

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金



制药



喷涂



橡胶

京津冀

长三角

珠三角

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期

Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策 孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)

长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征 代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)

经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征 陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)

近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析 马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)

电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系 柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)

焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析 顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)

典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟 孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)

多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析 曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)

龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析 王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)

基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例 李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)

造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估 张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郑明辉 (1131)

典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估 胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)

柠檬酸与磷共存对土壤吸附镉的影响 宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)

两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积 郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)

钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征 孙厚云, 卫晓锋, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)

盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)

水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响 汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)

壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响 杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)

铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响 于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)

研究报告

COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析 赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)

2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟 刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)

南京北郊 PM_{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源 尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)

西安市大气棕碳污染特性及发色团种类 陈前, 陈庆彩 (1236)

淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价 郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓雨, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)

北京市控制 PM_{2.5} 污染的健康效益评估 杜沛, 王建国 (1255)

西宁市大气污染来源和输送季节特征 刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)

青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征 袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)

基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征 王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)

山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析 刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)

兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献 王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛潇萱, 马建民 (1315)

2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析 华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)

生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单 马占云, 姜显聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)

长江口邻近海域表层沉积物中的细菌藎多醇及对低氧区的响应判别 尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)

鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估 徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)

衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析 刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)

丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征 潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)

金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价 黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)

汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响 李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)

苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)

娘子关泉群水化学特征及成因 唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)

过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用 徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)

亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向 王丽莎, 李希, 李裕元, 张满意, 吴金水 (1433)

紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂 刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)

太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能 马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)

一步法 La@MgFe₂O₄ 的制备及其吸附水中磷的性能 白润英, 宋博文, 张彧, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)

工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能 邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (1469)

ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制 毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)

不同季节城市污水处理厂微生物群落特性 贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)

麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学 殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)

内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价 王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春雨, 卞园, 张光宇 (1503)

广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素 马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)

超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响 方丹丹, 张立志, 王强 (1523)

水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响 陈佳, 赵秀兰 (1535)

四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性 王卫中, 迟苏琳, 徐卫红 (1545)

地膜覆盖对菜地垄沟 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)

对比研究生物炭和秸秆对麦玉轮作系统 N₂O 排放的影响 唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)

流域水生态空间管控下生境监测方法概述 阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)

《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)

COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析

赵雪¹, 沈楠驰¹, 李令军², 武高峰¹, 陶静¹, 赵文吉^{1*}

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 北京市生态环境监测中心, 北京 100048)

摘要: 为了应对 COVID-19 疫情, 京津冀地区采取了一系列严格的管控措施, 这些措施导致了大气污染物人为源排量的减少, 为探究大气污染受人类活动的影响程度提供了时机。将疫情防控分为前期、初期、中期和后期这 4 个阶段, 并结合气象、交通量和工业数据, 综合运用数理统计和空间分析方法, 得出各时间段大气污染物的变化情况及其影响因素, 为京津冀地区进一步治理大气污染提出了合理化建议。结果表明: ① 京津冀三地在疫情防控期总体的 AQI 值和 6 项污染物同比 2019 年均有所下降, 其中 SO₂、PM₁₀ 和 NO₂ 的降幅较大(分别为 26.5%、24.3% 和 16.9%); 由初期到后期, 各污染物(除 O₃) 总体处于下降趋势; O₃ 在初期增幅大(76.2%), 中后期增幅放缓。② 防控初期北京市的重污染天气是污染物本地积累、二次转化和区域传输共同作用的结果; 北京 2 月份的 PM_{2.5} 浓度同比相似气象条件下的 2014 年 2 月偏低近 6 成; 若仅考虑人为减排的影响, 则各污染物浓度同比 2019 年均有所下降。③ 防控中后期, 随着交通量和工业复工率进一步扩大, 各污染物变化趋于平稳或有微升; 重工业城市的热异常辐射强度与主要污染物的灰色关联度大于 0.6, 即控制工业排放量仍是治理大气污染的关键。

关键词: COVID-19 疫情; 京津冀地区; 空气质量; 污染特征; 人为影响

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1205-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202007249

Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic

ZHAO Xue¹, SHEN Nan-chi¹, LI Ling-jun², WU Gao-feng¹, TAO Jing¹, ZHAO Wen-ji^{1*}

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Beijing Municipal Ecological and Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China)

Abstract: A series of strict control measures were imposed in the Beijing-Tianjin-Hebei region in early 2020 to control the spread of COVID-19. These measures have led to a reduction of anthropogenic air pollutants, providing an opportunity to observe the contribution of human activities to local air pollution. In this study, the control period was divided into four stages: the before, early, middle, and later stages. Based on a variety of data including meteorological, traffic, and industrial manufacturing datasets, statistical methods were combined with spatial analysis to evaluate changes in air pollution and associated human impacts during each stage. In addition, suggestions are made for further regional air pollution control in the Beijing-Tianjin-Hebei area. Key results are as follows: ① Overall, the AQI and the concentrations of six air pollutants, especially SO₂, PM₁₀, and NO₂, were lower during control period than during the equivalent period in 2019 (reductions of 26.5%, 24.3%, and 16.9%, respectively). From the before to later stages, pollutants (except O₃) showed a downward trend while O₃ increased significantly during the before stage (by 76.2%) and the growth rate slowed during the middle and later stages; ② During the prior stage, Beijing experienced two periods with heavy air pollution days as a result of the local accumulation of pollutants, secondary transformation, and regional transport. The concentration of PM_{2.5} in February was nearly 60% lower than in February 2014 under similar meteorological conditions in Beijing; ③ Following an increase in traffic volume and industrial activity, changes in air pollutants tended to be stable or slightly increase during the middle and later stages of the control period. The grey relation coefficients between thermal radiation intensity anomalies and the main pollutants in heavy industrial cities were greater than 0.6, which means that the control of industrial emissions remains key to controlling air pollution.

Key words: COVID-19 epidemic; Beijing-Tianjin-Hebei region; air quality; pollution characteristics; human influence

近年来,为治理区域大气污染,京津冀地区采取了一系列有效的措施,空气质量得到了显著改善^[1-3],北京市年均 PM_{2.5} 浓度已由 89.5 μg·m⁻³ (2013 年)降低至 42 μg·m⁻³ (2019 年)。2020 年 1 月,COVID-19 疫情在中国乃至全世界迅速蔓延^[4,5],为应对疫情,京津冀地区于 1 月 24 日启动了重大突发公共卫生事件一级响应,实施了一系列严格的管控措施,如封锁交通干线、限制人口非必要活动、工厂停工和学校停课等^[6]。这些措施减少了大

气污染物的人为源,为调查大气污染受人类活动的影响程度提供了时机。

对 2008 年北京奥运会和 2014 年 APEC 会议期间的研究表明,排放控制措施对降低颗粒物和气态

收稿日期: 2020-07-27; 修订日期: 2020-08-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0706004); 北京市自然科学基金项目(8202024)

作者简介: 赵雪(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为 GIS 在环境中的应用,E-mail: zhaoxue19801100695@163.com

* 通信作者,E-mail: zhwenji1215@163.com

污染物的浓度起到很大的作用^[7,8]. 欧空局公布的哨兵 5P 数据显示,2020 年初,中国东部地区对流层的 NO₂ 柱比 2019 同期下降了 65%,主要是由疫情影响期后化石燃料燃烧量的变化引起的^[9]. 但也有研究发现,重污染天气并没有因为人为排放量的减少而消失^[10],北京市管控后的空气质量反而比之前更差^[11],减少一次污染物的排量取得的效果,可能会被不利的气象条件和二次污染的加强所抵消^[12,13]. 且以 O₃ 为代表的光化学污染呈快速上升趋势,O₃ 超标天数已经超过 PM_{2.5},成为首要的大气污染物^[14].

