

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2022032503

蒋星星, 陈庆彩, 熊梦琪, 等. 疫情管控对关中城市群大气污染特征及颗粒物化学组成的影响[J]. 环境化学, 2023, 42(8): 2640-2650.
JIANG Xingxing, CHEN Qingcai, XIONG Mengqi, et al. Influence of epidemic control on air pollution characteristics and chemical composition of particulate matter in Guanzhong urban agglomeration[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42 (8): 2640-2650.

疫情管控对关中城市群大气污染特征及颗粒物 化学组成的影响*

蒋星星 陈庆彩** 熊梦琪 Ainur Dyussenova

(陕西科技大学环境科学与工程学院, 西安, 710021)

摘要 新冠肺炎疫情的暴发对生产生活模式产生了重大影响, 进而改变了大气污染现状和规律, 是一次极限减排的“大气实验”。本研究以中国典型大气污染控制区的关中城市群为研究对象, 考察该地区疫情管控下大气污染物污染特征、来源和形成机制, 解析了大气细颗粒物(PM_{2.5})中化学组分的浓度变化特征。结果显示, 除O₃外, 其余大气污染物浓度的整体变化趋势均表现为管控前>管控后, 与全国趋势一致, 但程度不同。新冠肺炎疫情的社会隔离措施大幅度削减了各类排放源, 西安市、咸阳市、铜川市、宝鸡市、渭南市等5个城市PM₁₀、PM_{2.5}、NO₂和CO浓度值明显降低, 其中PM₁₀、SO₂、NO₂、CO在疫情期间的浓度达到近5年来历史最低。O₃浓度在封城期间却有显著上升的现象, 表明大气氧化性可能在燃烧排放减少的背景下由于NO₂滴定效应减小而得到强化。对西安市PM_{2.5}中水溶性阴阳离子浓度对比分析结果显示, Ca²⁺、Na⁺、Cl⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、SO₄²⁻等几种主要水溶性离子浓度在疫情管控后明显降低, 由于来源和形成机制不同, NH₄⁺、SO₄²⁻离子在管控后占比有所上升, 其他4种离子占比都有所下降, 这与对交通源和工业源的大幅消减以及颗粒物中NH₄⁺和SO₄²⁻、NO₃⁻之间的二次反应有很大关系。特别是, 交通源排放的减排对大气污染物NO₂、CO、PM浓度的减小是显著的, 因此未来在城市汽车尾气治理、机动车低耗能低排放以及清洁能源等方面多加投入是必要的。适当的排放源管控有利于大气环境质量的改善, 但除了要考虑污染源和减排目标以外, 还需要结合当地大气污染特征和气象条件、考虑O₃的“滴定效应”, 实现大气颗粒物与O₃协同控制, 改变颗粒物浓度下降而O₃污染加剧的局面。

关键词 疫情管控, 关中城市群, 大气污染特征, 颗粒物化学组成。

Influence of epidemic control on air pollution characteristics and chemical composition of particulate matter in Guanzhong urban agglomeration

JIANG Xingxing CHEN Qingcai** XIONG Mengqi Ainur Dyussenova

(College of Environmental Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an, 710021, China)

Abstract The outbreak of the COVID-19 epidemic situation has had a significant impact on production and life patterns, which has changed the present situation and law of air pollution. In this study, the Guanzhong area, a typical air pollution control area in China, was taken as the research

2022年3月25日收稿(Received: March 25, 2022).

* 陕西青年科技新星项目(2021KJXX-36)和未央区扬尘污染特征、来源及其控制研究(202224)。

Supported by Shaanxi Youth Science and Technology Rising Star Project (2021KJXX-36) and Study on Characteristics, Sources and Control of Dust Pollution in Weiyang District (202224)。

** 通信联系人 Corresponding author, E-mail: chenqingcai@sust.edu.cn

object. The types, sources, and formation mechanism of air pollutants under epidemic control in this area were investigated, as well as the concentration variation characteristics of chemical components in atmospheric fine particles ($PM_{2.5}$). The results show that, except for O_3 , the overall change trend in the average concentration of other air pollutants before control > after control. However, the concentration of O_3 increased significantly during the city lockdown, indicating that the atmospheric oxidation may be strengthened due to the reduction of the NO_2 in the context of reduced combustion emissions. The social isolation measures during the COVID-19 epidemic have greatly reduced the concentrations of various pollutants, and the concentrations of PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 and CO have obviously decreased in five cities, including Xi'an, Xianyang, Tongchuan, Baoji and Weinan. During the epidemic, the concentrations of PM_{10} , SO_2 , NO_2 and CO reached the lowest level in the past five years. A comparative analysis of the concentration of water-soluble anions and cations in $PM_{2.5}$ in Xi'an shows that the concentration of several main water-soluble ions such as Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} decreased significantly after the epidemic control. During the lockdown, the proportion of NH_4^+ and SO_4^{2-} ions increased due to different sources, whereas the proportion of other four ions decreased, which is related to the strict control of traffic sources and the chemical reaction between NH_4^+ and NO_3^- and SO_4^{2-} in particulate matter. NO_2 , CO, PM and other pollutants are greatly reduced after control. Automobile exhaust emission reduction is very important for air pollution control. In the future, more invest would be required in urban automobile exhaust control, low energy consumption and emission of motor vehicles, and clean energy. Proper emission source control is beneficial to the improvement of atmospheric environmental quality. In order to achieve a win-win situation of economic development and ecological health, it is necessary to combine local air pollution characteristics and meteorological conditions, when developing pollution source control scheme, in addition to pollution sources and emission reduction targets.

Keywords epidemic control, Guanzhong urban agglomeration, characteristics of air pollution, chemical composition of particulate matter.

2019年年末, 突发性流行病新冠肺炎席卷全球, 对人类的身体和生活生产方式产生了巨大影响, 进而改变了人类活动对大气环境的影响. 疫情发生后, 我国迅速反应, 实施了一系列最为严格的管控措施, 使得新冠疫情在国内的蔓延得到有效控制, 相关的措施也为世界各国疫情防控提供了有效的参考模板^[1-2]. 在疫情得到有效控制的同时, CO 、 NO_2 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、 PM_{10} 等常规污染物的人为排放也受到直接影响, 在严格管控期间, 限制交通出行、居家隔离、一些企业停工停产等措施会使大气污染物的移动源、工业源、扬尘源等大幅消减. 而长时间以来, 关中地区是我国大气污染较为严重的地区, 在本地污染源以及周边区域传输污染源和本地气象条件等共同作用下, 冬季区域性重污染天气时有发生, 受到了社会各界广泛关注, 而疫情爆发正值冬春季节, 对人为减排带来的空气质量改善的研究将更加有利于帮助城市应对重污染天气. 大气中的污染物浓度受自然排放源与人为排放源的综合影响, 对比疫情前后常规污染物浓度以及颗粒物化学组成的变化, 可以分析在保证人民基本生产生活条件下人为减排对污染物浓度减小的极限^[3-4] 以及极限减排下颗粒物化学组分和毒性的变化.

