

李燕,王敏,赵有璟,等.盐湖卤水锂资源提取技术及开发现状[J].盐湖研究,2023,31(2):71-80.

Li Y, Wang M, Zhao Y, et al. Technology and development of lithium extraction from salt lake brine[J]. Journal of Salt Lake Research, 2023, 31(2): 71-80.
(in Chinese)

DOI: 10.12119/j.yhyj.202302009

盐湖卤水锂资源提取技术及开发现状

李燕^{1,2}, 王敏^{1,2*}, 赵有璟^{1,2}, 王怀有^{1,2}, 祝增虎^{1,2}, 彭正军^{1,2}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 青海 西宁 810008;

2. 青海省盐湖资源化学重点实验室, 青海 西宁 810008)

摘要: 锂作为最轻的碱金属元素, 广泛应用于国民经济的各个领域。近年来锂产品需求量日益增加, 锂资源的有效开发和提取对于促进新能源发展、保障我国能源安全具有重要意义。青海柴达木地区盐湖卤水锂资源储量丰富, 但高镁锂质量比增加了盐湖提锂的技术难度, 并成为制约我国盐湖锂资源可持续发展的“卡脖子”关键问题。对目前国内外盐湖卤水提锂技术进行综述, 介绍了卤水提锂方法最新研究进展, 对于实现我国高镁锂比盐湖卤水锂资源绿色低碳高效开发利用具有重要意义。

关键词: 锂; 盐湖卤水; 提锂技术

中国分类号: G353.11; TS396.5

文献标志码: A

文章编号: 1008-858X(2023)02-0071-10

1 锂资源需求及应用

锂是能源金属元素, 在储能材料和清洁能源领域具有重要的战略地位, 被誉为“推动世界进步的能源金属”^[1]。锂是国家矿产资源宏观调控和监督管理的重点对象, 也是关乎国计民生的重要战略矿产资源, 对社会经济发展具有重要意义, 在各个产业部门有着广泛应用^[2-3]。例如, 锂是电化学当量最大的金属, 具有高氧化还原电位、高比热容、低密度等特殊化学特性, 成为引导电动汽车革命的关键元素, 又因其显著的环保属性, 被赋予“二十一世纪的清洁能源”的美誉^[4]。目前, 锂离子电池约占国际蓄电池市场的37%, 预计2025年电池行业对锂矿资源的需求量(以碳酸锂计)将至 25×10^4 t, 年均增长率为10.8%^[5]。锂及其化合物在玻璃、陶瓷、润滑剂、冶金、空气处理等传统工业领域亦具有广泛的应用^[6-7]。目前锂在玻璃、陶瓷相关行业中的年平均增长需求量约为2%, 且占比逐年递增^[8]; 未来5年润滑脂行业的用锂需求将达4 000 t^[9]。此外, 锂也广泛应

用于石油化工、钢铁、机械及医疗等行业领域, 有“工业味精”之称^[9]; 其在航空航天、国防军工等军事领域亦具有极高的战略价值, 有“宇航合金”之说^[10], 锂在热核反应领域的需求量可达 50×10^4 t/yr。近年来全球锂盐产品的需求量以10%的速度增长^[11], 预计到2025年全球锂资源需求量将突破 90×10^4 t/yr(碳酸锂当量)^[12]。未来几年, 我国锂离子电池行业对锂的需求量(碳酸锂当量)最大, 且其占比将会持续增长^[4]。目前我国现有锂资源开发速度和能力远低于各行业对锂资源的需求量^[13], 发展高效镁锂分离与锂提取技术具有重要意义, 是保障国家能源安全和重大战略需求的基础性工作。

2 国内外锂资源分布

锂在地壳中的含量约为0.007%, 主要赋存于富锂卤水和高品位锂矿中^[5]。全球锂资源储量约为 $6 200 \times 10^4$ t, 盐湖锂资源储量占全球锂总赋存量的69%以上^[5], 主要分布在“南美锂三角”(阿根廷、玻利

收稿日期: 2022-12-21; 修回日期: 2023-01-30

基金项目: 国家自然科学基金(U20A20138); 青海省重大科技专项(2019-GX-A7); 青海省盐湖资源化学重点实验室创新平台建设专项(2022-ZJ-Y06)

作者简介: 李燕(1992-), 女, 博士研究生, 主要研究方向膜分离技术、分离膜材料。Email: liyan615@isl.ac.cn。

通讯作者: 王敏(1966-), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事膜分离、熔盐热物性及锂离子电池等研究。Email: wangmin@isl.ac.cn。

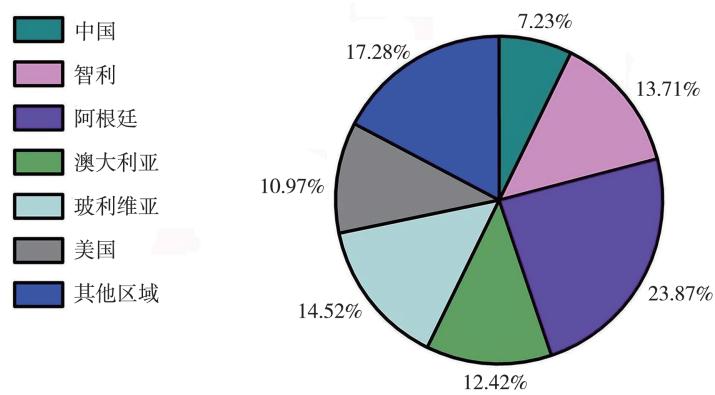


图1 世界各国锂资源分布情况^[14]

Fig. 1 The distribution of lithium resources around the world

维亚和智利)、中国和美国。其中,阿根廷锂资源储量占世界锂矿总赋存量的23.87%,居世界第一位;其次是玻利维亚(14.52%)和智利(13.71%)。中国盐湖卤水型锂资源主要分布在青藏高原地区,锂资源总储量约为 450×10^4 t,居世界第6位(图1)^[14]。青海柴达木盆地是国内盐湖资源的集中分布区,其富锂盐湖可达30余个。全国矿产资源储量通报数据统计,国内已查明卤水型锂矿资源占比约为88.3%^[5]。卤水锂资源开发具有低能耗、经济性优、环境友好等特点,卤水提锂是未来锂产业发展的重要方向。

