

中国锂元素动态物质流及关键驱动因素分析

赵连征¹, 汪鹏^{2,3*}, 汤林彬⁴, 王鹤鸣^{1*}, 岳强¹, 陈伟强^{2,3}, 杜涛¹

1. 东北大学国家环境保护生态工业重点实验室, 沈阳 110819
2. 中国科学院城市环境研究所, 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021
3. 中国科学院大学, 北京 100049
4. 中国科学院赣江创新研究院, 赣州 341000

摘要 构建了基于全生命周期的中国锂元素物质流分析框架, 核算并分析了新能源汽车驱动下的中国 2000—2020 年锂元素的流量、存量和供需格局的演变情况。研究显示: (1) 在流量视角下, 2000—2020 年间, 锂供给以锂矿石供应为主, 一次资源 (34.9 万 t) 的使用量增幅较大, 二次资源 (0.8 万 t) 的供应较小; 各类锂产品的加工和使用量从传统锂工业产品和 3C 产品 (手机、平板、笔记本电脑) 驱动向新能源汽车驱动转变。(2) 在存量视角下, 锂产品在用存量都有不同程度的增长, 其中动力电池产品的增速位列首位 (20 年间增长 7.2 万 t), 回收潜力较大 (目前不足 5%)。(3) 在供需格局视角下, 中国的锂矿石对外依存度较高 (75% 以上), 并将持续保持高位, 中国主要从南美发展中国家进口工业级碳酸锂, 然后向日本、韩国、美国等发达国家出口电池级氢氧化锂。

关键词 新能源汽车; 全生命周期; 锂; 动态物质流分析

新能源与低碳技术的发展广受关注^[1], 锂金属是其中不可或缺的全局战略性金属之一^[2]。近年来, 锂金属主要应用在锂离子电池中, 锂离子电池因其超高的能量密度被广泛应用于电动汽车和储能基站领域; 另外, 应用锂金属合成的化合物, 有助

于改善陶瓷玻璃的耐磨性、增强机械的安定性和缓解精神类疾病, 在传统工业生产^[3]中主要用于陶瓷玻璃^[4]、润滑脂^[5]及医药。2020 年中国新能源汽车产量 137 万辆, 对锂 (锂含量, 如无特殊说明, 数据则是按照锂金属当量对待) 的消耗近 2.5 万 t^[6], 所需

收稿日期: 2022-06-03; 修回日期: 2022-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41871204, 52070034, 71904182, 71961147003); 福建省科技计划对外合作项目 (202010039)

作者简介: 赵连征, 硕士研究生, 研究方向为工业生态学, 电子信箱: 2171828@stu.neu.edu.cn; 汪鹏 (通信作者), 副研究员, 研究方向为金属-能源关联系统建模与分析, 电子信箱: pwang@iue.ac.cn; 王鹤鸣 (共同通信作者), 教授, 研究方向为工业生态学, 电子信箱: wang-heming2006@gmail.com

引用格式: 赵连征, 汪鹏, 汤林彬, 等. 中国锂元素动态物质流及关键驱动因素分析[J]. 科技导报, 2022, 40(21): 100-109; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.21.010

的锂矿资源 75% 以上来自澳大利亚的锂辉石供应^[7], 中国锂资源的对外依存度持续保持高位, 对中国锂资源上游的稳定供给及能源转型带来巨大挑战^[8]。

物质流分析方法^[9] (material flow analysis, MFA) 是利用物质守恒定律 (一定时间内流入与流出某系统的物质质量相等) 对某个系统的物质和能量的输入、迁移、转化、输出进行定量化的方法。利用此方法从锂流量演变中寻找节约锂资源、改善供需格局的路径, 可为中国循环经济环境系统发展提供新的方法和视角, 在资源利用和环境改善方面为决策者提供参考。近年来, 物质流分析方法在金属领域的研究逐渐增多^[10], 广泛应用于分析铁^[11-13]、铜^[14-16]、钴^[17]、铝^[18]、镍^[19-21] 金属的再生潜力以及未来需求。早期中国对锂的研究大多是侧重于静态物质流分析^[22], 近年来, 对锂元素动态物质流^[23]、回收^[24-25]、贸易^[26], 以及单个锂电池产品^[27] 的研究逐渐深入, 并对锂资源未来需求^[28] 进行了预测。另外, 已有研究针对电动汽车和基站储能的锂电池金属开展了动态物质流分析^[29], 展示了小型汽车和发电行业未来 30 年对锂离子电池中锂金属累积需求的

综合动态物质流分析结果。然而, 很少有学者从整个产业链视角研究中国近年来锂元素的生产、消费、存量和供需格局情况。

本研究基于全生命周期的动态物质流的分析方法, 展示锂元素在中国的流量状况。在大量搜集统计数据的基础上, 核算并更新 2000—2020 年中国锂元素全生命周期各阶段的产品流量、存量、回收与贸易数据, 进一步分析各阶段的变化情况, 弥补了当前研究侧重于电池生产阶段以及单一年份静态物质流的不足。伴随着第一批新能源电动汽车报废高峰的来临^[30], 本研究进一步提供回收建议及政策预判。

1 锂元素物质流分析方法

1.1 研究方法述

中国锂元素物质流分析框架^[31] 如图 1 所示, 主要包括开采、冶炼分离、产品加工、产品制造、使用和废物管理 6 个阶段的贸易^[25,29]。其中, 开采阶段主要是对矿石、卤水的获取及对锂精矿的粗加工; 冶炼分离阶段主要包括氢氧化锂、碳酸锂、氯化锂

