

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2024.01.004

新冠疫情期间西安市空气质量时空特征研究

吴雅睿*, 刘弘蕾, 娄春辉

(西安科技大学测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 2019年和2021年新冠疫情期间西安市政府均采取了强有力的管控措施, 为此对比研究了不同程度减排措施对空气质量的影响。采用特征雷达图、空间插值和HYPLIST轨迹模型等方法对西安市疫情期(2019年12月—2020年2月、2021年12月—2022年2月)和正常生产期(2020年12月—2021年2月)冬季空气质量变化特征进行了对比分析, 并探讨了人为减排情景下空气质量变化潜在原因。结果表明: (1) 西安市环境空气质量指数(AQI)空间分布整体呈现“西北劣东南优”特征。2020年疫情严控期空气质量得到明显改善, 优良率达到53%; 2022年疫情严控期空气质量未受管控措施明显影响。(2) 2020年疫情严控期除O₃外污染物浓度均明显下降, 降幅分别为PM_{2.5} (42.90%) > NO₂ (42.13%) > CO (35.37%) > PM₁₀ (32.58%) > SO₂ (17.40%); 2022年仅有SO₂和NO₂浓度下降, 降幅为NO₂ (31.86%) > SO₂ (18.31%)。疫情期间污染类型属于偏二次型。(3) 疫情期间, 污染天气是在高湿静风天气条件和盆地地形的基础上, 受人为源排放和区域污染物传输引起的, 因此促进污染物协同减排和关中地区联防联控是改善空气质量的关键举措。

关键词: 新冠疫情; 空气质量; 时空特征; 影响因素

中图分类号: X51

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2024)01-047-015

Spatial-temporal characteristics of air quality in Xi'an during the COVID-19 pandemic

WU Yaru*, LIU Honglei, LOU Chunhui

(College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: During the COVID-19 pandemic in 2019 and 2021, strong control measures were taken in Xi'an, China, therefore, the impact of different degrees of emission reduction measures on air quality was studied comparatively. In this work, the characteristics of air quality changes during the pandemic period (December 2019-February 2020 and December 2021-February 2022) and the normal production period (December 2020-February 2021) in Xi'an were compared and analyzed by methods of characteristic radar map, spatial interpolation and HYPLIST trajectory model, and the potential causes of air quality change under anthropogenic emission reduction scenarios were discussed. The results show that: (1) The overall spatial distribution of air quality index (AQI) in Xi'an exhibits a characteristic of "inferior in northwest and superior in southeast". In 2020, the air quality of Xi'an city was significantly improved during the strict pandemic control period, with 53% days with the air quality being excellent and good. While in 2022, the

基金项目: 陕西省教育厅自然科学基金项目(17JK0494)

作者简介: 吴雅睿(1984-), 女, 河北廊坊人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事环境监测与治理方面的研究。E-mail: wuyarui@xust.edu.cn

收稿日期: 2022-03-25; 修改日期: 2022-06-08

*通信作者。

air quality was not significantly affected by the strict epidemic control measures. (2) During the strict control period of the epidemic in 2020, except for O_3 the concentrations of other pollutants, decreased significantly, with $PM_{2.5}$ (42.90%) > NO_2 (42.13%) > CO (35.37%) > PM_{10} (32.58%) > SO_2 (17.40%). While in 2022, only SO_2 and NO_2 concentrations decreased, with a decrease of NO_2 (31.86%) > SO_2 (18.31%). The type of pollution during the pandemic was mainly secondary pollution. (3) During the pandemic period, polluted weather was mainly caused by anthropogenic source emissions and regional pollutant transport on the basis of high humidity, calm wind weather conditions and basin topography. Therefore, promoting the coordinated reduction of pollutant emission, as well as joint prevention and control in Guanzhong area, is the key measure to improve air quality.

Key words: COVID-19 pandemic; atmosphere quality; spatio-temporal characteristics; influence factors

0 引言

随着工业化、城市化进程的加快,大气污染已经成为目前突出的城市环境问题,受到全社会范围的广泛关注。2019年西安市获批第9个国家中心城市,作为关中平原中心和中国丝绸之路的起点城市、西部地区的经济中心和交通枢纽,西安市在国家治理体系和发展格局中地位尤其凸显,其城市空气质量更是备受瞩目,而特殊地形及经济的持续发展使得西安市成为全国重污染多发城市之一。近年来,西安市精准治霾,综合施策,制定了《“铁腕治霾·保卫蓝天”三年行动方案(2018—2020年)》、《西安市大气污染防治条例》等一系列政策措施,空气质量得到了明显改善,但大气污染防治并非一蹴而就,复杂的污染源及成因导致西安市秋冬季大气污染事件时有发生^[1]。

2019年底,新冠疫情爆发,疫情形势严峻,我国各省市于2020年1月25日前后启动重大突发事件公共卫生事件I级响应,全国范围内均实施了严格的防控措施。2021年12月,西安市受到疫情的再次冲击,于2021年12月23日对全市实行封闭管理。新冠疫情管控措施的实施使人为污染物排放到达下限,形成了两次典型的极限减排情景,为研究强力减排下空气质量及影响因素对比分析提供了“天然对照试验”。相关研究表明,疫情期间工业、住宅取暖和机动车污染物排放量保持稳定或略有降低,对空气质量改善作用明显^[2,3]。也有研究认为疫情管控创造的人为减排情景并未使严重污染天气消失^[4-6],相比于减排的影响,不利的气象条件是导致疫情期间二次污染物浓度变化的主要原因^[7-9]。

然而,现有研究对西安市疫情期间的空气质量关注较少,因此利用两次疫情进行区域性对比研究,探讨疫情期间大气污染排放、区域传输及气象变化等因素变化情况具有重要意义。本研究选取疫情期间(2019年12月—2020年2月、2021年12月—2022年2月)和正常生产期(2020年12月—2021年2月)进行对比分析,并分别选取2020年1月25日—2020年2月28日和2021年12月23日—2022年1月24日这两次疫情严控期作为研究时段,这两个时段涵盖了两次疫情从停工停产到全面复工复产的整个过程,可实现对两次疫情严控期防疫措施影响的横向对比。基于大气污染物和气象条件相关监测数据,结合空间插值方法和HISPLIT (Hybrid single particle lagrangian integrated trajectory model) 模型等探讨两次疫情管控措施及影响因素对空气质量的影响,以期西安市大气污染防治策略的制定提供一定的数据支持和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西安市位于渭河流域关中平原中部, 北临黄土高原, 南邻秦岭, 市内海拔差异明显, 形成了东宽西窄的喇叭口形的特殊地形。此外, 西安市地处暖温带半湿润的季风气候区, 四季分明, 年平均气温 13.1~14.3 °C。西安市区常年盛行东北风, 年平均风速为 1.3~2.6 m/s。关中地区特殊的喇叭口地形和持续的东北风使得西安大气污染物自然扩散能力较弱, 雾霾频发。全国重点城市空气质量排名显示, 2021 年西安市空气质量排名为倒数第 20 位, 由此看来, 西安市改善空气质量任务依旧艰巨。

