侯思雨,庄绪宁,杨 凡,等.我国退役动力电池及关键金属资源时空分布特征与处理需求解析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(8):4727-4736.
Hou S Y, Zhuang X N, Yang F, et al. Analysis of the temporal and spatial distribution characteristics and processing requirements of retired power batteries and critical metal resources in China [J]. China Environmental Science, 2025,45(8):4727-4736.

我国退役动力电池及关键金属资源时空分布特征与处理需求解析

侯思雨,庄绪宁*,杨 凡,宋小龙,吴雯杰,赵 静 (上海第二工业大学资源与环境工程学院,上海 201209)

摘要：聚焦我国退役动力电池及其关键金属资源的时空分布特征,运用 LSTM 神经网络模型预测新能源乘用车销量,结合 Weibull 分布模型估算退役动力电池及关键金属资源存量,并进一步分析其空间分布特征.研究发现,2012~2035 年我国动力电池退役量及关键金属资源累计存量存在明显的区域性差异和空间聚集性,当前广东、浙江、山东、北京、上海、河南动力电池累计退役量及关键资源累计存量最多,西藏、青海、宁夏、黑龙江、新疆、内蒙古最少;至 2035 年,江苏将取代北京成为累计退役量最多的 6 省份之一,累计退役量为 225.46 万 t,甘肃将取代内蒙古成为累计退役量最少的省份之一,累计退役量为 15.36 万 t.空间聚集性上,当前高-高集聚区为江苏,低-低集聚区有新疆、青海、四川、甘肃、内蒙古、吉林,未来高-高集聚范围将进一步扩大(新增安徽、上海),而低-低集聚区范围将缩小(四川退出).从退役动力电池综合利用白名单企业处理能力分布上看,当前我国虽总体处理能力过剩但存在空间错位性,未来上海、江苏、河北、广西、天津、广东、浙江、云南、河南再生利用能力将不能满足自身需求,需进一步优化回收处理产能布局.

关键词：新能源乘用车；退役动力电池；关键金属资源；时空分布；回收处理
中图分类号：X820.3 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)08-4727-10

Analysis of the temporal and spatial distribution characteristics and processing requirements of retired power batteries and critical metal resources in China. HOU Si-yu, ZHUANG Xu-ning*, YANG Fan, SONG Xiao-long, WU Wen-jie, ZHAO Jing. (School of Resources and Environmental Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai, 201209, China). *China Environmental Science*, 2025,45(8)：4727~4736

Abstract：The study focused on the spatiotemporal distribution characteristics of retired power batteries and critical metal resources in China. It used the LSTM neural network model to predict the sales volume of electric vehicles. It also estimated the stock of retired power batteries and critical metal resources by applying the Weibull distribution model, and further analyzed their spatial distribution characteristics. The research found that from 2012 to 2035, there were significant regional differences and spatial agglomeration in the cumulative retirement volume of power batteries and the cumulative stock of critical metal resources in China. Currently, Guangdong, Zhejiang, Shandong, Beijing, Shanghai, and Henan had the highest cumulative retirement volume of power batteries and the highest cumulative stock of critical metal resources, while Tibet, Qinghai, Ningxia, Heilongjiang, Xinjiang, and Inner Mongolia had the lowest. By 2035, Jiangsu was projected to replace Beijing as one of the six provinces with the highest cumulative retirement volume, with a cumulative retirement volume of 2.2546 million tons. Gansu was projected to replace Inner Mongolia as one of the provinces with the lowest cumulative retirement volume, with a cumulative retirement volume of 153,600 tons. In terms of spatial agglomeration, the high-high agglomeration area was found to be Jiangsu, while the low-low agglomeration areas included Xinjiang, Qinghai, Sichuan, Gansu, Inner Mongolia, and Jilin. It was projected that the scope of high-high agglomeration would expand further in the future (with Anhui and Shanghai being added), while the scope of low-low agglomeration would contract (with Sichuan no longer being part of this category). Regarding the distribution of processing capacities of the white-listed enterprises for the comprehensive utilization of retired power batteries, it was found that although China had an overall surplus in processing capacity, there was a spatial misalignment. It was anticipated that in the future, the recycling and regeneration capacities in Shanghai, Jiangsu, Hebei, Guangxi, Tianjin, Guangdong, Zhejiang, Yunnan, and Henan would not be sufficient to meet their own demands, and it was necessary to further optimize the layout of recycling and processing capacities.

Key words：electric vehicles；retired power batteries；critical metal resources；temporal and spatial distribution；recovery and treatment

收稿日期：2025-01-06
基金项目：上海市浦东新区科技民生项目(PKJ2023-C03);国家自然科学基金面上项目(42471331)

* 责任作者，教授, xnzhuang@sspu.edu.cn

随着我国新能源汽车产业的快速发展,新能源汽车销量呈快速上升趋势.动力电池作为新能源汽车的核心部件,当其容量下降至 80%时,将无法支撑新能源汽车运行使用,达到退役标准[1-4].预计到 2025 年动力电池年退役量或达 80 万 t,未来动力电池退役量巨大.

退役动力电池中富含 Li、Ni、Co 等关键金属资源[5-9],回收利用退役动力电池中的关键金属资源对于缓解资源供需矛盾具有重要现实意义[10-11].因此,动力电池退役量及其所含关键金属资源回收潜力相关研究被国内外众多学者关注[12-14].国外研究表明,至 2040 年全球退役动力电池所含资源量可以满足全球 60%的 Co、53%的 Li、57%的 Mn 和 53%的 Ni 供应需求[15],美国退役动力电池量将达 400 万 t[16].至 2030 年,中国 Li、Ni 资源的回收潜力为 0.5~0.7 万 t、3.5~6 万 t,美国的 Li、Ni 回收潜力为 0.2~0.3 万 t、1.6~2.6 万 t[17],巴西退役动力电池中所含 Li、Co、Ni 资源约占当年巴西总需求量的 5.5%、11%、9.0%[18].在国内,姚沛帆[19]利用 Weibull 分布模型对我国三元锂电池退役量进行预测,结果显示至 2025 年我国三元锂电池退役量将达到 80.67 万 t;李建西[20]同样采用 Weibull 分布模型对我国基准情景、磷酸铁锂电池和三元锂电池主导情景下的动力电池退役量进行预测分析,结果表明,至 2030 年三种情景下我国动力电池退役量分别可达 531.49 万 t、461.82 万 t、601.16 万 t.对于退役动力电池关键资源,2030 年我国退役动力电池中 Li 的潜在回收量约为 0.5 吨[21],Ni 的回收潜力最高可达 9.3 万 t,约占动力电池生产总需求量的 1/3[22];至 2050 年,我国退役动力电池所含以上各金属的回收可为新电池的生产提供约 58.0%的 Li、57.2%的 Co、56.7%的 Ni、59.8%的 Mn、58.1%的 Cu、59.7%的 Al、65.1%的 Fe 资源供给[23].

