

新冠疫情“封锁”对贵阳市环境空气污染物浓度变化的影响

苏志华, 刘 婷

贵州财经大学管理科学与工程学院, 贵州 贵阳
Email: suzhihua1219@163.com, 748004386@qq.com

收稿日期: 2021年5月6日; 录用日期: 2021年6月10日; 发布日期: 2021年6月17日

摘 要

新冠疫情“封锁”为研究极限减排对环境空气污染物浓度变化的影响建立了“天然实验室”。本文通过多尺度对比贵阳市“封锁”前后不同阶段的空气污染物 $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO和 O_3 浓度变化, 并结合同期的气象资料, 研究疫情“封锁”对贵阳市空气质量的影响。结果显示: “封锁”对6项污染物的影响明显不同, 一级“封锁”导致 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和CO平均浓度分别比“封锁”前期下降了3.23%、14.84%、0.08%、52.45%和22.30%, 而 O_3 平均浓度则上升了33.88%。 NO_2 对疫情“封锁”的响应最为明显, 其浓度大幅下降与疫情期间严格的交通管制有关。机动车活动水平下降减少了空气中的NO浓度, 导致对 O_3 的“滴定”作用减弱, 从而使一级“封锁”期间 O_3 浓度大幅上升。 $PM_{2.5}$ 平均浓度在一级“封锁”期间下降幅度较小, 可能与气体-颗粒转换生成更多的硫酸盐气溶胶有关。气象条件对污染物浓度具有重要影响。在二级“封锁”期间日照时数和温度显著上升, 相对湿度明显下降, 光化学反应较为活跃, 导致 O_3 浓度显著上升。日照时数增加, 气温升高使扬尘作用加强, 导致空气中的颗粒物 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度明显增大。本研究的启示为: 采取减排措施改善空气质量时有必要制定预防 O_3 污染的方案, 并关注气体-颗粒转换产生的二次气溶胶对空气质量的影响。

关键词

新冠疫情, “封锁”, 污染物, 气象条件, 贵阳市

Impact of the COVID-19 Lockdown on Air Pollutant Concentration in Guiyang, Southwestern China

Zhihua Su, Ting Liu

School of Management Science, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang Guizhou
Email: suzhihua1219@163.com, 748004386@qq.com

Received: May 6th, 2021; accepted: Jun. 10th, 2021; published: Jun. 17th, 2021

文章引用: 苏志华, 刘婷. 新冠疫情“封锁”对贵阳市环境空气污染物浓度变化的影响[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(6): 777-785. DOI: 10.12677/ag.2021.116072

Abstract

The “lockdown” during the COVID-19 pandemic has established a “natural laboratory” to study the impact of extreme emission reductions on changes in air pollutant concentrations. We compared the changes in the concentrations of the pollutants $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO and O_3 at different stages before and after the “lockdown” in Guiyang city on a multi-scale basis. The results show that the “lockdown” had significantly different effects on the six pollutants. The first-level “lockdown” caused the average concentrations of $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , and CO to drop by 3.23%, 14.84%, 0.08%, 52.45% and 22.30%, respectively, compared with the previous period of the “lockdown”. while the average concentration of O_3 increased by 33.88%. NO_2 had the most obvious response to the “lockdown” of the epidemic, and its sharp drop in concentration was related to strict traffic control. The reduction in the activity level of motor vehicles reduced the NO concentration in the air, causing the weakness of the “titration” of O_3 , which greatly increased the O_3 concentration during the first-level “lockdown” period. The average concentration of $\text{PM}_{2.5}$ decreased slightly during the first-level “lockdown” period, which may be related to the formation of more sulfate aerosols from gas-particle conversion. Meteorological conditions have an important influence on the concentration of pollutants. During the secondary “lockdown” period, the sunshine hours and temperature increased significantly, the relative humidity decreased significantly, and the photochemical reaction was more active, leading to a significant increase in the O_3 concentration. The increasing sunshine hours and temperature had strengthened the effect of dust, resulting in a significant increase in the concentration of particulate matter $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} in the air. The enlightenment of this study is: it is necessary to formulate a plan to prevent O_3 pollution, and pay attention to the impact of secondary aerosols produced by gas-particle conversion on air quality when adopting emission reduction measures to improve air quality.

