

国际锂矿开发的技术现状、革新及展望

吴西顺^{1,2}, 孙艳³, 王登红³, 黄文斌^{1,2}, 黄凡³, 高曦^{1,2}, 张炜^{1,2}, 姚翔⁴

(1. 中国地质调查局地学文献中心, 中国地质图书馆, 北京 100083; 2. 中国地质调查局国际矿业研究中心, 北京 100037; 3. 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 4. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075)

摘要: 与国内的锂矿技术创新相比, 国外的锂矿开发利用技术总体发展时间早, 但区域发展极不均衡, 欧美澳技术革新持续性强, 近期颠覆性技术频频出现。锂矿山多矿种综合利用是趋势, 是降低成本、提高效率 and 环境保护的重要方向。采选冶垂直一体化是创新增效、优化流程的重要选项。从地域上看, 美洲是世界锂提取技术的摇篮, 南美锂三角技术稳定, 成本低, 正处于技术革新的前夕。非洲资源量大, 硬岩为主, 受限于基础设施, 云母型提取技术的创新和综合利用是出路。澳洲硬岩锂矿开发强度最大, 技术娴熟, 成本压力催生更多优化创新项目。欧洲市场需求带动本土锂矿开发, 采选冶一体化项目增多。新型锂矿如盐湖卤水、硬岩采选、粘土沉积型、地热卤水的提取技术在近期都将有重大突破的希望。

关键词: 锂矿; 开发技术; 国际; 技术革新; 展望

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2020.06.019

中图分类号: TD353 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2020) 06-0110-11

锂是世界上最轻的金属, 不但在新能源和储能领域如电动汽车、船舶和笔记本电脑的锂离子电池(LIB)中是重要材料, 还是未来可控核聚变“人造太阳”的重要原料, 1 g 锂放出的有效能量最高比铀裂变能量大 8 倍, 相当于 3.7 t 标准煤。在制造业中被制成轻质合金用于各种航天器、硬盘驱动器(HDD)玻璃、耐热玻璃添加剂、空调制冷除湿系统、润滑剂等, 还在医药领域用于治疗抑郁症、阿兹海默症等精神疾病^[1-4]。

锂资源的赋存状态直接决定了提取技术的难易和复杂程度, 反之锂提取技术的发展也影响锂储量和资源量评估。2020年, 美国地质调查局采用多重标准发布了世界范围内的探明锂资源量修改为约 8000 万 t。其中, 美国的锂资源量(包括盐湖卤水、

地热卤水、锂蒙脱石、油田卤水和伟晶岩)为 680 万 t^[5], 其他国家的锂资源修订为 7300 万 t, 按降序排列分别为: 玻利维亚 2100 万 t; 阿根廷 1700 万 t; 智利 900 万 t; 澳大利亚 630 万 t; 中国 450 万 t; 刚果(金) 300 万 t; 德国 250 万 t; 加拿大和墨西哥, 各 170 万 t; 捷克 130 万 t; 俄罗斯、马里和塞尔维亚各 100 万 t; 津巴布韦 54 万 t; 巴西 40 万 t; 西班牙 30 万 t; 葡萄牙, 25 万 t; 秘鲁 13 万 t; 奥地利、芬兰和哈萨克斯坦, 各 5 万 t; 纳米比亚 0.9 万 t。中国不但早有沉积岩型锂, 且最近云南玉溪又开钻新的粘土型约 500 万 t 氧化锂资源^[6]。

生产方面, 全球矿石锂产量在 2015~2019 年从 6.1 万 t LCE 增长至 25.8 万 t (精矿), 盐湖锂产量从 9.7 万 t LCE 增长至 17.8 万 t。2019 年主要

收稿日期: 2020-08-15

基金项目: 中国地质调查“国际地质调查动态跟踪与分析”(DD20190414); “地学情报综合研究与产品研发”(121201015000150002)

作者简介: 吴西顺(1975-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事矿产资源、矿业科技、非常规能源、海洋地质和产业政策的科学研究工作。

生产企业，在澳大利亚有6家，阿根廷和智利各有2家卤水厂，中国有1家卤水和1家矿石锂企业。由于产能过剩和价格下跌，一些已建成的锂业务推迟了产能扩张计划。澳大利亚、加拿大和纳米比亚的一些采矿业务完全停止了生产，导致澳大利亚硬岩锂矿产量从上年的5.88万t下降到4.2万t，而锂三角盐湖产量仍稳步上升达到2.4万t（表1）。

表1 世界各国锂矿生产形势

Table 1 The production situation of lithium ore all over the world

年度产量	2015	2016	2017	2018	2019	储量
美国	W	W	W	W	W	63
阿根廷	3600	5800	5700	6400	6400	170
澳大利亚	14100	14000	40000	58800	42000	280
巴西	200	200	200	300	300	9.5
加拿大	-	-	-	2,400	200	37
智利	10500	14300	14200	17000	18000	860
中国	2000	2300	6800	7100	7500	100
纳米比亚	-	-	-	500	-	NA
葡萄牙	200	400	800	800	1200	6
津巴布韦	900	1000	800	1600	1600	23
其他	-	-	-	-	-	110
世界	31500	38000	69000	95000	77000	1700

资料来源：U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2016-2020。年度产量单位为t，储量单位为万t。

这些产量变化的背后原因是资源和技术不同导致各国矿山的生产成本差别很大。本文研究了96个代表性锂矿国际项目，总结其采选冶技术发展创新现状并对未来给予一定展望。

市场方面，中国是锂产品消费大国，受国际供求形势影响很大。2019年碳酸锂现货价格从年初每吨约11600美元降至12月的每吨约7300美元。美国由于约束性合同^[5]，碳酸锂年均价格为13000美元，比2018年下降了24%。中国氢氧化锂现货价格从年初的每吨15500美元下降到12月的8000美元。中国市场锂金属现货（99.9% Li）价格从年初每吨12万美元降至12月的8.2万美元（USGS, 2020）。价格的持续走低，一定程度上刺激了资本并购和以降低成本为目的的技术创新。

