

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2021022402

刘跃斌, 张远, 张逸冰, 等. 邯郸市新冠疫情前后空气质量指数 (AQI) 对比与疫情防控期间大气污染特征分析[J]. 环境化学, 2021, 40(12): 3743-3754.

LIU Yuebin, ZHANG Yuan, ZHANG Yibing, et al. Comparison of air quality index (AQI) before and after COVID-19 in Handan City and analysis of air pollution characteristics during COVID-19 prevention and control[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40 (12): 3743-3754.

邯郸市新冠疫情前后空气质量指数 (AQI) 对比与 疫情防控期间大气污染特征分析*

刘跃斌¹ 张远¹ 张逸冰¹ 梁轶群¹ 朱雪凝¹
兰建林¹ 牛红亚^{1,2} 樊景森^{1,2 **}

(1. 河北工程大学 地球科学与工程学院, 邯郸, 056038; 2. 河北工程大学 河北省煤炭资源开发与
利用协同创新中心, 邯郸, 056038)

摘要 2020年初 COVID-19 疫情爆发, 我国采取一系列管控措施使大气污染物排放量明显降低. 为了解疫情期间减排活动下邯郸市大气污染特征, 采用统计学变量分析方法与特征雷达图对疫情爆发前 (12月、1月)、疫情防控期间 (2—4月)、疫情防控后 (5月、6月) 以及2019年同期大气污染情况进行对比分析. 并进一步估算防控期间大气污染物的减排量, 通过后向轨迹聚类分析气团的迁移轨迹来探讨人为减排对空气质量的影响. 结果表明, 2020年2月疫情管控开始后, 环境空气质量与2019年同期相比明显好转, 2月份AQI值降幅约为50%, 3、4月份两年差距逐渐缩小; 疫情防控期间较疫情爆发前空气质量也有较大幅度提升, 防控结束后AQI值有小幅度回弹; 防控期间PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO的日平均浓度值均有较大幅度下降, 在2月份下降最为明显, 降幅分别为51%、55%、62%、41%、33%; O₃ 8h平均浓度与气温呈显著正相关 (0.747), 疫情期间浓度呈上升趋势, 在4月底达到的峰值 (238 μg·m⁻³). 北京市空气污染相对较轻, 邯郸市与石家庄市较为严重, 整体上受颗粒物的污染较明显. 邯郸市2、3、4月份特征雷达图属于偏复合型, 2月燃煤、生物质燃烧排放的污染物偏高, 4月份来自工厂的NO₂和SO₂浓度偏高. 疫情防控前期各污染物排放量均有较大幅度降低, 与2019年2月的气团移动轨迹来源特征相似, 说明人为减排对环境空气质量提升效果显著.

关键词 COVID-19 疫情, 邯郸市, 减排效应, 空气质量.

Comparison of air quality index (AQI) before and after COVID-19 in Handan City and analysis of air pollution characteristics during COVID-19 prevention and control

LIU Yuebin¹ ZHANG Yuan¹ ZHANG Yibing¹ LIANG Yiqun¹ ZHU Xuening¹
LAN Jianlin¹ NIU Hongya^{1,2} FAN Jingsen^{1,2 **}

2021年2月24日收稿(Received: February 24, 2021).

* 国家自然科学基金 (41807305), 河北省重点研发计划项目 (19273705D), 河北省教育厅百名优秀创新人才支持计划项目 (SLRC2019021), 河北省杰出青年科学基金 (D2018402147) 和河北省高等学校科技研究重点项目 (ZD2017015) 资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (41807305), Hebei Provincial Key Research and Development Program (19273705D), Hundred Excellent Innovative Talents of Education Department of Hebei Province (SLRC2019021), Science Foundation for Distinguished Youth of Hebei Province (D2018402147) and Key Project of Science and Technology Research of Higher Education Institutions of Hebei Province (ZD2017015).

** 通讯联系人 **Corresponding author**, Tel: 15373102118, E-mail: fanjingsen@hebeu.edu.cn

(1. Hebei University of Engineering School of Earth Science and Engineering, Handan, 056038, China; 2. Hebei University of Engineering Hebei Collaborative Innovation Center of Coal Resources Development and Utilization, Handan, 056038, China)

Abstract The COVID-19 epidemic have been broken out in early 2020, and China took a series of control measures to significantly reduce the emission of air pollutants during the epidemic. In order to understand their pollution characteristics in Handan city under the emission reduction during the epidemic period, statistical variable analysis method and characteristic radar map were used to analyzed the air pollution situation before the outbreak (December-2019 and January-2020), during the prevention and control period (February to April-2020), after the prevention and control period (May and June-2020) and compared with the same period of 2019. The impact of anthropogenic emission reduction on air quality was discussed through backward trajectory clustering analysis of air mass migration trajectory. Our results showed that after the outbreak control began in February-2020, the air quality was significantly improved compared with the same period in February-2019. The AQI value was decreased by approximately 50% in February, and the gap between March and April gradually narrowed. During the prevention and control period in February, the average concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂ and CO were decreased significantly as 51%, 55%, 62%, 41%, and 33%, respectively. During in these period, mean concentration of O₃ for 8 h was significantly positively correlated with air temperature (0.747). O₃ concentration was increased during the epidemic period and reached the peak at the end of April (238 μg·m⁻³). On the whole, air pollution by particulate matter is more obvious. The characteristic radar map of Handan city in February, March and April is relatively comprehensive. During February, the pollutants discharged from coal burning and biomass combustion are on the high side, while the NO₂ and SO₂ concentration from factories is on the high side in April. In the early stage of epidemic prevention and control, the emission of all pollutants were decreased significantly, which was similar to the air mass movement trajectory and source characteristics in February-2019, indicating that man-made emission reduction had a significant impact on the improvement of air quality.

Keywords COVID-19 epidemic, Handan City, abatement effect, atmosphere quality.

京津冀及周边地区的大气环境情况在全国范围内污染情况最为严重, 针对该地区的大气污染情况, 我国发布了《大气污染防治行动计划》与《京津冀及周边地区 2017 年大气污染防治工作方案》两条国家政策对空气质量进行监督和治理, 同时京津冀地区已采取多种措施提升大气环境质量. 从 2016—2017 年跨年的一次重污染事件到 2020 年初, 京津冀及周边地区主要大气污染物排放量大幅下降 50%^[1]. 2020 年疫情期间在管控措施下, 京津冀地区平均经济活跃度比 2019 年同期下降 12% 以上^[2]. 邯郸市作为京津冀大气污染传输通道中的核心城市, 已采取削煤、压减产能、减排、降尘等多种大气污染防治对策使得大气污染水平整体改善^[3]. 2020 年年初, 新冠疫情爆发, 我国生产活动水平大幅度降低, 大气污染物排放量也相应减少, 这为研究邯郸市人类活动对大气环境的影响创造了机会

研究表明, 邯郸市主要污染源为工业源, 2016 年工业排放的 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、CO、VOCs 分别占总排放量的 74.5%、54.5%、30.6%、76.7% 和 28.1%^[4]. 2017 年 10 月到 2018 年 3 月期间发生过 3 次重污染过程, 其中都以细颗粒物污染为主, 污染期间烟花燃放与有机气溶胶二次转化贡献较大^[5]. 邯郸市每年 AQI 值均在冬季采暖期达到最高, 且首要污染物为 PM_{2.5} 和 PM₁₀^[6]. 对 2008 年奥运会和 2014 年 APEC 会议期间排放控制措施对大气污染物浓度影响的研究可知, 在排放控制措施下, 大气颗粒物和气态污染物浓度可以出现较大幅度降低^[7-8]. 不过也有研究表明, 节能减排并未使重污染天气消失^[9], 因为不利的气象条件和二次污染的加强会抵消一次污染物排放量降低的效果^[10-11]. 据姚祎等的研究可知, 新冠疫情期间北京市空气质量在管控措施实施初期大气环境并未有明显的改善^[12].

