吸附与脱附, 原理为: 在含 Li^+ 溶液中, 通过施加电压使 Li^+ 嵌入电极材料(如 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$), 再反向通电实现 Li^+ 脱附, 得到高浓度 Li^+ 溶液。该技术适用于低浓度卤水($\text{Li}^+ < 0.5 \text{ g/L}$), 德国马普研究所开发的新型电极材料, Li^+ 吸附容量达 50 mg/g , 脱附率超 95%, 能耗 $300 \text{ kWh/吨 Li}_2\text{CO}_3$, 成本预计 3.5 万元/吨。但电极材料制备复杂(需纳米级合成), 且长期使用易出现容量衰减(循环 100 次后容量下降 15%), 尚未进入中试阶段。

4. 锂矿资源提取技术面临的挑战

4.1. 技术瓶颈: 效率与适配性不足

4.1.1. 低品位资源提取效率低

全球已探明的锂资源中, 大量属于低品位资源, 例如盐湖卤水锂离子浓度低于 0.05 g/L , 以及锂氧化

物品位低于 0.5%的黏土型锂矿。针对这类资源,现有提锂技术的效率普遍不高。以盐湖卤水提锂为例,沉淀法、膜法、萃取法、盐梯度太阳池法、吸附法等盐湖提锂技术有所应用,但对于低锂浓度的卤水,其回收效率和生产周期仍面临挑战[30]。

4.1.2. 技术适配性差

不同类型的锂矿(如硬岩锂矿、盐湖卤水、黏土锂矿)因其矿物组成、化学性质及赋存条件的显著差异,对提取技术提出了不同要求。一种高效的提锂技术往往仅适用于特定类型的锂矿,难以普适。例如,某些高效处理盐湖卤水的技术,在应用于硬岩锂矿时可能效果不佳甚至完全无效。单一技术难以覆盖不同类型锂矿:吸附法在高镁锂比盐湖($Mg/Li > 50$)中效率高,但在低锂浓度卤水中吸附容量骤降(从 45 mg/g 降至 20 mg/g);硫酸盐焙烧法适用于锂辉石,但对锂云母(含钾、氟杂质)浸出时,酸耗增加、杂质含量高、回收率低的问题,且氟离子会腐蚀设备[19];原位开采法仅适用于浅层黏土矿(埋深 < 50 米),深层矿(埋深 > 100 米)钻孔成本高,经济性不足。

4.1.3. 核心技术与材料依赖进口

在锂矿提取技术的核心环节,如高性能吸附剂、特种分离膜、高效萃取剂等关键材料和核心装备方面,我国在一定程度上仍依赖进口。我国锂资源消费占全球 52% [31],是第一大消费国,尽管我国锂资源丰富,但供应能力较弱,对外依存度高达 80%,供应体系存在安全隐患,一旦西方国家对我国进行锂封锁,锂资源的过度紧缺将有可能影响到我国的经济发展安全[32]。这不仅增加了生产成本,也对产业链供应链安全构成潜在风险。

4.2. 成本压力:全产业链经济性失衡

4.2.1. 原材料与能耗成本高

锂矿提取过程通常需要消耗大量的化学试剂(如酸、碱)和能源(如电力用于破碎、研磨、加热、溶液输送等)。特别是对于低品位矿石或成分复杂的卤水,试剂消耗和能耗更高,直接提高了生产成本[33]。

4.2.2. 环保处理成本激增

除了传统的政治、军事、经济等安全,资源保障安全已经成为现今各国发展的新需求,尤其是战略性矿产资源,加上全球气候变暖和我国“碳达峰与碳中和”的重大战略目标,国家经济发展将朝向绿色清洁的低碳化方向转型[32]。随着环保法规日益严格,锂矿提取过程中产生的废水、废渣、废气治理标准不断提高,相应的环保投入和运营成本显著增加[33]。例如,含重金属废水深度处理、尾矿库安全与防渗、蒸发池管理等环节都带来了巨大的成本压力。

4.2.3. 规模效应不足

对于一些新兴的提锂技术或适用于特定类型锂矿的技术,由于其尚处于产业化初期或应用范围有限,难以形成大规模生产,导致单位产品的固定资产投资折旧、人工成本等固定成本较高,缺乏规模经济效应。

