

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析 .....	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价 .....	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络 .....	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例 .....	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM <sub>2.5</sub> 减排效果评估 .....	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM <sub>2.5</sub> 中碳质气溶胶的影响 .....	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区 .....	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响 .....	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析 .....	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析 .....	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM <sub>2.5</sub> 和 O <sub>3</sub> 污染的健康效益评价 .....	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析 .....	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单 .....	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源 .....	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源 .....	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律 .....	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析 .....	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价 .....	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估 .....	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程 .....	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估 .....	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制 .....	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价 .....	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素 .....	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径 .....	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制 .....	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II)和 Ni(II)的去除性能及机制 .....	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定 .....	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素 .....	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响 .....	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估 .....	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析 .....	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩娟, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量 .....	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征 .....	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生季草地土壤细菌群落结构的垂向差异 .....	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局 .....	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响 .....	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响 .....	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响 .....	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N <sub>2</sub> O 排放及其功能基因的影响 .....	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响 .....	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响 .....	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析 .....	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM <sub>2.5</sub> 中重金属含量表征及健康风险 .....	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价 .....	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例 .....	高越, 吕童, 张蕴凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析 .....	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析 .....	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价 .....	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准 .....	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析 .....	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价 .....	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析 .....	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析 .....	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险 .....	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌区土壤-小麦重金属健康风险评估 .....	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测 .....	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)	

# 深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析

刘婵芳<sup>1</sup>, 张傲星<sup>2\*</sup>, 房庆<sup>1</sup>, 叶毓婧<sup>1</sup>, 杨红龙<sup>3</sup>, 陈炯恺<sup>2</sup>, 吴雯璐<sup>2</sup>, 侯岳<sup>2</sup>, 莫佳佳<sup>2</sup>, 傅宗玫<sup>2</sup>

(1. 广东省深圳生态环境监测中心站, 深圳 518049; 2. 南方科技大学环境科学与工程学院, 深圳 518055; 3. 深圳市国家气候观象台, 深圳 518040)

**摘要:** 短期减排是我国城市应对大气污染事件的重要应急管控手段,但短期减排的效益尚未得到完善分析. 2022 年 3 月 14 ~ 20 日,广东省深圳市为抑制新冠疫情传播实施了全市管控,为评估短期减排对华南城市春季空气质量的影响提供独特机会. 结合深圳市高精度环境空气质量监测与气象观测等多源数据,分析了深圳市管控期间前后的空气质量变化. 此次管控前和管控期中均有部分日期天气形势静稳,局地污染水平主要反映本地排放,有利于分析本地减排的影响. 观测与 WRF-GC 区域化学模拟都表明,与珠三角周边城市相比,深圳市管控期间由于市内交通源排放显著减少,深圳市二氧化氮( $\text{NO}_2$ )浓度降低( $-26 \pm 9.5\%$ ),可吸入颗粒物( $\text{PM}_{10}$ )浓度降低( $-28 \pm 6.4\%$ ),细颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )浓度降低( $-20 \pm 8.2\%$ ),但臭氧( $\text{O}_3$ )浓度无显著变化[ $(-1.0 \pm 6.5\%)$ ]. TROPOMI 卫星观测的甲醛和二氧化氮柱浓度数据对比表明,2022 年春季珠三角臭氧光化学主要受挥发性有机物(VOCs)浓度控制,对氮氧化物浓度降低不敏感,反而可能因氮氧化物对臭氧滴定效应减弱而造成臭氧浓度上升. 由于较小的减排时空范围,该城市尺度短期减排造成的空气质量效应略弱于我国各地在 2020 年大范围疫情管控期间的空气质量影响. 华南城市未来空气质量治理,应当关注氮氧化物削减对臭氧污染的影响,并更多地考虑氮氧化物与 VOCs 的协同减排方案.

**关键词:** 疫情管控; 华南; 春季; 臭氧污染; 协同控制

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3117-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202205313

## Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022

LIU Chan-fang<sup>1</sup>, ZHANG Ao-xing<sup>2\*</sup>, FANG Qing<sup>1</sup>, YE Yu-jing<sup>1</sup>, YANG Hong-long<sup>3</sup>, CHEN Jiong-kai<sup>2</sup>, WU Wen-lu<sup>2</sup>, HOU Yue<sup>2</sup>, MO Jia-jia<sup>2</sup>, FU Tzung-May<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Ecological and Environmental Monitoring Center of Guangdong Province, Shenzhen 518049, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China; 3. Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen 518040, China)

**Abstract:** The short-term reduction of air pollutant emissions is an important emergency control measure for avoiding air pollution exceedances in Chinese cities. However, the impacts of short-term emission reductions on the air qualities in southern Chinese cities in spring has not been fully explored. We analyzed the changes in air quality in Shenzhen, Guangdong before, during, and after a city-wide lockdown associated with COVID-19 control during March 14 to 20, 2022. Stable weather conditions prevailed before and during the lockdown, such that local air pollution was strongly affected by local emissions. In-situ measurements and WRF-GC simulations over the Pearl River Delta (PRD) both showed that, due to reductions in traffic emissions during the lockdown, the concentrations of nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ), respirable particulate matter ( $\text{PM}_{10}$ ), and fine particulate matters ( $\text{PM}_{2.5}$ ) in Shenzhen decreased by  $(-26 \pm 9.5\%)$ ,  $(-28 \pm 6.4\%)$ , and  $(-20 \pm 8.2\%)$ , respectively. However, surface ozone ( $\text{O}_3$ ) concentration did not change significantly [ $(-1.0 \pm 6.5\%)$ ]. TROPOMI satellite observations of formaldehyde and nitrogen dioxide column concentrations indicated that the ozone photochemistry in the PRD in spring 2022 was mainly controlled by the volatile organic compound (VOCs) concentrations and was not sensitive to the reduction in nitrogen oxide ( $\text{NO}_x$ ) concentrations. Reduction in  $\text{NO}_x$  may even have increased  $\text{O}_3$ , because the titration of  $\text{O}_3$  by  $\text{NO}_x$  was weakened. Due to the small spatial-temporal extent of emission reductions, the air quality effects caused by this short-term urban-scale lockdown were weaker than the air quality effects across China during the widespread COVID-19 lockdown in 2020. Future air quality management in South China cities should consider the impacts of  $\text{NO}_x$  emission reduction on ozone and focus on the co-reduction scenarios of  $\text{NO}_x$  and VOCs.

**Key words:** COVID-19 lockdown; SouthChina; spring; ozone pollution; collaborative control

近年来我国多次在重大活动或空气污染事件期间实施短期减排措施,以改善局地环境空气质量. 例如,2008 年北京奥运会<sup>[1,2]</sup>、2010 年上海世博会<sup>[3,4]</sup>、2010 年广州亚运会、2014 年北京亚太经合组织会议<sup>[5,6]</sup>、2016 年杭州 G20 峰会、2022 年北京冬奥会和 2015 年北京重度灰霾期间等,通过城市或区域范围车辆限行、停工停产等措施减少污染排放,达到降低大气污染物浓度的目标. 然而,短期减排措施对空气质量的定量贡献受到气象条件变化影响,较难评估<sup>[7~12]</sup>. 部分研究通过对比减排期间与同季节非减排期间的空气质量变化,定性评估了城

市尺度的短期减排措施的效益<sup>[3,13]</sup>,为城市进一步优化环境管理和减排措施方案提供了重要参考.

前述短期减排事件大多发生于冬夏季节,但华南春季城市短期减排对局地空气质量的影响,特别是对臭氧污染的影响,尚未得到充分观测评估. 臭氧

收稿日期: 2022-05-29; 修订日期: 2022-09-02

基金项目: 深圳市科技创新委员会可持续发展科技专项(KCXFZ202002011008038); 广东省基础与应用基础研究基金区域联合基金项目(2021A1515110748, 2020B1515130003)

作者简介: 刘婵芳(1983~),女,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为大气环境监测与预报预警, E-mail: 99753846@qq.com

\* 通信作者, E-mail: zhangax@sustech.edu.cn

由挥发性有机气体 (volatile organic compounds, VOCs) 在太阳照射下, 通过氮氧化物 ( $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ ) 催化的光化学反应生成. 华南地区纬度较低, 春季光照、气温和植物源 VOCs 排放相对较高, 故该地区即使在春季也存在较高臭氧污染风险<sup>[14]</sup>. 以广东省深圳市为例, 臭氧自 2015 年以来已成为深圳市首要污染物. 2015 年 7 月至 2022 年 5 月期间, 深圳市共发生臭氧超标 93 例, 其中 9 例发生在 2~4 月.

自 2020 年新冠肺炎疫情暴发以来, 全球许多城市先后实施了管控措施, 导致局地人为源污染物和前体物排放显著减少, 影响局地空气质量<sup>[15~17]</sup>. 有研究表明 2020 年 1~2 月我国大范围疫情管控期间, 华北  $\text{NO}_x$  排放较管控前减少 51%, 细颗粒物排放减少 63%<sup>[18]</sup>. 由于氮氧化物减排,  $\text{NO}_x$  对臭氧的滴定作用减弱, 导致华北城市地面臭氧浓度上升 10%~15%, 反映臭氧光化学生成对  $\text{NO}_x$  和 VOC 前体物浓度复杂且非线性的响应<sup>[18,19]</sup>. 在不同地区、排放结构和气候条件下, 臭氧对  $\text{NO}_x$  和 VOC 的敏感性存在差异, 我国各大城市群 (京津冀、长三角和珠三角地区) 普遍处在 VOC 控制区<sup>[20~24]</sup>, 因此单独减排  $\text{NO}_x$  对改善臭氧污染效果较弱, 甚至有反效果. 2021 年以来, 我国虽不再出现全国范围疫情, 但城市范围的疫情及针对性的管控措施仍偶有发生. 城市空气质量对污染物排放变化的敏感性, 与各个城市地理环境、排放水平和排放物种特征、季节和天气形势等因素关系密切, 而城市范围管控正好可以理解为上述敏感性提供契机.

