

目次

长三角城市群 PM _{2.5} 时空变化和影响因素分析	吴舒祺, 么嘉祺, 杨冉, 张镭文, 赵文吉 (5325)
近10年华北背景大气 PM _{2.5} 中重金属健康风险及污染来源的变化	石晓兰, 宗政, 彭辉, 张欣捷, 孙溶, 王晓平, 田崇国 (5335)
典型生态脆弱区水库周边大气降尘重金属风险评价及 APCS-MLR 模型溯源	石震宇, 卢俊平, 刘廷玺, 张晓晶, 贾永芹, 王怡, 刘莹慧 (5344)
硫酸铵和硝酸铵对镇江市大气 PM _{2.5} 理化性质的影响	曹军, 谢佳丽, 孙娟, 李锦雯, 徐政, 华陈杰, 张雨生, 宋柏颖, 刘永春 (5356)
基于地统计模型的上海大气污染物多建模方法的比较	吴英晗, 许嘉, 段玉森, 伏晴艳, 杨文 (5370)
基于多源数据的西安大气重污染过程案例分析	王楠, 高宇星, 屈焱, 曲静, 师菊莲, 时迎强, 周岳, 朱崇抒 (5382)
七大区域不同温湿条件下臭氧浓度变化	刘静达, 何超, 赵舒曼, 朱俊, 汪巍, 王莉莉, 王跃思 (5392)
基于 Brute-Force 方法的京津冀区域夏季臭氧反应机制	李睿, 魏巍, 王兴锋, 王晓琦, 程水源 (5400)
黄冈市大气挥发性有机物污染特征、来源及对臭氧生成的影响	连世泽, 邓萌杰, 陈楠, 王语嫣, 陶卉婷, 成海容 (5410)
宝鸡市夏季不同功能区挥发性有机物污染特征及健康风险评价	庞晓蝶, 陈来国, 高博, 王硕, 赵伟, 刘明, 陆海涛, 梁小明 (5418)
河北省 2013~2020 年大气污染治理进程中的减污降碳协同效益	孙世达, 张改革, 孙露娜, 徐晨曦, 郭梦婕, 崔泽琪, 何学娟, 李富柏, 宋子谦, 薄宇, 贺克斌 (5431)
江苏省二氧化碳减排政策对空气质量改善增益	王松伟, 汤克勤, 张皓然, 刘弯弯, 白露, 李楠 (5443)
“双碳”背景下北京市农业温室气体排放评估及“十四五”时期减排潜力预测	杨帆, 韩玉花, 隗潇, 毕海涛, 王晓亚 (5456)
多情景视角下中国能源消费和碳达峰路径	陈喜阳, 周程, 王田 (5464)
北京市河流生态系统健康评价	张宇航, 渠晓东, 彭文启, 张敏, 张海燕, 杜龙飞, 张舒朝 (5478)
人工湿地去除抗生素抗性基因的研究进展	薛慧, 林辉, 王智, 杨玉义 (5490)
贵州乌都河流域雨季河水水化学特征及其控制因素	涂春霖, 寸得欣, 和成忠, 陶兰初, 马一奇, 刘振南 (5498)
土地利用对典型喀斯特河流溶解性有机质的直接和间接影响	张柳柳, 刘睿, 郑达燕, 郑财贵, 张静 (5511)
太湖表层沉积物重金属的分布、来源与生态风险评价	余符合, 王姝, 钱程远, 江桥, 陈涛, 唐芸芸, 全晖, 王建军, 成小英 (5524)
西昌邛海沉积物重金属含量时空变化与污染评价	李国展, 王晓雨, 颜梦霞, 陈文科, 张清慧, 张恩楼, 刘恩峰 (5536)
太湖沉积物好氧细菌空间分布与氮磷来源及风险	程新宇, 李岩, 李晔, 王艮梅, 张焕朝, 温佳乐, 李柠, 虞叶, 叶子, 胡捷翔, 李志龙, 刘敏 (5546)
南昌城市湖泊浮游真菌群落组成、共生模式及影响因素	黄祎, 王鹏, 丁明军, 黄高翔, 张华, 聂明华, 高鹏飞, 叶深 (5556)
不同材质水窖沉积物中真菌群落差异及其与环境因子的相关性	杨浩, 包文雄, 杨晓妮, 孙洪伟, 王宝山, 周添红 (5567)
超声复合铁活化过硫酸盐处理有机废水	李柄池, 李昊阳, 徐祺辉, 尤宏, 李之鹏, 谢冰涵, 柳峰 (5578)
CuNiFe LDHs/BiO _{2-x} 异质结可见光活化过硫酸盐降解环丙沙星	党璞, 赵亚娟, 谢会东, 王康康, 赵儒霞 (5587)
核桃青皮生物炭对重金属的吸附效应分析	朱晓丽, 程燕萍, 申烨华, 张子夜, 王军强, 尚小清 (5599)
我国不同利用方式土壤的磺胺类和大环内酯类抗生素抗性基因积累	张秀, 宋建宇, 高欢, 吴凤芝 (5610)
基于机器学习的情景分析的我国焦化行业企业用地污染预测	李凯, 郭广慧, 雷梅 (5622)
基于 PSRM 模型的京津冀地区生态脆弱性时空演变	武帅, 田冰, 顾世杰, 胡引翠 (5630)
生物炭与土壤调理剂对滨海荒盐碱地改良效应	杨莉琳, 谢志霞, 朱向梅, 撒旭 (5641)
不同改良物质添加对滨海盐碱地土壤重金属及酶活性的影响	解雪峰, 徐梓晴, 田再洋, 卜心国, 徐飞, 梁晶, 濮励杰 (5649)
华北典型工矿城镇土壤重金属来源解析及潜在生态风险评价	梁家辉, 田亦琦, 费杨, 刘昭玥, 师华定, 漆静娴, 莫莉 (5657)
基于蒙特卡罗模拟的煤矸山周边农用地土壤重金属健康风险评估	马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 刘萍, 孙静 (5666)
黑土区城郊耕地重金属污染空间扩散机制	李文博, 闫卓冉, 祝元丽 (5679)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的燃煤电厂周边土壤潜在有毒元素 (PTEs) 污染特征与来源解析	李军, 李旭, 高世刚, 李开明, 焦亮, 臧飞, 潘文惠, 台喜生 (5689)
稻田土壤砷、镉复合污染阻控技术研究进展	唐舒庭, 卢一铭, 肖盛柏, 崔浩, 魏世强 (5704)
磷基材料对土壤铅稳定化效果及影响因素的 Meta 分析	王亚坤, 张琛, 李媛媛, 秦晴晴 (5718)
硅肥等量施用对土壤镉生物有效性和水稻吸收镉的影响	吴家梅, 谢运河, 官迪, 陈山, 陈锦, 龙世平, 纪雄辉 (5727)
氯基和硫基肥对土壤镉水稻生物有效性的影响	欧阳晴雯, 龙坚, 郝汉驰, 王文禹, 李耀, 黄奕航, 侯红波, 彭佩钦 (5737)
外源亚精胺调控黑麦草根响应镉胁迫及其转录组学分析	余志强, 胡嘉源, 李尚珂, 施维林, 史广宇 (5746)
外源植物激素喷施对三叶鬼针草修复镉污染土壤的影响	杨青, 谢俊婷, 张志盼, 杨昭, 方治国, 李志恒, 赵雯璐, 刘惠君, 都韶婷 (5757)
不同程度镉污染农田中粉葛镉富集转运特征	林小兵, 何绍浪, 吴多基, 周利军, 武琳, 彭君, 黄尚书, 王斌强, 黄欠如, 吴建富 (5769)
不同聚合物类型微塑料浸出液的表征及其对生菜种子萌发的影响	杨柳, 张琳, 邓敏, 杨文, 韩云, 金明路, 谢俊杰, 贺冕, 蔡怡敏, 章海波 (5779)
基于酶化学计量法探究有机无机肥配施调控果园土壤微生物碳、磷代谢机制	吕凤莲, 梁霖霖, 吉冰洁, 郑朝霞, 赵志远, 李利敏, 李紫燕, 郑伟, 翟丙年 (5788)
长年耕作对北方旱作麦田土壤细菌群落结构及理化性质的影响	钟融, 王培如, 孙培杰, 林文, 任爱霞, 任永康, 孙敏, 高志强 (5800)
秸秆还田配施石灰对酸性水稻土有机碳及碳库管理指数的影响	黄巧义, 林碧珊, 饶国良, 戴文举, 李苹, 吴永沛, 黄建凤, 曾招兵, 宋慧敏, 唐桂虎, 张木, 徐培智 (5813)
有机无机肥长期配施对果园土壤碳库及温室气体排放的影响	张媛, 郑朝霞, 赵志远, 冯天宇, 郑伟, 翟丙年 (5823)
秸秆生物炭对河套灌区膜下滴灌玉米农田生态系统碳足迹的影响	聂会东, 屈忠义, 杨威, 王丽萍, 张如鑫, 杨旖璇 (5832)
不同气候情景下甘肃草地碳收支时空模拟与预测	孙倩, 张美玲, 王鑫婧, 徐士博 (5842)
聚乙烯微塑料对海洋微藻生长和卤代烃释放的影响	杨帆, 陈华, 翟星, 杨桂朋, 何真 (5852)
饮用水中微纳塑料的“胶体泵效应”研究进展	赵伟高, 张晓晴, 田一梅, 赵鹏 (5861)
光固化 3D 打印废塑料来源、处置技术和环境影响	张阔楠, 孙昱楠, 宋玉茹, 马畅, 陈冠益 (5870)
《环境科学》征订启事 (5455) 《环境科学》征稿简则 (5621) 信息 (5717, 5756, 5768)	

河北省 2013 ~ 2020 年大气污染治理进程中的减污降碳协同效益

孙世达¹, 张改革¹, 孙露娜², 徐晨曦¹, 郭梦婕¹, 崔泽琪¹, 何学娟¹, 李富柏³, 宋子谦⁴, 薄宇^{1,5*}, 贺克斌^{6,7}

(1. 清华大学地球系统科学系, 地球系统数值模拟教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 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, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300071; 3. 北京信息科技大学信息与通信工程学院, 北京 100101; 4. 清华大学深圳国际研究生院, 深圳 518055; 5. 中国科学院大气物理研究所, 东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029; 6. 清华大学环境学院, 北京 100084; 7. 清华大学碳中和研究院, 北京 100084)

摘要: 当前,我国面临着大气污染治理与碳减排的双重挑战,“减污降碳”成为了社会经济绿色转型的重要抓手. 大气污染物和 CO₂ 排放清单是“减污降碳”工作的基础支撑,但已有研究存在着物种覆盖不全、源类体系不一、时间范围较窄等问题. 基于统一的源分类体系与源排放表征技术,建立了河北省 2013 ~ 2020 年排放清单,据此分析了排放的总量趋势、结构演变、变化驱动、协同效益和区域分布. 研究期内,河北省取得了社会经济发展与人为源排放控制的双赢,SO₂ 排在“大气十条”期间下降速度较快,VOCs 和 NH₃ 排在“蓝天保卫战”期间减排效果更好,NO_x 和 PM_{2.5} 排放的下速度相对稳定,CO₂ 排放略有上升. 燃煤治理有效削减了大气污染物和 CO₂ 排放,重点行业超低排放改造降低了 SO₂、NO_x 和 PM_{2.5} 排放,但 VOCs 治理力度有待提升. 电力源和民用源实现了大气污染物与 CO₂ 的协同减排,散煤治理从源头优化了能源结构,使得民用源具有更高的减排协同度. 河北省“减污降碳”的重点区域为石家庄、唐山、邯郸、保定和廊坊. 研究提出的方法与结论可为区域“减污降碳”工作提供技术借鉴与决策参考.

