



移动扫码阅读

周德荣,蒋琳,王伶俐,等.COVID-19疫情期间江苏三市大气中 VOCs 浓度变化特征及来源分析[J].能源环境保护, 2022,36(1):98-104.

ZHOU Derong, JIANG Lin, WANG Lingrui, et al. Variation characteristics and source analysis of atmospheric volatile organic compounds in three cities of Jiangsu Province during COVID-19[J]. Energy Environmental Protection, 2022,36(1):98-104.

COVID-19 疫情期间江苏三市大气中 VOCs 浓度变化特征及来源分析

周德荣^{1,2}, 蒋琳^{2,*}, 王伶俐², 陈俊², 谢郁宁²

(1. 南京大学 大气环境与绿色发展产业技术研究院, 江苏 南京 210093;

2. 南京浦蓝大气环境研究院有限公司, 江苏 南京 210046)

摘要:为研究我国新冠疫情(COVID-19)期间防控措施对江苏省不同城市大气中挥发性有机物(Volatile organic compounds, VOCs)浓度和来源的影响,在2020年1月1日~2月29日在使用VOCs在线监测仪器对南京、南通以及徐州三市VOCs进行监测分析。结果表明:疫情防控开始后,南京、南通以及徐州三市总挥发性有机物(Total Volatile Organic Compounds, TVOCs)浓度分别下降35%、35%以及54%,南京市与南通市VOCs浓度受影响最为显著的物质均为芳香烃,徐州市烯烃降幅最大;三市TVOCs对臭氧生成潜势(Ozone Formation Potentials, OFP)的贡献分别下降了44%、44%和54%,芳香烃降幅最大;正矩阵因数分解源解析结果显示,疫情管控对南京与南通的石油化工源、工业溶剂源影响最为显著,对徐州化工源、机动车排放源、燃烧源的影响较大。为了有效降低VOCs浓度并限制O₃生成,建议对南京、南通市的石油化工及工业溶剂源的排放进行限制。对徐州市,针对其石油化工及机动车源排放的控制则更为有效。

关键词:COVID-19;挥发性有机物;源解析;浓度变化特征

中图分类号:X511

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)01-0098-07

Variation characteristics and source analysis of atmospheric volatile organic compounds in three cities of Jiangsu Province during COVID-19

ZHOU Derong^{1,2}, JIANG Lin^{2,*}, WANG Lingrui², CHEN Jun², XIE Yuning²

(1. Atmospheric Environment and Green Development Research Institute, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Nanjing Pulan Atmospheric Environment Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210046, China)

Abstract: In order to study the effects of the prevention and control measures of COVID-19 on the concentration and source of volatile organic compounds (VOCs) in different cities of Jiangsu Province, VOCs online monitoring instruments were used to monitor and analyze VOCs in Nanjing, Nantong and Xuzhou from January 1 to February 29, 2020. The results showed that after the prevention and control of COVID-19, the concentrations of total volatile organic compounds (TVOCs) in Nanjing, Nantong, and Xuzhou decreased by 35%, 35% and 54%, respectively. The most significantly affected species in VOCs were aromatic hydrocarbons in Nanjing and Nantong, and olefins in Xuzhou. The contribution rates of TVOCs to ozone formation potential (OFP) in the three cities decreased by 44%, 44% and

收稿日期:2021-09-18;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:江苏省PM_{2.5}与臭氧污染协同控制重大专项(2019023);江苏省重点研发计划(社会发展)重大科技示范(BE2019704);上海大气PM_{2.5}和O₃精细化监测预报及关键前体污染物防控关键技术研究与应用示范(20dz1204000)

第一作者简介:周德荣(1988-),男,江苏泰州人,博士,助理研究员,主要研究方向为空气污染气象学、大气物理和大气化学。E-mail:zhoudr@nju.edu.cn

通讯作者简介:蒋琳(1993-),女,江苏扬州人,硕士,工程师,主要研究方向为大气物理与大气化学。E-mail:44641859@163.com

54%, respectively. The contribution rate of aromatic hydrocarbons decreased the most. The positive matrix factorization source analysis results showed that the prevention and control measures of COVID-19 had the most significant impact on the petrochemical and industrial solvent sources in Nanjing and Nantong, and had a great impact on chemical sources, motor vehicle emission sources and combustion sources in Xuzhou. In order to effectively reduce the VOCs concentration and the O_3 generation, it was suggested to limit the VOCs emission from petrochemical and industrial solvent sources in Nanjing and Nantong. For Xuzhou, it was more effective to control VOCs emission from petrochemical and motor vehicle sources.