1 卤水提锂技术现状及创新

由于不同盐湖的卤水成分不同，加上场地条件的限制，采用的生产方法也不同。但太阳能蒸发池一般分为三个区域，即上部对流区域（UCZ，含有淡水）、非对流区域（NCZ，盐度从上到下逐渐增加）和下部对流区（LCZ，由预浓缩盐水组成）^[4]。最近，美国Symbol公司与韩国巨头POSCO（浦项钢铁公司）合作尝试建立一种替代太阳能蒸发的提锂工艺。他们基于反渗析技术对在南加州盐顿海地热电站的热液卤水进行处理，无需太阳能蒸发，操作成本低廉。太阳能蒸发池的回收率最高50%，而POSCO技术回收率可高达80%以上，纯度也高达99.99%。早在2012年，浦项钢铁公司就与智利北部科皮亚波的Li₃能源公司合作运营年产能为20 t Li₂CO₃的中试工厂。考虑到卤水供应，还与玻利维亚政府签署合作协议，对其技术在该地区含锂卤水项目中的应用进行评估^[4,7-8]。

据日本JOGMEC调研，国际上盐湖卤水的传统提锂技术主要有Atacama法、FMC法、Olaroz法^[9]，新型的方法有POSCO法、LiSX法、Eramet（吸附法）、MRT法、真空法等。

Atacama法是SQM公司和Albemarle公司在智利Atacama盐湖生产碳酸锂的方法^[9]，属于浓缩-转化法，工艺简单且成本较低，用泵抽取地表以下1.5 m至60 m的卤水，再将卤水注入超过1700公顷面积的蒸发池，而后运输到Antofagasta港附近的加工厂制造碳酸锂与氢氧化锂。主要生产步骤如下：①利用太阳能对卤水（Li: 1500 × 10⁻⁶）进行蒸发浓缩，结晶出溶解度比LiCl更低的NaCl和KCl。此时，Li的浓度已被浓缩到约0.9%。②在阳光下反复蒸发结晶出MgCl₂，最终使Li的浓度浓缩到6%。此时仍残留1.8%的Mg和0.8%的B。③首先用溶剂萃取法除去B，然后加入生

石灰 (CaO) 或熟石灰 (Ca(OH)₂) 中和并除去 Mg(OH)₂。④向碳酸盐中加入纯碱 (Na₂CO₃)，经加热、压滤和干燥后得到碳酸锂产品。⑤在碳酸锂中加入熟石灰取代羟基得到氢氧化锂。但碳酸化和纯碱的添加带来如何去除残留钙的问题，对此各生产商都有自己的专有技术。

FMC 法是阿根廷 Hombre Muerto 盐湖中所采用的方法。该方法经过温度和 pH 值调节后，用氧化铝基吸附剂 (可选择性吸附 Li) 将 Li 含量浓缩到约 1%，然后再在阳光下进行蒸发，从而进一步浓缩 Li 的含量。其后续的工艺 (碳酸化) 似乎与 Atacama 法几乎相同。

Olaroz 法是 Orocobre 公司在阿根廷 Olaroz 盐湖所采用的方法。通过向卤水中加入 CaO 去除 Mg 后，在阳光下蒸发得到浓缩卤水 (含 Li 约 1%) 后加入纯碱，生成初级碳酸锂。然后加入 CO₂ 进行再次溶解。反应式为 Li₂CO₃+CO₂+H₂O → 2LiHCO₃。此后将残余的 Mg、Ca、B 等杂质通过离子交换将其从过滤溶液中去除，然后加热结晶得到纯化的碳酸锂。上述三种方法从流程上可以予以比较和说明，见图 1。

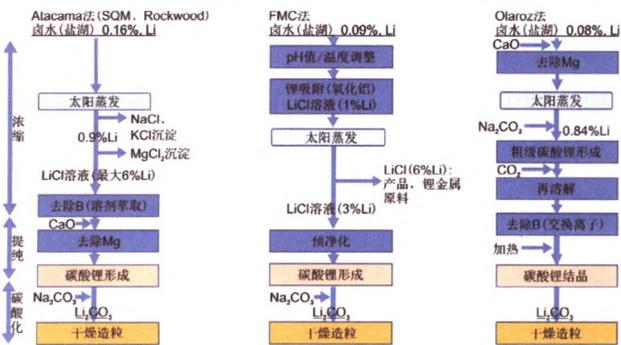


图 1 传统卤水提锂方法比较^[9]

Fig.1 Comparison of traditional brine extraction methods

POSCO 法，由 POSCO 公司研发，是一种新型磷酸盐沉淀 - 膜电解技术，旨在开发阿根廷盐湖中的锂。主要步骤为：①通过太阳能蒸发提高卤水中锂的浓度，再用碱性溶液 (NaOH) 进行中和和除去杂质 (Mg 和 Ca)。②向不含杂质的锂溶液

中加入 Na₃PO₄，使低溶性磷酸锂沉淀析出。③加入过量磷酸将磷酸锂沉淀溶解，以形成酸性磷酸锂溶液。④在离子交换膜分离装置中通过电解法生产氢氧化锂。利用该技术可以生产出高纯氢氧化锂，但缺点是化学药剂 (NaOH、磷酸和磷酸盐) 的成本较高。

LiSX 法，利用有机溶剂和萃取剂从卤水中萃取锂，是 Tenova Bateman 公司研发的一种提锂方法。该法将 SX-EW 法中用于提炼铜的技术应用于锂的提取，并使用了选择性锂提取剂。步骤包括：①卤水 LiP 预处理 (如膜分离等物理处理)，以去除杂质 (Mg 和 Ca)。②LiSX 柱 (溶剂萃取工艺) 处理 (见图 2)。与以往的溶剂萃取一样，经过萃取、洗涤、反萃取三个步骤制得高纯度的锂溶液。③商品化过程 (碳酸化和羟基化)。

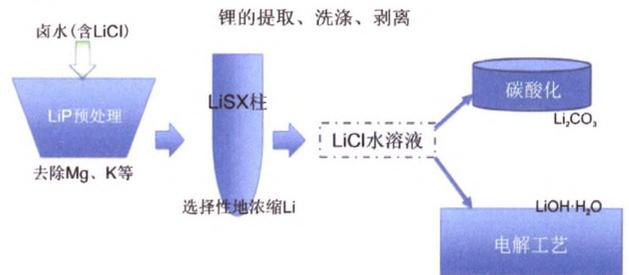


图 2 新型 LiSX 法的工艺流程

Fig.2 Process flow of the new LiSX method

该溶剂萃取反应是在立式塔中进行的，而不是在传统的搅拌 - 沉淀器中进行。该技术的优点是不需要蒸发池 (但需预处理去除杂质)，从而缩短了生产时间 (蒸发池法约需要 18 个月，而 LiSX 法仅需要数小时)。另一方面，其缺点是有有机溶剂的成本较高，以及盐湖所在的高原地区挥发性使有机溶剂难以处理。

