

# 六个步骤使得锂的提取更清洁、更快、更便宜

贺茂勇<sup>1,5\*</sup>, 潘彤<sup>2</sup>, 杨红军<sup>3</sup>, 马黎春<sup>4</sup>, 侯殿宝<sup>3</sup>, 程原原<sup>1</sup>, 陈建洲<sup>6</sup>

1. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061

2. 青海省地质矿产勘查开发局, 西宁 810008

3. 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 青海省盐湖资源化学重点实验室, 西宁 810008

4. 青海盐湖工业股份有限公司, 格尔木 816000

5. 青海师范大学 高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810016

6. 青海省第四地质勘查院, 西宁 810001

锂被称为 21 世纪改变世界的“绿色能源金属”和“白色石油”，战略意义显著。锂作为重要的战略资源，广泛地应用于能源、化工、冶金、玻璃和陶瓷等产业。其中可充电锂电池广泛应用于便携式电子设备（如手机、摄影机、笔记本电脑）、交通运输工具（如电动自行车、新能源汽车）以及航空航天等领域，是锂化合物最大的潜在应用增长区域。伴随着世界各国相继推出新能源战略，新能源汽车产业高速发展，尤其是锂离子电池在电动汽车行业的成功应用，带动锂资源消耗的高速增长。同时，世界各国对锂资源勘探、开发和回收的重视程度日益增强。

电池和其他绿色技术对锂的需求正在爆炸式增长。据预测，2025 年，锂的需求将是 2018 年的 3 倍（（15—19）万 t），2100 年，将再增加 3—5 倍（（40—70）万 t）。受制于新的锂矿开发和更新提锂设施周期的缓慢且成本高昂，导致未来 10 a 锂将“供不应求”。国际能源署（IEA）预测，如果按照目前的情形，实现《巴黎协定》中“努力将气温升幅限制在工业化前水平以上 1.5℃ 之内”可持续性发展目标，到 2030 年生产商只能满足锂行业需求一半锂的供应。但是，在过去的一个世纪里，不论是硬岩锂矿、黏土型锂矿还是盐湖型锂矿的开采和加工都是低效，且浪费和破坏环境的机械与化学方法，在这个过程中不仅会消耗大量的能源和水，且产生大量的固体废物和排放物。按照美国锂资源开发生产模式，生成 1 t 碳酸锂或氢氧化锂消耗 6 个美国家庭 1 a 的用电量（60 MWh）和一个小游泳池的用水量（70 m<sup>3</sup>），且还向大气排放 3—17 t 二氧化碳。

如果锂的开发和生成方式还不做改变，只是利用现有的锂资源来增加锂的产量，其产生的危害将会超过其驱动的清洁技术带来的好处。来自美国劳伦斯伯克利国家实验室和加拿大 JF 麦格南咨询公司共 6 位专家在 *Nature* 期刊发表评论文章《如何让锂提取更清洁、更快、更便宜——6 个步骤》（How to make lithium extraction cleaner, faster and cheaper— in six steps）。文章指出，避免更大的环境破坏和影响，锂行业必须开发出可持续、绿色提取方法，目前 6 个优先需要转变的步骤是至关重要的。

## 1 尽可能减少提取锂的步骤和流程

直接从盐湖卤水或酸性溶解液中提取锂不仅可以避免更多的化学反应，并且消耗更少的原材料、水和能源。化学家和工程师正在开发和试用可重复使用的“吸附剂”（通常是多孔金属氧化物）来吸附和富集锂，尽管大多数尚未商业化。此外，电解也是另一种有效节省试剂和降低排放的方法。

实际上，中国盐湖提锂技术已经是世界前列，目前为止，中国盐湖锂的提取的工艺有吸附-膜耦合工艺、梯度耦合膜分离法、选择性电渗析法、萃取法、太阳池法和煅烧法等，且盐湖锂的产能现在逐年扩大，近日，青海盐湖工业股份有限公司 4 万 t·a<sup>-1</sup> 基础锂盐一体化项目在青海省格尔木察尔汗盐湖湖区开工，综合产能将达到 7 万 t·a<sup>-1</sup>。

## 2 将锂生产过程中的废物转化为有价值的商品

采用硫酸锂和碳酸钠生产碳酸锂的过程中，将产生大量的硫酸钠废物，该废物的处置也是一项重大挑战，主要是倾倒垃圾填埋场或运往海外。据统计，到 2030 年，生产锂的过程中将产生 800 万 t 硫酸钠废物，到 2050 年，这个量将增加到 3000 万 t。采用新型的技术将硫酸钠加工成氢氧化钠和硫酸，不仅增加了废物的价值，还可以把重新生产的氢氧化钠和硫酸应用到锂的提取和生成中，提高锂离子电池供应链的循环性、可持续性和稳定性。根据行业分析，不管采用哪种技术，这种再利用的成本低于 1000 \$·t<sup>-1</sup>，将锂行业的加工和处理成本能降低至少 15%，且在 2024—2050 年还将减少至少 1.6 亿 t 二氧化碳排放。

