

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.05.008

# 新冠肺炎疫情管控期间乌鲁木齐市空气质量变化及原因分析

居鲁都孜·沙山<sup>1</sup>, 咎梅<sup>1,2\*</sup>

(1 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054;  
2 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

**摘要:** 为研究新型冠状病毒肺炎疫情防控期间乌鲁木齐市空气质量变化特征及其影响因素, 选取了2020年乌鲁木齐市两次疫情严格防控期间(2020年1月26日至3月21日和7月20至8月29日)及疫情前后, 以及2019年相同时期地面观测站的逐小时空气质量指数(AQI)、颗粒污染物(PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>)和气态污染物(SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO、O<sub>3</sub>)的数据进行对比分析, 探究了气态污染物对颗粒污染物二次合成的贡献, 并利用地理探测器对影响空气质量的因子进行了定量探测。结果表明: 与2019年同期相比, 2020年乌鲁木齐市两次疫情防控期间, 除O<sub>3</sub>外, PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>和CO浓度都呈现下降趋势, 分别减少了36%、55%、10%、18%和49%; 而同疫情严格防控期相比, 2020年疫情前后期的AQI、颗粒污染物浓度及气态污染物浓度都要高。说明疫情防控措施在一定程度上减少了乌鲁木齐市颗粒污染物和气体污染的浓度, 改善了空气质量。单因子探测结果显示空气污染指标中CO和PM<sub>2.5</sub>是主导因子, 气象因子中气温对空气质量的影响相对较大; 交互因子探测结果表明, 空气污染物PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>在其他因子的交互作用下对AQI的影响最明显, 而气象因子中相对湿度结合其他因子的交互作用对AQI影响较明显。说明乌鲁木齐市的空气质量是多种因子相互作用的结果。本研究为乌鲁木齐市空气质量改善和大气污染防治工作提供了理论参考。

**关键词:** 新型冠状病毒肺炎; 空气质量; 大气污染物; 颗粒污染物二次合成; 地理探测器

中图分类号: X511

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)05-479-015

## Change and correlation analysis of air quality in Urumqi during the epidemic of COVID-19

Juluduzi Shashan<sup>1</sup>, ZAN Mei<sup>1, 2\*</sup>

(1 College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China;  
2 Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, China)

**Abstract:** In order to study the characteristics of air quality changes and their influencing factors in Urumqi, China, during the strict prevention and control of COVID-19, the data of hourly air quality index (AQI), particulate pollutants (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>) and gaseous pollutants (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>) during the two strict epidemic prevention and control periods (January 26 to March 21, 2020 and July 20 to August 29, 2020) as

**基金项目:** 新疆师范大学博士科研启动基金项目(XJNUBS2003, XJNUBS1620), 新疆维吾尔自治区重点实验室招标课题(XJDX0909-2021-01)

**作者简介:** 居鲁都孜·沙山(1997-), 女, 新疆伊犁人, 硕士研究生, 主要从事PM<sub>2.5</sub>遥感反演研究。E-mail: 1845610807@qq.com

**导师简介:** 咎梅(1979-), 女, 新疆乌鲁木齐人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事干旱区生态环境与遥感应用研究。

E-mail: zanmei1102@163.com

**收稿日期:** 2022-02-11; **修改日期:** 2022-04-15

\*通信作者。

well as before and after the two control periods in Urumqi in 2020, and in the same period of 2019, were selected for comparative analysis, the contribution of gaseous pollutants to the secondary synthesis of particulate matter was explored, and the quantitative detection of the factors affecting air quality was carried out using geographical detectors. The results show that compared with the same period in 2019, during the two epidemic prevention and control periods in Urumqi in 2020,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$  and CO concentrations all show a downward trend, with a decrease of 36%, 55%, 10%, 18% and 49%, respectively. While compared with the two strict epidemic prevention and control periods, the AQI, particulate matter concentration and gaseous pollutant concentration in the pre and post epidemic periods of 2020, are generally higher. That indicates that the epidemic prevention and control measures acquired have reduced the concentration of particulate pollutants and gas pollution in Urumqi to some extent, leading to the improvement of the air quality. The single factor detection results show that CO and  $PM_{2.5}$  are the dominant factors in air pollution indicators, and the temperature has a relatively significant effect on air quality in meteorological factors. The interaction factor detection results show that air pollutants  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  have the most obvious effects on AQI under the interaction of the other factors, and the interaction of relative humidity with other factors in meteorological factors has a significant effect on AQI. So it is shown that the air quality of Urumqi city is the result of the interaction of multiple factors. This study provides a theoretical basis for the improvement of air quality and air pollution prevention and control in Urumqi.

**Key words:** COVID-19; air quality; air pollutants; secondary synthesis of particulate contaminants; geographical detector

## 0 引 言

新型冠状病毒肺炎 (COVID-19, 简称新冠) 是由新型冠状病毒 (2019-nCov) 引起的肺部炎症<sup>[1]</sup>, 传染性强, 传播速度快。为了遏制新冠疫情的蔓延, 我国政府制定了迅速的防治对策, 包括严格管制车辆出行, 居民禁止外出, 停止集市聚集, 停工停业停课等<sup>[2]</sup>。居家隔离政策有效降低了病毒传播机率<sup>[3]</sup>。截止到2020年9月为止, 乌鲁木齐市经历了两次严重的新冠疫情。

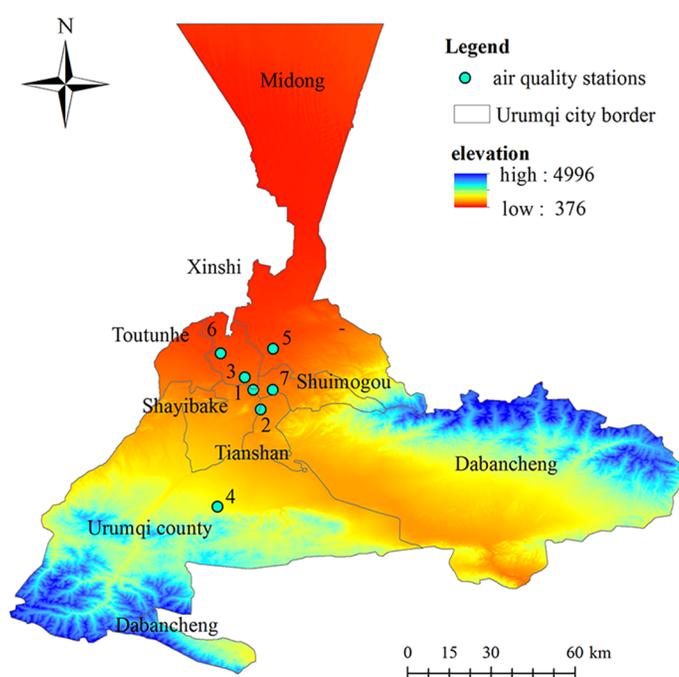
大气污染是当前我国政府和社会各界普遍关心的重要环境问题。国内外学者对新冠疫情期间污染物排放及其对空气质量的影响开展了深入研究。Venter等<sup>[4]</sup>根据卫星遥感数据和地面空气质量监测数据对全球34个地区新冠疫情期间污染物浓度进行了分析, 发现疫情期间空气质量显著改善,  $NO_2$ 和 $PM_{2.5}$ 浓度下降,  $O_3$ 略有上升。Collivignarelli等<sup>[5]</sup>在米兰地区利用9种污染物结合气象因素进行分析, 得到 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 浓度在疫情防控期间大幅度降低的结论。Zhang等<sup>[6]</sup>在武汉市借助WRF-GC模型研究发现疫情管控期间 $NO_2$ 浓度下降了50%。Chen等<sup>[7]</sup>发现疫情期间的交通限制政策对中国城市空气质量改善具有重要意义。Nie等<sup>[8]</sup>研究发现中国31个省份在疫情期间 $NO_2$ 比 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 浓度下降幅度大。赵雪等<sup>[9]</sup>研究发现北京在疫情防控期间空气质量显著改善,  $SO_2$ 、 $PM_{10}$ 和 $NO_2$ 浓度分别降低了26.5%、24.3%和16.9%,  $O_3$ 浓度初期增长76.3%, 后期增长速度放缓。Zhao等<sup>[10]</sup>采用WRF模型和CMAQ模型评估疫情期间气象因素对空气质量的影响, 结果表明必须考虑气象因素对大气污染的影响。另外, 冯海英<sup>[11]</sup>研究了乌鲁木齐市疫情防控期间 $PM_{2.5}$