Eramet 法，是一种吸附法，法国公司 Eramet 开发的主要针对阿根廷 Centenario 盐湖和 Ratones 盐湖的方法。步骤包括：①在太阳能蒸发过程中预处理，利用吸附剂选择性吸附和浓缩锂。吸附剂的种类和详细情况不详。锂离子吸附柱是一个

装满珠状吸附剂的柱子，注入卤水时锂被吸附。

②用水洗（或酸洗）对吸附柱进行锂的解吸附。

③蒸发含有浓缩锂的处理液。之后的处理类似于 Atacama 法。这项技术预计将使蒸发池的面积减小。然而吸附剂成本较高。

目前在研的技术除沉淀回收、电解、溶剂萃取浓缩、选择性吸附外，还提出了分子识别技术 MRT (Molecular Recognition Technology) 以及针对原油和地热卤水的真空法（即通过真空蒸发代替蒸发池进行锂成分的浓缩）技术^[9]。其中，后两项新技术都是为了减少或省去蒸发这一过程。美国的地热卤水提锂技术已积淀了十几年的成果，正准备商业化。2020年3月《自然》杂志报道莫纳什大学和 CSIRO 等多家机构联合成功研制出一种超纳米级离子筛分膜 Asy-MOF SNC，调整 pH 值可选择通过 K^+/Mg^{2+} 在 10^2 至 10^4 之间。通道由 6-Å 尺寸的窗口和 8-11-Å 尺寸的空腔在骨架上镶嵌有机官能团 3D 多孔 $UiO-66-(COOH)_2$ ，可作为仿生离子筛过滤器，将来可用于盐湖提锂技术^[10]。

2 矿石提锂技术现状与创新

伟晶岩是目前锂矿物的主要来源，因晶粒较粗选矿回收相对容易而成为矿石锂的主力^[1]。由于锂精矿在酸浸之前需要高温预处理而冶炼难度较大成本较高，多数位于边际盈利线上下。近年价格下行正推动企业创新以降低成本。

2.1 锂辉石技术流程优化

矿石主要有锂辉石 ($LiAlSi_2O_6$)、锂云母和粘土矿物，前者结构简单易于选冶。通过颚式破碎机或圆锥破碎机将原矿破碎，再进行重选、浮选和磁选，再过滤、洗选和烘干等工序生产出精矿。通常情况下，原矿（锂辉石矿）的 Li_2O 品位约为 1%，精矿品位约为 6%。精矿再被提炼成碳酸锂和氢氧化锂等各种化合物。目前各环节都在优化。

煅烧-硫酸浸出法是最常用的方法。除此之外，

还有石灰煅烧法再通过加热溶液进行浸取可以直接生成 $LiOH \cdot H_2O$ 。目前西澳氢氧化锂精炼厂计划建设的是先纯化硫酸锂溶液，然后通过加入 $NaOH$ 来置换 $LiOH$ 。另外，加拿大 Nemaska Lithium 公司还直接将硫酸锂溶液直接进行膜电解以获得 $LiOH \cdot H_2O$ ^[12]。

2.2 锂云母产品即将量产

目前锂云母的提取技术已经比较成熟，且已经在德国、纳米比亚等地实施商业开发项目。锂云母成分为 $K(Li,Al)_3(Si,Al)_4O_{10}(F,OH)_2$ ，新的回收方法主要有 L-Max、SiLeach 等技术，分别由澳大利亚的企业 Lepidico 公司和 Lithium Australia 公司研究发明并拥有专利。主要步骤包括：①在约 100℃ 的高温 and 大气压下，用硫酸浸提取锂云母。②进行石膏沉淀、Fe-Al 等杂质去除、Ca 杂质去除等多级净化。③用碳酸盐化的方式回收碳酸锂。

该方法的优点是不需要煅烧，从而达到节能的目的，而且品位与锂辉石差不多。据研发企业介绍，即使将 K_2SO_4 、 Na_2SiO_3 、 $CsCOOH$ 等副产品也考虑在内，其成本也比较低，但也面临着液体净化过程多且复杂等问题。

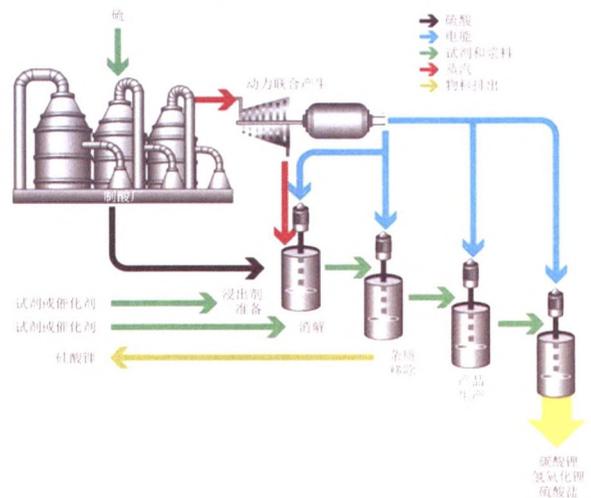


图 3 锂云母提锂技术流程^[9]

Fig. 3 Technical flow of lithium extraction from lepidolite

2.3 粘土型锂矿技术呼之欲出

蒙脱石 $Na_{0.3}(Mg,Li)_3Si_4O_{10}(OH)_2$ 是主要类型，

成分比锂辉石更为复杂，是介于矿石锂和盐湖锂之间的一种锂资源，主要优势在于资源总量庞大、开采便利、低剥采比且无需爆破，因此在前端采矿环节相比锂辉石具备成本优势。目前粘土型锂矿的开发技术正在研发并渐趋成熟，从粘土矿物（锂蒙脱石）生产锂精矿的步骤主要是：①制粒过程：加入 CaCO_3 和 CaSO_4 后混合。②煅烧过程：加热至 1050°C （除去挥发成分）。③水浸制得硫酸锂溶液。④蒸发/结晶（分步结晶）：根据各元素的溶解度差异去除杂质。⑤加入纯碱对硫酸锂溶液进行碳化处理。

