

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立 40 周年专栏

新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战	王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙 (4801)
河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险	王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅 (4810)
海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展	袁东星, 黄勇明, 王婷 (4822)
环境水体中硫化物的分析方法: 从实验室分析到原位监测	李鹏, 林坤德, 袁东星 (4835)
环境水体中无机砷现场分析方法研究进展	薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑 (4845)
海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展	黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华 (4858)

聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展	骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠 (4869)
水稻土中氮素对微生物固氮的扰动及效应机制	王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮 (4876)
中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物	史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林 (4888)
中国油气系统甲烷逸散排放估算	陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍 (4905)
2015 ~ 2020 年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征	李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖 (4914)
九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征	程宏, 陈荣 (4924)
厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征	姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红 (4931)
九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制	戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪 (4939)
福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制	杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪 (4950)
厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制	潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红 (4961)
改性生物炭固定床对模拟湖水体中 Mn^{2+} 的吸附	赵洁, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟 (4971)
基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测	徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤 (4982)
紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯	徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 譙杨 (4992)

研究报告

2019 年秋季海南省 4 次臭氧污染过程特征及潜在源区分析	符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅 (5000)
伊犁河谷夏季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制	陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文 (5009)
城区与郊区 $PM_{2.5}$ 污染及传输特征差异性	齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超 (5018)
南京北郊 BTESX 特征及健康风险评估	冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀 (5030)
我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估	孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱奔, 马长文, 叶建锋 (5040)
东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析	陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕 (5053)
长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析	刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇 (5064)
青藏高原湖泊水环境特征及水质评价	刘智琦, 潘保柱, 韩谔, 李刚, 王韬轶 (5073)
基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水文地球化学特征及控制因素	查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿 (5084)
丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系	贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男 (5096)
铜沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能	王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科 (5106)
基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群	章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇弟, 厉巍 (5115)
寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析	杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广 (5123)
中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析	田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾立新 (5131)
硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析	刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠 (5140)
不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响	邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 张广林 (5149)
不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 NO 和 N_2O 排放的影响	唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (5159)
基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征	刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标 (5169)
基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析	高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫 (5180)
基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析	张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋 (5192)
老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中 Cd^{2+} 的影响	王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏 (5205)
磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响	芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球 (5214)
牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响	赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高 (5224)
磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和锌镉累积的影响	帅祖华, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强 (5234)
重庆开州区农地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估	方林发, 叶萃萃, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然 (5244)
基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应	侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文 (5253)
黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征	许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉 (5263)
土壤多功能性对微生物多样性降低的响应	陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟 (5274)
氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响	苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方 (5286)
碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比	李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣 (5294)
中国能源消费碳排放的空间化与时空动态	郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 颜斌斌, 杜海波 (5305)
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	杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束轲 (5315)
我国塑料污染防治政策分析与建议	李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会 (5326)

京津冀及周边地区“2 + 26”城市结构性调整政策的CO₂ 协同减排效益评估

杨添棋, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束韞*

(中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘要:《打赢蓝天保卫战三年行动计划》(“三年行动计划”)明确提出,产业结构调整、能源结构调整、交通结构调整和用地结构调整是大幅减少大气污染物和CO₂排放的重要抓手,这种协同效应非常明显,但在城市群层面还未被量化研究。为此,采用京津冀温室气体-空气污染物协同控制综合评估模型(GAINS-JJJ),构建了2017年京津冀及周边地区“2 + 26”城市群基础排放清单,定量分析了“三年行动计划”的实施带来的CO₂和主要大气污染物的排放变化情况。结果表明,与2017年相比,2020年政策情景下“2 + 26”城市的CO₂、一次PM_{2.5}、SO₂、NO_x和NH₃的减排量分别为29.1 Mt(相当于2017年排放量的2%)、203.8(21%)、281.8(27%)、485.5(17%)和34.3 kt(3%),排放量较大的城市或部门都实现了较为明显的减排。碳协同减排效益结果显示,产业结构调整的一系列重大举措(淘汰落后产能、工业锅炉升级改造和散乱污企业综合整治等)取得了良好的CO₂和大气污染物协同减排效应,而不同污染物中NO_x的碳协同减排效应最高。

关键词:结构性调整政策; 碳减排; 协同效应; “2 + 26”城市; GAINS-JJJ模型

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)11-5315-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202111234

Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the “2 + 26” Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings

YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, ZHU Jin-wei, CUI Yu-tao, TAN Yu-ling, SHU Yun*

(State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The Three-Year Action Plan for Winning the Blue Sky Defense Battle states that structural adjustments of industrial, energy, transportation, and land use are important to significantly reduce CO₂ and air pollutant emissions. This co-effect is evident but has not been quantified at the city-cluster level. This study developed an emission inventory for the “2 + 26” cities of the Jing-Jin-Ji region and its surroundings and quantitatively analyzed the impacts of measures in the Three-Year Action Plan for Winning the Blue Sky Defense Battle on the emissions of CO₂ and major air pollutants using Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies in the “2 + 26” cities model (GAINS-JJJ). The results showed that in the “2 + 26” cities, the emission reductions in CO₂, primary PM_{2.5}, SO₂, NO_x, and NH₃ under policy scenario 2020 were 29.1 Mt (equivalent to 2% of the emissions in 2017), 203.8 (21%), 281.8 (27%), 485.5 (17%), and 34.3 kt (3%), respectively, relative to 2017. In terms of the cities or sectors, the higher the pollutant emissions, the higher the reduction achieved. The CO₂ mitigation co-effect results showed that industrial adjustment measures, such as eliminating backward production capacity, upgrades on industrial boilers, and phasing out small and polluting factories, contributed the most to the co-effect of CO₂ emission reduction, whereas NO_x presented the highest co-effects, with CO₂ among the different air pollutants.

Key words: structural adjustment measures; carbon mitigation; co-effect; “2 + 26” cities; GAINS-JJJ model

近年来,中国在城市建设方面取得巨大成就。然而,城市化进程也消耗了大量的化石能源,导致每年向大气中排放数十亿t的温室气体(GHGs)和大气污染物^[1,2],气候变化与大气污染已成为中国面临的两大环境问题。2007年,中国超过美国成为最大的二氧化碳排放国,约占全球温室气体排放量的20%^[3]。为此,中国在节能降碳方面做出巨大努力:2020年单位国内生产总值能耗比2015年下降13.2%,全国煤炭消费占一次能源消费比重下降至56.8%左右^[4,5];文献[6]中提出,碳排放达峰后稳中有降,生态环境根本好转,美丽中国建设目标基本实现。

同时,中国政府也制定实施了一系列大气污染防治计划。国务院于2013年颁布了《大气污染防治行动计划》(“大气十条”)^[7],要求到2017年京津冀

等重点地区的细颗粒物(PM_{2.5})年均浓度下降25%。据估算,“大气十条”实施以来,京津冀地区2017年SO₂、NO_x和一次PM_{2.5}排放量相较2013年分别下降36%、31%和30%^[8]。其中,工业燃烧和工业过程在SO₂减排中起重要作用,而NO_x的减排主要发生在交通运输部门,工业源和民用燃烧源对PM_{2.5}的减排贡献最大^[9]。值得一提的是,“大气十条”的实施减少了352.7 Mt[(39.9 ± 5.3)%]的CO₂排放^[10]。随后,国务院发布《打赢蓝天保卫战三年行动计划》(“三年行动计划”)^[11],提出到2020年,SO₂和NO_x排放总量分别比2015年下降15%

收稿日期: 2021-11-22; 修订日期: 2022-02-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0213000)

作者简介: 杨添棋(1997~),男,硕士,主要研究方向为温室气体与空气污染物协同治理, E-mail: 937554966@qq.com

* 通信作者, E-mail: shuyun@cea.cn

以上,并协同减少温室气体(主要 CO_2)排放,重点区域范围包括京津冀及周边(“2+26”城市)等地区.大气污染防治措施在实现产业、能源和交通结构清洁化发展的同时,可以带来明显的协同减碳效果,同样地,节能和减缓气候变化政策也可以显著改善空气质量^[1,12].“十四五”时期,推动减污降碳协同治理将成为促进经济社会发展全面绿色低碳转型的重要抓手^[13].