Keywords

COVID-19, Lockdown, Atmospheric Pollutant, Meteorological Conditions, Guiyang

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2019 年新型冠状病毒爆发, 给中国带来前所未有的社会影响[1]。为阻断病毒在人与人之间传播, 中国国务院发布了《国家突发公共事件应急预案》。各地依法采取一系列强制性措施, 如制止集市、集会等一切大型群众性活动, 严格交通管制, 限制居民旅行[2] [3]。湖北武汉于 2020 年 1 月 23 日宣布封城(lockdown) [4], 中国其他主要城市/县随后也纷纷效仿。各地根据新冠病毒可能造成的危害程度、紧迫性和发展程度来确定预警级别[3] (一般分为四级: 一级(特别严重)、二级(严重)、三级(较重)和四级(一般)。疫情“封锁”导致的人类活动水平下降, 本质上相当于重大会议及体育赛事期间的污染源临时排放管制, 但疫情“封锁”的力度更大, 范围更广, 持续时间更长[5]。在“封锁”期间, 人为活动及其污染物排放大幅减少, 为评估极限减排对空气质量的影响建立了“天然实验室” [6]。

新冠疫情“封锁”对空气污染物浓度的影响已成为当前学术界关注的焦点, 并取得了一系列成果: 疫情“封锁”对 6 项常规空气污染物浓度的影响明显不同。由于异常严格的交通管制, 导致疫情期间的 NO_2 浓度大幅下降, 而 SO_2 主要来源于燃煤企业的排放, 疫情期间下降幅度通常较小, 甚至出现了不降

反升的现象[6] [7] [8] [9]。大范围的交通管制大幅降低了 NO 的排放量, 对 O₃ 的“滴定”作用减弱, 导致疫情期间 O₃ 浓度普遍上升[8] [9] [10]。颗粒物 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 来源既有燃煤、机动车尾气和道路扬尘等的一次直接排放, 同时也含有前体物如 SO₂、NO₂ 和 CO 等的二次转化生成[11]。因此, 疫情期间颗粒物的变化较为复杂, 如 PM_{2.5} 浓度对疫情防控政策的响应存在明显的地区差异[6]。另外, 除了污染源排放外, 污染物浓度还受到气象条件的影响[12]。如相对湿度增加有利于各种气体前体物通过气相氧化和多相反应生成二次气溶胶, 并进一步导致 PM_{2.5} 浓度的爆发性增长[13]。受不利气象条件影响, 我国华北平原在疫情“封锁”期间仍然发生了严重的污染事件[14]。Le 等[6]估算疫情“封锁”对污染物浓度的减排高达 90%, 但疫情期间的高湿度的天气, 加上电厂和石化行业的持续排放仍然造成了严重空气污染。

各个地区不同的能源结构、产业组成、交通设施和气象条件, 都会影响污染物浓度变化对“封锁”措施的响应。因此, 需要对“封锁”前后的空气污染物浓度进行多尺度分析, 并剔除气象影响, 才能正确认识疫情“封锁”对空气质量的实际影响。本文选择贵阳市为研究区域, 通过多尺度对比贵阳市疫情“封锁”前后不同阶段环境空气污染物 PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, CO 和 O₃ 质量浓度的变化, 并结合同期的气象资料, 探讨疫情“封锁”对贵阳市环境空气污染物浓度变化的影响, 以期为未来的空气污染防治提供科学依据。

2. 资料与方法

2.1. 区域概况与数据来源

贵阳位于中国西南部的云贵高原, 贵州省中部, 地处东经 106°07′~107°17′, 北纬 26°11′~26°55′之间。贵阳是贵州省省会, 国家级大数据产业发展集聚区, 中国重要的生态休闲度假旅游城市。截至 2020 年 11 月, 贵阳市常住人口 497.14 万人, 城镇人口 378.47 万人, 城镇化率 76.13%。目前, 中国环境监测总站在贵阳市共设置了 10 个环境空气监测国控站点(图 1), 以监测空气质量和污染物浓度的变化情况。监测方法根据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)执行, 并按照《环境空气质量自动监测技术规范》(HJ/T193-2005)定期对监测仪器进行校准, 以保证监测数据的准确性。各个站点监测的污染物浓度数据实时发布于网络上(<http://www.aqistudy.cn/>; <http://data.epmap.org/>)。本文选取的污染物项目包括 PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, CO 和 O₃。另外, 为研究气象变化对空气污染物浓度的影响, 本文搜集了同期的气象观测数据, 包括日照时数(h)、气温(°C)、风速(m/s)、相对湿度(%)和降雨量(mm)。气象观测数据来自贵阳市国家基本气象站(WMOID = 57816) (<http://data.cma.cn/user/toLogin.html/>)。