和 $PM_{10}$ 的时空变化特征,发现防控期间 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 浓度均值低于防控前后;袁波波等<sup>[12]</sup>选取大气污染物和空气质量指数(AQI)分析了乌鲁木齐市疫情期间交通流量对空气质量的影响,结果表明,在乌鲁木齐市两次疫情交通管制期间,交通流量显著降低了 $PM_{10}$ 、CO和 $NO_2$ 的浓度。综合以上可以看出,大部分研究还集中在在疫情防控前后大气环境质量的对比和分析,有关定量解析气态污染物的成因和影响空气质量驱动因素的研究较少。因此,本文除了探究乌鲁木齐市2020年两次疫情严格防控期间相比2019年同期的空气质量变化特征之外,还结合乌鲁木齐市重点工业企业和汽车保有量的数据分析其排放物对空气质量的影响,定量解析气态污染物对颗粒污染物二次合成的贡献,最后利用地理探测器分析影响空气质量的驱动因素,以期乌鲁木齐市空气质量改善和大气污染防治工作提供理论依据。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 研究区概况

乌鲁木齐市地处天山北麓中段( $86^{\circ}37'33'' E \sim 88^{\circ}58'24'' E$ ,  $42^{\circ}45'32'' N \sim 44^{\circ}08'00'' N$ ),北与准噶尔盆地连接,地势起伏大,三面环山,北面平原宽广。复杂的地形不利于大气污染物的扩散。研究区属于温带大陆性干旱气候,7月和8月最热,平均气温 $25.7^{\circ}C$ ;1月最冷,平均气温 $-15.2^{\circ}C$ 。乌鲁木齐市有7个辖区、1个县(图1)。乌鲁木齐市范围内的空气质量监测站点有7个,分别为铁路局、培训基地、监测站、米东区环保局、三十一中学、收费站以及新疆农科院农场等<sup>[13]</sup>,空间位置如图1所示。



注: 1 收费站; 2 监测站; 3 铁路局; 4 培训基地; 5 米东区环保局; 6 新疆农科院; 7 三十一中学

图1 乌鲁木齐市空气质量监测站点分布图

Fig. 1 Distribution of air quality monitoring stations in Urumqi city

### 1.2 数据来源

2020年乌鲁木齐市第1次疫情严格防控期从1月26日(启动重大突发公共卫生事件一级响应)到3月21

日(响应级别降至四级)。第2次疫情严格防控期从7月20日(提高乌鲁木齐市风险等级)至8月29日(降为低风险)<sup>[11]</sup>。2020年第1次疫情严格防控前期和后期分别是1月1—25日和3月22日—7月19日。第2次疫情严格防控前期和后期分别是3月22日—7月19日和8月30日—12月31日。本研究分别选取乌鲁木齐市2020年两次疫情严格防控期间和前后期以及2019年同时期PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、AQI等污染物浓度的逐小时数据,数据来源于中国环境监测总站<sup>[12]</sup>(表1)。O<sub>3</sub>数据用8h的最大浓度作为日均浓度,其他数据用24h滑动平均值作为日均浓度。两次疫情严格防控期间乌鲁木齐市空气质量监测站中3个监测站(新疆农科院、铁路局和米东区环保局)的空气质量指标普遍比其他4个站点的高,为反映乌鲁木齐市整体空气质量状况,对7个站点数据取平均值,并利用Origin2021Pro软件对数据进行分析。

表1 乌鲁木齐市空气质量数据说明<sup>[14]</sup>

Table 1 Description of air quality data in Urumqi<sup>[14]</sup>

种类	说明
AQI	按照污染程度与空气质量情况分类表示,目前参与评估的有细微颗粒物、可吸收粒子、二氧化硫、二氧化氮、臭氧、一氧化碳等六项
PM <sub>2.5</sub>	细颗粒物,是指大气中直径小于或等于2.5 μm的颗粒物,粒径一般很小,但具有很大的毒性
PM <sub>10</sub>	可吸入颗粒物,指空气动力学当量直径≤10 μm的颗粒物
SO <sub>2</sub>	二氧化硫,溶于水,会产生亚硫酸
CO	一氧化碳,极易与血红蛋白结合,使血红蛋白失去携氧的能力和作用
NO <sub>2</sub>	二氧化氮,吸入二氧化氮可能对肺组织产生强烈的刺激作用和腐蚀作用
O <sub>3</sub>	臭氧,对眼睛和呼吸道有刺激作用,对肺功能也有危害

### 1.3 研究方法

本研究利用地理探测器模型定量分析不同因子对空气质量的影响。地理探测器是探测要素驱动能力的统计工具,其基于空间分异理论,将因变量与不同的自变量放在同一空间尺度进行探测,若某个自变量对因变量有重要影响,说明两者的空间分布具有一定的相似性。具体是通过计算统计量 $q$ 来度量单要素的解释力,还可以分析两个变量间的交互作用,从而得到双变量的解释力。 $q$ 的取值范围一般在0~1之间, $q$ 值越大,表示自变量 $x$ 对因变量 $y$ 的解释能力也越强<sup>[15,16]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 2020年疫情严格防控期与2019年同期对比分析

#### 2.1.1 空气质量分析

AQI是定量描述空气质量状况的无量纲指数<sup>[12]</sup>,其数值和级别越高,说明城市空气污染情况越严重。AQI评价等级划分为优、良、轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染6个等级,空气质量指数大小对应的级别如表2所示。

图2为2020年两次疫情严格防控期间与2019年同期AQI对比结果。由图可以看出,2020年乌鲁木齐第1次疫情严格防控期间(1月26日—3月21日),AQI均值为98,空气质量属于二级(良),第2次疫情严格防控期间(7月20日—8月29日),AQI均值为38,空气质量属于一级(优)。与2019年同期相比,2020年第1次和第2次疫情防控期间AQI分别降低了36%和21%。以上结果说明,相比正常时期,疫情严格防控期间空气质量较好。

表 2 空气质量指数范围及等级分布<sup>[17]</sup>

Table 2 Air quality index range and class distribution<sup>[17]</sup>

AQI 指数	空气质量状况	空气质量指数等级
0~50	优	一级
51~100	良	二级
101~150	轻度污染	三级
151~200	中度污染	四级
201~250	重度污染	五级
251~300	严重污染	六级

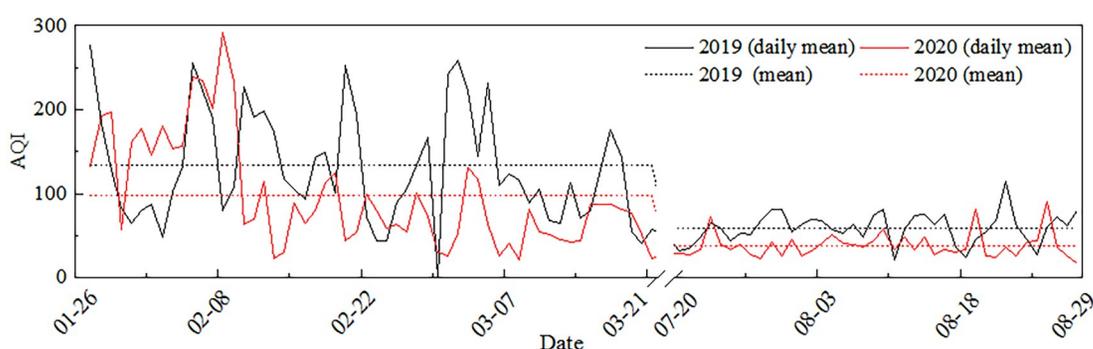


图 2 2020 年两次疫情严格防控期间与 2019 同期 AQI 的对比

Fig. 2 Comparison of air quality index during two outbreaks of strict control in 2020 with the same period in 2019

