

基于生命周期评价的纯电动汽车环境影响和碳足迹分析

宋晓聪¹, 邓陈宁¹, 沈鹏¹, 钱怡², 谢明辉^{1*}

1. 中国环境科学研究院, 国家环境保护生态工业重点实验室, 北京 100012
2. 墨尔本大学, 维多利亚 3010

摘要: 为探究新能源汽车中纯电动汽车环境影响和碳足迹, 实现交通运输领域绿色低碳发展, 本文以纯电动汽车为例, 采用生命周期评价方法, 量化评估纯电动汽车环境影响和碳足迹, 构建清洁电网、能效提升和电池回收3种低碳减排情景, 评估不同减排路径对新能源汽车行业的碳减排效果。结果表明: ①1辆纯电动汽车生命周期内环境影响潜值和碳足迹分别为1288.81 Pt和25.02 t, 行驶150000 km的碳排放强度为0.17 kg/km(以CO₂计), 此外, 环境影响类别由大到小依次为呼吸系统影响>化石燃料>气候变化>矿产资源>生态毒性>致癌>酸化和富营养化。②纯电动汽车碳足迹分布特征与环境影响相似, 原材料获取、运行使用阶段的环境影响潜值以及碳排放量合计均占环境影响总潜值和碳足迹的96%, 这两阶段是纯电动汽车减污降碳的重点环节。③低碳减排情景中, 清洁电网情景和使用能效情景下纯电动汽车分别可实现17.64%和12.51%的减碳潜力, 回收废旧电池中的有价金属, 仅实现约2%的碳减排潜力, 因此, 通过优化电力结构和提高动力系统使用能效相比于电池回收具有更优的碳减排效益。

关键词: 生命周期评价; 新能源汽车; 环境影响; 碳足迹

中图分类号: X713

文章编号: 1001-6929(2023)11-2179-10

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2023.08.15

Environmental Impact and Carbon Footprint Analysis of Pure Electric Vehicles Based on Life Cycle Assessment

SONG Xiaocong¹, DENG Chenning¹, SHEN Peng¹, QIAN Yi², XIE Minghui^{1*}

1. State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-Industry, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China
2. The University of Melbourne, Victoria 3010, Australia

Abstract: In order to investigate the environmental impact and carbon footprint of electric vehicles and achieve green and low-carbon development in the transportation industry, this article took electric new energy vehicles as an example and used life cycle assessment method to quantitatively evaluate the environmental impact and carbon footprint of electric vehicles. Three low-carbon emission reduction scenarios were constructed, including clean power grid, energy efficiency of power system use, and battery recycling, to evaluate the carbon emission reduction effects of different emission reduction paths on the new energy vehicle industry. The results showed that: (1) The potential environmental impact and carbon footprint of an electric vehicle during its lifecycle were 1,288.81 Pt and 25.02 t, respectively. The carbon emission per 1km of 150,000 km was 0.17 kg/km (calculated as CO₂). In addition, the environmental impact categories from large to small were respiratory inorganics > fossil fuels > climate change > minerals > ecotoxicity > carcinogenic effects > acidification and eutrophication. (2) The carbon footprint distribution characteristics and environmental impacts of electric vehicles were similar. The total environmental impact and carbon emissions during the raw material acquisition and operation stages account for 96% of the total environmental impact and carbon footprint. These two stages were the main links for reducing pollution and carbon emissions of

收稿日期: 2023-05-18 修订日期: 2023-08-06

作者简介: 宋晓聪(1992-), 女, 河北石家庄人, 工程师, 硕士, 主要从事生命周期影响评价、碳核算、固体废物资源化研究, 2634145277@qq.com.

* 责任作者, 谢明辉(1981-), 男, 安徽淮北人, 研究员, 博士, 主要从事污染源管理、生命周期评价研究, xiemh@craes.org.cn

基金项目: 中国环境科学研究院国家环境保护生态工业重点实验室开放基金项目(No.2022KFF-06); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(No.2022YSKY-09); 中华环境保护基金会汽车环保创新引领计划项目

Supported by Open Research Fund of State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-Industry, Chinese Research Academy of Environmental Sciences (No.2022KFF-06); Fundamental Research Funds for the Central Public-Interest Scientific Institution, China (No.2022YSKY-09); China Environmental Protection Foundation Automotive Environmental Protection Innovation Leading Program

electric vehicles. (3) In the low-carbon emission reduction scenario, electric vehicles could achieve a carbon reduction potential of 17.64% and 12.51% in the clean power grid scenario and the use of energy efficiency scenario, respectively. Recycling valuable metals from waste batteries only achieved about 2% of the carbon reduction potential. Therefore, optimizing the power structure and improving the energy efficiency of power system use had better carbon reduction benefits compared to battery recycling.

Keywords: life cycle assessment; new energy vehicle; environmental impact; carbon footprint

近年来我国新能源汽车行业迅速发展,新能源汽车保有量已占全球 50% 左右,巨大的汽车拥有量使得运输行业对资源和环境产生了巨大的影响,该行业也成为造成能源消耗和气候变化的主要因素^[1-3].我国多次在公开会议上作出碳达峰、碳中和的郑重承诺,同时也对交通领域减污降碳提出了新要求^[4].虽然新能源汽车在行驶过程中可以做到清洁、低碳、无污染,但从全生命周期视角来看,新能源汽车的环境影响和碳足迹如何?是否较传统的燃油汽车更环保、低碳?这都需要从全生命周期角度,对新能源汽车生产制造、行驶、报废处置等阶段进行全面系统的分析,科学合理测算环境影响和碳足迹,从而为我国新能源汽车产业绿色低碳发展提供借鉴与支撑.