4.3. 环境风险:生态破坏与污染隐患

4.3.1. 土地与水资源占用

土地占用:硬岩矿露天开采需剥离地表植被,澳大利亚格林布什锂矿开采区占地超 100 平方公里,植被恢复周期超 20 年;盐湖提锂蒸发池需占用大面积盐碱地,青海某盐湖项目蒸发池占地 50 平方公里,导致局部区域地下水补给减少 15%。

水资源消耗:硬岩矿酸浸法每吨矿需用水 10 吨,四川甲基卡锂矿年用水量超 500 万立方米,对周边牧区水资源造成压力;黏土矿原位开采法需注入大量浸出剂溶液,江西试验项目单井用水量 1000 立方米

/天, 长期开采可能导致地下水位下降。

4.3.2. 污染物排放

废气排放: 硬岩矿高温焙烧产生 SO_2 (浓度 500~800 mg/m^3), 需脱硫处理, 若处理不当会导致酸雨; 黏土矿碱熔-沉淀法焙烧产生 Na_2O 粉尘(排放浓度 100~200 mg/m^3), 对周边空气造成污染。

废水与固废污染: 黏土矿酸浸法产生的酸性废水($\text{pH}=1\sim2$)若直接排放, 会导致土壤酸化; 硬岩矿固废(硅铝渣)含氟、磷等杂质, 长期堆存可能导致重金属渗入土壤, 青海某矿区周边土壤氟含量超标 2 倍。

4.4. 政策与市场制约: 外部环境不确定性

4.4.1. 政策法规限制

资源管控加强: 智利 2023 年实施锂矿国有化政策, 要求外资企业与政府成立合资公司, 且政府持股比例不低于 51%, 导致雅宝、SQM 等企业减产, 全球盐湖锂供给减少 10%; 中国对锂矿实施“配额制”开采, 2023 年硬岩锂矿开采配额较 2022 年减少 5%, 限制部分高能耗项目产能。

环保标准提升: 欧盟《新电池法规》要求 2027 年起, 电池生产所用锂需满足“碳足迹 $\leq 50 \text{ kg CO}_2\text{eq}/\text{kg}$ 锂”, 而中国硬岩矿传统工艺碳足迹达 8 吨 CO_2 /吨 Li_2CO_3 , 需技术升级才能符合出口要求; 美国《通胀削减法案》对“北美本土提取的锂”给予税收优惠, 歧视进口锂资源, 增加中国锂产品出口成本。

4.4.2. 市场价格波动

锂价剧烈波动影响技术商业化进程: 2022 年锂价峰值达 50 万元/吨 Li_2CO_3 , 刺激高成本技术(如黏土矿碱熔法)投入研发; 2023 年锂价回落至 15 万元/吨, 部分高成本项目(如生物提锂小试项目)因利润空间消失暂停; 长期来看, 若锂价持续低于 20 万元/吨, 将制约低碳技术(如高压酸浸、DLE)的规模化投入, 延缓技术升级进程。

4.4.3. 产业链协同不足

锂矿提取与下游电池产业衔接不畅: 电池企业对锂产品纯度要求提升(如电池级 Li_2CO_3 纯度需 $\geq 99.5\%$), 但部分提取技术(如黏土矿酸浸法)产品纯度仅 98%, 需额外提纯, 成本增加 10%; 锂矿企业与研发机构合作松散, 澳大利亚 Orocobre 公司高压酸浸技术从实验室到工业化用了 8 年, 远超预期, 主要因缺乏与设备制造企业的协同研发, 导致设备适配性问题频发。

4.5. 关键外部因素对技术路线选择的影响: 基于“政策-市场-技术”联动框架的分析

锂矿提取技术的演进与商业化应用并非孤立的技术进程, 而是深受政策导向与市场波动的双重塑造。单一的效率或成本指标已不足以评判技术的优劣, 必须将其置于“政策-市场-技术”的联动框架下, 分析关键外部变量如何动态改变不同技术路线的成本效益与商业吸引力。

