

# 氢燃料电池重型车全生命周期节能减排效果评估<sup>\*</sup>

于亚梅

(上海市环境监测中心, 上海 200235)

**摘要** 对比分析 5 种常用制氢途径的全生命周期能耗、温室气体与大气污染物排放量,并以此为基础,结合当前氢气供给结构与能源结构,核算中国氢燃料电池重型车(HHDV)全生命周期能耗、温室气体及大气污染物排放量,与柴油重型车(DHDV)进行对比,分析推广 HHDV 对节能减排的作用和效果。结果显示,电网电电解水制氢的能耗和温室气体排放均为最高;可再生能源电电解水制氢的 CO<sub>2</sub> 及 CH<sub>4</sub> 排放最低,甲烷催化重整制氢能耗及 N<sub>2</sub>O 排放最低;HHDV 全生命周期能耗和温室气体排放分别为 20.4 MJ/km、1 492.7 g/km,分别比 DHDV 高 20.0%和 41.5%,表明在当前氢气供给和能源结构条件下 HHDV 无法实现节能减碳效果;HHDV 和 DHDV 的大气污染物排放各有优劣,与污染物的种类有关。

**关键词** 氢燃料电池重型车 全生命周期评价 能耗 温室气体 大气污染物

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2024.04.013

**Evaluation of life cycle energy saving and emission reduction effects of hydrogen fuel cell heavy-duty vehicles** YU Yamei.  
(Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai 200235)

**Abstract:** The life cycle energy consumption, greenhouse gas (GHG) and atmospheric pollutant emissions of five commonly used hydrogen production pathways were analyzed and compared in this study. On the above basis, combined with the current hydrogen supply structure and energy structure, the life cycle energy consumption, atmospheric pollutant emissions, and GHG emissions of hydrogen fuel cell heavy-duty vehicles (HHDV) in China were calculated. In addition, compared with those of diesel heavy-duty vehicles (DHDV), the effect of promoting HHDV to achieve energy saving and emission reduction was analyzed. The results showed that among five hydrogen production pathways, the total primary energy consumption and GHG emissions of grid electricity electrolysis were the highest, CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions of renewable power electrolysis were the lowest, and the energy consumption and N<sub>2</sub>O emission of methane catalytic reforming was the lowest. The life cycle energy consumption and GHG emissions of HHDV were 20.4 MJ/km and 1 492.7 g/km, respectively, which were 20.0% and 41.5% higher than those of DHDV, respectively. It indicated that HHDV could not achieve emission reduction and energy saving effects currently. The atmospheric pollutant emissions of HHDV were not always higher or lower than those of DHDV, depending on the types of pollutants.

**Keywords:** hydrogen fuel cell heavy-duty vehicles; life cycle assessment; energy consumption; greenhouse gas; atmospheric pollutant

化石燃料的大量使用导致气候变化、空气污染和化石能源短缺等问题,对人类社会的可持续发展造成了严峻挑战。2010 年至 2020 年,我国机动车保有量从 1.9 亿辆增长到了 3.7 亿辆<sup>[1]</sup>,年均增速达到 6.9%,与此同时,交通运输部门能耗以年均 11.1%的速度增长,以化石燃料为主的燃油汽车消耗了全国约 42%的石油<sup>[2]</sup>,并且随着汽车保有量的增长,这一占比还将进一步提高。因此,需要加快改变严重依赖于石油资源的交通方式,发展新能源汽车。目前新能源汽车的发展路线整体呈现出乘用车

和中短途商用车电动化,中重型、中长途商用车氢燃料电池化和电动化并行的趋势。与内燃机汽车(ICEV)相比,纯电动汽车(BEV)和氢燃料电池汽车(HFCV)行驶时在能耗和排放方面具有显著优势,其中 HFCV 在重型商用车领域因具有续航里程长、能量转换效率高、补能时间短等优点<sup>[3]4402</sup>,成为汽车行业技术竞争的制高点。

然而,HFCV 对环境的影响研究目前还不充分。HFCV 虽然在行驶过程中没有排放,但在氢气的生产、储存、运输以及车辆的制造过程中会产生温室气

作者:于亚梅,女,1995 年生,硕士,助理工程师,主要从事移动源污染防治研究。

<sup>\*</sup>上海市生态环境局青年科研项目(沪环青科[2023]第 8 号)。

体和大气污染物。KIM 等<sup>[4]</sup>指出有必要对不同制氢途径的环境影响进行比较,筛选出最适合的燃料方案。LIU 等<sup>[5]</sup><sup>[17982]</sup>发现一些氢气生产途径导致 HFCV 产生比 ICEV 更高的温室气体排放量,尤其是化石燃料密集型电网电力电解水和煤气化制氢技术。CORREA 等<sup>[6]</sup><sup>[1]</sup>分析了阿根廷、智利和巴西 4 种动力系统(柴油、氢燃料电池、电力及柴油混合电力驱动)城市客车燃料周期的大气污染物排放表现,结果显示 BEV 在短距离行驶时排放更低,而 HFCV 在长距离行驶时排放更低。LIU 等<sup>[7]</sup>对 HFCV(丰田未来)和传统汽油车(马自达 3)的能耗和排放进行了分析,发现与传统汽油车相比,HFCV 即使消耗的氢气来源于化石能源,也能在燃料周期减少约 15%~45% 的温室气体排放量。通过文献调研发现,目前针对 HFCV 全生命周期环境影响的研究多集中于乘用车<sup>[5]</sup><sup>[17993]</sup>、<sup>[8]</sup>、<sup>[9]</sup><sup>[304]</sup>,关于氢燃料电池重型车(HHDV)的研究较少,且已有关于 HHDV 的研究多聚焦于燃料循环和不同氢能途径的比较<sup>[6]</sup><sup>[2]</sup>、<sup>[10]</sup>,涉及车辆制造的研究较少;另外,涉及目前氢气开发现状的研究也较少。