为控制新冠疫情蔓延, 深圳市于 2022 年 3 月 14~20 日暂停了除基本保障企业外的工业生产和经营活动, 企事业单位居家办公, 公交和地铁停运, 全市社区封闭式管理. 为分析全市管控期排放变化对空气质量的影响, 本研究分析比较了全市管控期、管控前 5 d (2022 年 3 月 9~13 日)、管控后 5 d (2022 年 3 月 21~25 日), 以及前一年同期 (2021 年 3 月 9~25 日) 深圳市大气污染物浓度和气象要素的时空变化. 本研究可作为华南春季城市短期大幅减排案例, 以期为评估大气污染防治措施效果提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 珠三角城市地面及边界层大气污染物观测数据

本研究分析 2021 年和 2022 年的 3 月深圳市天地空一体化环境空气质量监测数据, 包括深圳市 75 个“一街一站”高精度大气自动监测网 (15 个国控站、4 个省控站和 56 个市控站) 的二氧化氮 ( $\text{NO}_2$ )、

臭氧 ( $\text{O}_3$ )、细颗粒物 ( $\text{PM}_{2.5}$ ) 和可吸入颗粒物 ( $\text{PM}_{10}$ ) 污染物逐时浓度数据, 深圳市石岩气象观测梯度塔 8 个高度层的  $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  逐时浓度监测数据, 以及莲花山站的总 VOC (TVOC) 和组分监测数据 (包含烷烃、烯烃、炔烃和芳香烃在内的 56 种). 深圳市 75 个站点数据应有 64 800 条, 缺测 1067 条, 根据《环境空气质量监测数据编码技术规范 (征求意见稿)》剔除低质量数据 471 条, 有效数据比例为 99.1%. 深圳市石岩气象观测梯度塔数据应有 6 528 条, 质量控制后剔除 385 条, 有效数据比例为 94.1%. 莲花山 TVOC 监测数据应有 408 条, 缺测数据 37 条, 质量控制后剔除 19 条, 有效数据比例为 86.2%. 本研究还分析了珠三角其他城市惠州市、东莞市、广州市、中山市、珠海市、佛山市、肇庆市和江门市共 65 个国控站点的  $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  逐时浓度监测数据, 数据来自中国环境监测总站全国城市空气质量实时发布平台 (<https://air.cnemc.cn:18007>), 应有 56 160 条, 缺测 1 225 条, 质量控制后剔除 573 条, 有效数据比例为 96.8%.

### 1.2 气象数据

本研究使用美国环境预测中心全球数据同化系统的再分析气象数据<sup>[25]</sup> (NCEP FNL, <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.3>), 分析 2022 年 3 月 9~25 日珠三角气象形势. 该数据的时间分辨率为 6 h, 空间分辨率为  $0.25^\circ$ , 本研究取深圳市范围内 8 个格点平均值表征深圳市气象状况. 另使用 2022 年 3 月 9~25 日深圳市气象局 19 个自动气象站逐小时的地面气象要素观测 (气温、相对湿度、2 min 风速和 2 min 风向), 验证再分析数据对深圳市气象状况的代表性. 深圳市地面气象要素观测数据应有 31 008 条, 缺测 96 条, 有效数据比例为 99.7%.

### 1.3 卫星数据

本研究使用荷兰皇家气象研究所 Sentinel-5P 卫星 TROPOMI 仪器观测的对流层  $\text{NO}_2$  和甲醛 (HCHO) 柱浓度产品<sup>[26]</sup> (<http://www.tropomi.eu/data-products>). 卫星于当地时间 13:30 过境星下点, 其观测的对流层  $\text{NO}_2$  和甲醛柱浓度比 (formaldehyde- $\text{NO}_2$  ratio, FNR) 可用于表征区域臭氧光化学生成对  $\text{NO}_x$  和 VOC 的敏感性<sup>[27~29]</sup>. 本研究将 2022 年 3 月的 TROPOMI 2 级卫星数据 (分辨率约为  $5.5 \text{ km} \times 3.5 \text{ km}$ ) 质量控制后, 线性插值到珠三角地区 ( $21^\circ \sim 24^\circ \text{N}$ ,  $112^\circ \sim 115^\circ \text{E}$ ) 的  $0.1^\circ$  网格, 获得珠三角地区的 3 级卫星数据. 初始 2 级卫星观测数据 196 043 条 (包括  $\text{NO}_2$  数据 100 504 条、HCHO 数据 95 539 条), 去除数据质量得分小于 75 (包括云盖影响、数据错误等情形) 的情况后, 剩余

有效数据70 581条(包括 NO<sub>2</sub> 数据40 055条,HCHO 数据30 526条),有效数据比例为 36. 0%.

1.4 WRF-GC 空气质量模式

WRF-GC 空气质量模式<sup>[30,31]</sup>在线耦合天气研究和预报模式 WRF(weatherresearch and forecasting model) V3.9.1.1<sup>[32]</sup>和大气化学传输模式 GEOS-Chem<sup>[33]</sup>,包含先进的臭氧-氮氧化物-VOC-气溶胶化学方案<sup>[34,35]</sup>,模拟区域空气质量和化学-气象相互作用.本研究使用的 WRF-GC 模拟巢区如图 1 所示,外巢水平分辨率为 27 km,内巢覆盖广东省及周边区域,水平分辨率为 9 km.模型从地面到 10 hPa 共分为 49 垂直层.模拟时段从 2022 年 3 月 5 日 00:00 开始,到 2022 年 3 月 18 日 00:00 结束,其中前 4 d(2022 年 3 月 5 日 00:00 至 3 月 9 日 00:00)用于预

模拟.气象初始和边界条件来自 NCEP FNL<sup>[25]</sup>,化学初始和边界条件来自 MOZART(model for ozone and related chemical tracers)全球模式 2017 年对应日期的模拟结果<sup>[36]</sup>.模拟采用的详细物理化学过程方案如表 1 所示.

WRF-GC 在我国除广东省外的地区使用中国多分辨率排放清单 MEIC 表征 2017 年人为源排放,水平分辨率为 0.25°<sup>[37]</sup>.广东省内使用暨南大学制作的 2017 年高分辨率排放清单,水平分辨率为 3 km<sup>[38]</sup>.为了降低 2017 年以后排放减少带来的模拟误差,本研究基于疫情管控前(2022 年 3 月 9~13 日)模拟与观测的 NO 和 PM<sub>2.5</sub> 浓度平均值比值,对广东省排放清单进行了修正.WRF-GC 中植物源排放由 MEGAN 模块在线计算<sup>[39]</sup>.



基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2022)4307 号的标准地图制作,底图无修改

图1 WRF-GC 模拟网格范围示意

Fig. 1 Domains of the WRF-GC simulation

表1 WRF-GC 模拟采用的物理过程方案

Table 1 Physical mechanisms used in the WRF-GC simulation

物理过程	方案名称
微物理过程	Morrison 2-moment bulk microphysics <sup>[40]</sup>
辐射传输	RRTMG <sup>[41,42]</sup>
地表大气	Monin-Obukhov Similarity scheme <sup>[43]</sup>
陆面过程	Noah Land-Surface Model <sup>[44]</sup>
边界层物理	MYNN 2.5 level TKE scheme <sup>[45,46]</sup>
积云过程	New-Tiedtke scheme <sup>[47]</sup>

2 结果与分析

2.1 深圳市 3 月 9~25 日天气形势

图 2 显示深圳市疫情管控前后的天气形势,图 3 显示深圳市疫情管控前后地面气象要素和边界层高度的变化趋势.NCEP FNL 再分析资料与深圳市地面

观测气温(相关系数  $r = 0.97$ ,均方根误差  $RMSE = 0.72^{\circ}C$ )和相对湿度( $r = 0.86$ , $RMSE = 7.2\%$ )时间特征一致.全市管控前(2022 年 3 月 9~13 日),广东受到高压脊和下沉气流控制,整体天气静稳;深圳市边界层内风力弱、光照强、无降水,有利于污染物积累.3 月 14 日进入全市疫情管控期后,除 3 月 16 日和 3 月 20 日外,深圳市日最高气温均在 25℃ 以上;其中 3 月 14~17 日,深圳市近地面大气静稳、高温和强光照,有利于污染物生成和积累.3 月 18~19 日,珠三角南部的深圳市和珠海市处在辐合带中心,出现了一次来自北部城市的污染物传输事件,而珠三角其他城市空气质量较为平稳.3 月 20~25 日,深圳市受到低压系统和高湿气团影响,风速增大、气温下降和湿度增

