

引用格式:郑林昌, 张亚楠, 李泽阳, 等. 不同消费情景下中国新能源汽车锂回收潜力[J]. 资源科学, 2022, 44(1): 97-113. [Zheng L C, Zhang Y N, Li Z Y, et al. Lithium recovery potential of new energy vehicles in China under different consumption scenarios[J]. Resources Science, 2022, 44(1): 97-113.] DOI: 10.18402/resci.2022.01.08

不同消费情景下中国新能源汽车锂回收潜力

郑林昌, 张亚楠, 李泽阳, 赵颖

(河北大学经济学院, 保定 071002)

摘要:新能源汽车是锂资源消费主力, 回收新能源汽车报废锂电池中的锂对于增加锂供给具有重要意义。本文通过建立锂电池储电量与锂消费对应关系, 利用新能源汽车生产大数据, 测算不同类型新能源汽车、锂电池单位储电量锂消费, 并在对锂电池退役相关参数作修正的基础上, 测算了不同情景下中国新能源汽车的锂回收潜力, 结果显示:①虽然中国新能源汽车的锂回收潜力规模不大, 但增速快;②新能源汽车退役锂电池直接报废是锂回收潜力的主要来源, 退役锂电池再利用后报废产生的锂回收潜力较小;③从车辆类型看, 过去新能源客车产生的锂回收潜力最大, 未来新能源乘用车产生的锂回收潜力将最大;从锂电池类型看, 过去报废磷酸铁锂电池产生的锂回收潜力最大, 未来报废三元材料锂电池产生的锂回收潜力将最大。为确保新能源汽车锂回收由潜力变成现实, 建议加快制定强制性、差异性锂电池回收政策体系, 加快推动锂电池回收由政府推动向市场推动转变。

关键词:新能源汽车; 锂电池; 报废; 回收潜力; 情景分析; Weibull分布

DOI: 10.18402/resci.2022.01.08

1 引言

近年来, 锂电池以其高能量、高功率密度、低重量、长寿命等优点成为新能源汽车的首选电池, 新能源汽车逐渐成为锂消费主力。在其带动下, 全球锂产销量大幅增加, 根据 USGS 数据, 尽管 2019 年全球锂产量出现大幅下降, 产量仍有 7.5 亿 t, 而 2000 年全球锂产量只有 1.4 亿 t。虽然中国锂资源储量较丰富, 但开发难度大, 锂资源依然高度依赖进口^[1]。2019 年, 中国锂精矿进口 20.7 LCE 万 t, 原矿进口 0.02 LCE 万 t, 占全国锂原料供应量的近 73%^[2], 锂资源供需压力来源于近年快速发展的新能源汽车产业。中国汽车工业协会提供的数据显示, 2019 年中国新能源汽车产量已达到 124.2 万辆。随着新能源汽车生产技术不断进步、城市环境污染问题日益受到重视以及实现“碳达峰、碳中和”目标日趋紧迫, 未来中国新能源汽车将会带来规模更加庞大的锂消费, 锂资源供需压力将进一步增加。此外, 全球锂资源分布集中、储量有限、开采技术难等特

点^[3], 限制了锂资源的安全获取, 尤其原料价格的起伏变化对锂资源的获取提出了更大挑战^[4]。从报废产品中回收锂成为缓解锂供给压力的一种选择, Hanisch^[5]研究表明每 200 个 $\text{Li}(\text{NiCoMn})_{1/3}\text{O}_2$ 电池单体约含有 4 kg 锂。值得重视的是, 退役、报废锂电池如果不能及时被回收、处置和再利用, 还会对生态环境造成影响乃至破坏^[6]。目前, 中国前期推广应用的新能源汽车, 其装配的锂电池已陆续进入生命终点, 今后将有大量锂电池从新能源汽车上退役和报废。面对关键矿产资源供需、生态保护等压力, 当前亟需准确掌握新能源汽车的锂回收潜力及其变化^[7]。

国内外对退役汽车的回收管理已相对成熟, 在主要发达国家退役汽车已成为重要金属、有用物质等的重要来源。2015 年欧盟已对 95% 的退役汽车实现了回收, 美国几乎实现了所有汽车的回收, 约 86% 的回收汽车被循环再利用或用于生产能源^[8]。相比传统内燃机汽车, 锂电汽车整车报废与锂电池

收稿日期: 2021-04-25; 修订日期: 2021-06-29

基金项目: 国家社会科学基金重点项目 (20ATJ004); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20221975)。

作者简介: 郑林昌, 男, 山东阳谷人, 博士, 教授, 研究方向为资源利用、生态保护与可持续发展。E-mail: zhenglinchang@126.com

退役(报废)时间并非同步,且退役(报废)锂电池的技术处理难度更大,对环境的影响也更严重,因此新能源汽车锂电池回收再利用成为近年全球关注的重点^[9]。各国积极推进锂电池的回收、拆解和再利用^[10],加速了锂电池中锂回收的研究^[11]。其中锂物质流模型为衡量锂回收潜力提供了一个重要工具,自 Ziemann 等^[12]构建首个锂物质流模型以来,全球范围内开始利用物质流分析方法描述锂物质在不同领域的存量和流量^[13-15],锂物质流模型不仅能定量评估不同领域锂资源存量,也提供了不同产品的累计锂消费量,为测算未来锂回收潜力提供了数据基础。尽管锂物质流模型设计中有锂回收环节,但多数研究成果并未给出具体锂回收量。全生命周期分析^[16]是衡量新能源汽车锂电池回收的另外一种研究方法,但该领域研究重点在于锂回收阶段物质、能量消耗和污染物排放等^[17]。根据新能源汽车及其所装配锂电池容量大小也能对未来汽车锂回收潜力进行判断。有些研究基于样本企业、样本锂电池,对新能源汽车装配锂电池的锂消费进行了测算,如 Gaines 等^[18]测算 NCA-G 电池中的锂含量约为 $0.25 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, Elsa 等^[19]测算结果显示 LCO、NCA、NMC-111、NMC-622 和 NMC-811 电池中的锂含量分别约为 $0.113 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 、 $0.112 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 、 $0.139 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 、 $0.126 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 和 $0.111 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, Mayyas 等^[20]等测算出 NMC333^a 锂电池中的锂含量约为 $0.13 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。也有研究基于样本车辆生产数据设定锂电池锂含量,如文博杰^[21]设定一辆“特斯拉”品牌新能源汽车用锂电池的碳酸锂用量在 50~70 kg。但现实中锂电池类型多样,利用此方法很难实现总体新能源汽车锂回收潜力的测算。新能源汽车锂回收潜力测算离不开锂电池报废的测算,多数研究借鉴了传统内燃机汽车、电器报废使用的 Weibull 分布,但不同类型新能源汽车锂电池使用强度并不一样,锂电池寿命也不一样,尤其是锂电池具有特殊储电性能衰减规律,直接借鉴其他产品报废相关参数,并不能准确地测算新能源汽车的锂回收潜力。

综上所述,国内外针对新能源汽车锂电池报废

及锂含量做了大量工作,但综合考虑新能源汽车续航里程增加、锂电池生产技术进步、锂电池结构变化以及各类锂电池寿命长度不同、各类新能源汽车使用强度不同等的研究仍然欠缺。本文将综合考虑新能源汽车续航里程、锂电池结构变化和技术变化以及更加符合中国新能源汽车寿命特征参数,动态考察中国新能源汽车的锂回收潜力。本文所指的锂回收潜力是指锂电池退役后理论上可回收锂的潜力,与实际锂回收有一定差异。由于本文选择研究期限相对较短,研究仅考虑锂电池退役(报废)产生的锂回收潜力,不考虑新能源汽车报废而带来的锂回收潜力和新能源汽车更换锂电池后再次退役(报废)产生的锂回收潜力。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文新能源汽车单位车辆储电量相关数据来自 2011—2019 年《节能与新能源汽车年鉴》,新能源乘用车消费数据为中国地级市新增上缴“机动车交通事故责任强制保险”的新能源乘用车。锂资源生产数据、消费数据均来自“上海有色金属网”。《节能与新能源汽车年鉴》中部分新能源汽车产量数据缺少对应的储能数据,依据《免征车辆购置税的新能源汽车车型目录》《享受车船税减免优惠的节约能源使用新能源汽车车型目录》提供的车辆技术指标进行补充,按照年均等速变化方法对部分缺失数据进行插值。为保障统计推测的准确性,《节能与新能源汽车年鉴》中有储能数据的样本,其样本数(即年鉴中对应的含有储能数据的记录条目数)占总体样本(年鉴中记录条目数)比例小于 80%,该样本不予采用;有储能的数据,如果该数据对应的车辆规模占车辆规模比例小于 80%^①,该数据也不予采用。研究地区包括中国 31 个省(区、市)(因数据缺失,不包括港澳台地区)。

2.2 技术路线

本文研究思路如图 1 所示。①单位车辆储电量的测算与设定。首先,基于抽样推断的原理,依据处理好的样本数据推算各类型新能源汽车的单位车辆储电量,并设定未来的单位车辆储电量。然

