

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM _{2.5} 减排效果评估	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的影响	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM _{2.5} 和 O ₃ _{8h} 污染的健康效益评价	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II)和 Ni(II)的去除性能及机制	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩娟, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生季草地土壤细菌群落结构的垂向差异	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N ₂ O 排放及其功能基因的影响	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM _{2.5} 中重金属含量表征及健康风险	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例	高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌区土壤-小麦重金属健康风险评估	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)	

天津市“十三五”期间 $\text{PM}_{2.5}$ 减排效果评估

肖致美¹, 徐虹¹, 蔡子颖^{2*}, 张裕芬³, 刘茂辉¹, 孙猛¹, 李鹏¹, 杨宁¹, 戢运峰^{1*}

(1. 天津市生态环境监测中心, 天津 300191; 2. 天津市环境气象中心, 天津 300074; 3. 南开大学环境科学与工程学院, 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)

摘要: 为了解“十三五”期间天津市 $\text{PM}_{2.5}$ 减排效果, 基于 2015~2020 年不同大气污染治理措施的减排量核算结果, 利用空气质量模型和高时空分辨率 $\text{PM}_{2.5}$ 监测数据, 对“十三五”期间天津市 $\text{PM}_{2.5}$ 减排效果进行分析。结果表明, 2015~2020 年, 天津市 SO_2 、 NO_x 、VOCs 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放量分别减少 4.77×10^4 、 6.20×10^4 、 5.37×10^4 和 $3.53 \times 10^4 \text{ t}$, 其中工艺过程、散煤和电力治理对 SO_2 的减排贡献大, 工艺过程、电力和钢铁治理对 NO_x 的减排贡献大, 工艺过程对 VOCs 的减排贡献最大, 工艺过程、散煤和钢铁治理对 $\text{PM}_{2.5}$ 的减排贡献大。“十三五”期间天津市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值、污染天数和重污染天数明显下降, 分别较 2015 年下降 31.4%、51.2% 和 60.0%; 与前期 (2015~2017 年) 相比, 后期 (2018~2020 年) 天津市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值和污染天数下降幅度减缓, 重污染天数基本保持在 10 d 左右。数值模拟结果表明, 2015~2020 年天津市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降贡献中, 气象因素占 1/3, 减排措施影响占 2/3。其中工艺过程减排使 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 降低 $2.66 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度改善贡献率为 18.3%; 散煤清零措施使 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 降低 $2.18 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度改善贡献率为 15.0%; 钢铁行业减排使 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 降低 $1.70 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度改善贡献率为 11.7%; 电力行业减排使 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 降低 $0.51 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度改善贡献率为 3.5%。为促进“十四五”期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的持续改善, 在煤炭消费总量控制和“双碳”目标的约束下, 天津应继续开展煤炭结构的优化调整, 推进煤炭消费进一步向治污水平先进的电力行业集中; 同时要进一步提升工业污染源全过程的排放绩效水平, 以环境容量为约束, 设计产业优化调整和转型升级的技术路线, 优化配置环境容量资源, 提出有限环境容量下的重点行业有序发展模式, 引导企业清洁化提升改造、转型升级和绿色发展。

关键词: 天津; “十三五”期间; 污染源排放; $\text{PM}_{2.5}$; 减排效果评估

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3054-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202208166

Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on $\text{PM}_{2.5}$ Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin

XIAO Zhi-mei¹, XU Hong¹, CAI Zi-ying^{2*}, ZHANG Yu-fen³, LIU Mao-hui¹, SUN Meng¹, LI Peng¹, YANG Ning¹, JI Yun-feng^{1*}

(1. Tianjin Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin 300191, China; 2. Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074, China; 3. 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)

Abstract: The emission reduction effect of major air pollution control measures on $\text{PM}_{2.5}$ concentrations was assessed using air quality simulations based on the calculation data of emission reductions from different air pollution control measures and the high spatiotemporal resolution online monitoring data of $\text{PM}_{2.5}$ during the 13th Five-Year Period in Tianjin. The results showed that the total emission reductions of SO_2 , NO_x , VOCs, and $\text{PM}_{2.5}$ from 2015 to 2020 were 4.77×10^4 , 6.20×10^4 , 5.37×10^4 , and $3.53 \times 10^4 \text{ t}$, respectively. SO_2 emission reduction was mainly due to the prevention of process pollution, loose coal combustion, and thermal power. NO_x emission reduction was mainly due to the prevention of process pollution, thermal power, and steel industry. VOCs emission reduction was mainly due to prevention of process pollution. $\text{PM}_{2.5}$ emission reduction was mainly due to the prevention of process pollution, loose coal combustion, and the steel industry. The concentrations, pollution days, and heavy pollution days of $\text{PM}_{2.5}$ decreased significantly from 2015 to 2020 by 31.4%, 51.2%, and 60.0% compared to those in 2015, respectively. The concentrations and pollution days of $\text{PM}_{2.5}$ decreased slowly in the later stage (from 2018 to 2020) as compared with those in the early stage (from 2015 to 2017), and the days of heavy pollution remained for approximately 10 days. The results of air quality simulations showed that meteorological conditions contributed one-third to the reduction in $\text{PM}_{2.5}$ concentrations, and the emission reductions of major air pollution control measures contributed two-thirds to the reduction in $\text{PM}_{2.5}$ concentrations. For all air pollution control measures from 2015 to 2020, $\text{PM}_{2.5}$ concentrations were reduced by the prevention of process pollution, loose coal combustion, the steel industry, and thermal power by 2.66, 2.18, 1.70, and $0.51 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively, accounting for 18.3%, 15.0%, 11.7%, and 3.5% of $\text{PM}_{2.5}$ concentration reductions. In order to promote the continuous improvement in $\text{PM}_{2.5}$ concentrations during the 14th Five-Year Plan period, under the total coal consumption control and the goal of “peaking carbon dioxide emissions and achieving carbon neutrality,” Tianjin should continue to optimize and adjust the coal structure and further promote the coal consumption to the power industry with an advanced pollution control level. At the same time, it is necessary to further improve the emission performance of industrial sources in the whole process, taking environmental capacity as the constraint; design the technical route for industrial optimization, adjustment, transformation, and upgrading; and optimize the allocation of environmental capacity resources. Additionally, the orderly development model for key industries with limited environmental capacity should be proposed, and clean upgrading, transformation, and green development should be guided for enterprises.