Key Words: COVID-19; Volatile organic compounds; Source apportionment; Variation characteristics of concentration

0 引言

近十年来随着我国经济的持续发展,一系列环境问题和由此产生的经济损失、公众健康问题正日益凸显^[1]。为改善区域大气污染状况,京津冀、长三角、珠三角等地区采取了一系列有效的措施,包括改进工业和机动车排放标准、关停小型污染企业、升级改造工业锅炉等,空气质量有了显著改善^[2-3];京津冀和长三角地区的颗粒物重度污染天数由 2013 年 122 天和 33 天降低到 2017 年的 31 天和 25 天^[4]。尽管一次污染有了显著改善,但是以 O_3 为代表的二次污染出现天数呈快速上升的趋势, O_3 超标天数已经超过 $PM_{2.5}$, 成为影响环境质量的首要污染物^[5-6]。因此,挥发性有机物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 作为 O_3 和二次有机气溶胶 (Secondary Organic Aerosol, SOA) 的重要前体物来引起了国内外学者的广泛关注,一系列针对 VOCs 浓度水平、时空分布特征、反应活性、来源解析等方面的研究正持续开展^[7-11]。

2020 年 1 月,新冠疫情在中国乃至全世界迅速蔓延^[12-13],为控制疫情,各省市均启动了重大突发公共卫生事件一级响应,实施了一系列严格的管控措施,包括封锁交通干线、限制人口非必要活动、工厂停工和学校停课等^[6, 14]。这些措施极大改变了人们的生活方式,导致城市中日常活动的庞大机动车数量降至最低。疫情防控期间大城市机动车在途量锐减使得 VOCs 的人为排放得到控制,为评估人类活动对大气中 VOCs 浓度水平及分布特征的影响,Zheng 等^[15]对比了 2016 年 G20 峰会会议期间上海市浦东新区和青浦区淀山湖站管控阶段与会后解除管制的 VOCs 浓度,发现会后浦东新区和青浦区淀山湖站 VOCs 浓度最大增长率分别为 74.47% 和 147.92%。研究大多关

注大型会议或赛事期间管控措施对污染物浓度的影响,其中的管控措施大都仅限于工厂停工和机动车限行,管控力度远远弱于此次疫情期间的措施。并且这些研究主要着眼于单个城市,对于同样严格的管控措施下人口流动和工业结构均有显著差异的不同城市的 VOCs 浓度和来源具体表现出的变化特征鲜有研究。

为探究疫情期间的管控措施对江苏省不同城市 VOCs 浓度、特征物以及来源的影响,本文选取了南京、南通和徐州三个城市进行对比,对比了疫情前和疫情期间,三城市 VOCs 浓度水平和组成特征的差异,以及各城市特征物种的变化趋势,通过 PMF 源解析分析城市间和城市内行业贡献的差异和变化,为江苏省对制定不同城市的 VOCs 减排政策提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 监测时间与监测点位

利用 2020 年 1 月 1 日~2 月 29 日南京市环境监测中心、南通市监测中心和徐州市监测中心的监测数据,对比分析疫情前和疫情期间城市 VOCs 浓度水平和来源的差异。三个站点均为城市站点,站点经纬度如表 1 所示。

表 1 监测站点经纬度及类型

Table 1 Longitude, latitude and type of monitoring site

城市	经度	纬度	站点类型
南京	118.76°N	32.06°E	城市站点
苏州	120.86°N	32.01°E	城市站点
徐州	117.27°N	34.22°E	城市站点

由于疫情发生后,江苏省启动突发公共卫生时间一级响应时间为 1 月 25 日,随后暂停所有进出江苏的省际班线客运以及小区封闭式管理,因此选择 1 月 25 日作为疫情管控前后的时间结点

