

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源: 基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法: 以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析

唐倩¹, 郑博², 薛文博¹, 张强³, 雷宇^{1*}, 贺克斌⁴

(1. 生态环境部环境规划院, 北京 100012; 2. 法国国家气候与环境科学实验室, 伊韦特河畔日夫 91191; 3. 清华大学地球系统科学系, 北京 100084; 4. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 基于大气污染源排放清单技术方法, 定量分析 2016~2017 年秋冬季“跨年霾”至 2019~2020 年秋冬季“疫情霾”期间京津冀及周边地区主要大气污染物排放量变化, 解析大气污染防治政策实施带来的减排和疫情造成的活动水平下降对主要污染物排放的贡献, 并利用空气质量模型模拟分析不利气象条件下措施减排和疫情影响对空气质量改善的贡献。结果表明, 从“跨年霾”(2016-12-16~2017-01-14)至“疫情霾”(2020-01-22~2020-02-14)该区域主要大气污染物排放量大幅下降 50% 左右, 不利气象条件下, 区域 $PM_{2.5}$ 平均浓度可削减 40% 以上。措施减排主要来自火电、钢铁等重点工业行业提标改造和工业锅炉、民用燃煤等燃煤源治理, 对 SO_2 和 $PM_{2.5}$ 排放量的削减贡献较大, 贡献率分别为 67.1% 和 53.4%; 疫情主要影响移动源和轻工业活动水平, 对 NO_x 和 VOCs 排放量的削减贡献较大, 贡献率分别为 71.9% 和 68.2%。措施减排对区域空气质量改善贡献突出, 有效抑制了重污染过程的强度和范围。在“跨年霾”的不利气象条件下, 措施减排使区域 $PM_{2.5}$ 平均浓度下降 26%, 重度及以上污染天数减少 44%。受疫情影响, 区域 $PM_{2.5}$ 平均浓度继续下降 24%, 重污染持续时间和范围进一步缩减。

关键词: 京津冀及周边地区; 新冠肺炎疫情; 排放清单; 污染物减排; 重污染

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1591-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007218

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas

TANG Qian¹, ZHENG Bo², XUE Wen-bo¹, ZHANG Qiang³, LEI Yu^{1*}, HE Ke-bin⁴

(1. Chinese Academy of Environmental Planning, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China; 2. Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, CEA-CNRS-UVSQ, Gif-sur-Yvette, 91191, France; 3. Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the air pollution emission inventory technical methodology, this study conducted a quantitative analysis on the changes in major air pollutant emissions in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas from the ‘New Year Haze’ in the autumn and winter of 2016-2017 to the ‘Pandemic Haze’ in the autumn and winter of 2019-2020. The contributions of the implementation of air pollution prevention and control policies and the COVID-19 pandemic to major air pollutant emission reductions were studied, and their impacts on the regional air quality under adverse meteorological conditions were simulated using an air quality model. The results showed that from the ‘New Year Haze’ in Dec 2016-Jan 2017 to the ‘Pandemic Haze’ in Jan-Feb 2020, the major air pollutant emissions in the region had dropped by approximately 50%, and the average concentration of $PM_{2.5}$ was potentially reduced by more than 40% under adverse meteorological conditions. The most effective emission reduction measures included the clean heating project and raising the standards in key industrial sectors, such as the iron and steel industry, coal-fired boilers, and power plants, which contributed 67.1% and 53.4% of the emission reductions in SO_2 and $PM_{2.5}$, respectively. The COVID-19 pandemic predominantly affected the mobile sources and light industry, which contributed 71.9% and 68.2% of the emission reductions in NO_x and VOCs, respectively. The implementation of air pollution prevention and control policies contributed substantially to the improvement of regional air quality, which effectively reduced the intensity and extent of the heavy pollution process under unfavorable meteorological conditions. The regional average $PM_{2.5}$ concentration was reduced by 26%, and the number of days experiencing heavy pollution decreased by 44%. Due to the impacts of the COVID-19 pandemic, the average $PM_{2.5}$ concentration in the region was reduced by an additional 24%, and the duration and extent of heavy pollution decreased even further.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas; COVID-19 pandemic; emission inventory; air pollutant emission reduction; heavy pollution

京津冀及周边地区是我国大气污染最严重的地区, 区域性重污染天气受到社会各界广泛关注。近年来, 随着“大气十条”和打赢蓝天保卫战三年行动计划等政策的实施, 该区域空气质量改善显著, 2017~2019 年京津冀及周边地区“2+26”城市 $PM_{2.5}$ 年均浓度下降 11%。然而 2020 年春节期间, 受到新冠肺炎疫情影响, 社会经济活动水平大幅减少, 主要大气污染物排放降低, 京津冀及周边地区仍出现重污

染过程, 引发公众对大气污染防治措施有效性的质疑。

空气质量主要由污染物排放量和大气环境容量

收稿日期: 2020-07-23; 修订日期: 2020-09-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0207504); 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0201)

作者简介: 唐倩(1983~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为大气污染源排放清单, E-mail: tangqian@caep.org.cn

* 通信作者, E-mail: leiyu@caep.org.cn

决定^[1~3]. 大气环境容量主要受气象条件、地形地貌、污染排放布局 and 污染物构成等影响^[4,5]. 由于在一定时期内地形地貌相对稳定, 空气质量主要由污染物排放和气象条件决定. 疫情期间出现重污染过程(疫情霾)的原因应从污染物排放和气象条件两方面进行分析. 基于空气质量模型的研究表明不利气象因素是导致本次重污染的主要原因^[6,7]. 此次重污染过程的气象不利程度与 2016~2017 年跨年典型重污染过程(跨年霾)相当, 然而 PM_{2.5} 峰值浓度明显降低, 可归因于主要大气污染物排放量下降^[6]. 从“跨年霾”至“疫情霾”污染物排放的变化主要来自两个方面: 一是近年来大气污染防治政策措施的实施带来的措施减排, 二是春节期间加之新冠肺炎疫情影响, 全社会活动水平下降带来的排放量下降.