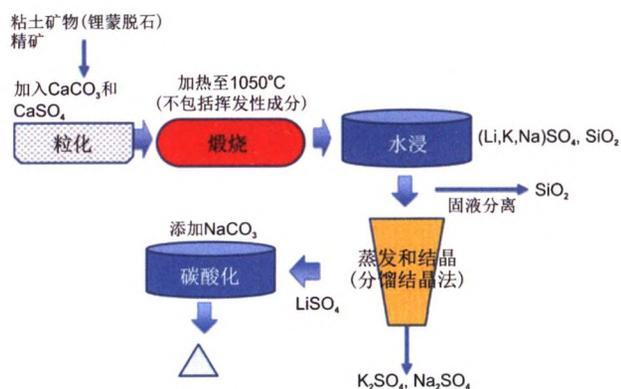


图 4 锂蒙脱石提锂工艺流程

Fig. 4 Process flow of lithium extraction from hectorite

上述生产方法最初是由当时 Western Lithium 公司（如今的 Lithium Americas）提出，但现在已经改为只用硫酸浸出而不煅烧。

除此之外还有与煤层相关的提锂技术也研发中，包括粉煤灰和煤层压裂水中的锂^[13-16]。俄罗斯、中国、美国、南非和朝鲜均发现了高锂煤矿床但尚未有工艺成熟的提取锂技术，而粉煤灰提锂工艺技术研究正处于实验室研究阶段。

3 世界重要锂矿项目技术现状

本文共核查了世界各国 96 个重要的在建、在生产或在研锂矿项目。

3.1 美洲：锂矿技术的摇篮

不管是硬岩锂矿还是盐湖卤水以及粘土型锂矿，美国几乎都是技术最早得以试验和应用的地

方，而且南美“锂三角”是目前世界上最大的产区之一。

美国北卡罗莱纳州 Kings Mountain 和毗邻的 Hallman-Beam 矿山位于锡石 - 锂辉石伟晶岩成矿带，曾是锂业巨头 Foote（洛克伍德、雅保锂业前身）和 Lithium Corporation of America（FMC Lithium 前身，现独立分拆上市更名为 Livent）崛起的重要基石，是现代硬岩锂矿技术的摇篮。内华达州 Clayton Valley 的银峰盐湖（Silver Peak）是世界第一个盐湖锂项目，开发历程最早可追溯至 1860 年左右。1938 年，美国钾肥公司在加州 Searles Lake 也开采和加工卤水。美国公司 Lilac Solutions 与澳大利亚公司 Controlled Thermal Resources(CTR) 共同在加州南部帝王谷索尔顿海盐湖地热卤水锂矿，凭借其创新离子交换珠锂回收技术甚至吸引了比尔·盖茨的风投资项目 Breakthrough Energy Ventures(BEV)。美国能源部在十几年前就资助地热卤水高效提锂的分子筛研究。2019 年 12 月，加州能源委员会发起了“GFO-19-303 克服技术障碍与实现盐水中矿物锂回收的地热能”项目，包含“提高现有地热设施的产能和灵活性”、“改进回收锂的处理技术”和“从地热盐水中回收锂的示范工程”三个子课题。

美国银峰盐湖周边的非核心区域也有数个盐湖和沉积岩型锂开发项目，距离 Tesla 的 Gigafactory1 超级工厂仅约半小时的车程。但北美最大的锂矿项目是内华达 Thacker Pass 黏土锂矿，也是北美三大沉积岩型锂矿项目中平均品位最高的一处，探获矿产资源总量约 5.33 亿 t。美洲锂业通过旗下全资子公司 Lithium Nevada 全资控制该黏土项目。

智利 Atacama 盐湖是高产盐湖，是南美锂三角中资源赋存形式和开发条件较好的，也是开发程度最高的硫酸镁亚型盐湖而备受青睐^[25]。SQM（智利化工矿业公司，Sociedad Química y Minera de Chile）采矿权 81920 公顷，提取和蒸发后的浓缩氯化锂溶液送到 Antofagasta 附近的 Salar del

Carmen 加工厂进行处理以获得碳酸锂和氢氧化锂。雅保 (Albemarle) 公司的采矿权约 1.67 万公顷, 抽取卤水 (含锂 0.2%) 后利用太阳能将卤水在盐田中蒸发富集 (多套蒸发晒卤系统), 约 18 个月后将 6% 老卤 (钾肥已提取) 运输至位于安托法加斯塔港口附近的 La Negra 加工厂。目前建成一期、二期产能 4.4 万 t, 三期、四期合计 4 万 t/y 产能在建, 有望于 2021 年逐步投产 (可能因疫情而延后)。未来雅保计划择机实施回收率优化项目, 在不新增卤水抽取的前提下提高产出。另外俄罗斯 Rosatom 矿业铀子公司还将与加拿大惠尔斯合作催化剂技术绿色开采智利 4.62 万公顷的区域。

阿根廷卡塔马尔卡、萨尔塔及胡胡伊三省目前至少有 40 多个项目处于不同的发展阶段, 开发商来自美国、智利、日本、加拿大、澳大利亚和中国等。其中卡塔马卡省 Hombre Muerto (翁布雷·穆尔托) 盐湖大部矿权为美国 FMC 公司所有, Albermarle 公司 2016 年投资勘探安托法拉盐湖 (Salar de Antofalla)。胡胡伊省奥拉罗斯盐湖 (Salar de Olaroz) 开始生产, 是全球近 20 年来第一个利用盐沼提取锂的新建项目, 2015 年由日本丰田公司支持奥诺科布雷 (Orocobre) 公司投资。SQM 也在胡胡伊省合资开发 Cauchari-Olaroz 盐沼项目。雷克资源 (Lake Resources NL) 的卡察里项目 (Cauchari Lithium Brine Project) 和 AAL 锂业 - 奥罗科布 (Orocobre) 的合资项目在赣锋 - 美国锂业卡察里项目的隔壁。韩国浦项制铁集团 (POSCO) 2018 年投资萨尔德维达项目 (Sal de Vida Project) 北部矿权, 原系银河资源资产。萨尔塔省的林孔锂项目 (Rincon Lithium Project) 由 Argosy Minerals Limited 公司开发, 2017 年投产。此外知名的还有 Eramet 公司在 Centenario 盐湖和 Ratones 盐湖的研发项目。