4.5.1. 政策法规的“指挥棒”效应: 碳壁垒重构成本结构

全球严格的环保政策正成为技术选择的“指挥棒”。以欧盟《新电池法规》(碳足迹 $\leq 50 \text{ kg CO}_2\text{eq}/\text{kg}$)为例, 其与传统硫酸法高达 8~8.5 $\text{t CO}_2/\text{t Li}_2\text{CO}_3$ 的碳足迹形成尖锐矛盾[2][9]。这意味着传统工艺产品将面临高昂的碳边境税, 成本优势被大幅削弱。反之, 高压酸浸、生物浸出等低碳技术虽前期投资较高, 却因规避了“碳成本”罚金而获得显著的“绿色溢价”。政策压力正将碳排放内化为核心成本, 加速资本从高碳工艺向低碳技术转移。

4.5.2. 市场价格波动的“筛选器”作用: 划定技术商业化的经济门槛

锂价波动构成了新兴技术的“经济筛选器”。在高位(>30 万元/吨), 丰厚利润为黏土提锂、生物提锂

等高成本技术打开了试验窗口。在中位(15~30 万元/吨),具备初步成本竞争力的吸附法、高压酸浸法等开始对传统工艺形成替代,而更高成本的技术则推进困难。一旦进入低位(<15 万元/吨),生存成为首要目标,绝大多数新兴技术的研发与投资因无法与传统工艺的现金成本竞争而陷入停滞[8][11]。2022 年高锂价刺激研发与 2023 年价格回落导致项目暂停的现象,即是明证。

5. 锂矿资源提取技术的未来趋势

5.1. 绿色低碳化：降低全生命周期碳排放

5.1.1. 工艺低碳革新

未来提锂技术将更加注重绿色低碳发展。研究方向包括：硬岩提锂推广高压酸浸法，替代传统焙烧法，碳排放减少；盐湖提锂结合光伏供电，开发低能耗或利用可再生能源(如太阳能、风能)的提锂工艺；优化现有工艺以减少化学品消耗和废弃物产生，废弃物循环再利用，降低对环境的影响；探索低温、常压等温和条件下的提取方法，从而降低整个生命周期的碳排放和环境足迹。

5.1.2. 碳捕捉与利用

锂矿提取项目配套碳捕捉设施，硬岩矿焙烧窑加装胺法碳捕捉装置，CO₂ 捕捉率超 90%，捕捉的 CO₂ 可用于盐湖提锂(促进 Li₂CO₃ 沉淀)，形成“碳循环”；中国江西某黏土矿项目试点“碳捕捉-生物固碳”模式，将捕捉的 CO₂ 用于微藻培养，微藻分泌物可辅助浸出 Li⁺，实现碳减排与提锂效率双提升。

5.2. 多技术耦合化：发挥协同优势

5.2.1. 跨类型锂矿技术融合

未来技术发展可能会打破锂矿类型的界限，探索将适用于不同资源类型的技术进行交叉融合。例如，借鉴盐湖提锂的某些单元技术用于优化硬岩锂矿或黏土锂矿的提取过程，或者利用数种技术的优点组合成全新的 Hybrid 工艺。

5.2.2. 单一矿种多技术联用

针对同一种锂矿资源，特别是复杂难处理的资源，采用两种或多种提锂技术联用的模式将成为重要方向。通过技术联用，可以扬长避短，提高锂的回收率、产品纯度，并可能降低综合成本。例如，“吸附+膜分离”、“焙烧+浸出+萃取”等组合工艺已被研究和应用。

5.3. 资源综合利用化：提升附加值

5.3.1. 伴生元素回收

盐湖卤水锂矿，通常共伴生有钾、钠、镁、硼、铷、铯等多种有价值的元素。除提锂外，回收 Mg(制备 Mg(OH)₂ 阻燃剂)、K(制备钾肥)、B(制备硼酸)；锂辉石矿提锂后，硅铝渣制备建筑材料(如轻质隔墙板)、陶瓷原料；锂云母矿回收 Rb、Cs(稀有金属，用于电子元件)。未来的趋势是从简单的提锂转向资源的综合高效利用，即在提取锂的同时，回收利用其他有价组分。这不仅能提升资源价值，摊薄生产成本，也能减少废弃物排放，符合循环经济理念。

5.3.2. 废弃物资源化

废水循环利用：黏土矿酸浸废水经中和、过滤后，用于浸出剂配制，循环利用率超 90%，江西项目年减少废水排放 100 万立方米；盐湖提锂反渗透浓水(含高浓度 Mg²⁺)用于制备 MgO，实现“零废水”排放。