对于我国退役动力电池及其所含关键金属资源的空间分布情况,部分机构及学者也对此展开研究.如北理新源科技研报预测[24],2022~2026 年我国退役动力电池主要集中在华东、华南、华北和华中区域,华东、华南、华北、华中、西南、西北、东北地区 5 年累计退役量分别可达到 38.0GW·h、26.1GW·h、14.3GW·h、14.3GW·h、8.9GW·h、6.1GW·h、4.0GW·h,但分析主要是以区域为维度,未能深入分析以省份为维度的空间分布情况;Hu 等[25]对 2020 年 7 月至 2021 年 6 月各省(自治区、直辖市)动力电池退役区域分布情况进行分析,结果表明动力电池退役分布区域不平衡,广东、山东、浙江、河南、江苏等省(自治区、直辖市)占据前五,但该研究开展时间较早且时间周期仅为 1 年,不能准确反应我国动力电池空间分布及其随时间变化的动态趋势;孟微[26]分别对上海大都市圈的 9 个城市(上海、苏州、常州、无锡、南通、嘉兴、湖州、宁波和舟山)2023 年的动力电池退役量进行预测,结果表明上海市的动力电池退役量占比超过 68%,其余城市的动力电池退役量占比均不到 10%;黄达[27]对深圳市 2025 年 9 个行政区动力电池退役量进行预测分析,结果显示南山区动力电池退役量最高,为 1.78 万 t.

当前国内外关于动力电池退役量及关键金属资源存量相关研究多以宏观总量分析为主,对退役动力电池空间分布差异的研究不够系统深入,尤其缺少系统的时空动态分析.本文聚焦我国退役动力电池及其所含 Li、Co、Ni 等关键金属资源的时空动态分布特征,解析其空间分布特征与动态变化趋势,并在此基础上分析我国动力电池退役量与回收处理能力之间的匹配关系,为资源回收利用产能的合理布局与规划提供科学依据.

1 研究内容与方法

1.1 研究区域及数据来源

本文研究的区域范围为中国的 31 个省(自治区、直辖市),不含香港、澳门行政特区及台湾省.目前,新能源乘用车在新能源汽车市场中占据主导地位,以 2024 年为例,其销量占新能源汽车总销量的 96%.因此,本研究以新能源乘用车为研究对象,研究数据为 2012~2023 年 31 个省(自治区、直辖市)新能源乘用车销量数据,该数据来自新能源乘用车交强险数据,涵盖了所有销售渠道,包括 4S 店、经销商、线上销售等.本文使用到我国基础地理要素矢量数据,来自自然资源部标准地图服务网站(http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/),审图号为 GS (2020) 4619,底图无修改;白名单企业回收能力来自各企业公开数据.

1.2 研究方法

1.2.1 退役动力电池与关键金属资源存量预测

采用长短期记忆(LSTM)神经网络模型对我国 31 个

省(自治区、直辖市)2024 年~2035 年新能源乘用车销量进行预测.LSTM 神经网络是一种特殊的循环神经网络(RNN),它能够有效地处理时间序列数据,在众多领域中展现出卓越的预测性能[28].LSTM 神经网络通过特殊的门控机制来处理序列数据中的长期依赖关系,核心结构包括记忆单元 c_{t-1} 和 3 个门:输入门、遗忘门和输出门,其网络结构示意图如图 1 所示.

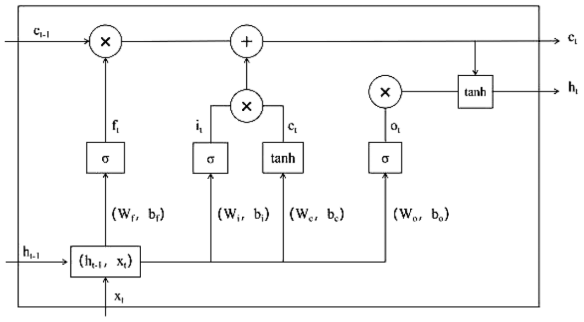


图 1　LSTM 网络结构示意图

Fig.1　LSTM network structure diagram

遗忘门决定了上一时刻中哪些信息应该被遗忘.它接收上一时刻的隐藏状态 h_{t-1} 和当前时刻的输入 x_t,通过一个 sigmoid 函数产生一个介于 0 和 1 之间的值,这个值与上一时刻的记忆状态 c_{t-1} 相乘.若该值接近 0,就表示对应的信息会被遗忘,若接近 1,信息会被保留;输入门用于控制新信息的输入,它同样基于 h_{t-1} 和 x_t,通过 sigmoid 函数决定更新哪些信息,同时通过 tan h 函数产生新的候选值 c_t,然后将这两部分结合起来更新状态;输出门决定了当前时刻的隐藏状态 h_t,它根据 h_{t-1} 和 x_t 通过 sigmoid 函数产生一个输出控制信号,与经过 tan h 函数处理后的记忆状态 c_t 相乘,得到最终的隐藏状态输出.

其中 W_f、W_i、W_c、W_o 分别是输入值与遗忘门、输入门、暂存记忆门和输出门之间的权重矩阵,b_f、b_i、b_c、b_o 分别是偏置向量,σ 表示 sigmoid 函数,tan h 是双曲正切激活函数.LSTM 神经网络模型计算公式如下式:

$$f_t=\sigma[W_f\cdot(h_{t-1},x_t)+b_f] \tag{1}$$

$$i_t=\sigma[W_i\cdot(h_{t-1},x_t)+b_i]] \tag{2}$$

$$c_t=\tan h[W_c\cdot(h_{t-1},x_t)+b_c] \tag{3}$$

$$c_t=f_t\cdot c_{t-1}+i_t\cdot c_t \tag{4}$$

$$o_t=\sigma[W_o\cdot(h_{t-1},x_t)+b_o] \tag{5}$$

$$h_t=o_t\cdot\tan hc_t \tag{6}$$

本文通过均方误差 MSE 来判断新能源乘用车销量预测的拟合程度,计算公式如下:

$$\mathrm{MSE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2 \tag{7}$$

式中:n 表示年份;y_i 表示第 i 年的新能源乘用车实际销量;$\hat{y}_i$ 表示第 i 年的新能源乘用车预测销量.MSE 的值越小表示模型对数据的拟合程度越好.