关键词: 排放清单; 大气污染物; 碳排放; 协同效益; 河北省

中图分类号: X24, X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)10-5431-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202210097

Synergistic Benefits of Pollution and Carbon Reduction from Air Pollution Control in Hebei Province from 2013 to 2020

SUN Shi-da¹, ZHANG Gai-ge¹, SUN Lu-na², XU Chen-xi¹, GUO Meng-jie¹, CUI Ze-qi¹, HE Xue-juan¹, LI Fu-bai³, SONG Zi-qian⁴, BO Yu^{1,5*}, HE Ke-bin^{6,7}

(1. Ministry of Education Key Laboratory for Earth System Modeling, Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Urban Transport Emission Research, State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin, 300071, China; 3. School of Information and Communication Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China; 4. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China; 5. Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 6. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 7. Institute for Carbon Neutrality, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Recently, China has been facing the dual challenges of air pollution control and carbon emission reduction. Pollution and carbon reduction have become a breakthrough point for green socio-economic transformation. Air pollutant and CO₂ emission inventories provide a tool for monitoring pollution and carbon reduction; however, there have been some problems in previous studies, including incomplete species coverage, different source classifications, and narrow time scales. Based on the unified emission source classification system and estimation method, an emission inventory was developed for Hebei Province from 2013 to 2020, and the emission trends, structure change, driving force, synergistic benefits, and spatial distribution were analyzed. Hebei Province achieved a balance during the study period in socio-economic development and anthropogenic emission control. SO₂ emissions decreased rapidly during the “Ten Atmospheric Measures” period. VOCs and NH₃ emissions reduction were more significant during the “Blue Sky Defense War” period. The decrease rates of NO_x and PM_{2.5} emissions were relatively stable, and CO₂ emissions increased slightly. The coal-fired treatment effectively reduced the air pollutant and CO₂ emissions and strengthening the emission standards for key industries reduced SO₂, NO_x, and PM_{2.5} emissions; however, the VOCs emission control requires improvement. Power and residential sources achieved co-reduction of air pollutants and CO₂ and reducing residential coal optimized the energy structure, thereby leading to greater synergistic benefits in the residential source. The key pollution and carbon reduction areas in Hebei Province were Shijiazhuang, Tangshan, Handan, Baoding, and Langfang. The methods and conclusions in this study can provide technical and decision-making references for regional pollution and carbon reduction efforts.

Key words: emission inventory; air pollutants; carbon emissions; synergistic benefit; Hebei Province

收稿日期: 2022-10-10; 修订日期: 2022-12-04

基金项目: 能源基金会河北省“十四五”大气污染防治与温室气体协同控制策略研究项目(G-2009-32432)

作者简介: 孙世达(1991 ~),男,博士,主要研究方向为多尺度动态排放清单开发与应用, E-mail: sunshida314@126.com

* 通信作者, E-mail: boyu@mail. iap. ac. cn

随着《大气污染防治行动计划》(“大气十条”)和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》(“蓝天保卫战”)的先后实施,近年来我国空气质量有了明显改善,但不少城市的大气污染程度仍处于高位^[1].我国同时也是全球 CO₂ 第一排放大国,碳达峰、碳中和目标的实现面临着巨大挑战^[2].作为世界上最大的发展中国家,如何在社会经济高速发展的过程中,统筹空气质量改善与气候变化应对,是我国面临的重要问题.空气质量改善的重点是降低大气污染物排放,气候变化应对的核心是降低以 CO₂ 为代表的温室气体排放,二者具有“同根、同源、同过程”的特征^[3].大气污染治理政策的实施可以促进能源、产业、交通与用地结构的优化调整,在改善空气质量的同时带来显著的协同降碳效果^[4].与之相对的,节能和气候变化减缓的政策也有助于减少大气污染物排放^[5].“减污降碳”作为社会经济绿色转型的重要抓手,已成为生态环境领域研究的热点与前沿,覆盖了排放清单、情景预测、政策评估和协同分析等诸多方面^[6].

排放清单是“减污降碳”工作推进的基础数据,用于分析大气物种的变化趋势、来源结构与空间分布,但已有研究存在着物种覆盖不全、源类体系不一和时间范围较窄等方面的问题,难以有效支撑区域“减污降碳”政策的制订.从物种覆盖来看,单独的大气污染物或 CO₂ 排放清单的研究已较为丰富^[7,8],但同时涉及两类排放的研究较为少见.从源类体系来看,在我国城市生态环境治理工作中,大气污染物排放清单通常参考《城市大气污染物排放清单编制技术手册》编制^[9],CO₂ 排放清单大多根据《国家温室气体清单指南》和《省级温室气体清单编制指南》编制^[10],两类排放清单在分类体系和计算方法上均存在较大差异.从时间范围来看,源类和物种覆盖相对完整的排放清单研究,多数只面向特定年份^[11,12],难以形成长时间序列,无法表征排放的演变趋势.而已有的长时间序列研究,有些是源类齐全,但仅面向单一大气物种,如 NMVOC^[13] 和 NH₃^[14]等,有些是物种齐全,但只考虑了单一源类,如机动车^[15]和生物质^[16]等.总体而言,极少有研究能在统一的源分类与方法学体系下,综合分析多污染物与 CO₂ 排放的长时间序列演变特征,这就使得措施评估与协同分析缺乏数据基础^[5,17],成为了“减污降碳”决策的技术瓶颈.

京津冀地区位于中国北部,包括北京、天津和河北这3个省级行政区.改革开放以来,京津冀的工业化与城市化发展迅速,当前已成为了人口密集、能耗密集和排放密集的重点区域^[18].京津冀地区的

人为源排放主要来自河北省^[19].本研究基于统一的源分类体系与源排放表征技术方法,建立了河北省2013~2020年人为源大气污染物与 CO₂ 排放清单,在此基础上,分析了排放的演变趋势,对比了“大气十条”和“蓝天保卫战”时期排放的结构性差异,并将研究期内的排放变化进行了精细分解,评价了不同源类减排的协同效益,同时在城市尺度上讨论了排放的分布规律,识别出了减排的关键源类、关键区域和关键措施.本研究既可为河北省以及类似区域的污染治理与节能降碳工作提供决策参考,也可为“减污降碳”相关领域的研究者提供方法借鉴.

1 材料与方法

1.1 排放清单

以河北省为研究区域,以2013~2020年为研究时段,建立人为源大气污染物与 CO₂ 排放清单.为保证核算边界的一致性,只考虑研究区域内一次能源消费和生产过程产生的排放,不考虑二次能源(如电力和热力)使用以及产业链上下游产生的排放,计算方法见公式(1):

$$E_s = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l A_{ij} X_{ijk} EF_{sijk} C_{ijkl} (1 - \eta_{sl}) \quad (1)$$

式中, s 为排放物种,包括 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs、NH₃ 和 CO₂; i 为排放部门/行业,涵盖电力、工业、民用、交通和农业这5大类排放源; j 为燃料/产品; k 为燃烧/工艺技术; l 为末端控制技术; E_s 表示物种 s 的年排放量; A_{ij} 为 i 部门排放源活动水平,包括燃料消耗量/产品产量 j 等; X_{ijk} 为细分活动水平下燃烧/工艺技术 k 的普及率; EF_{sijk} 为排放系数,表征 i 部门 j 活动水平在 k 技术下未经末端处理的物种 s 排放水平; C_{ijkl} 和 η_{sl} 分别为相应情况下末端控制技术 l 的渗透率以及对物种 s 的去除效率.排放源活动水平 A 、技术分布 X 和末端装置渗透率 C 取自于国家统计局、河北省统计局、环境统计与排污许可等相关数据库.排放系数 EF 和去除效率 η 主要参考文献[20].由于碳捕集等 CO₂ 末端控制技术尚未普及,现阶段计算 CO₂ 排放时 η 通常取 0.

对于电力、水泥和钢铁等主要工业企业排放源,按照工业过程逐个排污设备计算排放量,动态表征经济发展、产业变迁和技术进步等因素引起的排放变化^[21].对于民用源,通过入户调查修正宏观数据资料中民用散煤与生物质燃料消耗的统计误差,采用更准确的活动水平和技术分布降低排放计算的不确定性^[22].对于道路机动车,综合考虑气温、湿度、海拔和工况等参数,基于逐时气象场、排放因子模型、路网信息和交通流多源融合数据,提升计

算结果的时空解析度^[23].

1.2 变化分解

基于所构建的长时间序列排放清单,在部门层面对排放进行分解,以识别排放变化的驱动源类,探究引起变化的深层原因. 本研究中排放变化分解大致包括三步.

首先,将研究期内(2013 ~ 2020 年)排放总量的变化分解为排放增量与排放减量,如公式(2)所示:

$$EC_s = E_{2020,s} - E_{2013,s} = EI_s + ED_s \quad (2)$$

式中, EC_s 为研究期内物种 s 的总排放变化量,在数值上等于河北省 2020 年排放量 E_{2020} 与 2013 年排放量 E_{2013} 的差值; EI_s 为总排放增量; ED_s 为总排放减量.

