

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测 陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 (1)

粤港澳大湾区大气PM_{2.5}浓度的遥感估算模型 代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 (8)

典型输送通道城市冬季PM_{2.5}污染与传输变化特征 代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 (23)

郑州市夏季PM_{2.5}中二次无机组分污染特征及其影响因素 和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 (36)

重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析 彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沫, 翟天宇 (48)

2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析 陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 (61)

2020年“三连击”台风对我国东部地区O₃污染的影响分析 花丛, 尤媛, 王晴, 张碧辉 (71)

北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析 张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 (81)

机动车减排降碳综合评价体系综述 范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 (93)

基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景 杨峰, 张贵驰, 孙伟, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 (104)

广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力 翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王焯嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 (115)

给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素 张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 (123)

中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评估 襄殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 (131)

太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评估 张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 (140)

水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价 张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈冈, 沈晓盛 (151)

长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析 姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 (159)

珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用 李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 (173)

富春江水库浮游植物功能群变化的成因 张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 (181)

合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制 陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 (194)

新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素 李军, 欧阳宏涛, 周金龙 (207)

京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素 李魁明, 王晓燕, 姚罗兰 (218)

近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析 王耕, 张芙蓉 (228)

光伏电站建设对陆地生态环境的影响: 研究进展与展望 田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 (239)

大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因 石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 (248)

西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究 徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 (262)

不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响 崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 (275)

基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测 帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋珉 (287)

基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测 石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 (300)

长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态 胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨浩, 高超 (314)

漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子 申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 (323)

不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响 陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 (335)

紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征 李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 (343)

氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响 薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 (354)

重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析 梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 (364)

中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展 刘浩然, 邢静怡, 任文杰 (376)

基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测 解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 (386)

基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析 马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 (396)

铜陵某废弃硫铁矿矿区土壤重金属污染特征及来源解析 李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 (407)

天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价 李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 (417)

基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应 唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 (429)

腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值 胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍茂, 魏世强 (439)

生物质炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复 吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 (450)

人体微塑料污染特征及健康风险研究进展 马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 (459)

聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(*Lactuca sativa*)生理生态的影响 牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霆, 刘淑丽 (470)

转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制 刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (480)

微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响 赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 (489)

微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响 刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 (496)

民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测 王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 (508)

不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应 郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 (520)

厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响 刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 (530)

土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征 陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 (543)

叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响 梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二苹, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 (555)

昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析 王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 (567)

基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征 黄福义, 周曙仟, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张娴 (576)

城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素 刘可, 童蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 (584)

氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制 刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 (594)

CO₂气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb²⁺吸附性能对比 江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 (606)

《环境科学》征订启事(70) 《环境科学》征稿简则(193) 信息(334,554,605)

机动车减污降碳综合评价体系综述

范朝阳¹, 佟惠^{1,2}, 梁晓宇¹, 彭剑飞^{1*}

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津市城市交通污染防治研究重点实验室, 天津 300071; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 机动车排放已成为我国大气污染的重要来源之一, 推动机动车减污降碳工作是助力区域环境质量改善和双碳目标实现的关键。构建全面科学的机动车减污降碳协同评价体系和量化方法, 是科学有效开展机动车减污降碳工作的重要前提。全面综述现有大气减污降碳协同性评价和综合环境效益核算方法, 在此基础上聚焦机动车排放特征, 系统梳理机动车协同减排评价关键指标, 并从健康暴露成本、气候变化影响成本和污染物治理成本这3个方面综述政策效果的量化方法, 可为相关减排政策的制定、方案的组合选取及其效果评估提供理论支持。未来机动车协同减排评估研究应加快建立统一指标体系、深入分析环境效益的空间分布、重点关注机动车电动化导致的污染转移问题和探究极端天气的气候变化成本量化方法。

关键词: 机动车; 减污降碳; 指标体系; 环境效益; 政策评价

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)01-0093-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202301128

Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction

FAN Zhao-yang¹, TONG Hui^{1,2}, LIANG Xiao-yu¹, PENG Jian-fei^{1*}

(1. Tianjin Key Laboratory of Urban Transport Emission Research, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: Vehicle emissions have become one of the most important air pollution sources in China. Promoting vehicle synergistic reduction of pollution and carbon is the key to improving regional environmental quality and achieving the carbon peaking and carbon neutrality goals. Building a collaborative evaluation system and comprehensive quantitative method is an important prerequisite for scientific and effective implementation of vehicle pollution and carbon synergistic reduction. Therefore, it is significant to extensively review existing synergistic evaluation methods and comprehensive environmental benefit accounting methods of atmospheric pollution and carbon reduction. On this basis, we focused on vehicle emission characteristics, systematically organized the key indicators of vehicle collaborative reduction evaluation, and summarized quantitative methods of policy effects from three aspects (health exposure cost, climate change cost, and pollutant control cost), to provide theoretical support for policy formulation, schemes selection, and their effect evaluation. For the future, the assessment of vehicle coordinated emission reduction is proposed to accelerate unified index system establishment, deeply analyze the spatial distribution of environmental benefits, focus on the pollution transfer caused by vehicle electrification, and explore the quantitative methods of climate change cost due to extreme weather.

Key words: vehicles; pollution and carbon synergistic reduction; index system; environmental benefits; policy evaluation

空气质量持续改善和实现双碳目标已成为我国可持续发展和生态文明建设的重要战略方向。目前, 我国能源消费仍以一次化石燃料为主, 使得污染物和温室气体排放具有同根同源同过程的特点^[1-4]。在大气污染防治初期阶段, 重污染天气的频发引起公众广泛关注, 相比之下气候变化带来的影响相对滞后未能引起足够的重视, 这促使国家和地方政府对污染物与温室气体采取区别治理的方式, 将污染物减排作为早期工作的重心^[5]。然而, 空气污染和气候变化的交互作用将给数以亿计的人们带来额外的“气候惩罚”^[6], 严重危害生态环境与人体健康。例如, 黑碳和甲烷等污染物的大量排放会加剧气候变暖, 气候变化同时也会进一步影响污染物的运输与扩散^[7], 对地面臭氧生成产生放大效应。由此可见, 污染物与温室气体排放的同根源性使得其治理措施存在一定程度的重合, 减污降碳的协同推进可以对空气质量改善和应对气候变化起到事半功倍的效果。

事实上, 早在2001年政府间气候变化专门委员会(IPCC)就在第三次评估报告中提出污染物与温室气体协同减排的概念^[8]。2021年, 我国发布“十四五”规划指出要“协同推进减污降碳, 持续改善环境质量”^[9], 随后生态环境部等七部门联合印发《减污降碳协同增效实施方案》^[10], 对行业治理的多要素协同、政策协同和机制协同等方面提出了更高的要求。

相较于其他重点行业, 交通领域能源消费结构(主要为汽柴油)较为单一, 污染物与温室气体排放的协同性更加显著^[11-13]。随着交通运输需求的不断增加, 机动车排放已成为我国大气污染的重要来源。

收稿日期: 2023-01-20; 修订日期: 2023-03-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0135000); 国家自然科学基金项目(42175123); 天津市自然科学基金项目(20JCYBJC01270)

作者简介: 范朝阳(1996~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为低碳交通和环境管理, E-mail: zhaoyangfan@mail.nankai.edu.cn

* 通信作者, E-mail: pengjianfei@nankai.edu.cn

之一。城市大气源解析结果显示,机动车源对细颗粒物($PM_{2.5}$)直接贡献占比约为 15%~30%^[14-23],对挥发性有机物(VOCs)的排放占比可高达 45%^[24-27],其排放的氮氧化物(NO_x)和 VOCs 也是二次有机气溶胶和臭氧生成的重要前体物^[28]。同时,机动车尾气管排放高度与人群呼吸带高度重合,更易对人体健康造成伤害。另一方面,交通运输也是中国碳排放增长最快的领域之一。国际能源署(IEA)^[29]发布的最新数据表明,1990~2020 年的 30 年间,我国交通领域的碳排放增长率为 853%,远高于同期碳排放总量增长率(383%)。然而,当前中国千人汽车保有量仅为 180 辆^[30],远低于发达国家平均水平(500~900 辆每千人)^[31-33]。随着运输需求与机动车保有量的持续增加,相较于水泥和钢铁等碳排放即将步入峰值平台期的重点行业,交通部门碳排放仍具有较大的增长潜力,节能降碳工作面临巨大挑战。因此,推动机动车减污降碳工作是助力区域环境质量改善和双碳目标实现的关键。