### 2.1.2 颗粒污染物浓度变化分析

图 3 为 2020 年两次疫情严格防控期间与 2019 年同期  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  对比结果。由图可以看出, 2019 年和 2020 年  $PM_{2.5}$  浓度波动较大, 2020 年大部分时间  $PM_{2.5}$  浓度都小于 2019 年同期的  $PM_{2.5}$  浓度。其中, 2020 年第 1 次疫情严格防控期间,  $PM_{2.5}$  浓度均值为  $68 \mu g/m^3$ , 2019 年同期  $PM_{2.5}$  浓度均值为  $104 \mu g/m^3$ 。2020 年第 2 次疫情严格防控期间  $PM_{2.5}$  浓度均值为  $17 \mu g/m^3$ , 2019 年同期  $PM_{2.5}$  浓度均值为  $19 \mu g/m^3$ 。2020 年与 2019 年同期相比, 第 1 次疫情严格防控期间,  $PM_{2.5}$  浓度减少了 36%, 第 2 次疫情严格防控期间,  $PM_{2.5}$  减少了 2%。说明乌鲁木齐市 2020 年疫情严格管控期内  $PM_{2.5}$  浓度相比正常时期降低了。

空气污染除了细颗粒物  $PM_{2.5}$  贡献率较大外, 粗颗粒物  $PM_{10}$  的贡献率也大<sup>[12]</sup>。由图 3 可以看出, 2020 年乌鲁木齐市两次疫情严格防控期间,  $PM_{10}$  的平均浓度分别为  $77 \mu g/m^3$  和  $30 \mu g/m^3$ , 2019 年同期  $PM_{10}$  浓度平均值分别为  $132 \mu g/m^3$  和  $60 \mu g/m^3$ 。2020 年与 2019 年同期相比, 第 1 次疫情严格防控期间  $PM_{10}$  下降了 55%, 第 2 次疫情严格防控期间  $PM_{10}$  下降 30%。很多研究表明施工工地扬尘污染已成为城市空气主要污染源之一<sup>[18]</sup>, 工地扬尘会产生更多大颗粒污染物。而乌鲁木齐市在第 1 次和第 2 次疫情防控期间各种工地基本处于停工状态, 是造成疫情严格防控期间  $PM_{10}$  浓度下降的原因之一。

### 2.1.3 气态污染物浓度变化分析

图 4 为 2020 年两次疫情严格防控期间与 2019 年同期  $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $O_3$  和 CO 浓度的对比结果。由图可知, 2020 年乌鲁木齐市第 1 次疫情严格防控期间  $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $O_3$  和 CO 浓度均值分别为  $9$ 、 $38$ 、 $94 \mu g/m^3$  和  $1.27 mg/m^3$ , 第 2 次疫情严格防控期间, 以上各气态污染物浓度均值分别为  $8$ 、 $11$ 、 $128 \mu g/m^3$  和  $0.55 mg/m^3$ 。对应 2019 年同期

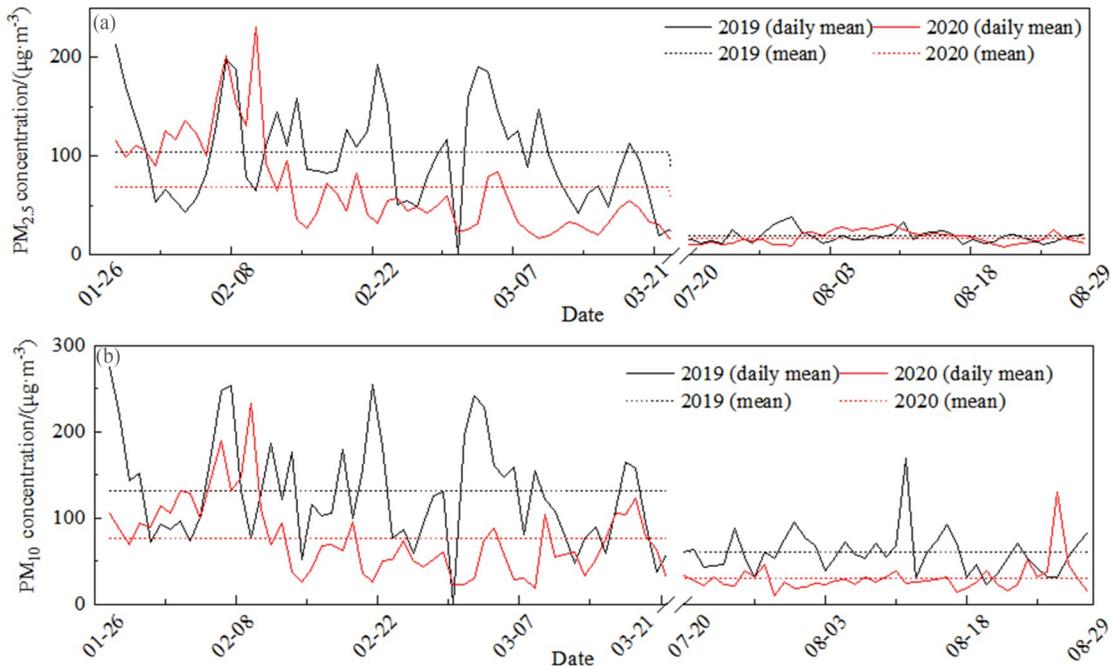


图3 2020年两次疫情严格防控期间与2019同期 $PM_{2.5}$  (a) 和 $PM_{10}$  (b) 浓度的对比

Fig. 3 Comparison between  $PM_{2.5}$  (a) and  $PM_{10}$  (b) concentrations during the two 2020 epidemic quarantine period and the same period in 2019

的 $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $O_3$ 、 $CO$ 均值为 $10.56$ 、 $73 \mu g/m^3$ 和 $1.76 mg/m^3$  (1月26日—3月21日), 以及 $8.30$ 、 $140 \mu g/m^3$ 和 $0.59 mg/m^3$  (7月20日—8月29日)。

图5为2020年两次疫情严格防控期间相对2019年同期气态污染物浓度的变化幅度。通过对比可以看出, 2020年两次疫情严格防控期间,  $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $O_3$ 和 $CO$ 的日均浓度相对2019年同期呈现下降趋势, 其中第1次疫情严格防控期间 $SO_2$ 下降10%, 第2次几乎不变; 两次疫情严格防控期间 $NO_2$ 分别下降18%和19%; 第1次疫情严格防控期间 $O_3$ 增加21%, 而第2次疫情严格防控期间上升了12%。两次疫情严格防控期间 $CO$ 降低49%和4% (图5)。

## 2.2 2020年疫情期间及前后期对比变化分析

2020年疫情严格防控期间及其前后期AQI对比分析结果如图6所示。由图可知, 第1次疫情严格防控前期, AQI的均值(183)比严格防控期间高85, 第1次疫情严格防控后期的AQI均值为75; 第2次疫情严格防控期间, AQI均值比前期低37。第2次严格防控后期AQI逐渐升高, 均值达到102。2020年整体表现出疫情前后期AQI比疫情期间高的现象。

图7为2020年第1次疫情严控防控前期和后期 $PM_{2.5}$ 浓度和 $PM_{10}$ 浓度的对比结果。由图可知,  $PM_{2.5}$ 浓度均值分别为 $136 \mu g/m^3$ 和 $128 \mu g/m^3$ , 比第1次疫情严格防控期间分别高 $32 \mu g/m^3$ 和 $51 \mu g/m^3$ 。第1次疫情严格防控后期,  $PM_{2.5}$ 均值逐渐下降。第2次疫情严格防控后期,  $PM_{2.5}$ 比严格防控期间增加了 $42 \mu g/m^3$ 。第1次疫情严格防控期间 $PM_{10}$ 的均值与严格防控后期基本一致。第2次疫情严格防控期间 $PM_{10}$ 的均值比防控前期下降了 $48 \mu g/m^3$ 。第2次疫情严格防控后期,  $PM_{10}$ 逐渐升高, 比第2次疫情防控期间高 $61 \mu g/m^3$ 。整体上2020年颗粒物浓度变化趋势与AQI相似。

