

面向碳中和的新能源汽车全生命周期评价研究综述及趋势展望

陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 张春梅, 邢云翔, 蔡旭, 罗耿, 陈昊

(长安大学汽车学院, 西安 710064)

摘要: 为应对能源安全和全球气候变暖问题, 从全生命周期评价理论出发, 系统梳理国内外生命周期评价方法研究现状, 详细总结国内外纯电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车全生命周期评价研究进展, 归纳我国新能源汽车生命周期评价现存问题, 基于现存问题对新能源汽车清单数据精细化、研究对象多元化、评价模型动态化和评价体系标准化等生命周期评价方向进行前瞻性研究, 为面向碳中和的汽车生命周期降低碳排放提供对策和建议。

关键词: 新能源汽车; 全生命周期评价; 碳排放; 现存问题; 发展方向; 减碳建议

中图分类号: U469.72 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2022.04.03

Review and Future Prospects of Life Cycle Assessment of New Energy Vehicles Towards Carbon Neutrality

CHEN Yisong, LAN Libo, HAO Zhuo, ZHANG Chunmei, XING Yunxiang, CAI Xu,

LUO Geng, CHEN Hao

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To enhance energy security and address global warming, the paper studies the life cycle assessment theory, and describes research status of the assessment approaches both at home and abroad. Life cycle assessment of battery electric vehicles, hybrid electric vehicles and fuel cell vehicles are summarized in detail. The existing problems in life cycle assessment of new energy vehicles are presented. The future development directions for life cycle assessment of new energy vehicles are proposed, which includes inventory accuracy, diverse objects of the study, dynamic assessment model and standardization of the evaluation system. Finally suggestions are provided for the automotive industry to reduce carbon emissions towards carbon neutrality.

Keywords: new energy vehicles; life cycle assessment; carbon emission; existing problems; development direction; carbon reduction suggestions

最新数据表明, 2021年中国石油消耗对外依存度达到72%, 能源安全问题成为当今亟须解决的严重问题^[1]。为应对全球气候变暖, 我国政府承诺在2030年前达到碳达峰, 在2060年前实现碳中和。

收稿日期:2022-04-12 改稿日期:2022-04-17

基金项目:国家重点研发计划(SQ2021YFE011519);陕西省重点产业创新链项目(2020ZDLGY16-08);陕西省青年科技新星项目(2021KJXX-15);陕西省交通运输厅科研项目(21-17R)

参考文献引用格式:

陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 等. 面向碳中和的新能源汽车全生命周期评价研究综述及趋势展望[J]. 汽车工程学报, 2022, 12(4):360-374.

CHEN Yisong, LAN Libo, HAO Zhuo, et al. Review and Future Prospects of Life Cycle Assessment of New Energy Vehicles Towards Carbon Neutrality[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2022, 12(4):360-374. (in Chinese)



面向碳中和的未来愿景，2021年10月24日，国务院印发的《关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知》将交通运输绿色低碳运动作为重点任务之一，明确到2030年，当年新增新能源、清洁能源动力的交通运输工具比例达到40%左右。同时，早在2015年国务院出台的《中国制造2025》中已将节能与新能源汽车作为十大重点发展领域之一；并且《新能源汽车产业发展规划（2021-2035年）》中提出，到2025年实现新能源汽车新车销售量达到汽车新车销售总量20%左右的发展愿景。新能源汽车包括纯电动汽车（Battery Electric Vehicle, BEV）、混合动力汽车（Hybrid Electric Vehicle, HEV）和燃料电池汽车（Fuel Cell Vehicle, FCV），分别以电能和氢能为主要能源的BEV和FCV使用过程具有零排放的优势，但考虑电能和氢能的来源，同时考虑车辆的原材料获取和制造时，BEV和FCV相对于传统燃油车（Internal Combustion Engine Vehicle, ICEV）是否节能减排是一个值得研究的课题。生命周期评价方法（Life Cycle Assessment, LCA）可以系统、详细地解决这一科学问题，全生命周期评价的结构图如图1所示。

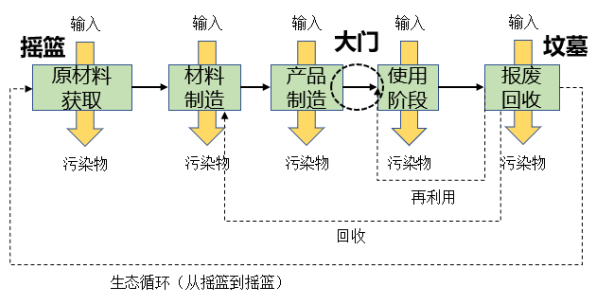


图1 全生命周期评价结构图

本文从全生命周期理论出发，系统介绍国内外汽车全生命周期评价方法研究现状，总结梳理了国内外BEV、HEV和FCV的全生命周期评价研究进展，BEV生命周期评价从整车不同阶段对比、不同锂电池对比、锂电池梯次利用及报废回收3个方面进行了总结，FCV生命周期评价从整车及关键因子、不同氢能路径和燃料电池系统3个方面进行了总结，归纳了我国新能源汽车生命周期评价现存问题，基于现存问题对新能源汽车生命周期评价发展

方向进行了前瞻性研究，最后为汽车生命周期降低碳排放提供意见。

1 新能源汽车全生命周期评价方法

中国标准GB/T 24040—2008等同国际标准ISO 14040: 2006《环境管理 生命周期评价 原则与框架》，生命周期评价定义为“对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价”^[2]。生命周期评价的主要步骤为目的与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释4个阶段^[3-4]。

汽车全生命周期评价的主体思路是从汽车原材料获取、制造装配、运行使用、关键部件二次利用到报废回收过程中的生命周期影响，如图2所示。汽车全生命周期评价研究开展的过程是搜集汇总不同动力类型汽车所涉及到的材料开采、部件制造和燃料生产使用清单数据，综合得出不同动力类型汽车的环境影响情况，并根据影响结果总结评价意见^[5-6]。汽车全生命周期评价为汽车产品的绿色生态开发与优化、汽车企业制定战略规划和政府制定标准政策提供有力的技术支撑，为交通运输领域实现碳达峰碳中和行动方案的制定提供参考意见。

围绕汽车生命周期评价方法，国外许多学者主要聚焦碳排放和能耗研究，不同学者有不同的侧重点和研究方向，国外主流研究现状见表1。国内不同的部分研究团队开展了新能源汽车全生命周期评价工作，在基础数据、评价方法和评价案例方面存在差异，具体见表2。

2 国内外新能源汽车全生命周期评价研究进展

2.1 纯电动汽车(BEV)

纯电动汽车在使用运行过程具有零排放优势，但考虑整车的制造、电能的来源时，纯电动汽车生命周期的环境影响是否优于传统燃油汽车是一个值得研究的科学问题。本文系统梳理了不同阶段的BEV与ICEV生命周期影响的对比研究结果，同时总结梳理了不同锂电池全生命周期影响的对比、锂电池梯

