

耦合不同车辆类型的城市道路交通全生命周期评价研究

付佩¹, 蔡旭¹, 刘浚哲¹, 兰利波¹, 杨洋^{1,2}, 陈轶嵩¹

(1. 长安大学 汽车学院, 西安 710064; 2. 长安大学 运输工程学院, 西安 710064)

摘要: 城市道路交通是我国节能减碳重要领域, 如何量化集成道路和车辆的城市道路交通的能源消耗和碳排放成为交通绿色发展的迫切需求。利用全生命周期评价方法, 量化评价了城市道路交通原材料获取、施工制造、运行维护和报废拆除阶段的全生命周期化石能源消耗量 ADP(f) 和全球变暖潜值 GWP (以 CO₂ 当量计), 讨论对比了基于传统燃油汽车 (ICEV)、混合动力汽车 (HEV)、插电式混合动力汽车 (PHEV)、纯电动汽车 (BEV) 和燃料电池汽车 (FCV) 的城市道路交通的全生命周期 ADP(f) 和 GWP, 并对关键因素年均日通行量、FCV 的技术进步和不同车型占比进行了敏感性分析。研究发现, 基于 ICEV 的城市道路交通的全生命周期 ADP(f) 和 GWP 分别为 3.26E+09 MJ 和 2.16E+08 kg。相比于 ICEV, 基于 BEV 的城市道路交通的全生命周期 ADP(f) 和 GWP 分别降低 32.5% 和 36.1%。

关键词: 城市道路交通; 全生命周期评价; 不同车辆; 能源消耗; 碳排放

中图分类号: U469.72 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2023.03.14

Life Cycle Assessment of Urban Road Traffic for Various Different Vehicle Types

FU Pei¹, CAI Xu¹, LIU Junzhe¹, LAN Libo¹, YANG Yang^{1, 2}, CHEN Yisong¹

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. College of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Urban road traffic plays an important role in energy conservation and carbon reduction in China. Determining a method to quantify the energy consumption and carbon emissions of urban road traffic, considering both roads and vehicles, has become an urgent demand for green traffic development. The paper employs the full life cycle assessment method to quantitatively evaluate the whole life cycle of fossil energy consumption ADP (f) and global warming potential GWP (calculated in CO₂ equivalent) in urban road traffic, including the stages of raw materials acquisition, construction, operation and maintenance, and scrapping and demolition. Additionally the paper compares the full life cycle ADP(f) and GWP of urban road traffic for various vehicle types, including the traditional internal combustion engine vehicles (ICEVs), hybrid electric vehicles (HEVs), plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs), BEVs and FCVs. Furthermore, a sensitivity

收稿日期: 2022-12-05 改稿日期: 2023-01-11

基金项目: 国家重点研发计划项目 (SQ2021YFE0192900); 陕西省重点研发计划项目 (2021LLRH-04-04-02); 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); 氢能联盟“揭榜挂帅”项目; 一汽大众中华环境保护基金会项目 (220222220522)

参考文献引用格式:

付佩, 蔡旭, 刘浚哲, 等. 耦合不同车辆类型的城市道路交通全生命周期评价研究[J]. 汽车工程学报, 2023, 13(3): 416-430.

FU Pei, CAI Xu, LIU Junzhe, et al. Life Cycle Assessment of Urban Road Traffic for Various Different Vehicle Types [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2023, 13(3): 416-430. (in Chinese)



analysis is conducted on the key factors such as the annual average daily traffic volume, technological advances in fuel cell vehicles and the proportion of different vehicle types. It is found that the full life cycle ADP (f) and GWP of urban road traffic based on ICEVs are $3.26\text{E}+09$ MJ and $2.16\text{E}+08$ kg, respectively. In comparison to ICEVs, the life cycle ADP (f) and GWP based on BEVs are reduced by 32.5% and 36.1%, respectively.

Keywords: urban road traffic; life cycle assessment; different vehicle type; energy consumption; carbon emissions

在第七十五届联合国大会上,中国宣布二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。在中国共产党第二十次代表大会的报告中指出,积极稳妥推进碳达峰、碳中和。我国出台了一系列城市绿色交通政策,助力碳达峰和碳中和目标的实现,其中《交通强国建设纲要》中将绿色发展作为交通强国建设的重要任务。由2020年交通碳排放数据可知,道路交通的碳排放占交通碳排放的87%^[1],道路交通碳排放成为我国降低碳排放的重点关注领域。道路交通涉及道路和车辆两个主体,其碳排放的核算是一个系统工程,需要考虑道路材料获取、道路施工、车辆材料获取、车辆制造、车辆运行等诸多因素相关联的碳排放,如何准确核算综合车辆和道路的城市道路交通碳排放是一个值得研究的科学课题,生命周期评价方法(Life Cycle Assessment, LCA)可以系统地研究这一个课题。

关于道路全生命周期评价,国内外学者进行了一定的研究。SEO等^[2]首次对韩国道路、桥梁、隧道等建筑的主要和基础材料的消耗所排放的二氧化碳进行了量化。CELAURO等^[3]提出了一种评估道路整体影响的综合方法,考虑了与整个结构相关的不同道路施工技术。ANTHONISSEN等^[4]使用全生命周期评估方法,将热拌沥青与冷拌沥青混合料(含乳化液)和热拌沥青进行了比较。FERNÁNDEZ-SÁNCHEZ等^[5]分析了广泛的减排方案,结合了当前技术状况下的可行方案,并涉及到对总排放平衡有重大贡献的道路建设和维护元素。NOLAND等^[6]建立了用于确定使用的材料、施工设备、项目资源调动、施工期间的交通中断和

用于全生命周期维护的材料相关的全生命周期温室气体排放的GASCAP模型。GULOTTA等^[7]介绍了意大利城市道路的能源和环境评估,采用全生命周期方法评估典型意大利城市道路的能源和环境影响。沙爱民等^[8]利用LCA将沥青路面建设划分为原材料生产、运输、拌和、摊铺、碾压5个阶段,细化了材料获取阶段的排放源。蔺瑞玉^[9]提出了半刚性基层和沥青面层建设过程碳排放总量模型。WANG Xianwei等^[10]以西南地区4个高速公路建设项目为例,提出了估算高速公路建设过程中二氧化碳排放的经验方法,为类似中国西南地区的其他地区二氧化碳排放估算提供参考。CHEN Fei等^[11]对热拌沥青路面、接缝素混凝土路面和连续配筋混凝土路面进行详细的LCA模型构建,重点研究了拥堵和使用模块中的延迟估计。CHEN Jing等^[12]利用LCA从国家和省两个层面计算了中国公路建设的温室气体排放量。刘圆圆等^[13]对20个沥青项目和18个混凝土项目进行LCA评价,并将其分为高等级道路和低等级道路,估计了二氧化碳排放量,并识别了实际整个道路项目施工阶段的不确定性,包括道路结构和土方工程(路面除外)。

