

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响	胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019~2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析	王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	郑镇森, 姜建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015~2020 年中国城市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染时空演变特征	牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015~2021 年京津冀及周边地区 PM _{2.5} 和臭氧复合污染时空特征分析	宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000~2020 年中国典型经济区 PM _{2.5} 时空变化及其与植被景观格局的关系	徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析	赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征	刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季 PM _{2.5} 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势	罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征	王红磊, 刘思略, 孙杰娟, 刘煥武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季 PM _{2.5} 组分特征及来源解析	谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高分辨率网格的郑州市城镇居民 PM _{2.5} 暴露浓度与健康风险变化评估	李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单	刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析	陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势	张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析	贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O ₃ 生成特征	俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应	李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估	俞珊, 张双, 张增杰, 翟艳芝, 刘桐坤 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO ₂ 排放模拟	马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源水质变化趋势及风险分析	卓海华, 姜保峰, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价	李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析	吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子	谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估	李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价	张静, 胡愈圻, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用	纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素	张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑烟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响	何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
毫清河水体细菌群落的结构和分布特征	王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (<i>Sinularia microclavata</i>) 共生细菌群落结构和功能的影响	刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价	严棋 (2136)
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性	刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布	刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估	辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别	张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析	马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估	黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量	马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估	赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险	邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测	戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析	王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析	刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征	刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响	江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应	杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔箭筈锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响	王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)
菌渣与化肥肥施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响	耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响	胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 魏利祥, 曹帅 (2348)
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响	储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价	付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征	薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展	胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望	李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910)	《环境科学》征稿简则(1984)
信息(2167, 2191, 2324)	

面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价

付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩*

(长安大学汽车学院, 西安 710064)

摘要: 发展节能与新能源汽车是降低交通运输行业碳排放的重要技术路径。为量化预测节能与新能源汽车的全生命周期碳排放, 利用全生命周期评价方法, 以汽车相关技术路线和政策为参考, 选取燃油经济性、整车轻量化水平、电力结构碳排放因子和氢能碳排放因子为关键参数, 构建传统燃油汽车(ICEV)、轻度混合动力汽车(MHEV)、重度混合动力汽车(HEV)、纯电动汽车(BEV)和燃料电池汽车(FCV)的数据清单并对其全生命周期碳排放进行量化预测评价, 对电力结构碳排放因子和不同制氢方式碳排放因子进行了敏感性分析和讨论。结果发现, 2022 年 ICEV、MHEV、HEV、BEV 和 FCV 的全生命周期碳排放量(以 $\text{CO}_2\text{-eq}$ 计)分别为 208.0、195.5、150.0、113.5 和 205.0 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ 。到 2035 年, BEV 和 FCV 相比于 ICEV 具有较为显著的减碳效益, 分别降低 69.1% 和 49.3%。电力结构的碳排放因子对 BEV 的全生命周期碳排放的影响最显著。关于燃料电池汽车的不同制氢方式, 短期应以工业副产氢提纯为主供应 FCV 氢能需求, 长期以可再生能源电解水制氢和化石能源制氢结合碳捕获、利用和封存技术来满足 FCV 氢能需求, 最终实现 FCV 全生命周期减碳效益的显著提高。

关键词: 节能与新能源汽车; 全生命周期评价(LCA); 碳排放; 电力结构; 不同制氢方式

中图分类号: X32 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-2365-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202208236

Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035

FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, HAO Zhuo, XING Yun-xiang, CAI Xu, ZHANG Chun-mei, CHEN Yi-song*

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

Abstract: The development of energy saving and new energy vehicles is an important technology path to reduce carbon emissions for the transportation industry. To quantitatively predict the life cycle carbon emissions of energy saving and new energy vehicles, this study used the life cycle assessment method and selected the fuel economy level, lightweight level, carbon emission factor of electricity structure, and carbon emission factor of hydrogen production as key performance parameters to establish inventories of internal combustion engine vehicles (ICEV), mild hybrid electrical vehicles (MHEV), heavy hybrid electrical vehicles (HEV), battery electrical vehicles (BEV), and fuel cell vehicles (FCV) based on automotive-related policy and technical routes. The sensitivity of carbon emission factors of electricity structure and different hydrogen production methods were analyzed and discussed. The results showed that the current life cycle carbon emissions (CO_2 equivalent) of ICEV, MHEV, HEV, BEV, and FCV were 207.8, 195.2, 149.9, 113.3, and 204.7 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$, respectively. By 2035, BEV and FCV were predicted to have a significant reduction of 69.1% and 49.3%, respectively, compared with ICEV. The carbon emission factor of electricity structure had the most significant influence on BEV life cycle carbon emissions. In terms of different hydrogen production methods of FCV, hydrogen demand should be mainly supplied by industrial hydrogen by-product purification in the short-term future, whereas hydrogen energy production by water electrolysis and hydrogen production from fossil energy combined with carbon capture, utilization, and storage technology should be used to meet the hydrogen demand of FCV in the long-term future, so as to achieve a significant improvement in the life cycle carbon reduction benefits of FCV.

Key words: energy saving and new energy vehicles; life cycle assessment(LCA); carbon emission; electricity structure; different hydrogen production methods

根据国际能源署(international energy agency, IEA)数据显示, 2020 年我国二氧化碳排放量为 98.94 亿 t, 约占全球的二氧化碳排放量的 30.9%, 其中道路交通运输行业及其相关的石油行业、电力行业是碳排放的重要来源。为应对全球变暖问题, 我国政府承诺力争到 2030 年前达到碳达峰, 到 2060 年前实现碳中和。面向碳中和愿景, 2020 年 10 月, 国务院发布的《新能源汽车产业发展规划(2021—2035 年)》中提出, 到 2025 年实现新能源汽车新车销售量达到汽车新车销售总量 20% 左右的发展愿景; 2021 年 10 月, 国务院印发的《关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知》明确到 2030 年, 当年新增新能源和清洁能源动力的交通运输工具比例应达到 40% 左右。新能源汽车迎来

了暴发式增长, 2021 年我国国内新能源汽车销量达到 298.9 万辆, 同比增长 169.1%。纯电动汽车(battery electrical vehicles, BEV)和燃料电池汽车(fuel cell vehicles, FCV)在使用过程具有零排放的优势, 但在考虑原材料获取和整车制造时, BEV 和 FCV 是否相比于传统燃油汽车(internal combustion engine vehicles, ICEV)具有减碳效益是一个值得研究的课题, 全生命周期评价方法(life cycle assessment, LCA)可以系统地解决这个科学问题。