因此,本研究对比分析了可再生能源电(以太阳能发电为例)电解水制氢、电网电电解水制氢、煤气化制氢、甲烷催化重整制氢、氯碱工业副产氢 5 种常用制氢途径的全生命周期能耗与排放情况,并以此为基础,结合当前氢气供给结构与能源结构,核算了我国 HHDV 全生命周期能耗、温室气体及大气污染物排放量;并与柴油重型车(DHDV)进行对比,分析了推广 HHDV 对实现节能减排的作用和效果,为 HHDV 生产企业的技术开发和管理部门的政策制定提供数据参考。

## 1 评价方法

生命周期评价(LCA)是一种系统化评估原料、产品、生产和服务整个生命周期过程中直接和间接环境影响的分析方法,也称从“摇篮”到“坟墓”的评价方法。本次车辆 LCA 分析符合《环境管理 生命周期评价 原则与框架》(GB/T 24040—2008)。

### 1.1 研究边界

LCA 具体计算采用 GREET 软件。研究边界示意图见图 1。车辆生命周期主要分为燃料周期和车辆周期两部分。燃料周期由燃料的上游生产(WTP)过程和下游消费(PTW)过程共同组成。WTP 过程包括燃料原料(原油、原煤等)开采、生产与运输过程,以及燃料的生产与运输过程。PTW 过

程主要指燃料的最终消耗过程,即车辆行驶过程。由于实际驾驶工况以及驾驶习惯的复杂性,车辆实际行驶过程的燃油经济性通常与工信部公示值有较大差异。本研究车辆行驶过程燃油经济性假设比工信部公示的数值高约 35%,该值来源于 GONG 等<sup>[11]</sup>对北京数千次车辆真实行驶循环的研究及文献<sup>[12]</sup>、<sup>[13]</sup>。车辆周期包括车辆主体的生产与加工过程,零部件组装、涂漆等装配工艺过程,以及补充液体、更换轮胎和其他零部件等维修过程。

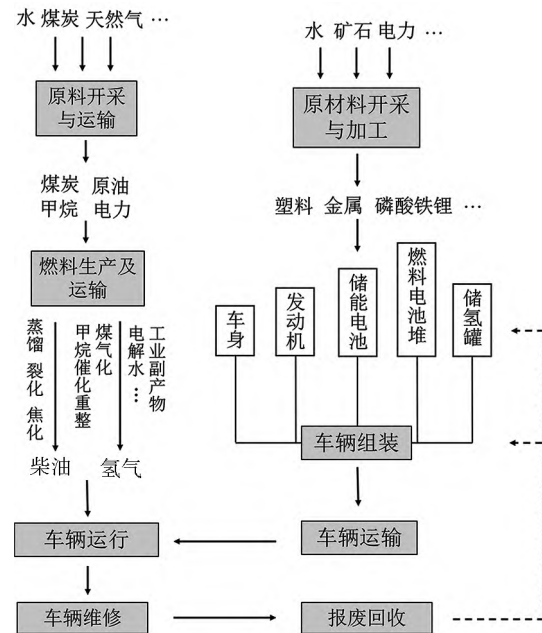


图 1 研究边界示意图

Fig.1 Schematic diagram of life cycle assessment system framework

功能单位指经过量化的产品功能或绩效特征<sup>[3]</sup><sup>[4403]</sup>。假设所研究重型车全生命周期道路行驶里程为 100 万 km。功能单位为车辆行驶 1 km。

### 1.2 研究对象与评价指标

研究对象为 HHDV 及 DHDV。选择北汽福田燃料电池半挂牵引车及北汽福田半挂牵引车分别作为两类车辆的代表车型,车辆参数见表 1。

评价指标包含能耗、温室气体排放量与大气污染物排放量。其中,能耗包含一次能源消耗总量和化石能源消耗总量(煤炭消耗量、石油消耗量及天然气消耗量之和);温室气体包含 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O,温室气体排放量是根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)相关报告中 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 的全球变暖潜值<sup>[14]</sup>计算的 CO<sub>2</sub> 当量;大气污染物主要关注挥发性有机物(VOCs)、CO、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)、可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>)、细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)和硫氧化物(SO<sub>x</sub>)。

表 1 HHDV 及 DHDV 的车辆基本参数  
Table 1 Vehicle parameters for HHDV and DHDV

参数	DHDV	HHDV
车身尺寸(长/宽/高)/mm	7 115/2 525/3 800	7 570/2 490/3 866
整备质量/kg	8 500	11 100
总质量/kg	25 000	25 000
油箱容积/L	1 060	
发动机排量/L	12.9	
发动机最大功率/kW	382	
电池系统额定功率/kW		220
燃油经济性	0.3 L/km	0.09 kg/km
续航里程/km		650

### 1.3 数据来源

数据来源主要为 GREET 模型数据库、国家统计局、国家能源局、工信部、中国宏观经济研究院等官方网站及各类文献<sup>[15-17]</sup>。对于当前国内尚为空白的数据,采用国际平均水平数据。本研究讨论的时间基准为 2020 年。

### 1.4 清单分析

#### 1.4.1 燃料周期清单:能源结构与电力组成

“十三五”以来,我国加快调整能源结构,减少煤炭消费,国内原油及天然气产量稳步回升;可再生能源比重大幅增加。2020 年我国能源消费组成大致为煤炭占 56.8%,石油占 18.9%,天然气占 8.4%,电力及其他能源占 15.9%<sup>[18]184</sup>。