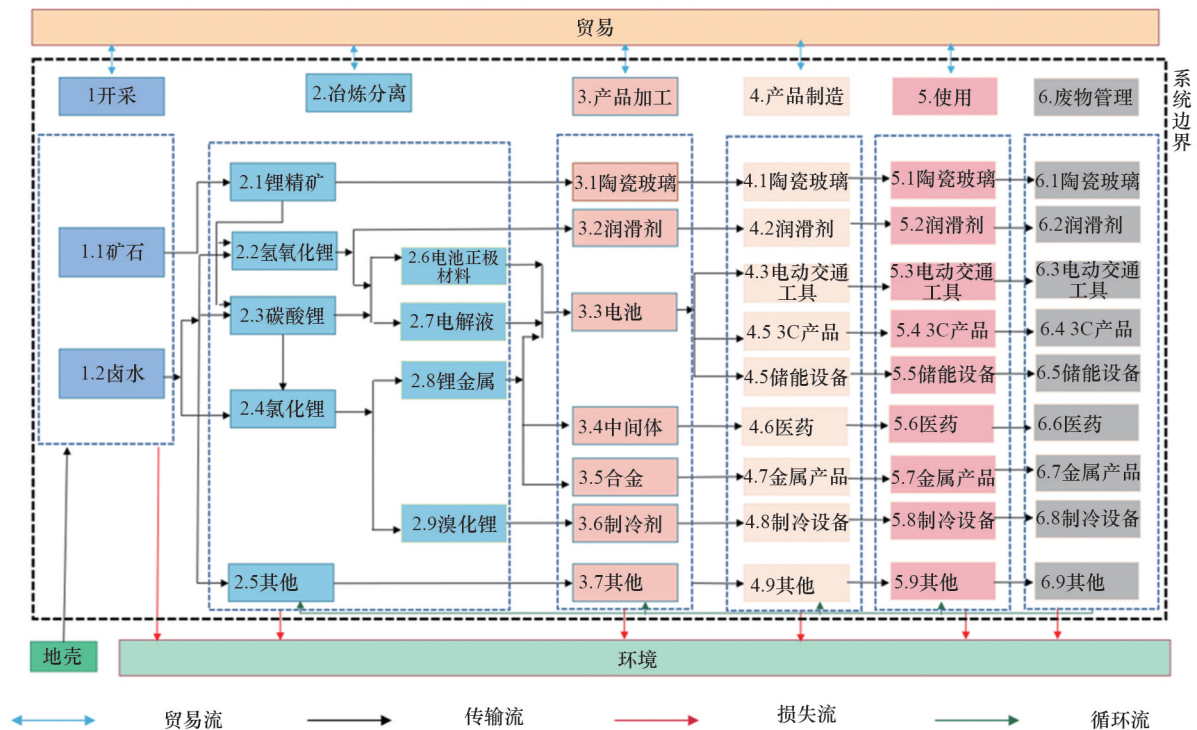


图 1 中国锂的全生命周期动态物质流分析框架

以及这3种锂盐分离的电池正极材料、电解液和锂金属单质;产品加工阶段主要包括陶瓷玻璃、润滑脂、电池、医药中间体以及锂合金;制造、使用和废物管理阶段主要包括传统工业产品(陶瓷玻璃、润滑脂和医药)和电池产品(锂电池动力汽车、3C产品和储能设备)。MFA目标系统由空间和时间边界确定^[18],空间边界为中国大陆,时间边界为2000—2020年,该时间段见证了中国锂资源应用从传统工业行业向高新技术行业的演变^[32]。

1.2 数据来源

研究涉及的数据可分为生产数据、贸易数据、锂含量数据、产品寿命数据。这些数据又可分为一手数据和二手数据。一手数据来自官方和锂公司披露的锂矿产信息,主要有政府勘查报告、企业年报、公司网站公开信息等;二手数据主要来自个人或机构的研究成果,如文献资料、商业数据库、券商报告、咨询公司报告等。具体数据和来源如表1所示,为确保数据准确,主要选取一手数据,其次是二手数据。部分数据缺失时,根据已有数据进行拟合。

表1 数据来源

数据类型	数据来源
生产数据	美国地质调查局、中国有色金属工业协会锂业分会官网、统计年鉴、文献[22-23,28,33-34]
贸易数据	统计数据、UN Comtrade Database、文献[24,25,35]
锂含量数据	文献[23,32]
寿命数据	调研结果、文献[36]

1.3 计算方法

1.3.1 各阶段锂流量计算

开采、冶炼分离、产品加工、产品制造、使用和废物管理6个阶段之间的锂资源流量计算采取动态物质流分析方法的基本方式,含锂产品流量遵守质量守恒定律,流量方程可表示为

$$M_{l,t}^{if} + M_{l,t}^{ip} = M_{l,t}^{of} + M_{l,t}^{op} + M_{l,t}^{loss} \quad (1)$$

式中, l 为全生命周期的不同阶段; t 为研究时间范围内某一年份; $M_{l,t}^{if}$ 为第 t 年 l 阶段从上一阶段传输过来的流量; $M_{l,t}^{ip}$ 为第 t 年 l 阶段产品的进口量; $M_{l,t}^{of}$

