

交通领域减污降碳协同控制研究回顾及展望

邓红梅^{1,2}, 梁巧梅^{3,4}, 刘丽静^{3,4*}

(1. 交通运输部水运科学研究院环境保护与节能技术研究中心, 北京 100088; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084; 3. 北京理工大学能源与环境政策研究中心, 北京 100081; 4. 北京理工大学管理与经济学院, 北京 100081)

【摘要】 交通运输行业是二氧化碳和空气污染物排放的主要贡献者之一, 开展交通领域的减污降碳协同控制政策是实现“双碳”目标和空气污染防治的迫切需要。本研究追溯了交通领域减污降碳协同控制的起源及发展, 回顾了交通领域协同减污降碳的主要路径, 具体包括交通基础信息协同、交通排放清单编制协同、交通减排目标设定与减排情景分析协同、交通减排技术及措施工具箱协同, 以及交通减排保障措施协同。然后, 从研究范围、研究方法、协同度评价体系构建、污染相关健康协同效应、研究区域等方面对交通领域减污降碳协同控制的研究实践及特点进行了分析, 并相应提出了对未来研究的展望。

【关键词】 交通; 空气污染物; 碳排放; 协同控制; 研究回顾; 展望

【中图分类号】 X51; X32; F124.5

【文章编号】 1674-6252 (2023) 02-0024-07

【文献标识码】 A

【DOI】 10.16868/j.cnki.1674-6252.2023.02.024

引言

交通领域是全球温室气体和空气污染物排放的主要行业之一, 面临着气候变化和污染防治的双重挑战。交通运输是全球增长最快的温室气体排放源, 从1990年到2021年, 全球交通领域的碳排放量以年均近1.7%的速度增长, 快于任何其他终端使用行业。目前全球交通领域的二氧化碳排放量约为76.4亿t, 约占全球二氧化碳排放量的20%, 占全球温室气体排放量的比例约为17%。中国目前在全球交通领域的碳排放量排名第二, 仅次于美国。在过去的20年里, 中国的经济增长使中国的交通碳排放量飙升, 我国交通领域的二氧化碳排放量在2000年还不到3亿t, 到2020年已上升至9.66亿t。为实现2050年净零排放目标, 交通行业的二氧化碳排放量需在2030年前每年下降约3%^[1]。交通运输也是全球空气污染物排放的主要贡献者, 并对人体健康产生了不利的影响。特别是对于发展中国家而言, 交通运输引起的空气污染及健康损害更为严重。2021年, 我国机动车主要污染物排放总量为1557.7万t, 包括768.3万t的一氧化碳(CO)、200.4万t的碳氢化合物(HC)、582.1万t的氮氧化物(NO_x)和6.9万t的颗粒物(PM)排放。另外,

我国非道路移动源排放也对空气质量产生了显著的影响。在2021年我国非道路移动源分别排放了16.8万t、42.9万t、478.9万t和23.4万t的二氧化硫(SO₂)、HC、NO_x和PM^[2]。很多流行病学研究表明, 交通源排放的空气污染物会对人体呼吸系统、神经系统和心血管系统等造成负面影响, 严重威胁公众健康。由于交通运输行业的二氧化碳和空气污染物排放主要源于化石燃料的燃烧, 具有同根同源的特性, 如何以更加有效的措施协同开展交通领域的减污降碳工作是近年来研究的热点话题。

实现交通领域的减污降碳协同增效是我国实现碳达峰碳中和及绿色发展的迫切需要。首先, 随着“双碳”目标的提出, 加速交通领域的脱碳转型是实现我国碳达峰和碳中和的重点和难点。由于经济增长和交通运输密切相关且交通严重依赖石油消费等客观原因, 交通运输行业是较难实现脱碳进程的关键部门。如果不积极针对交通领域制定合理的减碳路径, 我国将很难如期实现“双碳”目标。其次, 对交通运输行业产生的空气污染进行防治是推进国家绿色发展的重要基础。党的二十大报告全面阐述了推动绿色发展、促进人与自然和谐共生的战略部署, 这要求交通运输