全球富锂盐湖主要有智利阿塔卡玛、玻利维亚乌尤尼、阿根廷翁布雷穆尔托、美国银峰以及中国西藏的扎布耶和青海的一里坪、台吉尔盐湖等^[15]。

上述盐湖卤水的主要化学组成如表1所示^[16]。与国外盐湖相比,青海柴达木地区盐湖锂资源的特点为高镁低锂,其中开发程度较高的察尔汗盐湖镁锂质量比高达1 837,大柴旦盐湖为114,西台吉乃尔盐湖为62,是国外盐湖的数十倍乃至千倍^[17]。青海地区盐湖卤水高镁锂比的特点增加了锂资源分离与提取的难度,成为制约我国盐湖锂资源可持续开发利用的瓶颈问题。另外,基于镁、锂在元素周期表中位置的特殊性,其化学性质十分相似,进一步增加了卤水提锂的难度。如表1所示,与国外优质盐湖卤水锂资源相比,我国盐湖卤水伴生离子种类复杂且浓度较高,锂离子品位较低,锂资源开发提取难度更大。

表1 全球部分富锂盐湖卤水主要化学组成^[16]

Table 1 Main chemical composition of salt lake brine around the world									wt. %
盐 湖	Na ⁺	Mg ²⁺	Li ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	B	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	镁锂比
乌尤尼	7.06	0.4	0.05	0.7	0.12	0.02	0.85	16.7	8.4
阿卡塔玛	7.6	0.96	0.15	1.8	0.03	0.064	1.78	16	6.4
霍姆布雷托	9.8	0.085	0.062	0.62	0.053	0.035	0.85	16	1.4
银 峰	6.2	0.28	0.02	0.53	0.02	0.008	0.71	15.25	8.61
西台吉乃尔	8.4	1.3	0.021	0.7	0.016	0.032	2.9	15.29	61
一里坪	2.58	1.28	0.021	0.91	0.016	0.031	2.06	15.41	61
扎布耶	14.17	0.001	0.12	3.96	0.007	0.2	4.35	19.63	0.008

3 盐湖卤水锂资源开发现状

目前已有许多国内外学者就盐湖卤水镁锂分离与锂提取技术进行了研究,形成了以沉淀、溶剂萃取、离子交换吸附、膜分离等方法为主的盐湖提锂工

艺,各提锂方法的研究进展及发展现状表述如下。

3.1 沉淀法

沉淀法提锂因其方法简单、易于放大且成本较低,是卤水提锂领域应用最早且最为广泛的方法^[18]。

在最佳pH和温度条件下,通过向死卤水中加入氯化铝获得铝酸锂沉淀,该盐湖卤水提锂的研究最早可追溯到20世纪60年代^[19]。目前也有部分学者通过多步沉淀法获得碳酸锂沉淀,实现盐湖卤水锂资源的高效分离提取^[20]。沉淀法提锂主要受盐湖卤水中镁离子浓度的影响,沉淀方法也因卤水镁锂比不同而有所差异。

当盐湖卤水镁锂比 < 6 时,通常采用“碳酸盐沉淀法”提锂^[21],即首先将含锂卤水进行蒸发浓缩提高锂离子含量,然后向卤水中加入氧化钙生成氢氧化镁沉淀去除镁杂质,进一步通过添加碳酸钠获得碳酸锂。此提锂方法适用于美国银丰盐湖、智利阿塔卡玛盐湖等镁锂比较低的盐湖卤水体系。Xu等^[22]通过“碳酸盐沉淀”与“ CO_2 碳化沉淀”两步沉淀法在国内西藏达松措盐湖获得电池级碳酸锂产品。

“铝酸盐沉淀法”适用于高镁锂比盐湖卤水提锂^[23]。该方法通过氯化铝和氢氧化钠制备氢氧化铝,加入提硼后的卤水沉锂除镁;将所得铝酸锂沉淀进行高温焙烧浸取,加入氧化钙和碳酸钠去除钙、镁杂质;蒸发浓缩后加入碳酸钠高温反应生成碳酸锂^[19]。“铝酸盐沉淀法”环境较为友好,高镁锂比盐湖卤水锂离子回收率较高,但焙烧浸取需蒸发大量的水,能耗高且工艺流程复杂。近年来开发了新型的Al-Ca合金^[24]、Al-NaCl混合材料^[25]进行卤水提锂,其对高镁锂比盐湖卤水锂资源的回收率高达94%。Paranthaman等^[26]研发了新型铝锂层状吸附材料(LDH),从地热卤水中选择性地提取氯化锂。该方法成本较低且绿色环保,对卤水中的锂离子具有优异的选择效果,锂离子回收率达91%。

“镁共沉淀法”也能够有效降低高镁锂比盐湖卤水镁锂比,实现卤水锂资源的高值化提取。在最佳反应温度、反应时间条件下,草酸铵和碳酸钠可有效沉淀去除高镁锂比盐湖卤水中98%的镁离子^[27]。Tran等^[28]在镁锂比为21.2的乌尤尼盐湖加入草酸形成草酸镁沉淀,去除95%以上的镁离子,有效降低高镁锂比盐湖卤水镁锂比,实现锂离子的有效提取。研究表明两步或多步沉淀法对高镁锂比盐湖卤水中镁离子的去除率高达99%,实现镁锂分离的同时有效降低卤水中其它杂质离子含量,提高锂盐产品纯度。An等^[20]通过两步沉淀法 $[\text{Ca}(\text{OH})_2$ 除镁、硼; $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 除钙、镁]成功从高镁(15~18 g/L)低锂(0.7~0.9 g/L)的玻利维亚Salar de Uyuni盐湖中获得高纯

度(99.55%)碳酸锂产品。Wang等^[29]通过多步沉淀法实现镁锂比为19.22的青海台吉乃尔盐湖卤水中锂离子的有效回收,卤水镁离子的去除率高达99.56%,高纯(99.7%)碳酸锂产率为91%。Lai等^[30]首先向高镁锂比盐湖卤水中加入氯化钾,生成光卤石以去除卤水中50%的镁;进一步加入磷酸氢二钠生成磷酸氢镁沉淀,成功通过两步沉镁法实现高镁锂比盐湖卤水(镁锂比 > 40)提锂。该方法对卤水中镁的总去除率为99.6%,锂的回收率达93.2%;沉淀过程中所用氯化钾、磷酸氢二钠可进行回收,显著降低了卤水提锂的成本。Zhang等^[31]使用九水偏硅酸钠作为新型镁沉淀剂,实现高镁锂比盐湖卤水镁锂分离。初始卤水镁锂比由30显著降低至0.022,镁离子的沉淀率约为99.94%,卤水锂离子回收率为86.73%。

