

目次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用	刘润璞, 彭栓, 陈玉烁, 陈民, 张楠, Nihed Benani, 吕连宏, 阳平坚 (1233)
全生命周期视角下中国建筑碳排放空间关联网络演化及影响因素分析	任晓松, 李昭睿 (1243)
京津冀地区城市三生空间碳代谢效率特征及演进模式	田超, 程琳琳, 邵盈钊 (1254)
太原市“十四五”规划大气污染防治政策的 CO ₂ 协同效益评估	肖婷玉, 束赕, 李慧, 王涵, 李俊宏, 严沁, 张文杰, 姜华 (1265)
湖南省工业领域碳减排与空气质量改善协同	李楠, 刘弯弯, 朱书涵, 邢晓雯, 汤克勤, 王松伟, 白露 (1274)
“双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤降碳路径	张静, 杨萌, 张伟, 曹东, 赵静, 李勃, 薛英岚, 蒋洪强 (1285)
郑州市公交车队电动化减排降碳环境效益	邹超, 汪亚男, 吴琳, 何敬, 倪经纬, 毛洪钧 (1293)
长江中游城市群城市化对 PM _{2.5} 浓度的多尺度驱动机制	张政, 周廷刚, 周志衡, 昌悦 (1304)
天山北坡城市群 PM _{2.5} 浓度时空分布特征及影响因素分析	王相男, 张喆, 刘方青 (1315)
天津市 PM _{2.5} 碳组分空间差异性来源解析	武甫亮, 吴建会, 戴启立, 肖致美, 冯银厂 (1328)
贵阳市花溪城区大气 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的变化特征及来源解析	桂佳群, 杨员, 王显钦, 李云武, 闫广轩, 徐鹏 (1337)
新乡市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征、来源解析及气象影响分析	刘恒嘉, 李岚清, 李焕莉, 任言, 许梦源, 贾梦珂, 刘恒志, 杨莹, 宋天颂, 洪启航 (1349)
2017~2018 年冬季菏泽大气 PM _{2.5} 中金属元素特征及健康风险评估	杜虹萱, 任丽红, 赵明升, 韩慧霞, 徐义生 (1361)
北京市臭氧污染跳变型特征及影响因素分析	潘锦秀, 安欣欣, 刘保献, 李云婷, 李倩, 孙峰, 张章, 邱启鸿, 陈阳 (1371)
南京夏季大气臭氧光化学特征与敏感性分析	罗丽彤, 章炎麟, 林煜棋, Ahsan Mozaffar, 曹梦瑶 (1382)
苏州市初夏臭氧污染成因及年际变化	吴也正, 张鑫, 顾钧, 缪青, 魏恒, 熊宇, 杨倩, 吴斌, 沈文渊, 马强 (1392)
长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源	卢洪斌, 卢少勇, 李响, 张森霖, 黄张根 (1402)
基于 PCA-APCS-MLR 模型的乌梁素海表层沉积物重金属时空分布及来源解析	崔志谋, 史小红, 赵胜男, 卢俊平, 张昊, 刘莹慧, 郭鑫, 王彦隽 (1415)
重庆市长寿湖水表层水体重金属时空分布及风险评价	张瑞溪, 刘娅君, 罗泳楠, 李杰芹, 李彩霞, 李佳佳, 张成 (1428)
长江流域微塑料污染特征及生态风险评估	李思琼, 王华, 储林佑, 曾一川, 闫雨婷 (1439)
宜昌市东山运河微塑料污染评估及年排放量估算	丁爽, 李卫明, 张续同, 刘子健, 高雅坤, 李映成, 王芳炜 (1448)
汜水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估	赵长民, 和兵, 李和通, 张瑞琪, 李银月, 张发文, 桂新, 马丽 (1457)
宁夏入黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评价	高礼, 李凌云, 郑兰香, 吴海娟, 陶红, 刘邓超 (1468)
浙南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评价	钟奕昕, 李立湘, 吴鑫, 周施阳, 姚飞延, 董好刚 (1480)
鄱阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析	马妍, 孙晨, 毕茹乐, 张波涛, 刘艳, 邵鹏, 刘统, 王圣瑞, 钟文军 (1492)
杭州湾南岸 20 a 水质净化功能变化及预测	王珊珊, 曹公平, 徐明伟, 黄君宝, 曾剑 (1502)
不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例	代孟均, 张兵, 杜倩倩, 孙季琰, 田蕾, 王义东 (1512)
长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素	刘海, 宋阳, 李迎春, 魏伟, 赵国红, 王旭东, 黄健敏 (1525)
富营养化湖泊藻华降解产生的溶解性有机质动态变化及其环境效应	张瑾, 陈明滢, 郝智能, 钟寰, 何欢, 雷沛杰 (1539)
紫外光活化亚硫酸盐降解水中卡马西平	林涛, 苑宇杰 (1553)
再生水消毒副产物的检测、生成与控制	廖雨枫, 王正, 潘旸, 李爱民 (1561)
3 种人工湿地基质材料对氨氮的吸附特性	何强, 陈博文, 杨雨静, 周全, 刘彦君, 王志刚, 程呈 (1577)
基于改进遥感生态指数的青藏公路那(曲)安(多)段生态环境评估及驱动机制分析	傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 王旭 (1586)
基于 AWRSEI 的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析	赵嘉丽, 李兴, 孙冰 (1598)
定量评估气候变化对长江中下游地区植被 GPP _{GS} 变化的影响	徐勇, 盘钰春, 邹滨, 郑志成, 郭振东 (1615)
基于 Meta 分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响	李健明, 康雨欣, 蒋福祯, 宋明丹, 祁凯斌, 卢素锦, 李正鹏 (1629)
连续周年轮作休耕对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响	鲁泽让, 李永梅, 杨春怀, 夏梓泰, 程伟威, 王自林, 赵吉霞, 范茂攀 (1644)
4 种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响	丁馨茹, 严宁珍, 王子芳, 李志琦, 黄容, 王洋, 代文才, 高明 (1655)
不同植茶年限土壤氮素组分变化及其与环境因子关系	邵奇, 吴涛, 解雪峰, 徐梓晴, 李文琦, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞 (1665)
黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征	王传盈, 王凯月, 王浩然, 张梦迪, 周云凯 (1674)
覆膜年限和有机肥施用对花生田耕层土壤微塑料赋存特征的影响	宋宁宁, 李梦佳, 王学霞, 刘君, 王芳丽, 宗海英, 黄小丽, 王斌, 梁丽娜 (1684)
秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响	胡天怡, 车佳玥, 胡煜杰, 陈琦琦, 张冬明, 雷菲, 曾建华, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (1692)
耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响	陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 李天姿, 于媛, 李晶 (1702)
基于遥感时-空-谱特征及随机森林模型的土壤重金属空间分布预测	王泽强, 张冬有, 徐夕博, 王兆鹏, 杨东宇, 宋晓宁 (1713)
黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 曹素珍 (1724)
广西贺州市典型矿区周边耕层土壤 Cd 通量特征	杨烨宇, 李程, 杨忠芳, 张起钻, 邹胜章, 宋淑娥, 蔡贺清 (1739)
基于信息扩散模型的沔东地区土壤重金属潜在生态风险评估	杨楠楠, 韩玲, 刘明 (1749)
湘西地区土壤重金属污染溯源分析及环境质量评价	肖凯琦, 徐宏根, 甘杰, 戴亮亮, 李毅, 李凯, 许青阳, 张俊, 邓世民, 李颖 (1760)
典型行业再利用土壤重金属含量分布、来源解析及生态风险评估	沈城, 王文娟, 沙晨燕, 谢雨晴, 王敏, 吴健 (1769)
省级尺度土壤 As 迁移转化与水稻安全种植区划:以贵州省为例	董心月, 吴勇, 周子寒, 王佛鹏, 张云霞, 宋波 (1781)
谷壳灰硅肥改善土壤质量降低水稻镉砷累积的效应	易轩韬, 欧阳坤, 辜娇峰, 李倩, 游萍, 周航, 廖柏寒 (1793)
EDDS 对土壤铜镉有效性及蓖麻吸收转运的影响	刘文英, 吴刚, 胡红青 (1803)
叶面调控剂对复合污染农田小麦籽粒 Cd、As 和 Pb 累积的阻控效应	肖冰, 王秋实, 高培培, 赵全利, 杨威, 王钊, 刘文菊, 薛培英 (1812)
民勤绿洲退耕地土壤微生物群落结构与功能多样性特征	李常乐, 张富, 王理德, 赵赫然, 赵学成, 张恒平 (1821)
宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制	李雨桐, 余海, 刘坤, 柏宏成, 汪军, 朱正杰 (1830)
养鸡场空气微生物污染及工人呼吸暴露风险	白渔樵, 孙兴滨, 仇天雷, 郭雅杰, 高敏, 王旭明 (1840)
玛瑙河多环境介质和铜锈环螺体内微塑料的赋存特征	高雅坤, 李卫明, 张续同, 刘子健, 李映成, 丁爽, 王芳炜, 刘流 (1849)
不同官能团微塑料对斑马鱼胚胎菌群和代谢功能的胁迫效应	闫振华, 张燕, 包旭辉, 朱培元, 陈玉芳 (1859)

郑州市公交车队电动化减污降碳环境效益

邹超^{1,2}, 汪亚男^{1,2}, 吴琳^{1,2*}, 何敬³, 倪经纬³, 毛洪钧^{1,2}

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071; 2. 天津市城市交通污染防治研究重点实验室, 天津 300071; 3. 河南天朗生态科技有限公司, 郑州 450000)

摘要: 公交车队电动化是道路交通部门实现减污降碳的重要手段, 评估当前公交车队电动化减排成效, 对推进大中型城市公交全面电动化具有重要参考意义. 基于燃料生命周期法分析了郑州市公交车队电动化前后 CO₂ 和污染物排放特征, 并评估了不同电动化情景下的车队排放. 结果表明, 本轮电动化使公交车队燃料生命周期内 CO₂ 和 PM_{2.5} 排放量分别增长 32.6% 和 42.6%, CO、NO_x 和 VOC 排放量下降了 28%、34% 和 25%. 优化发电结构对于电动化过程中的 CO₂ 及 PM_{2.5} 减排尤为重要, 在全面电动化和发电结构优化的最佳情景下, CO₂、CO、NO_x、VOC 和 PM_{2.5} 减排可达 38.7%、80.1%、84.4%、92.2%、30.2%. 在全面电动化进程中, 应优先对中长里程线路车辆进行电动化替换, 此外, 插电混动天然气车型的纯电动化替换对减排利弊兼有, 同步推进车队替换和电力结构调整进程才能实现减污降碳协同增效.

