

锂的城市矿产利用：前景、挑战及政策建议

王翹楚^{1,2}, 孙鑫³, 郝瀚^{3*}, 陈玮^{1,2}, 陈伟强^{1,2*}, 郑绵平⁴

1. 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
2. 中国科学院海西创新研究院, 厦门 361021
3. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084
4. 中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心, 北京 100037

摘要 锂是重要的战略性资源, 在电动汽车与能源存储技术中具有不可替代的作用。梳理了全球及中国锂资源储量、开采量、消费量的历史变化情况, 并采用物质流分析方法, 预测了2020—2080年全球锂资源供给量、需求量、报废量及城市矿产储量的变化趋势, 阐明了开发锂城市矿产的必要性与紧迫性, 并通过识别城市矿产利用的多重瓶颈从而提出了相应的应对策略。研究表明, 未来全球锂资源的需求量、报废量及在用存量(城市矿产储量)将保持高速增长的态势, 预计到2080年分别增长至约150万、115万、1840万t。其中, 电池部门是主要的增长驱动力, 电池产品的回收利用程度也将决定锂城市矿产的综合利用水平。假设未来无新增的经济可采储量且锂的回收利用率可以达到100%, 锂的自然资源储量将在2080年左右消耗殆尽, 将实现锂资源供给从天然矿产到城市矿产的巨大转变。而开发城市矿产将对降低中国锂进口依存度以及缓解原生锂开采的资源、能源、环境压力起到积极的促进作用。因此, 亟需针对锂城市矿产利用的技术、经济和管理的多重瓶颈, 制定相应的应对策略, 保障未来锂城市矿产的高效、高质、高值、环保利用。

关键词 锂; 关键金属; 城市矿产; 资源循环利用

锂是重要的战略性资源, 地壳中的丰度约为0.0065%^[1], 主要赋存于盐湖和花岗伟晶岩矿床

中^[2]。随着地质勘探技术的进步, 不断有新的矿种与矿床被发现与利用, 比如从加州 Salton Sea 地热

收稿日期: 2020-05-20

基金项目: 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDB-SSW-DQC012); 国家自然科学基金面上项目(41671523); 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(71961147003)

作者简介: 王翹楚, 助理研究员, 研究方向为关键金属循环与城市矿产开发, 电子信箱: qcwang@iue.ac.cn; 郝瀚(通信作者), 副教授, 研究方向为交通能源系统分析、交通低碳技术3E评价, 电子信箱: hao@tsinghua.edu.cn; 陈伟强(共同通信作者), 研究员, 研究方向为环境系统工程、城市矿产与循环经济、资源安全与可持续发展战略, 电子信箱: wqchen@iue.ac.cn

引用格式: 王翹楚, 孙鑫, 郝瀚, 等. 锂的城市矿产利用: 前景、挑战及政策建议[J]. 科技导报, 2020, 38(15): 6-15; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.15.001

田的卤水中可以提取锂等金属资源。锂广泛应用于电动汽车、能源存储、润滑脂、陶瓷玻璃等领域,是支撑全球能源低碳转型的重要元素与中国发展战略性新兴产业必需的关键矿产^[3-4],被誉为“21世纪的能源金属”^[5]与“推动世界前进的重要元素”^[6]。

20世纪末至今,全球锂资源的经济可采储量(reserve,以下简称储量)与开采量稳步提升,但是空间分布呈现严重不均衡的现象。20世纪90年代,全球锂储量如图1(a)所示保持在400万t左右(研究涉及的锂统计数据均采用锂当量表示)。近年来,随着电动汽车等锂产品成功走向商业化,锂的需求量逐渐提高,其勘探活动也处于持续进行之中。2008年,全球锂储量出现阶跃式增长,达到1000万t。截至2018年底,全球已探明的锂储量达到1700万t,主要分布于智利(860万t)、澳大利亚(280万t)、阿根廷(170万t)与中国(100万t)。其

中,智利和阿根廷为盐湖型锂资源,澳大利亚为矿石型锂资源^[7]。目前,全球已探明的锂矿资源量(resource)已达到8000万t,主要分布于南美洲的“锂三角”地区,即玻利维亚(2100万t)、阿根廷(1700万t)与智利(900万t)。

1994—2018年,全球锂开采量从1万t增长至10万t,在24年的时间内提高了约10倍(图1(b))。其中,1994—2015年属于锂开采量平稳增长期,年均复合增长率为6.4%。由于电动汽车等锂产品的普及,锂需求量从2016年开始飞速增长,其开采量年均增长率快速提升至35%。其中,智利和澳大利亚一直是全球主要的锂供应国,产量占比保持在60%以上。2013年,澳大利亚取代智利成为全球最大的锂资源供应国。中国锂开采量的增速相对平稳,年均锂开采量约为0.3万t。随着技术的进步,中国锂开采量逐渐提高,2019年时已经超过1万t。