1.2.2　退役动力电池与关键金属资源存量预测　采用 Weibull 分布模型估算我国 2024~2035 年动力电池退役量,进而估算其关键金属(Li、Co、Ni)资源存量.Weibull 分布是一种广泛应用于可靠性工程领域的概率分布模型,用于描述产品的寿命分布情况[29].Weibull 分布表达式如下:

$$f(t)=\frac{k}{\lambda}\left(\frac{t}{\lambda}\right)^{k-1}\cdot \mathrm{e}^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^{k}} \tag{8}$$

式中:k 为形状参数;λ 为尺度参数,大小与动力电池寿命有关,具体数值由式(9)、式(10)确定;t 为动力电池退役时间.

$$\left(\frac{T_{\mathrm{ave}}}{T_{\max}}\right)^{k}=\frac{k-1}{k\cdot\ln 100} \tag{9}$$

$$\lambda=T_{\mathrm{ave}}\cdot\left(1-\frac{1}{k}\right)^{-\frac{1}{k}} \tag{10}$$

式中:T_{ave} 为动力电池的平均使用寿命,与 Weibull 寿命分布密度函数曲线的中值对应,也是最大概率密度点;$T_{\max}$ 为 99%的动力电池退役所需的时间,在本研究中设 $T_{\max}=2T_{\mathrm{ave}}$.

三元锂电池平均使用寿命为 5~8 年,磷酸铁锂电池平均使用寿命为 8~9 年,由式(8)、式(9)计算可得 k=2.8,三元锂电池和磷酸铁锂电池 λ 的取值分别为 7.6 和 9.3.

表 1 为《中国退役动力电池循环利用技术与产业发展报告》中统计的三元锂电池和磷酸铁锂电池中不同资源含量占比情况(表 1)[30],本研究主要对 Li、Co、Ni 三种关键金属资源进行估算.

1.2.3　退役动力电池与关键金属资源累计存量空间相关性分析　空间自相关是一种重要的空间数据分析方法,空间自相关分析包括全局空间自相关和局部空间自相关[31].本研究使用 geoda 软件开展此项分析.

(1)全局空间自相关

表 1 动力电池关键资源含量占比(%)

Table 1 Proportion of critical resources content in power batteries(%)

资源	三元锂电池	磷酸铁锂电池
镍	9.64	
钴	9.67	
锰	9.03	
锂	1.14	1.21
铜	7.8	8.15
铝	5.26	6.52
铁		9.71
塑料	3.15	4.4

Moran's I 指数是衡量区域整体空间相关性和空间差异的平均程度的使用最广泛的指标.Moran's I 指数计算公式如下:

$$I=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}(x_i-\overline{x})(x_j-\overline{x})}{S^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}} \tag{11}$$

$$S^2=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x}) \tag{12}$$

$$\overline{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \tag{13}$$

式中:x_i 和 x_j 分别表示 i 地区和 j 地区退役动力电池退役量;w_{ij} 表示空间权重矩阵,即两个地区 i 和 j 之间的临近关系,若两个地区相邻,值取 1,若不相邻,值取 0; $\overline{x}$ 表示动力电池退役量的平均值;S^2 表示方差.Moran's I 指数的范围为(−1,1),正值表示正相关,负值表示负相关,0 表示数据随机分布,其绝对值越大,空间自相关越强.结果通常采用 Z 值、P 值进行检验,当 P<0.1 时,且|Z|>1.65,有 90%的可能性是相关的.当 P<0.05 时,且|Z|>1.96,有 95%的可能性是相关的.当 P<0.01 时,且|Z|>2.58,有 99%的可能性是相关的.

由于海南在地理位置上与任何省(自治区、直辖市)都不接壤,但与广东省的距离最近,因此在空间权重矩阵的设置中设为海南省与广东省相邻.

(2)局部空间自相关

局部空间自相关常采用局部 Moran's I 指数来衡量,局部 Moran's I 指数计算公式如下:

$$I=\frac{x_i-\overline{x}}{S^2}\sum_{j=1}^{n}[W_{ij}(x_i-\overline{x})] \tag{14}$$

局部空间自相关会有五种关联结果:高−高关联(HH),即高动力电池退役量的省(自治区、直辖市)被高动力电池退役量的省(自治区、直辖市)所包围;低−高关联(LH),即低动力电池退役量的省(自治区、直辖市)被低动力电池退役量的省(自治区、直辖市)所包围;低−低关联(LL),即低动力电池退役量的省(自治区、直辖市)被低动力电池退役量的省(自治区、直辖市)所包围;高−低关联(HL),即高动力电池退役量的省(自治区、直辖市)被低动力电池退役量的省(自治区、直辖市)所包围.

2 结果与讨论

2.1 新能源乘用车销量预测

图 2 所示为 2010~2035 年我国新能源乘用车总销量及 31 个省(自治区、直辖市)的销量数据.其中,2010~2023 年为新能源汽车实际销量,2024−2035 年为基于实际销量预测的数据.根据预测结果,2024~2035 年新能源乘用车年总销量分别为 909.45 万辆、1092.00 万辆、1206.14 万辆、1288.37 万辆、1351.55 万辆、1401.29 万辆、1440.20 万辆、1471.03 万辆、1495.74 万辆、1517.45 万辆、1537.83 万辆、1554.91 万辆,MSE 结果为 4.39×10^{-9},预测结果与实际值之间的偏差极小,拟合程度较高.销售量排名前六的地区为广东、浙江、江苏、山东、河南和上海,这些地区具有较强的经济实力、政策支持、市场需求和良好的基础设施建设,推动了新能源汽车销量的增长.而西藏、青海、宁夏、黑龙江、甘肃、新疆销量最低,其经济实力及政策支持力度较小且属于西北、东北地区,气候条件对电池性能影响大,限制了新能源汽车发展.