关于车辆全生命周期评价,国内外进行了一定的研究。针对纯电动汽车(Battery Electric Vehicles, BEV)全生命周期研究,SHAFIQUE等^[14]基于当前和未来的电力结构研究了10个典型国家的BEV的生命制造,HELD等^[15]研究车辆使用阶段对BEV全生命周期的环境影响,研究发现,锂离子电池制造是整车制造的关键因素,清洁电力的使用可以减缓全球变暖。BURCHART等^[16]、SISANI等^[17]和TAGLIAFERRIA等^[18]研究了BEV的生命

周期碳排放,研究发现,BEV的全生命周期碳排放量低于传统燃油汽车(Internal Combustion Engine Vehicles, ICEV),约为100~200 g CO₂ eq/km,但BEV的生命周期人体毒性、酸化、水体富营养化均高于ICEV。QIAO Qinyu等^[19]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。陈轶嵩等^[20-22]利用LCA方法对比了BEV、ICEV和增程式电动汽车的生命周期碳排放和减碳经济性。杨洋等^[23-24]利用生命周期评价方法重点研究不同智能网联级别BEV的全生命周期影响。赵子贤等^[25]分析了中国不同省份私人BEV全生命周期碳排放减排潜力和关键影响因素。针对氢燃料电池汽车(Fuel Cell Vehicles, FCV)的全生命周期评价,BAUER等^[26]构建了一种基于新型集成车辆仿真框架的比较全生命周期评价模型,BENITEZD等^[27]和AHMADI等^[28]重点研究了储氢罐中碳纤维的制造工艺、4种行驶工况和燃料电池衰退对FCV全生命周期环境排放和燃油经济性的影响。AHMADI等^[29]、PATELLA等^[30]、LEE等^[31]和IANNUZZI等^[32]研究了加拿大、罗马、美国、阿根廷等不同区域的燃料电池汽车的生命周期影响。陈轶嵩等^[33-37]用LCA方法预测评价了氢燃料电池汽车动力系统、不同制氢方式下的氢燃料电池汽车的生命周期碳排放和能源消耗情况。LI Mengyu等^[38]和LIU Feiqi等^[39]特别关注了车辆热负荷、FCV未来的销量情况和制氢的碳排放因子对FCV全生命周期影响。

由国内研究现状可知,道路的全生命周期评价研究涵盖道路材料获取、施工、使用和拆除阶段,道路使用过程多数仅考虑车辆的尾气排放,考虑道路运行车辆材料获取、制造及报废的较少。综合考虑道路材料获取、施工、使用和拆除以及车辆的材料获取、制造、使用和报废的城市道路交通全生命周期环境影响评价的结果尚不清楚,此结果可以更系统、全面地量化城市道路交通的环境影响,防止某些技术的进步只带来环境影响转移而未真正实现环境友好。同时,新能源汽车的快速发展和规模的不断扩大对城市道路交通的全生命周期环境影响尚

不确定。本文利用全生命周期评价方法,量化综合道路和车辆的全生命周期化石能源消耗量、全球变暖潜值、酸化潜值,对比讨论基于传统燃油汽车(ICEV)、混合动力汽车(Hybrid Electric Vehicles, HEV)、插电式混合动力汽车(Plug-in Hybrid Electric Vehicles, PHEV)、纯电动汽车(BEV)、燃料电池汽车(FCV)场景下的城市道路交通全生命周期化石能源消耗量、全球变暖潜值、酸化潜值。研究结果可以为城市道路交通的绿色发展提供技术支撑和决策参考。

1 方法

1.1 系统边界

本文将城市道路交通全生命周期划分为原材料获取、施工制造、运行维护和报废回收阶段。在原材料获取阶段重点考虑道路施工过程涉及的沥青、碎石和水泥等材料,同时重点考虑车辆制造过程中涉及的钢、铸铁和铝等材料;在施工制造阶段重点考虑道路施工过程中的机械能耗、场外拌合能耗、材料运输能耗以及车辆制造中的冲压、焊接、涂装和总装等工艺所消耗的能源及材料;在运行维护阶段重点考虑道路维护过程中道路材料的消耗及道路维护机械的能耗,以及车辆运行尾气排放及消耗能源上游生产污染物排放;在拆除报废阶段重点考虑道路拆除过程中工程机械能耗和车辆进入报废汽车厂的报废回收的正负环境效益。城市道路交通系统边界如图1所示。

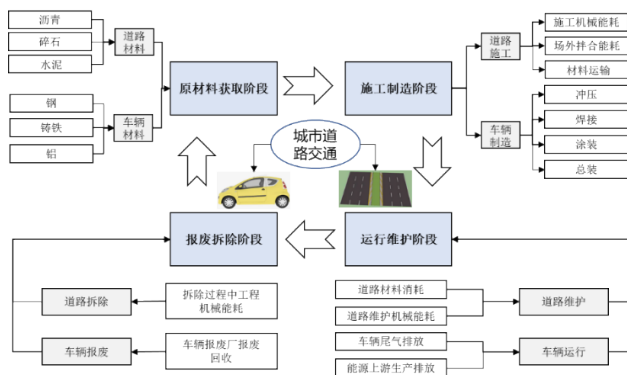


图1 城市道路交通系统边界

功能单位是指经过量化的产品功能或绩效特征。确定功能单位的目的是使道路交通全生命周期各个阶段的参数确定处在统一的度量单位下,使各个阶段具有可比性。本文假设道路长度为10 km且寿命为15年,行驶车辆的寿命为150 000 km。

1.2 评价模型

本文在作者科研团队前期积累模型和参考其他学者构建模型的基础上,搭建了城市道路交通全生命周期评价模型,模型总共包含原材料获取阶段、施工制造阶段、运行维护阶段和报废拆除阶段4个评价模型。

1.2.1 能源消耗评价模型

原材料获取阶段能源消耗矩阵如式(1)所示。

$$E_{\text{mat}} = \delta(m_{0ij})_{1 \times q} \cdot (e_{0ij})_{q \times u} + \lambda \sum_k [(m_{1ij})_{k \times n} \cdot (e_{1ij})_{n \times u}] \quad (1)$$

式中: δ 为道路的长度,单位km; m_{0ij} 为1 km道路所含的第*j*种道路材料的质量,单位kg; e_{0ij} 为生产第*i*种道路材料所需要的第*j*种初级能源量,单位MJ/kg; q 为道路材料的种类数; u 为初级能源的种类数; λ 为道路运行车辆的等效数量; m_{1ij} 为单个车辆第*i*个组成部件所包含的第*j*种车用材料的质量,单位kg; k 为汽车的组成部分数量; n 为车用材料的种类数; e_{1ij} 为生产单位第*i*种车用材料所需要的第*j*种初级能源量,单位MJ/kg。

施工制造阶段能源消耗矩阵如式(2)所示。

$$E_{\text{man}} = \delta(e_{2ij})_{1 \times r} \cdot (e_{3ij})_{r \times u} + \lambda \sum_k [(e_{4ij})_{k \times r} \cdot (e_{3ij})_{r \times u}] \quad (2)$$

式中: e_{2ij} 为1 km道路施工建设过程所需的第*j*种二次能源量,单位MJ/km; e_{3ij} 为生产单位第*i*种二次能源所需要的第*j*种初级能源量,单位MJ/MJ; r 为二次能源的种类数; e_{4ij} 为单个车辆第*i*个组成部件制造过程所需的第*j*种二次能源量,单位MJ/kg。