① 比如,年鉴中纯电动乘用车车辆规模为 1000 辆,但年鉴中有储能数据的纯电动乘用车车辆数只有 500 辆,占比 50%,低于 80%,该数据不采用。

2022年1月

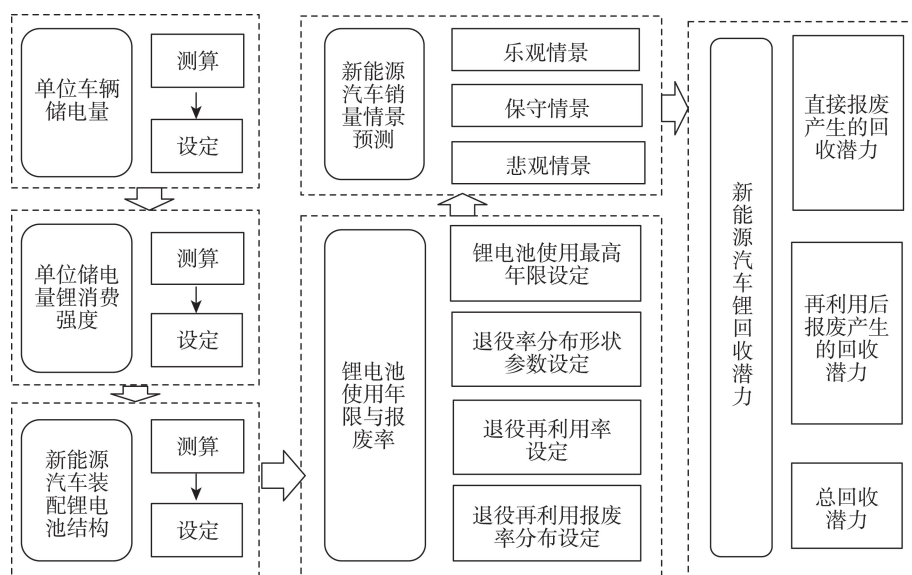


图1 研究框架图

Figure 1 Framework of research

后,根据各类型新能源汽车样本车辆占总体的比例推算各类型车辆规模,结合测算出的单位车辆储电量,按照车辆类别分别测算总储电量。②单位储电量锂消费强度的设定。依据中国锂电池总储电量及锂消费规模测算锂电池单位储电量锂消费强度,结合国外相关类型锂电池单位储电量锂消费强度,以及中国锂电池技术进步性,设定中国新能源汽车装配各类型锂电池的单位储电量锂消费强度。③新能源汽车装配锂电池结构的设定。按照磷酸铁锂技术路线、三元材料电池技术路线和锰酸锂、钴酸锂电池技术路线,对未来新能源汽车装配锂电池结构进行设定。④新能源汽车装配锂电池的退役概率、退役锂电池的再利用率的设定。测算和设定各类型新能源汽车装配锂电池的最高使用年限,设定各年度退役锂电池的再利用率。⑤新能源汽车消费规模的预测。利用相关模型对各类型新能源汽车消费规模进行预测。⑥根据新能源汽车历史销量、预测销量及相关参数的测算和设定,从不同角度测算不同时期各类型新能源汽车的锂回收潜力。

2.3 新能源汽车及其装配锂电池关键参数测算与设定

利用新能源汽车生产数据测算各类型新能源汽车的单位车辆储电量、单位储电量锂消费强度。

首先进行以下假设:各类型新能源汽车单位储电量锂消费是一样的,新能源汽车锂电池、新能源汽车、锂资源均不存在进出口,也没有库存;新能源汽车、新能源汽车锂电池、锂资源的数据统计在时间上是一致的,即锂资源开发利用后马上投入到锂电池生产,锂电池生产后即刻投入到新能源汽车生产。

2.3.1 新能源汽车单位车辆储电量测算与设定

(1) 单位车辆储电量的测算

根据新能源汽车及其装配锂电池数据测算出各类型新能源汽车的平均储电量,结果显示:纯电动客车的单位车辆储电量明显高于其他类型车辆,其后单位车辆储电量大小依次是纯电动专用车、乘用车和插电式混合动力客车,2019年平均每辆纯电动客车、专用车、乘用车和插电式混合动力客车、乘用车的储电量分别为 $194.61 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 、 $74.61 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 、 $47.15 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 和 $46.45 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 、 $13.67 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。动态变化看,纯电动客车的单位车辆储电量总体“先下降后上升”;电动乘用车的单位车辆储电量总体增加,纯电动专用车和插电式混合动力客车的单位车辆储电量总体增加,插电式混合动力乘用车的单位车辆储电量相对稳定(图2)。

(2) 单位车辆储电量的设定

依据中国新能源汽车补贴政策变化以及未来发展趋势,设定2023年、2025年纯电动乘用车续驶

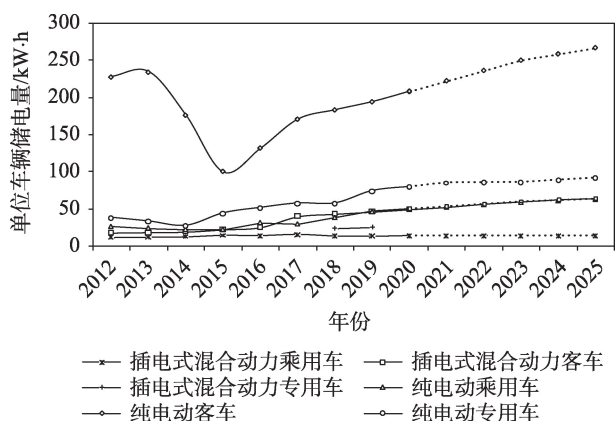


图2 2012—2025年新能源汽车的单位车辆储电量

Figure 2 Unit vehicle power storage capacity of new energy vehicles, 2012-2025

里程平均达到450 km和480 km。以2019年纯电动乘用车的单位车辆储电量测算结果为基准,根据2021年纯电动乘用车续驶里程补贴标准(400 km)和上述设定的2023年、2025年续驶里程,按照2019年续驶里程补贴标准(350 km)与设定续驶里程的比例,对2021年、2023年和2025年单位车辆储电量进行设定,同时按照年均等速变化的方法,对2020年、2022年、2024年纯电动乘用车的单位车辆储电量进行插值。

各类型新能源汽车的单位车辆储电量测算结果显示,2015—2019年插电式混合动力客车、纯电动客车、纯电动乘用车的单位车辆储电量有同等比例增长的特征。为此,假设未来3类车型的单位车辆储电量仍保持此特征,依据纯电动乘用车单位车辆储电量的设定结果,设定插电式混合动力客车、纯电动客车的单位车辆储电量。相比而言,纯电动专用车的单位车辆储电量增长速度较慢,同样参照纯电动乘用车的单位车辆储电量设定方法对纯电动专用车的单位车辆储电量进行设定,增速相比纯电动乘用车要慢,2023年和2025年按照纯电动乘用车单位车辆储电量增速的0.9倍处理。由于插电式混合动力乘用车对续驶里程要求并不高,根据2015—2019年插电式混合动力乘用车单位车辆储电量的均值来设定2020—2025年单位车辆储电量。未来插电式混合动力专用车将逐步退出市场,不再设定该类型新能源汽车的单位车辆储电量。2012—2025年,各类型新能源汽车的单位车辆储电

量的历史值和设定值如图2。

2.3.2 设定新能源汽车装配锂电池的单位储电量锂消费强度

(1)锂电池行业的单位储电量锂消费强度。根据锂电池总储电量和锂电池行业对锂的总需求量,测算锂电池总体的单位储电量锂消费强度。测算结果显示:锂电池单位储电量的锂消费强度由2014年的0.1662 kg/(kW·h)逐步下降到2019年的0.1463 kg/(kW·h)。中国生产的锂电池大部分被应用于新能源汽车领域,且应用于各领域(如3C、储能领域)锂电池的生产技术并没有太大差别,为此假设新能源汽车上锂电池总体的单位储电量锂消费强度与锂电池行业的单位储电量锂消费强度大小相等。依据新能源汽车上锂电池的总储电量和单位储电量锂消费强度,可测算新能源汽车上锂电池的锂消费规模。

(2)锂电池的单位储电量锂消费强度的参考。目前,Gaines研究团队研究成果被广泛采用,本文利用Gaines^[18]研究成果中提供的数据测算锂电池的单位储电量锂消费强度,结果显示:钴酸锂电池、三元材料电池和磷酸铁锂电池的单位储电量锂消费强度分别为0.4227 kg/(kW·h)、0.2463 kg/(kW·h)和0.1560 kg/(kW·h)。Gaines等^[22]的研究成果还表明锰酸锂、钴酸锂电池正极材料的单位储电量锂消费强度相差并不大。考虑到锰酸锂、钴酸锂电池在新能源汽车领域应用规模亦不大,本文将锰酸锂电池和钴酸锂电池作为一类锂电池处理。

(3)新能源汽车装配各类型锂电池的单位储电量锂消费强度的设定。综合考虑中国未来锂电池生产技术的进步空间、单位储电量锂消费强度的提升空间等,参考上述国外3类锂电池单位储电量锂消费强度、中国锂电池单位储电量锂消费强度的测算结果,对磷酸铁锂电池、三元材料电池和锰酸锂、钴酸锂电池的单位储电量锂消费强度进行设定。同时,基于结构分解原理(将新能源汽车锂消费量分解到装配各类型锂电池新能源汽车上),依据新能源汽车上不同类型锂电池储电量及单位储电量锂消费强度的设定测算总体锂消费量,并与上述第一步测算的新能源汽车总体锂消费量进行对比,根据对比结果对各类型锂电池单位储电量锂消费强度设定值进行调整,一直调整到两类测算结果相等^[23]。

2022年1月

中国新能源汽车发展之初,锂电池生产技术与国外有一定差距,此期间新能源汽车上锂电池的单位储电量锂消费强度采用基于 Gaines 等^[18]研究成果的测算结果。2012—2014年,新能源汽车装配磷酸铁锂电池的单位储电量锂消费强度设定为 0.1560 kg/(kW·h),2017年、2018年和2019年的单位储电量锂消费强度分别按照2014年的85%、83%和0.81%处理。考虑三元材料电池技术进步相对较快,2012—2013年三元材料电池的单位储电量锂消费强度设定为 0.246 kg/(kW·h),2014年三元材料电池的单位储电量锂消费强度设定为2013年消费强度的0.95倍,2017年、2018年和2019年分别按照2014年的0.70倍、0.64倍、0.63倍处理。各年度锰酸锂、钴酸锂电池的单位储电量锂消费强度按照三元材料电池的1.2倍进行处理。2019—2025年,磷酸铁锂电池、三元材料电池和锰酸锂、钴酸锂电池的单位储电量锂消费强度,按照年均1%的递减速度处理。2015年和2016年,磷酸铁锂电池、三元材料电池和锰酸锂、钴酸锂电池的单位储电量锂消费强度进行插值处理。2012—2025年,磷酸铁锂电池、三元材料电池和锰酸锂、钴酸锂电池的单位储电量锂消费强度详见表1。

