

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

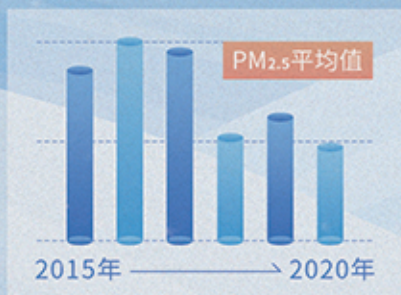
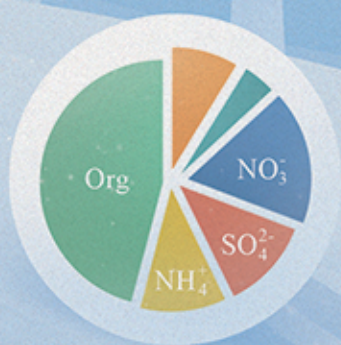
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡罗模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比

陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩*

(长安大学汽车学院, 西安 710064)

摘要: 发展氢燃料电池汽车被认为是解决能源安全和环境污染问题的理想解决方案之一, 为量化探究氢燃料电池汽车动力系统的化石能源消耗和排放情况, 运用 GaBi 软件建模, 以新能源汽车相关技术路线为参考, 构建我国氢燃料电池汽车动力系统的数据清单并对其全生命周期化石能源消耗和全球变暖潜值情况进行定量评价计算和预测分析, 对不同类型的双极板、不同能量控制策略和不同制氢方式对环境的影响分别进行了对比研究, 并对关键数据进行了不确定分析。结果表明, 预计到 2030 年我国每台氢燃料电池汽车动力系统生命周期的化石能源消耗量 (ADP_f)、全球变暖潜值 (GWP, 以 CO_2 eq 计) 和酸化潜值 (AP, 以 SO_2 eq 计) 分别为 1.35×10^5 MJ、9 108 kg 和 15.79 kg。动力系统生产制造阶段的化石能源消耗和全球变暖潜值均高于使用阶段, 主要原因是燃料电池堆栈和储氢罐的制造过程。金属双极板、石墨复合双极板和石墨双极板的制造工艺中石墨复合双极板的综合环境效益最好。能量控制策略的优化会使得氢能消耗降低, 当氢能消耗降低 22.8% 时, 动力系统的生命周期化石能源消耗和全球变暖潜值分别降低 10.4% 和 8.3%。相比于甲烷蒸气重整制氢, 基于混合电网电解水制氢的动力系统生命周期全球变暖潜值高出 53.7%, 而基于水电解水制氢降低 39.6%。降低动力系统生命周期化石能源消耗和全球变暖潜值的措施包括优化能量控制策略降低氢能消耗、规模化发展可再生能源发电电解水制氢产业和聚焦突破燃料电池堆栈关键技术实现性能提升。

关键词: 氢燃料电池汽车 (HFCV); 动力系统; 生命周期评价 (LCA); 关键参数; 化石能源消耗; 全球变暖潜值 (GWP)

中图分类号: X32 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4402-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110178

Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems

CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, FU Pei*

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

Abstract: Hydrogen fuel cell vehicles (HFCVs) are regarded as potential solutions to the problems of energy security and environmental pollution. To explore the energy consumption and pollutant emissions of fuel cell vehicle power systems, data inventories of an HFCV power system were established, and quantitative evaluation calculations and prediction analysis were carried out for fuel life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions of Chinese fuel cell vehicles in 2030 based on the technology roadmap for new energy vehicles by modeling with GaBi software. The effects of different types of bipolar plates, different energy control strategies, and different hydrogen production methods on the environment were studied, with uncertainty analysis as the key parameter. The results showed that fossil energy consumption (ADP_f), global warming potential (GWP, CO_2 equivalent), and acidification potential (AP, SO_2 equivalent) for the HFCV power system in the fuel life cycle were 1.35×10^5 MJ, 9 108 kg, and 15.79 kg, respectively. The energy consumption and greenhouse gas emissions in the production of the power system were higher than those in the use stage, mainly because of the fuel cell stack and hydrogen storage tank. In the manufacturing process of metal bipolar plates, graphite composite bipolar plates, and graphite bipolar plates, graphite composite bipolar plates had the most comprehensive environmental benefits. Optimizing the energy control strategy will reduce hydrogen energy consumption. When the hydrogen energy consumption was reduced by 22.8%, the life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions of the power system were reduced by 10.4% and 8.3%, respectively. For life cycle power systems, the use of hydrogen from electrolysis operated with water power reduced the GWP by approximately 39.6% relative to steam methane reforming. In contrast, the application of hydrogen from electrolysis operated with the Chinese electricity grid mix resulted in an increase in GWP of almost 53.7%. Measures to reduce fossil energy consumption and global warming potential in the life cycle of fuel cell vehicle powertrains include optimizing energy control strategies to reduce hydrogen energy consumption, scaling up the hydrogen production industry using water electrolysis for renewable energy power generation, and focusing on key technologies of fuel cell stacks to improve performance.

Key words: hydrogen fuel cell vehicle (HFCV); power system; life cycle assessment (LCA); key parameter; fossil energy consumption; global warming potential (GWP)

最新数据表明, 2020 年中国石油消耗对外依存度达到 73%, 能源安全问题成为我国当今亟需解决的重要问题。为应对全球气候变暖, 我国政府承诺在 2030 年前达到碳峰值, 在 2060 年前达到碳中和。氢燃料电池汽车 (hydrogen fuel cell vehicles, HFCV) 具有氢能来源广、效率高和使用过程零排放等优点, 成为解决能源安全和环境污染等诸多问题的理想方案之一。在文献[1]中明确提出, 到 2030 年, HFCV 的保有量将达到 100 万辆。这表明, HFCV 是未来的重

要发展方向。相比于传统燃油汽车和纯电动汽车, HFCV 的特别之处在于其有独特的动力系统, 动力系统包含燃料电池堆栈、储能电池、储氢罐、电机和

收稿日期: 2021-10-23; 修订日期: 2022-02-11

基金项目: 国家重点研发计划项目 (SQ2021YFE011519); 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); 陕西省交通运输厅科研项目 (21-17R)

作者简介: 陈轶嵩 (1988 ~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究新能源汽车生命周期评价技术, E-mail: chenysong_1988@163.com

* 通信作者, E-mail: peifu@chd.edu.cn

电堆辅助设备 (balance of plant, BOP)^[2,3]. 虽然 HFCV 动力系统使用阶段零排放, 但是其原材料获取和加工制造阶段会产生大量的污染物排放, 同时当使用阶段考虑氢能制备、运输和储存的化石能源消耗和排放时, HFCV 动力系统的化石能源消耗和污染物排放变得难以估计, 采用生命周期评价的方法进行科学评估就显得尤为重要.