为第 t 年 l 阶段传输到下一阶段的流量; $M_{l,t}^{op}$ 为第 t 年 l 阶段产品的出口量; $M_{l,t}^{loss}$ 为第 t 年 l 阶段流入环境中的损失量。

1.3.2 在用存量的计算

在动态物质流研究中,寿命分布模型是计算废物产生的重要因素,目前常用固定寿命模型、高斯正态分布模型、威布尔模型确定此产品的使用年限,使用高斯正态分布模型拟合锂产品的使用寿命,使用了 n 年的产品报废比例的计算公式为

$$K_n = \int_{n-1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt \quad (2)$$

根据报废率可以计算出报废量(B_N),计算公式为

$$B_N = \sum_{n=0}^{n_{\max}} F_{N-n} \times K_n \quad (3)$$

式中, F_{N-n} 为第 $N-n$ 年锂产品的消费量; n 为实际使用寿命; n_{\max} 为最大使用年限。

因此,可计算出锂产品的在用存量 C_n ,计算公式为

$$C_n = \sum_{N=2000}^{2020} (F_N - B_N) \quad (4)$$

2 结果与分析

在大量收集数据的基础上,绘制2000—2020年基于全生命周期的中国锂元素流动情况,如图2所示,并针对开采、冶炼分离、产品加工制造、使用和废物管理阶段流量开展具体分析。2000—2020年,中国共开采锂矿6.7万t(碳酸锂当量35.8万t)、卤水锂4.2万t,从国外进口锂矿共24.0万t(原矿3.1万t,精矿20.9万t);锂消费量为23.8万t,主要包括陶瓷和玻璃制品(3.2万t)、润滑脂(2.3万t)、医药(0.6万t)、电池产品(13.7万t)以及其他含锂产品(4.0万t);锂元素的在用存量为11.0万t,其中来自大部分的电池产品(10.1万t)和少量的传统锂工业产品(0.9万t);锂的最终报废量8.8万t,流入环境8.0万t,回收0.8万t;锂资源在各阶段加工过程中均有大量损耗,全生命周期共有9.0万t的损失,损失率达29%。

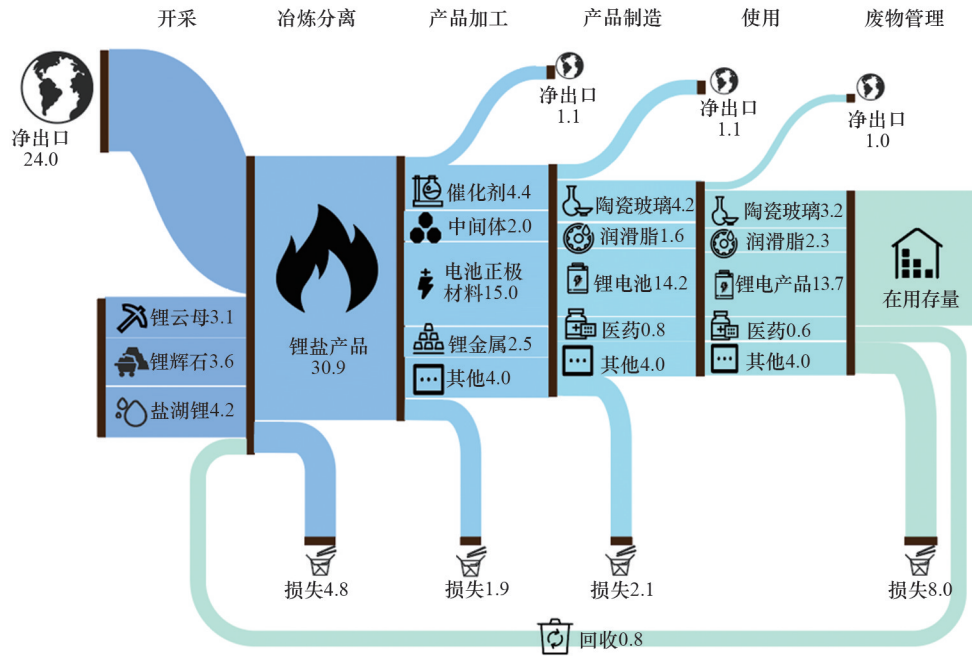


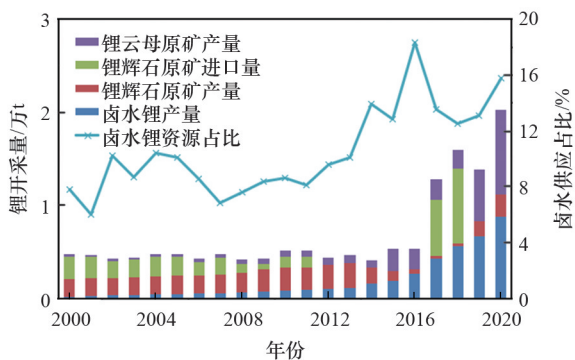
图2 2000—2020年中国锂元素动态物质流分析(单位:万t)