1.2 数据来源

本研究使用的西安市空气质量数据来自中国环境监测总站 (<http://www.cnemc.cn>) 公布的空气质量逐时观测数据, 包括空气质量六要素: SO_2 、 NO_2 、 CO 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 , 除 O_3 外计算各站点 24 h 平均浓度值的算术平均值作为日均浓度, O_3 采用日最大 8 h 平均浓度值的算术平均值作为日均浓度。西安市各监测点均位于西安市区内, 站点位置分布见图 1。气象数据来自中国国家气象信息中心地面逐小时观测资料 (<http://data.cma.cn>)。HYSPLIT 轨迹模型中使用的气象资料来源于美国国家环境预报中心 (NCEP) 提供的 GDAS 资料 (<ftp://arlftp.arl-hq.noaa.gov/pub/archives/gdas1>), 该数据每 6 h 记录一次, 分别为 00:00、06:00、12:00、18:00 (UTC, 世界时), 空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。此外, 城内出行强度数据来源于百度地图迁徙大数据平台 (<http://qianxi.baidu.com>)。

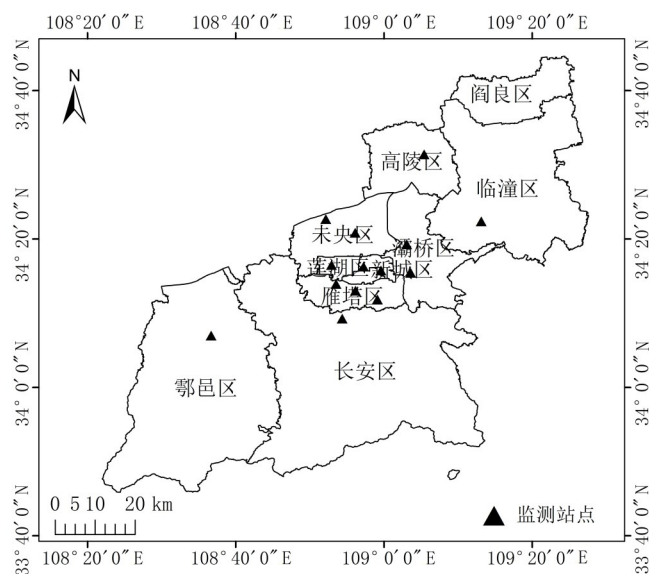


图 1 研究区位置及各站点分布图

Fig. 1 Location of the study area and distribution of the stations in Xi'an

1.3 研究方法

(1) 克里金插值分析法

克里金插值法是一种建立在半变异函数理论的基础上, 对有限区域内的区域化变化取值进行无偏最优

估计的空间插值方法, 算法公式可表示为

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

式中: $Z(x_0)$ 为未知样点的值, $Z(x_i)$ 为第*i*个样点的值, n 为已知样点数, λ_i 为第*i*个样点的未知权重^[10]。

(2) 污染特征雷达图

污染物特征雷达图是一种通过数学方法消除不同污染物间浓度值差异的影响, 直观地展现区域大气污染类型及时空变化特征的分析方法^[11], 其设计思路、数据处理过程及类型划分参见文献^[11]。通过对监测数据进行归一化处理, 从而在时间序列上判断出偏机动车污染、偏燃煤污染、偏二次颗粒物污染、偏沙尘污染、偏烟花污染等多个污染类型^[12]。

(3) 后向轨迹聚类分析

HYSPLIT模型即拉格朗日混合单粒子轨道模型, 是一种用于计算和分析大气中气团和粒子运动轨迹和大气复杂传输扩散、沉积模拟的专业模型, 因而被广泛应用于大气污染物来源及输送路径等方面的研究^[13,14]。

2 结果与讨论

2.1 空气质量变化特征分析

2.1.1 时间特征分析

根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ633-2012)对疫情期间西安市空气质量等级进行划分。表1为研究时段内西安市月度空气质量对比, 图2为研究时段同期AQI值变化对比, 图3为两次疫情严控期AQI值与其他年份同时段对比。

表1 西安市不同时段空气质量对比

Table 1 Comparison of air quality in different periods of Xi'an

时期	2019—2020			2020—2021			2021—2022			疫情严控期	
	12月	1月	2月	12月	1月	2月	12月	1月	2月	2020年	2022年
AQI均值	132.80	166.87	106.20	110.68	123.87	108.64	96.68	146.26	109.61	114.31	137.21
AQI峰值	323	275	183	201	275	328	188	230	179	275	252
优良天数/%	45.16	19.35	51.72	35.48	41.94	67.86	64.52	19.35	39.29	54.28	33.33
重度污染及以上天数/%	16.13	32.26	0	3.23	9.68	10.71	0	16.13	0	2.86	15.15

根据表1和图2可知, 2019年12月和2020年1月AQI均值分别为132.80和166.87, 比2021年同期高出19.96%和34.62%, 说明整体空气质量较差。I级响应启动后, 2020年2月份AQI值整体出现大幅下降, 优良天数达到整月天数的51.72%, 可见人为减排对空气质量改善作用显著。而第二次疫情期间, 处于疫情严控期的2022年1月份, 空气质量却劣于处于疫情初期的2021年12月份, 且优良天数(6天)比上年同期(13天)减少7天, 重度污染及以上天气达到5天, 可见2022年疫情管控对空气质量作用并不明显。从两次疫情严控期间AQI值与同期对比分析(图3)可以很直观地看出, 疫情严控期内AQI值整体较同期低, 可见疫情对空气质量存在一定改善作用。由图3(a)可见, 2020年2月5日之前AQI值出现三次峰值且都较2021年和

2022年同期高, 推测其原因, 可能是春节期间烟花爆竹燃放管控不力及大气扩散条件差等条件所致。图3(b)中, 2022年疫情严控期AQI值整体低于往年同期, 但可以明显看出三年AQI值均波动较大。总体来看, 两次疫情严控期间AQI值均得到改善, 但由于其他空气质量影响因素的综合作用, 空气质量的改善程度不同, 对影响因素的分析见下文。

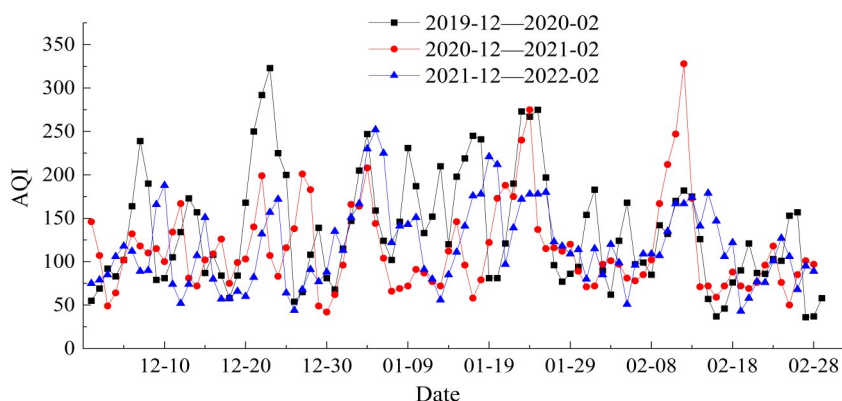


图 2 不同年份对应研究时段内西安市 AQI 值对比

Fig. 2 Comparison of AQI averages in Xi'an during the corresponding study periods in different years

