

非常规卤水型锂资源开发现状与研究进展

刘学, 郑军卫, 刘文浩, 王立伟

(中国科学院西北生态环境资源研究院文献情报中心, 甘肃 兰州 730010)

摘要: 这是一篇矿业工程领域的论文。锂作为新能源领域重要的电池原材料, 其全球需求量正加速增长。长期以来中国需要大量进口锂原料, 预计未来仍存在较大的需求缺口。地热卤水、油气田卤水、海水淡化废弃卤水等非常规卤水所包含锂资源量可观, 或将成为常规锂资源的有效补充。作为一种绿色、可持续的锂资源提取方式, 非常规卤水型锂资源开发面临重大发展机遇。在中国四川、西藏、云南等地发现丰富的、尚未有效开发的非常规卤水型锂资源, 对解决中国国内锂原料供应不足将有巨大帮助。通过梳理国内外非常规卤水型锂资源开发及其关键技术的现状与进展, 为中国非常规卤水型锂资源开发提供参考。

关键词: 矿业工程; 锂; 地热卤水; 油气田卤水; 海水; 关键矿产; 战略性矿产

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.04.003

中图分类号: TD983; P618.71 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 04-0021-06

引用格式: 刘学, 郑军卫, 刘文浩, 等. 非常规卤水型锂资源开发现状与研究进展[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(4): 21-26+56.

LIU Xue, ZHENG Junwei, LIU Wenhao, et al. Development status and research progress of unconventional brine-type lithium resources[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(4): 21-26+56.

锂享有“白色石油”“工业味精”“21 世纪的能源金属”等美誉, 被美国、欧盟、加拿大、澳大利亚、中国等世界主要经济体列为“关键矿产”、“战略性矿产”、“关键原材料”等, 并掀起了对其研究热潮^[1-6]。在全球努力实现双碳目标的背景下, 锂作为新能源领域重要的电池原材料, 其全球需求量正加速增长^[7-8]。国际能源署预测, 到 2030 年全球将面临近 50% 的锂需求缺口。地热卤水、油气田卤水、海水等非常规卤水来源的锂资源或成为弥补该供应缺口的新途径, 欧美等多国已在该领域进行布局并取得一定成效。本文系统梳理全球非常规卤水型锂资源开发领域科技进展, 分析我国在该领域的现状并提出建议。

1 非常规卤水锂资源概况与潜力

全球金属锂资源存在形式主要为盐湖卤水 (58%), 其次为伟晶岩 (26%)、锂黏土 (7%)、

油田卤水 (3%)、地热卤水 (3%) 和锂沸石 (3%)^[9]。目前, 盐湖卤水和伟晶岩型锂矿是全球提锂的主要原料。本文涉及的非常规卤水型锂资源是指除了盐湖卤水这一常规来源以外的其他卤水或盐水的锂资源, 主要包括来自地热卤水、油气田卤水、海水 (包括海水淡化废弃卤水) 等。传统的盐湖锂资源开发会破坏景观、影响水资源与环境。Baspineiro 等^[10]估计, 在蒸发过程中, 每吨碳酸锂当量 (LCE) 造成 50~500 m³ 的水蒸发到大气中。生产浓缩石灰溶液和提纯碳酸锂每吨消耗 5~50 m³ 的淡水^[11]。关于生命周期缺水足迹的研究表明, 在智利和中国, 与锂开采相关的用水可能会给人类和自然造成天然淡水短缺的高风险^[12]。此外, 将卤水从盐滩的水文地质系统中排除被认为是一种重要环境影响^[13]。Liu 等^[14]指出锂开采活动是智利阿塔卡马盐滩环境退化的主要压力源之一。

收稿日期: 2023-03-13

基金项目: 中国科学院文献情报能力建设专项课题 (E1290423, E2290431); 中国地质调查局地质大调查项目 (DD20221828)