2.3.3 新能源汽车装配锂电池结构

近年来,中国新能源汽车装配锂电池经历了由

表1 2012—2025年锂电池的单位储电量锂消费强度

Table 1 Lithium consumption intensity of lithium batteries per unit storage capacity, 2012-2025

年份	磷酸铁锂电池 /(kg/(kW·h))	三元材料电池 /(kg/(kW·h))	锰酸锂、钴酸锂电池 /(kg/(kW·h))
2012	0.1560	0.2460	0.2950
2013	0.1560	0.2460	0.2950
2014	0.1560	0.2337	0.2804
2015	0.1482	0.2132	0.2558
2016	0.1404	0.1927	0.2312
2017	0.1326	0.1722	0.2066
2018	0.1295	0.1574	0.1889
2019	0.1264	0.1550	0.1860
2020	0.1248	0.1525	0.1830
2021	0.1232	0.1501	0.1801
2022	0.1217	0.1476	0.1771
2023	0.1201	0.1451	0.1742
2024	0.1186	0.1427	0.1712
2025	0.1170	0.1402	0.1683

以磷酸铁锂电池为主向三元材料电池为主的转变过程,装配锰酸锂电池和钴酸锂电池占比较低,未来向三元材料电池继续转变的可能性仍很大。依据2017—2019年装配各类锂电池新能源汽车数量及其所占比例,对2025年装配各类锂电池新能源汽车所占总体比例进行设定。2025年全部插电式混合动力乘用车、专用车和纯电动乘用车装配锂电池为三元材料电池;全部纯电动客车装配电池为磷酸铁锂电池;80%的纯电动专用车装配磷酸铁锂电池,剩余20%装配三元材料电池;50%的插电式混合动力客车装配锰酸锂电池,剩余20%和30%分别装配磷酸铁锂电池和钴酸锂电池。按照年均递增(减)方法对2020—2024年装配不同类型锂电池的各类新能源汽车车辆规模所占总体比例进行插值处理,具体详见表2。

2.4 新能源汽车锂电池退役率分布、参数设定

2.4.1 退役率分布

随着新能源汽车的使用,其装配的锂电池使用强度相应增加,锂电池性能也会相应下降。但锂电池性能并非以线性速度下降,越是接近退役终点,性能下降速度越快^[24,25]。由于Weibull分布函数能够通过改变相应参数来改变分布函数的形状,且该函数已在汽车报废、新能源汽车报废以及其他相关领域报废测算得到成功应用,本文采用Weibull分布函数对新能源汽车锂回收潜力进行测算。Weibull分布是设备寿命可靠性分析中最常用的分布,其中三参数Weibull分布比较完善。若随机变量 t 服从三参数Weibull分布,其概率密度函数 $f(t)$ 和分布函数 $F(t)$ 可以表示为:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\mu}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t-\mu}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad t \geq \mu \quad (1)$$

$$F(t) = P(T \leq t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t-\mu}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad t \geq \mu \quad (2)$$

式中: t 、 T 为设备使用时间、寿命时间, α 、 β 、 μ 分别为尺度参数、形状参数、位置参数。

$\beta > 0$ 影响分布曲线的形状变化,当 $\beta < 1$ 时,函数呈倒J形分布,当 $1 < \beta < 3.6$ 时,函数呈正偏山状分布,当 $\beta > 3.6$ 时,函数为负偏山状分布; $\alpha > 0$ 决定横坐标尺度的大小,不影响曲线的形状; $\mu > 0$ 决定曲线的起始位置。考虑到新能源汽车动力电池存在因意外情况使用时间不到1年就报废的可能,

表2 2017—2025年新能源汽车装配各类型锂电池的比例(%)

Table 2 Proportion of new energy vehicles equipped with various types of lithium batteries, 2017-2025 (%)

车辆类型	电池类型	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年
插电式混合动力乘用车	三元材料电池	93.86	98.82	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	磷酸铁锂电池	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	锰酸锂电池	0.00	1.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
插电式混合动力客车	磷酸铁锂电池	29.42	24.38	20.57	20.48	20.38	20.29	20.19	20.10	20.00
	锰酸锂电池	70.57	75.62	61.38	59.48	57.59	55.69	53.79	51.90	50.00
	钴酸锂电池	0.00	0.00	18.05	20.04	22.03	24.02	26.02	28.01	30.00
插电式混合动力专用车	三元材料电池	0.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
纯电动乘用车	磷酸铁锂电池	17.79	13.09	6.45	5.37	4.30	3.22	2.15	1.07	0.00
	三元材料电池	80.29	86.89	93.52	94.60	95.68	96.76	97.84	98.92	100.00
纯电动客车	磷酸铁锂电池	89.37	89.09	93.00	94.17	95.33	96.50	97.67	98.83	100.00
	锰酸锂电池	3.44	4.43	2.36	1.97	1.57	1.18	0.79	0.39	0.00
	钴酸锂电池	6.70	6.48	4.64	3.86	3.09	2.32	1.55	0.77	0.00
纯电动专用车	磷酸铁锂电池	25.15	39.94	70.90	72.41	73.93	75.45	76.97	78.48	80.00
	锰酸锂电池	5.72	6.19	2.05	1.70	1.36	1.02	0.68	0.34	0.00
	三元材料电池	69.12	53.87	27.06	25.88	24.71	23.53	22.35	21.18	20.00

取 $\mu=0$, 三参数 Weibull 分布转化为二参数 Weibull 分布。概率密度函数 $f(t)$ 和分布函数 $F(t)$ 可表示为:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (3)$$

$$F(t) = P(T \leq t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^{\beta} \right] \quad (4)$$

若设定 t_{\max} 为最长动力电池报废时间, t_{ave} 为动力电池平均使用寿命, 对应 Weibull 分布密度函数曲线的中值, 则有:

$$\left(\frac{t_{\text{ave}}}{t_{\max}} \right)^{\beta} = \frac{\beta - 1}{-\beta \cdot \ln 0.01} \quad (5)$$

$$\alpha = t_{\text{ave}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\beta} \right)^{-\frac{1}{\beta}} \quad (6)$$

2.4.2 新能源汽车锂电池使用年限

从个体看, 在不同使用方式、使用环境下, 新能源汽车装配锂电池的使用寿命不同^[26]。如果从整体看, 考察新能源汽车装配锂电池的使用寿命, 可以排除使用方式、使用环境等影响, 但仍需要考虑以下因素。第一, 不同类型锂电池的技术性能不同。目前, 三元材料电池的循环次数在 800 次左右, 磷酸铁锂电池的循环次数在 2000 次左右^[27], 锰酸锂电池的循环次数在 300~700 次, 钴酸锂电池的循环次数在 500~1000 次, 设定三元材料电池、磷酸铁锂电池、

锰酸锂电池和钴酸锂电池的循环次数分别为 800 次、2000 次、600 次和 800 次。第二, 不同类型新能源汽车锂电池的使用强度不同。中国新能源汽车消费受政策引导较强, 前期新能源汽车在公交、出租、租赁等领域消费量较大, 客车多用于城市公交、旅游大巴等, 专用车多用于短途货运、城市环卫等, 部分新能源乘用车用于公务车、租赁车、网约车等。城市公交、客运、环卫等用途的新能源汽车以及网约车充电较频繁, 每周充电次数约 7 次, 新能源乘用车私人用户每周充电次数 1~2 次^[28,29], 设定新能源乘用车、客车和专用车的电池频率为 5 天/次、7 次/周和 5 次/周。第三, 新能源汽车装配锂电池的容量逐渐增加。2014 年中国平均每辆新能源汽车储电量 43 kW·h, 到 2019 年增加到 52 kW·h, 电池容量的增加能够减少充电循环、充电次数以及延长电池使用寿命, 但延长幅度有限。第四, 从其他产品生命周期看, 强制性淘汰政策是产品使用寿命必须考虑的重要因素, 但从技术发展趋势看, 未来一段时间新能源汽车装配锂电池使用寿命大概率不会超过车辆使用寿命, 且针对锂电池强制性报废政策仍不明朗, 本文不再考虑强制性车辆报废等政策的影响。为此, 首先根据设定的不同类型锂电池的循环次数、不同类型新能源汽车锂电池充电次数, 测

2022年1月

算不同类型新能源汽车的理论使用年限。然后,参考现有研究成果^[30-34]、技术标准以及技术进步、消费升级对乘用车消费者使用信心的影响等,设定新能源乘用车、客车和专用车动力电池的退役最高年限(表3)。

2.4.3 锂电池退役率

国内外研究表明,锂电池的性能非线性下降,后期电池性能以指数形式快速下降^[35,36],这决定了锂电池退役概率在前期和后期并不对称,退役概率最大值应接近生命终点。在缺失使用寿命数据的情况下,参考相关文献和经验值,对分布形状参数进行假定,设定 $t_{\max}=1.3t_{\text{ave}}$ 。新能源汽车锂电池退役时间概率分布见表4所示,随着锂电池寿命长度的增加,锂电池在使用前期和后期的报废概率越来越低。

2.4.4 退役锂电池再利用率、报废概率

2018年之后,新能源汽车部分退役锂电池会有一定比例再利用,开始时这个比例并不大,但会随时间和技术进步而有所提高,设定2019年新能源汽车退役锂电池再利用比例为5%,此后以每年5%

的速度递增,到2025年新能源汽车退役的锂电池将有35%左右被再利用(表4)。当前无法准确掌握这些锂电池再利用及其生命变化,对退役锂电池再利用报废分布进行经验性的设定,设定再利用最高寿命为5年, $t_{\max}=1.3t_{\text{ave}}$,可以得到各年度报废概率(表5)。

3 新能源汽车销量的情景预测

3.1 情景设定

近年来,新能源汽车在全球范围内被快速推广应用,伴随其关键核心技术的研发与应用,未来新能源汽车发展存在很大变数。为此,本文设定新能源汽车3种消费情景:乐观消费情景、保守消费情景和悲观消费情景。新能源汽车消费量(下文以销量替代)预测期限到2025年^②。