新冠疫情期间严格的管控措施对大气污染物来说是一次极限人为减排的“实验”, 研究人为管控导致的污染源减排对大气污染的影响成为许多学者的关注点^[5], 有学者对类似的特殊时期的大气污染进行了分析研究, 赵辉等^[6] 利用 G20 峰会期间杭州及其周边城市的空气质量监测数据, 结合气象因素分析其时空分布特征, 评估了保障措施对空气质量的影响. 赵军平^[7] 等研究了杭州 G20 峰会期间气象条件对空气质量的影响. 周亚端等^[8] 分析对比了湖北省重点行业疫情管控前后的污染物排放情况. 乐旭等^[9] 通过多种数据的计算, 分析了我国新冠肺炎疫情期间人为碳排放和主要大气污染物的变化. 很多研究都表明, 人为减排对环境空气质量提升效果是非常显著的. 而对大气污染物的研究中, 颗粒物的化学组成也是很多学者关注的重点. 毛敏娟等^[10] 研究了杭州 G20 峰会期间的大气污染物减排措施对大

气中无机水溶性离子特征的影响. Wang 等^[1]利用卫星和地面数据,包括颗粒物(PM)、痕量气体、水溶性离子(WISs)和炭黑(BC),评估了2019新冠疫情封锁期间长江三角洲的空气质量,分析了封锁期间常规大气污染物及颗粒物中水溶性离子的变化情况,发现在封锁期间, NO_3^- 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Na^+ 浓度均有下降,而 Mg^{2+} 则上升了30.2%. Xiong 等^[2]收集了嘉兴从2020年1月2日至4月25日的 $\text{PM}_{2.5}$ 样品,分析了其化学成分(包括碳组分、水溶性离子(WISs)和无机元素),结果表明,疫情管控期间,所有数据都有所下降.颗粒物的化学组分决定着颗粒物的毒性、与其他大气污染物的反应以及对人体健康的危害程度,而改善空气质量的根本目标是人类健康发展,所以在控制常规大气污染物排放的同时,研究颗粒物中化学组分的变化也是至关重要的.

汾渭平原是中国大气污染重点防控区域,而关中地区是汾渭平原重要组成部分,目前是全国大气污染特别是颗粒物污染最为严重的地区之一.本研究以陕西省关中地区为研究对象,考察该地区大气污染物种类、来源和形成机制,解析 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子的浓度变化特征以及疫情管控前后的空气质量差异,通过对疫情严控前后半年内的关中主要城市大气污染物的浓度水平、变化趋势、气象条件等特征的对比分析,解析疫情发生前后大气污染物污染特征的差异,结合气象资料和政府行动措施,科学评估疫情期间人为管控对大气污染特征和潜在来源的影响并提出科学建议,以期对关中地区大气污染治理提供科学参考.

1 实验部分(Experimental section)

1.1 数据来源

本文选取关中地区五个城市(西安市、宝鸡市、咸阳市、铜川市以及渭南市)疫情前后半年的6项常规污染物监测数据,以西安为代表的关中地区自1月26日起采取了严格的管控措施,所以以2020年1月26日为时间节点,划分疫情管控前(2019年7月26日—2020年1月25日)和管控后(2020年1月26日—2020年7月26日),严控前(2020年1月11日—2020年1月25日)和严控期(2020年1月26日—2020年2月10日)等4个时期并对此期间的污染物浓度变化进行对比分析.为了解疫情严控期间污染物的水平,选取近5年同一时段(1月26日—2月10日)的6项污染物浓度进行对比.以上空气质量监测数据均来源于中国环境监测总站官网(中国环境监测总站(cnemc.cn)),发布空气质量6项污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、CO和 O_3 逐时观测数据,气象数据来源于中国气象局.

1.2 实验方法

为了进一步说明影响大气质量的主要因素,本研究还测定了西安市疫情管控前后各一周的 $\text{PM}_{2.5}$ 中主要的水溶性离子 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 的浓度.采样地点位于西安市陕西科技大学逸夫楼(经纬度: $\text{N}34^\circ22'35.07''$; $\text{E}108^\circ58'34.58''$;海拔高度约420 m;距离地面的高度约30 m),采样时间为2020-01-19至2020-02-02每天7:00—次日6:30,采样仪器使用的是配有 $\text{PM}_{2.5}$ 切割头的智能大流量空气颗粒物采样器(上海新拓分析仪器科技有限公司,XT-1025),采样器设置空气流量为 $1000 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,采样器中配备的滤膜是预先用马弗炉(合肥科晶材料技术有限公司,KXL-1200X)烧制的石英滤膜(PALL Life Science, TISSUQUARTZ, 2500QAT-UP), $\text{PM}_{2.5}$ 样品将被截留在此滤膜上.每一天采集的样品用锡纸包裹,独立包装并做好日期标记,随后保存于 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 的冰箱内等待分析.

分析时先从样品原滤膜上裁取3张直径为15 mm的滤膜置于干燥清洁的离心管中,依照样品日期对离心管做好标记;再用移液枪精确移取15 mL超纯水加入载有膜样品的离心管中;随后将离心管放入超声波清洗器内,在室温条件下超声30 min;超声完成后用10 mL注射器将样品溶液通过PTFE滤膜(13 mm, $0.45 \mu\text{m}$)过滤到干燥清洁的离心管中,对样品仍然做好标记,再对滤液样品进行离子色谱(瑞士万通公司940型)分析,记录结果.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 关中地区疫情管控前后空气质量的区域对比

选取关中地区代表城市在疫情管控前后半年的空气质量指标参数进行分析.由图1可知,从空间

角度来看, 西安、铜川、宝鸡、咸阳和渭南市的 $PM_{2.5}$ 浓度和 PM_{10} 浓度在疫情管控前后的变化趋势大体一致, 颗粒物浓度有了显著的降低, 说明整个关中地区在采取疫情管控措施后空气质量有了明显改善^[13]. 其中, $PM_{2.5}$ 的浓度变化较 PM_{10} 更为明显, 其浓度下降程度更大. 由于疫情发生在冬季, 以颗粒物为主要污染物, 在疫情严控期内, 由于交通管制和停工停产, 扬尘排放大大降低, $PM_{2.5}$ 为主要污染物, 而在解除管控后, 扬尘排放量增加, PM_{10} 成为主要污染物.

