

不同燃料路径氢燃料电池汽车全生命周期环境影响评价

余亚东¹, 高慧², 肖晋宇³, 侯金鸣³, 金晨³, 张瑾轩³, 周文戟⁴, 任宏涛¹, 郭颖^{5*}

(1. 华东理工大学商学院, 上海市 徐汇区 200237;

2. 中国石油集团经济技术研究院, 北京市 西城区 100724;

3. 全球能源互联网发展合作组织, 北京市 西城区 100031;

4. 中国人民大学应用经济学院, 北京市 海淀区 100872;

5. 中南大学能源科学与工程学院, 湖南省 长沙市 410083)

Life-cycle Assessment of Environmental Impact of Hydrogen Fuel Cell Vehicles with Different Fuel Pathways

YU Yadong¹, GAO Hui², XIAO Jinyu³, HOU Jinming³, JIN Chen³, ZHANG Jinxuan³, ZHOU Wenji⁴, REN Hongtao¹, GUO Ying^{5*}

(1. School of Business, East China University of Science and Technology, Xuhui District, Shanghai 200237, China;

2. Research Institute of Economics and Technology of CNPC, Xicheng District, Beijing 100724, China;

3. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Xicheng District, Beijing 100031, China;

4. School of Applied Economics, Renmin University of China, Haidian District, Beijing 100872, China;

5. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan Province, China)

Abstract: Hydrogen fuel cell vehicles (FCVs) have a long driving range and high energy-conversion efficiency. The fuel can be produced by electrolyzing water with renewable energy. The FCV promotion and application will promote the consumption of unstable electricity generated by renewable energy, thus improving the renewable energy consumption rate. Existing research lacks a comprehensive life-cycle assessment analysis of the environmental impact of hydrogen fuel production, storage, and transportation. In this study, 17 hydrogen fuel pathways were designed based on different technology combinations, including hydrogen production, hydrogen transportation, and electricity production. Using the GREET software, the life-cycle environmental impacts of these pathways were calculated. The results show that Pathways 3 (renewable energy power generation + liquid hydrogen tank car hydrogen transmission) and 16 (renewable energy power generation + power transmission + on-site hydrogen production) have the least environmental impact, which are lower than those of battery electric vehicles (electricity from the grid + lithium-

ion electric vehicle) and internal combustion engine vehicles. In the future, to promote the application of those pathways with low life-cycle environmental impact, it is necessary to further reduce the cost of renewable energy power generation and hydrogen production by water electrolysis.

Keywords: hydrogen; fuel cell vehicle (FCV); life cycle analysis (LCA); environmental impact assessment; GREET

摘要: 氢燃料电池汽车续航里程长、能量转换效率高,其燃料可通过可再生能源电解水制取。氢燃料电池汽车的推广应用将促进电力系统消纳不稳定的可再生能源电力。已有文献缺乏对氢燃料生产、储运等不同路径的环境影响全生命周期综合分析。考虑中国当前主要的制氢、输氢和发电技术,根据不同技术组合设计17条氢燃料路径,通过GREET软件对这些路径的生命周期环境影响进行核算。研究表明:路径3(可再生能源发电制氢+液氢槽车输氢)和路径16(可再生能源发电+输电+现场制氢)的环境影响最小,低于纯电动车路径(混合发电+锂离子电动车)和汽油内燃机车路径的环境影响。未来需要进一步降低可再生能源发电制氢的成本,提升这些路径的经济性,从而推动燃料电池汽车低环境影响路径的应用。

关键词: 氢能; 燃料电池汽车; 生命周期分析; 环境影响评价; GREET

基金项目: 国家自然科学基金(72074077, 71704055); 全球能源互联网集团有限公司科技项目(N100-72007)。

National Natural Science Foundation of China (72074077, 71704055); Science and Technology Foundation of GEIGC (N100-72007).

0 引言

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。交通领域是非常重要的化石燃料使用部门,其碳排放量占全球能源相关碳排放量的25%^[1],迫切需要通过技术创新降低对化石燃料的依赖,如发展新型乘用车等技术^[2]。与传统的内燃机汽车(internal combustion engine vehicle, ICEV)相比,纯电动汽车(battery electric vehicle, BEV)^[3]和燃料电池汽车(fuel cell vehicle, FCV)^[4]在能耗和排放方面具有显著优势,迅速成为关注的焦点。其中,FCV因具有续航里程长、能量转换效率高、补能时间短等优点,成为未来汽车业技术竞争的制高点。更为重要的是,FCV所使用的氢,可以利用风电、太阳能发电等不稳定电力和剩余电力制取,从而有效提升可再生能源消纳能力。