资助项目: 国家自然科学基金项目(72004108, 72074022, 72104022); 中国博士后科学基金项目(2019M650724)。

作者简介: 邓红梅(1989—), 女, 助理研究员, 研究方向为交通及水运领域环保节能等, E-mail: denghongmei@wti.ac.cn。

***责任作者:** 刘丽静(1993—), 女, 副教授, 博士生导师, 研究方向为气候—环境协同治理、能源—环境—经济复杂系统建模等, E-mail: liulijing@bit.edu.cn。

行业在现有基础上大力削减空气污染物的排放，并实现交通领域的绿色发展。当前，我国交通领域面临着碳减排和空气污染防治的双重任务，协同推进交通领域碳减排和污染防治，达到双管齐下和协同增效的效果，是共同推进“双碳”目标和绿色发展的必经之路。

目前针对交通领域减污降碳的文献以定量研究为主，缺乏相关的综述研究，为了整体把握交通领域减污降碳的相关研究工作和研究趋势，基于 20 世纪 90 年代以来中国知网和 Web of Science 核心数据库等相关中英文文献，本研究追溯交通领域协同减污降碳的研究起源及发展，回顾交通领域协同减污降碳的主要路径，分析交通领域减污降碳协同控制的研究实践及特点，并相应提出对未来相关研究的展望。

1 交通领域减污降碳协同治理的起源及发展

早在 20 世纪 90 年代就有相关学者对交通领域大气污染物和温室气体的协同减排进行了研究。例如，Delucchi 在 1996 年的研究中量化了不同运输方式和不同燃料使用情景下大气污染物和温室气体的排放情况，并将其融入交通政策制定的成本效益分析中^[3]。随着 2001 年联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第三次评估报告对“协同效应”进行定义^[4,5]，近 20 年来已有越来越多的研究聚焦于交通领域温室气体和空气污染物的协同治理。

早期的研究主要集中于道路交通相关温室气体和空气污染物的协同减排。例如，IPCC 第三次评估报告主要对道路交通温室气体减排所带来的空气污染物协同效应进行了重点阐述，气候减排政策的实施可以协同减少道路交通的空气污染，暴露其中所引起的健康损害^[4]。道路交通污染造成的健康成本很高，在一项研究估计中，瑞士、法国和奥地利每年与道路交通空气污染相关的死亡人数超过了仅因交通事故造成的死亡人数，且道路交通污染相关的健康成本占其空气污染总健康成本的一半以上^[6]。

后期的一些研究开始细分客货运不同运输方式下的减污降碳协同效应。如 IPCC 第四次评估报告提到了对货运减排的协同效应，比利时的货运网络模拟表明，将货运的边际社会成本内部化将引起卡车运输、铁路和内陆水运的运输比例发生变化。据估计，若将卡车运输比例减少 26%，空气污染和温室气体排放的总成本将下降 15.4%^[7]。通常，交通领域空气污染物减排所能避免的健康损失可以抵消一部分的温室气体减排成本。

后续的相关研究进一步拓展了交通减污降碳的协

同范畴，很多减排政策的实施必然会对其他目标产生正面或者负面的影响。IPCC 第五次评估报告将交通领域气候政策的协同效应系统归纳为三大方面，即环境、社会和经济方面的协同效应，环境协同效应包括空气污染物减缓和生态系统影响等方面，社会协同效应包括公众健康、噪声和道路安全等方面，经济协同效应包括能源安全、拥堵和技术溢出效应等方面^[8]。考虑到更多维的协同目标，交通领域的减污降碳政策需要开展更宏观的政策模拟，以和相关政策目标进行权衡取舍。IPCC 第六次评估报告将交通领域气候政策与相关的联合国可持续发展目标联系起来，进一步拓展了交通领域减污降碳协同效应的维度，并且将相关分析细分至道路交通、航空和航运^[9]。