点,分析1月1日~1月24日(疫情管控前)以及1月25日~2月29日(疫情管控中)两个阶段下污染物浓度的特征差异。

1.2 仪器介绍及数据来源

1.2.1 挥发性有机物(VOCs)

南京、南通和徐州监测站均采用配有氢离子火焰检测器的气质联用检测仪(GC-MS/FID)在线监测大气中的挥发性有机物。在线监测的物种包括烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、卤代烃和含氧VOC等106种挥发性有机物,时间分辨率为1小时。待测气体经过颗粒物去除器、除水阱以及二氧化碳去除器后进入-150℃的捕集阱中被固定,采样结束后捕集阱迅速升高温度到100℃,同时载气带走捕集阱中物质进入色谱柱进行分离,分离后物质进入FID和MS中进行定量分析,在下一小时开始时捕集阱重新降温到-150℃重复上述流程。

为保证VOCs在线监测数据准确可靠,对在线监测仪器进行定期维护,包括定期更换标气瓶,

标定同时利用外标和内标进行标定,每天零点自动进样外标气,当响应数据与外标浓度偏差在±30%以内认为合格,否则对仪器进行重新标定。此外,在每小时进样中定量的内标气都会随采样气体进入仪器,利用内标法计算待测物质浓度,通过外标和内标的校验和审核,保证仪器运行状态正常,产出数据真实可靠。

1.2.2 清单数据

VOCs排放清单使用的是清华大学编制的MEIC清单,空间分辨率为0.25度^[16]。

图1为南京、南通以及徐州市VOCs排放强度及占比,从图1(a)中三市VOCs排放来看,南京VOCs排放量最大,其次为南通和徐州。图1(b)中可见三市VOCs产业贡献最大的均为工厂工业(占比55%、32%与56%)。除工厂工业外,南京市VOCs主要贡献源为居民(17%)、道路(12%)与溶剂(10%)。南通溶剂源贡献尤为显著(占比31%),其次为居民(17%)与道路源(12%)。徐州主要贡献源为溶剂(17%)与道路(11%)。

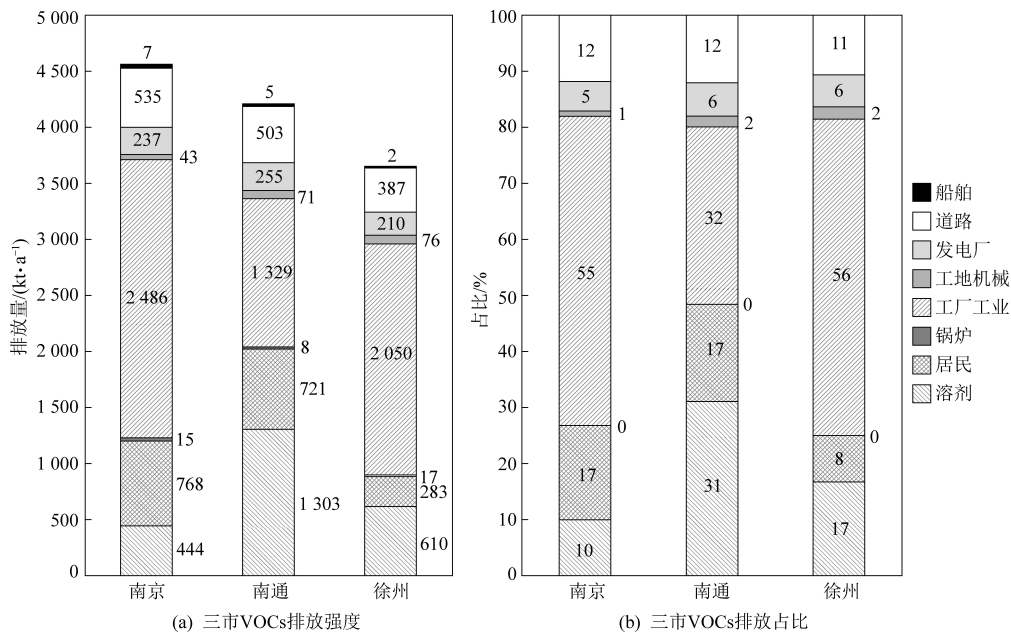


图1 南京、南通以及徐州市VOCs排放强度及占比

Fig.1 Emission intensity and proportion of VOCs in Nanjing, Nantong and Xuzhou

2 结果与讨论

2.1 疫情前后VOCs浓度变化特征

本次监测共筛选出56种VOCs物质,各城市不同阶段的VOCs浓度统计于表2中。疫情管控措施开始前南京市TVOCs(TVOCs指所有VOCs物质浓度总和)浓度水平最高,为 $65.13 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,徐州与南通分别为 $64.51 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 与 $50.98 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