国外已有许多学者对新能源汽车开展生命周期评价研究.美国是最早开始此研究的,早在 2008 年 Samaras 等^[5]对插电式混合动力汽车的汽车生产、电池生产和汽车使用 3 个过程进行生命周期评价.随着新能源汽车行业发展,生命周期评价研究的内容也不断拓展.一方面评价的新能源汽车车型更多,如 Gao 等^[6]对美国燃料电池汽车、电动和混合动力汽车进行生命周期评价,并提出混合动力汽车环境效益最佳的结论;另一方面是对不同电力结构下新能源汽车使用的比较,如 Onat 等^[7]对美国 50 个州的普通汽车、电动汽车、插电式混合动力汽车、混合动力汽车进行生命周期评价,发现电动汽车和混合动力汽车分别是碳减排和节能的首选.欧洲国家在此领域的研究稍晚一些,最初的研究也是聚焦在新能源汽车车型上,如 Tagliaferri 等^[8]对本地电动汽车和普通燃油汽车在能源消耗、温室气体排放、毒性等方面进行了生命周期评价,发现电动汽车最主要的环境负荷是毒性,而温室气体排放仅是普通燃油汽车的一半.而后的研究也开始聚焦电力结构的影响,如 Burchart-Korol 等^[9]对当地电动汽车进行了生命周期评价,结果发现电力结构导致当地新能源汽车使用阶段产生的人体毒性和颗粒物等均高于燃油汽车. Shafique 等^[10]比较分析了 10 个国家不同电力情景下纯电动汽车的生命周期影响.近几年由于电池技术的发展以及人们对报废后新能源汽车电池的关注,生命周期评价的内容开始涵

盖电池处置过程, Marques 等^[11]对新能源汽车进行生命周期评价时,将电池的回收处置纳入到评价边界中.国内学者也依托国外生命周期评价模型对新能源汽车开展研究, Shen 等^[12]对中国不同新能源车型进行了生命周期评价; Wu 等^[13]比较了不同电力结构情景下新能源汽车和燃油汽车的温室气体排放情况;赵子贤等^[14]基于中国不同省份的火力发电比例,分析影响私人纯电动汽车生命周期碳减排的影响因素;王嘉诚等^[15]从生命周视角评估了省级范围内纯电动汽车的碳排放差异情况; Qiao 等^[16]发现纯电动汽车比燃油汽车的生命周期碳排放低 18%;付佩等^[17]量化分析了 5 种新能源汽车的全生命周期碳排放情况,缺少致癌、生态毒性和化石燃料等其他类别环境影响分析.

综合来看,中国现有的大多数研究借助国外生命周期评价模型进行评价,导致评价结果并不能反映我国的真实水平,杨建新等^[18]建立了我国环境影响类型的基准体系和加权体系,但是基准值基于 1990 年,数据一直未更新.此外,我国现有关于新能源汽车生命周期评价的研究多集中在温室气体排放和全球变暖潜力上,环境影响评价的研究年份比较老旧,且汽车整体环境影响和碳足迹的综合分析较少.因此,本文建立适用于我国汽车行业的本地化终点类生命周期影响评价模型,以新能源汽车中的纯电动汽车为例,量化评估纯电动汽车的环境影响和碳足迹,此外,构建清洁电网、能效提升和电池回收 3 种低碳减排情景,评估不同减排路径对新能源汽车行业的碳减排效果,以期为新能源汽车生命周期环境管理和行业绿色低碳发展提供科技支撑.

1 材料与方法

1.1 评价对象

以纯电动汽车为评价对象,根据销量选取一款“*A*级”汽车^[19]为代表进行全生命周期环境影响和碳足迹分析.车型的详细参数见表 1,车辆采用电池类型为磷酸铁锂电池.

1.2 系统边界和功能单位

评价范围包括汽车的车辆周期和燃料周期在内的全生命周期阶段,其中,汽车的车辆周期包括原材

表 1 车型参数

Table 1 Parameters of vehicle type

参数	数值	
汽车质量/kg	车身	623.10
	底盘	708.83
	动力系统	708.48
	液体流体	25.98
动力电池容量/Ah	75	
驱动电机总功率/kW	160	
电耗/[kW·h/(100 km)]	13	

料获取、整车制造装配、车辆运行使用和报废回收阶段; 燃料周期包括燃料的生产和使用两个阶段, 主要考虑电力的生产和传输过程, 系统边界具体见图 1。

以一辆车运行 150 000 km 为功能单元^[20-21], 在进行各阶段的比较分析时, 都量化为行驶 1 km 的全生命周期环境影响进行比较。

1.3 生命周期评价方法

本文参考李雪迎等^[22]建立的我国本地化终点破坏型生命周期环境影响评价模型, 选取相关指标构建

了我国汽车行业生命周期影响评价模型, 详细模型参数见表 2^[22-23]。

1.4 不确定性分析

纯电动汽车行业环境影响和碳足迹核算需要大量活动水平数据以及排放因子数据, 数据因为时空异质等因素存在不确定性, 进而会对最终核算结果准确性产生影响。因此本文基于误差传播方程^[24]对纯电动汽车生命周期清单数据的不确定性进行分析, 以确保纯电动汽车环境影响和碳足迹核算结果的准确性。

$$CE_{ij} = \sqrt{(CT_{ij})^2 + (CR_{ij})^2} \quad (1)$$

$$C_{total} = \frac{\sqrt{(CE_1 \times E_1)^2 + (CE_2 \times E_2)^2 + \dots + (CE_i \times E_i)^2}}{E_1 + E_2 + \dots + E_i} \quad (2)$$

式中: CE_{ij} 为第 i 个阶段中第 j 种环境影响类别或碳源估算的不确定性, %; CT_{ij} 为第 i 个阶段中第 j 种碳源核算所用排放因子的不确定性, %; CR_{ij} 为第 i 个阶段中第 j 种环境影响类别或碳源核算所用活动水平数据的不确定性, %; C_{total} 为环境影响总潜值或碳足