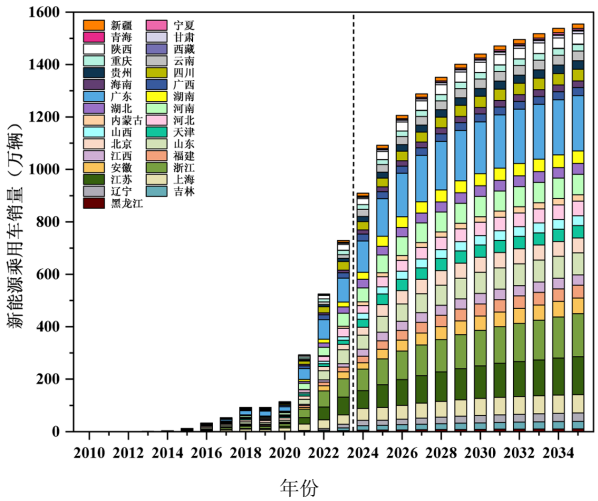


图 2 我国 31 省(自治区、直辖市)2010~2035 年新能源乘用车销量

Fig.2 Electric vehicle sales in 31Provinces (Autonomous Regions and Municipalities) of China from 2010 to 2035

2.2　动力电池退役量与关键金属资源存量分析

依据新能源汽车实际销量及未来预测销量,对我国 2012~2035 年动力电池退役量及其所含关键金属 Li、Co、Ni 资源存量进行估算,结果如图 3 所示.

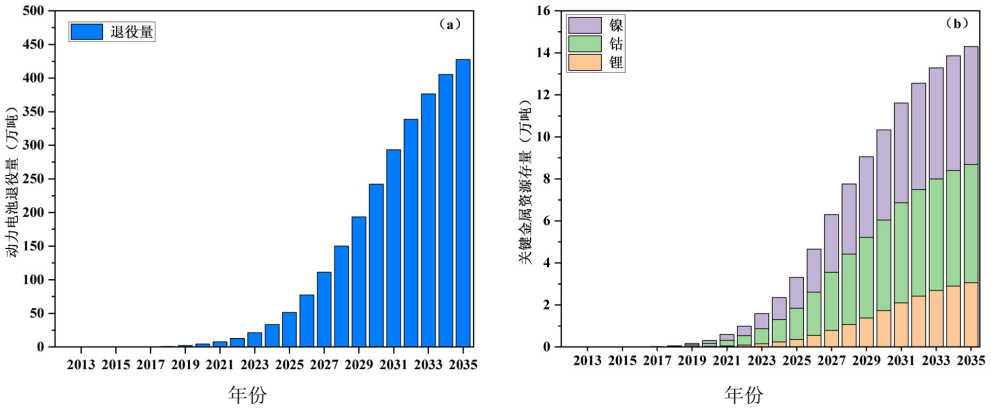


图 3　2012 年~2035 年动力电池退役量(a)及关键金属资源存量(b)

Fig.3　The stock of retired power batteries (a) and critical metal resources (b) from 2012 to 2035

由图 3 所示结果可知,2012~2035 年我国动力电池退役量呈现快速增长趋势.2012~2017 年因新能源汽车的普及率较低,动力电池退役量相对较少,6 年间动力电池累计退役量仅为 0.44 万 t.2017 年后早期动力电池寿命到期且新能源汽车市场快速增长,动力电池退役量呈现快速增长态势,至 2023 年退役量可达 21.18 万 t,年均增速为 101%.预计至 2035 年,我国动力电池退役量将增长至 427.67 万 t,在 2024 年基础上年均增速为 28%.

与退役动力电池退役量相对应,其所含关键金属资源 Li、Co、Ni 存量亦呈现快速增长趋势,由 2012 年的 0.23t 增长至 2035 年的 14.31 万 t,年均增速为 20%.其中 Li、Co、Ni 金属资源的年均增速分别为 17%,21%,21%.2012~2017 年间,退役动力电池中所含关键金属资源累计存量仅为 0.03 万 t,2017 年后开始快速增长,Li、Co、Ni 资源分别从 2017 年的 0.002 万 t、0.01 万 t、0.01 万 t 增长至 2023 年的 0.15 万 t、0.72 万 t、0.72 万 t,年均增速分别为 105%、104%、104%.未来,随着动力电池退役量的快速增长,其所含关键金属资源存量将进一步增长,至 2035 年其总存量将达到 14.31 万 t,年均增速为 20%,其中 Li、Co、Ni 资源的年均增速分别为 29%、19%、19%.

2.3　退役动力电池及关键金属资源的空间分布特征

2.3.1　退役动力电池及关键金属资源累计存量空间分布

借助 ArcGIS 软件进行区域维度可视化分析,图 4 所示为当前现状下(2012~2023 年)我国动力电池退役量及其关键金属资源累计存量分布图.

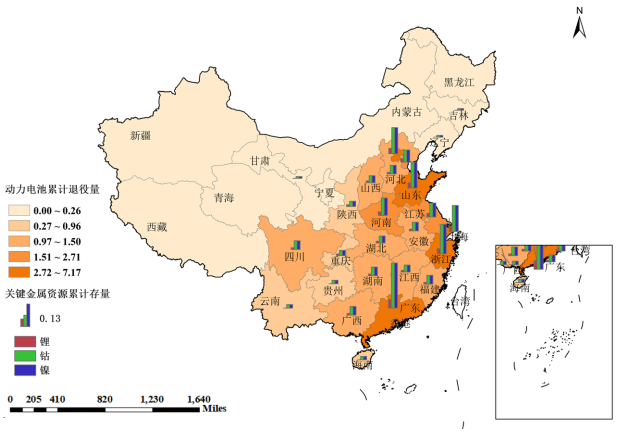


图 4　当前现状下(2012~2023 年)我国动力电池退役量及其关键金属资源累计存量分布

Fig.4　Distribution of retired power batteries and critical metal resources in China from 2012 to 2023 under the current situation

审图号:GS(2020)4619

由图中所示结果可以看出,当前我国动力电池退役量在空间分布上呈现明显差异.当前现状下,动力电池退役量主要集中在华东、华北、华中和华南地区.这些区域经济较为发达、新能源汽车普及率较高,新能源汽车保有量较大,因而动力电池退役量也相应较多.具体来看,2012~2023 年广东、浙江、山东、北京、上海、河南动力电池累计退役量最多,其中广东位于全国之首,累计退役量为 7.17 万 t,占全国动力电池总退役量的 14%;其余 5 个省(自治区、直辖市)的累计退役量分别为 4.98 万 t、4.62 万 t、4.57 万 t、4.54 万 t、2.71 万 t.分别占全国总退役量的 10%、9%、9%、9%、5%.西藏、青海、宁夏、黑龙江、新疆和

内蒙古动力电池累计退役量最少,6 个省(自治区、直辖市)累计退役量合计仅为 0.37 万 t,仅占全国总退役量的 1%.