疫情管控开始后南京TVOCs质量浓度最高,其次为南通、徐州。TVOCs浓度较疫情管控开始前降幅最大的为徐州市(54%),南京与南通均降低了35%。

图2为疫情管控前、中时期三市VOCs物种占比变化,疫情开始后三市VOCs组分浓度均有下降,其中南京市VOCs浓度受影响降幅最为显著的物种为芳香烃(53%)和烯烃(48%);南通市为

芳香烃(52%)与炔烃(46%)、徐州则是烯烃(降幅60%)与芳香烃(56%)。三个城市中,疫情前占比最高的物种均为烷烃,在南京、南通以及徐州市的占比分别为68%、63%以及58%。疫情发生后,四类物种占比均有不同比率的变化:三市烷烃占比均上升(增幅5%、5%、2%),芳香烃占比均下降(降幅2%、4%、1%),烯烃除南通占比不变外,南

京与徐州占比下降(降幅3%、2%),芳香烃南通占比下降1%而南京与徐州则增长1%、2%。

疫情管控措施开始后出行限制,部分中小企业停工,机动车尾气排放对烷烃、烯烃、芳香烃贡献较大;烯烃、芳香烃则与工业生产、溶剂使用、燃料燃烧密切相关,可见各组分 VOCs 浓度下降,受疫情影响显著。

表 2 监测期间 VOCs 各组分浓度均值及浓度范围

Table 2 The average concentration and concentration range of each component of VOCs during the monitoring period						
$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$						
	南京		南通		徐州	
	疫情前	疫情中	疫情前	疫情中	疫情前	疫情中
烷烃	43.59±18.44	29.31±16.52	31.00±16.91	21.37±9.94	37.3±16.47	18.28±10.14
烯烃	6.29±4.05	3.18±2.17	4.10±3.48	2.73±2.48	7.26±3.71	3.03±2.08
炔烃	3.36±1.95	2.22±1.07	2.63±1.80	1.49±0.73	3.66±2.32	2.07±1.22
芳香烃	11.92±7.49	5.41±5.98	13.30±9.95	6.55±5.27	16.31±11.43	7.31±3.30
TVOC	65.13±29.05	40.08±23.63	50.98±29.94	32.13±16.38	64.51±30.73	30.36±14.05

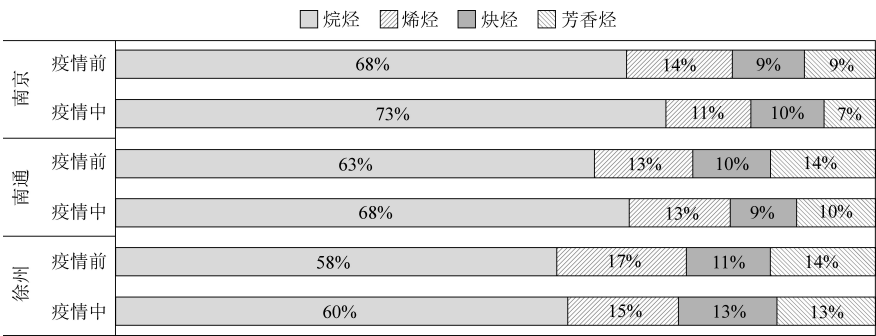


图 2 疫情管控前、中时期三市 VOCs 各组分占比变化

Fig.2 Changes in the proportion of VOCs components in the three cities before and during the epidemic control period

2.2 VOCs 浓度前十物种及其臭氧生成潜势

图 3 为疫情管控前、中时期三城市 VOCs 浓度前十物质及其对应的 OFP 浓度。由图 3 可见,三市疫情管控措施落实前和落实后的前十物种都以烷烃、烯烃及芳香烃为主。