基于易于工业化操作、使用成本较低等优势,沉淀法提锂在盐湖卤水提锂领域仍具有广泛的应用,但后续应进一步提高其沉淀效率,降低化学试剂的使用对锂盐产品和环境产生的影响。

3.2 离子交换吸附法

离子交换吸附法主要利用对锂具有选择性吸附性能的有机或无机吸附剂,从卤水中选择性吸附锂,然后再用脱附剂对锂进行洗脱,从而实现锂和卤水其它离子的有效分离。基于“锂离子筛”对锂离子优异的选择性吸附效果,离子交换吸附法适用于锂离子含量较低的盐湖卤水,具有生产成本低、提锂效率高、易于工业化操作等优势,在盐湖卤水提锂领域受到广泛关注。锂离子高选择性吸附剂是影响吸附法实际应用效果的关键所在,大量学者在高性能吸附材料的研发方面进行了探索。

由于锰系和钛系离子筛对锂离子具有很高的特异性选择吸附效果和较大的交换容量,近年来关于锰系和钛系氧化物型离子筛的报道与日俱增。Chitrakar等^[32]以 LiMnO_2 为前驱体成功制备了 $\text{Li}_{1.6}\text{Mn}_{1.6}\text{O}_4$ 吸附剂,为期3d的吸附性能研究实验证实该类型吸附剂对海水中锂的最大吸附容量为40 mg/g,回收率超80%。进一步的研究结果表明,在海水中加入少量的 NaHCO_3 和HCl,可在保持吸附容量的同时将吸附周期缩短至1d^[33]。不过,锰系吸附剂所含金属-氧键作用较弱,致使其化学稳定性差,制备过程难度高,循环稳定性低。为提高锰系吸附剂的化学稳定

性, Ohashi 和 Tai^[34]通过过渡金属氧化物低聚物处理 $\text{Li}_{1.33}\text{Mn}_{1.67}\text{O}_4$, 煅烧形成具有超薄金属氧化物涂层的吸附剂, 成功对吸附剂表面进行改性。改性后的吸附剂具有优异的化学稳定性, 对卤水中锂离子的选择性吸附容量超 50 mg/g。由于铝离子尺寸与锰离子相当, Al-氧键作用力更强, 锰系吸附剂锰溶解问题亦可通过铝掺杂来实现, 提高锰系吸附剂稳定性的同时有效改善吸附材料对卤水锂的吸附容量。Zhang 等^[35]成功制备了铝掺杂 $\text{Li}_{1.6}\text{Mn}_{1.6}\text{O}_4$ 离子筛前驱体, 4 次吸附循环实验后, 锰溶解率从 2.06% 降低至 1.92%, 其对卤水锂离子的吸附容量达 32.6 mg/g。

钛基 (TiO_2) 吸附剂 Ti-氧键化学稳定性强, 在锂离子选择性离子筛制备领域具有较好的应用前景。钟辉等^[36]以 TiO_2 为原料, 通过碳酸锂/氢氧化锂渗入锂并做高温处理, 用酸换型制备了对锂具有高选择性的偏钛酸型锂离子吸附剂 (H_2TiO_3)。该类型吸附剂对高钙镁、低锂含量的卤水中锂离子具有较高的分离选择效果, 锂吸附容量达 25.34 mg/g。然而, 传统固体吸附剂多为粉体, 流动性和渗透性能较差, 使用过程中易形成结块, 致使有效吸附面积及吸附容量明显下降, 吸附稳定性有待提高。为改善这一现象, Wei 等^[37]结合静电纺丝和煅烧技术, 开发了一种新型多孔钛基 LIS 纳米纤维, 煅烧所产生的多孔结构有效暴露吸附位点, 锂离子吸脱附机率显著增加; 其在 298 K 条件下对盐湖卤水锂离子的吸附容量为 59.1 mg/g, 具有优异的锂吸附能力和高分离选择效果。

近年来, Li/Al 复合氢氧化物因其优异的锂离子选择吸附效果受到国内外学者的广泛关注。Zhong 等^[38]通过共沉淀法制备了有序二维 Li/Al 复合氢氧化物 (Li/Al-LDHs), 研究了其在室温条件下对察尔汗高镁锂比盐湖卤水的吸附效果。结果表明, Li/Al-LDHs 吸附剂对卤水锂的最高吸附容量为 7.27 mg/g, 此外 Li/Al-LDHs 对盐湖卤水复杂溶液体系溶质离子的选择性吸附顺序为, $\text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} \gg \text{Mg}^{2+}$, 锂离子选择性吸附效果优异。经 12 个吸—脱附循环后, 该吸附材料对锂的吸附容量稳定在 7.0 mg/g, 洗脱液卤水镁锂比由 301.58 显著降低至 0.43, 且其吸附性能、晶体结构保持较好的稳定性。虽然 Li/Al 复合氢氧化物的吸附效率低于锰系 (Mn-O) 和钛系 (Ti-O) 吸附剂, 但生产成本低、制造工艺简单、循环稳定性强等优势使其在卤水提锂领域具有良好的应

用潜力。

此外, 具有纳米结构的吸附剂 (如基于尖晶石结构的锂锰氧化物离子筛) 对不同品味盐湖卤水中的锂离子亦具有较强的吸附能力, 然而较高的生产成本和环境污染限制了其在商业提锂领域的广泛应用。利用可持续材料制备新型卤水锂离子高选择性吸附剂成为近年来的研究热点。Absi 等^[39]制备了两种新型复合材料 (RDP-FC-Cu 和 RDP-FC-Ni), 并就其对卤水锂的吸附性能进行研究。与原吸附剂 (RDP) 相比, 新型复合吸附材料具有更强的物理化学稳定性, 在 $\text{pH} = 6$, $c_{(\text{Li}^+)} = 100 \text{ mg/L}$ 条件下吸附效率达最高值。新型吸附材料具有高密度活性吸附位点, 对卤水复杂溶液中锂的解析率高于 99%, 有效实现卤水锂离子的选择性吸附。Wahib 等^[40]近期还研发了一种新型低成本环保吸附剂 (IL-CNC@DP), 在 $\text{pH} = 6$ 时对锂的回收率达 90%, 较改性前吸附材料 (RDP=50%) 性能显著提升。

3.3 溶剂萃取法

溶剂萃取法也称“液—液萃取法”或“化学萃取法”, 因其生产成本低、锂离子回收率高等优势, 在盐湖卤水提锂领域具有广阔应用前景和工业化生产潜力。溶剂萃取法适用于高镁锂比盐湖卤水提锂, 其最早实现卤水提锂的研究可追溯到 20 世纪 60 年代^[16]。萃取法分离提锂原理为采用对锂具有高选择性且对其它溶质离子无萃取作用的有机溶剂萃取剂将锂从水相萃入有机相, 之后通过反萃过程将有机相中的锂洗脱下来与萃取剂分离, 实现锂和其它溶质离子的高效分离^[41]。