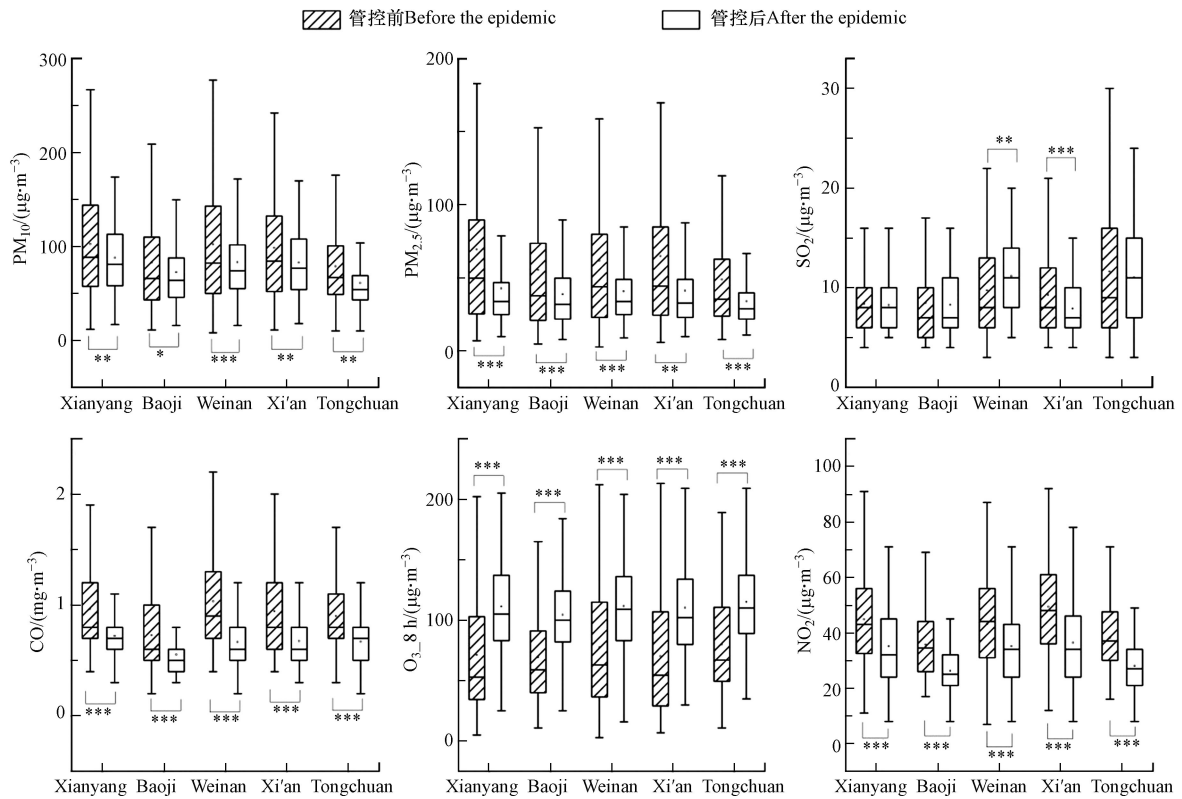


图1 关中地区疫情管控前后空气质量指标的日平均浓度

(图中*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, ***表示 $P < 0.001$;))

Fig.1 Daily average concentration of air quality indicators before and after epidemic control in Guanzhong area (in the figure * means $P < 0.05$, ** means $P < 0.01$, *** means $P < 0.001$;))

疫情期间, 除西安和铜川以外, 其他3个城市的大气 SO_2 浓度较疫情前均有所上升, 一方面是由于疫情时段正值春节期间, 空气质量受烟花燃放影响显著; 另一方面, 疫情管控前期处于取暖季, 民用燃煤的使用量增多也是 SO_2 浓度增高的重要原因^[14-15].

道路移动源对城市大气 NO_2 有重要贡献^[16], NO_x 和 $VOCs$ 是 O_3 生成的主要前体物, 而疫情管控期间由于道路移动源的排放大幅减少, 导致与 NO_x 和 $VOCs$ 减排不成比例, 继而出现 O_3 异常升高的现象^[17]. 而另一方面, 太阳辐射增强、气温升高也是关中地区 O_3 浓度在疫情管控期间整体显著上升的重要原因.

为了解疫情严控措施对大气污染物的极限减排情况, 对严控前和严控期的常规大气污染物浓度变化及空间差异进行进一步的分析(见图2), 关中地区大气 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 NO_2 和 CO 的平均改善值分别为 63.40 、 50.94 、 24.6 、 $0.34 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 改善率分别为 40.81% 、 37.20% 、 53.44% 和 23.91% , AQI 的平均改善率为 35.2% . 其中, 西安市 AQI 改善率最高, 为 37.15% ; 西安市和咸阳市 NO_2 浓度改善值较大, 分别为 $27.98 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $27.85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 而东北部渭南市的 NO_2 浓度改善值相对较小, 为 $20.30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 五市的 CO 改善率都比较高, CO 主要来源于碳氢化合物的不完全燃烧, 如燃煤散烧排放和机动车尾气等^[18], 交通管制对 CO 的消减效果明显, 说明在城市中, 机动车尾气是 CO 的重要来源. 5座城市大气颗粒物浓度降低幅度也有较大差异, 西安、铜川、宝鸡、咸阳和渭南 PM_{10} 的平均浓度分别降低 71.43 、 54.09 、 50.87 、 65.49 、 $75.12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. $PM_{2.5}$ 的平均浓度分别降低 58.38 、 38.42 、 43.07 、 57.67 、 $57.17 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 其中, 颗粒物浓度改善值最大的是西安市, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的平均浓度分别由疫情管控前的

161.87 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 147.13 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降为疫情管控后的 90.44 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 88.75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 改善率分别为 44.13% 和 39.68%。各代表城市 SO_2 浓度改善相对较小, 宝鸡市严控期 SO_2 浓度甚至高于管控前, 这可能与冬季取暖以及农村地区生物质燃烧和散煤燃烧有关^[19]。