目前,各个国家及地区已陆续实施多项机动车减污降碳举措,但是其对污染物和温室气体的减排效果各有侧重^[34]。例如淘汰老旧汽车、加严排放标准和提高油品质量等政策聚焦机动车 NO_x 和 $PM_{2.5}$ 污染防治工作;推广替代燃料与新能源汽车、车身轻量化和制动能量回收等政策则更关注车辆节能减排。由于污染物与温室气体的量化单位和衡量标准不同,如何科学系统地评价政策实施的协同减排效果,为方案的选取和组合提供决策支撑已成为亟需解决的问题。然而,针对机动车减污降碳评价方法的研究较少,指标体系不甚完善。同时各城市机动车保有量、车队构成和电网构成存在差异,致使各地机动车排放特点不一且相同减排政策实施效果不一,但是现有研究大多关注总量核算,忽略了路网附近浓度高峰、人群聚集区健康暴露与产业集群等空间分布问题,从而大大降低了环境效益评价的准确性,模糊了政策实施的针对性。尽管许多学者在大气减污降碳综合评价领域开展了广泛研究,但尚未有文章对其评价与核算方法进行系统梳理和详细综述,对构建移动源协同减排评估方法的经验借鉴有限。因此,本研究立足于“十四五”减污降碳协同增效方针,全面综述了现有大气减污降碳协同性评价方法及其综合环境效益核算方法,在此基础上,梳理适用于机动车排放特征的关键评价指标和量化方法,以期对机动车减排政策的效果评估和方案选取提供理论支持和科学参考,对后续相关政策的制定和监管工作具有借鉴意义。

1 减污降碳协同性评价方法

1.1 大气减污降碳协同性评价指标与评价体系

早期研究中,通常仅根据减排政策的单向环境影响来探讨减污降碳的综合效果,即大气污染防治政策对温室气体排放的影响或碳减排政策对大气污染物减排的促进作用^[35]。例如叶芳羽等^[36]通过模拟研究发现碳权政策可以显著降低区域大气二氧化硫(SO_2)和 $PM_{2.5}$ 浓度,具有明显的碳污协同效应;Yang 等^[37]使用多目标分析法比较了不同措施减排效益,研究指出 $PM_{2.5}$ 减排政策可以有效减少二氧化碳(CO_2)排放,但 CO_2 减排政策的 $PM_{2.5}$ 减排效果欠佳。之后,有学者提出协同坐标系法(图 1),即将二维坐标系中的横纵轴分别代表温室气体和污染物减排效果,若减排指标位于第一象限则表明该项措施具有减污降碳协同性^[12, 13, 34, 38, 39]。此外,部分研究通过引入其他参数实现对污染物与温室气体协同性的准确量化(表 1)。李海生等^[40]将单位 GDP 的 SO_2 排放量与 CO_2 排放量线性拟合,使用相关系数表征减污降碳协同性;俞珊等^[41]将 CO_2 与污染物的减排率比值定义为协同控制效应分级指数,并依据数值将其划分为 6 个等级。此外,还有学者引入了计量经济学的评估手段,如唐湘博等^[42]使用耦合协调度模型量化了污染物(SO_2 、 NO_2 和 PM)与温室气体排放当量间的减排协调程度;郭立祥^[43]使用非径向方向性距离函数分别量化 CO_2 与 $PM_{2.5}$ 的边际减排成本,从而用成本相关性表征减污降碳相关性;牛彤^[44]构建了一个能源-环境-经济模型,计算单位产值排放强度的减排量,用相对减排量增长率的相关性衡量减污降碳的协同程度,进而分析不同地区工业的协同减排潜力。

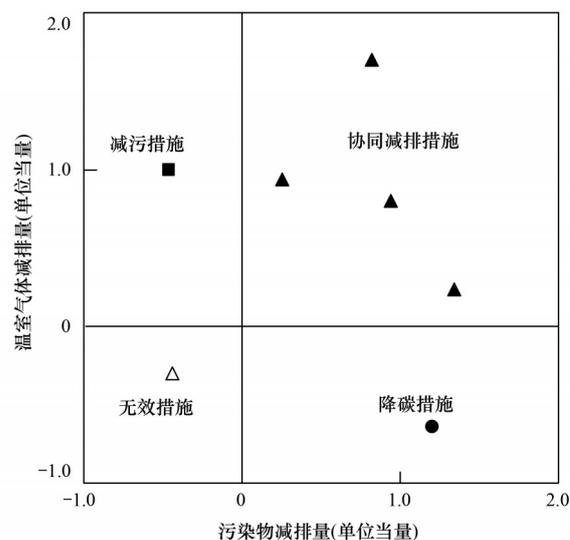


图 1 减污降碳协同控制坐标系示意

Fig 1 Co-control effects coordinate system of pollution and carbon reduction

表1 减污降碳协同性评价指标

Table 1 Co-control effects evaluation index of pollution and carbon reduction

方法	变量选取	公式	文献
相关系数法	单位GDP SO ₂ 排放量与CO ₂ 排放量	$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2}$ $R^2 \text{ 为回归分析相关系数; } x \text{ 和 } y \text{ 为两组相关变量; } \hat{y}_i \text{ 为 } x_i \text{ 对应的 } y_i \text{ 预测值; } \bar{y}_i \text{ 为 } y \text{ 的均值}$	[40]
交叉弹性系数法	单个污染物(SO ₂ 、NO _x 和PM ₁₀ 或VOCs)与CO ₂ 排放量的变化率	$Els_{g/a} = \frac{\Delta g/G}{\Delta a/A}$ $Els_{g/a} \text{ 为弹性系数; } G \text{ 和 } \Delta g \text{ 分别为温室气体 } g \text{ 的排放量和减排量; } A \text{ 和 } \Delta a \text{ 分别为大气污染物 } a \text{ 的排放量和减排量}$	[41]
耦合协调度模型	污染物当量(SO ₂ 、NO ₂ 和PM排放量归一化得到)与CO ₂ 排放量	$D = \sqrt{\frac{2\sqrt{U_1 U_2}}{U_1 + U_2} \times (aU_1 + bU_2)}$ $D \text{ 为耦合协调度; } U_1 \text{ 为污染物排放当量; } U_2 \text{ 为 } CO_2 \text{ 排放量; } a \text{ 和 } b \text{ 为待定系数}$	[42]
非径向方向性距离函数	PM _{2.5} 与CO ₂ 的排放量及其边际减排成本	$T = \alpha \cdot \frac{MACB_{PM_{2.5}} - MACT_{PM_{2.5}}}{MACB_{PM_{2.5}}} + \beta \cdot \frac{MACB_{CO_2} - MACT_{CO_2}}{MACB_{CO_2}}$ $T \text{ 为协同效应系数; } MACB \text{ 为单独减污下的边际减排成本; } MACT \text{ 为协同减排下的边际减排成本; } \alpha \text{ 和 } \beta \text{ 为待定系数}$	[43]
截面回归法	污染物总量与CO ₂ 排放量的相对减排增长率	$CORR_{ij,t} = 1 - \frac{1}{2} \left\{ \frac{r_{it} - \bar{r}_i}{\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (r_{it} - \bar{r}_i)^2}} - \frac{r_{jt} - \bar{r}_j}{\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (r_{jt} - \bar{r}_j)^2}} \right\}$ $CORR_{ij,t} \text{ 为协同减排水平指数; } r_{it} \text{ 和 } r_{jt} \text{ 为污染物减排 } i \text{ 和 } CO_2 \text{ 减排 } j \text{ 的相对减排增长率; } \bar{r}_i \text{ 和 } \bar{r}_j \text{ 为 } r_{it} \text{ 和 } r_{jt} \text{ 年平均值}$	[44]

然而以上指标仅能从单一角度表征碳污协同性强弱,为此许多学者、科研院所和政府部门着手于减污降碳协同评价指标体系的构建,引入其他指标全面表征政策协同程度。生态环境部环境规划院在考虑环境现状、工作进展和减污降碳协同性等因素的基础上,构建了大气环境减污降碳协同指数,利用单位经济产出碳排评估指数和环境健康影响评估指数组成的无量纲参数,对政策实施的减排效果进行评价^[45]。此后规划院将协同指数在浙江省进行本地化推广,与浙江省生态环境厅联合发布减污降碳协同增效区域指数^[46],从协同效果、协同路径与协同管理这3个方面的24项指标出发,对各地区进行工作成效横向排名与任务进展纵向比较,进而通过排序对各区域政策协同效果进行定量化评估。于雷等^[2]使用碳污协同程度与碳排放量双指标约束条件作为分区标准,筛选协同性高、碳排放总量大且排放强度高的企业划为减污降碳重点管控区。杨儒浦等^[47]提出了工业园区减污降碳协同发展指数,参照工业示范园区和绿色园区的建设标准,构建了包含目标层、准则层和指标层多个参数的指标体系,通过调研与计量的方式获取各项指标,并基于层次分析法对指标赋权,最终得出协同指数全面评价工业园区的减污降碳协同性。总的来说,目前有关协同性评估指标体系的研究更侧重于政策措施的合理性与落地效果,较少关注其经济成本与环境效益分析,此外由于指标体系多选用统计数据,更适用于工作评价与绩效