玻利维亚乌尤尼盐沼储量最丰富, SRK 的最新调查发现的锂资源储量或高达 2100 万 t, 但蒸发效率低, 基础设施落后, 高镁比是阿根廷的 20 倍、智利的 3 倍, 提取过程复杂化, 产量几乎没

有。政策开放度不够, 由 Potosi 机构统管和国有企业 YLB 运作。Payne 研究所在研发适用的直接锂提取 (DLE) 技术。德国 ACISA 公司 2019 年曾计划引用 K-UTEC AG Salt Technologies 的新技术直接从卤水中生产氢氧化锂 (DLE) 来降低成本, 预计 2022 年产出 4 万 t 氢氧化锂, 但因政局动荡而被取消。

墨西哥北部 Sonora 黏土锂项目由 10 个连续矿权组成, 资源量庞大, 矿产资源总量为 5.59 亿 t。其中 Bacanora Lithium 公司控制了 La Ventana 矿权的 100% 股权以及 Mexilit 和 Megalit 的各 70% 股权。目前赣锋锂业在完成股权投资后正在针对该项目的提锂工艺进行全面的审视。项目设计采用露天开采, 黏土经过筛选后加入硫酸钠, 在 900℃ 高温下焙烧生产硫酸锂, 经蒸发沉淀后再加入碳酸钠, 最后通过离子交换等提纯工序后生产碳酸锂。项目一期产能 1.75 万 t 碳酸锂, 二期产能 3.5 万 t 碳酸锂和 3~3.5 万 t 硫酸钾副产品。

魁北克 La Corne 锂辉石矿资源总量 4700 万 t, Nemaska Lithium 选择采用新工艺、打造采选冶垂直一体化产能, 在魁北克 Whabouchi 采用膜电解法打造氢氧化锂一体化产能再度尝试, 设计产能 20.5 万 t 6.25% 品位锂精矿; Shawinigan 电化学锂盐厂采用创新的膜电解法, 设计年产 3.7 万 t 氢氧化锂, 将酸化焙烧后的硫酸锂溶液经离子交换除杂后、通过膜电解工艺来生产单水氢氧化锂, 2019 年曾发行“北欧债券 (Nordic Bonds)”, 目前已破产保护。但 2020 年 8 月 Nemaska 锂业将由主要债权人跨国金融机构 Orion Mine Finance、魁北克政府投资署及新合作伙伴英国 Pallinghurst Group 共同注资 6 亿加元并在 10 月交易完成后到位。曼尼托巴省的伯尼可湖 (Bernic Lake) 伟晶岩是一种复杂的带状伟晶岩, 含有锂辉石、锂云母、磷锂铝石、透锂长石和锂霞石。矿山多年来将锂辉石、钽、铈和铷作为选厂的主要回收矿物。此外还有 Authier 项目和银河资源的 James Bay 项目。

巴西 Mibra 矿山位于 Minas Gerais 州, 2018

年启动锂精矿的规模化采选，主要利用钽矿采选后的尾矿作为原料。AMG采用德国技术面向德国市场。Grota do Cirilo硬岩项目有28个大小矿权，分为11个矿床。Sigma Lithium公司控制，处于设计阶段。

秘鲁硬岩型Falchani锂矿居世界前列，但含有放射性铀，预计2020年出台锂铀联采政策。

3.2 非洲：希望之地

非洲的大型项目主要核查了7个锂矿。纳米比亚因低价停产，但新工艺在重启产能，而且是多矿种综合开发。锂云母项目由Rubicon和Helikon两座矿床组成，2017年Desert Lion Energy利用历史堆积矿石迅速启动锂云母精矿采选并于2018年发出首船3万t低品位精矿，之后即关停。原计划三期2万tLCE垂直一体化产能，2019年被澳洲企业Lepidico（拥有L-Max专利）收购，2020年5月发布的锂矿和选矿厂设计方案直接采用常规浮选和新型铷铯综合浸取工艺。

刚果（金）的马诺诺项目位于坦噶尼喀省全球最大的富锂LCT（锂、铯、钽）低铁伟晶岩矿床，澳洲AVZ Minerals接手的矿区分为Manono和Kitotolo两部分，至少有6处大型LCT伟晶岩，其中马诺诺区Carriere de L'est伟晶岩最大，Kitotolo区的Roche Dure伟晶岩紧随其后。设计选矿回收率80.9%，年产110万t5.8%品位的锂精矿，采选成本很低，但运输成本很高。2019年11月引入宜宾天宜锂业投资占12%股权。

津巴布韦的锂矿主要分布在Bikita和Bindura，其低铁透锂长石极受市场欢迎。Arcadia硬岩项目位于首都Harare附近的Bindura，被总统及内阁办公室列为优先矿业工程，通过铁路将精矿运输至450公里外的莫桑比克贝拉（Beira）港口。Prospect Resources拥有87%股权，中矿资源（旗下控股东鹏锂业）参股7.06%并包销。Bikita伟晶岩是世界上巨型锂铍矿，位于Masvingo省。目前已使用重介质旋流器，透锂长石精矿富集到上浮物料中，沉砂经比重更大的重介质再处理后得到

锂辉石精矿。

马里Goulamina大型硬岩锂矿选矿等环节采用长沙矿冶院技术并在推进另外一项研究探索延伸生产硫酸锂等产品。设计重选和浮选LOM选矿回收率70.4%产能36.2万t6%锂精矿。

3.3 大洋洲：全球主力，技改进行时

澳大利亚的锂矿山西澳9座、北领地1座。格林布什矿床被视为全球固体锂矿“皇冠上的明珠”，成矿条件优越，采选工艺和设备成熟，低剥采比，重选、浮选工艺流程娴熟，回收率高，2019年泰利森锂精矿产能已扩大至135万t。

Mt Cattlin锂辉石探明资源储量较小但产量稳定。银河资源（Galaxy Resources）全资控制，2019年的回收率优化项目（YOP）投产，新增了超细重选产线和光电选矿等装置，设计在回收率、矿物单体解离、杂质分离三个维度带来选矿流程的优化。

Mt Marion矿山重选和浮选双线，同时产出4%和6%两种品位精矿，2019年初Ai6技改项目添置浮选等各项装置、优化供水品质，预计精矿提升至6%。赣锋国际和MRL平摊RIM股权。