2020 年春节前后邯郸市大部分市区禁止燃放烟花爆竹, 疫情期间, 邯郸市及周边地区化石燃料燃烧也明显减少, 汽车尾气排放也相对降低. 本次研究对邯郸市疫情期间大气环境情况进行着重分析, 分别与疫情爆发前、疫情一级防控结束后的大气情况以及 2019 年同期大气环境情况进行对比, 分析疫情爆发前后及疫情期间减排活动下邯郸市大气污染特征.

1 实验部分(Experimental section)

1.1 数据来源

本次研究使用的数据来源于邯郸市环境空气质量 4 个国控站点(东污水处理厂、环保局、丛台公园、矿院)和 37 个省控站点的监测资料, 数据来自中国环境监测总站(<http://106.37.208.233:20035/>). 邯郸市地理位置与邯郸市各监测站点的分布位置见图 1. 监测的时间段为 2018 年 12 月—2019 年 4 月、2019 年 12 月—2020 年 4 月. 通过计算各点位 24 h 平均浓度值的算术平均值获得邯郸市 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的日平均浓度, 计算各点位 O_3 日最大 8 h 平均浓度值的算术平均值作为邯郸市 O_3 的日评价指标.

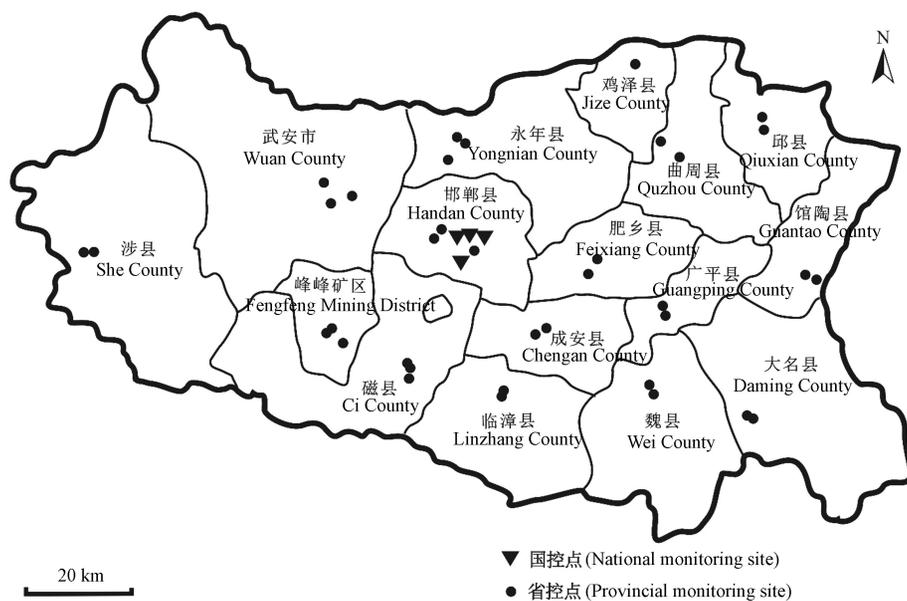


图 1 邯郸市位置及邯郸市各站点位置分布图
Fig.1 Location distribution of stations in Handan City

1.2 疫情防控阶段划分

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, 限制人口非必要流动, 4 月 30 日三地的疫情响应措施调整至二级^[2]. 本次研究将对疫情防控前(12 月、1 月), 疫情防控期间(2、3、4 月)及疫情一级防控后(5、6 月)进行大气污染特征分析.

1.3 分析方法

1.3.1 统计学变量分析

通过各站点数据求得邯郸市各污染物日平均浓度(M), 计算各污染物间的相关系数(R), 分析各污染物浓度变化的基本特征并讨论各污染物之间的相关性.

$$A = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_i \quad (1)$$

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(P_i - \bar{P}) \times (O_i - \bar{O})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (3)$$

式中, A 为邯郸市有效监测数据点位的日平均污染物浓度或气象要素值; X_i 为第 i 时刻污染物浓度或气象要素值; m 为时间序列的长度, h ; n 为邯郸市有效数据点位数量; P_i 、 O_i 为第 i 时刻的两种污染物浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; \bar{P} 、 \bar{O} 为两种污染物浓度的平均值, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

1.3.2 特征雷达图

依据段菁春等^[13]设计的特征雷达图分析方法,对数据进行归一化处理,求得2、3、4月份邯郸市的归一化成分谱与各污染物的特征值,计算邯郸市疫情期间污染物特征标准值及上、下限值,后进行特征雷达图的绘制与分析.监测数据通过归一化处理,可以有效解决污染物浓度变化和不同污染物的浓度值在数值上的数量级差异问题.依据特征雷达图,可在时间序列上明确判断出偏沙尘污染型、偏燃煤污染型、偏二次颗粒物污染型、偏机动车污染型、偏烟花污染型等多个污染类型^[13].

1.3.3 减排效应估算

为了解邯郸市在疫情期间生产水平下降情况下的减排效应,通过公式(4)估算在无疫情影响下2020年疫情期间的污染物排放浓度,然后通过实际的污染物浓度与估算的浓度差值近似表现出疫情期间的减排情况.根据中国气象网中公布的气象数据可知,2020年疫情期间与2019年同期气象情况相差不大,因此不考虑气象条件影响.

$$C_{X2020\text{估算}} = C_{2020\text{前期}} \times (C_{X2019}/C_{2019\text{前期}}) \quad (4)$$

$$C_{2020\text{年}X\text{月份减排估算}} = C_{X2020\text{估算}} - C_{X2020} \quad (5)$$

其中, C_X 表示 X 月份污染物浓度 (X 取 2、3、4), $C_{2020\text{前期}}$ 表示 2019 年 12 月与 2020 年 1 月的平均浓度值, $C_{2019\text{前期}}$ 表示 2018 年 12 月与 2019 年 1 月的平均浓度值.