作者简介: 刘学 (1986-), 女, 助理研究员, 主要从事地球科学与资源战略情报研究。

当前,亟需开拓新的来源和新的提取方式以确保锂资源供应。Yan 等^[15]分析了 122 000 个非常规卤水(油气田生产水、地热卤水以及海水淡化废弃卤水等)指出,这些水源中的锂含量非常高,值得提取。Millot 等^[16]对整个欧洲与地热系统相关的卤水锂浓度进行了广泛的审查,确定了 6 个锂浓度大于 90 mg/L 的系统。Amit 等^[17]指出世界各地的多个油田卤水中含有大量锂,例如,美国的 Smackover 卤水的锂含量最高超过 500 mg/L。蔡艳龙等^[18]、隰弯弯等^[19]都指出,地热卤水、油气田卤水锂矿极具开发潜力,或成为未来锂矿床的勘探开发热点。

非常规卤水或成为常规锂资源的有效补充,其开发面临重大机遇。从油气田卤水、地热卤水中的提锂项目是一种绿色、可持续的锂资源开发方式,多个汽车企业已签订了此类项目的承购协议。为了满足世界对锂的需求,海洋被认为是最重要和最有前途的锂资源。据报道,海洋中的锂储量总量约为 2 600 亿 t,为满足锂需求的快速增长提供了几乎无限的资源。然而,非常规卤水锂资源开发也面临各种挑战。地热卤水提锂不仅需应对高温(甚至超过了 100 ℃)带来的挑战,同时它还含有多种其他矿物元素(钠、镁、钙等),可能会干扰锂的提取。由于油气田卤水一般埋深较深,并且缺乏油气田采出水中锂资源的准确数据和信息,阻碍了油气田卤水中锂资源开发。海水中锂浓度极低,且富含其他杂质离子,从中提锂极具挑战性。

2 国际非常规卤水型锂资源开发进展

2.1 地热卤水提锂

目前地热卤水提锂取得积极进展的项目主要集中于美国加州的索尔顿海与欧洲上莱茵河谷。加州能源委员会评估索尔顿海地热田中碳酸锂的年供应量将超过 60 万 t。为推动从索尔顿海地热卤水中经济可行的直接提取锂,加州能源委员会于 2019 年 12 月资助 1 400 万美元的地热卤水提锂项目,美国能源部于 2021 年 11 月设立 400 万美元“美国制造地热锂提取奖”。2019 年伯克希尔哈撒韦公司开始推动索尔顿海地热提锂项目,其采用专有的离子交换工艺已在两座示范工厂生产出碳酸锂和氢氧化锂,计划最早于 2024 年开始推进商业化运作。EnergySource Minerals 公司一直在开

发专门针对萨尔顿海 KGRA 地热卤水的名为“集成锂吸附解吸”(ILiAD)的锂萃取工艺技术。该工艺实验表明,该公司能够以 90% 的锂回收率生产高纯度锂产品(纯度为 99.9%)^[16]。公司计划以目前 1 574 m³/h 的卤水流量每年生产 1.65 万 t 的 LCE,商业锂生产预计于 2024 年开始。Vulcan Energy Resources 公司聚焦于德国上莱茵河谷的深层地热卤水项目,采用原卤吸附技术从深层地热卤水中直接提锂,并将尾液回注地下,规划年产氢氧化锂 4 万 t,计划 2024 年分阶段投产。

2.2 油气田卤水提锂

美国、加拿大等国认为油气田生产过程中产出的卤水是较好的锂资源来源^[20]。近年来,美国能源部持续资助油气田卤水提锂相关技术的商业化研究和开发。目前海外的油气田提锂项目主要集中于美国 Smackover 地层与加拿大 Alberta 省 Leduc 地层。加拿大 MGX 矿业公司设计了采用纳米过滤技术提锂的新工艺,正在开采加拿大鲟鱼湖油田产出于 Leduc 地层的油田水(锂平均含量为 67 mg/L)^[21]。E3 锂公司在加拿大 Alberta 省布局有 7 个油气田提锂的子项目,其中 3 个项目合计 700 万 t LCE 推断资源量,平均锂含量为 53~75 mg/L。2022 年 6 月,加拿大 E3 锂公司已与加拿大最大的原油生产商 Imperial 达成合作,利用 E3 锂公司的吸附直接提锂技术,规划建设 2 万 t 氢氧化锂年产能,2025 年底前后实现商业生产。标准锂业(Standard Lithium)公司研发了专为美国阿肯色州 Smackover 地层卤水锂资源开发的 LiSTR 直接提锂技术,该技术的吸附材料是基于钛酸盐结构的固体陶瓷材料,能够在 70 ℃ 的温度下选择性的从卤水尾矿中获得高纯度氯化锂溶液,提锂时间被缩减至数小时且环境友好。