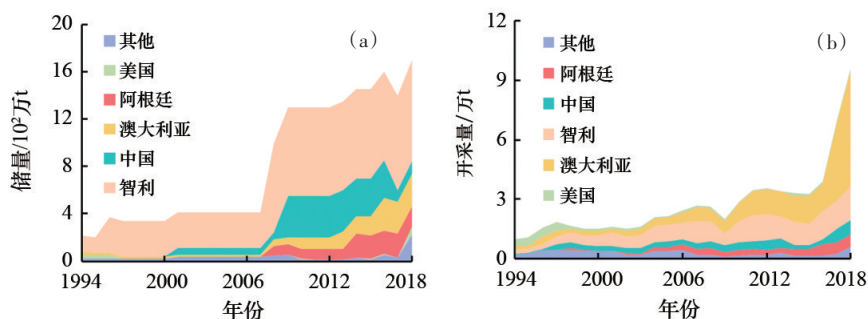


图1 全球锂储量(a)与开采量(b)变化趋势

图2(a)所示为1994—2018年全球锂消费国的构成情况(2016—2018年各国锂消费量是基于全球锂消费总量与2015年各国锂消费占比估算)。其中,中国、美国、欧盟、日本和韩国为全球主要的锂消费国与地区。1996年至今,中国一直是全球最大的锂消费国,其消费占比保持在25%左右。

图2(b)所示为全球分部门的锂消费情况。其中,1994—2014年,全球锂的主要消费领域为玻璃陶瓷、锂基润滑脂和原铝冶炼等传统工业部门,平均占比约50%。锂在电池领域的消费量从2000年开始稳步提升,到2014年时已经完全取代玻璃陶瓷成为

锂消费占比最大的行业(35%)。特别是在2015—2018年期间,电动汽车产业的快速发展极大地促进了锂的消费需求,使得锂在电池行业的消费量从1.3万t增长至6.2万t,消费量增速高达1.6万t/a,远高于1994—2014年的0.06万t/a。2018年,锂在电池部门的消费占比已经增长至65%,玻璃陶瓷、锂基润滑脂与原铝冶炼部门的锂消费占比下降至24%,锂消费量仅有2.3万t。此外,锂也被广泛用于制备空调制冷剂、聚合物、连铸结晶器熔剂粉末、医药、化妆品、铝锂合金等产品,这些产品对锂资源的需求量维持较为平稳的趋势,约占锂消费总量的10%。

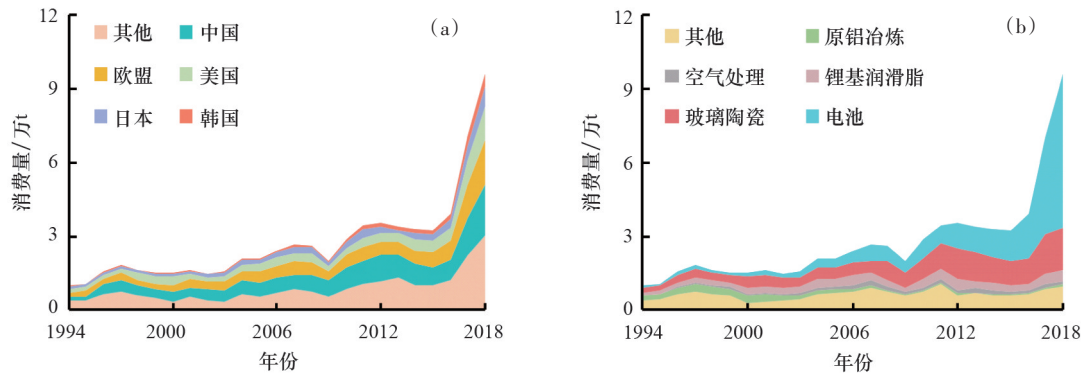


图2 全球分国别(a)与分行业(b)的锂消费量变化趋势

电动汽车与电池技术的发展与进步将进一步刺激锂的开采与消费,使锂自然资源储量面临持续下降的风险。未来,锂城市矿产储量将逐渐提高,开发城市矿产将成为锂产业可持续发展的重要保障。尤其是废旧电池中锂的回收利用程度将决定未来锂城市矿产的综合利用水平^[8]。因此,探明未来锂城市矿产储量的变化趋势与利用潜力,识别城市矿产利用的多重挑战并提出相应的应对策略对锂城市矿产的高效、高质、高值、环保利用至关重要。在综合现有研究的基础上,着重阐明如下问题:(1)2020—2080年锂需求量及其结构的长期变

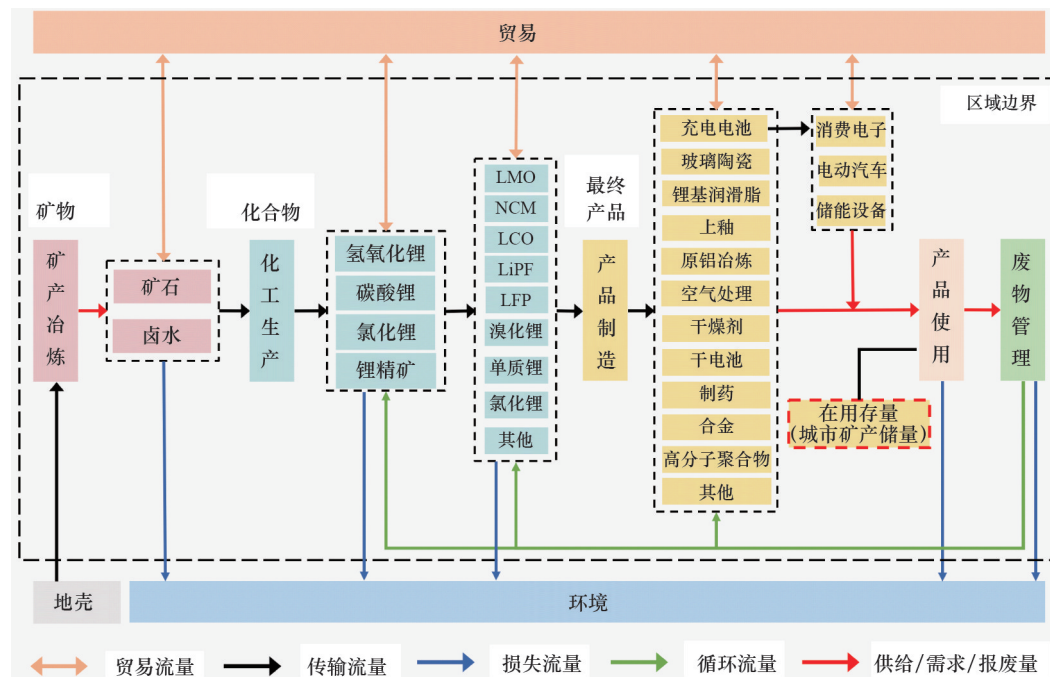
化趋势与锂自然资源储量的保障能力分析;(2)锂城市矿产储量的长期变化趋势及其在保障锂资源供给方面的潜力分析;(3)开发锂城市矿产面临的技术、经济和管理的多重瓶颈;(4)促进中国和全球锂城市矿产利用的对策建议。