关于京津冀及周边地区主要大气污染物排放的研究, 我国学者已经开展了许多工作^[8~16]. 李亚林等^[9]基于拉网式调查获取的详细活动水平数据建立了 2016 年邯郸市大气污染源排放清单. 段文娇等^[10]运用自下而上的方法建立了钢铁行业分工序的多污染物排放清单, 并利用空气质量模型分析了钢铁行业对 PM_{2.5} 的影响. Guo 等^[12]建立了区域人为源氨排放清单, 并预测了未来氨排放变化趋势和减排潜力. 现有研究多是针对单一城市、行业或污染物建立高分辨率排放清单, 对区域整体主要污染物排放情况和近年来排放变化的定量研究相对较少, 对疫情带来的污染物减排研究更为缺乏.

本研究以 2016~2017 年秋冬季为基准时段, 基于排放清单技术方法, 定量分析“跨年霾”至“疫情霾”京津冀及周边地区主要大气污染物排放变化, 解析大气污染防治措施和疫情对排放量下降的贡献, 并利用空气质量模型模拟不利气象条件下措施减排和疫情影响对空气质量改善的贡献, 分析该区域秋冬季主要减排驱动因素.

1 材料与方法

1.1 排放清单建立方法

研究区域为京津冀及周边地区“2+26”城市, 选取 2016~2017 年秋冬季为基准时段, 2019~2020 年秋冬季为目标时段, 基于系数法建立研究区域基准时段主要大气污染物排放清单, 并以此为基础, 根据活动水平和主要大气污染物排放系数变化建立目标时段排放清单. 本研究中秋冬季是指每年 10 月 1 日至次年 3 月 31 日. 由于目标时段和基准时段大气污染物排放量的变化主要来自大气污染治理措施的推进和新冠肺炎疫情引起的活动水平下

降, 为深入分析两方面因素的影响, 本研究设置了 2019~2020 年秋冬季无新冠肺炎疫情假设情景和有疫情真实情景, 分别建立排放清单, 具体方法如下.

1.1.1 2016~2017 年秋冬季排放清单

采用系数法对“2+26”城市所在的北京市、天津市、河北省、山西省、山东省和河南省这 6 省市建立 2017 年涵盖电力、工业、民用、交通和扬尘这 5 大类排放源, SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5} 和 VOCs 这 4 种污染物的大气污染源排放清单^[17]. 主要大气污染物排放量计算公式如下:

$$E_{ijk} = \sum_{k=1}^m EF_{ijk} \times A_{ij} \times (1 - \eta_{ijk})$$

式中, E_{ijk} 为 i 地区 j 排放源 k 污染物的排放量, t; A_{ij} 为 i 地区 j 排放源的活动水平, 单位与排放源种类相关; m 为排放源总个数, 个; EF_{ijk} 为 i 地区 j 排放源 k 污染物产生系数, 单位与排放源种类相关; η_{ijk} 为 i 地区 j 排放源 k 污染物去除效率, %; $EF_{ijk} \times (1 - \eta_{ijk})$ 为 i 地区 j 排放源 k 污染物排放系数. 以上方法可建立北京市、天津市、河北省、山西省、山东省和河南省这 6 省市排放清单, 根据“2+26”城市能源和产业结构特征, 假设“2+26”城市中河北省、山西省、山东省和河南省的城市各种污染物排放量分别占所在省排放总量的 90%、40%、40% 和 50%, 得到该区域 2017 年排放清单. 假设 2016 年 10~12 月与 2017 年 1~3 月该区域各类源主要污染物日均排放量相同, 可得到该区域 2016~2017 年秋冬季排放清单.

1.1.2 2019~2020 年秋冬季无新冠肺炎疫情情景排放清单

以 2016~2017 年秋冬季排放清单为基础, 根据活动水平和主要污染物排放系数的变化, 建立 2019~2020 年秋冬季无新冠肺炎疫情情景排放清单.

$$E_{ijk2019 \sim 2020 \text{ without COVID-19}} = \sum E_{ijk2016 \sim 2017} \times a_{ij \text{ without COVID-19}} \times b_{ijk}$$

$$a_{ij \text{ without COVID-19}} = \frac{A_{ij2019 \sim 2020 \text{ without COVID-19}}}{A_{ij2016 \sim 2017}}$$

$$b_{ijk} = \frac{EF_{ijk2019 \sim 2020} \times (1 - \eta_{ijk2019 \sim 2020})}{EF_{ijk2016 \sim 2017} \times (1 - \eta_{ijk2016 \sim 2017})}$$

式中, $E_{ijk2019 \sim 2020 \text{ without COVID-19}}$ 和 $E_{ijk2016 \sim 2017}$ 分别为 2019~2020 年秋冬季无新冠肺炎疫情情景下和 2016~2017 年秋冬季 i 地区 j 排放源 k 污染物的排放量, t; $a_{ij \text{ without COVID-19}}$ 为 i 地区 j 排放源 2019~2020 年秋冬季无疫情情景与 2016~2017 年秋冬季活动水平的比值; b_{ijk} 为 i 地区 j 排放源 k 污染物 2019~2020 年秋冬季与 2016~2017 年秋冬季排放系数的比值.

1.1.3 2020 年春节新冠肺炎疫情暴发期间排放清单

本研究中 2020 年春节新冠肺炎疫情暴发期间是指 2020 年 1 月 20 日至 2 月底,该时间段各源污染治理水平与 2019 ~ 2020 年秋冬季无新冠肺炎疫情情景相同,故污染物排放量变化仅与活动水平变化相关.以 2019 ~ 2020 年秋冬季无疫情情景排放清单为基础,建立疫情暴发期间排放清单.

$$E_{ijk \text{ COVID-19}} = \sum E_{ijk2019 \sim 2020 \text{ without COVID-19}} \times a_{ij \text{ COVID-19}}$$

式中, $E_{ijk \text{ COVID-19}}$ 为新冠肺炎疫情暴发期间 i 地区 j 排放源 k 污染物的排放量, t ; $a_{ij \text{ COVID-19}}$ 为 i 地区 j 排放源新冠肺炎暴发期间与 2019 ~ 2020 年秋冬季无新冠肺炎疫情情景活动水平的比值.

1.2 数据获取

1.2.1 活动水平数据获取

2017 年各类源活动水平数据根据国家统计局数据^[18]、环境统计和排污许可等宏观数据资料并结合实地调研数据获取.