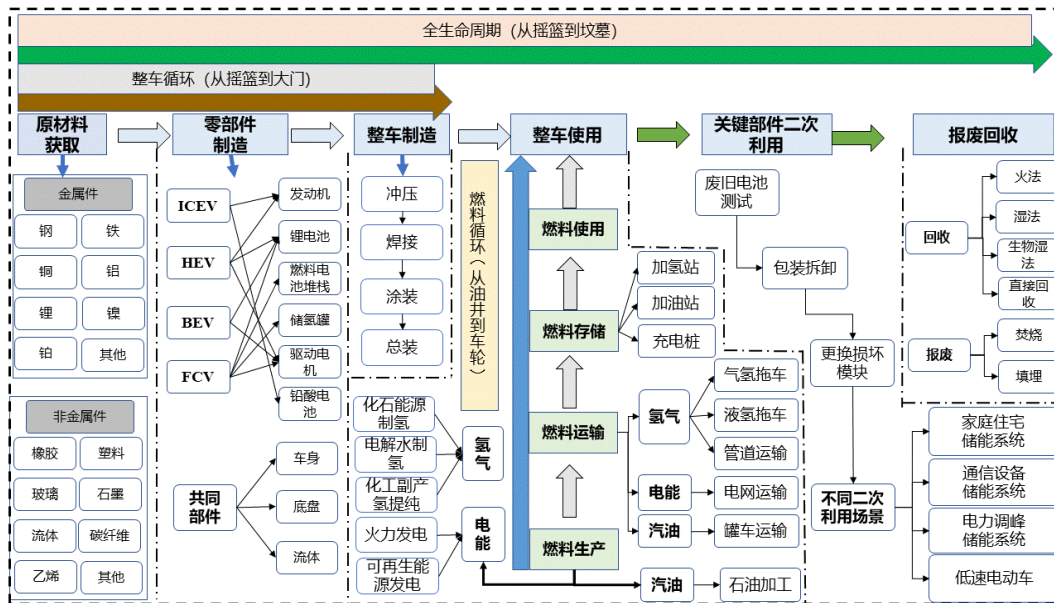


图 2 汽车生命周期评价主体思路

表 1 国外主流研究现状

美国阿岗国家实验室	德国斯图加特大学	荷兰莱顿大学
基础数据 侧重能源数据，数据扩展性和延展性较好	侧重工业、企业数据，有典型工艺数据	更多的是理想的实验数据，侧重材料环境属性
评价软件 GREET 软件	GABI 软件	SIMAPRO 软件
评价案例 侧重不同燃料汽车的对比分析	侧重关键零部件生产制造过程的评价计算	侧重针对材料的环境影响评价和改善评价
总体评价 数据库数据代表行业平均水平，数据质量有待提高；侧重燃料、材料环节的评价，对先进制造工艺的研究分析不足		

表 2 国内主流研究现状

清华大学	上海交通大学	湖南大学	四川大学	长安大学
基础数据 基于我国实际电能和燃料生产过程建立电动汽车全生命周期数据库	借鉴国外基础数据库及国内本土行业平均数据	国内外文献综述及企业调研	CLCD 数据库	借鉴国内外基础数据库及企业调研
评价方法 电动汽车全生命周期碳排放模型	替代燃料汽车生命周期评价模型	MEP 模型、Vehicle-IA 评价软件	eBalance 模型、eFootprint 系统	新能源汽车生命周期节能减排绩效评价模型及软件
评价案例 侧重发电结构、电池生产等环节对电动汽车排放的影响	侧重对甲醇、乙醇等不同替代燃料汽车的环境影响评价	侧重于整车及零部件产品的实证评级及分析	侧重于整车相关的基础材料评价	侧重新能源汽车及零部件的实证评级及分析
总体评价 基础数据统计口径不一，数据质量有待提高；侧重材料评价，先进的制造工艺研究不足；未重视汽车能源消耗随时间、环境变化所产生的动态影响				

次利用及报废回收的研究进展。

2.1.1 整车不同阶段对比

纯电动汽车的全生命周期主要包含整车制造、使用和报废回收阶段。关于整车制造，QIAO Qinyu 等^[7]从不同部件、材料和能耗 3 个维度比较了中国 BEV 和 ICEV 生产制造过程的全生命周期碳排放，生产 BEV 的生命周期碳排放为 15.0~15.2 t

CO₂ eq，比生产 ICEV 的 10.0 t CO₂ eq 高 50%，主要原因是锂电池的制造；SHAFIQUE 等^[8]研究发现，在中国、美国和德国的所有选定类别中，锂电池制造对整车制造的生命周期环境影响比例均超过 45%。关于整车的使用，HELD 等^[9]重点研究使用阶段对 BEV 全生命周期评价的环境影响，研究发现，规则和可预测的移动需求模式和较高的车辆利

用率是环保部署 BEV 的有利条件；SHAFIQUE 等^[8]采用当前和未来的电力混合情景，对 10 个选定国家的 BEV 生命周期进行了比较分析，清洁能源的使用可以在全球范围内减少对环境的影响和减缓气候变化。

关于 BEV 的从摇篮到坟墓的全生命周期评价，QIAO Qinyu 等^[10]研究发现，2015 年中国 BEV 全生命周期碳排放量约为 41 t CO₂eq，比 ICEV 低 18%，由于电力的碳排放因子降低，到 2020 年该值将下降到 34.1 t CO₂eq；WU Zhixin 等^[11]计算比较了 2010 年、2014 年和 2020 年 BEV 和 ICEV 的生命周期碳排放，发现随着电力结构的优化、发电技术的进步和热电联产规模扩大，到 2020 年 BEV 相对于 ICEV 的生命周期碳排放降低 13.4%；BURCHART 等^[12]研究发现，波兰和捷克当前和未来 BEV 的碳排放均低于 ICEV，但 BEV 引起的酸化、富营养化和人体毒性高于 ICEV；SISANI 等^[13]研究发现，BEV 的生命周期碳排放量相比于 ICEV 较低，为 100~200 g CO₂eq·km⁻¹，但淡水富营养化和淡水生态毒性排放较高；TAGLIAFERRIA 等^[14]研究发现，基于欧洲锂电池技术的两种制造模型下的 BEV 全生命周期的碳排放分别为 110 和 120 g CO₂eq·km⁻¹，均低于 ICEV 的 160 g CO₂eq·km⁻¹。SOUZA 等^[15]评估和比较巴西的 ICEV 和 BEV 的全生命周期环境影响。YU Ang 等^[16]基于中国实际生产数据，对一辆 ICEV 和两辆磷酸锂（LFP）和三元锂（NCM）电池驱动的 BEV 进行了生命周期评价，情景分析考虑了电力结构和电池能量密度。赵子贤等^[17]分析了中国不同省份私人 BEV 生命周期碳排放减排潜力和关键影响因素。CORREA 等^[18]从油井到车轮分析的基础上，提出了一种利用多物理指标比较 5 种城市客车动力系统能源和环境性能的新方法。BEV 与 ICEV 生命周期碳排放量对比见表 3。

综上所述可知，BEV 生产制造过程的生命周期碳排放总体上高于 ICEV，主要原因是锂电池制造过程的高碳排放，其使用阶段的生命周期碳排放高度依赖于电网结构的清洁程度，其从摇篮到坟墓的

全生命周期碳排放量要低于 ICEV。因此，动力电池制造技术的进步、电网结构可再生能源成分的比例的提高以及热电联产的规模化发展都是降低 BEV 生命周期碳排放的关键措施。

表 3 BEV 与 ICEV 生命周期碳排放量对比/g CO₂eq·km⁻¹

国家/地区	年份	车型	全生命周期	文献	
中国	2015	BEV	273	[10]	
		ICEV	333		
	2020	BEV	227		
		ICEV	326		
	2020	BEV	171~183		[11]
		ICEV	198		
	2019	BEV	237		[19]
		ICEV	282		
2050	BEV	110			
	ICEV	282			
巴西	2018	BEV	151	[15]	
		ICEV	291		
欧洲	2016	BEV	110~120	[14]	
		ICEV	160		
意大利	2019	BEV	100~200	[13]	
		ICEV	210~450		
波兰	2015	BEV	276	[12]	
	2050	BEV	172		
	2015	ICEV	284		
捷克	2015	BEV	214	[12]	
	2050	BEV	146		
	2015	ICEV	284		
美国	2015	BEV	180	[20]	
		ICEV	260		

2.1.2 不同锂电池对比

根据上文分析可知，锂电池的生产制造是影响 BEV 生命周期碳排放的主要因素。量化对比不同锂电池从材料获取、制造、使用到报废的全生命周期的环境影响是重要的研究课题^[21-22]。SUN Xin 等^[23]收集了 2017 年到 2019 年两家中国领先的锂电池供应商、两家领先的正极材料生产商和两家电池回收公司的清单数据，量化评估了 NCM 的生命周期环