考核,对政策预期收益的评估能力略有不足。

1.2 机动车减污降碳协同性评价方法

由于各行业排放特征不一,综合性评价方法在特定领域的适用性较差,因此部分研究针对不同行业减排协同效果开展了研究,如侯静怡等^[48]将减污降碳协同度的概念应用于固废处理过程的评价;傅京燕等^[49]选取CO₂与SO₂排放相关性代表电力行业减污降碳协同性,并通过数平均迪氏指数分解法进行量化;李新等^[50]构建了钢铁行业协同减排环境效益评价体系,耦合能源消耗、环境分布和人群健康效益评价模块,重点关注了SO₂、NO_x、PM₁₀、PM_{2.5}与CO₂排放的减排成本。

相较于钢铁、电力等行业,交通行业具有一定的特殊性:①机动车数量众多,不同类型的单车排放差异较大,同时由于其排放具有移动性特征,排放总量数据很难通过监测获取;②排放区域与人口密集区高度重叠,对人体健康的影响更明显;③机动车排放的污染物成分复杂,包括一氧化碳(CO)、NO_x、SO₂、碳氢化合物、醛类化合物和含铅化合物等气态与颗粒态污染物^[35, 51];④减污降碳协同程度更高,许多学者使用协同效应坐标系对上海、杭州和广州等城市的交通领域进行减污降碳研究时,都指出交通排放的污染物与温室气体具有强协同性^[11-13];⑤核算范围难界定,机动车排放主要来自燃料燃烧,但其消耗的能源在上游制备与开采过程中会产生大量排放,电池和轻量化车铝材等材料的制造也会造成污染,因

此基于尾气排放、燃料周期排放和全生命周期排放模拟获得的政策减排效益存在较大差异,以电动化政策为例,黄莹等^[11]仅考虑了尾气排放与车辆行驶能耗,认为与提高货运能效和提高生物燃料比例等措施相比,车辆电动化的污染物与温室气体减排潜力和协同控制效果较好;但高玉冰等^[52]将上游电厂的排放考虑在内,得出在乌鲁木齐推广电动车不具备协同减排效应的结论。基于以上机动车排放特点,在构建指标体系时应统一评价标准,对影响因素、污染物种类和核算范围等进行规定,探究不同政策实施的协同减排效应,为政府决策提供理论基础。

由于目前暂未有研究关注针对移动源特征的减污降碳协同性评价方法,因此本文综述了大气领域评价方法和针对电力、钢铁等特定行业的评价指标及计算公式,并论述了机动车污染源的表征与机动车评价体系建立的关键,力图为机动车减排政策评价研究提供思路。

2 减污降碳综合环境效益量化方法

2.1 大气减污降碳综合环境效益量化方法

定性评估主要关注污染物与温室气体的减排协同性,导致在协同性差异较小的情况下很难直观对比各政策的优先顺序^[53]。因此,科学量化政策实施的碳污协同效果对于减排方案的制定和选取至关重要。不同污染物和温室气体的测量单位不同,衡量尺度不一,是量化综合减排效果的症结所在。许多研究从健康损害、经济成本和治理难度等影响因素出发,将污染物减排量化为统一当量,进而将各项收益归一化得到综合环境效益。根据换算标准和综合效益表现形式的不同,综合环境效益评估方法主要分为两种,一种是当量值法,另一种是货币化法。

当量值法是指根据污染物的有害程度和治理经济成本设置当量系数,将排放的主要污染物按照其各自的当量系数加权求和,获得污染物排放综合当量值的方法^[11, 34, 41],主要用于总污染程度的衡量,具有计算简便的特点。目前当量系数主要依据《中华人民共和国环境保护税法》^[54]大气污染物污染当量值表进行设置,其中规定的44种污染物主要针对对工业源设置,未涉及PM_{2.5}与O₃等对人体健康存在危害的污染物,且未考虑CO₂和CH₄等温室气体,对量化减污降碳综合环境效益的支持有限。

货币化法则借鉴经济学外部性内在化的手段,将环境污染对人体健康的影响量化为经济价值^[55]。早期研究将政策环境效益定义为污染导致的健康损失改善,如王泓程^[56]将PM_{2.5}和PM₁₀造成的健康损失货币化,用于表征雾-霾天气造成的经济损失;张泽

宸^[57]将PM₁₀的健康损失改善作为附属收益,进行减排政策的成本效益分析。这类研究仅考虑了狭义上的环境效益,忽略了污染对生态环境整体造成的损失。除健康损失外,近年来有大量研究考虑了大气污染对农业、建筑和清洁等方面的影响,完善了对环境成本的定义。如Tollefsen等^[58]参考欧洲清洁空气计划的边际损耗成本报告,核算了空气污染对农作物的损害成本;邓秋菊^[59]讨论了污染对人体健康、生物和器物的经济损失,量化建设项目的环境影响;崔青青^[60]在核算大气污染物损失时,将对生物的影响细化为对农业和林业的经济损失;卢亚灵等^[61]将对建筑材料的损害和房屋车辆的日常清洁费用,纳入环境改善效益的核算。货币化法从不同影响因素的成本核算入手,可以针对不同地区、措施和技术特征灵活调整,同时考虑了各类污染物与温室气体排放的综合影响,更适用于减污降碳综合环境效益的评价。

2.2 机动车减污降碳综合环境效益量化方法

机动车排放的环境影响研究主要聚焦在量化污染物的健康暴露方面^[62-64],近年来也有研究开始关注温室气体排放的负面环境影响,使用碳排放的社会价值衡量其影响程度^[65-70]。除此之外,燃油效率也是减排体系的重要评价指标^[71],许多研究将油耗或能耗的降低纳入成本计算。如仇恒东等^[72]构建的量化方法中,同时考虑了尾气排放削减(NO_x、CO、HC和PM)和燃油消耗减少;Wu等^[73]通过成本效益分析核算了机动车节能减排技术性设备的直接成本以及燃油效率提高产生的间接收益。综上所述,由于地区间资源禀赋、路网分布、人口密度、研究重点与政策目标等因素存在差异,机动车环境效益研究进行核算的成本种类不甚相同,现有文献广泛考虑的成本包括健康暴露成本、气候变化成本与污染物治理成本。

尽管现有研究的关注重点各有不同,例如,污染物排放清单研究与分布模拟多考虑健康暴露成本^[74, 75],机动车碳排放研究多考虑气候变化成本^[76, 77],成本-效益分析多考虑污染治理成本^[78, 79],机动车外部性研究多考虑健康暴露成本与气候变化成本^[69, 70, 80],少有研究同时涵盖以上3项成本。下文将详细梳理各项成本的衡量标准与量化工具,并初步提出一套适用于的机动车环境效益量化方案,力图为后续环境效益的准确量化工作提供借鉴,为减污降碳综合环境效益的货币化方法提供参考。

2.2.1 健康暴露成本

人群是环境外部性的责任主体,污染物浓度的升高会导致患病率和死亡率的增加。流行病学已证实机动车排放的PM、SO₂和NO_x等污染物会造成呼吸

系统疾病和心血管疾病,与居民患病率和死亡率的上升有显著的相关性^[81, 82]。大气污染对人群健康的影响不容小觑,环境改善的健康收益应当作为政策

效益考虑在内。健康暴露成本核算主要依据污染物排放量或浓度与患病率的关系,量化健康损失的经济价值(表2)。

表2 健康暴露成本核算方法

Table 2 Accounting methods for health exposure cost

项目	方法	指标选取	适用范围	优缺点
健康暴露	吸入因子法(自上而下)	人群吸入转换系数;污染物总排放量;机动车排放分担率	总量计算;通过致死率统计数据推算交通致死率占比	经验公式,操作简便,准确率略低
	人体暴露模型(自下而上): GEMM模型和GBD模型等	浓度-反应系数;污染物浓度分布;人口密度分布	患病率分布模拟;范围较大区域或人口分布不均区域	可观察患病人群分布,准确率高,但所需数据量大且操作复杂
健康损失货币化	愿付价格法(统计寿命价值法)	群体收入;经济水平;人群健康意识;其他地区愿付价格基线等	针对特定地区的健康损失估算	理论层面成熟,但社会调研数据难获取,且数据准确率低
	疾病成本法(人力资本法)	医疗投入成本;误工成本	政府标准中健康成本的估算	适用范围广,计算简单,但忽略无形损失以及无收入人群损失,结果容易低估