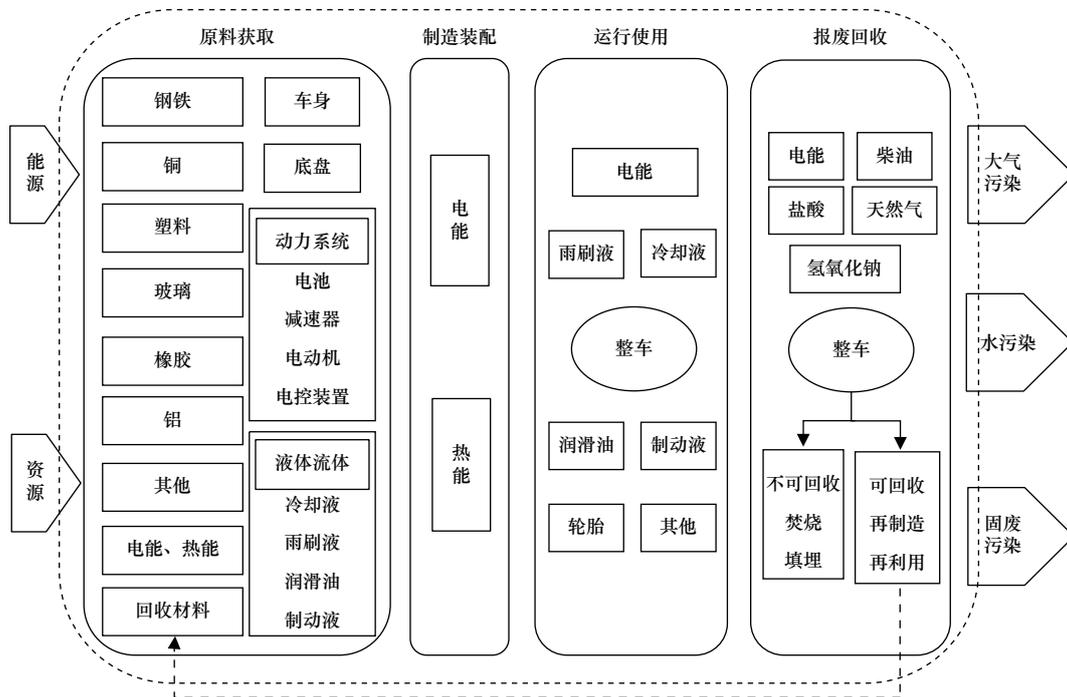


图 1 纯电动汽车全生命周期的系统边界

Fig.1 The system boundary of the whole life cycle of pure electric vehicles

表 2 汽车行业生命周期评价模型参数^[22-23]

Table 2 Parameters of life cycle assessment model for automobile industry^[22-23]

影响类别	单位	人均基准值(NF _j)	权重因子(DF _j)
人体健康(致癌、呼吸系统影响、气候变化)	DALY	1.51×10 ⁻²	0.60
生态系统(生态毒性、酸化和富营养化)	PDF	1.19×10 ³	0.25
资源(矿产资源、化石燃料)	MJ	2.47×10 ³	0.15

迹核算结果的不确定性, %; CE_i 为第 i 个阶段的不确定性, %; E_i 为第 i 个阶段不同环境影响类别或碳源的量, Pt 或 t.

2 清单分析

本文所采集的数据大部分是通过现场调查获得, 部分参考本地化研究, 对于参考本地化研究的已列明相关文献, 此外, 难以获取和非主要清单数据来自 Ecoinvent 数据库, 并对其中的主要能源清单 (如煤、电和天然气等) 进行了本地化数据替换.

2.1 原料获取阶段

纯电动汽车主要包括车身、底盘、动力系统、液体流体四大系统. 四个系统组成材料质量情况以及各部件生产制造能耗情况见表 3、表 4 和表 5.

表 3 纯电动汽车组成材料质量

Table 3 Quality of composition materials of battery electric vehicles

部件	质量/kg	
车身	钢	489.33
	铜	13.90
	塑料	144.05
	橡胶	3.36
	玻璃	47.45
	油漆	14.00
	有机物	13.84
	铝	5.41
	镁	0.29
	锌	0.12
	其他	0.17
底盘	钢	436.90
	铜	13.14
	塑料	28.40
	橡胶	49.31
	有机物	9.72
	铝	42.59
	铁	37.24
	其他	3.10
动力系统 ¹⁾	动力电池	481.9
	驱动电机	93.12
	减速器	44
	电控装置	79
液体流体	26	

注: 1) 动力系统数据参考文献 [21,25-26], 其他数据均为现场调研获得.

2.2 制造装配阶段

整车装配是一个极其复杂的过程, 所涉及主要能耗程序包括喷漆、焊接、加热、照明等^[31], 总能耗约 4 973.85 MJ/辆, 包括底盘、动力电池、电机、电控、

表 4 动力电池组成材料质量^[21]

Table 4 Quality of power battery composition materials^[21]

部件	质量/kg	
正极	磷酸铁锂(LiFePO ₄)	106.0
	聚偏氟乙烯(PVDF)	14.5
	N-甲基吡咯烷酮(NMP)	4.8
负极	铝基体	24.1
	石墨	48.2
	聚偏氟乙烯(PVDF)	4.8
	N-甲基吡咯烷酮(NMP)	9.6
	铝基体	38.6
电解液	六氟磷酸锂(Li PF ₆)	9.6
	碳酸乙烯酯(EC)	19.3
	二甲基碳酸酯(DMC)	19.3
隔膜	聚丙烯(PP)	7.2
	聚乙烯(PE)	7.2
壳体	聚丙烯(PP)	19.3
	铝	135.0
电池管理系统	钢	4.8
	铜	4.8
	电路板	4.8

表 5 纯电动汽车各部件生产制造能耗量

Table 5 Energy consumption in production and manufacturing of various parts of battery electric vehicles

部件	电能/(MJ/kg)	热能/(MJ/kg)	数据来源	
玻璃	84.7	—	文献[21-22,27]	
前盖总成	1.48	—		
顶盖总成	1.19	—		
翼子板及侧围	5.08	—		
行李箱盖总成	3.18	—		
前侧面车门总成	1.97	—		
后侧面车门总成	1.97	—		
电池支架总成	1.01	—		
前围总成	1.15	—		
后围总成	1.15	—		
地板总成	4.29	—		
车辆总装	0.74	—		
悬架弹簧	0.21	2.77		
轮辋	2.68	—		
底盘	轮辐	1.26	—	文献[28]
	轮胎	2.35	—	
	车轮装配	0.08	—	
动力系统	动力电池	42.13	—	文献[21,29]
	驱动电机	5.03	1.82	
	减速器	6.93	4.14	
	电控装置	1.37	—	
液体流体	66.92	—	文献[29-30]	