2 交通领域减污降碳的主要协同路径

交通领域的温室气体减排政策和空气污染物减排政策会产生双向的协同减排效果，因而需要对其产生协同性的路径进行进一步探究。对于实现交通领域减污降碳的协同方式，基于现有研究主要归纳了五种协同路径，即交通基础信息协同、交通排放清单编制协同、交通减排目标设定与减排情景分析协同、交通减排技术及措施工具箱协同和交通减排保障措施协同^[10,11]。

2.1 交通基础信息协同

交通基础信息协同是指通过协同开展文献调研和实地调研，收集交通结构、需求、供给和相关交通减排政策等基础信息，整体掌握相关交通活动的发展现状，为交通领域温室气体和空气污染物排放清单编制、交通减排目标设定和交通减排情景分析等提供数据支撑。交通基础数据涵盖的范围包括道路、轨道、民航、水运和其他移动源等方面，数据需求包括交通工具保有量、运输客货运量、周转量、交通结构、能源结构和相关能源消费量等，数据收集来源可包括年鉴、政府文件、能源平衡表和社会经济相关发展规划等资料，如《交通运输行业发展统计公报》《中国统计年鉴》《交通强国建设纲要》和《国家综合立体交通网规划纲要》等。在现有研究中，交通运输水平和社会经济发展情况等数据主要基于文献调研得到，燃料类型以及能源效率等信息主要基于文献调研与实地调研相结合的方式获得。

2.2 交通排放清单编制协同

交通排放清单编制协同是指通过明确交通排放清

单核算边界并采用相关的清单核算方法,得到交通领域的大气污染物和温室气体排放清单,从而识别交通排放的重点排放源。现有研究主要涉及的温室气体为CO₂,大气污染物包括CO、NO_x、HC、PM、挥发性有机物(VOCs)和SO₂等。交通排放清单的核算边界主要包括明确时间边界、地域边界、排放源边界和排放种类边界。时间边界主要是确定年、月、日等时间分辨率,地域边界是划定交通排放的地理范围,排放源边界主要是明确道路移动源或非道路移动源的排放,排放种类边界是确定所分析的交通大气排放种类。交通领域排放清单的核算方法主要包括周转量法、里程法、能耗法和起降法,在道路和水路交通中多采用周转量法和里程法,非道路机械排放多采用能耗法,航空排放多采用起降法。

2.3 交通减排目标设定与减排情景分析协同

交通减排目标设定与减排情景分析协同是指通过减排目标设定兼顾控制温室气体与大气污染物排放的需求,并通过减排情景分析预测未来不同情景下的交通大气排放量以及相应的减排潜力。通常设定的情景包括基准情景、单一政策情景和组合政策情景,基于基准年的交通温室气体和空气污染物排放现状,在不同情景下对未来交通领域的温室气体和空气污染物的排放量进行预测,从而可以评估不同情景下的交通减排潜力,并得到各情景的减排贡献率或减排行动路线图,为交通领域减污降碳协同控制提供政策支撑。现有研究通常通过情景分析模拟不同减排情景下的协同减排效果,并用温室气体和空气污染物的减排量与排放控制目标进行对比,从而选择最符合减排目标的减排情景。

2.4 交通减排技术及措施工具箱协同

交通减排技术及措施工具箱协同是指交通减排技术及措施需要协同控制温室气体和空气污染物的排放,并产生较优的协同控制效果。该工具箱囊括了待识别和选择的交通协同减排技术及措施,通过评估实现协同效应的成本和效益,进而进一步确定交通领域关键协同减排技术及措施的优先顺序。在现有研究中,交通协同减排工具箱中的技术及措施可大致分为三类:车辆排放类、能源结构类和出行结构类。车辆排放类协同技术及措施包括汽油、柴油车尾气排放标准提高、淘汰老旧车、淘汰摩托车、汽油及柴油油品升级等。能源结构类协同技术及措施包括纯电动公交代替天然气公交、电动出租代替汽油出租、纯电动汽