收稿日期: 2022-08-18; 修订日期: 2022-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42177465); 天津市科技计划项目 (21YFNSN00200); 中国工程院院地合作项目 (2020C0-0002)

作者简介: 肖致美 (1972~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为大气污染防治, E-mail: xiaozhimei01@163.com

* 通信作者, E-mail: 120078030@163.com; yf_2100@163.com

Key words: Tianjin; 13th Five-Year Period; pollution source emission; $\text{PM}_{2.5}$; emission reduction effect assessment

随着《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》深入实施,“十三五”期间,我国城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值持续下降,以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的超标天数和重污染的天数明显减少^[1]. 2020 年,长三角区域 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[1],首次达到《环境空气质量标准》(GB3095-2012)二级标准限值,大气污染较重的京津冀地区(13 个地级以上城市) $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值为 $44 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[2~4],较 2015 年($77 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)下降 42.9%. 从 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上看,2020 年京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值是《环境空气质量标准》(GB3095-2012)二级标准限值的 1.26 倍,科学高效地开展 $\text{PM}_{2.5}$ 污染控制,依然是“十四五”期间京津冀区域环境空气质量改善面临的主要任务之一.

随着 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的持续下降, $\text{PM}_{2.5}$ 改善空间将进一步缩小,如何科学高效开展“十四五”期间 $\text{PM}_{2.5}$ 污染控制,制定精准的减排措施,亟需对现行的各项防治措施减排效果开展评估. 目前减排效果评估的方法主要有 3 种:基于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度监测的评估方法^[5,6]、基于受体模型的 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析评估方法^[7~9]和基于源模型的减排情景分析评估方法^[10~12]. 基于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度监测评估法可直接通过浓度变化定性评估控制措施的环境效益,但仅能得出所有控制措施的综合效果;基于受体模型的 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析方法可通过 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分和主要污染源类贡献的变化定量评估减排措施的有效性,但不能满足污染源复杂地区多类措施精细化评估的要求;基于源模型的减排情景分析评估法可以通过污染源排放的变化定量评估不同措施的减排效果,在短期重大活动期间如 APEC 会议^[13~16]、“9.3”阅兵^[17~20]、青奥会^[21,22]和“G20”峰会^[23,24],重污染应急减排^[25~31]以及短期^[32~34]和长期大气污染防治措施的评估^[35~38]上均得到应用.

天津市位于京津冀区域的中北部,是典型工业和港口城市,石油、化工和装备制造等工业发达,拥有国家级石油化工基地,同时机动车保有量高、港口吞吐量,是京津冀区域大气污染较重的城市之一^[1]. “十三五”期间天津市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 由 2015 年的 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至 2020 年的 $48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[2],但 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度依然远高于国家二级标准限值,近年来天津市关于 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究主要集中在污染特征、变化趋势与来源解析^[7~9,39~41],缺少 $\text{PM}_{2.5}$ 减排效果评估,本研究在“十三五”期间环境 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化基础上,定量评估各项减排措施效果,以期为“十四五”期间 $\text{PM}_{2.5}$ 精细化管控提供科学依据,同时也为京津冀区

域精细化评估与管控提供借鉴.

1 材料与方法

1.1 采样及分析方法

$\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_2 浓度数据均来源于天津市环境空气质量监测网络国控评价点,监测点位分布见图 1. 采用美国 Thermo 公司 TEOM 1405F 监测 $\text{PM}_{2.5}$,每月更换采样滤膜,对采样流量进行校准;每季度进行压力传感器和温度传感器校验;每半年进行比例系数(K0)校验,质量控制均严格按照《环境空气颗粒物(PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$)连续自动监测系统运行和质控技术规范》(HJ 817-2018)要求进行. 美国 Thermo 43i 监测 SO_2 ,Thermo 42i 监测 NO_2 , SO_2 和 NO_2 监测仪器每天进行自动校准,质量控制均严格按照《环境空气气态污染物(SO_2 、 NO_2 、 O_3 和 CO)连续自动监测系统运行和质控技术规范》(HJ 818-2018)要求进行.

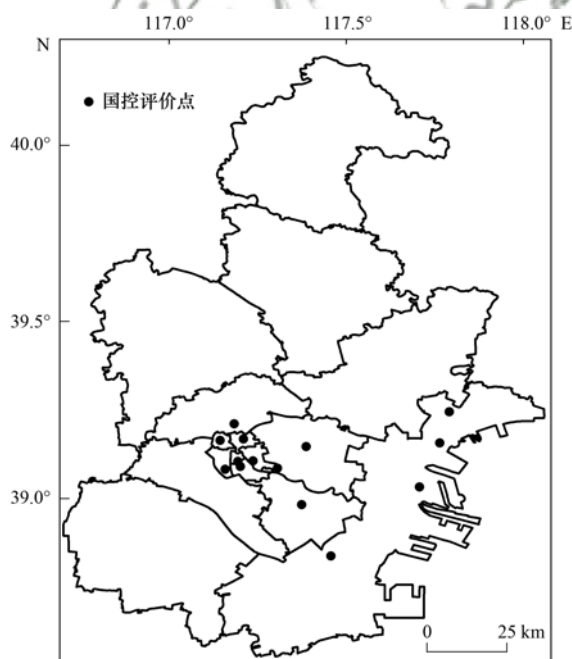


图 1 监测点位分布示意

Fig. 1 Location of the sampling station

1.2 研究方法

1.2.1 排放源清单的建立

根据天津市污染源排放情况,结合天津市大气污染防治措施,大气污染排放涉及的污染源主要包括电力锅炉、供暖锅炉、民用散煤、工艺过程源、移动源和扬尘源共 6 个主要类别 6 种污染物(SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 CO 和 VOCs)的排放量. 各项污染物的排放因子依据城市大气污染物排放清单编制技术手册^[42],其计算方法如下:

$$E = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_{i,j} EF_{i,j} (1 - \eta_{i,j}) \quad (1)$$

式中, E 为排放量; A 为污染源活动水平, 如化石燃料使用量、有机溶剂使用量、产品产量等; EF 为不同污染源不同污染物的排放因子; η 为废气治理设施的污染物去除效率; i 和 j 分别为不同污染物和不同污染源; m 和 n 分别为污染物和污染源的数量。