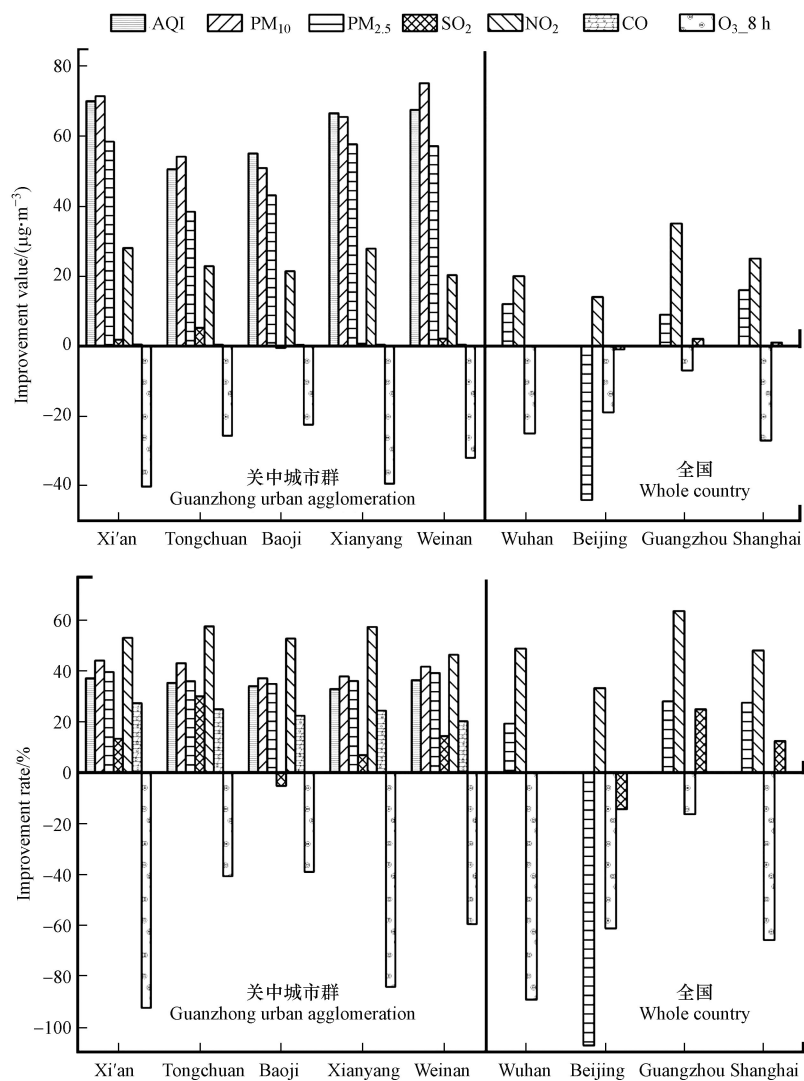


图 2 关中地区空气质量改善值和改善率

(图 a AQI 无单位, CO 浓度单位为 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 武汉, 北京, 广州, 上海等四城市数据来源于文献 [20])

Fig.2 Improvement value and rate of air quality in Guanzhong Area

(In the figure a, AQI has no unit, and the unit of CO concentration is $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; Data of Wuhan, Beijing, Guangzhou and Shanghai come from literature [20])

除疫情管控导致的排放源削减以外, 气象条件也是影响区域大气污染物浓度的重要因素^[21]。对关中地区严控前和严控期的风场数据进行统计分析(见表 1)。结果表明, 严控前和严控期关中地区盛行东风和东北风, 整体风力等级以 2 级为主, 严控前后扩散条件基本一致。在严控期, 西安市、咸阳市、渭南市、铜川市盛行东北风, 风力等级以 2 级为主, 2 级风的天数分别为 8d、12d、15d 和 11d, 铜川市最大风力为 2 级, 其余三城市最大风力为 3 级, 而宝鸡市盛行东风, 严控期宝鸡市风力等级以 1 级为主, 最大风力为 2 级, 且 2 级风力只有两天, 与其他四个城市相比扩散条件相对较差。关中五地市的空气质量改善情况与扩散条件相对应, 西安市、咸阳市、渭南市三市空气质量改善程度最大, 而铜川市和宝鸡市的污染物浓度下降相对较少, 其中, 宝鸡市的改善效果最差。说明疫情期间人为管控导致的污染源削减是空气质量改善的最主要因素, 扩散条件的差异是严控期较严控前空气质量改善的一大推力, 同时也是引起各城市之间空气质量改善差异的重要因素。

虽然关中地区在疫情管控期间, 除 O_3 以外的大气污染物浓度都有不同程度的下降, 但是与其他城市相比, 仍有差距, 如 Chen 等^[22] 发现, 疫情管控期间武汉的 NO_2 浓度下降了 22.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 全国平均

NO_2 浓度下降了 $12.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 武汉的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降了 $1.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 而全国 367 个城市的平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降了 $18.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Le 等^[20] 的研究表明, 2020 年春节叠加疫情严控期间(2020 年 1 月 23 日—2020 年 2 月 13 日), 中国 $\text{PM}_{2.5}$ 平均值为 $52.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 而此阶段西安市、铜川市、咸阳市、宝鸡市和渭南市的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均值分别为 113.1、81.8、128.9、91.5、114.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 远高于全国平均值. 这可能是由于疫情管控影响了交通源和密集劳动的工业源的排放, 但并没有影响到部分重工业源和电厂等的排放, 关中五地市的排放源结构、背景浓度以及气象条件的不同导致了关中地区不同城市之间以及关中五地市和其他城市之间的减排差异, 而关中地区不利于污染物扩散的特殊地理位置也是关中地区长期以来大气污染物浓度高于许多城市的一大原因.

表 1 关中地区疫情严控期不同风力等级天数统计表(d)

Table 1 Statistical table of days with different wind grades during epidemic control period in Guanzhong Area (d)

时期 Period	风力等级 Wind scale	西安 Xi'an	铜川 Tongchuan	宝鸡 Baoji	咸阳 Xianyang	渭南 Weinan
严控前 Strictly control before	1级(0.3—1.5 m·s ⁻¹)	5	6	14	5	3
	2级(1.6—3.3 m·s ⁻¹)	9	9	1	8	11
	3级(3.4—5.4 m·s ⁻¹)	1	0	0	2	1
严控期 After strict control	1级(0.3—1.5 m·s ⁻¹)	7	5	14	3	0
	2级(1.6—3.3 m·s ⁻¹)	8	11	2	12	15
	3级(3.4—5.4 m·s ⁻¹)	1	0	0	1	1

严控前和严控期关中地区整体风力等级以2级为主, 扩散条件基本一致.

Before and during the strict control period, the overall wind power level in Guanzhong area is mainly Level 2, and the diffusion conditions are basically the same.

2.2 疫情停工期间污染物日变化规律分析

以西安市为例, 选取近 5 年疫情同一时期(1 月 26 日—7 月 26 日)的 6 项大气污染物浓度数据, 对疫情停工期间污染物日变化规律进行分析. 如图 3 所示, 2020 年的 6 项污染物浓度都明显低于前 5 年, 近 5 年西安市大气 SO_2 浓度的逐年降低与炉改造和取消散煤燃烧等措施有关, 2019 年和 2020 年 SO_2 排放源基本没有变化, 所以疫情管控对西安市的 SO_2 浓度变化影响并不明显.