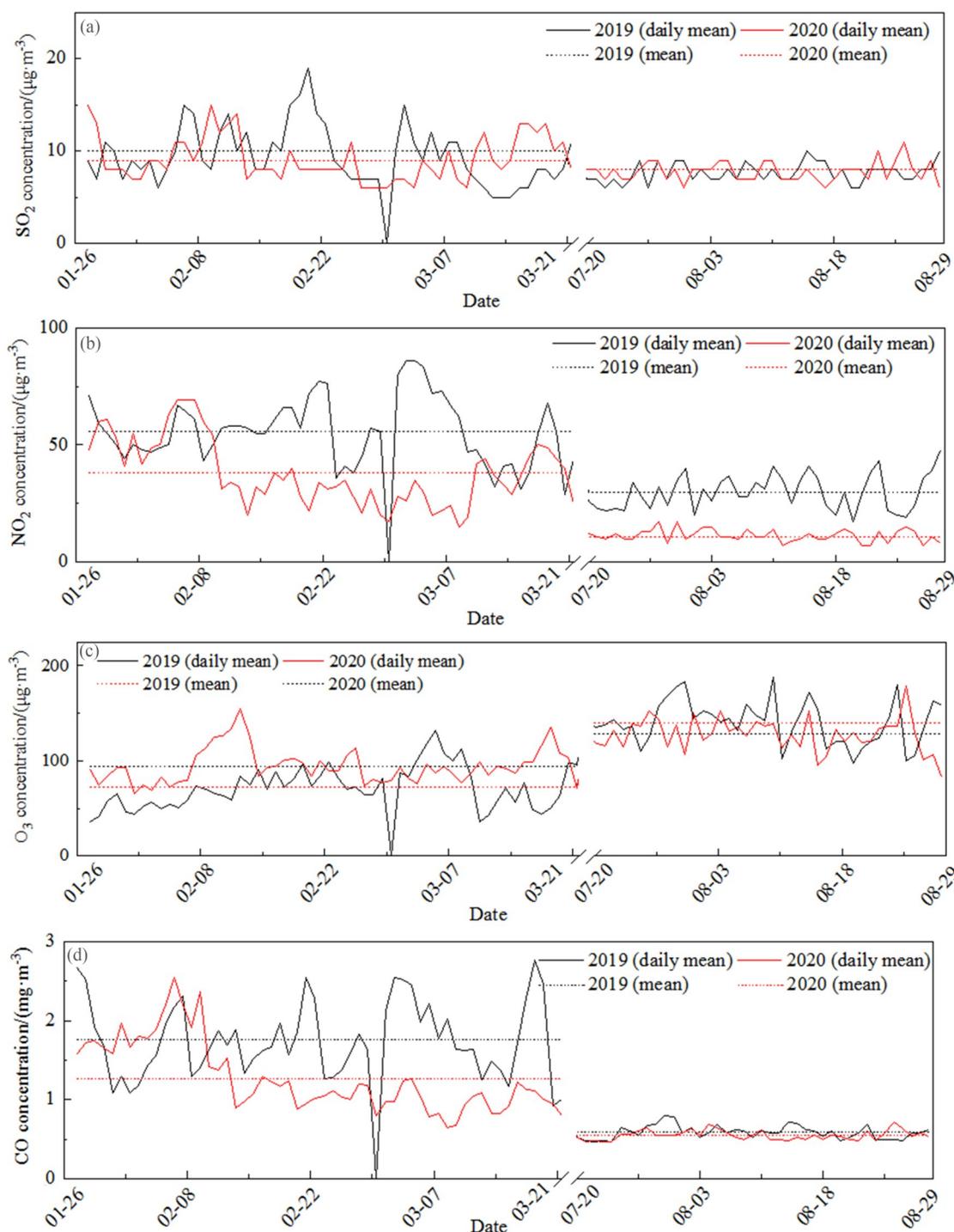


图 4 2020年两次疫情严格防控期间与2019同期SO<sub>2</sub> (a)、NO<sub>2</sub> (b)、O<sub>3</sub> (c) 和CO (d) 浓度的对比

Fig. 4 Comparison of SO<sub>2</sub> (a), NO<sub>2</sub> (b), O<sub>3</sub> (c) and CO (d) concentrations during the two 2020 strict epidemic prevention and control period and during the same period in 2019

图 8 为 2020 年两次疫情严格防控期间与 2020 年疫情前后 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 和 CO 浓度的对比。由图可知, 2020 年乌鲁木齐市第 1 次疫情严格防控前期, SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 和 CO 浓度均值分别为 9、70、48  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  和 1.95  $\text{mg}/\text{m}^3$ ; 第 1 次疫情严格防控期间, 以上各气态污染物浓度均值分别为 9、38、94  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  和 1.27  $\text{mg}/\text{m}^3$ 。其中 SO<sub>2</sub> 没

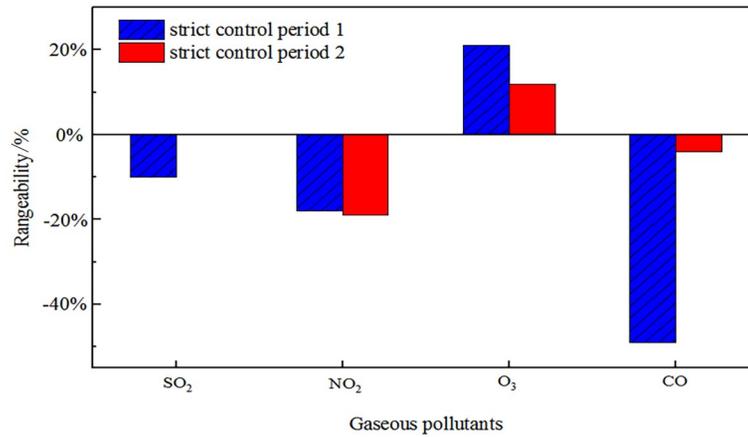


图 5 2020年两次疫情严格防控期间相对2019年同期气态污染物浓度的变化幅度

Fig. 5 Changes in the concentration of gaseous pollutants during the strict prevention and control of the two epidemics in 2020 compared to the same period in 2019

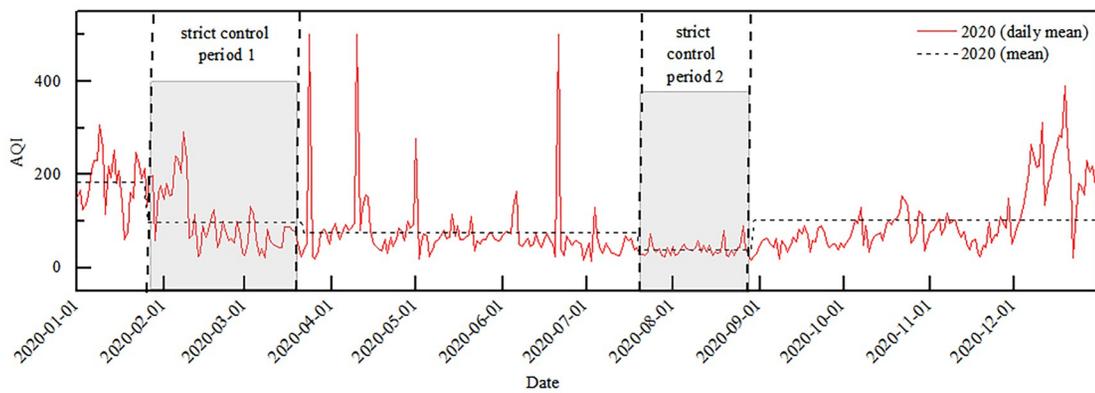


图 6 2020年两次疫情严格防控期间与2020年疫情前后AQI的对比

Fig. 6 Comparison between air quality index during the two strict epidemic prevention and control periods in 2020 and those in 2020