国内外诸多学者研究了 HFCV 整车的化石能源消耗和污染物排放情况. Miotti 等^[4]的研究利用生命周期评估的方法对目前和未来轻型 HFCV 的燃料电池系统环境影响进行分析, 发现燃料电池堆栈的铂金属和储氢罐的碳纤维是燃料电池系统环境影响的重要因素. Simons 等^[5]和 Evangelisti 等^[6]的研究对质子交换膜燃料电池系统的生产和报废处理阶段进行了清单分析. Benitez 等^[7]的研究重点分析了储氢罐中碳纤维的清单数据并对 HFCV 进行了生命周期分析, 结果发现随着储氢罐环境性能的提升, 整车的气候变化降低 46%, 人类毒性降低 75%. Usai 等^[8]的研究对 HFCV 动力系统进行了生命周期评价, 结果发现随着技术的进步, 各个环境影响类别将会降低 25% ~ 70%. 国内外学者还研究了燃料电池降解^[9]、车辆热负荷^[10]、制氢碳排放因子^[11]和电力结构^[12]等因素对 HFCV 生命周期环境影响. 同时考虑到区域差异, 韩国^[13]、加拿大^[14]、德国^[15]、美国^[16]和阿根廷^[17]等区域的学者对各自区域的 HFCV 生命周期环境影响进行了研究. 国内学者对 HFCV 生命周期评价聚焦在不同氢能路径的优化和整车的生命周期评价^[18~20]. 煤气化^[21]、甲烷蒸气重整^[22]和电解水^[23]等不同的制氢方式是当前主流的氢能获取方式和当前的研究热点, Hao 等^[24]的研究利用全生命周期的方法分析了 19 种基于不同氢能路径 HFCV 的全球变暖潜值情况, 朱昊等^[25]的研究核算了 HFCV 在 4 条氢能路径下的化石能源消耗和污染物排放, 陈轶嵩等^[26]的研究基于 HFCV 燃料循环和 4 种制氢方案的全生命周期评价数学模型, 评估了 HFCV 不同制氢方案对资源、能源和环境的影响. 综上, 国内针对 HFCV 动力系统生命周期评价和预测的研究较少, 而国外对 HFCV 动力系统的研究数据不能正确评估我国的发展情况.

为正确评估和预测我国 2030 年的 HFCV 动力系统的全生命周期化石能源消耗和污染物排放情况, 本文基于文献[1]对我国 2030 年 HFCV 动力系统的性能参数做了合理的预测并构建了动力系统原材料获取和加工制造的数据清单, 在此基础上对 HFCV 动力系统建立了 GaBi 模型并利用 CML2001 评价方法进行了特征化处理, 评价结果可为 HFCV

行业政策制定和企业技术的战略规划提供量化参考依据. 此外, 本文基于动力系统生命周期评价分析结果, 对比分析了不同种类双极板、不同能量控制策略和不同制氢方式的化石能源消耗和全球变暖潜值情况, 并对关键数据进行不确定分析, 以期为推动 HFCV 动力系统绿色可持续的产业链的构建提供参考.

1 评价方法

1.1 系统边界和功能单位

生命周期评价 (life cycle assessment, LCA) 是指对一个产品的整个生命周期中所有输入、输出和潜在环境影响进行汇编和评价的过程. 汽车 LCA 分析需要按照国际 ISO 14040 进行^[27], 首先需要明确研究目的、系统边界和功能单位. 本文的研究目的是探索 2030 年我国 HFCV 动力系统生命周期各部分对资源、能源和环境排放的影响, 为企业、研究机构和政府部门决策做参考, 因此研究涵盖了 HFCV 动力系统的原材料获取阶段、制造阶段、系统装配阶段和使用阶段. 报废回收阶段本文暂未给予考虑, 本文的系统边界如图 1 所示.

功能单位是指经过量化的产品功能或绩效特征. 本文假设以 2030 年技术下的 HFCV 在中国道路行驶 20 万 km 为功能单位.

1.2 评价对象和数据来源

由于本文是针对 2030 年技术背景下的 HFCV 动力系统进行预测评价, 因此以当前技术比较成熟的丰田 Mirai 的动力系统为参考, 结合中国的实景数据, 基于文献[1]的参数预测, 对我国 2030 年燃料电池乘用车动力系统的性能参数进行了预测, 如表 1.

表 1 中国 2030 年燃料电池乘用车动力系统的性能参数假设
Table 1 Performance parameter assumption of power system of passenger fuel cell vehicles in China for 2030

参数	数值	参数	数值
最高效率/%	60	百公里氢耗量/kg·(100 km) ⁻¹	0.8
冷启动温度/℃	-40	续航里程/km	650
储氢罐压力/MPa	70	寿命/万 km	20
额定功率/kW	80		

本文的 HFCV 的各阶段所需的实景数据主要来自于文献[4~8], 部分来自于企业调研, 背景数据主要指上游数据, 来源于 GaBi9 数据库 2020 年的中国数据.

1.3 影响评价指标

影响评价是指在选定的影响指标和评价模型的基础上, 将清单分析结果转化为潜在环境影响的过

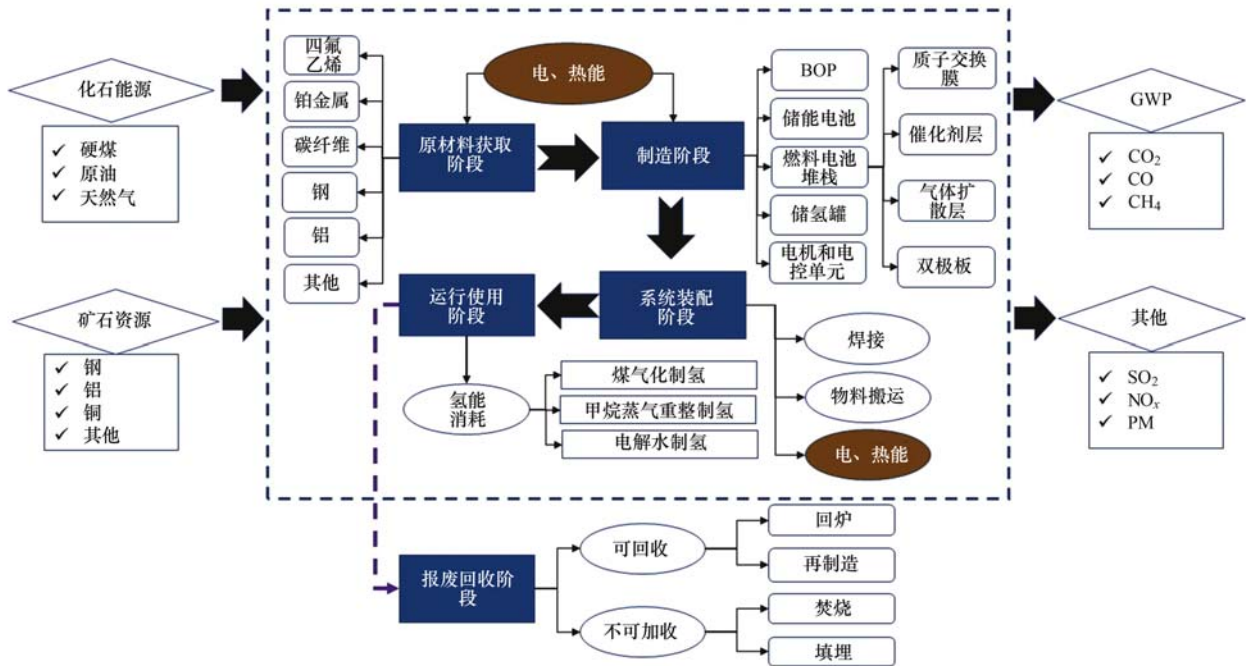


图1 氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价系统边界

Fig. 1 Life cycle assessment system boundary of hydrogen fuel cell vehicles power systems

程. 本文针对 HFCV 动力系统的特点, 选取矿产资源消耗量 (ADP_e , 以 Sb eq 计)、化石能源消耗量 (ADP_f)、全球变暖潜值 (GWP, 以 CO_2 eq 计) 和酸化潜值 (AP, 以 SO_2 eq 计) 这 4 项指标用于衡量动力系统的资源、能源消耗和对环境的影响, 单位为 kg、MJ、kg 和 kg.