健康暴露导致患病率的估算大体可分为自上而下和自下而上两种方式。自上而下法以吸入因子法为代表,即根据污染物排放量与吸入因子获得进入人体的污染物总量,再根据剂量-反应函数计算人群发病率,最终根据健康影响计算经济损失。该方法操作简便但准确率较低^[68, 83]。Liu等^[84]和栗树朋^[85]都使用吸入因子法评估了交通排放NO_x、SO₂、PM₁₀和PM_{2.5}等污染物造成的健康影响及经济损失情况;也有文献使用实际致死率与交通排放的污染分担率乘积表征交通污染致死率,最终得到交通污染的健康成本^[64, 86]。自下而上方法以人体暴露模型为代表,通过大气中污染物浓度与浓度-反应函数计算致病率,可以结合浓度分布得到健康效益分布,在研究中广泛使用^[80, 87, 88]。机动车尾气接近地表与人口聚居区^[89],相较于自上而下的总量计算,根据浓度分布与人口分布得到的患病率更为准确,但所需数据量大且操作复杂。人体暴露模型能够直观反映大气中污染排放对人体的影响,广泛用于大气污染物与空气质量研究,常用模型有全球-暴露死亡模型(GEMM)和全球疾病暴露模型(GBD)。Zhang等^[90]考虑了缺血性心脏病、中风、肺癌和慢性阻塞性肺病这4种疾病,使用GBD模型模拟计算了跨洋传输污染和国际贸易排放的PM_{2.5}对过早死亡率的影响;有学者提出在地广人稀的地方相同浓度的污染物危害相对较小,在GEMM中引入人口加权的PM_{2.5}浓度更能反映颗粒物对人体健康的影响^[91],通过改良GBD模型模拟了PM_{2.5}浓度增加导致的健康暴露成本增加情况,进而讨论了中国天然气贸易中断应急策略的环境影响^[92];Geng等^[93]选取与PM_{2.5}相关的8种疾病早死率进行分析,通过GEMM模型衡量空气污染对健康的影响,设置4种情景与实际情况进行对比,评估末端

治理政策、能源气候政策和经济结构调整的减排效果;Zhou等^[94]结合天气研究和预报模型(WRF-Chem)和GEMM模型,讨论了推行中国北方清洁能源计划过程中,多种清洁能源代替固体燃料的能源效率、污染物排放及其健康影响;Wang等^[95]选择GEMM进行健康暴露评估,根据两种情景设置的比较,评估近年来中国交通污染控制政策带来的健康效益。Tong等^[96]使用一个集成了基线排放清单、大气扩散化学机制、人口暴露和PM_{2.5}公共卫生浓度响应函数的空气污染社会影响回归模型(EASIUR),模拟早产率和患病率等数据并将其作为衡量污染程度的指标,探究不同燃油车技术对于气候变化和大气污染平衡的影响;Tong等^[97]使用EASIUR模型中心血管疾病与肺癌死亡率衡量空气污染带来的健康损失,暂未考虑哮喘等慢性病的发病率。总体来说,GEMM模型相对比较简单,模拟得出的相关致病率不确定性较大^[93];GBD模型考虑到了二手烟和家庭油烟等其他源,准确性较高,但与实际死亡人数相比容易高估^[95]。

大气污染健康效应货币化的方法主要有愿付价格法和疾病成本法。愿付价格法(WTP)或统计寿命价值法(VSL)指人们愿意为预防患病或死亡的风险支付多少金钱,此方法理论层面较成熟,但受到群体收入、经济水平和健康意识等因素的影响,社会调研数据难收集,实际应用受限^[64, 68, 98]。邓欣等^[63]参考欧洲国家标准,根据GDP与愿付价格的转化率估算出北京地区愿付价格;Hsieh等^[65]使用成都地区VSL数据作为基线,根据效益转移法^[99]估算中国其他地区愿付价格;Peng等^[67]使用6项国内外研究的VSL值分别进行计算,给出中国机动车污染的健康成本区间。此外,疾病成本法是核算因疾病或死亡造成的误工成本以及治病带来的医疗投入,作为环境污染的健

康成本。疾病成本法在政府的标准制定中也被广泛使用,如世界银行1997年的研究中所采用的人力资本法^[100]与美国环保署(EPA)环境影响评价的经济损失认定程序均属于其中一种。该方法操作较为简单,但折现率的确定比较困难,忽略了心理影响等无形损失,且仅考虑了有收入或产出的部分人群,导致其对外部成本的显著低估^[63, 101-103]。

2.2.2 气候变化成本

机动车行驶中会产生大量温室气体如CO₂、CH₄和N₂O等,其对气候变暖造成的影响不容忽视。气候变化成本货币化主要基于温室气体排放量进行碳排放经济价值核算。

为方便计算,大部分研究在核算温室气体时使用二氧化碳当量,即根据温室气体的全球增温效应将其他气体转化为等体积CO₂^[104, 105]。目前,国际能源署、英国石油公司数据库、联合国气候变化框架公约组织和美国橡树岭国家实验室二氧化碳信息分析中心等多个国际政府部门或科研机构,建立了官方碳排放数据库。中国尚未建立官方碳排放数据库,现有研究大多根据化石能源消费量与燃料的碳排系数折算碳排放量^[106]。如王嘉熙^[70]根据汽柴油消耗估算机动车碳排放量;邵丹等^[107]对上海市客运交通电动化减排效益进行模拟,使用IPCC排放因子分别计算了以汽油、柴油和电力为能源的机动车碳排放量。

移动源温室气体排放成本大多通过碳社会价值进行量化,即将碳税或者碳交易价格作为单位碳排放的经济价值进行估算。征收碳税是解决温室气体排放问题的有效政策。早在20世纪90年代,芬兰和瑞典就开始征收碳税,据IEA^[108]最新数据,北欧是全球电动化进程最快的地区,这与各国大力推进碳税制度息息相关;中国目前并未进行碳税征收,有学者预测如果进行征收,未来中国碳税价格可能为10~20元·t⁻¹^[69]。此外,碳配额和碳交易制度也是各国常用降碳政策,自2002年至今已有英国、日本和欧盟等多个国家及组织建成碳交易体系,以航空公司为首的交通运输企业积极参与,如欧盟航空与美国加州交通燃料供应商等。中国已有8个省市开展了碳交易试点,其中上海、北京和深圳已开始探索交通运输领域碳交易,为航空、港口、风电和光伏等移动源相关领域碳交易提供试点。基于以上碳税或碳市场价格,结合燃料消耗量计算机动车碳排放量,可以得出碳排放的社会成本,进而评估相关政策的降碳效益^[65, 67]。

2.2.3 污染物治理成本

污染物浓度的降低需要大量人力物力的投入,污染物治理成本即为减排量的直接经济价值。治理

成本核算可分为机动车减排技术成本核算以及单种污染物单位减排成本核算两部分。

目前已有许多新技术和新设备用于机动车节能减排领域,包括调整喷油压力及次数、调整进排气和优化燃烧室等优化内燃机燃油效率的措施,增加选择性催化还原系统、柴油氧化催化器、柴油颗粒捕集器、氨捕捉器和废气再循环系统等装置^[109],可以促进燃油充分燃烧,降低能源消耗,减少有害污染物排放。除节能技术外,还有学者关注车队的轻量化,通过减少车重减少能源消耗,从而达到减排目的,如吴潇萌^[110]针对轻型车队的典型节能技术成本进行估算。此外,还有许多规划类措施对机动车污染治理起到一定作用,由于政策效果较难估算,一般由实地调研获得^[111, 112],如高玉冰等^[52]根据减排成本与归一化综合排放指标,通过费效分析估算了燃油经济性提升、快速公交与轨道交通的推广、尾气排放标准提高、黄标车淘汰与油品升级等措施的单位减排成本。总的来说,减排设备与技术的成本核算相对简单,规划类政策的成本核算相对困难,需要结合实际调研获得。

在计算单位污染物治理成本时,大多研究先使用当量值法对各污染物减排量进行归一化,进而结合总成本得出单位当量治理成本^[113]。然而大气污染物种类繁多,政策措施往往可以实现多种污染物的共同减排,但总治理成本在各污染物治理效果间的分摊比例难以界定。有研究通过关联矩阵分析典型污染物排放特征,进而得到单种污染物的治理成本^[114];还有研究使用治理成本系数法,使用治理前后浓度与排放标准的函数作为单种污染物成本系数,据此分配各污染物治理成本^[115]。此外,许多官方机构也基于实测开展了相关实验,为单位治理成本核算提供参考,如能源基金会^[116]根据各车型硬件成本、维护成本和燃油经济性改善率等数据,核算欧1到欧4排放标准下,各车型推荐控制方案CO、HC和NO_x等典型污染物单位减排成本;国际清洁交通理事会^[117]实测得出常用减排技术的碳减排率及其技术成本(表3)。