相比已有研究,本文在时间上覆盖了整个疫情期间(2020 年 1~5 月),并且根据气象、夜光遥感、交通量和工业等数据,分析了京津冀地区疫情影响不同时期影响大气污染物的自然和人为因素,强调了人为管控措施对污染物浓度变化的影响,以期为进一步治理京津冀地区大气污染提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 数据来源与处理

本研究所用到的京津冀地区 13 个地级市和 87 个国家控点的 AQI 值和 6 种大气污染物 (PM_{2.5}、PM₁₀、O₃、SO₂、NO₂ 和 CO) 浓度数据,来自中国环境监测总站 (<http://106.37.208.233:20035/>),时间跨度为 2019 年 1~5 月、2020 年 1~5 月以及 2014 年 2 月. 对 PM_{2.5} 等 5 种污染物求当日平均浓度作为日均浓度,O₃ 则以日最大 8 h 浓度作为日均浓度^[15,16]. 河北省各时期浓度通过 11 个地级市求平均得到.

气象数据(温度、气压、相对湿度、风速和风向等)来自中国气象数据网的逐小时观测资料,时间跨度为 2020 年 1 月 22 日至 2 月 29 日. 对气象数据求日平均,并制作风玫瑰图.

夜光遥感数据来自 NASA 的 NPP-VIIRS 产品, (https://eogdata.mines.edu/download_dnb_composites.html),以研究区为掩膜进行裁剪,并统计不同地区和时间段的夜光亮度值.

京津冀的客货运量和规模以上工业增加值增速,来自三地的统计局官网发布的月度数据,时间跨度为 2020 年 1~5 月.

工业热异常点和辐射强度数据来自 Soumi-NPP 卫星搭载的 VIIRS 传感器 375m 分辨率多光谱数据的月产品数据集. 在 GoogleEarth 提取出落在工业用地的热异常点,并筛选出夜间的部分以排除其他热异常以及建筑物反射太阳光的干扰^[17,18].

1.2 研究方法

1.2.1 阶段划分

2020 年 1 月 24 日,京津冀相继启动重大突发公共卫生事件一级响应,封锁交通干线,限制人口非必要流动;据工业和信息化部公布的数据显示,截止 2 月 19 日,三地规模以上工业的复工率达到 60% 以上;4 月 30 日,三地的疫情影响措施调整至二级,各街道乡镇取消封锁,疫情防控由战时状态转为常态化.

根据以上时间节点,本文将疫情防控分为 4 个时期:前期(1 月 1~23 日)、初期(1 月 24 日~2 月 19 日)、中期(2 月 20 日~4 月 30 日)和后期(5 月 1~31 日). 2019 与 2020 年前期和初期阶段划分以农历除夕(2019 年 2 月 4 日;2020 年 1 月 24 日)为分界点,中、后期的分界点日期相同(2 月 20 日和 5 月 1 日).

1.2.2 减排效应估算

为定量分析 2020 年防控初期的人为控制措施对北京市各项大气污染物的削弱作用,剔除不利气象条件的影响,基于公式(1)和公式(2)估计北京市防控初期各项污染物的本地排放浓度和防控措施对减排的贡献(据中国气象数据网公布的数据显示,2019 年同期的气象条件良好,故可视作仅受春节假期人类活动的影响).

$$\rho(2020 \text{ 初期估计}) = \rho(2020 \text{ 前期}) \times \rho(2019 \text{ 初期}) / \rho(2019 \text{ 前期}) \quad (1)$$

$$\rho(2020 \text{ 初期人为减排估计}) = \rho(2019 \text{ 初期}) - \rho(2020 \text{ 初期估计}) \quad (2)$$

式中, ρ 为各污染物的浓度,PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂ 和 O₃ 的单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,CO 的单位为 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

1.2.3 核密度估计

核密度估计(kernel density estimation, KDE)用于计算点、线要素测量值在指定邻域范围内的单位密度,能直观地反映出离散测量值在连续区域内的分布情况^[19,20],栅格值即为单位密度. 若存在热异常点 x_1, x_2, \dots, x_n , 则任意热异常点聚集区 x_i 处的核密度估计为:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \xi_i(k) \quad (3)$$

式中, $K\left(\frac{x-x_i}{h}\right)$ 为核函数, h 为搜索半径, $x-x_i$ 表示估计点到样本 x_i 处的距离.

本文根据热异常点的空间分布和辐射强度大小,估算其核密度,以反映各地区工业生产规模.

1.2.4 灰色关联分析

灰色关联分析(grey relation analysis, GRA)是一

种多因素统计分析的方法,可以确定系统因素间的影响程度,根据比较数列的几何形状相似程度判断其联系是否紧密.两因素的灰色关联度越大,变化态势越一致^[21].计算公式如下:

$$\xi_i(k) = [\min \min |\hat{X}^{(0)}(k) - X^{(0)}(k)| + \rho \max \max |\hat{X}^{(0)}(k) - X^{(0)}(k)|] / [|\hat{X}^{(0)}(k) - X^{(0)}(k)| + \rho \max \max |\hat{X}^{(0)}(k) - X^{(0)}(k)|] \quad (4)$$

式中, $\xi_i(k)$ 表示关联系数, $k=0, 1, \dots, n$, $\hat{X}^{(0)}(k)$ 为参考数据列, $X^{(0)}(k)$ 为比较数据列, ρ 为分辨系数, $\rho \in (0, 1)$, 常取 0.5^[22].

关联度 r 的计算公式如下:

$$r = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (5)$$

式中, r 越接近 1, 说明相关性越好^[23]. 由于 NO_2 、 SO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 等大气污染物来源复杂, 难以与热异常

点的辐射强度建立直接的相关关系^[24], 故本文利用灰色关联模型分析, 以更准确地反映其相近程度.

2 结果与分析

2.1 疫情防控期大气污染情况

图 1 为京津冀在疫情防控 4 个时期和 2019 年同期的 7 类指标 (AQI 值与 6 类大气污染物) 的平均浓度变化情况对比. 从总体上看, 三地的 7 类指标值同比 2019 年均有所下降, AQI 值平均降幅为 15.1%, 一级优天气平均增加了 14 d; 污染物浓度平均降幅最大的为 SO_2 (26.5%)、 PM_{10} (24.3%) 和 NO_2 (19.6%), 其次为 $\text{PM}_{2.5}$ (14.4%) 和 CO (8.5%), O_3 呈直线上升趋势, 总体相比两年变化幅度较小, 三地平均降低了 4.6%.