2.3 海水提锂

美国、日本、韩国等国都在开展从海水中提锂的技术研究。实验已经证实,海水提锂在理论和技术上都是可行的。Chung 等^[22]于 2004 年提出用溶胶凝胶法制备纳米二氧化锰吸附剂提取海水中的锂离子。Liu 等^[23]开发了一种脉冲静置和脉冲静置-反向脉冲静置电化学方法,实现了从海水中以 1:1 的钠锂比回收锂。Li 等^[24]采用固态电解质膜,设计了连续的电驱动膜过程,从红海海水样品的富集溶液中直接沉淀出纯度为 99.94% 的磷酸锂。Liu 等^[25]报道了氧化锰离子筛法从海水中提取

锂。Harvianto 等^[26]报道了使用噻吩甲酰三氟丙酮—三正辛基氧化膦（TTA-TOPO）混合物从海水中协同提取锂，可回收约 93% 的锂。Hoshino^[27]提出采用离子液体膜电渗析法从海水中提锂技术。

3 我国非常规卤水型锂资源开发现状

由于国内锂资源禀赋较差、开发难度大，长期以来我国需要大量进口锂原料，2021 年锂原料的对外依存度达到 67%，预计未来需求存在较大缺口。中国工程院院士郑绵平曾在 2022 “锂电之都”产业生态及供应链大会上指出，仅考虑国内电动车和储能等对锂的需求，到 2030 年我国对碳酸锂供需缺口将达到 3.5 万 t。长期以来，我国锂资源开发主要来自硬岩型锂矿。近 10 年来勘查实践证实，我国还存在许多新型的锂资源^[28]，如四川盆地东北部黄金口一带地下卤水中的锂、藏南和滇西的热泉型锂矿等，这些非常规卤水型锂资源具有较大开发利用价值，目前尚未进行有效开发。

3.1 地热卤水提锂

目前，我国已在该领域有所布局，例如西藏自治区科技厅重大科技专项“西藏重点含锂地热活动区锂资源调查评估与提取实验研究”与西藏自治区矿产资源勘查专项“西藏重点含锂地热活动区锂资源调查评价”。王晨光等^[29]调查指出青藏高原南部地热水中锂含量可高达 239 mg/L，锂含量达到或超过 19 mg/L 的富锂温泉至少有 19 处，年排出金属锂约 4 281 t，折合碳酸锂 2.56 万 t，调查认为青藏高原南部广泛发育的高温富锂地热资源是一种极具开发利用价值的地热型锂资源。针对该地区的锂提取，膜法和吸附法可能值得考虑。近年来，中国学者也在不断推进地热水中锂的提取技术研究。Sun 等^[30]提出了一种基于新型磷酸铁锂电化学技术从地热水中回收锂的方法，锂的回收率可达 90.65%。中国工程院重点咨询研究项目“深部矿产和地热资源共采战略研究”重点探索深部矿产与地热资源共采面临的难题^[31]。但目前来讲，我国地热流体中锂资源相关开发还存在着锂资源分布特征不清、潜力不明等问题，针对富锂地热流体中锂的提取技术的研究仍然有待加强。

3.2 油气田卤水提锂

我国有关油气田卤水提锂的研究开展较早，近年来相关提锂技术已取得了积极的进展。早在 1983 年我国就针对四川威远气田的气田水（锂含

达 97.5 mg/L）提出了效果较好的提锂技术^[21]，但并未实现大批量生产。四川盆地东北部黄金口背斜群多处钻井的气田卤水含有大量的锂^[32-33]，最高达 323 mg/L^[33]。湖北江汉盆地江陵凹陷和潜江凹陷的油气田卤水的锂平均含量分别为 61.23 mg/L 和 68.21 mg/L^[34]。中国石油江汉油田公司已形成了采用超滤、反渗透和电渗析对卤水进行分阶段浓缩以制备电池级碳酸锂。目前江汉油田正在开展中试装置的建设^[35]。陈立等^[36]调查指出中国石油西南油气田公司一些气田水中锂资源最高达 131.6 mg/L，初步估算三处区块的碳酸锂资源量达 68 万 t。2022 年 12 月，位于龙王庙组气藏的国内首套气田水提锂中试装置成功投运，其采用锂离子筛吸附提锂技术，预计可实现碳酸锂年产 50 t。总体而言，油田水提锂技术的选择将取决于锂浓度、采出水量以及采出水中是否存在其他化合物。