我国是煤炭资源大国,煤炭资源存量相对丰富,内蒙古、新疆、山西等都是煤炭资源丰富的地区。同时,出于经济性和需求等因素考虑,我国还从印尼、俄罗斯等国家进口煤炭。我国煤炭运输方式包括铁路运输、公路运输及水路运输。2018 年我国煤炭铁路货运量达 23.8 亿 t,占 2018 年全国煤炭总产量的 67.1%<sup>[19]</sup>。水路运输主要有海路运输和内河运输两种方式,2018 年全国沿海港口和内河港口煤炭发运量分别占煤炭货运总量的 30.4%和 1.1%<sup>[20]</sup>。公路运输以短途为主,运距多在 1 000 km 以内。我国石油和天然气资源储量相对不足,目前石油探明储量多集中在黑龙江、山东和辽宁。2019 年我国石油进口总量为 5.8 亿 t,占石油消费总量的 86.8%<sup>[18]185</sup>,进口石油主要来自俄罗斯、沙特阿拉伯、安哥拉等国家。天然气主要分布于中西部的盆地,其中以塔里木盆地和四川盆地资源最为丰富。进口天然气主要来自中亚地区,俄罗斯、澳大利亚及卡塔尔等国家。

中国电力企业联合会统计数据<sup>[21-22]</sup>显示,2021 年我国发电量 81 121.8 亿 kW·h。其中,以煤炭作

为主燃料的火力发电量、水力发电量、风力发电量、核能发电量及太阳能发电量分别占社会总发电量的 71.1%、14.6%、7.0%、5.0%和 2.3%。

#### 1.4.2 氢能产业现状

氢能产业复杂,涉及氢气制备、储存、运输等多个环节。目前我国氢气制备以 3 种技术路线为主:以煤炭、天然气等为原料的化石能源重整制氢,以氯碱尾气、焦炉煤气等工业尾气为代表的工业副产气提纯制氢,以及电解水制氢。煤制氢技术是当前成本最低的制氢方式,适用于大规模稳定制备。以天然气为原料的重整制氢技术是国外主流的制氢方式。可用于提纯制氢的工业副产气通常来源于钢铁、化工等行业,提纯利用其中的氢气,可提高资源利用效率、降低大气污染。电解水制氢得到氢气纯度高(99.7%以上<sup>[23]</sup>),但制取成本受电价的影响较大。我国 2020 年氢气供给结构<sup>[24]</sup>如表 2 所示。

表 2 中国 2020 年氢气供给结构  
Table 2 Supply structure of hydrogen in China in 2020

氢气来源	占比/%
化石能源重整制氢	67
工业副产气提纯制氢	30
可再生能源电解水制氢	3

氢气的储运形态主要有气态、液态和固态 3 种,目前我国氢气储运以高压气态方式为主。

#### 1.4.3 车辆周期清单:车辆材料组成、生产与维护

为了评估车辆制造过程的能耗和排放量,首先必须明确车辆的组成和质量分布,国际上通用的分析方法是车辆的主要材料构成进行分析。本研究车辆主体和电池系统的材料构成<sup>[25-26]</sup>如表 3、表 4 所示。

表 3 车辆主体材料质量分数分布  
Table 3 Distribution of mass fraction of vehicle body materials %

材料类型	DHDV	HHDV
钢	63.3	60.1
铸铁	11.0	4.4
铸铝	5.1	5.8
锻铝	4.1	3.3
铜	0.2	1.4
橡胶	6.5	6.1
碳纤维增强塑料	0	8.3
玻璃纤维增强塑料	3.7	3.8
其他塑料	3.5	2.8
玻璃	1.9	1.8
其他	0.7	2.1

表4 电池系统材料分布  
Table 4 Battery system material composition

电池类型	材料	材料质量占比/%
铅酸电池	塑料	6.1
	铅	69.0
	硫酸	7.9
	玻璃纤维	2.1
	水	14.1
	其他	0.8
	活性材料	15.4
	石墨/碳	9.5
	硅	0
	黏合剂	0.5
锂离子电池	铜	25.7
	锻铝	26.3
	铸铝	0
	电解液:LiPF <sub>6</sub>	1.1
	电解液:碳酸乙烯酯	3.1
	电解液:碳酸二甲酯	3.1
	聚丙烯	1.2
	聚乙烯	0.5
	聚对苯二甲酸乙二醇酯	0.3
	钢	0.6
	热绝缘材料	1.7
	冷却液:乙二醇	6.9
	电子部件	4.0

车辆装配过程的能耗和排放主要集中于涂装、制冷、照明、焊接等过程。已有研究表明,车辆主体、零部件生产与整车装配阶段的能耗和排放量通常与质量呈线性相关<sup>[27]</sup>。车辆配送过程指汽车生产下线后运输至销售店的过程,重型卡车生产下线后通常为送车司机自主驾驶到销售地,平均运输距离为1 600 km<sup>[28]</sup>。车辆维修阶段的能耗与排放主要来源于轮胎及液体的更换补充,根据 XIONG 等<sup>[29]</sup>的研究,轮胎、发动机油、雨刷液、制动液和动力总成冷却液分别行驶 62 500、10 000、12 500、62 500、62 500 km 更换一次,车辆寿命期只需更换一次传动液和燃

料电池组。车辆报废过程主要包括车辆主体的粉碎和电池系统的处理,该部分核算参考文献[30]进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 能 耗

5 种不同制氢途径的能耗结果(制备 1 MJ 氢气的能耗,以氢气的低位热值 120 MJ/kg 计算)如图 2 所示。电网电电解水制氢总一次能源消耗最高,为 3.1 MJ/MJ,甲烷催化重整制氢最低,为 0.7 MJ/MJ。电网电电解水制氢消耗大量电能,受发电效率及我国发电结构(火电为主)影响,该制氢途径煤炭消耗较高。氯碱工业能耗主要由主产品承担,而非副产物氢气,因此氯碱工业副产氢的能耗较低。甲烷催化重整制氢原料为天然气,因此该途径天然气消耗最多。余亚东等<sup>[9]303</sup>讨论了 17 种氢燃料制备途径的全生命周期环境影响,指出电网电电解水制氢为能耗最高的制氢途径,能耗较低的制氢途径为可再生能源电电解水制氢、焦炉煤气提纯制氢以及天然气制氢,各制氢途径的能耗与本研究结果有较好一致性。