其次,将排放变化在子源层面进行分解,如公式(3) ~ (5)所示:

$$EC_{si^*} = E_{2020,si^*} - E_{2013,si^*} = \begin{cases} EI_{si^*} & (EC_{si^*} > 0) \\ ED_{si^*} & (EC_{si^*} < 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$EI_s = \sum_{i^*} EI_{si^*} \quad (4)$$

$$ED_s = \sum_{i^*} ED_{si^*} \quad (5)$$

式中, i^* 为子源名称. 为更精细的分解排放变化,本研究集合公式(1)中的 i 和 j 参数,将 5 大类排放源 i 细化至 18 类子源 i^* . 具体而言,是将电力源拓展为燃煤电厂和其他电厂(2 类),工业源拓展为燃煤供热、其他供热、燃煤锅炉、其他锅炉、钢铁、焦化、水泥、其他工业和溶剂使用(9 类),民用源拓展为民用燃煤和其他民用(2 类),交通源拓展为汽油车、柴油车和非道路移动源(3 类),农业源拓展为畜禽养殖和肥料使用(2 类). 由公式(3)可知,当子源 i^* 在研究期内的排放上升时($EC_{si^*} > 0$),记为排放增量 EI_{si^*} ,排放下降时($EC_{si^*} < 0$),记为排放减量 ED_{si^*} . 根据公式(4)和公式(5)的定义,总排放增量 EI_s (减量 ED_s) 由排放上升(下降)的各子源排放增量 EI_{si^*} (减量 ED_{si^*}) 加和求得.

最后,计算子源对排放变化的驱动贡献. 若研究期内子源 i^* 的排放上升,则计算其对排放增长的驱动贡献,若子源 i^* 的排放下降,则计算其对排放削减的驱动贡献,如公式(6)和公式(7)所示:

$$FI_{si^*} = \frac{EI_{si^*}}{EI_s} \quad (6)$$

$$FD_{si^*} = \frac{ED_{si^*}}{ED_s} \quad (7)$$

式中, FI_{si^*} 和 FD_{si^*} 分别为子源 i^* 对物种 s 排放增长和削减的驱动贡献,单位为%.

1.3 协同评价

本研究结合协同坐标系与协同度两种方法评价不同子源 i^* 的协同减排效益^[24].

协同坐标系法是将各源类大气污染物与 CO_2 的排放变动标记在直角坐标系中. 横坐标表示某源类大气污染物排放变化,纵坐标表示 CO_2 排放变化. 坐标值为正时,代表排放增长,反之代表排放下降. 因此,当源类排放变化坐标点落于第一象限时,代表污染物与 CO_2 排放同时增长,属于相对不利的情形,当落于第三象限时,代表污染物与 CO_2 具有减排协同性,是相对理想的情形,当落于第二、四象限时,代表两类排放一增一减,不具有减排协同性.

减排协同度指标基于 CO_2 与大气污染物排放变动的方向与幅度量化不同子源 i^* 减排的协同效益,计算方法如公式(8)所示:

$$ES_{si^*} = \frac{\frac{EC_{CO_2,i^*}}{E_{2013,CO_2,i^*}}}{\frac{EC_{pi^*}}{E_{2013,pi^*}}} \quad (8)$$

式中, ES_{si^*} 为减排协同度; EC_{CO_2,i^*} 和 EC_{pi^*} 分别为研究期内(2013 ~ 2020 年)子源 i^* 的 CO_2 和大气污染物 p (包括 SO_2 、 NO_x 、 $PM_{2.5}$ 、 $VOCs$ 和 NH_3) 排放的变化量; E_{2013,CO_2} 和 $E_{2013,p}$ 分别为基期年(2013 年) CO_2 和大气污染物的排放量; EC 与 E 的比值即为排放量的变化率. 为更清晰地展示评价结果,本研究仅针对具有减排协同性,即协同坐标系第三象限中的源类计算 ES . ES 越高,意味着单位大气污染物下降带来的 CO_2 减排越多,协同效益就越为显著.

2 结果与讨论

2.1 总量趋势

图 1 以 2013 年为基准,展示了河北省人为源排放以及相关经济指标的变化趋势. 2013 ~ 2020 年间,河北省 SO_2 和 $PM_{2.5}$ 排放降幅较大,分别为 73.0% 和 55.1%, NO_x 排放降幅居中,为 28.8%, NH_3 和 $VOCs$ 排放降幅较小,分别为 19.2% 和 15.8%, CO_2 排放不降反升,小幅上涨了 0.9%. 总体而言,研究期内河北省的人为源排放总量呈现出下降或相对平稳的态势.

本研究分析了 6 项与人为源排放直接相关的河北省社会经济指标在研究期内的走势,包括国内生产总值(gross domestic product, GDP)、能源消费量、发电量、钢铁产量、机动车保有量和粮食产量. 其中,GDP 与能源消费量影响着几乎所有的人为源排放^[25],发电量与电力源密切相关^[26],钢铁是河北省典型的工业产品,产量居于全国首位^[27],对工业

源影响较大^[28],粮食产量则与农业源存在着较强关联性^[29].与2013年相比,河北省GDP(已调整为2013年不变价)、能源消费量、发电量、钢铁产量、机动车保有量和粮食产量分别上升了52.6%、10.5%、37.0%、34.8%、114.1%和5.9%.

通过排放与经济走势的对比可知,2013~2020年,河北省在社会经济平稳持续发展的同时,实现了人为源排放的有效削减.尽管部分排放治理手段,如“散乱污”企业取缔与老旧车提前淘汰会带来一定的经济损失以及额外的财政支出,但前者可以倒逼高耗能和高排放企业转型,推动传统产业升级,后者可以置换新车消费空间,拉动汽车产业增长.“十八大”以来我国累计淘汰黄标车和老旧车2000多万辆,带动新车消费3.5万亿元.大气污染治理与产业、能源、交通和用地结构优化的有机统一,既可以持续削减人为源排放,又可以满足经济高质量发展的要求^[30].

2.2 排放结构

2013~2020年,河北省SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs和NH₃的排放量分别从198.75、220.33、92.83、164.73、53.48万t降至53.74、156.91、41.64、138.69、43.20万t,CO₂的排放量从7.99亿t增至8.06亿t(图2).

2013年以来我国大气污染治理的进程,可划分为“大气十条”(2013~2017年)和“蓝天保卫战”

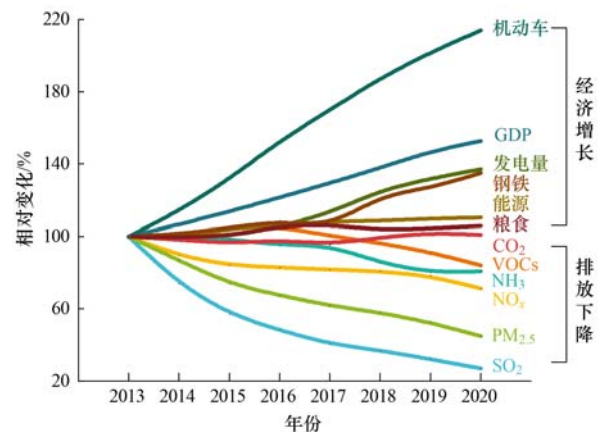
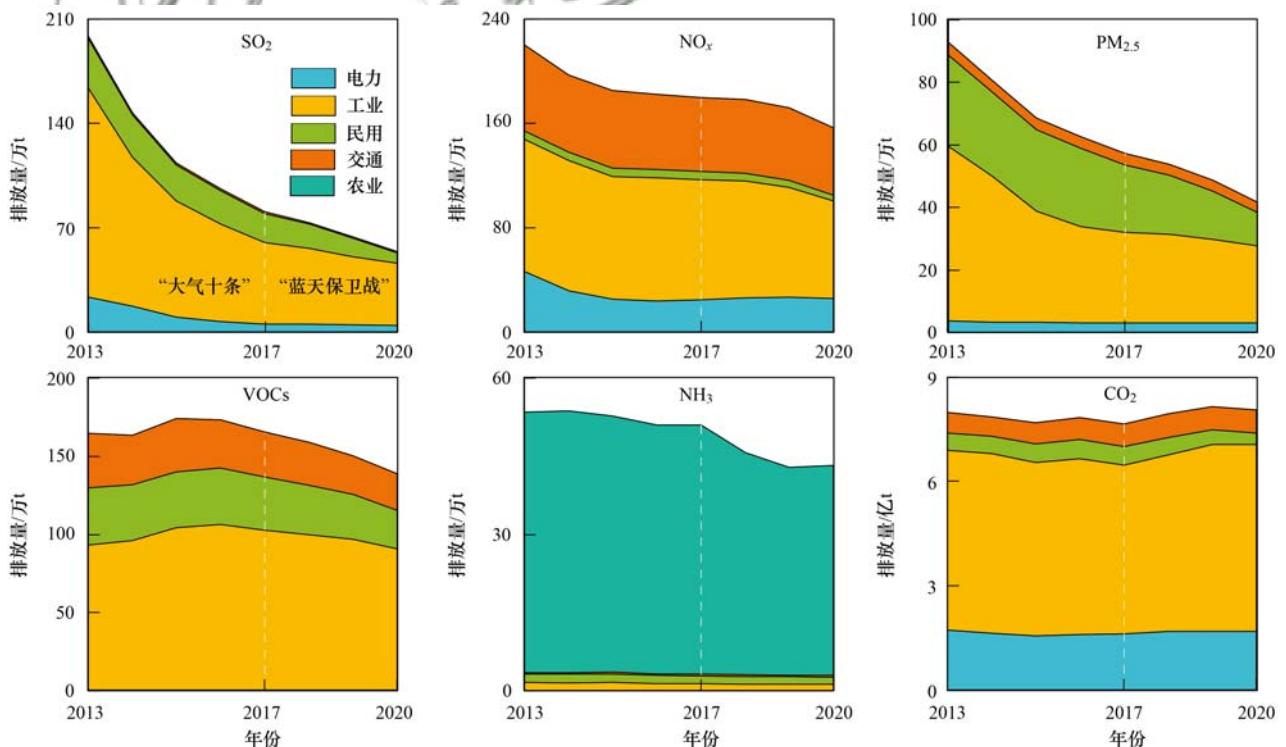


图1 河北省2013~2020年人为源排放与社会经济发展状况

Fig. 1 Anthropogenic emissions and socio-economic development in Hebei Province from 2013 to 2020

(2018~2020年)两个时期,不同时期内政策指向与侧重有所不同.表1展示了各物种与源类在不同时期排放的年变化率,正值表示排放上升,负值表示下降.SO₂排放在“大气十条”期间的下降速度显著快于“蓝天保卫战”时期.SO₂减排主要来自于燃煤锅炉的整治,而这项工作“在“大气十条”期间已完成大半,压缩了后续的减排空间^[31].NO_x和PM_{2.5}排在两个时期内的下降速度差异不大.VOCs排放的上升势头在“大气十条”时期尚未被完全遏制.“蓝天保卫战”时期,河北省强化了VOCs专项治理,通过原辅材料替代、无组织排放治理、高效治理设施建



虚线区分“大气十条”和“蓝天保卫战”两个时期

图2 河北省2013~2020年大气污染物与CO₂排放演变

Fig. 2 Air pollutants and CO₂ emissions in Hebei Province from 2013 to 2020

设等手段,使得 VOCs 排放稳定下降^[32]. NH₃ 排在“蓝天保卫战”时期的下降速度远高于“大气十条”时期. 因为“大气十条”并未对农业源治理提出具体要求,“蓝天保卫战”则提出了加强 NH₃ 排放控制的要求. CO₂ 排在“大气十条”时期略微下降,这得益于燃煤锅炉整治带来的煤炭消费量下降,但在“蓝天保卫战”时期又有所回弹^[33],说明河北省的经济发展尚未实现与 CO₂ 排放的脱钩^[34].