与防控前期相比, 防控初期天津和河北两地的各项污染物 (除 O_3) 浓度均有下降且降幅超过 2019

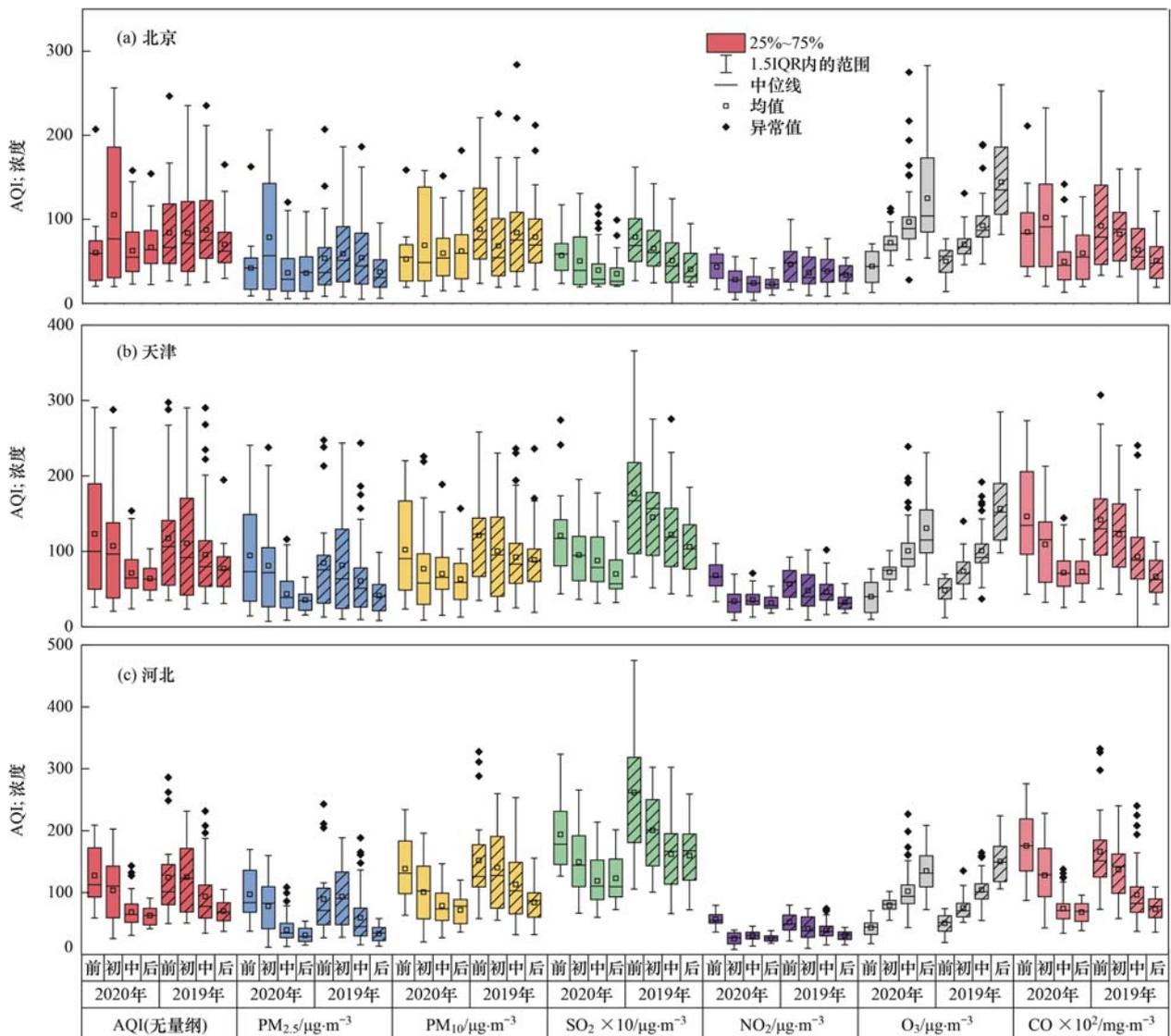


图 1 2020 年与 2019 年同期 AQI 值与各项污染物浓度对比

Fig. 1 Changes in the AQI and concentrations of six air pollutants during comparable period of 2019 and 2020 in Beijing, Tianjin, and Hebei

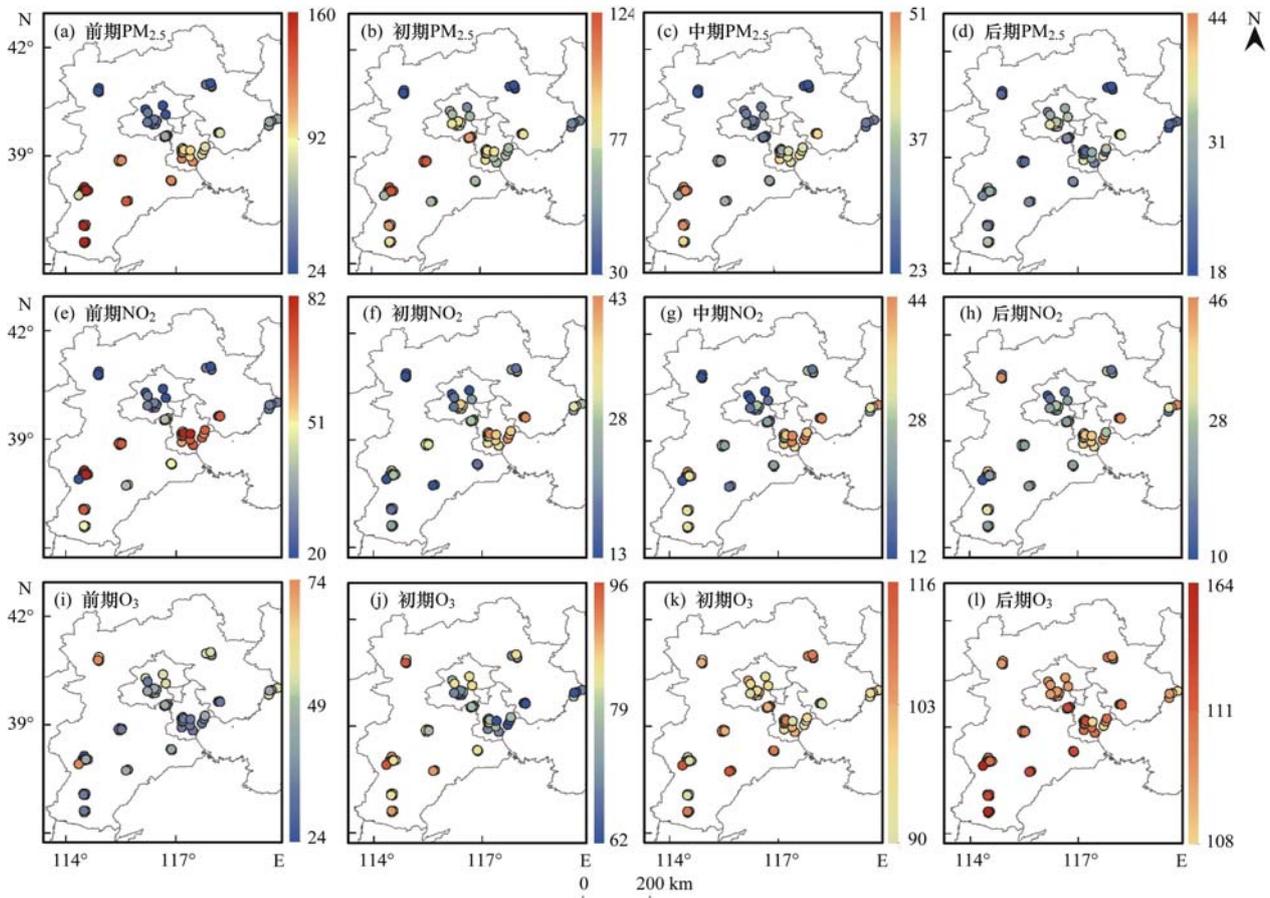
年同期水平,其中 NO_2 降幅最大(52.5%),其次为 CO (26.2%)、 PM_{10} (26%)、 SO_2 (22%) 和 $\text{PM}_{2.5}$ (17%);北京市各类指标的变化情况则与河北天津不同,除降幅最大的污染物同为 NO_2 (35.2%) 和 SO_2 (11.3%) 且超 2019 年同期降幅外, $\text{PM}_{2.5}$ 明显增加(86.7%), PM_{10} 和 CO 有微升;防控初期三地的 O_3 浓度同比前期平均上升了 76.2%,增幅远超 2019 年同期水平(47.1%)。从理论上来说,受春节和元宵节假期的影响,叠加疫情严格的防控措施(限制人口流动和部分工厂停工等),防控初期大气污染物的浓度应该比 2019 年有更大的降幅。但仅天津和河北的各项污染物浓度(除 O_3)有所下降,北京市的 $\text{PM}_{2.5}$ 却不降反升,接连出现两次重污染天气,这与极端不利的气象条件导致的污染物二次转化和区域传输有关,本文在 2.2 节和 2.3 节中对其展开详细论述。