车辆全生命周期能耗情况如图 3 所示。HHDV 与 DHDV 全生命周期一次能源消耗总量分别为 20.4、17.0 MJ/km。与 DHDV 相比,HHDV 总能耗高 20.0%,说明当前氢气供应结构和能源结构下,推广 HHDV 无法达到降低能耗的效果。DHDV 能耗主要来源于 PTW 阶段,占总能耗的 62.9%;HHDV 的 WTP 和 PTW 阶段能耗分布较为平均,分别占总能耗的 49.3%和 46.7%。

WTP 阶段,DHDV 的能耗比 HHDV 低 43.7%,分析原因可能为燃料生产过程能源转化效率的差异,目前柴油加工的能源转化效率超过 90%,

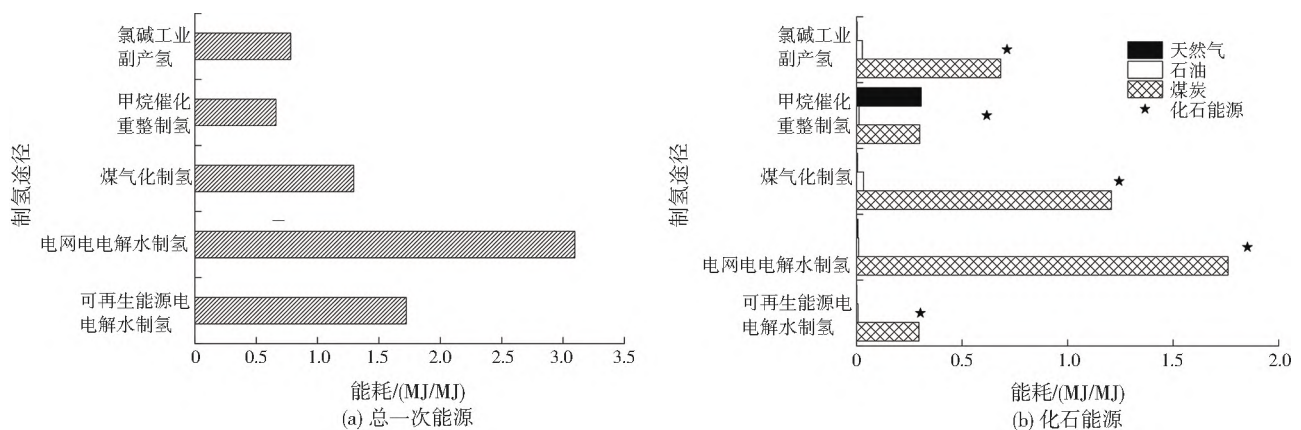


图2 不同制氢途径总一次能源消耗与化石能源消耗

Fig.2 The total primary energy consumption and fossil fuel consumption of different hydrogen production pathway

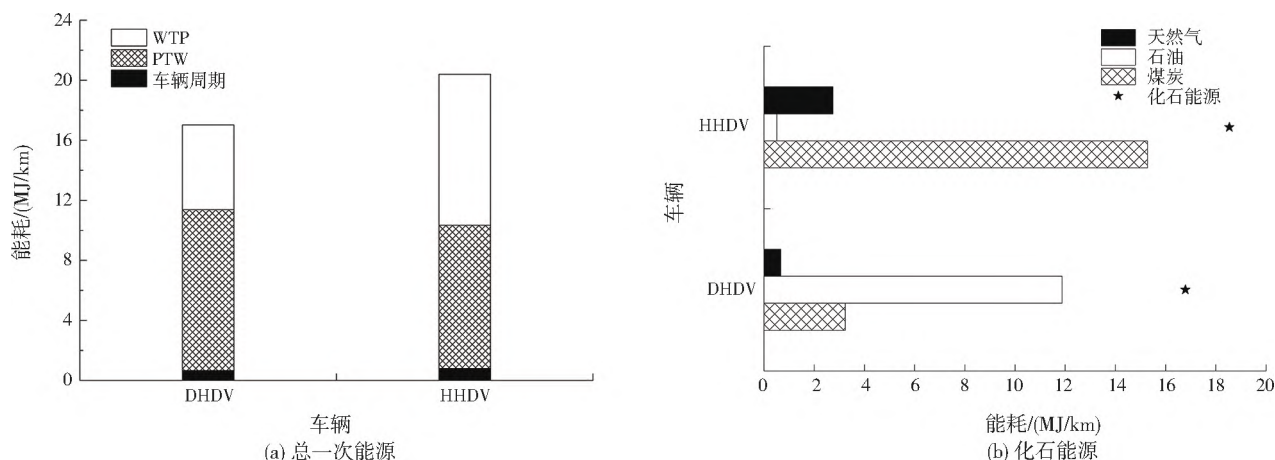


图 3 2 种燃料类型重型车全生命周期总一次能源消耗与化石能源消耗

Fig.3 The total primary energy consumption and fossil fuel consumption of heavy duty vehicle driven by two fuels

而氢气制备的综合能源转化效率较低,当前氢气来源结构中占比最大的化石能源制氢能源利用率(以煤炭、天然气为原料制氢综合能源利用率大约分别为 50%~60%<sup>[31]</sup>和 72%<sup>[32-33]</sup>)低于柴油加工能源利用率。PTW 阶段,柴油发动机的能源转化率大约为 30%~45%,而氢燃料电池将氢能转化为电能的效率约为 60%<sup>[34]</sup>,电动机电能利用效率最高可达到 90%,因此 HHDV 的综合能源转化率高 DHDV,使得 PTW 阶段 HHDV 的能耗比 DHDV 低 11.0%。综合 WTP 阶段和 PTW 阶段得出 DHDV 的燃料周期能耗比 HHDV 低 16.4%。在车辆周期,由于 HHDV 配备了电动机和燃料电池,车架相应做了加固,使得 HHDV 的整备质量比 DHDV 高约 2 600 kg(见表 1),进而车辆周期的能耗比 DHDV 高 21.2%。