3.2 销量情景预测

(1)乘用车

乐观消费情景下,新能源乘用车销量将继续保持历史发展趋势。为此,基于2010—2019年新能源乘用车销量历史数据,采用趋势外推法预测未来新能源乘用车、纯电动乘用车的销量。考虑插电式混

表3 各类新能源汽车装配锂电池使用寿命的设定

Table 3 Lithium-ion battery's designated service life for various types of new energy vehicles

车辆类型	装配电池类型	循环次数/次	理论年限/年	设定年期		
				2012—2018年	2019—2020年	2021—2025年
乘用车	三元材料电池	800	10.96	8	9	10
	磷酸铁锂电池	2000	27.40	10	11	12
	锰酸锂电池	600	8.22	6	7	8
	钴酸锂电池	800	10.96	9	10	11
客车	三元材料电池	800	2.19	3	3	3
	磷酸铁锂电池	2000	5.48	5	6	6
	锰酸锂电池	600	1.64	2	2	2
	钴酸锂电池	800	2.19	2	2	2
专用车	三元材料电池	800	3.07	3	3	3
	磷酸铁锂电池	2000	7.67	5	6	7
	锰酸锂电池	600	2.30	2	2	2
	钴酸锂电池	800	3.07	3	3	3

表4 2019—2025年新能源汽车退役锂电池再利用比例

Table 4 Reuse ratio of retired lithium batteries for new energy vehicles, 2019-2025

年份	2019年	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年
再利用率/%	5	10	15	20	25	30	35

② 不再对燃料电池新能源汽车产量进行预测。

表5 不同使用年限锂电池的报废概率

Table 5 Scrap probability of lithium batteries with different service life

	12年	11年	10年	9年	8年	7年	6年	5年	3年	2年
1年	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.027	0.680
2年	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.005	0.012	0.039	0.862	0.320
3年	0.001	0.002	0.004	0.008	0.018	0.041	0.106	0.307	0.111	
4年	0.006	0.011	0.020	0.039	0.080	0.178	0.386	0.594		
5年	0.021	0.036	0.064	0.121	0.230	0.401	0.446	0.060		
6年	0.054	0.090	0.155	0.259	0.377	0.333	0.050			
7年	0.114	0.179	0.268	0.338	0.256	0.042				
8年	0.194	0.264	0.296	0.202	0.037					
9年	0.251	0.257	0.163	0.033						
10年	0.222	0.134	0.030							
11年	0.112	0.027								
12年	0.025									

合动力乘用车历史数据起伏变化较大,且数据期限相对较短,难以基于数据变化规律进行预测,选择新能源乘用车与纯电动乘用车销量预测的差额为插电式混合动力乘用车的销量。对比相关预测方法,选择多项式预测方法预测新能源乘用车、纯电动乘用车的销量(拟合度为0.9664、0.9718),新能源乘用车和纯电动乘用车销量预测模型如式(7)、(8)。

$$y^{\text{EPV}} = 19434t^2 - 102117t + 101776 \quad (7)$$

$$y^{\text{PEPV}} = 14359t^2 - 71136t + 66869 \quad (8)$$

式中: y^{EPV} 、 y^{PEPV} 分别为新能源乘用车、纯电动乘用车的销量; t 为年度,2010年取值为1,2011—2019年分别取值为2~10。

保守消费情景下,中国新能源乘用车的销量达到《新能源汽车发展规划(2021—2035年)》目标:2025年新能源汽车新车销量占汽车新车销量的比例在25%左右,新能源乘用车是新能源汽车的绝对主力,2025年新能源乘用车销量占乘用车销量的25%。悲观消费情景下,受国际形势、新冠疫情、补贴政策变化等影响,新能源乘用车销量仅占乘用车销量的20%,不能达到规划目标。“乘用车产销量”用“新注册民用小型载客汽车拥有量”代替,选择BASS扩散模型,基于2002—2019年民用小型载客汽车拥有量数据,预测2020—2025年民用小型载客汽车拥有量,预测公式如式(9)。

$$y^{\text{PM}} = 31318.64 \left[\frac{1 - e^{-0.259t}}{1 + 53.754e^{-0.259t}} \right] \quad (9)$$

式中: y^{PM} 为民用小型载客汽车拥有量。

依据乘用车销量预测值和新能源乘用车销量占乘用车销量的比例,可测算出保守消费情景和悲观消费情景下的新能源乘用车销量,其中纯电动乘用车、插电式混合动力乘用车的销量参照乐观消费情景下的车辆结构占比进行处理。

(2) 客车

新能源客车主要在中国重点区域、重点城市推广应用,其中城市公交车是新能源客车主要领域,2019年销售的新能源客车有94%是城市公交车。新能源客车在重点地区、城市和领域已经接近饱和,未来新能源客车发展空间将逐渐变小。虽然有少量进口新能源客车也在中国推广,但仍以国产新能源客车为主,因此用新能源客车产量替代销量。根据城市公交车保有量发展趋势和新能源客车累计销量(保有量)占城市公交车保有量的比重,测算未来新能源客车的销量。2010—2018年,中国城市公交车保有量呈线性增长态势,选择线性预测方法对城市公交车保有量进行预测(拟合度0.99),如式(10)。

$$y^{\text{CB}} = 3.2033t + 38.239 \quad (10)$$

式中: y^{CB} 为城市公交车保有量。

乐观、保守和悲观消费情景下,2025年城市公交车保有量的100%、95%和90%是新能源城市公交车,新能源城市公交车保有量占新能源客车保有量的比例分别为90%、94%和94%。根据式(10)和上

2022年1月

述设定比例可测算出2025年中国新能源客车的销量。基于年均递增(减)的方法对2020—2024年新能源客车的销量进行插值处理。

未来插电式混合动力客车将逐步退出市场,设定2025年插电式混合动力客车销量为0,2020—2024年插电式混合动力客车销量按照年均递减方法进行插值处理(图3)。

(3) 专用车

中国新能源专用车主要应用于城市物流、环卫等领域,2019年城市物流车占新能源专用车的比例超过80%。目前,中国推广应用的新能源专用车基本来自国产,为此利用新能源专用车产量代替销

量。受补贴政策变化影响,近年新能源专用车产销量连续大幅下滑(2018年、2019年)。未来新能源专用车将面临新能源汽车补贴政策取消、淘汰国三及其以下标准柴油货车、新能源物流车路权等变化及其带来的影响。乐观消费情景下,新能源汽车有利影响将全面释放,2020—2025年新能源专用车销量以年均20%的速度增长。保守消费情景下,补贴政策的变化对新能源专用车销量仍有一定消极影响,后期其他利好政策会抵消补贴政策取消的影响,2020—2025年新能源专用车销量以年均10%的速度增长。悲观消费情景下,2020—2022年新能源专用车销量以年均10%的速度增长,2023年新能源汽

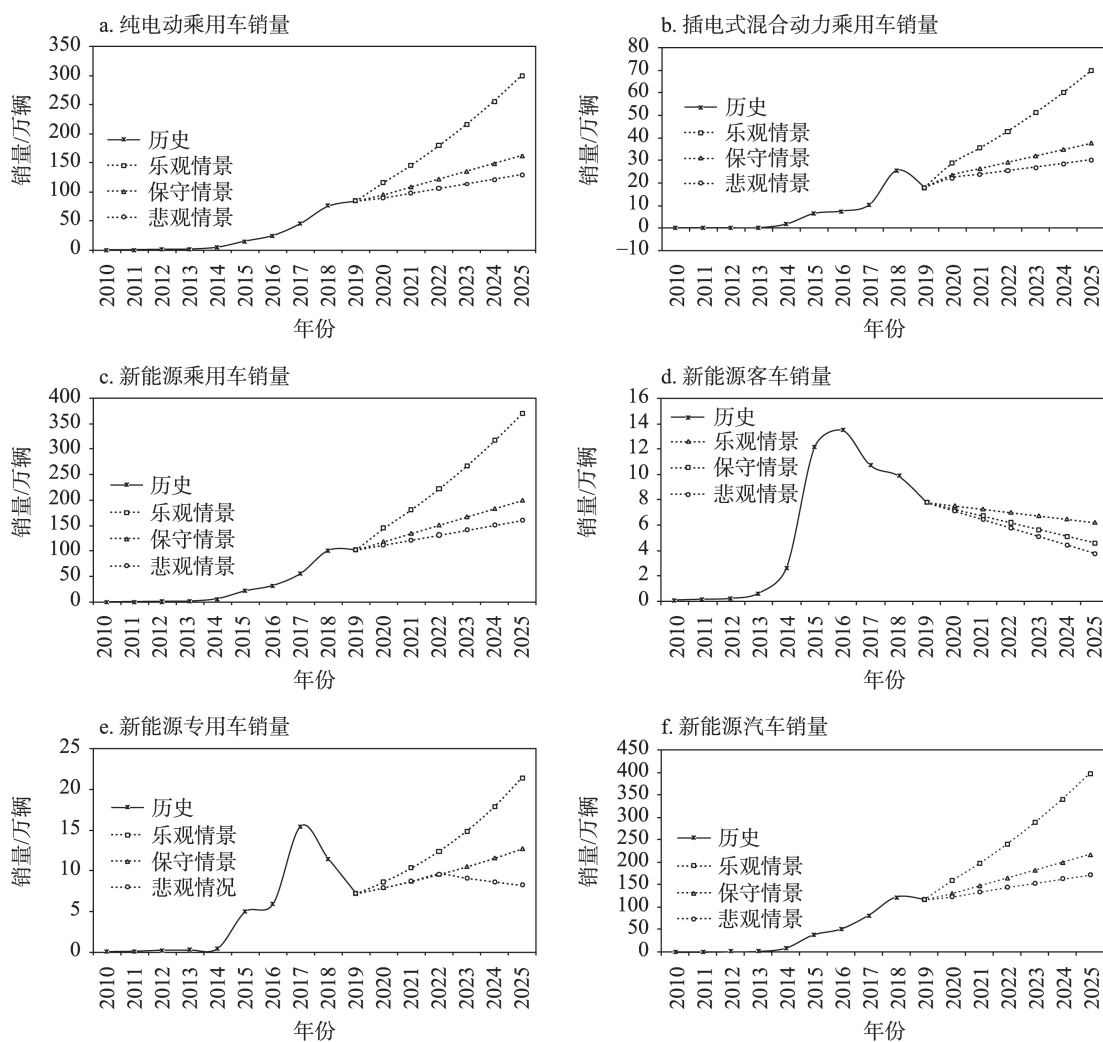


图3 2020—2025年3种消费情景下中国新能源汽车的销量

Figure 3 Forecast of new energy vehicle sales under three scenarios in China, 2020-2025