2 模型构建

本文在作者科研团队前期构建的数学模型的基础上^[26,28,29], 针对 HFCV 动力系统的特点和技术趋势进行了丰富优化, 并运用德国斯图加特大学开发的 GaBi ts 软件系统平台建模, 模型所需的实景数据和背景数据来源于 GaBi 数据库、文献调研和实地调研数据. 本文的研究对象 HFCV 动力系统在美国阿岗国家重点实验室分类的基础上进行了改进, 将动力系统分为燃料电池堆栈、储能电池、电机和电控单元、BOP 和储氢罐这五大部分.

2.1 生命周期评价模型

动力系统生命周期评价模型主要包括化石能源消耗评价模型和污染物排放评价模型.

2.1.1 生命周期化石能源消耗评价模型

动力系统生命周期化石能源消耗评价包含燃料周期和材料周期.

(1) 燃料周期 首先, 构建能源生产的化石能源消耗强度矩阵:

$$E_0 = (e_{0ij})_{r \times h} \quad (1)$$

式中, e_{0ij} 表示生产单位第 i 种能源 (1 kg 氢气和 1 kW·h 电等) 所需要的第 j 种初级能源输入量 [$MJ \cdot kg^{-1}$ 和 $MJ \cdot (kW \cdot h)^{-1}$ 等], r 表示能源种类数, h 表示初级能源的种类数.

燃料周期的化石能源消耗主要包括车辆运行阶段的氢能消耗. 设 L 表示 HFCV 行驶总里程数 (km), F 表示汽车百公里氢耗量 [$kg \cdot (100 km)^{-1}$], HFCV 总质量为 m_1 , HFCV 动力系统质量为 m_2 , 则 HFCV 动力系统的燃料周期的化石能源消耗 (E_{fuel} , MJ) 为:

$$E_{fuel} = \sum_h [(m_2/m_1) \times L \times (F/100)] \cdot E_0 \quad (2)$$

(2) 材料周期 构建动力系统的质量矩阵:

$$M = (m_{ij})_{k \times n} \quad (3)$$

式中, m_{ij} 表示动力系统第 i 个组成部分所包含的第 j 种车用材料, k 表示动力系统的组成部分数量, $k = 5$, n 表示车用材料的种类数.

材料周期主要包含动力系统的材料加工、零部件制造和动力系统装配. 构建材料加工阶段的化石能源消耗强度矩阵:

$$E_1 = (e_{1ij})_{n \times h} \quad (4)$$

式中, e_{1ij} 表示生产单位第 i 种车用材料所需的第 j 种初级能源输入量 ($MJ \cdot kg^{-1}$). 车用材料加工阶段的化石能源消耗 (E_{mat} , MJ) 为:

$$\begin{aligned} E_{mat} &= \sum_k \sum_h M \cdot E_1 \\ &= \sum_k \sum_h [(m_{ij})_{k \times n} \cdot (e_{1ij})_{n \times h}] \end{aligned} \quad (5)$$

动力系统制造装配过程的化石能源消耗强度:

$$E_2 = (e_{2ij})_{k \times r} \quad (6)$$

式中, e_{2ij} 表示动力系统第 i 个组成部分制造装配过程所需的第 j 种能源量. 动力系统制造装配过程的化石能源消耗 (E_{man} , MJ) 为:

$$\begin{aligned} E_{\text{man}} &= \sum_k \sum_h E_2 \cdot E_0 \\ &= \sum_k \sum_h [(e_{2ij})_{k \times r} \cdot (e_{0ij})_{r \times h}] \end{aligned} \quad (7)$$

动力系统的生命周期化石能源消耗为燃料周期和材料周期的化石能源消耗总和, 总化石能源消耗 (E_{LCA} , MJ) 为:

$$E_{\text{LCA}} = E_{\text{fuel}} + E_{\text{mat}} + E_{\text{man}} \quad (8)$$

2.1.2 生命周期污染物排放评价模型

动力系统生命周期污染物排放评价同样包含燃料周期和材料周期.

(1) 燃料周期 构建能源生产的污染物排放强度矩阵:

$$P_0 = (p_{0ij})_{r \times s} \quad (9)$$

式中, p_{0ij} 表示生产单位第 i 种能源所排放的第 j 种污染物排放当量 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$), s 表示污染物排放当量的种类数, $s=2$, p_{0a1} 和 p_{0a2} 分别表示全球变暖潜值和酸化潜值.

动力系统燃料周期的污染物排放为:

$$\begin{aligned} [P_{\text{fuel}, \text{CO}_2}, P_{\text{fuel}, \text{SO}_2}] &= \\ [(m_2/m_1) \times L \times (F/100)] \cdot P_0 \end{aligned} \quad (10)$$

(2) 材料周期 构建材料加工阶段的污染物排放矩阵:

$$P_1 = (p_{1ij})_{n \times s} \quad (11)$$

式中, p_{1ij} 表示生产单位第 i 种车用材料所排放的第 j 种污染物排放当量. 车用材料加工阶段的污染物排放为:

$$[P_{\text{mat}, \text{CO}_2}, P_{\text{mat}, \text{SO}_2}] = \sum_k [(m_{ij})_{k \times n} \cdot (p_{1ij})_{n \times s}] \quad (12)$$

动力系统制造装配过程的污染物排放:

$$[P_{\text{man}, \text{CO}_2}, P_{\text{man}, \text{SO}_2}] = \sum_k [(e_{2ij})_{k \times r} \cdot (p_{0ij})_{r \times s}] \quad (13)$$

动力系统的生命周期污染物排放为:

$$P_{\text{LCA}, \text{CO}_2} = P_{\text{fuel}, \text{CO}_2} + P_{\text{mat}, \text{CO}_2} + P_{\text{man}, \text{CO}_2} \quad (14)$$

$$P_{\text{LCA}, \text{SO}_2} = P_{\text{fuel}, \text{SO}_2} + P_{\text{mat}, \text{SO}_2} + P_{\text{man}, \text{SO}_2} \quad (15)$$

2.2 清单分析

氢燃料电池汽车动力系统的核心部件包含燃料电池堆栈、储能电池、电机和电控单元、BOP 和储氢罐, HFCV 动力系统物料清单如表 2 所示.

2.2.1 燃料电池堆栈

燃料电池堆栈的核心零部件包括质子交换膜、催化剂层、气体扩散层和双极板等. 燃料电池堆栈的核心部件材料清单见表 2, 此清单是基于文献[6, 30]进行二次处理得到的.