1 方法与数据

1.1 研究方法

1.1.1 锂物质流核算框架的构建

建立图3所示的锂元素全生命周期的物质流



LMO—锰酸锂; NCM—镍钴锰酸锂; LCO—钴酸锂; LiPF₆—六氟磷酸锂; LFP—磷酸铁锂

图3 锂元素全生命周期物质流分析框架

核算框架,包含矿产冶炼、化工生产、产品制造、产品使用与废物管理5个环节。其中,前3个环节的产物分别为矿产(含锂矿石和含锂卤水)、化合物(碳酸锂、氢氧化锂、锂电池正极材料等)与最终产品(锂电池、玻璃陶瓷、锂基润滑脂等)。

1.1.2 产品保有量的核算

产品保有量是指处于使用状态的某种产品的数量,例如电动汽车的保有量。2020—2080年全球锂产品的保有量(S)是基于未来人口数量(P)与产品保有率(c)进行模拟预测(式(1));通过文献调研等方式确定未来锂产品保有率的饱和水平(N),并通过 Logistic 方程估算未来产品保有率(c)的发展趋势(式(2))。

$$S(t) = P(t)c(t) \quad (1)$$

$$c(t) = \frac{N}{1 + \left(\frac{N}{c_0} - 1\right) \exp\left[-\frac{Nd_0}{c_0(N - c_0)}(t - t_0)\right]} \quad (2)$$

式中, $c(t)$ 为第 t 年的产品保有率; c_0 是 t_0 年(2019年)的产品保有率; d_0 是 t_0 年产品保有率的初始变化率。

根据计算,未来全球电动汽车的保有率将在2030、2050、2080年分别达到每千人20辆、125辆、340辆,全球电动汽车的保有量将增长至1.7亿、11.4亿、31.9亿辆。需要指出的是,研究模型假设未来电动汽车对燃油车的替代基于如下原则:(1)所关注的纯电动汽车和插电式混合动力汽车仅替代轻型燃油车,重型燃油车主要由氢能燃料电池汽车进行替代;(2)对于北美、西欧、东亚等电动汽车发展较快地区,假设电动汽车的轻型车市场渗透率在2030、2050、2080年分别达到30%、70%、100%,其中纯电动汽车与插电式混合动力汽车的比例约为3:1;(3)对于其他电动汽车发展相对较慢地区,假设电动汽车市场渗透率相比发展较快地区落后10年。

1.1.3 理论报废量与理论需求量的核算

理论报废量(F_{out})是指使用状态的产品达到服务年限之后变成报废产品的数量以及产品中所包含的物质重量。理论需求量(F_{in})是指投入使用的产品数量以及产品中所包含的物质质量。理论报

废量与需求量分别为图3中使用环节的输出与输入流量。其中,理论报废量是基于产品的服务年限模型进行核算(式(3)),研究采用正态分布函数 $[\lambda(t, t', \tau, \sigma)]$ 模拟未来锂产品的理论报废量(式(4));理论需求量是基于在用存量的变化量与理论报废量进行核算(式(5))。

$$F_{\text{out}}(t) = \sum_{i \leq t} F_{\text{in}}(t') \lambda(t, t', \tau, \sigma) \quad (3)$$

$$\lambda(t, t', \tau, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t - t' - \tau)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

$$F_{\text{in}}(t) = S(t) - S(t-1) + F_{\text{out}}(t) \quad (5)$$

式中, F_{out} 为第 t 年的理论报废量; F_{in} 为第 t 年的理论需求量; $S(t)$ 与 $S(t-1)$ 分别为第 t 与 $t-1$ 年的在用存量; t' 为产品的平均使用寿命; σ 为使用寿命标准差。