然而,FCV对环境的影响目前还存在争议^[5]。文献[6]从车辆制造角度比较了FCV与其他类型汽车的能耗和排放,结果表明在车辆制造阶段,FCV的能耗高于ICEV但低于BEV,温室气体排放高于BEV和ICEV,颗粒物排放几乎和ICEV相同并且高于BEV,车辆制造阶段的能耗和排放都远低于车辆使用阶段。文献[7]认为,车辆的环保性不能简单根据使用过程中直接排放的有害废气来判断,而应全面考虑燃料的生产、运输和使用全生命周期的环境影响。FCV的燃料由制氢、储氢、输氢等多个环节构成,每个环节都有不同技术可供选择,不同的技术组合会导致FCV对环境的影响有所差异,有必要从全环节和全生命周期角度比较不同制氢和输氢技术组合产生的环境影响,从而筛选出合适的FCV燃料方案。

目前,已有较多文献从全生命周期角度研究不同燃料生产和储运技术方案下FCV的环境影响和可持续性^[8-14]。针对可再生能源和不可再生能源制氢途径的研究结果表明:光伏发电+电解水制氢具有明显的节能减排优势^[2],但如果考虑经济因素,天然气重整制氢很可能是最初引入到FCV的主要技术^[15]。文献[16]研究发现使用电网混合电制氢并不环保。中国学者研究发现风电+电解水制氢路径的能耗和排放最低,是FCV的最可行路径^[17]。文献[18]通过对比不同制氢技术发现,若电力结构被火力发电主导,电解水制氢是众多制氢技术中矿产资源消耗、能耗和环境影响最大的技术。文献[19]分析3种铝-水反应制氢发现,与石

化燃料制氢相比,铝-水制氢发电不会释放有害颗粒,而且无需储运,具有一定的发展潜力。除了制氢技术以外,不同的氢能储运技术也会改变FCV对环境的影响。文献[20]分析了公路运输、船舶运输和液体有机物储运氢几种方式下氢能供应链的环境和经济表现,结果表明,由于各种技术各有其优缺点,不存在在经济表现全面占优的氢能供应链。文献[21]研究发现,管道输氢对环境的影响最小,输送距离越短,长管拖车输氢的环境影响越小。

在上述研究中,基于温室气体、管制排放和能源使用技术模型和软件(The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies Model, GREET)的生命周期分析(life-cycle analysis, LCA)方法已经成为非常重要的研究工具^[2, 16-18, 22-25]。许多学者都基于GREET模型开展了FCV的燃料技术组合的环境影响分析和路径筛选。文献[2]研究了中国台湾FCV的6种潜在燃料技术路径(天然气+蒸汽重整制氢、玉米乙醇+蒸汽重整制氢、电网电+电解水制氢、光伏发电+电解水制氢、煤气化制氢、煤气化制氢+碳捕集封存)的环境影响,研究表明光伏发电+电解水制氢路径的环境影响较低,但经济成本较高。文献[16]对葡萄牙FCV燃料路径的环境影响研究表明,风力发电+电解水制氢路径最为环保,而电网混合电+电解水制氢路径最不环保。文献[24]对韩国5种FCV燃料路径的环境影响研究发现,天然气现场制氢较为环保,其温室气体排放比石脑油重整制氢低50%。文献[25]对不同液态氢生产方法下液态氢动力汽车的环境排放研究发现,太阳能、核能和电解水制氢是最环保的方法,煤炭和电制氢已成为对环境最有害的方法。

已有研究从生命周期角度对FCV的环境影响分析取得了丰富的成果。然而,综合考虑中国当前主要的氢燃料生产、储运等不同技术组合,分析不同技术组合方案的环境影响的研究还未见报道。鉴于此,本文基于GREET模型研究不同技术方案下FCV燃料生命周期的环境影响,并将其与BEV和ICEV进行对比,从而筛选出合适的FCV燃料方案。

具体而言,本研究考虑最为主要的5种制氢技术(包括可再生能源发电制氢、混合电制氢、煤制氢、天然气制氢、焦炉煤气副产氢),3种输氢技术(包括气氢拖车、气氢管道、液氢槽车^[1, 26-27]),以及2种现场制氢场景(包括可再生能源电和混合电现场制氢并加氢的技术)。本文研究这些技术组合产生的17种FCV燃料技术方案的能耗、水耗、环境排放等环境影

响，并与BEV和ICEV进行对比，筛选出FCV在氢燃料的环境影响方面的最优技术组合。

1 研究框架与模型

1.1 研究框架

项目的研究框架如图1所示。环境影响的研究采用LCA方法，具体计算采用GREET软件^[23]，评估内容包括能量消耗与排放等指标，该软件由美国阿贡国家实验室开发，现已广泛用于车用燃料的LCA研究^[18-19]。