减速器、液体流体和车身制造装备。

2.3 运行使用阶段

使用阶段主要涉及电力消耗和零件更换。根据工信部数据, 纯电动汽车的电耗为 13 kW·h/(100 km), 汽车在使用阶段的能耗为 19 500 kW·h。在零件更换方面主要考虑流体液体的更换, 假设汽车每行驶 40 000 km 更换一次流体液体, 则使用阶段消耗 33.14 kg 流体液体^[21,32]。

2.4 报废回收阶段

考虑到汽车经过使用会产生磨损, 设定汽车回收时质量折损 2%^[21], 重点关注退役金属(钢、铝、铁、铜)的回收, 相应的回收率及回收能源消耗情况见表 6。考虑到中国企业还未实现动力电池中有价值金属的大规模回收, 同时相关数据的透明度不高^[34], 本文暂未考虑电池的回收。

表 6 金属二次回收参数

Table 6 Parameters of metal secondary recovery

金属类型	回收率 ^[21] /%	回收量/kg	能源消耗 ^[33] /MJ		
			煤	天然气	电力
钢	90	793.59	—	15.87	3 356.89
铝	92	36.70	—	5.51	29.36
铁	80	34.15	281.40	—	76.50
铜	90	32.19	—	—	307.09

3 结果与讨论

3.1 纯电动汽车环境影响分析

纯电动汽车全生命周期影响评价结果如图 2 所示。由图 2 可知, 从生产到报废的环境影响总潜值为 1 288.81 Pt, 1 辆纯电动汽车生命周期内环境影响类

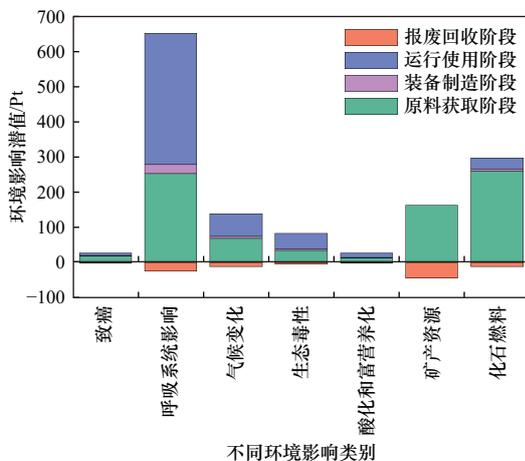


图 2 纯电动汽车不同生命周期阶段的环境影响潜值

Fig.2 Environmental impact potential of battery electric vehicles at different life cycle stages

别由大到小依次为呼吸系统影响>化石燃料>气候变化>矿产资源>生态毒性>致癌>酸化和富营养化, 纯电动汽车生命周期内环境影响主要集中在呼吸系统影响 (626.70 Pt)、化石燃料 (286.22 Pt)、气候变化 (126.68 Pt) 和矿产资源 (118.51 Pt) 4 个方面, 以上 4 种环境影响潜值合计占纯电动汽车生命周期内环境影响总潜值的 90%。

从纯电动汽车不同生命周期阶段的环境影响分析 (见图 2) 发现, 呼吸系统影响又主要分布在纯电动汽车原材料获取和运行使用阶段, 这两阶段对呼吸系统影响的贡献达到 96%, 这是因为纯电动汽车在原材料获取和运行使用时消耗能源并排放大量的大气污染物所致^[35]; 气候变化影响的分布与呼吸系统影响相同, 原材料获取和运行使用两阶段气候变化环境影响潜值为 133.25 Pt, 占报废回收前气候变化环境影响总潜值的 96%。此外, 由于纯电动汽车包含大量的零部件, 其生产制造能耗巨大^[36], 使得化石燃料影响集中在原料获取阶段。报废回收阶段因为部分金属回收减少了资源消耗, 进而主要降低了矿产资源影响。

原材料获取阶段环境影响潜值占纯电动汽车全生命周期环境影响总潜值的一半以上, 该阶段由车身、底盘、动力系统和液体流体 4 个部分组成, 所对应的环境影响潜值贡献占比结果如图 3 所示。由图 3 可知, 动力系统的环境影响潜值占据了整车原材料获取阶段环境影响总潜值的绝大部分 (73.81%), 相当于整车环境影响的 46%, Shafique 等^[10]发现相似的结论, 锂电池生产的环境影响潜值占整车环境影响总潜值的 45% 以上; 其次是底盘和车身, 均占原材料获取阶段环境影响总潜值的 13% 左右; 液体流体主要为制动液、制冷液等使用, 仅占 0.93%。这主要是因为纯电动汽车动力系统生产需要电解液六氟磷酸锂, 还需要大量金属铝作为包箱体和基底, 且为了保证续航里程, 电池系统往往重量较大^[37], 因此实现汽车行业绿色可持续发展需要重视新纯电动汽车动力系统的轻量化和高效化。

将各环境影响类别加和到对应的终点破坏类别, 结果如表 7 所示。纯电动汽车全生命周期对环境的影响主要集中在人体健康和资源衰竭方面, 环境影响潜值分别为 779.59 和 404.75 Pt, 分别占全生命周期环境总影响总潜值的 60.50% 和 31.41%, Luo 等^[38]发现, 35% 的环境健康风险是由车辆排放的 PM_{2.5} 和 O₃ 引起的, 所以纯电动汽车在减少大气污染物排放方面具有较大的潜力^[39], 此外, 通过回收利用报废纯电动汽车的有价金属可降低约 8% 的环境影响。同时利用