防控中期,京津冀三地的交通量和复工率仍处于较低水平,各污染物变化不同,平均 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 CO 同比初期均有下降(分别为 51.4%、16.3%、14.2% 和 44.2%) 且降幅低于 2019 年同期;但 NO_2 变化趋势不同,北京市仍然下降

(14.2%),天津和河北却逐渐增加(5.9% 和 18%);由前期到中期,北京和天津的 O_3 浓度增幅与 2019 年同期相近(平均为 36.5%),河北的增幅放缓(28.8%),同比 2019 年下降了 10%。

4 月 30 日京津冀疫情响应下降为二级之后,防控进入后期,交通量大规模增加,各行各业全面复工复产。三地的 $\text{PM}_{2.5}$ 等 5 项污染物浓度值变化趋于平缓或有微升,增幅大于 2019 年同期水平,即增长的交通量和复工率对大气污染起到了较大贡献;三地的 O_3 增幅均放缓(平均为 30.3%),同比 2019 年下降了 13%。

通过 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 O_3 这 3 种典型污染物浓度在疫情防控 4 个时期的空间分布图(图 2)可看出,前期北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度在区域内处于较低水平($42.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),初期其浓度程度虽然有升高($78.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),但仍远低于天津和河北大部分地区;中期整个地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 大幅度下降(平均为 $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),河北南部(保定、衡水、邢台和邯郸)的降幅尤为明显;后期保持平稳或有微降。 NO_2 的变化与 O_3 相反,河北南部和天津的 NO_2 在初期就有了大幅度下降并且在中后期维持在较低水平(约 32.6



图例表示浓度,单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

图 2 京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 和 O_3 浓度空间分布情况

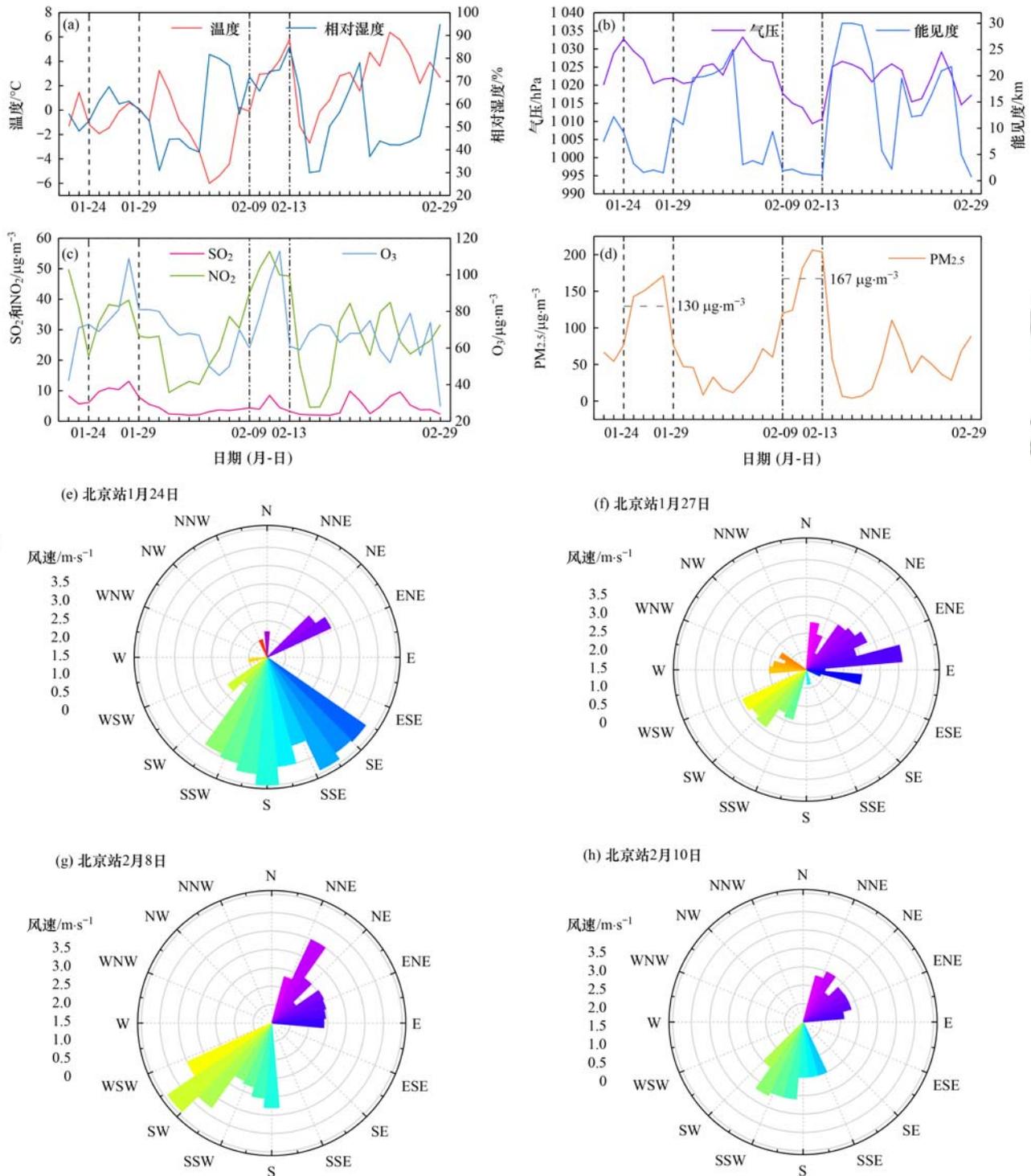
Fig. 2 Spatial pattern of $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 , and O_3 in the Beijing-Tianjin-Hebei region