境影响,发现材料制备阶段对锂电池生命周期的贡献最大,其中正极材料、变形铝和电解质是主要贡献者,真空干燥和包衣干燥是两个主要的工序。KIM等^[24]基于材料清单和来自电池行业的原始数据量化评估了福特福克斯BEV中使用的NCM/锰酸锂(LMO)电池组的全生命周期碳排放,24 kW·h的电池的从摇篮到大门的碳排放量为3.4 t CO₂ eq,即140 kg CO₂ eq·kW·h⁻¹,其中电池制造是碳排放的关键因素,占比45%。CUSENZA等^[25]研究了以LMO和NCM为复合正极材料,不仅在NMC和LMO正极的高性能和低性能之间取得了良好的折中,同时表现出了良好的环境性能。殷仁述等^[26-27]的研究构建包括重置和二次使用阶段在内的纯电动客车用钛酸锂电池全生命周期评价模型,计算得出每kW·h钛酸锂电池全生命周期碳排放为1 860 kg CO₂ eq。

MARQUES等^[28]比较评估了LMO和LFP电池的生命周期能耗和碳排放量,重点考虑了不同运行条件下的电池容量衰减问题,电池制造和使用分别考虑了不同区域制造工艺和电网结构的差异,研究发现,LFP电池的运行性能优于LMO电池,且在整个BEV使用寿命内所需的电池数量较少;但LFP电池的生命周期影响高于LMO电池,这主要是由于制造影响较大。SHU Xiong等^[29]对比评价了LFP和NCM电池的生命周期环境影响,研究发现,LFP生产阶段更环保,而NCM电池在应用和运输阶段更环保;从整个生命周期视角来看,LFP比NCM更环保;此外,由于质量较大,LFP电池在用于能量存储时可能会获得更大的环境效益。HAO Han等^[30]的研究构建了中国动力电池生产过程清单数据并量化其生命周期碳排放量,结果表明,28 kW·h的LFP、NCM和LMO电池生产时的碳排放量分别为3061、2912和2705 kg CO₂ eq,动力电池正极材料的生产过程产生的碳排放比例较高。不同锂电池生命周期碳排放量如图3所示。

综上可知,当前流行的动力电池各有千秋,难以判断哪种电池更具优势。总体来看,电池的正极活性材料的制备是动力电池生产过程的碳排放的主

要影响因素,电力结构的清洁程度是影响电池使用的碳排放的重要因素^[31]。因此,提升动力电池制备技术和发展可再生的清洁能源有助于提升动力电池及整车的环境效益。

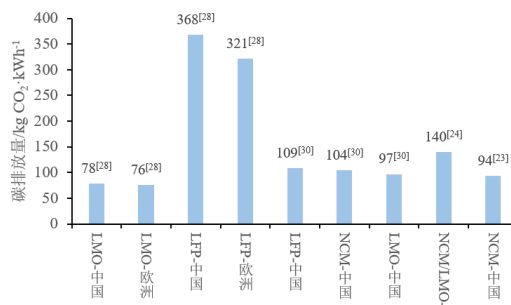


图3 不同锂电池生命周期碳排放量

2.1.3 锂电池梯次利用及报废回收

当锂电池的容量降低20%~30%时便不再满足BEV的要求,车用废旧电池的处理方式主要包括再制造、梯次利用、回收、直接报废^[32]。

为应对车用废旧锂电池环境威胁和电池组件供应风险,XIONG Siqin等^[33]的研究量化分析了NCM电池再制造的环境影响及成本,发现电池再制造的能耗与排放分别降低8.55%和6.62%。ALFARO等^[34]提出了一种可用于再制造的BEV锂电池拆卸过程设计模型,该模型能以最小的环境影响获得最大的经济效益。虽然废旧动力电池再制造可以降低40%的成本,但当前动力电池的再制造没有大规模应用^[32]。

关于废旧电池的梯次利用研究,AHMADI等^[35]研究了锂电池从生产、一次利用、再制造、二次利用到报废的全生命周期的环境影响,二次利用的场景为静态储能系统,研究发现,通过延长BEV锂电池的寿命,以及利用好非高峰低成本清洁电力或间歇式可再生能源,汽车电气化降低碳排放的效益更显著。CUSENZA等^[36]研究了一个由BEV退役的废旧锂电池制造的电池储能系统、一个20 kW光伏电站和电网组成的系统,该系统提供现有的接近为净零的住宅建筑所需的电能(25 kWh/年)。为解决二次利用电池是否比新电池好以及二次利用电池是否会为不同静态应用场景提供相似的

碳排放的问题，KAMATH等^[37]比较了美国住宅屋顶光伏储能、公共服务级光伏固定和公共服务级调峰3种储能应用中使用再利用电池和新锂电池的全生命周期碳排放，共41个场景。在考虑的应用中，与新的锂电池相比，再利用电池降低了7%~31%的碳排放，在公共服务级的应用中降低得更多。BOBBA等^[38]从生命周期评价的角度研究废旧电池用于住房建筑的环境效益，发现动力电池二次利用可以增加住宅的光伏自耗。SUN Bingxiang等^[39]将回收的锂电池再利用，构建了一个3 MW×3 h的电池储能系统，用于电力负荷调峰。贾志杰等^[40]的研究构建了两个应用场景，其中直接应用场景包括LFP储能电池生产制造、直接应用和回收再生3个阶段，其中梯次利用场景包括LFP动力电池生产制造、电动汽车应用、测试筛分、不合格电池回收、梯次应用和回收再生6个阶段。研究发现，将退役的LFP动力电池应用于通信基站储能领域，比使用原生LFP储能电池可减少18.98%的总环境影响，环境优势较为明显。

关于锂电池的回收及报废，不同学者研究总结了锂电池的火法、湿法、生物湿法和直接回收的环境效益和经济效益^[41-43]。HAO Han等^[44]的研究基于2025年的案例建立的数据库比较了BEV在完全回收和不回收两种情况下的碳排放情况，BEV生产过程中存在和不存在循环利用的碳排放分别为9.8和14.9 t CO₂ eq，表明通过循环利用可以减少34%的碳排放。徐建全等^[45]的研究重点考虑了回收过程的ICEV和BEV的生命周期评价。

综上所述，BEV的锂电池达不到整车要求时，首先应考虑的是锂电池的二次利用，可考虑应用到家庭住宅、通信基站和电力调峰等静态储能系统，也可探索在低速电动车上应用^[46]，以实现BEV全生命周期环境效益最大化。锂电池二次利用要面临安全问题、评估方法、筛选和重组等技术挑战，标准化、大数据和云计算等先进技术的发展将促进锂电池二次利用和回收产业化^[32]。

2.2 氢燃料电池汽车 (FCV)

氢燃料电池是一种以电化学方式将燃料与氧化剂的化学能转换为电能的能源转换装置^[47]。氢能作为二次能源，具有来源广泛、终端零排放的突出优势，更可作为理想的能源互联媒介，将弃风、弃电进行高效利用并存储，在能源结构中拥有重要的战略地位^[48]。氢燃料电池汽车的发展近年来受到国家和行业的高度重视^[49-50]，2019年政府工作报告中提出了“推动加氢设施建设”的任务部署；2020年9月，五部委发布《关于开展燃料电池汽车示范运行的通知》，示范内容聚焦技术创新，找准应用场景，构建完整产业链；2022年3月，国家发展改革委和能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划（2021-2035）》，明确氢能是构建绿色低碳产业体系、打造产业转型升级的新增长点。截至2021年10月底，新能源汽车国家检测与管理平台累计接入全国燃料电池汽车6 910台，燃料电池汽车发展驶入快车道。

燃料电池汽车使用过程具有零排放的突出优势，但是FCV的制造过程及氢能的制取、储运等过程伴随着污染物的排放，因此，从FCV全生命周期视角来看，其是否具有良好的环境效益是一个值得研究的科学问题^[51-53]。国内外学者围绕这一科学问题，从不同氢能路径、不同应用场景、不同关键因子着手，分析对比FCV生命周期能源消耗和污染物排放情况。FCV生命周期评价总体分为燃料循环和车辆循环，燃料循环包含氢能的制取、运输、储存等环节，车辆循环包括材料的获取、零部件制造、整车装配、运行使用、报废回收5个阶段。