加,出现局部降水,有利于污染物清除。

根据前述分析,可知2022年3月9~25日深圳市受气象影响大致可分为以下3个气象阶段。

(1)区域静稳阶段包括3月9~17日,期间珠三角受高压控制,温度较高和风速较低,珠三角各城市天气形势较为一致。

(2)局地辐合传输阶段包括3月18~19日,期间珠三角南部深圳市和珠海市污染受区域传输影响,珠三角各城市天气形势较不一致。

(3)区域扩散阶段包括3月20~25日,期间珠三角地区,温度较低、湿度较高和风速较大,有利于污染物的扩散和清除。

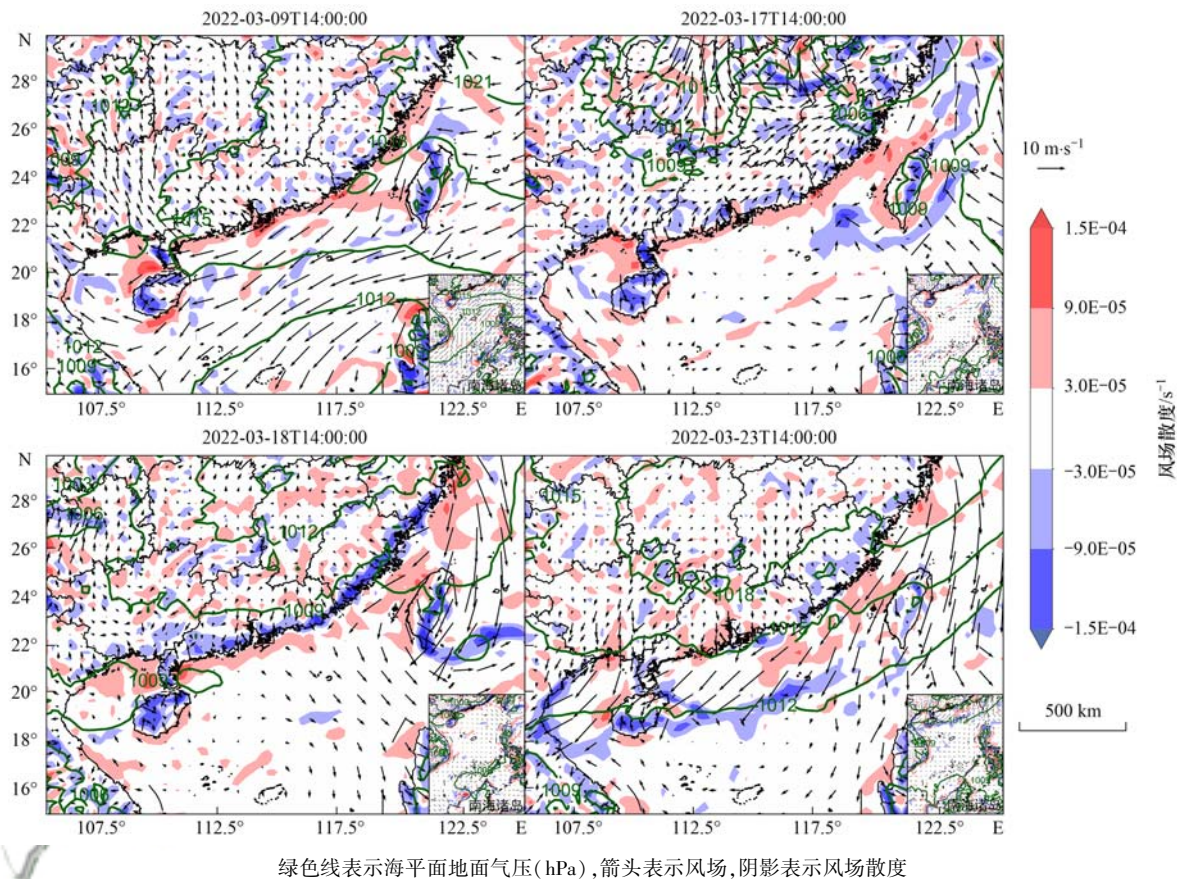


图2 2022年3月的9、17、18和23日华南局地14:00海平面地面气压、风场和风场散度分布

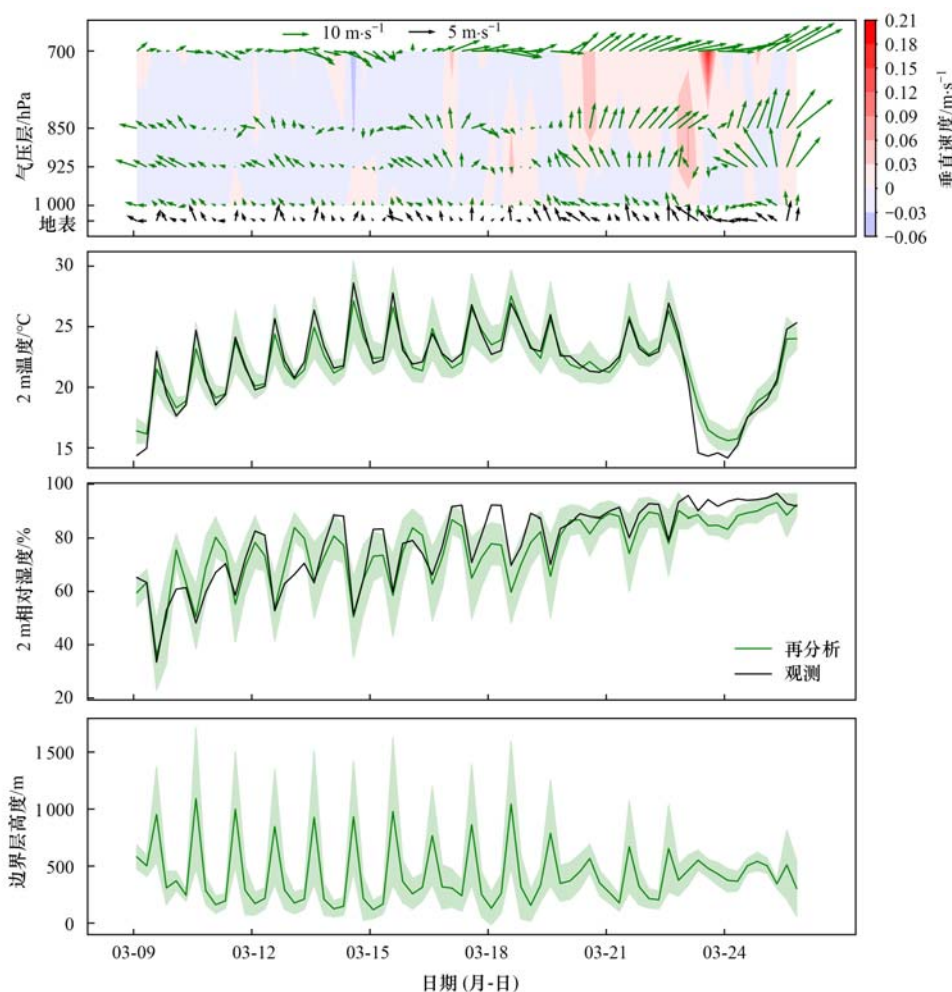
Fig. 2 Sea level pressure, surface winds, and surface wind divergence (shading) over southern China at 14:00 localtime on March 9, 17, 18, and 23 of 2022

## 2.2 深圳市疫情管控前后的空气质量分析

### 2.2.1 2022年3月地面污染物浓度变化

图4显示深圳市3月~25日 $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和TVOC地面小时浓度的时间序列,及与2021年同期对比。图5显示不同阶段污染物的日内变化。2022年3月14日全市管控之前, $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 和TVOC逐时浓度具较明显日内变化, $\text{PM}_{2.5}$ 与 $\text{PM}_{10}$ 有早晚高峰特征,反映深圳市区内 $\text{NO}_2$ 、TVOC、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 浓度主要受交通源排放影响, $\text{O}_3$ 日内浓度受光化学控制。3月14日管控开始后,除 $\text{O}_3$ 以外污染物浓度的日内变化趋于不明显,反映管控措施大幅降低了交通源排放。3月14~20日管控期间, $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 和TVOC浓度变化主要受天气过程影响。其中3月18日夜間至3月19日日間, $\text{PM}_{10}$ 浓度大于其他时段 $\text{PM}_{10}$ 浓度的第95百分位数,原因是该时段出现一次颗粒物污染气团传输事件,造成深圳市内

$\text{PM}_{10}$ 浓度短时升高。2022年全市管控期间与管控前对比, $\rho(\text{NO}_2)$ 平均值降低( $-4.8 \pm 6.6$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值小幅增加( $3.7 \pm 1.4$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , $\rho(\text{PM}_{10})$ 平均值降低( $-5.6 \pm 3.8$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , $\varphi(\text{TVOC})$ 增加 $0.3 \times 10^{-9}$ , $\rho(\text{O}_3)$ 平均值增加( $1.3 \pm 11$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。3月20日以后深圳市风速、相对湿度增加,温度和光照减弱,并出现降水,使得 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{O}_3$ 浓度下降。管控结束后(3月21~25日)与管控前(3月9~13日)对比, $\rho(\text{NO}_2)$ 平均值降低( $-7.3 \pm 6.5$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值降低( $-0.9 \pm 1.5$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , $\rho(\text{PM}_{10})$ 平均值降低( $-16 \pm 4.7$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , $\varphi(\text{TVOC})$ 平均值增加 $1.4 \times 10^{-9}$ , $\rho(\text{O}_3)$ 平均值降低( $-27 \pm 8.5$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。上述2022年3月9~25日的大气污染物浓度变化,包括了排放变化和天气形势变化的共同效应。



绿色线和箭头表示再分析气象数据,黑色线和箭头表示地面观测;阴影表示对应气象要素在深圳市内的标准差;地表表示距离地面高度 10 m

图 3 深圳市 2022 年 3 月 9 ~ 25 日气象要素时间序列

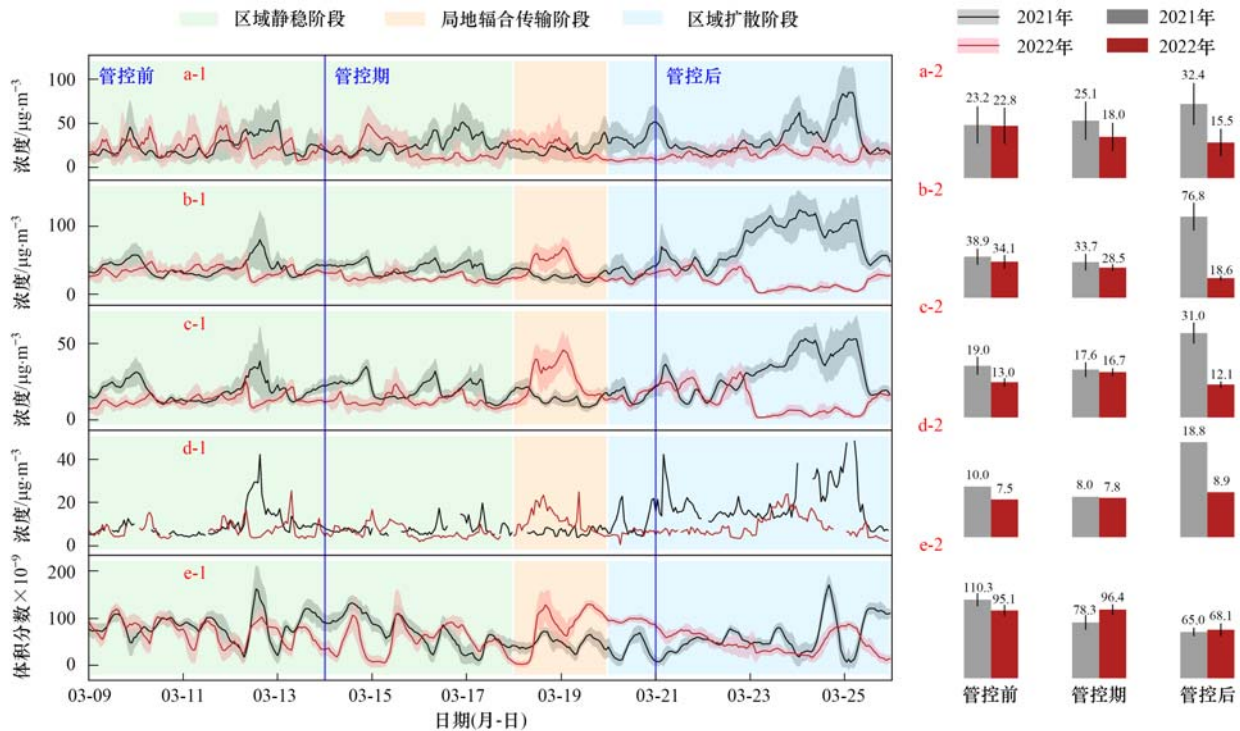
Fig. 3 Time series of meteorological variables in Shenzhen during March 9 to 25, 2022