2.1 采矿选矿阶段

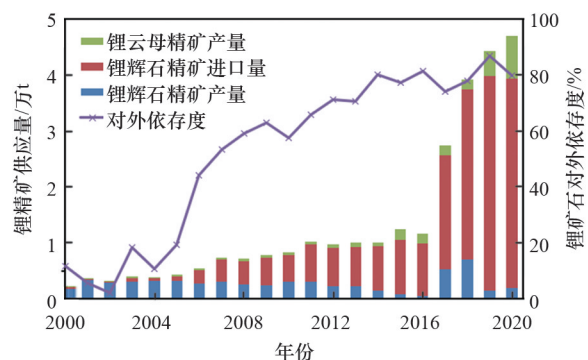
2000—2020年中国锂原矿与卤水的供给情况如图3所示,采矿阶段共从国外流入锂辉石原矿3.1万t(占原矿总需求的33%),在这整个阶段从地壳流入社会经济系统的矿产锂资源从2000年的0.2万t增长到2020年的5.0万t(碳酸锂当量26.7万t)。国内卤水锂产量从0.02万t(2000年)增长到0.9万t(2020年),卤水锂资源占比从2000年的不足10%提升到近年来(2016—2020年)的15%左右。2011年之前锂云母提锂技术还不成熟^[37],所以70%以上锂矿来源于锂辉石矿;2012—2016年由

于国内锂辉石原矿的产量扩大,中国并没有进口锂辉石原矿;受下游新能源汽车需求的刺激,2017—2018年又进口原矿资源以保障对下游的供应;2018年以后,得益于盐湖提锂以及锂云母提锂技术的成熟和普及,中国对锂辉石原矿的需求量再次降低,进口量也随之降低。

2000—2020年中国锂精矿的供给情况如图3所示,锂辉石精矿进口量从2000年的0.03万t到2020年的3.7万t,增长了123.3倍以上,致使锂矿石对外依存度从不足10%增长到70%以上。特别在新能源电动汽车在国内市场爆发的刺激下,2017年



(a) 中国锂原矿与卤水供应情况



(b) 中国锂精矿供应与对外依存度情况

图3 中国锂矿开采与供给情况

起,国内市场对锂精矿的需求达到2.3万t(较去年增长214%),并且近几年有持续增长的趋势。

2.2 冶炼阶段

2000—2020年中国锂盐生产与贸易情况如图4所示。碳酸锂贸易方面,从时间上可以划分2个阶段:一是缓慢增长阶段(2000—2016年),国内对碳酸锂进口量从0.08万t(2000年)稳步增长至0.5万t(2016年);另一个是震荡上升阶段(2017—2020年),2018年伴随澳大利亚锂精矿产能的释放,国内进口的锂精矿增多,随之而来的对碳酸锂的进口减少至0.5万t;2019年随着锂盐价格的下跌^[38],国内碳酸锂进口量开始恢复增长至0.6万t;2020年由于海外市场以高镍电池为主,需求的锂盐多为氢氧化锂,大量碳酸锂(0.9万t)再次流入中国内。其中阿根廷及智利占据供应量的前2位,从二者进口量达总进口量的90%以上^[35]。碳酸锂的出口量比进口量要小很多,2000—2020年总出口1.2万t,主要出口至美国、韩国和日本等发达国家。

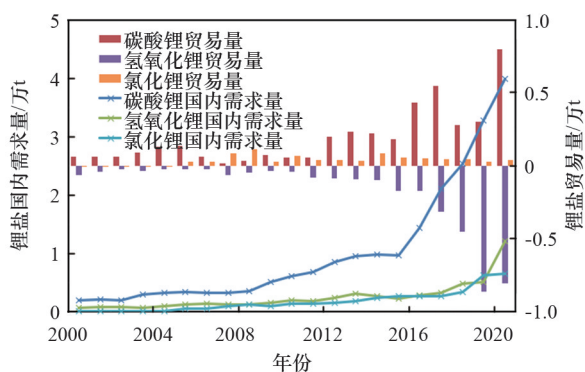


图4 中国锂盐需求与贸易情况

氢氧化锂进出口方面,中国为氢氧化锂的主要出口国,担负了全球近90%的产量,从2000年净出口0.06万t增长至2020年的0.8万t。随着发达国家高镍电池的扩建,氢氧化锂出口量将保持持续增长,主要出口至韩国、日本(出口二者量占总量的95%左右)。这也印证了发达国家高镍电池发展的进程逐渐加快^[34],而且随着中国氢氧化锂供应商进入全球高镍供应链体系,未来氢氧化锂出口比例将进一步提升。

国内需求方面分2个增长阶段:第一阶段的增

速有限,碳酸锂需求量从2000年(0.2万t)至2015年(1.0万t)仅增长了0.8万t;另一阶段增速较快,从2015年到2020年(4.0万t)增长3.0万t,这得益于从2016年开始国内锂电池汽车的大幅度增加。相比于碳酸锂,国内对氢氧化锂、氯化锂的需求量增量并不算太大,分别从2000年的0.06万、0.004万t增长至2020年的1.2万、0.7万t,主要原因是国内的高镍动力电池还没有大规模应用,对氢氧化锂的需求量并不如碳酸锂大。

2.3 加工制造阶段

如图5所示,中国锂产品制造和加工阶段的锂资源消耗格局逐渐从传统锂工业产品向锂电池产品转变,2000—2020年期间,流入传统工业产品材料和电池正极材料的总量分别为8.9万、15.0万t。2005年之前锂加工制造格局变化相对较小,陶瓷玻璃、润滑脂、医药、电池占比维持在40%、30%、10%、10%左右。2005年受电池正极材料变化的影响,改变了原有的加工制造格局。电池正极材料在2005—2020年间经历了3个增长阶段:2005—2008年间受消费电子产品的影响,主要是钴酸锂电池材料的有限增长(3年增长0.06万t);2009—2015年受3C产品智能化的影响,电池正极材料产量从0.17万t(2009年)快速增长至0.8万t(2015年);2015—2020年受绿色交通转型的影响,增长主要由动力电池驱动,产量急速增加至4.3万t(2020年)。经过上述3个增长阶段,电池正极材料在全部加工制造产品占比从2005年的10%左右稳步提升到2020年70%以上,而其他产品材料占比均下降到10%以下(催化剂6%、润滑脂材料3%、金属锂6.5%)。