关键词: 电动化; 燃料生命周期; 碳排放; 公交车; 减污降碳

中图分类号: X24; X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1293-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202304156

Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou

ZOU Chao^{1,2}, WANG Ya-nan^{1,2}, WU Lin^{1,2*}, HE Jing³, NI Jing-wei³, MAO Hong-jun^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Urban Transport Emission Research, Tianjin 300071, China; 3. Henan Tianlang Ecological Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Electrification of bus fleets is an effective approach to reducing transportation-related pollution and carbon emissions. Evaluating the impact of electrification on existing bus fleets can provide valuable insights for promoting full electrification of public transportation in large cities. Utilizing the fuel life cycle method, we analyzed the CO₂ and pollutant emissions of Zhengzhou's bus fleet before and after electrification and evaluated emissions under different electrification scenarios. Our results indicated that after electrification, the fuel life cycle CO₂ and PM_{2.5} emissions increased by 32.6% and 42.6%, respectively, whereas CO, NO_x, and VOC emissions decreased by 28%, 34%, and 25%, respectively. Optimizing the power generation structure is a critical factor in reducing CO₂ and PM_{2.5} emissions during the electrification process. The best scenario for comprehensive electrification and power generation structure optimization could result in a 38.7% reduction in CO₂, as well as reductions of 80.1% in CO, 84.4% in NO_x, 92.2% in VOC, and 30.2% in PM_{2.5}. Prioritizing electrification on long-distance routes is recommended during the replacement process. Additionally, replacing plug-in hybrid natural gas vehicles with pure electric vehicles has both advantages and disadvantages in terms of emission reduction. Achieving pollution reduction and carbon synergies requires advancing fleet replacement and power structure adjustments simultaneously.

Key words: electrification; fuel life cycle; carbon emissions; bus; pollution and carbon reduction

道路交通排放已经成为我国城市区域大气污染的主要来源^[1-3], 2020年, 中国交通部门排放了 8.96 亿 t CO₂, 占总排放的 9%, 且排放量和占比均呈逐年上升趋势^[4]. 为从源头减少大气污染物和碳排放, 我国统筹开展了大气减污降碳协同增效行动^[5-7]. 在交通领域, 以清洁化运输为切入点, 构建城市绿色出行体系, 逐步推动公共领域用车电动化, 其中公交电动化, 是实现道路交通部门的“低排放”的重要手段. 我国目前有超过 80 万辆公交车在运营, 得益于早在 2009 启动的“十城千辆工程”长期战略计划, 我国通过补贴推动了新能源汽车的发展^[8], 截至 2021 年, 全国新能源城市公交车比例超过 66%.

近年来国内外学者针对公交车电动化开展了多层次研究. 有研究从经济政策角度对规模化推广发展新能源公交车汽车进行评估^[9-11]. 从车辆运行优化角度, 研究者对电动公交车线路规划及车辆替换提

出了优化方案^[12-15]. 在公交电动化环境影响评价角度, 分别从能耗^[16,17]、温室气体及碳减排^[18-21]和车辆及车队排放^[22-24]这 3 个领域进行了广泛研究, 同时对国内外城市的车队电动化案例也进行了分析^[25-32]. 对于车队电动化, 研究侧重于电动公交车运行过程、燃料生命周期以及全生命周期的碳及污染物排放评估^[33], 其中燃料生命周期 (well to wheels, WTW) 研究是当前关注的重点. 现有研究采用 WTW 评估方法比较了电动公交车与多种传统燃料公交车型的 CO₂ 排放的差异, 以上研究表明电动公交车在 CO₂ 减排方面具有较大潜能^[34,35]. 此外还有学者结合城市数据, 对

收稿日期: 2023-04-19; 修订日期: 2023-06-06

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC3703600); 天津科技支撑计划项目 (20YFZCSN01000)

作者简介: 邹超 (1991~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为机动车排放建模及政策评估, E-mail: mattzou@outlook.com

* 通信作者, E-mail: wulin@nankai.edu.cn

公交系统如 (bus rapid transit, BRT) 等电动化后的 WTW 排放进行了计算^[36], 这类公交车队燃料生命周期评估通常使用基于燃料消耗的自上而下方法和基于车辆活动的自下而上方法进行建模计算, 但在估算过程中, 由于不同国家和城市的公交电动化进程、车型结构、电力结构等因素存在较大差异, 且车队实际运营数据对评估准确性影响巨大, 车队电动化环境效益研究结论在不同国家和地区呈现较大差异^[36-38]. 因此, 有必要采用本地化真实车队运营数据, 开展我国城市公交车队电动化发展的环境影响研究, 为城市改善环境空气质量综合决策提供科学支撑.

郑州是河南省省会, 地处中国中部地区, 也是国家中心城市. 郑州具有较高的工业、交通和人口密度, 2021 年机动车保有量超过 500 万辆^[39]. 根据《河南省新能源及网联汽车发展三年行动计划》, 郑州市于 2017 年启动新一轮公交电动化, 2018 年和 2019 年分两期替换. 随着郑州市公交车的电动化, 超过 90% 的公交车已更换为新能源公交车^[40]. 本研究基于本地化真实替换情景及运营数据, 采用燃料生命周期分析方法, 对郑州市公交车队电动化的环境效益进行评价, 结合情景分析, 以期为进一步推进大中型城市公交全面电动化进程提供参考.

1 材料与方法

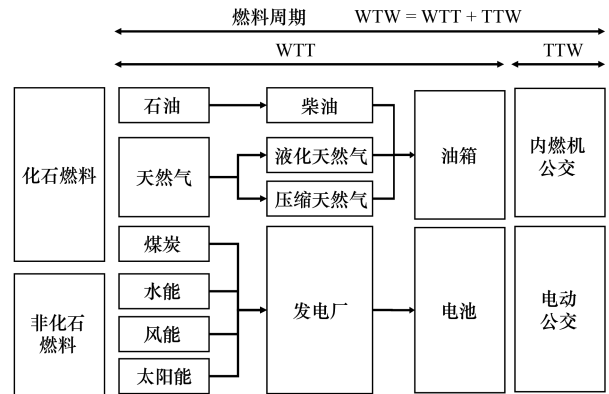
1.1 研究范围与数据处理

1.1.1 研究边界

本研究中公交车队电动化的环境影响是根据 WTW 方法计算 CO₂ 和 4 种常规污染物 (CO、NO_x、VOC、PM_{2.5}) 尾气排放量来估算的. WTW 分析专注于车辆的燃料周期评估, WTW 方法涵盖燃料生产阶段 (well to tank, WTT) 和燃料燃烧阶段 (tank to wheels, TTW). WTT 阶段包含原料生产、运输、燃料生产和燃料分配过程, TTW 阶段包括车辆运行过程. WTW 方法中内燃机公交与电动公交燃料周期系统边界如图 1 所示.

1.1.2 数据来源

本研究中车辆属性信息、车辆班次、运行轨迹数据和燃料消耗数据来源于郑州市公交公司. 车辆信息截至 2019 年 12 月, 车辆班次、轨迹数据及燃料消耗数据共两周, 范围为 2017 年 12 月 1~7 日和 2019



包含 WTT 阶段和 TTW 阶段

图 1 内燃机公交与电动公交燃料周期研究边界

Fig. 1 WTW research boundary of internal combustion engine bus and electric bus

年 12 月 2~8 日. WTT 阶段内燃机公交和电动公交的 CO₂ 与污染物排放因子使用美国阿贡实验室开发的 GREET (greenhouse gases, regulated emissions, and energy use in transportation model) 模型计算, TTW 阶段 CO₂ 因子使用 GREET 模型计算, 常规污染物因子使用基于车速的 HTSVE (high temporal-spatial resolution vehicle emission inventory model) 模型获取^[41, 42]. 郑州市发电结构数据来源于统计年鉴^[43].

1.1.3 公交车队数据统计

本研究分燃料类型对车辆数据进行统计如图 2 所示. 从总保有量看, 为满足公交出行需求, 运营车队进行了车辆替换与车辆补充, 车队扩容 136 辆. 从替换角度看, 纯燃料车型如柴油、压缩天然气车 (compressed natural gas vehicle, CNG) 及燃料混合动力车型 (hybrid electric vehicle, HEV) 如柴油混合动力-柴油 (HEV-柴油)、液化天然气混合动力 (HEV-LNG) 和压缩天然气混合动力 (HEV-CNG) 全部被淘汰并进行了纯电动替换, 插电混合动力 (plug-in hybrid electric vehicle, PHEV) 由于车龄较新, 并未进行调整. 此外, 除纯电动公交外还有 223 辆氢能源公交加入了运营车队. 经过本轮电动化, 车队新能源化率由 92% 提升到 100%, 纯电动化率由 25% 提升到 56%.

根据车队运行里程与实际月度燃料加注及充电量数据, 计算得到车辆单位里程平均能源消耗, 如表 1 所示, 此数据将用于基于燃料消耗的排放量计算.