### 3 用电化学的方法在地下直接对矿物进行加工

目前从矿石中提锂，首先需要将矿石挖出运到加工场，费时费力。不如采用与页岩油层类似的方式，对富含锂的地质矿床进行“压裂”获得锂。虽然该技术还处在起步阶段，但是已经应用于铜的生产。鉴于该方法可能会加剧水和环境污染，得到不少人的反对，然而，锂矿石或黏土的破裂深度比深层油页岩要浅，水和沙子可以用作压裂液，无需使用页岩压裂所需的化学表面活性剂和稳定剂。当然该方法的可行性及其对碳（土壤中的碳和储存的碳）和生态系统的影响还需要严格评价。

### 4 用原矿石直接制作电极

目前均是使用纯锂和过渡金属盐合成锂离子电极材料来生产电池。如果能够用加工较少甚至均匀的原材料（例如矿石本身）制造电极将避免大量的化学加工。目前有大量的科学家正在研制层状锂镍锰钴氧化物（Li-NMC），包括含有锰或钛元素无序岩盐（DRX），上述的构想未来可能成为可能。直接用锂矿石或黏土锂矿制造电极理论上是可行的，此类矿石富含用于电池电极的元素。例如，锂辉石包含锂、铝、硅和镁，而黏土锂矿（如锂蒙脱石）包含锂、镁、铁和锰。尽管这个概念可能还需要 10 a 的时间，但是化学家和工程师正在探索其可能性。

### 5 采矿和锂电回收需要扩大到全球范围

要克服锂瓶颈，“在哪里”可能与“做什么”同样重要。从长远来看，投产更多矿山和加工设施是保障能源安全最简单的方法。虽然已经开始这么做了，但采矿和能源基础设施项目花费时间较长，平均需要 16 a。在短期内，经济稀缺孕育创新，使用更少的材料和替代元素可以缓解供应压力并降低成本。同时应着手开发浓度较低的非常规锂来源，包括尾矿和酸性矿山排水，以及石油和天然气钻井的“生产用水”，其经济性需要通过实验室和中试生产进行可行性评估。另外，应加大力度进行锂离子电池的回收，2030 年之后达到寿命而报废的废旧电动汽车将激增，其回收将大大缓解锂的供应，据行业预测，到 2040 年，锂离子电池的回收利用可能满足未来超过 10% 锂的供应。

### 6 协调政策，加强研究和交流

世界能源的转型带来的是矿物的需求不断增长，这将给公司、政府和社区带来风险。矿产资源和材料的采购必须负责任，且供应链中不存在不良行为者。数字化文档犹如“护照”一样，使得追踪产品和材料流动更加容易。材料来源地可采用新的技术，如同位素技术，采用质谱仪检测同位素并和已有锂同位素组成数据库对比而获得。样品制备和分析方法需要全球合作建立标准化流程，并引入法规来保证。全球不同地区资源需求可以通过贸易协定和经济支持计划来激励。技术创新和知识产权保护也是需要协调的领域。

近年来，伴随着新能源汽车产量的增长，中国已经成为全球第一锂盐生产国和消费国。虽然近年中国加大对锂资源的开发力度，对外依存度与 2016 年相比高峰有所下降，但仍在 60% 以上。根据中国有色金属工业协会锂业分会统计，2021 年中国利用国内锂资源生成的锂盐按碳酸锂计算约为 16 万 t，约占国内锂盐产量的 35%，锂资源对外的依存度达 65%。据估计，2030 年按照碳酸盐锂计算将达到 50 万 t，到时将对中国的保障能力提出巨大考验。锂资源供需矛盾的挑战也是基础研究的需求与全球政策相一致的难得机遇，以上六项行业的转变对中国建设世界级盐湖产业基地，打造国家清洁能源产业高地至关重要。同时，中国的深层卤水锂矿资源丰富，有望在未来“白色石油”争夺战中，为中国带来新的保障。

#### 参考文献

- Desautly A M, Monfort Climent D, Lefebvre G, et al. 2022. Tracing the origin of lithium in Li-ion batteries using lithium isotopes [J]. *Nature Communications*, 13: 4172. DOI: 10.1038/s41467-022-31850-y.
- Haddad A Z, Hackl L, Akuzum B, et al. 2023. How to make lithium extraction cleaner, faster and cheaper— in six steps [J]. *Nature*, 616(7956): 245–248.
- He M Y, Luo C G, Yang H J, et al. 2020. Sources and a proposal for comprehensive exploitation of lithium brine deposits in the Qaidam Basin on the northern Tibetan Plateau, China: evidence from Li isotopes [J]. *Ore Geology Reviews*, 117: 103277. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.103277.