Pilgangoora被视作格林布什后又一锂钽矿“新星”。Pilbara Minerals全资控股，宁德时代和赣锋、POSCO参股，也是重选和浮选双线选矿，分别产出粗、细两种精矿。目前处于技改优化阶段，包括产线调校和磨合，优化浮选前颗粒大小、浮选前后的除铁、选矿厂管理和自动化，提升回收率和稳定性等。化工方面拟采用POSCO技术并合建工厂。

Wodgina位于西澳北部Pilbara地区，表土剥采比高但储量大，2016年MRL收购除钽之外的全部金属矿权，2019年末雅保斥重资形成60/40合资公司共同运营产能，从原矿DSO时代转型到采选冶垂直一体化。建有千万吨三级破碎产线和3个精矿选矿模块，以及Kemerton氢氧化锂工厂。

Altura-Pilgangoora项目，Altura lithium全资拥有，宁波杉杉参股。与Pilbara Resources的矿山相似，

也打造了重选（粗颗粒精矿）、浮选（细颗粒精矿）两套选矿系统，关键设备来自中国，更加偏重重选且状态理想，浮选前期技改有成效但仍需攻关，主要是球磨机和尾矿浓密机和药剂问题。

Bald Hill 位于西澳 Eastern Goldfields 区，Mt Marion 东南方约 75 km。为追求快速投产，采用了简单的重选系统（未设计浮选），在原钽矿采选装置的基础上翻新改造、增添设备，锂钽联产，计划再增细粒矿料选矿装置，将粒径由 1 mm 降至 0.5 mm，回收率优化至 72%~80% 并提高总产能。因重组暂停，中国氢能（CHE）投资复活。

北领地达尔文南侧的 Finniss 伟晶岩项目，分为几十个靶区包括 Grants、BP33、Sandras、Hang Gong、Carlton、Lees 等，属历史锡钽开采区。其中 Grants 露天开采，BP33 和 Carlton 地下开采，利用重选装置年产近 18 万 t 5.5% 锂精矿。

Mt Holland-Earl Grey 位于珀斯以西，是全球最大的待开发硬岩锂矿之一，矿产资源总量 1.89 亿 t。Kidman 和 SQM 成立 50/50 联营公司 Covalent Lithium。2019 年澳洲 Wesfarmers 溢价收购 Kidman 计划在西澳打造“锂矿采选+氢氧化锂”垂直一体化产能。设计选矿回收率 75%。工厂位于奎纳纳工业园。

Kathleen Valley 和 Buldania 两座锂矿项目，均由 LioneTown 全资控股。前者采用重选加浮选流程，设计年处理 200 万 t 锂钽矿。重选产出 5.9% 精矿、三级浮选产出 5.5% 精矿，平均品位 5.6%，综合回收率为 79%，锂钽共选；后者处于勘探阶段。

3.4 欧洲：老树新花

欧洲主要核查了 20 个锂矿。俄罗斯的 Kola Peninsula 和 Sayanakh Region 地区拥有储量巨大的锂资源如 Goltsovoe 和 Vishnyakovskoe^[11]。唯一的锂矿项目是位于后贝加尔东部的扎维京斯克矿场，1941~1997 年曾开采锂辉石，但如今已不再开采。但最近莫斯科钢铁与合金学院有色金属与黄金教研室开发出一种酸处理技术，已完成萤石矿区岩石样本和废锂离子电池提取锂的测试，并将在滨

海边疆区的萤石矿场和后贝加尔边疆区的扎维京斯克矿区^[17]投入工业化应用。

捷克巨型 C̄v̄novec 铁锂云母项目位于捷克和德国的边境，历史上是锡钨矿。2019 年 11 月 20 日，European Metals 与捷克电力能源 CEZ 集团协议，通过项目平台公司 Geomet 进行开发。

德国 Zinnwald 铁锂云母项目位于德国和捷克边境，是历史著名的花岗岩型钨-锡-锂成矿带，有 300 多年开采史。坐拥德墨两地资源的英国公司 Bacanora Lithium 拥有项目 50% 股权^[12]。另 Lithium Australia 全资拥有德国萨迪斯多夫（Sadisdorf）矿床（萨克森州的一个关停锡矿），锡矿化被云英岩所包裹，蚀变带广泛以锂云母形式出现。目前澳州锂业公司已开发出无需焙烧即可从硅酸盐中回收锂，同时还可能产生一系列有价值的副产品。其专有技术 SiLeach® 可从锂云母和铁锂云母等含锂的云母中回收锂，以及众多稀有金属。另有巴西的氢氧化锂工厂也在建。

奥地利 Wolfsberg 锂辉石矿项目位于南部，基建成熟。European Lithium 公司设计年采选 80 万 t 矿石，年产约 6.7 万 t 精矿，计划配套年产 1 万 t 氢氧化锂工厂。

芬兰 Keliber 锂辉石项目有六个非连续矿区组成。Nordic Mining 持有项目 18.5% 股权，芬兰政府通过 Finnish Minerals Group 持股 24.3%。

乌克兰的锂矿主要富集在滨亚速海地区和基洛沃格勒州地区的伟晶岩型锂矿。

爱尔兰 Avalonia 锂辉石项目位于 Leinster 锂成矿带，目前在总计 292 平方公里的 8 处探矿权证区域中确认了 23 个主要目标，未勘探区域仍很大。加拿大国际锂业与赣锋合作制定长期的勘探和开发方案分别持有 Blackstairs Lithium 公司 45% 和 55% 股权。

葡萄牙的传统硬岩锂矿产区，年产约 4258 吨碳酸锂当量，主要来自锂云母，大部分直接进入了玻璃和陶瓷行业。除此之外，葡萄牙北部也有锂辉石矿，代表性企业有 Savannah Resources、铁

矿巨头 FMG 等。Savannah Resources 全资拥有葡萄牙北部的 Mino do Barroso 锂辉石矿项目，是葡萄牙北部四个最大锂矿项目之一，涵盖 Grandao、Reservatorio、Pinheiro、NOA 和 Aldeia 等矿区。年产 17.5 万 t 品位 6% 的锂辉石精矿产能主要利用传统重选、浮选工艺。

西班牙 San Jose 铁锂云母矿位于 Estremadura 地区，矿产资源总量约 1.113 亿 t。Infinity Lithium 拥有 75% 股权，正在推进资源的开发。项目计划有年产 1.5 万 t 氢氧化锂的“采选至锂盐”垂直一体化产能。选矿厂设计年处理 125 万 t、年产 55 万 t 锂云母精矿，平均品位 1.3%，选矿回收率设计 66.5%。

