

# 面向2035年的氢燃料与柴油重型商用车全生命周期环境影响预测研究

张硕<sup>1</sup>, 张春梅<sup>1</sup>, 蔡旭<sup>1</sup>, 兰利波<sup>1</sup>, 张建章<sup>1</sup>, 张淑祺<sup>2</sup>, 陈轶嵩<sup>1\*</sup>

1. 长安大学汽车学院, 陕西 西安 710064

2. 长安大学长安都柏林国际交通学院, 陕西 西安 710064

**摘要:** 氢燃料电池重型商用车 (fuel cell heavy commercial vehicles, FCHCV) 在推广交通领域碳减排方面具有广阔的应用前景, 但对环境是否友好仍需进一步研究. 为准确衡量 FCHCV 相对于柴油重型商用车 (diesel heavy commercial vehicles, DHCV) 的环境效益, 基于生命周期评价理论和《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》, 构建面向 2035 年基于不同氢能路径的 FCHCV 与 DHCV 的材料消耗、能源消耗、碳排放和污染物排放预测评价模型, 科学量化预测不同氢能路径下 FCHCV 相较于 DHCV 的全生命周期环境影响和节能减排潜力, 梳理并搭建了 FCHCV 与 DHCV 的物质流、能量流和排放流的数据清单, 采用 GaBi 软件与 CML2001 方法体系对数据清单进行了计算, 并对比分析了全生命周期环境影响预测结果. 结果表明: 目前, FCHCV 的全生命周期材料消耗量高于 DHCV, 主要原因是锂电池的材料消耗量较高, 基于光伏电解水制氢路径的 FCHCV 的节能减排效果较好, 对环境产生的负面效益较低. 到 2035 年, 基于光伏电解水制氢的 FCHCV 的全生命周期化石能源消耗量、碳排放和酸化潜值较 DHCV 分别低 41.78%、79.09%、55.30%, 但基于混合电力电解水制氢的 FCHCV 的全生命周期化石能源消耗量、碳排放量和酸化潜值较 DHCV 分别高 56.80%、10.47% 和 45.01%. 研究显示, 以可再生能源制氢为基础的 FCHCV 在未来具有较大的节能减排和降低环境负面效益潜力, 但以混合电力制氢为基础的 FCHCV 未来与 DHCV 在节能减排 and 环境保护方面竞争力较小.

**关键词:** 氢燃料; 柴油; 重型商用车; 全生命周期评价; 环境影响; 情景预测; 氢能路径

中图分类号: X32

文章编号: 1001-6929(2023)10-1892-13

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2023.08.12

## Life Cycle Prediction Assessment of Hydrogen Fuel Cells and Diesel Heavy-Duty Commercial Vehicles for 2035

ZHANG Shuo<sup>1</sup>, ZHANG Chunmei<sup>1</sup>, CAI Xu<sup>1</sup>, LAN Libo<sup>1</sup>, ZHANG Jianzhang<sup>1</sup>, ZHANG Xuqi<sup>2</sup>, CHEN Yisong<sup>1\*</sup>

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

2. Chang'an Dublin International College of Transportation at Chang'an University, Chang'an University, Xi'an 710064, China

**Abstract:** Fuel cell heavy commercial vehicles (FCHCV) have broad application prospects in reducing transportation carbon emissions, but whether they are environmentally friendly still needs to be studied. In order to accurately measure the environmental benefits of FCHCV compared to diesel heavy commercial vehicles (DHCV), based on the theory of life cycle assessment and the 'Roadmap 2.0 for Energy Conservation and New Energy Vehicle Technology', a prediction and evaluation model for material consumption, energy consumption, carbon emissions, and pollutant emissions of FCHCV based on different hydrogen energy paths and diesel heavy commercial vehicles (DHCV) is constructed for the year 2035. The model scientifically quantifies the life cycle environmental impact and energy-saving and emission reduction potential of FCHCV based on different hydrogen energy paths compared to DHCV. A data list of material flow, energy flow, and discharge flow for FCHCV and DHCV was compiled and constructed. The data list was calculated using

收稿日期: 2023-04-28

修订日期: 2023-08-16

**作者简介:** 张硕(1985-), 女, 陕西渭南人, 副教授, 博士, 主要从事新能源汽车技术与全生命周期评价研究, zhangshuo@chd.edu.cn.

\* 责任作者, 陈轶嵩(1988-), 男, 陕西西安人, 教授, 博士, 博导, 主要从事氢燃料电池汽车与新能源汽车全生命周期评价研究, chenysisong\_1988@163.com

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (No.2021YFE0192900); 陕西省重点研发计划项目 (No.2021LLRH-04-04-02); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金项目 (No.300102223207)

**Supported by** National Key Research and Development Program of China (No.2021YFE0192900); Key Research and Development Project of Shaanxi Province, China (No.2021LLRH-04-04-02); Fundamental Research Funds for the Central Universities, Chang'an University, China (No.300102223207)

GaBi software and CML2001 method system, and the results of life cycle environmental impact prediction were compared and analyzed. The results show that the current life cycle material consumption of FCHCV is higher than that of DHCV, mainly due to the high material consumption of lithium batteries. FCHCV based on the photovoltaic electrolysis water hydrogen production path has good energy saving and emission reduction effects, and low negative environmental benefits. By 2035, the life cycle fossil energy consumption, carbon emissions and acidification potential of FCHCV based on photovoltaic electrolysis of water for hydrogen production will be 41.78%, 79.09% and 55.30% lower than DHCV. However, the life cycle fossil energy consumption, carbon emissions and acidification potential of FCHCV based on hybrid electric electrolysis of water for hydrogen production will be 56.80%, 10.47% and 45.01% higher than DHCV. Therefore, FCHCV based on renewable energy for hydrogen production has great potential for energy conservation, emission reduction, and reduction of negative environmental benefits in the future. However, FCHCV based on hybrid electricity for hydrogen production has less competitiveness in energy conservation, emission reduction, and environmental protection compared to DHCV in the future.

**Keywords:** hydrogen fuel; diesel oil; heavy commercial vehicles; life cycle assessment; environmental impact; scenario prediction; hydrogen energy pathway

全球变暖和能源安全问题成为中国高质量发展需要面对的问题,当前交通运输行业已成为中国碳排放重要领域之一<sup>[1]</sup>。《关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知》中明确,到 2030 年新增新能源、清洁能源动力的交通运输工具比例在 40% 左右。《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》中预计,到 2025 年初步建立以工业副产氢和可再生能源制氢就近利用为主的氢能供应体系。同时,各级政府发布氢能与燃料电池方面的发展规划,预计到 2025 年和 2035 年全国燃料电池汽车保有量分别达  $10 \times 10^4$  和  $100 \times 10^4$  辆,氢燃料电池汽车在未来拥有巨大的发展潜力。部分学者关于燃料电池重型商用车的高成本、高续航里程、加氢站建设<sup>[2]</sup>等因素研究发现,燃料电池汽车发展路线应以商用车为主<sup>[3]</sup>。氢燃料电池重型商用车(fuel cell heavy commercial vehicles, FCHCV)在运行使用阶段产物只有对环境友好的水<sup>[4]</sup>,但是考虑 FCHCV 的材料获取、制造过程以及追溯氢能的制取、运输和存储过程,FCHCV 较传统燃油重型商用车对环境是否友好仍是需要研究的课题。利用全生命周期评价(life cycle assessment, LCA)方法可以全面系统地量化对比 FCHCV 与传统燃油重型商用车对环境产生的影响和节能减排效益。

LCA 方法早在 20 世纪 60 年代便用于产品能源与资源相关研究,采用 LCA 方法可以量化分析产品生命周期内涉及资源、能源消耗以及所产生的各种环境影响,实现产品生命周期环境评价结果最优,推动产品绿色可持续发展。在生命周期影响评价方法方面,目前比较成熟、应用比较广泛的有国外的 EDIP、CML<sup>[5]</sup>等方法,其中 CML2001 方法体系涉及的影响评价分为材料的消耗、能源的消耗以及污染物的排放和损害等三大类,笔者选取 CML2001 方法体系评估 FCHCV 生命周期环境效益。关于采用 LCA 方法