与动力电池累计退役量分布相同,关键金属资源亦主要集中在华东、华北、华中和华南地区.2012~2023 年广东、浙江、山东、北京、上海、河南的 Li 资源累计存量分别为 0.05 万 t、0.03 万 t、0.03 万 t、0.03 万 t、0.03 万 t、0.02 万 t;Co 资源累计存量分别为 0.26 万 t、0.17 万 t、0.15 万 t、0.15 万 t、0.15 万 t、0.10 万 t;Ni 资源累计存量分别为 0.26 万 t、0.17 万 t、0.15 万 t、0.15 万 t、0.15 万 t、0.10 万 t.西藏、青海、宁夏、黑龙江、新疆和内蒙古的 Li、Co、Ni 资源累计存量仅占全国总量的 0.2%.

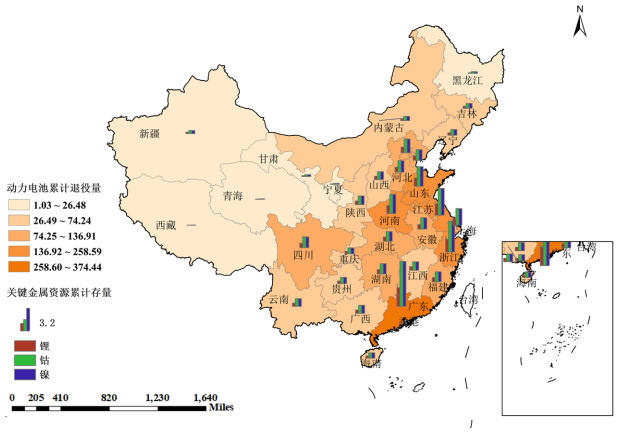


图 5 未来趋势下(2012~2035 年)我国动力电池退役量及其关键金属资源累计存量分布

Fig.5 Distribution of retired power batteries and critical metal resources in China from 2012 to 2035 under the future situation

审图号:GS(2020)4619

未来,随着新能源汽车销量的不断增加,必然会带来动力电池退役量的持续增长.图 5 所示为未来趋势下(2012~2035 年)我国动力电池退役量及其关键金属资源累计存量分布图,可以发现,至 2035 年我国动力电池累计退役量将达 427.67 万 t,其中广东、浙江、江苏、山东、河南、上海动力电池累计退役量最多,分别为 374.44 万 t、258.58 万 t、225.46 万 t、164.12 万 t、162.63 万 t、136.91 万 t,分别占全国总退役量的 14%、9%、8%、6%、6%、5%;西藏、青海、宁夏、黑龙江、甘肃、新疆动力电池累计退役量最少,累计退役量分别为 1.03 万 t、3.84 万 t、9.14 万 t、14.16 万 t、15.36 万 t、26.48 万 t,6 个省(自治区、直辖市)累计退役量仅占全国总累计退役量的 3%.

随着动力电池退役量的增多,关键金属资源累计存量也持续增加,至 2035 年我国退役动力电池关键金属资源累计存量为 14.31 万 t,其中 Li、Co、Ni 资源累计存量分别为 3.06 万 t、5.63 万 t、5.61 万 t.其中,广东、浙江、江苏、山东、河南、上海的 Li 资源累计存量分别为 2.67 万 t、1.85 万 t、1.61 万 t、1.17 万 t、1.16 万 t、0.98 万 t;Co 资源累计存量分别为 6.44 万 t、4.41 万 t、3.82 万 t、2.79 万 t、2.75 万 t、2.38 万 t;Ni 资源累计存量分别为 6.42 万 t、4.40 万 t、3.81 万 t、2.79 万 t、2.74 万 t、2.38 万 t.西藏、青海、宁夏、黑龙江、甘肃、新疆的 Li、Co、Ni 资源累计存量分别为 0.5 万 t、1.17 万 t、1.17 万 t.

由此可以看出,未来江苏省的退役动力电池及其所含关键金属资源量将呈快速增长趋势,将取代北京成为退役动力电池及其所含关键金属资源累计存量最多的六个省、直辖市之一;而内蒙古的退役动力电池也呈现出较快的增长态势,从退役量与资源累计存量最少的 6 个省、自治区中退出.

2.3.2 退役动力电池及关键金属资源分布空间相关性分析 为更好的分析我国退役动力电池及其关键金属资源累计存量的空间分布相关性情况,本研究分别从全局相关性与局部相关性角度进行了分析.表 2 所示分别为当前现状下(2012~2023 年)和未来至 2035 年情景下我国 31 个省(自治区、直辖市)退役动力电池全局莫兰指数检验结果.结果显示,全局 Moran's *I* 指数均超过 0.2,且通过了 *P* 值小于 0.05 的显著性水平,*Z* 值均大于 1.96,这表明从全国来看,退役动力电池及其所含关键金属资源累计存量呈现显著的空间相关性,且随着时间的推移,空间相关性更加显著.

表 2 动力电池累计退役量的全局 Moran's *I* 指数

Table 2 Global Moran's I index of the cumulative quantity of retired power batteries

年份	Moran's I	Z-value	P-value
2012~2023 年	0.22	2.32	0.02
2012~2035 年	0.23	2.45	0.01

在全局空间自相关的基础上,研究进一步采用局部 Moran's *I* 指数来确定空间集聚类型.Lisa 聚类图是一种用于展示数据集中局部空间相关性分布

的可视化工具,本研究采用 Lisa 聚类图反映各个地区局部空间相关性类型及其分布概况.图 6 所示为当前和未来至 2035 年情境下我国退役动力电池累计退役量及其所含关键金属资源累计存量的 Lisa 聚类图.

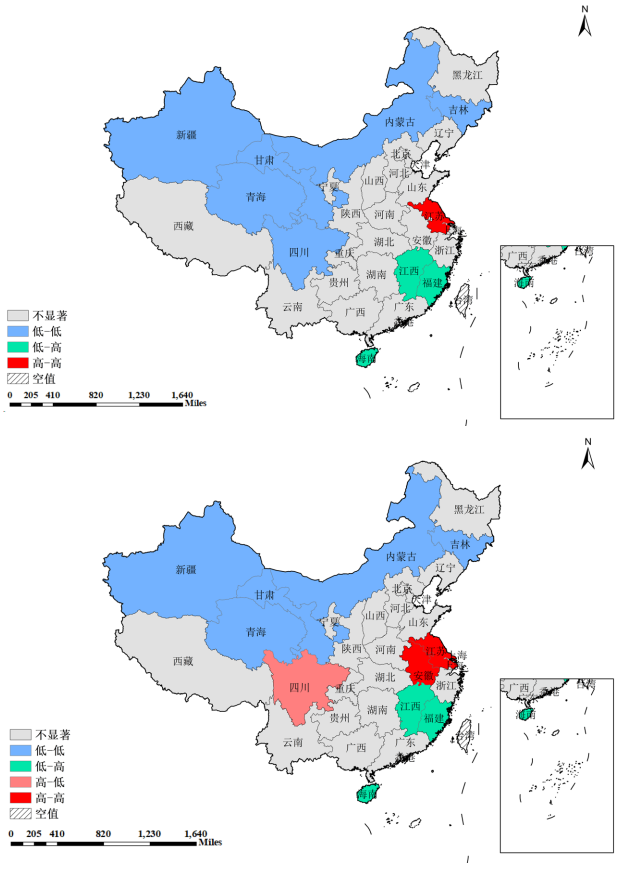


图 6　当前现状(2012~2023 年,a)及未来趋势下(2012~2035 年,b)我国退役动力电池及关键金属资源累计存量的 Lisa 聚类图

Fig.6　Lisa Cluster Map of the retired power batteries and critical metal resources in China under the current situation (from 2012 to 2023, a) and future trends (from 2012 to 2035, b)