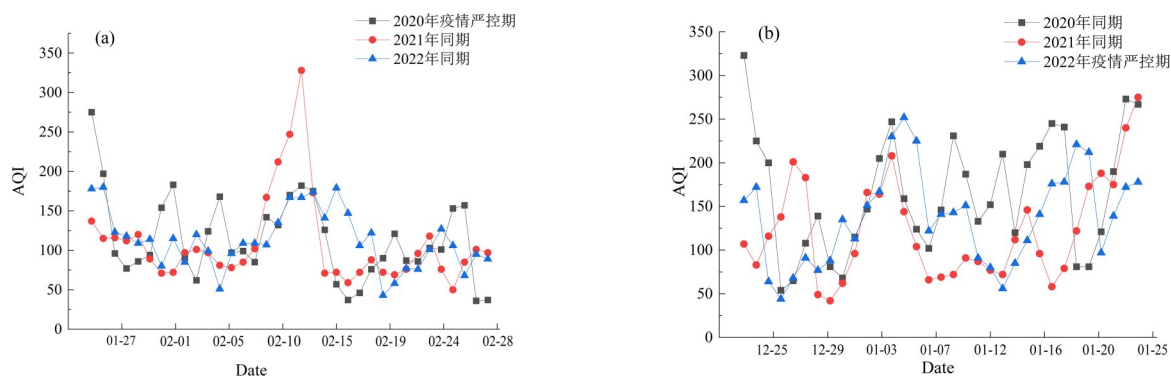


图 3 2020 年 (a) 与 2022 年 (b) 两次疫情严控期 AQI 值与其他年份同时段对比

Fig. 3 Comparison of AQI averages for the two outbreak control periods in 2020 (a) and 2022 (b) compared to the same time period in other years

由上文分析可知, 严格划分日期的疫情管控期与疫情所处大致月份空气质量情况相当, 各等级所占比例相差较小, 综合考虑, 根据月份划分不同防疫阶段更有利于整体把握西安市空气质量情况。

同时, 两次疫情期间全市均实施了严格的管控措施, 对两次疫情严控期空气质量变化对比 (如图4), 可以对疫情期间的管控程度及其他影响因素进行对比分析。由图4可知, 两次疫情严控期对空气质量改善程度并不相同。2020年疫情严控期正值春节假期, 全国范围内人员流动受到限制, 停工停产较为彻底。期间优良天数占比达50%以上, 仅有3%的重度污染天气出现。但2022年严控期空气质量改善程度较差, 优良天数占比仅为33%。从理论上讲, 疫情严控措施应使得空气质量与2020年改善程度相当, 但却出现了15%的重度污染天气, 推测与极端不利的气象条件导致的污染物二次转化和西安周边未管控城市污染物区域传输有关。

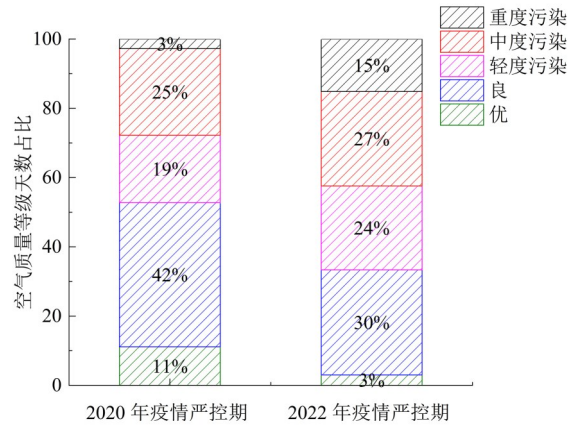


图4 2020、2022年疫情严控期西安市空气质量等级天数对比

Fig. 4 Comparison of the number of days with different air quality level in Xi'an during the strict pandemic control period of 2020 and 2022

2.1.2 空间特征分析

研究表明,克里金插值能够有效提高空间插值的效率,应用较为灵活,对正态数据实现空间插值精度较高^[15,16]。在ArcGIS 10.2软件中对监测站点AQI月均值数据进行普通克里金插值,得到不同月份西安市AQI值空间格局分布图,详见图5。

从整体来看,研究时段内西安市空气质量分布趋势整体一致,呈现西安市西北部(未央区、高陵区)AQI整体较高,西安市东南部(灞桥区、临潼区、长安区北部)AQI值整体较低的分布特征。其中未央区监测站点(经开区)均处于相对较高水平,而临潼区监测站点(临潼区)均处于相对较低水平,整体符合工业聚集区AQI值大于生态旅游区的规律,说明不同的产业结构会对AQI造成区域化差异,而疫情严控期间工业企业停产则导致南北AQI值差距有所减小。

分时段看,研究时段内西安市AQI值月度变化均呈倒U型分布,即疫情期间(2019年12月—2020年2月、2021年12月—2022年2月)和正常生产期(2020年12月—2021年2月)内的12月及2月较1月低。疫情管控措施使2020年2月份全市范围AQI值处于较低水平,而2022年1月份AQI值却未出现明显降低,造成这一现象的主要原因是西安市工业园区大多位于西郊和北郊,在2022年疫情管控期间陆续恢复生产,西北方向的气团输送使得污染物浓度逐步增加,加上1月份气温较低,不利于污染物扩散,导致疫情管控对污染物浓度变化的影响较小。

2.2 污染物浓度变化特征分析

由西安市研究时段内 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 等6种污染物月均浓度对比(如图6)可知研究期间各污染物浓度均呈现不同程度的月间波动性。

研究时段内, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 与CO变化趋势大体一致,呈倒U型变化。三类污染物浓度最低值均为2020年2月份,较上月分别下降42.90%, 32.58%和35.37%,可见减少污染排放是最直接有效的治理方式,而同属于疫情管控期的2022年1月,虽存在疫情集中管控,但污染物水平并未受到影响。推测其原因,2022年疫情严控期间西安周边城市企业未受疫情影响,同时1月10日起西安市区工业企业已逐步复工复产,污染源逐步增多,且存在不利气象条件和区域传输,导致此种情况发生。