对 FCHCV 与传统燃油重型商用车进行评估方面,国内外已有不少研究案例。从寻求替代柴油燃料的研究视角出发,Wanniarachchi 等<sup>[6-7]</sup>基于车辆类型和相关供应链,全面考察了替代燃料货运的生命周期环境和经济影响,并针对关键的电力和氢燃料供应链场景开发了一个 LCA 影响数据库;Sun 等<sup>[8]</sup>量化评估了加拿大液化天然气作为重型车辆的替代燃料对环境的影响;Stettler 等<sup>[9]</sup>量化对比了液化气和柴油重型货车的燃料生命周期碳排放;Hannach 等<sup>[10]</sup>通过改造现有的燃料喷射系统和卡车上的燃料存储来混合柴油和氢气,评估了在重型卡车上实施氢和柴油双燃料解决方案的生命周期环境和经济影响。从柴油和氢燃料电池商用车的 LCA 对比研究视角,Yeow 等<sup>[11-14]</sup>从续航里程、氢能路径、车辆类型和生命周期成本方面进行了研究,发现 FCHCV 与柴油重型商用车(diesel heavy commercial vehicles, DHCV)相比能在一定程度上降低碳排放。但 Gustafsson 等<sup>[15]</sup>量化评估了纯电动汽车、燃料电池汽车和纯电动重型商用车能源载体燃料生命周期碳排放,结果表明,高电力依赖的能源载体在降低碳排放效果上并不一定比柴油更好。涂小岳等<sup>[16]</sup>基于 LCA 方法建立了 DHCV 的生命周期能耗和环境排放差异评价模型。Zhang 等<sup>[17]</sup>比较了 2020 年和 2040 年不同时间节点下的纯电动汽车、氢燃料电池汽车和 DHCV 的全生命周期污染物排放量,发现绿色电力和绿色氢是影响不同重型商用车电气化方案下  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{PM}_{2.5}$  全生命周期排放的重要因素。

综上,国内外学者关于重型商用车全生命周期评价主要聚焦在液化气和 DHCV,符合我国实际发展情况的 FCHCV 的全生命周期环境影响预测研究相对较少且结果尚不明确。因此,本研究基于我国区域实际发展情况,构建面向 2035 年基于不同氢能路径下的 FCHCV 与 DHCV 的 LCA 预测模型,对 2022 年与

2035年FCHCV与DHCV的全生命周期物质流、能量流和排放流进行对比分析,探究基于不同氢能路径下的FCHCV与DHCV产生的环境效益和节能减排潜力,以期为FCHCV节能减排、环境友好路线制定提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 评价对象

本研究选取国内某重型商用车企业某款FCHCV

为评价研究对象,同时为使得FCHCV与DHCV具有可比性,选取的DHCV与FCHCV为同一型号,以此量化预测对比FCHCV与DHCV的生命周期材料资源消耗、化石能源消耗、碳排放和污染物排放结果,评估FCHCV的生命周期环境影响和节能减排潜力。由于FCHCV与DHCV的差异主要在整备质量的差异,因此暂未考虑车辆的悬挂车厢,两款车型实车实景图如图1所示,基本特征参数见表1。



图1 FCHCV与DHCV实车实景对比

Fig.1 Comparison diagram of FCHCV and DHCV actual vehicle

表1 DHCV与FCHCV基本特征参数

Table 1 Basic characteristic parameters of DHCV and FCHCV

参数名称	DHCV	FCHCV
车身长度×宽度×高度	7.06 m×2.55 m×3.98 m	7.06 m×2.55 m×3.98 m
整车质量/t	8.8	9.0
牵引总质量/t	40	40
最高车速/(km/h)	110	110
燃料电池额定功率/kW		162
锂电池容量/(kW·h)		117.1
电动机峰值功率/kW		360
发动机最大输出功率/kW	390	
燃料电池寿命/h		30 000
百公里氢能消耗量/ [kg/(100 km)]		14.91 <sup>1)</sup>
燃油经济性/[L/(100 km)]	40	
低温启动温度/℃		-30

注: 1)14.91 kg/(100 km)代表49 t重型牵引车在C-WTVC驾驶循环下测算的百公里氢耗量。

### 1.2 系统边界

FCHCV与DHCV的全生命周期包括原材料获取、制造装配、运行使用和报废回收4个阶段,分别用阶段I、阶段II、阶段III和阶段IV来表示。基于CML2001方法体系,其输出为表征碳排放的全球变暖潜值[GWP,以CO<sub>2</sub>-Eq(当量)计,单位为kg)]以及将模型输出的材料资源统一转换为材料资源消耗量[ADP(e),以Sb-Eq计,单位为kg],初级能源统一转

换为化石能源消耗量[ADP(f),单位为MJ],环境排放物统一转换为酸化潜值(AP,以SO<sub>2</sub>-Eq计,单位为kg),以及水体富营养化潜值(EP,以Phosphate-Eq计,单位为kg)、光化学烟雾潜值(POCP,以Ethene-Eq计,单位为kg)和人类损害潜值(HTP,以DCB-Eq计,单位为kg)。功能单位是指经过量化的产品功能或绩效特征<sup>[12]</sup>,《节能与新能源汽车技术路线图2.0》规划氢燃料电池商用车到2025年的整车寿命为40×10<sup>4</sup> km,本研究假设FCHCV在中国工况运行40×10<sup>4</sup> km,系统边界如图2所示。

### 1.3 预测评价模型

#### 1.3.1 预测情景

本研究基于FCHCV关键技术发展趋势,参考《节能与新能源技术路线图2.0》和《中国2030年能源电力发展规划研究及2060年展望》等,选取车辆百公里燃料消耗量、牵引车挂牵比、氢能运输方式和电力结构等关键因素构建面向2035年的预测情景。根据《节能与新能源汽车技术路线图2.0》中商用车的总体技术路线可知,到2035年重型商用车的燃油经济性降至10 kg/(100 km),牵引车挂牵比变化率提高15%,DHCV的油耗降低25%,整备质量降低13%,FCHCV的预测情景如表2所示。

#### 1.3.2 预测评价模型

本研究基于笔者所在团队研究基础<sup>[18-21]</sup>上,构建

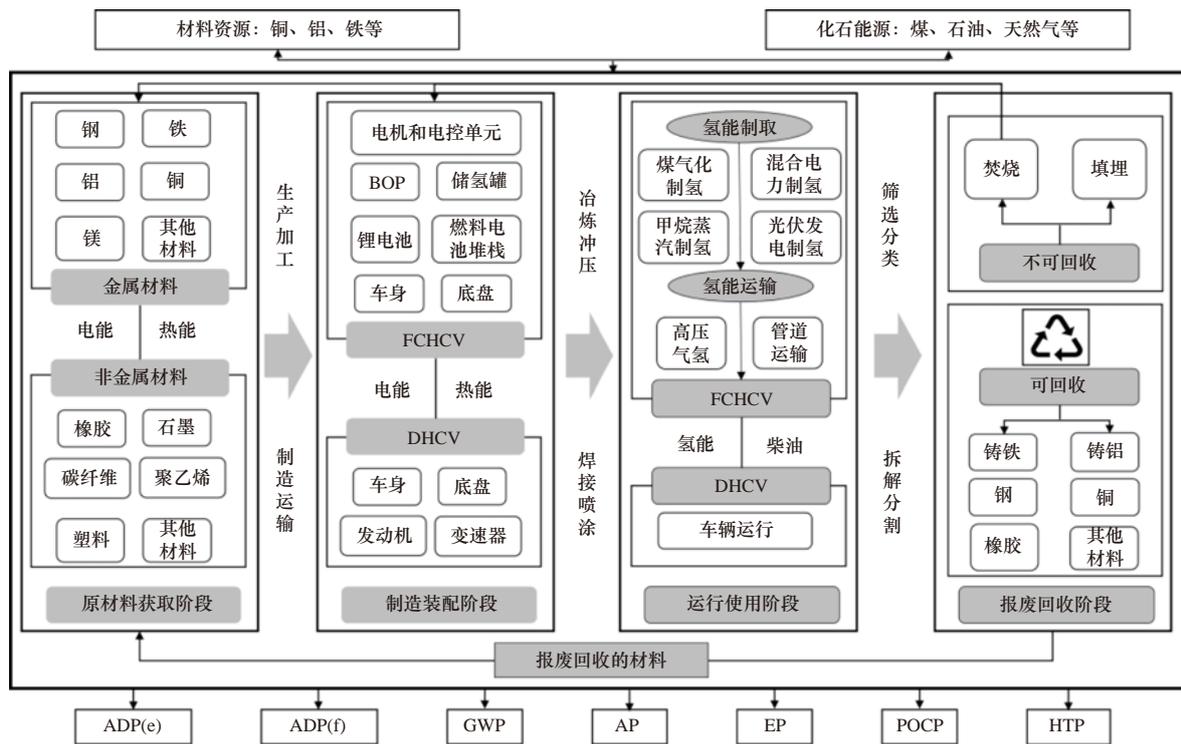


图 2 系统边界

Fig.2 System boundary

表 2 FCHCV 的预测情景

Table 2 Predictive scenarios for fuel cell heavy commercial vehicles

年份	百公里氢耗量/ [kg/(100 km)]	牵引车挂牵比率 变化率/%	整备 质量/t	电解水制取1 N·m <sup>3</sup> 的 氢耗电量/(kW·h)	氢能运输 方式	电力结构占比/%					
						煤电	水电	核电	光伏发电	风电	其他
2022	14.91	—	9.00	4	高压气氢	71	15	3	2	4	5
2035	10.00	15	7.83	3	管道运输	40	12	9	17	19	3

面向 2035 年基于关键因子变化的车辆 LCA 预测评价模型,量化预测对比 FCHCV 与 DHCV 的全生命周期材料资源消耗、化石能源消耗、碳排放和污染物排放结果,评估 FCHCV 全生命周期环境效益和节能减排潜力。