臭氧生成潜势 (Ozone Formation Potentials, OFPs) 是基于 MIR 来量化 CO 和 VOCs 对臭氧生成贡献的指标,可以说明该地区大气 VOCs 具有的臭氧生成的最大能力,计算公式如下:

$$OFP_i = MIR_i \times [VOC_i]$$

式中, $[VOC_i]$ 是观测到的 VOCs 物种 i 的浓度, MIR (Maximum Incremental Reactivity, MIR) 为最大增量反应活性。本研究中 MIR 取值引用自 CARTER 的研究^[17]。

由图 3 可见,疫情管控开始后南京市和南通市高 OFP 物质浓度下降,低 OFP 物质浓度上升。南京市石油化工的典型示踪物:乙烯(燃

料燃烧)、甲苯(机动车、溶剂)、丙烯浓度降低。南通市丙烷(LPG 排放源)以及甲苯、间/对二甲苯等溶剂使用源浓度降低最多。徐州市苯、甲苯等表征工业排放的物种浓度下降幅度最大。

由图 4 可见,疫情管控前南京、南通以及徐州市 TVOCs 对 OFP 的贡献分别为 166.0、131.86、192.58 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。疫情管控后由于污染物浓度的下降,三市 OFP 分别下降了 44%、44%以及 54%。可见管控措施从整体上对 OFP 产生了显著影响。3 个城市各 VOCs 组分对 OFP 的贡献有所差异,南京市烯烃对 OFP 的贡献最大,这是由于烯烃活性较强,且南京市烯烃浓度仅次于烷烃,其次为芳香烃、烷烃和炔烃。南通与徐州市高 OFP 贡献组分特征较为一致,均为芳香烃最大。疫情期间管控开始后,三城市的芳香烃 OFP 浓度降幅最为显著,其次为烯烃。

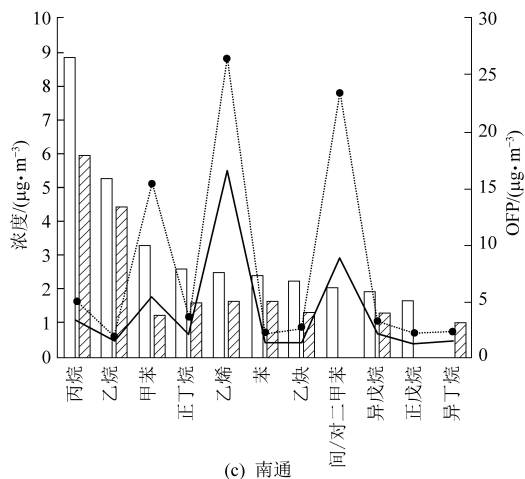
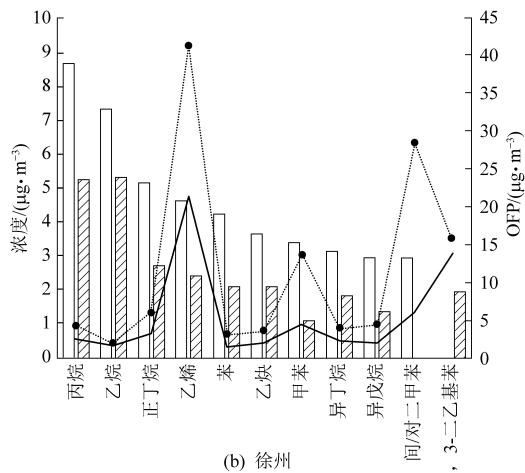
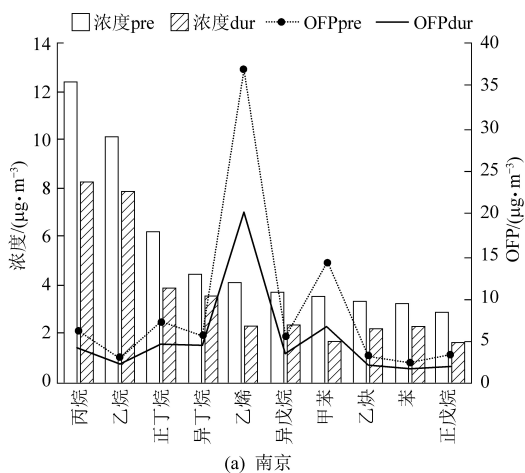