塞尔维亚 Jadar 锂硼矿项目位于西北部，是一座独特的大型锂、硼伴生矿，发现于 2004 年，矿产资源总量 1.357 亿 t。力拓 (Rio Tinto) 全资控制 Jadar 项目，并在澳大利亚墨尔本设立了小试工厂来验证 Jadarite 的锂硼提取工艺，预计“采选冶”一体化。

3.5 亚洲：群星灿烂

亚洲的锂矿，主要分布在中国、阿富汗、哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、巴基斯坦、蒙古等国，多山高水远。其中阿富汗加兹尼和赫尔曼德省的盐湖锂资源量几乎和玻利维亚相当，而伟晶岩矿在东巴达赫尚、西巴达赫尚、努里斯坦-南帕米尔和赫尔曼德 4 条成矿带上广泛分布有 Tagawlor、Drumgal、Jamanak 和 Pasghusta 等矿。哈萨克斯坦 Belogorsk mining 和 Metallurgical complex 有伴生型锂矿。乌兹别克斯坦的锂矿主要在塔什干地区如沙瓦兹赛矿床沉积岩型锂铷铯矿^[11]。但商业性采选项目除中国外很少。韩国、日本的锂矿项目多是下游冶炼厂。

4 锂矿提取技术创新趋势展望

4.1 新类型锂矿提取技术逐渐涌现

传统硬岩锂矿以锂辉石为主，新类型的锂矿例如锂云母型、黏土蒙脱石型以及煤层相关型的提锂技术近年层出不穷，有的已经实际应用，有的正在密集研发和优化。澳洲锂业 (LA) 公司的

SiLeach® 硅堆浸技术已经在德国的萨迪斯多夫锂云母矿山得以应用，这是一种已经获得专利的低能耗专有技术。无需焙烧即可环保型提取锂，不但能提取锂，还可以提取很多稀有金属，如锡、钽、钨、铯、钾、硅、铍、铷和稀土等，前景非常可观。无独有偶，非洲纳米比亚的锂云母矿山也在去年被澳洲企业 Lepidico 收购，直接采用新型铷铯 L-Max 综合浸取专利工艺。这都说明锂云母的原地堆浸技术即将进入实际操作阶段。

近年 Greenbushes 和 Bikita 矿山扩建同时澳大利亚和加拿大等国许多新锂项目上马，如澳大利亚的 Mt Cattlin、Mt Marion、Bald Hill 和加拿大的 Whabouchi 等。锂蒙脱石粘土矿床过去不被认为是锂的来源之一，但美国内华达州、墨西哥索诺拉州以及中国的锂蒙脱石矿引起了人们的兴趣，正在研究提锂技术。塞尔维亚贾达尔石目前由力拓集团 (Rio Tinto) 开展提取锂的半工业试验。巨型锡钨锂矿 Cinovec 正研究利用分段磁选进行富集，且具有成本优势。

4.2 采选冶一体化是规模企业的首选

在本文重点考察的 68 个国际项目中，有 30 个以上的大型项目已经制定或者正在实施“采选冶垂直一体化”生产方案，对于提高收益大有帮助。当然，这需要有一定的资金和技术实力的经营企业和投资方。由于各种原因，采选冶垂直一体化生产模式也有失败的例子，比如加拿大 Nemaska Lithium 公司在 La Corne 锂辉石矿采用新工艺、打造采选冶垂直一体化产能，采用膜电解法打造氢氧化锂一体化产能，但是进展并不顺利。智能化采选冶技术在锂企业中尚不普遍。

4.3 中资企业崭露头角与外企同台竞技

澳洲矿业公司的技术创新能力较强，其自动化、智能化水平较高，也是许多新技术应用的策源地^[18]。然而其设备也不少是来自中国制造。中资矿企已崭露头角，一些技术已经在海外矿山得以应用，例如马里 Goulamina 大型硬岩锂矿选矿等环节就采用了长沙矿冶院的相关技术。天齐锂

业和雅保在澳洲格林布什和智利盐湖都存在着竞争合作关系。

4.4 卤水提锂处于技术革命前期

国际上许多技术机构都在研发卤水提锂技术并有很多阶段性成果。例如，离子筛型氧化物目前处于技术突破期，一旦溶损问题完全解决将大大提升吸附工艺水平。随着膜技术和萃取体系的发展，膜法和萃取法卤水提锂技术正逐步应用于高Mg/Li比卤水提锂工业化生产。一旦新技术得到量产，将迎来新一波世界性锂生产布局变动。

5 结论

(1) 欧盟委员会于2008年拟定了第一份关键原材料清单，并分别在2014和2017年修订；2017年更新的名单中新增了7种原材料，总数达27种都未包括锂矿产。但2020年9月新修订名单总数增加到30种，锂、钛、锶、铝土矿首次荣登榜单，说明当今世界各国都对锂资源的开发和利用给予了足够的重视。

(2) 矿石提锂的技术革新主要是降低成本和提高效率上，但是在自动化和智能化的技术发展趋势下，成本降低空间并不大。卤水提锂的技术创新，一直在不断发展，一方面是工艺技术层面的持续改进，另一方面是资源类型的不断拓展，例如美国已经率先将地热卤水、油田卤水等作为提锂储量。目前卤水提锂技术由于药品成本等问题无法大规模量产，如果一旦或得突破，将迎来全球格局的大变化，而中国作为盐湖锂资源的大国将有可能迎来大发展。但主要障碍是各国盐湖资源的禀赋差异较大，将大大增加技术应用的复杂性。

(3) 受到世界性新冠疫情的影响，全球锂矿2020年的开发和利用将大幅度下滑。2021年将迎来新的强劲增长，许多新建锂矿山和盐湖将在2022年前后陆续投产，锂市场供求关系将经受新的调整和变化。无论市场价格如何变化，锂资源和产业供应链仍将是各国重点打造的国家级保障项目。

(4) 中国坐拥矿石和卤水多种锂资源，但在开

发利用技术尤其是技术创新动力和技术创新能力仍然落后于国外发达国家，特别是许多中资企业是民营企业，在海外运营当中抗御风险的能力比较脆弱，这是值得国家有关部门给予重视和多方保护的。