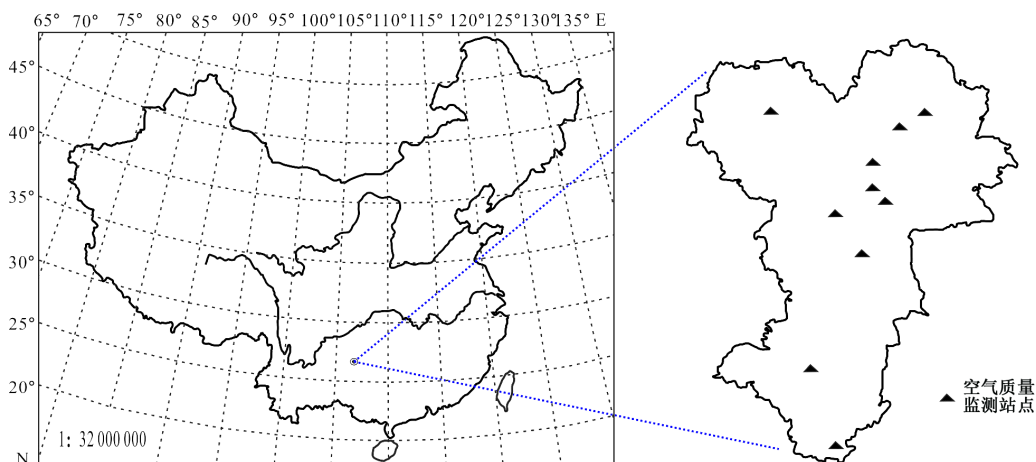


Figure 1. Geographical location of Guiyang city and the distribution of air quality stations
图 1. 贵阳市地理位置及其环境空气监测站分布图

2.2. 研究方法

2020 年 1 月 24 日, 贵州省人民政府决定启动突发公共卫生事件一级响应, 贵阳随后采取的防疫措施包括关闭所有文化娱乐场所、景区等公共场所; 实行城市小区封闭式管理, 限定每户家庭每 2 天指定一名家庭成员出门采购一次生活物资; 全面实行日常生活用品定点“无接触式”配送等。2 月 9 日, 贵州省下发通知, 要求员工必须戴口罩上岗, 标志严厉封锁从此告一段落。2020 年 2 月 15 日下午贵州省宣布, 疫情防控期间各市州、各县、乡村之间设立的“关卡”一律取消, 畅通省内交通、流通, 不能再搞简单化一关了之、一停了之, 为生产、消费创造良好条件。根据贵阳市防疫政策的变化, 本文选取 2020 年 1 月 24 日至 2 月 9 日(共 17 天)为本研究的一级“封锁”期间, 2020 年 1 月 7 日至 1 月 23 日(共 17 天)为“封锁”前期。2020 年 2 月 10 日至 2 月 26 日(共 17 天)为二级“封锁”期。本文通过多尺度对比不同时间段污染物浓度相对变化, 结合气象参数, 分析疫情管制对污染物浓度变化的影响。本文使用的污染物浓度数据均基于小时浓度, 并通过小时浓度计算出不同时间尺度(“封锁”前期、一级“封锁”期和二级“封锁”期)的平均质量浓度。

3. 结果

3.1. 不同阶段空气污染物浓度的差异

图 2 显示, 一级“封锁”期间 PM_{10} 、 NO_2 和 CO 平均浓度较“封锁”前期分别下降了 14.84%、52.45% 和 22.30%, 其中 NO_2 的平均浓度下降最大, 降幅过半。然而, O_3 平均浓度相比“封锁”前期上升了 33.88%, $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 的平均浓度变化较小, 大约与“封锁”前期持平。与一级“封锁”期相比, 二级“封锁”期间 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_2 的平均浓度均明显升高, 增幅分别为 42.64%, 34.97% 和 32.26%, 可能因为“封锁”力度降低, 复工复产等人类活动增加了污染物的排放量, 导致了空气污染物浓度明显升高。由于 SO_2 主要来源于钢铁厂和电厂等燃煤企业, 因生产和工艺设备的特殊性不能中断生产[15], 导致“封锁”期间 SO_2 平均浓度不降反升。 NO_x 的最大排放源为交通运输源[16], 一级“封锁”期间 NO_2 平均浓度的大幅下降与严格交通管制造成机动车活动水平急剧下降有关。二级“封锁”期间, 由于人类活动部分得以恢复, 汽车排放增加, 导致 NO_2 平均浓度上升了一定幅度(图 2)。一级“封锁”期间由于机动车减少导致 NO 的排放下降, 缓解了 O_3 被“滴定”消耗[17], 导致疫情期间 O_3 浓度大幅上升。