图3 疫情管控前、中时期南京市、徐州市以及南通市 VOCs 浓度前十物质及其对应的 OFP 浓度

Fig.3 Top ten VOCs concentrations and their corresponding OFP concentrations before and during the epidemic control period in Nanjing, Xuzhou and Nantong

2.3 VOCs 来源解析

T/B(甲苯/苯)常被用来判断大气中 VOCs 的可能来源^[18]。研究表明,城市地区甲苯与苯的比值在 2 左右可能受机动车排放影响较为显著^[19],若大于 2 则有可能受到溶剂及工业排放影响,若显著低于 1 则

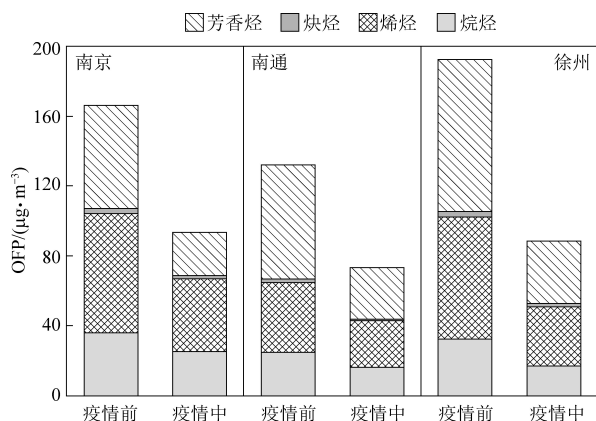


图4 疫情管控前、中时期三城市 VOCs 各组分类别的 OFP 浓度

Fig.4 OFP concentration of VOCs in three cities before and during the epidemic control period

可能受到燃煤或生物质燃烧源的影响。图 5 为疫情管控前、中时期 VOCs 关键物质比值时间序列。

从图 5 中比值来看,1 月 8 日以前南京、南通以市受工业排放及溶剂源影响较大,其中南通市 T/B 最高可达 16,是南京以及徐州的三倍有余,而南通市比值相对较低,除 1 月 4 日 5~8 点比值大于 2,其余时刻主要均低于 1,以燃烧源为主^[19-20]。

1 月 25 日以后,二者比值显著下降,除南通市比值偶有峰值,呈现工业溶剂影响特征外,整体均小于 1,以燃烧源为主,与疫情期间居家供暖的特征一致。2 月 21 日后比值上升,南京市主要为交通源影响,南通则为工业溶剂源及交通源混合,徐州依旧主要以燃烧源为主。

通过 PMF 源解析共确定了 5 种源类别,分别为居民生活、机动车排放、燃烧、工业溶剂及石油化工源,各城市因子贡献占比可见图 6。由图 6 可知,疫情前,南京市与南通市 VOCs 源解析特征较为一致:燃烧源占主导,贡献分别为 38%与 35%;其次为机动车排放源、工业溶剂、居民生活源。徐州市机动车排放源贡献达 39%,其次为居民生活源 26%、石油化工、燃烧以及工业溶剂。

疫情管控措施开始后,三市 VOCs 浓度均有降低,贡献因子中机动车排放与石油化工均有不同比例的下降,由图 6 可见,南京、南通以及徐州市内石油化工占比降幅分别为 5%、2%、13%;机动车排放降幅为 0、2%、5%;南京市与南通市的工业溶剂降幅为 10%、8%;徐州市燃烧源降幅为 3%。此外,疫情管控期间,受居家隔离政策的影响,三城市的居民生活源占比均有所上升,南京南通以及徐州市分别上升了 6%、13%以及 13%。