表 1 各类型车辆单位里程平均能源消耗

Table 1 Average energy consumption per unit mileage for various vehicle categories

车型	纯电动 /kW·h·km ⁻¹	氢能源 /kW·h·km ⁻¹	PHEV-CNG /m ³ ·km ⁻¹	PHEV-LNG /kg·km ⁻¹	HEV-CNG /m ³ ·km ⁻¹	HEV-LNG /kg·km ⁻¹	HEV-柴油 /L·km ⁻¹	柴油 /L·km ⁻¹	CNG /m ³ ·km ⁻¹
燃料消耗	0.94	0.83	0.36	0.36	0.42	0.34	0.30	0.34	0.39

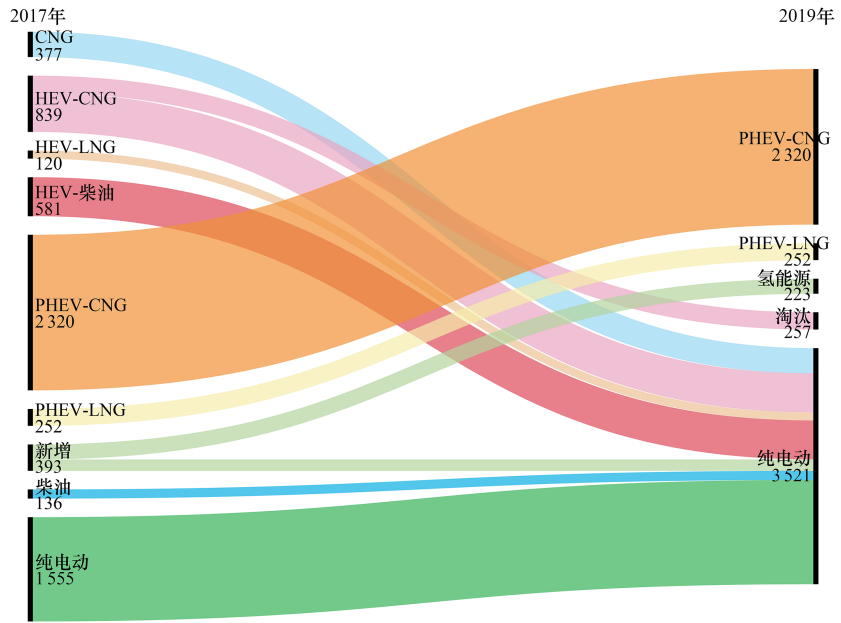


图 2 本轮电动化前(2017年)后(2019年)各燃料类型车辆数量变化情况

Fig. 2 Numbers of vehicles for each fuel type before (2017) and after (2019) bus fleet electrification

1.1.4 车辆运行数据处理

车辆运行数据处理的核心是刻画公交车的真实行程轨迹,本研究采用以下步骤处理生成车辆轨迹数据.首先,基于每日车辆班次表,获取当日实际运营车辆列表,遍历列表从车辆运行GPS记录数据库中逐辆提取该车当日轨迹数据集,数据包含时间戳及车辆经纬度字段;随后将GPS点数据与实际的道路地图进行匹配,实现车辆空间属性与GIS信息的对

应,生成车辆运行轨迹数据集.对原始GPS数据中存在的时空异常和缺失点,采用基于KDTree的点线近邻匹配优化算法进行时空填补^[44],保证数据的时空连续性;处理后该轨迹集合每15s一条记录,一条记录为一个轨迹子段,并通过地理运算增加各子段对应的里程及车速.此数据作为基于里程及车速的排放量计算流程中的活动水平输入.轨迹数据处理流程如图3所示.

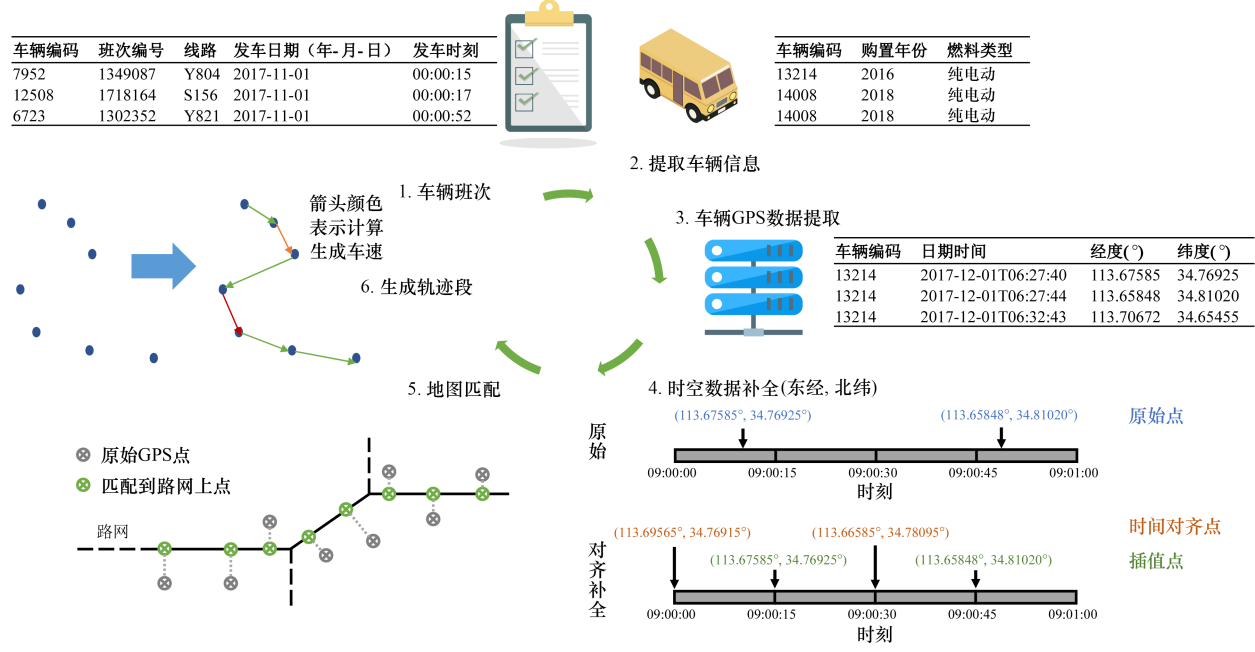


图 3 公交车轨迹数据生成流程

Fig. 3 Flow of bus trajectory data generation

1.2 WTW 阶段 CO₂与污染物排放计算

WTW 阶段排放可拆分为 WTT 和 TTW 两个阶段

独立进行计算,WTW 阶段总排放计算方法如式(1)所示.

$$E_{c,p}^{WTW} = E_{c,p}^{WTT} + E_{c,p}^{TTW} \quad (1)$$

式中, $E_{c,p}^{WTW}$ 、 $E_{c,p}^{WTT}$ 和 $E_{c,p}^{TTW}$ 分别为两类 c (内燃机公交、电动公交) 在 WTW、WTT 和 TTW 阶段的污染物 p (CO_2 、 CO 、 NO_x 、 VOC 、 $\text{PM}_{2.5}$) 的排放量, 单位为 t。

1.2.1 WTT 阶段

WTT 阶段 CO_2 及各污染物排放量采用基于燃料消耗量的方式计算。WTT 阶段排放计算方法如式 (2) 所示。

$$E_{c,p}^{WTT} = D_c \times \text{FC}_c \times \text{EF}_{c,p}^{WTT} \quad (2)$$

式中, D_c 为车型 c (内燃机公交和电动公交) 的行驶里程, 单位 km, 根据 1.1.4 节方法计算获取; FC_c 为单位里程平均能源消耗, 参照表 1 获取; $\text{EF}_{c,p}^{WTT}$ 为 WTT 阶段污染物 p (CO_2 、 CO 、 NO_x 、 VOC 和 $\text{PM}_{2.5}$) 排放因子。

1.2.2 TTW 阶段

TTW 阶段通常认为仅内燃机公交存在 CO_2 与污染物排放, 对于 CO_2 排放, 与 WTT 阶段类似, 采用基于燃料消耗量的方式计算, 见式 (3)。

$$E_{c,p}^{TTW} = D_c \times \text{FC}_c \times \text{EF}_{c,p}^{TTW} \quad (3)$$

式中, c 为内燃机公交, p 为 CO_2 , D_c 为内燃机公交的行驶里程, 单位 km; FC_c 为单位里程平均能源消耗, 参照表 1 获取; $\text{EF}_{c,p}^{TTW}$ 为 TTW 阶段污染物 CO_2 排放因子。

对于其他污染物排放, 采用基于轨迹里程与轨迹速度的方法进行计算, 见式 (4)。

$$E_{c,p}^{TTW} = \sum_{m=1}^m \sum_{n=1}^{N_m} D_{c,m,n} \times \text{EF}(v_{m,n})_{c,p,m,n}^{TTW} \quad (4)$$

式中, c 为内燃机公交, p 为其他污染物 (CO 、 NO_x 、

VOC 和 $\text{PM}_{2.5}$), m 为参与计算的公交车数量, N_m 为第 m 辆车的运行轨迹段数量, $D_{c,m,n}$ 为第 m 辆车在第 n 段轨迹的行驶里程, $\text{EF}(v_{m,n})_{c,p,m,n}^{TTW}$ 为第 m 辆车在第 n 段轨迹上基于平均车速 $v_{m,n}$ 计算得到的污染物 p (CO 、 NO_x 、 VOC 和 $\text{PM}_{2.5}$) 排放因子。

1.2.3 排放因子获取

根据 GREET 模型估算 WTT 阶段排放因子, 其中, 发电结构对电动车排放因子有较大影响^[45]。因此本研究基于 2019 年郑州市统计年鉴, 获取本轮电动化过程中的发电结构数据, 同时, 考虑到“双碳”目标的实现, 根据郑州市现代能源体系规划中对电力供应的预测结果, 通过降低火力发电比例, 提升水力和太阳能发电占比, 作为 2025 年和 2035 年的优化后电力结构。3 类发电结构如表 2 所示。