车代替汽油车、油电混合动力车代替汽油车、纯电动物流货车代替柴油货车等。出行结构类协同技术及措施包括控制城市机动车保有量、优化土地利用布局、公交优先策略、构建步行和自行车系统、低排区政策和无车承运人政策等。

2.5 交通减排保障措施协同

交通减排保障措施协同是指提出落实协同控制交通领域温室气体和空气污染物的保障措施。交通协同减排政策的实施需要跨领域和跨部门的协调,并且需要统筹人才、资金和技术等多方面的资源。交通协同减排政策的保障措施主要包括政策措施、体制机制、信息交流、激励机制、资金支持、能力建设及国际合作、考核评估、公众参与和监督等方面。目前相关研究较多聚焦在政策措施之间的协同,如同时采取协调的交通排放标准政策和碳定价政策可以更大程度地协同减排交通领域的空气污染物和二氧化碳排放^[12]。

3 交通领域减污降碳协同控制研究实践

迄今为止,已经有很多学者对交通领域温室气体和空气污染物减排的协同效应开展了相关研究,该部分从研究范围、研究方法、研究区域等方面分析了目前的研究实践及特点。

从研究范围上来看,交通领域协同减污降碳研究通常聚焦于交通运输行业的子部门,大多以道路交通为主^[13-15],也有研究单独分析航空^[16,17]或航运^[18,19]领域的减污降碳协同效应,全面综合研究交通领域的文章相对较少^[20,21]。目前道路交通关注度较高是由于道路交通是交通领域大气排放的主要贡献者。对于温室气体排放而言,道路交通的排放占比约为70%,航运和航空总共约占23%^[9];而对于空气污染物排放,道路交通所产生的空气污染物会更大程度地威胁城镇居民的身心健康。针对道路交通和航运的研究大多探讨了温室气体和空气污染物的协同减排措施及效果,针对民航领域的研究较多分析了温室气体和空气污染物排放清单之间的协同,少量针对综合交通的研究分析了不同减排措施及情景下的协同减排效果及协同减排潜力。

在研究方法上,学术界广泛使用LEAP模型来评估交通领域温室气体和空气污染物的排放水平,并模拟不同减排情景下的减排潜力^[14,15,21,22]。大气排放评估方法通常可以分为两类:自上而下和自下而上的方法。在自上而下的方法中,将国家或地区的交通运输燃料消费量乘以各种燃料的大气排放系数得到总排放

量。在自下而上的方法中,将各种交通方式的里程或周转量乘以相应的单位油耗得到总油耗,再乘以燃料的大气排放系数得到总排放量。当政策制定者更关注交通运输行业的交通结构、能源结构及能源效率等更多技术细节时,大多采用自下而上的方法,因为它可以评估不同交通工具及不同情景的排放贡献率。目前自下而上的建模软件主要包括 TREMOVE、TV-SIM、TRANUS 和 LEAP 模型等,其中 LEAP 模型是较为流行的分析方法,因为它具有灵活的模型结构和数据分析框架^[23]。

从协同度评价体系的构建来看,目前交通领域减污降碳协同度评价体系的分析方法通常包括协同控制坐标系分析、雷达图分析和污染物减排交叉弹性分析等。协同控制坐标系分析和雷达图分析可以直观地反映不同污染物的协同减排效果,污染物减排交叉弹性分析则可以进一步量化相关的协同效益。例如,Cheng 等使用协同控制效应坐标系评估了珠三角地区不同的车辆排放控制措施对空气污染物和温室气体减排的协同程度,研究显示协同减排效果最明显的单一减排措施包括淘汰黄标车和结构性控制措施^[24]。Jiao 等使用雷达图分析法研究了广州城市交通减排政策的二氧化碳和空气污染物协同减排效应,并指出调整运输方式、电气化、增加生物燃料和氢能的应用等措施具有较为显著的协同效益^[15]。Alimujiang 等使用协同控制坐标系和污染物减排交叉弹性分析探讨了在上海推广电动私家车、出租车和公共汽车的协同减排能力和效果,通过比较交叉弹性的大小表明电动公交车的协同减排效果最优^[25]。