3.3 海水提锂

作为一项前瞻性科学研究，我国在海水提锂领域也有所涉及。Zhang 等^[37]研制了一种从海水中提取锂的全固态电化学装置。Yang 等^[38]提出了一种利用太阳能的恒流电解技术（组合电解液和离子选择性固体陶瓷膜），成功从海水中提取了金属锂，然而，该技术商业化应用最大的难题是技术从实验室到产业化的放大以及装置的持续运行。

4 非常规卤水型锂资源开发关键技术

直接提锂技术（Direct Lithium Extraction, DLE）是地热卤水、油田卤水等非常规卤水型锂资源成功开发的关键。在直接提取锂中，锂通过技术手段从溶液中进行浓缩，而非蒸发浓缩。理想的直接锂提取技术是能够专门从复杂的地球化学溶液中提取锂离子，同时将所有其他盐和金属留在溶液中。然而，从卤水中选择性提取锂具有挑战性（表 1），特别是直接提取锂比蒸发池具有更高的前期成本^[39]。在阿根廷和中国，直接提锂已被用于从盐湖卤水中生产氯化锂。估计 2019 年全球约 12% 的锂供应由直接提锂技术生产^[16]。

目前主流的直接提锂技术有 5 种（表 2），包括吸附法、离子交换法、溶剂萃取法、膜分离法和电化学生物法。其中，最受关注的是基于锂离子筛的离子交换吸附方法，因为它们具有良好的锂离子选择性和高吸附性能。部分非常规卤水直接提锂常用的是吸附法和离子交换法（表 3）。

表 1 传统盐田蒸发沉淀与直接提锂技术的对比		
Table 1 Comparison between traditional evaporation precipitation in salt pans and direct lithium extraction		
	传统盐田蒸发沉淀	直接提锂
环境足迹	蒸发池的碳足迹和淡水使用量较高	消除或降低蒸发池的碳足迹，淡水使用量更低
生产用时	晒卤周期长	较短
采收率	较低（40%）	80%以上
最终产品品质	盐湖系碳酸锂存在钠、镁、钙、硼杂质偏高	电池级锂最终产品纯度更高
技术适用性	适合锂浓度高、镁锂比低的优质盐湖卤水	使低品位锂项目具有经济可行性
技术成熟度	相对成熟	尚未进行大规模和长时间的测试。其经济性和有效性仍有待确定。
技术复杂性	简单	较复杂
生产成本	低	成本可能更高，具体取决于位置、DLE 工艺类型、能源成本等多种因素。

表 2 目前主流的 5 种直接提锂技术			
Table 2 Current mainstream 5 types of direct lithium extraction technology			
技术名称	技术要点说明	商业成熟度	锂采收率/%
吸附	利用吸附剂的吸附工艺	已经投入商用	80~99.9
离子交换	利用树脂、铝酸盐或陶瓷实现离子交换装置	尚未投入商用	80~99.9
溶剂萃取	将萃取剂与卤水混合，将含锂溶液从卤水中分离	尚未投入商用	99.9
膜分离	通常和离子交换法及吸附法/溶剂萃取法一并使用。技术前景乐观的工艺包括纳滤法和反渗透法	尚未投入商用	≥99
电化学分离	利用吸附法或嵌入法从卤水中以电化学方式提取锂	尚未投入商用	>90

表 3 正在推进的部分非常规卤水直接提锂项目				
Table 3 Some unconventional brine direct lithium extraction projects				
公司名称	SRI International	Vulcan Energy Resources	标准锂业	E3锂公司
项目	索尔顿海	上莱茵河谷	Lanxess	Clearwater
所在地	美国加州	德国	美国阿肯色州	加拿大Alberta省
卤水类型	地热	地热	溴尾液	油田
锂浓度/（mg/L）	400	181	168	74.6
规划产量/（t/a）	20 000	40 000	20 900	20 000
技术	离子交换	吸附	吸附	吸附
锂回收率/%	90	90	90	>90
锂产品	碳酸锂	氢氧化锂	碳酸锂	氢氧化锂