值得注意的是,现有的污染物治理成本研究大多关注尾气排放,但机动车消耗能源的开采和加工等上游排放不可忽视。Hsieh等^[65]指出油井到车轮过程(WTW)排放评估表明,机动车排放主要来自汽油生产而不是尾气,需要对炼油厂实施更严格的排放控制以有效应对空气污染问题。Michalek等^[88]认为,电动车是否能减少外部性成本的关键,在于电池制造及发电过程中的排放;Buekers等^[118]也指出发电行业能源结构对于环境健康效益十分重要。因此,越来越多的研究将机动车总排放量的核算范围扩大至燃

表 3 小型机动车典型碳减排技术的单车减排率与增量成本¹⁾

Table 3 Reduction rate and incremental cost of light-duty vehicle carbon reduction technologies

技术	CO ₂ 减排率/%	2017年成本/美元	2025年成本/美元	
发动机	柴油发动机	19.5	2 965	2 420
	涡轮增加+小型化	11~17	427	337
变速器技术	8速干式DCT变速箱	11.1	80	66
混动与电动技术	纯电动(100 km)	100	17 837	9 676
	插电混(40 km)	63	14 401	8 626
	双模混合动力传动系统	23	7 099	4 722
	功率分流式混动车	19	4 483	3 406
附件技术	空气阻力降低	4.7	74	71

1)数据来自《Passenger car fuel-efficiency, 2020-2025》^[117],美元为2010年美元购买力

料周期,甚至全生命周期。如陈思旭^[86]核算了包括车辆生产、使用与报废的机动车全生命周期中排放污染物的健康暴露成本,讨论了不同新能源车代替率情况下的环境健康收益价值;Peng等^[67]估计了使用替代能源车的环境成本,并指出只有与深度脱碳电力相结合,才能最大限度地发挥替代能源车的作用,改善空气质量并缓解气候变暖。

3 展望

随着减污降碳综合环境效应研究的不断深入,适用于不同领域的政策评价指标体系逐步建立。然而由于机动车协同减排研究尚处于起步阶段,政策环境效益的精细化评估仍面临诸多挑战,如更具普适性便于横向对比的官方准则、更精细化的时空分布、覆盖全生命周期的协同减排环境影响评价以及更全面地货币化温室气体对气候变化的影响。基于此,本文对机动车减污降碳综合评价体系提出以下展望。

(1)构建统一的减污降碳指标体系全面量化机动车政策减排效益。建立机动车环境效益指标体系是量化政策减排效果的有效手段。我国机动车减污降碳效果评估指标体系研究尚在起步阶段,需要针对机动车排放特征,加快建立并完善指标体系,统一评价标准,开展机动车相关减排方案效果的精细化评估和预测,为推动相关政策出台和监管提供理论依据。

(2)关注政策环境效益的空间分布。不同地区的资源禀赋不同,可能导致政策效果具有空间差异性。因此,仅进行总量估算无法准确定位协同减排工作开展的重点地区,需要进一步结合空气质量模型、交通网分布、人口密度、经济水平等指标综合研判不同地区的减排效果,因地制宜地制定减排方案,促使政策实施的环境效益最大化。

(3)重视机动车电动化导致的污染转移问题,进一步核算燃料周期排放。车辆燃料由汽柴油向电力转换,改善了城市地区的尾气排放问题,但也将导致发电厂等燃料生产地区排放量陡增,由此产生的污

染转移后果不容小觑。因此,需要进一步从燃料周期的角度开展机动车协同减排评估工作,制定针对性政策从尾气排放的末端治理转变为燃料生产排放的源头治理。

(4)探讨极端天气带来的气候变化损失。气候变化包括温度升高等缓慢变化以及洪涝灾害等极端天气的增加,现有研究仅考虑气候缓慢变化的经济损失,未量化气候突变成本。然而持续增暖会导致极端天气风险上升且复合极端事件加剧,极端天气一旦发生经济损失往往是数额巨大不容忽视的,因此需要探究气候突变潜在经济损失的核算方法,提升碳排放经济成本核算的准确性。

参考文献:

- [1] 熊华文. 减污降碳协同增效的能源转型路径研究[J]. 环境保护, 2022, 50(S1): 35-40.
Xiong H W. The study on energy transformation path of achieving synergizing the reduction of pollution and carbon emissions [J]. Environmental Protection, 2022, 50(S1): 35-40.
- [2] 于雷, 牛韧, 薛强, 等. “三线一单”减污降碳协同管控的基本思路与建议[J]. 环境影响评价, 2022, 44(2): 28-33, 38.
Yu L, Niu R, Xue Q, et al. Fundamental considerations and suggestions of synergetic control of the "Three Lines One Permit" and pollution and carbon reduction [J]. Environmental Impact Assessment, 2022, 44(2): 28-33, 38.
- [3] 张瑜, 孙倩, 薛进军, 等. 减污降碳的协同效应分析及其路径探究[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(5): 1-13.
Zhang Y, Sun Q, Xue J J, et al. Synergistic effects of pollution control and carbon reduction and their pathways [J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(5): 1-13.
- [4] 郑逸璇, 宋晓晖, 周佳, 等. 减污降碳协同增效的关键路径与政策研究[J]. 中国环境管理, 2021, 13(5): 45-51.
Zheng Y X, Song X H, Zhou J, et al. Synergetic control of environmental pollution and carbon emissions: pathway and policy [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(5): 45-51.
- [5] 姜晓群, 王力, 周泽宇, 等. 关于温室气体控制与大气污染物减排协同效应研究的建议[J]. 环境保护, 2019, 47(19): 31-35.
Jiang X Q, Wang L, Zhou Z Y, et al. Suggestions on co-benefits between GHG emission control and air pollutant reduction [J]. Environmental Protection, 2019, 47(19): 31-35.
- [6] World Meteorological Organization. WMO air quality and climate

