

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期

Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力 李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培(5563)

汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策 王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平(5574)

西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单 高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益(5585)

新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析 陈军辉, 冯小球, 李媛, 王书肖(5594)

基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM_{2.5} 浓度估算 吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪(5602)

《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM_{2.5} 中水溶性无机离子特征 李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思(5616)

洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析 孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(5624)

北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素 曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭(5633)

天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析 王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂(5644)

沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性 杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜(5656)

典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析 葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正(5663)

南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估 张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟(5673)

基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征:以郑州市高新区为例 任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄(5687)

我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响 高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小拴(5698)

VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析 王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿(5713)

山东省 O₃ 时空分布及影响因素分析 张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨(5723)

2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性 钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政(5736)

基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建 郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇(5747)

三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析 张凯, 吴凤平, 成长春(5757)

长江流域总氮排放量预测 丁肇慰, 郑华(5768)

1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征 姚梦雅, 胡敏娟, 陈丁江(5777)

黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布 韩语, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明(5786)

基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源 邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅(5796)

水源水库真核微生物种群结构季相演替特征 张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容(5804)

达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异 李文宝, 郭鑫, 张博亮, 杜蕾, 田雅楠(5814)

尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制 王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞(5826)

武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估 张坤锋, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军(5836)

上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系 徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮(5848)

曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素 李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇(5857)

水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除 赵伟, 范增增, 杨新萍(5865)

木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响 孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报(5876)

黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮 魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英(5884)

玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响 南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒(5896)

饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径 周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉(5905)

污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势 曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高(5912)

阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应 高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕(5921)

典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 李强, 曹莹, 何连生, 王耀锋, 龚成, 何书涵(5930)

我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价 王耀锋, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健(5938)

浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险 王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜霓雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军(5949)

北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探 管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华(5958)

典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价 强瑛, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫(5967)

雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应 周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌(5977)

铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划 朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波(5988)

干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响 黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧(5997)

铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除 王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郜红建, 叶新新(6006)

稻田灌溉河流 CH₄ 和 N₂O 排放特征及影响因素 吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文(6014)

节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房(6025)

有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N₂O 的排放特征及微生物特性 王楷, 史雷, 马龙, 王书停, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年(6038)

不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响 孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖(6047)

氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响 杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧(6058)

化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响 向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明(6067)

浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量 王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛(6078)

《环境科学》第42卷(2021年)总目录 (6091)

《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)

新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析

陈军辉^{1,2}, 冯小琼^{2,3*}, 李媛², 王书肖¹

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 四川省生态环境科学研究院, 成都 610041; 3. 四川省环保科技工程有限责任公司, 成都 610041)

摘要: 基于污染源排放调查、空气质量和组分站观测数据, 利用 WRF/SMOKE/CMAQ 模式系统, 分析 2020 年新冠疫情期间污染源和气象条件变化对空气质量的影响。结果表明: ① 2020 年新冠疫情期间, 四川盆地除 $\rho(\text{O}_3)$ 同比上升外, $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{CO})$ 、 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 均同比下降, 下降幅度为 8%~41%。② 疫情期间成都市 $\text{PM}_{2.5}$ 组分与 2019 年同期相比, $\rho(\text{Cl}^-)$ 、 $\rho(\text{K}^+)$ 、 $\rho(\text{Si})$ 、 $\rho(\text{Al})$ 、 $\rho(\text{Ca})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 的占比均同比下降, 说明疫情期间施工工地、机动车、工业燃煤和生物质燃烧排放减少是 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 下降的主要原因。③ 疫情期间, 工业源 SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 排放量分别同比下降 32%、31%、40%、39% 和 41%; 成都市机动车车流量仅为正常时段的 40.3%, 车速提升 19.7%, NO_x 、VOCs 和 CO 日排放量降幅分别为 44.7%、49.6% 和 38.0%, 污染物的非等比例下降使得机动车排放贡献的大气氧化性进一步增强。④ 2020 年疫情期间四川盆地气象条件同比不利, 使得 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{O}_3)$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 分别上升 2%、4%、23%、6% 和 8%, 扣除气象条件变化影响后, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{SO}_2)$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 分别下降 21%、45%、31% 和 30%, $\rho(\text{O}_3)$ 上升 12%。

关键词: 新冠疫情(COVID-19); 污染排放; 气象影响; 机动车; 四川盆地

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5594-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.202102113

Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak

CHEN Jun-hui^{1,2}, FENG Xiao-qiong^{2,3*}, LI Yuan², WANG Shu-xiao¹

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Sichuan Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610041, China; 3. Sichuan Province Environmental Protection Technology Engineering Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on the pollution emission survey and the observation data of air quality and component stations, the WRF/SMOKE/CMAQ model system was adopted to analyze the impact of pollution sources and changes in meteorological conditions on air quality during the COVID-19 outbreak. The results showed that during the COVID-19 outbreak in 2020, in addition to the year-on-year increase in $\rho(\text{O}_3)$ in the Sichuan Basin, $\rho(\text{SO}_2)$, $\rho(\text{NO}_2)$, $\rho(\text{CO})$, $\rho(\text{PM}_{2.5})$, and $\rho(\text{PM}_{10})$ all decreased year-on-year, with decreases ranging from 8% to 41%. Compared with levels from the same period in 2019, $\rho(\text{Cl}^-)$, $\rho(\text{K}^+)$, $\rho(\text{Si})$, $\rho(\text{Al})$, $\rho(\text{Ca})$, and $\rho(\text{EC})$ in Chengdu decreased year-on-year, indicating that the emission reduction of construction sites, motor vehicles, industrial coal burned, and biomass combustion were the main reasons for the decrease in $\text{PM}_{2.5}$ concentration. During the COVID-19 outbreak, the SO_2 , NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, and VOCs industrial emissions decreased by 32%, 31%, 40%, 39%, and 41%, respectively. The traffic volume of motor vehicles in Chengdu was only 40.3% of that during the normal period, and the speed of traffic increased by 19.7%. The daily emissions of NO_x , VOCs, and CO were reduced by 44.7%, 49.6%, and 38.0%, respectively. The non-equal decrease in pollutants made the atmospheric oxidability contributed by motor vehicle emissions relatively further enhanced. The unfavorable weather conditions in the Sichuan Basin caused $\rho(\text{PM}_{2.5})$, $\rho(\text{NO}_2)$, $\rho(\text{SO}_2)$, $\rho(\text{O}_3)$, and $\rho(\text{PM}_{10})$ to rise by 2%, 4%, 23%, 6%, and 8%, respectively. After deducting the influence of changes in weather conditions, the concentrations of $\rho(\text{PM}_{2.5})$, $\rho(\text{NO}_2)$, $\rho(\text{SO}_2)$, and PM_{10} decreased by 21%, 45%, 31%, and 30%, respectively, and $\rho(\text{O}_3)$ increased by 12%.

Key words: COVID-19; pollutant emissions; weather influence; motor vehicle; Sichuan Basin

2020 年春节前后突发的新型冠状病毒肺炎疫情(新冠疫情, COVID-19)快速发展并在全球蔓延, 四川省自 1 月 24 日开始启动突发公共卫生事件一级应急响应, 对疫情进行管控。由于采取了严格的人员隔离措施, 机动车活动水平急剧下降, 大部分企业生产及商业旅游活动受限, 污染物排放大幅降低, 但火力发电等持续供能设备、钢铁、石化和平板玻璃等生产工序中不可中断的燃烧设备仍在运转。

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进行了研究。Venter 等^[1]的研究根据卫星遥感监测和地面空气质量监测站点监测数据, 对全球 34 个地区新冠疫情期间污染物浓度进行了分析, 结果表明, 在考虑气象条件影响后, 疫情期

间管控措施使得 $\rho(\text{NO}_x)$ 、 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{O}_3)$ 分别降低了 60%、31% 和 4%。文献[2]对西班牙马德里室内空气质量的研究表明, 由于疫情期间缺乏适当的通风并大量使用清洁产品和消毒剂, 室内空气中日均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 增加约 12%, 日均 $\rho(\text{TVOC})$ 增加 37%~559%, 提出了在全部或部分隔离的情况下, 提高室内空气质量的措施。Chen 等^[3]对武汉和全国的研究结果表明, 疫情期间交通源污染物排放下降明显, 住宅取暖和工业排放保持稳定或略有下降, 大部分区

收稿日期: 2021-02-18; 修订日期: 2021-05-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0214006)

作者简介: 陈军辉(1973~), 女, 硕士, 研究员, 主要研究方向为大气污染防治, E-mail: 9503062@qq.com

* 通信作者, E-mail: 475269341@qq.com

域空气质量改善显著. Nichol 等^[4]的研究采用卫星遥感和地面监测数据分析表明, 新冠疫情期间京津冀、东北和华中大部分地区颗粒物浓度均同比上升, $\rho(\text{NO}_2)$ 同比降低, 原因在于 $\rho(\text{NO}_2)$ 的降低导致 $\rho(\text{O}_3)$ 上升, 大气氧化性增强, 二次反应增加, 从而使得 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 上升. 长三角地区^[5,6]、东部地区^[7] 和山东^[8] 等国内多数地区的研究结果均表明, 疫情管控期间, 污染物排放量显著降低, 环境空气中 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 和 $\rho(\text{CO})$ 也有大幅下降, 但部分地区 $\rho(\text{O}_3)$ 有所反弹^[5,6,8,9].