以 2015 年为基准年, 基于基准年活动水平以及历年统计年鉴、大气污染防治措施和环境统计结合实地走访调研梳理完成 2016~2020 年活动水平数据。

1.2.2 评估模型及模拟情景设置

采用 WRF/Chem 模式开展减排效果评估, 该模式是由 NCAR 和 NOAA 联合一些大学和研发机构开发的中尺度在线大气化学模式, 考虑了大气污染的化学过程、平流输送、湍流扩散和干湿沉降过程, 在全球空气质量预报和模拟中有广泛的运用。模式版本为 WRF/Chem3.9.1 版本^[43~45], 气相化学过程采用 CBMZ 机制, 气溶胶过程采用 MOSAIC 模型。主要物理过程设置如下: 积云对流方案采用 grell-3D, 微物理过程采用 WSM5, 边界层方案使用 YSU,

长波辐射方案和短波辐射方案采用 RRTMG, 考虑气溶胶直接辐射反馈。模式水平分辨率 15 km, 水平网格 121 × 121, 中心经纬度为 39°N、117°E, 垂直方向分为 41 层。模拟时间为 2020 年的 1、4、6 和 11 月, 分别代表冬、春、夏和秋季, 模拟采用 24 h 滚动计算, 每 24 h 重新使用一次 FNL 气象初始场, 污染初始场为上一次的模拟值。

天津以外排放源选用清华大学 MEIC 清单 (<http://meicmodel.org>), 包括逐月工业、农业、交通、生活和电力行业 BC、OC、SO₂、NO_x、CO、PM_{2.5}、PM₁₀、NH₃ 和 VOC 排放量, 分辨率 0.25° × 0.25°; 天津排放源采用 1.2.1 节建立的清单, 清单分辨率为 1 km × 1 km, 除了工业、农业、交通、生活和电力行业外, 还细分为电力、钢铁、工艺过程、散煤、扬尘和道路移动源。以 2020 年排放 (MEIC2020 污染源排放清单, 天津 2020 年污染源排放清单) 为基准情景进行模拟, PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 模拟值与实测值相关系数分别为 0.83、0.59、0.72 和 0.82 (图 2), 可较好地模拟和反映天津空气质量变化趋势。

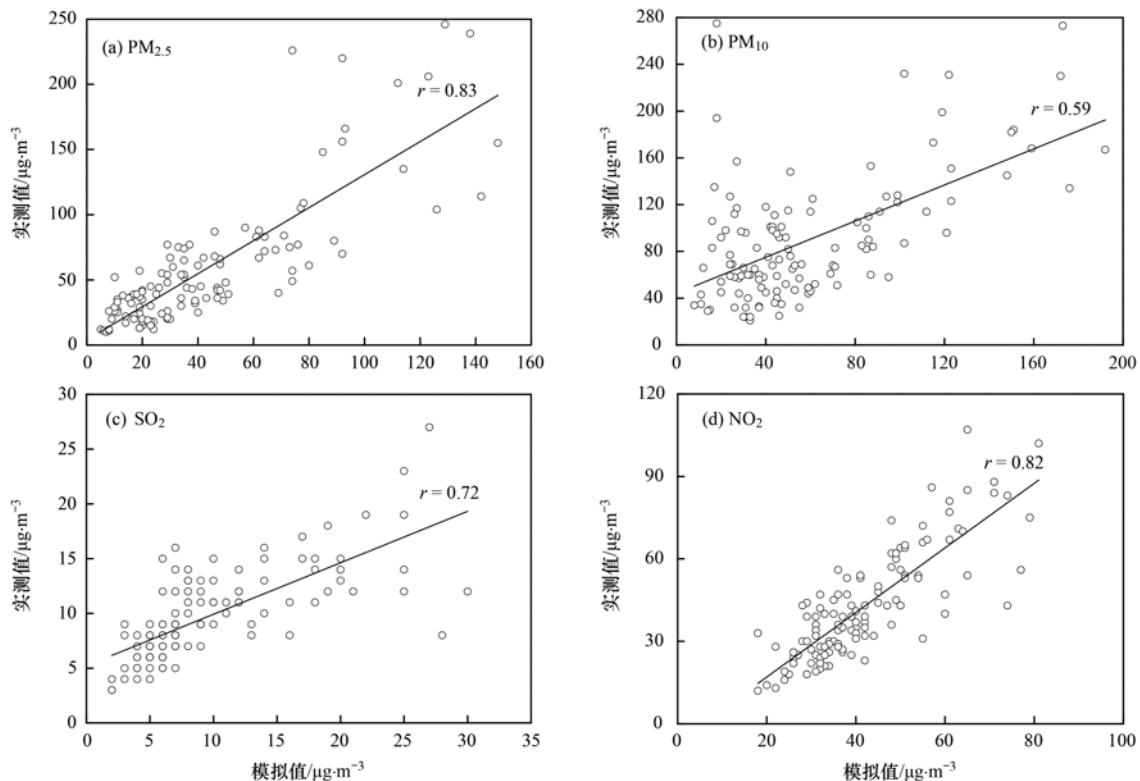


图 2 2020 年天津市主要污染物模拟值与实测值的相关系数

Fig. 2 Correlation coefficient of measured and simulated data of main pollutants in 2020 in Tianjin

2 结果与讨论

2.1 “十三五”期间大气污染源排放状况

2015~2020 年, 天津市大气污染防治主要针对电力、工业、交通、燃煤和扬尘等污染排放, 主要防

治措施有煤电机组改燃或关停或超低排放改造; 燃煤锅炉改燃或关停或提标改造、散乱污企业整顿、关停淘汰落后污染企业、企业废气处理设施提升改造和 VOCs 泄漏检测与修复; 淘汰黄标车和老旧车和 提高机动车排放标准, 投运清洁能源机动车, 安装

港口岸电箱;散煤清洁化利用、改电改气和集中供热;提高道路机扫率和水洗率、工地扬尘整治、裸露地面和堆场的治理等.从主要的污染源类别排放量变化上看(图3),2015~2020年,天津市 SO₂、NO_x、VOCs 和 PM_{2.5}的排放量分别减少 4.77 × 10⁴、6.20 × 10⁴、5.37 × 10⁴ 和 3.53 × 10⁴ t.