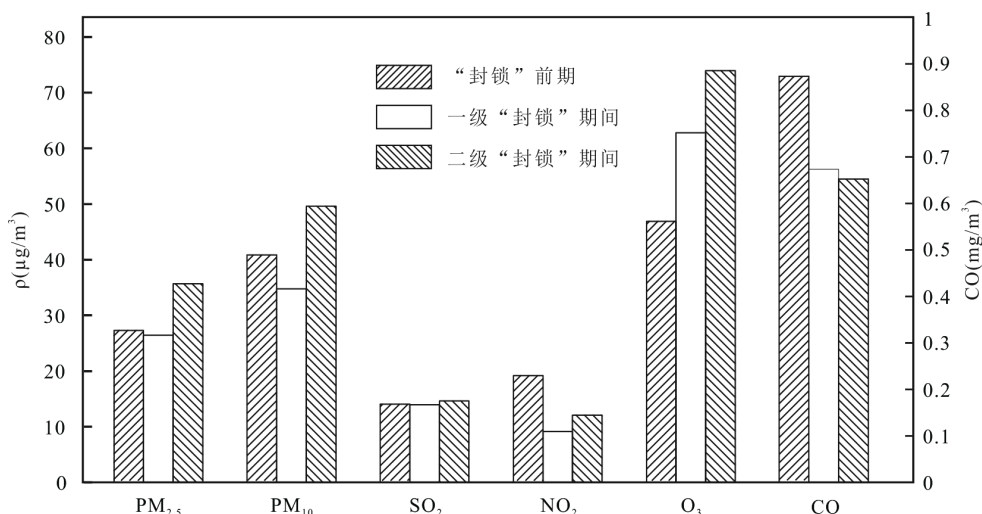


Figure 2. Average pollutant concentration at different stages

图 2. 不同阶段空气污染物的浓度均值

3.2. 空气污染物浓度的逐时变化特征

图 3 显示, 6 项空气污染物的小时平均浓度始终处于剧烈波动状态, 说明在短期内气象条件对污染物浓度具有显著影响。从小时平均浓度的变化来看, PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 在“封锁”前期, 一级“封锁”期间和二级“封锁”期间的阶段差异不明显, 而 NO_2 和 CO 在“封锁”期间明显下降。大范围的交通限制是 NO_2 下降的主要原因, CO 浓度降低除了因机动车出行率显著减少[18], 还与其源贡献组成及自身化学稳定性有关。由于 NO_x 浓度下降, “滴定”作用减弱, O_3 浓度在“封锁”期间显著上升。此外, “封锁”期间 O_3 浓度存在剧烈波动, 说明光化学反应是影响其浓度变化的重要因素。 O_3 浓度的峰值和谷值与 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 不能很好对应, 指示了 O_3 作为二次污染物, 主要受到前体物浓度及光化学反应生成的影响[19]。2020 年 1 月 30 日, SO_2 出现了一次明显的污染事件, 而其他污染物浓度没有显著增加, 反映 SO_2 污染源的不同。