溶剂萃取法从盐湖卤水中分离提取锂的核心为锂高选择性萃取剂, 磷酸三丁酯 (TBP) 是使用最为广泛、性能较为优越且目前研究最多的萃取剂。例如在 TBP- FeCl_3 -煤油组成的萃取体系中, TBP 充当中性有机磷萃取剂, 煤油为稀释剂, FeCl_3 作为共萃剂, 该萃取体系适用于高镁锂比盐湖卤水提锂。Zhou 等^[42]利用 TBP- FeCl_3 -煤油萃取体系对卤水锂的回收效率进行研究, 结果表明卤水中大量存在的镁与锂之间竞争效应较弱, 盐析效应较为显著。锂的分配系数主要受共萃剂 (FeCl_3) 影响, 当 $\text{Fe/Li} = 9$ 时, 该萃取体系对锂的萃取效率达最大值。Ji 等^[43]以 TBP 为萃取剂, FeCl_3 为共萃剂, 邻苯二甲酸二辛酯 (DOP) 为协萃剂, 对高镁锂比盐湖卤水进行萃取提锂实验, 系

统研究了溶剂体积浓度、盐酸浓度、Fe/Li摩尔比等因素对卤水锂离子的分离提取效率。当TBP浓度(V/V)为40%,DOP浓度(V/V)为20%时,盐湖卤水锂提取效率可达90%。

TBP-煤油- FeCl_3 组成的萃取体系中,共萃剂 FeCl_3 的加入可以与盐湖卤水中大量存在的氯离子形成 FeCl_4^- 配阴离子,有利于加速锂离子萃入有机相,大幅提升锂的萃取效率^[16]。溶剂萃取提锂工艺主要包括萃取段、洗涤段、反萃段和再生阶段,其中反萃阶段需要高浓度的酸以完成锂离子的回收,且需对再生阶段有机相中所残留的酸进行中和,导致 Fe^{3+} 的损失,萃取效率下降。为了缩短萃取提锂流程,提高萃取效率,提高 Fe^{3+} 利用率,Su等^[44]研发了一种由TBP、 FeCl_3 、2-乙基己基膦酸单2-乙基己基酯(P507)组成的三元萃取体系,其反萃阶段用水即可完成,避免酸处理对 FeCl_3 的影响,直接实现有机相的循环利用,缩短了萃取流程。经三级逆流串级萃取实验,高镁锂比盐湖卤水中锂的萃取率达99.8%, Fe^{3+} 完全保留在有机相中无需再生。该萃取体系对高镁锂比盐湖卤水锂离子具有较高的选择效果,保证了锂的高回收效率,缩短萃取流程的同时降低了反萃过程对设备的腐蚀性,有利于降低萃取提锂成本。

煤油作为TBP-煤油- FeCl_3 萃取体系中的稀释剂,对萃合物的溶解能力、稳定性均有待进一步提升。离子液体具有挥发性低、熔点低、高热稳定性等优势,有望成为传统稀释剂的绿色替代品。其萃取锂的机理是通过阳离子交换的方式实现的,离子液体构成的萃取体系中仍需要加入TBP,离子液体只起到了溶剂作用。Shi等^[45]以TBP为萃取剂,离子液体($[\text{C}_4\text{mim}][\text{PF}_6]$)为稀释剂,高氯酸钠为共萃剂,实现高镁锂比盐湖卤水锂离子的分离提取。在最佳操作条件下,锂的单次萃取效率为87.28%,远高于常规萃取体系,三级逆流串级萃取实验后锂的萃取效率达99.12%。TBP- $[\text{C}_4\text{mim}][\text{PF}_6]$ -高氯酸钠萃取体系实现了高镁锂比盐湖卤水锂离子高效萃取,具有良好的应用前景。Shi等^[46]在不含共萃剂 FeCl_3 的条件下还成功制备了TBP- $[\text{C}_n\text{mim}][\text{NTf}_2]$ - $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$ ($n=4, 6, 8$)萃取体系,实现了高镁锂比盐湖卤水中锂的高效萃取,且在最优条件下锂的萃取率可达90%以上;其后又合成了两种新型离子液体^[47-48]: $[\text{N}_{444}][\text{DEHP}]$ 和 $[\text{N}_{888}][\text{DEHP}]$,实现了高镁锂比盐湖卤水锂资源的高效萃取。新型离子液体能够与卤水锂以

1:1的形式形成萃合物分子 $\text{LiCl}[\text{N}_{xxxx}][\text{DEHP}]$,其萃取提锂的机理与传统离子液体不尽相同,主要为中性复合机理。

综上所述,溶剂萃取法提锂在盐湖卤水提锂方面具有优异的性能和良好的应用前景,但其较适用于锂离子浓度较高的卤水,工艺过程控制比较复杂,共萃剂 FeCl_3 的加入会造成乳化现象,TBP传统萃取体系成本较高,萃取过程易挥发损耗,萃取剂对设备腐蚀性强,单级萃取效率较低,并且有机萃取剂使用时潜在的环境污染问题仍有待解决。今后,应进一步研发新型锂萃取剂,优化萃取提锂工艺过程,提高卤水锂萃取效率。

3.4 膜分离法

膜分离法主要借助离子交换膜或者纳滤膜等膜分离材料对镁离子和锂离子的选择性差异,在机械压力或化学位差的推动力作用下,对卤水中的镁、锂进行分离。膜分离工艺过程具有控制便捷、易于实现连续操作和自动化控制等特点,在高镁锂比盐湖卤水镁、锂分离领域具有独特的优势,受到国内外学者的普遍关注。由于较为突出的锂、镁离子选择性,且操作控制较为方便,纳滤和离子选择性电渗析技术已在盐湖锂资源提取领域得到一定的应用。其中,纳滤膜具有纳米级孔径,截留分子量为200~1 000 Da,纳滤膜功能层表面具有荷电性,允许一价离子透过的同时截留二价/高价离子,能够完成不同价态溶质离子的选择性分离。纳滤膜独特的分离优势以及纳滤分离工艺环境友好、装置集成度高和智能化控制等优势,在卤水锂资源绿色开发领域具有良好的应用前景。