从排放的源类结构来看,工业源和民用源是 SO₂ 排放的主要贡献源,其中工业源贡献率呈上升趋势,民用源贡献率则先增后降,在 2020 年时分别为 78.0% 和 12.3%. NO_x 排放主要来自于工业源和交通源,2013 ~ 2020 年间的平均贡献率分别为 49.6% 和 31.5%,且交通源的贡献率略有上升,2020 年时为 33.0%. PM_{2.5} 排放的主要贡献源为工业源与民用源,研究期内平均贡献率分别为 54.8% 和 34.4%,但民用源贡献率在 2020 年时已降至 25.5%. 工业源、民用源和交通源在 2013 年时对 VOCs 排放的贡献率分别为 56.4%、22.2% 和 21.2%,之后在 2020 年,工业源的贡献率升至 65.3%,民用源和交通源的贡献率降至 17.7% 和 16.9%. 农业源是 NH₃ 排放的首要贡献源,且贡献率相对稳定,研究期内的均值为 93.4%. 电力源和工业源是 CO₂ 排放的主要贡献源,且贡献率波动不

大,2013 ~ 2020 年间的均值分别为 20.8% 和 65.1%. 工业源对 NH₃ 之外的排放物种均具有较高贡献率,未来应进一步调整优化产业结构,深化工业污染治理. 民用源在各类大气污染物和 CO₂ 排放中的贡献率均有所下降,在河北省的“减污降碳”工作中扮演着重要角色.

各源类在“大气十条”和“蓝天保卫战”时期的排放变化率差异同样反映了污染防治政策的演变. 电力源排放(除 SO₂ 以外)在“大气十条”时期显著下降,但在“蓝天保卫战”时期小幅反弹. 电力源的减排得益于燃煤电厂超低排放改造与燃煤机组淘汰,但随着终端能源电气化的推进,河北省的发电量继续上升,“蓝天保卫战”时期的反弹来自于燃气机组排放的增长^[35]. 工业源 SO₂、PM_{2.5} 和 CO₂ 在“大气十条”时期的减排速度更快,主要得益于燃煤锅炉整治,NO_x、VOCs 和 NH₃ 排在“蓝天保卫战”时期减排效果较好,主要来自于重点行业超低排放改造以及 VOCs 专项治理^[32]. 民用源在“蓝天保卫战”时期的减排速度显著高于“大气十条”,这得益于 2017 年以来北方地区清洁取暖工作的有效推进. 交通源排放的变化速率在两个时期差异不大,说明了相关控制政策的平稳性.“蓝天保卫战”提出了控制农业源 NH₃ 排放的要求,NH₃ 排放的下降速度相较于“大气十条”时期大幅提升.

表 1 河北省“大气十条”与“蓝天保卫战”时期各源类排放的年变化率/%

Table 1 Annual emission change rates by source during the period of Ten Atmospheric Measures and Blue Sky Defense War in Hebei Province/%							
源类	时期	SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	VOCs	NH ₃	CO ₂
总量	大气十条	-20.1	-4.8	-11.3	0.2	-1.2	-1.0
	蓝天保卫战	-12.5	-4.4	-10.0	-5.7	-5.3	1.8
电力	大气十条	-30.2	-13.2	-3.8	-1.5	— ¹⁾	-1.6
	蓝天保卫战	-6.2	0.9	0.3	1.4	—	1.5
工业	大气十条	-21.0	-2.5	-15.0	2.6	-2.7	-1.5
	蓝天保卫战	-8.3	-6.5	-5.1	-4.1	-3.1	3.5
民用	大气十条	-12.2	-1.0	-7.1	-1.7	-2.7	1.3
	蓝天保卫战	-29.1	-9.6	-20.8	-10.4	-2.5	-14.7
交通	大气十条	-8.3	-3.4	-3.2	-4.7	6.7	2.4
	蓝天保卫战	-8.1	-3.1	-3.7	-6.2	2.5	1.2
农业	大气十条	—	—	—	—	-1.1	—
	蓝天保卫战	—	—	—	—	-5.5	—

1) “—”表示未考虑该源类此大气物种的排放

2.3 变动分解

2013 ~ 2020 年间,河北省工业源与民用源对 SO₂ 减排的贡献分别为 68.3% 和 18.4%,对 PM_{2.5} 减排的贡献分别为 61.0% 和 36.3%,是这两类污染物减排的主要驱动源类. 工业源与电力源是 NO_x 减排的主要驱动源类,贡献率分别为 42.1% 和 32.8%,民用源与交通源是 VOCs 减排的主要驱动源类,贡献率分别为 46.5% 和 43.9%. 农业源主导了 NH₃

减排,贡献率为 94.2%,但交通源推升了 NH₃ 排放. 工业源和交通源对 CO₂ 排放增长的贡献率分别为 73.3% 和 26.7%,电力源和民用源对 CO₂ 减排的贡献率分别为 18.1% 和 81.9%. 工业源主导了多数排放物种的增减变化,民用源对所有物种的减排均有贡献.

图 3 中将 5 类排放源细分为 18 类子源,更为精细地展示了不同源类对排放变动的贡献. 燃煤电厂

和燃煤工业锅炉是减排的主要贡献源类,对 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、VOCs 和 CO_2 减排的合计贡献分别为 55.5%、49.8%、10.6%、10.0% 和 52.8%,主要得益于燃煤机组淘汰、电厂超低排放改造以及燃煤工业锅炉整治。但与此同时,河北省的发电量与主要工业产品产量仍在上升,其他燃料(主要是燃气)的发电机组和工业锅炉助推了 NO_x 和 CO_2 排放的增长。燃煤锅炉整治包括淘汰与改造两方面,改造的主要技术路径是天然气等清洁能源的使用^[36]。燃气锅炉的 SO_2 排放极低, NO_x 为主要污染物^[37]。尽管燃气锅炉也会排放 CO_2 ,但从单位热值的排放因子来看,天然气相对于燃煤的减碳效应显著^[38]。

河北省在钢铁、焦化和水泥等重点行业推行超低排放改造,聚焦于脱硫、脱硝和除尘技术的应用,对 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的减排贡献合计为 17.1%、11.7% 和 44.1%^[39]。相较于以上 3 类污染物,工业源 VOCs 治理深度不够,减排力度有待提升,其中钢铁和溶剂使用对 VOCs 增长的贡献分别为 27.7% 和 68.5%。溶剂使用源包括印刷、制药和家具等多个行业,具有量大面广、来源分散和监管困难的特点^[40]。未来应在重点行业 VOCs 治理的基础上,强化源头替代,着力推进 VOCs 攻坚减排。

在散煤燃烧治理前,民用源是河北省冬季大气污染物排放的主要来源^[41]。在“蓝天保卫战”时期,河北省以农村民用散煤为重点,开展“气代煤”和“电代煤”双代改造,有效削减了民用散煤消费量^[42]。相应的,民用燃煤源对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 的减排贡献在所有源中居于首位,达到了 31.5% 和 35.9%,对 SO_2 和 CO_2 的减排贡献仅次于燃煤锅炉,分别为 18.3% 和 43.9%。双代改造多采用“气代煤”的方式,因此燃气取暖户数有所上升^[43]。反映到源类变动上,其他民用源(主要为燃气)推升了 NO_x 和 CO_2 排放,贡献率分别为 6.3% 和 17.2%。工业锅炉改造和民用散煤双代改造中,均出现了燃煤源和燃气源排放的一减一增。但对比两类燃料排放的增减变化,可以发现由煤转气整体上削减了大气污染物和 CO_2 排放。在煤炭消费总量控制和转型替代的大背景下,有序引导燃气消费将成为能源结构调整的重点工作。

机动车主导了交通源排放的增减变化。汽油车对 VOCs 的减排贡献仅次于民用燃煤源,达到了 25.2%。汽油车是机动车 VOCs 的主要贡献源,随着排放标准的提升,单车排放水平迅速下降,进而削减了车队总体的 VOCs 排放^[44]。但汽油车也推升了 NH_3 和 CO_2 排放,这主要是因为机动车保有量的增长。一方面,排放标准的上升,使得三元催化器得以

普及,而 NH_3 是尾气催化反应的副产物,从而推高了 NH_3 排放^[45];另一方面,与污染物控制相比,燃油经济性的改善极为有限,因此 CO_2 排放的增长势头并未得到有效遏制^[15]。柴油车对 NO_x 的减排贡献为 19.3%,仅次于燃煤电厂,对 VOCs 的减排贡献也达到了 11.8%。柴油车多为重型运输车辆,保有量不大,但活动水平与排放因子均相对较高^[46]。VOCs 和 NO_x 是二次有机气溶胶与 O_3 的共同前体物,因此以柴油货车为抓手治理交通源污染,有助于实现 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的协同控制。

畜禽养殖和肥料使用源对 NH_3 减排的贡献分别为 32.0% 和 62.2%。畜禽养殖方面,河北省不断提升规模养殖场粪污处理设施装备配套率,强化畜禽粪污的综合利用,有效减少了 NH_3 排放^[47]。肥料使用方面,河北省推广测土配方技术,节约了化肥用量,同步实现了 NH_3 减排和作物增产的效果^[48]。