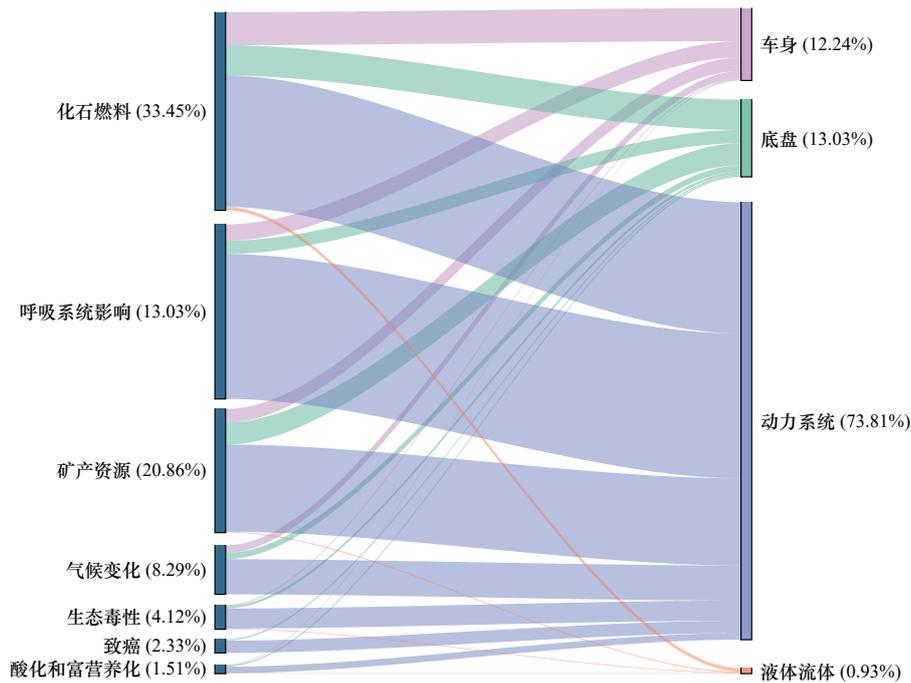


图 3 原料获取阶段纯电动汽车各部件环境影响潜值占比

Fig.3 Proportion of potential environmental impact values of various components of battery electric vehicles at the stage of raw material acquisition

Recipe 方法计算纯电动汽车全生命周期环境影响, 结果显示人体健康、生态系统和资源衰竭方面环境影响潜值分别为 1 178.68、94.23、577.03 Pt, 虽然本模

型环境影响计算结果与 Recipe 方法有所差异, 但是两种方法结果均显示纯电动汽车全生命周期环境影响类别主要集中在人体健康和资源衰竭方面.

表 7 纯电动汽车不同生命周期阶段环境影响终点评价

Table 7 Environmental impact endpoint assessment of battery electric vehicles at different life cycle stages

影响类别	环境影响潜值/Pt				合计
	原料获取阶段	制造装配阶段	运行使用阶段	报废回收阶段	
人体健康	339.54	33.76	442.30	-36.01	779.59
生态系统	47.57	4.42	58.30	-6.13	104.17
资源衰竭	423.03	5.22	32.32	-55.82	404.75
合计	810.15	43.40	532.92	-97.97	1 288.50

3.2 纯电动汽车碳足迹分析

纯电动汽车全生命周期各阶段 CO₂ 排放量如图 4 所示. 一辆纯电动汽车碳足迹为 25.02 t, 行驶 150 000 km 的碳排放强度为 0.17 kg/km(以 CO₂ 计), 不同的研究纯电动车的碳足迹结果有所不同, 但是近年纯电动汽车碳排放强度基本在 0.17~0.23 kg/km (以 CO₂ 计)^[13,16] 之间, 纯电动汽车碳足迹与传统燃油汽车相比降低了 40%^[37]. 其中, 原材料获取和运行使用阶段碳排放占据主导地位, 分别产生 12.00 和 13.88 t CO₂, 分别占报废回收前纯电动汽车碳排放总量的 44% 和 52%. 中国以火电为主的发电结构, 致使纯电动汽车运行使用阶段碳排放占比最大^[13], 因此, 优化中国电力结构, 降低碳排放因子是新能源汽车行

业减碳的关键. 报废回收阶段因避免矿产资源开采、冶炼等诸多常规生产环节^[40] 产生 2.00 t 的碳减排效益, 降低约 7% 的碳减排量.

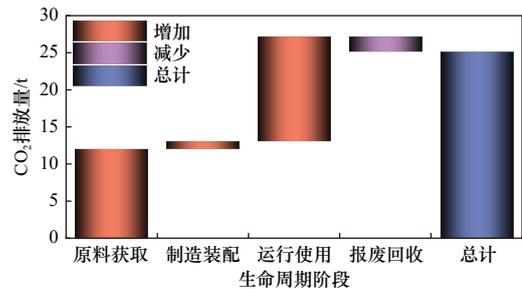


图 4 纯电动汽车不同生命周期阶段的碳排放

Fig.4 Carbon emissions of battery electric vehicles at different lifecycle stages

运行使用阶段主要为电耗带来的碳排放, 原材料获取阶段因纯电动汽车零部件较多需对各要素碳排放占比进一步分析, 如图 5 所示. 结果显示, 动力系统生产产生的碳排放位居新能源汽车原材料获取阶段第一位 (72.25%), 这主要与电池生产有关^[41]; 其次为车身的生产, 共排放 1.94 t CO₂, 占比为 16.17%; 底盘的获取排放约 1.33 t CO₂, 占比为 11.08%. 可以看出, 原材料获取阶段各要素的碳排放量与其环境影响潜值对应占比基本保持一致, 动力系统轻量化生产是未来新能源汽车行业减污降碳的重点.

3.3 低碳减排情景分析

为了进一步挖掘纯电动汽车的碳减排潜力, 设定清洁电网、能效提升和电池回收 3 种低碳减排情景, 与基准情景对比, 评估不同减排路径对新能源汽车行业的碳减排效果, 构建面向 2030 年的低碳减排情景

分析模型, 关键参数设置见表 8, 其中电池回收情景金属回收指在原来不考虑电池回收基础上增加的量.