2.2.1 整车及关键因子

关于FCV整车生命周期评价，BAUER等^[54]在考虑了车辆参数设置的一致性和对未来技术进步的基础上，提出了一种基于新型集成车辆仿真框架的比较生命周期评价模型，分析了传统、混合汽油、柴油和天然气汽车以及BEV和FCV的生命周期环境影响。BENITEZD等^[55]重点研究了储氢罐中碳纤维的制造工艺清单数据和对比FCV生命周期环境影响，碳纤维制造工艺的改进使制造储氢罐的碳

排放由原来的5.6 t CO₂ eq降低为3.0 t CO₂ eq, FCV的生命周期碳排放量由150 g CO₂ eq·km⁻¹降低为90 g CO₂ eq·km⁻¹。AHMADI等^[56]研究了4种行驶工况、燃料电池衰减和制动能量回收对FCV全生命周期碳排放和燃油经济性的影响,结果表明,高速公路工况的生命周期碳排放最低,燃料电池衰减对FCV平均燃油经济性的负面影响为23%,制动能量回收可以提高燃油经济性。LI Mengyu等^[57]特别关注了车辆热负荷对BEV和FCV的从油井到车轮性能的影响,在考虑车辆座舱热负荷时,以天然气为能源的FCV在总能源消耗和碳排放方面优于所有BEV。LIU Feiqi等^[58]以FCV未来的销量情况和制氢的碳排放因子两个关键因素构建了5个情景来评估FCV对中国道路车队碳排放的影响。在最乐观的情景下,整个车队产生的碳排放将比没有FCV的情景减少13.9%,重型货车碳排放将减少近20%。

考虑到区域差异, AHMADI等^[59]对加拿大4个省由ICEV转变为FCV的环境影响和经济成本进行了分析。BEKEL等^[60]对比和分析了德国的FCV和BEV的环境影响和成本。LEE等^[61]研究了美国燃料电池客车的生命周期环境影响和经济性。IANNUZZI等^[62]对阿根廷的传统柴油客车和燃料电池客车进行了生命周期排放对比分析。

综上所述,氢燃料电池汽车的行驶工况、燃料电池衰退、车辆热负荷、制氢碳排放因子、电力结构、区域发展条件等因素是影响FCV生命周期碳排放的关键因子,聚焦突破关键因子的关键核心技术是提升氢燃料电池汽车环境效益的重要手段。

2.2.2 不同氢能路径

国内外学者分析了基于不同氢能路径的FCV全生命周期评价研究。HAO Han等^[63]利用生命周期评价的方法对比分析了北京客车的19种不同的氢能路径的能耗与碳排放情况,研究发现,基于混合电网电解水制氢拥有最高的碳排放,为3 100 g CO₂ eq·km⁻¹;氯碱工业副产氢最低,为80 g CO₂ eq·km⁻¹。孔德洋等^[64]研究了风能、混合电网和光伏发电制氢对FCV全生命周期的影响。研究发现,风能发电氢能路径的碳排放最低,为60 g CO₂ eq·km⁻¹。

YOO等^[65]对比分析了以甲烷蒸汽重整(SMR)、焦炉气提纯、石脑油裂解、电解水等制氢方式为基础的7种氢能路径的碳排放量,为50.7~388.0 g CO₂ eq·km⁻¹。SIMONS等^[66]考虑了SMR、煤气化、混合电网发电制氢、光伏发电制氢等不同氢能路径,研究发现,与ICEV相比,使用光伏发电的电解水制氢可以减少约40%的碳排放,而使用欧洲平均混合电力的电解水制氢可以增加约80%的碳排放。林婷婷^[67]研究了电解水制氢、SMR、煤气化、焦炉煤气提取氢和生物质气化5种制氢方式。WANG Qun等^[68]利用从油井到车轮分析了12条氢能路径的碳排放情况,发现使用可再生电力电解水的HFCV表现最好,为31 g CO₂ eq·km⁻¹,而采用混合电解水的HFCV表现最差,为431 g CO₂ eq·km⁻¹。不同区域和不同氢能来源的FCV和ICEV的生命周期碳排放量见表4。由表4可知,相比于ICEV,基于可再生清洁能源发电用于电解水制氢的FCV具有明显的降低碳排放的效益,而基于混合电网的电解水制氢的FCV会产生较高的碳排放。

2.2.3 燃料电池系统

已有诸多学者对氢燃料电池系统开展了全生命周期评价研究, EVANGELISTI等和SIMONS等的研究构建并分析了质子交换膜、气体扩散层、催化层、膜电极、辅电设备(Balance of Plant, BOP)、储氢罐等的详细清单数据,为燃料电池系统生命周期的评估提供了数据基础^[66, 70]。关于燃料电池系统生命周期的评价, MIOTTI等^[71]考虑关键技术参数的进步并构建2015年和2030年的情景,发现燃料电池系统生命周期碳排放从3.8 t CO₂ eq降低到1.6 t CO₂ eq。USAI等^[72]发现燃料电池系统制造的生命周期碳排放为5.0 t CO₂ eq,其中燃料电池堆栈的催化层和储氢罐的碳纤维是关键因素,总占比53%,同时随着关键参数的变化,每kW的燃料电池系统制造的碳排放由60 kg CO₂ eq降低到30 kg CO₂ eq。陈轶嵩等^[73]以我国节能与新能源汽车技术路线图2.0为参考,量化预测燃料电池系统制造的生命周期碳排放结果为67 kg CO₂ eq·kW⁻¹。燃料电池系统部件清单和碳排放情况见表5。

表4 不同区域和不同氢能路径的FCV和ICEV的生命周期碳排放量/ $\text{g CO}_2 \text{ eq} \cdot \text{km}^{-1}$

地区	时间	氢气来源	FCV	ICEV	文献
中国	2017	SMR	173		[68]
		可再生能源电解水	35	309	
		混合电网电解水	431		
中国	2017	SMR	179	-	[69]
		混合电网电解水	657		
韩国	2015	SMR	218	220	[65]
		混合电网电解水	388		
欧洲	2012	SMR	290		[54]
		可再生能源电解水	100	300	
		混合电网电解水	310		
	2030	SMR	235		
		可再生能源电解水	75	240	
		混合电网电解水	250		
欧洲	2010	SMR	296		[66]
		可再生能源电解水	164	273	
		混合电网电解水	490		
	2020	SMR	274		
		可再生能源电解水	150	-	
	混合电网电解水	460			

综上可知, 燃料电池系统生命周期碳排放的区间为 $36 \sim 112 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} \cdot \text{kW}^{-1}$, 燃料电池堆栈的关键部件和储氢罐的碳纤维是关键因素, 提升燃料电池的性能以及降低关键部件的耗材有助于燃料电池系统的生命周期碳排放, 进而提升FCV的环境效益。

2.3 混合动力汽车 (HEV)

混合动力汽车主要分为常规混合动力汽车 (HEV)、插电式混合动力汽车 (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV) 和增程式混合动力汽车 (Extend Range Electric Vehicle, EREV)。

关于PHEV的生命周期评价研究中, SOUZA等^[15]评估和比较巴西的PHEV、ICEV和BEV的生命周期环境影响, 考虑了燃料生产、发电和动力总成生产、车辆使用和动力总成报废, 研究发现, PHEV、ICEV和BEV的生命周期碳排放分别为 242 、 291 和 $151 \text{ g CO}_2 \text{ eq} \cdot \text{km}^{-1}$ 。CUSENZA等^[25]的

表5 燃料电池系统部件清单和碳排放情况/ $\text{kg CO}_2 \text{ eq} \cdot \text{kW}^{-1}$

碳排放	112	36	60	90	67
质子交换膜	√	√	√	×	√
气体扩散层	√	√	√	×	√
催化层	√	√	√	×	√
膜电极	√	√	√	×	√
双极板	√	√	√	×	√
垫片和端板	√	√	√	×	√
BOP	√	√	√	×	√
储氢罐	√	×	√	√	√
电池	√	×	×	√	√
电机	√	×	×	√	√
文献	[70]	[66]	[72]	[55]	[73]