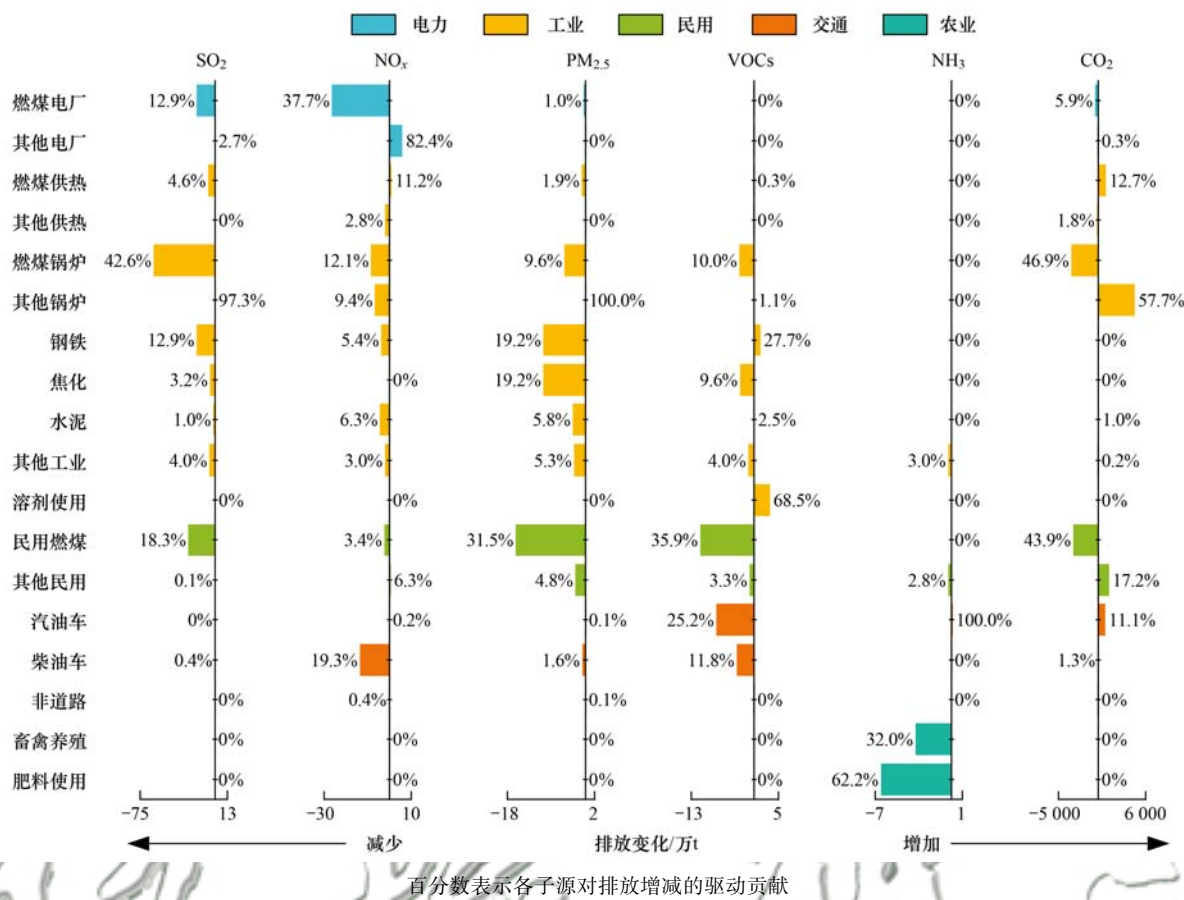
除 NH_3 外,大气污染物与 CO_2 减排均主要来自于燃煤相关的源类。工业燃煤锅炉整治主导了 SO_2 和 CO_2 减排,燃煤电厂治理有效削减了 NO_x ,民用燃煤替代大幅降低了 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 排放。说明以“控煤”为主线的能源结构调整是河北省 2013~2020 年间大气污染防治与 CO_2 减排的关键举措。当前,河北省煤炭在能源消费中的占比为 80.5%,显著高于全国平均水平 56.9%,燃煤相关的源类仍具有较大的减排潜力。

2.4 协同评价

“大气十条”与“蓝天保卫战”政策出台的直接目的是改善环境空气质量,但对某些源类而言,大气污染物减排会协同减少 CO_2 的排放,源类的减排协同度越高意味着协同效益越好。

2013~2020 年间,河北省 5 大源类的大气污染物排放普遍下降,但仅有电力源和民用源实现了 CO_2 的协同减排。不同污染物的减排协同度存在差异。电力源 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 的减排协同度分别为 0.03、0.05、0.17 和 1.07,未协同减少 NH_3 排放。民用源所有污染物与 CO_2 排放均有所下降, SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、VOCs 和 NH_3 的减排协同度依次为 0.44、1.21、0.56、1.07 和 2.09。民用源的减排协同度普遍高于电力源。这是因为电力源减排很大程度上依赖超低排放改造,属于末端治理,而化石燃料使用量并未下降。民用源减排则是通过双代改造直接压减燃煤用量,属于源头治理,因此具有较好的协同减排效益。

图 4 以协同坐标系的形式展示了河北省 2013~2020 年间实现大气污染物与 CO_2 协同减排的 6 类子源,相应的点均落于第三象限,圆圈面积越大,

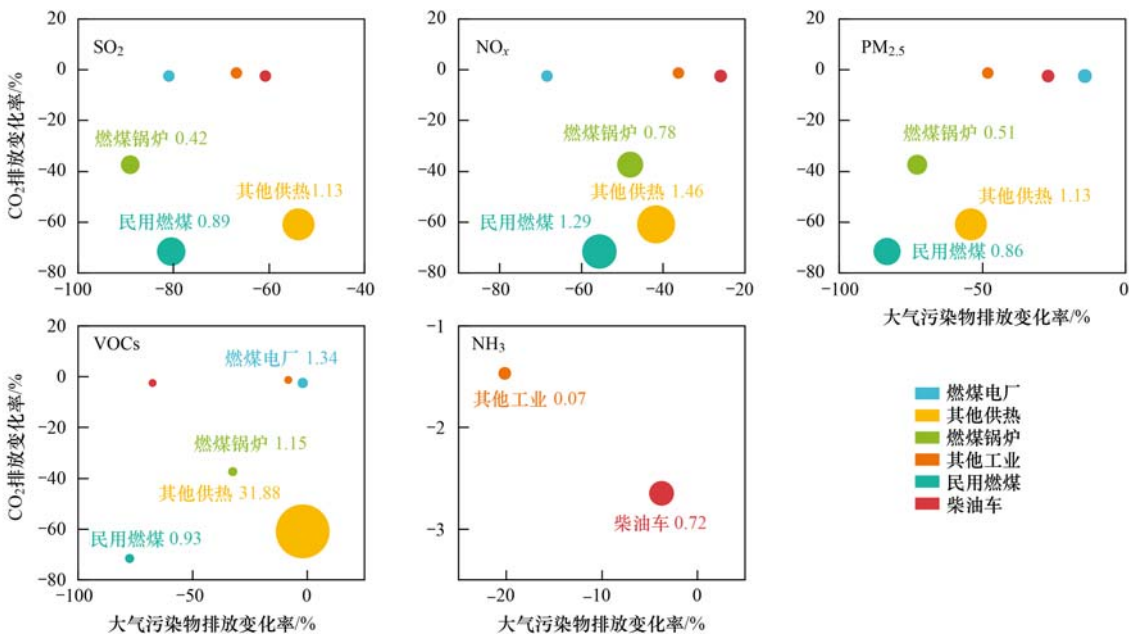


百分数表示各子源对排放增减的驱动贡献
图 3 河北省 2013 ~ 2020 年人为源排放变化分解

Fig. 3 Decomposition of changes in anthropogenic emissions in Hebei Province from 2013 to 2020

则减排协同度越高. 对 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 而言,其他供热、民用燃煤和燃煤锅炉的减排协同度较高,均值分别为 1.24、1.02 和 0.57. 其他供热 VOCs 减排幅度很小,仅为 1.9%,但 CO_2 削减了 60.9%,因此

VOCs 减排协同度高达 31.88,之后依次为燃煤电厂和燃煤锅炉,协同度分别是 1.34 和 1.15. 仅有柴油车和其他工业 (如肥料、砖瓦生产) 实现了 NH_3 协同减排,协同度分别为 0.72 和 0.07. 尽管柴油车与



圆圈面积大小表示减排协同度高低

图 4 河北省 2013 ~ 2020 年人为源排放变动协同性评价

Fig. 4 Synergistic benefit evaluation of changes in anthropogenic emissions in Hebei Province from 2013 to 2020

其他工业的协同度不高,但对所有种类的大气污染物均实现了协同减排,均衡性较好。

综合以上协同效益分析结果,可得到 4 点启示。首先,燃煤相关源类(民用燃煤、燃煤锅炉和燃煤电厂)的协同减排效益较为显著,应作为“减污降碳”工作的重点;其次,工业源同样展示出了较好的减排协同性,得益于产业结构调整与后处理技术升级的双重助力,这与京津冀地区已有研究结论一致^[5];再次,集中供暖(其他供热)与分户采暖(民用燃煤)中的双代改造具有较强的减排协同性,能源结构调整通过压减燃煤用量从源头减少大气污染物与 CO₂ 排放,更为符合“减污降碳”的内在规律^[49];最后,柴油车具有一定的减排协同性,当前

河北省公路货运周转量的占比远高于全国平均水平,“公转铁”和“公转水”这类运输结构调整措施仍具有较大减排潜力。

2.5 城市特征

图 5 展示了河北省 2020 年各地级市人为源的排放状况。不同城市的经济规模、能源使用、产业发展和交通运输情况存在差异,因此排放的总量与构成也存在异质性。

从总量来看,排放集中在石家庄、唐山、保定和邯郸这 4 个城市,对河北省 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs、NH₃ 和 CO₂ 排放的合计贡献率依次为 72.6%、67.1%、69.7%、61.7%、48.0% 和 68.7%。NH₃ 排放的集中度显著低于其他大气物种,这是因