缓解大气污染和减少 CO_2 排放之间的协同效应已被许多研究证实^[14~20],研究主要从政策措施和部门行业两个维度展开.一方面,不同政策措施的 CO_2 和大气污染物协同减排潜力有所不同,比如在省级或市级层面实施清洁能源替代政策相较其他政策表现出更明显的协同减排效果^[10,17,18];另一方面,不同污染物与 CO_2 的协同减排效益在不同行业部门中往往存在差异,比如在国家层面钢铁行业的 $\text{PM}_{2.5}$ 减排对 CO_2 排放存在明显的协同减排效益^[19],而水泥行业在削减 SO_2 的同时有助于大幅减少 CO_2 的排放^[20].然而,目前 CO_2 与常规大气污染物协同减排效益研究多数集中在国家、省级或者是单一城市层面,研究对象也主要是以某行业(部门)或者某种污染物开展评估,而在城市群层面开展多部门多污染物的综合协同减排效益研究目前还比较少.

京津冀及周边“2+26”城市,虽然只占全国国土面积的 7.2%,却消耗了全国 33% 的煤炭,单位面积污染物排放强度约为全国平均水平的 4 倍^[21],是我国大气污染防治的重点地区.针对“2+26”城市开展大气污染防治政策对温室气体协同减排效益研究意义重大.“三年行动计划”明确提出,产业结构调整、能源结构调整、交通结构调整和用地结构调整是大幅减少大气污染物和 CO_2 排放的重要抓手,这种协同效应非常明显,但在城市群层面还未被量化研究.为此,本文采用温室气体和空气污染相互作用与协同效应模型(greenhouse gas-air pollution interaction and synergies, GAINS)^[22]定量评估“三年行动计划”中四大结构调整政策在“2+26”城市的 CO_2 与常规大气污染物(一次 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_x 和 NH_3)的协同减排效益.分别设置基准情景和政策情景,通过比较分析,得到各城市在 2017、2020、2025 和 2030 年的 CO_2 和大气污染物协同减排情况,识别出具有优异协同效应的关键部门以及关键污染物,以期对未来政策制定提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域

本文研究区域为京津冀及周边地区“2+26”城

市,包括北京、天津、河北省的石家庄、唐山、保定、廊坊、沧州、衡水、邯郸和邢台,山西省的太原、阳泉、长治和晋城,山东省的济南、淄博、聊城、德州、滨州、济宁和菏泽,河南省的郑州、新乡、鹤壁、安阳、焦作、濮阳和开封这 28 个城市,如图 1 所示.

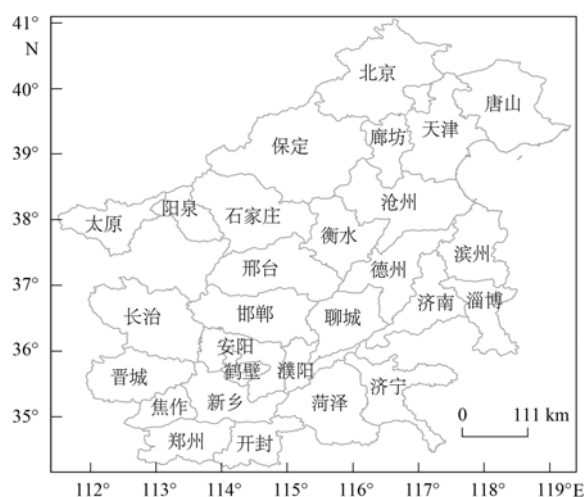


图 1 研究区域示意

Fig. 1 Overview of the study domain

1.2 评估模型与数据来源

GAINS 模型主要用于评估温室气体减缓和空气污染控制潜力,以及政策之间相互作用.为评估“2+26”城市群政策效果,开发了京津冀温室气体-空气污染物协同控制综合评估模型(GAINS-JJJ).模型研究区域涵盖京津冀及周边地区 28 个污染传输通道城市,依据本地大气污染物排放清单^[23]、中国城市统计年鉴、中国能源统计年鉴和实地调研数据等更新模型城市层面活动水平基础数据.采用排放因子法估算基准年下各城市不同部门的大气污染物和温室气体排放量,如公式(1).具体来说,利用收集到的数据对模型参数(如燃料类型、能源消耗量、工业产品产量和大气污染控制技术的普及率/脱除率等)进行校准.比如,模型数据库中“2+26”城市的主要工业产品产量和能源消费量(如煤炭开采量、玻璃、粗钢、生铁、球团矿、烧结矿、焦炭、水泥、熟料和纸板等)主要根据文献^[24~30]的数据进行了更新;又根据文献^[31,32]对各城市的交通运输结构、汽车保有量和不同交通工具的燃料消耗量等进行了校正.对于仅有规模以上统计数据的部分地级市,依据前期研究结果^[23,33]对此类城市的活动水平进行二次校核.

$$E_p = \sum_k \sum_m A_k e_{k,m,p} \chi_{k,m,p} \quad (1)$$

式中, k 、 m 和 p 分别为活动类型、污染减排措施和污染物; E_p 为污染物 p (如一次 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_x 、

NH₃ 和 CO₂ 等)的排放量,10³ t·a⁻¹; A_k 为活动类型 k 的活动水平数据,t·a⁻¹ (以产品计)或 PJ·a⁻¹; ef_{k,m,p} 为采用污染控制措施 m 后活动类型 k 的污染物 p 的排放系数,g·t⁻¹ (以产品计)或 g·PJ⁻¹; χ_{k,m,p} 为污染减排措施 m 对活动 k 的污染物 p 在当地的普及率,%.

1.3 情景设计

借助情景分析法分别构建了基准情景和政策情景,通过不同情景的比较识别出政策效益. 基准年设定为“三年行动计划”起始年份 2017 年,且基准情景和政策情景中 2017 年的活动水平保持一致,评估期包括 2017、2020、2025 和 2030 年. 基准情景下 2020、2025 和 2030 年的活动水平是依据 GAINS-JJJ 模型中

2018 世界能源展望政策情景(WEO-2018-CPS)^[34] 的发展趋势,对现有政策^[7,35] 进行的外推. 在政策情景中,将“三年行动计划”政策措施应用于“2+26”城市,以此来分析该项政策在 2017~2030 年期间的实施效果. 结构性调整政策是该计划的重要特征,政策情景中设置了四项政策措施组合,包括产业结构调整,能源结构调整,交通结构调整和用地结构调整(表 1). 其中,产业结构调整政策主要通过活动水平的变化来反映,如式(2)所示;能源结构调整政策主要通过活动水平和能源效率的变化来体现,如式(3)~(5)所示;交通结构调整政策主要通过排放因子和活动水平的变化来体现;最后,用地结构调整政策主要通过排放因子的变化来反映.