由于我国目前氢气来源依赖化石燃料制氢,其中包括煤气化制氢,因此 HHDV 的全生命周期煤炭消耗明显高于 DHDV,约为其 4.7 倍。与 DHDV 相比, HHDV 的全生命周期石油消耗约节约 95.7%,因此 HHDV 的推广有助于减少我国对进口石油的依赖。以天然气为原料的甲烷催化重整制氢技术是目前较为常见的制氢技术,因此 HHDV 的天然气消耗量明显高于 DHDV。

## 2.2 温室气体

5 种制氢途径温室气体排放情况(制备 1 MJ 氢气产生的排放量)如图 4 所示。电网电电解水制氢的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放量均最高,分别为 301.37、9.62、0.32 g/MJ,可再生能源电电解水制氢的 CO<sub>2</sub>和 CH<sub>4</sub>排放量最低,分别为 28.51、1.05 g/MJ。甲烷催化重整制氢的 N<sub>2</sub>O 排放量(0.16 g/MJ)最低。文献[5]、[9]、[10]的研究表明,可再生能源电电解

水制氢、电网电电解水制氢、煤气化制氢、甲烷催化重整制氢和氯碱工业副产氢生命周期碳排放量(CO<sub>2</sub>当量)大致为 20.8~31.3、283.1~401.0、203.8~258.3、111.4~158.3、155.8~161.0 g/MJ,本研究结果与其类似。

由图 5 可知, HHDV 和 DHDV 全生命周期温室气体排放量分别为 1 492.7、1 055.1 g/km。与 DHDV 相比, HHDV 全生命周期温室气体排放量高 41.5%,说明当前氢气供应结构和电力组成条件下,推广 HHDV 无法达到减碳效果。CO<sub>2</sub>排放是车辆全生命周期温室气体排放的主要部分,分别占 DHDV 和 HHDV 全生命周期温室气体排放总量的 97.2%和 95.7%。CH<sub>4</sub>排放量仅为 CO<sub>2</sub>的 2.7%(DHDV)和 4.1%(HHDV),CH<sub>4</sub>排放主要与电力结构有关<sup>[12]</sup>。N<sub>2</sub>O 排放量仅为 CO<sub>2</sub>的 0.08%(DHDV)和 0.23%(HHDV)。

燃料周期阶段为车辆全生命周期温室气体排放的主要阶段,分别占 DHDV 和 HHDV 全生命周期温室气体排放总量的 98.8%和 98.9%。虽然 HHDV 在 PTW 阶段没有排放,但 WTP 阶段氢气制备过程的温室气体排放量是柴油生产过程的 5 倍多,使得燃料周期阶段 HHDV 的温室气体排放量比 DHDV 高 41.6%。HHDV 和 DHDV 的整备质量及原材料比例不同,车辆生产、装配及配送等过程的碳排放量不同,车辆周期 HHDV 碳排放量比 DHDV 高 31.9%。根据上述分析,电网结构的清洁度将对氢气制备过程碳排放产生直接影响,如果未来我国改变以煤电为主的电力结构,推广可再生能源电电解水制氢工艺, HHDV 全生命周期的温室气体排放量将大幅降低。