在交通领域减污降碳的分析角度上,部分研究进一步将空气污染物的协同效应扩展至健康效应的分析^[26-32]。分析交通减碳政策健康协同效应的重点是构建“能源消费—环境排放—污染物浓度—健康效应—经济损失”的综合评估模型,在该评估链条中,关键在于构建评估污染物浓度的空气质量模型。自第一代空气质量模型推出以来,总共经历了三代空气质量模型的演变。第一代空气质量模型是从高斯模式衍生出来的一系列模型,如 CALPUPP、ISC、ADMS 和 AERMOD 等模型,第一代模型以物理扩散为主,没有或只有简单的化学反应模块,但由于其结构简单,数据要求低且计算快速简便,至今仍应用广泛。第二代空气质量模型改进了单一污染物的化学反应模块,但是缺乏不同污染物之间的耦合,如 ROM、STEM、EMEP 和 UAM 模型等。第三代空气质量模型构建统一的模型框架纳入了多种污染物的化学反应过程,如

CMAQ、CAMx、GEOS-Chem、WRF-Chem 等模型^[33]。目前在交通减污降碳领域应用的空气质量模型以第一代和第三代为主。第一代模型如 Aggarwal 等在分析德里交通运输产生的空气质量和公众健康影响时所用到的 ISC-AERMOD 模型^[31],Xia 等在研究南澳大利亚州阿德莱德与交通相关的空气污染和健康协同效益时所用到的 TAPM 模型^[28]。第三代模型如 Shi 等在探讨中国清洁车队的二氧化碳、空气污染物排放和健康效益时所用到的 WRF-CAMx 模型^[32]。

从研究区域来看,现有交通领域协同减污降碳的研究较多聚焦在城市和区域层面^[14,15,24,25,34],其次是国家层面^[13,35,36]和国际层面^[30]。由于交通领域的空气污染存在地域性,因而国际层面的交通领域协同减污降碳研究相对较少。在国家层面,欧美等发达国家已显著降低了交通相关 PM_{2.5} 等污染物的排放水平,而印度和中国等发展中国家仍是交通相关 PM_{2.5} 等污染物平均浓度较高的国家,因此很多相关的研究都聚焦在发展中国家。现有研究较多集中在城市层面是因为城市交通是当地最主要的大气污染源之一,比如中国大城市交通运输行业对 PM_{2.5} 排放的贡献度可高达 45%^[27]。针对城市层面的交通领域协同减污降碳政策可以显著降低城市居民的健康影响,并产生减少拥堵和减缓噪声等其他协同效益。

4 交通领域减污降碳协同治理研究展望

学术界目前已针对交通领域减污降碳协同控制开展了大量的研究,为交通领域协同减排政策的落地实施提供了理论和方法支撑,为了更加有效地推动交通领域的协同减污降碳工作,本研究提出了如下几点研究展望。

首先,交通行业的减污降碳目标需整体覆盖道路交通、水运、航空、铁路和管道等客货运领域,随后针对各子部门提出进一步的协同减污降碳目标。随着我国“双碳”目标的提出,我国需要对交通运输行业的碳排放量进行整体管控与规划,并提出交通领域整体的碳达峰和碳中和路线。同时,党的二十大报告也明确提出了推动绿色发展的目标,实现该目标需要交通运输行业全面开展空气污染物减排。在此背景下,我国需要提前规划交通领域协同减污降碳的目标及技术措施。在确定交通运输行业协同减污降碳的整体目标后,进一步将协同减排目标分解至道路交通、水运、民航、铁路和管道等子部门。

第二,在未来的研究中需要加强构建交通领域的综合评估模型,同时囊括交通领域的协同减排成本及

收益,以便决策者在政策制定时开展更加有效的成本效益分析。现有研究虽然大多采用包含更多技术细节的自下而上的方法去评估不同措施及情景下交通领域温室气体和空气污染物的协同减排效果,但是仍较为缺乏纳入协同减排成本的综合分析。排放控制措施的成本效益分析是交通运输行业制定和完善大气减排政策的重要组成部分,加强构建全面考虑减排措施总成本及效益的综合评估模型,可以促进决策者制定最有效的交通领域协同减排政策^[37]。