参考文献：

- [1] Tadesse B. The beneficiation of lithium minerals from hard rock ores: A review. *Minerals Engineering*, 2019, 131: 170-184.
- [2] 吴西顺, 王登红, 黄文斌, 等. 全球锂矿及伴生铍铊的采选冶技术发展趋势 [J]. *矿产综合利用*, 2020(1):1-9.
Wu X Sh, Wang D H, Huang W B, et al. Development Trend of mining and smelting technology for lithium ore and associated Beryllium niobium tantalum [J]. *Comprehensive Utilization of Minerals*, 2020(01):1-9.
- [3] 王登红, 吴西顺. 21世纪的能源金属——锂的奥秘 [J]. *国土资源科普与文化*, 2017(4):22-27.
Wang D H, WU X Sh. Energy metal in the 21st Century -- The mystery of Lithium [J]. *Science Popularization and Culture of Land and Resources*, 2017(4):22-27.
- [4] Pankaj K. Choubey, Min-seuk Kim, Rajiv R. Srivastava, Jaechun Lee, Jin-Young Lee, Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element: Lithium. Part I: From mineral and brine resources, *Minerals Engineering*, Volume 89, 2016, Pages 119-137.
- [5] U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries -lithium, 2016-2020.
- [6] 云南滇中发现世界级锂资源基地 [J]. *中国有色冶金*, 2019, 48(4):92.
World class lithium resource base discovered in central yunnan, yunnan [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2019, 48(4):92.
- [7] Tsuyoshi Hoshino, Preliminary studies of lithium recovery technology from seawater by electrodialysis using ionic liquid membrane [J]. *Desalination*, 2013, 317:11-16.
- [8] Tsuyoshi Hoshino, Development of technology for recovering lithium from seawater by electrodialysis using ionic liquid membrane [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2013, 317:11-16.
- [9] 大久保聡. リチウム生産技術概略—現状および今後の動向—[R]. 2019.
- [10] Jun Lu, Huacheng Zhang, Jue Hou, Xingya Li, Xiaoyi Hu, Yaoxin Hu, Christopher D. Easton, Qinye Li, Chenghua Sun, Aaron W. Thornton, Matthew R. Hill, Xiwang Zhang, Gengping Jiang, Jefferson Zhe Liu, Anita J. Hill, Benny

D. Freeman, Efficient metal ion sieving in rectifying subnanochannels enabled by metal-organic frameworks, March 2020, Materials, Nature.

[11] 乔东海, 赵元艺, 汪傲, 等. “一带一路”地区能源金属矿床分布规律及开发工艺 [J]. 地质通报, 2017, 36(1): 66-79.

Qiao D H, Zhao Y Y, Wang A, et al. Distribution law and development process for energy metal deposits in the "One Belt And One Road" region [J]. Geological bulletin, 2017, 36(1): 66-79.

[12] 五矿证券. 锂想系列 1: 全球硬岩锂矿纵览, 生存之战与新机遇 [R]. 2019, 12(1): 68-69.

Minmetals securities. Lithium series 1: a global overview of hard rock lithium deposits, the battle for survival and new opportunities [R]. 2019, 12(1): 68-69.

[13] Seredin V V, Dai S, Sun, Y, Chekryzhov I Y. Coal deposits as promising sources of rare metals for alternative power and energy-efficient technologies. 2013(31): 1-11.

[14] Ronghong Lin, Yee Soong, Evan J. Granite, Evaluation of trace elements in U.S. coals using the USGS COALQUAL database version 3.0. Part II: Non-REY critical elements,

International Journal of Coal Geology, 2018, 192: 39-50.

[15] 李超, 王丽萍, 郭昭华, 等. 粉煤灰中锂提取技术研究进展, 有色金属: 冶炼部分, 2018(4): 46-50.

Li Ch, Wang L P, Guo Zh H, et al. Research progress of Lithium extraction technology from Fly ash, non-ferrous metals (Smelting part), 4th issue, 2018, (4): 46-50.

[16] Sun Y Z, Zhao C L, Li Y H, et al. Further Information of the Associated Li Deposits in the No.6 Coal Seam at Jungar Coalfield, Inner Mongolia, Northern China [J]. Acta Geologica Sinica: English Edition, 2013, 87: 801-812.

[17] 中国科学技术部. 俄罗斯科学家开发从废料中提取锂的技术 [E]. 国内外科技术动态, 2017(5): 10.

Chinese Ministry of Science and Technology. Russian scientists develop technology for extracting lithium from waste materials [E]. Science and Technology Trends at home and abroad, 2017(5): 10.

[18] RFC Ambrian. Report 5—Mineral Processing & Water Treatment [R]. 2019.9.

International Lithium Mine Utilization Technology: Current Status, Innovation and Prospects

Wu Xishun^{1,2}, Zhang Wei^{1,2}, Sun Yan³, Wang Denghong³, Yao Xiang⁴, Gao Xi^{1,2}, Zhang Wei^{1,2}

(1. Documentation Center, China Geological Survey, China National Geological Library, Beijing, China; 2. International Research Center, CGS; 3. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resource, CAGS, Beijing; 4. Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou, China)

Abstract: Compared with the domestic lithium resources utilization, the overall development of foreign lithium mining development and utilization technology starts earlier, but the regional development is extremely uneven. The technological innovation in Europe, America and Australia is strong, and disruptive technologies have frequently appeared recently. The comprehensive development and utilization of multiple minerals in lithium mines is a trend, which is an important direction for reducing costs, improving benefits and environmental protection. The vertical integration of mining, sorting and smelting is an important option for innovation, efficiency enhancement and process optimization. From a geographical point of view, America is the cradle of lithium technology in the world, and the South American lithium triangle has stable technology and low cost, and is on the eve of technological innovation. Africa has a large amount of resources, mainly hard rock, and is limited by infrastructure. Innovation and comprehensive development and utilization of mica-type extraction technology are the way out. Australia's hard rock mine has the strongest development intensity, skilled technology, and cost pressure has spawned more optimized and innovative projects. The demand of the European market has driven the development of local lithium mines, and the integration of mining, dressing and smelting projects has increased. New types of lithium mines, such as saline brine, hard rock, clay sedimentation, and geothermal brine extraction technology, will have breakthroughs in the near future.

Keywords: Lithium resources; Utilization technology; International; Technological innovation; Prospect