模型假设2020—2080年电动汽车等锂产品的平均寿命保持不变(电动汽车的平均寿命约为12年),而且不考虑潜在的新兴技术的发展对锂未来需求结构的影响。

1.1.4 锂存量与流量的核算

研究采用自下而上法,根据产品的未来保有量(S)与锂元素的使用强度(I)估算在用存量(M),进而核算未来锂资源的理论需求量(M_{in})与报废量(M_{out}),具体计算方法见式(6)~式(8)。模型假设未来锂产品中的锂元素使用强度由电动汽车续航里程、电动汽车能耗、单位动力电池所需锂元素等要素决定,具体假设如下:(1)纯电动汽车和插电式混合动力汽车的纯电续航里程在2030年分别达到400、60 km,之后保持不变;(2)汽车轻量化、动力系统能效提升等因素推动汽车能耗持续下降。以中国为例,纯电动乘用车能耗将从2020年约15(kW·h)/100 km水平下降至2080年约12(kW·h)/100 km的水平;(3)单位动力电池锂元素含量随电池化学体系变化,介于0.09 kg/(kW·h)(磷酸铁锂电池)至0.13 kg/(kW·h)(三元NCM523电池)之间,结合各类动力电池市场渗透率其平均水平保持在0.11 kg/(kW·h);(4)由以上要素共同决定的电动汽车锂元素含量持续变化,以中国为例,纯电动乘用车单车锂元素含量从2030年的6.3 kg下降至2080年的5.5 kg。

$$M(t) = I(t)S(t) \quad (6)$$

$$M_{in}(t) = F_{in}(t)I_{in}(t) \quad (7)$$

$$M_{out}(t) = F_{out}(t)I_{out}(t) \quad (8)$$

1.1.5 锂自然资源储量的核算

以当前全球 1700 万 t 的锂储量为基准值(2020 年),通过计算锂资源的理论需求量与报废回收量的差值,作为未来的资源开采量,进而揭示锂自然资源储量的变化趋势。其中,模型假设未来全球无新增的锂经济可采储量,而且按照废旧产品中锂的回收利用率为 100% 计算其报废回收量。

1.2 数据来源

研究数据主要来源于文献资料、行业报告、统计年鉴等。其中,产品保有量数据来源于锂元素相关产品的统计资料,电动汽车替代情景基于国际能源署等国际组织相关预测展望^[9],锂元素的使用强度数据主要通过文献调研的方式获取,产品的服务年限参数来自于汽车等产品的存活规律相关研究^[11]。

2 锂供给、需求与城市矿产储量的发展趋势

2.1 全球锂需求量与报废量的变化趋势

2020—2080 年全球锂需求量的预测结果如图 4(a)所示。研究表明,未来全球锂需求量将保持快

速增长趋势,2030、2050、2080 年分别达到 25 万、77 万、150 万 t,远超当前水平。同时,锂需求结构也将发生根本性变化,短期内锂需求以消费电子、玻璃陶瓷、润滑脂等传统工业产品为主体。中长期来看,电动汽车动力电池的生产制造是锂需求增长的主要驱动力。在电动汽车销量快速增长、车用动力电池技术路线不发生明显变化的情况下,电动汽车对锂需求量的占比将在 2080 年超过 80%。从区域视角来看,近期电动汽车对锂资源的需求主要来自美国、欧盟、中国等电动汽车先发国家和地区。未来,随着电动汽车在全球范围内的技术扩散,印度、巴西等具有较高电动汽车发展潜力的国家对锂资源的需求也将迅速增长。

与锂需求量的变化趋势相似,锂报废量也将在未来几十年内快速增长,预计在 2030、2050、2080 年分别达到 11 万、40 万、115 万 t(图 4(b))。由于汽车使用寿命高于一般消费品,其资源报废量的变化量与需求量的变化量相比,有 10 年左右的滞后。因此,锂报废量将在 2030 年之后快速增长。玻璃陶瓷等传统产品的锂含量较低,回收成本高,目前回收率接近 0,主要以生活垃圾的形式被填埋和焚烧,资源难以得到有效再利用。车用动力电池是锂资源回收的主要潜力所在,通过物理方法、火法冶金、湿法冶金等多种回收方法可以实现锂的再生利用。

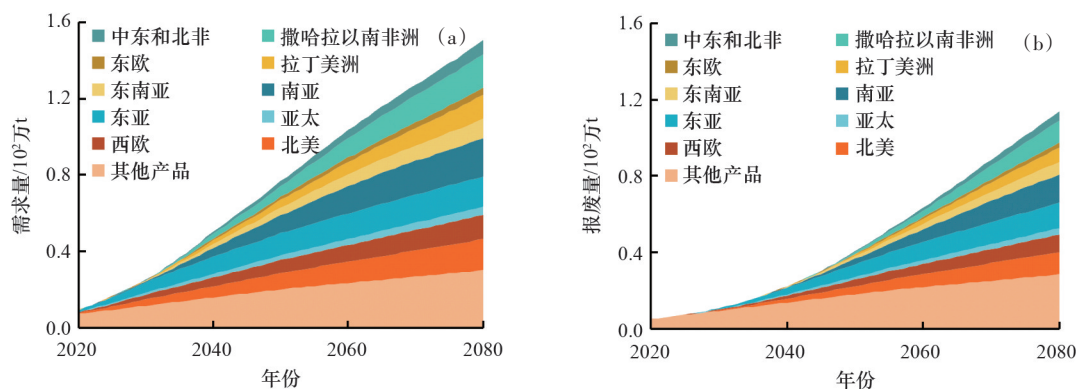


图4 全球分地区电动汽车与其他终端产品的锂需求量(a)与报废量(b)

2.2 全球锂在用存量的变化趋势

图 5(a)所示为 2020—2080 年全球锂在用存量的变化趋势。锂在用存量将在 2030、2050 与 2080 年分别达到 134 万、680 万、1840 万 t。电动汽车未