- bulletin [EB/OL]. https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/environment/air_quality/wmo-air-quality-and-climate-bulletin-no.2, 2022-09-01.
- [7] 易兰, 赵万里, 杨历. 大气污染与气候变化协同治理机制创新[J]. 科研管理, 2020, **41**(10): 134-144.
- Yi L, Zhao W L, Yang L, *et al.* Innovation of collaborative governance mechanism on air pollution and climate change control [J]. *Science Research Management*, 2020, **41**(10): 134-144.
- [8] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2001 [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [9] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm, 2021-03-13.
- [10] 中华人民共和国中央人民政府. 减污降碳协同增效实施方案[EB/OL]. <http://www.nxcity.gov.cn/zw229/fdzdkgknr/msxx/hjbh1/hjbhzcshgh/202208/P020220831339048081186.pdf>, 2022-06-10.
- [11] 黄莹, 焦建东, 郭洪旭, 等. 交通领域二氧化碳和污染物协同控制效应研究[J]. 环境科学与技术, 2021, **44**(7): 20-29.
- Huang Y, Jiao J D, Guo H X, *et al.* Assessment of co-control effects for CO₂ and air pollutants in transport sector [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **44**(7): 20-29.
- [12] 王慧慧, 曾维华, 吴开亚. 上海市机动车尾气排放协同控制效应研究[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(5): 1345-1352.
- Wang H H, Zeng W H, Wu K Y. Co-control effects of motor vehicle pollutant emission in Shanghai [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(5): 1345-1352.
- [13] 唐伟, 郑思伟, 何平, 等. 基于情景分析的杭州市机动车尾气排放控制协同效应研究[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(6): 2033-2042.
- Tang W, Zheng S W, He P, *et al.* Study on the co-benefit of motor vehicle emission control based on scenario analysis in Hangzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(6): 2033-2042.
- [14] 李妙玲. 北京大气细颗粒物的化学组成特征及来源解析[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- [15] 周敏. 上海大气PM_{2.5}来源解析对比: 基于在线数据运用3种受体模型[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 1997-2005.
- Zhou M. Comparison of three receptor models for source apportionment of PM_{2.5} in Shanghai: using hourly resolved PM_{2.5} chemical composition data [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 1997-2005.
- [16] 李云燕, 葛畅. 我国三大区域PM_{2.5}源解析研究进展[J]. 现代化工, 2017, **37**(4): 1-5, 7.
- Li Y Y, Ge C. Research progress of PM_{2.5} source analysis in three main regions of China [J]. *Modern Chemical Industry*, 2017, **37**(4): 1-5, 7.
- [17] 黄晓锋, 云慧, 宫照恒, 等. 深圳大气PM_{2.5}来源解析与二次有机气溶胶估算[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, **44**(4): 723-734.
- Huang X F, Yun H, Gong Z H, *et al.* Source apportionment and secondary organic aerosol estimation of PM_{2.5} in an urban atmosphere in China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **57**(6): 1352-1362.
- [18] 周瑞文, 陈敏, 李园园, 等. 济南市冬季PM_{2.5}中元素的污染特征、来源及健康风险评估[J]. 环境化学, 2023, **42**(4): 1280-1292.
- Zhou R W, Chen M, Li Y Y, *et al.* Pollution characteristics, sources and health risk assessment of elements in PM_{2.5} during wintertime in Jinan city [J]. *Environmental Chemistry*, 2023, **42**(4): 1280-1292.
- [19] 安欣欣, 曹阳, 王琴, 等. 北京城区PM_{2.5}各组分污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2251-2261.
- An X X, Cao Y, Wang Q, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in urban area of Beijing [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2251-2261.
- [20] 张远远, 戴维, 华楠, 等. 基于不同周期PM_{2.5}组成高时间分辨观测的PMF源解析研究[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(2): 308-317.
- Zhang Y Y, Dai W, Hua N, *et al.* PMF Source apportionment based on high time-resolved measurements of PM_{2.5} components during different observation periods [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(2): 308-317.
- [21] 张艺凡, 侯雪伟, 陈军, 等. 淮安市洪泽区细颗粒物及臭氧污染特征[J]. 环境化学, 2022, **41**(8): 2561-2572.
- Zhang Y F, Hou X W, Chen J, *et al.* Study on characteristics of fine particulate matter and ozone pollution in Hongze District of Huai'an City [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, **41**(8): 2561-2572.
- [22] 秦波, 张岳翀, 马彤, 等. 阜康市PM_{2.5}组分特征及来源解析研究[J]. 环境科学与技术, 2022, **45**(S1): 159-167.
- Qin B, Zhang Y C, Ma T, *et al.* The component characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Fukang [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, **45**(S1): 159-167.
- [23] 方方. 徐州市大气臭氧和PM_{2.5}污染特征及来源分析[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [24] 齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 等. 郑州市夏季大气VOCs污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(12): 5429-5441.
- Qi Y J, Wang L L, Ni J W, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient summer volatile organic compounds in Zhengzhou, China [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5429-5441.
- [25] 刘新军, 王淑娟, 刘程, 等. COVID-19疫情期间雄安地区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1268-1276.
- Liu X J, Wang S J, Liu C, *et al.* Characteristics, ozone formation potential, and source apportionment of VOCs during the COVID-19 epidemic in Xiong'an [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1268-1276.
- [26] 张浩然. 南昌市2021年大气VOCs污染特征和来源分析[D]. 南昌: 东华理工大学, 2022.
- [27] 王艺璇, 刘保双, 吴建会, 等. 天津市郊夏季VOCs化学特征及其时间精细化的来源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 5644-5655.
- Wang Y X, Liu B S, Wu J H, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment with temporal refinement for VOCs in Tianjin suburb in summer [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5644-5655.
- [28] 胡灿伟. 机动车已成空气污染主力[J]. 生态经济, 2016, **32**(4): 10-13.
- [29] International Energy Agency. CO₂ emissions by sector, People's Republic of China 1990-2020 [EB/OL]. <https://www.iea.org/countries/china>, 2022-07-01.
- [30] 中华人民共和国中央人民政府. 中国汽车市场迎多项利好[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-04/10/content_5500755.htm, 2020-04-10.
- [31] Davis S C, Boundy R G. Transportation energy data book: edition 39[R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Lab, 2021.
- [32] European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport. EU transport in figures: statistical pocketbook 2022

- [R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2022.
- [33] Statistics Bureau of Japan. Japan statistical yearbook 2023 [R]. Tokyo: Ministry of Internal Affairs and Communications, 2022.
- [34] 毛显强, 邢有凯, 高玉冰, 等. 温室气体与大气污染物协同控制效应评估与规划[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(7): 3390-3398.
Mao X Q, Xing Y K, Gao Y B, *et al.* Study on GHGs and air pollutants co-control: assessment and planning [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(7): 3390-3398.
- [35] 覃小玲. 温室气体与大气污染控制的协同减排效益研究——以深圳市为例[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [36] 叶芳羽, 单汨源, 李勇, 等. 碳排放权交易政策的减污降碳协同效应评估[J]. 湖南大学学报(社会科学版), 2022, **36**(2): 43-50.
Ye F Y, Shan M Y, Li Y, *et al.* An evaluation of the synergistic effect of air pollutants and carbon reduction of the carbon emissions trading policy [J]. Journal of Hunan University (Social Sciences), 2022, **36**(2): 43-50.
- [37] Yang H Z, Liu J F, Jiang K J, *et al.* Multi-objective analysis of the co-mitigation of CO₂ and PM_{2.5} pollution by China's iron and steel industry [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, **185**: 331-341.
- [38] 李丽平, 周国梅, 季浩宇. 污染减排的协同效应评价研究——以攀枝花市为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, **20**(S2): 91-95.
Li L P, Zhou G M, Ji H Y. Study of co-benefits assessment of pollution reduction: a case study in Panzhihua [J]. China Population, Resources and Environment, 2010, **20**(S2): 91-95.
- [39] 毛显强, 曾桢, 胡涛, 等. 技术减排措施协同控制效应评价研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, **21**(12): 1-7.
Mao X Q, Zen A, Hu T, *et al.* Study of coordinate control effect assessment of technological measures for emissions reduction [J]. China Population, Resources and Environment, 2011, **21**(12): 1-7.
- [40] 李海生, 谢明辉, 李小敏, 等. 全过程一体化构建减污降碳协同制度体系[J]. 环境保护, 2022, **50**(S1): 24-29.
Li H S, Xie M H, Li X M, *et al.* Build a synergistic system to reduce pollution and carbon emissions in the whole process from source to end [J]. Environmental Protection, 2022, **50**(S1): 24-29.
- [41] 俞珊, 张双, 张增杰, 等. 北京市“十四五”时期大气污染物与温室气体协同控制效果评估研究[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(6): 499-508.
Yu S, Zhang S, Zhang Z J, *et al.* Assessment of co-control effects for air pollutants and greenhouse gases in Beijing during the 14th Five-Year Plan period [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(6): 499-508.
- [42] 唐湘博, 张野, 曹利珍, 等. 中国减污降碳协同效应的时空特征及其影响机制分析[J]. 环境科学研究, 2022, **35**(10): 2252-2263.
Tang X B, Zhang Y, Cao L Z, *et al.* Spatio-temporal characteristics and influencing mechanism of synergistic effect of pollution and carbon emission reduction in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(10): 2252-2263.
- [43] 郭立祥. 基于边际减排成本的减污降碳协同效应研究[D]. 济南: 山东财经大学, 2022.
- [44] 牛彤. 中国工业大气污染物和二氧化碳协同减排研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [45] Xue W B, Lei Y, Liu X, *et al.* Synergistic assessment of air pollution and carbon emissions from the economic perspective in China [J]. Science of the Total Environment, 2023, **858**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159736.
- [46] 中华人民共和国生态环境部. 浙江首创减污降碳“双指数”实现对减污降碳进展和效果的量化评估[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/dfnews/202206/t20220622_986282.shtml, 2022-06-22.
- [47] 杨儒浦, 王敏, 胡敬韬, 等. 工业园区减污降碳协同增效评价方法及实证研究[J]. 环境科学研究, 2023, **36**(2): 422-430.
Yang R P, Wang M, Hu J T, *et al.* Evaluation method and empirical study on synergistic reduction of pollution and carbon emissions in industrial parks [J]. Research of Environmental Sciences, 2023, **36**(2): 422-430.
- [48] 侯静怡, 陈丹荷, 刘雯雯. 减污降碳协同度的概念、模型及优化路径——基于全国31个省市的市政污泥数据[J]. 建筑经济, 2022, **43**(S1): 566-569.
Hou J Y, Chen D H, Liu W W. Concept, model and optimization path for synergy degree of pollution and carbon reduction: based on industrial sludge data of 31 provinces and cities in China [J]. Construction Economy, 2022, **43**(S1): 566-569.
- [49] 傅京燕, 原宗琳. 中国电力行业协同减排的效应评价与扩张机制分析[J]. 中国工业经济, 2017, (2): 43-59.
Fu J Y, Yuan Z L. Evaluation of effect and analysis of expansion mechanism of synergic emission abatement in China's power industry [J]. China Industrial Economics, 2017, (2): 43-59.
- [50] 李新, 路路, 穆献中, 等. 京津冀地区钢铁行业协同减排成本-效益分析[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(9): 2226-2234.
Li X, Lu L, Mu X Z, *et al.* Cost-benefit analysis of synergistic emission reduction in steel industry in Beijing-Tianjin-Hebei Region, China [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(9): 2226-2234.
- [51] 王力, 冯相昭, 马彤, 等. 典型城市减污降碳协同控制潜力评价研究: 以渭南市为例[J]. 环境科学研究, 2022, **35**(8): 2006-2014.
Wang L, Feng X Z, Ma T, *et al.* Evaluation of co-controlling air pollutants and carbon emission potential in typical cities: a case study in Weinan city [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(8): 2006-2014.
- [52] 高玉冰, 毛显强, Corsetti G, 等. 城市交通大气污染物与温室气体协同控制效应评价——以乌鲁木齐市为例[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(11): 2985-2992.
Gao Y B, Mao X Q, Corsetti G, *et al.* Assessment of co-control effects for air pollutants and green house gases in urban transport: a case study in Urumqi [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(11): 2985-2992.
- [53] 蔡晓萍, 柏静, 段华波, 等. 深圳市纯电动泥头车减污降碳协同效益评价研究[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(12): 471-480.
Cai X P, Bai J, Duan H B, *et al.* Evaluation of environmental emission reduction of electric dump trucks in Shenzhen city [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(12): 471-480.
- [54] 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国环境保护税法[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/ywzq/fgbz/fl/201811/t20181114_673632.shtml, 2022-12-07.
- [55] Berck P, Helfand G. 环境经济学[M]. 吴江, 贾蕾, 译. 北京: 中国人民大学出版社, 2013.
- [56] 王泓程. 城市雾霾污染的人体健康危害及生态环境损害的量化评估研究——以济南市为例[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [57] 张泽宸. 深圳市大气细颗粒物污染控制措施的成本效益分析[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- [58] Tollefsen P, Rypdal K, Torvanger A, *et al.* Air pollution policies in Europe: efficiency gains from integrating climate effects with