审图号:GS(2020)4619

由分析结果可以看出,当前江苏属于高-高集聚区,周边省、自治区经济发达、人口密集,新能源汽车行业发展较好,具有正向的带动作用;低-低集聚区主要集中于西部、北部与东北地区(主要包括新疆、青海、四川、甘肃、内蒙古、吉林),这些地区经济发展水平相对较低,新能源汽车市场相对不成熟、发展速度较慢.福建、江西、海南三省呈现出低-高集聚趋势,说明其相较于其周边省份而言属于低退役量省份,其余 20 个省份未体现出明显的集聚特性.未来至 2035 年,东部沿海高-高集聚区范围将扩大(新增上海、安徽),表现出扩散效应;低-低集聚区呈缩小趋势,四川省由低-低集聚区转变为高-低集聚区,说明其动力电池退役量及关键金属资源累计存量相较于周边地区显著提高,这可能是由于政策的支持及 Li 矿资源的储量丰富等优势,推动了四川新能源汽车产业的快速发展,从而带来动力电池退役量的增加.福建、江西、海南随着时间的变化,集聚情况未发生明显变化,仍属于低-高聚集区.

高值集聚区域从经济发展、政策支持力度及动力电池回收体系建设等方面均较为完善,随着动力电池退役量的增加以及高值集聚区的空间扩散趋势,这类区域可利用聚集优势加强与周边区域的协同合作、加大技术研发力度,提高电池的回收效率和资源的循环利用率.对低-高集聚区及无明显集聚特性的区域而言,可通过引入高值区相关回收利用经验与技术,逐步提高区域整体产业竞争力.此外,低值集聚区亦要高度重视区域内动力电池回收处理与资源循环利用能力建设,确保动力电池得到有效回收与处理.

2.4　退役动力电池综合利用能力与空间布局

2.4.1　白名单企业及其综合利用能力　为了规范我国退役动力电池的回收与综合利用行业发展,工信部推出《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范条件》,并对符合条件的企业进行审批.2018 年工信部公布首批符合规范条件的 5 家企业名单,即“白名单企业”.随后 2020 年、2021 年、2023 年分别有 22 家、41 家和 68 家入选,当前我国共计有 156 家企业进入退役动力电池综合利用白名单,总回收处理能力约为 515.45 万 t.表 3 所示为当前我国退役动力电池综合利用白名单企业空间分布及其回收处理能力情况,可以看出我国目前白名单回收处理企业及回收处理能力主要分布在华东、华中和华南地区,3 个地区分别拥有白名单企业 65 家、33 家、26 家,占白名单企业总数量的 42%、21%、17%,处理能力分别占全国的 40%、25%和 18%.具体来看,华东地区以江西、安徽、浙江、江苏为代表,是白名单企业数量最多的区域.其中,江西白名单企业最多,拥有 18 家白名单企业,处理能力为 77.7 万 t,占全国总回收处理能力的 15%.安徽、浙江、江苏分别有 12 家、9 家、7 家,处理能力分别为 50 万 t、25.4 万

t、19 万 t.华中地区以湖南为代表,拥有 18 家白名单企业,回收处理能力占全国回收处理能力的 15%.华南地区以广东为代表,拥有 20 家白名单企业,是我国白名单企业分布最多的省份,回收处理能力达到 88.25 万 t,占全国回收处理能力的 17%.西北、东北等地区白名单企业较少,两个地区共有 6 家,占比仅为 4%,回收处理能力仅占全国回收处理能力的 4%.黑龙江、辽宁、山西、内蒙古、西藏、青海和新疆目前尚无白名单企业.

表 3 白名单企业及其回收处理能力分布

Table 3 Whitelisted enterprises and the distribution of their recycling and processing capacities

区域	省(自治区、直辖市)	白名单企业数量	回收处理能力(万 t)	
			再生利用	梯次利用
东北地区	吉林	2	6.5	0.5
华东地区	上海	6	0.5	5.8
	江苏	7	1.5	17.5
	浙江	9	14.5	10.9
	安徽	12	23	27
	福建	8	15.5	7
	江西	18	63	14.7
	山东	5	0	7.6
华北地区	北京	1	未公布	
	河北	7	1.3	20
	天津	5	1.2	7.2
华中地区	河南	8	18	17.6
	湖北	7	15	3.1
	湖南	18	33.8	43.7
华南地区	广东	20	7.5	80.75
	广西	5	0.5	3.3
	海南	1	未公布	
西南地区	四川	2	0	1.7
	贵州	6	21	0
	云南	2	7.5	0
	重庆	3	0	2.6
西北地区	陕西	1	3	
	甘肃	2	10.5	0
	宁夏	1	1.2	0

注:回收处理能力的数据来源于各省(自治区、直辖市)白名单企业公布的数据.其中,对于未明确提供回收处理重量的省(自治区、直辖市),依据相关文献[32-34]中的动力电池参数进行了科学合理的换算,以确保数据的准确性和完整性.

2.4.2 白名单企业回收处理能力的空间匹配情况 根据上述白名单企业数量及处理能力情况可知,白名单企业在不同地区的分布存在差异.当前退役三元锂电池的再生利用率为 93%,退役磷酸铁锂电池的再生利用率为 66%.在此背景下,进一步以 31 省(自治区、直辖市)白名单企业处理能力为基础,对其 2023−2035 年的退役动力电池回收处理能力与动力电池退役量之间的匹配情况进行分析.