研究以LMO和NCM为复合正极材料, 对PHEV锂电池进行了生命周期环境评价。ANDERSSON等^[74]利用生命周期评价方法对比了HEV、PHEV和BEV的生命周期碳排放情况, 燃料考虑了化石燃料、第一代生物燃料和第二代生物燃料3种情景, 充电考虑了2020年和2050年的欧洲电力, 研究发现, 可再生燃料在减少生命周期碳排放潜力方面比低碳电力组合更大。YANG Lai等^[75]的研究对PHEV、ICEV和BEV的生命周期碳排放量和空气污染物进行评估, 发现PHEV和BEV的碳排放量、VOCs和 NO_x 的排放比ICEV低, 但其 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 比ICEV高。PHEV的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 排放量分别是ICEV的1.8倍和1.5倍。YUKSEL等^[76]研究了美国PHEV和ICEV的生命周期碳排放, 重点考虑了电力结构、环境温度、车辆行驶里程数和不同的行驶工况。在纽约城市行驶工况, PHEV相比于ICEV可以减少60%的生命周期碳排放。MILLO等^[77]设计制造了一辆插电式混合动力轻型商用车, 验证了混合动力减少碳排放的良好效果。陈轶嵩等^[78]利用GABI软件对PHEV进行了生命周期的评估。KANNANGARA等^[79]为ICEV、HEV、PHEV、BEV和FCV开发了一个适应性生命周期评价框架, 该框架考虑了车辆动力总成技术的进步、电力和燃料供应的变化。研究发现PHEV和HEV的生命周期碳排放低于ICEV, 但高于BEV。CANDERLARES

等^[80]的研究比较了HEV、ICEV和FCV三款基于氢燃料的乘用车的生命周期环境性能,研究发现3款纯氢汽车被认为是极好的脱碳解决方案,车辆基础设施被确定为环境负担的主要来源。

针对增程式混合动力汽车进行生命周期评价的研究相对较少,陈轶嵩团队^[81-82]基于德国开发的生命周期评价专用软件GABI,选取国内市场上的增程式电动汽车,建立全生命周期评价模型,从而对增程式电动汽车的节能减排绩效进行研究。

3 我国新能源汽车生命周期评价现存主要问题

新能源汽车全生命周期评价是一项涉及多元素、多因子、多目标和跨产业的复杂系统工程,数据质量、系统边界、功能单位和评价模型的不同都会导致评价结果产生差异。

3.1 与关键部件的技术进步深度耦合不足

从科学研究的角度看,新能源汽车生命周期评价与关键部件的关键核心技术进步交叉耦合程度不够,如锂电池机理研究和报废回收关键技术与纯电动汽车的生命周期评价的深度耦合,氢燃料电池机理研究、报废回收与氢燃料电池汽车生命周期评价的深度耦合,智能网联汽车关键技术的进步与新能源汽车生命周期评价的深度交叉融合等。

3.2 缺乏基于国家标准的评价体系

从评价结果可对比性看,生命周期评价的系统边界存在多样性,包含从摇篮到大门、从摇篮到坟墓、从油井到车轮、从摇篮到摇篮等不同的边界,不同产品在不同边界下的分析结果不具有可比性,当前亟须新能源汽车生命周期评价体系标准化,尤其在碳中和背景下,当前缺乏一套基于国家标准的新能源汽车生命周期碳排放评价体系。

3.3 缺乏指导科学决策的动态评价模型

影响新能源汽车生命周期的环境性能存在诸多动态因素,各动态影响因素之间相互耦合,牵一发而动全身,所以静态生命周期评价模型对技术参数进步、区域发展条件差异和产品制造工艺多样性的适应性较差。国内研究多停留在静态评价模型而缺乏具有前瞻

性、预测性的动态评价模型。唯有以汽车理论和环境工程理论为基础,对前瞻性问题进行动态评价和研判,才能对各种技术所造成的环境影响进行预警,为企业选择技术路线和政府科学决策提供参考。

3.4 数据清单的本土化和完整性有待提高

从数据清单的质量看,由于当前企业数字化管理水平较低,整车和零部件企业的先进制造工艺所产生的能耗、排放数据的管理水平相对较差,导致我国生命周期评价研究者利用的数据多为工业平均数据、经验数据和国外数据库数据,使汽车相关产品生命周期评价所构建的数据清单的本土化、质量、完整性和时效性相对较差,最终评价结果较难反映当前我国先进技术水平的新能源汽车生命周期环境影响。

4 新能源汽车生命周期评价发展方向

4.1 清单数据精细化

新能源汽车生命周期评价涉及成千上万的数据,数据质量和完整性对最终评价结果影响较大。未来企业利用大数据和云计算技术加速数字化转型,搭建关键部件和能源的溯源数据管理平台,提炼关键部件材料获取、制造工艺的数据清单,提炼能源获取、存储的数据清单。由于企业关键数据涉及企业机密,可通过数据再加工得到标准的数据清单,最终形成基于汽车相关企业先进制造工艺的准确和完整的数据清单,提高评价结果的可信度。

4.2 研究对象多元化

新能源汽车研究对象主要为BEV、HEV和FCV。新能源汽车的关键部件包含锂电池、燃料电池、储氢罐、驱动电机等。未来新能源汽车生命周期评价的研究内容需要将整车或部件的生命周期评价与前沿的先进技术进行耦合,如基于燃料电池机理性能优化的燃料电池汽车生命周期评价,基于锂电池梯次利用的纯电动汽车生命周期评价,基于智能网联汽车关键技术的新能源汽车生命周期评价等。整车生命周期理论与汽车关键技术的深层次耦合是未来的研究趋势。

4.3 评价模型动态化

新能源汽车对生态环境的影响涉及诸多动态因素，仅从静态角度评价产品的时效性、适应性存在不足，可供参考的价值也大为降低，所以对新能源汽车生命周期评价需进行动态分析，建立系统动力学模型。可运用拓扑学、系统论等方法，以系统动力学方法，针对材料、能源、环境和成本四大特性确定各变量之间的计算方程以及关键参数，开发新能源汽车生命周期动态评价系统，运用系统进行灵敏度测试与分析，根据分析结果进行动态模拟与仿真。在不同目标导向下，通过不同指标权重设计代表不同优先级取向的全生命周期优化目标函数进行关键参数的多目标优化分析。

4.4 评价体系标准化

新能源汽车生命周期评价系统边界存在多样性，不同系统边界下的不同车型的研究结果不具备对比性。未来新能源汽车生命周期评价体系将向标准化发展，不同产品将建立一套基于产品特性的相同系统边界、数据标准、评价模型的生命周期评价体系，便于计算未来汽车生命周期能耗和污染物排放。在碳达峰和碳中和的背景下，未来将建立一套科学的标准化的新能源汽车生命周期碳排放评价体系。

基于数据清单精细化、研究对象多元化、评价模型动态化和评价体系标准化的新能源汽车生命周期评价发展方向前瞻性研究，本文凝练总结了我国新能源汽车生命周期评价体系，如图4所示。