本文LCA分析的过程如下：①基于GREET软件^[22]，分别测算能源生产阶段（well-to-pump, WTP）（即能源开采到供应站点，如加氢站、加油站或充电站）和能源使用阶段（pump-to-wheel, PTW）（即能源供应站点到能源的使用）这2个阶段的环境清单，并汇总为原材料开采到能源使用（well-to-wheel, WTW）全过程的环境清单；②环境清单包括原油、原煤、天然气和水等进入系统边界的物质，以及VOC、CO、NO_x、PM₁₀、PM_{2.5}、SO_x、CH₄、CO₂、N₂O等通过排放离开系统边界的物质；③通过生态指标99（Eco-indicator 99）^[28]进行环境影响评价。需要说明的是，本研究不考虑上游建设引起的能耗、水耗和排放。

本文考虑2种方式实现FCV的燃料供给，第一种是在制氢工厂生产氢气，再把氢气运输到加氢站；第二种是为加氢站提供电能，在加氢站电解水现场制氢和加氢。第一种方式中的制氢环节有5种选择，输氢环节有3种选择；第二种方式中的电力来源有2种选择。因此对于FCV的氢燃料来源，共有17种路径可以选择；为了对比FCV与BEV和ICEV的区别，共设置19

种路径，见表1。

表 1 路径名称及编码
Table 1 Pathway name and code

路径名称	路径编号
可再生能源发电制氢+气氢管道	FCV-P1
可再生能源发电制氢+气氢拖车	FCV-P2
可再生能源发电制氢+液氢槽车	FCV-P3
混合电制氢+气氢管道	FCV-P4
混合电制氢+气氢拖车	FCV-P5
混合电制氢+液氢槽车	FCV-P6
焦炉煤气副产氢+气氢管道	FCV-P7
焦炉煤气副产氢+气氢拖车	FCV-P8
焦炉煤气副产氢+液氢槽车	FCV-P9
煤制氢+气氢管道	FCV-P10
煤制氢+气氢拖车	FCV-P11
煤制氢+液氢槽车	FCV-P12
天然气制氢+气氢管道	FCV-P13
天然气制氢+气氢拖车	FCV-P14
天然气制氢+液氢槽车	FCV-P15
可再生能源发电+输电+现场制氢	FCV-P16
混合发电+输电+现场制氢	FCV-P17
汽油内燃机汽车	ICEV-gasoline
锂离子电池电动车	BEV-LiH

1.2 生命周期环境影响分析

本文采用GREET 2020，构建如表1所示的19种路径对应的过程，开展LCA研究，步骤如下。

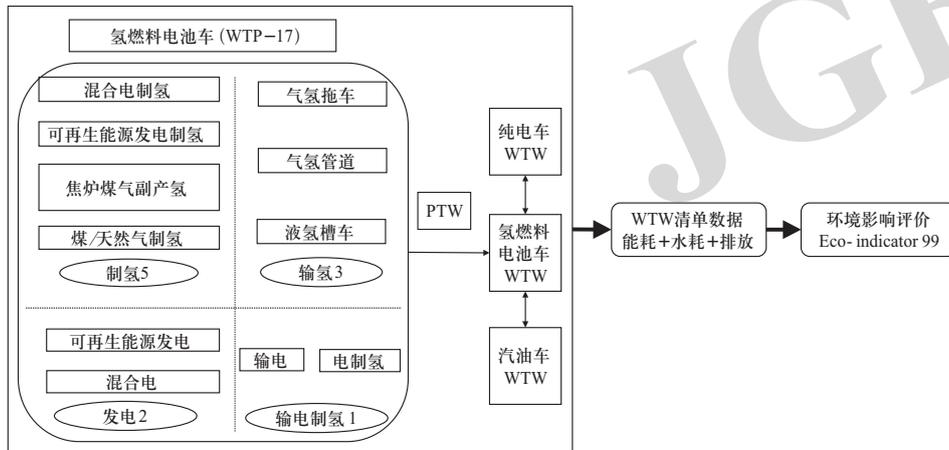


图 1 研究框架图

Fig. 1 Research framework

1) 选定车型。车型和车辆相关参数是使用GREET软件研究汽车能耗和排放的必要条件。本文为FCV、ICEV和BEV分别选择一款具体的车型作为代表。FCV选择丰田Mirai, ICEV选择凯美瑞2019款2.5G豪华版车型, BEV选择比亚迪汉2020款EV超长续航版豪华型车。这些车辆的相关参数根据太平洋汽车网等资料和文献^[29]整理, 具体见表2。