固废高值化：硬岩矿固废(硅铝渣)通过高温烧结制备锂离子电池正极材料载体(如 Al₂O₃-SiO₂ 复合载体)，比表面积达 100 m²/g，可提升正极材料容量；中国科学院团队将黏土矿浸出残渣用于土壤改良(含天

然蒙脱石,可吸附重金属),试点区域土壤重金属去除率超 80%。

5.4. 智能化:优化生产与管理

5.4.1. AI 驱动工艺优化

将人工智能、大数据、物联网等智能化技术应用于锂矿提取过程是未来发展的重要趋势。通过建立工艺模型、实时数据采集与分析、机器学习优化算法等,可以实现生产过程的精准控制、故障预测与诊断、能耗与物耗优化、资源回收率提高等目标,最终提升生产效率和经济效益。

5.4.2. 数字孪生与智能装备

构建锂矿提取全流程数字模型,模拟不同工况下的生产效果,提前预判问题。硬岩矿开采采用无人采矿车(定位精度 ± 5 cm),浸出车间配备机器人巡检(检测精度 0.1 mg/L),盐湖提锂吸附塔安装智能传感器(实时监测吸附容量),提高生产效率。

5.4.3. 产业链智能协同

建立“锂矿-提取-电池”全产业链数据平台,实现信息共享:锂矿企业实时上传锂产品纯度、碳足迹数据,电池企业根据需求调整采购计划;澳大利亚 Orocobre 公司与特斯拉合作搭建该平台,锂产品交付周期缩短 30%,碳足迹追溯精度达 95%,符合欧盟《新电池法规》要求。

6. 结论

(1) 资源与技术现状:全球锂矿可分为卤水型、硬岩型和黏土型三种,其中卤水型可细分为盐湖型和地下卤水型,硬岩型可细分为伟晶岩型、花岗岩型和隐爆角砾岩型。盐湖型、硬岩型、地下卤水型和黏土型锂矿分别占全球锂矿资源的 58%、26%、6%和 10% [34]。分布呈现“美洲集中、亚洲分散”格局;提取技术方面,卤水提锂以吸附法、膜分离法为主流(锂回收率 85%~90%),硬岩提锂向高压酸浸、生物浸出转型(能耗降低 60%),黏土提锂仍处于研发阶段(原位开采法锂回收率 65%),新兴技术(DLE、电化学提锂)展现潜力但未规模化。

(2) 核心挑战:当前技术面临“技术-成本-环境-政策”四重制约,技术上低品位资源提取效率低、核心材料依赖进口;成本上原材料与环保投入高、规模效应不足;环境上面临土地占用与污染风险;政策市场上资源管控加强、锂价波动大,制约技术商业化进程。

(3) 未来趋势:绿色低碳化(碳足迹降至 1 吨 CO₂/吨 Li₂CO₃ 以下)、多技术耦合化(锂回收率超 95%)、资源综合利用化(伴生元素回收率 $\geq 90\%$)。

基金项目

本文为省级大学生创新创业训练项目(编号: S202411390033)。

参考文献

- [1] 窦立荣,刘化清,常德宽,等. 全球锂资源分布、产业现状和中国面临的挑战与对策[J]. 中国科学院院刊, 2025, 40(3): 494-510.
- [2] 杨卉芑,柳林,丁国峰. 全球锂矿资源现状及发展趋势[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(5): 26-40.
- [3] 刘丽君,王登红,刘喜方,等. 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, 2017, 44(2): 263-278.
- [4] 郑绵平,邢恩袁,张雪飞,等. 全球锂矿床的分类、外生锂矿成矿作用与提取技术[J]. 中国地质, 2023, 50(6): 1599-1620.
- [5] Haque, F., Zaman, M. and Chen, J. (2022) Global Lithium Resources and Sustainability Issues. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 528-546.