质子交换膜当前主流技术为全氟磺酸型质子交换膜, 主要是由杜邦公司生产的 Nafion 系列膜^[31], 本文假设质子交换膜是由质量分数为 57.4% 的四氟乙烯和质量分数为 42.6% 的硫酸构成^[5,6]. 气体扩散层通常由多孔碳纤维基底和微孔层构成, 厚度为 200 ~ 400 μm ^[31], 本文假设气体扩散层为涂有质量分数为 10% 的聚四氟乙烯和 5% 的碳黑的碳布^[6]. 催化层通常由催化剂/载体和质子交换树脂溶液制备而成, 催化层厚度一般在 5 ~ 10 μm ^[32], 催化剂目前最常用的为 Pt/C 型催化剂, 美国能源部的 2020 年的 Pt 金属的总含量目标为 0.125 $\text{g} \cdot \text{kW}^{-1}$ ^[33], 文献[2]预计到 2020 年的铂金属负载为 0.1 $\text{g} \cdot \text{kW}^{-1}$. 参考国外先进技术指标和国内的发展趋势^[2,33], 本文假设到 2030 年的铂金属负载为 0.08 $\text{g} \cdot \text{kW}^{-1}$. 膜电极是由两层气体扩散层、两层催化剂层和一层质子交换膜构成^[34]. 双极板当前流行的为金属双极板、石墨双极板和复合双极板^[31], 文献[5]假设到 2020 年单个金属双极板的质量为 43 g, 本文假设采用压缩模压石墨复合材料.

2.2.2 储能电池

丰田第一代 Mirai 搭载的是 1.6 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 的 Ni-MH 电池, 2020 年发布的第二代 Mirai 搭载的是锂电池. 本研究的储能电池假设为 1.6 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 锂电池, 总质量为 40 kg, 具体清单参考文献[37 ~ 39].

2.2.3 BOP

燃料电池的 BOP 辅电系统包括空气压缩机和其控制器、氢气循环泵和其控制器、加湿器和散热器等结构. 文献[5]假设 BOP 是由 75% 的基础 BOP (作用于反应物和冷却) 和 25% 的辅助 BOP (电子器件) 构成的. 文献[6]假设 BOP 的质量为 35 kg. 由于国内 BOP 的清单难以获得, 这部分参考文献[5], 背景数据来源于 GaBi 数据库, 假设 BOP 的质量为 35 kg.

2.2.4 储氢罐

高压储氢罐为 IV 型瓶, 压力 70 MPa, 采用三层结构. 文献[6]假设的储氢罐的质量为 117 kg, 压力为 35 MPa, 碳纤维树脂复合环绕的 IV 型瓶, 并在敏感性分析中和铝衬垫型 III 型储氢罐进行了对比. 本文假设储氢罐质量为 75 kg, 具体清单参考文献[8].

表 2 氢燃料电池汽车动力系统物料清单¹⁾

Table 2 Material inventory of hydrogen fuel cell vehicle power systems

部件名称	组件名称	材料清单	数量	文献	部件名称	材料清单	数量	文献	
燃料电池堆栈 ²⁾	质子交换膜 (1 kg)	异丙醇	0.75 kg	[6]	BOP(1 kg)	钢	0.69 kg	[5]	
		水	0.75 kg			锻造铝	0.04 kg		
		电能	1.15 MJ			高密度聚乙烯	0.15 kg		
		热能	0.71 MJ			乙烯	0.08 kg		
		四氟乙烯	0.57 kg			橡胶	0.03 kg		
		硫酸	0.43 kg			其他	0.01 kg		
		聚乙烯	1.37 kg			铜	0.16 kg		
	气体扩散层 (1 kg)	石墨	0.05 kg	[6,30]	电机和电控 单元(1 kg)	钢	0.79 kg	[35,36]	
		聚四氟乙烯 ³⁾	0.10 kg			钎铁硼 ⁶⁾	0.01 kg		
		碳纤维 ⁴⁾	0.90 kg			铝合金	0.04 kg		
		电能	3.58 MJ			化石能源消耗 ⁷⁾	—		
	催化层 (1 kg)	Pt/C ⁵⁾	0.06 kg	[6]	储氢罐 (1 kg)	碳纤维	0.60 kg	[8]	
		碳黑	0.09 kg			环氧树脂	0.24 kg		
		Nafion DE-521	0.72 kg			泡沫	0.04 kg		
		水	0.06 kg			玻璃纤维	0.04 kg		
		甲醇	0.06 kg			高强度聚乙烯	0.07 kg		
		电能	833 MJ			铝基体	0.01 kg		
	膜电极 (1 kg)	质子交换膜	0.07 kg	[6]	储能电池 (1 kg)	磷酸铁锂	0.22 kg	[30,37~39]	
		气体扩散层	0.84 kg			聚氯乙烯	0.07 kg		
		催化层	0.09 kg			铝基体	0.41 kg		
		电能	11.70 MJ			石墨	0.10 kg		
	冷却垫片 (1 kg)	橡胶	1.00 kg	[6]		聚丙烯	0.06 kg		
		电能	0.13 MJ			聚乙烯	0.12 kg		
	端板和拉杆 (1 kg)	铝	0.50 kg	[6]		其他	0.02 kg		
		钢	0.50 kg			电能	2.67 MJ		
	双极板 (1 kg)	石墨	0.70 kg	[6]					
		醋酸乙烯酯	0.30 kg						
		电能	22.20 MJ						

1) 功能单位为 1 kg;2) 每 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 的端板和拉杆组成^[6];3) 聚四氟乙烯的清单在 GaBi 数据库中未用,用高强度聚乙烯代替;4) 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^[6];5) 生产 1 g Pt/C 需要消耗 0.6 MJ 的电能和 0.09 MJ 的热能^[6];6) 生产 1 kg 钎铁硼需要消耗 0.697 kg 的铁和 3.370 kg 的硬煤^[35];7) 电机厂的制造化石能源消耗强度(标准煤)为 1 kg·kW⁻¹,生产电机需要消耗 59% 的煤和 32% 的电能^[36]

2.2.5 电机和电控单元

电机和电控单元包括 DC/DC 转换器和动力分配控制单元等结构,电机功率为 80 kW. 电机和电控单元的原材料清单参考文献[35],本文假设电机和电控单元的质量为 50 kg.

2.2.6 制造能源消耗

本文是针对 HFCV 动力系统 2030 年的生命周期影响做预测,因此制造阶段的电能的消耗情况应该是面向 2030 年的电力结构. 本文假设中国当前和 2030 年的电力结构如表 3 所示^[40].

2.2.7 系统装配

针对 HFCV 动力系统装配阶段的数据,本文参考加州大学伯克利分校对汽车装配工业的研究,汽车装配厂的主要能源消耗来自:涂装、空气调节系统和照明、供暖、物料搬运、焊接和车间的压缩空气等工艺或设备^[41]. 由于动力系统的装配不需要涂装,具体化石能源消耗清单如表 4,其总质量为 380 kg.