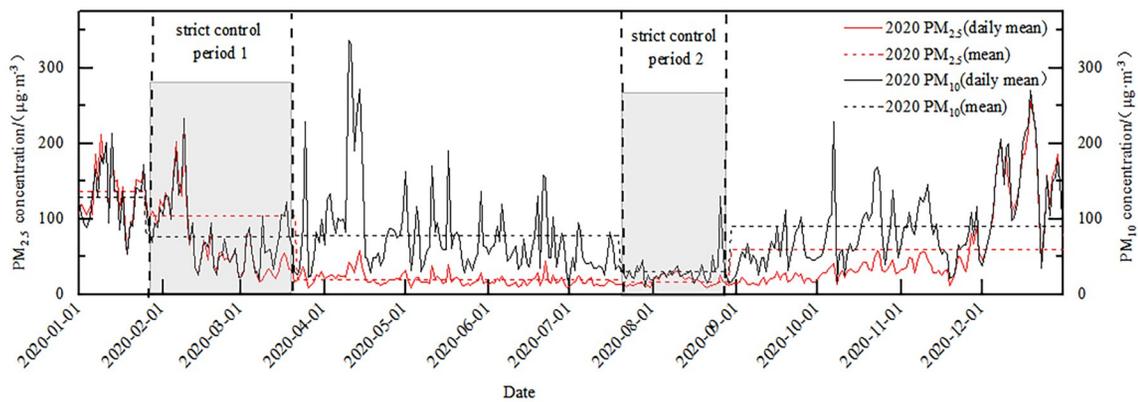


图 7 2020年两次疫情严格防控期间与2020年疫情前后PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>浓度的对比

Fig. 7 Comparison of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> concentrations between the two 2020 strict containment periods and around the outbreak in 2020

有变化,  $\text{NO}_2$ 和 $\text{CO}$ 分别下降了 $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $0.68 \text{mg}/\text{m}^3$ ,  $\text{O}_3$ 反而升高了 $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。第2次疫情严格防控前期,  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 和 $\text{CO}$ 浓度均值分别为 $8$ 、 $26$ 、 $118 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $0.60 \text{mg}/\text{m}^3$ 。第2次疫情严格防控期间,  $\text{SO}_2$ 依然没有变化,  $\text{NO}_2$ 和 $\text{CO}$ 分别下降了 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $0.05 \text{mg}/\text{m}^3$ ,  $\text{O}_3$ 升高了 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。第2次疫情严格防控后期, 以上各气态污染物浓度均值分别为 $9$ 、 $46$ 、 $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $1.12 \text{mg}/\text{m}^3$ 。与第2次疫情严格防控期间相比较,  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 及 $\text{CO}$ 分别上升了 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $0.97 \text{mg}/\text{m}^3$ ,  $\text{O}_3$ 下降到 $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

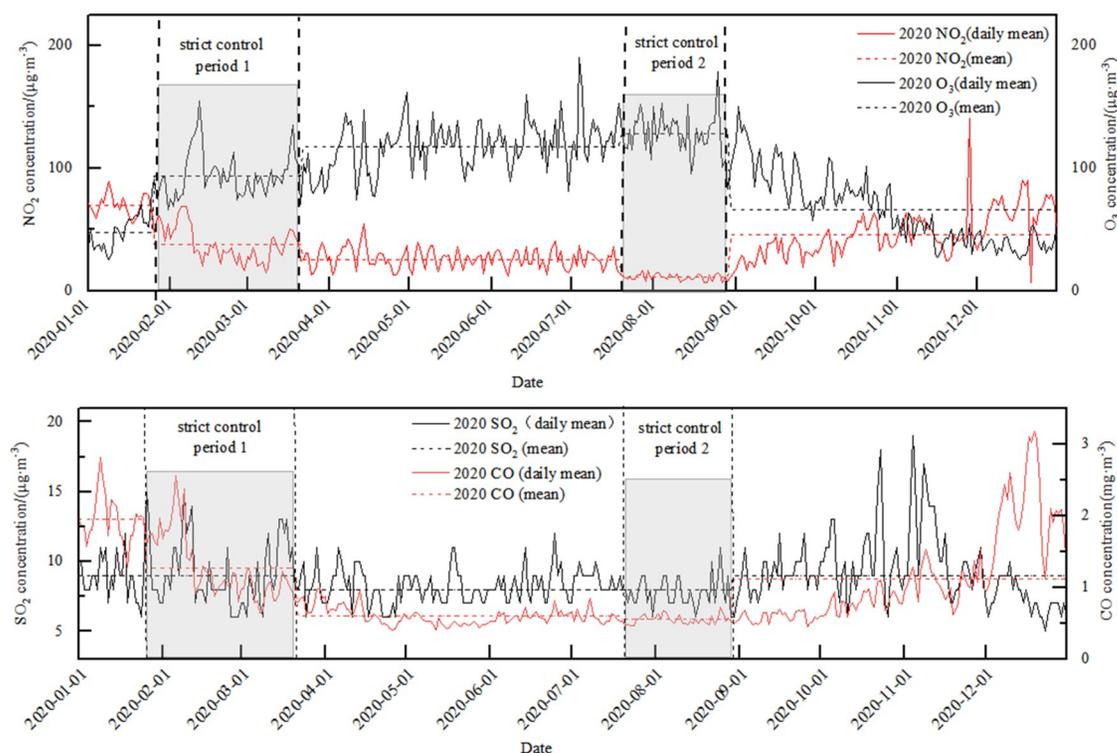


图8 2020年两次疫情严格防控期间与2020年疫情前后 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 和 $\text{CO}$ 浓度的对比

Fig. 8 Comparison of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$  and  $\text{CO}$  concentrations during the 2020 outbreak period and around the outbreak in 2020

## 3 讨论

### 3.1 重点工业企业和汽车保有量的排放物对空气质量的影响

据统计,电力和热力行业在工业企业排放废气和污染物中占比较高,包括工业废气排放、二氧化碳排放、氮氧化物和烟尘排放<sup>[19]</sup>。根据《乌鲁木齐市国民经济与社会发展统计公报》统计,乌鲁木齐市2019年用电总量为 $379.70 \times 10^8 \text{kw}\cdot\text{h}$ ,其中全行业用电量为 $358.42 \times 10^8 \text{kw}\cdot\text{h}$ ,城乡居民生活用电 $21.28 \times 10^8 \text{kw}\cdot\text{h}$ 。2020年全年乌鲁木齐地区用电总量、全行业用电量比2019年分别下降1.9%和2.3%,但城乡居民生活用电量比2019年增长4.8%。此外,2020年乌鲁木齐市机动车燃料汽油的产量比2019年下降了16%。随着车辆保有量的扩大,机动车污染对我国城市当前空气污染的贡献率越来越高。统计公报数据表明,2019年和2020年乌鲁木齐市民用车保有量分别为 $123.58 \times 10^4$ 辆和 $128.98 \times 10^4$ 辆,2019年比2018年增长了5.9%,2020年比2019年增长了4.4%。车辆所排放的主要污染物包括一氧化碳( $\text{CO}$ )、碳氢化合物( $\text{HC}$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )和颗粒物( $\text{PM}$ )<sup>[20]</sup>。

以上数据说明,2020年乌鲁木齐市汽车保有量虽然比2019年有所增加,但由于疫情,2020年汽油产量比2019年下降了,导致2020年两次疫情严格防控期间乌鲁木齐市 $\text{PM}_{10}$ 、CO和 $\text{NO}_2$ 等汽车尾气引起的污染物浓度比2019年显著降低。此外,由于疫情防控实施交通管制,居民被限制出行,对乌鲁木齐市机动车活动水平有较大影响,从而对空气质量的改善有一定帮助。疫情防控期间,各地除因为工作程序无法中断的重工业和与基本居民生活密切相关的取暖、电力等行业外,中小型工业均处于停工停产状态,工地停止施工也都会导致颗粒污染物浓度的降低。以上均为乌鲁木齐市2020年疫情期间大气质量改善、颗粒污染物和气体污染降低的重要原因。