从主要行业减排量上看,电力、钢铁、工艺过程和散煤等防治措施使 SO₂ 分别减少 0.53 × 10⁴、0.29 × 10⁴、2.88 × 10⁴ 和 1.06 × 10⁴ t,分别占 SO₂ 减排总量的 11.1%、6.1%、60.4% 和 22.2%;电力、钢铁、工艺过程和散煤等防治措施使 NO_x 分别减少 1.27 × 10⁴、0.94 × 10⁴、3.19 × 10⁴ 和 0.16 × 10⁴ t,分别占 NO_x 减排总量的 20.5%、15.2%、51.5% 和 2.6%;电力、钢铁、工艺过程、散煤和机动车等防治措施使 VOCs 分别减少 0.14 × 10⁴、0.44 × 10⁴、3.46 × 10⁴、0.52 × 10⁴ 和 0.22 × 10⁴ t,分别占 VOCs 减排总量的 2.6%、8.2%、64.4%、9.7% 和 4.1%;电力、钢铁、工艺过程、散煤和机动车和扬尘等防治措施使 PM_{2.5} 分别减少 0.29 × 10⁴、0.80 × 10⁴、1.03 × 10⁴、0.96 × 10⁴、0.07 × 10⁴ 和 0.29 × 10⁴ t,分别占 PM_{2.5} 减排总量的 8.2%、22.7%、29.2%、27.2%、2.0% 和 8.2%.主要行业减排量的构成表明:工艺过程、散煤和电力治理对 SO₂ 的减排贡献大,工艺过程、电力和钢铁治理对 NO_x 的减排贡献大,工艺过程对 VOCs 的减排贡献最大,工艺过程、散煤和钢铁治理对 PM_{2.5} 的减排贡献大.

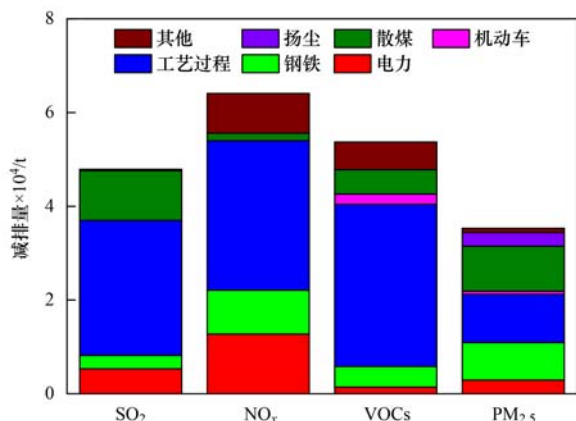


图3 2015~2020年天津市主要污染物减排量

Fig. 3 Emission reductions of main pollutants from 2015 to 2020 in Tianjin

2.2 “十三五”期间天津市 PM_{2.5}污染状况

2015~2020年,天津市 PM_{2.5}污染状况明显改善(图4), $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值由2015年的 70 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至2020年的 48 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,下降 31.4%; PM_{2.5}污染天数由2015年的 123 d 降至2020年的 60 d,下降

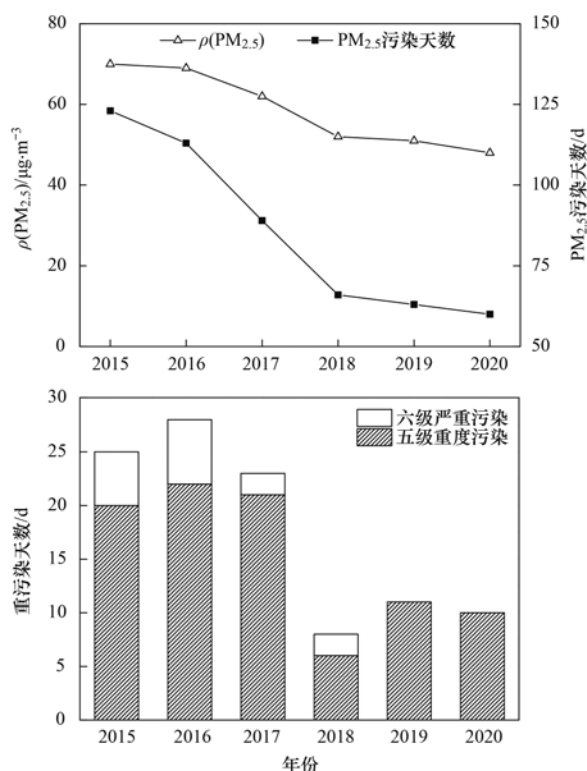


图4 “十三五”期间天津市 PM_{2.5}污染状况

Fig. 4 Pollution of PM_{2.5} during 13th Five-Year Period in Tianjin

51.2%; PM_{2.5}重污染天数也明显降低,由2015年的 25 d 降至2020年的 10 d,下降 60.0%,其中2019~2020年消除了 PM_{2.5}六级严重污染天气。“十三五”期间,与 PM_{2.5}污染相关的气态前体物 SO₂ 和 NO₂ 浓度平均值均明显下降(图5), $\rho(\text{SO}_2)$ 平均值由2015年的 29 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至2020年的 8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,下降 72.4%; $\rho(\text{NO}_2)$ 平均值由2015年的 42 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至2020年的 39 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,下降 7.1%。从总体变化趋势上看,前期(2015~2017)天津市 NO₂ 浓度平均值略升,后期(2018~2020年)NO₂ 浓度平均值呈现下降趋势;与前期

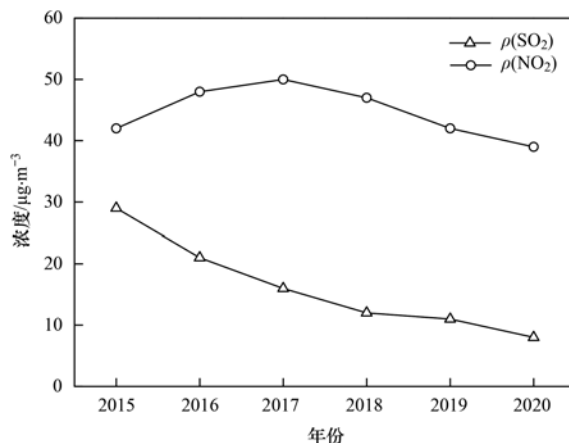


图5 “十三五”期间天津市 SO₂ 和 NO₂ 浓度变化

Fig. 5 Concentrations of SO₂ and NO₂ during 13th Five-Year Period in Tianjin

相比,后期天津市 SO_2 浓度平均值、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值和污染天数下降幅度减缓, $\text{PM}_{2.5}$ 重污染天数基本保持在 10 d 左右.