我国在青海盐湖卤水的直接提锂技术开发以及产业化应用处于全球领先，并在加速西藏盐湖锂资源的开发：蓝科锂业在青海察尔汗盐湖采用吸附法+膜分离的耦合技术已具备年产 3 万 t 的碳酸锂；藏格锂业在青海察尔汗盐湖采用高效的连续吸附提锂技术建成年产 1 万 t 碳酸锂产能；五矿盐湖在青海一里坪盐湖采用“梯度耦合膜分离技术”和“多级锂离子浓缩高镁锂比卤水提取技术”结合已建成年产 1 万 t 碳酸锂，当前其正在建设原卤吸附产线，规划将总产能提升至 1.3 万~1.4 万 t 碳酸锂；金圆股份公司正在应用电化学脱嵌法^[40-41]在西藏捌千错盐湖推进千吨级锂盐产线产业化项目。然而，将直接提锂技术应用于非常规卤水型锂资源开发领域，我国的步伐则不及欧美国家。

5 启示与建议

（1）开展全国非常规卤水型锂资源详细勘查

我国锂矿种类多样，找矿前景良好。近十年来，在四川盆地气田卤水、柴达木油田卤水、西藏地热卤水等相继发现了不同于传统盐湖卤水型锂矿的新型锂资源。油气田卤水和地热卤水的综合利用价值高，随着传统盐湖卤水型锂矿的不断消耗和工业技术的发展，这些非常规卤水型锂资源将成为锂资源的重要补充。进一步提高勘查力度，是提高我国锂资源供给的重要途径。

（2）加大非常规卤水型锂资源基础研究与技术开发

非常规卤水型锂资源开发利用需要鼓励相关理论研究突破和生产技术创新，如加强地热卤水中锂的形成规律和超常富集机理研究。直接提锂技术不仅可以让非常规的地热或油田卤水提锂成为可能，还可通过提高采收率，提升常规卤水项目的锂产量。在目前成熟在产的油气田、深层卤水溴矿、地热电站的基础上，嫁接新增直接

提锂的装置,是较为可行的商业化路径。建议对已经过实验的新的提取技术应尽快开展经济效益分析,推进产业化进程。

(3) 尽快启动地热卤水提锂相关工作

当前,地热作为一种重要的清洁和可再生能源得到了国家层面的高度重视,但从地热卤水里提锂并没有。地热卤水提锂聚焦于同时提供清洁地热能和供应锂的双重目标,且几乎不排放碳、对周围环境影响较小,将会成为一种新趋势。建议加强对西藏南部、四川自贡、湖北潜江地区等地下卤水型锂矿的勘查与潜力评估,尽快启动地热卤水的提取工作。

(4) 布局海水提锂技术储备

虽然由于生产成本、市场需求等原因,海水提锂距离产业化应用还有一定距离,但海水提锂可作为一项技术储备,如利用太阳能的综合联用,进行多资源提取利用,可能是该领域的未来发展路径。

参考文献:

- [1] 毛景文, 杨宗喜, 谢桂青, 等. 关键矿产——国际动向与思考[J]. 矿床地质, 2019, 38(4):689-698.
MAO J W, YANG Z X, XIE G Q, et al. Critical minerals: international trends and thinking[J]. Mineral Deposits, 2019, 38(4):689-698.
- [2] 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 等. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题[J]. 中国科学基金, 2019, 33(2):106-111.
ZHAI M G, WU F Y, HU R Z, et al. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2019, 33(2):106-111.
- [3] 刘文浩, 刘学, 郑军卫. 基于文献计量的国际关键矿产资源研究态势评估[J]. 矿产综合利用, 2021(5):59-66.
LIU W H, LIU X, ZHENG J W. Bibliometric evaluation of international critical mineral resources research trend[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):59-66.
- [4] GOURCEROL B, GLOAGUEN E, MELLETON J, et al. Re-assessing the European lithium resource potential —A review of hard-rock resources and metallogeny[J]. Ore Geology Reviews, 2019, 109:494-519.
- [5] 陈其慎, 张艳飞, 邢佳韵, 等. 国内外战略性矿产厘定理论与方法[J]. 地球学报, 2021, 42(2):137-144.
CHEN Q S, ZHANG Y F, XING J Y, et al. Methods of strategic mineral resources determination in China and abroad[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(2):137-144.
- [6] 王登红. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. 地质学报, 2019, 93(6):1189-1209.
WANG D H. Study on critical mineral resources: significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6):1189-1209.
- [7] 吴西顺, 王登红, 杨添天, 等. 碳中和目标下的锂矿产业创新及颠覆性技术[J]. 矿产综合利用, 2022(2):1-8.
WU X S, WANG D H, YANG T T, et al. Lithium mining industry innovation and disruptive technology under the goal of carbon neutrality[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(2):1-8.
- [8] 徐正震, 梁精龙, 李慧, 等. 含锂资源中锂的提取研究现状及展望[J]. 矿产综合利用, 2021(5):32-37.
XU Z Z, LIANG J H, LI H, et al. Research status and prospects of lithium extraction from lithium containing resources[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):32-37.
- [9] Bradley, D. C., Stillings, L. L., Jaskula, B. W., et al. Lithium, chapter k of critical mineral resources of the United States—economic and environmental geology and prospects for future supply[R]. U. S. Geological Survey Professional Paper 1802. 2017. <https://pubs.usgs.gov/pp/1802/k/pp1802k.pdf>
- [10] Baspineiro, C. F., Franco, J., Flexer, V. Potential water recovery during lithium mining from high salinity brines[J]. Science of The Total Environment, 2020, 720 (137523).
- [11] Flexer, V., Baspineiro, C. F., Galli, C. I. Lithium recovery from brines: a vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing[J]. Science of The Total Environment, 2018, 639, 1188–1204.
- [12] Schomberg, A. C., Bringezu, S., Flörke, M. Extended life cycle assessment reveals the spatially-explicit water scarcity footprint of a lithium-ion battery storage[J]. Communications Earth & Environment. 2021, 2, 1-10.
- [13] Marazuela, M. A., Ayora, C., Vázquez-Suñé, et al. Hydrogeological constraints for the genesis of the extreme lithium enrichment in the Salar de Atacama (NE Chile): a thermohaline flow modelling approach[J]. Science of The Total Environment. 2020, 739 (139959).
- [14] Liu W J, Agusdinata D B., Myint S W. Spatiotemporal patterns of lithium mining and environmental degradation in the Atacama Salt Flat, Chile[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2019, 80, 145-156.
- [15] Yan G B, Wang M Z, Grant T. Hill, et al. Defining the challenges of Li extraction with olivine host: The roles of competitor and spectator ions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2022, 119. DOI: [10.1073/pnas.2200751119](https://doi.org/10.1073/pnas.2200751119)
- [16] Stringfellow, W. T.; Dobson, P. F. Technology for the recovery of lithium from geothermal brines[J]. Energies 2021, 14, 6805. <https://doi.org/10.3390/en14206805>
- [17] Amit K, Hiroki F, Alan HT, et al. Lithium recovery from oil and gas produced water: a need for a growing energy industry[J]. ACS Energy Lett. 2019, 4, 6, 1471–1474
- [18] 蔡艳龙, 李建武. 全球锂资源开发利用形势分析及启示[J]. 地球学报, 2017, 38(1):25-29
CAI Y L, LI J W. The analysis and enlightenment of exploitation situation of global lithium resources[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(1):25-29
- [19] 隰弯弯, 赵宇浩, 倪培, 等. 锂矿主要类型、特征、时空分布及找矿潜力分[J]. 沉积与特提斯地质. 2022. DOI:[10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04002](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04002).
- [20] XI W W, ZHAO Y H, NI P, et al. Main types, characteristics,