来将成为锂在用存量的绝对主体,占 2080 年在用存量总量的 92%,其分布与全球汽车保有量分布基本一致。这些在用存量未来也将成为锂的城市矿产,提供宝贵的再生锂资源。

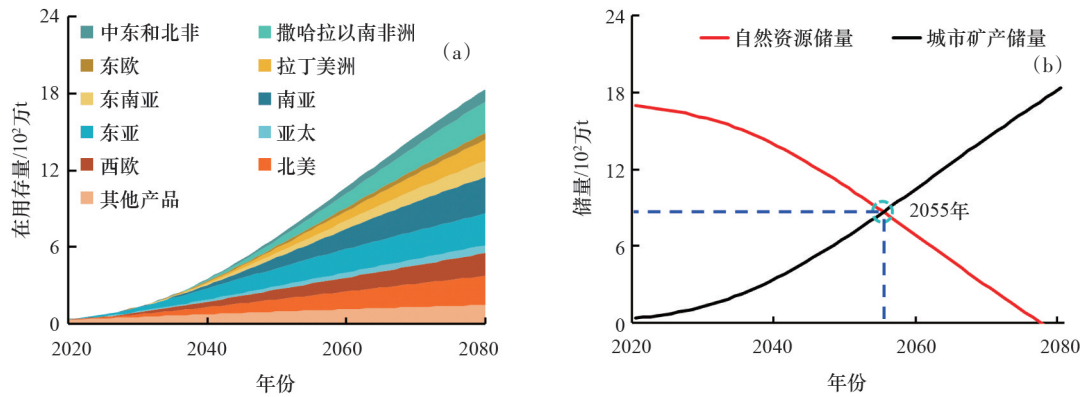


图5 全球分地区电动汽车与其他终端产品中的锂在用存量(a)及锂自然资源储量和城市矿产储量的未来变化趋势(b)

假设未来无新增的经济可采储量,且锂的回收利用率达到100%,其自然资源储量(经济可采储量)仍将以约28万t/a的速率迅速下降(图5(b)),而城市矿产储量将持续增加,在2055年左右超过其自然资源储量成为全球锂的主要供给来源。预计在2080年左右,锂的自然资源储量将消耗殆尽,实现锂资源供给从天然矿产到城市矿产的巨大转变。

2.3 锂城市矿产利用潜力分析

实际上,锂资源的回收利用率在短期内难以实现100%的目标。假设车用动力电池中锂的回收利用率在2030、2050年分别达到40%、80%(2050—2080年按照80%计算),据此测算未来全球锂资源

的供给结构如图6所示。可以看出,通过回收利用获取的二次资源在短期内难以发挥显著作用。2030年之前,全球仍然主要依赖一次资源的供给(图6(a))。中长期来看,二次资源将发挥越来越重要的作用,其在总供应量中的比例在2050、2080年将分别达到23%、45%(图6(b)),在资源供给体系中逐渐发挥主导作用,同时必须认识到,在电动汽车产量长期增长、动力电池报废存在滞后、锂资源回收难度高等因素的作用下,即使从中长期来看,也难以摆脱对一次资源供给的显著依赖。而在此回收率的假设情景下,目前锂的经济开采储量(1700万t)至少需要提高1倍,即增长至3300万t左右才能满足全球2080年以前对锂资源的需求。

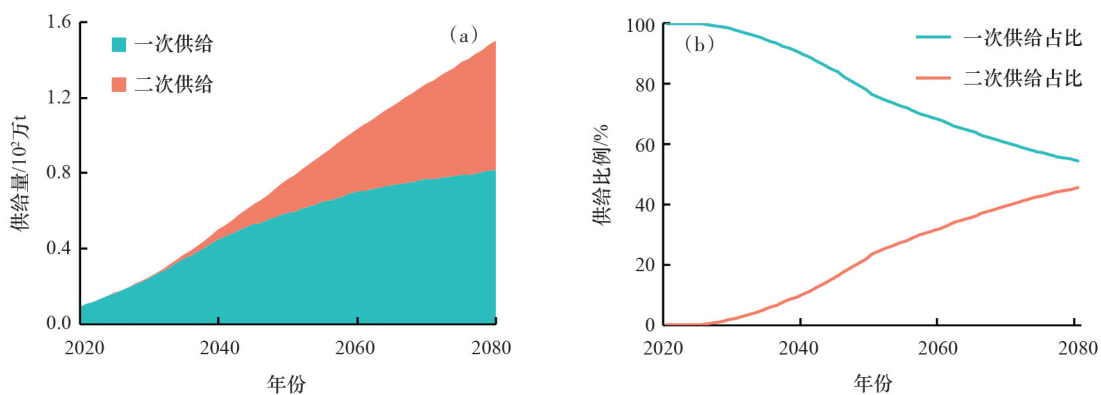


图6 全球原生锂与再生锂的供给量(a)及占比(b)的变化趋势

3 锂城市矿产利用的优势、挑战与应对策略

3.1 利用城市矿产有利于降低对原生矿产和国外矿产的依赖

图7所示为1994—2018年中国锂资源进口依存度的变化趋势(基于锂矿产的进口量与碳酸锂、氢氧化锂等化合物的产量核算)。可以看出,中国对锂资源的进口依赖程度总体上呈现快速增长的变化趋势。进口依存度指标从1994年的54%提升至2018年的86%。锂作为战略性关键矿产资源,其进口依赖程度的提高将对中国锂供给链与国家战略资源安全带来潜在的风险隐患。为了确保未来锂资源的安全稳定供给,中国亟需提高对锂城市矿产利用的重视程度。通过开发城市矿产,降低对原生矿产与国外矿产的依赖度,这对保障国家资源安全具有重要的战略意义。