材料资源消耗 LCA 预测矩阵 ( $F_{LCA}$ ) 为

$$F_{LCA} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n [(\delta \times m_{ij})_{k \times n} \times (f_{1ij})_{n \times t}] + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n [(\delta \times m_{ij})_{k \times n} \times (f_{2ij})_{n \times t}] + F_{rec} \quad (1)$$

式中:  $\delta$  为车辆部件质量轻量化因子;  $m_{ij}$  为汽车第  $i$  个组成部件中第  $j$  种车用材料的质量, kg;  $f_{1ij}$  为生产单位汽车第  $i$  个组成部件中第  $j$  种车用材料消耗的材料资源量, kg/kg;  $t$  为材料资源的种类数;  $f_{2ij}$  为制造单位汽车第  $i$  个组成部件中第  $j$  种车用材料消耗的材料资源量, kg/kg;  $F_{rec}$  为报废回收阶段的材料资源消耗

LCA 预测矩阵,其计算方法如式 (2) 所示。

$$F_{rec} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \sum_{a=1}^5 [(m_{ij} \times \zeta_a)_{k \times 5} \times (f_{4a})_{5 \times t}] \quad (2)$$

式中:  $\zeta_a$  为金属  $a$  的回收率, %;  $f_{4a}$  为回收单位金属  $a$  过程中所消耗的材料资源量, kg/kg。

化石能源消耗 LCA 预测矩阵 ( $E_{LCA}$ ) 为

$$E_{LCA} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n [(\delta \times m_{ij})_{k \times n} \times (e_{1ij})_{n \times u}] + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n [(\delta \times m_{ij})_{k \times n} \times (e_{2ij})_{n \times u}] + \lambda \times Q_1 \times L \div 100 \div \eta \times (e_{311})_{1 \times u} + E_{rec} \quad (3)$$

式中:  $e_{1ij}$  为生产单位汽车第  $i$  个组成部件中第  $j$  种车用材料消耗的化石能源量, MJ/kg;  $u$  为化石能源的种类数;  $e_{2ij}$  为制造单位汽车第  $i$  个组成部件中第  $j$  种车用材料消耗的化石能源量, MJ/kg;  $\lambda$  为汽车在未来技术进步下燃料百公里消耗量降低的百分率;  $Q_1$  为汽

车的百公里氢耗量或百公里柴油消耗量, kg/(100 km);  $L$  为全生命周期的行驶里程, km;  $\eta$  为汽车的氢气加注效率或柴油的加注效率;  $e_{311}$  为生产单位氢或柴油所消耗的化石能源量, MJ/kg;  $E_{\text{rec}}$  为报废回收阶段的化石能源消耗 LCA 预测矩阵, 如式 (4) 所示.

$$\mathbf{G}_{\text{LCA}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n [(\delta \times m_{ij})_{k \times n} \times (g_{1ij})_{n \times 1}] + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n [(\delta \times m_{ij})_{k \times n} \times (g_{2ij})_{n \times 1}] + \lambda \times Q_1 \times L \div 100 \div \eta \times [(g_{311})_{1 \times s} + (g_{321})_{1 \times s}] + \mathbf{G}_{\text{rec}} \quad (5)$$

式中:  $g_{1ij}$  为生产单位汽车第  $i$  个组成部件中第  $j$  种车用材料所产生的碳排放当量, kg/kg;  $g_{2ij}$  为制造单位汽车第  $i$  个组成部件中第  $j$  种车用材料所产生的碳排放当量, kg/kg;  $g_{311}$  为生产单位氢或柴油所产生的碳排放当量, kg/kg;  $s$  为污染物排放物的种类数;  $g_{321}$  为燃烧单位氢或柴油所产生的碳排放当量, kg/kg;  $\mathbf{G}_{\text{rec}}$  为报废回收阶段的碳排放 LCA 预测矩阵, 其计算方法

$$\mathbf{P}_{\text{LCA}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n [(\delta \times m_{ij})_{k \times n} \times (p_{1ij})_{n \times s}] + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n [(\delta \times m_{ij})_{k \times n} \times (p_{2ij})_{n \times s}] + \lambda \times Q_1 \times L \div 100 \div \eta \times [(p_{311})_{1 \times s} + (p_{321})_{1 \times s}] + \mathbf{P}_{\text{rec}} \quad (7)$$

式中:  $p_{1ij}$  为生产单位汽车第  $i$  个组成部件中第  $j$  种车用材料所排放的污染物当量, kg/kg;  $p_{2ij}$  为制造单位汽车第  $i$  个组成部件中第  $j$  种车用材料所排放的污染物当量, kg/kg;  $p_{311}$  为生产单位氢或柴油所排放的污染物当量, kg/kg;  $p_{321}$  为燃烧单位氢或柴油所排放的污染物当量, kg/kg;  $\mathbf{P}_{\text{rec}}$  为报废回收阶段的污染物排放 LCA 预测矩阵, 其计算方法如式 (8) 所示.

$$\mathbf{P}_{\text{rec}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \sum_{a=1}^5 [(m_{ij} \times \zeta_a)_{k \times 5} \times (p_{4a})_{5 \times s}] \quad (8)$$

式中,  $p_{4a}$  为回收单位金属  $a$  过程中所排放的污染物当量, kg/kg.

## 1.4 清单分析

### 1.4.1 原材料获取阶段

本研究将 FCHCV 划分为燃料电池堆栈<sup>[22-25]</sup>、储氢罐<sup>[25]</sup>、锂电池<sup>[26-28]</sup>、电机与电控单元<sup>[29-30]</sup>、电堆辅电系统 (Balance of plant, BOP)<sup>[23]</sup>、车身<sup>[31-32]</sup>和底盘<sup>[18-19]</sup>七部分, 将 DHCV 划分为发动机、变速器、车身和底盘<sup>[19,31-32]</sup>四部分. 根据实地调研, FCHCV 电池堆栈、储氢罐、锂电池、电机与电控单元、电堆辅电系统、车身和底盘的质量占比分别为 4.1%、7.6%、6.5%、1.0%、2.7%、30.1% 和 48.0%, 根据商用车总体技术路线, 2022 年和 2035 年 FCHCV 动力系统数据清单如表 3 所示, 车身和底盘数据清单如表 4 所示. DHCV 发动机、变速器、车身和底盘的质量占比分别为 10.3%、5.7%、30.7% 和 53.3%, 具体数据清单如表 4 所示.

$$\mathbf{E}_{\text{rec}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \sum_{a=1}^5 [(m_{ij} \times \zeta_a)_{k \times 5} \times (e_{4a})_{5 \times u}] \quad (4)$$

式中,  $e_{4a}$  为回收单位金属  $a$  过程中所消耗的化石能源量, MJ/kg.

碳排放 LCA 预测矩阵 ( $\mathbf{G}_{\text{LCA}}$ ) 为

法如式 (6) 所示.

$$\mathbf{G}_{\text{rec}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n \sum_{a=1}^5 [(m_{ij} \times \zeta_a)_{k \times 5} \times (g_{4a})_{5 \times s}] \quad (6)$$

式中,  $g_{4a}$  为回收单位金属  $a$  过程中所产生的碳排放当量, kg/kg.

污染物排放 LCA 预测矩阵 ( $\mathbf{P}_{\text{LCA}}$ ) 为

### 1.4.2 制造装配阶段

考虑制造装配车辆所带来的能源消耗, 目前我国电力以煤电为主, 经调研文献和产业报告, 假设我国电力来源中燃煤发电占 71%, 水力发电占 15%, 核能发电占 3%, 光伏发电占 2%, 风力发电占 4% 以及其他发电方式占 5%. 参考文献 [19-20], 得到 FCHCV 整车装配阶段的电能和热能消耗分别为 6.86 和 2.03 MJ/kg, DHCV 整车制造装配阶段电能和热能消耗分别为 2.82 和 0.84 MJ/kg.

### 1.4.3 运行使用阶段

FCHCV 运行使用阶段主要考虑氢气消耗所带来的环境影响, 氢能路径的不同和车辆的运行状况都会影响车辆使用过程的氢能消耗. 目前国内主流为站外供氢加氢站<sup>[34]</sup>, 因此本研究只考虑站外供氢加氢站. 根据《氢能产业发展中长期规划 (2021—2035 年)》可知, 可再生能源制氢和传统能源制氢匹配碳捕捉、利用和封存技术 (carbon capture, utilization and storage, CCUS) 是未来的发展方向, 因此选取煤气化、甲烷重整、混合电力电解水以及光伏电解水制氢作为制氢方式代表进行量化分析, 混合电力结构参考我国当前电力结构, 运输方式考虑当前氢能主流运输方式——高压气氢运输. 基于文献调研和实地调查<sup>[35-37]</sup>, 4 种氢能路径下 1 kg 氢气的生命周期能耗、碳排放和污染物排放量如表 5 所示.