表 1 政策情景的结构调整措施
Table 1 Structural adjustment measures in policy scenario

城市	调整优化产业结构,推进产业绿色发展	加快调整能源结构,构建清洁低碳高效能源体系	积极调整运输结构,发展绿色交通体系	优化调整用地结构,推进面源污染治理
北京	到 2020 年,退出一批制造业和污染企业	①以煤改电为主,基本实现全市平原地区“无煤化”;②进一步降低燃气采暖热水炉氮氧化物排放;③充分开发本地新能源资源,推进可再生能源清洁取暖,原则上不再新建天然气热电联产和天然气化工程项目	①到 2020 年,全市轻型汽油车和重型柴油车实施国六(B)排放标准;②新能源车保有量达到 40 万辆左右;③货物到发铁路运输的比重提高到 10%	①加强施工扬尘控制,严格落实工地“六个百分之百” ^[11] ;②实施有机肥代替化肥行动;③加强秸秆综合利用
天津	严禁新增钢铁、焦化、电解铝、铸造、水泥和平板玻璃等产能,到 2020 年完成压减粗钢产能 690 万 t 任务	①全市 75.6 万户农村散煤清洁能源替代;②淘汰 35 t·h ⁻¹ 以下燃煤锅炉,65 t·h ⁻¹ 及以上燃煤和油锅炉实现超低排放;③全市可再生能源电力装机规模进一步提高	①全市轻型汽油车和其余行业重型柴油车实施国六(B)排放标准;②新增新能源汽车 6 万辆;③铁路运输比例达到 50% 以上	①严格落实工地“六个百分之百”;②化肥利用率提高到 40% 以上;③秸秆综合利用率实现全量化利用
石家庄、唐山、保定、廊坊、沧州、衡水、邯郸和邢台	到 2020 年,分别压减退出钢铁、水泥、平板玻璃、焦炭和火电等产能 1400、100、840 万 t 和 50 万 kW	①主城区清洁取暖率达到 100%;②2020 年基本淘汰 35 t·h ⁻¹ 以下燃煤锅炉,65 t·h ⁻¹ 及以上燃煤燃油锅炉全部实现超低排放;③提升清洁能源比重,积极发展可再生能源	①到 2020 年,全市轻型汽油车和其余行业重型柴油车实施国六排放标准;②累计推广新能源汽车 30 万辆(标准车);③铁路货运比例较 2017 年增长 40%	①加强施工扬尘控制,严格落实工地“六个百分之百”;②到 2020 年,化肥利用率提高到 40% 以上;③秸秆综合利用率达到 95% 以上
郑州、新乡、鹤壁、安阳、焦作、濮阳和开封	禁止新增钢铁、焦化、电解铝、铸造、水泥和玻璃等产能,到 2020 年,累计关停 300 万 kW 以上落后煤电机组	①城区和农村地区清洁取暖率分别达到 95% 和 50%;②2020 年基本淘汰 35 t·h ⁻¹ 以下燃煤锅炉,65 t·h ⁻¹ 及以上燃煤燃油锅炉全部实现超低排放	①到 2020 年,全市轻型汽油车和其余行业重型柴油车实施国六排放标准;②累计推广新能源汽车 20 万辆;③铁路货运量占比达到 6%	①加强施工扬尘控制,严格落实工地“六个百分之百”;②到 2020 年,化肥利用率提高到 40% 以上;③秸秆综合利用率达到 89% 以上
济南、淄博、聊城、德州、滨州、济宁和菏泽	严禁新增钢铁、焦化、电解铝、铸造、水泥和平板玻璃等产能	①平原地区基本完成散煤替代;基本淘汰 35 t·h ⁻¹ 以下燃煤锅炉;②燃气锅炉基本完成低氮改造,生物质锅炉实施超低排放改造	①到 2020 年,全市轻型汽油车和其余行业重型柴油车实施国六排放标准;②累计推广新能源汽车 30 万辆;③铁路货运量比 2017 年增长 40%	①加强施工扬尘控制,严格落实工地“六个百分之百”;②到 2020 年,化肥利用率提高到 40% 以上;③秸秆综合利用率达到 92% 以上
太原、阳泉、长治和晋城	严禁新增钢铁、焦化、铸造、水泥和平板玻璃等产能	①建成区和农村地区清洁取暖覆盖率分别达到 100% 和 60% 以上;②基本淘汰 35 t·h ⁻¹ 以下燃煤锅炉,65 t·h ⁻¹ 及以上燃煤燃油锅炉全部实现超低排放	①到 2020 年,全市轻型汽油车和其余行业重型柴油车实施国六排放标准;②累计推广新能源汽车 20 万辆;③铁路货运量比 2017 年增长 40%	①加强施工扬尘控制,严格落实工地“六个百分之百”;②到 2020 年,化肥利用率提高到 40% 以上;③秸秆综合利用率达到 85% 以上

产业结构调整:

$$\Delta A = A_{BL} \times \Delta Ca / Ca_{2017} \quad (2)$$

式中,ΔA 为由于政策变化带来活动水平的变化量,t·a⁻¹ (以产品计)或 PJ·a⁻¹; A_{BL} 为基准年活动水平,

$t \cdot a^{-1}$ (以产品计) 或 $PJ \cdot a^{-1}$; ΔCa 为产能变化量, $t \cdot a^{-1}$ (以产品计); Ca_{2017} 为基准年 2017 的总产能, $t \cdot a^{-1}$ (以产品计), 数据主要来自省级统计年鉴^[25~30].

能源结构调整(以居民“煤改电”政策为例):

$$\Delta A_{Coal}^{Res} = \Delta N_{House} \times U_{Coal} \quad (3)$$

$$\Delta A_{Ele}^{Res} = \frac{\Delta A_{Coal}^{Res} \times Eff_{Coal}^{Res} \times R_{Coal-Ele}}{Eff_{Ele}^{Res}} \quad (4)$$

$$\Delta A_{Coal}^{PP} = \Delta A_{Ele}^{Res} / [Eff_{Coal}^{PP} \times (1 - Eff_{Loss})] \quad (5)$$

式中, ΔA_{Coal}^{Res} 为政策变化带来的民用燃煤变化量, $PJ \cdot a^{-1}$; ΔA_{Ele}^{Res} 为政策变化带来的民用电力变化量, $PJ \cdot a^{-1}$; ΔA_{Coal}^{PP} 为政策变化带来的电力部门煤炭使用变化, $PJ \cdot a^{-1}$; ΔN_{House} 为政策影响的居民人数变化^[23], capital; U_{coal} 为居民户均耗煤量^[36], $PJ \cdot capital^{-1}$; Eff_{Coal}^{Res} 为民用燃煤效率, %; Eff_{Coal}^{PP} 为燃煤电厂发电效率, %; Eff_{Loss} 为电网电耗, %; $R_{Coal-Ele}$ 为煤改电替代比例, %.

交通结构调整(以加严尾气排放标准为例): 在 GAINS-JJJ 模型中, 车辆的增长率反映了现有存量中新增的车辆, 而相同比例的旧车(排放标准过时)被淘汰. 加严的机动车排放标准将被应用于新车存量中, 同样比例的老旧车将被淘汰.

用地结构调整(以提高化肥利用率为例): 针对提高化肥利用率政策, 在 GAINS 模型控制策略中调整先进施肥技术比例, 以此来降低肥料中的氮含量, 从而减少农业部门的氨排放量.

依据碳协同减排效益计算方法^[10,37], 使用“协

同作用的相对程度”指标 S 作为评价协同减排效益的指标. 通过公式(6)得到协同效益参数 S , 用于评估不同城市、政策措施或污染物的 CO_2 协同减排效益. S 越高, 意味着单位大气污染物排放减少的 CO_2 减排潜力越大.

$$S = (\Delta E_{CO_2} / E_{CO_2}) / (\Delta E_p / E_p) \quad (6)$$

式中, S 为协同效益参数; ΔE_{CO_2} 为 CO_2 的减排量, Mt; E_{CO_2} 为 CO_2 的排放量, Mt; ΔE_p 为所考虑的大气污染物减排量, kt; E_p 为所考虑的大气污染物排放量, kt.

2 结果与讨论

2.1 基准情景下 2017~2030 年污染排放分析

图 2 为 2017~2030 年基准情景下“2+26”城市的大气污染物排放变化情况. 2017 年, “2+26”城市的 CO_2 排放量为 1 891.6 Mt, 一次 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_x 和 NH_3 的排放总量分别为 971.5、1 038.1、2 920.2 和 1 290.6 kt (图 2). 通过与文献结果比较(表 2), 本研究中的大气污染物排放量和文献[23]结果的一致性较好, 但略低于文献[8,38,39], 这可能是由于本研究校准基础数据只考虑了本地规模以上企业活动水平的原因. 从 2017~2030 年, “2+26”城市 CO_2 和 NH_3 的排放量逐年上升, 到 2030 年分别达到了 2 096.1 Mt 和 1 315.5 kt, 这可能与 28 个城市能源消费量的不断升高^[33] 和缺乏有效的 NH_3 管控措施有关^[40]. 一次 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_x 排放呈现小幅下降趋势, 但到 2030 年 3 项污染物排放量依然处于较高水平, 分别达到 831.0、869.3 和 2 654.9 kt.

表 2 2017 年京津冀及周边地区空气污染物排放量在不同研究中的比较¹⁾/kg·person⁻¹

Table 2 Comparison of air pollutant emissions in the Jing-Jin-Ji region and surrounding areas in 2017 among different studies/kg·person⁻¹

研究区域	$PM_{2.5}$	SO_2	NO_x	NH_3	文献
“2+26”城市	2.95	3.10	9.10	3.86	本研究
“2+26”城市	2.47	2.98	8.92	2.89	[23]
京津冀及周边 6 省市	7.44	12.07	16.37	8.18	[38]
京津冀	6.48	8.89	14.63	7.12	[8]
京津冀	5.44	6.87	15.08	—	[39]

1) “—”表示无数据

从不同部门排放贡献来看: CO_2 的排放主要来源于工业燃烧(占排放量的 34%)和电力部门(29%), 这和两个部门煤耗较高有关^[24]; 民用燃烧源(33%)是一次 $PM_{2.5}$ 排放的主要来源, 这是由于家用燃煤取暖过程燃烧效率较低且缺乏有效控制^[41,42]; 工业燃烧(29%)、民用燃烧(28%)和工业过程(24%)是“2+26”城市 SO_2 排放的主要来源, 而电力部门(15%)的贡献相对较小, 这是因为 2013 年以来我国燃煤发电的超低排放改造, SO_2 排

放量显著减少^[43,44]; NO_x 排放则主要来自交通运输(31%), 尤其是重型柴油车(25%), 其次是工业燃烧(24%)和工业过程(13%); 与上述污染物不同的是, 92% 以上的 NH_3 排放来自农业, 包括畜禽粪便(猪、家禽、牛和其他)和合成肥料的施用(尿素和碳酸氢铵的施用)^[45].