收稿日期: 2022-08-25; 修订日期: 2022-11-14

基金项目: 长安大学研究生科研创新实践项目(300103722025); 国家重点研发计划项目(SQ2021YFE0192900)

作者简介: 付佩(1994~), 女, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为燃料电池机制与新能源汽车全生命周期评价, E-mail: peifu@chd.edu.cn

* 通信作者, E-mail: chenysisong.1988@163.com

同时,随着核心技术的不断迭代和技术创新要素持续提质增效,汽车的节能水平、轻量化水平和电力结构的清洁度等不断提高,面向未来关键参数变化以实现量化预测汽车全生命周期的碳排放评估具有重要研究意义。

国内外学者研究了新能源汽车全生命周期碳排放情况.关于 BEV 整车全生命周期评价,Qiao 等^[1]的研究从不同组件、材料和能源消耗这 3 个方面比较了中国 BEV 和 ICEV 生产制造过程的全生命周期碳排放,生产 BEV 的全生命周期碳排放量(以 CO₂-eq 计)为 15.0 ~ 15.2 t,比 ICEV 高 50%;Wu 等^[2]的研究发现,电力结构的优化和热电联产规模扩大可以使 2020 年的 BEV 相比于 ICEV 的全生命周期碳排放降低 13.4%;有研究发现^[3~5],BEV 的全生命周期碳排放均低于 ICEV,但 BEV 引起的淡水富营养化、人体毒性和酸化等的影响高于 ICEV.关于 BEV 的动力蓄电池全生命周期碳排放评价,不同学者基于实景数据对磷酸铁锂电池、锰酸锂电池和三元锂电池进行了对比评价^[6~12].关于 FCV 全生命周期评价碳排放,不同学者在重点考虑不同氢能路径^[13~17]、车辆热负荷变化^[18]、储氢罐碳纤维制造^[19]、燃料电池衰退^[20]、未来汽车销量^[21]和燃料电池功率密度^[22]等关键因素下进行了量化评价.关于混合动力汽车(hybrid electrical vehicles, HEV)全生命周期评价,Andersson 等^[23]、Yang 等^[24]和 Yuksel 等^[25]的研究在考虑电力结构、行驶工况和不同生物燃料等影响因素下发现,插电式混合动力汽车和 HEV 的全生命周期碳排放低于 ICEV,但

PM_{2.5}和 SO₂ 排放比 ICEV 高。

国内外不同学者针对新能源汽车全生命周期碳排放评价,在数据清单构建、技术路线设计和评价模型搭建上进行了一定的研究^[26].但是,国外的数据不符合我国汽车产业的发展国情和未来趋势,同时,2022 年国内能源革命、智能革命和互联网革命为汽车技术创新发展注入强大动能,培育和促进汽车技术快速迭代发展.汽车技术参数正不断进步,如何准确核算技术进步下的节能与新能源汽车的全生命周期碳排放是我国汽车行业共同面临的迫切需求.为解决这一问题,通过文献调研、实地调研和数据库调研构建符合我国汽车产业发展现状的数据清单,同时,基于《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》和汽车相关产业政策^[27],对汽车燃油经济性、轻量化水平、电力结构碳排放因子和氢能碳排放因子等关键技术参数进行合理预测,量化预测 ICEV、轻度混合动力汽车(mild hybrid electrical vehicles, MHEV)、HEV、BEV 和 FCV 的全生命周期碳排放,对电力结构碳排放因子和不同氢能制氢方式的碳排放因子进行了敏感性分析和讨论,旨在为企业和政府制定战略决策提供参考,并为汽车行业的碳交易提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 评价对象

根据中国市场的销量情况,选取国内典型的车型(ICEV、MHEV、HEV、BEV 和 FCV)进行全生命周期碳排放评价,典型车型的具体参数见表 1。

表 1 典型车型的具体参数

Table 1 Parameters of typical vehicle types

参数	ICEV	MHEV	HEV	BEV	FCV
整备质量/kg	1 490	1 530	1 650	1 650	1 850
发动机排量/L	1.5	1.5	2.5	— ¹⁾	—
动力蓄电池容量/kW·h	—	0.8	—	57	1.6
发动机功率/kW	115	115	131	—	—
电动机功率/kW	—	11.5	88	100	113
百公里油耗/L·(100 km) ⁻¹	6.6	6.1	4.38	—	—
百公里电耗/kW·h·(100 km) ⁻¹	—	—	—	12.3	—
百公里氢耗/kg·(100 km) ⁻¹	—	—	—	—	1.1
电池类型	铅酸蓄电池	48 V 蓄电池	镍氢蓄电池	磷酸铁锂电池	磷酸铁锂电池

1) “—”表示该车型不存在对应的参数

1.2 系统边界和功能单位

全生命周期评价(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.基于 ISO 14040 国际标准^[28],目标和范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释是全生命周期评价的 4 个步骤.本文的研究目的是

对我国 2022 年和未来节能与新能源汽车全生命周期碳排放评价及关键参数的对比分析,为企业和政府提供战略决策参考.将整车的全生命周期划分为动力系统和其他部件的生产、整车装配、运行使用和报废回收这 4 个阶段,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