第三,构建协同度评价体系可以有效识别协同减排政策的薄弱点和主要问题,在未来交通领域协同减污降碳的研究中可适当构造将协同减排效果归一化的大气减排当量指标,从而以更加直观的单一数值来判断各种减排政策的协同减排效果。协同控制坐标系等分析手段更加适用于大气污染排放物种类和减排控制措施较少的研究情景,当大气污染排放物种类和减排措施较多时,其分析效果将会显得较为繁杂。而归一化的大气减排当量指标将合并统计各类温室气体和大气污染物的减排量,统一分析不同减排措施的累积协同减排效果,通过最终的数值排序可以较易识别出需重点推进的协同减排政策。

第四,在未来分析交通领域减污降碳的健康协同效益时,可进一步强化空气质量模型的使用,并将健康影响的评估拓展到更多的污染物。在模拟交通健康协同效应的研究中应推动跨领域的学术合作,并尽量使用精度较高的第三代空气质量模型,进而模拟多种污染物的耦合化学反应及污染物浓度。影响公众健康的大气污染排放物可以从PM_{2.5}进一步拓展至臭氧和二氧化碳,在现有交通领域相关研究中的健康效益仍以PM_{2.5}的健康影响为主,随着臭氧问题的凸显应进一步研究与臭氧相关的健康效应,以及气候变化造成的间接健康影响。

第五,在分区域的交通领域减污降碳协同控制研究中,也需关注并评估相关协同减排政策的公平性影响。弱势地区的人群由于地处公路、机场、铁路或港口等交通排放源附近,通常会更大程度地暴露在空气污染物中,并遭受更严重的健康影响,如哮喘、心血管疾病、癌症和过早死亡等^[38]。为了更有效地评估交通领域气候及环境协同减排政策的公平性影响,了解公平性,以及它如何影响气候并产生环境风险至关重要。如果没有保护措施来解决公平性问题,未来交通领域的气候及环境变化可能会加强和加剧现有的不公平性,并使弱势地区的人群面临更大的气候及环境风险。

参考文献

- [1] IEA. Transport[EB/OL]. Paris: IEA, 2022. <https://www.iea.org/reports/transport>.
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 中国移动源环境管理年报 2022[R]. 北京, 2022.
- [3] DELUCCHI M. Emissions of Criteria Pollutants, Toxic Air Pollutants, and Greenhouse Gases, from the Use of Alternative Transportation Modes and Fuels[R]. Davis: University of California, 1996.
- [4] METZ B, DAVIDSON O, SWART R, et al. Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [5] 王灿, 邓红梅, 郭凯迪, 等. 温室气体和空气污染物协同治理研究展望[J]. 中国环境管理, 2020, 12(4): 5-12.
- [6] SOMMER H, SEETHALER R, CHANEL O, et al. Health Costs Due to Road Traffic-Related air Pollution: An Impact Assessment Project of Austria, France and Switzerland[R]. Bern: Federal Department of Environment, Transport, Energy and Communications, Bureau for Transport Studies, 1999.
- [7] METZ B, DAVIDSON O R, BOSCH P R, et al. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel for Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [8] SHUKLA P R, SKEA J, SLADE R, et al. Climate Change 2014: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [9] SHUKLA P R, SKEA J, SLADE R, et al. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [10] 能源基金会, 宇恒可持续交通研究中心, 世界资源研究所, 等. 城市交通大气污染物与温室气体协同控制技术指南(1.0版本)[R]. 北京, 2019.
- [11] 宇恒可持续交通研究中心. 城市交通大气污染物与温室气体协同控制技术指南(2.0版本)[R]. 北京: 宇恒可持续交通研究中心, 能源基金会, 2021.
- [12] KISHIMOTO P N, KARPLUS V J, ZHONG M, et al. The impact of coordinated policies on air pollution emissions from road transportation in China[J]. Transportation research part D: transport and environment, 2017, 54: 30-49.
- [13] WEGER L B, LEITÃO J, LAWRENCE M G. Expected impacts on greenhouse gas and air pollutant emissions due to a possible transition towards a hydrogen economy in German road transport[J]. International journal of hydrogen energy, 2021, 46(7): 5875-5890.
- [14] DUAN L F, HU W, DENG D, et al. Impacts of reducing air pollutants and CO₂ emissions in urban road transport through 2035 in Chongqing, China[J]. Environmental science