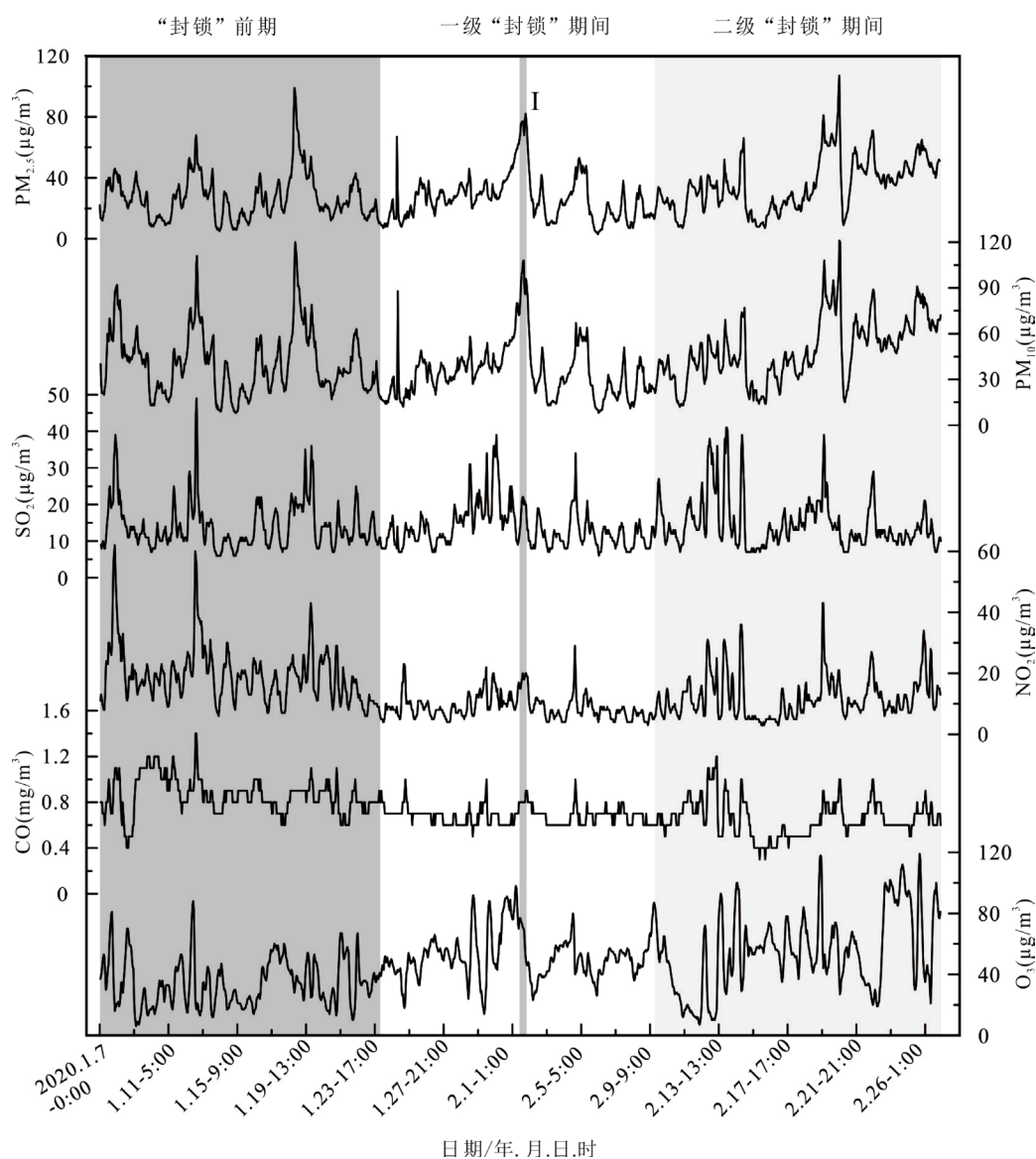


Figure 3. Hourly changes of air pollutant concentrations in 2020 year

图 3. 2020 年空气污染物浓度的逐时变化

3.3. 不同阶段空气污染物的日变化特征

为了进一步了解疫情“封锁”对空气质量的影响,我们分析了6项污染物浓度的日变化特征。图3显示,PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂和CO浓度的日变化曲线均呈“双峰”型分布。第一个峰值出现在9:00~13:00点,主要由交通早高峰引起。其中NO₂在9:00点就达到峰值,出现峰值的时间最早,表明NO₂浓度变化受交通源的控制最明显。SO₂和CO由于污染源与NO₂不同,其浓度达到峰值的时间相对较晚。颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀浓度达到峰值的时间最晚,可能与前体物氧化生成二次气溶胶需要反应时间有关。第二个峰值出现在20:00~21:00点,除了受交通晚高峰排放的影响外,还与气流垂直输送和晚间边界层高度较低造成的污染物积累有关[20]。受太阳辐射的变化及光化学反应的影响,O₃浓度的日变化曲线为“单峰”型,白天高夜间低,午后15:00~17:00时段达到峰值。

一级“封锁”期间的PM_{2.5}浓度与“封锁”前期相当,但PM₁₀浓度则显著降低。说明疫情管制能显著降低PM₁₀浓度,但对PM_{2.5}污染的改善不明显。三个阶段的SO₂浓度日变化特征差异较小,反映“封锁”对SO₂浓度的影响较小。与PM_{2.5}、PM₁₀和SO₂明显不同,“封锁”期间的NO₂和CO浓度与“封锁”前期相比显著降低,表明其受到疫情管制的影响最大。在一级“封锁”期间,NO₂和CO浓度的峰值特征很不明显,这与疫情严控时段几乎不存在上下班交通高峰的影响有关。由于NO浓度降低,“滴定”作用减弱,“封锁”期间的O₃浓度明显上升(图4(f))。