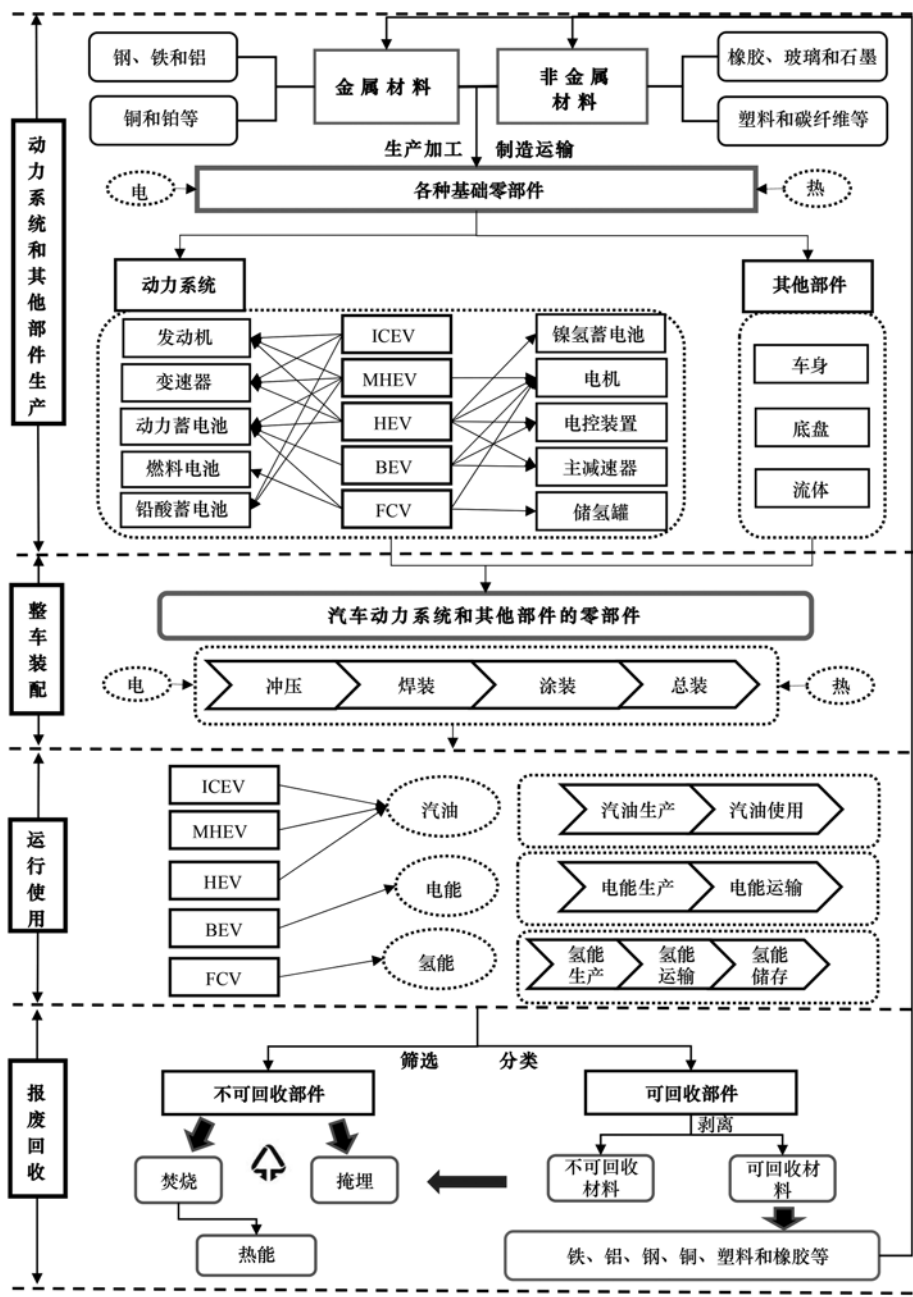


图 1 系统边界

Fig. 1 System boundary

征^[29]. 假设不同动力汽车在中国道路行驶 20 万 km 为功能单位. 同时,不同动力汽车的全生命周期碳排放的结果的功能单位(以 CO₂-eq 计)为 g·km⁻¹.

1.3 评价模型

本作者科研团队在前期积累模型和参考其他学者构建模型的基础上^[14,30~35],搭建 ICEV、MHEV、HEV、BEV 和 FCV 的全生命周期碳排放评价模型,模型总共包含整车生产、整车装配、运行使用和报废回收碳排放评价模型.

$$P_{LCA}\text{-CO}_2 = P_1\text{-CO}_2 + P_2\text{-CO}_2 + P_3\text{-CO}_2 + P_4\text{-CO}_2$$

(1)

式中, $P_1\text{-CO}_2$ 表示整车生产阶段碳排放量, $P_2\text{-CO}_2$

表示整车装配阶段碳排放量, $P_3\text{-CO}_2$ 表示运行使用阶段碳排放量, $P_4\text{-CO}_2$ 表示报废回收阶段碳排放量.

1.3.1 整车生产阶段碳排放评价模型

整车生产阶段碳排放的评价模型为:

$$P_1\text{-CO}_2 = \sum_k [(m_{ij})_{k \times n} \cdot (p_{0ij})_{n \times 1}] + \sum_k [(e_{1ij})_{k \times r} \cdot (p_{1ij})_{r \times 1}] \quad (2)$$

式中, m_{ij} 表示整车第 i 个部件所包含的第 j 种车用材料质量(kg), k 表示整车的部件数量, n 表示车用材料的种类数; p_{0ij} 表示生产单位质量第 i 种车用材料的碳排放当量(kg·kg⁻¹), e_{1ij} 表示汽车第 i 个部件

制造过程所需的第 j 种能源量 (MJ), p_{ij} 表示生产单位第 i 种能源所排放的第 j 种污染物排放量 ($\text{kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$), r 表示能源的种类数. 此阶段会涉及到一些车用材料, 如钢、铸铁、铝、铜和橡胶等. 根据 GaBi 数据库, 生产 1 kg 的钢的碳排放量为 2.41 kg, 生产 1 kg 的铝的碳排放量为 20.7 kg, 生产 1 kg 的铸铁的碳排放量为 2.38 kg, 生产 1 kg 的铜的碳排放量为 4.76 kg, 生产 1 kg 的橡胶的碳排放量为 2.96 kg.

1.3.2 整车装配阶段碳排放评价模型

整车装配阶段的碳排放评价模型为:

$$P_2\text{-CO}_2 = (e_{2j})_{1 \times r} \cdot (p_{1ij})_{r \times 1} \quad (3)$$

式中, e_{2j} 表示汽车整车装配过程中所需要的第 j 种能源量 (MJ). 此阶段主要的能量消耗为电能和热能, 根据《中国电力行业年度发展报告 2021》发布数据测算得知, 2022 年电力结构的碳排放强度为 $0.565 \text{ kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$. 根据 GaBi 数据库, 热能的碳排放强度为 $0.102 \text{ kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$.