### 3.2 气态污染物对颗粒物二次合成的贡献

人为污染源是大气污染的主要来源,可以分为生活污染源、工业污染源和交通污染源等<sup>[21]</sup>。根据监测数据可知,乌鲁木齐市空气污染源主要以工业源和交通源为主。近年来,由空气细颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ )所导致的空气质量严重下降以及雾霾事件发生的频繁成为了倍受关注的环保问题。已有研究证实, $\text{PM}_{2.5}$ 是通过进入空气中的一次微粒与空气中的气态污染物之间经过化学转换而形成的二次颗粒物,即二次合成颗粒物是 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源<sup>[22]</sup>。也有研究表明,部分 $\text{PM}_{10}$ 也来源于二次合成颗粒物<sup>[23]</sup>。通过相关性分析定量解析气态污染物对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 二次合成的贡献,进而可以摸清乌鲁木齐市在疫情防控期间 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 的污染成因,从而为研究区空气质量治理提供依据。

图9是2020年两次疫情严格防控期间与2019年同期各气态污染物对颗粒物二次合成的贡献。由图可知,2020年和2019年同期乌鲁木齐市 $\text{SO}_2$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 呈弱相关,相关系数分别为0.39、0.19。 $\text{SO}_2$ 是 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要前体物,其浓度在疫情期间并没有显著变化,可能与疫情期间部分未停工的工业生产活动有关。2020年和2019年同期乌鲁木齐市 $\text{NO}_2$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 之间的相关性较强,相关系数依次为0.78、0.67。 $\text{NO}_x$ 是指 $\text{NO}_2$ 和NO的统称,在 $\text{NO}_x$ 中对人类健康产生很大危害的物质主要是 $\text{NO}_2$ 。车辆排放废气中的直接污染物为NO,NO进一步氧化反应分解为 $\text{NO}_2$ 。乌鲁木齐市疫情防控级别降低后,大气中 $\text{NO}_2$ 浓度的增加与生产生活恢复正常、交通运输量增加有关<sup>[12]</sup>。 $\text{O}_3$ 与 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 都呈负相关。 $\text{O}_3$ 浓度在疫情期间出现不减反增现象,基于 $\text{O}_3$ 形成机理,主要原因 $\text{O}_3$ 生成的前体物是 $\text{NO}_x$ 和可挥发性有机物(VOCs)<sup>[24]</sup>,在被污染的空气中, $\text{O}_3$ 作为二次污染物,其变化受多种因素的影响,VOCs在氮氧自由基( $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ )和氢氧自由基 [ $\text{HO}_x = \text{OH} + \text{HO}_2 +$ 有机过氧自由基( $\text{RO}_2$ )]的催化作用下发生光化学反应,迅速生成 $\text{O}_3$ ,VOCs和 $\text{NO}_x$ 主要来自于移动源和工业源,生活源也产生VOCs,由于疫情期间采取严格管控措施, $\text{NO}_x$ 浓度下降,因而导致 $\text{O}_3$ 浓度上升,以上分析证明了乌鲁木齐市的 $\text{O}_3$ 形成机制是由VOCs主导,治理VOCs是控制臭氧污染的关键。其次 $\text{O}_3$ 的增加可能与研究区疫情期间 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 的减少有关。颗粒物浓度下降导致太阳辐射增加,从而促进 $\text{O}_3$ 的光化学反应<sup>[25]</sup>。此外,疫情期间 $\text{NO}_2$ 和NO浓度均呈下降趋势, $\text{NO}_2$ 的下降减少了空气中的氧氮自由基,从而抑制了 $\text{O}_3$ 的生成。而NO的下降削弱了其对 $\text{O}_3$ 的滴定作用( $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ ),减少了 $\text{O}_3$ 的消耗,最终 $\text{NO}_2$ 对 $\text{O}_3$ 的补偿效应超过了NO的消耗效应,导致 $\text{O}_3$ 浓度升高<sup>[26,27]</sup>。由图9可知,2019—2020年 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 与CO之间相关较强,相关系数分别为0.86和0.91。主要是因为研究区冬季为采暖期,区域采暖燃煤排放大气污染物是区域大气污染的主导性因素,同时城市机动车尾气排放也是 $\text{PM}_{2.5}$ 和CO的主要来源。总之,可以看出CO、 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_2$ 对颗粒污染物二次合成有一定的贡献。

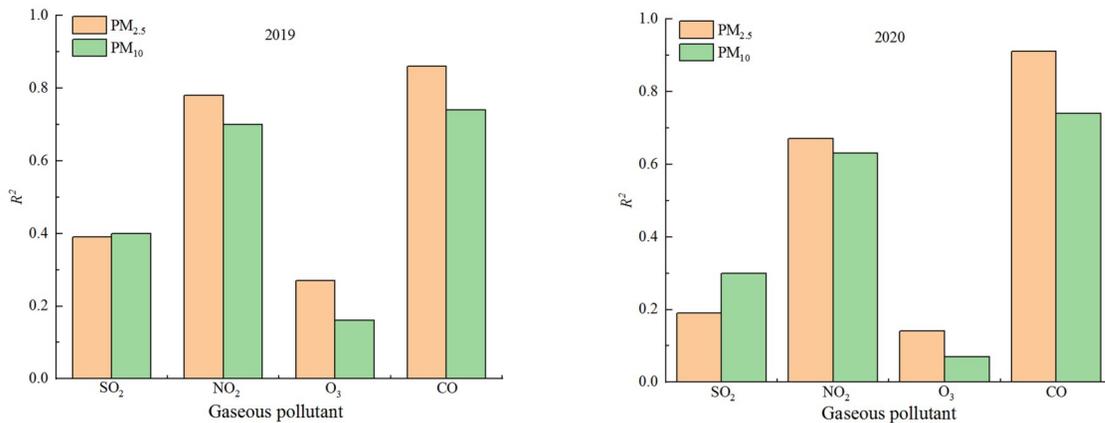


图 9 2020年两次疫情严格防控期间与2019年同期各气态污染物对颗粒物二次合成的贡献

Fig. 9 The contribution of various gaseous pollutants to the secondary synthesis of particulate matter during the two strict epidemic prevention and control periods in 2020 and during the same period in 2019

### 3.3 空气质量影响因素的探测分析

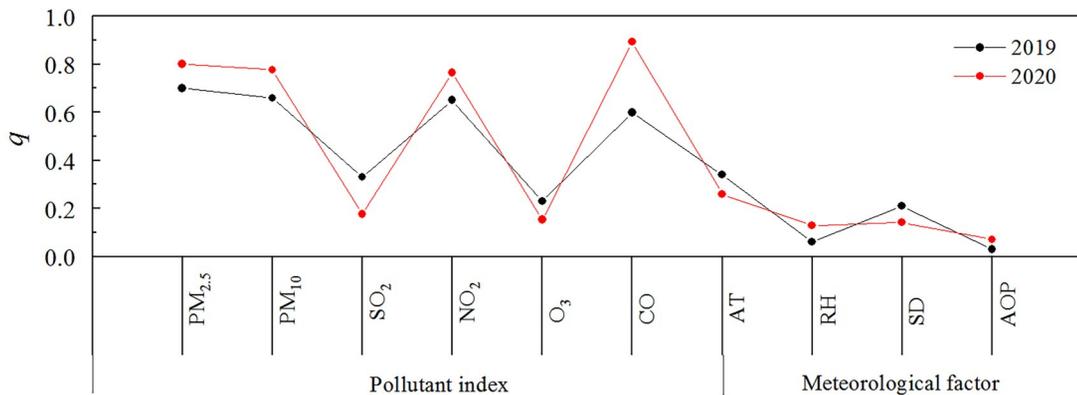
空气质量的空間变化受天气、地势、人类活动等诸多因素的综合影响<sup>[16]</sup>。因此,本研究从自然和人为两方面选取 10 个代表性因子,利用地理探测器定量分析影响乌鲁木齐市 2020 年两次疫情防控期间及 2019 年同期空气质量的主导因子和不同因子之间对空气质量的交互作用。