表 2 研究时间范围内郑州市发电结构及优化后发电结构/%
Table 2 Power generation structure and optimized power generation structure of Zhengzhou within the research period/%

年份	发电结构			
	火力发电	水力发电	风力发电	太阳能发电
2019	86.99	3.75	6.94	2.32
2025	76.00	15.00	6.20	2.80
2035	60.00	31.40	5.20	3.40

根据两类发电结构可计算得到对应电动车排放因子, 结构优化后电力排放因子显著降低。WTT 及 TTW 阶段不同燃料种类车辆基于能耗的排放因子如表 3 所示。

表 3 各燃料种类车辆单位能源消耗对应排放因子¹⁾

Table 3 Emission factors for various fuel types based on energy consumption

燃料种类	WTT					TTW
	$\text{CO}_2/\text{kg} \cdot \text{Unit}^{-1}$	$\text{VOC}/\text{g} \cdot \text{Unit}^{-1}$	$\text{CO}/\text{g} \cdot \text{Unit}^{-1}$	$\text{NO}_x/\text{g} \cdot \text{Unit}^{-1}$	$\text{PM}_{2.5}/\text{mg} \cdot \text{Unit}^{-1}$	$\text{CO}_2/\text{kg} \cdot \text{Unit}^{-1}$
柴油	0.44	0.25	0.40	0.66	41.14	1.15
CNG	0.32	0.38	1.20	1.42	19.48	1.25
HEV-柴油	0.44	0.25	0.40	0.66	41.14	1.15
HEV-LNG	0.52	0.36	0.87	1.09	38.05	1.25
HEV-CNG	0.32	0.38	1.20	1.42	19.48	1.25
PHEV-LNG	0.52	0.36	0.87	1.09	38.05	1.25
PHEV-CNG	0.32	0.38	1.20	1.42	19.48	1.25
氢能源	0.97	0.12	0.27	0.45	44.57	1.25
电动-2019 年	0.92	0.08	0.29	0.74	66.85	0.00
电动-2025 年	0.80	0.07	0.24	0.61	55.49	0.00
电动-2035 年	0.63	0.05	0.19	0.48	43.80	0.00

1) Unit 为各车型燃料消耗量单位: 电动及氢能源为 $\text{kW} \cdot \text{h}$; CNG、PHEV-CNG 和 HEV-CNG 为 m^3 ; PHEV-LNG 和 HEV-LNG 为 kg; HEV-柴油和柴油为 L。

TTW 阶段 CO 、 NO_x 、 VOC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 等各类污染物使用基于速度的排放因子模型 HTSVE 计算。排放因子如图 4 所示。

1.3 电动化情景设置

为评估郑州市本轮公交车电动化的减排收益并

预估未来继续电动化的减排潜力, 基于获取的电动化前后车队运行数据及不同发电结构对应的排放因子数据, 本研究设置了 5 种排放计算情景, 如表 4 所示。

车队与活动水平: F1 代表根据 2017 年 12 月 1~7

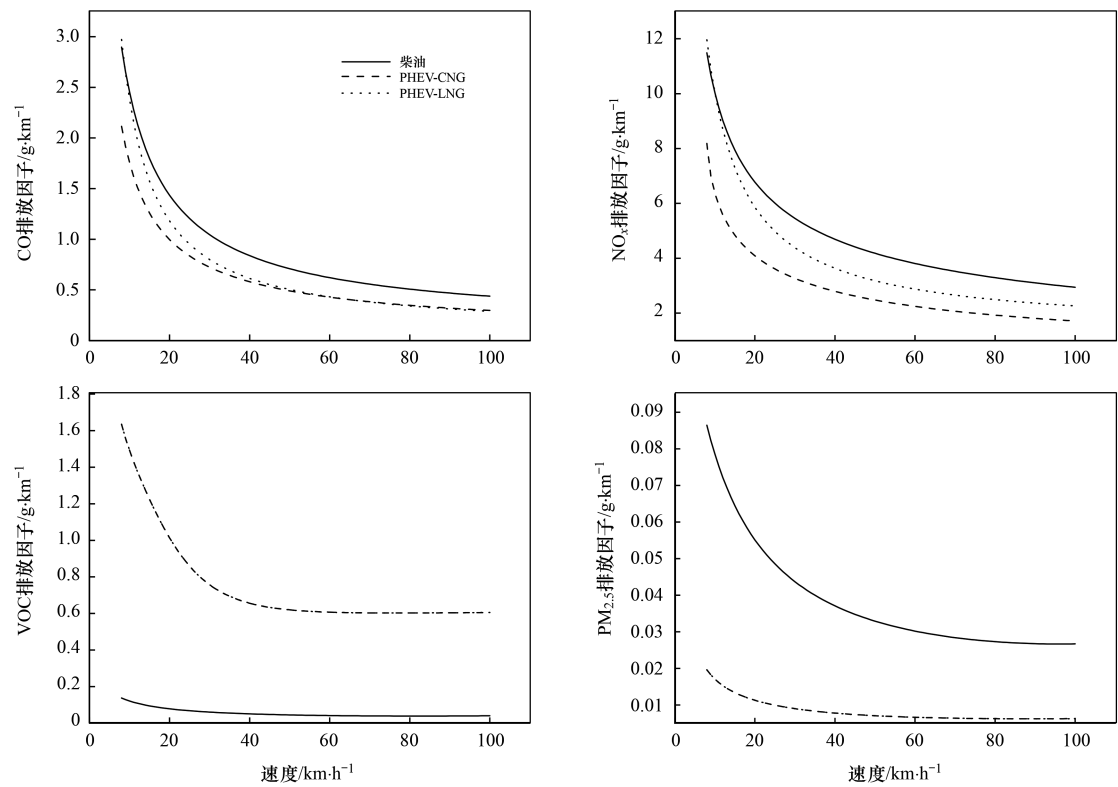


图 4 TTW 阶段基于速度的污染物排放因子
Fig. 4 Speed-based pollutant emission factors for TTW phase

日数据获取的车辆轨迹并匹配 2017 年车队结构(电动化前). F2 代表根据 2019 年 12 月 2~8 日数据获取的车辆轨迹并匹配 2019 年车队结构(电动化后). F3 代表根据 2019 年 12 月 2~8 日数据获取的车辆轨迹并匹

配基于 2019 年进行全面纯电动化替换后的车队结构(全面电动化). 车队结构参见 1.1.3 节.

发电结构: 参见 1.2.3 节, E1、E2 和 E3 分别代表 2019 年、2025 年和 2035 年发电结构.

表 4 公交车队电动化排放情景设置

Table 4 Scenario setting of bus fleet electrification

情景	车队与活动水平	发电结构	描述
S1	F1	E1	电动化前情景
S2	F2	E1	电动化后车队结构及活动水平, 2019 年发电结构
S3	F2	E2	电动化后车队结构及活动水平, 2025 年发电结构
S4	F3	E2	车队全面电动化, 2025 年发电结构
S5	F3	E3	车队全面电动化, 2035 年发电结构

2 结果与讨论

2.1 车队运行特征

电动化前后每日运营车辆数及每日车队总运行里程如图 5(a). 结果表明, 日均运营车辆从电动化前的 5 775 辆增长到电动化后的 6 227 辆, 增长了 7.8%. 日均运行总里程由 77 万 km 增长至 89 万 km, 提升了 15.7%. 受通勤需求影响, 工作日运营车辆数及里程高于周末约 4%~5%.

各车型运行里程占比如图 5(b)所示, 电动化后新能源车型里程占比达到 100%, 其中纯电动车由 25.7% 提升至 59.9%, 已成为主导运营车型. 作为示

范推广的氢能源车, 其里程占比为 0.4%, 车辆使用率有提升空间. PHEV-CNG 车辆里程占比仍较高, 达到 35.1%, 此型车辆实际日均里程数相较电动化前增加 3.1 万 km, PHEV 类车型仍然是当前运营主力车型.

2.2 WTW 阶段排放总量

WTW 阶段排放总量如图 6 所示, 对比车队电动化前后(S1 和 S2)情景, 在 WTW 阶段, 电动化后 CO₂ 和 PM_{2.5} 排放量分别增长 32.6% 和 42.6%, CO、NO_x 和 VOC 排放量下降了 28%、34% 和 25%. 除运营里程变动带来的 CO₂ 和 PM_{2.5} 排放量增加外, 电动化后 WTT 阶段近两倍的排放增长抵消了 TTW 阶段的排放缩减. CO、NO_x 和 VOC 的排放量在电动化后的 WTT 阶