2000—2020年中国电池正极材料供应情况如图5所示,截至2020年,锂电池正极材料形成的加工制造格局占比为三元材料40%(1.9万t)、磷酸铁锂材料28%(1.2万t)、钴酸锂材料10%(0.5万t)、锰酸锂材料13%(0.6万t)。特别是锰酸锂电池材料占比由2000年的56%降至2003年的30%左右;后又受手机普及的影响上升至2009年的90%;2010后随着新能源汽车市场的不断扩大,对三元材料和

磷酸铁锂材料的使用增加,钴酸锂占比下降,直到2018年之后稳定在15%左右。磷酸铁锂材料是近年来增速最快的电池材料,磷酸铁锂电池凭借其充

电快、高能量密度、安全性能好、环保的优点,未来的产量将会不断扩大。

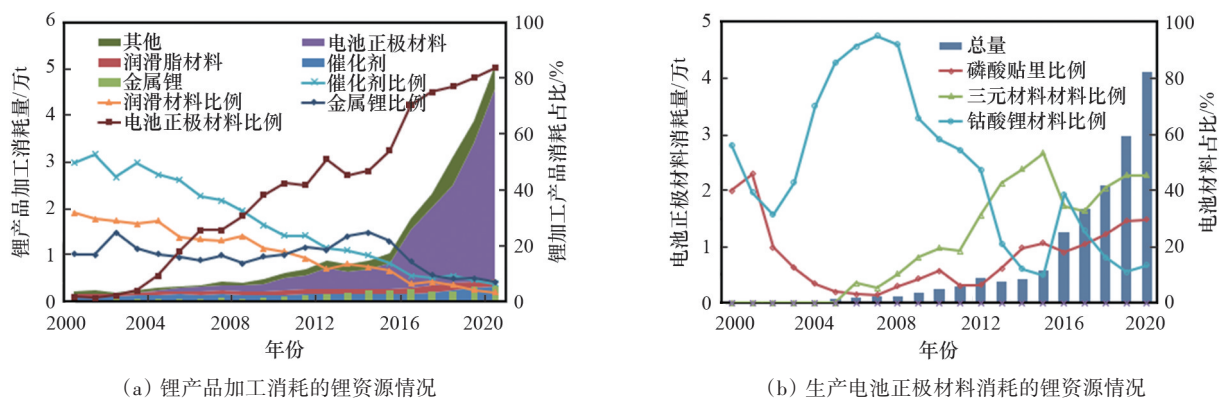


图5 中国锂资源加工制造阶段消耗情况

2.4 使用阶段

2000—2020年,中国锂产品使用情况如图6所示,使用阶段的锂资源主要应用于一次消耗产品(医药产品、锂金属电池产品、陶瓷玻璃、润滑脂)和锂离子电池中,研究显示锂制品在各应用领域的增长幅度差异较大。此阶段的增长从时间上可划分为传统工业产品驱动(2000—2008年)、3C电池驱动(2009—2015年)、动力电池驱动(2016—2020年)3个阶段,在传统工业驱动阶段,锂产品的增长主要由传统工业产品驱动(使用占比70%左右),中国锂产品的使用量以10%左右的年复合增长率稳步增长。在3C电池驱动阶段,由于3C产品的普

及以及产品智能化进程不断加快,2015年全年,钴酸锂电池、锰酸锂电池分别消耗锂资源0.8万t(年复合增长30%)和0.3万t(年复合增长20%),为增速最快的2种产品,但由于3C锂电池的使用增长有限,且锂资源在动力电池的应用刚刚起步,锂资源在电池产品端的发展相对缓慢。在动力电池驱动阶段,电动汽车汽车的成熟以及国家对新能源汽车的补贴,使动力电池的使用量爆炸式增长(此阶段增长2.4万t)。锂产品的使用阶段,医药产品、锂金属电池产品、锂离子电池、陶瓷玻璃、润滑脂比例依次分别由2000年的7%、7%、3%、30%、35%演变为2015年的7%、10%、23%、33%、25%。2015年后