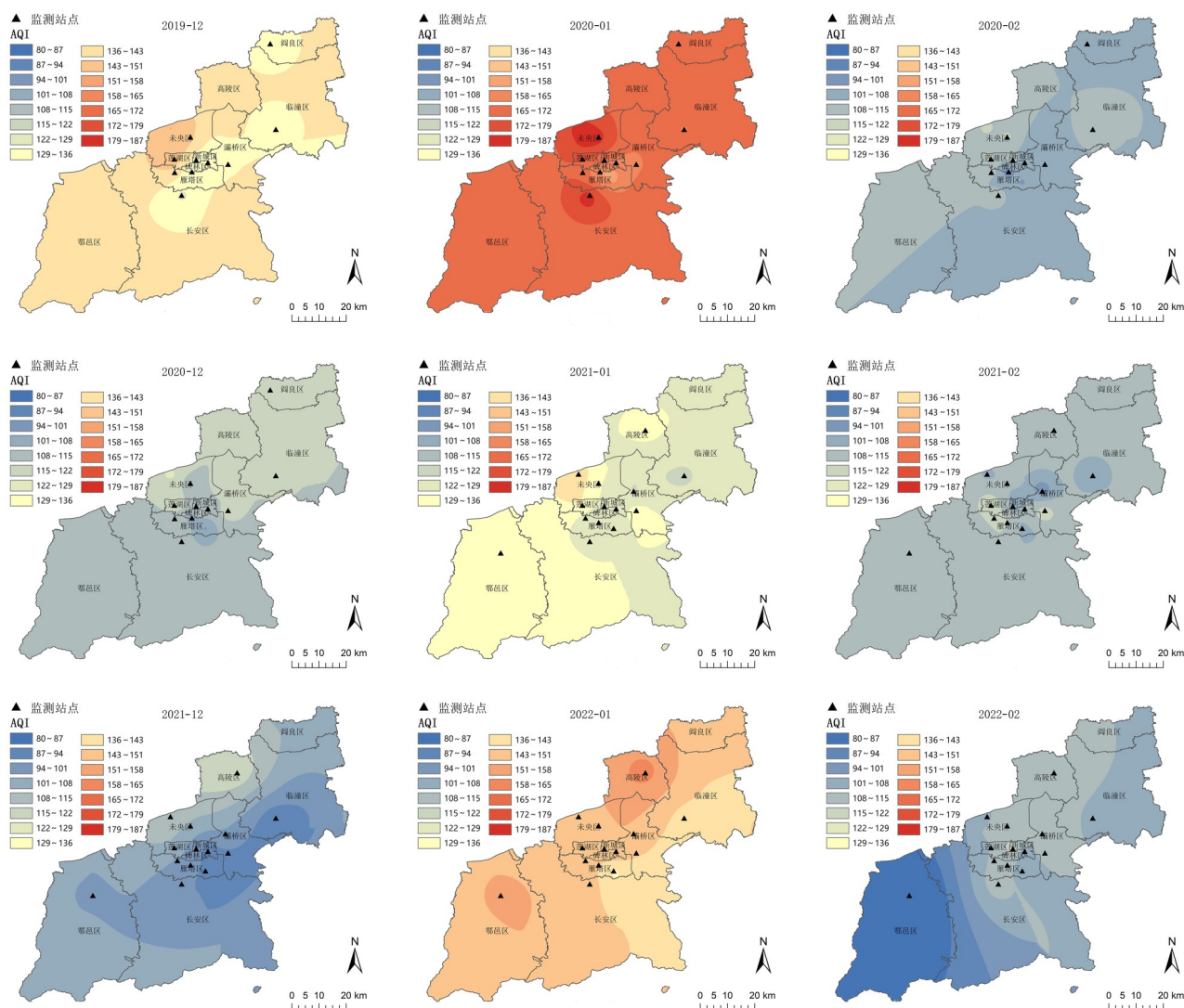


图 5 2019-2022 年疫情期间不同阶段西安市污染物浓度分布对比

Fig. 5 Comparison of pollutant concentration distribution in Xi'an at different stages from 2019 to 2022

SO₂、NO₂ 两类污染物在两次疫情严控期均出现明显下降, 其中以 2020 年 2 月份下降最为明显, 较上月相比相比降幅分别为 17.40% 和 42.13%, 可见管控措施有效减少了工业生产和汽车尾气排放等来源的污染物排放。由于 2022 年疫情管控政策仅针对西安市内, 周边地区污染物排放会导致疫情管控政策对其浓度影响较小, 因此 2022 年 1 月较上月浓度下降幅度仅分别为 18.31% 和 31.86%。

研究时段内 O₃ 月均浓度在疫情严控期 (2020 年 2 月、2022 年 1 月) 较上月增长明显, 增长幅度为 102% 和 57%, 其中 2020 年 2 月 O₃ 浓度显著增长。研究表明, 地表 O₃ 生成机制十分复杂, 污染主要来自氮氧化物 (NO_x) 和挥发性有机物 (VOCs) 在光照条件下的化学反应。一方面, 疫情导致人为排放 NO_x 浓度大幅降低, 减少的 NO 浓度会导致“滴定”效应 (NO + O₃ → NO₂ + O₂) 减弱, 而且 O₃ 受 NO_x 与 VOCs 减排比例影响, 人为排放 VOCs 浓度并未与 NO_x 等比下降, 从而促进 O₃ 的积累。另一方面, 细颗粒物浓度降低会导致较高的紫外线穿透度, 为地表臭氧生成提供了更多的能量^[17]。