运行维护阶段的能源消耗矩阵如式(3)所示。

$$E_{\text{use}} = \delta[(m_{02j})_{1 \times q} \cdot (e_{02j})_{q \times u} + (e_{22j})_{1 \times r} \cdot (e_{32j})_{r \times u}] + \lambda \times Q_1 \times L/100 \times \rho \times q \cdot (e_{31j})_{1 \times u} \quad (3)$$

式中: m_{02j} 为1 km道路维护所需的第*j*种道路材料

的质量,单位kg; e_{22j} 为1 km道路维护过程所需的第*j*种二次能源量,单位MJ/km; Q_1 为单个车辆的百公里耗油量,单位L/(100 km); L 为单个车辆全生命周期的行驶里程,单位km; ρ 为汽油的密度,单位kg/L; q 为汽油的最低热值,单位MJ/kg; e_{31j} 为生产单位汽油所需要的第*j*种初级能源量,单位MJ/MJ。

车辆报废回收阶段仅考虑了钢、铸铁、铝、铜金属的回收,设钢、铸铁、铝、铜金属的回收率分别为 ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 、 ξ_4 。报废拆除阶段的能源消耗矩阵如式(4)所示。

$$E_{\text{rec}} = \delta(e_{23j})_{1 \times r} \cdot (e_{33j})_{r \times u} + \lambda \sum_k \{ (m_{1ij} \cdot \xi_j)_{k \times 4} \cdot [(e_{5ij})_{4 \times r} \cdot (e_{3ij})_{r \times u} - (e_{1ij})_{4 \times u}] \} \quad (4)$$

式中: e_{23j} 为1 km道路拆除过程所需的第*j*种二次能源量,单位MJ/km; e_{33j} 为回收单位金属*i*过程中所需的第*j*种二次能源量,单位MJ/kg。

1.2.2 环境排放物评价模型

原材料获取阶段环境排放物矩阵如式(5)所示。

$$P_{\text{mat}} = \delta(m_{0ij})_{1 \times q} \cdot (p_{0ij})_{q \times s} + \lambda \sum_k [(m_{1ij})_{k \times n} \cdot (p_{1ij})_{n \times s}] \quad (5)$$

式中: p_{0ij} 为生产单位第*i*种道路材料所排放的第*j*种环境排放物当量,单位kg/kg; s 为环境排放物的种类数; p_{1ij} 为生产单位第*i*种车用材料所排放的第*j*种环境排放物当量,单位kg/kg。

施工制造阶段环境排放矩阵如式(6)所示。

$$P_{\text{man}} = \delta(e_{2ij})_{1 \times r} \cdot (p_{2ij})_{r \times s} + \lambda \sum_k [(e_{4ij})_{k \times r} \cdot (p_{2ij})_{r \times s}] \quad (6)$$

式中: p_{2ij} 为生产单位第*i*种二次能源所排放的第*j*种环境排放物当量,单位kg/MJ。

运行维护阶段的环境排放矩阵如式(7)所示。

$$P_{\text{use}} = \delta[(m_{02j})_{1 \times q} \cdot (p_{02j})_{q \times s} + (e_{22j})_{1 \times r} \cdot (p_{22j})_{r \times s}] + \lambda \times Q_1 \times L/100 \times \rho \times q \cdot (p_{21j})_{1 \times s} \quad (7)$$

式中: p_{21j} 为生产单位汽油所排放的第*j*种环境排放物当量,单位kg/MJ。

报废拆除阶段的环境排放矩阵如式(8)所示。

$$P_{\text{rec}} = \delta(e_{23j})_{1 \times r} \cdot (p_{2ij})_{r \times s} + \lambda \sum_k \{ (m_{1ij} \cdot \xi_j)_{k \times 4} \cdot [(e_{5ij})_{4 \times r} \cdot (p_{2ij})_{r \times s} - (p_{1ij})_{4 \times s}] \} \quad (8)$$

本文采用国际通用评价方法 CML2001 评价方法,将上述模型输出 u 类初级能源统一转换为化石能源消耗量 ADP(f), s 类环境排放物统一转换为全球变暖潜值 GWP(以 $\text{CO}_2\text{-Eq}$)。利用这 2 项指标评价城市道路交通的能耗和碳排放情况,单位分别为 MJ 和 kg。

表 1 道路和车辆特征参数

道路参数	值/规格	车辆参数	值/规格
道路等级	一级	整备质量/kg	1 490
车道数	6	公称油耗/[L/(100 km)]	6.6
寿命/年	15	寿命里程/km	150 000
维修年限/年	8	燃料类型	汽油
年均日通行量/辆 DD//DANWEN	16 291	发动机排量/L	1.5
道路长度/km	10	发动机最大功率/kW	115.0

2.2 清单分析

2.2.1 道路全生命周期清单

道路原材料获取阶段主要考虑沥青、砂石、水泥等材料的获取。石油沥青、改性沥青和乳化沥青主要应用在沥青道路建设中,高放^[40]基于国内沥青生产标准进行能耗估算得到基质沥青的生产碳排放因子为 439.81 kg/t,改性沥青的生产碳排放因子为 613.48 kg/t;孟良^[41]和刘圆圆^[42]直接参考欧洲沥青协会发布的数据,基质沥青的生产碳排放因子为 174.24 kg/t,改性沥青的生产碳排放因子为 295.91 kg/t。本文利用 GaBi 专业数据库中有关中国沥青生产的数据清单,基质沥青的生产碳排放因子为 462 kg/t,改性沥青的生产碳排放因子为 634 kg/t。关于水泥,清华大学的龚志起^[43]研究了 P.I.52.5、P.O.42.5 和 P.S.32.5 三种类型水泥的环境排放,3 种类型水泥的碳排放因子分别为 1 041.56、920.03 和 677.68 kg/t。本文参考 GaBi 软件的中国水泥的材料获取的数据库,碳排放因子为 830 kg/t。标准一级公路建设原材料获取阶段清单见表 2。各材料的碳排放因子包含直接排放和间接排放。

道路施工阶段的化石能源消耗和环境排放物主要来源于施工现场机械、场外拌和及建设所需材料

2 案例分析

2.1 评价对象

本文研究西安的综合道路和车辆的城市道路交通全生命周期环境影响评价,车辆选取典型 ICEV 作为代表车型,将车辆在评价道路上的行驶里程简化处理,将所有车辆的行驶里程转化为选取的典型 ICEV 的行驶里程,道路和车辆的基本参数见表 1。

表 2 标准一级公路建设材料原材料获取阶段清单^[34, 39, 44-46]

材料类型	消耗量	单位
石油沥青	607.0	t
改性沥青	275.9	t
乳化沥青	54.7	t
砂	2 013.9	m ³
矿粉	888.5	t
石屑	1 285.6	m ³
碎石	34 059.7	m ³
水泥	676.8	t
水	2 006.0	m ³