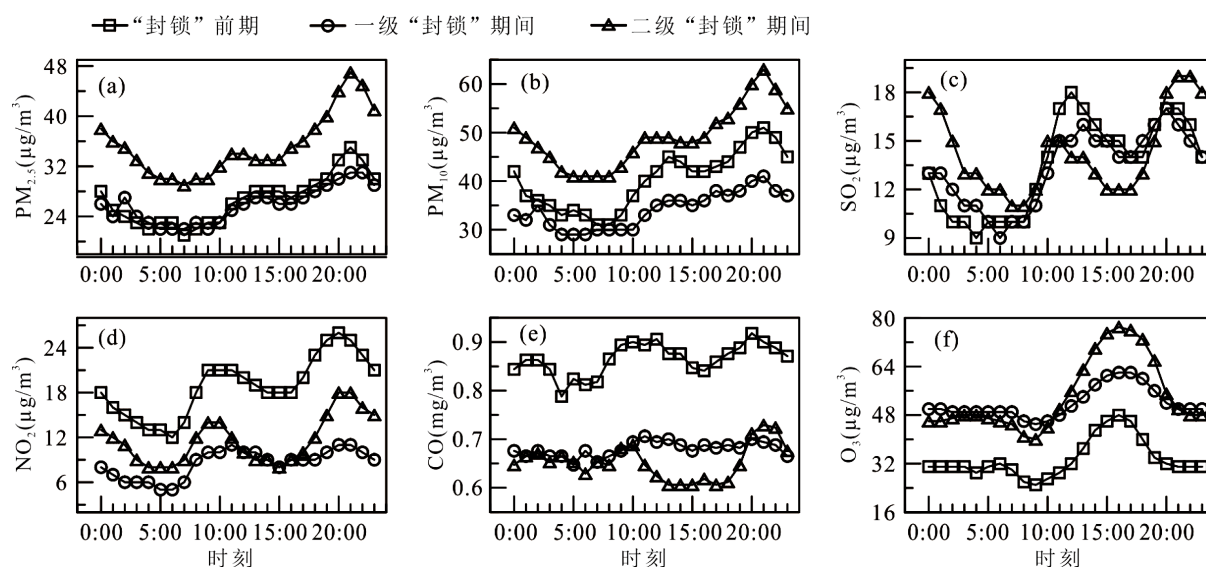


Figure 4. Daily changes of 6 pollutants in different stages in 2020 year

图4. 2020年不同阶段6项污染物的日变化

4. 讨论

4.1. 气体-颗粒转换生成的二次气溶胶对污染过程的影响

“封锁”前后6项常规污染物浓度的不同程度变化,表明污染水平的变化不能完全用一次排放来解释,气体-颗粒转换产生的二次气溶胶对污染过程同样至关重要[21]。前人研究指出,在受人类活动影响的空气环境中,SO₂和NO_x可以通过多种化学途径氧化分别形成硫酸盐和硝酸盐,颗粒物中的次生无机化合物往往以硫酸盐和硝酸盐为主[22][23][24]。硫酸盐和硝酸盐的二次气溶胶形成往往是PM_{2.5}爆发性增长首要驱动因素[13]。一级“封锁”期间NO₂浓度大幅下降,而PM_{2.5}浓度与“封锁”前期持平,两者

并不同步,可能因为 SO_2 与 OH 自由基反应生成更多的硫酸盐气溶胶[25], 替代了硝酸盐气溶胶,从而使 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度降幅不大。由于二次气溶胶粒度通常较细,对 PM_{10} 浓度通常没有贡献,从而使一级“封锁”期间 PM_{10} 下降了一定幅度。

4.2. 不利气象条件对空气质量的影响

二级“封锁”期间的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 平均浓度明显高于“封锁”前期(图 2), 日变化结果也显示二级“封锁”期的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的小时均值也显著高于前两个阶段(图 4), 与“封锁”前期相比,在排放减少的条件下反而出现了颗粒物浓度增加的现象。另外,二级“封锁”期间,由于复工复产,机动车活动水平增加了空气中的 NO_x 浓度(图 4),从而加大对 O_3 的“滴定”消耗,但空气中的 O_3 浓度却显著增加。显然,只用排放变化不能解释上述现象。因此,我们对比了“封锁”前后的平均气象条件。图 5 显示,与“封锁”前期相比,二级“封锁”期间风速略有上升,日照时数和温度显著上升,相对湿度明显下降。前人研究指出,太阳辐射增强和相对湿度降低有利于光化学反应生成 O_3 [19]。由于二级“封锁”期间光化学反应活跃,生成了更多的 O_3 ,从而使空气中的 O_3 浓度升高。二级“封锁”期间的白天 O_3 浓度与一级“封锁”期相比上升明显,但在夜晚两者却差异不大,也指示了光化学反应对生成 O_3 的贡献。由于二级“封锁”期间日照时数增加,气温升高,地表变得干燥,地表的灰尘更容易飞扬到空气中,从而使空气中的颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度增大(图 4)。但气态污染物主要存在于空气中,气温和日照时数的变化对其影响较小,因此, SO_2 、 NO_x 和 CO 在二级“封锁”期间并没有明显上升。