注:新能源乘用车销量(c)=纯电动乘用车销量(a)+插电式混合动力乘用车销量(b);新能源汽车销量(f)=新能源乘用车销量(c)+新能源客车销量(d)+新能源专用车销量(e)。

车补贴政策的退出对新能源专用车销量会产生一定冲击,2020—2025年新能源专用车销量以年均5%的速度下降。由于插电式混合动力专用车销量很小,本文预测过程中不再考虑插电式混合动力专用车。

根据测算,乐观、保守和悲观消费情景下,2025年中国新能源汽车销量将分别达到398万辆、217万辆和172万辆,分别是2019年销量的3.40倍、1.86倍和1.47倍(图3f)。

4 结果与分析

根据上述新能源汽车消费情景预测结果、装配锂电池储电量、单位储电量锂消费强度和装配不同锂电池各类型新能源汽车使用年限、退役率、退役再使用率等参数的设定,可估算出不同消费情景下新能源汽车的锂回收潜力。由于部分类型新能源汽车装配锂电池退役年限较长,到2025年3种消费情景下锂回收潜力显示不出明显差别,考虑2025年后锂电池退役最快也要有2年时间,将预测期限延长到2027年^③。

4.1 直接报废产生的锂回收潜力

4.1.1 历史回收潜力

2013—2019年,新能源汽车锂电池直接报废产生的锂回收潜力快速增长,到2019年锂回收潜力已超过3000 t。新能源客车和新能源专用车装配的锂电池退役较早,所以锂回收潜力产生的也早,2019年新能源客车和新能源专用车锂电池直接报废产生的锂回收潜力分别约为1830 t、1150 t,分别占总体的60.00%和37.00%,其中纯电动客车、纯电动专用车的锂回收潜力分别占总体的57.00%和37.00%(图4b、4d、4f、5b、5d、5f)。退役锂电池主要是磷酸铁锂电池和三元材料电池,2019年新能源汽车退役的磷酸铁锂电池、三元材料电池直接报废产生的锂回收潜力分别占总体的52.00%和32.00%,锰酸锂、钴酸锂电池直接报废产生的锂回收潜力不到总体的16.00%。2013—2019年,新能源汽车退役锂电池直接报废累计产生的锂回收潜力近6000 t,其中新能源客车、新能源专用车和新能源乘用车分别贡献了约3890 t、1960 t和120 t;磷酸铁锂电池、锰酸锂(钴

酸锂)电池、三元材料电池分别贡献了约2700 t、1580 t和1680 t(图4a、4c、4e、5a、5c、5e)。

4.1.2 未来回收潜力

随着前期新能源客车、专用车锂电池退役高潮过去,未来新能源汽车退役锂电池直接报废产生的锂回收潜力增长有所下降,到2027年,乐观、保守和悲观消费情景下,新能源汽车退役锂电池直接报废产生的锂回收潜力将分别达到5745 t、4597 t和4227 t,分别是2019年锂回收潜力的1.87倍、1.50倍和1.38倍,2019—2027年3种消费情景下的锂回收潜力年均增速分别为8.16%、5.18%和4.09%。

(1)按新能源汽车类型

新能源乘用车退役锂电池直接报废产生的锂回收潜力将持续快速增长,逐渐成为锂回收潜力的最大来源车型。2027年,乐观、保守和悲观情景下,新能源乘用车退役锂电池直接报废产生的锂回收潜力分别有3888 t、3129 t和2919 t,均占新能源汽车总体的68%左右,锂回收潜力主要是由纯电动乘用车退役下的锂电池贡献;2019—2027年,乐观、保守和悲观消费情景下,锂回收潜力年均增速分别为60.69%、56.38%和55.03%。新能源客车退役锂电池直接报废产生的锂回收潜力次之,3种消费情景下锂回收潜力均占新能源汽车总体的19%左右,锂回收潜力几乎全部是由纯电动客车退役的锂电池贡献的;2019—2027年乐观、保守和悲观情景下,锂回收潜力年均分别下降6.77%、8.56%和9.64%。新能源专用车退役锂电池直接报废产生的锂回收潜力最少,2027年乐观、保守和悲观情景下,新能源专用车退役锂电池直接报废产生的锂回收潜力,分别占新能源汽车总体的14.10%、12.44%和11.68%;乐观、保守和悲观情景下,2019—2027年锂回收潜力年均分别下降4.26%、8.34%和10.01%(图5b、5d、5f、6b、6d、6f)。

(2)按锂电池类型

乐观、保守和悲观消费情景下,2027年新能源汽车退役下的三元材料电池直接报废产生的锂回收潜力将分别达到4243 t、3177 t和2910 t,分别是2019年锂回收潜力的4.07倍、3.20倍和2.93倍,分

③ 篇幅所限,下文不再分析各类新能源汽车锂回收潜力的锂电池类型分布情况、各类锂电池锂回收潜力的汽车类型分布情况。

2022年1月

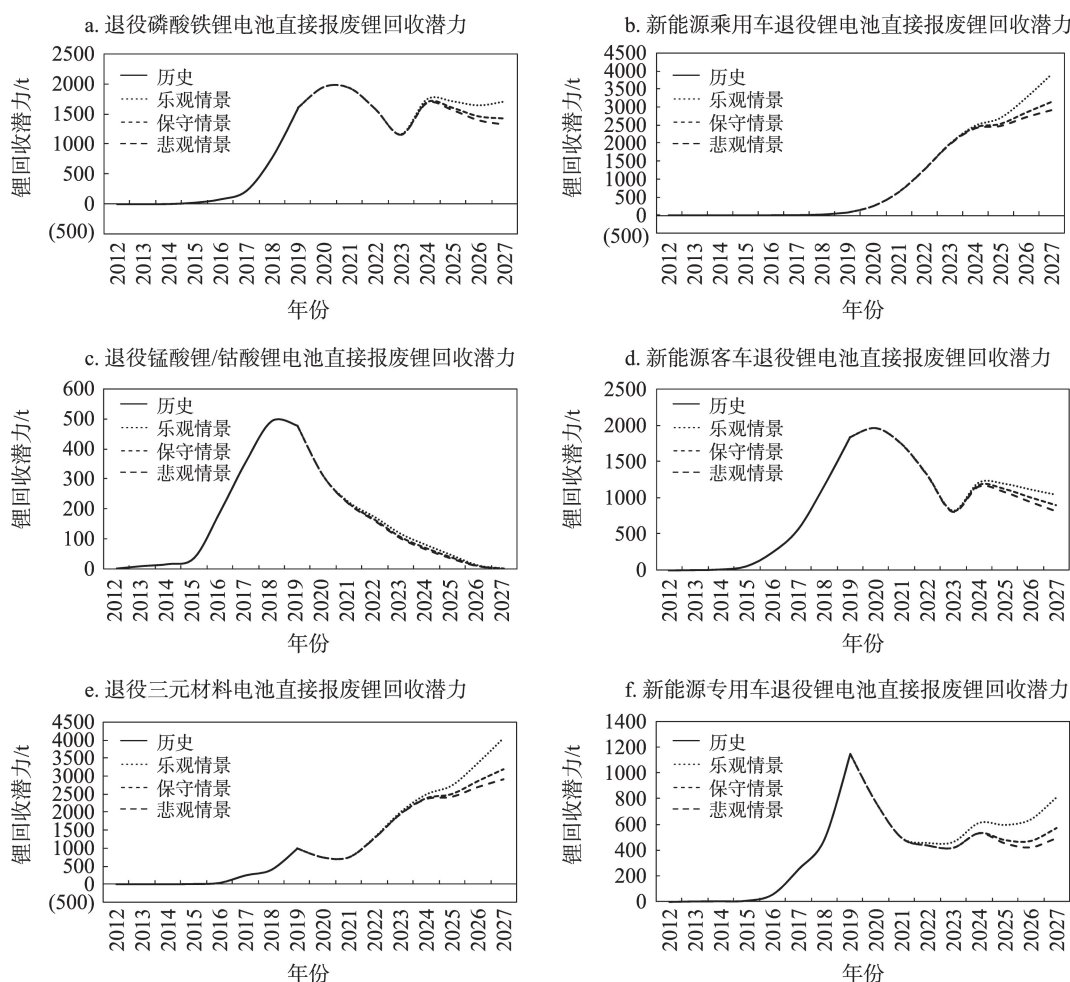


图4 2012—2027年中国新能源汽车退役锂电池直接报废产生的锂回收潜力

Figure 4 Lithium recovery potential resulting from direct scrapping of retired lithium batteries from new energy vehicles in China, 2012-2027

别占新能源汽车总体的70.37%、69.11%和68.83%。退役的三元材料电池直接报废产生的锂回收潜力有所增长,2019—2027年锂回收潜力年均增速分别为19.19%(乐观消费情景)、15.65%(保守消费情景)和14.38%(悲观消费情景)。2027年,乐观、保守和悲观消费情景下,新能源汽车退役下的磷酸铁锂电池,直接报废产生的锂回收潜力将分别达到1701 t、1419 t和1317 t,分别占新能源汽车总体的29.61%、30.87%和31.16%。退役下的锰酸锂、钴酸锂电池直接报废产生的锂回收潜力很少,且一直下降(图5a、5c、5e、6a、6c、6e)。