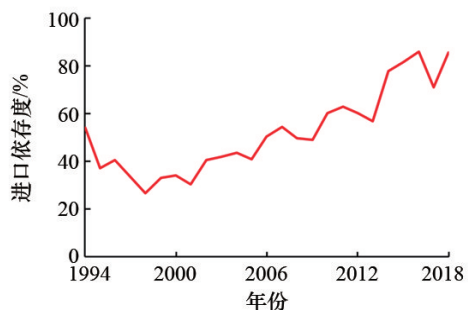


图7 中国锂资源进口依存度变化趋势

3.2 利用城市矿产有利于缓解原生矿产开采的资源、能源与环境压力

城市矿产的循环利用、规模利用与高值利用是减少锂原生矿产消耗,缓解能源、环境压力,保障锂产业可持续发展的重要途径。中国锂城市矿产储量(在用存量)到2080年将增长至1840万t,约92%来自电动汽车中的锂电池。因此,废旧锂电池将成为未来锂城市矿产利用的主要方向。预计到2080年,全球报废电池中的锂资源总量将达到86万t(图4)。如果对其全部加以回收利用,预计将削减57%的原生矿产资源需求量。可见,开发城市矿产对保障全球及我国锂资源持续稳定供应至关重要。

开发城市矿产亦有利于缓解原生锂开采的能

源与环境压力。全球锂资源主要来自盐湖及锂矿石,而锂资源的提取将引起水资源耗竭、水体污染、土壤污染、大气污染、生态毒性等严峻的生态环境问题^[12]。例如,智利的阿塔卡马盐滩(Atacama)处于干旱地区,锂资源长期的开采已造成当地水资源的严重短缺与污染,甚至引发水权纷争等问题^[13]。城市矿产蕴含着丰富的资源回收潜力,通过有效地回收利用,可以显著降低原生锂生产的能耗与环境影响。以锂电池为例,Dunn等^[14]的研究表明,从废旧锂电池中回收锰酸锂所需的能耗远低于锰酸锂的初级生产过程。同时,锂电池回收阶段的环境影响亦低于电池的制造与使用环节,而且通过回收废旧锂电池,可以降低人体毒性等环境影响^[15-16]。随着锂产品报废量的持续提升,未来锂城市矿产的开发利用将具有一定的节能减排潜力。

3.3 锂城市矿产的利用存在技术、经济和管理的多重瓶颈

联合国环境规划署(UNEP)2011年发布的报告指出,全球锂资源的回收率不足1%^[17]。其中,废旧锂电池作为锂城市矿产的主要来源,其全球范围内的平均回收率也仅有5%^[18]。随着锂电池回收产业的快速发展,全球目前有50多家企业正在从事锂电池的回收研究,产能主要集中于中国与韩国^[19]。Circular Energy Storage的统计结果表明,2018年全球总计回收约9.7万t锂电池,其中,中国与韩国分别占有70%与20%的市场份额^[20]。然而,锂电池回收企业主要关注钴、镍、铜等有价金属的回收,锂元素通常存在于残渣中被填埋或焚烧处理^[21-22]。总体上,锂城市矿产的利用目前尚存在技术、经济与管理等方面的多重瓶颈。

1) 技术方面存在回收效率低、产品设计不易于资源回收的问题。以锂电池为例,废旧锂电池的产品结构与成分组成十分复杂,包含电极、隔膜、电解液等组分,以及锂、铜、镍、钴、铅、氟化物、有机电解质等有毒和易燃物质,降低了电池拆解等废物管理环节的回收效率;锂产品的设计阶段未充分考虑资源的可回收性,极大地限制了末端回收的整体效率。例如,锂电池采用点焊技术降低了电池组件的拆解效率^[23]。

2) 经济方面存在利润空间小,经济可行性较低的问题。研究表明,锂的回收成本是从盐湖中提取原生锂成本的5倍^[24]。而从废旧锂电池中回收碳酸锂的成本约为\$8000/t碳酸锂,远高于原生锂开采的平均成本^[25]。另外,城市矿产中锂元素单位含量较低也是锂回收成本较高的主要原因之一。锂电池中锂元素单位含量仅有0.13 kg/(kW·h),而钴、镍、铜等则高达0.33~0.62 kg/(kW·h)^[26]。

3) 管理方面存在废弃资源回收体系不健全的问题。目前,全球范围内仍然缺乏成熟的废旧锂产品回收与分类体系,多种类型报废产品的混合加大了锂的回收难度与废旧产品收集、运输和存储阶段的安全风险。此外,随着电动汽车与能源存储技术的快速发展,未来废旧锂产品的成分与类型也将发生变化,极大地增加了锂回收产业链的不确定性。因此,保障长期、稳定、大量的废料供应也将是未来锂回收产业规模化面临的关键问题。