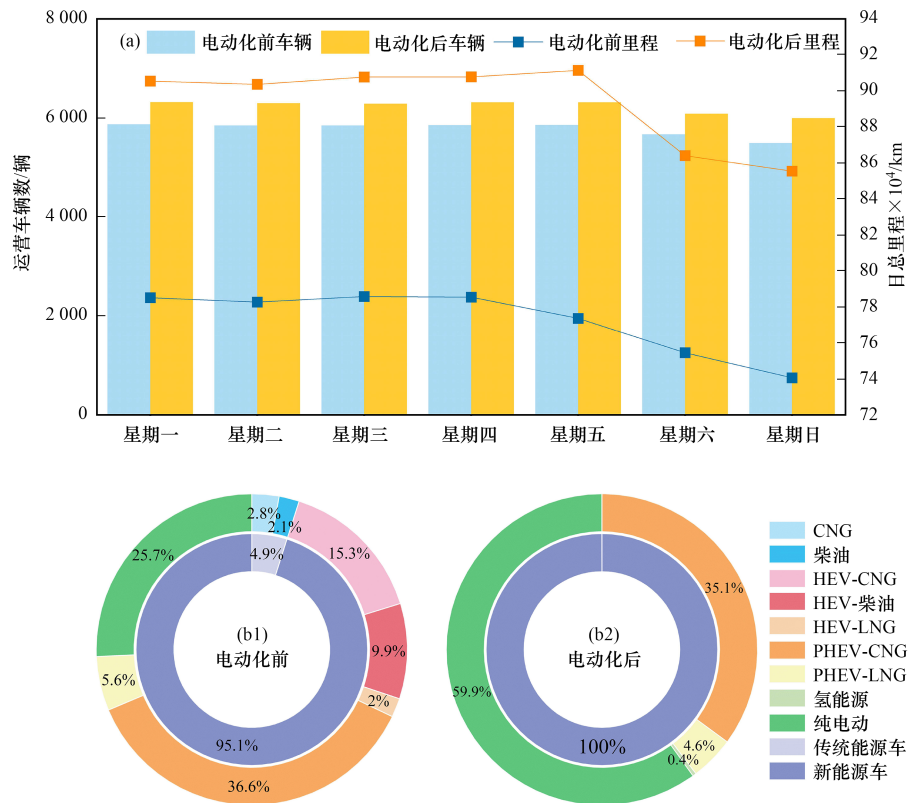


图 5 电动化前后每日运营车辆数,车队总运行里程和各车型里程占比

Fig. 5 Number of vehicles operating per day, total mileage of the fleet per day, and mileage ratio of each vehicle category before and after electrification

段并未显著增长,以上污染物的主要减排收益来源于TTW阶段排放量的显著降低。

车队全面电动化后一般认为TTW阶段排放为近零状态,WTW过程排放变化主要反映在WTT阶段。通过对比S3和S4情景,全面电动化对TTW阶段排放占主导的污染物如CO、NO_x和VOC削减最为明显,CO₂排放量也有14.5%的下降,但PM_{2.5}排放量不降反升。以上对比表明,即使车队进入全面电动化,在2025年预期发电结构状态下,WTW阶段CO₂及颗粒物并未实现有效减排。

在优化发电结构后的车队排放情景S3和S5中,对比S2情景,短期内优化至2025年发电结构可使CO₂、CO、NO_x、VOC和PM_{2.5}排放量下降9.2%、4.0%、3.3%、1.3%和14.2%。而远期优化至2035年发电结构可使CO₂、CO、NO_x、VOC和PM_{2.5}排放量下降38.7%、80.1%、84.4%、92.2%和30.2%。因此,优化发电结构对于电动化过程中的CO₂及颗粒物减排尤为重要,当前火力发电主导的发电结构会较大抵消车队电动化带来的环境收益,同步推进车队替换和电力结构调整进程才能实现减污降碳协同增效。

2.3 WTW阶段分车型排放特征

WTW阶段各车型排放贡献是污染物针对性减

排措施下车辆替换路径选择的依据,各车型WTW阶段CO₂和污染物排放贡献如图7所示。纯电动和PHEV-CNG是CO₂排放的主要贡献车型,结合图5(b)数据,在S2情景下,PHEV-CNG车型以35%的运行里程占比贡献了25%的CO₂排放,而纯电动车60%的里程占比却贡献了70%的排放。PM_{2.5}排放特征与之类似,显然,在当前情境下,如不能降低纯电动车WTW阶段CO₂及PM_{2.5}排放强度,从减污降碳角度看,PHEV-CNG的电动化替换收益不明显。

对于主要由燃烧产生的污染物CO和NO_x,对比S1和S2,内燃机类车型如HEV-CNG、HEV-柴油等高贡献车型替换为纯电车后,减排效果显著。特别是在当前重视NO_x减排的政策下,PHEV-CNG、PHEV-LNG这两类车型仍有较大减排空间。此外,各类CNG燃料车型是VOC排放的主要贡献源,对此类车型进行替换是大幅削减VOC排放的重要路径。综合分析,如果偏向于NO_x及VOC减排,电动化替换提速是最优减排路径。在此基础上考虑CO₂及PM_{2.5}的同步减排提升,则适当保留低车龄的PHEV-CNG车辆继续运营也是合理选项。

2.4 TTW阶段车辆里程与污染物减排

相较于WTT阶段,TTW阶段污染物排放对排放源周边大气环境有更为“明显”的影响,公交车队电

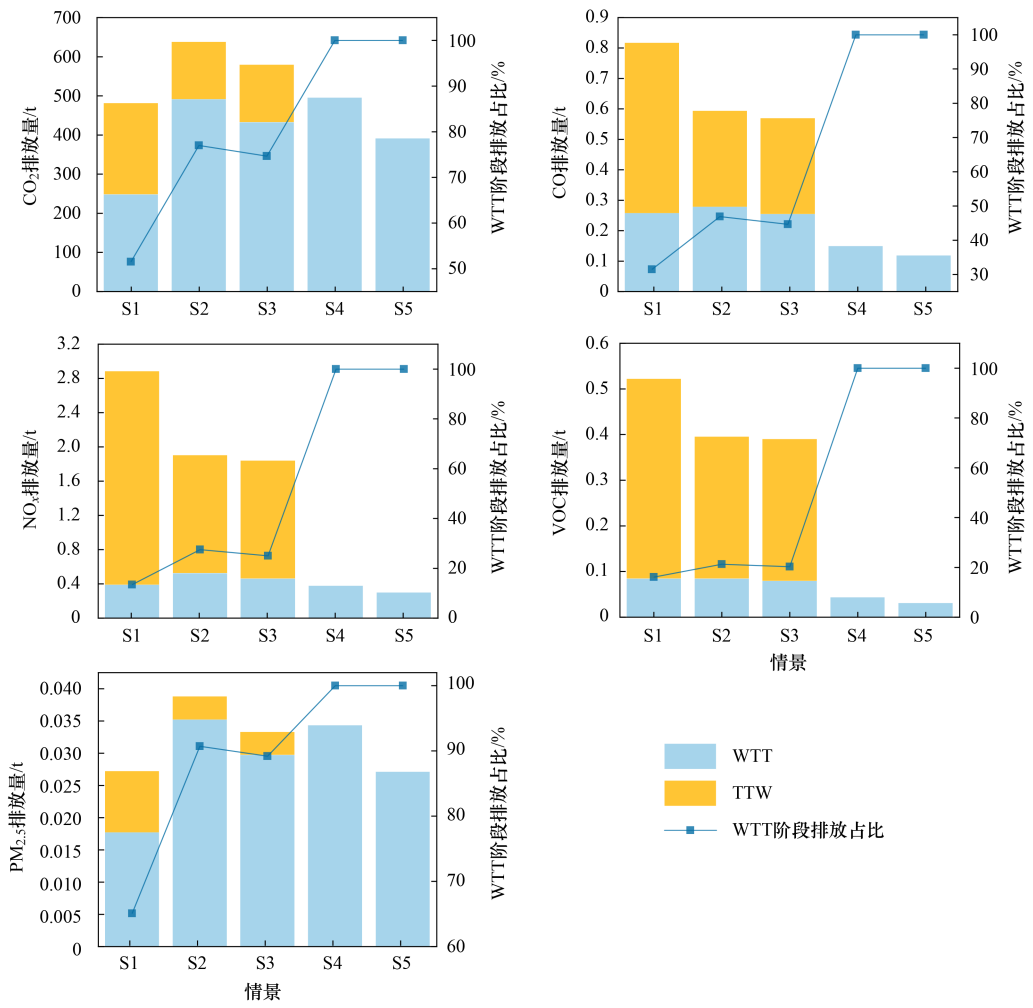


图 6 5 种情景下公交车队 WTW 阶段 CO₂ 和污染物日均排放总量及 WTT 和 TTW 各阶段排放占比

Fig. 6 Daily CO₂ emissions of bus fleets in the WTW phase and the proportion of WTT and TTW emissions in each scenario under five scenarios

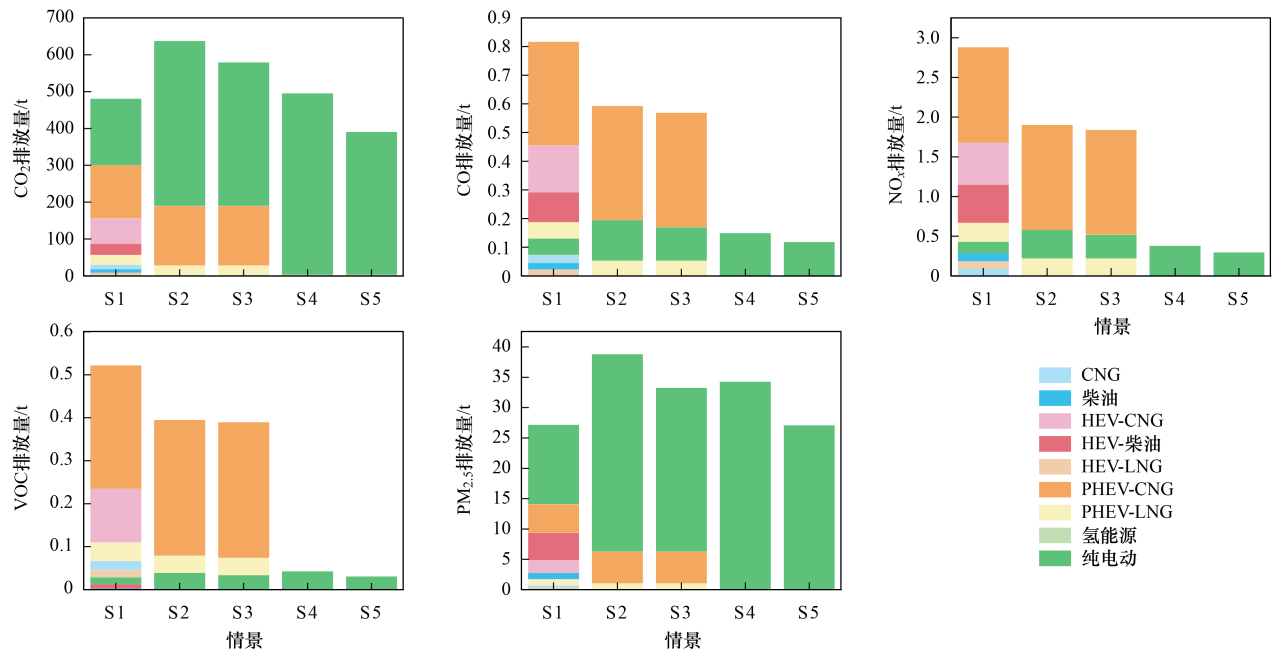


图 7 5 种情景下各车型 WTW 阶段 CO₂ 和污染物排放贡献

Fig. 7 Contribution of CO₂ and pollutant emissions of each vehicle category in WTW under five scenarios

动化替换更为直接的减排收益体现在这一阶段. 电动化进程中通常会分阶段按照运营线路进行整体车辆替换, 因此替换车辆的优先度对减排有较大影响.