- damage costs to health and crops [J]. *Environmental Science & Policy*, 2009, **12**(7): 870-881.
- [59] 邓秋菊. 建设项目环境影响货币化方法研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
- [60] 崔青青. 河北省环境污染物经济损失估算研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- [61] 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 等. 北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益[J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 2730-2739.
Lu Y L, Fan Z Y, Jiang H Q, *et al.* Economic benefit of air quality improvement during implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 2730-2739.
- [62] Liang X Y, Zhang S J, Wu Y, *et al.* Air quality and health benefits from fleet electrification in China [J]. *Nature Sustainability*, 2019, **2**(10): 962-971.
- [63] 邓欣, 黄有光. 中国道路交通外部成本估计——北京案例研究[J]. *重庆大学学报(社会科学版)*, 2008, **14**(1): 4-10.
Deng X, Huang Y G. Estimation of external costs of road transport: a case study of Beijing [J]. *Journal of Chongqing University (Social Science Edition)*, 2008, **14**(1): 4-10.
- [64] 佟琼, 王稼琼, 王静. 北京市道路交通外部成本衡量及内部化研究[J]. *管理世界*, 2014, (3): 1-9, 40.
- [65] Hsieh I L, Chossiere G P, Gencer E, *et al.* An integrated assessment of emissions, air quality, and public health impacts of China's transition to electric vehicles [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, **56**(11): 6836-6846.
- [66] 李文博, 龙如银, 张琳玲. 电力跨区域传输视角下电动汽车规模化应用的碳排放转移[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2022, **24**(1): 12-23.
Li W B, Long R Y, Zhang L L, *et al.* Carbon emission transfer by large-scale application of electric vehicles from the perspective of inter-regional electricity transmission [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2022, **24**(1): 12-23.
- [67] Peng L Q, Liu F Q, Zhou M, *et al.* Alternative-energy-vehicles deployment delivers climate, air quality, and health co-benefits when coupled with decarbonizing power generation in China [J]. *One Earth*, 2021, **4**(8): 1127-1140.
- [68] 蔡铭, 周展鸿. 道路交通外部成本评估研究综述[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2015, **54**(4): 1-7.
Cai M, Zhou Z H. A review of evaluation of external costs in road transport [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2015, **54**(4): 1-7.
- [69] 宗刚, 李聪. 北京市交通运输系统负外部性量化分析与计算[J]. *生态经济*, 2014, **30**(5): 57-63.
Zong G, Li C. Quantitative analysis and calculation of the negative externality of Beijing transportation system [J]. *Ecological Economy*, 2014, **30**(5): 57-63.
- [70] 王嘉熙. 北京机动车环境外部成本的实证研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [71] 郝吉明, 傅立新, 贺克斌, 等. 城市机动车排放污染控制—国际经验分析与中国的研究成果[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [72] 仇恒东, 于雷, 韩宝明, 等. 机动车尾气控制策略效益综合评价指标体系[J]. *环境保护科学*, 2007, **33**(4): 91-93, 106.
Qiu H D, Yu L, Han B M, *et al.* An integrated indicator systems for benefit assessment of vehicle emission control strategies [J]. *Environmental Protection Science*, 2007, **33**(4): 91-93, 106.
- [73] Wu Q, Nunes P A. Application of technological control measures on vehicle pollution: a cost-benefit analysis in China [R]. Milano: Fondazione Eni Enrico Mattei, 2005.
- [74] 张启钧, 杨磊, 魏宁, 等. 天津市典型市区隧道机动车黑碳排放特征与健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2023, **43**(2): 408-413.
Zhang Q J, Yang L, Wei N, *et al.* Pollution characteristics and health risks assessment of black carbon from vehicles emissions in typical urban tunnel of Tianjin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, **43**(2): 408-413.
- [75] 王珮玮. 北京机动车细颗粒物排放的浓度模拟和人体健康影响研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- [76] 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.
- [77] 刘浩, 李艳霞, 于凤菊, 等. 京津冀地区道路碳排放量的演变及空间分布[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(10): 4556-4564.
Liu H, Li Y X, Yu F J, *et al.* Evolution and spatial distribution of road carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(10): 4556-4564.
- [78] 于亚申, 胡煜晗, 张世秋. 老旧机动车淘汰更新及补贴政策的成本有效性分析——以北京市为例[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2022, **58**(4): 763-770.
Yu Y S, Hu Y H, Zhang S Q. A case study on cost-effectiveness of accelerated vehicle retirement programs in Beijing [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2022, **58**(4): 763-770.
- [79] 杨雯, 王学军, 张倩茹. 基于高精度清单的京津冀机动车控污政策研究[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(8): 2803-2810.
Yang W, Wang X J, Zhang Q R. Vehicle pollution control policy study on the Beijing-Tianjin-Hebei region, based on a high-precision emission inventory [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(8): 2803-2810.
- [80] Van Essen H, Schroten A, Otten M, *et al.* External costs of transport in Europe: update study for 2008 [R]. Delft: CE Delft, 2011.
- [81] 阚海东, 陈秉衡, 贾健. 城市大气污染健康危险度评价的方法第三讲大气污染物暴露与人群健康效应的暴露-反应关系分析(续二)[J]. *环境与健康杂志*, 2004, **21**(4): 253-254.
- [82] 谢元博, 陈娟, 李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度PM_{2.5}持续暴露的健康风险及其损害价值评估[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 1-8.
Xie Y B, Chen J, Li W. An assessment of PM_{2.5} related health risks and impaired values of Beijing residents in a consecutive high-level exposure during heavy haze days [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 1-8.
- [83] Mayeres I, Ochelen S, Proost S. The marginal external costs of urban transport [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 1996, **1**(2): 111-130.
- [84] Liu L, Wang K, Wang S S, *et al.* Assessing energy consumption, CO₂ and pollutant emissions and health benefits from China's transport sector through 2050 [J]. *Energy Policy*, 2018, **116**: 382-396.
- [85] 栗树朋. 基于LEAP模型的沈阳市道路交通部门能源需求及环境影响研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [86] 陈思旭. 重庆市新能源汽车替代使用的健康收益价值评估[D]. 昆明: 云南大学, 2019.
- [87] European Commission. ExternE externalities of energy: methodology 2005 update [R]. Luxembourg: European