## 2.3 大气污染物

5 种制氢途径的大气污染物排放情况(制备 1



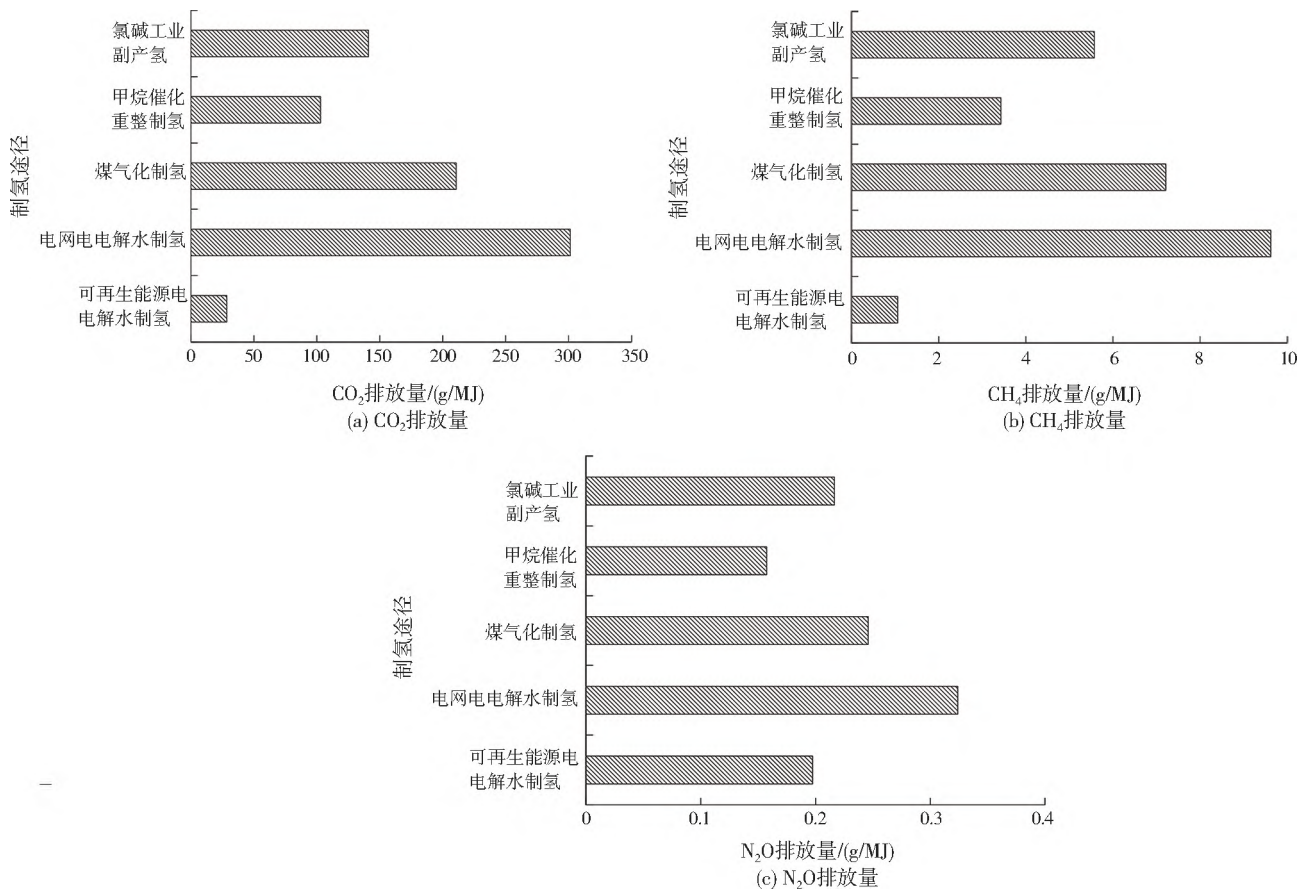


图 4 不同制氢途径的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放量  
Fig.4  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission of different hydrogen production pathway

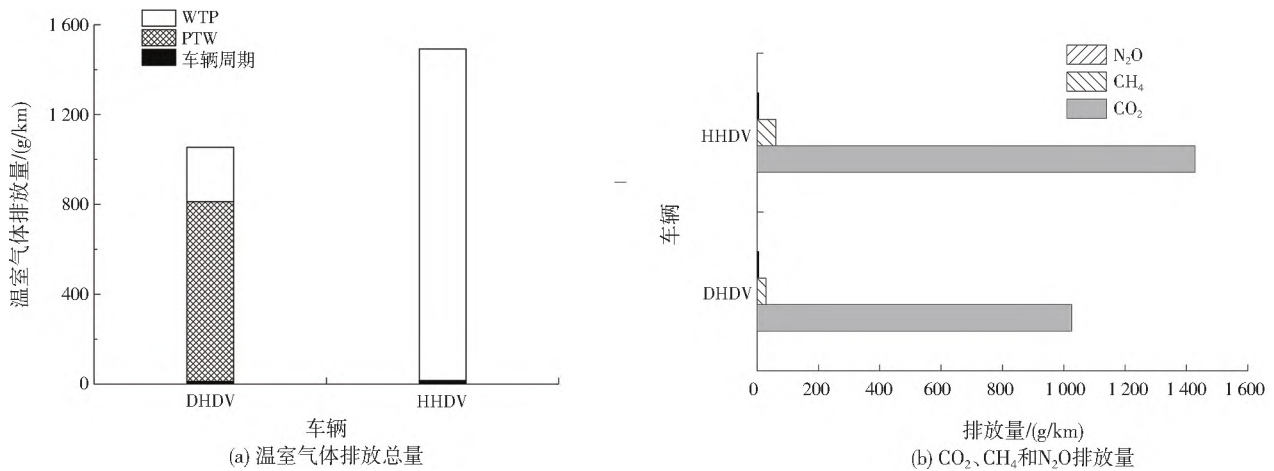


图 5 2 种燃料类型重型车全生命周期温室气体排放总量及  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  排放量

Fig.5 The total green gas emission and  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission of heavy duty vehicle driven by two fuels

MJ 氢气的排放量)如图 6 所示。目前我国电力结构仍以煤炭发电为主,使得电网电电解水制氢的  $\text{SO}_x$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$  排放量明显高于其他 4 种制氢途径,分别高 4.5~15.6、2.1~8.0、1.6~6.5 倍;电网电电解水制氢和氯碱工业副产氢的  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  排放量接近,分别比其他 3 种途径高 7.6~33.6、4.0~12.3 倍;氯碱工业副产氢的 VOCs 排放量最高,分别是

可再生能源电电解水制氢、电网电电解水制氢、煤气化制氢、甲烷催化重整制氢的 17.8、1.4、2.4、3.3 倍。

图 7 为 HHDV 和 DHDV 全生命周期大气污染物排放量。整体而言,HHDV 和 DHDV 的大气污染物排放各有优劣,主要与污染物的种类有关。DHDV 的  $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$  排放量分别为 1.79、1.24 g/km,分别为 HHDV 的 7.1、2.8 倍。HHDV 的 VOCs、