从不同城市排放量来看(图 3), 唐山、邯郸和石家庄等城市是污染排放大户. 一方面这些城市的工业产品产量大, 生产过程中产生大量污染物, 比如

唐山、邯郸和石家庄的粗钢产量的全国排名分别为第一、二和十八位^[46]。另一方面这些城市的能源消耗总量大,煤耗占比高,比如唐山和邯郸的能源消耗总量位列京津冀及周边地区前列,煤炭占比都在50%以上^[33]。另外值得一提的是,不同城市各项污

染物的主要来源部门存在差异,这是由于不同地区的产业经济结构差异较大的缘故。比如唐山地区的一次 PM_{2.5} 主要来自工业过程(32%)和工业燃烧(13%),而保定、石家庄和沧州等地则主要来自民用燃烧部门,占比分别为66%、44%和51%。

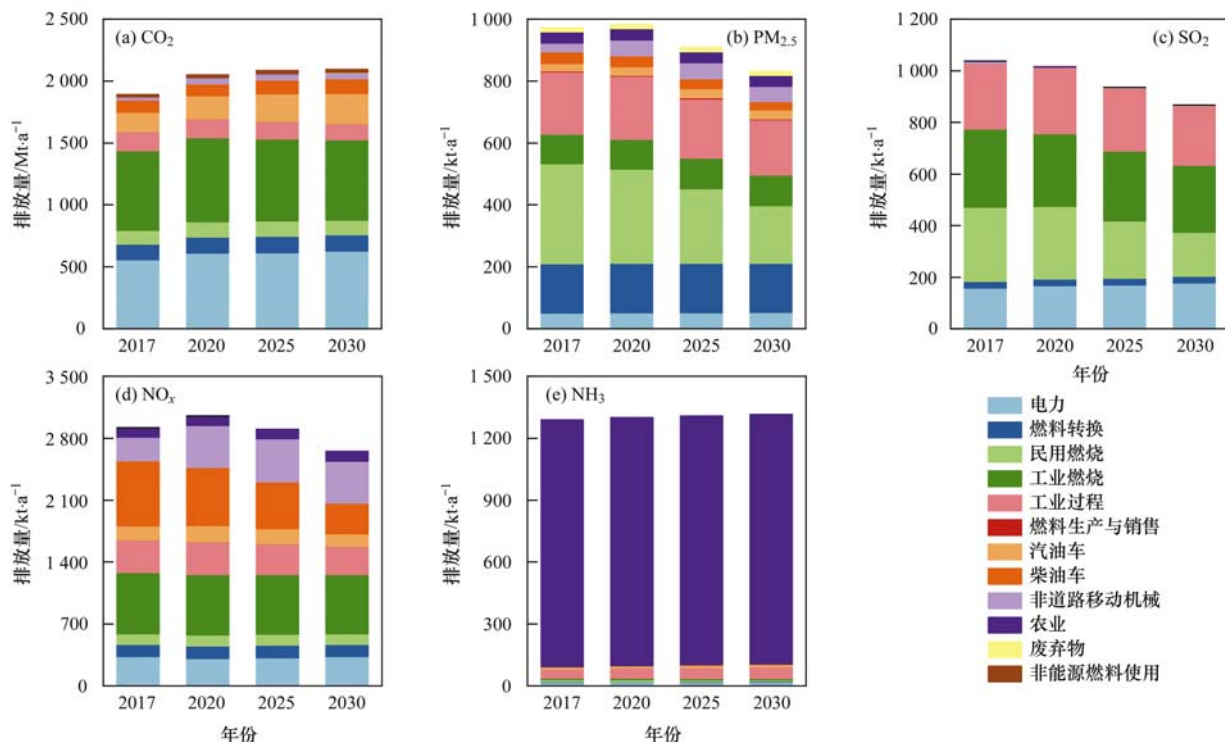


图2 基准情景下2017~2030年“2+26”城市空气污染物总排放情况

Fig. 2 Total emission of air pollutants in the “2+26” cities from 2017 to 2030 under baseline scenario

2.2 政策情景下2020~2030年减排量分析

“三年行动计划”主要从产业、能源、交通和用地这4个方面实施结构性调整政策,为各项污染物带来了不同程度的减排效果(图4)。与2017年相比,2020年政策情景下“2+26”城市的CO₂的减排量为29.1 Mt(相当于2017年排放量的2%),而一次PM_{2.5}、SO₂、NO_x和NH₃的减排量分别为203.8(21%)、281.8(27%)、485.5(17%)和34.3 kt(3%)。其中,一次PM_{2.5}、SO₂和NO_x减排占比均超过15%,减排效果显著,并且CO₂实现协同减排。由于政策的实施,2020~2030年一次PM_{2.5}、SO₂和NO_x的排放相较于2017年持续下降,NH₃排放稳定在1260 kt左右,而CO₂排放出现增加现象,说明今后的污染治理应重视NH₃和碳减排。

从不同部门减排贡献来看:工业燃烧(占减排量的40%)和工业过程(28%)两个部门对CO₂的减排贡献较大,这主要是禁止新增钢铁和焦化等产品产能政策的实施所致;而对于一次PM_{2.5}和SO₂的减排,民用燃烧部门的煤改清洁能源政策贡献显著,占比分别达到69%和57%;工业燃烧(37%)、移动源[主要为柴油车(28%)]和工业过程(14%)

是NO_x减排的主要来源,具体措施包括中小燃煤锅炉的淘汰,大型燃煤锅炉的超低排放改造和重型柴油车国六排放标准的实施等;而对于NH₃的减排来说,农业(85%)部门中的提高有机氮肥利用率占据主导地位。图5显示了2017~2020年不同结构性政策措施对不同污染物的减排效果。从图中可以看出,不同结构性政策对不同污染物减排的贡献存在差异。2017~2020年,CO₂的减排主要来自产业结构调整政策(减排占比76%),而能源结构调整政策对一次PM_{2.5}(53%)和SO₂(67%)的减排贡献最大,交通结构调整政策对NO_x减排的贡献最大,占比达到40%,NH₃的减排则基本来自用地结构调整政策(94%)。另外,2020~2030年CO₂的增排主要来自电力部门,这主要是由于煤改电和新能源汽车等政策的推广,增加了本地的煤电负荷,从而增加了CO₂的排放。

从不同城市减排效果来看(图6),排放量较大的城市或部门都实现了较为明显的减排。对于一次PM_{2.5}来说,唐山地区的减排主要来自工业过程(37%)和工业燃烧(13%)部门,这和当地淘汰了大量钢铁和焦炭等过剩产能有关;而沧州