1.3.4 后向轨迹聚类分析

采用 Meteoinfo 软件对邯郸市 2019 年 2 月与 2020 年 2 月的气团移动轨迹进行分析, Meteoinfo 是一套用于气象数据可视化和分析的软件工具^[14], 通过将 NCEP 的 GDAS 气象资料导入后, 计算每天 00:00—23:00 共 24 个小时的后向轨迹, 运行时间为 24 h, 据研究, 500 m 高度的风场既能减少地面摩擦对于气流轨迹的影响, 又能更准确地反映近地层的气团输送特征^[15-16], 因此研究过程中将轨迹计算的起点高度设为 500 m, 然后按照软件中聚类分析方法将 672 条轨迹 (2020 年为 696 条) 聚合成 6 类, 从而获得邯郸市不同年份气团来源的特征, 分析其污染物来源情况.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 邯郸市疫情前后大气污染特征对比

2.1.1 空气质量对比分析

自 COVID-19 疫情爆发后, 我国采取了一系列防护措施, 在 2020 年 1 月底我国政府要求居民减少非必要外出, 各大工厂企业停工停产, 2020 年年初大气污染物排放量较 2019 年同期明显减少, 整个京津冀地区空气质量较去年明显改善^[1]. 表 1 为两年不同疫情阶段 AQI 均值与峰值对比与达到重度及以上污染的天数, 图 2 为不同时间段邯郸市 AQI 值与上一年同期对比. 其中 AQI 值通过《HJ633—2012 环境空气质量指数 AQI 技术规定 试行》中给出的方法计算得出.

表 1 2019 与 2020 年不同疫情阶段 AQI 均值与峰值对比

Table 1 Comparison of AQI averages at different epidemic stages in 2019 and 2020

年份 Year	12月—1月			2月—4月			5月—6月		
	平均值 Average	峰值 Peak	重度及以上 Severe and above	平均值 Average	峰值 Peak	重度及以上 Severe and above	平均值 Average	峰值 Peak	重度及以上 Severe and above
2019	149.60	313	14 d	120.45	388	12 d	124.69	206	1 d
2020	156.76	384	19 d	84.61	223	2 d	105.21	201	1 d

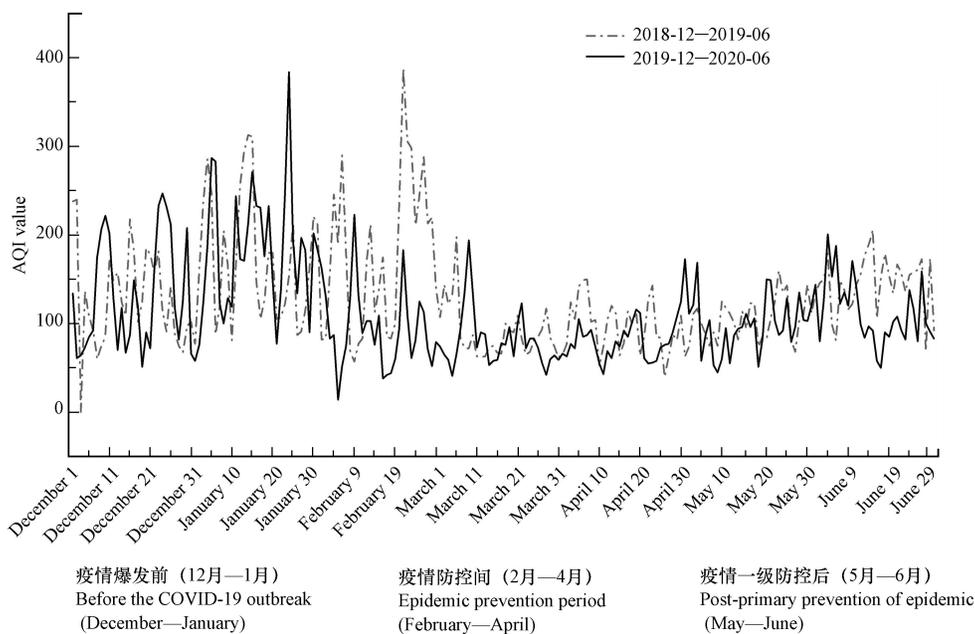


图2 不同时间段邯郸市AQI值与上一年同期对比

Fig.2 Comparison of Handan's AQI value in different time periods with the same period of the previous year

由表1可知,2020年疫情爆发之前的两个月内有19d的环境空气质量在重度及以上污染级别(AQI>200),其中1月24日达到严重污染,污染持续时间为1d.上一年同期的两个月中环境空气质量在重度及以上污染级别的天数有14d,严重污染的天数为2d.对比可得,2019年年底到2020年年初与上一年的大气环境情况相比达到重度污染及以上的天数增加了5d,其中严重污染事件的峰值较上一年要高出许多,不过严重污染持续时间较上一年明显缩短.疫情爆发之前邯郸市各产业均正常运行,污染物排放量较大,加上静风天气较多,污染物难以迁移,导致污染程度严重.

由图2中2020年疫情防控期间(2月—4月)AQI值与2019年同期对比可以很直观地看出,2020年春季与2019年相比AQI值有较大幅度下降,从2020年2月份开始明显低于2019年同期的数值,这两年数值中2月5日与2月22日两天AQI值差距最大,差值均为238.3,4月份差距相对较小.说明疫情期间空气质量改善与我国采取的疫情防控措施有一定关系:2月份左右居民减少非必要外出,邯郸市及附近大型工厂企业均未开工,污染物排放量也随之降低,空气质量有所改善.邯郸市于3月初开始复工复产,工厂企业污染物开始排放,两年空气质量差距也逐渐缩小.

疫情防控结束后,2020年5月和2019年5月的AQI变化范围逐渐趋于一致,数值与冬季相比大幅度减小.2020年6月中旬AQI值有较大幅度降低,与去年同期相比空气质量明显改善.

根据表1中不同阶段的AQI平均值计算结果可知,2020年疫情管控开始之前AQI平均值为156.76,比2019年同期高出4.79%,结合图2可知在2020年1月24日甚至还出现了严重污染事件,整体上空气质量较差.疫情管控措施实施后,2020年与去年相比空气质量有明显的改善,AQI指数降幅约为42.36%,其中2月份降幅最为显著,3、4月份两年的差距相对较小.疫情一级防控后随着邯郸市的复工复产,AQI指数有所回弹,5、6月份的AQI平均值增长到105.21,不过仍小于去年同期的平均值.邯郸市空气质量指数呈周期性变化,一次周期时长为8—10d,邯郸市每年春季中每个周期的AQI峰值与均值与上一年冬季相比数值都有较大幅度降低,据宋晓辉等^[6]研究可知这是由于邯郸市冬季采暖期降水少,温度低,局部逆温强,静稳天气指数高,致使邯郸市采暖期空气质量要明显差于其他季节.