从两次疫情严控期污染物特征雷达图对比 (图 7) 可知, 两次疫情严控期间各类污染物浓度差别不大,

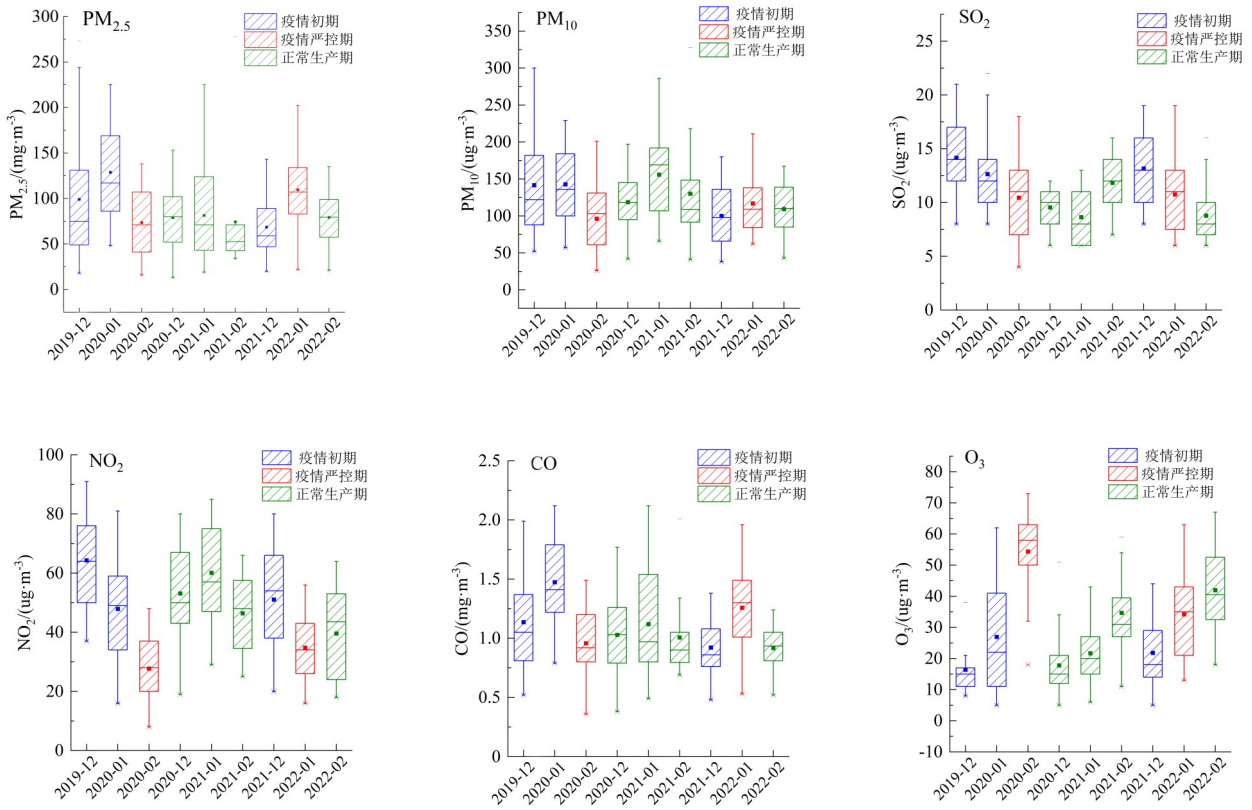


图 6 2019—2022 年不同防疫阶段西安市主要污染物浓度对比

Fig. 6 Comparison of main pollutant concentrations in Xi'an during different pandemic prevention stages from 2019 to 2022

均只有 $PM_{2.5}$ 超出标准值上限, 属于偏二次型, 表明污染物二次转化是导致大气污染的主要原因^[18]。从图 7 可以看到, NO_2 特征值均明显低于下限值, 说明机动车污染源减排对减少 NO_2 浓度效果显著。 PM_{10} 特征值均明显低于标准值下限, 其来源主要受人类活动、风力因素和道路积尘水平影响, 可见疫情管控一定程度上减少了 PM_{10} 对大气污染的贡献。

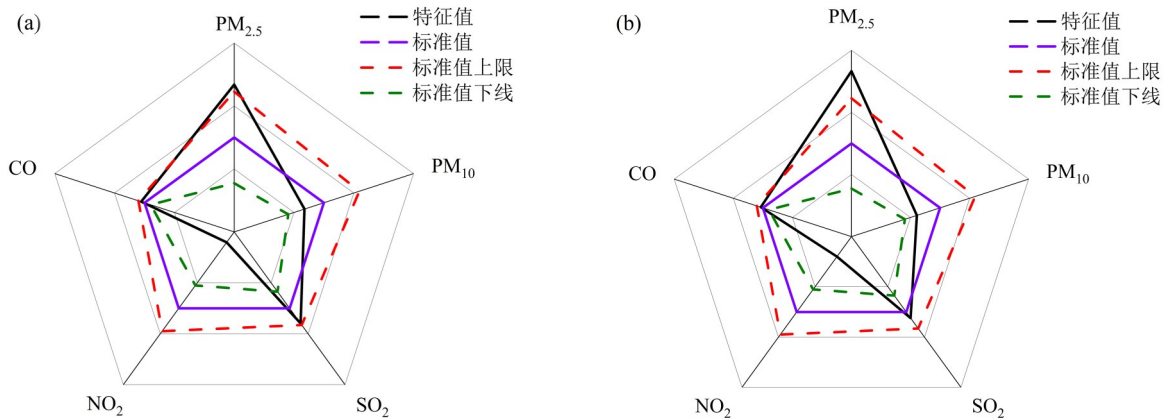


图 7 2020 年 (a) 与 2022 年 (b) 西安市疫情严控期污染物特征雷达图

Fig. 7 Radar plot of pollutant characteristics during strict epidemic control period in Xi'an in 2020 (a) and 2022 (b)

2.3 空气质量影响因素分析

2.3.1 气象条件

相关研究表明, 疫情期间气象条件对空气质量影响显著^[19]。对相关气象要素分析 (图 8、图 9) 发现, 西安市在研究时段内的重度污染天气期间均经历了不利的气象条件。

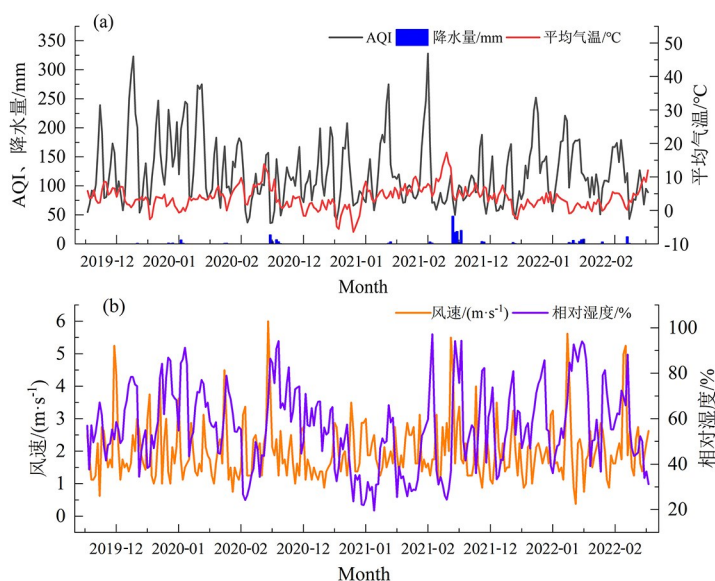


图 8 研究时段内 AQI、降水量及平均气温 (a) 与风速、相对湿度 (b) 逐日变化对比

Fig. 8 Comparison of diurnal variations of AQI, precipitation and average temperature (a) with wind speed and relative humidity (b) during the study period

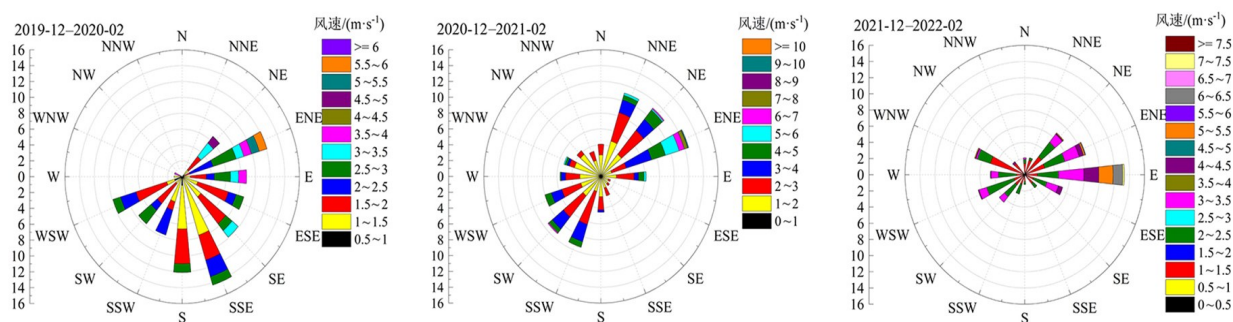


图 9 西安市研究时段研究时段内风向玫瑰图

Fig. 9 Rose chart of wind direction during the study period during the research period in Xi'an