表2 车辆参数表
Table 2 Vehicle parameters

	FCV	ICEV	BEV
车型	丰田Mirai	凯美瑞	比亚迪汉
百km燃料消耗量	1.04 kg 氢气	6 L 油	—
整备质量/kg	1850	1585	2020
续航/km	650	1000	605
电池和燃料种类	镍氢燃料电池	汽油	锂电池
电池容量/kWh	—	—	76.9
售价/万元	50.5	21.98	22.98

2) 设定基本过程及参数。在GREET模型中, 对于每一个过程或子过程, 需要定义使用的技术、输入的物质或能量的类型、输出的物质。根据表1的路径设计, 需要定义制氢、输氢、发电等不同的过程, 相关参数来自文献或软件本身, 软件的相关操作和设置来自操作手册^[30]。模型设置的输氢距离约1300 km, 输电线损约5%。在所有过程中, 都可能直接或者间接用到电力, 因此电力的构成对模型运行结果有不可忽视的影响, 模型中的发电结构(混合电力)参考文献[31]中的电力结构(见表3)。在GREET模型中, 水电、风电、光伏发电这3种可再生能源发电技术的直接排放均为0, 仅有用水量和效率的差别。考虑到光伏发电对地域的要求最低, 成本也具有竞争力, 因此本研究选择光伏发电作为可再生能源电力的代表。

表3 2019年中国发电量结构
Table 3 Electricity mix of China in 2019

种类	2019年发电量/亿kWh	占比/%
水电	13 019	17.8
风电	4057	5.5
光伏发电	2243	3
生物质发电	1111	1.5
核电	3487	4.8
火电	49 354	67.4

3) 环境影响评价方法。环境排放的危害最终会体现在对生态和人类健康的威胁上。因此, 有必要评价排放污染物的环境影响, 本文采用LCA常用的生态指标99 (Eco-indicator 99) 方法^[28], 该方法将环境影响量化为人体毒性潜力、气溶胶潜力、光化学烟雾潜力、酸化潜力、全球变暖潜力等方面^[32], 各类污染排放与环境影响指标的权重关系见表4。

表4 环境影响评价指标和权重
Table 4 Index and weight of environmental impact assessment

评价指标	排放的污染物	权重
人体毒性潜力	CO ₂	0.012
	NO _x	0.78
	SO _x	1.2
气溶胶潜力	PM ₁₀	1
	PM _{2.5}	1
光化学烟雾潜力	CH ₄	0.006
	NO _x	0.028
酸化潜力	SO _x	1
	NO _x	0.7
全球变暖潜力	CO ₂	1
	CH ₄	23
	N ₂ O	296

2 结果与讨论

2.1 能耗与水耗

不同路径的能耗结果如图2所示。结合表1可知, 混合发电制氢、煤制氢的FCV路径, 以及BEV路径的WTP阶段能耗明显较高; 可再生能源发电制氢、焦炉煤气副产氢联合气氢运输、天然气制氢联合气氢运输的FCV路径, 以及ICEV路径的PTW阶段能耗高于WTP阶段。不同FCV路径的PTW阶段的能耗相差不多, 大约为135 MJ/百km。而ICEV的PTW阶段能耗为282 MJ/百km, 远高于WTP阶段的73 MJ/百km, 几乎是后者的4倍。BEV在WTP和PTW阶段的能耗分别是135 MJ/百km和96 MJ/百km, 前者是后者的1.4倍。这种差异是制氢路径的技术工艺造成的, 化石能源能耗较高, 而可再生能源能耗较低, 工业副产氢的能耗低是因为能耗主要分摊在产品上而不是副产品氢上。

综合分析19种路径的能耗, 能耗较高的4条路径都包含混合电制氢的环节, 百km能耗均超过500 MJ, 其中FCV-P6 (混合电制氢+液氢槽车) 的能耗最高,

达到551 MJ/百km, FCV-P17为524 MJ/百km。能耗较低的路径为可再生能源发电制氢路径、焦炉煤气制氢以及天然气制氢的FCV路径, 能耗水平为221~239 MJ/百km。制氢+输氢路径和现场制氢路径相比, 能耗差别不大。