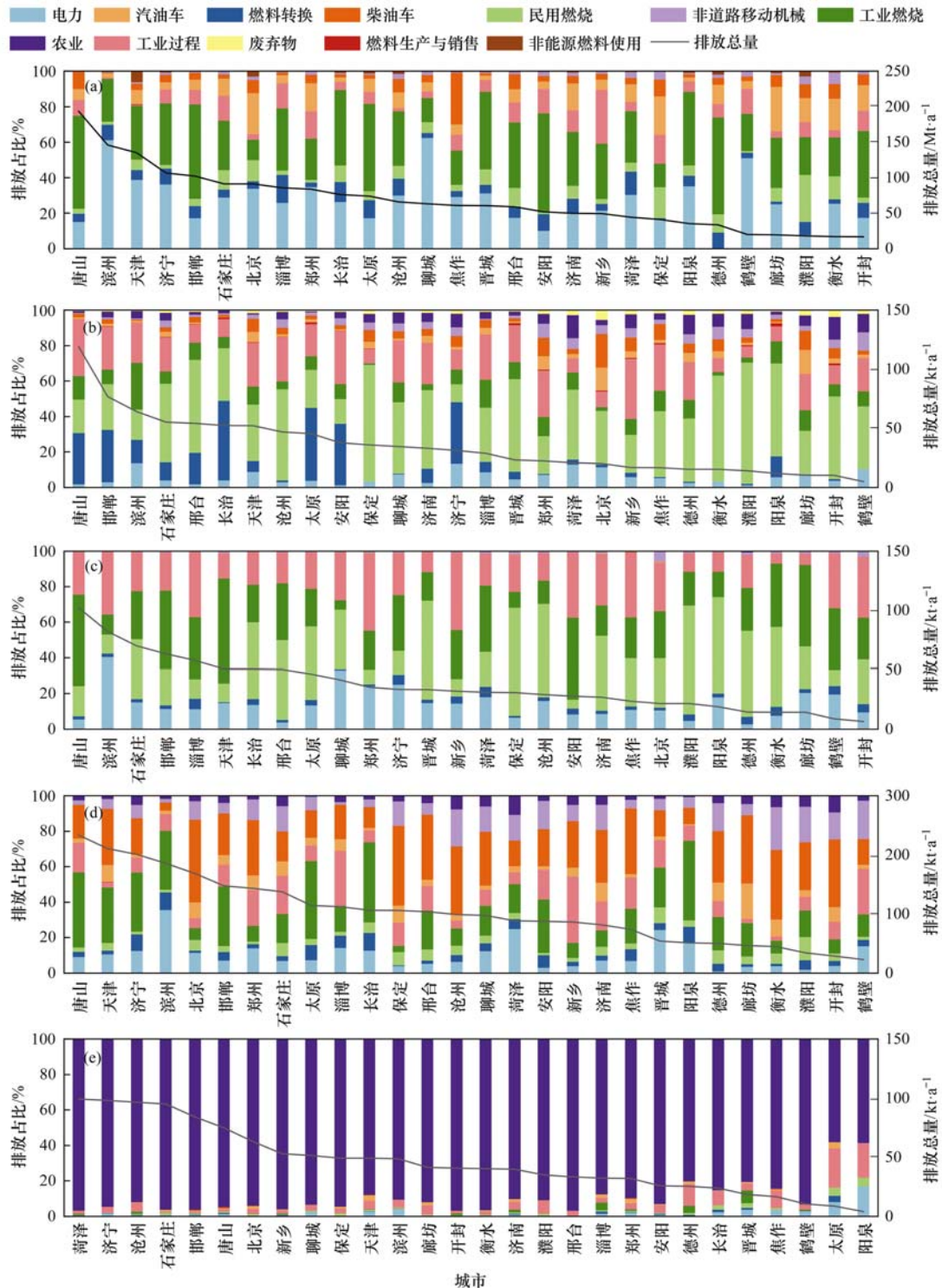
(a) CO_2 , (b) $\text{PM}_{2.5}$, (c) SO_2 , (d) NO_x , (e) NH_3

图3 基准情景下2017年“2+26”城市空气污染物排放情况

Fig. 3 Emission of air pollutants in the “2+26” cities in 2017 under baseline scenario

和石家庄的减排主要发生在民用燃烧(94%和74%)部门,这和当地的民用散煤基数大直接相关.而对于 NO_x 减排来说,济宁和滨州等地的减排主要来自工业燃烧(分别为50%和60%)部门,这和当地的燃煤锅炉超低排放改造有关;而北京的减排主要来自移动源(70%),这和本地机动车保有量大有关.

2.3 污染物与 CO_2 减排的协同效应分析

上述结果表明,“三年行动计划”的实施在减少大气污染物排放的同时也会减少 CO_2 的排放.下面进一步通过公式(2)计算 S 值,对“2+26”城市大气污染物与 CO_2 减排的协同效应进行分析,较高的 S 值则表明较好的协同效应.2020年“2+26”城市在实施四大结构调整政策后,一次 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_x

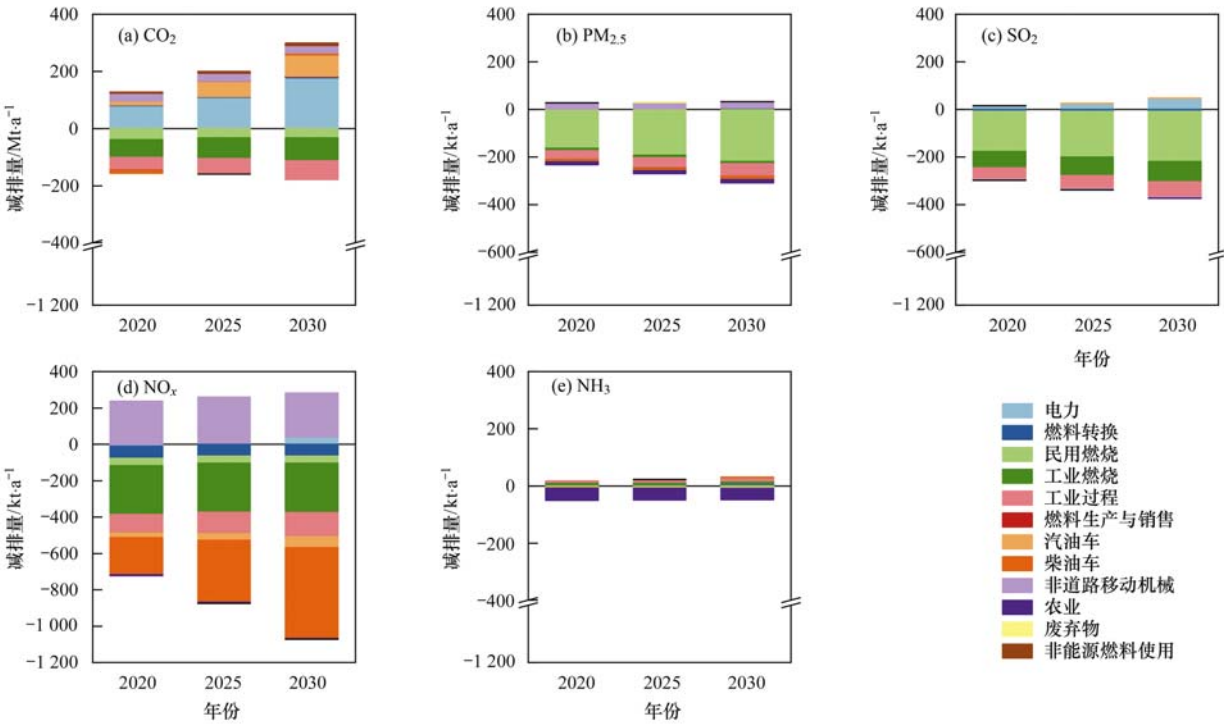
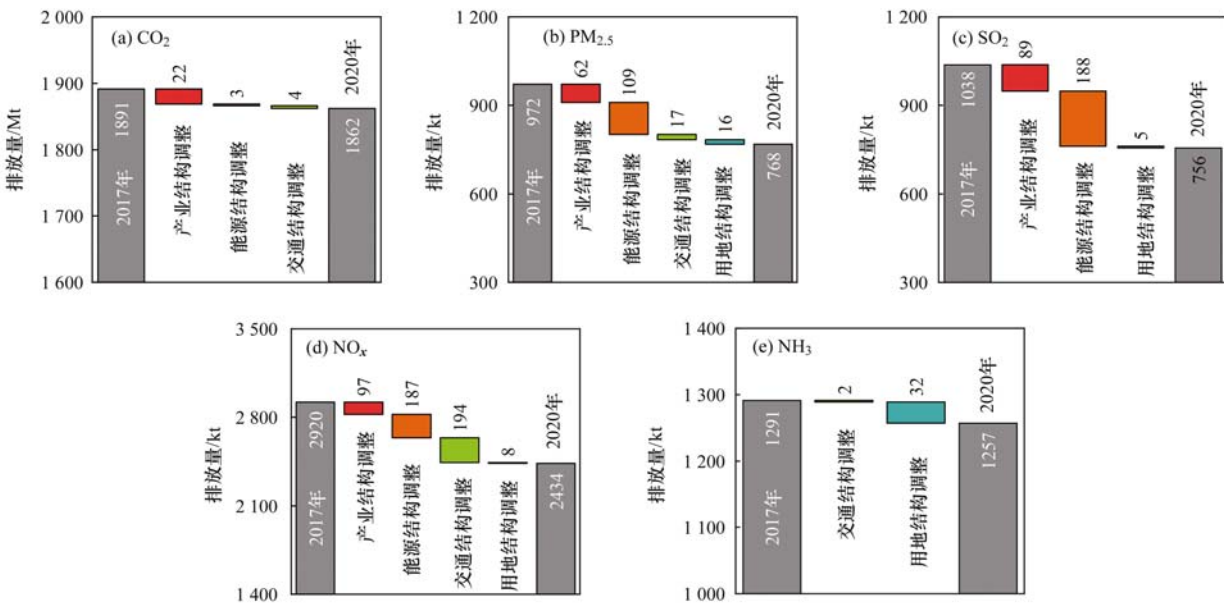