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); O_3 的变化情况则为整个区域内普遍升高,逐渐成为首要的大气污染物。

2.2 大气污染物变化的气象原因

相关研究表明,大规模减少交通和工业的排量,能显著改善当地空气质量^[25,26],气象也是重要的影响因素之一^[27,28]。由图 3 可知,北京市在两次重污染期间(1月24~29日;2月9~13日)都经历了极

端不利的气象条件:首先是大气温度升高,形成逆温层,使污染物垂直扩散受阻。据气象部门公布的数据显示,2月9~13日的重污染期间,中层温度为近8年最高温度水平,逆温层造成大气边界层降低,高度由日常的1100 m左右降低到350 m左右,大气环境容量陡降七成,污染物浓度较平时增加2~4倍;其次,两次污染前(1月24日和2月8日),北京市分



(a) ~ (d) 中两处虚线内为疫情一级响应后两次重污染期; (d) 中 $130 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $167 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 分别为该时期平均值

图 3 北京市两次重污染过程期间主要大气污染物浓度和气象要素变化

Fig. 3 Changes in major air pollutant concentrations and meteorological conditions during two heavy air pollution periods in Beijing

别经历了以东南、南和西南风为主的大风天气,平均风速 $>3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 导致该方向上来自于东南通道(济南-沧州-天津输送带)和西南通道(太行山前输送带)、石家庄方向的大气污染物聚集在太行山和燕山山脉东南部的辐合中心——北京地区. 当污染物浓度达到峰值时(1月27日和2月10日), 区域受低压场控制, 平均风速在 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下, 且以东风、西南风和南风为主, 不利于污染物的水平扩散; 第三, 两个污染时间段内大气的相对湿度都出现了峰值, 分别达到 60% 和 70% 以上, 较往年均值偏高 12.2%, 为近 8 年以来最高, 高湿环境大大增强了气态污染物向 $\text{PM}_{2.5}$ 的转化能力^[29,30], 有利于 NO_x 和 SO_2 等 $\text{PM}_{2.5}$ 的前体物二次转化和吸湿性增长^[31].

虽然极低的社会经济背景使 NO_x 的排放大幅降低, 但也削弱了其对 O_3 的滴定作用^[32], 导致 O_3 快速累积, 加强了大气环境的氧化性, 加剧了 SO_2 , NO_x 、 NH_3 和 VOCs 转化为硫酸盐、硝酸盐、铵盐和二次有机气溶胶等二次细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 的能力^[33]. 而且前体物质在传输过程中也会发生二次转化反应, 加大远距离传输的贡献^[34,35].

北京市 2014 年的天气状况与 2020 年类似^[36], 农历除夕(1月30日)后, 京津冀地区受低压场控制且相对湿度较高, 边界层高度降低 184 m, 导致平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增加 39%, 二次气溶胶浓度增幅大于一次气溶胶^[37]. 尤其是 2014 年 2 月 20~26 日的严重污染过程(如图 4), $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度超过 $250 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 且持续时间近 7d. 若无近年持之以恒的治理以及疫情期间的减排, 相似条件下 2014 年 2 月的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度达到 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 而 2020 年仅为 $63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 同比偏低近 6 成, 且重污染发生频次、持续时长和峰值均有下降.

表 1 防控初期北京市本地排放与人为减排的估计值¹⁾

Table 1 Estimates of local emissions and anthropogenic emissions reduction in Beijing

项目	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	NO_2	O_3	CO
本地排放估计值	46.4	41.0	4.7	34.3	61.9	0.8
人为减排估计值	12.7	27.5	1.8	2.5	8.5	0.1
同比 2019 年变化/%	-21.5	-40.1	-28.1	-6.7	-12	-2.9
同比前期变化/%	3	-22.3	-17.5	-20.9	40.4	-5.8

1) $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 O_3 的单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, CO 的单位为 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

仅考虑人为减排对大气污染的贡献, 则同比 2019 年, 6 项污染物的初期估计浓度均有降低, PM_{10} 、 SO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的降幅最大(分别为 40.1%、28.1% 和 21.5%), 其次为 O_3 、 NO_2 和 CO(分别为 12%、6.7% 和 2.9%). 同比前期, 北京市初期 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 和 CO 估计值的浓度均有下降(分别为 22.3%、20.9%、17.5% 和 5.8%) 降幅超过 2019 年同期水平; $\text{PM}_{2.5}$ 的

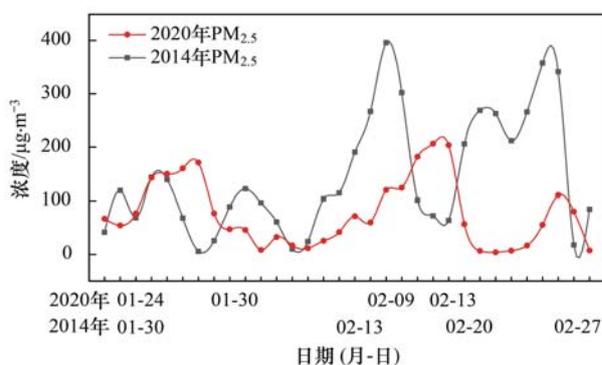


图 4 2014 年 2 月与 2019 年 2 月北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度

Fig. 4 Concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ in February 2014 and February 2020 in Beijing

2019 年, 在区域空气质量同步改善、气象条件整体有利的情况下, 北京市空气质量取得了显著的成绩, 但 2020 年的两次污染事件给人们提了醒, 京津冀及周边地区在同一空气流场内, 各城市相互影响, 空气质量一荣俱荣, 一损俱损, 若区域整体的污染情况得不到同步改善, 北京市自身减排取得的成果将在不利气象条件来临时消失殆尽. 总体来说, 区域污染物浓度仍较高叠加不利的气象条件是两次重污染天气的成因, 即空气质量是人为和自然共同作用的结果, 只有将控制区域人为排放源进行彻底管控, 才能保证当不利气象条件来临时仍然拥有优良天气.

2.3 大气污染物变化的人为原因

由于北京市在防控初期经历了极端不利的气象条件, 模糊了各项污染物的本地排放浓度和防控措施对减排的贡献, 故采用减排效应估算的方法, 剔除不利天气的影响. 将 2019 年和 2020 年前期和初期 6 项大气污染物浓度代入公式(1)和公式(2), 计算结果如表 1.

由表 1 可知, 若剔除防控初期不利天气的影响,

估计值浓度微升(3%)但增幅同比低于 2019 年(5.3%); O_3 估计值同比前期增加 40.4%, 增幅与 2019 年相当(40.3%). 这表明控制人为源排量对大气污染治理有十分明显的作用, 即北京市进一步的治理措施应继续以控制交通和工业排放为主.