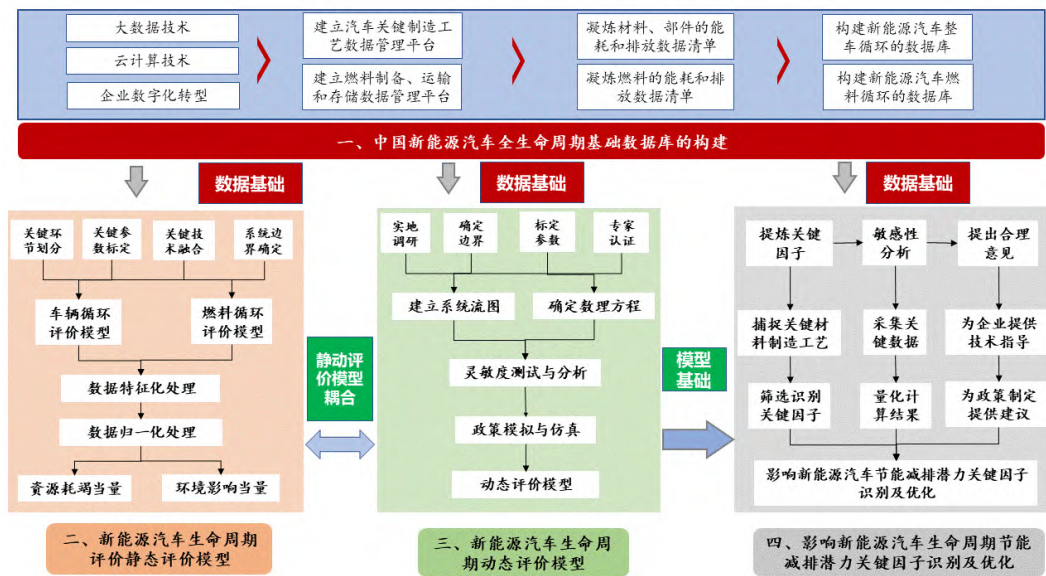


图 4 新能源汽车生命周期评价体系

5 面向碳中和的汽车全生命周期减碳建议

面向碳达峰和碳中和未来愿景，未来汽车行业应以车辆生命周期减碳为核心，以跨行业协同为基础，以负碳技术为补充，聚焦减碳、零碳和负碳3个技术手段，如图5所示，最终实现车辆从材料获取、车辆制造、运行使用到报废回收的全生命周期的碳排放降低。

建议聚焦关键部件的关键技术突破，提升关键部件生命周期绿色水平。动力电池、燃料电池、储

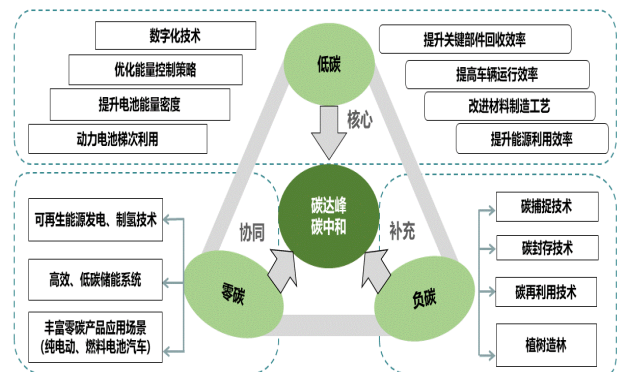


图 5 面向碳中和的汽车全生命周期减碳建议

氢罐等部件的碳排放是影响纯电动汽车和燃料电池汽车碳排放的关键部件,改进锂电池正极材料、燃料电池催化剂、燃料电池双极板、储氢罐的碳纤维等的制造工艺,优化提升电池的功率密度和能量密度,提升电池的回收利用技术,探索电池梯次利用场景,实现动力电池、燃料电池、储氢罐等制造工艺绿色水平的提高和耗材的减少,最终实现关键部件全生命周期碳排放的降低。

建议推进车用能源中的可再生清洁能源比例的提高,实现车辆燃料循环的低碳排放。从全生命周期视角看,电力结构的清洁程度是影响纯电动汽车使用过程碳排放的重要因素,车用氢能的来源是影响燃料电池使用过程碳排放的关键因素。逐步提高电力结构的清洁程度和发展可再生能源制氢,逐步

提高纯电动汽车和燃料电池汽车的推广水平,最终实现车用燃料的生命周期碳排放的降低。

建议从全生命周期视角,建立基于国家标准的新能源汽车碳排放评价体系。构建动力电池、燃料电池、储氢罐等部件生命周期信息追溯平台,构建汽车制造装配各个工艺的数据管理平台,构建车用能源数据管理平台,实现汽车全产业链的数据追溯管理,以量化评价汽车生命周期碳排放为总目标,考虑中国的能源结构、汽车制造工艺水平等关键因素,构建涵盖新能源汽车全产业链的生命周期碳排放评价方法和模型,最终构建一套基于国家标准并符合中国新能源汽车产业发展现状的生命周期碳排放评价体系。

参考文献 (References)

- [1] 尹佳音. 新冠疫情背景下中国石油进口安全问题研究[J]. 中国能源, 2021, 43(1): 64-67.
YIN Jiayin. Research on the Safety of China's Oil Imports in the Context of COVID-19 [J]. Chinese Energy, 2021, 43(1): 64-67. (in Chinese)
- [2] GB/T 24040—2008. 环境管理 生命周期评价 原则与框架[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
GB/T 24040—2008. Environment Management Life Cycle Assessment Principle and Framework[S]. Beijing: China Standard Press, 2008. (in Chinese)
- [3] 何文韬, 郝晓莉, 陈凤. 基于生命周期的新能源汽车碳足迹评价[J]. 东北财经大学学报, 2022(2): 29-41.
HE Wentao, HAO Xiaoli, CHEN Feng. Carbon Footprint Evaluation of New Energy Vehicles Based on Life Cycle Assessment[J]. Journal of Dongbei University of Finance and Economics, 2022(2): 29-41. (in Chinese)
- [4] 刘凯辉, 徐建全. 电动汽车生命周期评价研究进展[J]. 机电技术, 2016(1): 127-131, 136.
LIU Kaihui, XU Jianquan. Review on Life Cycle Assessment of Electric Vehicles [J]. Mechanical and Electrical Technology, 2016 (1): 127-131, 136. (in Chinese)
- [5] 陈轶嵩. 汽车零部件全生命周期生态效益评价研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
CHEN Yisong. A Study on Life Cycle Ecological Benefits Assessment of Automotive Parts[D]. Changsha: Hunan University, 2014. (in Chinese)
- [6] 李书华. 电动汽车全生命周期分析及环境效益评价[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
LI Shuhua. Life Cycle Assessment and Environmental Benefits Analysis of Electric Vehicles [D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [7] QIAO Qinyu, ZHAO Fuquan, LIU Zongwei, 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.
- [8] 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.
- [9] HELD M, SCHUCKING M. Utilization Effects on Battery Electric Vehicle Life-Cycle Assessment: A Case-Driven Analysis of Two Commercial Mobility Applications [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019, 75: 87-105.
- [10] QIAO Qinyu, ZHAO Fuquan, LIU Zongwei, et al. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Electric Vehicles in China: Combining the Vehicle Cycle and Fuel Cycle[J]. Energy, 2019, 117: 222-233.
- [11] WU Zhixin, WANG M, ZHENG Jihu, et al. Life Cycle Greenhouse Gas Emission Reduction Potential of Battery Electric Vehicle [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 190: 462-470.
- [12] BURCHART-KOROL D, JURSOVA S, FOLOEGA P,