DHCV 运行使用阶段主要考虑车辆消耗柴油的

表 3 2022 年和 2035 年 FCHCV 动力系统数据清单

Table 3 FCHCV powertrain data list in 2022 and 2035

部件	材料清单	投入用量		部件	材料清单	投入用量			
		2022年	2035年			2022年	2035年		
燃料电池堆栈 <sup>1)</sup>	质子交换膜	异丙醇	2.27 kg	1.96 kg	BOP	钢	167.67 kg	145.87 kg	
		水	2.27 kg	1.96 kg		锻造铝	9.72 kg	8.46 kg	
		电能	3.48 MJ	3.01 MJ		高密度聚乙烯	36.45 kg	31.71 kg	
		热能	2.15 MJ	1.86 MJ		乙烯	19.44 kg	16.91 kg	
		四氟乙烯	1.73 kg	1.49 kg		橡胶	7.29 kg	6.34 kg	
		硫酸	1.30 kg	1.12 kg		其他	2.43 kg	2.11 kg	
		聚乙烯	4.15 kg	3.58 kg					
		膜电极	石墨	16.82 kg	1.57 kg	电机和电控单元	铜	14.40 kg	12.53 kg
			聚四氟乙烯 <sup>2)</sup>	33.63 kg	3.14 kg		钢	71.10 kg	61.86 kg
			碳纤维 <sup>3)</sup>	302.70 kg	28.24 kg		钕铁硼 <sup>5)</sup>	0.90 kg	0.78 kg
			电能	1 204.06 MJ	112.32 MJ		铝合金	3.60 kg	3.13 kg
		催化层	铂碳催化剂 <sup>4)</sup>	0.23 kg	0.20 kg	储氢罐	化石能源消耗 <sup>6)</sup>	—	—
			碳黑	0.35 kg	0.30 kg		碳纤维	410.40 kg	357.05 kg
			Nafion DE-521	2.80 kg	2.42 kg		环氧树脂	164.16 kg	142.82 kg
			水	0.23 kg	0.20 kg		泡沫	27.36 kg	23.80 kg
			甲醇	0.23 kg	0.20 kg		玻璃纤维	27.36 kg	23.80 kg
			电能	3 437.08 MJ	2 800.06 MJ		高强度聚乙烯	47.88 kg	41.65 kg
		组装	电能	506.03 MJ	436.98 MJ	铝基体	6.84 kg	5.95 kg	
		冷却垫片	橡胶	42.59 kg	36.79 kg	锂电池	磷酸铁锂	128.70 kg	111.97 kg
				5.54 MJ	4.78 MJ		聚氯乙烯	40.95 kg	35.63 kg
	端板	铝	24.68 kg	21.28 kg			239.85 kg	208.67 kg	
			24.68 kg	21.28 kg	石墨		58.50 kg	50.90 kg	
							35.10 kg	30.54 kg	
	双极板	石墨	163.67 kg	141.48 kg	聚乙烯		70.20 kg	61.07 kg	
		醋酸乙烯酯	22.0 kg	60.63 kg	其他		11.70 kg	10.18 kg	
		电能	5 143.82 MJ	4 446.38 MJ	电能	2.67 MJ	1 358.90 MJ		

注: 1)1 kW 的燃料电池堆栈由 1.434 kg 的双极板、0.261 kg 的冷却剂垫片、0.265 kg 的膜电极和 0.302 kg 的端板组成<sup>[22]</sup>. 2) 聚四氟乙烯的清单在 GaBi 数据库中没有, 用高强度聚乙烯代替. 3) 生产 0.9 kg 碳纤维需要消耗 0.9 kg 的聚丙烯腈、88.7 MJ 热能和 235.87 MJ 的电能<sup>[22]</sup>. 4) 生产 1 g 铂碳催化剂需要消耗 0.6 MJ 的电能和 0.09 MJ 的热能<sup>[22]</sup>. 5) 生产 1 kg 钕铁硼需要消耗 0.697 kg 的铁和 3.37 kg 的硬煤<sup>[33]</sup>. 6) 电机厂的制造化石能源消耗强度为生产 1 kg 标准煤所使用的电能, 生产电机需要消耗 59% 的煤和 32% 的电能<sup>[30]</sup>.

表 4 2022 年和 2035 年 FCHCV 车身底盘、DHCV 原材料获取阶段数据清单

Table 4 FCHCV body chassis and DHCV raw material acquisition stage data list in 2022 and 2035

车型	年份	部件	使用量/kg								
			钢	铝	铸铁	铜	镁	橡胶	玻璃纤维	塑料	其他
FCHCV	2022	车身	1 861.08	21.67		51.47	2.71		178.79	471.37	121.91
		底盘	3 555.36	43.20	272.16	99.36		181.44		142.56	25.92
	2035	车身	1 619.14	18.85		44.78	2.36		155.55	410.09	106.06
		底盘	3 093.16	37.58	236.78	86.44		157.85		124.03	22.55
DHCV	2022	发动机	330.94	389.34	114.02	9.27		41.72		41.72	
		变速器	153.90	153.90	153.90			25.65		25.65	
		车身	1 898.18	22.10		52.50				480.76	306.69
		底盘	3 947.93	47.97	302.21	110.33		201.47		158.30	28.78
	2035	发动机	281.67	331.37	97.04	7.89		35.50		35.50	
		变速器	130.99	130.99	130.99			21.83		21.83	
		车身	1 615.56	18.81		44.68				409.18	261.03
		底盘	3 360.13	40.83	257.21	93.90		171.48		134.73	24.50

注: 由于缺少 2035 年车身各材料占比预测数据, 2035 年各原材料使用量参考《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》, 即各原材料使用量相较于 2022 年降低 13%.

表5 4种氢能路径下1 kg氢气的生命周期能耗、碳排放和污染物排放量

Table 5 Life cycle energy consumption, carbon emissions, and pollutant emissions of 1 kg hydrogen under 4 hydrogen energy pathways

氢能路径	ADP(f)/MJ	GWP/kg	AP/kg	EP/kg	POCP/kg	HTP/kg
煤气化+高压气氢	$3.31 \times 10^2$	$2.75 \times 10^1$	$1.66 \times 10^{-2}$	$8.26 \times 10^{-4}$	$4.78 \times 10^{-3}$	$8.30 \times 10^{-3}$
甲烷重整+高压气氢	$3.98 \times 10^2$	$2.03 \times 10^1$	$2.46 \times 10^{-2}$	$1.55 \times 10^{-3}$	$4.98 \times 10^{-3}$	$1.20 \times 10^{-2}$
混合电力电解水+高压气氢	$4.09 \times 10^2$	$3.47 \times 10^1$	$7.66 \times 10^{-2}$	$9.75 \times 10^{-3}$	$8.28 \times 10^{-3}$	$3.30 \times 10^{-2}$
光伏电解水+高压气氢	$1.52 \times 10^2$	$3.21 \times 10^0$	$1.26 \times 10^{-2}$	$9.26 \times 10^{-4}$	$4.13 \times 10^{-3}$	$1.00 \times 10^{-4}$

化石能源消耗和排放,根据当前《重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》的污染物排放限值以及参考文献[21]得到的参考值,经过Gabi软件CML2001方法的测算,得到柴油燃料生产和使用过程的排放量(见表6)。

表6 车辆行驶单位公里所需的柴油燃料在生产和使用过程中产生的碳排放量及污染物排放量

Table 6 Carbon emissions and pollutant emissions

during the production and use of diesel fuel kg

阶段	GWP	AP	EP	POCP	HTP
柴油生产	$1.68 \times 10^{-1}$	$7.63 \times 10^{-4}$	$7.6 \times 10^{-5}$	$1.10 \times 10^{-4}$	$2.86 \times 10^{-2}$
柴油使用	$1.64 \times 10^0$	$2.36 \times 10^{-3}$	$6.23 \times 10^{-4}$	$1.92 \times 10^{-4}$	$5.71 \times 10^{-3}$
总计	$1.81 \times 10^0$	$3.12 \times 10^{-3}$	$7.00 \times 10^{-4}$	$3.02 \times 10^{-4}$	$3.43 \times 10^{-2}$

#### 1.4.4 报废回收阶段

报废回收阶段主要考虑车辆报废之后拆解、粉碎等工艺和主要金属材料回收产生的环境效益。由于当前FCHCV处于示范运营阶段,国内尚未出现大规模报废的FCHCV。因此,本研究FCHCV的部件回收主要借鉴传统燃油汽车的报废流程<sup>[38]</sup>,其搭载的锂电池的回收参考纯电动汽车锂电池的回收流程工

艺<sup>[39-40]</sup>,搭载的电堆的回收借鉴国外电堆的回收工艺流程<sup>[22]</sup>,DHCV报废回收同样借鉴传统燃油汽车的报废流程。传统部件回收的能源消耗和回收效率如表7所示。

表7 传统部件材料回收的能源消耗和回收效率

Table 7 Energy consumption and recycling efficiency of traditional component material recycling

材料	预处理能耗/(kW·h)	回收效率/%	废渣处理率/%
钢	4.23	75	25
铝	0.80	46	54
铁	2.24	80	20
铜	9.54	90	10
橡胶		37	63