4.2 再利用后的锂回收潜力

由于设定2018年之后新能源汽车才有部分退役锂电池被回收再利用,2018年能够回收再利用的锂电池最快也要到2020年后才能报废,故测算的退

役锂电池再利用后产生的锂回收潜力将起始于2020年。相比直接报废产生的锂回收潜力,新能源汽车退役锂电池回收再利用后报废产生的锂回收潜力要少。2027年,乐观、保守和悲观消费情景下,新能源汽车退役锂电池回收再利用后直接报废产生的锂回收潜力均为1300 t左右。由于今后将有越来越多的退役锂电池能够被回收再利用,所以回收再利用后报废产生的锂回收潜力增速非常快,3种消费情景下,2019—2027年新能源汽车退役锂电池再利用后报废产生的锂回收潜力年均增速均超过了260%,这么快的增速与2019年新能源汽车退役锂电池再利用后报废产生的锂回收潜力规模很小有关。

(1) 按新能源汽车类型

新能源乘用车退役锂电池回收再利用后报废

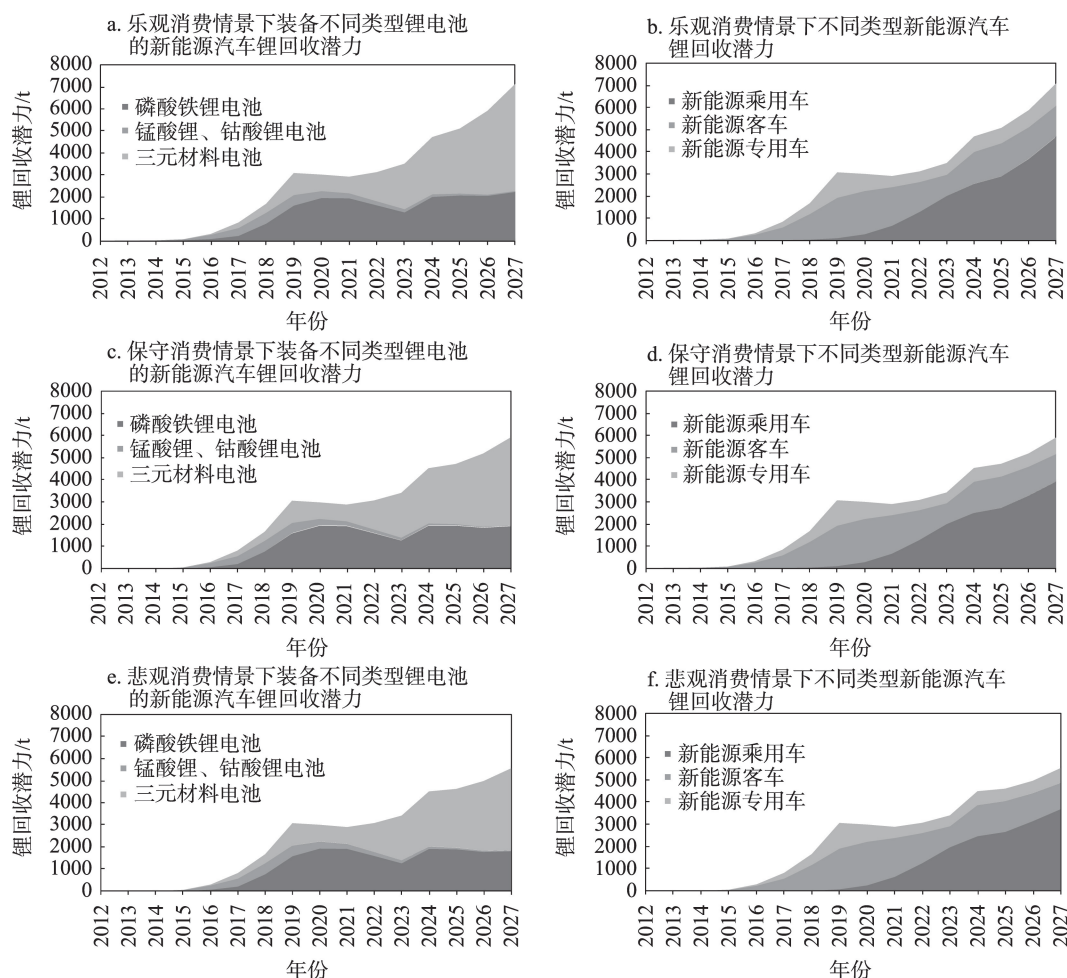


图5 2012—2027年按装配不同类型锂电池、汽车类型分新能源汽车的锂回收潜力

Figure 5 Lithium recovery potential of new energy vehicles of different types of vehicles and the types of lithium batteries in China, 2012-2027

产生的锂回收潜力较多。3种消费情景下,2027年新能源乘用车退役锂电池回收再利用后直接报废产生的锂回收潜力均接近800 t,占新能源汽车总体的60%左右;3种消费情景下,2019—2027年锂回收潜力年均增速均超过450%。新能源客车退役锂电池回收再利用后报废产生的锂回收潜力在350~370 t,占新能源汽车总体的27%左右;3种消费情景下,2019—2027年锂回收潜力年均增速均超过220%。新能源专用车退役锂电池回收再利用后报废产生的锂回收潜力最少,但锂回收潜力年均增速也会很快(图5b、5d、5f、6b、6d、6f)。

(2)按锂电池类型

新能源汽车退役锂电池再利用后直接报废产生的锂回收潜力,主要是由三元材料电池和磷酸铁

锂电池贡献的。2027年,乐观、保守和悲观消费情景下,退役的三元材料电池再利用后报废产生的锂回收潜力在770~800 t,占新能源汽车总体的59%;3种消费情景下,2020—2027年锂回收潜力年均增速均超过290%。退役的磷酸铁锂电池再利用后报废产生的锂回收潜力均为500 t左右,均占新能源汽车总体的39%;3种消费情景下,2020—2027年锂回收潜力年均增速均超过240%。2027年,退役的锰酸锂、钴酸锂电池再利用后报废产生的锂回收潜力对整体的贡献不足3%(图5a、5c、5e、6a、6c、6e)。

4.3 总体锂回收潜力

2019年之前,新能源汽车总体锂回收潜力为退役锂电池直接报废产生的锂回收潜力,2020年开始

2022年1月

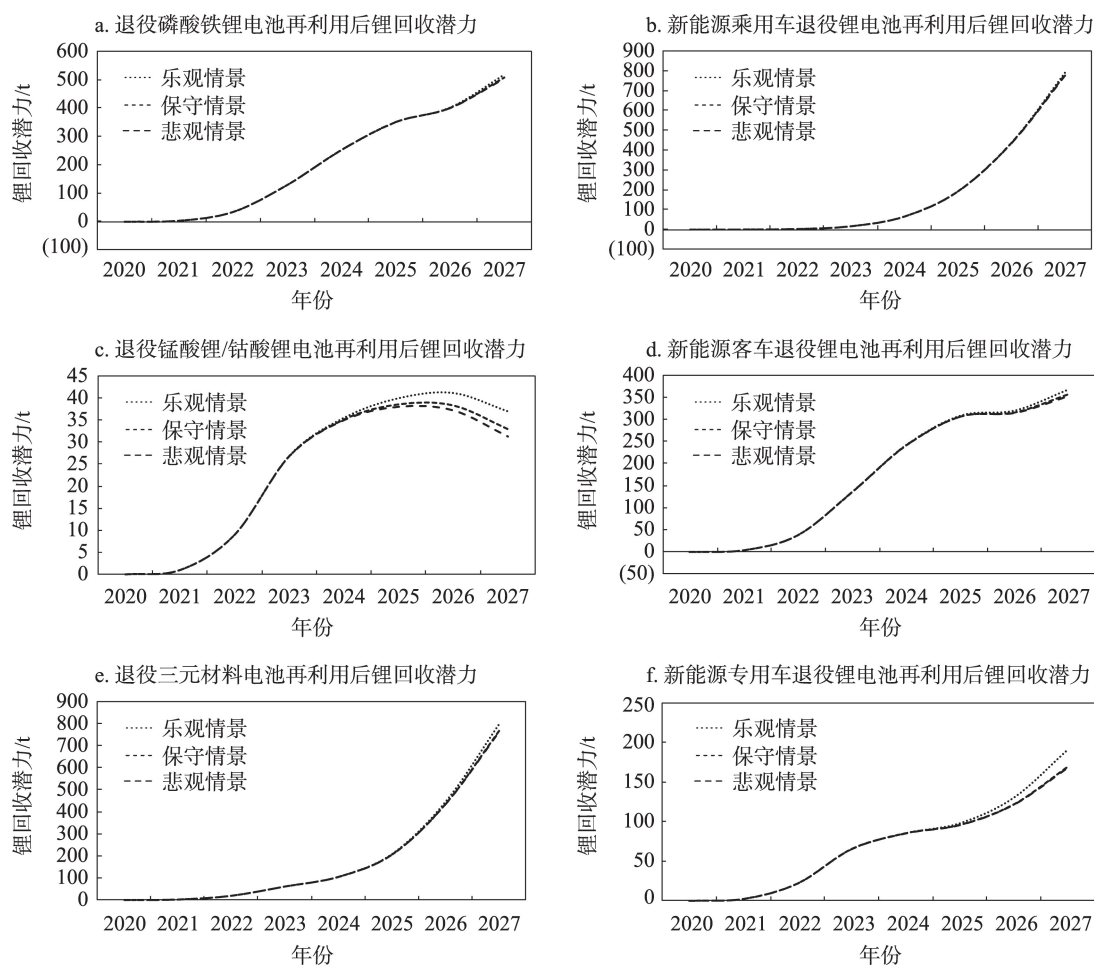


图6 2012—2027年中国新能源汽车退役锂电池再利用后产生的锂回收潜力

Figure 6 Lithium recovery potential resulting from the reuse of retired lithium batteries of new energy vehicles in China, 2012-2027