- distributions, and prospecting potential of lithium deposits[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2022. DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.04002.
- [20] 吴西顺, 孙艳, 王登红, 等. 国际锂矿开发的技术现状、革新及展望[J]. *矿产综合利用*, 2020(6):110-120.
- WU X S, SUN Y, WANG D H, et al. International lithium mine utilization technology: current status, innovation and prospects[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6):110-120.
- [21] 高娟琴, 王登红, 王伟, 等. 国内外主要油(气)田水中锂提取现状及展望[J]. *地质学报*, 2019, 93(6): 1489-1500.
- GAO J Q, WANG D H, WANG W, et al. Current status and prospects of lithium extraction in major domestic and foreign oil (gas) field waters[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1489-1500
- [22] Chung K S, Lee J C, Kim E J, et al. Recovery of lithium from seawater using nano-manganese oxide adsorbents prepared by gel process[J]. *Designing, Processing and Properties of Advanced Engineering Materials*, Pts 1 And 2, 2004, 449(4):277-280.
- [23] Liu C, Li Y B, Lin D C, et al. Lithium extraction from seawater through pulsed electrochemical intercalation[J]. *Joule* (2020), <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.05.017>
- [24] Li Z, Li C Y, Liu X W, et al. Continuous electrical pumping membrane process for seawater lithium mining[J]. *Energy and Environmental Science*, 2021, 14:3152-3159.
- [25] Liu L, Zhang H, Zhang Y, et al. Lithium extraction from seawater by manganese oxide ion sieve $\text{MnO}_2 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2015, 468: 280-284
- [26] Harvianto G, Kim SH, Ju CS. Solvent extraction and stripping of lithium ion from aqueous solution and its application to seawater[J]. *Rare Metals*. 2015, 35: 948-953
- [27] Hoshino T. Development of technology for recovering lithium from seawater by electrodialysis using ionic liquid membrane[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2013, 88(11):2956-2959.
- [28] 王登红, 代鸿章, 刘善宝, 等. 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*, 2022, 28(5):743-764.
- WANG D H, DAI H Z, LIU S B, et al. New progress and trend in ten aspects of lithium exploration practice and theoretical research in China in the past decade[J]. *Journal of Geomechanics*, 2022, 28(5):743-764.
- [29] 王晨光, 郑绵平, 张雪飞, 等. 青藏高原南部地热型锂资源[J]. *科技导报*, 2020, 38(15):24-36.
- WANG C G, ZHENG M P, ZHANG X F, et al. Geothermal-type lithium resources in Southern Tibetan Plateau[J]. *Science & Technology Review*, 2020, 38(15):24-36.
- [30] Sun S, Yu X P, Li M L, et al. Green recovery of lithium from geothermal water based on a novel lithium iron phosphate electrochemical technique[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 247:119178.
- [31] 蔡美峰, 多吉, 陈湘生, 等. 深部矿产和地热资源共采战略研究[J]. *中国工程科学*, 2021, 23(6):43-51
- CAI M F, DUO J, CHEN X S, et al. Development strategy for co-mining of the deep mineral and geothermal resources[J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6):43-51
- [32] 高娟琴, 于扬, 仲佳爱, 等. 川东北黄金口背斜 ZK001 钻孔流体地球化学及含锂特征[J]. *地球科学与环境学报*, 2019, 41(2):197-208.
- GAO J Q, YU Y, ZHONG J A, et al. Geochemical and li-bearing characteristics of fluids from borehole zk001 in Huangjinkou anticline of the Northeastern Sichuan, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2019, 41(2):197-208.
- [33] 林耀庭, 陈绍兰. 四川盆地地下卤水勘探开发前景展望[J]. *盐湖研究*, 2008(1):1-7.
- LIN Y T, CHEN S L. Exploration and development prospect of underground brine in Sichuan Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2008(1):1-7.
- [34] 余小灿, 刘成林, 王春连, 等. 江汉盆地大型富锂卤水矿床成因与资源勘查进展: 综述[J]. *地学前缘*, 2022, 29(1): 107-123
- YU X C, LIU C L, WANG C L, et al. Genesis of lithium brine deposits in the Jianghan Basin and progress in resource exploration: A review[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(1): 107-123
- [35] 陈新军, 李倩文. 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*, 2021, 11:44-49
- CHEN X J, LI Q W. The Characteristics and exploitation prospect of brine lithium in Jianghan Basin[J]. *Land and Resources Information*, 2021, 11:44-49
- [36] 陈立, 杨立, 刘韬, 等. 西南油气田含锂气田水资源调查分析[J]. *石油与天然气化工*. 2023. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1210.TE.20230214.1045.002.html>
- CHEN L, YANG L, LIU T, et al. Investigation and analysis of lithium-containing gas field water resource in Southwest Oil and Gas Field[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2023. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1210.TE.20230214.1045.002.html>
- [37] Zhang H Q, Ren Y X, Wu X, et al. An interface-modified solid-state electrochemical device for lithium extraction from seawater[J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 482:228938
- [38] Yang S X, Zhang F, Ding H P, et al. Lithium Metal Extraction from Seawater[J]. *Joule*, 2018, 2:1648-1651
- [39] Wall A. Competitiveness of direct mineral extraction from geothermal brines[J]. *Trans. -Geotherm. Resour. Counc.* 2019, 43, 6.
- [40] Zhao Z W, Liu G, Jia H, et al. Sandwiched liquid-membrane electrodialysis: Lithium selective recovery from salt lake brines with high Mg/Li ratio[J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 596:117685
- [41] 徐文华, 刘冬福, 何利华, 等. 电化学脱嵌法盐湖提锂电极反应动力学研究[J]. *化工学报*, 2021, 72(6):3105-3115
- XU W H, LIU D F, HE L H, et al. Kinetic study on electrochemical intercalation/deintercalation method for lithium extraction from brine[J]. *CIESC Journal*, 2021, 72(6):3105-3115