#### 3.3.1 单因子探测分析

将乌鲁木齐市 2020 年疫情防控期间及 2019 年同期的 AQI 作为因变量, PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、CO、平均气温、相对湿度、日照时数以及降水量作为自变量代入地理探测模型中。图 10 为单因子对 2020 年两次疫情严格防控期间与 2019 年同期 AQI 的影响探测,其中  $q$  值表示对空气质量的影响的强度(解释力)。由图可以看出,2020 年疫情严格防控期间的解释力依次为: CO > PM<sub>2.5</sub> > PM<sub>10</sub> > NO<sub>2</sub> > 气温 > SO<sub>2</sub> > O<sub>3</sub> > 日照时数 > 相对湿度 > 降水量。其中, CO ( $q = 0.81$ ) 是 2020 年疫情防控期间 AQI 的主导因子。2019 年同期单因子的解释力依次为: PM<sub>2.5</sub> > PM<sub>10</sub> > NO<sub>2</sub> > CO > 气温 > SO<sub>2</sub> > O<sub>3</sub> > 日照时数 > 相对湿度 > 降水量。说明 PM<sub>2.5</sub> ( $q = 0.70$ ) 是 2019 年研究区 AQI 的主导因子。通过对两年同期单因子对空气质量的解释力可以看出: CO 对 AQI 的影响较强,解释力在 60%~81% 之间。此外, PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 对空气质量的影响也较高。在气象因子中解释力最强的因子是气温,解释力在 27%~34% 之间,其次是日照时数,解释力在 17%~21% 之间。综上所述,乌鲁木齐市 2020 年疫情严格防控期间和 2019 年同期气象因子中的气温对空气质量的影响力较大,污染物指标中 CO、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 是大气环境质量最主要的影响因素,其他因素解释力相对较弱。

#### 3.3.2 交互探测分析

与单因子探测相比,双因子探测可以定量解析出任意两个自变量交互作用对因变量的解释力。交互探测结果一般分为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立和非线性增强的 5 种情况<sup>[28,29]</sup>。本研究分别将乌鲁木齐市 2020 年疫情严格防控期和 2019 年同期空气质量指数与 10 个因子进行交互探测,得到 56 项交互作用结果(图 11)。由图可以看出,双因子交互作用的决定性高于两个因子独立作用的决定性,本研究的结果表现出双因子增强型和非线性增强型的作用效果,没有出现独立及减弱的关系。2020 年疫情严格防控期间有 46 项双因子相互增强,10 项非线性增强。2019 年同期有 44 项双因子相互增强,12 项非线性增强。

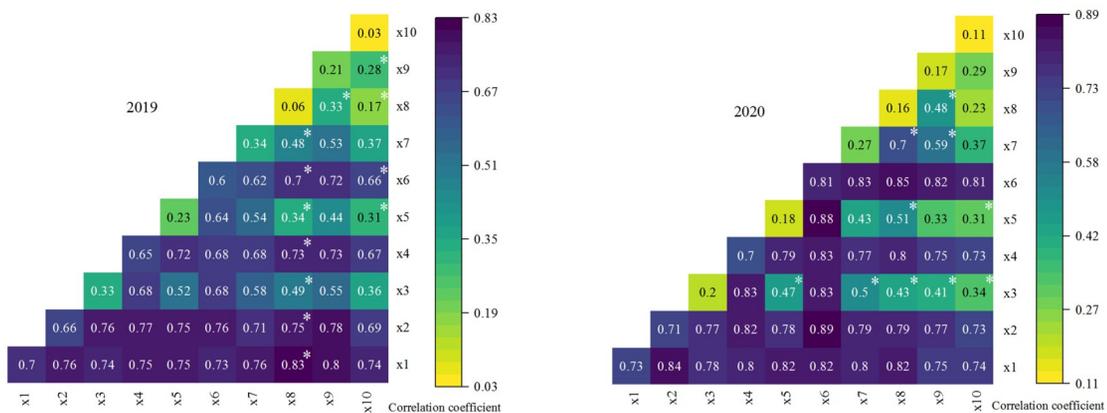


注: AT: 气温, RH: 相对湿度, SD: 日照时数, AOP: 降水量

图 10 单因子对2020年两次疫情严格防控期间与2019年同期AQI的影响探测

Fig. 10 Impact detection of single factor detection on air quality index during the two strict epidemic prevention and control periods in 2020 and the same period in 2019

2019年对AQI的影响最强的是PM<sub>2.5</sub>与对湿度的交互作用,解释力为0.83。随着湿度的上升,颗粒物吸湿性增强,从而导致PM<sub>2.5</sub>增加。2020年对AQI影响最强的是PM<sub>10</sub>与CO的交互作用,解释力为0.89。主要由于人为源产生的CO与PM<sub>10</sub>发生一系列化学反应,共同影响空气质量。污染物指标中,PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>在其他因子的交互作用下对AQI的影响最明显。气象因子中相对湿度结合其他因子对AQI有明显影响。此外也可以看出,CO和其他因子之间的交互探测值都很高。表明多因子交互作用的影响并非简单的叠加过程,而是相互增强或非线性增强的结果,也说明乌鲁木齐市空气质量的影响结果不是由单一因子构成的,而是多种因子相互作用形成的。



注: X1: PM<sub>2.5</sub>; X2: PM<sub>10</sub>; X3: SO<sub>2</sub>; X4: NO<sub>2</sub>; X5: O<sub>3</sub>; X6: CO; X7: 平均气温; X8: 相对湿度; X9: 日照时数; X10: 降水量; \*表示非线性增强,无标记的是双因子增强,颜色越深代表双因子增强对空气质量的解释力越强

图 11 不同因子对2020年两次疫情严格防控期间与2019年同期AQI影响的交互探测

Fig. 11 Interactive detection of the impact of air quality index during the two strict epidemic prevention and control periods in 2020 and the same period in 2019

## 4 结论

对乌鲁木齐市2020年两次疫情严格防控期及前后期和2019年同期的AQI、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、CO

等大气污染物浓度进行了对比分析,并利用地理探测器定量分析影响研究区空气质量的影响因子,得出的结论如下:

1) 乌鲁木齐市2020年两次疫情严格防控期间,大气环境中 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、CO、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 浓度及AQI与2019年同期相比均有下降趋势,特别是 $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、CO和 $NO_2$ 污染物浓度降低的幅度最大,而2020年疫情前后期比两次疫情严格防控期间的AQI、颗粒污染物及气态污染物浓度整体上高。充分证明疫情严格防控措施对大气质量的提高产生了积极作用。

2) 乌鲁木齐空气污染物CO、 $SO_2$ 和 $NO_2$ 浓度都对 $PM_{2.5}$ 浓度和 $PM_{10}$ 浓度的变化具有一定的影响。2020年疫情严格防控期间与2019年同期CO和 $PM_{2.5}$ 的相关性最强,相关系数分别为0.86、0.91,CO与 $PM_{10}$ 之间的相关系数分别为0.72,0.74; $NO_2$ 和 $PM_{2.5}$ 之间相关性较强,相关系数分别为0.78、0.67; $SO_2$ 和 $PM_{2.5}$ 之间相关性不强,相关系数分别为0.39、0.19; $O_3$ 与 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 均呈负相关。说明研究区CO和 $NO_2$ 对 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 二次合成的贡献较大, $SO_2$ 对颗粒物二次合成的贡献较小。

3) 研究区空气质量的变化特征是多种影响因素共同交互作用的结果。2020年疫情严格防控期间和2019年同期AQI的单因子探测结果表明,气象因子中气温对AQI的影响较大,污染物指标中CO、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 是AQI的主要的影响因素。交互因子探测中,2020年疫情严格防控期对AQI影响最强的是 $PM_{10}$ 与CO的交互作用,解释力为0.89。2019年同期对AQI的影响最强的是 $PM_{2.5}$ 与相对湿度的交互作用,解释力为0.83。此外, $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 和相对湿度在其他因子的交互作用下对AQI的影响力较大。