总体锂回收潜力由直接报废产生的锂回收潜力和再利用后报废产生的锂回收潜力两部分构成。乐观、保守和悲观消费情景下,2025年新能源汽车退役锂电池总体产生的锂回收潜力分别会有5084 t、4722 t和4610 t,2027年会进一步增长到7100 t、5908 t和5529 t左右。动态变化看,总体锂回收潜力会经历“快速增长—减速增长—快速增长”的变化过程。2019年之前,由于新能源客车和专用车装配的锂电池快速退役,历史锂回收潜力持续快速增长;2019—2023年,受锂电池使用年期延长、部分退役锂电池再利用等影响,总体锂回收潜力增速有所降低;2023年之后,受新能源乘用车锂电池逐渐退役、再利用退役锂电池再次报废等因素的影响,总体锂回收潜力再次加速增长。尽管如此,2019—2027年新能源汽车的总体锂回收潜力仍然有11.06%(乐观消费情景)、8.54%(保守消费情景)

和7.64%(悲观消费情景)的年均增速。

(1)按新能源汽车类型

新能源乘用车会持续快速成长为最大的锂回收潜力车型。2027年,乐观、保守和悲观消费情景下,新能源乘用车退役锂电池产生的总体锂回收潜力分别会有4683 t、3912 t和3698 t,占新能源汽车总体的66%左右,其中92%的锂回收潜力来自纯电动乘用车。2016年之前,新能源乘用车退役锂电池产生的总体锂回收潜力较少,2016年之后会快速增长,到2024年增速有所放缓。新能源客车和新能源专用车退役锂电池产生的总体锂回收潜力规模不大,但起伏变化较大。新能源客车退役锂电池产生的总体锂回收潜力从2013年开始快速增长,2020年增长到1960 t多(3种消费情景);2020年之后快速下降,下降到2023年的不足1000 t;经过2024—2025年增长到1506 t(乐观情景)、

1428 t(保守情景)和1386 t(悲观情景)后,又将下降到2027年的1415 t(乐观消费情景)、1255 t(保守消费情景)和1169 t(悲观消费情景);新能源客车退役锂电池产生的总体锂回收潜力主要是由纯电动客车贡献的。新能源专用车退役锂电池产生的总体锂回收潜力,从2013年开始一直快速增长,2019年接近1150 t;2019年后开始快速下降,下降到2022年的不足500 t;2022年之后,总体锂回收潜力将逐步增长,恢复到2027年的1002 t(乐观消费情景)、741 t(保守消费情景)和663 t(悲观消费情景)。新能源专用车退役锂电池产生的总体锂回收潜力主要是由纯电动专用车贡献的,插电式混合动力专用车的贡献非常少(图5b、5d、5f、7b、7d、7f)。

(2)按锂电池类型

2014年,新能源汽车退役的磷酸铁锂电池产生的锂回收潜力很小,后期一直增长到2020年的1940 t;之后开始下降,一直下降到2023年的1291 t(乐观消费情景)、1280 t(保守消费情景)、1276 t(悲观消费情景);2023年后再次增长,一直增长到2027年的2220 t(乐观消费情景)、1927 t(保守消费情景)和1821 t(悲观消费情景)。相比而言,新能源汽车退役的三元材料电池产生的锂回收潜力持续快速增长。2027年,乐观、保守和悲观消费情景下,退役的三元材料电池产生的锂回收潜力分别为4842 t、3948 t和3676 t,约占新能源汽车的67%;尽管2019年后锂回收潜力增速有所放缓,2019—2027年,乐观、保守和悲观消费情景下,锂回收潜力年均增速仍达到了21.90%、18.83%和17.78%。新能源汽车退役的锰酸锂、钴酸锂电池产生的锂回

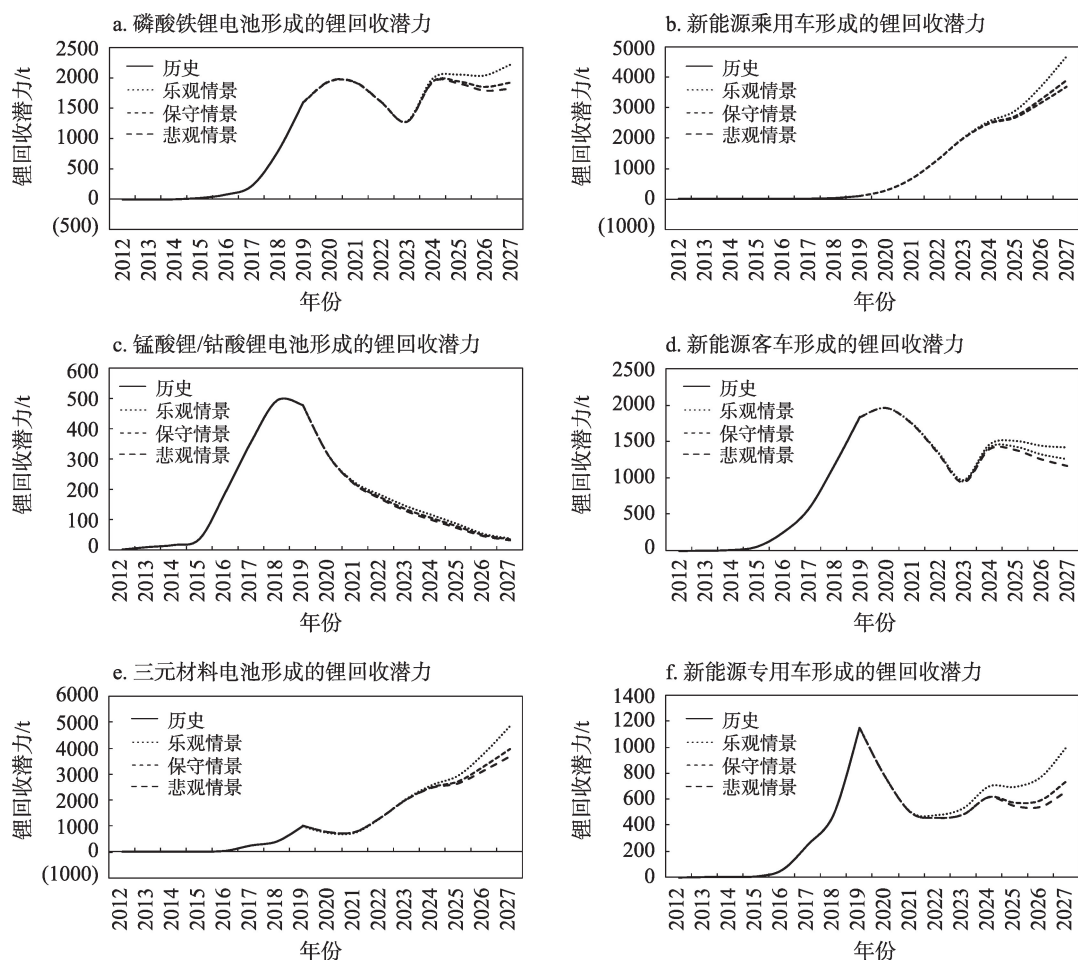


图7 2012—2027年中国新能源汽车退役锂电池锂回收潜力

Figure 7 Lithium recovery potential of retired lithium batteries for new energy vehicles in China, 2012-2027

2022年1月

收潜力最小,且呈现明显“先增后减”的变化过程(图5a、5c、5e、7a、7c、7e)。

5 结论与建议

5.1 结论

综上可得到以下主要结论:

(1)新能源汽车锂回收潜力规模并不大,但增长非常快。2019年中国新能源汽车的锂回收潜力只有3000 t多,到2027年会达到7100 t(乐观消费情景)、5908 t(保守消费情景)和5529 t(悲观消费情景),相比新能源汽车生产端庞大的锂消费能力,锂回收潜力规模并不大。但新能源汽车的锂回收潜力增长快速,2013—2019年锂回收潜力年均增速高达168%,2019—2027年期间,锂回收潜力年均增速仍会有11.06%(乐观消费情景)、8.54%(保守消费情景)和7.64%(悲观消费情景)。

(2)直接报废产生的锂回收潜力是新能源汽车锂回收潜力的主力。2027年,乐观、保守和悲观消费情景下,新能源汽车退役锂电池直接报废产生的锂回收潜力分别占相关消费情景下总体锂回收潜力的82%、78%和76%;退役锂电池再利用后产生的锂回收潜力分别占相关消费情景下总体锂回收潜力的22%、18%和24%。

(3)新能源汽车锂回收潜力由以新能源客车、专用车为主向以乘用车为主转变,由以磷酸铁锂电池为主向以三元材料电池为主转变。近年来,新能源汽车锂回收潜力主要来源于新能源客车和专用车,从电池类型来看则是主要来源于磷酸铁锂电池和三元材料电池。2019年,新能源客车、专用车和乘用车的锂回收潜力分别占总体的60%、37%和3%,磷酸铁锂、三元材料和锰酸锂、钴酸锂电池的锂回收潜力分别占总体的52%、32%、16%。未来锂回收潜力主要来源于新能源乘用车和客车,磷酸铁锂电池和三元材料电池。3种消费情景下,2027年,新能源乘用车、客车和专用车的锂回收潜力均占总体锂回收潜力的66%、21%和13%,三元材料电池、磷酸铁锂电池的锂回收潜力占总体锂回收潜力的67%、32%。

5.2 建议

尽快制定强制性锂电池回收政策体系。虽然相比新能源汽车生产端庞大的锂消费能力,新能源汽车产生的锂回收潜力规模并不大,但到2027年新能源汽车锂回收潜力有望达到7000万t,2012—

2027年累计锂回收潜力有望超过4万t,这对于锂电池循环化企业具有较大吸引力。更应引起重视的是,我国新能源汽车锂回收潜力由新能源客车、专用向乘用车的转化,也意味着新能源汽车锂电池将逐步由“单位报废”向“家庭报废”转变,由“集体报废”向“分散报废”转变,锂电池回收难度也将逐步增加,面临的生态破坏等风险也将大幅增加,建议中国加快推进锂电池资源化科技攻关、技术应用,尽快制定强制性锂电池回收政策体系。