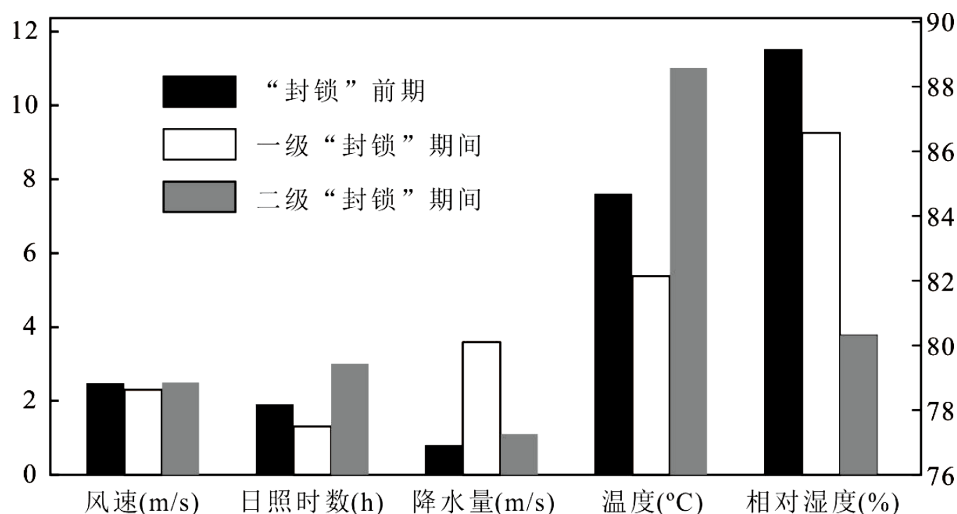


Figure 5. Comparison of meteorological elements at different stages

图 5. 不同阶段的气象要素对比

在一级“封锁”期间的 2 月 1 日, PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度出现异常峰值(图 3(I)), 发生了一次相对严重的污染事件。在严控期间,基本可以排除污染源异常排放的可能。说明尽管“封锁”期间污染物排放较低,但并不能避免空气污染现象。空气中污染物的背景值较大,配合不利的气象条件可能是本次污染事件发生的直接原因。

4.3. 对空气质量防治的启示

由于“滴定”作用减弱,导致“封锁”期间 O_3 浓度大幅增加[6]。本次“封锁”发生在冬季,该季节贵阳市在大部分时间的日照时数为 0,不利于光化学反应生成 O_3 ,因此空气中的 O_3 浓度并不高,但如果

在光化学反应较强的夏季, O_3 污染必然会显著加重。因此, 采取减排措施改善空气质量时有必要制定预防 O_3 污染的方案。另外, “封锁”期间, 更多的硫酸盐气溶胶的生成, 弥补了硝酸盐气溶胶的大幅下降 [21], 使得 $PM_{2.5}$ 浓度下降幅度不大。因此, 环境管理部门在制定环保措施时, 必须考虑气体-颗粒转换生成的二次气溶胶对颗粒物污染的影响。

4.4. 存在问题及不足

本文由于缺乏实际采样和实验, 无法分析“封锁”前后 $PM_{2.5}$ 化学成分的实际变化, 对气体-颗粒转换产生二次气溶胶及机制认识不足。我们将在今后补充该方面的研究工作。

5. 结论

“封锁”对 6 项污染物的影响明显不同, 一级“封锁”导致 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 平均浓度分别比“封锁”前期下降了 3.23%、14.84%、0.08%、52.45% 和 22.30%, 而 O_3 平均浓度则上升了 33.88%, 其中 NO_2 浓度下降幅度最大, 对疫情“封锁”响应最明显。 NO_2 浓度的快速下降与严格的交通管制有关, 极低的机动车出行率, 减少了空气中的 NO 浓度, 导致对 O_3 的“滴定”作用减弱, 从而使一级“封锁”期间 O_3 浓度大幅上升。 $PM_{2.5}$ 平均浓度在一级“封锁”期间下降幅度较小, 可能与气体-颗粒转换生成更多的硫酸盐气溶胶有关。气象条件对污染物浓度具有重要影响。在二级“封锁”期间, 日照时数和温度显著上升, 相对湿度明显下降, 气象条件有利于光化学反应, 使 O_3 浓度显著上升。另外, 日照时数增加, 气温升高使地表变得干燥, 地表的灰尘更容易飞扬到空气中, 从而使空气中的颗粒物 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度增大。本研究的启示为: 采取减排措施改善空气质量时有必要制定预防 O_3 污染的方案, 并关注气体-颗粒转换产生的二次气溶胶对空气质量的影响。

基金项目

国家自然科学基金地区科学基金项目(41964005): 湿润地区城市降尘污染的磁学监测研究 - 以贵阳城区为例。

参考文献

- [1] Bibek, R., Naveen, P., Bikal, S., *et al.* (2020) Air Medical Evacuation of Nepalese Citizen during Epidemic of COVID-19 from Wuhan to Nepal. *Journal of Nepal Medical Association*, **58**, 125-133. <https://doi.org/10.31729/jnma.4857>
- [2] Tian, H., Liu, Y., Li, Y., *et al.* (2020) An Investigation of Transmission Control Measures during the First 50 Days of the COVID-19 Epidemic in China. *Science*, **368**, 638-642. <https://doi.org/10.1126/science.abb6105>
- [3] Li, L., Li, Q., Huang, L., *et al.* (2020) Air Quality Changes during the COVID-19 Lockdown over the Yangtze River Delta Region: An Insight into the Impact of Human Activity Pattern Changes on Air Pollution Variation. *Science of the Total Environment*, **732**, 139-282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139282>
- [4] 牛方曲, 辛钟龄, 王芳. 基于交通管控效应的中国 COVID-19 疫情扩散的时空特征及其危险性[J]. 热带地理, 2021, 41(1): 1-11.
- [5] 徐超, 吴水平, 刘怡靖, 等. 厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应[J/OL]. 环境科学: 1-11[2021-06-09]. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202103009>
- [6] Le, T., Wang, Y., Liu, L., *et al.* (2020) Unexpected Air Pollution with Marked Emission Reductions during the COVID-19 Outbreak in China. *Science*, **369**, 702-706. <https://doi.org/10.1126/science.abb7431>
- [7] Lee, J.D., Drysdale, W.S., Finch, D.P., *et al.* (2020) UK Surface NO_2 Levels Dropped by 42% during the COVID-19 Lockdown: Impact on Surface O_3 . *Atmospheric Chemistry and Physics*, **20**, 15743-15759. <https://doi.org/10.5194/acp-20-15743-2020>
- [8] Su, Z., Duan, Z., Deng, B., *et al.* (2021) Impact of the COVID-19 Lockdown on Air Quality Trends in Guiyang,