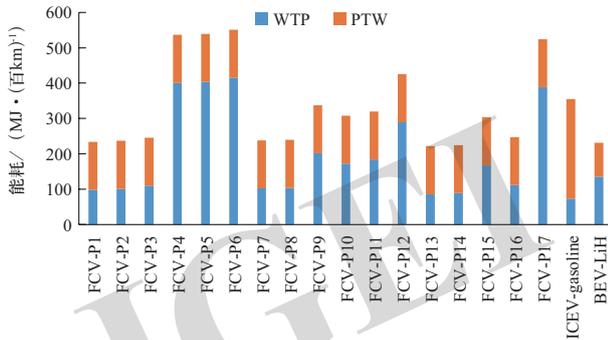


图2 不同路径的能耗

Fig. 2 Energy consumption in different pathways

在相同制氢技术的路径中, 3种运输方式的能耗从低到高分别是气氢管道、气氢拖车、液氢槽车。以FCV-P4、FCV-P5、FCV-P6为例, 由于运输方式不同引起的能耗差异仅占全部能耗的2%~3%, 因此这3种路径的总能耗近乎相同。

不同路径的水耗结果如图3所示。由于所有路径PTW阶段的水耗都为0, WTP阶段的水耗即为这些燃料路径WTW过程的水耗。

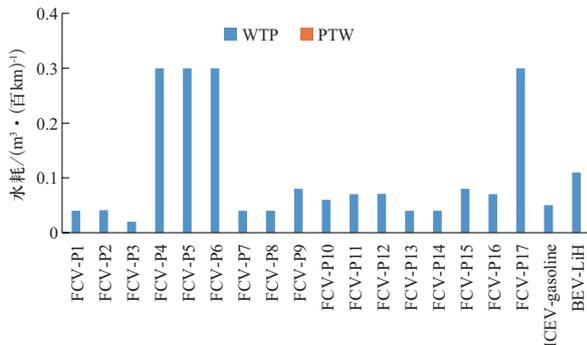


图3 不同路径的水耗

Fig. 3 Water consumption in different pathways

大部分FCV路径的水耗范围是0.04~0.08 m³/百km, 都低于BEV路径的水耗0.11 m³/百km, 有些路径的水耗甚至低于ICEV路径的0.05 m³/百km。但是和混合发电制氢相关的FCV路径水耗较高, 高达0.3 m³/百km, 几乎是BEV的3倍、ICEV的6倍。这是由于混合发电部分的水耗较高, 而混合发电的水耗又取决于电力结

构。中国电力结构以水耗较高的火电为主, 导致混合发电的WTP阶段水耗较高。如果未来电力结构发生变化, 可再生能源比例逐渐提高, 则该FCV路径的水耗也会随之降低。

2.2 环境排放

环境排放关注9种污染物: CH₄、CO、CO₂、N₂O、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀、SO_x、VOC。通过GREET模型计算19种路径在WTP和PTW阶段的9种污染物的排放水平。由于仅有ICEV存在PTW阶段的污染物, 所以不分别展示WTP和PTW各自的情况, 仅显示每个路径每种污染物WTW的排放量, 结果见表5。

表5 不同路径的污染物排放水平

Table 5 Environmental emissions in different pathways
g/百km

	VOC	CO	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO _x	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ *
FCV-P1	0.3	0.7	0	0.7	0.3	10	10	0.1	3.7
FCV-P2	0.4	1	0	0.7	0.3	10	10	0.1	3.9
FCV-P3	0	0.1	0.3	0	0	0	0	0	0.1
FCV-P4	0	10	20	10	0	110	60	0.7	43.7
FCV-P5	0	10	20	10	0	110	60	0.7	43.9
FCV-P6	0	10	20	10	0	100	60	0.7	40.4
FCV-P7	10	0	0	10	0	20	30	0.1	20
FCV-P8	10	0	10	10	0	20	30	0.1	20.1
FCV-P9	10	0	10	10	0	40	40	0.2	28.1
FCV-P10	0	0	0	0	0.6	10	40	0.1	26.1
FCV-P11	0	0	10	0	0.6	10	40	0.1	27
FCV-P12	0	0	10	0	0.7	0	60	0.2	37.6
FCV-P13	0	0	10	0	0.6	10	20	0.1	13.7
FCV-P14	0	0	10	0	0.6	10	20	0.1	13.9
FCV-P15	0	0	10	0	0	30	30	0.2	20.3
FCV-P16	0.2	0.5	0	0.5	0.2	10	0	0	2.7
FCV-P17	0	10	20	10	0	100	60	0.7	42.7
ICEV-gasoline	20	170	20	0	0	10	30	0	25.3
BEV-LiH	0	0	10	0	0	50	30	0.3	18.8

(注: 表中CO₂排放量的计量单位为kg/百km)

整体而言, FCV路径的环境排放并不总优于或劣于ICEV及BEV, 这和FCV路径的具体制氢和输氢方式有关。ICEV路径的某些污染物排放较高, 例如CO、CO₂、NO_x和VOC, 4种污染物排放量分别是170、