的运输等有关的能源消耗。标准 1 km 一级公路设施施工建设过程阶段消耗汽油、柴油和电能分别为 359 kg、35 503 kg 和 22 282 kWh^[42]。汽油、柴油和电能的上游生产参考了 GaBi 专业数据库和《中国电力行业年度发展报告 2021》的清单数据。各种能源的消耗量包含直接能耗和间接能耗,各种能源利用的排放包含直接排放和间接排放。汽油使用过程的污染物排放参考了国家标准 GB 27999—2019 和 GB 18352.6—2016,柴油的使用过程的污染物排

放参考了GB 17691—2018 和中国产品全生命周期温室气体排放系数库数据。

道路维修阶段只考虑路面的修护，研究的道路寿命为15年，维修年限为8年，因此维修一次。参考毛睿昌的论文得知，维修1 km标准一级公路材料消耗量和机械投入量见表3。

表3 维修1km标准一级公路材料消耗量和机械投入量^[47]

材料类型	消耗量/t	机械类型	柴油/kg	汽油/kg	电力/kWh
石油沥青	364.2	沥青拌合设备	50 637.0		20 845.0
改性沥青	120.6	轮胎式装载机	3630.0		
乳化沥青	32.9	自卸车	16 539.0	231.0	
碎石	4 257.5	沥青混合料摊铺机	789.0		
水	347.7	光轮压路机	5 354.0		
水泥	206.4	平地机	480.0		

道路的拆除需要履带式挖掘机、破路机等工程机械的工作，期间会产生一定量的工程废弃物。拆除过程中，工程机械和材料运输需要消耗柴油。1 km公路拆除过程中用到的破路机、机动空压机、履带式单车挖掘机和运输卡车的柴油消耗量分别为20 176、10 386、8 615、4 171 kg。

2.2.2 车辆全生命周期清单

车辆的原材料获取阶段主要考虑发动机、变速器、车身、底盘、动力电池等部件所需要的钢、铁、铝、橡胶等材料的加工生产过程的环境影响，这些材料的环境影响因子主要参考GaBi软件数据库的材料生命周期清单和文献调研的数据清单。将车辆各部件的材料清单进行二次处理得到了道路运行车辆单车材料消耗清单，见表4。

车辆制造过程主要包含冲压、焊接、涂装和总装四大制造工艺，各个制造工艺主要消耗的能量为热能和电能。根据前期研究可知，单辆ICEV制造过程中的电能和热能消耗量分别为20 854 MJ和4 184 MJ。

城市道路交通中，车辆运行过程中的能源消耗和环境排放物的计算需要通过车辆的百公里燃油消耗量、车辆寿命、道路年均日通行量、道路长度等参数测算得到。根据前文假设数据可知，本文的道

表4 道路运行车辆单车材料消耗清单

材料	质量/kg	占比/%
钢	779	52.3
铝	151	10.1
铸铁	241	16.2
铜	24	1.6
橡胶	37	2.5
塑料	140	9.4
铅	13	0.9
硫酸	2	0.1
聚丙烯	1	0.1
玻璃纤维	41	2.8
镁	1	0.1
流体	29	1.9
其他	31	2.0
总计	1 490	100

路运行车辆的等效数量 $\lambda=5\,946$ 辆。根据车辆寿命为150 000 km，车辆百公里燃油消耗量为6.6 L/(100 km)，测算可知，城市道路交通车辆运行使用过程中的燃油消耗量约为 5.886×10^7 L。

一般报废汽车的整个回收利用流程分为4个部分：拆解、粉碎、非铸铁金属分离和粉碎残渣处置。由于缺乏报废回收过程中拆解和粉碎等工艺的能耗和排放数据，而且在建模时难以体现详细的工艺流程，所以本部分研究主要考虑金属部件的回收。主要金属材料的回收率及能耗数据见表5和表6。

表5 单车金属材料回收步骤与回收率^[19, 48]

金属材料	回收步骤	回收率/%	建模回收量/kg
钢	废料-电弧炉	90	701
铸铁	废料-冲天炉-磨具冷却	80	193
铝	废料-融化-铝锭铸造	92	138
铜	废料-铜电解	90	21

3 结果

3.1 特征化结果

将城市道路交通的道路和车辆的数据清单代入

表 6 各金属材料回收阶段的单位能源消耗

金属材料	煤/MJ	天然气/MJ	电力/MJ
钢		0.02	4.23
铝		0.15	0.80
铸铁	8.24		2.24
铜			9.54

本文构建的城市道路交通全生命周期评价模型，利用 CML2001 评价方法计算得到城市道路交通各个阶段的环境影响评价特征化结果，见表 7。

表 7 城市道路交通全生命周期特征化结果

阶段	组成	ADP (f) /MJ	GWP/kg
原材料获取阶段	道路材料	4.67E+08	1.26E+07
	车辆材料	3.92E+08	3.64E+07
	总计	8.59E+08	4.90E+07
施工制造阶段	道路施工	1.97E+07	1.43E+06
	车辆制造	3.02E+08	2.18E+07
	总计	3.22E+08	2.32E+07
运行维护阶段	道路维护	2.36E+08	6.94E+06
	车辆运行	2.08E+09	1.63E+08
	总计	2.32E+09	1.70E+08
报废拆除阶段	道路拆除	2.17E+07	1.58E+06
	车辆报废	-2.61E+08	-2.8E+07
	总计	-2.39E+08	-2.64E+07
全生命周期	道路	7.44E+08	2.26E+07
	车辆	2.51E+09	1.93E+08
	总计	3.26E+09	2.16E+08

由表 7 可知，城市道路交通的全生命周期化石能源消耗量 ADP (f) 和全球变暖潜值 GWP 分别为 3.26E+09 MJ 和 2.16E+08 kg。

3.2 结果分析

3.2.1 能源消耗

城市道路交通全生命周期分阶段化石能源消耗量情况如图 2 所示。由图可知，在化石能源消耗方面，城市道路交通的全生命周期化石能源消耗量为 3.25×10^9 MJ，其中车辆全生命周期能耗占比 77%。从各个阶段看，运行维护阶段的化石能源消耗占比最大，其中车辆运行使用过程的能耗占运行维护阶

段的 89.8%。主要原因是道路运行车辆单车的能源消耗量大，同时道路的车流量较大，综合导致运行车辆的能源消耗较大。其次是原材料获取阶段的化石能源消耗量较大，主要原因是沥青、水泥等道路材料的获取过程需要消耗大量的化石能源，同时车辆材料的上游获取也需要一定量的化石能源。施工制造阶段的工程机械能耗、车辆制造能耗同样会消耗一定的化石能源。车辆报废阶段对于降低城市道路的化石能源消耗具有积极的环境效益。因此，注重优化降低运行维护阶段的化石能源消耗，对于城市道路交通化石能耗降低和保障国家能源安全具有重要的意义。