首先, 西安市冬季气温降低, 大气混合层高度降低, 易形成逆温现象, 温度降低导致污染物垂直扩散受阻, 污染物在近地面无法扩散, 就会形成持久的重污染天气^[20]。其次, 研究表明, 秋冬季关中地区相对湿度与颗粒污染物浓度呈现明显正相关^[1,21]。研究时段内污染过程空气相对湿度均达到 50% 以上, 如 2020 年 1 月 15 日, 尽管出现雨雪天气, 但过程降水量仅为 1~4 mm, 清除作用微弱。一方面降水前后边界层高度下降, 近地面空气被压缩, 污染物浓度相应升高; 另一方面近地面湿度维持在 85% 以上, 导致颗粒物吸湿能力增强, 为 NO_x 和 SO₂ 等污染物二次转化创造了有利条件, 因此污染物浓度升高抵消了降水的清除作用, 出现

3天的重度污染天气。再者较低风速会导致微小颗粒物均匀混合,易发生二次污染物生成。如2022年1月疫情严控期,主导风向为东风和东北风,而作为上风向处汾渭平原东部城市均已出现持续的污染天气,受风向影响,污染物随风进入西安地区,导致1月份空气质量较差,2022年1月份汾渭平原部分城市空气质量如表2所示。以上分析可以看出,西安市冬季气象因子对空气质量影响程度较为明显,不利的气象条件导致疫情管控下重污染天气时有发生,但会一定程度上减弱污染程度并缩短污染时长。

表2 2022年1月汾渭平原东部城市空气质量情况

Table 2 Air quality in eastern cities of the Fenhe and Weihe plains in January 2022

评价指标	三门峡	洛阳	运城	渭南
AQI均值	132.10	144.65	135.58	141.58
AQI峰值	229	244	208	228
优良天数/%	7	4	8	5
重度污染及以上天数/%	2	3	1	3

对污染情况及地理位置综合考虑,选取兴庆公园监测站点(108.99° E, 34.26° N)作为轨迹起始点,模拟的起始高度为500 m,对后向轨迹进行聚类后分析污染物来源及浓度情况。研究显示,500 m风场既能够减少地面摩擦对于气流轨迹的影响,也能够准确地反映出地层的气团输送特征^[22,23]。结合图10和表3整体来看,2020年2月气团输送轨迹主要为中短距离输送且PM_{2.5}浓度整体较低。27%的轨迹来自宁夏中部和内蒙古西部毛乌素沙地,54%来自省内短距离输送,20%来源于河南省西部。而2022年1月份69%的气团输送来源于本地输送且PM_{2.5}浓度较高,为124.07 μg/m³。其余输送均来自西北方向沙漠和半沙漠地区,污染物受到南部秦岭山地的阻挡,形成山前汇聚不易扩散,这与上文中西安市2022年1月份空气质量较差情况相符合。因此,西安市空气颗粒污染物外来源主要来自于西北方向输送和本地输送,且输送轨迹污染物浓度高低一定程度上影响西安市空气质量的优劣。

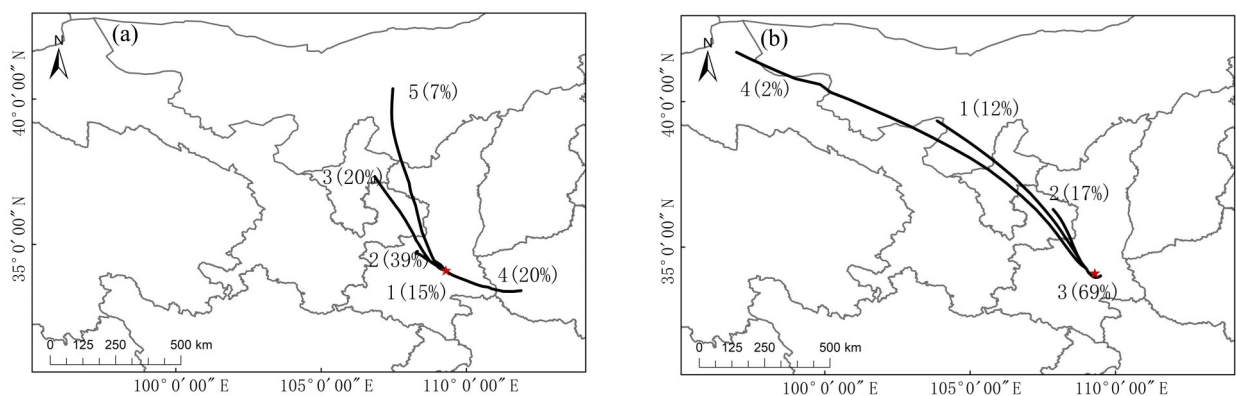


图10 2020年2月(a)与2022年1月(b)西安市疫情严控期间500 m高度后向轨迹聚类分析

Fig. 10 Cluster analysis of backward trajectory at 500 m height during strict epidemic control period in Xi'an in February 2020 (a) and January 2022 (b)

表 3 每组聚类轨迹数及相应 PM_{2.5} 浓度

Table 3 Number of cluster tracks and corresponding PM_{2.5} concentration

时期	轨迹类型	出现/%	途径区域	PM _{2.5} /(μg·m ⁻³)
2020-02	1	15	西安市	97.03
	2	39	咸阳市	49.80
	3	20	西安, 宁夏东部, 甘肃东部	31.41
	4	20	河南西部	69.75
	5	7	内蒙古西部	14.53
2022-01	1	12	甘肃北部, 内蒙古西部, 宁夏	65.80
	2	17	甘肃东部	88.65
	3	69	西安市	124.07
	4	2	甘肃, 内蒙古西部, 宁夏	35.85

2.3.2 地形条件

西安市境内南高北低, 海拔差异明显。秦岭山脉横亘南境, 山脊高度海拔 2000~2800 m。秦岭与境内北端的渭河平原构成西安市主要地貌主体, 地形图见图 11。从地理位置上看, 西安市地处关中盆地中部, 不利的地形条件带来的污染物滞留和累积影响对位于盆地中部的西安市尤为明显。关中盆地南部为秦岭山脉, 北部为黄土高原, 因此污染物难以向南北方向扩散, 在秋冬季盛行的东北风影响下, 由于秦岭山脉和黄土高原的阻挡, 使得由东部潼关和黄河共同形成的天然通风口进入的大气污染物不易扩散, 形成污染物累积。