图 6 基于深圳市高精度一街一站监测网络数据,显示全市管控期(3 月 14 ~ 17 日)对比管控前(3 月 9 ~ 13 日)深圳市不同街道在污染物浓度的相对变化,其表明深圳市不同街道在管控期内,NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>和 PM<sub>2.5</sub>浓度的相对变化较为一致。与管控前相比,有 11 个观测点 NO<sub>2</sub> 浓度增加 5% 以上,但其余大部分站点 NO<sub>2</sub> 浓度均显著下降。与管控前相比,有 11 个观测点 O<sub>3</sub> 浓度增加 5% 以上,7 个观测点 O<sub>3</sub> 浓度增加幅度不明显,其余 56 个观测点浓度降低 -5% 以上。深圳市南部、东南部 O<sub>3</sub> 浓度降低较显著,中部、北部 O<sub>3</sub> 浓度降低较不显著或浓度增加。

### 2.2.2 深圳全市管控期空气质量与去年同期比较

2022 年 3 月非管控期间与 2021 年同期比较,除明显的传输以外,NO<sub>2</sub> 等污染物地面浓度都具有较稳定的日内变化,并具有交通源典型的早晚高峰。2022 年管控期间内,NO<sub>2</sub> 日内变化明显减弱(图 5),且质量浓度平均值比 2021 年同期下降( $-7.1 \pm 7.1$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。2022 年管控期与 2021 年同期相

比, $\rho(\text{PM}_{2.5})$  小幅降低( $-0.9 \pm 2.4$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , $\rho(\text{PM}_{10})$  小幅降低( $-5.2 \pm 5.3$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;管控期颗粒物浓度下降不明显主要是由于 2022 年 3 月的 18 日和 19 日的区域污染传输抵消了部分局地排放减少的作用。若除去 3 月的 18 日和 19 日的区域传输事件,管控期内 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 浓度与 2021 年同期相比分别显著降低( $-6.0 \pm 2.4$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和( $-12 \pm 6.2$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。与 2021 年同期相比,2022 年 3 月 9 ~ 25 日整体 $\varphi(\text{TVOC})$ 降低 $3.8 \times 10^{-9}$ ;其中,管控期间 $\varphi(\text{TVOC})$ 比 2021 年同期小幅下降 $0.2 \times 10^{-9}$ 。管控期间 $\rho(\text{O}_3)$ 比 2021 年同期增加( $18 \pm 14$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。由于管控期 TVOC 体积分数变化不大,NO<sub>2</sub> 浓度显著降低,O<sub>3</sub> 浓度增加可能是因为 NO<sub>x</sub> 滴定作用的减弱。2022 年全市管控结束后,NO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 质量浓度和 TVOC 体积分数均显著低于去年同期,主要是由 2022 年管控后有利于污染物扩散和移除的天气形势导致。对比 2021 年和 2022 年的 3 月 21 ~ 25 日, $\rho(\text{NO}_2)$  平均值降低( $-17 \pm 11$ )



a ~ e 分别表示 NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、O<sub>3</sub> 和 TVOC, 1 为浓度逐时序列, 2 为浓度平均值的同期对比; 红色 (线和柱) 表示 2022 年, 黑色 (线和柱) 表示 2021 年, 蓝色线表示管控日期, 阴影区域表示 3 个不同气象阶段; a-2 ~ e-2 柱子高度和数值表示对应年 3 月 9 ~ 25 日浓度平均值 (NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub>, 单位 μg·m<sup>-3</sup>) 和 TVOC 体积分数 (单位 10<sup>-9</sup>), a-1 ~ e-1 的红色、黑色阴影和 a-2 ~ e-2 黑色实线表示不同站点污染物浓度标准差

图 4 2022 年与 2021 年 3 月 9 ~ 25 日深圳市国控站点 NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、O<sub>3</sub> 浓度逐时序列和莲花山站 TVOC 体积分数逐时序列, 及全市管控前、管控中、管控后污染物浓度平均值对比情况

Fig. 4 Time series of NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and O<sub>3</sub> measured at surface sites in Shenzhen and TVOC from the Lianhuashan station from March 9<sup>th</sup> to 25<sup>th</sup> of the years 2021 and 2022 and the comparison of Shenzhen mean pollutant concentrations before, during, and after the COVID lockdown

μg·m<sup>-3</sup>,  $\rho$  (PM<sub>2.5</sub>) 平均值降低 ( $-19 \pm 3.1$ ) μg·m<sup>-3</sup>,  $\rho$  (PM<sub>10</sub>) 平均值降低 ( $-58 \pm 12$ ) μg·m<sup>-3</sup>,  $\varphi$  (TVOC) 平均值增加  $9.9 \times 10^{-9}$ .

### 2.2.3 深圳市边界层内污染物浓度变化

图 7 显示深圳市石岩铁塔 2022 年 3 月 9 ~ 25 日间不同阶段 NO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度在边界层内垂直分布。城市近地面氮氧化物、颗粒物浓度与局地排放关系较大, 而铁塔高层颗粒物浓度更多受到周边地区传输的影响。当铁塔高层浓度高于近地面时, 可能存在较大的区域传输。在区域静稳阶段 (3 月 9 ~ 17 日) 和区域扩散阶段 (3 月 20 ~ 25 日), 边界层内污染物浓度垂直分布基本一致, NO<sub>2</sub> 浓度峰值在夜间主要在 110 m 左右, 白天在 110 ~ 210 m 之间; PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 浓度的边界层内峰值在夜间位于 110 m 以下, 白天位于 210 m 左右, 表明该阶段的 NO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 污染主要源于局地排放, 与前述地面站点所见的早晚高峰特征一致。3 月 18 日夜间至 19 日上午, 边界层下部内颗粒物浓度明显较其他日期升高, 但氮氧化物没有明显变化, 部分时段 325 m 高度处  $\rho$  (PM<sub>2.5</sub>) 平均值比 60 m 处高  $38 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

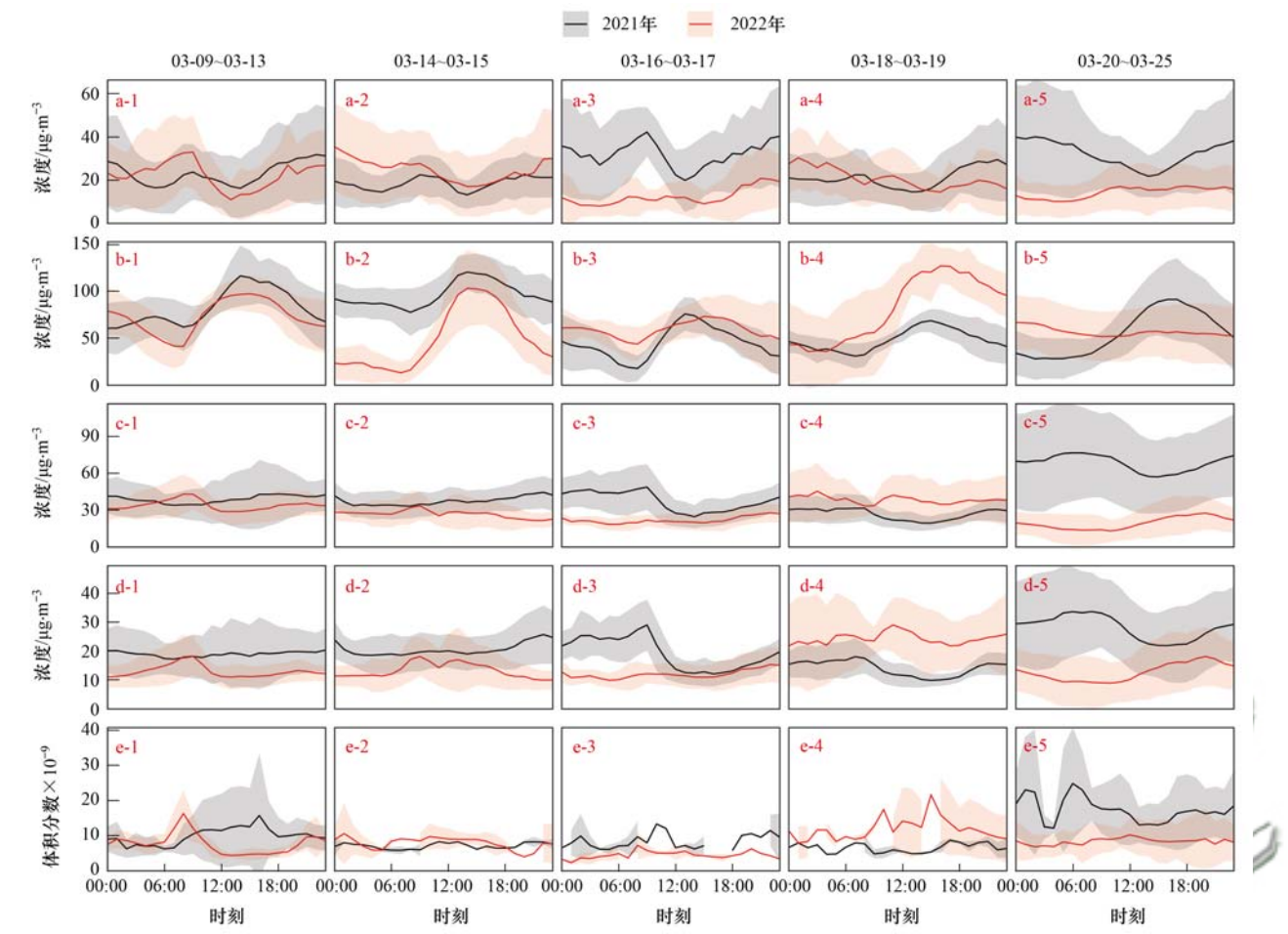
(184%),  $\rho$  (PM<sub>10</sub>) 平均值比 60 m 处高  $11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (31%), 表明 3 月 18 日夜间至 19 日上午深圳市边界层内颗粒物受区域传输影响显著, 结合当日区域气象观测结果, 可知该期间深圳市受华东大气颗粒物污染气团传输的影响。