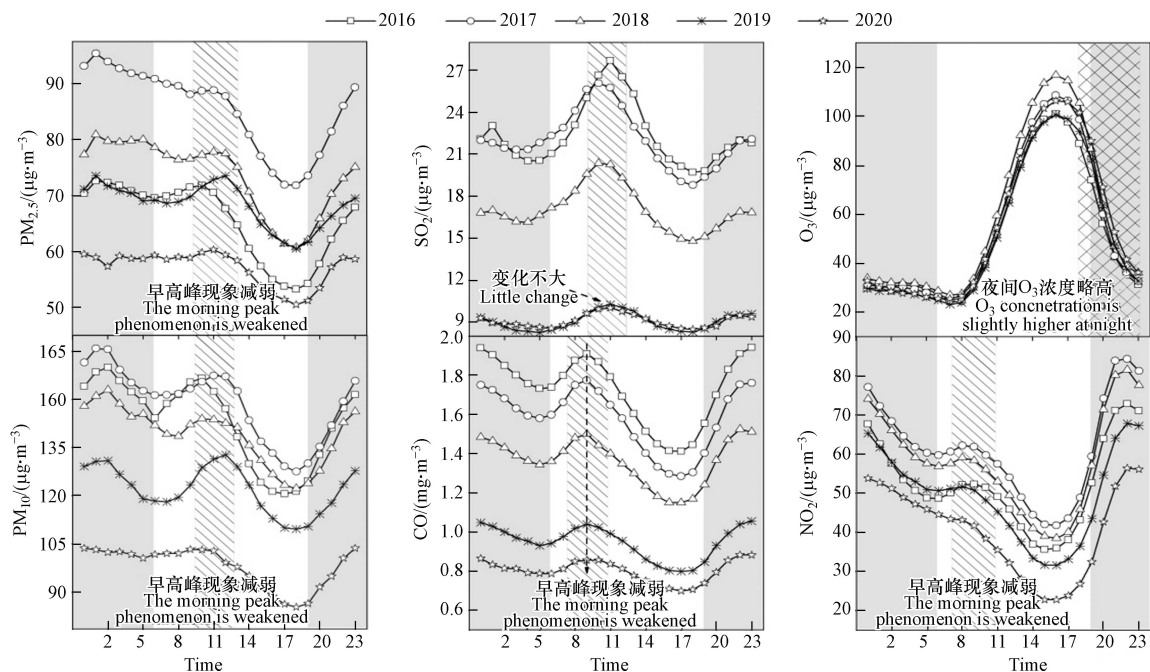


图 3 西安市疫情时段 6 项污染物的日变化

(图中灰色区域代表夜间, 白色区域代表白天, 斜线区域代表早高峰减弱现象, 网格区域代表污染物浓度异常升高现象)

Fig.3 Diurnal variation of six pollutants during epidemic period in Xi'an.

(In the figure, the gray area represents the night, the white area represents the day, the diagonal area represents the weakening of the morning peak, and the grid area represents the abnormal increase of pollutant concentration.)

SO₂ 浓度日内峰值相较于 CO、PM 等稍有滞后,原因是 SO₂ 主要来源于燃煤,而在中午需要做饭的时候,农村地区会出现燃煤散烧的情况,导致 SO₂ 在此时间段出现日内峰值.前 4 年的 PM_{2.5}、PM₁₀、CO 和 NO₂ 浓度日内变化趋势都存在明显的早高峰现象,而 2020 年由于疫情实行交通管制,以上 4 项污染物浓度的早高峰现象明显减弱.说明进行适当的交通管制措施对大气污染物的消减有重要作用.

O₃ 的日内变化呈单峰型,白天高夜间低,下午 15 时至 17 时之间达到峰值. O₃ 浓度主要受排放源和光照、温度等气象因素影响,所以白天是 O₃ 大量生成的高峰期,而夜间没有光化学反应过程的发生, O₃ 不再生成,其浓度相比于白天大幅下降,但 NO 对 O₃ 的“滴定”反应(O₃+NO→NO₂+O₂)却一直在进行,导致夜间 O₃ 浓度进一步下降.因此,昼夜不同时段影响关中地区 O₃ 浓度的主要机制不同,白天 O₃ 浓度取决于 VOCs 和 NO_x 的减排比例和太阳辐射以及温度等气象因素,而夜间交通源的大幅消减使 NO_x 的排放大幅减少,NO 对 O₃ 的滴定反应受到限制^[23-24],疫情管控期间西安及周边城市都处于污染物极限减排状态,汽车尾气排放相较于前几年大幅减少,严控时汽车尾气排放几乎为零,因此,2020 年夜间 O₃ 浓度略高于前几年.

2.3 近 5 年内疫情严控同期污染物浓度变化

为了解疫情严控期间污染物的水平,选取近 5 年同一时段(1 月 26 日—2 月 10 日)的 6 项污染物浓度数据进行分析(见图 4),结果显示,2016—2018 年期间,西安市各项污染物浓度波动较大,2018 年以后颗粒物浓度保持较为稳定的水平,除 O₃ 以外的其他各项污染物浓度均呈现逐年下降的趋势.2020 年疫情严控期间 PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 的浓度为近 5 年来最低,分别为 98.53、11.35、24.76、1.16 mg·m⁻³, O₃ 浓度最高为 82.41 μg·m⁻³,与 2019 年相比,PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO₂、CO 等 5 项污染物浓度同比减少 32.8%, 3.2%, 26.3%, 44.5%, 2.5%, O₃ 浓度同比上升 44%,说明严格的管控措施使得空气质量改善幅度十分显著^[25],但 O₃ 浓度却意外的进一步抬升, O₃ 的生成依赖于 NO、NO₂ 和 CO 等前体物体积分数变化和 Related 化学反应^[26],疫情管控打破了常态下前体物的相对含量的平衡状态,导致 O₃ 浓度的异常上升.臭氧的“不降反升”趋势与其他研究结果类似^[6,23,27].余锋等^[23]对疫情期间和 2019 年同期关中盆地的空气质量及污染物浓度进行了对比分析,发现与 2019 年的同期相比,疫情管控期间除 O₃ 以外其他 5 项污染物浓度均出现不同程度下降.赵辉等^[6]对 2016 年 G20 峰会保障期间杭州的空气质量进行了评估,发现 O₃ 浓度同比上升了 19.89%.

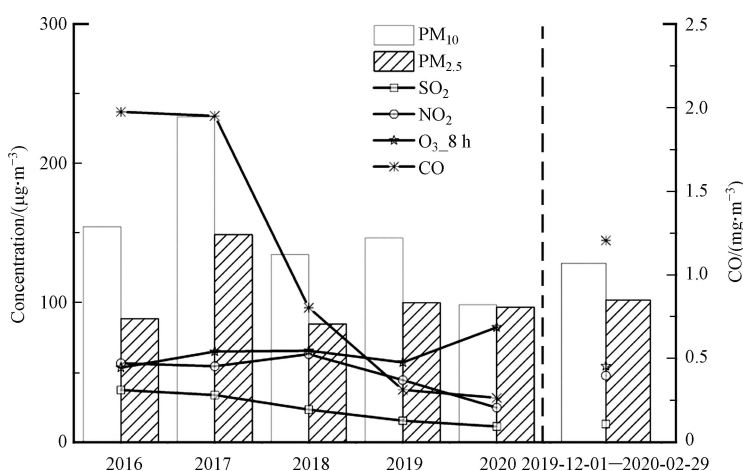


图 4 近 5 年内疫情严控同期污染物浓度变化

Fig.4 Daily variation of six pollutants during epidemic period

2.4 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及影响因素

为了更进一步说明疫情严控期间影响大气质量的主要因素,本研究还对 PM_{2.5} 中几种主要的水溶性无机离子的污染特征和影响因素进行了测定分析.选取西安市疫情管控前后一周的 PM_{2.5} 中水溶性离子浓度数据进行分析,结果如图 5 所示,在观测期间,大气 PM_{2.5} 中水溶性无机离子总浓度变化范围为 1.89—243.69 μg·m⁻³; 6 种主要水溶性无机离子浓度水平的高低顺序为: Na⁺< Ca²⁺< Cl⁻< NH₄⁺< NO₃⁻< SO₄²⁻.其中 SO₄²⁻、NH₄⁺、NO₃⁻和 Cl⁻是主要离子,其观测期间的平均浓度占总离子浓度的