Yang等^[49]采用DK纳滤膜,以镁锂比为18~24的模拟卤水为原料,开展了镁锂分离研究,发现卤水镁锂比对镁截留率的影响较小,锂截留率随镁锂比的增加而增大,镁锂比为18时锂负载留率接近-60%。Bi等^[50]利用DK纳滤膜对高镁锂比盐湖卤水进行镁锂分离,研究发现当操作压力为0.8 MPa时,纳滤膜对镁离子的截留率维持在96%,锂离子的回收率为85%,纳滤分离后卤水镁锂比较原来降低42倍。Li等^[51]就DK纳滤膜对高镁锂比盐湖卤水的镁锂分离选择效果进行的系统研究结果表明,镁锂分离主要受总含盐量、操作压力、进料温度、pH等关键影响因素的影响,当含盐量为25 g/L,操作压力为

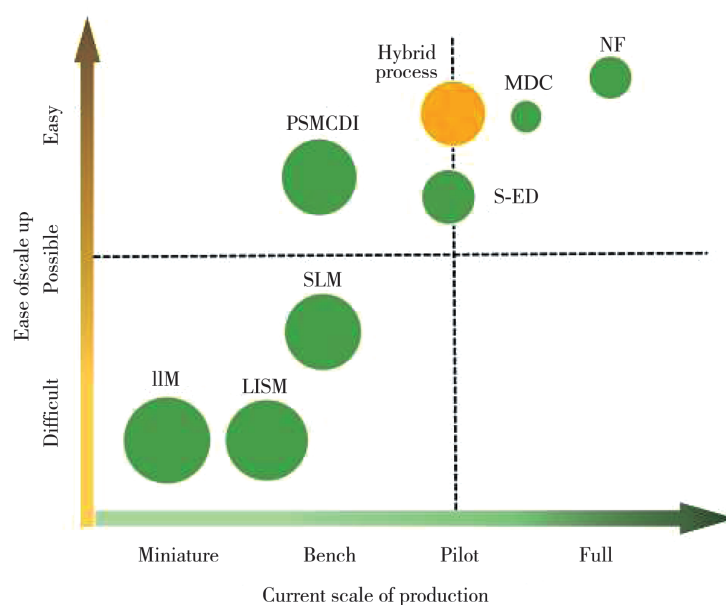
3.5 MPa, 进料温度为 25 °C, 卤水 pH = 4 时, 纳滤分离后所得透过液镁锂比最低, 纳滤膜对卤水镁锂分离选择效果最优。Li 等^[52]进一步设计多段纳滤分离工艺对纳滤高浓度液体中的锂离子进行回收, 并研究盐湖卤水复杂溶液体系共存离子对镁锂分离效果的影响; 结果表明当浓缩比为 4 时, 盐湖卤水中锂离子回收率达 99%。盐湖卤水中钠、钾离子的存在加剧了与锂离子竞争透过作用, 纳滤膜镁锂分离选择效果下降。纳滤膜渗透通量以及锂收率等对于实际纳滤分离工艺具有重要意义, 康为清等^[53]对不同镁锂比的实际卤水纳滤分离工艺进行优化, 镁锂比值 28~50 的原料卤水经镁锂分离后镁锂分离系数均低于 0.1, 单级纳滤过程锂离子收率为 62%。Somrani^[54]使用截留分子量较 DK 膜小的 NF 90 膜对经过稀释后的 Tunisian 盐湖卤水 (镁锂比为 50) 进行镁锂分离, 镁离子截留率接近 100%, 锂离子截留率为 17%, 之所以未出现锂离子的负截留是由于原料液含有大量钠离子。

高性能分离膜材料是提升纳滤膜分离选择效果、提高盐湖卤水锂离子回收率的关键。Li 等^[55]制备了一种荷正电中空纤维聚酰胺复合纳滤膜, 并就其对盐湖卤水的镁锂分离选择性能进行研究。结果表明, 在 0.3 ~ 0.6 MPa 的操作压力下, 纳滤膜对镁离子的截留率为 73.4%, 锂离子的截留率为 23.5%, 原料卤水镁锂比从初始值 20 降低至 7.7, 实现了卤水镁、锂的有效分离。Zhang 等^[56]通过界面聚合法在聚醚砜超滤膜表面合成并制备具有荷正电的纳滤膜, 并成功加入多壁碳纳米管 (MWCNT) 对纳滤膜功能层进行改性, 提升纳滤膜的渗透性能。结果表明, 复合纳滤膜对盐湖卤水钙、镁离子截留率超 95%, 锂离子截留率为 20%, 在盐湖卤水锂离子回收领域具有良好的应用潜力。Li 等^[57]以聚醚酰亚胺为载体, 通过聚乙烯亚胺 (BPEI) 和均苯三甲酰氯 (TMC) 界面聚合制备复合纳滤膜, 通过 EDTA 对纳滤膜进行改性, 并就其对盐湖卤水镁锂的分离选择效果进行研究。纳滤分离后盐湖卤水镁锂比降低至 2.6, 纳滤膜对镁离子的截留率稳定在 90% 左右, 锂离子截留率为 10%。

离子选择性电渗析 (SED) 为一种采用一价离子选择阳离子交换膜对镁、锂离子进行分离的电渗析方法。在直流电场的电势驱动下, 一价阳离子 (Li^+ 、 Na^+ 和 K^+) 由脱盐室迁移进入浓缩室, 而二价阳离子