## 参考文献:

- [1] Special Expert Group for Control of the Epidemic of Novel Coronavirus Pneumonia of the Chinese Preventive Medicine Association. An update on the epidemiological characteristics of novel coronavirus pneumonia (COVID-19) [J]. *Chinese Journal of Viral Diseases*, 2020, 10(2): 86-92.  
中华预防医学会新型冠状病毒肺炎防控专家组. 新型冠状病毒肺炎流行病学特征的最新认识 [J]. 中国病毒病杂志, 2020, 10(2): 86-92.
- [2] 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.  
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.
- [3] Ai W Y, Wu Y J. Analysis of air pollution and social activity change in Jinan during the COVID-19 epidemic [J]. *Changjiang Information & Communications*, 2021, 34(4): 29-34.  
艾文育,吴燕杰. COVID-19疫情期间济南大气污染及社会活跃度时空变化分析 [J]. 长江信息通信, 2021, 34(4): 29-34.
- [4] Venter Z S, Aunan K, Chowdhury S, et al. COVID-19 lockdowns cause global air pollution declines [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(32): 18984-18990.
- [5] Collivignarelli M C, Abbà A, Bertanza G, et al. Lockdown for COVID-2019 in Milan: What are the effects on air quality? [J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 732: 139280.
- [6] 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.
- [7] Chen Z F, Hao X Y, Zhang X Y, *et al.* Have traffic restrictions improved air quality? A shock from COVID-19 [J]. *Journal of cleaner production*, 2021, 279: 123622.
- [8] Nie D Y, Shen F Z, Wang J F, *et al.* Changes of air quality and its associated health and economic burden in 31 provincial capital cities in China during COVID-19 pandemic [J]. *Atmospheric Research*, 2021, 249: 105328.
- [9] 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.
- [10] Zhao Y B, Zhang K, Xu X T, *et al.* Substantial changes in nitrogen dioxide and ozone after excluding meteorological impacts during the COVID-19 outbreak in mainland China [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2020, 7(6): 402-408.
- [11] Feng H Y. Impact of epidemic prevention and control measures on atmospheric particulate concentration and distribution in Urumqi [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2021, 43(5): 606-610.  
冯海英. 疫情防控措施对乌鲁木齐市大气颗粒物浓度及分布影响分析 [J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(5): 606-610.
- [12] Yuan B B, Ma Y H, Zhang L, *et al.* Analysis of the impact of traffic flow on air quality during the epidemic in Urumqi [J]. *Energy Conservation & Environmental Protection in Transportation*, 2021, 17(2): 16-20.  
袁波波, 马艳华, 张蕾, 等. 乌鲁木齐市疫情期间交通流量对空气质量影响的分析 [J]. *交通节能与环保*, 2021, 17(2): 16-20.
- [13] Wang O, He B Y. Influence of 5 air quality parameters on  $PM_{2.5}$  and temporal and spatial variation characteristics of  $PM_{2.5}$  concentration in Urumqi [J]. *Environmental Protection of Xinjiang*, 2018, 40(1): 6-11.  
王鸥, 何秉宇. 乌鲁木齐市空气质量5参数对 $PM_{2.5}$ 的影响及 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化特征分析 [J]. *新疆环境保护*, 2018, 40(1): 6-11.
- [14] Xie L, Di G Z. An analysis of the influencing factors for  $PM_{2.5}$  in cities based on R language [J]. *Software Engineer*, 2019, 22(5): 15-17.  
解蕾, 狄光智. 基于R语言的城市 $PM_{2.5}$ 影响因素分析 [J]. *软件工程*, 2019, 22(5): 15-17.
- [15] Zhou M D, Kuang Y Q, Yun G L. Analysis of driving factors of atmospheric  $PM_{2.5}$  concentration in Guangzhou city based on geo-detector [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(2): 271-279.  
周敏丹, 匡耀求, 云国梁. 基于地理探测器的广州市大气 $PM_{2.5}$ 浓度驱动因素分析 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33(2): 271-279.
- [16] Jing Y, Sun Y L, Gao S, *et al.* Spatiotemporal variations of AOD and geographical detection of its influence factors in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(1): 87-98.  
景悦, 孙艳玲, 高爽, 等. 京津冀地区AOD时空变化及影响因子的地理探测 [J]. *干旱区地理*, 2020, 43(1): 87-98.
- [17] Cao T, Bai Y P. Air quality analysis and prediction before and after the prevention and control of COVID-19 in Taiyuan [J]. *Hebei Journal of Industrial Science & Technology*, 2021, 38(2): 156-162.  
曹通, 白艳萍. 太原市COVID-19防控前后空气质量分析及预测 [J]. *河北工业科技*, 2021, 38(2): 156-162.
- [18] Zha S P, Wang W J, Song Y Q, *et al.* Study on the ambient air quality of Wuhu City affected by the new type coronavirus pneumonia epidemic [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(11): 3094-3100.  
查书平, 王文婧, 宋艳卿, 等. 受新型冠状病毒肺炎疫情影响下的芜湖市环境空气质量 [J]. *环境化学*, 2020, 39(11): 3094-3100.
- [19] Zhu J, Yuan X J, Ma J Y, *et al.* Research on factors of industrial waste gas emissions in Urumqi based on LMDI methods [J]. *Environmental Conformity Assessment*, 2015, 7(5): 77-82.  
祝婕, 袁新杰, 马俊英, 等. 基于LMDI模型的乌鲁木齐工业废气排放影响因素研究 [J]. *中国环境管理*, 2015, 7(5): 77-82.
- [20] Zou Z Y, Zheng X C, Xu C M, *et al.* Fujian Province highway motor vehicle pollutant emission inventory under the

- background of the CO VID-19 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(5): 119-128.
- 邹泽耀, 郑鑫程, 徐崇敏, 等. 疫情背景下的福建省高速公路机动车污染物排放清单 [J]. *环境科学学报*, 2022, 42(5): 119-128.
- [21] Meng L Y. Catalytic method in air pollution prevention and control technology [J]. *Low Carbon World*, 2017, (21): 4-5.  
蒙李燕. 大气污染防治技术中的催化方法 [J]. *低碳世界*, 2017, (21): 4-5.
- [22] Jia L L. *Study on Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Particulate Matter in Northern Cold Areas* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.  
贾琳琳. 北方寒冷地区大气颗粒物污染特征及源解析研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [23] Shi L Z. *Source Apportionment and Concentration Prediction of Urban Atmospheric Particulate Matter (PM<sub>10</sub>) and the Influence of Meteorological Factors* [D]. Changsha: Central South University, 2011.  
石灵芝. 城市大气颗粒物 (PM<sub>10</sub>) 源解析与浓度预测及气象因素影响研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [24] Hembeck L, He H, Vinciguerra T P. Measured and modelled ozone photochemical production in the Baltimore-Washington airshed [J]. *Atmospheric Environment: X*, 2019, 2: 100017.
- [25] Sicard P, De Marco A, Agathokleous E, et al. Amplified ozone pollution in cities during the COVID-19 lockdown [J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 735: 139542.
- [26] Shi Z B, Song C B, Liu B W, et al. Abrupt but smaller than expected changes in surface air quality attributable to COVID-19 lockdowns [J]. *Science Advances*, 2021, 7(3): 6696.
- [27] Sbai S E, Mejjad N, Norelyaqine A, et al. Air quality change during the COVID-19 pandemic lockdown over the Auvergne-Rhône-Alpes region, France [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2021, 14(5): 617-628.
- [28] Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.  
王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [29] Pariha Helili, Zan M, Alimjan Kasim. Remote sensing evaluation of ecological environment in Urumqi City and analysis of driving factors [J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(5): 1484-1496.  
排日海·合力力, 咎梅, 阿里木江·卡斯木. 乌鲁木齐市生态环境遥感评价及驱动因子分析 [J]. *干旱区研究*, 2021, 38(5): 1484-1496.