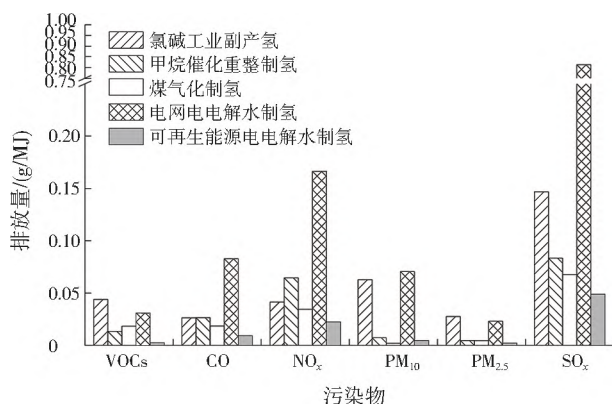


图6 不同制氢途径大气污染物排放情况

Fig.6 Atmospheric pollutant emission of different hydrogen production pathway

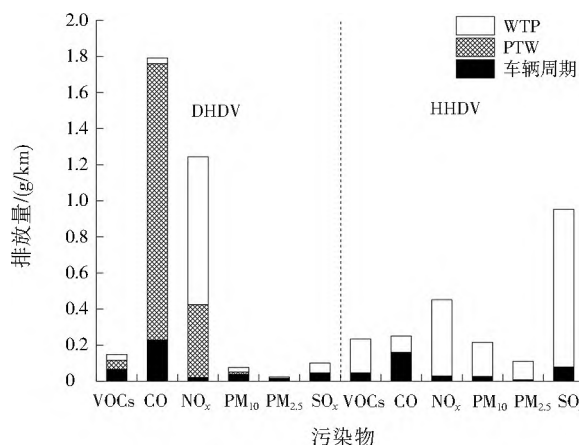


图7 2种燃料类型重型车全生命周期大气污染物排放情况

Fig.7 Atmospheric pollutant emission of heavy duty vehicle driven by two fuels

PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>和SO<sub>x</sub>排放量分别为0.23、0.19、0.11、0.95 g/km,分别为DHDV的1.6、2.8、4.5、9.4倍。

### 3 结论

(1) 电网电电解水制氢的总一次能源消耗最高,甲烷催化重整制氢最低。HHDV全生命周期总能耗为20.4 MJ/km,与DHDV(17.0 MJ/km)相比高约20.0%,表明当前氢气供应和能源结构条件下,HHDV无法实现节能效果。

(2) 电网电电解水制氢的CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放量最高,可再生能源电电解水制氢的CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>排放量最低,甲烷催化重整制氢的N<sub>2</sub>O排放量最低。与DHDV(1 055.1 g/km)相比,HHDV全生命周期温室气体排放总量(1 492.7 g/km)高约41.5%,表明当前氢气供应和能源结构条件下,HHDV无法实现减碳效果。

(3) 电网电电解水制氢的SO<sub>x</sub>、CO和NO<sub>x</sub>排放量最高,PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>排放量与氯碱工业副产氢接近,均较高;氯碱工业副产氢的VOCs排放量最

高。整体而言,HHDV的大气污染物排放量并不总高于或低于DHDV,与污染物的种类有关。

### 参考文献:

- [1] 生态环境部.中国移动源环境管理年报(2021)[R].北京:生态环境部,2021.
- [2] 能源与交通创新中心.中国传统燃油汽车退出时间表研究[R].北京:能源与交通创新中心,2019.
- [3] 陈轶高,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).
- [4] KIM I,KIM J,LEE J.Dynamic analysis of well-to-wheel electric and hydrogen vehicles greenhouse gas emissions; focusing on consumer preferences and power mix changes in South Korea[J].Applied Energy,2020,260:114281.
- [5] LIU F,MAUZERALL D L,ZHAO F,et al.Deployment of fuel cell vehicles in China:greenhouse gas emission reductions from converting the heavy-duty truck fleet from diesel and natural gas to hydrogen[J].International Journal of Hydrogen Energy,2021,46(34).
- [6] CORREA G,MUÑOZ P M,RODRIGUEZ C R.A comparative energy and environmental analysis of a diesel,hybrid,hydrogen and electric urban bus[J].Energy,2019,187.
- [7] LIU X,ELGOWAINY A,VIJAYAGOPAL R,et al.Well-to-wheels analysis of zero-emission plug-in battery electric vehicle technology for medium- and heavy-duty trucks[J].Environmental Science & Technology,2021,55(1):538-546.
- [8] CANDELAESI D,VALENTE A,IRIBARREN D,et al.Comparative life cycle assessment of hydrogen-fuelled passenger cars[J].International Journal of Hydrogen Energy,2021,46(72):35961-35973.
- [9] 余亚东,高慧,肖晋宇,等.不同燃料路径氢燃料电池汽车全生命周期环境影响评价[J].全球能源互联网,2021,4(3).
- [10] LIU X,REDDI K,ELGOWAINY A,et al.Comparison of well-to-wheels energy use and emissions of a hydrogen fuel cell electric vehicle relative to a conventional gasoline-powered internal combustion engine vehicle [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2020,45(1):972-983.
- [11] GONG H M,ZOU Y,YANG Q K,et al.Generation of a driving cycle for battery electric vehicles;a case study of Beijing [J].Energy,2018,150:901-912.
- [12] YU Y M,XU H,CHENG J P,et al.Which type of electric vehicle is worth promoting mostly in the context of carbon peaking and carbon neutrality? A case study for a metropolis in China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 837: 155626.
- [13] VIARD B,FU S.The effect of Beijing's driving restrictions on pollution and economic activity[J].Journal of Public Economics,2015,125:98-115.
- [14] IPCC.Climate change 2021: the physical science basis[EB/OL].[2023-01-20].https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/.
- [15] 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, 2017,22(1):94-110.

(下转第549页)