## 2 结果与讨论

### 2.1 预测结果

基于DHCV和FCHCV的数据清单,利用车辆全生命周期预测评价模型和CML2001评价方法,得到2022年和2035年DHCV和FCHCV的全生命周期评价结果如表8所示。

表8 2022年和2035年DHCV的全生命周期评价结果

Table 8 DHCV life cycle assessment results for 2022 and 2035

年份	阶段	ADP(e)/kg	ADP(f)/MJ	GWP/kg	AP/kg	EP/kg	POCP/kg	HTP/kg
2022	I	$5.82 \times 10^{-1}$	$3.43 \times 10^5$	$3.13 \times 10^4$	$1.14 \times 10^2$	$7.83 \times 10^0$	$1.23 \times 10^1$	$1.02 \times 10^4$
	II	$1.25 \times 10^{-3}$	$2.34 \times 10^5$	$2.21 \times 10^4$	$4.81 \times 10^1$	$6.29 \times 10^0$	$3.23 \times 10^0$	$9.57 \times 10^2$
	III	$0.00 \times 10^0$	$6.80 \times 10^6$	$7.23 \times 10^5$	$1.25 \times 10^3$	$2.80 \times 10^2$	$1.21 \times 10^2$	$1.37 \times 10^4$
	IV	$-4.97 \times 10^{-1}$	$-1.41 \times 10^5$	$-1.28 \times 10^4$	$-5.35 \times 10^1$	$-3.22 \times 10^0$	$-6.48 \times 10^0$	$-5.13 \times 10^3$
	总计	$8.62 \times 10^{-2}$	$7.24 \times 10^6$	$7.64 \times 10^5$	$1.36 \times 10^3$	$2.91 \times 10^2$	$1.30 \times 10^2$	$1.98 \times 10^4$
2035	I	$5.16 \times 10^{-1}$	$3.04 \times 10^5$	$2.77 \times 10^4$	$1.01 \times 10^2$	$6.94 \times 10^0$	$1.09 \times 10^1$	$9.04 \times 10^3$
	II	$1.11 \times 10^{-3}$	$2.07 \times 10^5$	$1.96 \times 10^4$	$4.26 \times 10^1$	$5.58 \times 10^0$	$2.87 \times 10^0$	$8.49 \times 10^2$
	III	$0.00 \times 10^0$	$5.10 \times 10^6$	$5.42 \times 10^5$	$9.37 \times 10^2$	$2.10 \times 10^2$	$9.06 \times 10^1$	$1.03 \times 10^4$
	IV	$-4.41 \times 10^{-1}$	$-1.25 \times 10^5$	$-1.13 \times 10^4$	$-4.74 \times 10^1$	$-2.85 \times 10^0$	$-5.74 \times 10^0$	$-4.55 \times 10^3$
	总计	$7.64 \times 10^{-2}$	$5.49 \times 10^6$	$5.78 \times 10^5$	$1.03 \times 10^3$	$2.19 \times 10^2$	$9.86 \times 10^1$	$1.56 \times 10^4$

由表8可见,相比于2022年,2035年DHCV全生命周期ADP(e)、ADP(f)、GWP、AP、EP、POCP和HTP分别降低了11.36%、24.17%、24.35%、24.26%、24.74%、24.15%和21.21%,主要原因是车辆轻量化

技术的进步以及使用的电能进一步清洁化。2022年和2035年基于4种氢能路径的FCHCV全生命周期评价结果如表9所示,进一步分析评价得到原材料获取阶段各部件全生命周期评价结果(见表10)。

表 9 2022 年和 2035 年基于 4 种氢能路径的 FCHCV 全生命周期评价结果

Table 9 FCHCV life cycle assessment results based on four hydrogen energy pathways in 2022 and 2035

年份	氢能路径	ADP(e)/kg	ADP(f)/MJ	GWP/kg	AP/kg	EP/kg	POCP/kg	HTP/kg
2022	煤气化	$2.86 \times 10^{-1}$	$2.05 \times 10^7$	$1.71 \times 10^6$	$1.16 \times 10^3$	$6.84 \times 10^1$	$2.97 \times 10^2$	$2.21 \times 10^4$
	甲烷重整	$2.86 \times 10^{-1}$	$2.45 \times 10^7$	$1.28 \times 10^6$	$1.63 \times 10^3$	$1.12 \times 10^2$	$3.09 \times 10^2$	$2.23 \times 10^4$
	混合电力电解水	$2.86 \times 10^{-1}$	$2.52 \times 10^7$	$2.14 \times 10^6$	$4.73 \times 10^3$	$6.01 \times 10^2$	$5.06 \times 10^2$	$2.36 \times 10^4$
	光伏电解水	$2.86 \times 10^{-1}$	$9.85 \times 10^6$	$2.63 \times 10^5$	$9.17 \times 10^2$	$7.43 \times 10^1$	$2.59 \times 10^2$	$2.16 \times 10^4$
2035	煤气化	$2.61 \times 10^{-1}$	$1.34 \times 10^7$	$1.11 \times 10^6$	$6.90 \times 10^2$	$4.82 \times 10^1$	$1.37 \times 10^2$	$1.86 \times 10^4$
	甲烷重整	$2.61 \times 10^{-1}$	$1.61 \times 10^7$	$8.23 \times 10^5$	$1.01 \times 10^3$	$7.70 \times 10^1$	$1.45 \times 10^2$	$1.88 \times 10^4$
	混合电力电解水	$2.61 \times 10^{-1}$	$8.61 \times 10^6$	$6.39 \times 10^5$	$1.49 \times 10^3$	$1.90 \times 10^2$	$1.70 \times 10^2$	$1.86 \times 10^4$
	光伏电解水	$2.61 \times 10^{-1}$	$3.20 \times 10^6$	$1.21 \times 10^5$	$4.61 \times 10^2$	$4.54 \times 10^1$	$1.05 \times 10^2$	$1.84 \times 10^4$

表 10 2022 年和 2035 年 FCHCV 原材料获取阶段各部件全生命周期评价结果

Table 10 Evaluation results of FCHCV raw material acquisition for various components in 2022 and 2035

年份	部件	ADP(e)/kg	ADP(f)/MJ	GWP/kg	AP/kg	EP/kg	POCP/kg	HTP/kg
2022	燃料电池堆栈	$4.42 \times 10^{-3}$	$6.45 \times 10^4$	$5.25 \times 10^3$	$1.28 \times 10^1$	$1.45 \times 10^0$	$9.53 \times 10^{-1}$	$2.56 \times 10^3$
	锂电池	$2.39 \times 10^{-1}$	$6.99 \times 10^4$	$9.47 \times 10^3$	$3.38 \times 10^1$	$1.71 \times 10^0$	$2.10 \times 10^0$	$3.04 \times 10^3$
	储氢罐	$7.84 \times 10^{-3}$	$3.60 \times 10^5$	$3.09 \times 10^4$	$6.53 \times 10^1$	$9.08 \times 10^0$	$4.73 \times 10^0$	$1.40 \times 10^3$
	电机与电控单元	$4.77 \times 10^{-2}$	$1.02 \times 10^4$	$1.03 \times 10^3$	$4.80 \times 10^0$	$3.05 \times 10^{-1}$	$3.71 \times 10^{-1}$	$5.41 \times 10^2$
	BOP	$2.32 \times 10^{-2}$	$1.04 \times 10^4$	$7.16 \times 10^2$	$4.10 \times 10^0$	$1.89 \times 10^{-1}$	$2.13 \times 10^{-1}$	$1.44 \times 10^4$
	车身	$1.98 \times 10^{-1}$	$6.67 \times 10^4$	$5.98 \times 10^3$	$1.90 \times 10^1$	$1.13 \times 10^0$	$2.42 \times 10^0$	$9.07 \times 10^2$
	底盘	$3.25 \times 10^{-1}$	$1.32 \times 10^5$	$1.07 \times 10^4$	$3.22 \times 10^1$	$2.57 \times 10^0$	$4.44 \times 10^0$	$1.66 \times 10^3$
	总计	$8.45 \times 10^{-1}$	$7.14 \times 10^5$	$6.40 \times 10^4$	$1.72 \times 10^2$	$1.64 \times 10^1$	$1.52 \times 10^1$	$2.45 \times 10^4$
2035	燃料电池堆栈	$4.83 \times 10^{-3}$	$4.19 \times 10^4$	$3.20 \times 10^3$	$8.30 \times 10^0$	$8.78 \times 10^{-1}$	$6.38 \times 10^{-1}$	$2.19 \times 10^3$
	锂电池	$2.08 \times 10^{-1}$	$5.14 \times 10^4$	$7.34 \times 10^3$	$2.75 \times 10^1$	$1.24 \times 10^0$	$1.70 \times 10^0$	$2.62 \times 10^3$
	储氢罐	$1.30 \times 10^{-2}$	$2.24 \times 10^5$	$1.83 \times 10^4$	$3.88 \times 10^1$	$5.47 \times 10^0$	$2.91 \times 10^0$	$9.74 \times 10^2$
	电机与电控单元	$4.15 \times 10^{-2}$	$8.25 \times 10^3$	$8.34 \times 10^2$	$4.05 \times 10^0$	$2.48 \times 10^{-1}$	$3.14 \times 10^{-1}$	$4.69 \times 10^2$
	BOP	$2.02 \times 10^{-2}$	$9.05 \times 10^3$	$6.23 \times 10^2$	$3.57 \times 10^0$	$1.64 \times 10^{-1}$	$1.85 \times 10^{-1}$	$1.25 \times 10^4$
	车身	$1.72 \times 10^{-1}$	$5.80 \times 10^4$	$5.20 \times 10^3$	$1.65 \times 10^1$	$9.83 \times 10^{-1}$	$2.11 \times 10^0$	$7.89 \times 10^2$
	底盘	$2.83 \times 10^{-1}$	$1.15 \times 10^5$	$9.31 \times 10^3$	$2.80 \times 10^1$	$2.24 \times 10^0$	$3.86 \times 10^0$	$1.44 \times 10^3$
	总计	$7.43 \times 10^{-1}$	$5.07 \times 10^5$	$4.48 \times 10^4$	$1.27 \times 10^2$	$1.12 \times 10^1$	$1.17 \times 10^1$	$2.10 \times 10^4$