(Ca^{2+} 和 Mg^{2+}) 被阳离子交换膜截留在脱盐室中, 实现镁锂分离和锂离子的浓缩。近年来 SED 技术在盐湖提锂方面的应用受到广泛关注, 主要围绕镁锂分离关键影响因素、选择性电渗析分离机理、工艺优化及选择性离子交换膜的制备等方面展开探索。Nie 等^[58]通过一价阳离子选择性离子交换膜对镁锂比为 150 的盐湖卤水中锂资源进行回收, 结果表明一价选择性阳离子交换膜对高镁锂比盐湖卤水镁、锂具有较高的分离选择效果, 运行 1 h 后卤水镁锂比较初始值下降了 30 倍, 锂离子回收率达 95.3%。Nie 等^[59]对 Selemion CSO 离子交换膜的镁锂分离效果进行了研究, 采用 $c(\text{Li}^+) = 0.15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、镁锂比为 67~400 的氯化镁-氯化锂混合溶液为原料液, 经过 SED 处理后得到的浓缩液的镁锂比与原料液相比降低了 6 倍以上; 同时, 采用东台吉乃尔盐湖卤水 [$c(\text{Li}^+) = 4.42 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 镁锂比 = 20.7] 进行了分离实验, 所得液体 $c(\text{Li}^+) = 4.95 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 镁锂比为 2.0, 分离过程的镁锂分离因子为 0.1, 锂收率为 90.5%。Guo 等^[60]采用 CIMS 膜开展了提锂工艺研究, 对操作电压、初始原料液/浓缩液体积比、料液温度等工艺条件进行了研究和优化, 并对比了该方法对东、西台吉乃尔盐湖以及一里坪盐湖三种模拟卤水锂提取效果。结果表明, 镁锂比较低的东台盐湖卤水的分离效果和电流效率较高, SED 过程前后溶液镁锂比值分别为 35.18 和 4.5, 锂收率为 76.45%, 锂离子迁移能耗为 $0.66 \text{ kWh} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。通过研究 SED 过程中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 等共存离子对镁锂分离效果的影响^[61], 发现共存阳离子对卤水锂离子迁移形成竞争的影响程度为 $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$, SO_4^{2-} 的“拖拽”作用有利于锂离子向浓缩室的迁移; 增强离子交换膜对锂离子的选择性对于提升 SED 过程的镁锂分离效果非常重要。不过, 盐湖卤水经过盐田摊晒以及提钾等过程后得到的老卤中, 除了 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 外, 还含有大量的 Na^+ 、 K^+ 等一价阳离子, 在实际应用过程中, SED 的镁锂分离效果以及锂离子的迁移效率均会受到 Na^+ 、 K^+ 等一价阳离子的不利影响。

除纳滤和选择性电渗析膜分离提锂技术外, 近年来还出现了大量基于膜分离技术的盐湖镁锂分离以及提锂技术的其他相关研究报道, 例如电容去离子 (CDI)、离子印记膜 (IIM)、锂离子筛膜 (LISM)、离子选择性膜电容去离子 (PSMCDI)、膜蒸馏结 (MDC)、支撑液膜 (SLM) 以及膜分离耦合技术等新



横坐标,技术的规模程度;纵坐标,技术易于放大的程度;圆圈的大小表示技术对锂离子的选择性大小
current scale of production (horizontal axis), the ease of scale up (vertical axis) and selectivity towards lithium (size of the symbol)

图2 基于膜过程的提锂技术的选择性以及工业化成熟度对比^[62]

Fig. 2 Comparison of the performance and commercial viability of membrane-based lithium recovery technologies on the basis of the current scale of production

型膜分离提锂技术。图2为基于膜过程的提锂技术离子选择性以及工艺成熟度对比。纳滤膜的工艺成熟度高并且技术易于放大,但是其离子选择性较其他锂提取技术低;离子选择性电渗析具有较高的锂离子选择性,但是其工业化程度比纳滤膜低。其余新型膜法提锂技术在离子选择性上具有非常突出的优势,但是由于技术正处于实验室研发阶段,需解决工艺设计、设备研发等一系列问题,才能实现工业化应用。利用各种膜分离技术的优势,通过多种膜分离过程的有机、高效耦合,协同实现镁锂分离、锂离子浓缩、杂质离子分离以及锂盐产品的制备,将是未来膜分离过程在盐湖提锂领域的一个主要的发展方向。

3.5 其他提锂方法

除沉淀法、离子交换吸附法、溶剂萃取法、膜分离法外,我国相关领域的科研和工程技术人员根据不同盐湖卤水锂资源的禀赋特点,开发出了其他多种盐湖提锂方法,例如煅烧法、电化学法、反应—分离耦合法等。其中煅烧法是将含锂、镁的混合盐在高温下煅烧,使水氯镁石脱水分解,再用淡水浸取煅烧产物,可溶性锂盐进入水相,镁以不溶的氧化镁形

式存在,从而实现镁和锂的分离。煅烧过程产生的氯化氢气体导致该方法存在一定的环保问题,且整个过程能耗高,在工业生产中有较大的局限性。电化学法的技术原理与锂离子电池的充放电过程类似,利用锂离子在电场作用下“嵌入”电极材料空位的过程,实现锂与镁的有效分离。基于电化学法的镁锂分离过程受原料液类型及浓度影响较小,具有技术普适性强、无需添加其它化学药剂等优点,但是目前该方法尚处于实验室规模的研究阶段,在设备规模的扩大以及工艺流程的优化等方面存在较多问题待解决。反应—分离耦合法主要基于层状复合金属氢氧化物(LDHs)的晶格选择性,使盐湖卤水中的镁离子进入LDHs结构制备出镁基功能材料(MgAl-LDHs),锂离子不能进入LDHs的层板结构,从而实现镁锂分离。相比于传统沉淀法,该方法的镁锂分离效果好,锂收率高,制备的锂产品杂质含量低,并且能副产镁基功能材料,具有非常突出的经济优势。然而,通过该法得到的富锂溶液中尚残余 Na^+ 、 K^+ 等阳离子和 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等阴离子,如何实现富锂溶液的高效富集以及杂质离子的有效脱除,是需要该方法进一步改善的内容。

4 结论和展望

便携式电子产品和电动汽车行业的飞速发展,使锂资源需求量呈指数式增长,面对不断增加的市场需求和锂资源短缺的现状,盐湖锂资源的重要性愈加凸显。新形势下我国盐湖卤水锂资源开发机遇与挑战并存,亟需研制适用于我国盐湖卤水特点的锂资源高效分离提取技术。现有盐湖提锂技术在卤水锂资源分离提取方面具有良好的应用前景,但依然存在锂资源利用率低、锂产品单一化、盐湖资源综合利用性差等问题。今后,可利用各盐湖提锂技术的优势,将多种提锂工艺有机耦合,协同实现高镁锂比盐湖卤水锂资源高值化利用,提高盐湖提锂新材料、新方法、新工艺的性能稳定性、重现性,将其从实验室研发规模延伸扩大至盐湖提锂工业化应用过程中,提升盐湖提锂工艺的可行性及实用性。与此同时,应在“一带一路”倡议的国际国内新形势下,立足青海省盐湖卤水资源优势禀赋,秉持互学互鉴、互利共赢原则,将国外卤水锂资源成功开发经验与我国盐湖卤水资源特点相结合,加强与国内外盐湖产区及锂盐公司的合作,促进我国盐湖卤水提锂技术的发展,实现锂盐产品种类多样化及盐湖资源的绿色低碳循环利用。

参考文献:

- [1] Choubey P K, Kim M S, Srivastava R R, *et al.* Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element: lithium. Part I: From mineral and brine resources [J]. *Minerals Engineering*, 2016, 89: 119-137.
- [2] 王秋舒, 元春华. 全球锂矿供应形势及我国资源安全保障建议[J]. *中国矿业*, 2019, 28 (5): 1-6.
- [3] 郑人瑞, 唐金荣, 周平, 等. 我国锂资源供应风险评估[J]. *中国矿业*, 2016, 25 (12): 30-37.
- [4] 张泽南. 中国锂矿资源需求预测及锂产品市场分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- [5] 崔晓林. 中国锂矿资源需求预测及供需分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- [6] Delgado M A, Valencia C, Sánchez M C, *et al.* Thermorheological behaviour of a lithium lubricating grease [J]. *Tribology Letters*, 2006, 23 (1): 47-54.
- [7] Muroga T. Vanadium alloys for fusion blanket applications [J]. *Materials*, 2005, 46 (3): 405-411.
- [8] 王登红, 王瑞江, 付小方, 等. 对能源金属矿产资源基地调查评价基本问题的探讨—以四川甲基卡大型锂矿基地为例[J]. *地球学报*, 2016, 37 (4): 471-480.
- [9] 李正山. 青海锂矿资源可持续开发路径研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- [10] 刘丹阳, 李劲风. 铝锂合金电化学特征与晶间腐蚀的相关性. 2018年全国腐蚀电化学及测试方法学术交流会论文集[C]. 北京, 北京化工大学, 2018: 216-218.
- [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] Battistel A, Palagonia M S, Brogioli D, *et al.* Electrochemical methods for lithium recovery: a comprehensive and critical review [J]. 2020, 32 (23): 1905440.
- [13] 姜贞贞, 刘高令, 卓玛曲西, 等. 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*, 2021, 29 (3): 104-110.
- [14] United States Geological Survey. Mineral commodity summaries 2019[M]. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2019: 79.
- [15] 戴自希. 世界锂资源现状及开发利用趋势[J]. *中国有色冶金*, 2008, 4: 17-20.
- [16] 李慧芳. TBP萃取体系从盐湖卤水中分离提取锂的机制及关键因素研究[D]. 西宁: 中国科学院青海盐湖研究所, 2019.
- [17] 周园, 李丽娟, 吴志坚, 等. 青海盐湖资源开发及综合利用[J]. *化学进展*, 2013, (10): 1613-1624.
- [18] 付焯, 钟辉. 沉淀法分离高镁锂比盐湖卤水的研究现状[J]. *矿产综合利用*, 2010, (2): 30-33.
- [19] Epstein J, Feist E, Zmora J, *et al.* Extraction of lithium from the dead sea [J]. *Hydrometallurgy*, 1981, 6 (3-4): 269-275.
- [20] An J W, Kang D J, Tran K T, *et al.* Recovery of lithium from uyuni Salar brine [J]. *Hydrometallurgy*, 2012, 117-118: 64-70.
- [21] Bertau M, Martin G. Integrated direct carbonation process for lithium recovery from primary and secondary resources [G]. *Materials Science Forum*, Trans. Tech. Publ., 2019, 959: 69-73.
- [22] Xu Z, Zhang H, Wang R, *et al.* Systemic and direct production of battery-grade lithium carbonate from a saline Lake [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53 (42): 16502-16507.
- [23] 于明臻. 我国锂盐工业的现状和技术进展[J]. *无机盐工业*, 1999, (1): 19-21, 3.
- [24] Li Y. H, Zhao Z. W, Liu X. H, *et al.* Extraction of lithium from salt lake brine by aluminum-based alloys [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25 (10): 3484-3489.
- [25] Liu X, Zhong M, Chen X, *et al.* Separating lithium and magnesium in brine by aluminum-based materials [J]. *Hydrometallurgy*, 2018, 176: 73-77.
- [26] Paranthaman M. P, Li L, Luo J. Q, *et al.* Recovery of lithium from geothermal brine with lithium-aluminum layered double hydroxide chloride sorbents [J]. *Environmental science & technology*, 2017, 51 (22): 13481-13486.
- [27] Hamzaoui A, M' nif A, Hammi H, *et al.* Contribution to the lithium recovery from brine [J]. *Desalination*, 2003, 158 (1-3):