- et al. Environmental Life Cycle Assessment of Electric Vehicles in Poland and the Czech Republic[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 202: 476-487.
- [13] SISANI F, DI MARIA F, CESARI D. Environmental and Human Health Impact of Different Powertrain Passenger Cars in A Life Cycle Perspective. A Focus on Health Risk and Oxidative Potential of Particulate Matter Components [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 805, 150171.
- [14] 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.
- [15] SOUZA L, LORA E, PALACIO J, et al. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional Vehicles with Different Fuel Options, Plug-in Hybrid and Electric Vehicles for a Sustainable Transportation System in Brazil[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 203: 444-468.
- [16] YU Ang, WEI Yiqun, CHEN Wenwen, et al. Life Cycle Environmental Impacts and Carbon Emissions: A Case Study of Electric and Gasoline Vehicles in China [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 65: 409-420.
- [17] 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 Zixian, SHAO Chaofeng, CHEN Yu. 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. (in Chinese)
- [18] CORREA G, MUNOZ P, FALAGUERRA T, et al. Performance Comparison of Conventional, Hybrid, Hydrogen and Electric Urban Buses Using Well to Wheel Analysis [J]. *Energy*, 2017, 141: 537-549.
- [19] 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*, 2021, 101112.
- [20] ONAT N, 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.
- [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.
- MA Jinqiu. Life Cycle Assessment on A Specific BEV with Different Power-Batteries [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (in Chinese)
- [22] 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.
- LIU Shuru. Comparative Study on Life Cycle Assessment of Li-Ion Power Battery and Pure Electric Vehicle [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. (in Chinese)
- [23] SUN Xin, LUO Xiaoxi, ZHANG Zhan, et al. Life Cycle Assessment of Lithium Nickel Cobalt Manganese Oxide (NCM) Batteries for Electric Passenger Vehicles [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 273, 123006.
- [24] KIM H, WALLINGTON T, ARSENAULT R, et al. Cradle-to-Gate Emissions from a Commercial Electric Vehicle Li-Ion Battery: A Comparative Analysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(14): 7715-7722.
- [25] CUSENZA M A, BOBBA S, ARDENTE F, et al. Energy and Environmental Assessment of a Traction Lithium-Ion Battery Pack for Plug-in Hybrid Electric Vehicles [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 634-649.
- [26] 殷仁述, 杨沿平, 杨阳, 等. 车用钛酸锂电池生命周期评价[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(6): 2371-2381.
- YIN Renshu, YANG Yanpin, YANG Yang, et al. Life Cycle Assessment of the Lithium Titanate Batteries Used for Electric Vehicles [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(6): 2371-2381. (in Chinese)
- [27] YIN Renshu, HU Shuhan, YANG Yang. Life Cycle Inventories of The Commonly Used Materials for Lithium-Ion Batteries in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 227: 960-971.
- [28] 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.
- [29] SHU Xiong, GUO Yingfu, YANG Wenxian, 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.
- [30] HAO Han, MU Zhexuan, JIANG Shuhua, et al. GHG Emissions from the Production of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles in China [J]. *Sustainability*, 2017, 9(4): 504-515.
- [31] XIA Xiaoning, LI Pengwei. A Review of the Life Cycle Assessment of Electric Vehicles: Considering the Influence

- of Batteries [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 814, 152870.
- [32] HUA Yang, LIU Xinhua, ZHOU Sida, et al. Toward Sustainable Reuse of Retired Lithium-ion Batteries from Electric Vehicles [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, 168, 105249.
- [33] XIONG Siqin, JI Junping, MA Xiaoming. Environmental and Economic Evaluation of Remanufacturing Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles [J]. *Waste Management*, 2020, 102: 579–586.
- [34] ALFARO M, RAMIREZ F. Techno-Economic and Environmental Disassembly Planning of Lithium-Ion Electric Vehicle Battery Packs for Remanufacturing [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2020, 154, 104461.
- [35] AHMADI L, YOUNG S B, FOWLER M, et al. A Cascaded Life Cycle: Reuse of Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Packs in Energy Storage Systems [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015, 22 (1): 111–124.
- [36] CUSENZA M A, GUARINO F, LONGO S, et al. Reuse of Electric Vehicle Batteries in Buildings: An Integrated Load Match Analysis and Life Cycle Assessment Approach [J]. *Energy & Buildings*, 2019, 186: 339–354.
- [37] KAMATH D, SHUKLA S, ARSENault R, et al. Evaluating the Cost and Carbon Footprint of Second-Life Electric Vehicle Batteries in Residential and Utility-Level Applications [J]. *Waste Management*, 2020, 113: 497–507.
- [38] BOBBA S, MATHIEUX F, ARDENTE F, et al. Life Cycle Assessment of Repurposed Electric Vehicle Batteries: An Adapted Method Based on Modelling Energy Flows [J]. *Journal of Energy Storage*, 2018, 19: 213–225.
- [39] SUN Bingxiang, SU Xiaojia, WANG Dan, et al. Economic Analysis of Lithium-Ion Batteries Recycled from Electric Vehicles for Secondary Use in Power Load Peak Shaving in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 123327.
- [40] 贾志杰, 高峰, 杜世伟, 等. 磷酸铁锂电池不同应用场景的生命周期评价 [J]. *中国环境科学*, 2022(4): 1975–1984.
- JIA Zhijie, GAO Feng, DU Shiwei, et al. Life Cycle Assessment of Lithium Iron Phosphate Battery in Different Utilization Scenarios [J]. *China Environmental Science*, 2022(4): 1975–1984. (in Chinese)
- [41] HARPER G, SOMMERVILLE R, KENDRICK E, et al. Recycling Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles [J]. *Nature*, 2019, 575(7781): 75–86.
- [42] FAN Ersha, LI Li, WANG, Zhenpo, et al. Sustainable Recycling Technology for Li-Ion Batteries and Beyond: Challenges and Future Prospects [J]. *Chemical Reviews*, 2020, 120(14): 7020–7063.
- [43] JIANG Haotan, WANG Qi, CHEN Shuai, et al. Recycling-Oriented Cathode Materials Design for Lithium-Ion Batteries Elegant Structures Versus Complicated Compositions [J]. *Energy Storage Materials*, 2021, 41: 380–394.
- [44] HAO Han, QIAO Qinyu, LIU Zongwei, et al. Impact of Recycling on Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Electric Vehicle Production: The China 2025 Case [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2017, 122: 114–125.
- [45] 吴小员, 王俊祥, 田维超, 等. 基于应用需求的退役电池梯次利用安全策略 [J]. *储能科学与技术*, 2018, 7 (6): 1094–1104.
- WU Xiaoyuan, WANG Junxiang, TIAN Weichao, et al. Application-Derived Safety Strategy for Secondary Utilization of Retired Power Battery [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2018, 7(6): 1094–1104. (in Chinese)
- [46] 徐建全, 杨沿平. 考虑回收利用过程的汽车产品全生命周期评价 [J]. *中国机械工程*, 2019, 30(11): 1343–1351.
- XU Jianquan, YANG Yanpin. Whole Life Cycle Assessment of Automotive Products Considering Recycling Processes [J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30 (11): 1343–1351. (in Chinese)
- [47] 衣宝廉. 燃料电池的原理、技术状态与展望 [J]. *电池工业*, 2003, 8(1): 16–22.
- YI Baolian. Fuel Cell: Fundamental, Technology and Prospect [J]. *China Battery Industry*, 2003, 8 (1): 16–22. (in Chinese)
- [48] 章桐. 中国燃料电池汽车产业链的现状与发展 [J]. *汽车纵横*, 2020(12): 17–19.
- ZHANG Tong. Current Situation and Development of Chinese Fuel Cell Vehicles Industry Chain [J]. *Auto Review*, 2020(12): 17–19. (in Chinese)
- [49] 谭旭光, 余卓平. 燃料电池商用车产业发展现状与展望 [J]. *中国工程科学*, 2020, 22(5): 152–158.
- TAN Xuguang, YU Zhuopin. Development Status and Prospects of Fuel Cell Commercial Vehicle Industry [J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22 (5): 152–158. (in Chinese)
- [50] 刘宗巍, 史天泽, 郝瀚, 等. 中国燃料电池汽车发展问题研究 [J]. *汽车技术*, 2018(1): 1–9.
- LIU Zongwei, SHI Tianze, HAO Han, et al. Research