### 2.3 定量评估深圳市疫情管控前后污染物浓度变化

#### 2.3.1 疫情管控前后深圳市与周边城市污染物浓度比较

前述分析显示, 深圳市 2022 年管控期间污染物浓度变化不仅受局地排放变化影响, 也受区域天气形势逐日变化影响; 简单地对比管控前后浓度差异, 不能定量反映局地人为排放变化对空气质量的贡献。因此, 本节使用 3 月 9 ~ 13 日的空气质量表示管控前的空气质量, 用 3 月 14 ~ 17 日的空气质量表示管控期间的空气质量, 并通过对比深圳市与周边城市污染物浓度关系, 表征排除区域天气形势影响后, 深圳市管控期间空气质量的变化。其中, 东莞市 3 月 14 ~ 20 日也执行了较为宽松的管控措施。

本研究计算管控前后深圳市与周边城市污染物浓度的比值差异。相对于周边城市  $k$  (包括广东省惠



a ~ d 分别表示深圳市国控站点  $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  浓度, e 表示莲花山站点 TVOC 体积分数, 1 ~ 5 分别表示 3 月 9 ~ 25 日不同阶段; 红色线表示 2022 年不同阶段污染物浓度和体积分数, 黑色线表示 2021 年同期污染物浓度或体积分数, 阴影表示不同站点与日期的污染物浓度或体积分数的标准差

图 5 2022 年 3 月 9 ~ 25 日与 2021 年同期不同阶段深圳市国控站点和莲花山站点污染物浓度日内变化  
Fig. 5 Diurnal cycles of air pollutant concentrations at surface sites in Shenzhen and Lianhuashan station (TVOC) during March 9<sup>th</sup> to 25<sup>th</sup> of the years 2021 and 2022

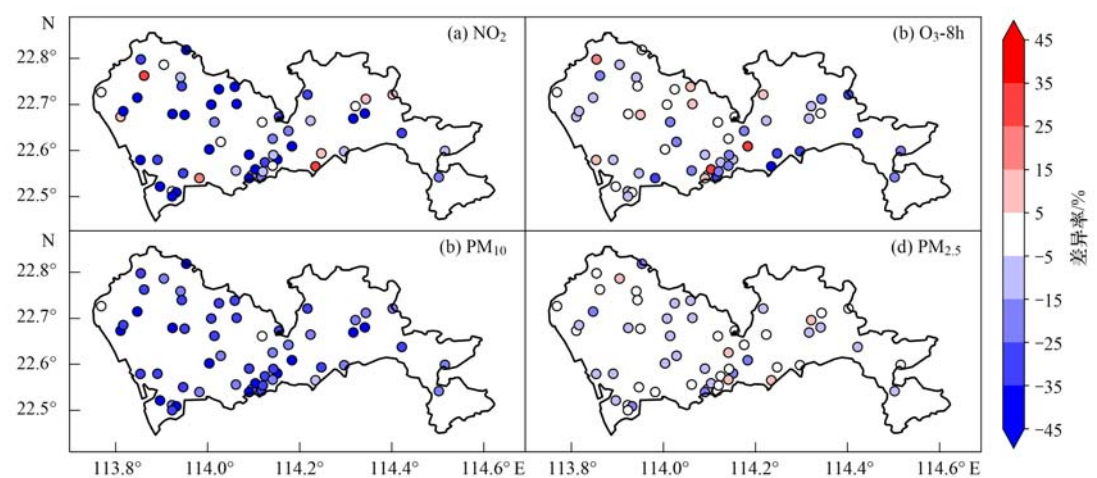


图 6 深圳市“一街一站”监测站点实测污染物浓度在管控期(2022 年 3 月 14 ~ 17 日)相对管控前(2022 年 3 月 9 ~ 13 日)的差异率  
Fig. 6 Percent changes in surface pollutant concentrations observed by the “one site per block” stations of Shenzhen for the period March 14<sup>th</sup> to 17<sup>th</sup>, 2022 relative to the period before the lockdown (March 9<sup>th</sup> to 13<sup>th</sup>, 2022)

州市、东莞市、广州市、中山市、珠海市、佛山市、肇庆市和江门市), 深圳市全市疫情管控期内与管  
控期外大气污染物浓度变化百分比  $P(k)$  计算方  
法为:

$$P(k) = \left[ \frac{\overline{R(k)}_{\text{管控期内}}}{\overline{R(k)}_{\text{管控期外}}} - 1 \right] \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $\overline{R(k)}$  为管控期内或管控期外深圳市污染物浓度与周边城市  $k$  对应污染物浓度比值。

$P(k)$  的物理意义是通过天气形势类似的观测点之间的污染物浓度比例变化,表示不同观测点人为排放的相对差异. 污染物浓度由天气形势和局地排放两个因素决定. 在不同地点的天气形势一致,深圳地区人为排放没有变化的情况下,深圳市污染物浓度与其他城市的相对比值应保持不变.  $P(k)$  反映深圳市疫情管控期间局地排放变化时,需要满足以下条件:①对于参与比较的观测点,天气形势随时间的变化较为一致. ②除深圳市外其他参与比较的观测点在深圳市疫情管控期内外的人为排放不变. 表 2 显示了区域静稳阶段(3 月 9 ~ 17 日)深圳市与珠

三角周边城市各气象要素(2 m 温度、2 m 相对湿度

表 2 深圳市与珠三角周边城市区域静稳阶段 6 h  
平均气象要素相关性

Table 2 Relationship of 6-hourly mean meteorological variables in Shenzhen and neighboring PRD cities during regional stagnation period

城市	深圳市与周边城市 6 h 平均气象要素的相关系数		
	2 m 温度	2 m 相对湿度	边界层高度
东莞	0.98	0.93	0.95
惠州	0.99	0.93	0.96
广州	0.97	0.87	0.94
中山	0.99	0.89	0.98
珠海	0.96	0.92	0.71
佛山	0.96	0.79	0.93
肇庆	0.95	0.75	0.89
江门	0.98	0.82	0.95
平均(排除东莞)	0.97 ± 0.01	0.85 ± 0.06	0.91 ± 0.08

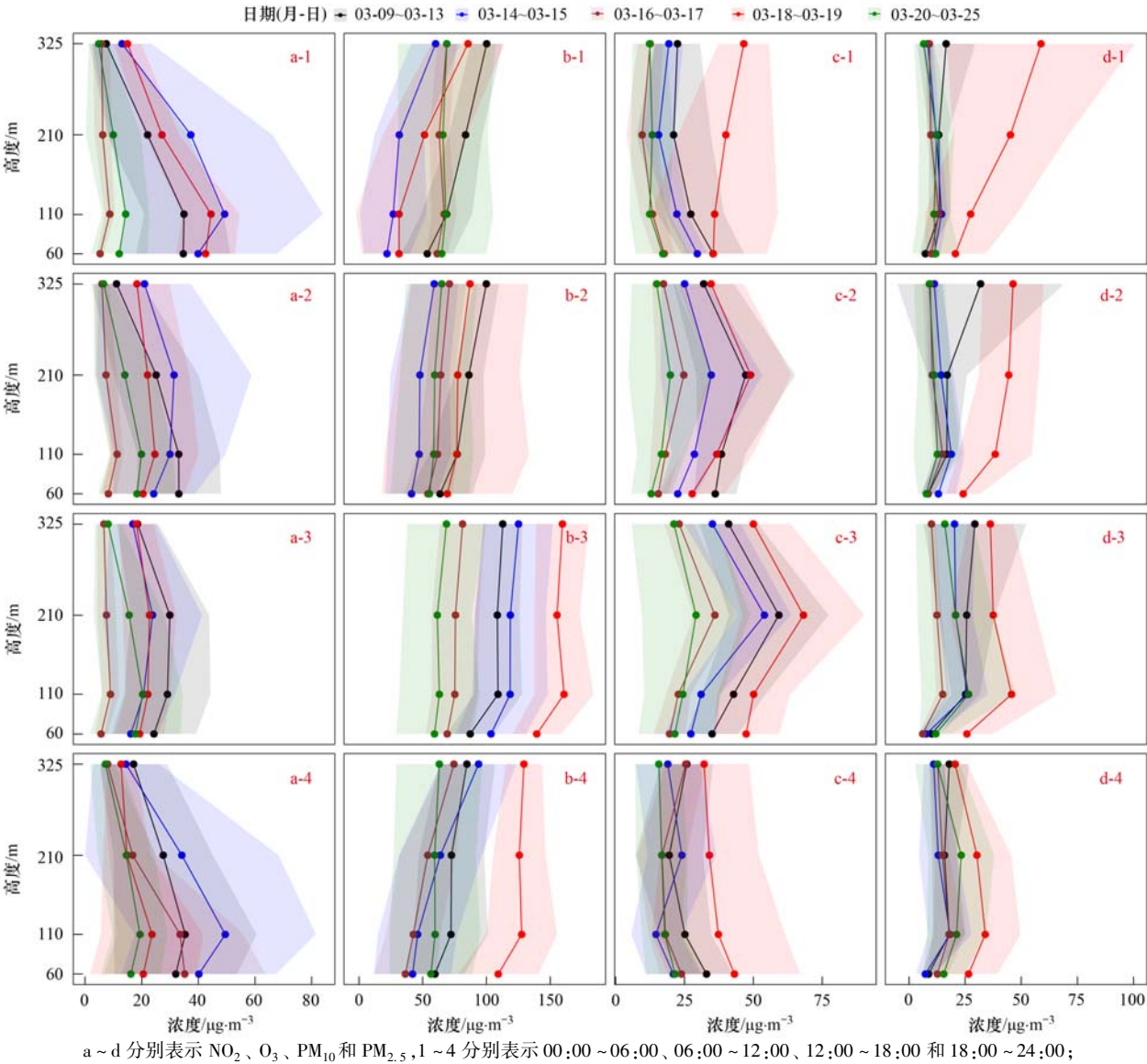


图 7 深圳市石岩气象环保梯度观测塔在 2022 年 3 月 9 ~ 25 日不同时段内污染物的垂直廓线

Fig. 7 Vertical profiles of pollutant concentrations at the Shenzhen Shiyang meteorological gradient observation tower during March 9<sup>th</sup> to 25<sup>th</sup>, 2022

和边界层高度)6 h 平均值的相关系数. 在区域静稳阶段,基本气象要素的相关系数均大于 0.7,除东莞市外各城市各气象要素平均相关系数均大于 0.85,表明参与比较的观测点天气形势的变化比较一致.