假设无新冠肺炎疫情,2019 ~ 2020 年秋冬季各类源日均排放水平与 2019 年 10 ~ 12 月基本持平.2019 年 10 ~ 12 月火电、钢铁、水泥、平板玻璃和焦炭等主要行业活动水平数据来自国家统计局公布的分省月度数据.工业燃煤锅炉煤炭消费量变化主要来自小锅炉淘汰.根据调研数据,2017 ~ 2019 年该区域累计完成燃煤锅炉整治 6 万多台,日均煤炭消费量可削减 11 万 t,其中改气锅炉 2 万余台,天然气日均消费量约增加 0.26 亿 m^3 .民用散煤消费量变化主要来自“煤改气”和“煤改电”等清洁取暖项目替代的散煤消费量.2017 ~ 2019 年该区域累计改造户数约 1 200 万户^[19~21],根据实地调查,户均散煤用量约 10 $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$,考虑到部分地区散煤复烧情况,民用散煤消费量削减约 11 万 $\text{t} \cdot \text{d}^{-1}$.按“煤改气”户数占清洁取暖改造户数的 60%,采暖季户均天然气消费量为 1 000 ~ 1 200 m^3 估算,该区域民用天然气消费量约增加 0.36 亿 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$.2019 年各类型机动车保有量可根据近年来保有量平均增速测算^[22].

新冠肺炎暴发期间主要工业部门活动水平变化情况主要来自国家统计局 (<http://www.stats.gov.cn/tjsj/>),中国电力企业联合会 (<https://www.cec.org.cn/>)、中国联合钢铁网 (<http://www.custeel.com/>) 等相关行业数据和污染源在线监测数据.道路移动源活动水平变化数据根据交通运输部交通流量监测数据 (<http://www.mot.gov.cn/tongjishuju>) 获取,非道路机械处于基本停用状态.民用源中城镇集中供热和农村散煤燃烧采暖等活动水平无显著变

化,城市商业和服务业燃煤活动水平根据国家统计局服务业生产指数和国家统计局服务业调查中心数据获取.

1.2.2 污染物产生和排放系数选取

各类源污染物产生系数主要参考文献[23].目标时段与基准时段各类源主要大气污染物排放系数的变化主要来自国家和地方对相关行业工艺水平和污染控制效率提升的要求.通过梳理分析京津冀及周边地区重点行业产业政策、相关标准和大气污染防治政策要求,结合实地调研,得到目标时段与基准时段重点行业排放系数变化情况,如表 1 所示.

1.3 模型设置和校验

本研究模拟了 2016-12-13 ~ 2017-01-14 气象条件下 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度,由于 CMAQ 空气质量模型存在起转时间,所以实际分析时段要比模拟时段减少 3 d. CMAQ 模型采用 Lambert 投影坐标系,中心点经度为 103°E ,中心纬度为 37°N ,两条平行纬度分别为 25°N 和 40°N .水平模拟范围为 X 方向 ($-2\,690 \sim 2\,690 \text{ km}$)、 Y 方向 ($-2\,150 \sim 2\,150 \text{ km}$),网格间距 20 km,共将全国划分为 270×216 个网格.垂直方向共设置 14 个气压层,层间距自下而上逐渐增大^[49,50]. CMAQ 模型所需要的气象场由中尺度气象模型 WRF 提供, WRF 模型与 CMAQ 模型采用相同的模拟时段和空间投影坐标系,垂直方向共设置 35 个气压层,层间距自下而上逐渐增大. WRF 模型的初始场与边界场数据采用美国国家环境预报中心 (NCEP) 提供的 6 h 一次、 1° 分辨率的 FNL 全球分析资料 (<http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2>),每日对初始场进行初始化,每次模拟时长为 30 h, Spin-up 时间设置为 6 h,并利用 NCEP ADP 观测资料 (<http://rda.ucar.edu/datasets/ds461.0>) 进行客观分析与资料同化.模型验证详见文献[6].

2 结果与讨论

2.1 2016 ~ 2019 年秋冬季无新冠肺炎疫情情景主要大气污染物排放变化情况

基于上述方法建立 2016 ~ 2017 年秋冬季“2 + 26”城市人为源主要大气污染物排放清单,该区域 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 日均排放量别为 5 186、11 126、5 835 和 13 557 t.从行业贡献看,工业源、民用源和电力对 SO_2 的贡献较大,行业贡献中工业锅炉、民用燃煤、钢铁和煤电的贡献率分别为 29.9%、28.4%、14.2% 和 10.7%; NO_x 主要来自工业源、交通源和电力,其中工业锅炉、机动车和煤电贡献率最高,分别为 35.3%、27.6% 和 11.0%; $\text{PM}_{2.5}$ 主要来

表 1 重点工业行业大气污染治理进展和污染物排放系数变化情况

Table 1 Progress of air pollution prevention and changes in emission coefficients in key industrial sectors