- 221–224.
- [28] Tran K T, Van L T, An J W, *et al.* Recovery of magnesium from uyuni Salar brine as high purity magnesium oxalate[J]. Hydrometallurgy, 2013, 138: 93–99.
- [29] Wang H, Zhong Y, Du B, *et al.* Recovery of both magnesium and lithium from high Mg/Li ratio brines using a novel process [J]. Hydrometallurgy, 2018, 175: 102–108.
- [30] Lai X, Xiong P, Zhong H. Extraction of lithium from brines with high Mg/Li ratio by the crystallization–precipitation method[J], Hydrometallurgy, 2020, 192: 105252.
- [31] Zhang Y, Hu Y, Sun N, *et al.* A novel precipitant for separating lithium from magnesium in high Mg/Li ratio brine[J], Hydrometallurgy, 2019, 187: 125–133.
- [32] Chitrakar R, Kanoh H, Miyai Y, *et al.* Recovery of lithium from seawater using manganese oxide adsorbent ($H_{1.6}Mn_{1.6}O_4$) derived from $Li_{1.6}Mn_{1.6}O_4$ [J]. Industrial & engineering chemistry research, 2001, 40 (9): 2054–2058.
- [33] Chitrakar R, Makita Y, Ooi K, *et al.* Selective uptake of lithium ion from brine by $H_{1.33}Mn_{1.67}O_4$ and $H_{1.6}Mn_{1.6}O_4$ [J]. Materials Letters, 2012, 41 (12): 1647–1649.
- [34] Ohashi F, Tai Y. Lithium adsorption from natural brine using surface-modified manganese oxide adsorbents[J]. Materials Letters, 2019, 251: 214–217.
- [35] Zhang G. T, Zhang J. Z, Zhou Y, *et al.* Synthesis of aluminum-doped ion-sieve manganese oxides powders with enhanced adsorption performance[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 583: 123950.
- [36] 钟辉. 偏钛酸型锂离子交换剂的交换性质及从气田卤水中提锂[J]. 应用化学, 2000, 17(3): 307–309.
- [37] Wei S, Wei Y, Chen T, *et al.* Porous lithium ion sieves nanofibers: general synthesis strategy and highly selective recovery of lithium from brine water [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 379: 122407.
- [38] Zhong J, Lin S, Yu J. Li^+ adsorption performance and mechanism using lithium/aluminum layered double hydroxides in low grade brines[J]. Desalination, 2021, 505: 114983.
- [39] Al-Absi R S, Abu-Dieyeh M H, Ben-Hamadou R, *et al.* Novel composite materials of modified roasted date pits using ferrocyanides for the recovery of lithium ions from seawater reverse osmosis brine[J]. Scientific Reports, 2021, 11 (1): 1–17.
- [40] Wahib S A, Da'na D A, Zaouri N, *et al.* Adsorption and recovery of lithium ions from groundwater using date pits impregnated with cellulose nanocrystals and ionic liquid[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 421: 126657.
- [41] Song J. F, Nghiem L D, Li X M, *et al.* Lithium extraction from Chinese salt-lake brines: opportunities, challenges, and future outlook[J]. Environmental Science Water Research & Technology, 2017, 3(4): 593–597.
- [42] Zhou Z, Qin W, Liu Y, *et al.* Extraction Equilibria of Lithium with Tributyl Phosphate in Kerosene and $FeCl_3$ [J]. J. Chem. Eng. Data, 2012, 57(1): 82–86.
- [43] Ji L, Hu Y, Li L, *et al.* Lithium Extraction with a Synergistic System of Dioctyl Phthalate and Tributyl Phosphate in Kerosene and $FeCl_3$ [J]. Hydrometallurgy, 2016, 162: 71–78.
- [44] Su H, Li Z, Zhang J, *et al.* Recovery of lithium from salt lake brine using a mixed ternary solvent extraction system consisting of TBP, $FeCl_3$ and P507 [J]. Hydrometallurgy, 2020, 197: 105487.
- [45] Shi C, Jia Y, Chao Z, *et al.* Extraction of lithium from salt lake brine using room temperature ionic liquid in tributyl phosphate [J]. Fusion Engineering & Design, 2015, 90: 1–6.
- [46] Shi C, Jing Y, Jia Y. Solvent extraction of lithium ions by tri-n-butyl phosphate using a room temperature ionic liquid[J]. Journal of Molecular Liquids, 2016, 215: 640–646.
- [47] 石成龙. 离子液体体系用于盐湖卤水中提取锂的研究[D]. 西宁: 中国科学院青海盐湖研究所, 2017.
- [48] 石成龙, 贾永忠, 景燕. 离子液体-磷酸三丁酯体系分离盐湖卤水镁锂[J]. 化工学报, 2015, 66(S1): 253–259.
- [49] Yang G, Shi H, Liu W. Q, *et al.* Investigation of Mg^{2+}/Li^+ separation by nanofiltration[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2011, 19 (4): 586–591.
- [50] Bi Q. Y, Zhang Z. Q, Zhao C. Y, *et al.* Study on the recovery of lithium from high Mg^{2+}/Li^+ ratio brine by nanofiltration[J]. Water Science and Technology, 2014, 70(10): 1690–1694.
- [51] Li Y, Zhao Y J, Wang M. Effects of pH and salinity on the separation of magnesium and lithium from brine by Nanofiltration[J]. Desalination and Water Treatment, 2017, (97): 141–150.
- [52] Li Y, Zhao Y J, Wang M. The application of nanofiltration membrane for recovering lithium from salt lake brine [J]. Desalination, 2019, 468: 114081.
- [53] 康为清, 时历杰, 赵有璟, 等. 纳滤法用于盐湖卤水镁锂分离的初步实验[J]. 无机盐工业, 2014(12): 22–24.
- [54] Somrani A, Hamzaoui A. H, Pontie M. Study on lithium separation from salt lake brines by nanofiltration (NF) and low pressure reverse osmosis (LPRO)[J]. Desalination, 2013, 317: 184–192.
- [55] Li X, Zhang C, Zhang S, *et al.* Preparation and characterization of positively charged polyamide composite nanofiltration hollow fiber membrane for lithium and magnesium separation[J]. Desalination, 2015, 369: 26–36.
- [56] Zhang H. Z, Xu Z. L, Ding H, *et al.* Positively charged capillary nanofiltration membrane with high rejection for Mg^{2+} and Ca^{2+} and good separation for Mg^{2+} and Li^+ [J]. Desalination, 2017, 420: 158–166.
- [57] Li W, Shi C, Zhou A Y, *et al.* A positively charged composite nanofiltration membrane modified by EDTA for $LiCl/MgCl_2$ separation[J]. Separation and Purification Technology, 2017, 186: 233–242.
- [58] Nie X Y, Sun S Y, Sun Z, *et al.* Ion-fractionation of lithium ions from magnesium ions by electrodialysis using monovalent selective ion-exchange membranes[J]. Desalination, 2017, 403: 128–135.

- [59] Nie X Y, Sun S Y, Song X, *et al.* Further investigation into lithium recovery from salt lake brines with different feed characteristics by electrodialysis [J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 530: 185–191.
- [60] Guo Z Y, Ji Z Y, Chen Q. B, *et al.* Prefractionation of LiCl from concentrated seawater/salt lake brines by electrodialysis with monovalent selective ion exchange membranes [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 193: 338–350.
- [61] Ji P Y, Ji Z Y, Chen Q B, *et al.* Effect of coexisting ions on recovering lithium from high Mg^{2+}/Li^{+} ratio brines by selective-electrodialysis [J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 207: 1–11.
- [62] Li X, Mo Y, Qing W, *et al.* Membrane-based technologies for lithium recovery from water lithium resources: a review [J]. *Journal of Membrane Science*, 2019, 591: 117317.

Technology and Development of Lithium Extraction from Salt Lake Brine

LI Yan^{1,2}, WANG Min^{1,2*}, ZHAO You-jing^{1,2}, WANG Huai-you^{1,2},
ZHU Zeng-hu^{1,2}, PENG Zheng-jun^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China;*

2. *Key Laboratory of Salt Lake Resources Chemistry of Qinghai Province, Xining, 810008, China*)

Abstract: As the lightest metal element, lithium is widely used in the various fields of the national economy. In recent years, the demand for lithium salts is increasing rapidly. Therefore, lithium resources extraction is of great significance for promoting the development of new energy and ensuring energy security. The Qaidam Basin in Qinghai province is the main area rich in salt lake resources, however, the high magnesium and low lithium contents of the brine significantly increase the difficulty of lithium separation and extraction, which is the key problem that restricts the sustainable utilization of salt lake lithium resources of China. The status quo and progress in extraction methods of lithium from salt lake brine was reviewed and the recent advances used in exploiting lithium from brine were briefly described, which were of great significance for the green low-carbon development and comprehensive utility of salt lake brine with high magnesium-to-lithium mass ratios in China.

Key Words: Lithium; Salt lake brine; Lithium extraction