如图 8(a)所示, 电动化前后(S1和S2), 约 80% 的车辆日均运营里程在 100~200 km 这一区间内. 从车辆类型看[图 8(b)], 电动化前(S1), 长运营里程

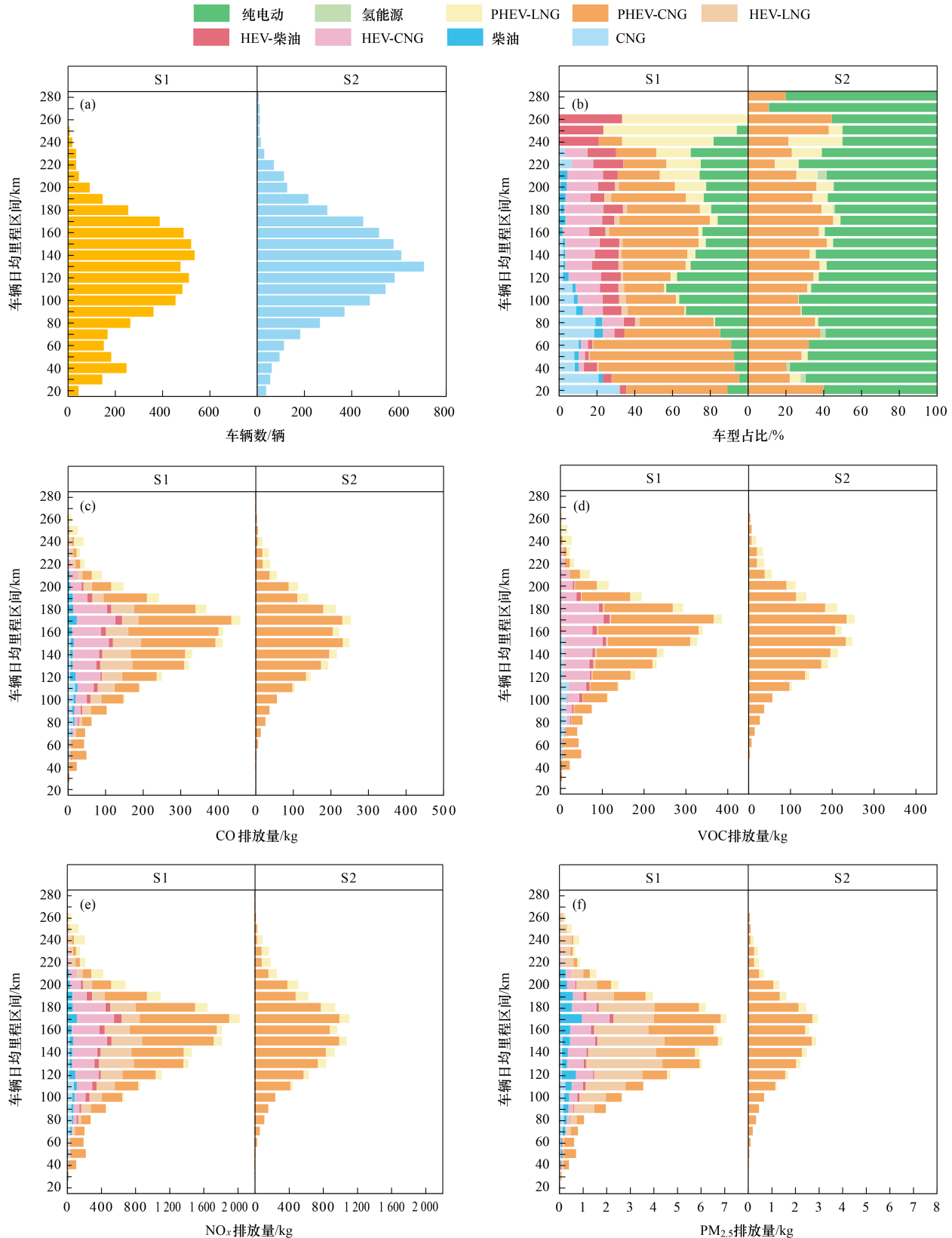


图 8 车辆运行各里程区间车辆分布数及车型占比及 TTW 阶段车辆运行各里程区间一周污染物排放量

Fig. 8 The number of buses and the proportion of bus categories at each mileage interval and the weekly pollutant emissions at each mileage interval in the TTW stage

(150 km 以上)车辆车型主要为柴油、HEV-CNG、PHEV-LNG 和 PHEV-CNG,即使在本轮电动化后(S2),PHEV-CNG 和 PHEV-LNG 车辆在中长运营里程车辆中的占比仍接近 40%。特别是大部分 PHEV-LNG 车辆日均运营里程超过 200 km,且以上车辆车龄较长,运营线路较为集中。中低运营里程车辆中纯电动车型占主导,PHEV-CNG 车辆逐渐退出这类运营线路。

从车辆排放情况分析[图 8(c)~8(f)],中长运营里程的内燃机车辆替换是 TTW 阶段污染物减排的主要原因。其中,HEV-LNG 车型的淘汰对 $PM_{2.5}$ 排放削减的贡献较大。PHEV-CNG 车型在长运营里程区间的各类污染物排放贡献超 50%,特别是对 VOC 排放,因为其车辆排放强度较高,减弱了电动化替换的排放削减程度。因此,对日常运营里程较长的车辆优先进行电动化替换有利于 TTW 阶段污染物的减排进程。

2.5 不确定性分析

排放因子的精细化及本地化及车辆运行数据是影响本研究结果准确性的重要因素。首先,WTW 阶段排放计算主要基于车辆能源消耗量进行计算,但获取逐车燃料消耗数据难度较大,导致车辆能源消耗量只能按车辆大类汇总统计,会降低排放量计算精度。其次,车辆负载对 TTW 阶段排放也有较大影响,本研究未能收集到车辆实时载客人数进行负载估算,因此没有对基于速度的排放因子进行负载修正,会影响排放量计算结果准确性。此外,尽管本研究对大部分轨迹数据进行了填补处理,提升了轨迹数据的准确性,但部分车辆班次在原始记录中未能准确记录,因此,运行轨迹的缺失会影响排放量估算,这部分误差可以通过获取车辆里程表信息等方式在未来研究中采取合理手段进行降低。最后,由于正常运营外的数据并未记录,车辆在公交场站内的怠速运行,调度移动等活动过程中的排放并未能纳入本研究的排放计算。

2.6 电动化政策讨论

从环境收益角度看,本研究表明,随着电力结构的持续优化,公交车队电动化可显著减少 CO_2 和污染物排放,从而使空气更清洁并减少温室气体排放。然而,公交车队电动化也面临一些挑战。根据本研究对车队电力消耗的计算,全面电动化后,车队全年耗电量将从电动化前的 0.71 亿 $kW \cdot h$ 扩大到 2.24 亿 $kW \cdot h$,增长了 3 倍,因此,电动公交还需要大量基础设施投资,包括充电站和电网建设以支持不断增长的充电需求。此外,电动公交车目前的行驶里程有限,这使得它们很难在单线长里程的路线上长期运

营^[46],本研究的结果也表明,在车队中保留部分混合动力车辆做补充是合理的。总的来说,尽管有许多挑战需要解决,公交车队的电动化仍是交通管理部门实现减污降碳的重要手段。

3 结论

(1) 郑州市本轮公交车队电动化显著提升了纯电动车占比,由 25.7% 提升至 59.9%,但车队中 PHEV-CNG 车辆运营里程占比仍较高,达到 35.1%,仍有较大纯电动化潜力。

(2) 在 WTW 周期,单纯的车辆电动化替换并不能全面降低污染物排放,本轮电动化后 CO_2 和 $PM_{2.5}$ 排放量出现增长,分别增长 32.6% 和 42.6%, CO 、 NO_x 和 VOC 排放量分别下降了 28%、34% 和 25%。

(3) 相较于车队全面电动化或优化电力结构两种单一情景,在同时实施全面电动化和电力结构优化的情景下, CO_2 、 CO 、 NO_x 、VOC 和 $PM_{2.5}$ 排放量可下降 38.7%、80.1%、84.4%、92.2% 和 30.2%,同步推进车队电动化和发电结构调整进程才能实现减污降碳协同增效。

(4) 车队全面电动化推进中,应优先替换长运营里程车辆,在电力结构暂未优化情况下,可对低车龄插电混动天然气车型延缓替换。

参考文献:

- [1] 肖致美,徐虹,李立伟,等.基于在线观测的天津市 $PM_{2.5}$ 污染特征及来源解析[J].环境科学,2020,41(10):4355-4363.
Xiao Z M, Xu H, Li L W, et al. Characterization and source apportionment of $PM_{2.5}$ based on the online observation in Tianjin [J]. Environmental Science, 2020, 41(10): 4355-4363.
- [2] 北京市生态环境局.全文实录|北京市现阶段大气 $PM_{2.5}$ 来源解析结果新闻发布会[EB/OL].<http://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/index/xxgk69/sthjlyzwg/fthg/11143030/index.html>, 2021-09-29.
- [3] 中华人民共和国环境保护部.中国移动源环境管理年报[EB/OL].<https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/202212/W020221207387013521948.pdf>, 2022-12-07.
- [4] IEA. Greenhouse gas emissions from energy [EB/OL].<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/greenhouse-gas-emissions-from-energy>, 2023-07-01.
查阅网上资料,请核对网址与文献是否相符
- [5] 朱信凯,龚斌磊.高质量发展背景下实现“双碳”目标的风险挑战与路径选择[J].治理研究,2022,38(3):13-23.
Zhu X K, Gong B L. Risks, challenges and pathways towards carbon peaking and climate neutrality in the context of high-quality development[J]. Governance Studies, 2022, 38(3): 13-23.
- [6] 邢有凯,刘峥延,毛显强,等.中国交通行业实施环境经济政策的协同控制效应研究[J].气候变化研究进展,2021,17(4):379-387.
Xing Y K, Liu Z Y, Mao X Q, et al. Research on co-control effect of environmental economic policies in China's transportation sector [J]. Climate Change Research, 2021, 17(4): 379-387.
- [7] 俞珊,张双,张增杰,等.北京市减污降碳协同控制情景模拟

- 和效应评估[J]. 环境科学, 2023, **44**(4): 1998-2008.
- Yu S, Zhang S, Zhang Z J, *et al.* Scenario simulation and effects assessment of co-control on pollution and carbon emission reduction in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 1998-2008.
- [8] Gong H M, Wang M Q, Wang H W. New energy vehicles in China: policies, demonstration, and progress[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2013, **18**(2): 207-228.
- [9] 李爱敏. 新能源公交车全生命周期成本管理研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2020.
- Li A M. Research on life cycle cost management of new energy bus [D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2020.
- [10] 马晓磊, 闫昊阳, 缪然. 考虑财政补贴的电动公交车队置换优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, **21**(3): 200-205.
- Ma X L, Yan H Y, Miao R. Optimization model of electric bus fleet replacement considering financial subsidies [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, **21**(3): 200-205.
- [11] 张景来, 宫一清. 纯电动公交车推广的综合效益与可行性分析[J]. 环境污染与防治, 2015, **37**(11): 106-110.
- Zhang J L, Gong Y W. Comprehensive benefits and feasibility analysis to popularize pure-electric buses [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2015, **37**(11): 106-110.
- [12] 姜岚清. 电动公交车线路规划方法研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2019.
- Jiang L Q. Research on route planning of electric buses [D]. Suzhou: Soochow University, 2019.
- [13] 郭媛媛. 电动公交车辆和乘务协同调度的双目标优化研究 [D]. 济南: 山东大学, 2022.
- Guo Y Y. Research on the Bi-objective integrated electric bus and crew scheduling problem [D]. Ji'nan: Shandong University, 2022.
- [14] 资丁源. 基于公交大数据的超长公交线路调整与调度优化 [D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
- Zi D Y. Adjustment and scheduling optimization for long distance bus lines based on public transit big data [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.
- [15] 唐春艳, 李小雨. 多车型纯电动公交车使用下的混合车队替换优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, **21**(2): 151-157.
- Tang C Y, Li X Y. Optimizing mixed transit fleet replacement with multi-type battery electric buses [J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, **21**(2): 151-157.
- [16] 王人洁. 电动车和天然气车能源环境影响的燃料生命周期评价研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- Wang R J. Fuel-cycle assessment of energy and environmental impacts from electric vehicles and natural gas vehicles [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [17] 闫琰. 城市公共交通系统能源消耗模型和计算方法[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- Yan Y. Urban public transport energy consumption model and calculation method [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [18] 富莉. 城市公交电动化转型机理及碳减排效果研究——以深圳市为例[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- Fu L. Research on the mechanism and carbon emission reduction effect of urban bus electrification—a case study of Shenzhen [D]. Xuzhou: Beijing: China University of Mining and Technology, 2018.
- [19] 付佩, 兰利波, 陈颖, 等. 面向2035的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价[J]. 环境科学, 2023, **44**(4): 2365-2374.
- Fu P, Lan L B, Chen Y, *et al.* Life cycle prediction assessment of energy saving and new energy vehicles for 2035 [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 2365-2374.
- [20] 林晓丹, 田良, 吕彬, 等. 基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3515-3521.
- Lin X D, Tian L, Lü B, *et al.* Energy conservation and emissions reduction benefits analysis for battery electric buses based on travel services [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3515-3521.
- [21] Yu Y, Jin Z X, Li J Z, *et al.* Low-carbon development path research on China's power industry based on synergistic emission reduction between CO₂ and air pollutants [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **275**, doi: 10.1016/j.jclepro. 2020. 123097.
- [22] Lv Z Y, Wu L, Yang Z W, *et al.* Comparison on real-world driving emission characteristics of CNG, LNG and hybrid-CNG buses [J]. *Energy*, 2023, **262**, doi: 10.1016/j. energy. 2022. 125571.
- [23] Rosero F, Fonseca N, López J M, *et al.* Effects of passenger load, road grade, and congestion level on real-world fuel consumption and emissions from compressed natural gas and diesel urban buses [J]. *Applied Energy*, 2021, **282**, doi: 10.1016/j. apenergy. 2020. 116195.
- [24] 楼狄明, 成伟, 冯谦. 国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 864-869.
- Lou D M, Cheng W, Feng Q. On road particle emission characteristics of a Chinese phase IV natural gas bus [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 864-869.
- [25] Xylia M, Leduc S, Laurent A B, *et al.* Impact of bus electrification on carbon emissions: the case of Stockholm [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **209**: 74-87.
- [26] Song Q B, Wang Z S, Wu Y, *et al.* Could urban electric public bus really reduce the GHG emissions: a case study in Macau? [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **172**: 2133-2142.
- [27] Ayetor G K, Mbonigaba I, Sunnu A K, *et al.* Impact of replacing ICE bus fleet with electric bus fleet in Africa: a lifetime assessment [J]. *Energy*, 2021, **221**, doi: 10.1016/j. energy. 2021. 119852.
- [28] 张智. 天津市实施公交电动化的战略思维与路径[J]. 城市, 2013, (9): 43-46.
- [29] 陈光悦. 深圳市新能源公交推广发展对策研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2018.
- Chen G Y. Research on the promotion and development of new energy public transport in Shenzhen [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2018.
- [30] 颜映果, 黄嘉盛. 广州公交电动化推广及应用分析[J]. 城市公共交通, 2020, (2): 36-41.
- Yan Y G, Huang J S. The promotion of Guangzhou electric public buses and the applied analysis [J]. *Urban Public Transport*, 2020, (2): 36-41.
- [31] 林晓丹. 基于生命周期视角的北京城市公交出行环境影响研究[D]. 海口: 海南大学, 2015.
- Lin X D. Research on the environmental impact of Beijing urban buses travel from a life cycle perspective [D]. Haikou: Hainan University, 2015.
- [32] 张元. 宜宾市公共交通电动汽车应用及发展研究[D]. 成都: 西华大学, 2016.
- Zhang Y. Research on the application and development of electric vehicles for public transport in Yibin [D]. Chengdu: Xihua University, 2016.

- [33] 贺晓婧, 廖诗武, 赵子潇, 等. 城市电动汽车规模化发展的大气环境影响研究[J]. 中国环境管理, 2020, 12(3): 77-84.
He X J, Liao S W, Zhao Z X, *et al.* The impact of large-scale development of urban electric vehicles on the atmospheric environment[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(3): 77-84.
- [34] 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.
- [35] He X Y, Zhang S J, Ke W W, *et al.* Energy consumption and well-to-wheels air pollutant emissions of battery electric buses under complex operating conditions and implications on fleet electrification[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171: 714-722.
- [36] Dreier D, Silveira S, Khawaja D, *et al.* Well-to-wheel analysis of fossil energy use and greenhouse gas emissions for conventional, hybrid-electric and plug-in hybrid-electric city buses in the BRT system in Curitiba, Brazil[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, 58: 122-138.
- [37] Mao F, Li Z H, Zhang K. Carbon dioxide emissions estimation of conventional diesel buses electrification: a well-to-wheel analysis in Shenzhen, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123048.
- [38] García A, Monsalve-Serrano J, Lago Sari R, *et al.* Life cycle CO₂ footprint reduction comparison of hybrid and electric buses for bus transit networks[J]. Applied Energy, 2022, 308, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118354.
- [39] 郑州市统计局. 郑州统计年鉴(2022)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [40] 郑州市公共交通集团有限公司. 郑州市公共交通集团有限公司简介[EB/OL]. <https://www.zhengzhoubus.com/aboutus.aspx>, 2022-12-01.
- [41] Zou C, Wu L, Wang Y N, *et al.* Evaluating traffic emission control policies based on large-scale and real-time data: a case study in central China[J]. Science of the Total Environment, 2023, 860, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160435.
- [42] Zhang Y, Wu L, Zou C, *et al.* Development and application of urban high temporal-spatial resolution vehicle emission inventory model and decision support system[J]. Environmental Modeling & Assessment, 2017, 22(5): 445-458.
- [43] 国家能源局河南监管办公室. 2017年12月河南省电力供需情况通报[EB/OL]. http://henb.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=b626510c-3d16-44ec-a69b-c1a6618ee8fe&columnId=Col_jgdt, 2018-01-23.
- [44] Yu Q, Yuan J. TransBigData: a python package for transportation spatio-temporal big data processing, analysis and visualization[J]. Journal of Open Source Software, 2022, 7(71), doi: 10.21105/joss.04021.
- [45] 郝旭, 王贺武, 李伟峰, 等. 基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的PHEV二氧化碳排放分析[J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1705-1714.
Hao X, Wang H W, Li W F, *et al.* Analysis of PHEV CO₂ emission based on China's grid structure and travelling patterns in mega cities[J]. Environmental Science, 2019, 40(4): 1705-1714.
- [46] 郭献超. 纯电动需求响应公交路径规划研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
Guo X C. Research on bus route planning of pure electric demand response[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