1.3.3 运行使用阶段碳排放评价模型

对于 ICEV、MHEV 和 HEV, 汽车使用过程的主要消耗为汽油. 设汽车的百公里燃油消耗量为 $Q_1 [\text{L} \cdot (100 \text{ km})^{-1}]$, 全生命周期的行驶里程为 $s (\text{km})$, 汽油生产的碳排放因子为 $C_1 (\text{kg} \cdot \text{L}^{-1})$, 汽油使用燃烧的碳排放因子为 $C_2 (\text{kg} \cdot \text{L}^{-1})$. 燃料加工生产的排放利用 GaBi 数据库数值, $C_1 = 0.396 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$, 燃料燃烧过程的排放参考了 GB 27999-2019 中 CO_2 转换系数为 $C_2 = 2.37 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$. ICEV、MHEV 和 HEV 的运行使用阶段碳排放为:

$$P_3^{\text{I}}\text{-CO}_2 = Q_1 \times s/100 \times (C_1 + C_2) \quad (4)$$

对于 BEV, 汽车使用过程中主要消耗电能. 假

设汽车的百公里耗电量为 $Q_2 [\text{kW} \cdot \text{h} \cdot (100 \text{ km})^{-1}]$, 2022 年电力结构的碳排放强度为 $C_3 [\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$, 汽车充电的效率为 η . 根据《中国电力行业年度发展报告 2021》发布数据测算得知, 2022 年 $C_3 = 0.565 \text{ kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$. 本文假设 $\eta = 0.95$, BEV 运行使用阶段的碳排放为:

$$P_3^{\text{II}}\text{-CO}_2 = Q_2 \times s/100 \times C_3/\eta \quad (5)$$

对于 FCV, 汽车使用过程中主要消耗氢能. 假设汽车百公里氢能消耗量为 $Q_3 [\text{kg} \cdot (100 \text{ km})^{-1}]$, 2022 年氢能的碳排放强度为 $C_4 (\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1})$. 根据《中国氢能产业发展报告 2020》和 GaBi 数据库数据测算^[36], 2022 年 $C_4 = 13.9 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$. FCV 的运行使用阶段的碳排放为:

$$P_3^{\text{III}}\text{-CO}_2 = Q_3 \times s/100 \times C_4 \quad (6)$$

1.3.4 报废回收阶段碳排放评价模型

由于缺乏报废回收过程中拆解和粉碎等工艺的能耗和排放数据, 所以本研究主要考虑金属部件的钢、铸铁、铝和铜这 4 种金属的回收利用^[37-39]. 设钢、铸铁、铝和铜金属的回收率分别为 ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 和 ξ_4 . 汽车报废回收阶段的碳排放为:

$$P_4\text{-CO}_2 = \sum_k (m_{ij} \cdot \xi_j)_{k \times 4} \times [(e_{3ij})_{4 \times r} \cdot (p_{1ij})_{r \times 1} - (p_{0ij})_{4 \times 1}] \quad (7)$$

式中, e_{3ij} 表示回收单位金属 i 过程中所需的第 j 种能源量 ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$).

1.4 清单分析

5 款典型汽车的部件质量占比见表 2, 发动机和不同蓄电池的材料质量占比见表 3, 其他部件材料质量占比见表 4, 各部件的制造能耗量见表 5.

表 2 5 款典型汽车的部件质量占比^{[27,29,40,41]/%}

Table 2 Component mass proportion of five typical vehicles/%

组成	部件	ICEV	MHEV	HEV	BEV	FCV
动力系统	发动机	10.1	9.8	8.8	— ¹⁾	—
	变速器	8.4	8.2	6.1	—	—
	动力蓄电池	—	0.7	—	21.8	2.2
	燃料电池	—	—	—	—	15.8
	镍氢蓄电池	—	—	1.2	—	—
	铅酸蓄电池	1.3	1.2	—	—	—
	电机	—	1.0	2.7	2.1	2.7
	电控装置	—	—	0.6	0.6	—
	主减速器	—	—	3.1	2.1	—
	储氢罐	—	—	—	—	4.1
其他部件	车身	42.0	40.9	42.0	41.8	42.2
	底盘	36.3	36.3	33.8	29.8	31.5
	流体	1.9	1.9	1.7	1.8	1.5

1) “—”表示该车型不存在对应的部件

表 3 发动机和不同蓄电池的材料质量占比^{[1,29,40,42] /%}

Table 3 Material mass proportion of engines and different batteries/%									
磷酸铁锂电池	占比	铅酸蓄电池	占比	镍氢蓄电池	占比	燃料电池	占比	储氢罐	占比
活性材料	22.4	铅	69.0	镍	28.2	质子交换膜	0.8	碳纤维	60.0
石墨	15.2	硫酸	7.9	钢	23.7	气体扩散层	9.8	环氧树脂	24.0
铝	20.3	聚丙烯	6.1	塑料	22.5	催化层	1.1	泡沫	4.0
聚偏氟乙烯	2.1	玻璃纤维	2.1	铸铁	12.0	冷却垫片	11.5	玻璃纤维	4.0
铜	12.4	水	14.1	铜	3.9	端板	13.4	高强度聚乙烯	7.0
电解液	18.3	其他	0.8	其他	9.7	双极板	63.4	铝	1.0
聚丙烯	3.2	— ¹⁾	—	—	—	—	—	—	—
其他	6.1	—	—	—	—	—	—	—	—

1) “—”表示该发动机或蓄电池不存在对应的材料

表 4 其他部件材料质量占比^{[41~43] /%}

Table 4 Material mass proportion of other components/%						
材料	变速器	车身	底盘	电机	电控装置	主减速器
钢	30.0	68.7	82.3	31.5	5.0	60.6
铝	30.0	0.8	1.0	39.5	47.5	20.0
铸铁	30.0	— ¹⁾	6.3	—	—	—
铜	—	1.9	2.3	15.8	8.3	19.0
橡胶	5.0	—	4.2	—	3.8	—
塑料	5.0	17.4	3.3	—	23.0	0.2
钕铁硼	—	—	—	13.2	—	—
其他	—	11.1	0.6	—	12.4	0.2

1) “—”表示该部件不存在对应的材料

表 5 各部件的制造能耗量^{[40~43] /MJ·kg⁻¹}

Table 5 Manufacturing energy consumption of different components/MJ·kg ⁻¹					
部件	电能	热能	部件	电能	热能
磷酸铁锂电池	27.00	8.80	变速器	17.97	10.70
铅酸蓄电池	2.72	— ¹⁾	车身	3.43	—
镍氢蓄电池	5.48	3.64	底盘	1.39	0.43
燃料电池	23.60	—	电机	5.28	1.90
储氢罐	141.52	53.22	电控装置	1.38	—
发动机	11.02	—	主减速器	18.00	10.07