表 3 中国电力结构/%

Table 3 Chinese electricity structure/%

电力来源	2021 年	2030 年
煤电	71	48
水电	15	18
核电	3	8
光伏发电	2	11
风电	4	14
其他	5	1

2.2.8 使用过程

氢燃料电池汽车动力系统的使用阶段重点考虑氢能的消耗,调研国内外研究,总结了百公里氢耗量的情况,如图 2 所示.

基于文献[1]假设我国 2030 年氢燃料电池乘用车在中国综合工况下的百公里氢耗量为 0.8 kg,整车质量为 1 850 kg. 本文的氢气生产过程来自于 GaBi 数据库,数据库中的氢能生产采用多种技术混

表 4 动力系统装配阶段的电能和热能消耗/MJ·kg⁻¹
Table 4 Electrical and thermal energy consumption of power system assembly/MJ·kg⁻¹

能源消耗类型	空气调节系统和照明	供暖	物料搬运	焊接	车间压缩空气
电能	2.18	—	0.45	0.61	0.90
热能	—	2.03	—	—	—

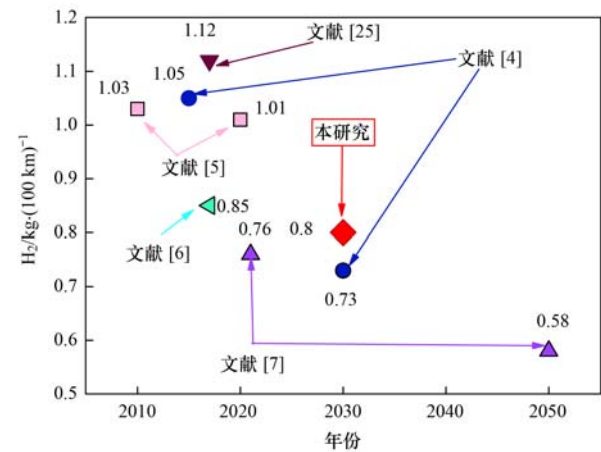


图 2 国内外百公里氢耗量对比
Fig. 2 Comparison of hydrogen consumption per 100 km at home and abroad

合的方式,包括甲烷蒸气重整、煤气化和电解水制氢等。

3 影响评价与结果解释

3.1 生命周期特征化结果

本文对 HFCV 动力系统 2030 年的生命周期评价预测运用了 GaBi 软件计算建模,并应用国际上普遍使用的 CML2001 的影响评价方法,对 ADP_e、ADP_f、GWP 和 AP 这 4 项指标进行了分析,特征化结果见表 5。

表 5 2030 年氢燃料电池汽车动力系统
生命周期环境影响特征化结果
Table 5 Characterization results of the life cycle environmental impact of power system of hydrogen fuel cell vehicles in 2030

部件	ADP _e	ADP _f	GWP	AP
燃料电池堆栈	2.70E-03	25 500	1 960	4.97
储能电池	1.47E-03	6 010	445	1.46
BOP	3.35E-03	1 510	104	0.55
储氢罐	1.57E-03	31 000	2 540	5.39
电机和电控单元	3.18E-02	4 910	335	1.80
系统装配	1.10E-04	3 090	294	0.63
燃料消耗	1.42E-04	63 400	3 430	0.99
总计	4.11E-02	135 420	9 108	15.79

由表 5 可知,2030 年 HFCV 动力系统生命周期的 ADP_e、ADP_f、GWP 和 AP 分别为 0.041 kg、1.35 × 10⁵ MJ、9 108 kg 和 15.79 kg。

3.2 化石能源消耗

燃料电池堆栈、储能电池、电机和电控单元、BOP 和储氢罐的生产制造总值记为系统生产制造值。由表 5 可计算得到,系统生产制造化石能源消耗值 ADP_f 为 68 930 MJ,此值略微高于使用阶段的燃料消耗值,主要因为燃料电池堆栈和储氢罐的制造过程消耗了大量的电能,占比分别为 37% 和 45%。由上文的清单分析可知,碳纤维和催化层的制造工艺需要消耗大量的电能,同时由于双极板在燃料电池堆栈中质量占比最高,造成了大量的化石能源消耗。因此,探索低能耗的碳纤维和双极板的制造工艺对动力系统生命周期化石能源消耗的降低显得尤为重要。

3.3 环境排放影响

由表 5 可计算得,系统生产制造全球变暖值 GWP 为 5 384 kg,此值高于使用阶段的燃料消耗产生的 GWP,燃料电池堆栈和储氢罐生产过程的高碳排放是造成动力系统生产制造阶段的较高全球变暖潜值的主要原因,占比分别为 36% 和 47%。运行使用阶段的氢能由于主要依靠化石能源制取,同样会产生较高的碳排放,探索对比不同制氢方式的全球变暖潜值,以寻求低碳排放的制氢方式对 HFCV 动力系统的生命周期全球变暖潜值的降低至关重要。

由表 5 可知,系统生产制造酸化潜值 AP 为 14.17 kg,燃料电池堆栈和储氢罐的生产产生了大量的酸化气体,其中,储氢罐的碳纤维的制造是造成酸化气体排放的主要原因。因此,改进碳纤维的制造工艺和降低其用量是降低酸化气体排放的主要途径。

4 关键参数对比与讨论

4.1 不同类型的双极板

双极板主要有金属双极板、石墨双极板和石墨复合双极板,双极板在燃料电池堆栈的质量占比最高,不同类型的双极板的制造工艺不尽相同,因此对环境的影响程度会产生差异。此部分将这 3 种不同类型的双极板进行对比研究,金属双极板的数据清单参考文献[5],石墨双极板和石墨复合双极板的数据清单参考文献[6],具体清单见表 6。

根据数据清单进行 GaBi 模型构建,并进行计算

得到不同双极板的环境影响特征化结果,见表 7. 由表 7 可知,金属双极板的矿产资源消耗最低,石墨复合双极板的化石能源消耗、全球变暖潜值和酸化潜值最低,石墨复合双极板的综合环境效益最高.

表 6 不同双极板材料清单¹⁾
Table 6 Material inventory of different bipolar plates

双极板类型	材料清单	数值
金属	铬钢	0.86 kg
	冷轧钢	0.86 kg
	二氧化钛	0.02 kg
	石墨	0.02 kg
	电能	22.20 MJ
石墨复合	石墨	0.70 kg
	醋酸乙烯酯	0.30 kg
	电能	22.20 MJ
石墨	石墨	0.83 kg
	醋酸乙烯酯	0.15 kg
	碳纤维	0.05 kg
	电能	22.20 MJ

1) 功能单位为 1 kg

基于不同双极板的燃料电池堆栈生产制造过程的化石能源消耗和全球变暖潜值情况进行了分析对比,基于金属、石墨复合和石墨双极板的燃料电池堆栈生产制造过程的化石能源消耗值分别为25 700、25 500和26 500 MJ,其全球变暖潜值分别为2 270、1 960和2 070 kg. 因此,不同双极板对燃料电池制造的化石能源消耗影响较小,对全球变暖潜值的影响差异较大. 相比于金属双极板,基于石墨复合双极板的燃料电池堆栈生产制造的全球变暖潜值降低 13.6%.