2.3 $\text{PM}_{2.5}$ 减排效果评估

2.3.1 气象对 $\text{PM}_{2.5}$ 减排效果影响

以 2020 年污染源排放清单为基准,在排放源不变的条件下,模拟分析气象条件对天津市 $\text{PM}_{2.5}$ 减排的贡献(图 6). 结果表明:2015 年和 2020 年模拟的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为 $47.50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $42.43 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,

2020 年较 2015 年下降 10.7%,这与蔡子颖等^[46]研究的结果相似. 说明 2015~2020 年气象条件促进了 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度改善,对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的改善贡献率为 10.7% ($7.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),实测 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 2020 年较 2015 年下降 31.4%,扣除气象条件的影响,2015~2020 年减排措施使 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降 20.7% ($14.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 2015~2020 年期间天津市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降贡献率中,气象因素影响约占 1/3,减排措施影响约占 2/3.

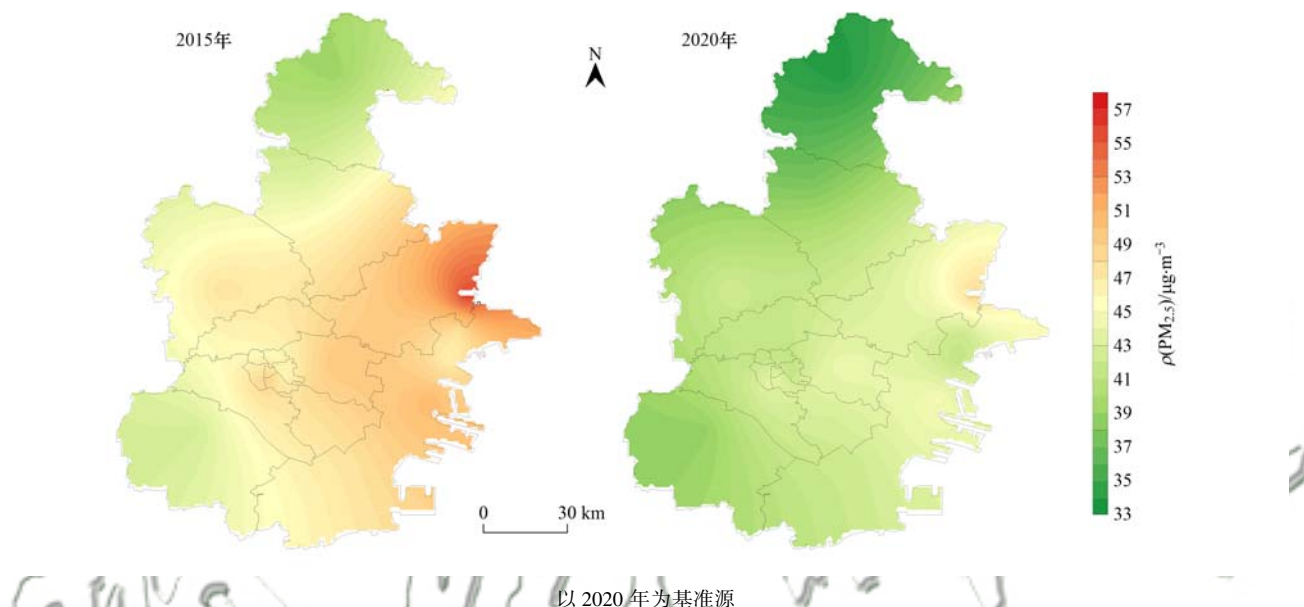


图 6 天津市 2015 年和 2020 年模拟的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布

Fig. 6 Simulated $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in Tianjin for 2015 and 2020

2.3.2 主要减排措施对 $\text{PM}_{2.5}$ 改善效果评估

为进一步分析不同减排措施对天津空气质量的影响,分别选取电力、钢铁、工艺过程控制和散煤清零等主要防治措施,设计排放情景(表 1),模拟评估主要减排措施的 $\text{PM}_{2.5}$ 改善效果,模拟结果表明(表 2),主要减排措施中,工艺过程减排使 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 降低 $2.66 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度改善贡献率为 18.3%;散煤清零措施使 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 降低 $2.18 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度改善贡献率为 15.0%;钢铁行业减排使 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 降低 $1.70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度改善贡献率为 11.7%;电力行业减排使

$\rho(\text{PM}_{2.5})$ 降低 $0.51 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度改善贡献率为 3.5%. 从对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度改善效果上看,工艺过程减排效果最明显,其次是散煤清零和钢铁行业减排,电力行业减排效果最小.

2015~2020 期间,天津市工艺过程排放的控制主要包括关停淘汰落后企业 221 家、整治“散乱污”企业 18 635 家和撤销取缔 13 个工业园区(集聚区),深度治理 452 家挥发性有机物重点排放企业和综合治理 382 家 VOCs 排放工业企业,改燃关停燃煤锅炉 11 568 台,实施重点工业企业脱硫和脱硝治理,对 25 个重点行业全面执行大气污染物特别排放限值

表 1 不同排放情景设计方案

Table 1 Design of different emission scenarios in Tianjin

情景方案	天津排放源	天津以外排放清单	目的
基础情景	2020 年排放清单	MEIC2020	天津空气质量
情景 1	2020 年排放清单,电力为 2015 年清单	MEIC2020	电力减排的影响
情景 2	2020 年排放清单,钢铁行业为 2015 年清单	MEIC2020	钢铁行业减排影响
情景 3	2020 年排放清单,工艺过程为 2015 年清单	MEIC2020	工艺过程减排的影响
情景 4	2020 年排放清单,散煤为 2015 年清单	MEIC2020	散煤清零的影响

表 2 不同减排措施对 PM_{2.5} 的改善效果¹⁾
Table 2 Emission reduction effect of different air pollution control measures on PM_{2.5}

情景方案	$\rho(\text{PM}_{2.5})$ 模拟值 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	改善效果 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	PM _{2.5} 改善贡献率 /%
基础情景	42.43	—	—
情景 1	42.94	0.51	3.5
情景 2	44.13	1.70	11.7
情景 3	45.09	2.66	18.3
情景 4	44.61	2.18	15.0

1) 2015~2020 年减排措施使 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 下降 14.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