- [6] Flexer, V., Baspineiro, C.F. and Galli, C.I. (2018) Lithium Recovery from Brines: A Vital Raw Material for Green Energies with a Potential Environmental Impact in Its Mining and Processing. *Science of the Total Environment*, **639**, 1188-1204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.223>
- [7] Liu, T., Chen, J. and Li, H. (2019) Extraction of Lithium from Chinese Micatype Minerals: A Review. *Hydrometallurgy*, **187**, 1-10.
- [8] USGS (2024) Mineral Commodity Summaries: Lithium. U.S. Geological Survey.
- [9] S&P Global Market Intelligence (2023) Chile's Lithium Nationalization: Implications for Global Supply.
- [10] SQM (2023) Sustainability Report 2023.
- [11] 甘仁香, 侯昭飞, 李军霞, 等. 基于双极膜电渗析的盐湖卤水制备氢氧化锂研究进展[J]. 膜科学与技术, 2023, 43(3): 198-207+216.
- [12] Zhang, Y., Liu, X. and Wang, L. (2022) Solvent Extraction of Lithium from Salt Lake Brine: A Review. *Hydrometallurgy*, **208**, Article ID: 105786.
- [13] 王敏, 邓小川. 扎布耶盐湖电渗析法提锂工业试验[J]. 化工矿物与加工, 2021, 50(2): 1-5.
- [14] IDE Technologies (2022) NF90 Membrane for Lithium Selective Separation—White Paper.
- [15] Wang, J., Zhao, Z. and Zhang, T. (2020) Reverse Osmosis Pre-Concentration of Lithium Brine: Pilot Study. *Desalination*, **496**, Article ID: 114700.
- [16] 赵元元, 陈海峰, 刘云云, 等. 锰系锂离子筛的制备与改性的研究进展[J]. 无机盐工业, 2022, 54(2): 21-29.
- [17] 高一航. 西昆仑大红柳滩锂矿带含矿伟晶岩信息提取与方法研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2023.
- [18] 张亮, 杨卉芃, 柳林, 等. 全球提锂技术进展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(5): 24-31.
- [19] 赵海平, 刘志伟, 刘敬智, 等. 国内外提锂技术研究进展及应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(8): 39-50, 59.
- [20] 余亮良, 黄敏. 含锂资源提锂技术现状及研究进展[J]. 有色冶金设计与研究, 2024, 45(2): 5-9, 24.
- [21] Li, J., Wang, S. and Zhang, Y. (2023) Bioleaching of Lithium from Lepidolite by Engineered *A. Ferrooxidans*. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **11**, 3346-3355.
- [22] Lithium Americas Corp (2022) NI 43-101 Technical Report—Thacker Pass Project.
- [23] Lithium Americas Corp (2023) Bankable Feasibility Study Update.
- [24] IBAT (2023) Sevier Lake DLE Demonstration Plant Results. Press Release.
- [25] Kang, S., Ling, B., Liang, X., Wang, G., Xu, J., Xu, Y., *et al.* (2024) Recovery of Rare Earth Elements from Ion-Adsorption Deposits Using Electrokinetic Technology: The Soil Conductivity Mechanism Study. *Minerals*, **14**, Article 491. <https://doi.org/10.3390/min14050491>
- [26] He, L.H., Zhao, Z.W., Lei, Y.T., Sun, F.L., Liu, X.H., Chen, X.Y. and Li, J.T. (2021) Method for Efficiently Extracting Lithium from Clay-Type Lithium Ore by Using Pulse Voltage. Chinese Patent ZL 202110790768.X [Granted 2021-10-22].
- [27] E3 Lithium (2023) Investor Presentation—November 2023.
- [28] Zhao, L., *et al.* (2022) Fungal Leaching of Lithium from Clay Ores. *Bioresource Technology*, **343**, Article ID: 126114.
- [29] Wang, H., Kowalski, J. and Janek, J. (2022) Electrochemical Lithium Extraction with Insertion Electrodes. *Nature Energy*, **7**, 673-681.
- [30] 丁涛, 郑绵平, 张雪飞, 等. 盐湖卤水提锂技术及产业化发展[J]. 科技导报, 2020, 38(15): 16-23.
- [31] 马哲, 李建武. 中国锂资源供应体系研究: 现状、问题与建议[J]. 中国矿业, 2018, 27(10): 1-7.
- [32] 王核, 黄亮, 白洪阳, 等. 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, 2022, 46(5): 848-866.
- [33] 邓小川, 朱朝梁, 史一飞, 等. 青海盐湖锂资源开发现状及对提锂产业发展建议[J]. 盐湖研究, 2018, 26(4): 11-18.
- [34] Bradley, D.C., Stillings, L.L., Jaskula, B.W., *et al.* (2017) Lithium. In: Schulz, K.J., DeYoung Jr., J.H., Seal II, R.R. and Bradley, D.C., Eds., *Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*. U.S. Geological Survey, K1-K21.