3.4 制定应对策略,促进锂城市矿产高效、高质、高值、环保利用

面对未来锂城市矿产利用的多重挑战,提出如下策略建议。

1) 推动锂产品生态设计。充分发挥政府职能,鼓励锂产品制造商在产品阶段考虑资源的可回收性。例如,优化锂电池的装配方法,允许产品更换回收时可以拆卸电池的单个组件,而无需处理整个产品。目前,加拿大政府已出台“矿产与金属政策”,强调资源与产品的可回收性应作为产品设计的重要考量要素^[27]。此外,推动锂电池等产品尺寸的标准化,促进锂资源回收利用技术与装备的清洁化、智能化升级,将有利于锂城市矿产的利用。

2) 制定支持锂城市矿产开发产业化的扶持政策。抓紧出台加快锂再生资源产业发展的政策措施,采取经济激励政策对锂回收企业予以扶持,包括税收减免、财政援助、无息或低息贷款、建立专项基金、深化生产责任延伸制度等。例如,2009年,美国能源部向Toxco公司提供950万美元的资金援助用于建设美国第一个锂电池回收工厂^[23]。

3) 建设锂城市矿产利用的基础设施与研发中心。目前,部分发达国家已着手推进锂城市矿产的

开发利用。2019年,美国能源部宣布成立锂电池回收利用研发中心,通过整合国家实验室、大学和私营企业的研究力量,加速推进锂电池关键材料回收再利用技术的研发,目标是将锂电池回收率从5%提高到90%^[28];德国大众集团2019年启动了电池回收的试点项目,预计在2020年回收1200 t的锂、镍、钴、锰等电池材料^[29]。2019年12月,中国工信部发布《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范条件》,明确指出,废旧动力蓄电池中镍、钴、锰的综合回收率不低于98%,锂的回收率不得低于85%^[30]。然而,目前许多汽车与电池的回收企业以及相关技术都是面向铅酸电池的回收。因此,当前亟需建立适用于锂电池等锂城市矿产利用的基础设施,并研发产业化的回收技术。

4) 建立完善的金属再生资源综合回收体系。以智能物联网技术以及互联网信息化大数据技术为支撑,在政府指导和各方参与共同努力下,形成“前端源头分类、中端智慧清运、后端精细分拣、末端资源利用”模式的“绿色智慧型”回收体系,综合回收城市矿产中的有价金属资源如锂、钴、镍、铜等,降低能耗水平和生产成本,提升企业的利润空间,实现城市矿产开发利用的良性循环发展。同时,为资源回收企业创造长期稳定的投资环境,降低矿产资源价格波动对回收产业链的消极影响。

5) 持续提升政府的管理水平和人民群众对资源节约、环境保护的认识。将城市矿产开发利用工作纳入政府职能范围,持续提升政府的管理水平,加强相关统筹、协调、推进、检查、督办和统计汇总等工作,探索形成适合我国城市矿产资源化利用的管理模式和政策机制。同时,政府应注重引导并加强民众对资源节约与环境保护的主体意识与责任意识,鼓励民众分类处理废旧产品,并交给具备相关资质的企业进行资源回收。

4 结论

1) 全球锂资源的开采量与消费量在1994—2018年期间呈现持续增长的变化趋势。其中,2016—2018年为高速增长阶段,年均增长率约为

35%, 电池部门是锂开采与消费量增长的主要驱动力, 其消费量占比在 2018 年时高达 65%。此外, 全球锂生产与消费国构成呈现如下特征: 澳大利亚与智利为主要的锂资源生产国, 中国是最大的锂消费国。

2) 未来全球锂资源的需求量、报废量及在用存量(城市矿产储量)将保持高速增长的态势, 预计到 2080 年分别增长至约 150 万、115 万、1840 万 t, 而电池行业的占比将分别达到 80%、75%、92%。电池产品的回收利用程度将决定未来锂城市矿产的综合利用水平。

3) 假设未来无新增的经济可采储量且锂的回收利用率可以达到 100%, 锂城市矿产储量将在 2055 年左右超过其自然资源储量成为全球锂的主要供给来源。预计在 2080 年左右, 锂的自然资源储量将消耗殆尽, 将实现锂资源供给从天然矿产到城市矿产的巨大转变。

4) 锂城市矿产的利用可以有效地降低对国外矿产的依赖, 并且可以缓解原生矿产开采的资源、能源、环境压力。然而, 目前锂城市矿产的利用仍然存在技术、经济和管理等方面的多重瓶颈, 亟需制定相应的应对策略, 保障未来锂城市矿产的高效、高质、高值、环保利用。

参考文献(References)