夜光遥感主要捕捉的是车辆的路灯和工厂的灯光, 从灯光角度衡量经济复苏情况, 可对所在区域的

生产情况起到较好的表征作用^[38]. 利用京津冀 2020 年春节假期后两周(2 月 7~19 日)夜光遥感的亮度平均值与不同样本期灯光亮度进行对比,结果如表 2,即受疫情影响,京津冀三地 2020 年春节后的经济恢复强度小于 2019 年,平均经济活跃程度下降了

表 2 京津冀夜光强度变化幅度

Table 2 Variations in nighttime light in the Beijing-Tianjin-Hebei region

城市	与 2019 年节前节后平均对比		与 2020 年节前对比		与 2019 年全样本平均值对比	
	差值/cm ⁻² ·sr ⁻¹	变化幅度/%	差值/cm ⁻² ·sr ⁻¹	变化幅度/%	差值/cm ⁻² ·sr ⁻¹	变化幅度/%
北京	-12.2	-4.6	-93	-36.4	-30.6	-3.2
天津	-18.7	-7.1	-38	-10.9	-14.4	-1.7
河北	-59.1	-24.4	-164	-44.3	-11.4	-4.6

如图 5,在疫情防控开始以后,京津冀三地客货运量在 2 月显著降低,规模以上工业增加值增速平均下降 12.8% (天津数据缺失); 3 月后,随着复工复产进一步扩大,客货运量逐渐回升,北京和天津的工业增加值增速也缓慢回升,但仍低于 -5%,河北省工业增加值增速较快,5 月已达到 2019 年同期水平.

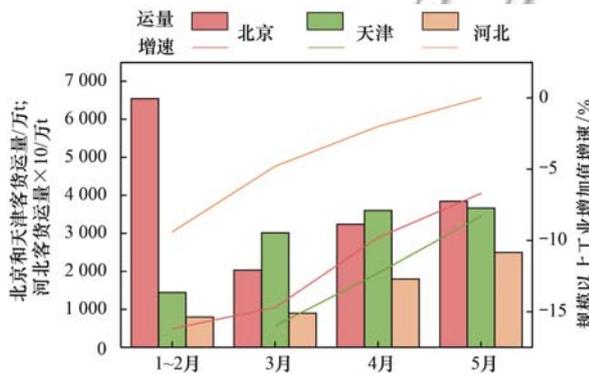


图 5 京津冀客货运量和规模以上工业增加值增速

Fig. 5 Growth in passenger volumes, freight transport, and industrial enterprises above the designated size (20 million RMB of annual major business revenue) in the Beijing-Tianjin-Hebei region

工业热异常点的数量可以表示工业生产的空间分布以及变化特征,辐射强度大小可以表征工业生产规模及能源消费情况,间接反映空气质量状况^[24]. 河北省产业结构偏重,以火力发电、钢铁和水泥等高污染高耗能的重工业为主^[39,40],这类行业因为存在不可中断的生产工序,疫情期间基本没有停产.图 6 为 2020 年 1~6 月工业热异常点分布和辐射强度的核密度变化情况,总体看来,热异常点多分布在唐山、天津和邯郸三座重工业城市.1~2 月辐射强度较低,3 月后辐射强度大幅度增加,相应地工业耗能量变大,大气污染排放量也变大.表 3 为热异常点的数量和唐山、天津及邯郸三市的辐射强度提取结果.从数量上看,2 月比 1 月增加了 31%,3 月比 2 月增加了 156%,4~6 月热异常点的数量基本

12% 以上,且就部分工厂而言,复工率还需等待员工结束隔离具备开工条件后才能逐步提升.这也与疫情初期 AQI 值和各类污染物(除 O₃)降幅超过 2019 年同期相对应,说明控制人类活动,可有效降低大气污染物的人为源排放,提高空气质量.

稳定或微升;从辐射能量看,2 月唐山和天津的值显著降低,邯郸略降,3 月后三地的辐射能量逐渐升高.

表 3 京津冀工业热异常点数量和唐山、天津和邯郸三市的辐射强度

Table 3 Thermal anomalies in the Beijing-Tianjin-Hebei region and radiation intensities in Tangshan, Tianjin, and Handan

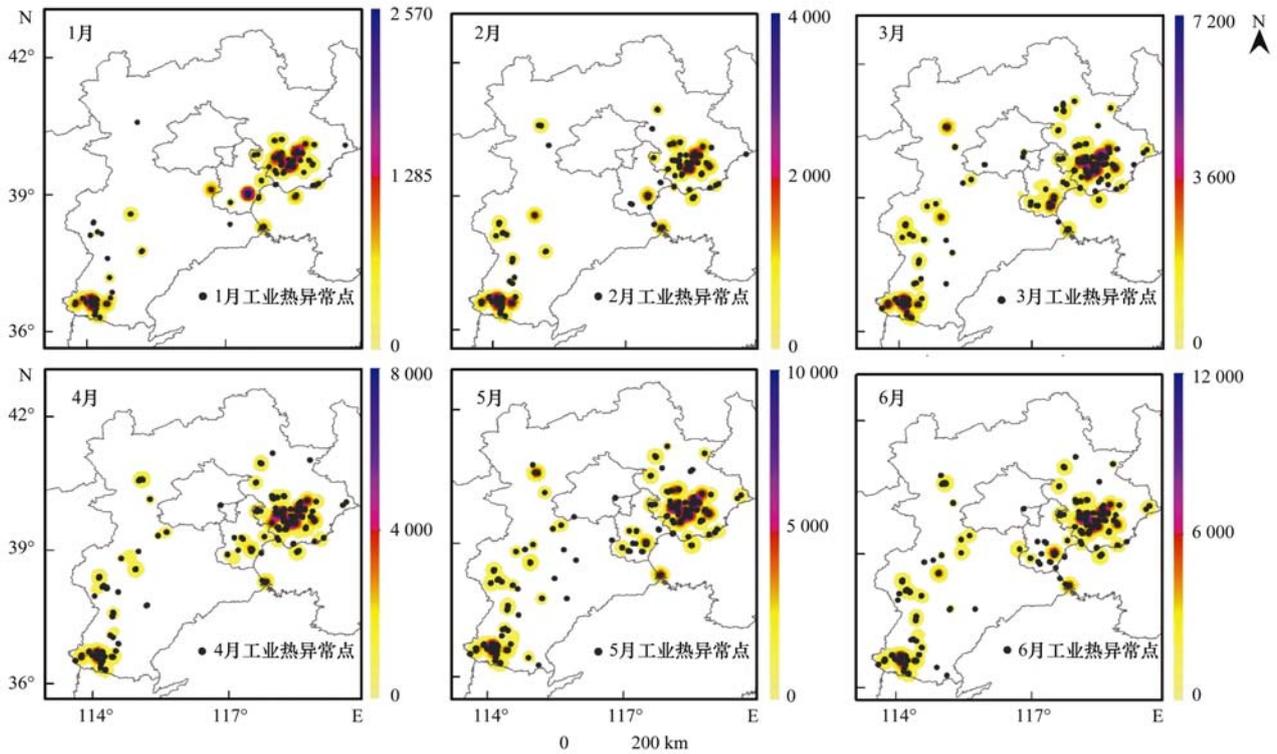
月份	京津冀工业热异常点数量/个	辐射强度/MW		
		唐山	天津	邯郸
1	629	1.69	2.74	1.59
2	825	1.32	1.73	1.55
3	2 114	1.65	1.69	1.54
4	2 529	1.91	2.04	1.52
5	2 569	1.84	2.43	1.51
6	2 572	1.89	2.09	1.81