行业	2016~2017 年秋冬季污染治理水平	2019~2020 年秋冬季污染治理水平	排放系数变化
火电	70% 左右超低排放, 30% 达标排放	基本全部超低排放	煤电机组 SO ₂ 、NO _x 和 PM _{2.5} 排放系数分别降低约 35%、40% 和 50% ^[24~27]
钢铁	烧结、球团、炼铁、炼钢和轧钢环节分别达到 GB 28662-2012 ^[28] 、GB 28663-2012 ^[29] 、GB 28664-2012 ^[30] 和 GB 28665-2012 ^[31] 中新建企业的污染物排放限值要求	1.15 亿吨以上钢铁产能完成超低排放改造 ^[21] , 未完成超低排放改造的企业执行钢铁行业大气污染物特别排放限值 ^[20]	长流程钢铁行业 SO ₂ 、NO _x 、PM _{2.5} 排放系数分别降低约 60%、30% 和 50%
焦化	达到 GB 16171-2012 ^[32] 中相关要求	河北达到地方超低排放限值要求 ^[33] , 其他地区达到 GB 16171-2012 ^[32] 中大气污染物特别排放限值要求 ^[20]	SO ₂ 、NO _x 、PM _{2.5} 、VOCs 排放系数分别降低约 20%、20%、30% 和 10%
水泥	北京、河北分别达到地方排放标准 DB 11/1054/2013 ^[34] 和 DB 132167-2015 ^[35] 要求; 其他地区达到 GB 4915-2013 ^[36] 中新建企业的污染物排放限值要求	山东达到 DB 37/2373/2018 ^[37] 要求; 天津和山西达到 GB 4915-2013 ^[36] 中大气污染物特别排放限值要求 ^[20] ; 河南达到豫环攻坚办[2019]25 ^[38] 中相关要求	SO ₂ 、NO _x 、PM _{2.5} 排放系数分别降低约 10%、30% 和 30% ^[39]
平板玻璃	北京和河北分别达到地方排放标准 DB 11501-2017 ^[40] 和 DB 13/2168-2015 ^[41] 要求, 其他地区达到 GB 26453-2011 ^[42] 要求	山东达到 DB 37/2373/2018 要求, 河南达到豫环攻坚办[2019]25 ^[38] 相关要求	平板玻璃行业 SO ₂ 、NO _x 、PM _{2.5} 排放系数分别降低约 30%、20% 和 20%
工业锅炉	达到 GB 13271-2014 ^[43] 中在用锅炉污染物排放限值要求	每小时 65 蒸吨及以上的燃煤锅炉基本完成超低排放改造, 达到燃煤电厂超低排放水平, 35~65 蒸吨燃煤锅炉达到大气污染物特别排放限值; 大力推进天然气锅炉低氮改造	燃煤工业锅炉 SO ₂ 、NO _x 、PM _{2.5} 排放系数分别降低约 15%、15% 和 20%, 燃气锅炉 NO _x 排放系数降低约 40%
石化化工、表面涂装、包装印刷	—	从源头替代、过程管控和末端治理推进 VOCs 综合治理	石化化工行业和溶剂使用源 VOCs 排放量约下降 10% 和 8%
其它工业	—	“散乱污”企业和集群综合整治	SO ₂ 、NO _x 、PM _{2.5} 、VOCs 排放量分别约下降 15%、10%、20% 和 5% ^[44]
机动车	部分淘汰黄标车	各类型汽车先后执行国五和国六标准; 全部淘汰黄标车; 老旧车淘汰完成任务量的 40% 以上 ^[45]	客车 NO _x 、PM _{2.5} 和 VOCs 排放系数分别下降约 40%、68% 和 47%, 货车 NO _x 、PM _{2.5} 和 VOCs 排放系数分别下降约 10%、30% 和 40% ^[46~48]
非道路移动源	—	新生产的非道路移动机械严格执行相应的排放标准; 划定禁止使用高排放非道路移动机械的区域; 开展监督执法	SO ₂ 、NO _x 、PM _{2.5} 和 VOCs 排放量分别降低 20%、5%、15% 和 5%
扬尘源	—	深入推进扬尘综合治理	PM _{2.5} 排放量下降约 10%

自工业源、扬尘源和民用源, 其中扬尘源、秸秆薪柴等民用生物质燃烧、民用燃煤和钢铁贡献率较高, 分别为 30.5%、17.6%、11.5% 和 10.0%。工业源和交通源是 VOCs 排放的主要来源, 其中工业溶剂使用、机动车和石化化工分别贡献 VOCs 排放总量的 36.7%、16.5% 和 13.8%。此外民用生物质燃烧对 VOCs 的贡献不可忽视, 约为 11%。主要行业对各种污染物排放量贡献情况详见图 1。

无新冠肺炎疫情影响, 2019~2020 年秋冬季该区域 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 和 VOCs 日均排放量分别为 3 478、9 429、4 341 和 11 470 t, 与 2016~2017 年秋冬季相比, 分别下降 32.9%、15.3%、25.6% 和 15.4%。各行业对主要污染物排放量贡献排序与 2016~2017 年秋冬季基本相同。从电力、工业、民用、交通和扬尘等分部门减排来看, 工业和民用是对

SO₂ 减排贡献最大的两个部门, 分别贡献了 SO₂ 总减排量的 56.5% 和 35.0%。工业和电力对 NO_x 减排贡献最大, 分别贡献了 NO_x 总减排量的 55.2% 和 29.4%。一次 PM_{2.5} 的减排贡献主要来自工业部门和民用部门, 减排贡献为 40.2% 和 36.1%。工业部门对 VOCs 减排贡献最大, 减排贡献达到 47.3%, 其次为交通部门和民用部门, 分别贡献了 VOCs 总减排量的 27.3% 和 25.5%。

与 2016~2017 年秋冬季相比, 2019~2020 年秋冬季(无疫情情景)该区域平板玻璃、粗钢、水泥、焦炭产量和火力发电量增长, 其中平板玻璃和粗钢产量增长 15% 以上, 而 5 大行业 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 和 VOCs 日均排放量分别下降 37.6%、24.9%、37.6% 和 3.8%。钢铁、煤电行业超低排放改造, 工业炉窑深度治理是 5 大行业排放量显著下降的根本原因。

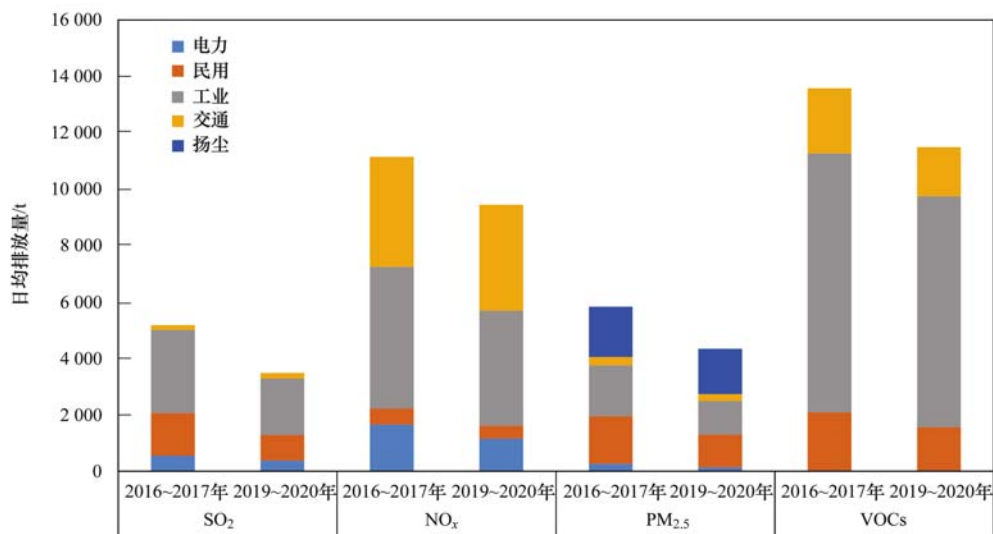


图1 2016~2017年秋冬季和2019~2020年秋冬季京津冀及周边地区大气污染物排放

Fig. 1 Air pollutant emissions in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas during the autumn and winter of 2016-2017 and 2019-2020