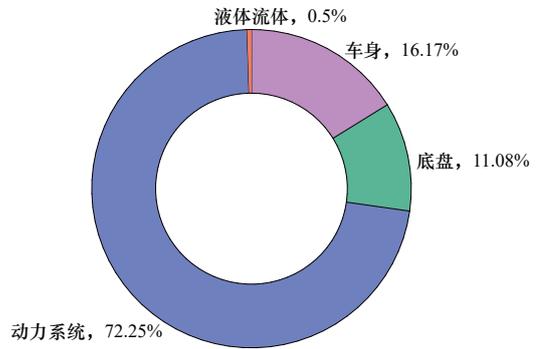


图 5 原料获取阶段纯电动汽车各部件碳排放占比
Fig.5 Proportion of carbon emissions from various components of battery electric vehicles in the stage of raw material acquisition

表 8 2030 年不同低碳减排情景下的关键参数设置

Table 8 Key parameter settings under different low-carbon emission reduction scenarios in 2030

项目	发电量/(10 ⁴ kW·h)	碳排放因子/[t/(kW·h)]	电耗/[kW·h/(100 km)]	金属回收率/%
清洁电网情景	火电	5.66×10 ⁸ [42]	0.84×10 ⁻³ [43]	
	水电	1.88×10 ⁸ [44]	0.003 5×10 ⁻³ [43]	
	核电	9.65×10 ⁷ [45]	0.012×10 ⁻³ [46]	
	风电	1.46×10 ⁸ [47]	0.025×10 ⁻³ [48-49]	
	太阳能发电	1.03×10 ⁸ [47]	0.036×10 ⁻³ [43]	
能效提升情景			10 ^[50]	
电池回收情景	锂			90 ^[51]
	铜			97 ^[52-53]
	铝			97 ^[52-53]

不同情景下纯电动汽车的碳足迹如图 6 所示. 通过回收废旧电池中的有价金属, 可以实现约 2% 的碳减排潜力, Xiong 等^[54] 研究发现, 电池回收过程中因为消耗大量能源使得实现的减碳效益较低, 当然有希望通过改进电池回收技术提高碳减排潜力^[55]. 清

洁电网情景和能效提升情景碳减排潜力相对较大, 在能效提升情景下, 电耗由 13 kW·h/(100 km) 降至 10 kW·h/(100 km) 时, 纯电动汽车生命周期碳排放比基准情景下降 12.51%; 在政策约束下通过优化电力结构, 提高清洁能源发电量 (占比约 50%) 实现 17.64% 的碳减排潜力.

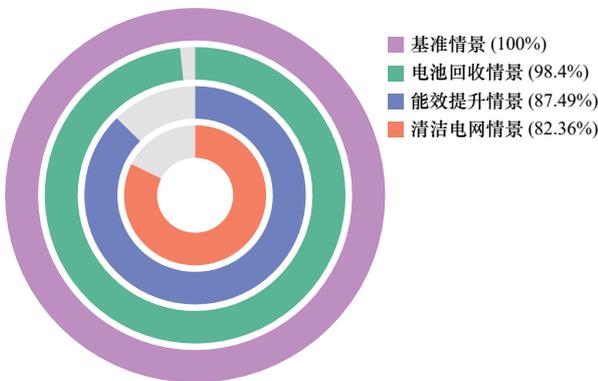


图 6 不同情景下纯电动汽车的碳足迹

Fig.6 Carbon footprint of battery electric vehicles under different scenarios

深度解析清洁电网情景和能效提升情景下纯电动汽车减碳的原因, 两种情景下纯电动汽车均是在运行使用阶段贡献了最大的碳减排潜力, 分别实现 3.40 和 3.13 t 的碳减排量 (见图 7), 分别占总减排量的 77.63% 和 100%, 说明通过优化电力结构, 提高电池使用能效, 在纯电动汽车报废回收前可实现碳排放量的降低. 此外, 清洁电网情景下原料获取阶段和制造装配阶段分别贡献 16.41% 和 5.96% 的减排潜力.

3.4 不确定性分析

本文基于误差传播方程量化评估了一辆纯电动汽车环境影响和碳足迹核算结果的不确定性. 参照张

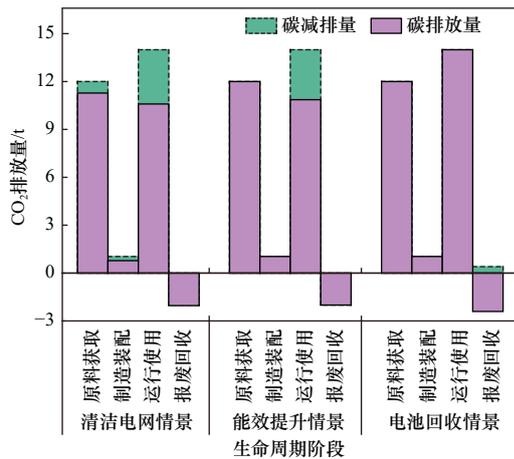


图7 不同情景下纯电动汽车生命周期碳减排量

Fig.7 Carbon emission reduction in the life cycle of battery electric vehicles under different scenarios

晓梅等^[56]研究,排放因子的不确定性和活动水平数据的不确定性分别取10%和5%。结果显示,一辆纯电动汽车环境影响和碳足迹核算结果不确定性分别为5%和7%,在合理范围内。

4 结论

a) 原材料获取和运行使用阶段是纯电动汽车减污降碳的重点环节。1辆纯电动汽车生命周期内环境影响潜值为1 288.81 Pt,环境影响类别由大到小为呼吸系统影响>化石燃料>气候变化>矿产资源>生态毒性>致癌>酸化和富营养化,原材料获取和运行使用阶段的呼吸系统影响和气候变化影响均贡献各自环境影响类别总量的90%以上,通过动力系统的轻量化和高效化,减少能源消耗降低大气污染物和温室气体排放,达到纯电动汽车减污降碳的目的。

b) 纯电动汽车碳足迹分布特征与环境影响相似,原材料获取和运行使用阶段碳排放合计占报废回收前纯电动汽车碳排放总量的96%。1辆纯电动汽车碳足迹为25.02 t,行驶150 000 km的碳排放强度为0.17 kg/km(以CO₂计),动力系统轻量化生产和电力结构优化分别是原材料获取和运行使用阶段减碳的关键。

c) 目前通过优化电力结构和提高动力系统使用能效相比于电池回收具有更优的碳减排效益。清洁电网情景和使用能效情景下纯电动汽车分别可实现17.64%和12.51%的减碳潜力,回收废旧电池中的有价金属,可以实现约2%的碳减排潜力。

参考文献 (References):

[1] CHEN Q W, LAI X, HOU Y K, et al. Investigating the environmental impacts of different direct material recycling and

battery remanufacturing technologies on two types of retired lithium-ion batteries from electric vehicles in China[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 308: 122966.

[2] 黄志辉, 纪亮, 尹洁, 等. 中国道路交通二氧化碳排放达峰路径研究[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(2): 385-393.