等, PM_{2.5} 化学组分中与工艺过程排放相关的 NO₃⁻、NH₄⁺ 和 Cl⁻ 等离子浓度在“十三五”期间均呈现下降趋势^[8], 工艺过程治理措施使 PM_{2.5} 的排放量减少 1.03 × 10⁴ t, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 降低 2.66 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 对 PM_{2.5} 浓度改善贡献率为 18.3%。散煤治理主要包括居民供暖煤改电和煤改燃, 农村居民散煤清洁能源替代等, 2020 年底天津市实现散煤全部清零, “十三五”期间, PM_{2.5} 化学组分中与燃煤排放相关的 SO₄²⁻、OC 和 EC 浓度及在 PM_{2.5} 中占比均呈现下降趋势^[8], 环境空气中 SO₂ 浓度下降 72.4%, 散煤治理措施使 PM_{2.5} 的排放量减少 0.96 × 10⁴ t, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 降低 2.18 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 对 PM_{2.5} 浓度改善贡献率为 15.0%。钢铁行业排放控制主要包括荣程钢铁和天钢联合特钢钢铁企业的烧结重点工序超低排放改造, 天钢集团和钢管集团钢铁企业的转炉和电炉除尘治理改造, 2020 年 9 月底关停天津市天重江天重工有限公司、天津冶金集团轧三钢铁有限公司和天津天丰钢铁有限公司等, 钢铁行业排放控制使 PM_{2.5} 的排放量减少 0.80 × 10⁴ t, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 降低 1.70 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 对 PM_{2.5} 浓度改善贡献率为 11.7%。电力行业排放控制措施主要包括关停陈塘热电厂、煤电机组清洁化改造、自备电站煤电机组超低排放改造和公共煤电机组冷凝脱水深度治理等, 电力减排措施使 PM_{2.5} 的排放量减少 0.29 × 10⁴ t, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 降低 0.51 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 对 PM_{2.5} 浓度改善贡献率为 3.5%。

2.4 PM_{2.5} 污染改善的启示

“十三五”期间, 天津市聚焦影响环境空气质量的关键问题, 持续调整产业结构、能源结构和运输结构, 完成“散乱污”企业的集中整治, 开展工业集聚区的提升改造, 破解“钢铁围城”和“园区围城”, 完成煤电机组的清洁化改造, 钢铁等重点行业稳定达到特别排放限值, 提高大宗货物铁路运输比例, 不断提高大气污染防治的科学化和精细化水平。全市第二产业比重由 2015 年的 41.3% 下降至 2020 年的 31.4%^[47], 煤炭消费总量从 2015 年的 4 538.83 ×

10⁴ t 降至 2020 年 3 745.28 × 10⁴ t^[47], 燃煤结构得到明显优化, 电煤占总燃煤比例显著提高。从 PM_{2.5} 减排效果上看, 电力行业燃烧效率高, 治污水平先进, 对环境 PM_{2.5} 浓度的贡献较小, 而以面源排放为主的工艺过程和散煤对环境 PM_{2.5} 浓度的影响较大, 减排措施的环境效果更明显。“十四五”期间, 随着污染治理的不断深入、治理难度会越来越大, 提高能源利用效率和优化燃煤结构是能源结构调整的重要方向, 在煤炭消费总量控制和“双碳”目标的约束下, 要继续开展煤炭结构的优化调整, 推进煤炭消费进一步向治污水平先进的电力行业集中; 另一方面, 要进一步提升工业污染源全过程的排放绩效水平, 在充分考虑行业内部不同企业之间工艺水平、管理水平和污染治理水平等因素的前提下, 以环境容量为约束, 设计产业优化调整和转型升级的技术路线, 优化配置环境容量资源, 提出有限环境容量下的重点行业有序发展模式, 引导企业清洁化提升改造、转型升级和绿色发展, 促进“十四五”期间 PM_{2.5} 浓度的持续改善。

3 结论

(1) 2015~2020 年, 天津市 SO₂、NO_x、VOCs 和 PM_{2.5} 的排放量分别减少 4.77 × 10⁴、6.20 × 10⁴、5.37 × 10⁴ 和 3.53 × 10⁴ t。从主要行业减排量的构成上看, 工艺过程、散煤和电力治理对 SO₂ 的减排贡献大, 工艺过程、电力和钢铁治理对 NO_x 的减排贡献大, 工艺过程对 VOCs 的减排贡献最大, 工艺过程、散煤和钢铁治理对 PM_{2.5} 的减排贡献大。

(2) 2015~2020 年, 天津市 PM_{2.5} 污染状况明显改善, PM_{2.5} 平均值、PM_{2.5} 污染天数和 PM_{2.5} 重污染天数分别下降 31.4%、51.2% 和 60.0%; 与 PM_{2.5} 污染相关的气态前体物 SO₂ 和 NO₂ 浓度平均值分别下降 72.4% 和 7.1%。与前期相比, 后期天津市 SO₂ 浓度平均值、PM_{2.5} 浓度平均值和 PM_{2.5} 污染天数下降幅度减缓。

(3) 数值模拟表明, 2015~2020 年期间天津市 PM_{2.5} 浓度下降贡献中, 气象因素影响约占 1/3, 减排措施影响约占 2/3。主要减排措施中, 工艺过程减排使 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 降低 2.66 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 对 PM_{2.5} 浓度改善贡献率为 18.3%; 散煤清零措施使 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 降低 2.18 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 对 PM_{2.5} 浓度改善贡献率为 15.0%; 钢铁行业减排使 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 降低 1.70 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 对 PM_{2.5} 浓度改善贡献率为 11.7%; 电力行业减排使 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 降低 0.51 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 对 PM_{2.5} 浓度改善贡献率为 3.5%。

(4)为促进“十四五”期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的持续改善,在煤炭消费总量控制和“双碳”目标的约束下,天津应继续开展煤炭结构的优化调整,推进煤炭消费进一步向治污水平先进的电力行业集中;同时要进一步提升工业污染源全过程的排放绩效水平,以环境容量为约束,设计产业优化调整和转型升级的技术路线,优化配置环境容量资源,提出有限环境容量下的重点行业有序发展模式,引导企业清洁化提升改造、转型升级和绿色发展。

参考文献:

- [1] 中国环境监测总站. 2013-2016 中国环境状况公报, 2017-2020 年中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.cnemc.cn/jcbg/zghjzkgb/>, 2022-08-30.
- [2] 天津市生态环境局. 2015 年天津市环境状况公报, 2020 年天津市生态环境状况公报 [EB/OL]. <http://sthj.tj.gov.cn/YWGZ7406/HJZL9827/HJZKGB866/TJSLNHJZKGB6653/>, 2022-08-30.
- [3] 北京市生态环境局. 2015 年北京市环境状况公报, 2020 年北京市生态环境状况公报 [EB/OL]. <http://sthj.beijing.gov.cn/bjhrb/index/xxgk69/sthjlyzwg/1718880/1718881/1718882/index.html>, 2022-08-30.
- [4] 河北省生态环境厅. 2015 年河北省环境状况公报, 2020 年河北省生态环境状况公报 [EB/OL]. <http://hbepb.hebei.gov.cn/hbhjt/sjzx/hjzkgb/>, 2022-08-30.
- [5] 汪伟峰, 王迎红, 王莉莉, 等. 北京奥运会期间奥运村站空气质量的观测与研究 [J]. 环境科学研究, 2010, **23**(1): 48-54.
- Wang W F, Wang Y H, Wang L L, *et al.* Observation and study on the air quality at the Olympic village station during the Beijing Olympic Games [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, **23**(1): 48-54.
- [6] 孙峰, 张大伟, 董欣, 等. 基于环境监测数据的 APEC 会议空气质量保障环境改善效果评估 [J]. 中国环境监测, 2016, **32**(3): 1-12.
- Sun F, Zhang D W, Dong X, *et al.* Research on improvement effects of assurance measures on ambient air quality during APEC based on environmental monitoring data [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, **32**(3): 1-12.
- [7] 肖致美, 毕晓辉, 冯银厂, 等. 天津市大气颗粒物污染特征与来源构成变化 [J]. 环境科学研究, 2014, **27**(3): 246-252.
- Xiao Z M, Bi X H, Feng Y C, *et al.* Variations of characteristics and sources of ambient particulate matter pollution in Tianjin City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(3): 246-252.
- [8] 肖致美, 徐虹, 李立伟, 等. 基于在线观测的天津市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征及来源解析 [J]. 环境科学, 2020, **41**(10): 4355-4363.
- Xiao Z M, Xu H, Li L W, *et al.* Characterization and source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ based on the online observation in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4355-4363.
- [9] 元洁, 刘保双, 程渊, 等. 2017 年 1 月天津市 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分特征及高时间分辨率来源解析研究 [J]. 环境科学学报, 2018, **38**(3): 1090-1101.
- Yuan J, Liu B S, Cheng Y, *et al.* Study on characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ and chemical components and source apportionment of high temporal resolution in January 2017 in Tianjin urban area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(3): 1090-1101.
- [10] 吴文景, 常兴, 邢佳, 等. 京津冀地区主要排放源减排对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染改善贡献评估 [J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 867-875.
- Wu W J, Chang X, Xing J, *et al.* Assessment of $\text{PM}_{2.5}$ pollution mitigation due to emission reduction from main emission sources in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 867-875.
- [11] 赵盟. 北京市奥运期间大气污染物减排效果评估 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
- Zhao M. Evaluation of the air pollutants reduction during the Beijing 2008 Olympic Games [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [12] Li X, Zhang Q, Zhang Y, *et al.* Source contributions of urban $\text{PM}_{2.5}$ in the Beijing-Tianjin-Hebei region: changes between 2006 and 2013 and relative impacts of emissions and meteorology [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 229-239.
- [13] 王浩, 李轶, 高健, 等. APEC 会议期间石家庄市大气污染特征及空气质量保障措施效果评估 [J]. 环境科学研究, 2016, **29**(2): 164-174.
- Wang H, Li Y, Gao J, *et al.* Characteristics of air pollution and evaluation of the effects of air quality assurance measures in Shijiazhuang City during the 2014 APEC meeting [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(2): 164-174.
- [14] 贾佳, 郭秀锐, 程水源. APEC 期间北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 特征模拟分析及污染控制措施评估 [J]. 中国环境科学, 2016, **36**(8): 2337-2346.
- Jia J, Guo X R, Cheng S Y. Numerical study on the characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing and the assessment of pollution control measures during APEC [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(8): 2337-2346.
- [15] Zhou X M, Tan J H, Qin J J, *et al.* Impact of emissions controls on ambient carbonyls during the Asia-Pacific Economic Cooperation summit in Beijing, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(12): 11875-11887.
- [16] Tong P F, Zhang Q R, Lin H M, *et al.* Simulation of the impact of the emergency control measures on the reduction of air pollutants: a case study of APEC blue [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, **192**(2), doi: 10.1007/s10661-019-8056-1.
- [17] 赵辉, 郑有飞, 徐静馨, 等. 大阅兵期间北京市大气质量改善效果评估 [J]. 中国环境科学, 2016, **36**(10): 2881-2889.
- Zhao H, Zheng Y F, Xu J X, *et al.* Evaluation of the improvement of the air quality during the parade in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(10): 2881-2889.
- [18] 钟巍盛, 周颖, 程水源, 等. 首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析 [J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3449-3457.
- Zhong Y S, Zhou Y, Cheng S Y, *et al.* Comparison analysis of the effect of emission reduction measures for major events and heavy air pollution in the Capital [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3449-3457.
- [19] Wang G, Cheng S Y, Wei W, *et al.* Characteristics and emission-reduction measures evaluation of $\text{PM}_{2.5}$ during the two major events: APEC and Parade [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **595**: 81-92.
- [20] Han X K, Guo Q J, Liu C Q, *et al.* Effect of the pollution control measures on $\text{PM}_{2.5}$ during the 2015 China Victory Day Parade: implication from water-soluble ions and sulfur isotope [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **218**: 230-241.
- [21] 李荔, 刘倩, 李冰, 等. 南京青奥会期间管控措施空气质量改善效果评估 [J]. 环境科学研究, 2016, **29**(2): 175-182.