2.1.2 各污染物浓度对比分析

图3为邯郸市疫情防控期间与2019年同期的AQI值和PM_{2.5},PM₁₀等6项大气污染物的日平均浓度变化对比.由图3可知,2020年与2019年相比除O₃外各类污染物排放均有所降低,PM_{2.5}与PM₁₀浓度有很大幅度的下降,降幅分别为51%、55%.经相关性计算可知,两者浓度变化相关性显著

(0.803), 可见颗粒物的来源具有一致性. 2019年2、3、4月份邯郸市 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度有 37 d 超过 GB3095—2012《环境空气质量标准》中二级标准限值($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 而 2020年超过二级标准限值的只有 14 d. PM_{10} 日均浓度超过 GB3095—2012《环境空气质量标准》中二级标准限值($150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的天数有 32 d, 2020年数据与之相比减少了 28 d, 由此可见大幅度的减少污染物排放是十分高效的大气环境保护措施. 与 2019年相比, 2020年的 SO_2 、 NO_2 、 CO 日平均浓度值也有下降, 其中 2月份下降最为明显, 降幅分别为 62%、41%、33%. 3、4月份差距相对较小. 疫情管控初期, 来自工厂燃煤和车辆尾气排放的颗粒物和 SO_2 、 NO_2 、 CO 都有明显下降, 随着 3月份开始的复工, 污染物浓度也逐渐上升. 由相关性分析可知, $\text{PM}_{2.5}$ 同 CO 之间呈显著相关(0.734), 其浓度具有相同的变化趋势, 说明两者之间来源具有一致性. 这两年 O_3 的浓度变化趋势并未有较大改变, 均呈现逐月增长的趋势, 说明 O_3 浓度变化受疫情期间停工减排的影响很小. 由于封城期间 NO_x 浓度的减少幅度比 VOCs 大, 这使得氮氧化物的滴定效果减弱, O_3 的消耗量降低, 导致大气中 O_3 浓度增加^[17]; O_3 的人为源排放量下降, 但会使大气氧化性(AOC)增强, 也会导致 O_3 的上升^[18]. 同时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的下降, 对氮氧化物和 HO_2 的清除作用减弱, O_3 浓度也会增加^[19]. 这些原因可能导致疫情期间 O_3 未出现明显下降的现象.

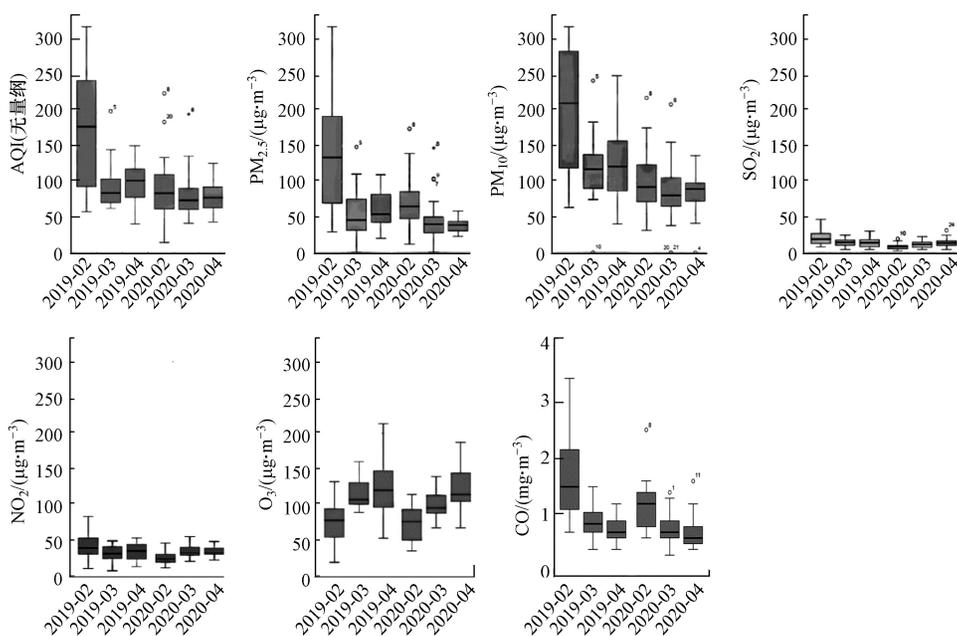


图 3 2019 年与 2020 年邯郸市 AQI 值与 6 种污染物浓度对比

Fig.3 Comparison of Handan AQI value and the concentration of 6 pollutants in 2019 and 2020

2.2 邯郸市疫情前后与其他城市污染物浓度对比分析

本次选取了我国北京、天津、石家庄 3 个北方城市与邯郸市进行对比, 这 3 个城市为华北平原比较典型的大气污染城市, 通过对比分析可以了解到疫情前后邯郸市在整个京津冀地区的大气污染水平. 由图 4 可以看出, 北京、天津、石家庄及邯郸的 AQI 月均值在 2、3、4 月份出现明显的下降, 空气质量改善, 5、6 月份数值开始逐渐增加, 污染逐渐加重. 可见京津冀疫情防控期间污染源排放量的减少对该区域大气环境有明显的改善. 其中北京市在整个分析时段空气质量要优于其他 3 个城市. 北京市的 SO_2 月均浓度值在 $3\text{—}6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 与其他 3 个城市相比污染较轻, 疫情防控之前(12 月—1 月)石家庄市的 SO_2 月均值较高, 而防控结束后(5 月—6 月)邯郸市的 SO_2 月均浓度领先于其他 3 个城市; 本次分析时段内 4 个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 月平均浓度的整体变化趋势一致, 均在 1 月份达到最大值, 在疫情防控开始后(2 月—4 月)月均浓度有较大幅度降低, 直到疫情防控结束也未出现回弹现象; NO_2 月均浓度在 12 月、1 月份数值比较大, 2 月份浓度值明显下降. 3、4、5、6 月份的月均浓度值虽有起伏, 但与 2 月份相比相差不大. O_3 的月均浓度值并未有受疫情防控措施影响的特征, 从去年 12 月开始, 4 个城市的 O_3 月均浓度值逐渐上升, 在 6 月份达到最大.

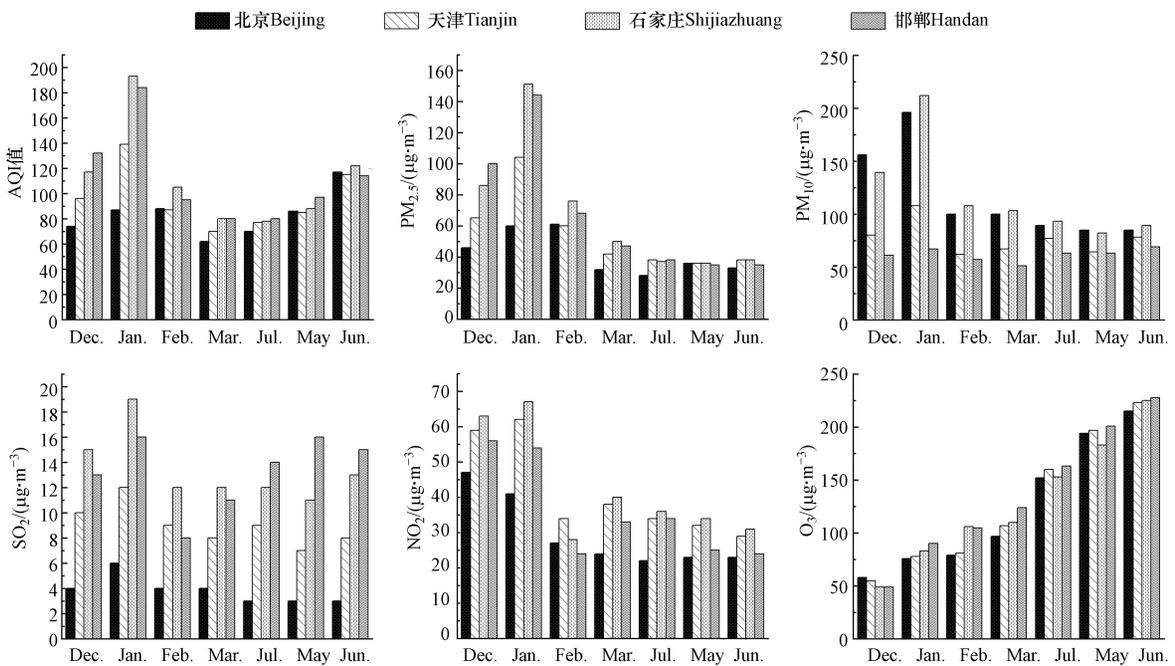


图4 疫情前后邯郸市与其他城市污染物浓度对比

Fig.4 Comparison of pollutant concentration between Handan and other cities before and after the epidemic