90.2%。疫情管控前期 $[\text{NO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ 基本大于 1, 说明疫情管控前移动源的贡献大于固定源, 移动污染源占据主导^[28], 而疫情管控关键期, $[\text{NO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ 基本小于 1, 固定源贡献大于移动源^[29-30]。这与疫情管控期间人流和车流量较低的实际情况相符。

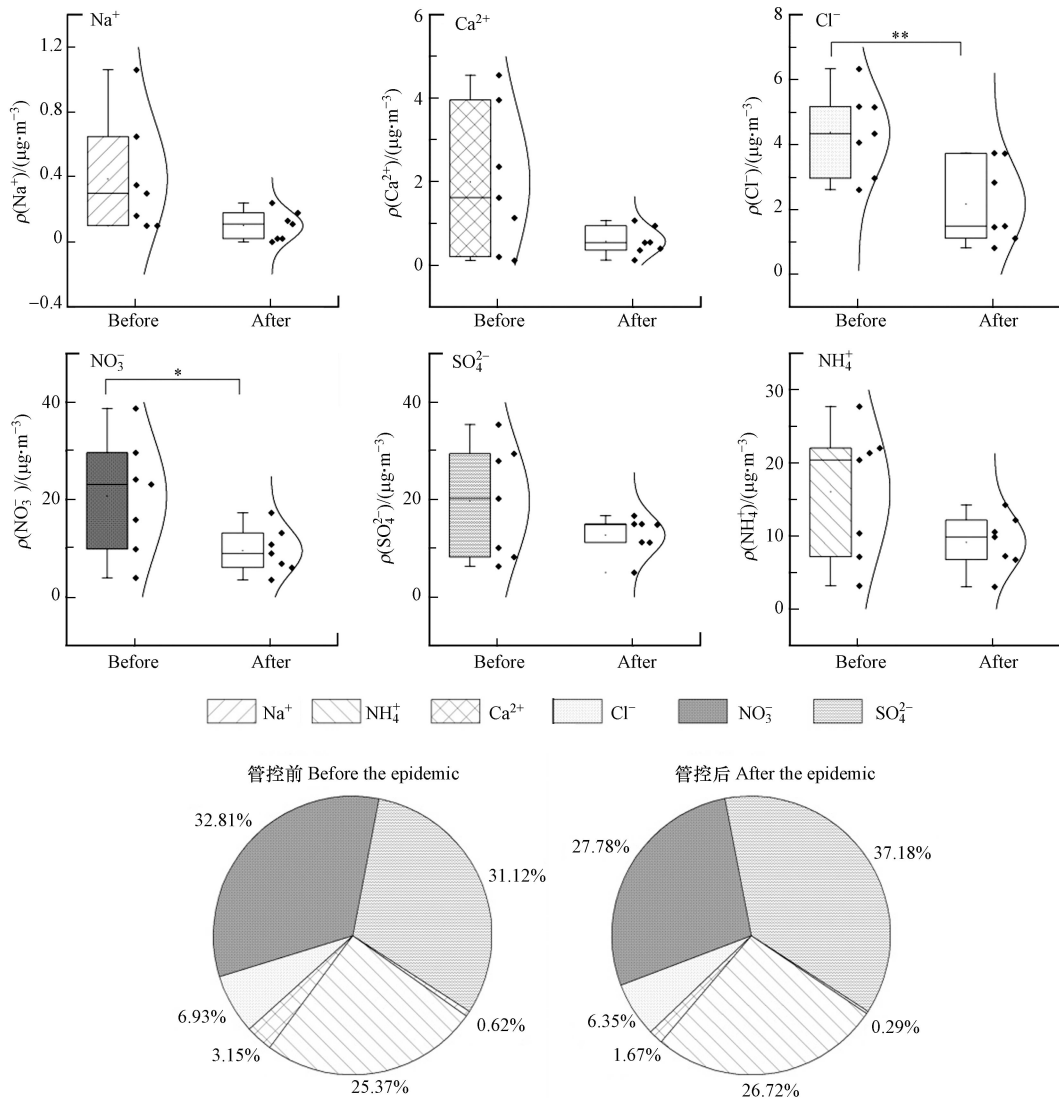


图 5 $\text{PM}_{2.5}$ 中主要水溶性离子污染特征

(*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$)

Fig.5 Pollution characteristics of water-soluble ions in $\text{PM}_{2.5}$

(* means $P < 0.05$ and ** means $P < 0.01$)

西安市疫情管控前后 $\text{PM}_{2.5}$ 中几种主要水溶性离子进行污染特征分析, 可以看出, 疫情管控后一周的 Na^+ 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 平均浓度相比于管控前一周分别下降 74%、43%、71%、50%、54%、35%, 说明疫情管控导致的排放源的改变对大气颗粒物中水溶性离子浓度的影响非常明显。疫情管控后 Cl^- 浓度明显降低, 管控后一周相比于管控前一周 Cl^- 浓度平均值下降了 $2.21 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。由于西安市地处内陆, 海盐的影响几乎可以忽略不计, 所以西安市 $\text{PM}_{2.5}$ 中的 Cl^- 可能来源主要有燃煤燃烧^[31], 烟花爆竹的燃放^[32]、生物质燃烧和冬季采暖^[33], 而在采取管控措施后 Cl^- 浓度的降低可能是由于停工停产等管控措施使工业生产的燃煤燃烧和烟花爆竹燃放的减少。 Ca^{2+} 主要来自于尘土, 对于西安来说, 其可能的来源有建筑粉尘、道路扬尘以及沙传输等。在管控后, Ca^{2+} 浓度下降了 $1.42 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 疫情管控期间, 工地停工, 交通也受到管制, 建筑粉尘和道路扬尘大量减少, 同一时期, 全国大多数城市处于疫情管控状态, 区域间污染物传输也随之变弱。 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度管控后分别降低了 $11.23 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $6.90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。大气中人为排放的 NO_x 主要来源于汽车尾气, 在疫情管控后, 机动车的车流量减少,

NO_x 的排放量大幅减少,大气中的 NH₃ 主要来源于动植物活动排放及腐烂、化肥使用、燃烧(生物质燃烧、废弃物燃烧和交通运输燃料燃烧)以及部分工业排放,疫情严控期间,氨的燃烧源和工业源大幅削减,NO_x 和 NH₃ 排放的减少导致了 NH₄NO₃ 的生成受到抑制,从而造成了 NH₄⁺和 NO₃⁻浓度降低^[33]. SO₄²⁻在疫情管控前浓度较高,而疫情管控后浓度先降低后上升.从整体上看,观测期间的 SO₄²⁻浓度相对较高,可能是由于采暖期燃煤量增加排放的大量气态 SO₂ 并经过充足的液相反应而产生^[29].从水溶性离子占比情况来看,由于不同离子的消减幅度不同,导致管控后离子占比发生了变化,NH₄⁺和 SO₄²⁻离子消减幅度最小,离子占比较管控前有所上升,其他离子均因大幅消减占比均有所下降.