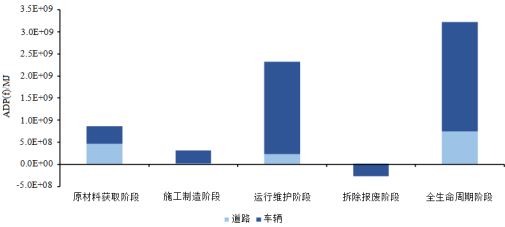


图 2 城市道路交通全生命周期分阶段化石能源消耗量情况

3.2.2 碳排放

城市道路交通全生命周期分阶段全球变暖潜值情况如图 3 所示。由图可知，城市道路交通的全生命周期变暖潜值为 2.16×10^8 kg，其中车辆全生命周期的全球变暖潜值占比 89.5%。从各个阶段看，城市道路维护运行阶段的全球变暖潜值占比最大，主要原因是运行车辆的尾气排放的高碳排放。其次是原材料获取阶段的全球变暖潜值占比较大，主要原因是道路中水泥和沥青获取过程的高碳排放，车辆中钢、铁、铝、铜等金属获取过程的高碳排放。施工制造过程也伴随着一定的碳排放，主要原因是工程机械的尾气中的碳排放和消耗能源上游获取过程的碳排放。

4 不同车辆类型的情景讨论

国务院颁发的《新能源汽车产业发展规划（2021—2035 年）》明确，到 2035 年我国新能源汽车核心技术达到国际先进水平，BEV 成为新销售车

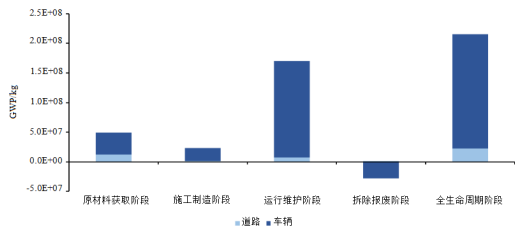


图3 城市道路交通全生命周期分阶段全球变暖潜值情况

辆的主流，公共领域用车全面电动化，燃料电池汽车实现商业化应用。BEV、PHEV、常规 HEV、FCV 等不同车型是当前和未来的热点车型，本部分在考虑道路条件不变的前提下，对比了这 5 种不同车辆类型场景模拟的城市道路交通全生命周期环境影响。

4.1 车辆类型选取

基于中国的市场数据和用户需求分析，本文选取 ICEV、PHEV、HEV、BEV 和 FCV 五款典型的车辆进行分析研究。5 款车型的基本参数见表 8。

表 8 五款典型车型的参数

参数	ICEV	PHEV	HEV	BEV	FCV
整备质量/kg	1 490.0	1 540.0	1 650.0	1 650.0	1 850.0
发动机排量/L	1.5	1.8	2.5		
动力蓄电池容量/kWh		10.5		57.0	1.6
发动机功率/kW	115.0	73.0	131.0		
电动机功率/kW			88.0	100.0	113.0
百公里油耗/[L/(100 km)]	6.6	3.2	4.4		
百公里电耗/[kWh/(100 km)]		3.8		12.3	
百公里氢耗/[kg/(100 km)]					1.1

关于不同车型的全生命周期数据清单，不同车型单车制造装配阶段的能源消耗情况见表 9，不同车型单车运行使用阶段的能源消耗情况见表 10，不同车型单车的金属材料回收量见表 11，HEV、PHEV、BEV 和 FCV 的单车的材料清单见表 12。

4.2 特征化结果

基于上文常规混合动力汽车、插电式混合动力汽车、纯电动汽车和燃料电池汽车的数据清单，利用 CML2001 评价方法得到 4 种车型的特征化结果。

表 9 不同车型单车制造装配阶段的能源消耗情况 [20, 22]

车型	电能/MJ	热能/MJ
HEV	20 320	4 919
PHEV	20 784	5 395
BEV	25 510	7 266
FCV	35 535	8 501

表 10 不同车型单车运行使用阶段的能源消耗情况

车型	汽油/L	电能/kWh	氢能/kg
HEV	6 570		
PHEV	5 670	5 700	
BEV		18 450	
FCV			1 650

表 11 不同车型单车的金属材料回收量 [48]

金属材料	HEV	PHEV	BEV	FCV	回收率/%
钢/kg	845.0	725.0	771.0	977.0	90.0
铸铁/kg	133.0	121.0	20.0	31.2	80.0
铝/kg	143.0	142.0	146.0	52.1	92.0
铜/kg	54.0	51.0	96.0	32.4	90.0

基于 HEV、PHEV、BEV 和 FCV 的城市道路交通全生命周期特征化结果见表 13。

4.3 结果分析

4.3.1 能源消耗

基于 5 种车型的城市道路交通的全生命周期分阶段化石能源消耗情况，如图 4 所示。由图可知，在化石能源消耗方面，相较于 ICEV 的城市道路交通，除 FCV 的城市道路交通以外，其余 3 种车型的城市道路交通的全生命周期化石能源消耗总量都有所降低，其中 BEV 的城市道路交通下降最明显，降低了约 1.06E+09 MJ。这是由于 BEV 的城市道路交通在运行维护阶段的化石能源消耗量较小。相反，FCV 的城市道路交通的全生命周期化石能源消耗总量大于 ICEV 的城市道路交通，原因是目前 FCV 的氢能制备的能耗相对较高，在原材料获取阶段及运行维护阶段的化石能源消耗量明显高于其他 4 种车型的城市道路交通。

4.3.2 碳排放

基于 5 种车型的城市道路交通的全生命周期分

表 12 HEV、PHEV、BEV 和 FCV 单车材料清单 [14-16, 20, 26, 35, 49]

常规 HEV			PHEV			BEV			FCV		
材料	数量/kg	比例/%	材料	数量/kg	比例/%	材料	数量/kg	占比/%	材料	数量/kg	占比/%
钢	939.70	56.95	钢	805.70	52.32	钢	848.80	51.44	钢	1034.50	55.92
铝	156.50	9.49	铝	152.70	9.92	铝	154.80	9.38	铝	39.00	2.11
铜	69.90	4.24	铜	71.40	4.64	铜	102.80	6.23	铜	46.70	2.52
铸铁	166.80	10.11	铸铁	151.40	9.83	铸铁	24.80	1.50	铸铁	36.70	1.98
橡胶	29.70	1.80	橡胶	25.40	1.65	橡胶	19.30	1.17	橡胶	24.50	1.32
塑料	162.60	9.85	塑料	140.50	9.12	塑料	146.90	8.90	塑料	158.00	8.54
镍	5.60	0.34	玻璃纤维	41.90	2.72	有机物	9.10	0.55	玻璃纤维	54.60	2.95
有机物	4.00	0.24	流体	29.00	1.88	玻璃纤维	45.50	2.76	流体	29.00	1.57
镁	0.70	0.04	铅	12.40	0.81	流体	29.00	1.76	燃料电池堆栈	291.90	15.78
玻璃纤维	47.70	2.89	硫酸	1.40	0.09	聚偏氟乙烯 PVDF	15.60	0.95	碳纤维	45.60	2.46
流体	30.00	1.82	聚丙烯	1.10	0.07	磷酸铁锂	7.60	0.46	环氧树脂	18.20	0.98
			水	2.50	0.16	石墨	87.80	5.32	泡沫	3.00	0.16
			三元锂	33.80	2.19	六氟磷酸锂	54.70	3.32	高强度聚乙烯	5.30	0.29
			聚偏氟乙烯	2.90	0.19	碳酸乙烯酯	9.70	0.59	三元锂	11.60	0.63
			石墨	22.00	1.43	二甲基酸酯	28.10	1.70	聚偏氟乙烯	1.00	0.05
其他	36.70	2.22	碳酸乙烯酯	7.80	0.51	聚丙烯	28.10	1.70	石墨	7.50	0.41
			二甲基酸酯	7.80	0.51	聚乙烯	11.50	0.70	碳酸乙烯酯	2.70	0.15
			其他	30.30	1.97	其他	25.90	1.57	二甲基酸酯	2.70	0.15
									其他	37.50	2.03
总计	1 650	100	总计	1 540	100	总计	1 650	100	总计	1 850	100