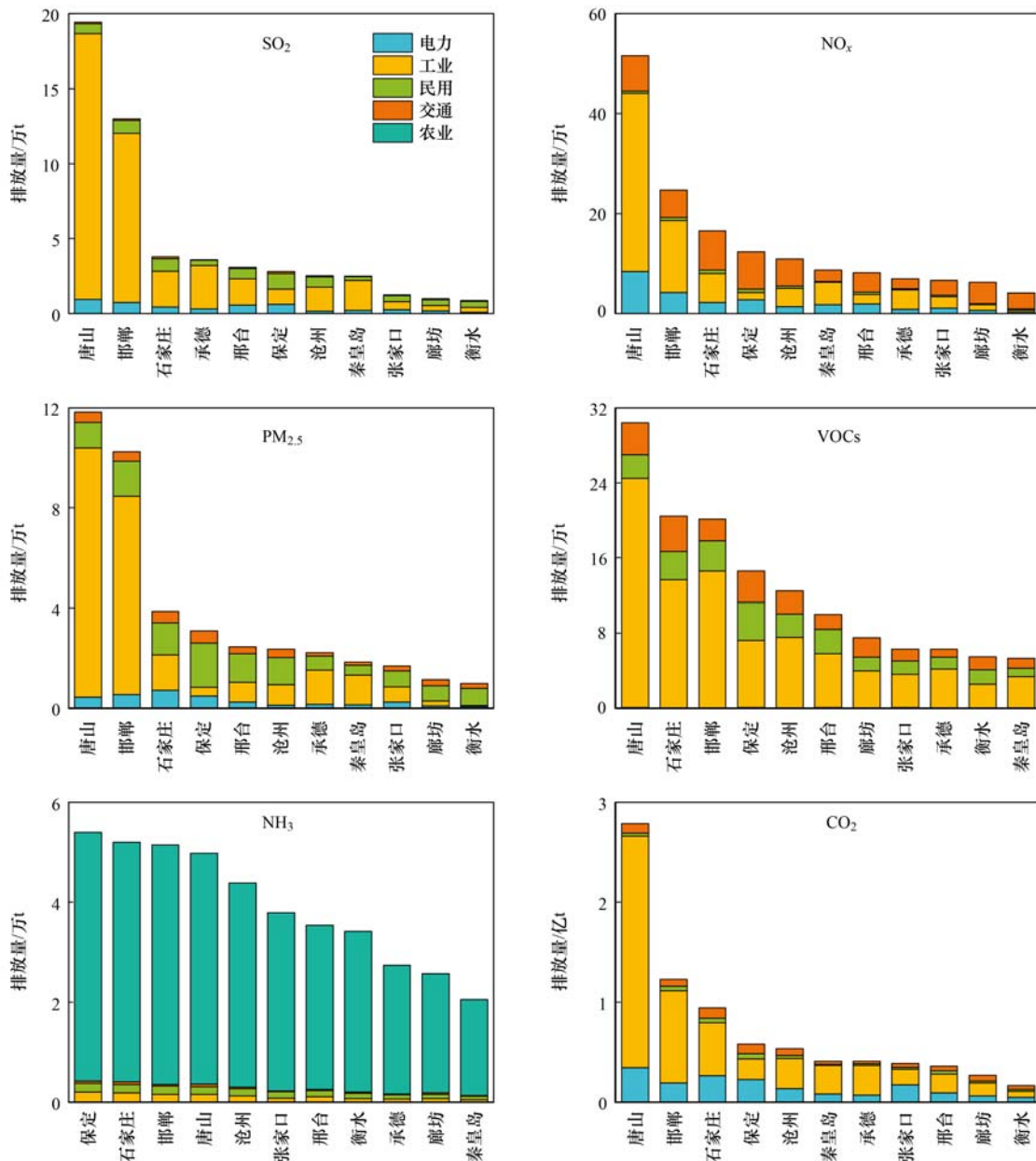


图 5 河北省 2020 年各城市人为源排放状况

Fig. 5 Anthropogenic emissions at the prefecture level in Hebei Province in 2020

为 NH_3 主要来自农业源,在空间上较为分散.唐山市对河北省 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 VOCs 和 CO_2 排放的贡献居于首位,分别为 36.2%、32.9%、28.4%、21.9% 和 34.6%,显著高于其他城市.唐山作为北方地区重要的工业城市与交通节点,当地人为源排放量大,空气污染问题突出. NH_3 排放的空间分布相对均衡,前 4 位城市的贡献率在 11.5% ~ 12.5% 的狭小区间内波动.

从部门层面看,唐山市对河北省电力源与工业源排放的贡献最大,各物种排放贡献率均值分别为 19.9% 和 35.4%,这主要是由偏重的产业结构导致的.唐山市的粗钢产量全国排名第一,2020 年第二产业生产总值占比高达 53.2%,远高于河北省均值 37.6%^[50].石家庄市对交通源排放贡献最高,贡献率均值为 15.3%,原因在于较高的汽车保有规模.截至 2020 年底,石家庄的汽车拥有量超过了 300 万辆,位列河北省第一^[51].保定作为农业大市,2020 年乡村人口占比在河北省内居首^[50],对民用源(主要是农村民用散煤)与农业源排放的贡献最高,贡献率均值分别为 15.5% 和 12.4%.

将河北省全域以及各地级市的人为源排放量与所辖区域的面积相除,即可求取排放强度,量化排放的空间分布状况^[52].表 2 展示了河北省 2020 年主要大气污染物与 CO_2 的排放强度,并以黑体字标注出了排放强度高于全域均值的城市.总体而言,人为源排放高值区分布于河北省的东部与南部,集中在石家庄、唐山和邯郸等地.尽管秦皇岛与廊坊的排放量不高,但两地所辖面积较小,因此拥有较高的排放强度.然而,秦皇岛市的空气质量仍然相对较好^[53],这得益于其滨海的地理位置,拥有较好的大气扩散条件^[18].廊坊市位于京、津两大直辖市之间,其潜在的污染传输风险应引起足够关注^[54].

综合排放总量与强度的分析结果,可知河北省“减污降碳”工作的重点区域为石家庄、唐山、邯郸、保定和廊坊.这些城市较高的人为源排放不仅推高了本地的污染物浓度^[18],还会通过大气传输影响其他区域的环境空气质量.文献[55]基于 CAMx-PAST 模型,论证了唐山、保定与廊坊的人为源排放对北京市大气污染的重要影响,与本研究结论可相互印证.

表 2 河北省 2020 年人为源排放强度/ $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$

Table 2 Anthropogenic emission intensities in Hebei Province in 2020/ $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$

城市	SO_2	NO_x	$\text{PM}_{2.5}$	VOCs	NH_3	CO_2
石家庄	2.39	10.44¹⁾	2.43	12.91	3.28	5 947.49
承德	0.91	1.76	0.56	1.58	0.69	1 028.98
张家口	0.34	1.80	0.46	1.70	1.03	1 042.82
秦皇岛	3.31	11.51	2.44	7.04	2.72	5 423.60
唐山	14.43	38.34	8.79	22.58	3.69	20 692.71
廊坊	1.53	9.72	1.75	11.64	4.00	4 164.94
保定	1.36	6.02	1.50	7.08	2.62	2 814.76
沧州	1.79	7.74	1.67	8.85	3.12	3 808.81
衡水	0.98	4.63	1.11	6.18	3.87	1 862.23
邢台	2.45	6.55	1.96	7.97	2.83	2 880.36
邯郸	10.76	20.45	8.49	16.66	4.27	10 162.10
河北全域	2.86	8.36	2.22	7.39	2.30	4 295.16

1) 黑体字表示排放强度高于全域均值

3 建议

(1)继续调整能源结构.控制化石能源消费总量,推动煤炭清洁高效利用,推进燃煤机组升级改造,推广大型燃煤电厂热电联产改造.积极发展非化石能源,大力发展风能、光伏和太阳能等可再生能源发电.继续实施散煤双代改造,严控农村散煤复燃.

(2)深化调整工业结构.遏制“两高”项目盲目发展,淘汰落后产能,化解过剩产能,确保“散乱污”企业的动态清零.加快实施电力、钢铁和水泥等重点行业的节能改造升级和污染物深度治理.开展

VOCs 综合治理,实施原辅材料 and 产品源头替代工程.

(3)积极调整交通结构.更新机动车车队构成,淘汰高排放老旧车辆,推广新能源或清洁能源车辆.构建高效集约的物流体系,加快大宗货物和中长途货物运输“公转铁”和“公转水”,大力发展多式联运.加强非道路移动源管控,淘汰老旧工程机械.

(4)稳步调整用地结构.优化肥料和饲料使用,推进农药化肥减量增效,推动规模养殖场污染治理和畜禽粪污资源化利用.提升秸秆综合利用水平,强化秸秆焚烧整治.引导重点行业向环境容量充足和扩散条件较好的区域布局,实施重点企业退城搬迁.

4 结论

(1)本研究期内,河北省人为源排放总量呈现下降或相对平稳态势,其中 SO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放降幅较大, NO_x 排放降幅居中, NH_3 和VOCs排放降幅较小, CO_2 排放小幅上涨,同期排放相关的社会经济指标稳步上升,说明河北省在社会经济平稳持续发展的同时,实现了人为源排放的有效削减。

(2) SO_2 排在“大气十条”期间下降速度较快,VOCs和 NH_3 排在“蓝天保卫战”期间减排效果更好, NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排在两个时期下降速度差异不大, CO_2 排放呈先降后升趋势,不同时期排放变化的差异反映了政策的指向与侧重,工业源对 NH_3 之外的排放物种均具有较高贡献率。

(3)燃煤电厂和燃煤工业锅炉是人为源减排的主要贡献源类,重点行业超低排放改造有效减少了 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放,但VOCs治理力度有待提升,民用源散煤治理对 $\text{PM}_{2.5}$ 和VOCs减排贡献居于首位, NH_3 减排主要来自于农业源,工业与民用部门的煤改气整体上削减了大气污染物和 CO_2 排放。

(4)电力源和民用源实现了大气污染物与 CO_2 的协同减排,但民用源的减排协同度更高,燃煤相关源类的协同减排效益较为显著,双代改造通过压减燃煤用量协同降低源头排放,更为符合“减污降碳”的内在规律,柴油车也具有一定的减排协同性,应通过运输结构调整深挖减排潜力。

(5)人为源排放集中在石家庄、唐山、邯郸、保定和廊坊,排放强度高值区分布于东部与南部,石家庄市汽车保有规模位列全省第一,对交通源贡献显著,唐山市产业结构偏重,对电力源与工业源排放的贡献最大,保定市乡村人口较多,对民用源与农业源排放的贡献较高。

参考文献:

- [1] 黄志炯,沙青娥,朱曼妮,等.我国 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧污染前体物排放源清单的现状与质量评估[J].科学通报,2022,67(18):1978-1994.
- Huang Z J, Sha Q E, Zhu M N, et al. Status and quality evaluation of precursor emission inventories for $\text{PM}_{2.5}$ and ozone in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(18): 1978-1994.
- [2] Zheng B, Zhang Q, Davis S J, et al. Infrastructure shapes differences in the carbon intensities of Chinese cities[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(10): 6032-6041.
- [3] 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.
- [4] Shi Q R, Zheng B, Zheng Y X, et al. Co-benefits of CO_2 emission reduction from China's clean air actions between 2013-2020[J]. Nature Communications, 2022, 13(1), doi: 10.1038/s41467-022-32656-8.
- [5] 杨添棋,王洪昌,张辰,等.京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 CO_2 协同减排效益评估[J].环境科学,2022,43(11):5315-5325.
- Yang T Q, Wang H C, Zhang C, et al. Carbon dioxide mitigation co-effect analysis of structural adjustment measures in the “2+26” cities in the Jing-Jin-Ji region and its surroundings [J]. Environmental Science, 2022, 43(11): 5315-5325.
- [6] 中国清洁空气政策伙伴关系.中国碳中和与清洁空气协同路径(2021)[EB/OL].http://www.ccapp.org.cn/dist/reportInfo/319,2022-07-17.
- [7] Zhou M M, Jiang W, Gao W D, et al. Anthropogenic emission inventory of multiple air pollutants and their spatiotemporal variations in 2017 for the Shandong Province, China [J]. Environmental Pollution, 2021, 288, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117666.
- [8] Wang H K, Lu X, Deng Y, et al. China's CO_2 peak before 2030 implied from characteristics and growth of cities [J]. Nature Sustainability, 2019, 2(8): 748-754.
- [9] 马强,宫密秘,杨晓霞,等.嘉兴市人为源大气污染物排放清单研究[J].环境污染与防治,2020,42(6):660-665.
- Ma Q, Gong M M, Yang X X, et al. Air pollutants emission inventory of anthropogenic sources in Jiaxing [J]. Environmental Pollution & Control, 2020, 42(6): 660-665.
- [10] 韦良焕,于坤,莫治新,等.西北五省温室气体排放核算及动态研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(1):32-37.
- Wei L H, Yu K, Mo Z X, et al. Accounting and dynamics of greenhouse gases emissions in five northwestern provinces [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(1): 32-37.
- [11] Jiang P Y, Chen X L, Li Q Y, et al. High-resolution emission inventory of gaseous and particulate pollutants in Shandong Province, eastern China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 259, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120806.
- [12] 周子航,邓也,谭钦文,等.四川省人为源大气污染物排放清单及特征[J].环境科学,2018,39(12):5344-5358.
- Zhou Z H, Deng Y, Tan Q W, et al. Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in the Sichuan Province [J]. Environmental Science, 2018, 39(12): 5344-5358.
- [13] Li M, Zhang Q, Zheng B, et al. Persistent growth of anthropogenic non-methane volatile organic compound (NMVOC) emissions in China during 1990-2017: drivers, speciation and ozone formation potential [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(13): 8897-8913.
- [14] 侯新红,于兴娜,沈丽,等.2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征[J].环境科学,2019,40(11):4862-4869.
- Hou X H, Yu X N, Shen L, et al. Establishment and characteristics of an artificial ammonia emissions inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017 [J]. Environmental Science, 2019, 40(11): 4862-4869.
- [15] Sun S D, Zhao G, Wang T, et al. Past and future trends of vehicle emissions in Tianjin, China, from 2000 to 2030 [J]. Atmospheric Environment, 2019, 209: 182-191.
- [16] Xu Y Q, Huang Z J, Jia G L, et al. Regional discrepancies in spatiotemporal variations and driving forces of open crop residue

- burning emissions in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **671**: 536-547.
- [17] 崔晓珍, 沙青娥, 李成, 等. 2013—2017 年珠江三角洲主要大气污染控制措施减排效果评估[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(5): 1800-1808.
- Cui X Z, Sha Q E, Li C, *et al.* Assessment of emission reduction effect of major air pollution control measures in the Pearl River Delta from 2013 to 2017 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(5): 1800-1808.
- [18] 杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 等. 京津冀地区高分辨率 PM_{2.5} 浓度时空变化模拟与分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4083-4094.
- Yang X H, Song C J, Fan L H, *et al.* High-resolution estimation of spatio-temporal variation in PM_{2.5} concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4083-4094.
- [19] Qi J, Zheng B, Li M, *et al.* A high-resolution air pollutants emission inventory in 2013 for the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **170**: 156-168.
- [20] 生态环境部. 关于发布《大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)》等 5 项技术指南的公告[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/t20150107_293955.htm, 2022-07-21.
- [21] Zheng B, Zhang Q, Geng G N, *et al.* Changes in China's anthropogenic emissions and air quality during the COVID-19 pandemic in 2020 [J]. *Earth System Science Data*, 2021, **13**(6): 2895-2907.
- [22] Peng L Q, Zhang Q, Yao Z L, *et al.* Underreported coal in statistics: a survey-based solid fuel consumption and emission inventory for the rural residential sector in China [J]. *Applied Energy*, 2019, **235**: 1169-1182.
- [23] Zheng B, Huo H, Zhang Q, *et al.* High-resolution mapping of vehicle emissions in China in 2008 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(18): 9787-9805.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Liu Z, Ciais P, Deng Z, *et al.* Near-real-time monitoring of global CO₂ emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic [J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1), doi: 10.1038/s41467-020-18922-7.
- [27] 国家统计局. 国家数据[EB/OL]. <http://data.stats.gov.cn/>, 2022-08-12.
- [28] Li M, Liu H, Geng G N, *et al.* Anthropogenic emission inventories in China: a review [J]. *National Science Review*, 2017, **4**(6): 834-866.
- [29] Yu X N, Shen L, Hou X H, *et al.* High-resolution anthropogenic ammonia emission inventory for the Yangtze River Delta, China [J]. *Chemosphere*, 2020, **251**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126342.
- [30] 雷宇, 严刚. 关于“十四五”大气环境管理重点的思考[J]. *中国环境管理*, 2020, **12**(4): 35-39.
- Lei Y, Yan G. Thoughts on the key issues regarding atmospheric environment management in the 14th Five-Year Plan [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2020, **12**(4): 35-39.
- [31] 河北省环境保护厅办公室. 河北省环境保护厅办公室关于印发《“大气十条”国家考核河北省重点任务厅内部责任分工》的通知[EB/OL]. <http://info.hebei.gov.cn/hbszfxgk/329975/329988/330110/6363917/index.html>, 2022-08-20.
- [32] 河北生态环境. 河北省持续开展 VOCs 专项执法行动[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/dfnews/202007/t20200706_787832.shtml, 2022-08-21.
- [33] Peters G P, Andrew R M, Canadell J G, *et al.* Key indicators to track current progress and future ambition of the Paris Agreement [J]. *Nature Climate Change*, 2017, **7**(2): 118-122.
- [34] 臧宏宽, 杨威杉, 张静, 等. 京津冀城市群二氧化碳排放达峰研究[J]. *环境工程*, 2020, **38**(11): 19-24, 77.
- Zang H K, Yang W S, Zhang J, *et al.* Research on carbon dioxide emissions peaking in Beijing-Tianjin-Hebei city agglomeration [J]. *Environmental Engineering*, 2020, **38**(11): 19-24, 77.
- [35] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见[EB/OL]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-01/30/c_1310464313.htm, 2022-09-01.
- [36] Lu Z Y, Huang L, Liu J, *et al.* Carbon dioxide mitigation co-benefit analysis of energy-related measures in the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in the Jing-Jin-Ji region of China [J]. *Resources, Conservation & Recycling: X*, 2019, **1**, doi: 10.1016/j.rerx.2019.100006.
- [37] 王庆丰, 杜红波, 刘进荣, 等. 北京市小区集中供热燃气锅炉 NO_x 排放现状及分析[J]. *暖通空调*, 2016, **46**(5): 67-69.
- Wang Q F, Du H B, Liu J R, *et al.* Status and analysis of NO_x emission of district central heating gas boilers in Beijing [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2016, **46**(5): 67-69.
- [38] 韩金保, 于洁, 牛璨. 河北省居民生活煤改气对大气污染物排放量的影响研究[J]. *安全与环境学报*, 2018, **18**(5): 1977-1981.
- Han J B, Yu J, Niu C. Study on the influence of natural gas substitution of coal in home heating in reducing air pollutant emission in Hebei [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, **18**(5): 1977-1981.
- [39] 于勇, 朱廷钰, 刘霄龙. 中国钢铁行业重点工序烟气超低排放技术进展[J]. *钢铁*, 2019, **54**(9): 1-11.
- Yu Y, Zhu T Y, Liu X L. Progress of ultra-low emission technology for key processes of iron and steel industry in China [J]. *Iron & Steel*, 2019, **54**(9): 1-11.
- [40] 夏思佳, 刘倩, 赵秋月. 江苏省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 592-599.
- Xia S J, Liu Q, Zhao Q Y. Emission inventory of anthropogenically sourced VOCs and its contribution to ozone formation in Jiangsu Province [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 592-599.
- [41] 徐双喜, 张众志, 杜晓惠, 等. 京津冀及周边民用散煤燃烧控制对北京市 PM_{2.5} 的影响[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(12): 2876-2886.
- Xu S X, Zhang Z Z, Du X H, *et al.* Impact of residential coal combustion control in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding region on PM_{2.5} in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(12): 2876-2886.
- [42] 河北省法制办. 河北《冬季清洁取暖工程实施方案》解读[EB/OL]. <http://info.hebei.gov.cn/hbszfxgk/329975/330000/330522/6788939/index.html>, 2022-09-17.

- [43] 河北省人民政府. 我市开展九项行动治理大气污染[EB/OL]. <http://www.hebei.gov.cn/hebei/14462058/14471802/14471717/14471784/14560429aa/index.html>, 2022-09-17.
- [44] 孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 等. 2000-2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变[J]. 环境科学, 2023, **44**(3): 1346-1356.
Sun L N, Zhong C Z, Sun S D, *et al.* Evolution and characteristics of full-process vehicular VOC emissions in Tianjin from 2000 to 2020[J]. Environmental Science, 2023, **44**(3): 1346-1356.
- [45] Li S Y, Lang J L, Zhou Y, *et al.* Trends in ammonia emissions from light-duty gasoline vehicles in China, 1999-2017 [J]. Science of the Total Environment, 2020, **700**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134359.
- [46] Song C B, Ma C, Zhang Y J, *et al.* Heavy-duty diesel vehicles dominate vehicle emissions in a tunnel study in northern China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **637-638**: 431-442.
- [47] 河北新闻网. 到 2020 年底河北省畜禽粪污综合利用率达到 75% 以上[EB/OL]. https://m.hebnews.cn/hebei/2017-11/24/content_6692154.htm, 2022-09-28.
- [48] 赵红梅, 郝立岩. 河北省化肥施用量连续实现负增长“四连降”是如何实现的?[EB/OL]. <http://country.people.com.cn/n1/2019/0518/c419842-31091616.html>, 2022-09-28.
- [49] 生态环境部. 关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202101/t20210113_817221.html, 2022-09-28.
- [50] 河北省统计局. 2021 河北统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
Hebei Provincial Bureau of Statistics. Hebei statistical yearbook 2021[M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [51] 中华人民共和国公安部. 2020 年全国新注册登记机动车 3328 万辆 新能源汽车达 492 万辆[EB/OL]. <https://www.mps.gov.cn/n2254314/n6409334/c7647242/content.html>, 2022-10-02.
- [52] Wu X M, Wu Y, Zhang S J, *et al.* Assessment of vehicle emission programs in China during 1998-2013: achievement, challenges and implications[J]. Environmental Pollution, 2016, **214**: 556-567.
- [53] 河北省生态环境厅. 2021 年全省环境空气质量排名情况[EB/OL]. <http://hbepb.hebei.gov.cn/hbhjt/zwgk/fdzdkgknr/zdlyxxgk/dqhjgl/101643247298763.html>, 2022-10-02.
- [54] Sun S D, Jin J X, Xia M, *et al.* Vehicle emissions in a middle-sized city of China: current status and future trends [J]. Environment International, 2020, **137**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105514.
- [55] Wen W, Shen S, Liu L, *et al.* Comparative analysis of PM_{2.5} and O₃ source in Beijing using a chemical transport model[J]. Remote Sensing, 2021, **13**(17), doi: 10.3390/rs13173457.