表 3 显示管控期深圳市相对于周边城市的空气污染物浓度比值与管控前相比的百分比变化,即公式(1)中的  $P(k)$ . 对于  $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$ ,除东莞市以外,深圳市的  $P(k)$  都为负值. 平均而言,由于深

圳市疫情管控期居民活动、交通流量和生产经营活动的减少,深圳市管控期相对管控前  $\text{NO}_2$  浓度减少  $(-26 \pm 9.5)\%$ ,可吸入颗粒物  $\text{PM}_{10}$  浓度减少  $(-28 \pm 6.4)\%$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度减少  $(-20 \pm 8.2)\%$ ;  $\text{O}_3$  日最大 8 h 浓度降低  $(-1.0 \pm 6.5)\%$  但不显著. 东莞市距离深圳市较近,且在同一时期进行了略微宽松的管控,故管控前后东莞市与深圳市空气污染物浓度比值的差别较小.

表 3 与珠三角周边城市相比,深圳市疫情管控期污染物浓度变化率<sup>1)</sup>/ $\%$   
Table 3 Changes in Shenzhen pollutant concentrations during COVID lockdown, compared to the pollutant concentrations in neighboring PRD cities/ $\%$

城市	$\text{NO}_2$	$\text{PM}_{10}$	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{O}_3$ 日最大 8 h
东莞	-5.7	-11	-10	-0.74
惠州	-25	-17	-11	-4.4
广州	-30	-32	-21	5.7
中山	-30	-27	-15	-11
珠海	-4.8	-21	-9.1	10
佛山	-34	-37	-35	0.46
肇庆	-23	-32	-24	-0.34
江门	-35	-29	-22	-5.0
平均(排除东莞)	$-26 \pm 9.5$	$-28 \pm 6.4$	$-20 \pm 8.2$	$-1.0 \pm 6.5$

1) 数值表示深圳市相对于周边城市污染物浓度的  $P(k)$

2.3.2 基于 WRF-GC 模拟的深圳市疫情减排效果验证

基于 2.3.1 节结果,本研究基于 WRF-GC 模型,在 3 月 9~17 日期间分别开展未减排,以及管控期间深圳市和东莞市  $\text{NO}_x$  减排 26%、 $\text{PM}_{2.5}$  减排 20% 的敏感性模拟,对由管控导致的深圳市污染物浓度变化进行验证. 图 8 显示深圳市及其周边城市  $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  逐小时浓度和  $\text{O}_3$  日最大 8 h 浓度平均值(MDA8)的观测和模拟的结果. WRF-GC 模型在研究时段内较好地模拟了深圳市及其周边城市污染物的逐日变化. 管控期前,深圳市及其周边城市模拟  $\text{NO}_2$  和  $\text{PM}_{2.5}$  小时浓度和  $\text{O}_3$  MDA8 与观测的平均偏差均小于  $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

当模式不考虑管控期内排放变化时,在深圳市管控期  $\text{NO}_2$  和  $\text{PM}_{2.5}$  模拟与观测相比显著高估;与管控前相比,模拟正偏差显著增大. 管控期内深圳市  $\text{NO}_2$  小时模拟偏差为  $(9.0 \pm 9.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (模拟比观测高估 48%),比管控前高估多  $9.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  小时模拟偏差为  $(1.5 \pm 8.0) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (模拟比观测高估 12%),比管控前高估多  $2.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 但在深圳周边城市,管控期内  $\text{NO}_2$  小时模拟偏差与管控前无显著差异( $P > 0.05$ ), $\text{PM}_{2.5}$  小时模拟偏差比管控前低  $2.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

当模式考虑管控期内排放变化时,管控期内深圳市  $\text{NO}_2$  和  $\text{PM}_{2.5}$  小时模拟偏差显著下降至  $(3.2 \pm$

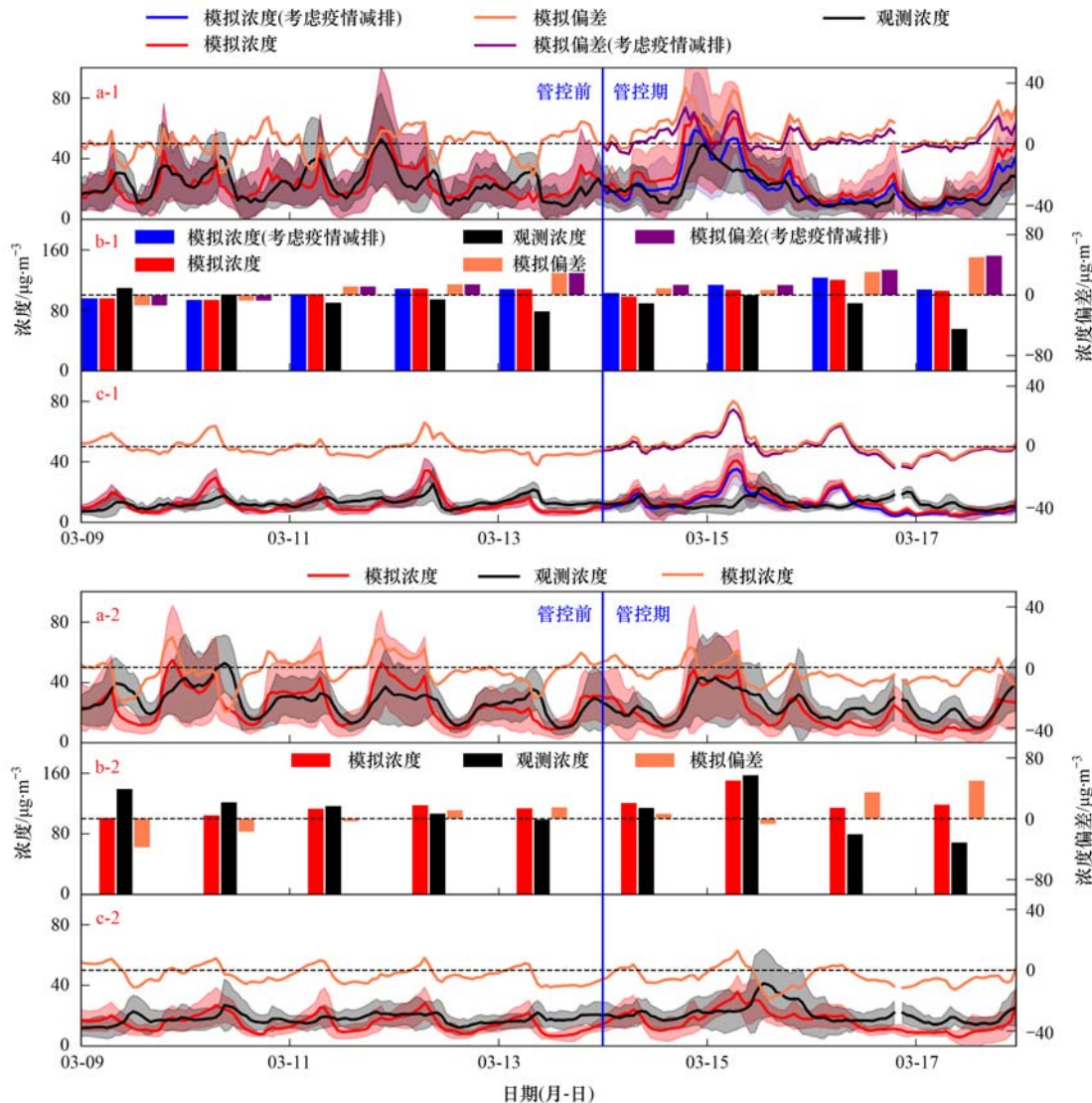
$7.0) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $(-0.3 \pm 7.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 在深圳市及周边城市,对管控期前和管控期内  $\text{O}_3$  MDA8 模拟偏差进行  $t$  检验,均未发现显著差异( $P > 0.05$ ). 上述分析证明,疫情管控期间深圳市  $\text{NO}_x$  和  $\text{PM}_{2.5}$  排放显著降低. 2.3.1 节提出基于周边城市大气污染情况定量评估疫情管控期间深圳市空气质量变化的方法具有有效性.

2.4 深圳市管控期臭氧光化学的敏感性分析

臭氧光化学生成的敏感性,可以通过卫星观测的对流层  $\text{NO}_2$  和甲醛柱浓度比值(formaldehyde- $\text{NO}_2$  ratio, FNR)表征<sup>[15~17]</sup>. 对华南春季而言,当 FNR 值大于 4.2 则臭氧光化学处于  $\text{NO}_x$  控制区,当 FNR 值小于 2.3 则处于 VOC 控制区,在 2.3~4.2 范围内则处于混合区<sup>[27~29,48]</sup>. 图 9 显示 2022 年 3 月 TROPOMI 卫星观测珠三角中心区 FNR 值. 深圳市和珠三角中心区属于 VOC 控制区,珠三角外围的广东省大部分处在混合区. 这与人研究的结果类似<sup>[15,19]</sup>,解释了深圳市管控期  $\text{NO}_x$  浓度显著下降时,臭氧浓度没有随之显著下降的原因.