- and ecotechnology, 2021, 8: 100125.
- [15] JIAO J D, HUANG Y, LIAO C P. Co-benefits of reducing CO₂ and air pollutant emissions in the urban transport sector: a case of Guangzhou[J]. Energy for sustainable development, 2020, 59: 131-143.
- [16] WANG K, WANG X Q, CHENG S Y, et al. National emissions inventory and future trends in greenhouse gases and other air pollutants from civil airports in China[J]. Environmental science and pollution research, 2022, 29(54): 81703-81712.
- [17] SONG S K, SHON Z H. Emissions of greenhouse gases and air pollutants from commercial aircraft at international airports in Korea[J]. Atmospheric environment, 2012, 61: 148-158.
- [18] International Council on Clean Transportation (ICCT). Air pollution and greenhouse gas emissions from ocean-going ships: impacts, mitigation options and opportunities for managing growth[J]. Maritime studies, 2007, 2007(153): 3-10.
- [19] SHARAFIAN A, BLOMERUS P, MÉRIDA W. Natural gas as a ship fuel: assessment of greenhouse gas and air pollutant reduction potential[J]. Energy policy, 2019, 131: 332-346.
- [20] 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.
- [21] 冯相昭, 赵梦雪, 王敏, 等. 中国交通部门污染物与温室气体协同控制模拟研究 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(3): 279-288.
- [22] SHABBAR R, AHMAD S S. Monitoring urban transport air pollution and energy demand in Rawalpindi and Islamabad using leap model[J]. Energy, 2010, 35(5): 2323-2332.
- [23] LI Y, BAO L, LI W X, et al. Inventory and policy reduction potential of greenhouse gas and pollutant emissions of road transportation industry in China[J]. Sustainability, 2016, 8(12): 1218.
- [24] 程晓梅, 刘永红, 陈泳钊, 等. 珠江三角洲机动车排放控制措施协同效应分析 [J]. 中国环境科学, 2014, 34(06): 1599-1606.
- [25] ALIMUJIANG A, JIANG P. Synergy and co-benefits of reducing CO₂ and air pollutant emissions by promoting electric vehicles—A case of Shanghai[J]. Energy for sustainable development, 2020, 55: 181-189.
- [26] WOODCOCK J, EDWARDS P, TONNE C, et al. Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: urban land transport[J]. The lancet, 2009, 374(9705): 1930-1943.
- [27] REQUIA W J, MOHAMED M, HIGGINS C D, et al. How clean are electric vehicles? Evidence-based review of the effects of electric mobility on air pollutants, greenhouse gas emissions and human health[J]. Atmospheric environment, 2018, 185: 64-77.
- [28] XIA T, NITSCHKE M, ZHANG Y, et al. Traffic-related air pollution and health co-benefits of alternative transport in Adelaide, South Australia[J]. Environment international, 2015, 74: 281-290.
- [29] SHEN J X, CHEN X T, LI H R, et al. Incorporating health cobenefits into province-driven climate policy: a case of banning new internal combustion engine vehicle sales in China[J]. Environmental science & technology, 2023, 57(3): 1214-1224.
- [30] ANENBERG S, MILLER J, HENZE D, et al. A Global Snapshot of the Air Pollution-Related Health Impacts of Transportation Sector Emissions in 2010 and 2015[R]. Washington: International Council on Clean Transportation, 2019.
- [31] AGGARWAL P, JAIN S. Impact of air pollutants from surface transport sources on human health: a modeling and epidemiological approach[J]. Environment international, 2015, 83: 146-157.
- [32] SHI X R, LEI Y, XUE W B, et al. Drivers in carbon dioxide, air pollutants emissions and health benefits of China's clean vehicle fleet 2019–2035[J]. Journal of cleaner production, 2023, 391: 136167.
- [33] 薛文博, 王金南, 杨金田, 等. 国内外空气质量模型研究进展 [J]. 环境与可持续发展, 2013, 38(3): 14-20.
- [34] DONATEO T, LICCI F, D'ELIA A, et al. Evaluation of emissions of CO₂ and air pollutants from electric vehicles in Italian cities[J]. Applied energy, 2015, 157: 675-687.
- [35] MAO X Q, YANG S Q, LIU Q, et al. Achieving CO₂ emission reduction and the co-benefits of local air pollution abatement in the transportation sector of China[J]. Environmental science & policy, 2012, 21: 1-13.
- [36] YUAN R X, MA Q, ZHANG Q Q, et al. Coordinated effects of energy transition on air pollution mitigation and CO₂ emission control in China[J]. Science of the total environment, 2022, 841: 156482.
- [37] LIU Y H, LIAO W Y, LI L, et al. Reduction measures for air pollutants and greenhouse gas in the transportation sector: a cost-benefit analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207: 1023-1032.
- [38] KANE ELIZA J. Evaluating Equity in Transportation Greenhouse Gas Emission Reduction Strategies in Local Climate Action Planning in Oakland, California (2022). Master's Projects and Capstones. 1483.