CONTENTS

Spatio-temporal Variations in PM _{2.5} and Its Influencing Factors in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration	WU Shu-qi, YAO Jia-qi, YANG Ran, <i>et al.</i> (5325)
Changes in Health Risks and Pollution Sources of Atmospheric PM _{2.5} -bound Metals in a Background Site in North China	SHI Xiao-lan, ZONG Zheng, PENG Hui, <i>et al.</i> (5335)
Risk Assessment of Heavy Metals in Dust Fall Around Reservoirs in Typical Ecologically Fragile Areas and Traceability Based on APCS-MLR Model	SHI Zhen-yu, LU Jun-ping, LIU Ting-xi, <i>et al.</i> (5344)
Influence of Ammonium Sulfate and Ammonium Nitrate on the Properties of Ambient PM _{2.5} in Zhenjiang	CAO Jun, XIE Jia-li, SUN Juan, <i>et al.</i> (5356)
A Comparison Study on Multiple Modeling Approaches for Air Pollutant Geographic Model Development in Shanghai	WU Ying-han, XU Jia, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (5370)
Case Analysis of Heavy Air Pollution Process in Xi'an Using Multi-source Data	WANG Nan, GAO Yu-xing, QU Yao, <i>et al.</i> (5382)
Variations in Ozone Concentration in Seven Regions Under Different Temperature and Humidity Conditions	LIU Jing-da, HE Chao, ZHAO Shu-man, <i>et al.</i> (5392)
Summer Ozone Mechanism and Control Strategy in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Brute-Force Method	LI Rui, WEI Wei, WANG Xing-feng, <i>et al.</i> (5400)
Characteristics, Sources, and Contributions to Ozone Formation of Ambient Volatile Organic Compounds in Huanggang, China	LIAN Shi-ze, DENG Meng-jie, CHEN Nan, <i>et al.</i> (5410)
Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Different Functional Zones in Baoji in Summer	PANG Xiao-die, CHEN Lai-guo, GAO Bo, <i>et al.</i> (5418)
Synergistic Benefits of Pollution and Carbon Reduction from Air Pollution Control in Hebei Province from 2013 to 2020	SUN Shi-da, ZHANG Gai-ge, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (5431)
Effect of Carbon Dioxide Emission Reduction Policy on Air Quality Improvement in Jiangsu Province	WANG Song-wei, TANG Ke-qin, ZHANG Hao-ran, <i>et al.</i> (5443)
Estimation of Agricultural Greenhouse Gas Emissions and Emission Reduction Potential of Beijing During the 14th Five-Year Plan Period Under the Background of "Carbon Peak and Neutrality"	YANG Fan, HAN Yu-hua, WEI Xiao, <i>et al.</i> (5456)
China's Energy Consumption and Carbon Peak Path Under Different Scenarios	CHEN Xi-yang, ZHOU Cheng, WANG Tian (5464)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in Beijing, China	ZHANG Yu-hang, QU Xiao-dong, PENG Wen-qi, <i>et al.</i> (5478)
Research Progress on Removing Antibiotic Resistance Genes in Constructed Wetlands	XUE Hui, LIN Hui, WANG Zhi, <i>et al.</i> (5490)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors in Wudu River Basin of Guizhou Province	TU Chun-lin, CUN De-xin, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i> (5498)
Direct and Indirect Effects of Land Use on Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River	ZHANG Liu-liu, LIU Rui, ZHENG Da-yan, <i>et al.</i> (5511)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in Surface Sediments of Taihu Lake	YU Fu-he, WANG Shu, QIAN Cheng-yuan, <i>et al.</i> (5524)
Spatial-temporal Variations and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of Qionghai Lake in Xichang City	LI Guo-zhan, WANG Xiao-yu, YAN Meng-xia, <i>et al.</i> (5536)
Spatial Distribution of Aerobic Bacteria, Sources and Risks of Nitrogen and Phosphorus in Taihu Lake Sediments	CHENG Xin-yu, LI Yan, LI Ye, <i>et al.</i> (5546)
Community Composition, Symbiotic Patterns, and Influencing Factors of Planktonic Fungi in Urban Lakes of Nanchang	HUANG Yi, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i> (5556)
Differences in Fungal Communities in Different Material Cellar Sediments and Their Correlation with Environmental Factors	YANG Hao, BAO Wen-xiong, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (5567)
Ultrasonic Composite Iron-carbon Activated Persulfate for Treating Organic Wastewater	LI Bing-chi, LI Hao-yang, XU Qi-hui, <i>et al.</i> (5578)
Degradation of Ciprofloxacin by CuNiFe LDHs/BiO _{2-x} Heterojunction-activated Peroxymonosulfate Under Visible Light Irradiation	DANG Pu, ZHAO Ya-juan, XIE Hui-dong, <i>et al.</i> (5587)
Adsorption Performance of Walnut Green Husk Biochar for Heavy Metals	ZHU Xiao-li, CHENG Yan-ping, SHEN Ye-hua, <i>et al.</i> (5599)
Accumulation of Sulfonamides and Macrolides Antibiotic Resistance Genes in Soils with Different Utilization Patterns in China	ZHANG Xiu, SONG Jian-yu, GAO Huan, <i>et al.</i> (5610)
Soil Pollution Prediction from Enterprise for Coking Industry in China Based on Machine Learning and Scenario Analysis	LI Kai, GUO Guang-hui, LEI Mei (5622)
Spatial-temporal Evolution of Ecological Vulnerability in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on PSRM Model	WU Shuai, TIAN Bing, GU Shi-jie, <i>et al.</i> (5630)
Effects of Biochar and Soil Conditioner on Coastal Barren Saline-alkali Soil	YANG Li-lin, XIE Zhi-xia, ZHU Xiang-mei, <i>et al.</i> (5641)
Effects of Supplementation of Different Amendments on Soil Heavy Metals and Enzyme Activities in Coastal Saline Land	XIE Xue-feng, XU Zi-qing, TIAN Zai-yang, <i>et al.</i> (5649)
Source Apportionment and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Industrial and Mining Towns in North China	LIANG Jia-hui, TIAN Yi-qi, FEI Yang, <i>et al.</i> (5657)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on Monte Carlo Simulation	MA Jie, SHE Ze-lei, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (5666)
Spatial Diffusion Mechanism Underlying Peri-urban Cropland Heavy Metal Contamination in the Black Soil Region	LI Wen-bo, YAN Zhao-ran, ZHU Yuan-li (5679)
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Potentially Toxic Elements in Soil around the Coal-fired Power Plant Using APCS-MLR and PMF Models	LI Jun, LI Xu, GAO Shi-gang, <i>et al.</i> (5689)
Research Advances in Barrier Technology of Paddy Soil Co-contaminated with As and Cd	TANG Shu-ting, LU Yi-ming, XIAO Sheng-hai, <i>et al.</i> (5704)
Meta Analysis of Stabilization Effect of Phosphorus on Soil Lead and Its Influencing Factors	WANG Ya-kun, ZHANG Zhuo, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5718)
Effects of Equal Amounts Silicon Fertilizer Application on Soil Bioavailability of Cadmium and Cadmium Uptake by Rice	WU Jia-mei, XIE Yun-he, GUAN Di, <i>et al.</i> (5727)
Effects of Chlorine-based and Sulfur-based Fertilizers on Rice Bioavailability of Cd in Soils	OUYANG Qing-wen, LONG Jian, HAO Han-chi, <i>et al.</i> (5737)
Exogenous Spermidine Regulates Ryegrass Root System Response to Cd Stress and Its Transcriptome Analysis	YU Zhi-qiang, HU Jia-yuan, LI Shang-ke, <i>et al.</i> (5746)
Effects of Exogenous Plant Hormone Spraying on the Phytoremediation by <i>Bidens pilosa</i> L. in Cadmium-contaminated Soil	YANG Qing, XIE Jun-ting, ZHANG Zhi-pan, <i>et al.</i> (5757)
Characteristics of Cadmium Concentration and Transport of <i>Pueraria thorssonii</i> in Farmland with Different Cadmium Pollution Degrees	LIN Xiao-bing, HE Shao-lang, WU Duo-ji, <i>et al.</i> (5769)
Characterization of Microplastic Leachate from Different Polymers and Its Effect on Seed Germination of Lettuce	YANG Liu, ZHANG Lin, DENG Min, <i>et al.</i> (5779)
Seasonal Regulation of Soil Microbial Carbon and Phosphorus Metabolisms in an Apple Orchard: Evidence from the Enzymatic Stoichiometry Method	LÜ Feng-lian, LIANG Kai-lin, JI Bing-jie, <i>et al.</i> (5788)
Effects of Long-term Tillage on Soil Bacterial Community Structure and Physicochemical Properties of Dryland Wheat Fields in Northern China	ZHONG Rong, WANG Pei-ru, SUN Pei-jie, <i>et al.</i> (5800)
Effects of Straw Returning with Lime on SOC and Carbon Pool Management in Acidic Paddy Soil	HUANG Qiao-yi, LIN Bi-shan, RAO Guo-liang, <i>et al.</i> (5813)
Effects of Long-term Combined Application of Organic and Inorganic Fertilizers on Soil Carbon Pool and Greenhouse Gas Emissions in Orchards	ZHANG Ai, ZHENG Zhao-xia, ZHAO Zhi-yuan, <i>et al.</i> (5823)
Effects of Straw Biochar on Carbon Footprint of Maize Farmland Ecosystem Under Mulched Drip Irrigation in Hetao Irrigation District	NIE Hui-dong, QU Zhong-yi, YANG Wei, <i>et al.</i> (5832)
Spatiotemporal Simulation and Prediction of Grassland Carbon Budget in Gansu Under Different Climate Scenarios	SUN Qian, ZHANG Mei-ling, WANG Xin-jing, <i>et al.</i> (5842)
Effects of Polyethylene Microplastics on Growth and Halocarbon Release of Marine Microalgae	YANG Fan, CHEN Zhi, ZHAI Xing, <i>et al.</i> (5852)
Research Progress on Colloid Pump Effect of Micro- and Nanoplastics in Drinking Water	ZHAO Wei-gao, ZHANG Xiao-qing, TIAN Yi-mei, <i>et al.</i> (5861)
Sources, Disposal Technologies, and Environmental Impact of Photopolymerization-based 3D Printing Plastic Waste	ZHANG Hong-nan, SUN Yu-nan, SONG Yu-ru, <i>et al.</i> (5870)