- [1] 尚玺, 孟宇航, 张乾, 等. 富锂矿物的锂提取与战略性应用[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(6): 152-158.
- [2] 郑绵平, 刘喜方. 中国的锂资源[J]. 新材料产业, 2007(8): 13-16.
- [3] Watari T, McLellan B C, Giurco D, et al. Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 148: 91-103.
- [4] 王登红. 战略性关键矿产相关问题探讨[J]. 化工矿产地质, 2019, 41(2): 65-72.
- [5] 李建康, 刘喜方, 王登红. 中国锂矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2269-2283.
- [6] 周平, 唐金荣, 张涛. 全球锂资源供需前景与对策建议[J]. 地质通报, 2014, 33(10): 1532-1538.
- [7] 刘丽君, 闫卫东, 王登红, 等. 国内外锂矿主要类型、分布特点及勘查开发现状[J]. 中国地质, 2017, 44(2): 263-278.
- [8] 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.
- [9] Hao H, Geng Y, Tate J E, et al. Impact of transport electrification on critical metal sustainability with a focus on the heavy-duty segment[J]. Nature Communications, 2019, 10: 5398.
- [10] International Energy Agency. Global EV Outlook 2019 [R]. Paris: International Energy Agency, 2019.
- [11] Zheng J, Zhou Y, Yu R, et al. Survival rate of China passenger vehicles: A data-driven approach[J]. Energy Policy, 2019, 129: 587-597.
- [12] Aral H, Vecchio-Sadus A. Toxicity of lithium to humans and the environment—A literature review[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2008, 70(3): 349-356.
- [13] Friends of the Earth Europe. Lithium[R]. Brussels: Friends of the Earth Europe, 2013.
- [14] Dunn J B, Gaines L, Sullivan J, et al. Impact of recycling on cradle-to-gate energy consumption and greenhouse gas emissions of automotive lithium-ion batteries [J]. Environmental Science and Technology, 2012, 46(22): 12704-12710.
- [15] Ioakimidis C S, Murillo-Marrodón A, Bagheri A, et al. Life cycle assessment of a lithium iron phosphate (LFP) electric vehicle battery in second life application scenarios[J]. Sustainability, 2019, 11: 2527.
- [16] Franco A A. Rechargeable Lithium Batteries (Chapter 11: Environmental performance of lithium batteries: Life cycle analysis)[M]. Amsterdam: Elsevier, 2015.
- [17] International Resource Panel. Recycling rates of metals: A status report[R]. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2011.
- [18] Melin H E. State-of-the-art in reuse and recycling of lithium-ion batteries—A research review[R]. London: Circular Energy Storage, 2019.
- [19] Melin H E. The lithium-ion battery end-of-life market 2018-2025[R]. London: Circular Energy Storage, 2018.
- [20] Melin H E. The lithium-ion battery end-of-life market—A baseline study[R]. London: Circular Energy Storage, 2018.
- [21] Swain B. Recovery and recycling of lithium: A review[J]. Separation and Purification Technology, 2017, 172: 388-403.
- [22] Ambrose H, Kendall A. Understanding the future of lithium: Part 2, temporally and spatially resolved life-cycle assessment modeling[J]. Journal of Industrial Ecology, 2020, 24(1): 90-100.

- [23] Church C, Wuennenberg L. Sustainability and second life: The case for cobalt and lithium recycling[R]. Winnipeg: International Institute for Sustainable Development, 2019.
- [24] Chagnes A, Światowska J. Global lithium resources and sustainability issues[M]//Lithium process chemistry. Amsterdam: Elsevier, 2015.
- [25] Gratz E, Sa Q, Apelian D, et al. A closed loop process for recycling spent lithium ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2014, 262: 255–262.
- [26] Mayyas A, Steward D, Mann M. The case for recycling: Overview and challenges in the material supply chain for automotive Li-ion batteries[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2019, 17: e00087.
- [27] Natural Resources Canada. The minerals and metals policy of the government of Canada[EB/OL]. [2020–05–20]. <https://www.nrcan.gc.ca/mining-materials/policy/8688>.
- [28] U.S. Department of Energy. Energy department announces battery recycling prize and battery recycling R&D center[EB/OL]. [2020–05–20]. <https://www.energy.gov/articles/energy-department-announces-battery-recycling-prize-and-battery-recycling-rd-center>.
- [29] Volkswagen Group. The Group's first pilot plant for battery recycling is being created in Salzgitter[EB/OL]. [2020–05–20]. <https://www.volkswagenag.com/en/news/stories/2019/02/lithium-to-lithium-manganese-to-manganese.html>.
- [30] 中华人民共和国工业和信息化部. 新能源汽车废旧动力电池综合利用行业规范条件(2019本)[EB/OL]. [2020–05–20]. <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652858/n1652930/n4509607/c7595282/content.html>.

Urban mining of lithium: Prospects, challenges and policy recommendations

WANG Qiaochu^{1,2}, SUN Xin³, HAO Han^{3*}, CHEN Wei^{1,2}, CHEN Weiqiang^{1,2*}, ZHENG Mianping⁴

1. Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China
2. Fujian Institute of Innovation, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China
3. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China
4. R&D Center for Saline Lakes and Epithermal Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract Lithium is widely regarded as a critical and strategic metal that plays an indispensable role in electric vehicles and energy storage technology. This study first provides a dynamic and holistic view on the historical evolution of the global reserve, production, and consumption of lithium. Material flow analysis (MFA) is then used to model the trends of supply, demand, scrap generation, and in-use stocks of lithium from 2020 to 2080. Finally, prospects, challenges, and policy recommendations for urban mining of lithium are discussed. It is shown that, driven by the increasing demand in batteries, the global lithium demand, scraps generation, and in-use stocks will keep fast growing over the next 60 years, and will reach ≈ 1.50 , ≈ 1.15 , and ≈ 18.40 million tons, respectively by 2080. If no new recoverable reserves are found and if lithium recycling rate reaches 100%, then lithium natural reserves would be exhausted in 2080, shifting the future lithium supply from natural minerals to urban minerals. Hence, it is important and urgent to explore the urban mines of lithium, which will have positive influences on trade, resource, energy, and environment. However, there are still many bottlenecks in terms of recycling technologies, economic feasibility, and waste management system to be solved so as to ensure highly efficient and environmental utilization of urban mining of lithium. Several policy recommendations are thus provided.

Keywords lithium; critical metal; urban mining; resource recycling ●



(责任编辑 刘志远)