选用环境空气质量标准(GB3095—2012)中表1中各污染物二级年平均浓度值作为参考值对4个城市污染情况进行评价,可知,本次分析的7个月内4个城市的 SO_2 月均值都小于 $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,远小于 SO_2 年平均浓度限值($60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),可见 SO_2 在京津冀城市中污染程度相对较小。 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均浓度限值为 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,据统计结果可知,只有北京市3、4、6月份的浓度值小于 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,北京市的其他月份和其余3个城市的月均浓度值均大于等于 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中1月份的石家庄、邯郸的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值最大,约为年平均限值的4倍,污染较为严重; PM_{10} 与 $\text{PM}_{2.5}$ 相比污染情况较轻,北京市 PM_{10} 7个月的月平均浓度值均小于年平均浓度限值($70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),天津市的12月、1月、4月、6月份浓度值超过了限值,但超出量相对较小。石家庄市与邯郸市7个月的月均浓度值都在限值以上,在1月份达到最大,为年浓度限值的2.5倍以上;4个城市12月、1月的 NO_2 月浓度值超过了 NO_2 年平均浓度限值($40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),其余5个月都未超过,影响相对较轻。

总体来说,疫情防控期间随着人为污染物排放量的减少,4个城市的空气质量有明显改善,污染物(除 O_3 外)浓度都有一定幅度的降低,说明人为减排对大气质量的改善有直观的效果。本次疫情前后,北京市空气污染在整个京津冀地区相对较轻,邯郸市与石家庄市空气污染较为严重,整个京津冀地区大气环境受到颗粒物的影响较大。

2.3 邯郸市疫情期间各污染物浓度特征分析

2.3.1 颗粒物、 SO_2 、CO日平均浓度变化特征

邯郸市疫情期间 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、CO的日浓度变化如图5所示,图中黑线为 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 对应的二级标准限值。由图6可知, $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度在2月份及3月初浓度较高,其中 $\text{PM}_{2.5}$ 有15 d超过其浓度限值($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), PM_{10} 有5 d位于其限值($150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)以上。3月中下旬和4月颗粒物浓度明显降低,据分析可知这与邯郸市冬季供暖有很大的关系,供暖时由于燃煤产生的颗粒物排放很大,同时加上邯郸市2月份风速较小,天气干燥,污染物不易扩散,造成颗粒物浓度很高,在3月15日供暖结束后颗粒物浓度明显降低。CO在2月份数值较高,这与供暖燃煤也有很大的关系,4月份由于复工复产,汽车尾气及工厂废气排放量也逐渐升高,CO浓度有所上升。 SO_2 在2月份浓度很低,3、4月份大型工厂开始运行, SO_2 排放量也随之增加,故其日平均浓度也相应增加。污染物排放量的增加与风速、降水、边界层高度、温湿垂直结构等气象因素都会直接影响污染物的浓度水平^[20-21],气象因素不可控,所以减排措施是治理大气环境最切实可行的方法。

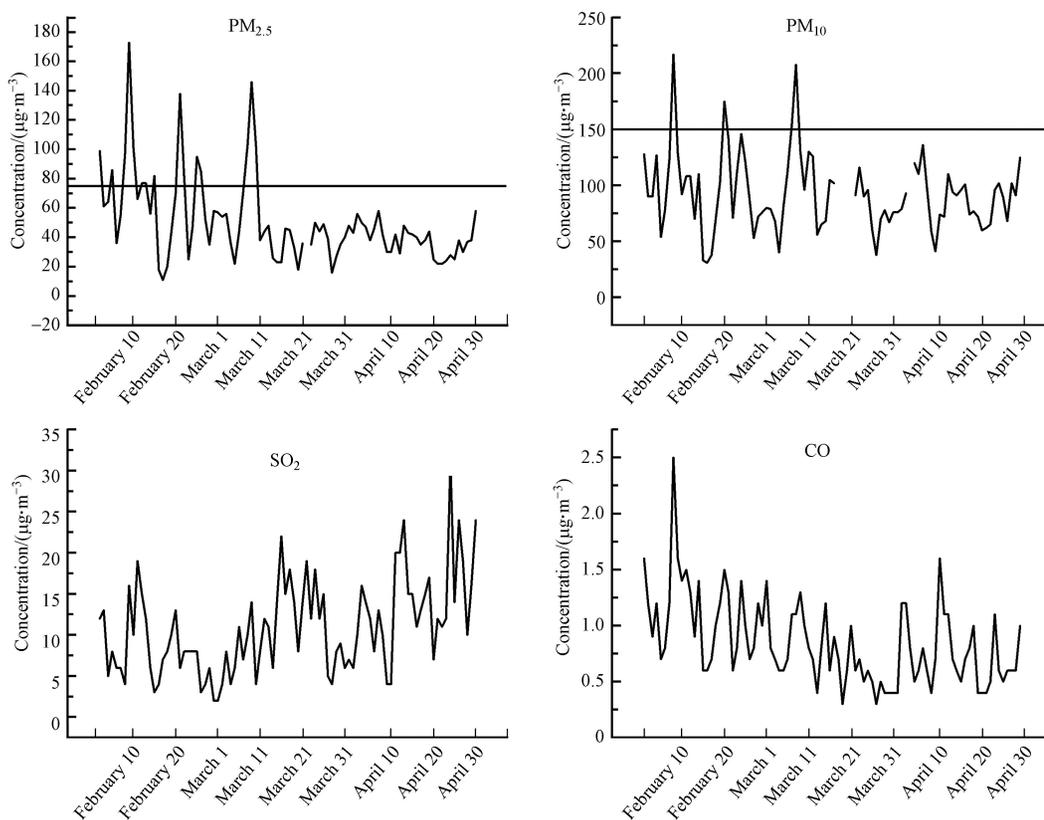


图5 疫情期间邯郸市各污染物浓度变化趋势

Fig.5 Changes in the concentration of various pollutants in Handan City during the epidemic