(下转23页)

Synergistic Effects of Reduce Pollution and Carbon Emissions: Policy Barriers and Innovation Path

SUN Xueyan¹, BAI Yuxin¹, WANG Can^{1,2*}

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As China is confronted with the two strategic tasks of achieving the fundamental improvement of ecological environment and achieving the carbon peak and carbon neutrality, the policy system of synergistic governance needs to embed the policy goal of carbon emissions in the existing ecological environment management system. Moreover, the institutional elements such as norms, resources and tools involved in reduce pollution and carbon emissions will be re-coordinated and integrated under the goal of synergistic paths. In terms of policy concepts, policy tools and policy subjects, reduce pollution and carbon emissions have path dependence on the traditional pollution prevention policy system, which may lead to the problems, such as lack of scientific decision-making, regulatory failure, poor policy sustainability, policy rigidity, and insufficient investment of market subjects. Therefore, it is necessary to speed up the improvement of relevant laws and regulations on synergistic paths, strengthen the overall synergy among multiple policy instruments, and optimize the management synergy of differentiated policies.

Keywords: synergistic effects; carbon peak; carbon neutrality; carbon assessment; reduce pollution and carbon emissions

（上接29页）

Review and Prospect of Co-control for Reducing Pollution and Carbon Emissions in Transportation Industry

DENG Hongmei^{1,2}, LIANG Qiaomei^{3,4}, LIU Lijing^{3,4*}

(1. Environmental Protection & Energy Saving Technology Research Center, China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Center for Energy and Environmental Policy Research, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 4. School of Management and Economics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The transportation industry is one of the major contributors to CO₂ and air pollutant emissions, and it is urgent to carry out collaborative carbon and pollution reduction policies in the transportation industry to achieve the “dual carbon” goals and prevent air pollution. This study traces the origin and development of research on co-control of reducing CO₂ and air pollutant emissions in the transportation industry, and reviews its main paths, including coordinated essential traffic information, merged transport emission inventories, united target setting and scenario analysis on transport emission reduction, combined technology and measure toolbox for transport emission reduction, and systematized supporting measures for transport emission reduction. Then, the practices and characteristics of research on co-control of CO₂ and air pollutant emissions in the transportation industry are analyzed in terms of research scope, research methods, construction of synergy degree evaluation system, pollution-related health co-benefits, and research regions, and the outlook on future research is proposed accordingly.

Keywords: transportation; air pollutants; carbon emissions; co-control; review; prospect