表 7 不同双极板的环境影响特征化结果¹⁾
Table 7 Characterization results of environmental impact of different bipolar plates

双极板类型	ADP _e	ADP _f	GWP	AP
金属	2.77E-06	71.6	7.07	0.015 2
石墨复合	4.20E-06	69.5	4.38	0.009 5
石墨	3.27E-06	78.2	5.28	0.011 8

1) 功能单位为 1 kg

4.2 不同能量管理策略

燃料电池动力系统具有燃料电池堆栈和锂电池双动力源,不同的能量控制策略会影响系统总的能量利用效率. 文献[42]以 ADVISOR 传统的功率跟随模式控制策略为基础,提出了基于微小变量模糊逻辑控制的燃料电池补偿动力电池放电的能量管理策略模型,输入参数为动力电池的电池荷电状态 (state of charge, SOC) 和系统满足工况行驶所需的功率 P ,优化目标为系统总的能量利用效率,运行工

况为 CYC-UDDS 工况. 微小变量模糊控制策略中分为两种情景, SOC 为 0.4 和 0.7. 本研究结果发现,在 SOC 为 0.4 和 0.7 时,微小变量模糊控制策略比传统的功率跟随模式的系统氢能消耗分别降低 6.4% 和 17.2%. 文献[43]提出一种燃料电池-锂离子电容器新型动力系统构型,设计了基于庞特里亚金极小值原理 (PMP) 的能量管理策略,考虑燃料电池余热利用对各能量源输出性能的影响,结果发现,考虑燃料电池余热的百公里氢耗量和未考虑燃料电池余热的百公里氢耗量相比,降低了 22.8%.

基于文献[42,43]的研究结果,本文进一步进行了研究,对不同能量控制策略对氢能消耗的影响设定了 4 种情景 (基础情景为传统的功率跟随控制策略),见表 8. 基于 4 种情景的 HFCV 动力系统的化石能源消耗和全球变暖潜值情况如图 3 和图 4 所示.

表 8 不同能量控制策略对应的百公里氢耗量
Table 8 Hydrogen consumption per 100 km of different energy control strategies

不同情景	百公里氢耗量 /kg·(100 km) ⁻¹	降低比例 /%
基础情景	0.8	—
模糊控制 (SOC = 0.4)	0.75	6.4
模糊控制 (SOC = 0.7)	0.66	17.2
余热利用, PMP	0.62	22.8

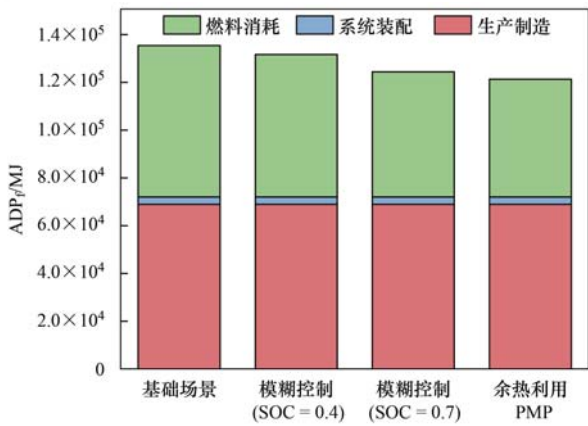


图 3 不同情景下动力系统的化石能源消耗

Fig. 3 Fossil energy consumption of power system based on different scenarios

由图 3 和图 4 知,随着百公里氢耗量的降低, HFCV 动力系统生命周期化石能源消耗逐渐降低,当氢能消耗分别降低 6.4%、17.2% 和 22.8% 时, HFCV 动力系统生命周期化石能源消耗分别降低 2.8%、8.1% 和 10.4%,其生命周期全球变暖潜值分别降低 2.3%、6.5% 和 8.3%. 研究表明,不同控制策略优化使氢能消耗降低,对动力系统的生命周期化石能源消耗和全球变暖潜值的降低效果明显.

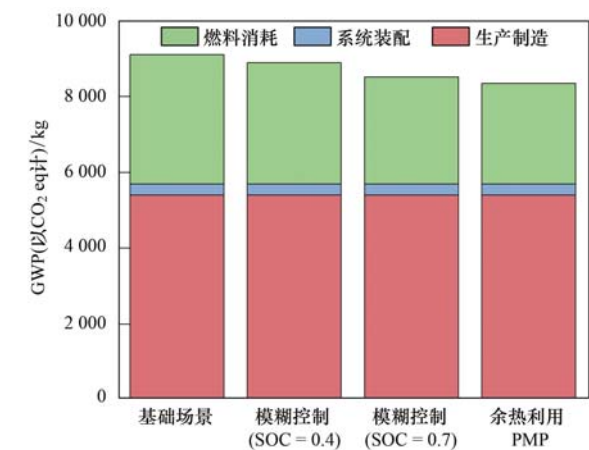


图 4 不同情景下的动力系统的全球变暖潜值
Fig. 4 Global warming potential of power system
based on different scenarios

4.3 不同制氢方式

上文得知,氢能的来源对动力系统的生命周期的全球变暖潜值有显著的影响.对煤气化、甲烷蒸气重整、混合电网电解水、风电电解水和水电电解水这5种制氢方式的全球变暖潜值进行了对比分析.不同制氢方式的碳排放因子见表9,基于不同制氢方式的动力系统的全球变暖潜值见图5.

表 9 不同制氢方式的碳排放因子
Table 9 Carbon emission factor of different
hydrogen production methods

氢能来源	碳排放因子 ¹⁾	文献
煤气化	11.30	[21,44]
甲烷蒸气重整	11.90	[21,23]
混合电网电解水 ²⁾	27.60	[26,40,45]
风电电解水	0.42	[26,40,45]
水电电解水	0.32	[26,40,45]

1)碳排放因子为生产单位质量的氢气所产生的二氧化碳的量;2)电解水制氢采用碱性电解技术,生产1 000 m³ 氢气需要消耗4 500 ~ 5 500 kW·h电能^[45],本文选取5 000 kW·h电能

由图5可知,相比于甲烷蒸气重整制氢,基于混合电网电解水制氢的动力系统生命周期全球变暖潜值高出53.7%,而基于水电电解水制氢降低39.6%.由于当前的制氢方式主要是煤气化制氢和甲烷蒸气重整,因此当前的混合制氢与煤气化制氢和甲烷蒸气重整制氢相当.未来基于可再生能源发电(水电和风电)的电解水制氢在降低动力系统全球变暖潜值方面具有很好的发展前景.

4.4 关键数据不确定分析

从上文数据清单分析可知,燃料电池堆栈、储氢罐和储能电池的整体质量具体数据难以获取,同时随着车型的不同具有较大的差异,因此其质量具有较大的不确定性.燃料电池堆栈、储氢罐和储能电池

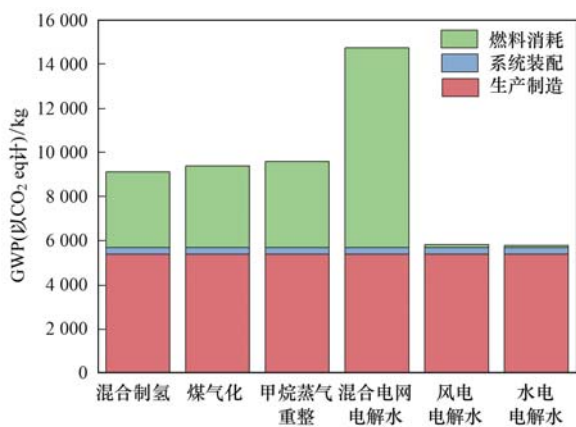


图 5 不同制氢方式下动力系统的全球变暖潜值
Fig. 5 Global warming potential of power system
on different hydrogen production methods

的质量变化对动力系统全生命周期化石能源消耗和全球变暖潜值的影响进行了敏感性分析,具体结果见图6和图7.