- Southwestern China. *Atmosphere*, **12**, 422. <https://doi.org/10.3390/atmos12040422>
- [9] Shi, X. and Brasseur, G.P. (2020) The Response in Air Quality to the Reduction of Chinese Economic Activities during the COVID-19 Outbreak. *Geophysical Research Letters*, **47**, e2020GL088070. <https://doi.org/10.1029/2020GL088070>
- [10] Shi, Z., Song, C., Liu, B., *et al.* (2021) Abrupt But Smaller than Expected Changes in Surface Air Quality Attributable to COVID-19 Lockdowns. *Science Advances*, **7**, eabd6696. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd6696>
- [11] 王爱平, 朱彬, 秦玮, 等. 新冠疫情严控期间南京市空气质量分析[J/OL]. 中国环境科学: 1-11[2021-06-09]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210223.026>
- [12] Shi, C., Yuan, R., Wu, B., *et al.* (2018) Meteorological Conditions Conducive to PM_{2.5} Pollution in Winter 2016/2017 in the Western Yangtze River Delta, China. *Science of the Total Environment*, **642**, 1221-1232. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.137>
- [13] Sun, W., Wang, D., Yao, L., *et al.* (2019) Chemistry-Triggered Events of PM_{2.5} Explosive Growth during Late Autumn and Winter in Shanghai, China. *Environmental Pollution*, **254**, Article ID: 112864. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.032>
- [14] Wang, P., Chen, K., Zhu, S., *et al.* (2020) Severe Air Pollution Events Not Avoided by Reduced Anthropogenic Activities during COVID-19 Outbreak. *Resources, Conservation & Recycling*, **158**, Article ID: 104814. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104814>
- [15] 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.
- [16] 张萌铎, 陈卫卫, 高超, 等. 东北地区大气污染源排放时空特征: 基于国内外清单的对比分析[J]. 地理科学, 2020, 40(11): 1940-1948.
- [17] Levy, M., Zhang, R., Zheng, J., *et al.* (2014) Measurements of Nitrous Acid (HONO) Using Ion Drift-Chemical Ionization Mass Spectrometry during the 2009 SHARP Field Campaign. *Atmospheric Environment*, **94**, 231-240. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.024>
- [18] Li, R., Mei, X., Wei, L., *et al.* (2019) Study on the Contribution of Transport to PM_{2.5} in Typical Regions of China Using the Regional Air Quality Model RAMS-CMAQ. *Atmospheric Environment*, **214**, Article ID: 116856. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116856>
- [19] Wang, Z., Li, Y., Chen, T., *et al.* (2015) Ground-Level Ozone in Urban Beijing over a 1-Year Period: Temporal Variations and Relationship to Atmospheric Oxidation. *Atmospheric Research*, **164-165**, 110-117. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.05.005>
- [20] Cheung, V.T.F. and Wang, T. (2001) Observational Study of Ozone Pollution at a Rural Site in the Yangtze Delta of China. *Atmospheric Environment*, **35**, 4947-4958. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00351-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00351-X)
- [21] Chen, H., Huo, J., Fu, Q., *et al.* (2020) Impact of Quarantine Measures on Chemical Compositions of PM_{2.5} during the COVID-19 Epidemic in Shanghai, China. *Science of the Total Environment*, **743**, Article ID: 140758. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140758>
- [22] Heintzenberg, J. (1989) Fine Particles in the Global Troposphere: A Review. *Tellus B*, **41**, 149-160. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.1989.tb00132.x>
- [23] Wang, G., Zhang, R., Gomez, M.E., *et al.* (2016) Persistent Sulfate Formation from London Fog to Chinese Haze. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **113**, 13630-13635. <https://doi.org/10.1073/pnas.1616540113>
- [24] Gen, M., Zhang, R., Huang, D.D., *et al.* (2019) Heterogeneous SO₂ Oxidation in Sulfate Formation by Photolysis of Particulate Nitrate. *Environmental Science & Technology Letters*, **6**, 86-91. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00681>
- [25] Wang, G., Zhang, F., Peng, J., *et al.* (2018) Particle Acidity and Sulfate Production during Severe Haze Events in China Cannot Be Reliably Inferred by Assuming a Mixture of Inorganic Salts. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **18**, 10123-10132. <https://doi.org/10.5194/acp-18-10123-2018>