3 讨论

本文通过分析深圳市 2022 年 3 月因疫情管控,造成人为活动排放降低对该市空气质量的影响,填补了城市短期减排对空气质量影响在华南春季案例研究的空白. 本研究详细分析了深圳市疫情管控期的天气形势,介绍了一种排除气象因素影响的方法,



a~c 分别表示  $\text{NO}_2$  小时浓度、 $\text{O}_3$  MDA8 和  $\text{PM}_{2.5}$  小时浓度和观测-模拟偏差的时间序列,1 为深圳市各项目浓度平均值,2 为珠三角周边城市各项目浓度平均值;红色(线和柱)表示模拟浓度,黑色(线和柱)表示观测浓度,橘色表示模拟-观测偏差;1 中蓝色和紫色(线和柱)分别表示考虑深圳市疫情减排后的模拟浓度和模拟-观测偏差;左侧纵轴表示模拟和观测浓度值,右侧纵轴表示模拟-观测浓度偏差值;蓝色线标记管控日期,对应颜色阴影表示不同站点污染物浓度标准差。模式结果在观测站点位置取值

图 8 深圳市及其周边城市  $\text{NO}_2$  小时浓度、 $\text{O}_3$  MDA8 和  $\text{PM}_{2.5}$  小时浓度观测值、模拟值及模拟偏差的时间序列

Fig. 8 Time series of observed and simulated hourly  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$  MDA8, and hourly  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations, as well as the simulation biases, in Shenzhen (top panel) and its neighbor cities (bottom panel)

定量分析了本地排放变化对空气质量变化的贡献,结论与我国已有短期应急减排评估的研究类似<sup>[1,3,5,12,20,21]</sup>,都发现了颗粒物浓度显著下降.另一方面,华南地区由于植被覆盖率高,植物 VOC 排放较大,且深圳市  $\text{NO}_x$  排放相对我国其他超大型城市较低,因此春季臭氧光化学处于 VOC 控制区,使得减排  $\text{NO}_x$  对改善臭氧污染的效果较差,甚至具有反效果.

前人研究集中探讨了 2020 年 1~3 月大范围疫情管控事件的空气质量效应<sup>[15~18,49~56]</sup>. 2020 年初,疫情管控造成我国不同地区  $\text{NO}_2$  浓度下降(−14%~−70%,中位数 −32%), $\text{PM}_{2.5}$  浓度下降(−4.8%

~−60%,中位数 27%), $\text{PM}_{10}$  下降(−24%~−64%,中位数 −36%), $\text{O}_3$  浓度变化 −28%~77%(中位数 −16%). 不同地区一次污染物的下降程度不同,与地理位置、气象影响、管控时间的不同有关. 2020 年疫情管控期间, $\text{O}_3$  在华中、华北地区有所增加<sup>[16,49~55]</sup>,珠三角有所降低<sup>[17,56]</sup>,此地区性差异主要由臭氧对前体物变化的敏感性不同导致. 2022 年 3 月深圳市疫情管控导致的一次性污染物浓度下降幅度较小,主要由于减排的时间短且空间范围小,周边城市未同步减排,且深圳市受到天气形势和区域传输的影响,一次性大气污染物浓度下降幅度较小. 这表示与城市尺度短期减排相比,区域尺度协同减

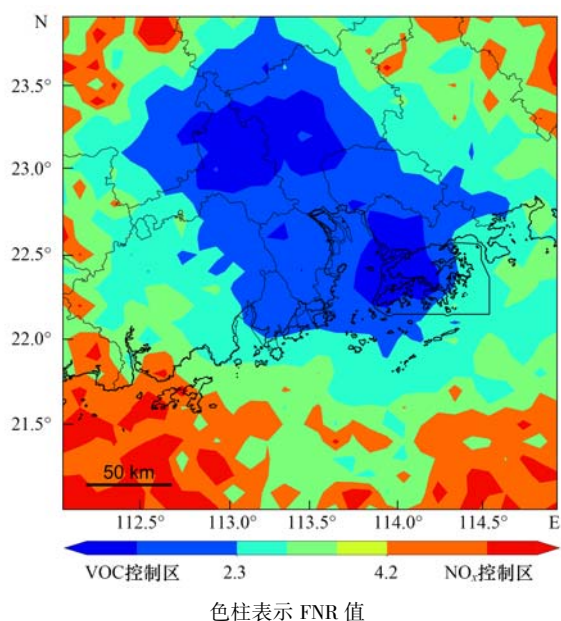


图9 2022年3月TROPOMI卫星观测珠三角及周边地区月平均FNR值分布

Fig. 9 Monthly mean FNR distribution over the PRD region in March 2022, based on TROPOMI satellite observations

排更利于应对短时间内城市空气质量改善的要求。

短期减排对改善不同类型污染的效果不同,这对我国未来的能源转型也有所启示。在应对气候变化,改善空气质量的趋势下,我国正在全面推进能源转型。其中,机动车大范围由内燃机发动转为电动将大幅减少 $\text{NO}_x$ 的机动车排放<sup>[24]</sup>。考虑到臭氧及其前体物的非线性关系,应当在不同季节按照不同的VOC/ $\text{NO}_x$ 比例进行减排,才能有效控制臭氧污染<sup>[7,23]</sup>。对于面临产业结构和能源转型的城市地区,要及时意识到转型期不同污染物排放比例的变化,并随之进行减排政策上的相应调整。

#### 4 结论

(1)在排除天气形势影响的情况下,与2022年3月非管控期和2021年同期相比,深圳市2022年新冠疫情全市管控期间(3月14~20日), $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{PM}_{10}$ 浓度和日内变化幅度显著减小,反映居民活动和交通流量减少,但臭氧浓度相对其他污染物的变化较少。

(2)基于深圳市和周边城市污染物浓度的比较,在2022年3月深圳管控期间受局地减排影响,深圳市 $\text{NO}_2$ 浓度下降( $-26 \pm 9.5\%$ ), $\text{PM}_{10}$ 浓度减少( $-28 \pm 6.4\%$ ), $\text{PM}_{2.5}$ 浓度减少( $-20 \pm 8.2\%$ ), $\text{O}_3$ 浓度无显著变化( $-1.0 \pm 6.5\%$ )。

(3)WRF-GC较好地模拟了深圳市及周边地区疫情管控前的空气质量。模拟结果显示,不考虑疫情管控减排时,深圳市 $\text{NO}_2$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟结果与观测

相比显著高估, $\text{O}_3$ 模拟与观测结果无显著差异。按照2.3.1节结果减排后, $\text{NO}_2$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟偏差接近于0,验证了定量评估疫情管控期间深圳市空气质量变化方法的有效性。

(4)深圳市管控期间臭氧浓度未显著下降,主要原因是春季珠三角臭氧处于VOC控制区,臭氧浓度和 $\text{NO}_x$ 浓度存在化学过程导致的负相关。

#### 参考文献:

- [1] 胡婧,程水源,苏福庆.北京奥运会及残奥会期间 $\text{PM}_{10}$ 质量浓度演变特征及成因[J].环境科学研究,2009,22(12):1395-1402.  
Hu J, Cheng S Y, Su F Q. Evolution characteristics and causes of  $\text{PM}_{10}$  mass concentration in Beijing during the Olympic Games and Paralympic Games Period[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(12): 1395-1402.
- [2] 吴其重,王自发,李丽娜,等.北京奥运会空气质量保障方案京津冀地区措施评估[J].气候与环境研究,2010,15(5):662-671.  
Wu Q Z, Wang Z F, Li L N, et al. Assessment on the effectiveness of the air quality assurance program in Beijing-Tianjin-Hebei area during the Beijing Olympic Games period[J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(5): 662-671.
- [3] 陈敏,马雷鸣,魏海萍,等.气象条件对上海世博会期间空气质量影响[J].应用气象学报,2013,24(2):140-150.  
Chen M, Ma L M, Wei H P, et al. Weather impacts on air quality of the world expo in Shanghai[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2013, 24(2): 140-150.
- [4] 卢怡.基于卫星观测约束的长三角典型活动空气质量保障方案下氮氧化物的减排效果研究[D].南京:南京大学,2020.
- [5] 李文涛,高庆先,刘俊蓉,等.APEC期间北京空气质量改善对比分析[J].环境科学,2015,36(12):4340-4347.  
Li W T, Gao Q X, Liu J R, et al. Comparative analysis on the improvement of air quality in Beijing during APEC[J]. Environmental Science, 2015, 36(12): 4340-4347.
- [6] 程念亮,李云婷,张大伟,等.2014年APEC期间北京市空气质量改善分析[J].环境科学,2016,37(1):66-73.  
Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, et al. Improvement of air quality during APEC in Beijing in 2014[J]. Environmental Science, 2016, 37(1): 66-73.
- [7] Liu Y S, Zhou Y, Lu J X. Exploring the relationship between air pollution and meteorological conditions in China under environmental governance[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1), doi: 10.1038/s41598-020-71338-7.
- [8] Lu X, Zhang L, Chen Y F, et al. Exploring 2016-2017 surface ozone pollution over China: source contributions and meteorological influences[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(12): 8339-8361.
- [9] 步巧利,余乐福,陈辰.广州2014—2019年气象条件对 $\text{O}_3$ 污染影响的定量评估[J].干旱气象,2022,40(2):266-274.  
Bu Q L, Yu L F, Chen C. Quantitative assessment of influence of meteorological conditions on ozone pollution in Guangzhou during 2014-2019[J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(2): 266-274.
- [10] 武文琪,张凯山.区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估[J].环境科学,2021,42(2):523-533.  
Wu W Q, Zhang K S. Contributions of emissions reduction and regional meteorological conditions to air quality improvement[J].