2.3.2 O₃ 与 NO₂ 的浓度变化特征

近地面 O₃ 对人的眼睛和呼吸系统有强烈的刺激性,其浓度的升高会对越来越多人的健康造成威胁^[22].邯郸市 2、3、4 月份 O₃ 与 NO₂ 的浓度变化趋势见图 6.由图 6 可知,邯郸市 3 个月内 O₃ 8 h 平均浓度有着不断增长的趋势,在 4 月底达到的峰值,数值为 238 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是国家二级标准(160 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的 1.5 倍,超标天数为 6 d,超标率为 6.7%;NO₂ 在 3 月 21 日达到峰值 54 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,超过国家二级标准值 40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,超标数为 11 d.邯郸市 3 个月内 O₃ 的浓度变化幅度较大,不过 85% 的天数在 50—150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.整体上看, O₃ 的变化趋势与邯郸市气温的变化趋势基本一致,经相关性计算可知,两者相关性系数为 0.747,呈显著性相关. O₃ 每个变化周期的峰值随着气温的增加逐渐增加,在 4 月底达到最大.气温的变化能较好的反映太阳辐射强度的变化,气温升高时太阳辐射增强,有利于大气光化学反应,同时邯郸市疫情期间干燥少雨,这些导致 O₃ 浓度呈增长趋势^[23]. NO₂ 浓度变化幅度较小,浓度变化范围在 10—50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, NO₂ 作为 O₃ 的一种前体物,与 O₃ 的浓度变化情况有相反的趋势,在 O₃ 浓度较高时, NO₂ 浓度相对较低.这与王东东等^[24]的研究结果一致.

2.3.3 污染物来源特征分析

利用大气颗粒物、SO₂、NO₂、CO 的检测数据绘制历史特征雷达图,对 2020 年春季疫情期间污染变化特征进行分析,根据研究,大气中 PM_{2.5} 既可以来自一次污染物排放,也可以二次反应生成^[25].粗颗粒物、SO₂、NO₂、CO 主要来自一次污染源排放^[26-27],其中 SO₂ 主要来自燃煤与钢铁制造等工业过程^[28], NO₂ 主要来自焦化、玻璃制作等燃煤工业活动以及机动车的废气^[29-30], CO 主要是由燃煤、机动车尾气及生物质的不完全燃烧产生^[31-32].粗颗粒物主要来自沙尘、土壤和扬尘^[33].

通过绘制邯郸市 2、3、4 月份各污染物的特征雷达图,依据各污染物特征值不同组合,进而判断邯郸市空气质量的主要影响因素.若 3 个月中某月的 5 种污染因子特征值未超出其特征值的上限,且大于其特征值下限时,表明本月的污染特征与邯郸市历史平均或区域平均相比未发生显著变化,归类为偏综合型;当某月中一个或多个污染因子超出污染物特征值上下限时,表明污染特征与历史平均或区域平均相比发生了显著变化^[13].

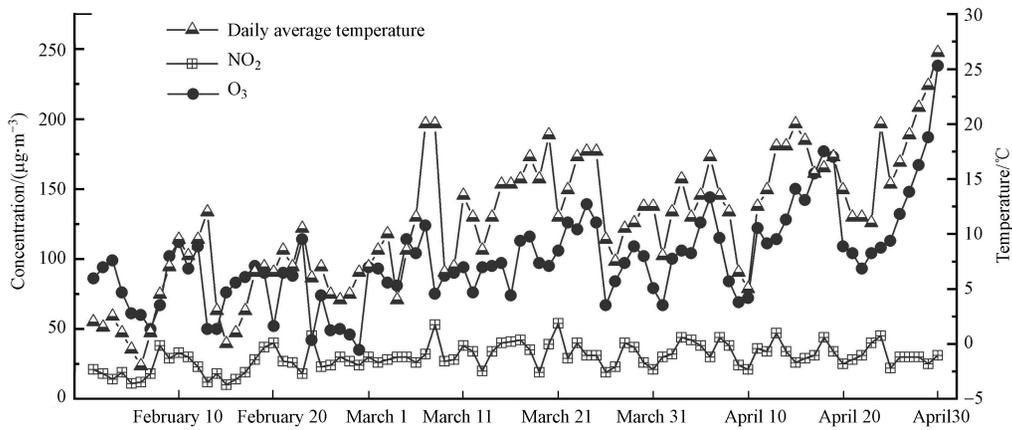


图6 O₃与NO₂的浓度变化及日均变化趋势
Fig.6 Concentration change and daily average change trend of O₃ and NO₂

图7中邯郸市2、3、4月份特征雷达图可知,这3个月的污染物特征值均位于标准值上限与下限之间,属于偏复合型,各种污染物浓度特征差异不大.但是由2月份的雷达图可以了解到,邯郸市2月份大气污染物中CO的特征值所占的百分比较高,NO₂与SO₂所占比例相对偏小,这是由于2月份邯郸市居民较少外出,工厂也停工停产,致使燃煤、生物质材料供暖产生的CO与PM_{2.5}的特征值偏高,工业生产排放的SO₂、NO₂的特征值相对偏小.3月份雷达图各污染物特征值相差不大,在雷达图中分布均匀,各污染物排放情况较为均衡.4月份邯郸市已复工复产,各大工厂基本上正常运行,来自工厂的NO₂与SO₂排放量增加,特征值也相应变大.

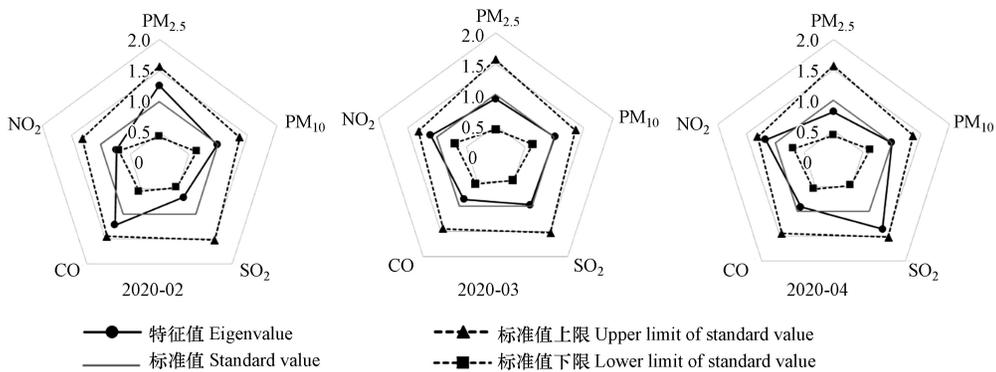


图7 邯郸市2、3、4月份特征雷达图
Fig.7 Feature radar map of Handan City in February, March and April

2.4 疫情期间减排效应及污染物后向轨迹分析

2.4.1 疫情期间减排情况分析

由于O₃浓度的影响因素较多且较为复杂,对O₃的减排效应估算准确率较低,所以本次只分析其余5种污染物的减排情况.按照1.2.4节中减排效应估算模型,分别将2019年与2020年12月—4月5种污染物浓度值带入后得到各污染物的估算值,由于3、4月估算值与实际值相差不大,因此不予列出.计算所得的2月份邯郸市污染物排放估计值见表2.可以看出,在不考虑气象因素的情况下,5种污染物估算所得的排放浓度都明显高于实际排放浓度,其中颗粒物估算出的减排量最大,PM_{2.5}减排量为80.77 µg·m⁻³,PM₁₀减排量为87.84 µg·m⁻³,分别是实际排放浓度的1.19、0.89倍,其次为NO₂、CO、SO₂,减排量分别占实际排放量的51.79%、55.61%、19.12%.经过对5种污染物的减排估算,说明在疫情防控初期5种污染物排放量都有明显的降低.