根据当前的动力电池退役量可知,我国白名单企业回收处理能力整体存在产能过剩情况,但在空间分布上还存在一定错位性,如黑龙江、辽宁、山西、内蒙古、西藏、青海和新疆七个省、自治区尚无白名单企业,但当前这 7 个省、自治区的动力电池退役量不大可以通过跨区域运输实现有效处理.山东、北京、海南、四川和重庆 5 个省(自治区)尚无再生利用企业,贵州、云南、甘肃和宁夏四个省(自治区)尚无梯次利用企业.

未来,随着动力电池退役量的逐年增加,当前我国白名单企业总回收处理能力可有效覆盖至 2035 年的退役动力电池处理需求,至 2035 年整体回收处理能力仍存在 87.78 万 t 的过剩处理能力.具体从再生利用和梯次利用产能来看,我国再生利用整体产能将从 2032 年出现缺口,整体缺口量由 2032 年的 23.03 万 t 增至 2035 年的 93.19 万 t,梯次利用 2035 年仍将存在 180.97 万 t 的过剩产能.对于再生利用产能(如表 4 所示),自 2025 年起上海、江苏、河北、广西、天津、广东、浙江、云南、河南的动力电池再生利用处理能力将逐步不能满足其本省、直辖市内的退役动力电池处理需求,空间分布的错位性进一步加剧.具体来看,上海、江苏、河北、广西最先开始出现缺口并逐年扩大,分别由 2025 年的 2.53 万 t、1.51 万 t、0.11 万 t 和 0.87 万 t 增加至 2035 年的 14.63 万 t、27.12 万 t、10.51 万 t 和 6.75 万 t.天津和广东自 2026 年开始出现缺口,缺口量分别由 2026 年的 0.53 万 t 和 0.93 万 t 增加至 2035 年的 10.06 万 t 和 38.72 万 t.浙江自 2030 年开始出现缺口,至 2035 年缺口量达到 16.92 万 t.云南自 2033 年开始出现少量缺口,至 2035 年缺口量为 0.98 万 t.河南 2035 年出现缺口情况,缺口量为 0.67 万 t.对于梯次利用产能,仅吉林和四川两个省份面临少量产能缺口,至 2035 年缺口量分别达到 1.52 万 t 和 2.68 万 t.

综上所述,上海、江苏、河北、广西、天津和广东退役动力电池再生利用处理能力缺口量较大且增长显著,应尽早规划和投入资金来提升再生利用处理能力,以避免缺口进一步扩大.浙江短期内能够覆盖再生利用动力电池量,但从长期来看存在较大缺口,需提前规划回收处理产能布局,以满足处理需求.其余省(自治

区、直辖市)的再生利用和梯次利用缺口量相对较小,可通过适当增加回收处理能力的布局或跨区域运输等进行回收处理,充分利用现有资源的同时也能保证退役动力电池得到合理回收和处理.

表 4　2025~2035 年我国动力电池再生利用处理能力与需求匹配情况

Table 4　Matching between the recycling and processing capacity of power batteries and the demand in China from 2025 to 2035

年份	整体过剩量/缺口量	回收处理能力存在缺口的省(自治区、直辖市)及其缺口量	
	(万 t)	省份缺口量(万 t)	省、自治区、直辖市
2025	203.98	5.03	上海、江苏、河北、广西
2026	183.43	10.32	上海、江苏、河北、广西、天津、广东
2027	156.67	19.10	上海、江苏、河北、广西、天津、广东
2028	126.02	28.71	上海、江苏、河北、广西、天津、广东
2029	91.76	39.18	上海、江苏、河北、广西、天津、广东
2030	53.25	54.59	上海、江苏、河北、广西、天津、广东、浙江
2031	12.89	71.04	上海、江苏、河北、广西、天津、广东、浙江
2032	−23.03	85.53	上海、江苏、河北、广西、天津、广东、浙江
2033	−52.58	97.08	上海、江苏、河北、广西、天津、广东、浙江、云南
2034	−75.69	107.36	上海、江苏、河北、广西、天津、广东、浙江、云南
2035	−93.19	116.30	上海、江苏、河北、广西、天津、广东、浙江、云南、河南

需要说明的是,本研究中的退役动力电池退役量数据仅针对新能源乘用车,可能导致分析结果低于我国实际退役动力电池总量,考虑这一因素,未来至 2035 年白名单企业整体的处理能力不一定过剩,且各省(自治区、直辖市)的缺口量可能会高于目前估算量.

3　结论

3.1　2012~2035 年我国动力电池退役量呈先快后慢的增长趋势,前期(2012~2017 年)累计退役量仅 0.44 万 t;2017 年后退役量快速攀升,至 2035 年动力电池退役量增至 427.67 万 t;相应的 2012~2017 年间关键金属资源 Li、Co、Ni 存量仅为 0.03 万 t,2017 年后快速增长至 2035 年的 14.31 万 t.

3.2　当前我国动力电池退役量以及关键金属资源累计存量主要集中在华东、华北、华中、华南地区.其中,广东、浙江、山东、北京、上海、河南 6 个省、直辖市的动力电池退役量及关键金属资源累计存量较多,西藏、青海、宁夏、黑龙江、新疆和内蒙古 6 个省、自治区的相关退役量及资源累计存量占全国总量比重低.至 2035 年,江苏省替代北京进入退役动力电池及其所含关键金属资源累计存量最多的六个省(自治区、直辖市)行列;内蒙古将退出退役量与资源累计存量最少的 6 个省(自治区)之列.

3.3　我国 31 个省(自治区、直辖市)的退役动力电池及其所含关键金属资源累计存量在当前及未来至 2035 年情景下,分布格局均呈现显著空间聚集性.当前高−高集聚区主要在东部沿海省份(如上海、江苏);低−低集聚区集中于西北与东北地区(如新疆、青海、吉林等).至 2035 年,高−高集聚区范围呈扩散效应(新增安徽),低−低集聚区缩小,四川由低−低转变为高−低集聚区,而福建、江西、海南集聚情况未明显变化.

参考文献:

[1] Neubauer J, Pesaran A. The ability of battery second use strategies to impact plug−in electric vehicle prices and serve utility energy storage applications [J]. Journal of Power Sources, 2011,196(23):10351−10358.

[2] Mrozik W, Rajaeifar M A, Heidrich O, et al. Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium−ion batteries [J]. Energy and Environmental Science, 2021,14:6099−6121.

[3] Zhang Q, Li X, Du Z, et al. Aging performance characterization and state−of−health assessment of retired lithium−ion battery modules [J]. Journal of Energy Storage, 2021,40:102743.

[4] Ahmadi L, Fowler M, Young B S, et al. Energy efficiency of Li−ion battery packs re−used in stationary power applications [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2014,8:9−17.