分解各行业污染控制措施对减排量的贡献发现(图2),该区域SO₂减排效果最明显的是民用燃煤、工业锅炉和钢铁,日均减排分别为591、500和398 t,贡献了减排量的34.4%、29.1%和23.1%。NO_x减排最显著的行业为工业锅炉和煤电,分别减排了771 t·d⁻¹和447 t·d⁻¹,贡献了减排量的44.8%和26.0%;一次PM_{2.5}减排效果最明显的行业是民用燃煤、钢铁和民用生物质,分别减排一次PM_{2.5}为333、247和205 t·d⁻¹,对总减排量的贡献为22.1%、16.4%和13.7%;VOCs减排较显著的行业为机动车和溶剂使用源,日均减排量分别为567 t和398 t,贡献了总减排量的27.1%和19.0%,其次为工业锅炉、民用生物质、民用燃煤和石化化工,分别贡献15.2%、14.3%、11.2%和9.0%。北方地区清洁取暖、燃煤锅炉综合整治、钢铁和火电行业超低排放和提标改造是对减排量整体贡献显著的措施,四项措施对该区域SO₂和NO_x减排总量的合计贡献超过80%,对一次PM_{2.5}总减排量的合计贡献近60%。以上分析可见,各

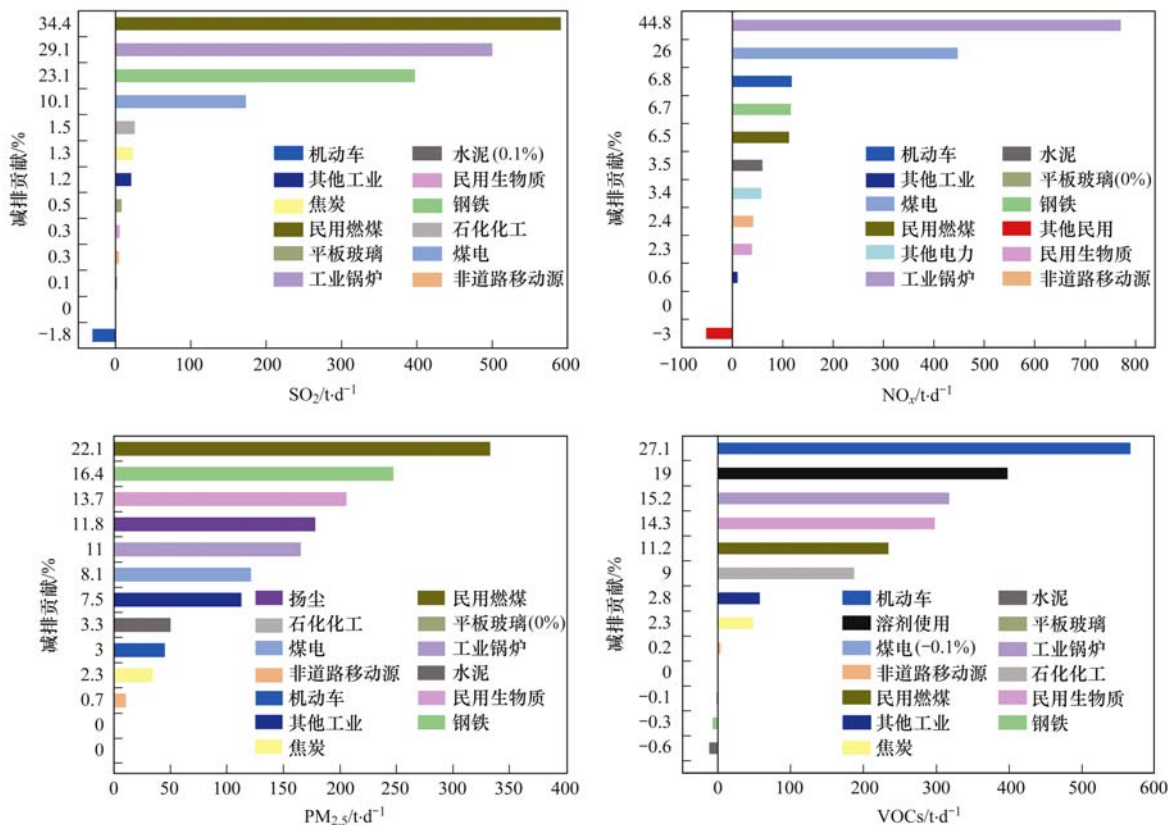


图2 主要大气污染物减排量主要行业贡献解析

Fig. 2 Contributions of key sectors to emission reductions of major air pollutants

行业对主要污染物减排的贡献与该行业对该项污染物排放量的贡献基本一致,即对污染物排放量贡献大的行业对减排量贡献也较大,可见该区域大气污染防治政策具有较强的精准性和有效性。

2.2 新冠肺炎疫情暴发期间重点源活动水平和大气污染物排放量的变化情况

2020 年春节期间恰逢疫情管控,自 2020 年 1 月下旬开始,全国相继启动重大突发公共卫生事件一级响应,逐渐实施交通管制和工厂企业的停产限产。随着疫情逐步得到控制并好转,自 2 月中下旬开始,各省份有序推进复工复产,社会经济稳步重启。京津冀及周边地区交通运输、建筑施工、餐饮服务和其它劳动密集型行业活动水平大幅降低,轻工业和加工业等基本处于停工状态。但大气污染物排放的主要来源,如火力发电等持续供能设备、居民采暖需求和钢铁、焦化、石化化工等生产工序中不可中断的燃烧设备仍在运转。

对于工业部门,春节期间河北省钢铁企业高炉开工率略高于去年同期;2020 年 2 月上旬重点统计钢铁企业粗钢、生铁和焦炭产量环比分别下降 2.68%、下降 1.15% 和增长 1.21%。平板玻璃和焦炭产量、原油加工量保持平稳。另从污染物在线监测数据看,农历初一到十五(1 月 25 日至 2 月 8 日),火电和钢铁行业污染物排放量较节前下降约 10% 左右,焦化、石化和玻璃等行业无明显变化。据以上信息测算,京津冀及周边地区 2020 年春节期间火电和工业部门的 SO_2 、 NO_x 、VOCs 和 $\text{PM}_{2.5}$ 等大气污染物日排放与春节前时段相比分别下降 25%、29%、40% 和 20%。