- Environmental Science, 2021, **42**(2): 523-533.
- [11] Xian T, Li Z Q, Wei J. Changes in air pollution following the COVID-19 epidemic in northern China: the role of meteorology [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, **9**, doi: 10.3389/fenvs.2021.654651.
- [12] Xiao Q Y, Zheng Y X, Geng G N, *et al.* Separating emission and meteorological contributions to long-term PM<sub>2.5</sub> trends over eastern China during 2000-2018 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(12): 9475-9496.
- [13] 岳岩裕, 沈龙娇, 周悦, 等. 武汉市军运会期间空气质量特征及气象条件分析[J]. *气象*, 2022, **48**(1): 96-106.  
Yue YY, Shen L J, Zhou Y, *et al.* Analysis on the characteristics of air quality and meteorological conditions during the 7th CISM Military World Games [J]. *Meteorological Monthly*, 2022, **48**(1): 96-106.
- [14] 洪莹莹, 陈辰, 保鸿燕, 等. 珠三角西南部春季臭氧来源与敏感性分析[J]. *生态环境学报*, 2021, **30**(5): 984-994.  
Hong YY, Chen C, Bao H Y, *et al.* Sources and sensitivity analysis of ozone in spring over the southwestern part of Pearl River Delta region [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(5): 984-994.
- [15] Zhang R X, Zhang Y Z, Lin H P, *et al.* NO<sub>x</sub> emission reduction and recovery during COVID-19 in East China [J]. *Atmosphere*, 2020, **11**(4), doi: 10.3390/atmos11040433.
- [16] 旷雅琼, 邹忠, 张秀英, 等. 长三角地区大气污染物对新冠肺炎封城的时空响应特征[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(4): 1165-1172.  
Kuang Y Q, Zou Z, Zhang X Y, *et al.* Spatial-temporal responses of atmospheric pollutants to the COVID-19 lockdown across the Yangtze River Delta region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(4): 1165-1172.
- [17] 朱一凡, 郑博扬, 杨楚怡, 等. 新冠疫情减排期间广东省空气质量响应及其驱动力分析[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2021, **57**(6): 1032-1041.  
Zhu Y F, Zheng B Y, Yang C Y, *et al.* Air quality changes and the driving factors in Guangdong Province during the COVID-19 pandemic [J]. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences)*, 2021, **57**(6): 1032-1041.
- [18] Xing J, Li S W, Jiang Y Q, *et al.* Quantifying the emission changes and associated air quality impacts during the COVID-19 pandemic on the North China Plain: a response modeling study [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(22): 14347-14359.
- [19] 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.
- [20] Ren J, Xie S D. Diagnosing ozone-NO<sub>x</sub>-VOC sensitivity and revealing causes of ozone increases in China based on 2013-2021 satellite retrievals [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, doi: 10.5194/acp-2022-347.
- [21] Shen H Z, Sun Z, Chen Y L, *et al.* Novel method for ozone isopleth construction and diagnosis for the ozone control strategy of Chinese cities [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(23): 15625-15636.
- [22] Wang N, Lyu X, Deng X J, *et al.* Aggravating O<sub>3</sub> pollution due to NO<sub>x</sub> emission control in eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **677**: 732-744.
- [23] Wei W, Wang X F, Wang X Q, *et al.* Attenuated sensitivity of ozone to precursors in Beijing-Tianjin-Hebei region with the continuous NO<sub>x</sub> reduction within 2014-2018 [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **813**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152589.
- [24] 沈劲, 黄晓波, 汪宇, 等. 广东省臭氧污染特征及其来源解析研究[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(12): 4449-4457.  
Shen J, Huang X B, Wang Y, *et al.* Study on ozone pollution characteristics and source apportionment in Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(12): 4449-4457.
- [25] National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, NOAA *et al.* NCEP GDAS/FNL 0.25 degree global tropospheric analyses and forecast grids [DB/OL]. Colorado, USA: Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. 2015 [2023-03-24]. doi: 0.5065/D65Q4T4Z.
- [26] van Geffen J, Boersma K F, Eskes H, *et al.* S5P TROPOMI NO<sub>2</sub> slant column retrieval: method, stability, uncertainties and comparisons with OMI [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, **13**(3): 1315-1335.
- [27] Wang W N, van der A R, Ding J Y, *et al.* Spatial and temporal changes of the ozone sensitivity in China based on satellite and ground-based observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(9): 7253-7269.
- [28] Du X H, Tang W, Cheng M M, *et al.* Modeling of spatial and temporal variations of ozone-NO<sub>x</sub>-VOC sensitivity based on photochemical indicators in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, **114**: 454-464.
- [29] Jin X M, Holloway T. Spatial and temporal variability of ozone sensitivity over China observed from the Ozone Monitoring Instrument [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, **120**(14): 7229-7246.
- [30] Feng X, Lin H P, Fu T M, *et al.* WRF-GC (v2.0): online two-way coupling of WRF (v3.9.1.1) and GEOS-Chem (v12.7.2) for modeling regional atmospheric chemistry-meteorology interactions [J]. *Geoscientific Model Development*, 2021, **14**(6): 3741-3768.
- [31] Lin H P, Feng X, Fu T M, *et al.* WRF-GC (v1.0): online coupling of WRF (v3.9.1.1) and GEOS-Chem (v12.2.1) for regional atmospheric chemistry modeling-Part 1: description of the one-way model [J]. *Geoscientific Model Development*, 2020, **13**(7): 3241-3265.
- [32] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, *et al.* A description of the advanced research WRF version 3 (No. NCAR/TN-475 + STR) [R]. Boulder: University Corporation for Atmospheric Research, 2008.
- [33] Bey I, Jacob D J, Yantosca R M, *et al.* Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: model description and evaluation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(D19): 23073-23095.
- [34] Bates K H, Jacob D J. A new model mechanism for atmospheric oxidation of isoprene: global effects on oxidants, nitrogen oxides, organic products, and secondary organic aerosol [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(14): 9613-9640.
- [35] Wang Y H, Jacob D J, Logan J A. Global simulation of tropospheric O<sub>3</sub>-NO<sub>x</sub>-hydrocarbon chemistry: 1. model formulation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(D9): 10713-10725.
- [36] Emmons L K, Walters S, Hess P G, *et al.* Description and evaluation of the model for ozone and related chemical tracers, version 4 (MOZART-4) [J]. *Geoscientific Model Development*, 2010, **3**(1): 43-67.
- [37] Zheng B, Tong D, Li M, *et al.* Trends in China's anthropogenic

- emissions since 2010 as the consequence of clean air actions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(19): 14095-14111.
- [38] Huang Z J, Zhong Z M, Sha Q G, *et al.* An updated model-ready emission inventory for Guangdong Province by incorporating big data and mapping onto multiple chemical mechanisms[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **769**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144535.
- [39] Guenther A B, Jiang X, Heald C L, *et al.* The model of emissions of gases and aerosols from nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions [J]. *Geoscientific Model Development*, 2012, **5**(6): 1471-1492.
- [40] Morrison H, Pinto J O. Mesoscale modeling of springtime arctic mixed-phase stratiform clouds using a new two-moment bulk microphysics scheme[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, **62**(10): 3683-3704.
- [41] Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, *et al.* Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**(D13), doi: 10.1029/2008JD009944.
- [42] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, *et al.* Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(D14): 16663-16682.
- [43] Jiménez P A, Dudhia J, González-Rouco J F, *et al.* A revised scheme for the WRF surface layer formulation [J]. *Monthly Weather Review*, 2012, **140**(3), doi: 10.1175/MWR-D-11-00056.1.
- [44] Chen F, Mitchell K, Schaake J, *et al.* Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, **101**(D3): 7251-7268.
- [45] Mellor G L, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [J]. *Reviews of Geophysics*, 1982, **20**(4): 851-875.
- [46] Nakanishi M, Niino H. Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2009, **87**(5): 895-912.
- [47] Tiedtke M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models [J]. *Monthly Weather Review*, 1989, **117**(8): 1779-1800.
- [48] Peng Y P, Chen K S, Lai C H, *et al.* Concentrations of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and HNO<sub>3</sub> and O<sub>3</sub>-VOC-NO<sub>x</sub> sensitivity in ambient air in southern Taiwan [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(35): 6741-6751.
- [49] 曹琦, 宋渐石, 邹凌云, 等. 新冠肺炎疫情期间石家庄市空气质量变化特征[J]. *环境与职业医学*, 2021, **38**(5): 494-499.
- Cao Q, Song J S, Zou L Y, *et al.* Air quality changes in Shijiazhuang during COVID-19 outbreak [J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2021, **38**(5): 494-499.
- [50] 吴力波, 任飞州, 徐少丹. 新冠肺炎疫情防控一级响应应对城市空气污染物减排的影响[J]. *环境经济研究*, 2020, **5**(3): 1-20.
- Wu L B, Ren F Z, Xu S D. Impact of first-level response to COVID-19 on the reduction of urban air pollutants in China[J]. *Journal of Environmental Economics*, 2020, **5**(3): 1-20.
- [51] 朱媛媛, 汪巍, 高愈霄, 等. 疫情期间“2+26”城市污染减排成效评估[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(2): 505-516.
- Zhu YY, Wang W, Gao Y X, *et al.* Assessment of emission reduction effect in Beijing, Tianjin and surrounding 26 cities from January to March in 2020 during the epidemic of COVID-19[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(2): 505-516.
- [52] 张宸赫, 王东东, 赵天良, 等. 基于 WRF-Chem 和 EMI 指数的新冠肺炎疫情期间沈阳市大气污染物浓度变化原因分析[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(9): 3709-3716.
- Zhang C H, Wang D D, Zhao T L, *et al.* Causes of variation of air pollutant concentration in Shenyang during the COVID-19 epidemic based on WRF-Chem and EMI-index [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(9): 3709-3716.
- [53] 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.
- 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.
- [54] 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]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4650-4659.
- Xu C, Wu S P, Liu Y J, *et al.* Response of air quality to COVID-19 lockdown in Xiamen Bay [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4650-4659.
- [55] 魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 等. 基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4126-4139.
- Wei Y, Xu Q X, Zhao J S, *et al.* Simulation analysis of the impact of COVID-19 pandemic control on air quality in Henan Province based on machine learning algorithm[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4126-4139.
- [56] Wang N, Xu J W, Pei C L, *et al.* Air quality during COVID-19 lockdown in the Yangtze River Delta and the Pearl River Delta: two different responsive mechanisms to emission reductions in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55**(9): 5721-5730.

## CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals .....	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China .....	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory .....	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City .....	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM <sub>2.5</sub> Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin .....	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM <sub>2.5</sub> During the Heating Period in Baoding .....	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM <sub>2.5</sub> Pollution for Nanjing .....	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020 .....	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island .....	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models .....	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM <sub>2.5</sub> as Well as O <sub>3</sub> - <sub>8h</sub> Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020 .....	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022 .....	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province .....	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an .....	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City .....	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin .....	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin .....	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River .....	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing .....	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes .....	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River .....	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City .....	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin .....	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir .....	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light .....	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar .....	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment .....	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar .....	HE Li-wen, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant .....	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis .....	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China .....	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China .....	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models .....	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye .....	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin .....	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain .....	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau .....	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields .....	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community .....	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N <sub>2</sub> O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas .....	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland .....	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield .....	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model .....	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province .....	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou .....	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China .....	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method .....	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics .....	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area .....	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone .....	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City .....	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City .....	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland .....	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials .....	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables .....	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province .....	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning .....	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)