## 2.2 结果分析

根据预测结果,重点分析了 2022 年和 2035 年 DHCV、FCHCV 的全生命周期材料资源消耗量 [ADP(e)]、化石能源消耗量 [ADP(f)]、碳排放量和污染物排放量。

### 2.2.1 材料资源消耗量

2022 年和 2035 年 DHCV、FCHCV 的全生命周期材料资源消耗量 [ADP(e)] 如图 3 所示。由图 3 可见,2022 年 FCHCV 的全生命周期材料资源消耗量是 DHCV 的 2.3 倍,主要原因是 FCHCV 的原材料获取阶段的材料资源消耗量明显高于 DHCV。到 2035 年, DHCV 和 FCHCV 的材料资源消耗量分别降低 11.36% 和 8.74%。

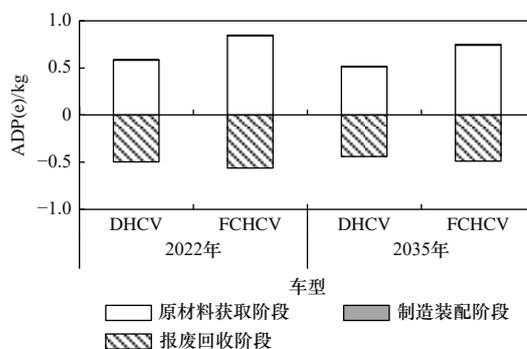


图 3 2022 年和 2035 年 DHCV、FCHCV 的全生命周期材料资源消耗量 [ADP(e)]

Fig.3 Life cycle ADP(e) for DHCV and FCHCV in 2022 and 2035

为进一步研究 DHCV 和 FCHCV 原材料获取阶段各部件材料资源消耗量的差异,得到 2022 年和 2035 年 DHCV、FCHCV 原材料获取阶段各部件的材料资源消耗量[ADP(e)]如图 4 所示.由图 4 可见,FCHCV 与 DHCV 的材料资源消耗差异主要来源于动力系统的差异,FCHCV 的材料资源消耗量高于 DHCV 的主要因为 FCHCV 车型原材料中用到了锂电池,锂电池的材料资源消耗量较高.

2.2.2 化石能源消耗量

2022 年和 2035 年 DHCV、FCHCV 的全生命周期化石能源消耗量[ADP(f)]如图 5 所示.由表 8、表 9 和图 5 可见,FCHCV 和 DHCV 的化石能源消耗量在运行使用阶段最大.在 2022 年,基于煤气化、甲烷重整和混合电力电解水制氢的 FCHCV 的全生命周期化石能源消耗量高于 DHCV,基于光伏电解水制氢的 FCHCV 的全生命周期化石能源消耗量低于 DHCV.与 2022 年相比,2035 年 DHCV 的全生命周期化石能源消耗量降低了 24.17%,基于煤气化、甲烷重整、混合电力电解水和光伏电解水制氢的 FCHCV 的全生命周期化石能源消耗量分别降低了 34.48%、34.23%、65.81% 和 67.55%.到 2035 年,基于煤气化、

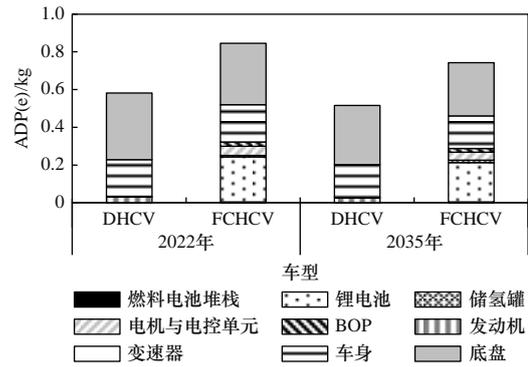
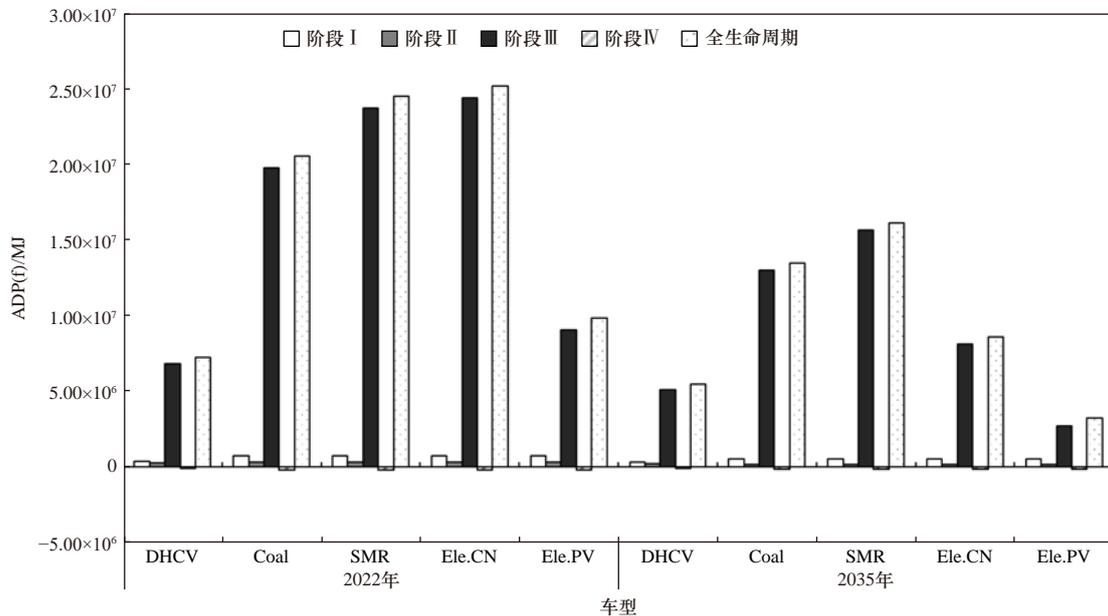


图 4 2022 年和 2035 年 DHCV、FCHCV 原材料获取阶段各部件的材料资源消耗量 [ADP(e)]  
Fig.4 ADP(e) of various components during the raw material acquisition phase of DHCV and FCHCV in 2022 and 2035

甲烷重整和混合电力电解水制氢的 FCHCV 的全生命周期化石能源消耗量比 DHCV 分别高 144.96%、193.77%、56.80%,基于光伏电解水制氢的 FCHCV 的全生命周期化石能源消耗量比 DHCV 低 41.78%.在未来基于光伏电解水制氢的 FCHCV 具有降低化石能源消耗量的潜力.



注: Coal 表示基于煤气化制氢的 FCHCV, SMR 表示甲烷重整制氢的 FCHCV, Ele.CN 表示基于混合电力电解水制氢的 FCHCV, Ele.PV 表示基于光伏电解水制氢的 FCHCV, 下同.