25 280、20、20 g/百km。BEV路径的排放则普遍较低，CH₄、NO_x、SO_x、CO₂分别是30、10、50、18 810 g/百km。本研究对BEV的LCA分析结果是针对使用电网电（混合电）的情景。本研究也对BEV使用可再生能源发电的情景进行了LCA分析，结果表明：在可再生能源发电情景下，BEV的这9种主要污染物排放均为0，是所有路径中最为环保的选择。

综合比较环境排放水平，可再生能源发电制氢的燃料电池汽车表现最好，其他路径的排放水平跟污染物类型有关。例如，混合发电制氢的VOC排放几乎为0，但是NO_x、SO_x、PM₁₀和CO₂的排放量很高。另外，和制氢过程相比，输氢过程的能耗和环境影响都较小。

2.3 环境毒性

对于环境毒性，用环境排放数据和生态指标99计算人体毒性潜力、气溶胶潜力、光化学烟雾潜力、酸化潜力和全球变暖潜力。为方便对比，对这5项指标进行归一化处理，结果如图4所示。

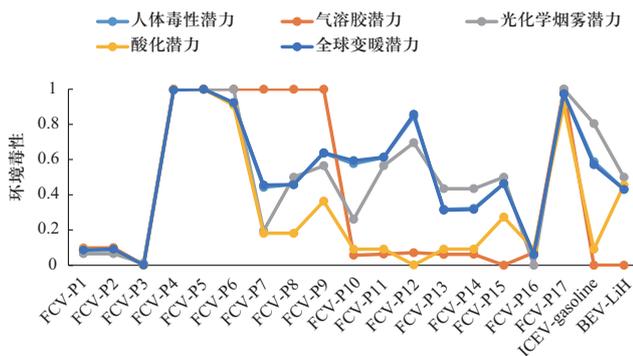


图4 不同路径的环境毒性

Fig. 4 Environmental toxicity in different pathways

由图4可知，FCV路径和ICEV及BEV路径相比，并不具有稳定的优势或劣势，这和FCV路径的具体制氢和输氢方式有关。ICEV路径的某些污染物排放较高，而BEV路径的排放则普遍较低。

在19种路径中，FCV-P1、FCV-P2、FCV-P3、FCV-P16的所有毒性都表现得最低，这说明可再生能源发电制氢的综合环境毒性最小，其他路径的排放水平跟污染物类型有关，这一特点和环境排放类似。混合发电制氢在所有指标中都表现出较强的毒性，这是由于混合发电的石化燃料发电占比过高造成的。

2.4 情景分析

电解水制氢是未来具有重要发展前景的技术，可

作为各种P2X（power-to-chemicals）的重要内容，对于解决可再生能源弃电问题具有重要意义^[33]。该技术的环境影响取决于电力的生产结构。在本研究中，FCV-P1至FCV-P3为100%可再生能源发电制氢条件下FCV的燃料路径，而FCV-P4至FCV-P6为2019年发电结构下（可再生能源占比较低）涵盖电制氢技术的FCV的燃料路径。为进一步探讨可再生能源发电比例如何影响FCV燃料路径的环境排放，本研究参考中国石油经济技术研究院对2030年和2050年中国发电结构的预测^[34]，在文中设立了2030年（水电、风电、光伏发电合计占比35%）和2050年（水电、风电、光伏发电合计占比55%）2种发电结构；进一步，将这2种结构下电制氢技术与3种氢气储运技术进行组合，形成6条新的技术路径（包括FCV-P4-2030、FCV-P5-2030、FCV-P6-2030、FCV-P4-2050、FCV-P5-2050和FCV-P6-2050）；最后，基于GREET模型计算这些技术路径的LCA结果，并与本研究设计的19条技术路径（特别是FCV-P1至FCV-P6这6条技术路径）的环境排放结果进行归一化后的对比，结果如图5所示。

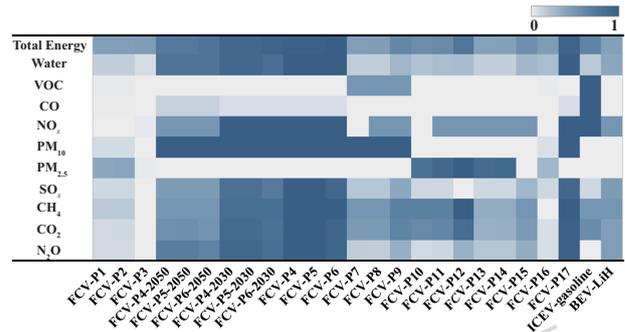


图5 不同路径的能耗、水耗和环境排放

Fig. 5 Energy consumption, water consumption, and environmental emissions of different pathways