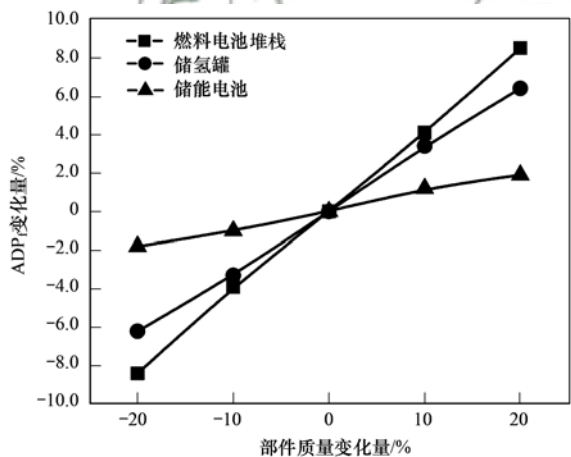


图 6 部件质量的化石能源消耗敏感性分析
Fig. 6 Fossil energy consumption sensitivity
analysis of component mass

由图6和图7的敏感分析可知,不同部件质量的变化对动力系统全生命周期的化石能源消耗和全球变暖潜值的影响存在差异,随着燃料电池堆栈、储氢罐和储能电池质量分别降低10%,动力系统全生命周期的化石能源消耗分别降低4.2%、3.2%和1.0%,动力系统全生命周期全球变暖潜值分别降低4.0%、3.6%和0.8%.

4.5 与现有研究对比

将本文的研究结果与现有的相似结果进行了对比分析,重点对比了动力系统生产制造过程的生命周期全球变暖潜值的结果,具体见表10.

由表10可知,本研究结果在 Benitez 等^[7]和 Usai 等^[8]的结果之间,总体上得到的结果和其他相似研究结果在同一数量级,说明了本研究结果具有一定的可信度.本文考虑了燃料电池堆栈、BOP、电

机和电控单元、储氢罐和储能电池,而 Miotti 等^[4]和 Usai 等^[8]研究的系统边界没有考虑储能电池、电机

和电控单元,因此本文的结果比文献[4,8]的研究结果要高一些.

表 10 不同研究结果的全球变暖潜值对比

Table 10 Global warming potential comparison of different research results

动力系统生产/kg·kW ⁻¹	燃料电池堆栈功率/kW	说明	文献
67	80	动力系统清单见上文	本研究
36	46	动力系统只考虑了燃料电池堆栈、BOP 和储氢罐	[4]
45	85	动力系统只考虑了燃料电池堆栈和 BOP	[5]
90	100	动力系统考虑了燃料电池堆栈、储氢罐、储能电池和电机	[7]
60	80	动力系统只考虑了燃料电池堆栈、BOP 和储氢罐	[8]

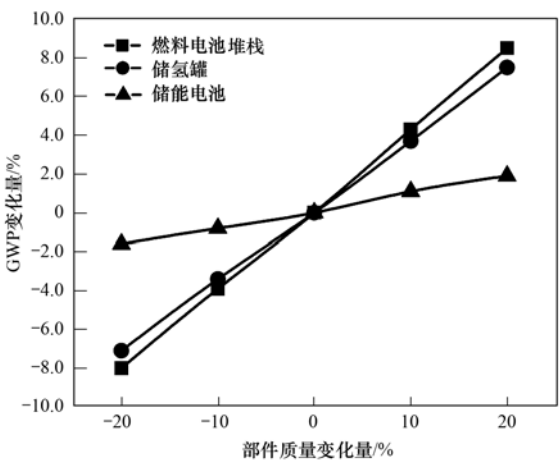


图 7 部件质量的全球变暖潜值敏感性分析
Fig. 7 Global warming potential sensitivity analysis of component mass

5 结论

(1)2030 年氢燃料电池汽车动力系统生命周期化石能源消耗量 ADP_f、全球变暖潜值 GWP 和酸化潜值 AP 分别为 1.35 × 10⁵ MJ、9 108 kg 和 15.79 kg,动力系统生产制造的化石能源消耗、全球变暖潜值和酸化气体均高于使用阶段,燃料电池堆栈和储氢罐的生产制造过程是主要的贡献者. 聚焦突破燃料电池堆栈和储氢罐关键技术,实现燃料电池堆栈和储氢罐的生产制造的化石能源消耗和排放的降低是推动氢燃料电池汽车动力系统绿色制造的重点.

(2)金属双极板、石墨复合双极板和石墨双极板的生产制造过程在化石能源消耗上差异较小,在全球变暖潜值呈现较大的差异. 相比于金属双极板,基于石墨复合双极板的燃料电池堆栈生产制造过程的全球变暖潜值降低 13.6%. 能量控制策略的优化会使得动力系统氢能的消耗量降低,当氢能消耗降低 22.8% 时,氢燃料电池汽车动力系统生命周期的化石能源消耗和全球变暖潜值分别降低 10.4% 和 8.3%. 优化能量控制策略对动力系统生命周期节能减排的环境效益显著.

(3)相比于甲烷蒸气重整制氢,基于混合电网电解水制氢的动力系统生命周期全球变暖潜值高出 53.7%,而基于水电电解水制氢降低 39.6%. 规模化发展可再生能源发电用以电解水制氢有助于氢燃料电池汽车动力系统全生命周期全球变暖潜值的降低.

参考文献:

[1] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图 2.0 [M]. 北京:机械工业出版社,2020.
China SAE. Technology roadmap for energy saving and new energy vehicles 2.0[M]. Beijing: China Machine Press, 2020.

[2] 侯明,衣宝廉. 燃料电池的关键技术[J]. 科技导报,2016, 34(6): 52-61.
Hou M, Yi B L. Fuel cell technologies for vehicle applications [J]. Science & Technology Review, 2016, 34(6): 52-61.

[3] 刘应都,郭红霞,欧阳晓平. 氢燃料电池技术发展现状及未来展望[J]. 中国工程科学,2021, 23(4): 162-171.
Liu Y D, Guo H X, Ouyang X P. Development status and future prospects of hydrogen fuel cell technology[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4): 162-171.

[4] 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.

[5] Simons A, Bauer C. A life-cycle perspective on automotive fuel cells[J]. Applied Energy, 2015, 157: 884-896.

[6] 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.

[7] Benitez A, Wulf C, de Palmaer 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, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123277.

[8] 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, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125086.

[9] Ahmadi P, Torabi S H, Afsaneh H, et al. The effects of driving patterns and PEM fuel cell degradation on the lifecycle assessment of hydrogen fuel cell vehicles [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(5): 3595-3608.