对于交通部门,根据交通流量监测数据,春节期间,京津冀及周边地区公路货车和客车流量较平时分别下降了 77% 和 39%。春节假期后,受疫情影响区域交通流量仍维持相对较低水平,同时非道路移动机械基本处于停用状态。据估算,区域内交通部门 NO_x 、VOCs 和 $\text{PM}_{2.5}$ 日均排放量比春节前分别下降 79%、71% 和 85%。对于民用部门,城镇集中供热和农村散煤燃烧采暖的排放强度与日常相比无太大差别,仅有城市商业和服务业燃煤大幅下降,民用部门整体排放的大气污染物相比春节前约下降 20% 左右。

总体看来,2020 年春节期间受新冠肺炎疫情影响,京津冀及周边地区主要大气污染物日均排放量较春节前秋冬季平均水平下降约 20%~50%。其中, SO_2 排放量约下降 24%,减排量主要来自于工业部门; NO_x 排放量约下降 46%,减排量主要来自机动车、非道路移动机械和其他部分工业企业停工; $\text{PM}_{2.5}$ 排放量约下降 30%,减排量主要来自建筑施工

停工、部分工业企业停工和道路扬尘下降等;VOCs 排放量约下降 39%,减排量主要来自交通部门和工业部门有机溶剂生产和使用量下降。

2.3 不利气象条件下,3 种排放情景对空气质量的影响

区域空气质量除受污染物排放量影响外,还与气象条件密切相关。如图 3 所示,为扣除气象条件的影响,客观研究排放量变化对空气质量的影响,本研

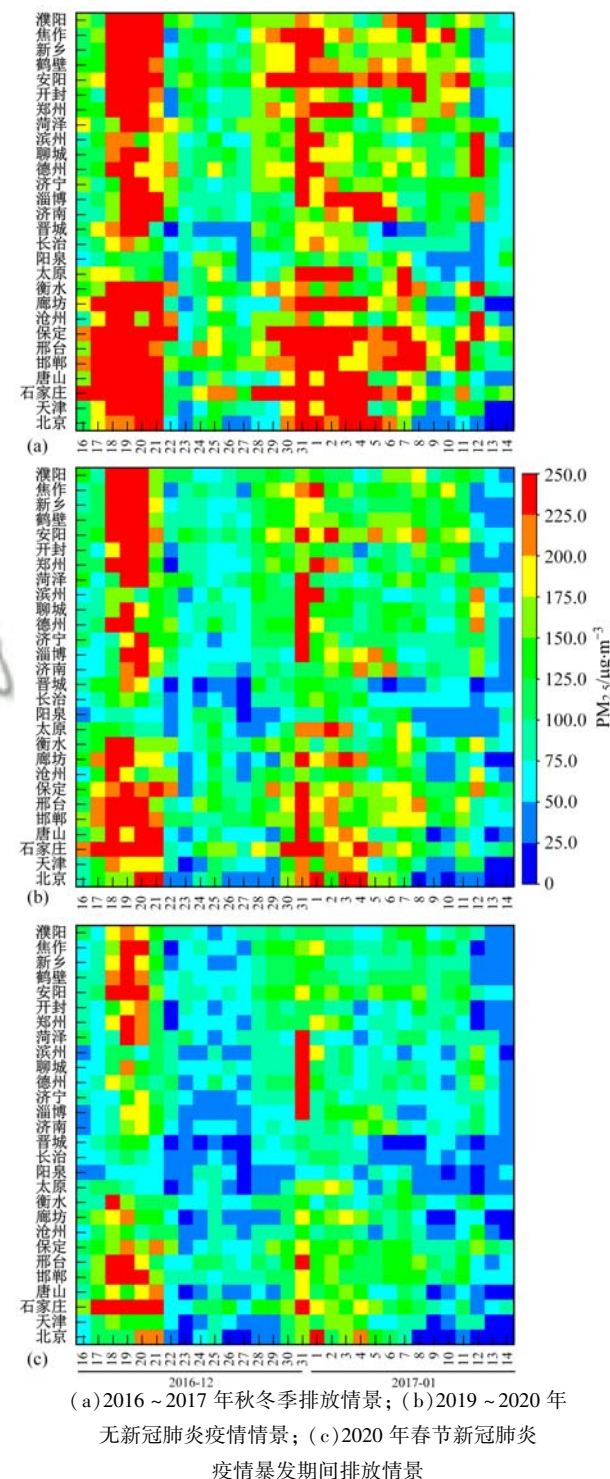


图 3 不利气象条件下不同污染物排放情景 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度

Fig. 3 $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in different pollutant emission scenarios under unfavorable meteorological conditions

究采用“固定气象条件,改变排放清单”的方法,对比模拟 2016 ~ 2017 年秋冬季、2019 ~ 2020 年秋冬季无新冠肺炎疫情情景和 2020 年春节新冠肺炎疫情暴发期间 3 种污染物排放情景下京津冀及周边地区 PM_{2.5} 浓度. 课题组相关研究结果表明 2016 ~ 2017 年“跨年霾”和 2020 年春节“疫情霾”两次重污染过程气象条件不利程度基本相当^[6]. 由于“跨年霾”(2016-12-16 日 ~ 2017-01-14 日)期间的气象条件和 2016 ~ 2017 年秋冬季各种污染物排放量与真实情况一致,本研究选取了“跨年霾”期间气象条件作为不利气象条件,利用 WRF-CMAQ 模型^[49,50],分析措施减排和疫情影响对空气质量改善的贡献,结果见表 2. 2016 ~ 2017 年秋冬季排放情景下 PM_{2.5} 浓度为实际观测值. 由于选取 2016 ~ 2017 年“跨年霾”重污染过程的固定气象条件,模型模拟的 2019 ~ 2020 年秋冬季无新冠肺炎疫情情景和 2020 年春节新冠肺炎疫情暴发期间排放情景下 PM_{2.5} 浓度与实际气象条件无关,其相对大小可以单纯反映措施减排和疫情对 PM_{2.5} 浓度的影响. 在“跨年霾”的不利气象条件下,3 种排放情景区域 PM_{2.5} 平均浓度分别为 169、125 和 95 μg·m⁻³. 措施减排使区域 PM_{2.5} 平均浓度下降 26%;受疫情影响,PM_{2.5} 浓度又进一步下降 24%. 从污染强度的角度看,2016 ~ 2017 年

“跨年霾”重污染过程,中度及以上污染 PM_{2.5} 浓度均值为 213 μg·m⁻³;重度及以上污染 PM_{2.5} 浓度均值为 240 μg·m⁻³. 在相同不利气象条件下,措施减排可使中度及以上污染和重度及以上污染 PM_{2.5} 浓度均值分别下降到 181 μg·m⁻³和 217 μg·m⁻³,降幅分别为 15% 和 10%. 疫情带来的全社会活动水平降低可使中度及以上污染和重度及以上污染 PM_{2.5} 浓度均值进一步下降 9% 和 6%.