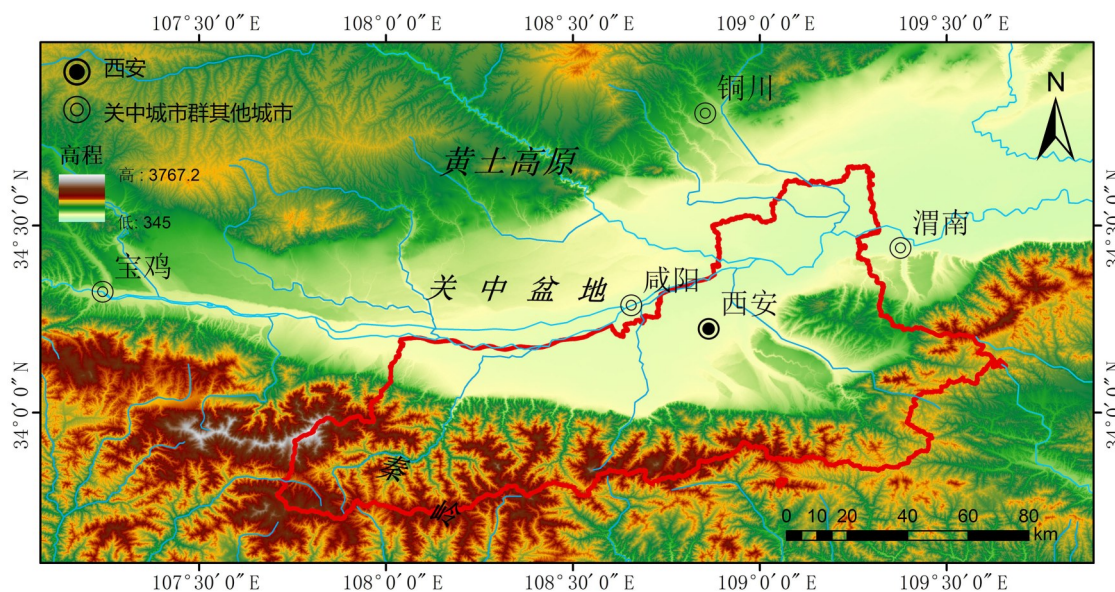


图 11 西安市地形图

Fig. 11 Topographic map of Xi'an City

2.3.3 重点源排放变化

(1) 机动车排放

2019年西安市现有机动车保有量已突破 300 万量, 位居全国第九位。机动车不仅会排放细颗粒污染

物,还会排放大量的 NO 、 NO_2 、 HC 等臭氧前体物,因此机动车排放是大气污染防治重点源之一。根据西安市大气污染防治“一市一策”专家团队对西安市2018年大气污染源解析的初步研究结果,西安市机动车污染物排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献高达18.5%。而对 NO_2 浓度的贡献率达43.51%,因此降低交通量是减少机动车排放对大气污染的最直接办法。新冠疫情管控措施的实施使得西安市交通出行强度大幅下降。2020年疫情期间,西安市80%区域实行出行管控。2021年12月27日起,西安市规定非疫情防控及民生保障车辆不得上路,并于2022年1月18日起有序恢复公共交通运输力。百度迁徙平台的2022年春节期间(1月10日—2月28日)与2021年、2020年农历同期城内出行强度变化较好地反映了两次疫情封控措施的影响,出行强度见图12,图中横坐标为距离春节的天数,可以发现实施疫情管控之后城内出行强度迅速下降,而2021年同期一直保持较高水平。由上文空气质量分析可知,2020年2月 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_2 浓度下降明显,未出现浓度超标的天气,2022年1月 NO_2 浓度下降明显,可见疫情期间交通强度下降一定程度上降低了污染物浓度。

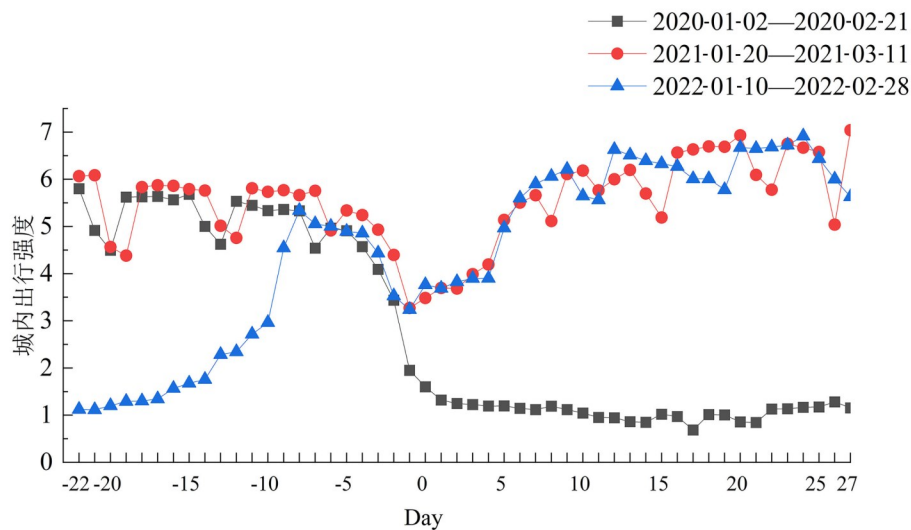


图12 西安市研究时段春节期间城内出行强度对比

Fig. 12 Comparison of inner city travel intensity during Spring Festival in Xi'an during the study period

(2) 工业企业排放

2019年起,西安市强力推进铁腕治霾,搬迁或关停7家重污染企业,对771户“散乱污”企业进行分类整治,完成50台燃煤工业窑炉整治及97台燃气锅炉低氮改造,规模以上企业煤炭消耗减少41万吨。2020年疫情期间,全市“五上”企业停工停产5853家,其中规模以上工业企业达1521家。统计数据显示,大范围停工停产使得西安市2020年1—2月规模以上工业增加值按可比价格计算同比下降3.3%。规模以上工业综合能源消费量102.39万吨标准煤,同比下降19.9%^[24]。2022年疫情期间,西安市政府实施“分区分级”的复工复产政策,自1月10日起各区逐步复工复产,工业产值未受到明显影响。与此同时,2022年疫情期间仅有西安市内企业停工停产,而关中地区其他城市企业未受影响,在盆地地形条件和高湿静风条件下,污染物累积就会造成污染天气的发生,这也与上文空气质量分析所得结果一致。

3 结 论

西安市两次新冠疫情管控措施作为天然的减排试验,对改善西安市空气质量起到了显著效果。本研究

基于气象监测数据,从全域角度出发,利用数学模型和空间分析等方法分析疫情期间空气质量变化及影响因素,得出以下结论:

1) 两次疫情初期西安市空气质量较2021年同期相比差别不大,2020年疫情严控期污染天气少,空气质量改善明显,但2022年受气象条件影响疫情严控期改善效果并不显著。研究时段内西安市空气质量空间分布为“西北部高,东南部低”。随着工业企业停工停产,市内南北AQI值差距减小,表明西北部的工业区污染排放是导致大气污染的重要因素之一。

2) 疫情严控期间移动源、工业排放源、扬尘源都受到不同程度的抑制,其中2020年管控措施较大,使得西安市污染物浓度除 O_3 外均出现明显下降,但两次疫情严控期污染特征均为偏二次型,可见 $PM_{2.5}$ 仍为西安市的首要污染物,同时 O_3 浓度均出现小幅上升,因此单一阻止某一污染物排放效果有限,推进 O_3 和 $PM_{2.5}$ 等污染物的协同减排才是实现空气质量好转的关键。