1) “—”表示该部件不存在对应的制造能耗

1.5 预测情景构建

综合《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》和关键技术的发展趋势,本文选取汽车的燃油经济性、整车轻量化水平、电力结构碳排放因子和氢能碳排放因子这 4 个关键因素进行预测分析. 根据《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》中的节能汽车总体技术路线可知,到 2035 年,在综合工况下 ICEV、MHEV 和 HEV 的燃油经济性分别降低到 5.3、4.5 和 3.3 L·(100 km)⁻¹; 根据纯电动汽车技术路线可知,到 2035 年,普及性 BEV 的综合工况下的电耗小于 10 kW·h·(100 km)⁻¹; 根据燃料电池乘用车技术路线图可知,到 2035 年,FCV 的综合工况下的氢耗约为 0.8 kg·(100 km)⁻¹; 根据乘用车轻量化技术路线可知,到 2035 年,ICEV、MHEV 和 BEV 的轻量化系数降低 25%,BEV 和 FCV 的整车轻量化系数降低 35%.

发动机效率的提高、动力蓄电池能量密度的提高、可再生能源在能源结构中占比的不断提高和铝合金材料使用量的提高等汽车关键性能参数的提高影响着汽车全生命周期碳排放量^[27]. 为量化预测 ICEV、MHEV、HEV、BEV 和 FCV 的全生命周期碳排放趋势变化,本文构建面向 2025、2030 和 2035 年的关键参数预测情景,见表 6.

2 结果与讨论

2.1 影响评价和结果

根据 ICEV、MHEV、HEV、BEV 和 FCV 清单数据,并基于本文构建的汽车全生命周期碳排放评价模型,在 GaBi 中搭建数学评价模型并进行运算,得到 ICEV、MHEV、HEV、BEV 和 FCV 的全生命周期碳排放量,见表 7. 从中可知,2022 年 ICEV、MHEV、HEV、BEV 和 FCV 的全生命周期碳排放量分别为

表 6 面向 2025、2030 和 2035 年的关键参数预测情景^[13,27,36]

Table 6 Key parameters prediction scenario for 2025, 2030, and 2035

车型	参数	2022 年	2025 年	2030 年	2035 年	说明
ICEV	燃油经济性/L·(100 km) ⁻¹	6.6	6.2	5.7	5.3	① 2022 年的数据是基于 2022 年发展现状的数据; ② ICEV、MHEV 和 HEV 的 2025、2030 和 2035 年整备质量相比于 2022 年的分别降低 10%、18% 和 25%, BEV 和 FCV 的 2025、2030 和 2035 年的整备质量相比于 2022 年的分别降低 15%、25% 和 35%; ③ 电力碳排放因子参考《中国 2030 年能源电力发展规划研究及 2060 年展望》的数据; ④ 氢能碳排放因子参考《中国氢能产业发展报告 2020》数据
	整备质量/kg	1 490	1 341	1 222	1 118	
MHEV	燃油经济性/L·(100 km) ⁻¹	6.1	5.4	4.9	4.5	
	整备质量/kg	1 530	1 377	1 255	1 148	
HEV	燃油经济性/L·(100 km) ⁻¹	4.38	4.1	3.6	3.3	
	整备质量/kg	1 650	1 485	1 353	1 238	
BEV	燃料经济性/kW·h·(100 km) ⁻¹	12.3	11	10.5	10	
	整备质量/kg	1 650	1 403	1 238	1 073	
	电力碳排放因子/kg·(kW·h) ⁻¹	0.565	0.51	0.32	0.3	
FCV	燃料经济性/kg·(100 km) ⁻¹	1.1	1.0	0.9	0.8	
	整备质量/kg	1 850	1 573	1 388	1 203	
	氢能碳排放因子/kg·kg ⁻¹	13.9	11.5	9	6.5	

4.16×10^4 、 3.91×10^4 、 3.00×10^4 、 2.27×10^4 和 4.10×10^4 kg. 轻度混合汽车和重度混合汽车相比于传统燃油汽车具有减碳效益, 分别降低 6.0% 和 27.9%; 纯电动汽车相比于传统燃油汽车碳排放降低 45.4%, 效益最明显; 燃料电池汽车相比于传统燃油汽车的减碳效益不明显, 主要原因是氢能获取过程的高碳排放. 随着车辆燃油经济性的提高、车辆轻量化水平的提高、电力结构的清洁和氢能获取

过程的清洁, ICEV、MHEV、HEV、BEV 和 FCV 在 2025 年全生命周期碳排放分别降低 7.2%、12.3%、8.3%、19.8% 和 23.2%, 在 2030 年分别降低 17.1%、22.8%、22.7%、49.3% 和 43.9%, 在 2035 年分别降低 23.1%、29.4%、29.3%、55.9% 和 60.5%. 到 2035 年, BEV 和 FCV 相比于 ICEV 具有较为显著的减碳效益, 分别降低 68.8% 和 49.4%.