表 2 2020 年 2 月邯郸市各污染物排放浓度估计值与实际值对比

Table 2 Comparison between the estimated emission concentration of pollutants and the actual value in Handan City in February 2020

	PM _{2.5} /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	PM ₁₀ /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	SO ₂ /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	CO/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	NO ₂ /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
估算排放浓度	148.56	186.15	9.53	1.70	36.92
实际排放浓度	67.79	98.31	8.00	1.12	23.72
减排估算浓度	80.77	87.84	1.53	0.58	13.19
减排量占实际排放量比例	119.15%	89.35%	19.12%	51.79%	55.61%

2.4.2 后向轨迹分析

据以上研究可知,邯郸市疫情防控初期(2020年2月)与2019年同期相比各污染物浓度均有明显下降,为了解在疫情防控初期与2019年同期该区域污染物的来源与跨区域输送的过程是否存在差异,因此对两年中的2月份气团后向移动轨迹进行聚类分析,由图8可以看出,邯郸市在这两年中2月份的气团来源相似,主要有6个来源轨迹,第一个来源主要是邯郸东北方向的渤海、天津地区,占总气团来源的15%左右,第二个来源为北侧区域,途径内蒙古、山西部分地区,占总来源的8%左右,第三个来源轨迹位于西北方向,途径内蒙古、陕西、山西区域,该气团来源分别占2019、2020年2月中总气团来源的14.44%和8.33%,2019年2月来自该方向的气团要比2020年稍大一些.第四、五、六个来源是分别来自山西西部、河南中部与河北南部区域,3条传输路径很短,可以定为华北地区本地气团,来自该区域的气团占总气团的65%左右.整体来看2019年2月与2020年2月中气团来源大致相似,即污染物的来源与迁移轨迹不存在较大差别,但两年的污染物浓度差值较大,说明人为减排对降低大气污染物浓度有一定的功效.

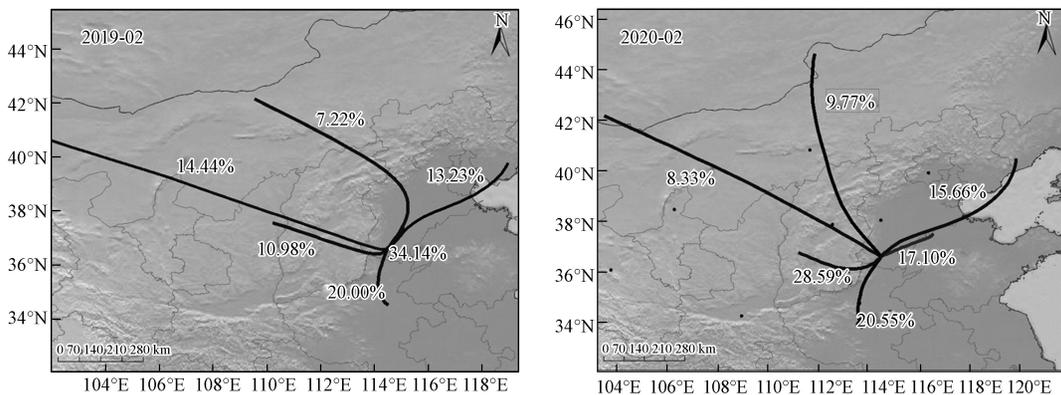


图 8 2019 年与 2020 年 2 月份气团后向移动轨迹聚类分析

Fig.8 Cluster analysis of backward movement trajectory of air mass in February 2019 and February 2020

3 结论(Conclusion)

(1) 疫情防控开始前邯郸市空气质量与上年同期相比空气质量相差不大,防控期间的空气质量与上年相比有明显改善,各类污染物(除 O₃ 外)浓度均有较大幅度降低,而 O₃ 浓度逐月增加,并未因疫情原因而下降.

(2) 疫情期间邯郸、北京、天津、石家庄的各污染物(除 O₃ 外)浓度与疫情前相比均有所下降,4个城市中北京市空气污染相对较轻,邯郸市与石家庄市较为严重.整体上看京津冀地区大气环境受到颗粒物的影响较大.

(3) 疫情期间2月份及3月初颗粒物浓度较高,这与供暖燃煤有很大关系.4月份因工业复工复产,使 SO₂ 浓度增加. O₃ 浓度随着气温的升高有逐渐增加的趋势,在月底达到最大值(238 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

(4) 邯郸市 2、3、4 月份污染特征均属于偏复合型.但邯郸市 2 月份大气污染物中来自燃煤和生物

质燃烧产生的CO所占的百分比较高,NO₂与SO₂所占比例相对偏小,4月份来自工厂的NO₂与SO₂增加,其特征值偏大。

(5)通过污染物减排估算可知,疫情防控前期各污染物排放量均有较大幅度减小,其中颗粒物估算出的减排量最大。由聚类分析可以看出2019年2月与2020年2月的气团移动轨迹和来源特征相似,说明疫情期间污染物浓度降低与人为减排有一定关联。

参考文献 (References)

- [1] 唐倩,郑博,薛文博,等.京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析[J].环境科学,2021,42(4):1591-1599.
TANG Q, ZHENG B, XUE W B, et al. Contributors to air pollutant emission changes in autumn and winter in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas [J]. Environmental Science, 2021, 42(4): 1591-1599 (in Chinese).
- [2] 赵雪,沈楠驰,李令军,等. COVID-19疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析[J].环境科学,2021,42(3):1205-1214.
ZHAO X, SHEN N C, LI L J, et al. Atmospheric pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei region during COVID-19 epidemics [J]. Environmental Science, 2021, 42(3): 1205-1214 (in Chinese).
- [3] 朱珊珊.河北邯郸市2013-2017年大气颗粒物化学组成特征的研究[D].南宁:广西大学,2019.
ZHU S S. Research on the characteristics of the chemical composition of atmospheric particulate matter in Handan city, Hebei Province from 2013 to 2017 [D]. Nanning: Guangxi University, 2019 (in Chinese).
- [4] 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 (in Chinese).
- [5] 关攀博,周颖,程水源,等.典型重工业城市空气重污染过程特征与来源解析[J].中国环境科学,2020,40(1):31-40.
GUAN P B, ZHOU Y, CHENG S Y, et al. Characteristics of heavy pollution process and source appointment in typical heavy industry cities [J]. China Environmental Science, 2020, 40(1): 31-40 (in Chinese).
- [6] 宋晓辉,杜亮亮,李剑东,等.邯郸采暖期环境污染特征及空气质量预报方法研究[J].生态与农村环境学报,2020,36(8):998-1005.
SONG X H, DU L L, LI J D, et al. Study on characteristics of environmental pollution and methods of air quality prediction during heating period in Handan city [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(8): 998-1005 (in Chinese).
- [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 (in Chinese).
- [9] 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: 104814.
- [10] LI X R, WANG L L, LI 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.
- [11] 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 (in Chinese).
- [12] 姚祎,王宇,俞海,等.北京市2020年春节期间空气质量影响因素分析[J].环境与可持续发展,2021,46(2):107-114.
YAO Y, WANG Y, YU H, et al. Analysis on the influencing factors of air quality during the Spring Festival in Beijing in 2020 [J]. Environment and Sustainable Development, 2021, 46(2): 107-114 (in Chinese).
- [13] 段菁春,胡京南,谭吉华,等.特征雷达图的设计及其在大气污染成因分析中的应用[J].环境科学研究,2018,31(8):1329-1336.
DUAN J C, HU J N, TAN J H, et al. Design of characteristic radar chart and its application in air pollution analysis [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(8): 1329-1336 (in Chinese).
- [14] WANG Y Q. MeteoInfo: GIS software for meteorological data visualization and analysis [J]. Meteorological Applications, 2014, 21(2): 360-368.
- [15] 周沙,刘宁,刘朝顺.2013—2015年上海市霾污染事件潜在源区贡献分析[J].环境科学学报,2017,37(5):1835-1842.
ZHOU S, LIU N, LIU C S. Identification for potential sources for haze events in Shanghai from 2013 to 2015 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(5): 1835-1842 (in Chinese).