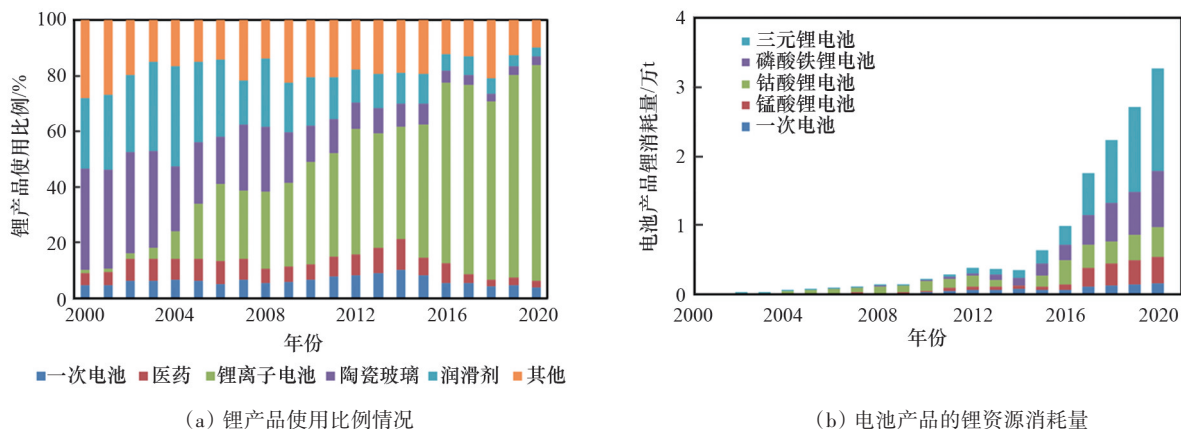
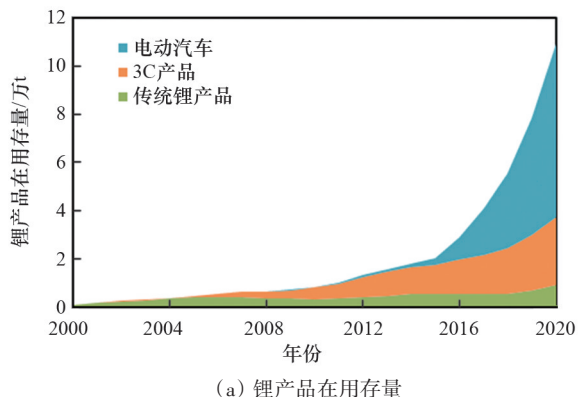


图6 中国锂产品使用情况

随着动力电池普及进程的不断加快,导致锂电池产品的使用量跳跃式增长,同时使用格局也发生巨大变化,截至2020年,锂产品的使用占比依次演变为5%、3%、80%、5%、7%。

2000—2020年,流入传统工业产品和电池产品的总量分别为6.1万、13.7万t,锂产品在各应用领域的消费呈现不同幅度的增长。其中,2015年以来伴随国内新能源汽车的需求猛增,电池部分中三元锂电池和磷酸铁锂电池的产量增速处于领先地位,二者产量分别从2015年的0.3万、0.12万t增长至2020年的1.8万、1.0万t,6年间分别增长了6.0倍、8.3倍。

2000—2020年中国锂产品在用存量情况由图



7所示,锂产品的在用存量都有不同程度的增长,锂产品存量从2000年的0.08万t快速增长至2020年的11.0万t,增长了137.5倍。其中,电动汽车和3C消费产品的在用存量增速最快,电动汽车从2008年前的0.004万t暴增至2020年的7.2万t,3C产品从2000年的0.002万t大幅增长至2020年的2.8万t,传统锂产品仅从2000年的0.08万t快速增长至2020年的0.9万t。锂电汽车在用存量在2015年之前仅有0.3万t,2015—2020年间提升近25倍,大量的锂电池都将随第一批新能源汽车报废高峰期的到来流入电池回收行业,但由于目前中国报废电池回收行业的技术还不够成熟,对此需特别关注^[39]。

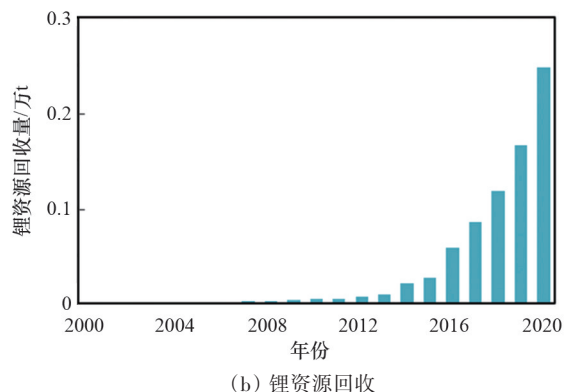


图7 中国锂产品在用存量与回收情况

2.5 废物管理阶段

目前,中国还没有关于锂产品回收率的官方统计数据,因此通过结合文献、相关报告和来自国内一些锂资源回收公司的调查数据进行估算。

2000—2020年中国锂废物的回收情况如图7所示。期间中国累计回收再利用废物0.8万t,回收利用主要有梯次利用(85%)、再次利用(15%)2种方式。在2008年之前报废的锂资源一直没有得到很好的利用^[40],因为当时锂主要应用在一次电池、润滑脂、医药等一次性产品中^[41],难以回收再利用,早期对于废料产品的终端处理以卫生填埋为主^[42];然而2015年后,锂资源回收量由0.05万t(2015年)增长到0.2万t(2020年)。然而锂资源的回收率比较低(不足5%)^[36],难点在于回收产业链上、下游信息不对称,上游有电池找不到下游买家,下游找不

到上游电池,并且交易透明度比较低;梯次利用技术存在缺陷,价格不透明,电池的健康状态难以评估;行业的装备水平对于不同类别、类型的电池兼容度较低,智能化和绿色化水平不够。

3 结论

分析了2000—2020年基于全生命周期的中国锂资源物质流的全过程,核算了锂在各个阶段的流量、存量和贸易量情况,研究结果如下。

1) 中国是最大的锂矿输入国,2000—2020共进口24.0万t,其中主要由澳大利亚的矿石供给,目前对外锂矿依存度仍维持在75%以上,由于国内锂矿石品位较低及开发环境恶劣,未来对外依存度仍会保持高位。