图 4 2017~2030 年“2+26”城市空气污染物总减排量

Fig. 4 Total emission reduction of air pollutants in “2+26” cities from 2017 to 2030



灰色柱子表示 2017~2020 年排放量；其他颜色柱子表示不同结构性政策实施后的减排量（柱子顶端数值）

图 5 各项结构性调整政策减排贡献

Fig. 5 Emission reduction contribution of various structural adjustment policies

的 S 值分别为 0.42 (CO₂ 协同减排量为 213.3 kt)、0.36 (260.5 kt) 和 0.45 (617.9 kt) [图 7(a)], NO_x 具有较高的 CO₂ 协同减排效应. 该结果和 Feng 等^[47]的研究结果一致, 他们通过 MARKAL-EFOM 系统模型研究发现, 水泥行业 NO_x 排放控制措施具备显著的 CO₂ 协同减排效应. 从不同城市比较中不难发现 [图 7(b)], 聊城市 3 项污染物 S 值之和明显高于其他城市, 这是由于严禁新增钢铁和焦化等产

能, 基本完成散煤替代, 燃气锅炉的低氮改造和生物质锅炉的超低排放改造等多种政策的共同影响. 从主要行业的 S 值分布来看 (表 3), “2+26”城市工业部门 (包括工业燃烧和工业过程) 的 S 值高于民用燃烧和交通部门, 表明产业结构调整的一系列重大举措 (淘汰落后产能、化解过剩产能、工业锅炉整治和散乱污企业综合整治等) 取得了良好的大气污染物与 CO₂ 协同减排效应. 该结果与文献

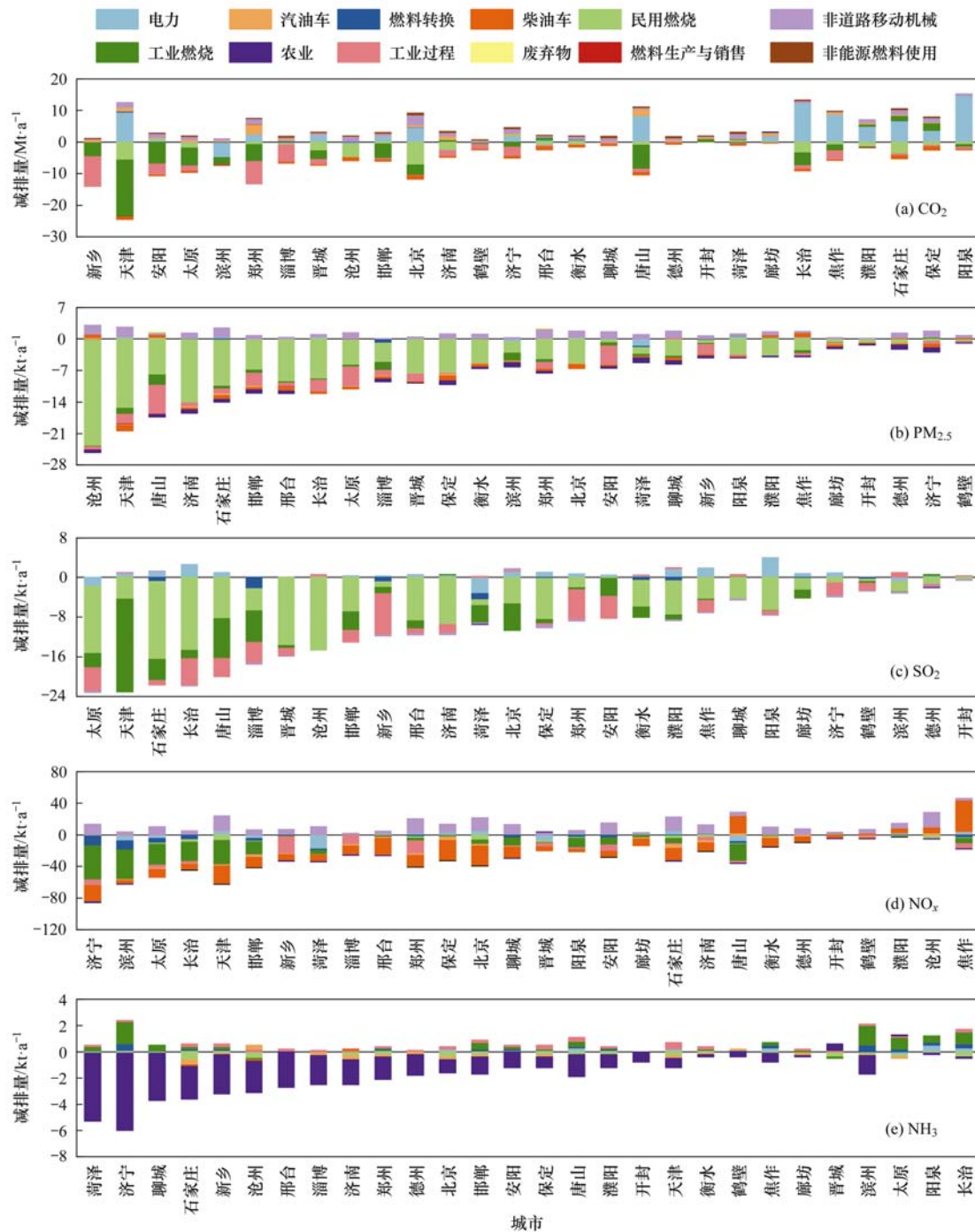


图6 2020年“2+26”城市空气污染物减排量

Fig. 6 Emission reduction of air pollutants in "2+26" cities in 2020

[48]的研究结果相一致,该研究认为2015~2020年我国工业部门的CO₂与主要污染物协同减排效果明显。另外,不同城市S值较高的行业分布存在差异。例如第二产业较为发达的唐山、天津和郑州等城市,工业燃烧部门的S值显著偏高,这和调整能源结构政策中淘汰中小燃煤锅炉和燃煤锅炉实现超低排放等措施的实施有关;而对于人口密集且第三产业较发达的北京和石家庄等城市民用燃烧部门的S值相较于其他行业高,这主要由于煤改清洁能源政策的实施。

本研究中“2+26”城市空气污染物排放量具有一定的不确定性。有研究表明^[38,49]:常规大气污染物排放的不确定性(95%置信区间)分别为-14%~12%(SO₂)、-10%~36%(NO_x)和-12%~42%(PM_{2.5}),这为政策效果评估的准确性带来了挑战。而本研究主要通过比较不同情景之间的差异来分析“三年行动计划”的实施效果,这可以在很大程度上抵消排放带来的不确定性因素。另外,本研究采用了和文献[38,49]相似的排放因子和方法使得本文的不确定性在可控范围内。