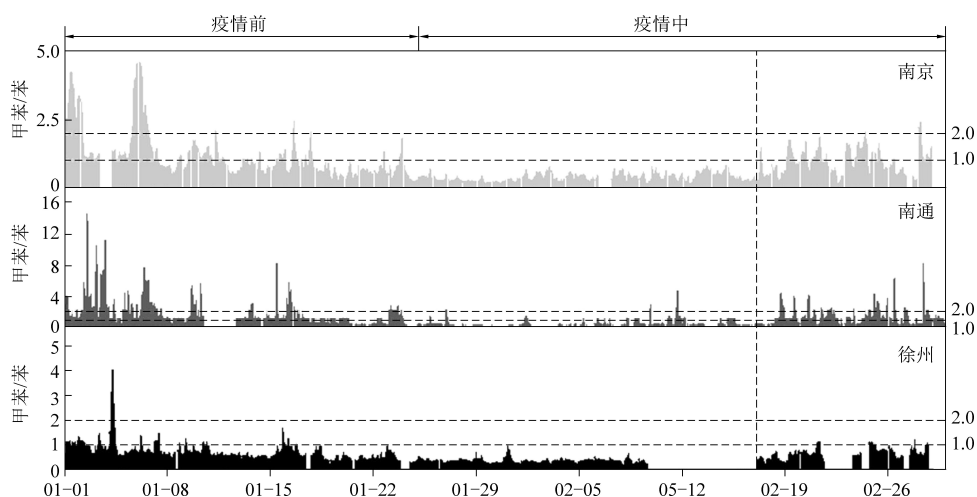


图5 疫情管控前、中时期 VOCs 关键物质比值时间序列

Fig.5 Time series of the ratio of key substances of VOCs before and during the epidemic control period

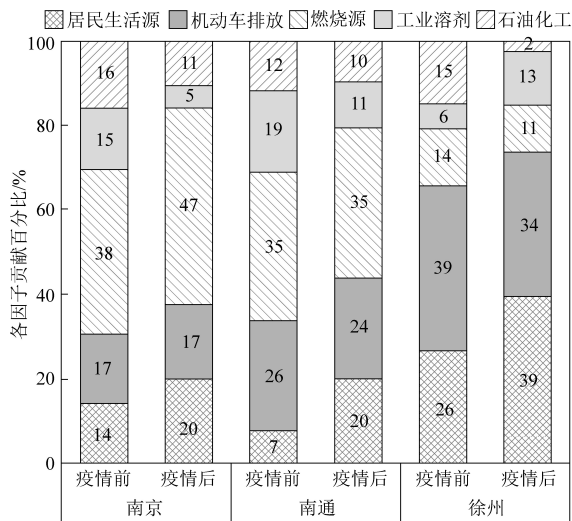


图6 疫情管控前、中时期 PMF 源解析各因子占比变化柱状堆积图

Fig.6 Columnar accumulation chart of the proportion changes of various factors in PMF source analysis before and during the epidemic control period

3 结 论

本研究基于地面监测站点及清单数据评估了2020年疫情管控对长三角主要城市大气挥发性有机物的影响,结果显示:

(1) 疫情期间(1月25日~2月29日)南京、南通及徐州市TVOCs体积浓度较疫情管控前(1月1日~1月24日)分别降低了35%、35%以及54%;各城市VOCs组分均有不同程度的下降,其中,南京与南通降幅最为显著的物质均为芳香烃(降幅53%、52%),徐州则为烯烃,降幅60%。

(2) 管控期间VOCs各组分中,南京市乙烯、甲苯、丙烯浓度显著降低;南通市丙烷以及甲苯、

间/对二甲苯等溶剂使用源浓度降低最多;徐州市苯、甲苯等表征工业排放的物种浓度下降幅度最大。

(3) 管控期间三市石油化工源贡献占比均下降(南京、南通及徐州市的降幅分别为5%、2%、13%),南京与南通市工业溶剂源贡献占比降幅最为显著(降幅分别为10%、8%),徐州市燃烧源及机动车排放源贡献占比降低(降幅分别为3%、5%);三市居民生活源贡献占比均上升(南京、南通及徐州市的升幅分别为6%、13%、13%),该结果与疫情期间居家隔离天然气的使用频率增强有一致的关联。