阶段全球变暖潜值情况，如图 5 所示。由图可知，在全球变暖潜值方面，相较于 ICEV 的城市道路交通，除 FCV 的城市道路交通以外，其余 3 种车型的城市道路交通的全生命周期全球变暖潜值都有所降低，其中 BEV 的城市道路交通下降最明显，降低了约 0.78E+08 kg，这是由于 BEV 的城市道路交通在运行维护阶段的化石能源消耗量较小。相反，FCV 的城市道路交通的全生命周期全球变暖潜值大于 ICEV 的城市道路交通，原因是目前 FCV 的氢气制备具有较高的碳排放，在原材料获取阶段以及运

行维护阶段的全球变暖潜值明显高于其他 4 种车型的城市道路交通。

4.4 敏感性分析

4.4.1 年均日通行量

前文假设的城市道路交通的年均日通行量是 16 291 辆，这一数据存在不确定性，主要与城市道路设施的建设情况、社会经济的发展程度、人们的出行方式等因素息息相关。此部分讨论年均日通行量的变化对城市道路交通全生命周期化石能源消耗

表13 基于HEV、PHEV、BEV和FCV的城市道路交通全生命周期特征化结果

车型	阶段	ADP (f) /MJ	GWP/kg
HEV	原材料获取阶段	8.96E+08	5.27E+07
	制造装配阶段	3.41E+08	2.49E+07
	运行使用阶段	1.53E+09	1.08E+08
	报废回收阶段	-2.54E+08	-2.76E+07
	总计	2.51E+09	1.58E+08
PHEV	原材料获取阶段	8.71E+08	5.75E+07
	制造装配阶段	3.50E+08	2.55E+07
	运行使用阶段	1.53E+09	1.06E+08
	报废回收阶段	-2.39E+08	-2.61E+07
	总计	2.51E+09	1.63E+08
BEV	原材料获取阶段	8.98E+08	6.48E+07
	制造装配阶段	4.26E+08	3.13E+07
	运行使用阶段	1.12E+09	6.90E+07
	报废回收阶段	-2.47E+08	-2.68E+07
	总计	2.20E+09	1.38E+08
FCV	原材料获取阶段	1.53E+09	1.04E+08
	制造装配阶段	2.11E+08	1.55E+07
	运行使用阶段	2.74E+09	1.67E+08
	报废回收阶段	-1.47E+08	-1.55E+07
	总计	4.33E+09	2.70E+08

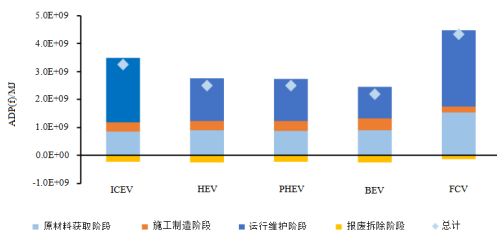


图4 基于5种车型的城市道路交通的全生命周期分阶段化石能源消耗情况

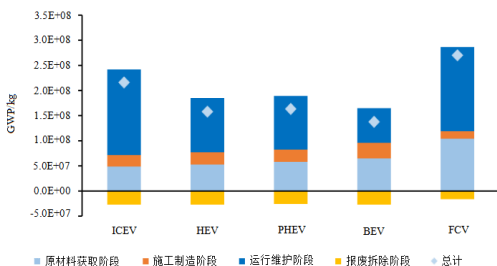


图5 基于5种车型的城市道路交通的全生命周期分阶段全球变暖潜值情况

和全球变暖潜值的影响。假设以城市道路交通的年均日通行量16 291辆为基础情景，年均日通行量的变化率为-20%、-10%、10%和20%，共5种情景。在这5种情景下，基于不同车型的城市道路交通的全生命周期化石能源消耗量ADP (f) 变化率，如图6所示；在这5种情景下，基于不同车型的城市道路交通的全生命周期全球变暖潜值GWP变化率，见表14。

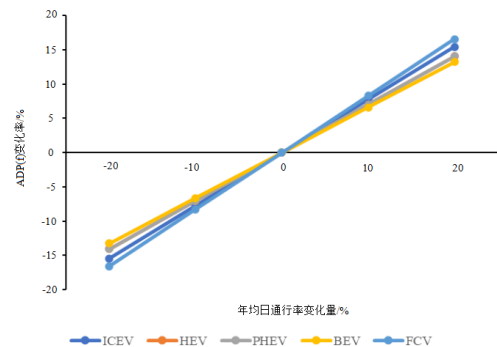


图6 城市道路交通的全生命周期ADP (f) 变化率

由图6和表16可知，随着城市道路交通年均日通行量的变化10%，基于FCV的城市道路交通全生命周期化石能源消耗量ADP (f) 和全球变暖潜值的变化率最大，基于BEV的城市道路交通全生命周期化石能源消耗量ADP (f) 和全球变暖潜值的变化率最小。

4.4.2 FCV技术进步

国务院颁发的《新能源汽车产业发展规划（2021—2035年）》明确，到2035年FCV实现商业化应用。随着政策的促进，FCV的技术将不断进步。为量化氢燃料电池汽车技术参数进步对城市道路交通的全生命周期化石能源消耗和全球变暖潜值的影响，本文构建基础情景和3个预测情景，基础情景为上文研究的FCV参数，预测情景为在基础情景上的进步，FCV技术进步的不同情景见表15。不同FCV技术进步情景下的城市道路交通的全生命周期ADP (f) 和GWP如图7~8所示。

由图7~8可知，随着FCV的百公里氢气消耗量的降低和整车轻量化水平的提高，相比于基础情

表 14 城市道路交通全生命周期 GWP 变化率

年均日通行量变化率	ICEV	HEV	PHEV	BEV	FCV
-20%	-17.9%	-17.1%	-17.2%	-16.7%	-18.3%
-10%	-8.9%	-8.6%	-8.6%	-8.4%	-9.2%
0%	0%	0%	0%	0%	0%
10%	8.9%	8.6%	8.6%	8.4%	9.2%
20%	17.9%	17.1%	17.2%	16.7%	18.3%

表 15 FCV 技术进步的不同情景

参数	基础情景	预测情景 1	预测情景 2	预测情景 3
百公里氢气消耗量/ [kg/ (100km)]	1.1	1.0	0.9	0.8
轻量化系数	0%	15%	25%	35%
整备质量/kg	1850	1572.5	1387.5	1202.5