表 7 ICEV、MHEV、HEV、BEV 和 FCV 的全生命周期碳排放量/kg

Table 7 Life cycle carbon emission results of ICEV, MHEV, HEV, BEV, and FCV/kg

车型	年份	动力系统生产	其他部件生产	整车装配	燃料生产	燃料使用	报废回收	总计
ICEV	2022	3.25E+03	3.61E+03	1.91E+03	5.44E+03	3.20E+04	-4.66E+03	4.16E+04
	2025	2.87E+03	3.18E+03	1.58E+03	5.11E+03	3.01E+04	-4.22E+03	3.86E+04
	2030	2.43E+03	2.65E+03	9.99E+02	4.70E+03	2.76E+04	-3.92E+03	3.45E+04
	2035	2.21E+03	2.40E+03	8.71E+02	4.37E+03	2.57E+04	-3.59E+03	3.20E+04
MHEV	2022	3.59E+03	3.66E+03	1.96E+03	5.03E+03	2.96E+04	-4.77E+03	3.91E+04
	2025	3.17E+03	3.21E+03	1.62E+03	4.45E+03	2.62E+04	-4.32E+03	3.43E+04
	2030	2.68E+03	2.69E+03	1.03E+03	4.04E+03	2.38E+04	-4.02E+03	3.02E+04
	2035	2.44E+03	2.43E+03	8.94E+02	3.71E+03	2.18E+04	-3.69E+03	2.76E+04
HEV	2022	4.02E+03	3.84E+03	2.12E+03	3.61E+03	2.12E+04	-4.85E+03	3.00E+04
	2025	3.55E+03	3.38E+03	1.75E+03	3.38E+03	1.99E+04	-4.41E+03	2.75E+04
	2030	3.02E+03	2.82E+03	1.11E+03	2.97E+03	1.75E+04	-4.15E+03	2.32E+04
	2035	2.74E+03	2.56E+03	9.64E+02	2.72E+03	1.60E+04	-3.81E+03	2.12E+04
BEV	2022	6.96E+03	3.64E+03	2.12E+03	1.46E+04	0.00E+00	-4.70E+03	2.27E+04
	2025	5.78E+03	3.02E+03	1.65E+03	1.18E+04	0.00E+00	-4.05E+03	1.82E+04
	2030	4.68E+03	2.44E+03	1.01E+03	7.07E+03	0.00E+00	-3.74E+03	1.15E+04
	2035	4.02E+03	2.10E+03	8.36E+02	6.32E+03	0.00E+00	-3.25E+03	1.00E+04
FCV	2022	6.27E+03	4.15E+03	2.38E+03	3.06E+04	0.00E+00	-2.44E+03	4.09E+04
	2025	5.05E+03	3.49E+03	1.96E+03	2.30E+04	0.00E+00	-2.04E+03	3.15E+04
	2030	3.62E+03	3.08E+03	1.73E+03	1.62E+04	0.00E+00	-1.67E+03	2.30E+04
	2035	3.06E+03	2.67E+03	1.50E+03	1.04E+04	0.00E+00	-1.44E+03	1.62E+04

以 $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$ 为功能单位, 5 款汽车的全生命周期碳排放量如图 2 所示. 从中可知, 2022 年 ICEV、MHEV、HEV、BEV 和 FCV 的全生命周期碳排放量分别为 208.0、195.5、150.0、113.5 和 205.0 $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$. 同时发现, 汽油的使用是 ICEV、MHEV 和 HEV 的全生命周期碳排放的主要来源, 电能的生产

和氢能的生产分别是 BEV 和 FCV 的全生命周期碳排放的主要来源, BEV 和 FCV 的动力系统生产的碳排放高于 ICEV, 汽车报废回收对于降低碳排放具有正效益.

2.2 敏感性分析

上文分析可知, 电能的生产 and 氢能的生产是影

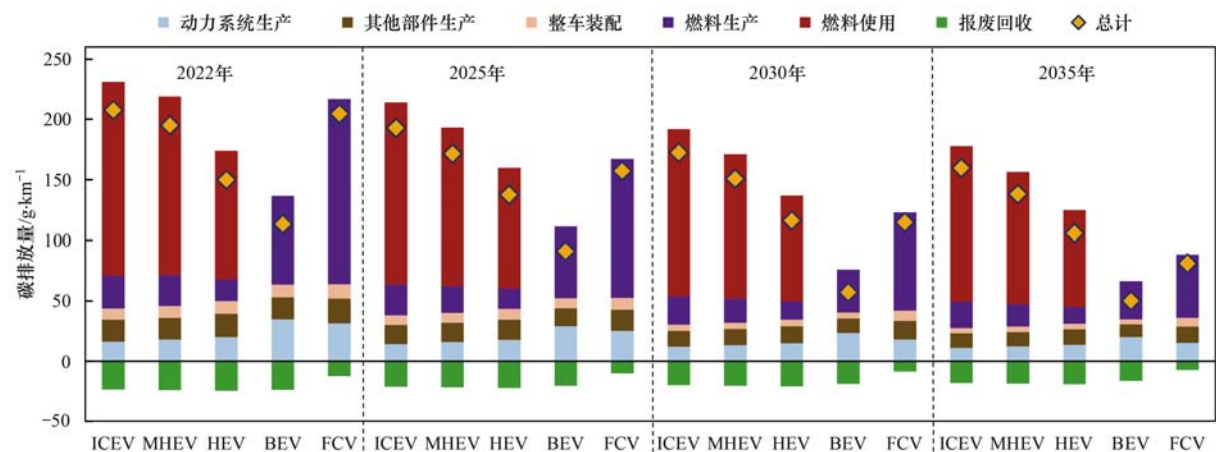


图2 5款汽车的全生命周期碳排放量

Fig. 2 Life cycle carbon emission of five vehicles

响 BEV 和 FCV 的全生命周期碳排放的主要因素。为深入分析电力结构和不同制氢方式对整车全生命周期碳排放的影响,选取电力结构的碳排放因子和不同制氢方式对应的碳排放因子进行讨论。

2.2.1 电力结构

上文假设我国 2022 年的电力结构的碳排放因子为 $0.565 \text{ kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 。为深入分析电力结构的变化对 ICEV、MHEV、HEV、BEV 和 FCV 全生命周期碳排放的影响程度,本文以 2022 年的情景为基

础,假设碳排放因子分别降低 10%、20% 和 30%,再分别提高 10%、20% 和 30%,构建 7 种情景。不同情景下汽车全生命周期碳排放量见表 8。

由表 8 可知,电力结构的碳排放因子对 BEV 的全生命周期碳排放量影响最大,对 ICEV、MHEV、HEV 和 FCV 的影响较小。随着电力结构的碳排放因子降低 10%,BEV、FCV、HEV、MHEV 和 ICEV 的全生命周期碳排放分别降低 8.81%、1.71%、1.33%、1.02% 和 0.96%。

表 8 不同情景下汽车碳排放量

Table 8 Vehicle carbon emission based on different scenarios

情景 / $\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$	ICEV / $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$	MHEV / $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$	HEV / $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$	BEV / $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$	FCV / $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$
0.396(-30%)	202.5	190	144	84	195
0.452(-20%)	204.5	191.5	146	93.5	198.5
0.509(-10%)	206	193.5	148	103.5	201.5
0.565(0%)	208.0	195.5	150.0	113.5	205.0
0.622(10%)	209.5	197	152	123	208
0.678(20%)	211.5	199	154	133	211
0.735(30%)	213	200.5	156	142.5	214