研究表明：①随着可再生能源占比逐渐增加，FCV燃料路径的能耗、水耗、污染物排放均逐渐降低；②与化石能源制氢和工业副产氢相比，在2030年和2050年发电结构下，涵盖电解水技术的FCV燃料路径的能耗和环境排放（如碳排放）仍然较高，甚至比ICEV及BEV（混合电+锂离子电动车）路径的排放都要高。

3 结论与展望

针对FCV对环境影响的争议，本文综合考虑中国当前主要的氢燃料生产、运输等不同技术组合，分

析了17种FCV燃料路径的能耗、水耗、环境排放及其环境影响, 并对比BEV和ICEV, 提出FCV在氢燃料路径发展方面的相关建议。研究表明: ①各路径在能耗、水耗、环境排放、环境毒性方面差异很大, 其中FCV-P3(可再生能源发电制氢+液氢槽车)和FCV-P16(可再生能源发电+输电+现场制氢)这两条路径的环境影响最小, 远低于其他路径, 也低于BEV和ICEV的环境影响; ②涵盖混合电制氢过程的路径(如FCV-P6、FCV-P17等)具有较高的能耗、水耗和环境影响, 甚至高于涵盖煤制氢、天然气制氢、工业副产氢过程的路径(FCV-P7至FCV-P15); ③BEV在各方面的环境影响低于大部分的FCV路径, 高于FCV-P3和FCV-P16, ICEV在VOC、CO和NO_x排放方面远高于FCV的各路径, 但其环境影响并非全部劣于FCV的各路径; ④随着可再生能源占比的逐渐增加, FCV燃料路径的能耗、水耗、污染物排放均逐渐降低。

涵盖可再生能源发电制氢过程的路径具有较低的能耗、水耗、环境排放和环境毒性, 但这些路径目前具有较高的经济成本; 涵盖煤制氢、天然气制氢、工业副产氢过程的路径的能耗和水耗较高, 但却具有较低的成本^[35]。按照目前的技术水平和电力结构、能源结构, 本文研究的17种FCV路径的环境和经济效益无法同时达到最优。未来电力结构、技术水平发生变化的情况下, 用本文提出的研究方法可对上述技术路径进行重新评价。

本文的研究方法对于分析FCV的能耗、排放、成本有借鉴作用, 未来将根据不同地区的实际情况, 采用更多本地化数据, 使研究结果具有更大的参考价值。

参考文献

- [1] International Energy Agency. Global energy & CO₂ status report 2019[R/OL].[2021-01-28].<https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>.
- [2] HWANG J J. Sustainability study of hydrogen pathways for fuel cell vehicle applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 19: 220-229.
- [3] YANG Z J, WANG B W, JIAO K. Life cycle assessment of fuel cell, electric and internal combustion engine vehicles under different fuel scenarios and driving mileages in China[J]. *Energy*, 2020, 198: 117365.
- [4] THOMAS C E, JAMES B D, LOMAX F D Jr, et al. Fuel options for the fuel cell vehicle: hydrogen, methanol or gasoline?[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2000, 25(6): 551-567.
- [5] GRANOVSKII M, DINCER I, ROSEN M A. Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 159(2): 1186-1193.
- [6] ASHNANI M H M, MIREMADI T, JOHARI A, et al. Environmental impact of alternative fuels and vehicle technologies: a life cycle assessment perspective[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2015, 30: 205-210.
- [7] 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.
- [8] ABDELKAREEM M A, ELSAID K, WILBERFORCE T, et al. Environmental aspects of fuel cells: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 141803.
- [9] LIU X Y, 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.
- [10] ABDEREZZAK B, BUSAWON K, BINNS R. Flows consumption assessment study for fuel cell vehicles: towards a popularization of FCVs technology[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(17): 12905-12911.
- [11] HE X, WANG F, WALLINGTON T J, et al. Well-to-wheels emissions, costs, and feedstock potentials for light-duty hydrogen fuel cell vehicles in China in 2017 and 2030[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 137: 110477.
- [12] ZAMEL N, LI X G. Life cycle analysis of vehicles powered by a fuel cell and by internal combustion engine for Canada[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 155(2): 297-310.
- [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] QIAN F Y, GAO W J, YANG Y W, et al. Economic optimization and potential analysis of fuel cell vehicle-to-grid (FCV2G) system with large-scale buildings[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205: 112463.
- [15] AHMADI P, KJEANG E. Comparative life cycle assessment of hydrogen fuel cell passenger vehicles in different Canadian provinces[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(38): 12905-12917.
- [16] PEREIRA S R, COELHO M C. Life cycle analysis of hydrogen-A well-to-wheels analysis for Portugal[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(5): 2029-2038.
- [17] 孔德洋, 唐闻翀, 柳文灿, 等. 燃料电池汽车能耗、排放与经济性评估[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018,