HUANG Z H, JI L, YIN J, et al. Peak pathway of China's road traffic carbon emissions[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(2): 385-393.

[3] 黎土煜, 余大立, 张洪申. 基于GREET的纯电动公交车与传统公交车全生命周期评估[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(10): 1653-1660.

LI T Y, YU D L, ZHANG H S. Using the GREET model to assess the life cycle of electric and conventional buses[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(10): 1653-1660.

[4] 杨儒浦, 王敏, 胡敬韬, 等. 工业园区减污降碳协同增效评价方法及实证研究[J]. *环境科学研究*, 2023, 36(2): 422-430.

YANG R P, WANG M, HU J T, et al. Spatio-temporal characteristics and influencing mechanism of synergistic effect of pollution and carbon emission reduction in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(2): 422-430.

[5] SAMARAS C, MEISTERLING K. Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from plug-in hybrid vehicles: Implications for Policy[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42: 3170-3176.

[6] GAO L, WINFIELD Z C. Life cycle assessment of environmental and economic impacts of advanced vehicles[J]. *Energies*, 2012, 5: 605-620.

[7] ONAT N C, KUCUKVAR M, TATARI O. Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? state-based comparative carbon and energy footprint analysis in the United States[J]. *Applied Energy*, 2015, 150: 36-49.

[8] TAGLIAFERRI C, EVANGELISTI S, ACCONCIA F, et al. Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: a cradle-to-grave systems engineering approach[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2016, 112: 298-309.

[9] BURCHART-KOROL D, PUSTEJOVSKA P, BLAUT A, et al. Comparative life cycle assessment of current and future electricity generation systems in the Czech Republic and Poland[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2018, 23: 2165-2177.

[10] SHAFIQUE M, LUO X. Environmental life cycle assessment of battery electric vehicles from the current and future energy mix perspective[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 303: 114050.

[11] MARQUES P, GARCIA R, KULAY L, et al. Comparative life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles addressing capacity fade[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 229: 787-794.

[12] SHEN W, HAN W, CHOCK D, et al. Well-to-wheels life-cycle analysis of alternative fuels and vehicle technologies in China[J]. *Energy Policy*, 2012, 49: 296-307.

- [13] WU Z,WANG M,ZHENG J,et al.Life cycle greenhouse gas emission reduction potential of battery electric vehicle[J].*Journal of Cleaner Production*,2018,190:462-470.
- [14] 赵子贤,邵超峰,陈珏.中国省域私人电动汽车全生命周期碳减排效果评估[J].*环境科学研究*,2021,34(9):2076-2085.
ZHAO Z X,SHAO C F,CHEN Y.Effects of private electric vehicles on carbon emission reduction in China during whole life cycle[J].*Research of Environmental Sciences*,2021,34(9):2076-2085.
- [15] 王嘉诚,刘晓峰,梅文卿,等.全生命周期视角下区域级电动汽车碳排放评估[J].*电力建设*,2023,44(6):33-40.
WANG J C,LIU X F,MEI W Q,et al.Carbon-emission assessment of regional electric vehicles from the full life cycle perspective[J].*Electric Power Construction*,2023,44(6):33-40.
- [16] QIAO Q Y,ZHAO F Q,LIU Z W,et al.Cradle-to-gate greenhouse gas emissions of battery electric and internal combustion engine vehicles in China[J].*Applied Energy*,2017,204:1399-1411.
- [17] 付佩,兰利波,陈颖,等.面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价[J].*环境科学*,2023,44(4):2365-2374.
FU P,LAN L B,CHEN Y,et al.Life cycle prediction assessment of energy saving and new energy vehicles for 2035[J].*Environmental Science*,2023,44(4):2365-2374.
- [18] 杨建新,王如松,刘晶茹.中国产品生命周期影响评价方法研究[J].*环境科学学报*,2001(2):234-237.
YANG J X,WANG R S,LIU J R.Methodology of life cycle impact assessment for Chinese products[J].*Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001(2):234-237.
- [19] 中汽中心.2021 年中国汽车市场发展回顾及 2022 年展望[EB/OL].天津:中汽数据有限公司,(2022-01-17)[2023-09-20].<http://www.catarc.info/news/12549.cshtml>.
- [20] XIA X M,LI P W.A review of the life cycle assessment of electric vehicles:considering the In-fluence of batteries[J].*Science of the Total Environment*,2022,814:152870.
- [21] 马金秋.匹配不同动力电池的纯电动汽车全生命周期评价研究[D].西安:长安大学,2019.
- [22] 李雪迎,白璐,杨庆榜,等.我国终点型生命周期影响评价模型及基准值初步研究[J].*环境科学研究*,2021,34(11):2778-2786.
LI X Y,BAI L,YANG Q B,et al.Preliminary study on endpoint life cycle impact assessment model and normalisation value in China [J].*Research of Environmental Sciences*,2021,34(11):2778-2786.
- [23] XIE M H,Ruan J L,Bai W N,et al.Pollutant payback time and environmental impact of Chinese multi-crystalline photovoltaic production based on life cycle assessment[J].*Journal of Cleaner Production*,2018,184:648-659.
- [24] IPCC.Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories[EB/OL].Manila:UNFCCC Workshop on the Preparation of National Communications form non-Annex I Parties,(2001 -06-15)[2023-09-20]https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/chinese/gpgaum_cn.html,2001-06-15.
- [25] 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.
- [26] MAYYAS A,OMAR M,HAYAJNEH M,et al.Vehicle's lightweight design vs electrification from life cycle assessment perspective[J].*Journal of Cleaner Production*,2017,167:687-701.
- [27] 陈轶嵩,郝卓,兰利波,等.匹配不同动力电池的纯电动汽车全生命周期节能减碳评价研究[J].*汽车工程学报*,2022,12(4):517-527.
CHEN Y S,HAO Z,LAN L B,et al.Research on energy saving and carbon reduction over the life cycle of battery electric vehicles with different power batteries[J].*Chinese Journal of Automotive Engineering*,2022,12(4):517-527.
- [28] 刘佳慧.氢燃料电池汽车生命周期评价研究[D].西安:长安大学,2020.
- [29] 李娟.纯电动汽车与燃油汽车动力系统生命周期评价与分析[D].长沙:湖南大学,2015.
- [30] 刘书如.锂离子动力电池及纯电动汽车生命周期评价对比研究[D].西安:长安大学,2021.
- [31] Argonne GREET Publication.The greenhouse gases,regulated emissions,and energy use in transportation (GREET) model version 1.5[EB/OL].Washington:U.S. Department of Energy,(1999-08-01)[2023-09-20].<https://greet.es.anl.gov/publication-h3k81jas>.
- [32] 中汽数据有限公司.面向碳中和的汽车行业低碳发展战略与转型路径(CALCP 2022)[M].北京:机械工业出版社,2022.
- [33] HAO H,MU Z X,JIANG S H,et al.GHG emissions from the production of lithium-Ion batteriesfor electric vehicles in China[J].*Sustainability*,2017,9(4):504-515.
- [34] WATARI T,NORTHEY S,GIURCO D,et al.Global copper cycles and greenhouse gas emissions in a 1.5 °C world[J].*Resources Conservation and Recycling*,2022,179:106118.
- [35] SHI S N,ZHANG H R,YANG W,et al.A life-cycle assessment of battery electric and internal combustion engine vehicles:a case in Hebei Province,China[J].*Journal of Cleaner Production*,2019,218: 606-618.
- [36] LIU Y T,QIAO J,XU H B,et al.Optimal vehicle size and driving condition for extended-range electric vehicles in China:a life cycle perspective[J].*Plos One*,2020,15:0241967.
- [37] SHAFIQUE M,AZAM A,RAFIQ M,et al.Life cycle assessment of electric vehicles and internal combustion engine vehicles:a case study of Hong Kong[J].*Research in Transportation Economics*, 2022,91:101112.
- [38] LUO Z,WANG YUE,LV Z,et al.Impacts of vehicle emission on air quality and human health in China[J].*Science of the Total Environment*,2022,813:152655.
- [39] REQUIA W J,MOHAMED M,HIGGINS C D,et al.How clean are electric vehicles?evidence-based review of the effects of electric mobility on air pollutants,greenhouse gas emissions and human health[J].*Atmospheric Environment*,2018,185:64-77.
- [40] YANG L,YU B Y,YANG B,et al.Life cycle environmental assessment of electric and internal combustion engine vehicles in China[J].*Journal of Cleaner Production*,2021,285:124899.