- [16] 铃伟妙, 张艳品, 陈静, 等. 石家庄大气污染物输送通道及污染源区研究 [J]. 环境科学学报, 2018, 38(9): 3438-3448.
QIAN W M, ZHANG Y P, CHEN J, et al. Air pollutant transport channels and its potential sources in Shijiazhuang [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(9): 3438-3448(in Chinese).
- [17] 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, 2021, 8(2): nwaal137.
- [18] 漏嗣佳, 朱彬, 廖宏. 中国地区臭氧前体物对地面臭氧的影响 [J]. 大气科学学报, 2010, 33(4): 451-459.
LOU S J, ZHU B, LIAO H. Impacts of O₃ precursor on surface O₃ concentration over China [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2010, 33(4): 451-459(in Chinese).
- [19] 杜祯宇, 殷惠民, 张焯. 细颗粒物与臭氧协同控制的方法和必要性 [J]. 世界环境, 2018(1): 19-20.
DU Z Y, YIN H M, ZHANG T. The methods and necessity of coordinated control of fine particulate matter and ozone [J]. World Environment, 2018(1): 19-20(in Chinese).
- [20] 张新科, 胡长金, 何跃, 等. 重庆市荣昌区冬季PM_{2.5}污染的气象因素及区域传输特征 [J]. 干旱气象, 2021, 39(1): 102-111.
ZHANG X K, HU C J, HE Y, et al. Meteorological influencing factors and regional transmission characteristic of PM_{2.5} in the winter in Rongchang district, Chongqing [J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(1): 102-111(in Chinese).
- [21] 苏伯尼, 张楠, 黄弘. 基于空气质量和气象数据的大气污染物排放水平评估 [J]. 安全与环境工程, 2019, 26(4): 44-49.
SU B N, ZHANG N, HUANG H. Air pollutant emission assessment based on air quality data and meteorological data [J]. Safety and Environmental Engineering, 2019, 26(4): 44-49(in Chinese).
- [22] 李同囡, 邱嘉馨, 房春生. 环境中臭氧的危害与防治浅析 [J]. 世界环境, 2020(5): 16-18.
LI T N, QIU J X, FANG C S. A brief analysis of the hazards of ozone in the environment and relevant prevention and treatment [J]. World Environment, 2020(5): 16-18(in Chinese).
- [23] 曹杨, 李钰春, 赵晓莉, 等. 成都市区夏季臭氧污染特征及与气象因子的关系研究 [J]. 环境科学与管理, 2020, 45(10): 135-139.
CAO Y, LI Y C, ZHAO X L, et al. Characteristics of ozone pollution and its relationship with meteorological factors in urban Chengdu during summer [J]. Environmental Science and Management, 2020, 45(10): 135-139(in Chinese).
- [24] 王东东, 朱彬, 王静. 利用差分吸收光谱系统对O₃, SO₂和NO₂的监测分析 [J]. 环境科学研究, 2009, 22(6): 650-655.
WANG D D, ZHU B, WANG J. Observational analysis of O₃, SO₂ and NO₂ with DOAS system [J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(6): 650-655(in Chinese).
- [25] XIANG P, ZHOU X M, DUAN J C, et al. Chemical characteristics of water-soluble organic compounds (WSOC) in PM_{2.5} in Beijing, China: 2011-2012 [J]. Atmospheric Research, 2017, 183: 104-112.
- [26] XIE Y Y, ZHAO B, ZHANG L, et al. Spatiotemporal variations of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations between 31 Chinese cities and their relationships with SO₂, NO₂, CO and O₃ [J]. Particulology, 2015, 20: 141-149.
- [27] 何涛, 彭燕, 乔利平, 等. 常州市冬季大气污染特征及潜在源区分析 [J]. 环境科学研究, 2018, 31(3): 487-495.
HE T, PENG Y, QIAO L P, et al. Characteristics of air pollution and potential source in winter of Changzhou city [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(3): 487-495(in Chinese).
- [28] MENG Z H, WANG C Y, WANG X R, et al. Simultaneous removal of SO₂ and NO_x from coal-fired flue gas using steel slag slurry [J]. Energy & Fuels, 2018, 32(2): 2028-2036.
- [29] TAN J H, DUAN J C, MA Y L, et al. Source of atmospheric heavy metals in winter in Foshan, China [J]. Science of the Total Environment, 2014, 493: 262-270.
- [30] 段菁春, 柴发合, 谭吉华, 等. 钢铁行业氮氧化物控制技术及其对策 [J]. 环境污染与防治, 2013, 35(3): 100-104,110.
DUAN J C, CHAI F H, TAN J H, et al. Control technologies and policies of iron and steel industry [J]. Environmental Pollution & Control, 2013, 35(3): 100-104,110(in Chinese).
- [31] 李宇飞, 李振华, 胡京南, 等. 轻型汽油车尾气PM_{2.5}的排放特征 [J]. 环境科学研究, 2016, 29(4): 503-508.
LI Y F, LI Z H, HU J N, et al. Emission profile of exhaust PM_{2.5} from light-duty gasoline vehicles [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(4): 503-508(in Chinese).
- [32] 栾孟孝, 姬亚芹, 王伟, 等. 鞍山市秋季大气PM_{2.5}中元素污染特征和来源分析 [J]. 环境化学, 2016, 35(10): 2197-2203.
LUAN M X, JI Y Q, WANG W, et al. Characteristic and sources of the polluted elements in PM_{2.5}during autumn of Anshan [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(10): 2197-2203(in Chinese).
- [33] 程萌田, 金鑫, 温天雪, 等. 天津市典型城区大气碳质颗粒物的粒径分布特征和来源 [J]. 环境科学研究, 2013, 26(2): 115-121.
CHENG M T, JIN X, WEN T X, et al. Size distribution characteristics and sources of carbonaceous aerosols in typical Tianjin city, China [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(2): 115-121(in Chinese).