- [8] YAN Y, PENG L, LI R, et al. Concentration, ozone formation potential and source analysis of volatile organic compounds (VOCs) in a thermal power station centralized area: a study in Shuozhou, China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 223: 295-304.
- [9] 蒋美青, 陆克定, 苏榕, 等. 我国典型城市群  $O_3$  污染成因和关键 VOCs 活性解析[J]. *科学通报*, 2018, 63(12): 1130-1141.
- [10] 乔月珍, 陈凤, 赵秋月, 等. 2015 年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性[J]. *环境科学*, 2019, 40(5): 2062-2068.
- [11] 张露露, 蒋卫兵, 张元勋, 等. 上海市青浦区大气挥发性有机化合物的特征[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(12): 3550-3561.
- [12] YING L, MIN S, LU S H, et al. Source apportionment of ambient volatile organic compounds in the Pearl River Delta, China: Part II[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(25): 6261-6274.
- [13] 周炎, 岳玳利, 张涛. 春季广州城区空气中 VOCs 来源解析[J]. *环境监控与预警*, 2017, 9(1): 42-47.
- [14] 景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 等. 典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性[J]. *环境科学*, 2020, 41(7): 3076-3084.
- [15] 林旭, 陈超, 叶辉, 等. 杭州秋季大气 VOCs 变化特征及化学反应活性研究[J]. *中国环境监测*, 2020, 36(2): 196-204.
- [16] 沈建东, 叶旭红, 朱英俊, 等. 杭州市大气 VOCs 浓度特征及其化学活性研究[J]. *中国环境监测*, 2020, 36(5): 80-87.
- [17] 杨强, 黄成, 卢滨, 等. 基于本地污染源调查的杭州市大气污染物排放清单研究[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(9): 3240-3254.
- [18] PAATERO P, TAPPER U. Analysis of different modes of factor analysis as least squares fit problems[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 1993, 18(2): 183-194.
- [19] SONG Y, SHAO M, LIU Y, et al. Source apportionment of ambient volatile organic compounds in Beijing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(12): 4348-4353.
- [20] CARTER W. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 1994, 44: 881-899.
- [21] 陈长虹, 苏雷燕, 王红丽, 等. 上海市城区 VOCs 的年变化特征及其关键活性组分[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(2): 367-376.
- [22] 李敏娜, 钱震, 蒋荣. 2016—2018 年南通市挥发性有机物组成特征与臭氧生成潜势变化[J]. *环保科技*, 2021, 27(4): 27-33.
- [23] 郑伟巍, 毕晓辉, 吴建会, 等. 宁波市大气挥发性有机物污染特征及关键活性组分[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(12): 1411-1419.
- [24] 王鑫, 张敏, 张付海, 等. 合肥市城区大气挥发性有机物污染特征及健康风险评估[J]. *中国科学技术大学学报*, 2018, 48(3): 210-220.
- [25] 邵敏, 袁斌, 王鸣, 等. 挥发性有机物来源及其大气化学作用[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [26] 周子航, 邓也, 周小玲, 等. 成都市工业挥发性有机物排源成分谱[J]. *环境科学*, 2020, 41(7).
- [27] 陆思华, 白郁华, 张广山, 等. 大气中挥发性有机化合物 (VOCs) 的人为来源研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(5).
- [28] WANG H L, CHEN C H, WANG Q, et al. Chemical loss of volatile organic compounds and its impact on the source analysis through a two-year continuous measurement[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 80: 488-498.
- [29] LIANG X M, SUN X B, LU Q, et al. VOC emission inventory of architectural coatings and adhesives for new buildings in China based on investigated and measured data[J]. *Atmospheric Environment*, 2021, 245: 118014.
- [30] 韩丽, 陈军辉, 姜涛, 等. 成都市冬季挥发性有机物污染特征及来源研究[J]. *四川环境*, 2019, 38(3): 120-125.

编辑: 胡翠娟 (收稿日期: 2023-08-24)

(上接第 542 页)

- [16] SIMONS A, BAUER C. A life-cycle perspective on automotive fuel cells[J]. *Applied Energy*, 2015, 157: 884-896.
- [17] 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.
- [18] 国家统计局. 中国统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [19] 中国煤炭工业协会. 2018 年中国煤炭工业经济运行报告[EB/OL]. [2023-04-22]. [http://lwzb.stats.gov.cn/pub/lwzb/gzdt/201905/t20190521\\_5097.html](http://lwzb.stats.gov.cn/pub/lwzb/gzdt/201905/t20190521_5097.html).
- [20] 交通运输部. 2018 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. [2023-04-25]. <http://jtt.hebei.gov.cn/jtyst/jtystxh/zjlt/zt-wz/101554854141990.html>.
- [21] 中国电力企业联合会. 电力行业“十四五”发展规划研究[EB/OL]. [2023-04-15]. <https://m.in-en.com/finance/html/energy-2250532.shtml>.
- [22] 中国电力企业联合会. 2021—2022 年度全国电力供需形势分析预测报告[EB/OL]. [2023-04-15]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-306171>.
- [23] 中国汽车技术研究中心有限公司. 氢能汽车蓝皮书: 中国车用氢能产业发展报告(2022)[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2023.
- [24] 中国氢能联盟. 中国氢能及燃料电池产业发展报告 2022[M]. 北京: 人民日报出版社, 2023.
- [25] LILIANA ISABEL C C. A sustainability assessment in the production of heavy-duty trucks: a case study at Scania: investigating the reduction of environmental impacts through design customization and LCA[R]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2020.
- [26] WOLFF S, SEIDENFUS M, GORDON K, et al. Scalable life-cycle inventory for heavy-duty vehicle production[J]. *Sustainability*, 2020, 12(13): 1-22.
- [27] 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.
- [28] 冯超. 基于 HLCA 的电动汽车规模化发展对能耗及环境影响研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.
- [29] XIONG S Q, JI J P, MA X M. Comparative life cycle energy and GHG emission analysis for BEVs and PhEVs: a case study in China[J]. *Energies*, 2019, 12(5): 1-17.
- [30] 王攀. 电动汽车与天然气车全生命周期环境影响评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [31] ELGOWAINY A, HAN J, ZHU H. Updates to parameters of hydrogen production pathways in GREET[EB/OL]. [2023-08-20]. <https://greet.es.anl.gov/files/h2-13>.
- [32] SUN P P, ELGOWAINY A. Updates of hydrogen production from SMR process in GREET[EB/OL]. [2023-08-20]. [https://greet.es.anl.gov/files/smr\\_h2\\_2019](https://greet.es.anl.gov/files/smr_h2_2019).
- [33] PEDRO J M, ARTURO J V, JOSE A C, et al. Hydrogen production technologies: from fossil fuels toward renewable sources. A mini review[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(20): 16403-16415.
- [34] United States Department of Energy. FY 2019 progress report for the DOE hydrogen and fuel cells program[R]. Washington, D.C.: United States Department of Energy, 2020.

编辑: 胡翠娟 (收稿日期: 2023-11-06)