表 3 2020 年“2+26”城市主要行业 S 值¹⁾

地区	民用燃烧			工业燃烧			工业过程			柴油车		
	PM _{2.5}	SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	SO ₂	NO _x
安阳	0.00	—	—	1.15	1.02	0.75	1.39	1.16	0.89	0.25	—	0.20
保定	0.89	0.57	1.30	—	0.08	0.06	0.85	—	0.72	0.64	0.66	0.69
北京	0.77	0.88	0.99	—	—	—	—	—	—	0.81	—	0.64
滨州	0.73	0.58	1.33	0.36	1.10	0.11	0.00	0.00	—	1.33	—	0.69
沧州	0.93	0.95	1.00	0.61	1.13	0.93	0.00	—	—	-0.24	—	-0.44
长治	0.92	0.75	1.13	2.61	0.99	0.30	0.67	0.62	0.84	0.46	—	0.45
德州	1.26	0.51	1.05	-0.58	—	1.18	6.08	1.08	0.72	0.62	—	0.56
邯郸	0.89	0.48	1.43	1.17	0.94	0.35	0.25	0.28	0.80	0.56	—	0.39
鹤壁	1.67	0.58	—	—	1.88	0.97	1.71	1.03	0.91	0.00	—	0.00
衡水	0.78	0.52	1.32	-0.08	0.06	0.06	0.00	—	—	0.69	—	0.67
菏泽	0.82	0.37	1.21	0.13	0.11	0.09	—	—	—	0.57	—	0.50
焦作	1.23	0.70	1.28	0.89	5.62	0.64	3.45	1.82	1.06	0.00	—	0.00
济南	0.82	0.94	0.96	—	1.65	2.00	2.78	1.33	0.94	0.55	—	0.36
晋城	0.87	0.74	1.11	—	1.24	1.43	1.11	1.04	0.90	0.57	—	0.49
济宁	1.45	0.78	3.50	-1.05	4.31	0.12	1.77	1.09	0.91	0.28	—	0.22
开封	2.56	0.63	—	—	—	0.38	0.00	—	—	0.00	—	0.00
廊坊	0.72	0.27	1.25	0.55	0.38	0.28	0.00	—	—	0.51	—	0.39
聊城	0.82	0.59	1.36	0.40	1.73	0.11	5.67	7.70	1.52	0.38	—	0.31
濮阳	1.02	0.72	1.12	—	0.09	0.09	0.00	—	—	0.00	—	0.00
石家庄	1.10	0.64	1.23	0.56	0.44	0.33	0.38	0.66	0.89	0.84	—	0.70
太原	0.77	0.61	1.21	1.41	0.67	0.36	0.68	0.72	0.89	0.70	—	0.60
唐山	0.86	0.57	1.33	0.95	0.94	0.61	0.32	0.38	1.00	-0.11	—	-0.03
天津	0.82	0.93	0.96	1.03	1.41	1.07	0.00	0.00	—	0.67	—	0.60
邢台	0.78	0.62	1.21	0.81	0.66	0.69	0.36	0.48	1.08	0.27	—	0.21
新乡	1.88	0.57	1.85	2.67	2.26	1.50	1.60	1.05	0.95	0.00	—	0.00
阳泉	0.80	0.69	1.19	—	2.15	0.14	1.02	1.07	0.88	0.57	—	0.46
郑州	0.74	1.00	0.85	1.17	5.63	1.02	2.01	1.35	0.98	0.00	—	0.00
淄博	0.77	0.49	1.38	0.32	0.37	3.30	2.55	2.05	1.26	0.64	—	0.47

1) “—”表示无数据,黑体字表示对应污染物中各主要行业的最大 S 值,该值越大表示协同效应越强

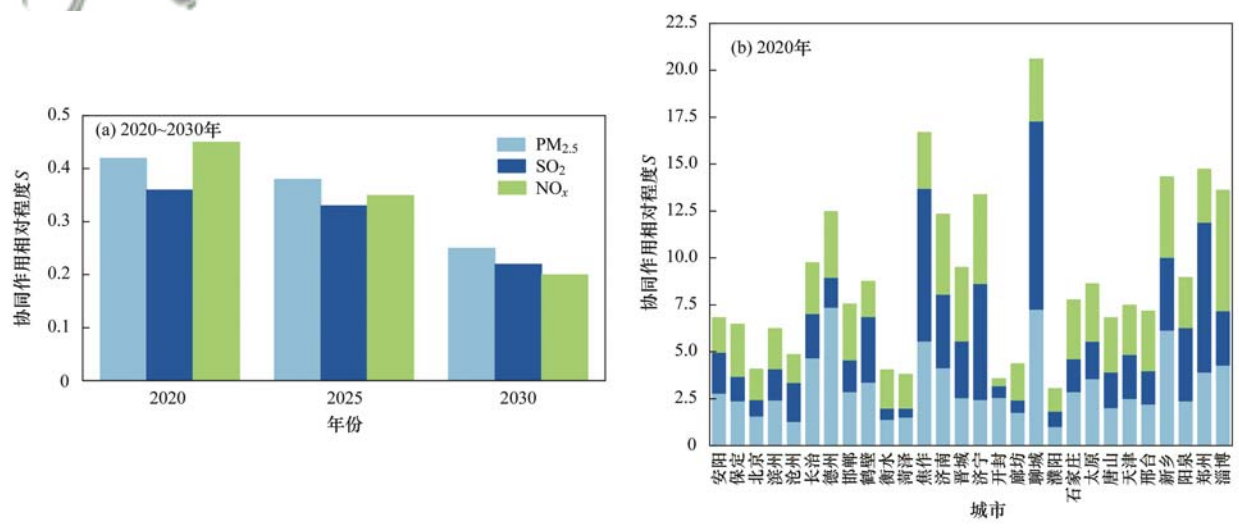


图 7 “2+26”城市空气污染物协同效益参数 S 值

Fig. 7 Values of S for the co-effects of the reductions in air pollutants in the “2+26” cities

综上研究提出两点政策建议. 第一, NH₃ 对 PM_{2.5} 的形成有重要影响, 加强对农业 NH₃ 的排放控制, 对缓解 PM_{2.5} 空气污染具有重要意义^[50], 然而对农业 NH₃ 的控制一直被忽视(图 4), 未来应加强对农业 NH₃ 排放的管控, 如提高有机氮肥利

用率等. 第二, 清洁能源政策如煤改电和新能源汽车等, 不可避免地会增加电力部门负荷, 从而造成污染物排放的升高(图 4 和图 6), 未来可再生能源发电需大幅提高并成为主力电源, 从而减少新增碳排放.

3 结论

(1)2017年,“2+26”城市的CO₂的排放量为1891.6Mt,一次PM_{2.5}、SO₂、NO_x和NH₃的排放量分别为971.5、1038.1、2920.2和1290.6kt。CO₂的排放主要来源于工业燃烧(占排放量的34%)和电力部门(29%);而民用燃烧源(33%)是一次PM_{2.5}排放的主要来源;工业燃烧(29%)、民用燃烧(28%)和工业过程(24%)是“2+26”城市SO₂排放的主要来源;NO_x排放则主要来自交通运输(31%),尤其是重型柴油车(25%);和上述污染物不同的是,92%以上的NH₃排放来自农业,包括畜禽粪便(猪、牛、家禽和其他)和合成肥料的施用(尿素和碳酸氢铵的施用)。不同城市各项污染物的主要来源部门存在差异,这是由于不同地区的产业经济结构差异较大的缘故。

(2)“三年行动计划”的实施,使“2+26”城市2020年的CO₂的减排量达到29.1Mt(相当于2017年排放量的2%),而一次PM_{2.5}、SO₂、NO_x和NH₃的减排量分别达到203.8(21%)、281.8(27%)、485.5(17%)和34.3kt(3%)。其中,工业燃烧(占减排量的40%)和工业过程(28%)两个部门对CO₂减排的贡献较大;而对于一次PM_{2.5}和SO₂的减排,民用燃烧部门的煤改清洁能源政策贡献显著,占比分别达到69%和57%。从不同城市减排效果来看,排放量较大的城市或部门都实现了较为明显的减排。

(3)“三年行动计划”实施使得常规污染物明显下降的同时,一次PM_{2.5}、SO₂和NO_x的CO₂协同减排量分别为213.3、260.5和617.9kt,NO_x具有较高的CO₂协同减排效应。产业结构调整的一系列重大举措(淘汰落后产能、工业锅炉升级改造和散乱污企业综合整治等)取得了良好的CO₂与大气污染物协同减排效应。

参考文献:

- [1] Jiang P, Chen Y H, Geng Y, *et al.* Analysis of the co-benefits of climate change mitigation and air pollution reduction in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, **58**: 130-137.
- [2] Dhakal S. Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications [J]. *Energy Policy*, 2009, **37** (11): 4208-4219.
- [3] Wen L, Shao H Y. Influencing factors of the carbon dioxide emissions in China's commercial department: a non-parametric additive regression model [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **668**: 1-12.
- [4] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴-2021 [R]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [5] 国务院新闻办公室. 国新办举行“十三五”生态环境保护工作新闻发布会 [EB/OL]. <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/xwfbh/wqfbh/42311/44005/index.htm>, 2020-10-21.
- [6] 中华人民共和国中央人民政府. 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议 [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/2020-11/03/content_5556991.htm, 2020-11-03.
- [7] 国务院. 国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知 [EB/OL]. http://www.gov.cn/zwqk/2013-09/12/content_2486773.htm, 2013-09-10.
- [8] Cai S Y, Wang Y J, Zhao B, *et al.* The impact of the “Air Pollution Prevention and Control Action Plan” on PM_{2.5} concentrations in Jing-Jin-Ji region during 2012-2020 [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**: 197-209.
- [9] Zhang Q, Zheng Y X, Tong D, *et al.* Drivers of improved PM_{2.5} air quality in China from 2013 to 2017 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(49): 24463-24469.
- [10] 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*, 2019, **1**, doi: 10.1016/j.rcrx.2019.100006.
- [11] 国务院. 国务院关于印发打赢蓝天保卫战三年行动计划的通知 [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-07/03/content_5303158.htm, 2018-06-27.
- [12] Zeng A, Mao X Q, Hu T, *et al.* Regional co-control plan for local air pollutants and CO₂ reduction: method and practice [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **140**: 1226-1235.
- [13] 中华人民共和国生态环境部. 福建出台“十四五”生态环境保护专项规划 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/ywdt/dfnews/202111/t20211125_961683.shtml, 2021-11-25.
- [14] Mittal S, Hanaoka T, Shukla P R, *et al.* Air pollution co-benefits of low carbon policies in road transport: a sub-national assessment for India [J]. *Environmental Research Letters*, 2015, **10**(8), doi: 10.1088/1748-9326/10/8/085006.
- [15] Peng W, Yuan J H, Zhao Y, *et al.* Air quality and climate benefits of long-distance electricity transmission in China [J]. *Environmental Research Letters*, 2017, **12**(6), doi: 10.1088/1748-9326/aa67ba.
- [16] Li N, Chen W Y, Rafaj P, *et al.* Air quality improvement co-benefits of low-carbon pathways toward well below the 2°C climate target in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(10): 5576-5584.
- [17] 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.
- [18] 闫文琪, 高丽洁, 任纪佼, 等. CDM项目大气污染物减排的协同效应研究 [J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(9): 1697-1704.
- [19] Yan W Q, Gao L J, Ren J J, *et al.* Air pollutant reduction co-benefits of CDM in China [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(9): 1697-1704.
- [20] 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.
- [20] 周颖, 张宏伟, 蔡博峰, 等. 水泥行业常规污染物和二氧化碳协同减排研究 [J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(12): 164-168, 180.
- [20] Zhou Y, Zhang H W, Cai B F, *et al.* Synergetic reduction of local pollutants and CO₂ from cement industry [J].

- Environmental Science & Technology, 2013, **36**(12): 164-168, 180.
- [21] Feng Y Y, Ning M, Lei Y, *et al.* Defending blue sky in China: effectiveness of the “Air Pollution Prevention and Control Action Plan” on air quality improvements from 2013 to 2017 [J]. Journal of Environmental Management, 2019, **252**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109603.
- [22] Amann M, Bertok I, Borken-Kleefeld J, *et al.* Cost-effective control of air quality and greenhouse gases in Europe: modeling and policy applications [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, **26**(12): 1489-1501.
- [23] 张强. 区域动态高时空分辨率大气污染源排放清单[R]. 北京: 大气重污染成因与治理攻关项目管理办公室, 2019.
- [24] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴-2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [25] 北京市统计局, 国家统计局北京调查总队. 北京统计年鉴-2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [26] 天津市统计局, 国家统计局天津调查总队. 天津统计年鉴-2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [27] 河北省人民政府. 河北经济年鉴-2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [28] 河南省统计局, 国家统计局河南调查总队. 河南统计年鉴-2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [29] 山东省统计局, 国家统计局山东调查总队. 山东统计年鉴-2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [30] 陕西省统计局, 国家统计局陕西调查总队. 陕西统计年鉴-2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [31] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴-2018[R]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [32] 中国交通年鉴编辑部. 中国交通年鉴-2018[R]. 北京: 中国交通年鉴社, 2018.
- [33] 李慧, 王淑兰, 张文杰, 等. 京津冀及周边地区“2+26”城市空气质量特征及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(1): 172-184.
- Li H, Wang S L, Zhang W J, *et al.* Characteristics and influencing factors of urban air quality in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas (‘2+26’ Cities) [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(1): 172-184.
- [34] IEA. World Energy Outlook 2018 [R]. Paris: International Energy Agency, 2018.
- [35] 环境保护部. 环境保护部关于印发《国家环境保护标准“十二五”发展规划》的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2013/content_2421036.htm, 2013-02-17.
- [36] Zhi G R, Peng C H, Chen Y J, *et al.* Deployment of coal briquettes and improved stoves: possibly an option for both environment and climate [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(15): 5586-5591.
- [37] Rive N, Aunan K. Quantifying the air quality cobenefits of the clean development mechanism in China [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(11): 4368-4375.
- [38] 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.
- [39] Ding D, Xing J, Wang S X, *et al.* Estimated contributions of emissions controls, meteorological factors, population growth, and changes in baseline mortality to reductions in ambient PM_{2.5} and PM_{2.5}-related mortality in China, 2013-2017 [J]. Environmental Health Perspectives, 2019, **127**(6), doi: 10.1289/EHP4157.
- [40] Zhang N N, Bai Z H, Winiwarter W, *et al.* Reducing ammonia emissions from dairy cattle production via cost-effective manure management techniques in China [J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(20): 11840-11848.
- [41] Zhao B, Zheng H T, Wang S X, *et al.* Change in household fuels dominates the decrease in PM_{2.5} exposure and premature mortality in China in 2005-2015 [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, **115**(49): 12401-12406.
- [42] Meng W J, Zhong Q R, Chen Y L, *et al.* Energy and air pollution benefits of household fuel policies in northern China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, **116**(34): 16773-16780.
- [43] Zheng B, Tong D, Li M, *et al.* Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(19): 14095-14111.
- [44] Jiang P, Khishgee S, Alimujiang A, *et al.* Cost-effective approaches for reducing carbon and air pollution emissions in the power industry in China [J]. Journal of Environmental Management, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110452.
- [45] Zhao Z Q, Bai Z H, Winiwarter W, *et al.* Mitigating ammonia emission from agriculture reduces PM_{2.5} pollution in the Hai River Basin in China [J]. Science of the Total Environment, 2017, **609**: 1152-1160.
- [46] 国家统计局. 国家数据[EB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=E0103>, 2022-02-17.
- [47] Feng X Z, Lugovoy O, Qin H. Co-controlling CO₂ and NO_x emission in China's cement industry: an optimal development pathway study [J]. Advances in Climate Change Research, 2018, **9**(1): 34-42.
- [48] 中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告工作组. 中国碳中和与清洁空气协同路径2021[R]. 北京: 中国清洁空气政策伙伴关系, 2021.
- [49] Xing J, Wang S X, Chatani S, *et al.* Projections of air pollutant emissions and its impacts on regional air quality in China in 2020 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(7): 3119-3136.
- [50] Cheng L, Ye Z L, Cheng S Y, *et al.* Agricultural ammonia emissions and its impact on PM_{2.5} concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2018 [J]. Environmental Pollution, 2021, **291**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118162.

CONTENTS

Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management	WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)
Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment	WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)
Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters	YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)
Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring	LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)
Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water	BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)
Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University	 HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858)
Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review	 LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)
Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils	WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)
Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China	SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)
Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China	CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020	LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)
Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary	CHENG Hong, CHEN Rong (4924)
Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach	YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)
Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay	QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)
Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province	 YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)
Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen	PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)
Adsorption of Mn ²⁺ by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters	ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)
Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS	XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)
Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes	XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)
Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019	FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)
Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley	 CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)
Difference in PM _{2.5} Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas	QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)
Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing	FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)
Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China	SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)
Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed	CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)
Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season	 LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)
Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau	LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)
Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope	 ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)
Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir	HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)
Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation	WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)
Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems	 ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)
Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions	 DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)
Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis	 TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis	 LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)
Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China	 SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)
Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N ₂ O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions	TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis	LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)
Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model	 GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)
Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS	ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)
Effect of Aging on Stabilization of Cd ²⁺ Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area	WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)
Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils	 LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)
Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil	ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)
Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L.	SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing	FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios	 HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)
Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)
Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity	CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)
Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes	SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)
Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction	 LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)
Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China	HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)
Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2 + 26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings	 YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)
Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China	LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)