- [41] YANG Z J,WANG B W,JIAO K.Life cycle assessment of fuel cell, electric and internal combustion engine vehicles under different fuel scenarios and driving mileages in China[J].*Energy*,2020,198: 117365.
- [42] 国家发展和改革委员会.能源生产和消费革命战略(2016—2030年)[EB/OL].北京:国家发展和改革委员会,(2017-04-25)[2023-09-20].http://www.gov.cn/xinwen/2017-04/25/content_5230568.htm.
- [43] 廖夏伟,谭清良,张雯,等.中国发电行业生命周期温室气体减排潜力及成本分析[J].*北京大学学报自然科学版*,2013,49(5):885-891.
- LIAO X W,TAN Q L,ZHANG W,et al.Analysis of life-cycle greenhouse gas emission reduction potential and cost for China's power generation sector[J].*Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*,2013,49(5):885-891.
- [44] 前瞻经济学人.2022年中国水力发电行业全景图谱[EB/OL].深圳:前瞻网,(2022-11-01)[2023-09-20].<https://weibo.com/ttarticle/p/show?id=2309404831021332824297>.
- [45] 中国电力企业联合会.中国电力行业年度发展报告(2021)[M].北京:中国建材工业出版社,2022.
- [46] WANG L,WANG Y,DU H,et al.A comparative life-cycle assessment of hydro-,nuclear and wind power:a China study[J].*Applied Energy*,2019,249(4):37-45.
- [47] 生态环境部.中国应对气候变化的政策与行动 2020 年度报告[EB/OL].北京:生态环境部,(2021-07-13)[2023-09-20].https://www.mee.gov.cn/ywgz/ydqhbh/syqhbh/202107/t20210713_846491.shtml.
- [48] ZHAO X,CAI Q,ZHANG S,et al.The substitution of wind power for coal-fired power to realize China's CO₂ emissions reduction targets in 2020 and 2030[J].*Energy*,2017,120:164-178.
- [49] GAO C K,NA H M,SONG K H,et al.Environmental impact analysis of power generation from biomass and wind farms in different locations[J].*Renewable and Sustainable Energy Reviews*,2019,102:307-317.
- [50] 中国汽车技术研究中心.中国汽车低碳行动计划研究报告(2021)[EB/OL].北京:数字菁英,(2021-12-13)[2023-09-20].<https://www.digitalelite.cn/h-nd-1515.html?fromColId=30>.
- [51] LI X L,ZHANG J,SONG D W,et al.Direct regeneration of recycled cathode material mixture from scrapped LiFePO₄ batteries[J].*Journal of Power Sources*,2017,345:78-84.
- [52] ROY J J,RAROTRA S,KRIKSTOLAITYTE V,et al.Green recycling methods to treat lithium-ion batteries E-waste:a circular approach to sustainability[J].*Advanced Materials*,2022,34: 2103346.
- [53] SHU X,GUO Y F,YANG W X,et al.Life-cycle assessment of the environmental impact of the batteries used in pure electric passenger cars[J].*Energy Reports*,2021,7:2302-2315.
- [54] XIONG S,JI J,MA X.Comparative life cycle energy and GHG emission analysis for BEVs and PHEVs:a case study in China[J].*Energies*,2019,12(5):834.
- [55] ZHANG R,HANAOKA T.Deployment of electric vehicles in China to meet the carbon neutral target by 2060:provincial disparities in energy systems,CO₂ emissions,and cost effectiveness[J].*Resources Conservation and Recycling*,2021,170(1):105622.
- [56] 张晓梅,庄贵阳,刘杰.城市温室气体清单的不确定性分析[J].*环境经济研究*,2018,3(1):8-18.
- ZHANG X M,ZHUANG G Y,LIU J.Uncertainty analysis of urban greenhouse gas inventories[J].*Journal of Environmental Economics*,2018,3(1):8-18.

(责任编辑:张蕊)