- Li L, Liu Q, Li B, *et al.* Assessment of air quality benefits from control measures during Nanjing Youth Olympic Games [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(2): 175-182.
- [22] Zhao H, Zheng Y F, Li T. Air quality and control measures evaluation during the 2014 Youth Olympic Games in Nanjing and its surrounding cities [J]. *Atmosphere*, 2017, **8**(6), doi: 10.3390/atmos8060100.
- [23] Li P F, Wang L Q, Guo P, *et al.* High reduction of ozone and particulate matter during the 2016 G-20 summit in Hangzhou by forced emission controls of industry and traffic [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2017, **15**(4): 709-715.
- [24] 毛敏娟, 胡德云. 杭州 G20 峰会空气污染控制状况评估 [J]. *环境科学研究*, 2017, **30**(12): 1822-1831.
- Mao M J, Hu D Y. Evaluation of the air pollution control over Zhejiang province during the G20 summit in Hangzhou [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(12): 1822-1831.
- [25] 刘文雯, 段菁春, 胡京南, 等. 基于环境监测数据的大气重污染应急减排措施效果评估 [J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(5): 734-741.
- Liu W W, Duan J C, Hu J N, *et al.* Effect assessment of emergency measures for heavy air pollution based on environmental monitoring data [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(5): 734-741.
- [26] 朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 等. 2019 年 10~12 月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4402-4412.
- Zhu Y Y, Gao Y X, Wang W, *et al.* Assessment of emergency emission reduction effect during the heavy air pollution episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and its surrounding area (“2+26” Cities) from October to December 2019 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4402-4412.
- [27] Cheng N L, Zhang D W, Li Y T, *et al.* Spatio-temporal variations of PM_{2.5} concentrations and the evaluation of emission reduction measures during two red air pollution alerts in Beijing [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/s41598-017-08895-x.
- [28] 王凌慧, 曾凡刚, 向伟玲, 等. 空气重污染应急措施对北京市 PM_{2.5} 的削减效果评估 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(8): 2546-2553.
- Wang L H, Zeng F G, Xiang W L, *et al.* A model evaluation of the effect of implementing heavy air pollution emergency plan to PM_{2.5} reduction in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(8): 2546-2553.
- [29] 吕喆, 魏巍, 周颖, 等. 2015~2016 年北京市 3 次空气重污染红色预警 PM_{2.5} 成因分析及效果评估 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 1-10.
- Ly Z, Wei W, Zhou Y, *et al.* Cause and effect evaluation of PM_{2.5} during three red alerts in Beijing from 2015 to 2016 [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 1-10.
- [30] 李涛, 程兵芬, 陈云波, 等. 红色预警期间北京市 PM_{2.5} 浓度特征及应急措施效果评估 [J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(9): 3262-3270.
- Li T, Cheng B F, Chen Y B, *et al.* Characteristics and effects of emergency measures on the concentration of PM_{2.5} in Beijing during the red alerts in 2015 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(9): 3262-3270.
- [31] Jia J, Cheng S Y, Liu L, *et al.* An integrated WRF-CAMx modeling approach for impact analysis of implementing the emergency PM_{2.5} control measures during red alerts in Beijing in December 2015 [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, **17**(10): 2491-2508.
- [32] 翟世贤, 安兴琴, 刘俊, 等. 不同时刻污染减排对北京市 PM_{2.5} 浓度的影响 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(6): 1369-1379.
- Zhai S X, An X Q, Liu J, *et al.* Effects of emission-sources reduction at different time points on PM_{2.5} concentration over Beijing Municipality [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(6): 1369-1379.
- [33] 朱媛媛, 汪巍, 高愈霄, 等. 疫情期间“2+26”城市污染减排成效评估 [J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(2): 505-516.
- Zhu Y Y, Wang W, Gao Y X, *et al.* Assessment of emission reduction effect in Beijing, Tianjin and surrounding 26 cities from January to March in 2020 during the epidemic of COVID-19 [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(2): 505-516.
- [34] 李洋, 唐伟, 杜谨宏, 等. “2+26”城市秋冬季大气污染治理措施效果评估 [J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(10): 4484-4494.
- Li Y, Tang W, Du J H, *et al.* Assessment on air pollution control measures during autumn and winter seasons in “2+26” cities [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(10): 4484-4494.
- [35] Wang J D, Zhao B, Wang S X, *et al.* Particulate matter pollution over China and the effects of control policies [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **584-585**: 426-447.
- [36] Cheng J, Su J P, Cui T, *et al.* Dominant role of emission reduction in PM_{2.5} air quality improvement in Beijing during 2013-2017: a model-based decomposition analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(9): 6125-6146.
- [37] 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*, 2019, **116**(49): 24463-24469.
- [38] 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.
- [39] Liu B S, Yang J M, Yuan J, *et al.* Source apportionment of atmospheric pollutants based on the online data by using PMF and ME2 models at a megacity, China [J]. *Atmospheric Research*, 2017, **185**: 22-31.
- [40] Xu H, Xiao Z M, Chen K, *et al.* Spatial and temporal distribution, chemical characteristics, and sources of ambient particulate matter in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **658**: 280-293.
- [41] 肖致美, 徐虹, 李鹏, 等. 天津市典型区域 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征 [J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(8): 1324-1332.
- Xiao Z M, Xu H, Li P, *et al.* Characterization of water-soluble ions in typical regional PM_{2.5} in Tianjin city [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(8): 1324-1332.
- [42] 贺克斌. 城市大气污染物排放清单编制技术手册 [EB/OL]. <https://www.doc88.com/p-3337324265982.html>, 2022-08-30.
- [43] 蔡子颖, 韩素芹, 邱晓滨, 等. 基于 WRF/Chem 模式天津地区重污染天气成因分析 [J]. *高原气象*, 2019, **38**(5): 1108-1119.
- Cai Z Y, Han S Q, Qiu X B, *et al.* Research on causes of severely polluted weather in Tianjin based on WRF/Chem [J]. *Plateau Meteorology*, 2019, **38**(5): 1108-1119.
- [44] 蔡子颖, 唐逸, 肖致美, 等. 基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2415-2426.
- Cai Z Y, Tang M, Xiao Z M, *et al.* Improvement of

- environmental model prediction based on inversion and aerosol assimilation[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2415-2426.
- [45] 郭文凯, 李光耀, 陈冰, 等. 兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在 WRF-Chem 中应用评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 634-642.
- Guo W K, Li G Y, Chen B, *et al.* Establishment of a High-resolution anthropogenic emission inventory and its evaluation using the WRF-Chem model for Lanzhou [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 634-642.
- [46] 蔡子颖, 郝团, 韩素芹, 等. 2000~2020 年天津 PM_{2.5} 质量浓度演变及驱动因子分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1129-1139.
- Cai Z Y, Hao J, Han S Q, *et al.* Analysis of change and driving factors of PM_{2.5} mass concentration in Tianjin from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1129-1139.
- [47] 天津市统计局. 2016-2021 年天津统计年鉴[EB/OL]. https://stats.tj.gov.cn/tjsj_52032/tjnj/, 2022-08-30.

欢迎订阅 2023 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE;Scopus;化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA);Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA);Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS);Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ - _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wen, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)