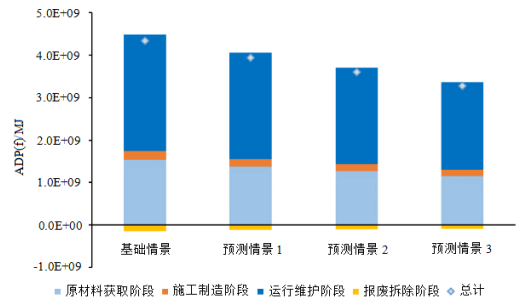


图 7 不同FCV技术进步情景下的城市道路的全生命周期ADP (f)

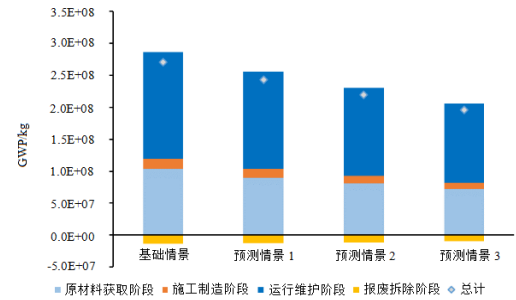


图 8 不同FCV技术进步情景下的城市道路的全生命周期GWP

景，基于FCV 预测情景 1、预测情景 2 和预测情景 3 的城市道路交通全生命周期化石能源消耗分别降低 8.9%、16.7% 和 24.5%，其全球变暖潜值分别降低 10.2%、18.9% 和 27.5%。FCV 技术进步对碳排放的降低效果比化石能源消耗量的降低效果更明显。

4.4.3 不同车型占比

上文是基于单车的城市道路交通全生命周期评

价，与实际场景的差异较大。为了较好地贴近实际情况，考虑不同车辆类型的占比，更好地模拟实际的城市道路交通场景。根据调研发现^[50]，当前的ICEV、HEV、PHEV、BEV 和 FCV 的占比分别约为 90.10%、4.67%、1.07%、4.15% 和 0.01%，将此设为基础场景，同时构建了 3 种不同的场景，见表 16。不同车型占比情景下的城市道路的全生命周期ADP (f) 和 GWP，如图 9~10 所示。

表 16 不同车型的占比情景 单位：%

车型	基础情景	情景 1	情景 2	情景 3
ICEV	90.10	78.43	48.69	20.51
HEV	4.67	11.12	24.85	34.46
PHEV	1.07	2.33	5.55	8.20
BEV	4.15	7.33	19.37	34.01
FCV	0.01	0.79	1.54	2.84

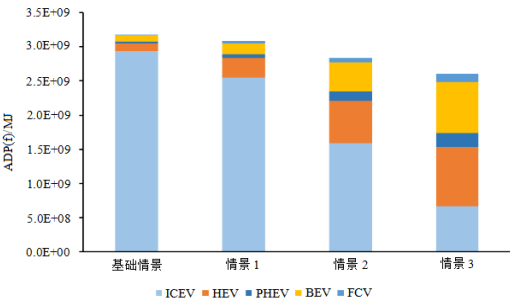


图 9 不同车型占比情景下的城市道路的全生命周期ADP (f)

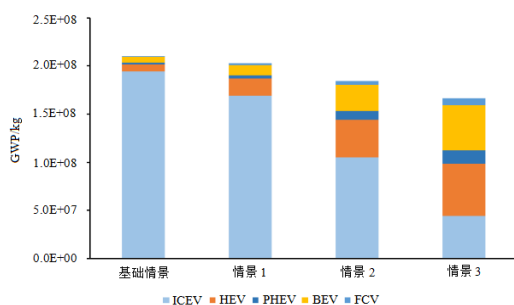


图10 不同车型占比情景下的城市道路交通的全生命周期GWP

由图9~10可知,相比于基础情景、情景1、情景2和情景3的城市道路交通全生命周期化石能源消耗量降低2.6%、10.4%和17.7%,其全生命周期全球变暖潜值降低2.9%、11.8%和20.2%。随着新能源汽车的推广,有助于降低整个城市道路交通的全生命周期化石能源消耗和全球变暖潜值。

5 结论

城市道路交通的全生命周期化石能源消耗量ADP(f)和全球变暖潜值GWP分别为 $3.26\text{E}+09$ MJ和 $2.16\text{E}+08$ kg,其中车辆的全生命周期ADP(f)和GWP的占比分别为77%和89.5%,高于道路的占比;由各个阶段分析可知,运行维护阶段的

ADP(f)和GWP远高于其他阶段,因此,城市道路的绿色发展应注重道路运行车辆的节能减碳效益。

由基于不同车辆类型的城市道路交通的情景讨论结果可知,相比于ICEV,基于BEV的城市道路交通的全生命周期ADP(f)和GWP降低最显著,分别降低32.5%和36.1%,基于HEV和PHEV的降低程度相似,基于FCV的没有明显的节能减碳效益。因此,纯电动汽车的推广有助于城市道路交通绿色发展。

由城市道路交通年均日通行量的敏感性分析可知,随着城市道路交通年均日通行量的变化10%,基于FCV的城市道路交通全生命周期化石能源消耗量ADP(f)和全球变暖潜值的变化率最大,基于BEV的城市道路交通全生命周期化石能源消耗量ADP(f)和全球变暖潜值的变化率最小。由FCV的技术进步的敏感性分析可知,燃料电池汽车技术进步对碳排放的降低效果比化石能源消耗量的降低效果更明显。由不同车型占比的敏感性分析可知,新能源汽车推广有助于降低城市道路交通全生命周期化石能源消耗和全球变暖潜值。

参考文献 (References)

- [1] 彭天铎,袁志逸,任磊,等.中国碳中和目标下交通部门低碳发展路径研究[J].汽车工程学报,2022,12(4):351-359.
PENG Tianduo, YUAN Zhiyi, REN Lei, et al. Pathway for China's Transport Sector Towards Carbon Neutrality Target[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2022, 12(4): 351-359. (in Chinese)
- [2] SEO Y, KIM S M. Estimation of Materials-induced CO₂ Emission from Road Construction in Korea [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 26: 625-631.
- [3] CELAURO C, CORRIERE F, GUERRIERI M, et al. Environmentally Appraising Different Pavement and Construction Scenarios: A Comparative Analysis for a Typical Local Road[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, 34: 41-51.
- [4] ANTHONISSEN J, BRAET J. Life Cycle Assessment of Bituminous Pavements Produced at Various Temperatures in the Belgium Context[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, 41: 306-317.
- [5] FERNÁNDEZ-SÁNCHEZ G, BERZOSA Á, BARANDICA J Met al. Opportunities for GHG Emissions Reduction in Road Projects: A Comparative Evaluation of Emissions Scenarios Using CO₂ NSTRUCT [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 104: 156-167.
- [6] NOLAND R B, HANSON C S. Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions Associated with a Highway Reconstruction: A New Jersey Case Study [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 107: 731-740.
- [7] GULOTTA T M, MISTRETTA M, PRATICÒ F G. A Life Cycle Scenario Analysis of Different Pavement Technologies for Urban Roads [J]. Science of the Total