3 结论(Conclusion)

本文研究了关中地区在疫情管控前后的大气污染特征进行对比研究,结合当时当地管控措施与实验观测结果,得出以下结论:

(1)从空间分布看,除 SO₂ 以外,西安、铜川、宝鸡、咸阳和渭南市的大气污染物浓度在疫情管控后都有明显下降,说明整个关中地区在采取疫情管控措施后空气质量都有了明显改善,但是各类污染物的改善情况在不同城市之间稍有差异,西安市和咸阳市 NO₂ 浓度改善值较大,分别为 27.98 μg·m⁻³ 和 27.85 μg·m⁻³,颗粒物浓度改善值最大的是西安市,严控期 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 平均改善率分别为 44.13% 和 39.68%,各代表城市 SO₂ 浓度变化相对较小,宝鸡市管控关键期 SO₂ 浓度甚至高于管控前,总体来说,五个城市中西安市空气质量改善效果最为显著.虽然关中地区在疫情管控期间大气污染物浓度有不同程度下降,但与其他城市之间仍有差距,这与城市污染物背景浓度、排放源结构及气象条件有关.

(2)从时间序列上看,2020 年疫情期间 PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 的浓度为近 5 年来历史最低,与 2019 年相比,PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO₂、CO 等 5 项污染物浓度同比减少 32.8%,3.2%,26.3%,44.5%,2.5%,O₃ 浓度同比上升 44%,除 O₃ 外,其余大气污染物的平均浓度在时间上的整体变化趋势均表现为管控前 > 管控后,疫情管控带来的减排是大气污染物浓度降低最直接的原因.疫情管控措施导致的交通源和工业源排放大大减少,说明城市大气污染物中,交通源和工业源贡献了很大的比例.O₃ 浓度在封城期间有显著上升,表明大气氧化性可能在 NO₂ 减少的背景下得到强化.

(3)对疫情管控前后一周西安市 PM_{2.5} 中水溶性离子的分析,结果表明,管控后 PM_{2.5} 中水溶性离子浓度明显降低,降低了 35%—74%,一方面与大气 PM_{2.5} 浓度降低有关,另一方面说明疫情管控改变了水溶性离子的来源,交通源的大幅减少以及冬季取暖燃煤的大量使用等等,使 PM_{2.5} 中水溶性离子的比例也发生了变化.其次,从 [NO₃⁻]/[SO₄²⁻] 的比值来看,管控前移动源的贡献大于固定源,而管控后,固定源占主导,与交通管制等措施吻合.

(4)疫情管控最直接限制的就是交通源的排放,管控后 NO₂、CO、PM 等污染物大幅减少,说明汽车尾气对大气污染的贡献不容小觑,未来在城市汽车尾气治理方面多加投入还是非常必要的.自从西安实行机动车限号政策以来,西安市的交通源得到有效消减,空气质量明显改善,说明人为管控可以有效限制汽车尾气的排放,但是除了人为管控以外,也需要在机动车低耗能低排放以及清洁能源等领域的发展上投入更多关注.

(5)疫情管控对于全社会来说是一次极限减排的“实验”,结果显示,适当的排放源管控有利于大气环境质量的改善,但是疫情期间这种一刀切过于严格的管控,一方面不利于社会经济发展,另一方面反而会破坏大气中化学反应平衡,容易在气象条件推动下出现 O₃ 和 PM_{2.5} 浓度异常升高等现象^[20].所以在制定污染源控制方案时,除了要考虑污染源和减排目标以外,还需要结合当地大气污染特征和气象条件,协同控制各项污染物的排放,使经济社会发展与生态环境健康齐头并进.

参考文献 (References)

[1] 周泽龙.从抗击新冠肺炎疫情看中国特色社会主义制度的显著优势[J].理论建设,2020,36(1):5-10.

ZHOU Z L. Observing the significant advantages of the socialist system with Chinese characteristics from the fight against COVID-