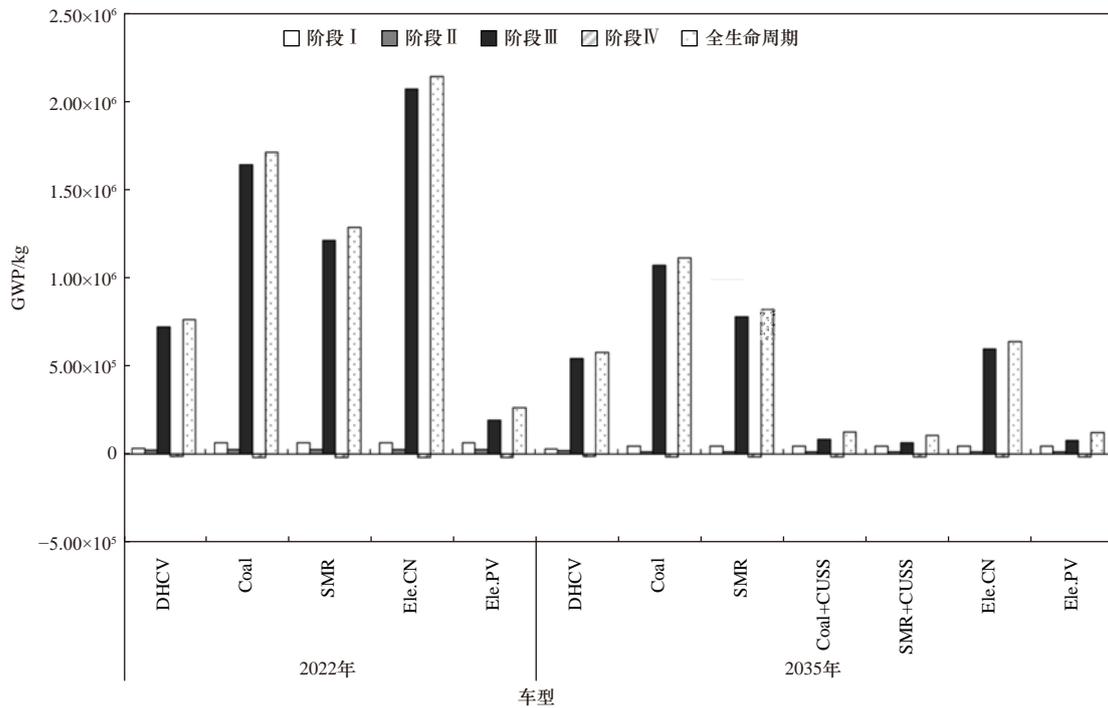
图 5 2022 年和 2035 年 DHCV、FCHCV 的全生命周期化石能源消耗量 [ADP(f)]

Fig.5 Life cycle ADP(f) of DHCV and FCHCV in 2022 and 2035

2.2.3 碳排放

由于 CCUS 技术是未来重点发展方向,因此重点讨论了煤气化和甲烷重整制氢匹配 CUSS 技术对 FCHCV 未来的全生命周期碳排放量的影响,根据文

献 [34],假设煤气化和甲烷重整制氢匹配 CUSS 技术后的制氢碳排放因子分别为 1.5 和 1 kg/kg (每生产 1 kg 的 H<sub>2</sub>, 将会产生 1 kg CO<sub>2</sub>),得到 2022 年和 2035 年 DHCV 和 FCHCV 的全生命周期碳排放量,如图 6



注: Coal+CUSS 表示煤气化制氢匹配 CCUS 技术的 FCHCV, SMR+CUSS 表示甲烷重整制氢匹配 CUSS 技术的 FCHCV, 下同。

图 6 2022 年和 2035 年 DHCV、FCHCV 的全生命周期碳排放量 (GWP)

Fig.6 Life cycle GWP of DHCV and FCHCV in 2022 and 2035

所示。

由表 8、表 9 和图 6 可见, FCHCV 和 DHCV 的全生命周期碳排放量在运行使用阶段占比最大。在 2022 年, 基于煤气化、甲烷重整和混合电力电解水制氢的 FCHCV 的全生命周期碳排放量均高于 DHCV, 基于光伏电解水制氢的 FCHCV 的全生命周期碳排放量低于 DHCV。与 2022 年相比, 2035 年 DHCV 的全生命周期碳排放量降低了 24.27%, 基于煤气化制氢、煤气化制氢匹配 CCUS 技术、甲烷重整制氢、甲烷重整制氢匹配 CUSS 技术、混合电力电解水制氢和光伏电解水制氢的 FCHCV 的全生命周期碳排放量分别降低了 35.09%、35.81%、92.58%、91.66%、70.15% 和 53.97%。到 2035 年, 基于煤气化、甲烷重整和混合电力电解水制氢的 FCHCV 的全生命周期碳排放量比 DHCV 分别高 92.07%、42.28%、10.47%, 基于煤气化制氢匹配 CUSS 技术、甲烷重整制氢匹配 CUSS 技术和光伏电解水制氢的 FCHCV 的全生命周期碳排放量比 DHCV 分别低 78.05%、81.51% 和 79.09%。在未来基于光伏电解水制氢和化石能源制氢匹配 CUSS 技术的 FCHCV 具有巨大的降低碳排放潜力。

### 2.2.4 污染物排放

2022 年和 2035 年 FCHCV 与 DHCV 的 AP、EP、

POCP 和 HTP 等全生命周期评价结果如图 7 所示。由图 7 可见, FCHCV 和 DHCV 的全生命周期中 AP、EP、POCP 在运行使用阶段占比均较大, FCHCV 和 DHCV 的全生命周期中 HTP 在原材料获取阶段占比最大。在 2022 年, 基于混合电力电解水制氢的 FCHCV 全生命周期中 4 种污染物排放量均高于 DHCV; 基于煤气化制氢的 FCHCV 全生命周期中 EP 值低于 DHCV, 其余 3 种污染物排放量均高于 DHCV; 基于甲烷重整和光伏电解水制氢路径的 FCHCV 全生命周期中 AP、EP 值均低于 DHCV, POCP 和 HTP 值均高于 DHCV。2035 年, 经过总体技术的发展提升, FCHCV 和 DHCV 的污染物排放量均有所降低。在 AP 方面, 基于煤气化和光伏电解水制氢的 FCHCV 全生命周期污染物排放量较 DHCV 分别低 33.05% 和 55.30%, 这两种制氢路径下的 FCHCV 在未来具有降低 AP 的潜力; 在 EP 方面, 基于煤气化、甲烷重整和光伏电解水制氢的 FCHCV 全生命周期污染物排放量比 DHCV 分别低 78.00%、64.85% 和 79.28%, 在这 3 种制氢路径下的 FCHCV 在未来具有降低 EP 的潜力; 在 POCP 和 HTP 方面, 2035 年 FCHCV 的全生命周期污染物排放量均高于 DHCV。综上, 以可再生能源制氢为基础的 FCHCV 在未来具有较大的节能减排潜力和降低对环境产生负面影响的潜力。

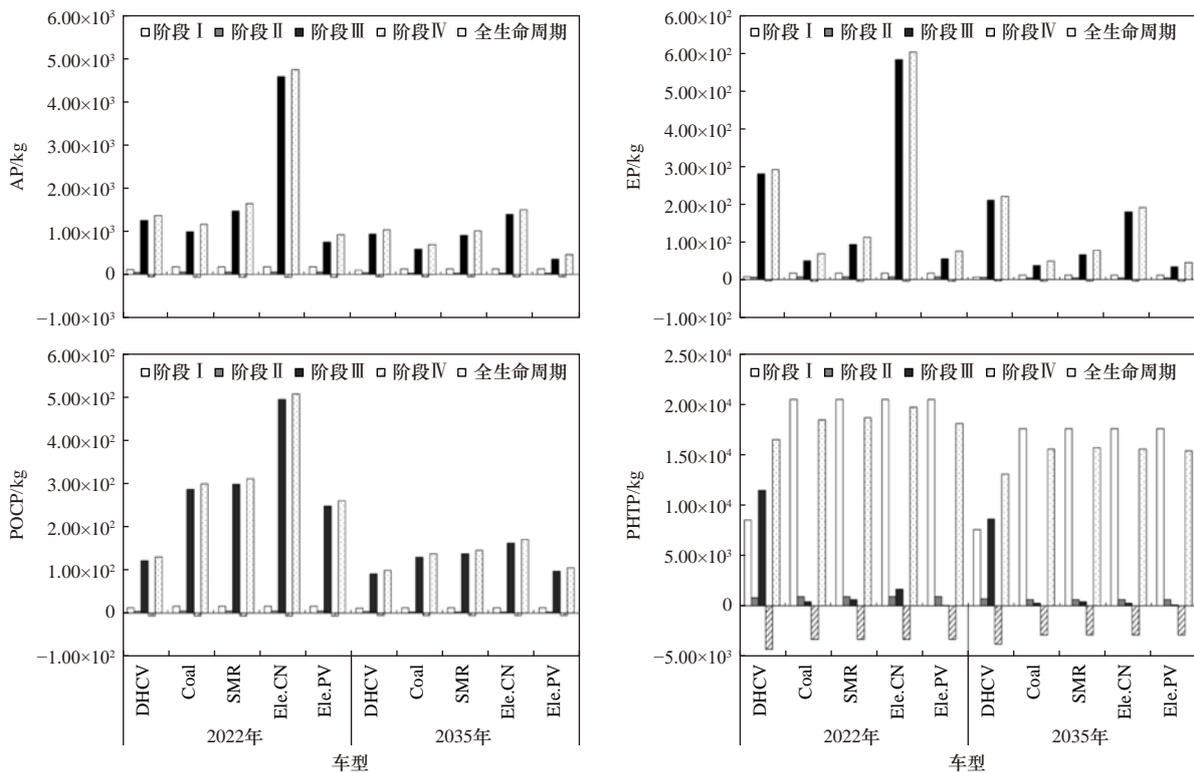


图7 2022年和2035年DHCV、FCHCV全生命周期污染物排放结果

Fig.7 Results of life cycle pollutant emissions from DHCV and FCHCV in 2022 and 2035