2) 2000—2020年, 锂盐的生产可分为2个阶段: 2000—2016年中国锂盐的生产量平稳增长, 从2000年的1.4万t增长到2015年的7.8万t; 2017—2020年受下游新能源汽车急剧增加的影响, 锂盐的生产量快速增长, 仅4年时间增长3倍。贸易方面, 中国进口产品多为工业级碳酸锂, 进口国为南美地区的发展中国家; 出口产品多为电池级氢氧化锂, 出口国家大多为发达国家。

3) 2000—2020年, 锂资源在中国累计消费量为23.8万t, 主要消费在锂电池领域(13.7万t)、陶瓷玻璃(3.2万t)、润滑脂(2.3万t)及医药(0.6万t), 受绿色转型的影响, 锂资源消费品的重心逐渐从传统行业向锂动力电池行业转移。

4) 此外值得注意的是, 截至2020年锂资源在中国社会经济系统的在用存量主要存在于3C产品和动力电池产品中, 中国将面对大批量新能源汽车废旧动力锂电池退役、动力锂电池回收利用率低及相关领域废旧动力锂电池需求量大等问题。目前中国尚不能满足大批量动力锂电池回收利用需求, 如不妥善解决, 将会对国内新能源汽车产业及经济社会造成诸多不良影响。

基于研究结果提出以下建议。

1) 稳定的上游供应是下游高新技术发展的前提, 中国锂资源供给主要由锂辉石、锂云母和盐湖卤水组成, 在现有矿点勘查工作推进的同时, 建议积极推动卤水勘查和供应, 厘清国内锂资源储量, 提高国内锂资源供应比例及保障力度, 减少对外依存度。

2) 能源绿色转型的刺激下, 锂电池的需求将不断加大, 导致其上游供应风险逐渐增大。在此背景下, 以钠离子电池为代表的新型电池可以作为锂电池的替代和备选电池。钠离子电池因其高低温性能比较优越、成本较低等优势, 可以大规模应用于轻型电动车、四季温差较大地区的中低续航的新能源汽车、储能基站等领域, 从而缓解锂的需求量。此外, 还应大力推广来提高电池的使用寿命。

3) 在高新技术发展的同时要注重提高锂资源的利用率和回收率。中国锂资源损失严重, 回收率低, 造成大量资源浪费的同时还给环境带来巨大负

担。伴随第一批新能源汽车报废高潮的来临, 有必要从战略高度布局动力锂电池回收利用体系, 保障大批量动力锂电池回收利用, 亟需加强对动力电池的回收工作, 以及建立合适的电池回收体系, 促进锂资源回收再利用, 以降低锂资源的供应压力。

参考文献 (References)

- [1] Zhang C, Liu B B, Li N, et al. Resource nexus for sustainable development: Status quo and prospect[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 66(26): 3426-3440.
- [2] Wang P, Wang H, Chen W Q, et al. Carbon neutrality needs a circular metal-energy nexus[J]. Fundamental Research, 2022, 2(3): 392-395.
- [3] 王钊越. 金属锂的应用及其市场[J]. 新疆有色金属, 2018, 41(增刊1): 56-58.
- [4] 徐翠云. 锂在陶瓷工业中的应用[J]. 江苏陶瓷, 1991, 24(3): 34.
- [5] 孙元碧, 付玉娥. 新型通用锂基润滑脂的制备研究[J]. 广州化工, 2013, 41(13): 129-130.
- [6] Sun X, Liu G, Hao H, et al. Modeling potential impact of COVID-19 pandemic on global electric vehicle supply chain[J]. iScience, 2022, 25(3): 103903.
- [7] 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.
- [8] 沈镭, 钟帅, 胡纾寒. 全球变化下资源利用的挑战与展望[J]. 资源科学, 2018, 40(1): 1-10.
- [9] 牛桂敏. 循环经济理论对传统经济学价值理论的创新[J]. 天津社会科学, 2008(4): 81-83.
- [10] 郭学益, 田庆华. 有色金属资源循环理论与方法概述[J]. 中国有色金属, 2011(增刊2): 76-78.
- [11] 李新, 任强, 罗胤达, 等. 基于物质流分析的中国机械行业铁资源代谢过程研究[J]. 资源科学, 2018, 40(12): 2329-2340.
- [12] Song L, Wang P, Hao M, et al. Mapping provincial steel stocks and flows in China: 1978—2050[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 262: 121393.
- [13] 张元林, 张上, 李金惠, 等. 中国钢结构建筑的物质流分析[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 546-555.
- [14] 郝敏, 陈伟强, 马梓洁, 等. 2000—2015年中国铜废碎料贸易及效益风险分析[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1515-1526.
- [15] Hao M, Wang P, Song L L, et al. Spatial distribution of copper in-use stocks and flows in China: 1978—2016[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 261: 121260.