将唐山、天津和邯郸三市 1~6 月的辐射强度与空气质量指标中的 PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 月平均浓度进行灰色关联度分析,得到热异常点辐射强度和各指标的关联度(表 4).在唐山和邯郸,灰色关联度从大到小依次为:PM₁₀ > NO₂ > SO₂,天津则为 SO₂ > PM₁₀ > NO₂,各项指标与辐射强度的关联度均大于 0.6,表明分析变量间的相关程度高,即大气污染物浓度的变化受工业源排放的影响程度显著.2~3 月,受疫情影响,部分工业的复工复产有所延迟,相应地大气污染排放比 2019 年同期有所降低,但随着复工规模扩大,相应地工业大气污染排放增加,各污染物浓度的增幅大于 2019 年同期水平.总而言之,控制工业的污染物排量仍是治理大气污染的关键,应继续

表 4 唐山、天津、邯郸三市工业热异常点辐射强度与空气质量灰色关联度

Table 4 Grey relation coefficients between radiation intensity and air quality in Tangshan, Tianjin, and Handan

指标	灰色关联度		
	唐山	天津	邯郸
SO ₂	0.60	0.75	0.64
NO ₂	0.66	0.66	0.71
PM ₁₀	0.76	0.72	0.78



图例表示浓度,单位为 $\text{MW}\cdot\text{km}^{-2}$
图 6 工业热异常点与辐射强度的核密度

Fig. 6 Kernel density of thermal radiation anomalies in the Beijing-Tianjin-Hebei region

推进产业结构调整,严格控制高耗能、高排放的企业产能,大力化解过剩产能和淘汰落后产能。

3 讨论

京津冀地区大气污染物浓度受本次疫情影响所呈现出的变化规律,能给进一步治理大气污染带来一些启示:其一,北京市易受西南和东南通道污染物传输的影响,故仅控制本市减排起到的效果很不稳定,必须进一步加强区域联防联控,争取将不利天气带来的影响降到最低。其二,现在的大气污染具有明显的复合型特征, O_3 和二次 $\text{PM}_{2.5}$ 同根同源,一体两面,根本原因是多种污染物的高强度排放。若区域 VOCs 和 NO_x 等 O_3 前体物质变化比例不一致,则有可能导致局地 O_3 污染加重。故下一步应准确定量分析城市-区域-全国等不同空间尺度上的 O_3 来源,科学指导 VOCs 和 NO_x 等多种污染物的协同减排。

由于无法获取到各项大气污染物的痕量组分数据,本文分析的污染物区域传输和二次转化仅从风向、风速和温度湿度等气象条件判断,并不十分准确,故北京市两次重污染天气的区域传输和二次转化贡献情况还需结合组分数据建模进行精确分析。

Berman 等^[41]研究了美国疫情封锁期间的 NO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化情况,发现二者在城市有较大幅度地下降,在乡村变化不明显。京津冀的空气质量监测

站大多分布在城区,故无法获取广大农村地区的各项污染物数据,无法进行此项对比。建议布设更为均衡的监测站点,结合城市和农村的具体情况制定更有针对性的减排方案。

4 结论

(1)从总体上看,京津冀地区在疫情防控期间的 AQI 值和各类污染物平均浓度与 2019 年同期相比均有下降,降幅最大的污染物为 SO_2 (26.5%)、 PM_{10} (24.3%) 和 NO_2 (16.9%)。

(2)由防控初期到后期,受疫情管控措施变化影响,各污染物(除 O_3)变化不一致但整体上仍处于下降趋势(河北南部和天津等重工业城市变化幅度最大);区域 O_3 浓度一直处于上升趋势,且初期增幅大(76.2%),中后期增幅放缓。

(3)防控初期北京市的重污染天气是污染物本地积累、区域传输和二次转化共同作用的结果。在相似的气象条件下,2020 年 2 月的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度($63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)同比 2014 年 2 月($150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)偏低近 6 成。若剔除不利气象因素,仅考虑人为管控措施对减排的影响,则初期北京市 6 项污染物的浓度比 2019 年同期均有下降。

(4)受管控措施影响,京津冀地区春节后的平均经济活跃度比 2019 年同期下降了 12% 以上;防

控中后期,随着交通量和工业复工进一步扩大,三地的各类污染物变化趋于平缓或有微升. 唐山、天津和邯郸三个重工业城市的热异常点辐射强度与 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_2 的浓度的灰色关联度结果均大于 0.6, 即控制工业排量仍是治理大气污染的关键.