- on Main Problems Associated with Development of Fuel Cell Vehicle in China[J]. *Automobile Technology*, 2018 (1): 1-9. (in Chinese)
- [51] 刘佳慧. 氢燃料电池汽车生命周期评价[D]. 西安: 长安大学, 2020.
LIU Jiahui. Life Cycle Assessment of Fuel Cell Vehicle [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese)
- [52] CHEN Yisong, HU Xu, LIU Jiahui. Life Cycle Assessment of Fuel Cell Vehicles Considering the Detailed Vehicle Components: Comparison and Scenario Analysis in China Based on Different Hydrogen Production Schemes [J]. *Energies*, 2019, 12(15): 1-24.
- [53] 陈轶嵩, 丁振森, 刘佳慧, 等. 面向2020年的质子交换膜燃料电池汽车生命周期评价及预测[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(21): 2546-2552.
CHEN Yisong, DING Zhensen, LIU Jiahui, et al. Life Cycle Assessment and Prediction of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Vehicles for 2020 [J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(21): 2546-2552. (in Chinese)
- [54] BAUER C, HOFER J, ALTHAUSI H, et al. The Environmental Performance of Current and Future Passenger Vehicles: Life Cycle Assessment Based on a Novel Scenario Analysis Framework[J]. *Applied Energy*, 2015, 157: 871-883.
- [55] BENITEZ A, WULF C, PALMENAER A, et al. Ecological Assessment of Fuel Cell Electric Vehicles with Special Focus on Type IV Carbon Fiber Hydrogen Tank [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123277.
- [56] AHMADI P, TORABI S H, AFSANEHf Het al. The Effects of Driving Patterns and PEM Fuel Cell Degradation on the Life Cycle Assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicles[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(5): 3595-3608.
- [57] LI Mengyu, ZHANG Xiongwen, LI Guojun. A Comparative Assessment of Battery and Fuel Cell Electric Vehicles Using a Well-to-Wheel Analysis [J]. *Energy*, 2016, 94: 693-704.
- [58] LIU Feiqi, ZHAO Fuquan, LIU Zongwei, et al. The Impact of Fuel Cell Vehicle Deployment on Road Transport Greenhouse Gas Emissions: The China Case [J]. *International of Hydrogen Energy*, 2018, 43: 22604-22621.
- [59] AHMADI P, KJEANG E. Comparative Life Cycle Assessment of Hydrogen Fuel Cell Passenger Vehicle in Different Canadian Provinces [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40 (38): 12905-12917.
- [60] BEKEL K, PAULIUK S. Prospective Cost and Environmental Impact Assessment of Battery and Fuel Cell Electric Vehicles in Germany [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24(12): 2220-2237.
- [61] LEE D Y, ELGOWAINYI A, VIJAYAGOPAL R. Well-to-Wheel Environmental Implications of Fuel Economy Targets for Hydrogen Fuel Cell Electric Buses in the United States [J]. *Energy Policy*, 2019, 128: 565-583.
- [62] IANNUZZI L, HILBERT J, SILVA L, et al. Life Cycle Assessment (LCA) for Use on Renewable Sourced Hydrogen Fuel Cell Buses vs Diesel Engines Buses in the City of Rosario, Argentina [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(57): 29694-29705.
- [63] HAO Han, MU Zhexuan, LIU Zongwei, et al. Abating Transport GHG Emissions by Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Chances for the Developing World [J]. *Frontiers in Energy*, 2018, 12(3): 466-480.
- [64] 孔德洋, 唐闻翀, 柳文灿, 等. 燃料电池汽车能耗、排放与经济性评估[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(4): 498-503, 23.
KONG Deyang, TANG Wenchong, LIU Wencan, et al. Energy Consumption, Emissions and Economic Evaluation of Fuel Cell Vehicles [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2018, 46 (4): 498-503, 23. (in Chinese)
- [65] YOO E, KIM M, SONG H. Well-to-Wheel Analysis of Hydrogen Fuel-Cell Electric Vehicle in Korea [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43 (41): 19267-19278.
- [66] SIMONS A, BAUER C. A Life-Cycle Perspective on Automotive Fuel Cells [J]. *Applied Energy*, 2015, 157: 884-896.
- [67] 林婷, 吴焯, 何晓旂, 等. 中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和CO₂排放[J]. *环境科学*, 2018, 39(8): 3946-3953.
LIN Ting, WU Ye, HE Xiaoyi, et al. Well-to-Wheels Fossil Energy Consumption and CO₂ Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicles in China [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(8): 3946-3953. (in Chinese)
- [68] WANG Qun, XUE Mianqiang, LIN Binle, et al. Well-to-Wheel Analysis of Energy Consumption, Greenhouse Gas and Air Pollutants Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicle in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 275: 123061.
- [69] 陈轶嵩, 丁振森, 王文君, 等. 氢燃料电池汽车不同制氢方案的全生命周期评价及情景模拟研究[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(5): 172-180.

- CHEN Yisong, DING Zhensen, WANG Wenjun, et al. Life Cycle Assessment and Scenario Simulation of Four Hydrogen Production Schemes for Hydrogen Fuel Cell Vehicles [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(5): 172-180. (in Chinese)
- [70] EVANGELISTI S, TAGLIAFERRI C, BRETT D, et al. Life Cycle Assessment of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell System for Passenger Vehicles [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 4339-4355.
- [71] MIOTTI M, HOFER J, BAUER C. Integrated Environmental and Economic Assessment of Current and Future Fuel Cell Vehicles [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, 22(1): 94-110.
- [72] USAI L, HUNG C, VASQUEZ F, et al. Life Cycle Assessment of Fuel Cell Systems for Light Duty Vehicles, Current State-of-the-Art and Future Impacts [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 280: 125086.
- [73] 陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 等. 氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比 [J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1-15.
- CHEN Yisong, LAN Libo, HAO Zhuo, et al. Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison Research of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power System [J]. Environmental Science, 2022, 43(3): 1-15. (in Chinese)
- [74] ANDERSSON Ö, BÖRJESSON P. The Greenhouse Gas Emissions of an Electrified Vehicle Combined with Renewable Fuels: Life Cycle Assessment and Policy Implications [J]. Applied Energy, 2021, 289: 116621.
- [75] YANG Lai, YU Biying, YANG Bo, et al. Life Cycle Environmental Assessment of Electric and Internal Combustion Engine Vehicles in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 285: 124899.
- [76] YUKSEL T, TAMAYAO M M, HENDRICKSON C, et al. Effect of Regional Grid Mix, Driving Patterns and Climate on the Comparative Carbon Footprint of Gasoline and Plug-in Electric Vehicles in the United States [J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(4): 044007.
- [77] MILLO F, CUBITO C, ROLANDO L, et al. Design and Development of a Hybrid Light Commercial Vehicle [J]. Energy, 2017, 136: 90-99.
- [78] CHEN Yisong, HU Xu, LIU Jiahui. Life Cycle Assessment of PHEV [J]. Automobile Technology, 2017, 9: 20-25.
- [79] KANNANGARA M, BENSEBAA F, VASUDEV M. An Adaptable Life Cycle Greenhouse Gas Emissions Assessment Framework for Electric, Hybrid, Fuel Cell and Conventional Vehicles: Effect of Electricity Mix, Mileage, Battery Capacity and Battery Chemistry in the Context of Canada [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 317: 128394.
- [80] CANDERLARESI D, VALENTE A, IRIBARREN D, et al. Comparative Life Cycle Assessment of Hydrogen-Fuelled Passenger Cars [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46: 35961-35973.
- [81] LIU Yongtao, QIAO Jie, XU Haibo, et al. Optimal Vehicle Size and Driving Condition for Extended-Range Electric Vehicles in China: A Life Cycle Perspective [J]. Plos One, 2020, 15(11): 0241967.
- [82] 马骊溟, 许海波, 陈轶嵩, 等. 增程式电动汽车全生命周期节能减排绩效评价 [J]. 汽车工程学报, 2021, 11(2): 107-114.
- MA Liming, XU Haibo, CHEN Yisong, et al. Evaluation of Energy Saving and Emission Reduction over the Whole Life Cycle of an Extended Range Electric Vehicles [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2021, 11(2): 107-114. (in Chinese)

作者简介



陈轶嵩 (1988-), 男, 陕西西安人, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源汽车生命周期评价、汽车产业规划与政策分析。

Tel: 17791263276

E-mail: chenysisong_1988@163.com

通信作者



罗耿 (1992-), 男, 陕西西安人, 博士, 讲师, 主要研究方向为轻质材料力学特性和汽车轻量化材料生命周期评价。

Tel: 15229392345

E-mail: luogeng@chd.edu.cn