3) 疫情严控期间污染天气主要是气象条件和不利地形双重作用的结果。疫情管控使得机动车和工业企业减排作用明显,但只能降低污染物的浓度,不能消除污染。受先天不足的地形条件和关中地区区域污染物输送影响,冬季高湿、静风等不利气象条件会导致西安市上空污染物累积,加速二次污染物的生成,造成污染天气的发生。由此可见,西安市大气污染防治不能独善其身,空气质量是否改善既取决于治理政策的实施,也取决于关中地区产业结构和能源结构的调整,因此加强区域联防联控是目前最直接有效的治理手段。

参考文献:

- [1] Huang L, Bi X, Yang X C, *et al.* Characteristics of $PM_{2.5}$ pollution and influence of meteorological factors in Xi'an during 2014-2017 [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2020, 38(3): 440-447.
黄蕾, 毕旭, 杨晓春, 等. 2014—2017年西安市 $PM_{2.5}$ 污染特征及影响因子 [J]. 干旱气象, 2020, 38(3): 440-447.
- [2] Liu H F, Xu W, Wei M, *et al.* Impact of pollutant emission reduction on air quality during the COVID-19 pandemic control in early 2020 based on RAMS-CMAQ [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(3): 1215-1227.
刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 等. 2020年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟 [J]. 环境科学, 2021, 42(3): 1215-1227.
- [3] Lu D B, Mao W L, Zheng L L, *et al.* Ambient $PM_{2.5}$ estimates and variations during COVID-19 pandemic in the Yangtze River Delta using machine learning and big data [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(8): 1423.
- [4] Song Y S, Lin C Q, Li Y, *et al.* An improved decomposition method to differentiate meteorological and anthropogenic effects on air pollution: A national study in China during the COVID-19 lockdown period [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, 250: 118270.
- [5] 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): 51-59.
- [6] Liu Y, Wang Z J, Sun K Z, *et al.* Characteristics of air quality during the COVID-19 pandemic in Jinan [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2021, 43(11): 1421-1425.
刘杨, 王兆军, 孙开争, 等. 新冠病毒肺炎防疫期间济南市空气质量特征分析 [J]. 环境污染与防治, 2021, 43(11): 1421-1425.

- [7] 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.
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.
- [8] Qiu Y, Ma Z, Li K, *et al.* Markedly enhanced levels of peroxyacetyl nitrate (PAN) during COVID-19 in Beijing [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(19): 1-10.
- [9] 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.
- [10] Shi Y Q, Wang J, Zhang Z P. Analysis on spatial distribution of air pollution and its spatial correlation with influencing factors in Xiamen City [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(12): 5406-5412.
施益强, 王坚, 张枝萍. 厦门市空气污染的空间分布及其与影响因素空间相关性分析 [J]. 环境工程学报, 2014, 8(12): 5406-5412.
- [11] 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.
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.
- [12] Dou W S, Wang C X, Liu Z S. Study on the characteristics of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region and the surrounding areas at early 2020 [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(11): 8-14.
窦旺胜, 王成新, 刘照胜. 2020年初京津冀及周边地区空气污染特征研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(11): 8-14.
- [13] Wang Y Q, Zhang X Y, Arimoto R. The contribution from distant dust sources to the atmospheric particulate matter loadings at Xi'an, China during spring [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368(2/3): 875-883.
- [14] Li R F, Zhang X H, Duan J L, *et al.* Pollution and optical characteristics of heavy pollution process in Beijing Area in spring [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2021, 16(1): 28-34
李若飞, 张学海, 段金龙, 等. 北京地区春季重污染过程污染特征及其光学特性分析 [J]. 大气与环境光学学报, 2021, 16(1): 28-34.
- [15] Zhao C X, Wang Y Q, Wang Y J, *et al.* Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ pollution status and the correlation of particulate matters and meteorological factors during winter and spring in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 418-427.
赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春PM_{2.5}和PM₁₀污染水平时空分布及其与气象条件的关系 [J]. 环境科学, 2014, 35(2): 418-427.
- [16] Yan X, Ma X L, Zhao W H. Research on the PM₁ pollutant concentration based on different interpolation method [J]. *Mapping*, 2010, 33(4): 172-175.
晏星, 马小龙, 赵文慧. 基于不同插值方法的PM₁污染物浓度研究 [J]. 测绘, 2010, 33(4): 172-175.
- [17] Wang S B, Liu G J, Yang P, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of ozone and influence of meteorological factors in Hefei [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2021, 16(4): 339-348.
汪水兵, 刘桂建, 杨鹏, 等. 合肥市臭氧时空分布特征与气象因子影响研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2021, 16(4): 339-348.
- [18] Yin L N, Chu Y X, Duan J C, *et al.* Characteristics of a multi-factor superimposing haze episode in '2+26' Cities [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(12): 2022-2030.
殷丽娜, 褚旻晰, 段菁春, 等. "2+26"城市一次多因素叠加重污染过程的特征分析 [J]. 环境科学研究, 2019, 32(12): 2022-2030.
- [19] Chen J H, Feng X Q, Li Y, *et al.* Analysis of air quality and influencing factors in Sichuan Basin during the COVID-19

- outbreak [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(12): 5594-5601.
- 陈军辉, 冯小琼, 李媛, 等. 新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析 [J]. *环境科学*, 2021, 42(12): 5594-5601.
- [20] Hu L, Cheng L, Lin Y, *et al*, A conceptual model of regional pollution and meteorological conditions in Guanzhong Region [J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(6): 1496-1503.
- 胡琳, 程路, 林扬, 等. 关中区域大气重污染年份气象条件分析 [J]. *干旱区研究*, 2020, 37(6): 1496-1503.
- [21] Zheng K L, Huang Y, Yao X Y, *et al*, Correlation between $PM_{2.5}$, NO_2 and tourism activities, weather factors in Zhangjiajie City [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2020, 15(5): 347-356.
- 郑凯莉, 黄毅, 姚小云, 等. 张家界市 $PM_{2.5}$ 、 NO_2 与旅游活动及天气因素的相关性分析 [J]. *大气与环境光学学报*, 2020, 15(5): 347-356.
- [22] 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.
- 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.
- [23] Zhao H, Wang T J, Jiang F, *et al*, Investigation into the source of air pollutants to Hong Kong by using backward trajectory method during the trace-p campaign [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2009, 25(2): 181-186.
- 赵恒, 王体健, 江飞, 等. 利用后向轨迹模式研究 TRACE-P 期间香港大气污染物的来源 [J]. *热带气象学报*, 2009, 25(2): 181-186.
- [24] Xi'an Bureau of Statistics. From January to February, the industrial energy consumption of above designated size in Xi'an City decreased greatly [EB/OL]. (2020-04-03)[2022-04-11]. <http://tjj.xa.gov.cn/tjsj/tjxx/5ea648aefd85080ad1789765.html>.
- 西安市统计局. 1—2 月西安市规模以上工业能耗降幅较大 [EB/OL]. (2020-04-03)[2022-04-11]. <http://tjj.xa.gov.cn/tjsj/tjxx/5ea648aefd85080ad1789765.html>.