1) 括号外面的数字表示以我国 2022 年电力结构的碳排放因子 $0.565 \text{ kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 为基准分别降低或提高 10%、20% 和 30% 后对应的数值,括号里面的数字,正值表示电力结构的碳排放因子提高 10%、20% 和 30%,负值表示表示电力结构的碳排放因子降低 10%、20% 和 30%

2.2.2 不同制氢方式

上文提到,根据《中国氢能产业发展报告 2020》和 GaBi 数据库数据测算,本文假设我国制氢的碳排放因子为 $13.9 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。我国 2022 年氢能来源主要包括化石能源制氢、电解水制氢和工业副产氢提纯。根据《氢能产业发展中长期规划(2021—2035)》可知,碳捕获、利用和封存(carbon capture, utilization, and storage, CCUS)技术以及可再生能源制氢是未来的重点发展方向。为探究不同制氢方式对氢燃料电池汽车全生命周期碳排放的影响程度,搜集甲烷蒸气重整(steam methane reforming, SMR)、SMR + CCUS、煤气化、煤气化 + CCUS、工

业副产氢提纯、混合电网电解水和风电电解水制氢的碳排放因子见表 9。基于不同制氢方式的 FCV 与 ICEV 和 BEV 的全生命周期碳排放量如图 3 所示。

表 9 不同制氢方式的碳排放因子/ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 9 Carbon emission factors of different hydrogen production methods/ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$

氢能来源	氢能碳排放因子	文献
SMR	9.50	[14,36,44]
SMR + CCUS	0.50	[36]
煤气化	19.0	[36,44]
煤气化 + CCUS	1.50	[36]
混合电网电解水	27.60	[29,36]
风电电解水	0.42	[29,36]
工业副产氢提纯	0.80	[36,45]

由图3知,基于煤气化和混合电网电解水制氢的FCV的全生命周期碳排放均高于BEV和ICEV.基于SMR+CUSS、煤气化+CUSS、水电电解水制氢和工业副产氢提纯的FCV的全生命周期碳排放相比于ICEV分别降低72.7%、67.1%、72.8%和70.8%,比BEV分别降低49.4%、39.7%、50.2%和46.5%.基于SMR的FCV的全生命周期碳排放比ICEV低24.8%,比BEV高37.9%.因此,短期未来应以工业副产氢提纯为主供应氢能需求,长期未来以可再生能源电解水制氢和化石能源制氢+CUSS技术来满足FCV氢能需求,最终实现FCV全生命周期减碳效益的显著提高.

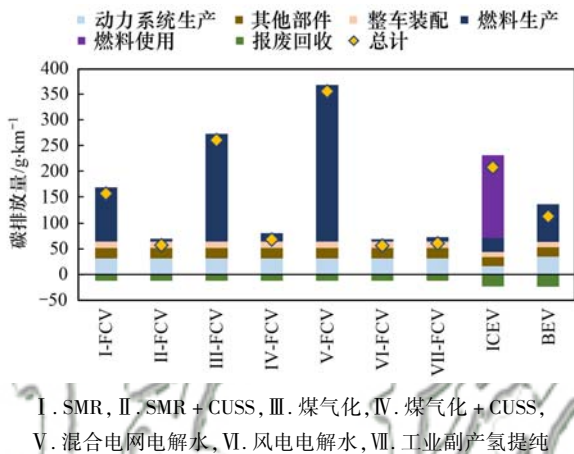


图3 不同制氢方式下FCV与BEV和ICEV全生命周期碳排放量

Fig. 3 Life cycle carbon emission of BEV, ICEV, and FCV based on different hydrogen production methods

3 结论

(1)面向2035的整车燃油经济性和轻量化水平的提高、电力结构和氢能的碳排放因子的降低对节能与新能源汽车的全生命周期碳排放的降低具有明显的积极影响.从全生命周期视角,2022年纯电动汽车和混合动力汽车相比于传统燃油汽车具有降低碳排放效益,同时纯电动汽车和燃料电池汽车在未来具有较大的降低碳排放潜力.2022年ICEV、MHEV、HEV、BEV和FCV的全生命周期碳排放量(以CO₂-eq计)分别为208.0、195.5、150.0、113.5和250.0 g·km⁻¹,到2035年,ICEV、MHEV、HEV、BEV和FCV的全生命周期碳排放分别为160.0、138.0、106.0、50.0、81.0 g·km⁻¹,BEV和FCV相比于ICEV具有较为显著的减碳效益,分别降低68.8%和49.4%.

(2)从敏感性分析可知,在发展推广纯电动汽车时应注意电力结构的清洁程度,电力结构的碳排放因子对BEV的全生命周期碳排放量影响最大,对

ICEV、MHEV、HEV和FCV的影响较小.随着电力结构的碳排放因子降低10%,BEV、FCV、HEV、MHEV和ICEV的全生命周期碳排放分别降低8.81%、1.71%、1.33%、1.02%和0.96%.

(3)关于燃料电池汽车的不同制氢方式,2022年基于煤气化和混合电网电解水制氢的FCV的全生命周期碳排放均高于BEV和ICEV.短期应以工业副产氢提纯为主满足FCV氢能需求,长期以可再生能源电解水制氢和化石能源制氢+CUSS技术来满足FCV氢能需求,最终实现FCV全生命周期减碳效益的显著提高.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Wu Z X, Wang M, Zheng J H, *et al.* Life cycle greenhouse gas emission reduction potential of battery electric vehicle [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **190**: 462-470.
- [3] Burchart-Korol D, Jursova S, Folega P, *et al.* Environmental life cycle assessment of electric vehicles in Poland and the Czech Republic[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **202**: 476-487.
- [4] Sisani F, Di Maria F, Cesari D. Environmental and human health impact of different powertrain passenger cars in a life cycle perspective. A focus on health risk and oxidative potential of particulate matter components [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **805**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150171.
- [5] Tagliaferri C, Evangelisti S, Acconcia F, *et al.* Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: a cradle-to-grave systems engineering approach [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2016, **112**: 298-309.
- [6] Sun X, Luo X L, Zhang Z, *et al.* Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) batteries for electric passenger vehicles [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **273**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123006.
- [7] Cusenza M A, Bobba S, Ardente F, *et al.* Energy and environmental assessment of a traction lithium-ion battery pack for plug-in hybrid electric vehicles [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **215**: 634-649.
- [8] Yin R S, Hu S H, Yang Y. Life cycle inventories of the commonly used materials for lithium-ion batteries in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **227**: 960-971.
- [9] Marques P, Garcia R, Kulay L, *et al.* Comparative life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles addressing capacity fade [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **229**: 787-794.
- [10] Shu X, Guo Y F, Yang W X, *et al.* Life-cycle assessment of the environmental impact of the batteries used in pure electric passenger cars [J]. *Energy Reports*, 2021, **7**: 2302-2315.
- [11] Hao H, Mu Z X, Jiang S H, *et al.* GHG emissions from the production of lithium-ion batteries for electric vehicles in China [J]. *Sustainability*, 2017, **9**(4), doi: 10.3390/su9040504.
- [12] 贾志杰, 高峰, 杜世伟, 等. 磷酸铁锂电池不同应用场景的生命周期评价 [J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(4): 1975-1984.