致谢: 中国环境监测总站提供了地面环境空气质量监测数据, 中国气象数据网提供了气象数据, 北京统计局、天津统计局和河北统计局提供了客货运量和规模以上工业增加值增速数据, NASA 官网提供了夜光遥感、热异常点和辐射强度数据, 在此一并致谢.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Ding A J, Huang X, Nie W, *et al.* Significant reduction of $PM_{2.5}$ in eastern China due to regional-scale emission control: evidence from SORPES in 2011-2018 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(18): 11791-11801.
- [3] Huang X, Ding A J, Gao J, *et al.* Enhanced secondary pollution offset reduction of primary emissions during COVID-19 lockdown in China [J]. *National Science Review*, 2020, doi: 10.1093/nsr/nwaa137.
- [4] Tian H Y, Liu Y H, Li Y D, *et al.* An investigation of transmission control measures during the first 50 days of the COVID-19 epidemic in China [J]. *Science*, 2020, **368**(6491): 638-642.
- [5] Wang C, Horby P W, Hayden F G, *et al.* A novel coronavirus outbreak of global health concern [J]. *The Lancet*, 2020, **395**(10223): 470-473.
- [6] Wilder-Smith A, Freedman D O. Isolation, quarantine, social distancing and community containment: pivotal role for old-style public health measures in the novel coronavirus (2019-nCoV) outbreak [J]. *Journal of Travel Medicine*, 2020, **27**(2), doi: 10.1093/jtm/taaa020.
- [7] Wang S L, Gao J, Zhang Y C, *et al.* Impact of emission control on regional air quality: an observational study of air pollutants before, during and after the Beijing Olympic Games [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(1): 175-180.
- [8] 刘奇琛, 黄婧, 郭斌, 等. 2014 年 APEC 会议期间排放控制措施对大气污染物浓度的影响 [J]. *首都公共卫生*, 2017, **11**(5): 220-224.
Liu Q C, Huang J, Guo B, *et al.* Investigation of emission control measures' impacts on air pollutants in Beijing during the 2014 Asia-Pacific Economic Cooperation [J]. *Capital Journal of Public Health*, 2017, **11**(5): 220-224.
- [9] He M Z, Kinney P L, Li T T, *et al.* Short- and intermediate-term exposure to NO_2 and mortality: a multi-county analysis in China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114165.
- [10] 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.
- [11] Chang Y H, Huang R J, Ge X L, *et al.* Puzzling haze events in China during the Coronavirus (COVID-19) shutdown [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(12), doi: 10.1029/2020GL088533.
- [12] Li X R, Wang L L, Ji D S, *et al.* Characterization of the size-segregated water-soluble inorganic ions in the Jing-Jin-Ji urban agglomeration: spatial/temporal variability, size distribution and sources [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **77**: 250-259.
- [13] 耿彦红, 刘卫, 单健, 等. 上海市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布特征 [J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(12): 1585-1589.
Geng Y H, Liu W, Shan J, *et al.* Characterization of major water-soluble ions in size-fractionated particulate matters in Shanghai [J]. *China Environmental Science*, 2010, **30**(12): 1585-1589.
- [14] Wang Y S, Li W J, Gao W K, *et al.* Trends in particulate matter and its chemical compositions in China from 2013-2017 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62**(12): 1857-1871.
- [15] GB 3095-2012, 环境空气质量标准 [S].
- [16] HJ 663-2013, 环境空气质量评价技术规范(试行) [S].
- [17] Xia H P, Chen Y H, Quan J L. A simple method based on the thermal anomaly index to detect industrial heat sources [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, **73**: 627-637.
- [18] Elvidge C D, Zhizhin M, Baugh K, *et al.* Methods for global survey of natural gas flaring from visible infrared imaging radiometer suite data [J]. *Energies*, 2016, **9**(1): 14.
- [19] 魏延生. 基于 POI 和滴滴出行数据的人们打车需求分析——以北京市核心区域为例 [D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2018.
Wei Y S. Study on demand of taxi based on Didi and POI data-taking Beijing Central region as an example [D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Science, 2018.
- [20] 蒋姝睿, 王玥, 王萌, 等. 区域视角下中国工业行业与工业污染关系 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(11): 4380-4387.
Jiang S R, Wang Y, Wang M, *et al.* Industrial sectors and pollution in China based on the regional perspective [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(11): 4380-4387.
- [21] 刘思峰, 谢乃明. 灰色系统理论及其应用 [M]. (第六版). 北京: 科学出版社, 2013.
- [22] Xie R, Sabel C E, Lu X, *et al.* Long-term trend and spatial pattern of $PM_{2.5}$ induced premature mortality in China [J]. *Environment International*, 2016, **97**: 180-186.
- [23] 湛社霞. 粤港澳大湾区常规大气污染物变化趋势与影响因素研究 [D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2018.
Zhan S X. Research on changing trend and influencing factors of conventional air pollutants in Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, 2018.
- [24] 孙爽, 李令军, 赵文吉, 等. 基于热异常遥感的冀南城市群工业能耗及大气污染 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 3120-3129.
Sun S, Li L J, Zhao W J, *et al.* Industrial pollution emissions based on thermal anomaly remote sensing monitoring: a case study of Southern Hebei urban agglomerations, China [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 3120-3129.
- [25] Zhang R X, Zhang Y Z, Lin H P, *et al.* NO_x emission reduction and recovery during COVID-19 in east China [J]. *Atmosphere*, 2020, **11**(4): 433.
- [26] Bauwens M, Compornolle S, Stavrakou T, *et al.* Impact of coronavirus outbreak on NO_2 pollution assessed using TROPOMI

- and OMI observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(11), doi: 10.1029/2020GL087978.
- [27] 王晓琦, 郎建垒, 程水源, 等. 京津冀及周边地区 PM_{2.5} 传输规律研究[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(11): 3211-3217.
Wang X Q, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Study on transportation of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) and its surrounding area[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(11): 3211-3217.
- [28] Huang F F, Li X, Wang C, *et al.* PM_{2.5} Spatiotemporal variations and the relationship with meteorological factors during 2013-2014 in Beijing, China[J]. *PLoS One*, 2015, **10**(11), doi: 10.1371/journal.pone.0141642.
- [29] Li W G, Liu X G, Zhang Y H, *et al.* Characteristics and formation mechanism of regional haze episodes in the Pearl River Delta of China[J]. *Journal of Environmental Science*, 2018, **63**: 236-249.
- [30] 李令军, 王占山, 张大伟, 等. 2013~2014年北京大气重污染特征研究[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1): 27-35.
Li L J, Wang Z S, Zhang D W, *et al.* Analysis of heavy air pollution episodes in Beijing during 2013~2014[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 27-35.
- [31] Rahman A, Luo C X, Khan M H R, *et al.* Influence of atmospheric PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, CO, NO₂, SO₂, and meteorological factors on the concentration of airborne pollen in Guangzhou, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **212**: 290-304.
- [32] Shi X Q, Brasseur G P. The response in air quality to the reduction of Chinese economic activities during the COVID-19 outbreak[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(11), doi: 10.1029/2020GL088070.
- [33] Sun Y L, Lei L, Zhou W, *et al.* A chemical cocktail during the COVID-19 outbreak in Beijing, China: Insights from six-year aerosol particle composition measurements during the Chinese New Year holiday[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **742**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140739.
- [34] 彭功, 赵媛媛, 赵吉麟, 等. 京津冀大气污染传输通道区大气污染时空格局研究[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(2): 449-458.
- Peng L, Zhao Y Y, Zhao J L, *et al.* Spatiotemporal patterns of air pollution in air pollution transmission channel of Beijing-Tianjin-Hebei from 2000 to 2015 [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(2): 449-458.
- [35] 郎建垒. 基于大气污染物总量控制的区域污染源分级与优化减排技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
- [36] 许万智, 蔡菁菁, 陈仲榆, 等. 2014年2月华北地区一次重污染天气过程的综合分析[A]. 见: 2014中国环境科学学会学术年会论文集[C]. 成都: 中国环境科学学会, 2014. 485-491.
- [37] Li J W, Han Z W, Wu Y F, *et al.* Aerosol radiative effects and feedbacks on boundary layer meteorology and PM_{2.5} chemical components during winter haze events over the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(14): 8659-8690.
- [38] 李德仁, 李熙. 夜光遥感技术在评估经济社会发展中的应用——兼论其对“一带一路”建设质量的保障[J]. *宏观质量研究*, 2015, **3**(4): 1-8.
Li D R, Li X. Applications of night-time light remote sensing in evaluating of socioeconomic development[J]. *Journal of Macro-Quality Research*, 2015, **3**(4): 1-8.
- [39] 王慧丽, 雷宇, 陈潇君, 等. 京津冀燃煤工业和生活锅炉的技术分布与大气污染物排放特征[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(10): 1510-1517.
Wang H L, Lei Y, Chen X J, *et al.* Technology distribution and air pollutant emissions from Coal-Fired boilers for industrial and residential use in Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(10): 1510-1517.
- [40] 伯鑫, 徐峻, 杜晓惠, 等. 京津冀地区钢铁企业大气污染影响评估[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(5): 1684-1692.
Bo X, Xu J, Du X H, *et al.* Impacts assessment of steel plants on air quality over Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(5): 1684-1692.
- [41] Berman J D, Ebisu K. Changes in U.S. air pollution during the COVID-19 pandemic [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **739**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139864.

CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing, <i>et al.</i>	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses; A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou, <i>et al.</i>	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian, <i>et al.</i>	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage-polysylls to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinooides</i> Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong, <i>et al.</i>	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)