Expansion Experiment of Multi-stage Precision Control Process for Lithium Enrichment in Qarhan Salt Lake Brine

LYU Xuecheng¹, SHI Zhonglu², TANG Yongquan³, LI Zhiwei^{4,5}

(1.Qinghai Salt Lake Magnesium Industry Co., Ltd., Golmud 816000, Qinghai, China; 2.Qinghai Salt Lake Industry Group Co., Ltd., Golmud 816000, Qinghai, China; 3.Qinghai Salt Lake Yuantong Potash Fertilizer Co., Ltd., Golmud 816000, Qinghai, China; 4.Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lake, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, Qinghai, China; 5.Key Laboratory of Salt Lake Resources Chemistry of Qinghai Province, Xining 810008, Qinghai, China)

Abstract: This is an article in the field of mining engineering. In view of the concentration and enrichment of lithium ions in old halide in Qerhan Salt Lake, the expansion experiment of the multi-stage precision control process of old halide enrichment was completed by means of evaporation crystallization and step separation. The enrichment law of lithium and boron during evaporation was studied. The concentration of lithium ions reached more than 1 g/L, and high quality hydrochloromagnite was obtained. The material balance of the evaporation process of the salt pan was carried out, and the actual halogen yield and lithium yield of each phase of salt extraction were obtained, as well as the production capacity of the sun salt pan and the area distribution ratio of each level of the salt pan, which can provide reliable data support for the comprehensive development and utilization of potassium old brine extraction in Qerhan Salt Lake in the future.

Keywords: Mining engineering; Salt lake brine; Lithium; Bischofite; Existing state; Salt field process

////////////////////////////////////
(上接第 26 页)

Development Status and Research Progress of Unconventional Brine-type Lithium Resources

LIU Xue, ZHENG Junwei, LIU Wenhao, WANG Liwei

(Literature and Information Center of Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730010, Gansu, China)

Abstract: This is an article in the field of mining engineering. As an important battery raw material in the field of new energy, the global demand for lithium is accelerating. For a long time, China has needed to import a large amount of lithium raw materials, and there is still expected to be a significant demand gap in the future. Unconventional brine sources such as geothermal brine, oil and gas field brine, and desalination wastewater in seawater containing contain considerable lithium resources and may become an effective supplement to conventional lithium resources. As a green and sustainable method for extracting lithium resources, the development of unconventional brine-type lithium resources faces significant opportunities. The discovery of abundant unconventional brine-type lithium resources in Sichuan, Xizang, Yunnan and other places in China will be of great help to solve the shortage of lithium raw material supply in China. By summarizing the current status and progress of unconventional brine-type lithium resource development and its key technologies both domestically and internationally, this article provides a reference for the development of unconventional brine-type lithium resources in China.

Keywords: Mining engineering; Lithium; Geothermal brines; Oil (gas) fieldbrines; Seawater; Critical minerals; Strategic minerals