CONTENTS

Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China	LIU Run-pu, PENG Shuan, CHEN Yu-shuo, <i>et al.</i> (1233)
Evolution and Influencing Factors of Spatial Correlation Network of Construction Carbon Emission in China from the Perspective of Whole Life Cycle	REN Xiao-song, LI Zhao-rui (1243)
Efficiency Characteristics and Evolution Patterns of Urban Carbon Metabolism of Production-Living-Ecological Space in Beijing-Tianjin-Hebei Region	TIAN Chao, CHENG Lin-lin, SHAO Ying-chao (1254)
Assessment of CO ₂ Co-benefits of Air Pollution Control Policies in Taiyuan's 14th Five-Year Plan	XIAO Ting-yu, SHU Yun, LI hui, <i>et al.</i> (1265)
Coordinated Control of Carbon Emission Reduction and Air Quality Improvement in the Industrial Sector in Hunan Province	LI Nan, LIU Wan-wan, ZHU Shu-han, <i>et al.</i> (1274)
Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Medium- and Long-term Study	ZHANG Jing, YANG Meng, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1285)
Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou	ZOU Chao, WANG Ya-nan, WU Lin, <i>et al.</i> (1293)
Multi-scale Driving Mechanism of Urbanization on PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River	ZHANG Zheng, ZHOU Ting-gang, ZHOU Zhi-heng, <i>et al.</i> (1304)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomerations on the Northern Slope of Tianshan Mountains	WANG Xiang-nan, ZHANG Zhe, LIU Fang-qing (1315)
Spatial Variability and Source Apportionment of PM _{2.5} Carbon Components in Tianjin	WU Fu-liang, WU Jian-hui, DAI Qi-li, <i>et al.</i> (1328)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} in Huaxi District, Guiyang	GUI Jia-qun, YANG Yuan, WANG Xian-qin, <i>et al.</i> (1337)
Pollution Characteristics, Source Apportionment, and Meteorological Response of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xinxiang, North China	LIU Huan-jia, LI Lan-qing, LI Huan-li, <i>et al.</i> (1349)
Characterization of Metal Elements in Atmospheric PM _{2.5} and Health Risk Assessment in Heze in Winter from 2017 to 2018	DU Hong-xuan, REN Li-hong, ZHAO Ming-sheng, <i>et al.</i> (1361)
Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Beijing	PAN Jin-xin, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1371)
Analysis of Photochemical Characteristics and Sensitivity of Atmospheric Ozone in Nanjing in Summer	LUO Li-tong, ZHANG Yan-lin, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (1382)
Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation	WU Ye-zheng, ZHANG Xin, GU Jun, <i>et al.</i> (1392)
Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the Middle Reaches of the Yangtze River	LU Hong-bin, LU Shao-yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (1402)
Spatiotemporal Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Model	CUI Zhi-mou, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, <i>et al.</i> (1415)
Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing	ZHANG Rui-xi, LIU Ya-jun, LUO Yong-nan, <i>et al.</i> (1428)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Yangtze River Basin	LI Si-qiong, WANG Hua, CHU Lin-you, <i>et al.</i> (1439)
Assessment of Microplastic Pollution and Estimation of Annual Emission Volume in the Dongshan Canal of Yichang City	DING Shuang, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1448)
Occurrence Characteristic and Risk Assessment of Microplastics in Sishui River (Xingyang Section)	ZHAO Chang-min, HE Bing, LI He-tong, <i>et al.</i> (1457)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	GAO Li, LI Ling-yun, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i> (1468)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Oujiang River Basin in Southern Zhejiang Province	ZHONG Yi-xin, LI Li-xiang, WU Xin, <i>et al.</i> (1480)
Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake	MA Yan, SUN Chen, BI Jia-le, <i>et al.</i> (1492)
Change and Prediction of Water Purification Function in the South Bank of Hangzhou Bay in the Past 20 Years	WANG Shan-shan, CAO Gong-ping, XU Ming-wei, <i>et al.</i> (1502)
Effects of Land Use Types on Water Quality at Different Buffer Scales: Tianjin Section of the Haihe River Basin as an Example	DAI Meng-jun, ZHANG Bing, DU Qian-qian, <i>et al.</i> (1512)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Shallow Groundwater in Anqing Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, SONG Yang, LI Ying-chun, <i>et al.</i> (1525)
Dynamic Changes of Dissolved Organic Matter Derived from Algal Decomposition and the Environmental Effects in Eutrophic Lakes	ZHANG Jin, CHEN Ming-ying, HAO Zhi-neng, <i>et al.</i> (1539)
Degradation of Carbamazepine in Water by UV-activated Sulfite Process	LIN Tao, YUAN Yu-jie (1553)
Detection, Generation, and Control of Disinfection By-products of Reclaimed Water	LIAO Yu-feng, WANG Zheng, PAN Yang, <i>et al.</i> (1561)
Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System	HE Qiang, CHEN Bo-wen, YANG Yu-jing, <i>et al.</i> (1577)
Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on Improved Remote Sensing Ecological Index	FU Kai-xiang, JIA Guo-dong, YU Xin-xiao, <i>et al.</i> (1586)
Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI	ZHAO Jia-li, LI Xing, SUN Bing (1598)
Quantitative Assessment of the Impact of Climate Change on the Growing Season of Vegetation Gross Primary Productivity in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	XU Yong, PAN Yu-chun, ZOU Bin, <i>et al.</i> (1615)
Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis	LI Jian-ming, KANG Yu-xin, JIANG Fu-zhen, <i>et al.</i> (1629)
Effects of Continuous Annual Crop Rotation and Fallow on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon	LU Ze-rang, LI Yong-mei, YANG Chun-huai, <i>et al.</i> (1644)
Effects of Four Amendments on Fertility and Labile Organic Carbon Fractions of Acid Purple Soil	DING Xin-ru, YAN Ning-zhen, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (1655)
Changes in Soil Nitrogen Components and Their Relationship with Environmental Factors with Different Tea Plantation Ages	SHAO Qi, WU Tao, XIE Xue-feng, <i>et al.</i> (1665)
Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics of Typical Wetland Soils in the Lower Yellow River	WANG Chuan-ying, WANG Kai-yue, WANG Hao-ran, <i>et al.</i> (1674)
Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut Field	SONG Ning-ning, LI Meng-jia, WANG Xue-xia, <i>et al.</i> (1684)
Effects of Straw Returning and Biochar Addition on Greenhouse Gas Emissions from High Nitrate Nitrogen Soil After Flooding in Rice-vegetable Rotation System in Tropical China	HU Tian-yi, CHE Jia-yue, HU Yu-jie, <i>et al.</i> (1692)
Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland	CHEN Xi, ZHANG Yan-jun, ZOU Jun-lie, <i>et al.</i> (1702)
Distribution Prediction of Soil Heavy Metals Based on Remote Sensing Temporal-Spatial-Spectral Features and Random Forest Model	WANG Ze-qiang, ZHANG Dong-you, XU Xi-bo, <i>et al.</i> (1713)
Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (1724)
Characteristics of Cd Flux in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi	YANG Ye-yu, LI Cheng, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (1739)
Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Fengdong New District Based on Information Diffusion Model	YANG Nan-nan, HAN Ling, LIU Ming (1749)
Traceability Analysis and Environmental Quality Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in West Hunan Province	XIAO Kai-qi, XU Hong-gen, GAN Jie, <i>et al.</i> (1760)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Typical Industry Reclaimed Soil	SHEN Cheng, WANG Wen-juan, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (1769)
Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province	DONG Xin-yue, WU Yong, ZHOU Zi-han, <i>et al.</i> (1781)
Effect of Silica Fertilizer(Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice	YI Xuan-tao, OUYANG Kun, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (1793)
Effect of EDDS Application on Soil Cu/Cd Availability and Uptake/transport by Castor	LIU Wen-ying, WU Gang, HU Hong-qing (1803)
Blocking Effects of Foliar Conditioners on Cadmium, Arsenic, and Lead Accumulation in Wheat Grain in Compound-contaminated Farmland	XIAO Bing, WANG Qiu-shi, GAO Pei-pe, <i>et al.</i> (1812)
Soil Microbial Community Structure and Functional Diversity Character of Abandoned Farmland in Minqin Oasis	LI Chang-le, ZHANG Fu, WANG Li-de, <i>et al.</i> (1821)
Microbial Mechanisms of Removal of Phthalic Acid Esters in Purple Soils Revealed Using Metagenomic Analysis	LI Yu-tong, YU Hai, LIU Kun, <i>et al.</i> (1830)
Air Microbial Contamination and Risk of Respiratory Exposure of Workers in Chicken Farms	BAI Yu-qiao, SUN Xing-bin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (1840)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Multi-environmental Media and <i>Bellamyia aeruginosa</i> of Manao River	GAO Ya-kun, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1849)
Biological Effect of Microplastics with Different Functional Groups on the Bacterial Communities and Metabolic Functions of Zebrafish (<i>Danio rerio</i>) Embryos	YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, BAO Xu-hui, <i>et al.</i> (1859)