(4) 本次疫情管控为研究长三角地区的VOCs污染来源提供了重要参考,表明对工业排放、溶剂使用及机动车尾气排放源的严格管控可显著降低长三角主要城市(南京、徐州、南通)VOCs主要物种的浓度;对烯烃、芳香烃的控制可对后续进一步控制VOCs浓度及 O_3 生成产生显著效果,也为江苏省以及其它地区的VOCs污染的控制提供合理有效的支撑。

参考文献

- [1] Cao J, Yang C, Li J, et al. Association between long-term exposure to outdoor air pollution and mortality in China: A cohort study [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186 (2-3): 1594-1600.
- [2] Qiang Z, Jiannong Q, Xuexi T, et al. Effects of meteorology and secondary particle formation on visibility during heavy haze events in Beijing, China [J]. Science of the Total Environment, 2015, 502: 578-584.
- [3] Xing C, Shuxiao W, Bin Z, et al. Contributions of inter-city and regional transport to $PM_{2.5}$ concentrations in the Beijing-

- Tianjin-Hebei region and its implications on regional joint air pollution control [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 1191-1200.
- [4] Jiandong L, Hong L, Jianlin H, et al. Severe particulate pollution days in China during 2013-2018 and the associated typical weather patterns in Beijing-Tianjin-Hebei and the Yangtze River Delta regions [J]. *Elsevier*, 2019, 248: 74-81.
- [5] Yuesi W, Wenjie L, Wenkang G, et al. Trends in particulate matter and its chemical compositions in China from 2013-2017 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62 (12): 1857-1871.
- [6] 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): 10.
- [7] Huang Z, Shaofei K, Xinli X, et al. Monitoring of volatile organic compounds (VOCs) from an oil and gas station in north-west China for 1 year [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18 (7): 4567-4595.
- [8] Yanli Z, Xinming W, Zhou Z, et al. Sources of C₂-C₄ alkenes, the most important ozone nonmethane hydrocarbon precursors in the Pearl River Delta region [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 502: 236-245.
- [9] Y Zou, X J Deng, D Zhu, et al. Characteristics of 1 year of observational data of VOCs, NO_x and O₃ at a suburban site in Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15 (12): 6625-6636.
- [10] 高宗江, 高松, 崔虎雄, 等. 上海市某化工区夏季典型光化学过程 VOCs 特征及活性研究 [J]. *环境科学学报*, 2017, 37 (4): 1251-1259.
- [11] 莫梓伟, 陆思华, 李悦, 等. 北京市典型溶剂使用企业 VOCs 排放成分特征 [J]. *中国环境科学*, 2015, 35 (2): 374-380.
- [12] Chen W, Peter W Horby, Frederick G Hayden, et al. A novel coronavirus outbreak of global health concern [J]. *The Lancet*, 2020, 395 (10223): 470-473.
- [13] Huaiyu T, Yonghong L, Yidan L, et al. An investigation of transmission control measures during the first 50 days of the COVID-19 epidemic in China [J]. *Science (New York, N. Y.)*, 2020, 368 (6491): 638-642.
- [14] Wilder-Smith A, Freedman D O. Isolation, quarantine, social distancing and community containment: Pivotal role for old-style public health measures in the novel coronavirus (2019-nCoV) outbreak [J]. *Journal of Travel Medicine*, 2020, 27 (2): 1-4.
- [15] Shanshan Z, Xiaofeng X, Yunjiang Z, et al. Characteristics and sources of VOCs in urban and suburban environments in Shanghai, China, during the 2016 G20 summit [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, 10 (6): 1766-1779.
- [16] Meng L, Qiang Z, Jun-ichi Kurokawa, et al. MIX: A mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17 (2): 935-963.
- [17] CARTR W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. *Air Waste*, 1994, 44 (7): 881-899.
- [18] 王伶俐, 李海燕, 陈程, 等. 长三角北部沿海城市 2018 年大气 VOCs 分布特征 [J]. *环境科学学报*, 2020, 40 (4): 1385-1400.
- [19] Qiusheng H, Yulong Y, Hongyan L, et al. Characteristics and reactivity of volatile organic compounds from non-coal emission sources in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 115: 153-162.
- [20] 罗达通, 高健, 王淑兰, 等. 上海秋季大气挥发性有机物特征及污染物来源分析 [J]. *中国环境科学*, 2015 (4): 987-994.