加快锂电池回收政策制定由政府推动向市场推动转变。目前,全球锂电池循环化企业从事经营锂电池回收、再利用和资源化会面临运输成本、规模经济等挑战^[37]。截至2021年,中国新能源乘用车锂回收潜力将超过1万t,这是锂电池循环化企业进入和规模化经营的关键时期,这也应是锂电池回收体系建设及其政策制定关键参考期,中国锂电池回收政策制定应逐步由政府推动向市场推动转变。

实施差异化锂电池回收政策。重视中国区域差异性存在,对于偏远地区、锂电池报废较少的地区,建议实施差异化动力电池回收、再利用和资源化政策,在锂电池再利用、资源化活动上给予一定财政资金支持,减缓运输成本、规模经济等对企业从事锂电池再利用、资源化活动的影响。

参考文献(References):

- [1] 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. [Ma Z, Li J W. Analysis of China's lithium resources supply system: Status, issues and suggestions[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(10): 1-7.]
- [2] Wu Y F, Yang L Y, Tian X, et al. Temporal and spatial analysis for end-of-life power batteries from electric vehicles in China[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104651.
- [3] 邢佳韵,彭浩,张艳飞,等. 世界锂资源供需形势展望[J]. 资源科学, 2015, 37(5): 988-997. [Xing J Y, Peng H, Zhang Y F, et al. Global lithium demand and supply[J]. Resources Science, 2015, 37(5): 988-997.]
- [4] 钟美瑞,宋婉婷. 战略性金属矿产价格冲击对行业产出的影响:基于TVP-FAVAR模型的时变分析[J]. 资源科学, 2020, 42(8): 1580-1591. [Zhong M R, Song W T. Impact of strategic metal price shocks on industrial output: Time-varying analysis based on the TVP-FAVAR model[J]. Resources Science, 2020, 42(8): 1580-1591.]
- [5] Hanisch C, Diekmann J, Westphal B G, et al. Recycling of Lithi-

- um-Ion Batteries (from Electric Vehicles)[C]. Braunschweig: Wein, 2014.
- [6] Richa K, Babbitt C W, Gaustad G, et al. A future perspective on lithium-ion battery waste flows from electric vehicles[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2014, 83: 63-76.
- [7] Kamran M, Raugei M, Hutchinson A, et al. 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 & Recycling, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105412.
- [8] Steward D, Mayyas A, Mann M. Economics and challenges of Li-ion battery recycling from end-of-life vehicles[J]. Procedia Manufacturing, 2019, (33): 272-279.
- [9] Gaines L. The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2014, (1): 2-7.
- [10] Harper G, Sommerville R, Kendrick E, et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles[J]. Nature, 2019, 575(7781): 75-86.
- [11] Wang W, Wu Y F. An overview of recycling and treatment of spent LiFePO₄ batteries in China[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2017, 127: 233-243.
- [12] Ziemanna 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.
- [13] Guo X Y, Zhang J X, Tian Q H. Modeling the potential impact of future lithium recycling on lithium demand in China: A dynamic SFA approach[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, DOI: 10.1016/j.rser.2020.110461.
- [14] Hao H, Liu Z W, Zhao F Q, et al. Material flow analysis of lithium in China[J]. Resources Policy, 2017, 51: 100-106.
- [15] 宋璐璐, 曹植, 代敏. 中国乘用车物质代谢与碳减排策略[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 501-512. [Song L L, Cao Z, Dai M. Material metabolism and carbon emission reduction strategies of passenger cars in China's mainland[J]. Resources Science, 2021, 43(3): 501-512.]
- [16] 翟一杰, 张天祚, 申晓旭, 等. 生命周期评价方法研究进展[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 446-455. [Zhai Y J, Zhang T Z, Shen X X, et al. Development of life cycle assessment method[J]. Resources Science, 2021, 43(3): 446-455.]
- [17] 卢强. 电动汽车动力电池全生命周期分析与评价[D]. 长春: 吉林大学, 2014. [Lu Q. Life Cycle Assessment of Electric Vehicle Power Battery[D]. Changchun: Jilin University, 2014.]
- [18] Gaines L, Nelson P. Lithium Ion Batteries: Possible Materials Issues[R]. Broward County: 13th International Battery Materials Recycling Seminar and Exhibit, 2009.
- [19] 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, DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105122.
- [20] 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, 2018, DOI: 10.1016/j.susmat.2018.e00087.
- [21] 文博杰. 基于中国新能源汽车发展规划的资源环境效应分析[J]. 中国矿业, 2017, 26(10): 76-80. [Wen B J. Analysis of the resource and environment effect based on China's new energy vehicle development plan[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(10): 76-80.]
- [22] Gaines L, Cuenca R. Costs of Lithium-Ion Batteries for Vehicles [R/OL]. (2020-05) [2021-04-25]. <https://www.docin.com/p-53437572.html>.
- [23] 刘光富, 林锦灿, 田婷婷. 新能源汽车动力电池报废量估算和资源潜力分析[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(1): 96-99. [Liu G F, Lin J C, Tian T T. Quantity prediction and resources potential analysis of spent lithiumion battery of new energy automobile[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(1): 96-99.]
- [24] Liu J, Saxena A, Goebel K, et al. An Adaptive Recurrent Neural Network for Remaining Useful Life Prediction of Lithium-Ion Batteries[C]. Ottawa: Annual Conference of Prognostics and Health Management Society, 2010.
- [25] 王帅. 数据驱动的锂离子电池剩余寿命预测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. [Wang S. Research on Data-driven-based Remaining Useful Life Prediction of Lithium-ion Battery [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.]
- [26] 塔拉. 电动汽车用动力电池模型仿真及寿命特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2011. [Ta L. Research on Electric Vehicle Traction Battery Modelling Simulation and Life Cycle Performance[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.]
- [27] 上海有色金属网. 2019中国锂钴及锂电池市场热点[R]. 上海: 2019-2022年中国镍钴锂新能源产业链报告, 2019. [Shanghai Nonferrous Metal Net. 2019 China Lithium Cobalt and Lithium Battery Market Hot Spots[R]. Shanghai: China New Energy Industry Chain Report of Nickel-Cobalt-Lithium 2019-2022, 2019.]
- [28] 林秀丽, 汤大钢, 丁焰, 等. 中国机动车行驶里程分布规律[J]. 环境科学研究, 2009, 22(3): 377-380. [Lin X L, Tang D G, Ding Y, et al. Study on the distribution of vehicle mileage traveled in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(3): 377-380.]
- [29] 王安建, 王高尚, 邓祥征, 等. 新时代中国战略性关键矿产资源安全与管理[J]. 中国社会科学基金, 2019, 33(2): 133-140. [Wang A J, Wang G S, Deng X Z, et al. Security and management of China's critical mineral resources in the new era[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2019, 33(2): 133-140.]
- [30] 郑林昌, 张亚楠, 吴锦霞. 中国新能源汽车生产端的锂消费测算[J]. 中国矿业, 2021, 30(3): 43-51. [Zheng L C, Zhang Y N, Wu J X. Research on lithium consumption of new energy vehicles from the production end in China[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(3): 43-51.]
- [31] Qiao D H, Wang G H, Gao T M, et al. Potential impact of the end-of-life batteries recycling of electric vehicles on lithium demand

- in China: 2010–2050[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142835.
- [32] Guo X Y, Zhang J X, Tian Q H. Modeling the potential impact of future lithium recycling on lithium demand in China: A dynamic SFA approach[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, DOI: 10.1016/j.rser.2020.110461.
- [33] Ai N, Zheng J J, Chen W Q. U. S. end-of-life electric vehicle batteries: Dynamic inventory modeling and spatial analysis for regional solutions[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 145: 208–219.
- [34] Wu Y F, Yang L Y, Tian X, et al. Temporal and spatial analysis for end-of-life power batteries from electric vehicles in China[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104651.
- [35] 何畏, 罗潇, 曾珍, 等. 利用QPSO改进相关向量机的电池寿命预测[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 36(6): 18–24. [He W, Luo X, Zeng Z, et al. Battery life prediction based on QPSO improved relevant vector machine[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 36(6): 18–24.]
- [36] Faria R, Marques P, Garcia R, et al. Primary and secondary use of electric mobility batteries from a life cycle perspective[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 262: 169–177.
- [37] Slattery M, Dunn J, Kendall A. Transportation of electric vehicle lithium-ion batteries at end-of-life: A literature review[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105755.

Lithium recovery potential of new energy vehicles in China under different consumption scenarios

ZHENG Linchang, ZHANG Yanan, LI Zeyang, ZHAO Ying

(College of Economics, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract: New energy vehicles are the main consumer of lithium resources, and the recycling of lithium from scrap lithium batteries for new energy vehicles is of great significance for increasing lithium supply. In this study, by establishing the relationship between lithium battery power storage and lithium consumption and using big data of new energy vehicle production, we measured the lithium consumption per unit storage capacity of different types of new energy vehicles and lithium battery. Finally, based on the modification of parameters related to lithium battery decommissioning, we analyzed the lithium recovery potential of new energy vehicles under different scenarios in China. The results show that although the lithium recovery potential of China's new energy vehicles is not high, it is growing at a fast speed. Lithium recovery potential from direct scrapping of lithium batteries is dominant, and lithium recovery potential resulting from reuse of retired lithium battery is not high. From the perspective of vehicle type, the lithium recovery potential generated by new energy buses is the largest in the past, and the lithium recovery potential generated by new energy passenger cars in the future will be the largest, from the perspective of lithium battery type, the lithium recovery potential generated by scrap iron phosphate lithium batteries is the largest in the past, and the lithium recovery potential generated by scrap ternary material lithium batteries in the future will be the largest. In order to ensure that the lithium recycling of new energy vehicles becomes a reality from the potential, we recommend to speed up the formulation of mandatory and differentiated lithium battery recycling policies, and speed up the transformation of lithium battery recycling from government driven to market driven.

Key words: new energy vehicles; lithium batteries; scrap; recycling potential; scenario analysis; Weibull distribution