- Communities, 2005.
- [88] Michalek J J, Chester M, Jaramillo P, *et al.* Valuation of plug-in vehicle life-cycle air emissions and oil displacement benefits [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, **108**(40): 16554-16558.
- [89] 金陶胜, 傅立新, 杜譔. 吸入因子: 汽车尾气污染健康影响的一种评价方法 [J]. 环境与健康杂志, 2006, **23**(2): 182-184.
- Jin T S, Fu L X, Du X. Intake fraction: an evaluation of vehicle emission health effects [J]. Journal of Environment and Health, 2006, **23**(2): 182-184.
- [90] Zhang Q, Jiang X J, Tong D, *et al.* Transboundary health impacts of transported global air pollution and international trade [J]. Nature, 2017, **543**(7647): 705-709.
- [91] Qin Y, Wagner F, Scovronick N, *et al.* Air quality, health, and climate implications of China's synthetic natural gas development [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, **114**(19): 4887-4892.
- [92] Qin Y, Zhou M, Pan D, *et al.* Environmental consequences of potential strategies for China to prepare for natural gas import disruptions [J]. Environmental Science & Technology, 2022, **56**(2): 1183-1193.
- [93] Geng G N, Zheng Y X, Zhang Q, *et al.* Drivers of PM_{2.5} air pollution deaths in China 2002 - 2017 [J]. Nature Geoscience, 2021, **14**(9): 645-650.
- [94] Zhou M, Liu H X, Peng L Q, *et al.* Environmental benefits and household costs of clean heating options in northern China [J]. Nature Sustainability, 2022, **5**(4): 329-338.
- [95] Wang H K, He X J, Liang X Y, *et al.* Health benefits of on-road transportation pollution control programs in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, **117**(41): 25370-25377.
- [96] Tong F, Azevedo I M L. What are the best combinations of fuel-vehicle technologies to mitigate climate change and air pollution effects across the United States? [J]. Environmental Research Letters, 2020, **15**(7), doi: 10.1088/1748-9326/ab8a85.
- [97] Tong F, Jenn A, Wolfson D, *et al.* Health and climate impacts from long-haul truck electrification [J]. Environmental Science & Technology, 2021, **55**(13): 8514-8523.
- [98] Randall A. Information, power and academic responsibility [J]. American Journal of Agricultural Economics, 1974, **56**(2): 227-234.
- [99] The Organisation for Economic Co-operation and Development. Valuing mortality risk reductions in regulatory analysis of environmental, health and transport policies: policy implications [R]. Paris: OECD, 2011.
- [100] World Bank. Informal financial markets and financial intermediation in four African countries, findings: Africa region [R]. Washington: World Bank, 1997.
- [101] Ridker R G, Henning J A. The determinants of residential property values with special reference to air pollution [J]. The Review of Economics and Statistics, 1967, **49**(2): 246-257.
- [102] Hodgson T A, Meiners M R. Cost-of-illness methodology: a guide to current practices and procedures [J]. The Milbank Memorial Fund Quarterly, Health and Society, 1982, **60**(3): 429-462.
- [103] Quinet E. A meta-analysis of Western European external costs estimates [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2004, **9**(6): 465-476.
- [104] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2022: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [105] World Meteorological Organization. WMO greenhouse gas bulletin (GHG bulletin) - no. 18: the state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2021 [R]. Geneva: WMO, 2022.
- [106] 蔡博峰, 刘晓曼, 陆军, 等. 2005年中国城市 CO₂ 排放数据集 [J]. 中国人口·资源与环境, 2018, **28**(4): 1-7.
- Cai B F, Liu X M, Lu J, *et al.* China city CO₂ emissions in 2005 [J]. China Population, Resources and Environment, 2018, **28**(4): 1-7.
- [107] 邵丹, 李涵. 城市客运交通电动化碳减排效益和碳达峰目标——以上海市为例 [J]. 城市交通, 2021, **19**(5): 53-58, 42.
- Shao D, Li H. Carbon reduction benefits and carbon peak goals of urban passenger transportation electrification: a case study of Shanghai [J]. Urban Transport of China, 2021, **19**(5): 53-58, 42.
- [108] International Energy Agency. World energy outlook 2022 [R]. Paris: IEA, 2022.
- [109] 丁焰, 方茂东, 王计广. 机动车污染防治行业 2017 年发展综述 [J]. 中国环保产业, 2018, (10): 16-22.
- Ding Y, Fang M D, Wang J G. Development report on prevention & control industry of motor vehicle pollution in 2017 [J]. China Environmental Protection Industry, 2018, (10): 16-22.
- [110] 吴潇萌. 中国道路机动车空气污染物与 CO₂ 排放协同控制策略研究 [D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [111] 陈进杰. 城市轨道交通项目广义全寿命周期成本理论与应用研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [112] 谢逢杰. 城市轨道交通项目经济效益评价方法初探 [J]. 工业技术经济, 2004, **23**(3): 77-79.
- [113] 陈秋兰, 陈璋琪, 洪小琴, 等. 基于虚拟治理成本法的大气污染环境影响量化评估探讨 [J]. 环境与可持续发展, 2018, **43**(2): 27-30.
- Chen Q L, Chen Z Q, Hong X Q, *et al.* Study on quantitative assessment of eco-environmental damage caused by air pollution based on virtual disposal cost approach [J]. Environment and Sustainable Development, 2018, **43**(2): 27-30.
- [114] 张增凯, 刘慧文, 杜慧滨, 等. 京津冀地区大气主要污染物虚拟治理成本分摊研究 [J]. 环境科学学报, 2022, **42**(2): 486-492.
- Zhang Z K, Liu H W, Du H B, *et al.* Virtual costs allocation of air quality governance in the Jing-Jin-Ji area in China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(2): 486-492.
- [115] 孙瑞玲, 于忠华, 吴杰, 等. 区域大气污染虚拟治理成本核算及空间差异分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2018, **32**(1): 56-61.
- Sun R L, Yu Z H, Wu J, *et al.* Virtual control cost accounting for regional air pollution and the spatial difference analysis [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, **32**(1): 56-61.
- [116] 能源基金会. 中国机动车排放污染与控制 [R]. 北京: 能源基金会北京办事处, 2001.
- [117] International Council on Clean Transportation. Passenger car fuel-efficiency, 2020 - 2025, comparing stringency and technology feasibility of the Chinese and US standards [R]. United States: International Council on Clean Transportation, 2013.
- [118] Buekers J, Van Holderbeke M, Bierkens J, *et al.* Health and environmental benefits related to electric vehicle introduction in EU countries [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2014, **33**: 26-38.

CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning	CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, <i>et al.</i> (1)
Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, <i>et al.</i> (8)
Variation Characteristics of PM _{2.5} Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter	DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (23)
Characteristics of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou	HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (36)
Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter	PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, <i>et al.</i> (48)
Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022	CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, <i>et al.</i> (61)
Analysis of O ₃ Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China	HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, <i>et al.</i> (71)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer	ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, <i>et al.</i> (81)
Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction	FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (93)
Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model	YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, <i>et al.</i> (104)
Driving Forces and Mitigation Potential of CO ₂ Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China	WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, <i>et al.</i> (115)
Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant	ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, <i>et al.</i> (123)
Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years	DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i> (131)
Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, <i>et al.</i> (140)
Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment	ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, <i>et al.</i> (151)
Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment	LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, <i>et al.</i> (159)
“Load-Unload” Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary	LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-ru, <i>et al.</i> (173)
Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir	ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (181)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City	CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, <i>et al.</i> (194)
Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang	LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long (207)
Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan (218)
Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years	WANG Geng, ZHANG Fu-rong (228)
Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect	TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, <i>et al.</i> (239)
Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone	SHI Song, LI Wen, QU Chen, <i>et al.</i> (248)
Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, <i>et al.</i> (262)
Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin	CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, <i>et al.</i> (275)
Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model	Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, <i>et al.</i> (287)
Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model	SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, <i>et al.</i> (300)
Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain	HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, <i>et al.</i> (314)
Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors	SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, <i>et al.</i> (323)
Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region	CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (335)
Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area	LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (343)
Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations	XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, <i>et al.</i> (354)
Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing	LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, <i>et al.</i> (364)
Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils	LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie (376)
Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model	XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, <i>et al.</i> (386)
Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented	MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (396)
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China	LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, <i>et al.</i> (407)
Source Apportionment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City	LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, <i>et al.</i> (417)
Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials	TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, <i>et al.</i> (429)
Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety	HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (439)
Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic	WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (450)
Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks	MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, <i>et al.</i> (459)
Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of <i>Lactuca sativa</i>	NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (470)
Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum	LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, <i>et al.</i> (480)
Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil	ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, <i>et al.</i> (489)
Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities	LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge (496)
Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial <i>Haloxylon ammodendron</i> Forest	WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, <i>et al.</i> (508)
Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity	ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei (520)
Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function	LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, <i>et al.</i> (530)
Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper	CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, <i>et al.</i> (543)
Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water	LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, <i>et al.</i> (555)
Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County	WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, <i>et al.</i> (567)
High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, <i>et al.</i> (576)
Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas	LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, <i>et al.</i> (584)
Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw	LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, <i>et al.</i> (594)
Comparison of Pb ²⁺ Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO ₂ Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid	JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, <i>et al.</i> (606)