- 46(4): 498-503.
KONG Deyang, TANG Wencong, LIU Wencan, et al. Energy consumption, emissions and economic evaluation of fuel cell vehicles[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(4): 498-503(in Chinese).
- [18] 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).
- [19] ORUC O, DINCER I. Development and performance assessment power generating systems using clean hydrogen[J]. Energy, 2021, 215: 119100.
- [20] WULF C, KALTSCHMITT M. Hydrogen supply chains for mobility—environmental and economic assessment[J]. Sustainability, 2018, 10(6): 1699.
- [21] WULF C, REUB M, GRUBE T, et al. Life cycle assessment of hydrogen transport and distribution options[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 199: 431-443.
- [22] ANDERSON R, KESHWANI D, GURU A, et al. An integrated modeling framework for crop and biofuel systems using the DSSAT and GREET models[J]. Environmental Modelling & Software, 2018, 108: 40-50.
- [23] PEREIRA L G, CAVALETT O, BONOMI A, et al. Comparison of biofuel life-cycle GHG emissions assessment tools: the case studies of ethanol produced from sugarcane, corn, and wheat[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 110: 1-12.
- [24] WEI Q S, ZHANG X, OH B S. The effect of driving cycles and H₂ production pathways on the lifecycle analysis of hydrogen fuel cell vehicle: a case study in South Korea[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(10): 7622-7633.
- [25] UGURLU A, OZTUNA S. How liquid hydrogen production methods affect emissions in liquid hydrogen powered vehicles?[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(60): 35269-35280.
- [26] 李璐伶, 樊栓狮, 陈秋雄, 等. 储氢技术研究现状及展望[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(4): 586-594.
LI Luling, FAN Shuanshi, CHEN Qiuxiong, et al. Hydrogen storage technology: current status and prospects[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(4): 586-594(in Chinese).
- [27] 黄格省, 李锦山, 魏寿祥, 等. 化石原料制氢技术发展现状与经济性分析[J]. 化工进展, 2019, 38(12): 5217-5224.
HUANG Gesheng, LI Jinshan, WEI Shouxiang, et al. Status and economic analysis of hydrogen production technology from fossil raw materials[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(12): 5217-5224(in Chinese).
- [28] GaBi. Description of the Eco-indicator 99 method[EB/OL]. [2021-01-28]. <http://www.gabi-software.com/support/gabi/gabi-lcia-documentation/eco-indicator-99>.
- [29] 金莉娜, 陆怡雅, 谢婧媛, 等. 基于GREET模型的新能源汽车全生命周期的环境与经济效益分析[J]. 资源与产业, 2019, 21(5): 1-8.
JIN Lina, LU Yiya, XIE Jingyuan, et al. Environment and economy analysis on entire life circle of new energy vehicles based on GREET model[J]. Resources & Industries, 2019, 21(5): 1-8(in Chinese).
- [30] WANG M, WU Y, ELGOWAINY A. Operating manual for GREET: version 1.7[R]. Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, 2007.
- [31] 水电水利规划设计总院. 中国可再生能源发展报告2019[R]. 北京: 水电水利规划设计总院, 2020.
- [32] 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.
- [33] 李佳蓉, 林今, 肖晋宇, 等. 面向可再生能源消纳的电化工(P2X)技术分析及其能耗水平对比[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 92-102.
LI Jiarong, LIN Jin, XIAO Jinyu, et al. Technical and energy consumption comparison of power-to-chemicals (P2X) technologies for renewable energy integration[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 92-102(in Chinese).
- [34] 中国石油经济技术研究院. 2050年世界与中国能源展望(2020年版)[R]. 北京: 中国石油经济技术研究院, 2020.
- [35] 单彤文, 宋鹏飞, 李又武, 等. 制氢、储运和加注全产业链氢气成本分析[J]. 天然气化工(C1化学与化工), 2020, 45(1): 85-90.
SHAN Tongwen, SONG Pengfei, LI Youwu, et al. Cost analysis of hydrogen from the perspective of the whole industrial chain of production, storage, transportation and refueling[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2020, 45(1): 85-90(in Chinese).

收稿日期: 2021-01-29; 修回日期: 2021-03-29。

作者简介:

余亚东(1986), 男, 博士, 副教授, 研究方向为资源-能源-环境系统分析, E-mail: yuyd@ecust.edu.cn。

高慧(1982), 女, 博士, 研究方向为能源化工, E-mail: gaohui005@cnpc.com.cn。



余亚东

郭颖(1981), 女, 博士, 研究方向为新能源发电与能源系统优化。通信作者, E-mail: guoying@csu.edu.cn。

(责任编辑 张宇)