[5] Yaocai B, Nitin M, Kook Y S, et al. Energy and environmental aspects in recycling lithium−ion batteries: Concept of battery identity global passport [J]. Materials Today, 2020,41:304–315.

[6] B J D, Linda G, John S, et al. Impact of recycling on cradle−to−gate energy consumption and greenhouse gas emissions of automotive lithium−ion batteries [J]. Environmental science & technology, 2012, 46(22):12704−12710.

[7] Hao H, Qiao Q, Liu Z, et al. Impact of recycling on energy consumption and greenhouse gas emissions from electric vehicle production: the China 2025 case [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017,122:114–125.

[8] Laura L, Tom C, Ali M R, et al. Financial viability of electric vehicle lithium-ion battery recycling [J]. iScience, 2021,24(7):102787.

[9] Xiong S, Ji J, Ma X. Environmental and economic evaluation of remanufacturing lithium batteries from electric vehicles [J]. Waste Management, 2020,102:579–586.

[10] Li J, Wang Y, Tan X. Research on the classification method for the secondary uses of retired lithium-ion traction batteries [J]. Energy Procedia, 2017,105:2843-2849.

[11] Ali M R, Marco R, Bernhard S, et al. Life cycle assessment of lithium - ion battery recycling using pyrometallurgical technologies [J]. Journal of Industrial Ecology, 2021,25(6):1560-1571.

[12] Zeng X, Ali S H, Tian J, et al. Mapping anthropogenic mineral generation in China and its implications for a circular economy [J]. Nature communications, 2020,11:1544.

[13] Liu W, Liu W, Li 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.

[14] Yang H, Song X, Zhang X, et al. Uncovering the in-use metal stocks and implied recycling potential in electric vehicle batteries considering cascaded use: A case study of China [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021,28(33):45867-45878.

[15] Jessica D, Margaret S, Alissa K, et al. Circularity of Lithium-Ion Battery Materials in Electric Vehicles [J]. Environmental science & technology, 2021,55(8):5189-5198.

[16] Richa K, Babbitt W C, 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.

[17] Shafique M, Rafiq M, Azam A, et al. Material flow analysis for end-of-life lithium-ion batteries from battery electric vehicles in the USA and China. Resources, Conservation and Recycling, 2022,178: 106061.

[18] Francine C D, Laura C, Mentore V. End-of-life automotive lithium-ion batteries (LIBs) in Brazil: Prediction of flows and revenues by 2030 [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 169:105522.

[19] 姚沛帆,黄 庆,张西华,等.中国退役动力电池中关键资源回收潜力研究 [J]. 稀有金属, 2022,46(10):1331-1339.
Yao P F, Huang Q, Zhang X H, et al. Recycling Potentials of Critical Resources from Spent Lithium-Ion Power Batteries in China [J]. Chinese Journal of Rare Metals. 2022,46(10):1331-1339.

[20] 李建西.退役动力电池循环利用的物质代谢特征及生态效率研究 [D]. 上海:上海第二工业大学, 2022.
Li J X. Metabolic characteristics and eco-efficiency of retired power battery recycling [D]. Shanghai: Shanghai Polytechnic University, 2022.

[21] Qiao D, Wang G, Gao T, 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, 2021,764:142835.

[22] Yao P, Zhang X, Wang Z, et al. The role of nickel recycling from nickel-bearing batteries on alleviating demand-supply gap in China's industry of new energy vehicles [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021,170:105612.

[23] 刘 敏.中国锂离子电池系统中金属再生潜力及其环境效益研究 [D]. 济南:山东大学, 2024.
Liu M. Study on the recycling potentials of metals and their environmental benefits in lithium-ion battery system in China [D]. Jinan: Shandong University, 2024.

[24] 吴文斌.动力电池退役预测分析-区域分布(2022 年)[EB/OL]. https://www.toutiao.com/article/7234433063428571681/?upstream_biz=doubao&source=m_redirect. 2023-05-18.
Wu W B.Retired power battery prediction and analysis - Regional distribution(2022).[EB/OL]. https://www.toutiao.com/article/7234433063428571681/?upstream_biz=doubao&source=m_redirect. 2023-05-18.

[25] Hu S, Jiang X, Zhao F, et al. Mathematical Model and Prediction Analysis of Automobile Power Battery Decommissioning Based on Weibull Distribution [J]. Academic Journal of Mathematical Sciences, 2023,4(1):61-66.

[26] 孟 微.上海大都市圈动力电池逆向物流网络规划研究 [D]. 镇江:江苏大学, 2023.
Meng H. Research on reverse logistics network planning of power battery in Shanghai metropolitan area [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023.

[27] 黄 达.新能源汽车动力电池逆向物流网络设施选址研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2024.
Huang D. Research on location selection of reverse logistics network facilities for new Energy vehicle power batteries [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2024.

[28] Tomasz C, Stanisław O. High Precision LSTM Model for Short-Time Load Forecasting in Power Systems [J]. Energies, 2021,14(11): 2983-2983.

[29] Elmahdy E E. A new approach for Weibull modeling for reliability life data analysis [J]. Applied Mathematics and Computation, 2015,250: 708-720.

[30] 中国科学院过程工程研究所,资源强制回收产业技术创新战略联盟.中国退役动力电池循环利用技术与产业发展报告 [M]. 北京:科学技术文献出版社, 2019.
Institute of Process Engineering, Alliance for Technology and Innovation in Resource Recycling.Report on the recycling technology and industrial development of retired power batteries in China. [M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 2019.

[31] 任建宁.基于车载传感器的关中典型城市道路环境颗粒物污染特征与表征方法研究 [D]. 北京:中国环境科学研究院, 2022.
Ren J N. Study on pollution characteristics and characterization methods of particulate matter in road environment of typical cities in Guanzhong based on vehicle-mounted sensors [D]. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2022.

[32] Deng Y, Li J, Li T, et al. Life cycle assessment of lithium sulfur battery for electric vehicles [J]. Journal of Power Sources, 2017,343:284-295.

[33] Ellingsen A L, Majeau-Bettez G, Singh B, et al. Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack [J]. Journal of Industrial Ecology, 2014,18(1):113-124.

[34] 刘凯辉.比亚迪 E6 纯电动汽车全生命周期评价 [D]. 福州:福建农林大学, 2016.
Liu K H. Life cycle assessment of BYD E6electric vehicle [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016.

作者简介: 侯思雨(2000-),女,山东聊城人,硕士研究生,主要研究方向为退役动力电池资源化,生命周期评价及应用.1954563016@qq.com.