- Environment, 2019, 673: 585–593.
- [8] 蔺瑞玉, 沙爱民, 杨发林, 等. 沥青路面温室气体排放评价方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014, 34(6): 19–26.
- LIN Ruiyu, SHA Aimin, YANG Falin, et al. Evaluation Method for Greenhouse Gas Emissions of Asphalt Pavement[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2014, 34(6): 19–26. (in Chinese)
- [9] 蔺瑞玉. 沥青路面建设过程温室气体排放评价体系研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- LIN Ruiyu. Research on Greenhouse Gas Emission Evaluation System for Asphalt Pavement Construction[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)
- [10] WANG Xianwei, DUAN Zhengyu, WU Lingsheng, et al. Estimation of Carbon Dioxide Emission in Highway Construction: A Case Study in Southwest Region of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103: 705–714.
- [11] CHEN Fei, ZHU Haoran, YU Bin, et al. Environmental Burdens of Regular and Long-Term Pavement Designs: A Life Cycle View[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016, 17(4): 300–313.
- [12] CHEN Jing, ZHAO Fuquan, LIU Zongwei, et al. Greenhouse Gas Emissions from Road Construction in China: A Province-Level Analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 168: 1039–1047.
- [13] LIU Yuanyuan, WANG Yuanqing, LI Di. Estimation and Uncertainty Analysis on Carbon Dioxide Emissions from Construction Phase of Real Highway Projects in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 144: 337–346.
- [14] SHAFIQUE M, LUO Xiaowei. Environmental Life Cycle Assessment of Battery Electric Vehicles from the Current and Future Energy Mix Perspective[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 303: 114050.
- [15] HELD M, SCHÜCKING 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.
- [16] BURCHART-KOROL D, JURSOVA S, FOLEGA 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.
- [17] SISANI F, DIMARIA 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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 Yisong, HAO Zhuo, LAN Libo, 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. (in Chinese)
- [21] 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 Vehicle[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2021, 11(2): 107–114. (in Chinese)
- [22] 陈轶嵩, 兰利波, 杜轶群, 等. 基于全生命周期评价理论的EREV/BEV/ICEV环境效益及减碳经济性评估[J]. 环境科学学报, 2023, 43(2): 516–527.
- CHEN Yisong, LAN Libo, DU Yiqun, et al. Environmental Benefit and Carbon Reduction Economic Evaluation of Extended Range/Battery Electric/Internal Combustion Engine Vehicles Based on Life Cycle Assessment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(2): 516–527. (in Chinese)
- [23] 杨洋, 赵阳, 郝卓, 等. 智能网联汽车全生命周期节能减排绩效评价研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(5): 266–274.
- YANG Yang, ZHAO Yang, HAO Zhuo, et al. Research on Performance of Energy Saving and Emission Reduction in Whole Life Cycle of Intelligent Connected Vehicle[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(5):

- 266–274.(in Chinese)
- [24] YANG Yang, LAN Libo, HAO Zhuo, et al. Life Cycle Prediction Assessment of Battery Electrical Vehicles with Special Focus on Different Lithium-Ion Power Batteries in China[J]. *Energies*, 2022, 15(15): 1–23.
- [25] 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)
- [26] BAUER C, HOFER J, ALTHAUSL 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.
- [27] 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.
- [28] AHMADI P, TORABI S H, AFSANEHF H, et 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.
- [29] 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.
- [30] PATELLA S M, SCRUCICA F, ASDRUBALI F, et al. Carbon Footprint of Autonomous Vehicles at the Urban Mobility System Level: A Traffic Simulation-Based Approach [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 74: 189–200.
- [31] LEE D Y, ELGOWAINY 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.
- [32] 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.
- [33] 王童, 杜轶群, 陈轶嵩, 等. 基于结构轻量化的城市客车车身生命周期评价 [J]. *汽车工程*, 2022, 44(5): 778–788.
- WANG Tong, DU Yiqun, CHEN Yisong, et al. Life Cycle Assessment of City Bus Body Based on Structural Lightweighting [J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(5): 778–788. (in Chinese)
- [34] 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(8): 4402–4412.
- 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(8): 4402–4412. (in Chinese)
- [35] 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)
- [36] 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, 2564.
- 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, 2564. (in Chinese)
- [37] CHEN Yisong, LAN Libo, HAO Zhuo, et al. Cradle-Grave Energy Consumption, Greenhouse Gas and Acidification Emissions in Current and Future Fuel Cell Vehicles: Study Based on Five Hydrogen Production Methods in China [J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 7931–7944.
- [38] LI Mengyu, ZHANG Xiongwen, LI Guojun, et al. A Comparative Assessment of Battery and Fuel Cell Electric Vehicles Using a Well-to-Wheel Analysis [J]. *Energy*, 2016, 94: 693–704.
- [39] 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.
- [40] 高放. 基于 LCA 的沥青路面建设期能耗和排放量化分析研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- GAO Fang. Study on the Quantitative Analysis of Energy Consumption and Emissions During the Period of Asphalt Pavement Construction Based on LCA [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [41] 孟良. 基于 LCA 的黑龙省沥青路面能耗与排放评估[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
- MENG Liang. Evaluation of Energy Consumption and Emission of Asphalt Pavement in Heilongjiang Province Based on LCA [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018. (in Chinese)
- [42] 刘圆圆. 基于 ALCA 的公路生命周期二氧化碳计量理论与方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- LIU Yuanyuan. Study on the Theory and Calculation Methods of Carbon Dioxide Emission from the Highway Life Cycle Using ALCA [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (in Chinese)
- [43] 龚志起. 建筑材料生命周期中物化环境状况的定量评价研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- GONG Zhiqi. A Quantitative Method to the Assessment of the Life Cycle Embodied Environmental Profile of Building Materials [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. (in Chinese)
- [44] 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.
- [45] SHARMA A, ZHENG Z, KIM J, et al. Assessing Traffic Disturbance, Efficiency, and Safety of the Mixed Traffic Flow of Connected Vehicles and Traditional Vehicles by Considering Human Factors [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 124: 102934.
- [46] SONG Haokun, ZHAO Fuquan, LIU Zongwei. Influences of Single-Lane Automatic Driving Systems on Traffic Efficiency and CO₂ Emissions on China's Motorways [J]. Applied Sciences, 2021, 11(22): 11032.
- [47] 毛睿昌. 基于 LCA 的城市交通基础设施环境影响分析研究——以深圳为例[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
- MAO Ruichang. Assessing the Environmental Impacts of Urban Transport Infrastructure Via Life Cycle Assessment: Case Study of a Mega City—Shenzhen, China [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017. (in Chinese)
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 中国汽车工程学会. 节能与新能源技术路线图 2.0 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- China-SAE. Technology Roadmap for Energy Saving and New Energy Saving Vehicles 2.0 [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2020. (in Chinese)

作者简介



付佩 (1994–), 女, 陕西西安人, 博士, 工程师, 主要研究方向为燃料电池技术与氢燃料电池汽车全生命周期评价。

Tel: 15686012518

E-mail: peifu@chd.edu.cn

通信作者



陈轶嵩 (1988–), 男, 陕西西安人, 博士, 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