- 19 [J]. *Theory Construction*, 2020, 36(1): 5-10(in Chinese).
- [2] 钱智勇, 刘思远. 疫情下中国特色社会主义基本经济制度的优越性透析 [J]. *当代经济管理*, 2020, 42(6): 1-5.
QIAN Z Y, LIU S Y. An analysis of the superiorities of the basic economic system of socialism with Chinese characteristics under the epidemic situation [J]. *Contemporary Economic Management*, 2020, 42(6): 1-5(in Chinese).
- [3] 蔡晓斌, 任永鹏, 张媛, 等. 利用卫星遥感NO₂监测结果分析COVID-19疫情对我国社会经济活动的短期影响 [J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 54(6): 1045-1050.
CAI X B, REN Y P, ZHANG Y, et al. The short-term impact estimate of COVID-19 epidemic on social-economic activity of China by using remotely sensed NO₂ observations [J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 2020, 54(6): 1045-1050(in Chinese).
- [4] 陶金花, 范萌, 顾坚斌, 等. 新冠病毒疫情期间复工复产卫星遥感监测 [J]. *遥感学报*, 2020, 24(7): 824-836.
TAO J H, FAN M, GU J B, et al. Satellite observations of the return-to-work over China during the period of COVID-19 [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(7): 824-836(in Chinese).
- [5] 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.
- [6] 赵辉, 郑有飞, 魏莉, 等. G20峰会期间杭州及周边地区空气质量的演变与评估 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(6): 2016-2024.
ZHAO H, ZHENG Y F, WEI L, et al. Evolution and evaluation of air quality in Hangzhou and its surrounding area during G20 summit [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(6): 2016-2024(in Chinese).
- [7] 赵军平, 罗玲, 郑亦佳, 等. G20峰会期间杭州地区空气质量特征及气象条件分析 [J]. *环境科学学报*, 2017, 37(10): 3885-3893.
ZHAO J P, LUO L, ZHENG Y J, et al. Analysis on air quality characteristics and meteorological conditions in Hangzhou during the G20 summit [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(10): 3885-3893(in Chinese).
- [8] 周亚端, 朱宽广, 黄凡, 等. 新冠肺炎疫情期间湖北省大气污染物减排效果评估 [J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(3): 228-236.
ZHOU Y D, ZHU K G, HUANG F, et al. Emission reductions and air quality improvements during the COVID-19 pandemic in Hubei Province [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(3): 228-236(in Chinese).
- [9] 乐旭, 雷亚栋, 周浩, 等. 新冠肺炎疫情期间中国人为碳排放和大气污染物的变化 [J]. *大气科学学报*, 2020, 43(2): 265-274.
YUE X, LEI Y D, ZHOU H, et al. Changes of anthropogenic carbon emissions and air pollutants during the COVID-19 epidemic in China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43(2): 265-274(in Chinese).
- [10] 毛敏娟, 杜荣光, 吴建. 杭州G20减排措施对大气水溶性离子特征的影响 [J]. *中国环境科学*, 2019, 39(6): 2283-2290.
MAO M J, DU R G, WU J. Influences of the G20 emission reduction on characteristics of water-soluble ions in PM in Hangzhou [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(6): 2283-2290(in Chinese).
- [11] WANG H L, MIAO Q, SHEN L J, et al. Characterization of the aerosol chemical composition during the COVID-19 lockdown period in Suzhou in the Yangtze River Delta, China [J]. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2021, 102: 110-122.
- [12] XIONG C F, ZHANG Y L, YAN J, et al. Chemical composition characteristics and source analysis of PM_{2.5} in Jiaying, China: Insights into the effect of COVID-19 outbreak [J]. *Environmental Technology*, 2021: 1-29.
- [13] DATTA A, RAHMAN M H, SURESH R. Did the COVID-19 lockdown in Delhi and Kolkata improve the ambient air quality of the two cities? [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2021, 50(2): 485-493.
- [14] QIAN Y, SCHERE L, TUKKER A, et al. China's potential SO₂ emissions from coal by 2050 [J]. *Energy Policy*, 2020, 147: 111856.
- [15] 叶堃, 李闯, 徐银涛, 等. 陕西典型地区民用燃煤炉具取暖污染减排效果及影响因素研究 [J]. *煤炭加工与综合利用*, 2020(10): 80-85, 5.
YE K, LI C, XU Y H, et al. The study on effects and influencing factors of pollution reduction of household coal-fired stove heating in typical areas of Shaanxi Province [J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2020(10): 80-85, 5(in Chinese).
- [16] 孟祥瑞, 张凯山. 成都市道路移动源减排对空气质量的短期影响 [J]. *环境科学学报*, 2021, 41(4): 1250-1258.
MENG X R, ZHANG K S. The short-term effect of on-road vehicle emissions reduction on air quality in Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(4): 1250-1258(in Chinese).
- [17] 姬杨蓓蓓, 莫世杰, 成枫. 公共交通管控对新冠肺炎病毒(COVID-19)疫情爆发期的影响分析 [J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(8): 20-28.
JI Y, MO S J, CHENG F. Influence analysis of public transport controls against novel coronavirus pneumonia(COVID-19) during outbreak period [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Science)*, 2020, 39(8): 20-28(in Chinese).
- [18] 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. Analysis of changes and factors influencing air pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei region during the COVID-19 pandemic [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(3): 1205-1214(in Chinese).
- [19] LU Q, ZHENG J Y, YE S Q, et al. Emission trends and source characteristics of SO₂, NO_x, PM₁₀ and VOCs in the Pearl River Delta

- region from 2000 to 2009 [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 76: 11-20.
- [20] LE T H, WANG Y, LIU L, et al. Unexpected air pollution with marked emission reductions during the COVID-19 outbreak in China [J]. *Science*, 2020, 369(6504): 702-706.
- [21] 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): e0141642.
- [22] CHEN K, WANG M, HUANG C H, et al. Air pollution reduction and mortality benefit during the COVID-19 outbreak in China [J]. *The Lancet. Planetary Health*, 2020, 4(6): e210-e212.
- [23] 余锋, 李小飞, 李锦雯, 等. 新冠疫情对关中盆地空气质量的影响 [J]. *陕西科技大学学报*, 2021, 39(4): 28-39.
YU F, LI X F, LI J W, et al. Effects of *Corona Virus Disease 2019* on air quality in Guanzhong Basin [J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 2021, 39(4): 28-39 (in Chinese).
- [24] WANG H L, HUANG C, TAO W, et al. Seasonality and reduced nitric oxide titration dominated ozone increase during COVID-19 lockdown in eastern China [J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2022, 5(1): 1-7.
- [25] 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 Y B, ZHANG Y, ZHANG Y B, 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 (in Chinese).
- [26] 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 等. 山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 [J]. *环境科学*, 2022, 43(2): 696-706.
YANG X, AN X Y, LIU Y Q, et al. Pollution characteristic and control factor analysis of atmospheric ozone during summer typical periods in Linyi, Shandong [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(2): 696-706 (in Chinese).
- [27] 王占山, 李云婷, 张大伟, 等. 2014年APEC会议期间北京市空气质量分析 [J]. *环境科学学报*, 2016, 36(2): 675-683.
WANG Z S, LI Y T, ZHANG D W, et al. Analysis on air quality in Beijing during the 2014 APEC conference [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(2): 675-683 (in Chinese).
- [28] 鲍宗炜, 张宏, 周志刚, 等. 兰溪市PM_{2.5}中水溶性离子的组成特征及季节变化 [J]. *环境科学学报*, 2021, 41(5): 1727-1733.
BAO Z W, ZHANG H, ZHOU Z G, et al. Compositional characteristics and seasonal variations of the water-soluble ions in PM_{2.5} in Lanxi [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(5): 1727-1733 (in Chinese).
- [29] 黄含含, 王羽琴, 李升革, 等. 西安市PM_{2.5}中水溶性离子的季节变化特征 [J]. *环境科学*, 2020, 41(6): 2528-2535.
HUANG H H, WANG Y Q, LI S P, et al. Seasonal variation of water-soluble ions in PM_{2.5} in Xi'an [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(6): 2528-2535 (in Chinese).
- [30] GAO X M, YANG L X, CHENG S H, et al. Semi-continuous measurement of water-soluble ions in PM_{2.5} in Jinan, China: temporal variations and source apportionments [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(33): 6048-6056.
- [31] HUANG X F, YU J Z, YUAN Z B, et al. Source analysis of high particulate matter days in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(6): 1196-1203.
- [32] 邹强, 姚玉刚. 春节烟花爆竹燃放期间苏州市区PM_{2.5}组分特征分析 [J]. *中国环境监测*, 2014, 30(4): 100-106.
ZOU Q, YAO Y G. The analysis of characteristics of PM_{2.5} components during set-off fireworks period of spring festival in Suzhou City [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, 30(4): 100-106 (in Chinese).
- [33] 申进朝, 陈纯, 多克辛. 部分中原城市PM_{2.5}中水溶性离子污染特征 [J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(7): 153-156.
SHEN J C, CHEN C, DUO K X. Pollution characteristics of water soluble ions in PM_{2.5} in some cities of central China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(7): 153-156 (in Chinese).