- [16] Wang C, Huang X, Lim M K, et al. Mapping the structural evolution in the global scrap copper trade network[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 275: 122934.
- [17] 刘立涛, 赵慧兰, 刘晓洁, 等. 1995—2015年美国钴物质流演变[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 524-534.
- [18] Chen W Q. Dynamic product-level analysis of in-use aluminum stocks in the United States[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2018, 22(6): 1425-1435.
- [19] Tian H Z, Lu L, Cheng K, et al. Anthropogenic atmospheric nickel emissions and its distribution characteristics in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 417-418: 148-157.
- [20] Nakajima K, Otsuka Y, Iwatsuki Y, et al. Global supply chain analysis of nickel: Importance and possibility of controlling the resource logistics[J]. *Metallurgical Research & Technology*, 2014, 111(6): 339-346.
- [21] Robotin B, Ispas A, Coman V, et al. Nickel recovery from electronic waste II electrodeposition of Ni and Ni-Fe alloys from diluted sulfate solutions[J]. *Waste Management*, 2013, 33(11): 2381-2389.
- [22] Hao H, Liu Z W, Zhao F Q, et al. Material flow analysis of lithium in China[J]. *Resources Policy*, 2017, 51: 100-106.
- [23] Liu W Q, Liu W, Li X X, et al. Dynamic material flow analysis of critical metals for lithium-ion battery system in China from 2000—2018[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 164: 105122.
- [24] Sun X, Hao H, Zhao F Q, et al. Tracing global lithium flow: A trade-linked material flow analysis[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 124: 50-61.
- [25] Nigl T, Schwarz T E, Walch C, et al. Characterisation and material flow analysis of end-of-life portable batteries and lithium-based batteries in different waste streams in Austria[J]. *Waste Management & Research*, 2020, 38(6): 649-659.
- [26] Ziemann S, Weil M, Schebek L. Tracing the fate of lithium: The development of a material flow model[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2012, 63: 26-34.
- [27] Chang T C, You S J, Yu B S, et al. A material flow of lithium batteries in Taiwan[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 163(2-3): 910-915.
- [28] Zeng X L, Li J H. Implications for the carrying capacity of lithium reserve in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, 80: 58-63.
- [29] Kamran M, Raugei M, Hutchinson A. A dynamic material flow analysis of lithium-ion battery metals for electric vehicles and grid storage in the UK: Assessing the impact of shared mobility and end-of-life strategies[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 167: 105412.
- [30] 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.
- [31] 李新, 康欣宇, 林靖, 等. 中国铅资源流动及其循环效率[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 535-545.
- [32] Song J L, Yan W Y, Cao H B, et al. Material flow analysis on critical raw materials of lithium-ion batteries in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 570-581.
- [33] 张江峰. 2015年中国锂产业发展概况[J]. *中国金属通报*, 2016(3): 19-21.
- [34] 张江峰. 2016锂电产业生产概况[J]. *中国有色金属*, 2017(1): 40-41.
- [35] 陈光辉. 2020年中日韩锂盐进出口情况简析[J]. *世界有色金属*, 2021, 4: 1-3.
- [36] Ziemann S, Müller D B, Schebek L, et al. Modeling the potential impact of lithium recycling from EV batteries on lithium demand: A dynamic MFA approach[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 133: 76-85.
- [37] 我国攻克锂云母高效提锂技术[J]. *金属矿山*, 2010(9): 189.
- [38] 李丽旻. 金属锂涨价潮将持续至明年[N]. 2021-12-27(7).
- [39] 蒋晓斌, 江健, 陈定江, 等. 中国乘用车塑料的动态物质流分析[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(9): 4106-4114.
- [40] 贺娟, 钟伟, 张永辉, 等. 基于物质流和全过程管理的中国建筑垃圾资源化分析[J]. *环境工程*, 2018, 36(10): 102-107.
- [41] 黄莉, 李芳琴, 代涛, 等. 锂金属回收潜力研究——基于现有回收技术与工艺[J]. *矿产保护与利用*, 2021(5): 31-37.
- [42] 栾晓玉, 刘巍, 崔兆杰, 等. 基于物质流分析的中国塑料资源代谢研究[J]. *资源科学*, 2020, 42(2): 372-382.

Dynamic material flow and key driving factors of lithium in China

ZHAO Lianzheng¹, WANG Peng^{2,3*}, TANG Linbin⁴, WANG Heming^{1*}, YUE Qiang¹, CHEN Weiqiang^{2,3}, DU Tao¹

1. State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-Industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China
2. Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. Ganjiang Innovation Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Ganzhou 341000, China

Abstract To clarify the strategic significance of the flow, stock, and supply and demand patterns of lithium metal in new energy vehicle batteries and to guarantee the national energy transition and development of new energy vehicles, a Chinese lithium material flow analysis framework based on whole life cycle is constructed. The evolution of flow, stock, and supply and demand patterns of lithium elements driven by new energy vehicles in China from 2000 to 2020 is analyzed. The conclusions are as follows. Firstly, from the perspective of flow rate, lithium supply was dominated by lithium ore supply from 2000 to 2020; the usage of the primary resources (349000 t) had a large increase while the supply of secondary resources (8000 t) was small; the driving force for the processing and usage of all kinds of lithium products changed from traditional lithium industrial products and 3C products (mobile phones, tablets, and laptops) to new energy vehicles. Secondly, from the perspective of stock, the stock of lithium products in use increased differently, among which the growth rate of power battery products ranked the first (an increase of 72000 t in 20 years), and the recycling potential was relatively large (less than 5% at present). Thirdly, from the perspective of the supply and demand pattern, the external dependence of lithium ore in China was relatively high (above 75%) and would remain high; China mainly imported industrial-grade lithium carbonate from developing countries in South America, and exported battery-grade lithium hydroxide to developed countries such as Japan, South Korea, and the United States.

Keywords new energy vehicles; life cycle; lithium; dynamic material flow analysis ●



(责任编辑 刘志远)