### 3 结论

a) 在全生命周期材料资源消耗量方面, 2022年与2035年FCHCV的材料资源消耗量分别为 $2.86 \times 10^{-1}$ 和 $2.61 \times 10^{-1}$  kg, DHCV的材料资源消耗量分别为 $8.62 \times 10^{-2}$ 、 $7.64 \times 10^{-2}$  kg. 2022年与2035年FCHCV的材料资源消耗量均比DHCV高, 且二者在未来降低全生命周期材料资源消耗量的潜力较低.

b) 在全生命周期化石能源消耗量方面, 2022年基于煤气化、甲烷重整和混合电力电解水制氢的FCHCV的化石能源消耗量高于DHCV, 基于光伏电解水制氢的FCHCV的化石能源消耗量低于DHCV; 到2035年, 仅基于光伏电解水制氢的FCHCV的化石能源消耗量比DHCV低41.78%, 在未来基于光伏电解水制氢的FCHCV具有降低化石能源消耗的潜力.

c) 在全生命周期碳排放量方面, 2022年仅基于光伏电解水制氢的FCHCV的全生命周期碳排放量低于DHCV; 与2022年相比, 2035年基于甲烷重整制氢和甲烷重整制氢匹配CUSS技术的FCHCV的全生命周期碳排放量分别降低了92.58%、91.66%. 在未来基于光伏电解水制氢和化石能源制氢匹配CUSS技术的FCHCV具有巨大的降低碳排放的潜力.

d) 在全生命周期污染物排放量方面, 在2022年

基于光伏电解水制氢的FCHCV的全生命周期中AP和EP均低于DHCV; 到2035年, 基于光伏电解水制氢的FCHCV的全生命周期AP和EP较DHCV分别低55.30%和79.28%; 在2022和2035年, 基于4种氢能路径的FCHCV的全生命周期POCP和HTP均高于DHCV. 因此, 以可再生能源制氢为基础的FCHCV在未来具有降低对环境产生负面影响的潜力.

#### 参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 邵志刚, 衣宝廉. 氢能与燃料电池发展现状及展望[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 469-477.  
SHAO Z G, YI B L. Developing trend and present status of hydrogen energy and fuel cell development [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 469-477.
- [3] 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 X G, YU Z P. Development status and prospects of fuel cell commercial vehicle industry [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 152-158.
- [4] 侯明, 邵志刚, 俞红梅, 等. 2019年氢燃料电池研发热点回眸[J]. 科技导报, 2020, 38(1): 137-150.

- HOU M, SHAO Z G, YU H M, et al. Review of hot topics on hydrogen fuel cell in 2019[J]. *Science & Technology Review*, 2020, 38(1): 137-150.
- [ 5 ] 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 J. 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.
- [ 6 ] WANNIARACHCHI S, HEWAGE K, WIRASINGHE C, et al. Hydrogen fuel supply chains for vehicular emissions mitigation: a feasibility assessment for North American freight transport sector [J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2023, 17(8): 855-869.
- [ 7 ] WANNIARACHCHI S, HEWAGE K, WIRASINGHE C, et al. Transforming road freight transportation from fossils to hydrogen: opportunities and challenges[J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2023, 17(5): 552-572.
- [ 8 ] SUN S H, ERTZ M. Life cycle assessment and risk assessment of liquefied natural gas vehicles promotion[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 153: 111769.
- [ 9 ] STETTLER M E J, WOO M, AINALIS D, et al. Review of well-to-wheel lifecycle emissions of liquefied natural gas heavy goods vehicles[J]. *Applied Energy*, 2023, 333: 120511.
- [ 10 ] EL HANNACH M, AHMADI P, GUZMAN L, et al. Life cycle assessment of hydrogen and diesel dual-fuel class 8 heavy duty trucks[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(16): 8575-8584.
- [ 11 ] YEOW L W, YAN Y T, CHEAH L. Life cycle greenhouse gas emissions of alternative fuels and powertrains for medium-duty trucks: a Singapore case study[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 105: 103258.
- [ 12 ] BOOTO G K, AAMODT E K, HANCKE R. Comparative life cycle assessment of heavy-duty drivetrains: a Norwegian study case[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 95: 102836.
- [ 13 ] LEE D Y, ELGOWAINY A, KOTZ A, et al. Life-cycle implications of hydrogen fuel cell electric vehicle technology for medium- and heavy-duty trucks[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 393: 217-229.
- [ 14 ] ALONSO-VILLAR A, DAVÍÐSDÓTTIR B, STEFÁNSSON H, et al. Technical, economic, and environmental feasibility of alternative fuel heavy-duty vehicles in Iceland[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 369: 133249.
- [ 15 ] GUSTAFSSON M, SVENSSON N, EKLUND M, et al. Well-to-wheel greenhouse gas emissions of heavy-duty transports: influence of electricity carbon intensity[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 93: 102757.
- [ 16 ] 涂小岳, 徐建全, 陈轶嵩, 等. 液化天然气商用车与柴油商用车生命周期能耗差异评价[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(23): 3211-3215.
- TU X Y, XU J Q, CHEN Y S, et al. An evaluation of differences between LNG and diesel commercial vehicle's life cycle energy consumption[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(23): 3211-3215.
- [ 17 ] ZHANG X Z, LIN Z H, CRAWFORD C, et al. Techno-economic comparison of electrification for heavy-duty trucks in China by 2040[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 102: 103152.
- [ 18 ] CHEN Y S, LAN L B, HAO Z, 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.
- [ 19 ] 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 Y S, LAN L B, DU Y Q, et al. Evaluation of environmental benefits and carbon reduction economy of EREV/BEV/ICEV based on life cycle assessment theory[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(2): 516-527.
- [ 20 ] 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 Y S, LAN L B, HAO Z, et al. Life cycle assessment and key parameters comparison of hydrogen fuel cell vehicle power system [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(8): 4402-4412.
- [ 21 ] 付佩, 兰利波, 陈颖, 等. 面向 2035 年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.
- [ 22 ] EVANGELISTI S, TAGLIAFERRI C, BRETT D J L, 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.
- [ 23 ] SIMONS A, BAUER C. A life-cycle perspective on automotive fuel cells[J]. *Applied Energy*, 2015, 157: 884-896.
- [ 24 ] USAI L, HUNG C R, VÁSQUEZ 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.
- [ 25 ] BENITEZ A, WULF C, de 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.
- [ 26 ] 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.
- [ 27 ] 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.
- [ 28 ] YANG Y, LAN L B, HAO Z, 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): 5321.
- [ 29 ] 丁锐, 秦训鹏, 董书洲. 电动汽车驱动电机再制造生命周期评价[J].

- 环境污染与防治,2021,43(11):1410-1415.
- DING R,QIN X P,DONG S Z.Life cycle assessment of remanufactured drive motor on electric vehicle[J].*Environmental Pollution & Control*,2021,43(11):1410-1415.
- [ 30 ] 周博雅.电动汽车生命周期的能源消耗、碳排放和成本收益研究[D].北京:清华大学,2016.
- [ 31 ] 许海波.增程式电动汽车全生命周期评价研究[D].西安:长安大学,2021.
- [ 32 ] 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 L M,XU H B,CHEN Y S,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.
- [ 33 ] 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*,2016,39(1):127-131.
- LIU K H,XU J Q.Research progress on life cycle assessment of electric vehicles[J].*Mechanical & Electrical Technology*,2016,39(1):127-131.
- [ 34 ] 凌文,刘玮,李育磊,等.中国氢能基础设施产业发展战略研究[J].*中国工程科学*,2019,21(3):76-83.
- LING W,LIU W,LI Y L,et al.Development strategy of hydrogen infrastructure industry in China[J].*Strategic Study of CAE*,2019,21(3):76-83.
- [ 35 ] SIDDIQUI O,DINCER I.A well to pump life cycle environmental impact assessment of some hydrogen production routes[J].*International Journal of Hydrogen Energy*,2019,44(12):5773-5786.
- [ 36 ] VALENTE A,IRIBARREN D,DUFOUR J.Comparative life cycle sustainability assessment of renewable and conventional hydrogen [J].*Science of the Total Environment*,2021,756:144132.
- [ 37 ] ZHANG J X,LING B,HE Y,et al.Life cycle assessment of three types of hydrogen production methods using solar energy[J].*International Journal of Hydrogen Energy*,2022,47(30):14158-14168.
- [ 38 ] LI W C,BAI H T,YIN J F,et al.Life cycle assessment of end-of-life vehicle recycling processes in China:take *Corolla* taxis for example[J].*Journal of Cleaner Production*,2016,117:176-187.
- [ 39 ] ENGEL J.Development perspectives of lithium-ion recycling processes for electric vehicle batteries[D].Kingston:University of Rhode Island,2016.
- [ 40 ] HAO H,QIAO Q Y,LIU Z W,et al.Impact of recycling on energy consumption and greenhouse gas emissions from electric vehicle production:the China 2025 case[J].*Resources,Conservation and Recycling*,2017,122:114-125.

(责任编辑:刘 方)