[10] Li M Y, Zhang X W, Li G J, et al. A comparative assessment of battery and fuel cell electric vehicles using a well-to-wheel analysis[J]. Energy, 2016, 94: 693-704.

- [11] Liu F Q, Zhao F Q, Liu Z W, *et al.* The impact of fuel cell vehicle deployment on road transport greenhouse gas emissions: the China case[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, **43**(50): 22604-22621.
- [12] Chen Y S, Hu X, Liu J H. 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), doi: 10.3390/en12153031.
- [13] Yoo E, Kim M, Song H H. Well-to-wheel analysis of hydrogen fuel-cell electric vehicle in Korea[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, **43**(41): 19267-19278.
- [14] 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.
- [15] Bekel K, Pauliuk S. Prospective cost and environmental impact assessment of battery and fuel cell electric vehicles in Germany[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, **24**(12): 2220-2237.
- [16] 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.
- [17] Iannuzzi L, Hilbert J A, Silva Lora E E, *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.
- [18] 林婷, 吴华, 何晓旖, 等. 中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO₂ 排放[J]. *环境科学*, 2018, **39**(8): 3946-3953.
- [19] Lin T, Wu Y, He X Y, *et al.* Well-to-wheels fossil energy consumption and CO₂ emissions of hydrogen fuel cell vehicles in China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3946-3953.
- [20] 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, 523.
- [21] Kong D Y, Tang W C, Liu W C, *et al.* Energy consumption, emissions and economic evaluation of fuel cell vehicles[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2018, **46**(4): 498-503, 523.
- [22] 陈铁嵩, 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.
- [23] Chen Y S, Ding Z S, Liu J H, *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.
- [24] 谢欣烁, 杨卫娟, 施伟, 等. 制氢技术的生命周期评价研究进展[J]. *化工进展*, 2018, **37**(6): 2147-2158.
- [25] Xie X S, Yang W J, Shi W, *et al.* Life cycle assessment of technologies for hydrogen production—a review[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2018, **37**(6): 2147-2158.
- [26] 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.
- [27] Huang G S, Li J S, Wei S X, *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.
- [28] Suleman F, Dincer I, Agelin-Chaab M. Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, **40**(21): 6976-6987.
- [29] Hao H, Mu Z X, Liu Z W, *et al.* Abating transport GHG emissions by hydrogen fuel cell vehicles: chances for the developing world[J]. *Frontiers in Energy*, 2018, **12**(3): 466-480.
- [30] 朱昊, 余卓平. 基于全生命周期评价的燃料电池汽车氢能路径分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, **45**(S1): 138-143, 151.
- [31] Zhu H, Yu Z P. Life cycle assessment of hydrogen pathways for fuel cell vehicles[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, **45**(S1): 138-143, 151.
- [32] 陈铁嵩, 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.
- [33] Chen Y S, Ding Z S, Wang W J, *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.
- [34] ISO 14040, Environmental management-life cycle assessment—principles and framework[S].
- [35] 陈铁嵩. 汽车零部件全生命周期生态效益评价研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [36] Chen Y S. A study on life cycle ecological benefits assessment of automotive parts[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [37] Bauer C, Hofer J, Althaus H J, *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.
- [38] 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.
- [39] Li S H. Life cycle assessment and environmental benefits analysis of electric vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [40] Wang Y, Ruiz Diaz D F, Chen K S, *et al.* Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells—A review[J]. *Materials Today*, 2020, **32**: 178-203.
- [41] 王诚, 王树博, 张剑波, 等. 车用质子交换膜燃料电池材料部件[J]. *化学进展*, 2015, **27**(2-3): 310-320.
- [42] Wang C, Wang S B, Zhang J B, *et al.* The key materials and components for proton exchange membrane fuel cell[J]. *Progress in Chemistry*, 2015, **27**(2-3): 310-320.
- [43] DOE. DOE hydrogen and fuel cells program record[R]. U. S: Department of Energy, 2015.
- [44] 衣宝廉. 燃料电池的原理、技术状态与展望[J]. *电池工业*, 2003, **8**(1): 16-22.
- [45] Yi B L. Fuel cell: fundamental, technology and prospect[J]. *Chinese Battery Industry*, 2003, **8**(1): 16-22.
- [46] 刘凯辉, 徐建全. 纯电动汽车驱动电机全生命周期评价[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(9): 3456-3463.
- [47] Liu K H, Xu J Q. Life cycle assessment of driving motor on electric vehicle[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(9): 3456-3463.
- [48] 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.
- [49] Zhou B Y. Life cycle assessment of energy use, carbon emissions and cost benefit of electric vehicles[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [50] 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.

- [38] 马金秋. 匹配不同动力电池的纯电动汽车全生命周期评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
Ma J Q. Life cycle assessment on a specific BEV with different power-batteries[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [39] 殷仁述, 杨沿平, 杨阳, 等. 车用钛酸锂电池生命周期评价[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(6): 2371-2381.
Yin R S, Yang Y P, Yang Y, *et al.* Life cycle assessment of the lithium titanate batteries used for electric vehicles[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(6): 2371-2381.
- [40] Wang Q, Xue M Q, Lin B L, *et al.* Well-to-wheel analysis of energy consumption, greenhouse gas and air pollutants emissions of hydrogen fuel cell vehicle in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **275**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123061.
- [41] Sullivan J L, Burnham A, Wang M. Energy-consumption and carbon-emission analysis of vehicle and component manufacturing [R]. Argonne: Argonne National Laboratory, 2010.
- [42] 王骞, 李顶根, 苗华春. 基于模糊逻辑控制的燃料电池汽车能量管理控制策略研究[J]. 汽车工程, 2019, **41**(12): 1347-1355.
Wang Q, Li D G, Miao H C. Research on energy management strategy of fuel cell vehicle based on fuzzy logic control [J]. Automotive Engineering, 2019, **41**(12): 1347-1355.
- [43] 潘越, 明平文, 杨代军, 等. 基于余热利用的燃料电池汽车能量管理策略[J]. 汽车技术, 2020, (4): 9-15.
Pan Y, Ming P W, Yang D J, *et al.* Fuel cell vehicle energy management strategies based on waste heat utilization [J]. Automobile Technology, 2020, (4): 9-15.
- [44] Cetinkaya E, Dincer I, Naterer G F. Life cycle assessment of various hydrogen production methods[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, **37**(3): 2071-2080.
- [45] 中国电动汽车百人会. 中国氢能产业发展报告 2020[R]. 北京: 中国电动汽车百人会, 2020.



CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i>	(3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i>	(3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i>	(3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i>	(3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i>	(3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i>	(3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i>	(3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i>	(3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i>	(3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i>	(3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i>	(3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i>	(4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i>	(4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i>	(4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i>	(4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i>	(4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i>	(4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i>	(4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i>	(4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i>	(4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i>	(4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i>	(4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i>	(4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i>	(4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shay County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i>	(4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i>	(4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i>	(4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i>	(4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i>	(4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i>	(4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i>	(4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i>	(4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i>	(4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i>	(4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i>	(4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i>	(4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i>	(4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i>	(4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i>	(4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i>	(4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i>	(4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i>	(4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qi, ZHANG Yun, <i>et al.</i>	(4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i>	(4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i>	(4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i>	(4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i>	(4402)