Jia Z J, Gao F, Du S W, *et al.* Life cycle assessment of lithium

- iron phosphate battery in different utilization scenarios[J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(4): 1975-1984.
- [13] 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.
- [14] 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 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.
- [15] 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.
- [16] Simons A, Bauer C. A life-cycle perspective on automotive fuel cells[J]. *Applied Energy*, 2015, **157**: 884-896.
- [17] 林婷, 吴烨, 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.
- 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.
- [18] Li M Y, Zhang X W, Li G J. A comparative assessment of battery and fuel cell electric vehicles using a well-to-wheel analysis[J]. *Energy*, 2016, **94**: 693-704.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Andersson Ö, Börjesson P. The greenhouse gas emissions of an electrified vehicle combined with renewable fuels; life cycle assessment and policy implications[J]. *Applied Energy*, 2021, **289**, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116621.
- [24] Yang L, Yu B Y, Yang B, *et al.* Life cycle environmental assessment of electric and internal combustion engine vehicles in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **285**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124899.
- [25] Yuksel T, Tamayao M A M, Hendrickson C, *et al.* Effect of regional grid mix, driving patterns and climate on the comparative carbon footprint of gasoline and plug-in electric vehicles in the United States[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, **11**(4), doi: 10.1088/1748-9326/11/4/044007.
- [26] 陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 等. 面向碳中和的新能源汽车全生命周期评价研究综述及趋势展望[J]. *汽车工程学报*, 2022, **12**(4): 360-374.
- Chen Y S, Lan L B, Hao Z, *et al.* Review and future prospects of life cycle assessment of new energy vehicles towards carbon neutrality [J]. *Chinese Journal of Automotive Engineering*, 2022, **12**(4): 360-374.
- [27] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图 2.0 [M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- China SAE. Technology roadmap for energy saving and new energy vehicle 2.0[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2021.
- [28] ISO 14040: 2006, Environmental management-life cycle assessment -principles and framework[S].
- [29] 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 parameter comparison of hydrogen fuel cell vehicles power systems [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 4402-4412.
- [30] 陈轶嵩. 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.
- Chen Y S. A study on life cycle ecological benefits assessment of automotive parts[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [31] 贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 等. 承德市 PM_{2.5} 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2343-2354.
- He B W, Nie S S, Li Y L, *et al.* Seasonal distribution characteristics, source analysis, and health risk evaluation of PAHs in PM_{2.5} in Chengde[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2343-2354.
- [32] 庾雄, 杨凌霄, 张婉, 等. 海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM_{2.5} 污染特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2284-2293.
- Tuo X, Yang L X, Zhang W, *et al.* Characteristics and source analysis of PM_{2.5} in Qingdao in winter under the action of sea-land-atmosphere convergence[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2284-2293.
- [33] 陈航, 王颖, 王澍. 铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2719-2731.
- Chen H, Wang Y, Wang S. Source analysis and pollution assessment of heavy metals in farmland soil around Tongshan mining area[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2719-2731.
- [34] 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.
- [35] 陈轶嵩, 丁振森, 刘佳慧, 等. 面向 2020 年的质子交换膜燃料电池汽车生命周期评价及预测[J]. *中国机械工程*, 2018, **29**(21): 2546-2552, 2024.
- 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.
- [36] 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.
- [37] Harper G, Sommerville R, Kendrick E, *et al.* Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles [J]. *Nature*, 2019, **575**(7781): 75-86.
- [38] Fan E S, Li L, Wang Z P, *et al.* Sustainable recycling technology for li-ion batteries and beyond: Challenges and future prospects[J]. *Chemical Reviews*, 2020, **120**(14): 7020-7063.
- [39] Tan J H, Wang Q, Chen S, *et al.* Recycling-oriented cathode

- materials design for lithium-ion batteries elegant structures versus complicated compositions[J]. *Energy Storage Materials*, 2021, **41**: 380-394.
- [40] Burnham A, Wang M Q, Wu Y. Development and applications of GREET2. 7-the transportation vehicle-cycle model [R]. Argonne: Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, 2012.
- [41] Liu Y T, Qiao J, Xu H B, *et al.* Optimal vehicle size and driving condition for extended-range electric vehicles in China: A life cycle perspective[J]. *Plos One*, 2020, **15**(11), doi: 10.1371/journal.pone.0241967.
- [42] 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.
Xu H B. Life cycle assessment of extended range electric vehicle [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [43] 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.
Liu K H, Xu J Q. Life cycle assessment of driving motor on electric vehicle[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(9): 3456-3463.
- [44] 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.
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.
- [45] 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.



CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i> (1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter	WANG Hao-qí, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i> (1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-píng, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i> (1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM _{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i> (1841)
Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling (1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM _{2.5} Over Xi'an	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i> (1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in the Core Area of Ili River Valley in Spring	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i> (1899)
Evaluation of Changes in PM _{2.5} Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i> (1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ting, <i>et al.</i> (1933)
Changes in O ₃ -VOCs-NO _x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i> (1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i> (1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i> (1962)
Characteristics of O ₃ Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i> (1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect	LI Shao-lin, WANG Qi-qi (1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i> (1998)
Simulation of Anthropogenic CO ₂ Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i> (2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i> (2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i> (2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i> (2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i> (2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i> (2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	JI Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i> (2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i> (2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen (2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i> (2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai	YAN Qi (2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i> (2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i> (2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu (2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i> (2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i> (2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i> (2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i> (2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i> (2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i> (2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i> (2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i> (2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i> (2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i> (2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i> (2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i> (2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i> (2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i> (2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i> (2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i> (2395)