措施减排和疫情影响造成的主要大气污染物排放量显著下降有效降低了重污染发生的强度,同时缩小了重污染区域范围和持续时间. 2016 ~ 2017“跨年霾”期间“2 + 26”城市发生重度及以上污染的总天数为 422 d,3 个及以上城市同时发生严重污染次数为 13 次,5 个及以上城市同时发生重度及以上污染次数为 24 次,1 个城市连续 3 d 及以上发生重度及以上污染次数为 27 次. 在相同的气象条件下,措施减排可使重度及以上污染天数减少 185 d,3 个及以上城市同时发生严重污染次数减少 8 次,5 个及以上城市同时发生重度及以上污染次数减少 7 次,1 个城市连续 3d 及以上发生重度及以上污染次数减少 6 次. 疫情带来的活动水平下降可使区域重度及以上污染总天数减少 128 d,进一步减轻区域性和连续性污染(见表 3 和图 3).

表 2 固定气象条件 PM_{2.5} 模拟统计结果/μg·m⁻³

Table 2	PM _{2.5} concentrations in different pollutant emission scenarios under the selected meteorological condition/μg·m ⁻³		
区域统计指标	2016 ~ 2017 年 秋冬季排放情景	2019 ~ 2020 年 无新冠肺炎疫情情景	2020 年春节 新冠肺炎疫情暴发期间排放情景
区域平均值	169	125	95
中度及以上污染平均值	213	181	164
重度及以上污染平均值	240	217	203

表 3 “跨年霾”气象条件下不同排放情景指标统计

Table 3	Statistics under the meteorological conditions from 16 December 2016 to 14 January 2017				
排放情景	3 个及以上城市 同时发生严重 污染次数	5 个及以上城市 同时发生重度及 以上污染次数	1 个城市连续 3 d 及 以上发生重度及 以上污染次数	重污染及 以上天数/d	中度污染及 以上天数/d
2016 ~ 2017 年秋冬季排放情景	13	24	27	422	566
2019 ~ 2020 年无新冠肺炎疫情情景	5	17	21	237	403
2020 年春节新冠肺炎疫情暴发期间排放情景	3	8	12	109	232

3 结论

(1) 从 2016 ~ 2017 年秋冬季的“跨年霾”到 2020 年春节“疫情霾”京津冀及周边地区主要大气污染物排放量大幅下降 50% 左右. SO₂、NO_x、PM_{2.5} 和 VOCs 日均排放量分别下降 49.0%、54.2%、47.9% 和 48.4%. 大气污染防治政策实施对 SO₂ 和 PM_{2.5} 的减排贡献较大,贡献率分别为 67.1% 和 53.4%;疫情影响对 NO_x 和 VOCs 排放量下降贡献

较大,贡献率分别为 71.9% 和 68.2%.

(2) 措施减排和疫情影响的根源不同. 措施减排主要来自火电、钢铁等重点工业行业提标改造和工业锅炉、民用燃煤等燃煤源治理,而疫情影响主要导致移动源活动水平的下降和轻工业停工,火电、钢铁等重点行业和民用源排放量变化不大.

(3) 措施减排对区域空气质量改善贡献突出. 在“跨年霾”的不利气象条件下,措施减排有效抑制了重污染过程的强度和范围. 区域 PM_{2.5} 平均浓度、

重度及以上污染 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值和中度及以上污染 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值分别下降了 26%、10% 和 15%, 重度及以上污染天数减少 44%。疫情带来的活动水平下降进一步减轻区域性、连续性污染。区域 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度、重度及以上污染 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值和中度及以上污染 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值分别进一步下降 24%、6% 和 9%。重度及以上污染天数减少 54%。

参考文献:

- [1] Chang X, Wang S X, Zhao B, *et al.* Contributions of inter-city and regional transport to $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei region and its implications on regional joint air pollution control[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 1191-1200.
- [2] Wang H, Xu J Y, Zhang M, *et al.* A study of the meteorological causes of a prolonged and severe haze episode in January 2013 over central-eastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **98**: 146-157.
- [3] Zhang Q, Quan J N, Tie X X, *et al.* Effects of meteorology and secondary particle formation on visibility during heavy haze events in Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **502**: 578-584.
- [4] 刘鸿亮, 缪天成, 杨本津, 等. 环境容量、背景值赴日考察团考察报告[J]. *环境科学动态*, 1983, (Z2): 1-8.
- [5] Wang W Y, Chen N, Ma X J. Research on atmospheric environmental capacity model of urban agglomeration[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, **518-523**: 1311-1320.
- [6] 薛文博, 史旭荣, 严刚, 等. 气象条件和排放变化对 2020 年春节前后华北地区重污染过程的影响[J]. *中国科学, 地球科学*, 2021, **51**(2): 314-324.
- Xue W, Shi X, Yan G, *et al.* Impacts of meteorology and emission variations on the heavy air pollution episode in North China around the 2020 Spring Festival[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, **51**(2): 314-324.
- [7] Wang P F, Chen K Y, Zhu S Q, *et al.* Severe air pollution events not avoided by reduced anthropogenic activities during COVID-19 outbreak[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, **158**, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104814.
- [8] 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.
- [9] 李亚林, 郭秀锐, 程水源, 等. 邯郸市大气污染源排放清单建立及总量校验[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(1): 1-8.
- Li Y L, Guo X R, Cheng S Y, *et al.* Establishment and verification of air pollution source emission inventory in Handan City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(1): 1-8.
- [10] 段文娇, 郎建奎, 程水源, 等. 京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 $\text{PM}_{2.5}$ 影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1445-1454.
- Duan W J, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Air pollutant emission inventory from iron and steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei region and its impact on $\text{PM}_{2.5}$ [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1445-1454.
- [11] Yang W, Yu C Y, Yuan W, *et al.* High-resolution vehicle emission inventory and emission control policy scenario analysis, a case in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **203**: 530-539.
- [12] Guo X R, Ye Z L, Chen D S, *et al.* Prediction and mitigation potential of anthropogenic ammonia emissions within the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **259**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113863.
- [13] Liu H J, Wu B B, Liu S H, *et al.* A regional high-resolution emission inventory of primary air pollutants in 2012 for Beijing and the surrounding five provinces of North China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **181**: 20-33.
- [14] 夏春林, 肖琳. 京津冀天然源挥发性有机物排放研究[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(8): 2680-2689.
- Xia C L, Xiao L. Estimation of biogenic volatile organic compounds emissions in Jing-Jin-Ji [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(8): 2680-2689.
- [15] 李瑞芃, 吴琳, 毛洪钧, 等. 廊坊市区主要大气污染源排放清单的建立[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(10): 3527-3534.
- Li R P, Wu L, Mao H J, *et al.* Establishment of an air pollutant emission inventory for Langfang urban area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(10): 3527-3534.
- [16] 杜小申, 燕丽, 贺晋瑜, 等. 安阳市典型工业源 $\text{PM}_{2.5}$ 排放特征及减排潜力估算[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2043-2051.
- Du X S, Yan L, He J Y, *et al.* $\text{PM}_{2.5}$ emission characteristics and estimation of emission reduction potential from typical industrial sources in Anyang [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2043-2051.
- [17] 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.
- [18] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [19] 环境保护部, 国家发展和改革委员会, 工业和信息化部, 等. 关于印发《京津冀及周边地区 2017-2018 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》的通知(环大气[2017]110号)[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201708/t20170824_420330.htm, 2017-08-24.
- [20] 生态环境部, 国家发展和改革委员会, 工业和信息化部, 等. 关于印发《京津冀及周边地区 2018-2019 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》的通知(环大气[2018]100号)[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/sthjbjwj/201809/t20180927_630570.htm, 2018-09-21.
- [21] 生态环境部, 国家发展和改革委员会, 工业和信息化部, 等. 关于印发《京津冀及周边地区 2019-2020 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》的通知(环大气[2019]88号)[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/201910/t20191016_737803.html, 2019-10-11.
- [22] 生态环境部. 机动车统计年报 2019[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/ydyhjgl/201909/P020190905586230826402.pdf>, 2020-05-12.
- [23] Li M, Liu H, Geng G, *et al.* Anthropogenic emission inventories in China: A review [J]. *National Science Review*, 2017, **4**(6): 834-866.
- [24] Chen X J, Liu Q Z, Sheng T, *et al.* A high temporal-spatial emission inventory and updated emission factors for coal-fired power plants in Shanghai, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **688**: 94-102.
- [25] Liu X, Gao X, Wu X B, *et al.* Updated hourly emissions factors for Chinese power plants showing the impact of widespread ultralow emissions technology deployment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(5): 2570-2578.

- [26] Zhang Y, Bo X, Zhao Y, *et al.* Benefits of current and future policies on emissions of China's coal-fired power sector indicated by continuous emission monitoring[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **251**: 415-424.
- [27] Liu S T, Zhang Z B, Wang Y, *et al.* PM_{2.5} emission characteristics of coal-fired power plants in Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10** (3): 954-959.
- [28] GB 28662-2012, 钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准[S].
- [29] GB 28663-2012, 炼铁工业大气污染物排放标准[S].
- [30] GB 28664-2012, 炼钢工业大气污染物排放标准[S].
- [31] GB 28665-2012, 轧钢工业大气污染物排放标准[S].
- [32] GB 16171-2012, 炼焦化学工业污染物排放标准[S].
- [33] DB13/2863-2018, 炼焦化学工业大气污染物超低排放标准[S].
- [34] DB11/1054-2013, 水泥工业大气污染物排放标准[S].
- [35] DB13/2167-2015, 水泥工业大气污染物排放标准[S].
- [36] GB 4915-2013, 水泥工业大气污染物排放标准[S].
- [37] DB37/2373-2018, 建材工业大气污染物排放标准[S].
- [38] 豫环攻坚办. 豫环攻坚办[2019]25 号关于印发河南省 2019 年大气污染防治攻坚实施方案的通知[EB/OL]. http://dnr.henan.gov.cn/sitesources/hnszrzt/page_pc/zt/hjwrfzgjzl/zcjd/article053cc442f24a4dfc8968a254a2b8aa96.html, 2019-06-04.
- [39] Liu H X, Yang F X, Du Y L, *et al.* Field measurements on particle size distributions and emission characteristics of PM₁₀ in a cement plant of China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10** (5): 1464-1472.
- [40] DB11/501-2017, 大气污染物综合排放标准[S].
- [41] DB13/2168-2015, 平板玻璃工业大气污染物排放标准[S].
- [42] GB 26453-2011, 平板玻璃工业大气污染物排放标准[S].
- [43] GB 13271-2014, 锅炉大气污染物排放标准[S].
- [44] 彭菲, 於方, 马国霞, 等. “2+26”城市“散乱污”企业的社会效益和环境治理成本评估[J]. *环境科学研究*, 2018, **31** (12): 1993-1999.
- Peng F, Yu F, Ma G, *et al.* Analysis of social-economic benefits and environmental pollution control costs of ‘dispersed, disrupted and polluted’ enterprises in the ‘2+26’ region[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31** (12): 1993-1999.
- [45] 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?trs=1, 2018-07-03.
- [46] GB 18352.6-2016, 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)[S].
- [47] GB 18352.5-2013, 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五阶段)[S].
- [48] GB 17691-2005, 车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ阶段)[S].
- [49] 许艳玲, 薛文博, 雷宇, 等. 中国氨减排对控制 PM_{2.5} 污染的敏感性研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37** (7): 2482-2491.
- Xu Y L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Sensitivity analysis of PM_{2.5} pollution to ammonia emission control in China[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37** (7): 2482-2491.
- [50] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 基于全国城市 PM_{2.5} 达标约束的大气环境容量模拟[J]. *中国环境科学*, 2014, **34** (10): 2490-2496.
- Xue W B, Fu F, Wang J N, *et al.* Modeling study on atmospheric environmental capacity of major pollutants constrained by PM_{2.5} compliance of Chinese cities[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34** (10): 2490-2496.

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Huai-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)