以上研究表明不同地区疫情期间空气质量变化情况有所不同, 且由于空气质量同时受污染排放和气象条件影响^[10-13], 各地区空气质量改善幅度与污染物排放量下降幅度不成正比. 本文以四川盆地为研究对象, 针对其秋冬季高湿和静稳气象条件^[14-16], 采用污染源排放调查、空气质量、组分站观测和空气质量模型模拟等手段, 将疫情期间(2020年1月24日至2月29日)与2019年同期相比, 分析气象条件和污染源变化对空气质量的影响, 以期对空气质量持续改善提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据来源

根据四川省疫情管控情况, 本研究将新冠疫情期间定义为2020年1月24日至2月29日. 研究区域为四川盆地, 位于我国大陆西南腹地, 包括17个地级市, 经济发展区域化明显, 目前已形成三大区域——成都及周边地区(成都市、德阳市、绵阳市、眉山市、资阳市、乐山市、遂宁市、雅安市)、川南地区(自贡市、泸州市、内江市、宜宾市)和川东北地区(广元市、南充市、达州市、广安市、巴中市).

本研究中空气质量数据来源于四川省空气质量监测网络管理平台(<http://www.scnewair.cn:3389>). 气象数据来源于中国国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/site/index.html>). 成都市 $\text{PM}_{2.5}$ 组分数据来自四川省生态环境科学研究院大气环境超级观测站($\text{E}104.07^\circ$, $\text{N}30.63^\circ$), 位于成都市中心城区, 所有监测设备均放置于四川省生态环境科学研究院楼顶, 距离地面约30m. 水溶性离子采用气溶胶 $\text{PM}_{2.5}$ 成分监测系统(瑞士万通 marga-1s), 有机碳和元素碳采用美国 Sunset 在线 OCEC 监测仪(model 4), 重金属在线监测设备为 horiba PX-375.

各城市重点行业产品产量数据来自市生态环境局, 机动车活动水平表征数据来源于成都市2020年1~4月3192个的卡口数据.

1.2 空气质量模拟

1.2.1 模拟方法

空气质量模拟采用 WRF3.7.1/SMOKE3.5/CMAQ5.0.2 模式系统, 其中, WRF 是由美国 NCAR (national Center for Atmospheric Research) 和 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 联合开发的新一代中尺度气象预报模型, 主要为空气质量模拟提供气象场驱动. SMOKE 系统是美国北卡罗莱纳大学开发的大气排放源清单处理系统, 主要对排放源清单数据进行时间分配、空间分配、垂直分配和物种分配等处理, 进而提供满足大气化学传输模型格式需求的排放清单网格化数据, 本研究四川盆地排放源清单数据来自课题组研究成果^[17], 其他区域数据来自清华大学2017年 MEIC 清单(<http://meicmodel.org/>). CMAQ 模型是由 U. S. EPA 国家暴露研究实验室大气建模与分析部在1998年开发的综合空气质量模型, 能够利用气象输入数据和排放源清单输入数据模拟污染物的传输和扩散过程、气相化学过程、液相化学过程和气溶胶化学过程, 本研究使用的 CMAQ 采用 AERO6 气溶胶模拟模块、CB05 气相化学机制和 ACM2 垂直扩散方案. CMAQ 模拟区域采用三层嵌套网格, 第一层模拟区域网格精度为 27 km, 覆盖东亚地区、东南亚部分国家以及西太平洋海域, 第二层模拟区域网格精度为 9 km, 覆盖中国全境, 第三层模拟区域网格精度为 3 km, 覆盖四川盆地, 是本研究的研究区域.

1.2.2 空气质量模拟检验

采用空气质量观测值与模拟值的平均偏差 (mean bias, MB)、平均标准偏差 (normalized mean bias, NMB)、平均标准误差 (normalized mean error, NME) 等统计指标来对模拟结果进行定量评价^[18,19]. 各指标计算方法见文献[18], 四川盆地各指标计算结果如表1所示, 各项指标基本均在模拟结果可接受范围内, 表明模拟结果较好^[18,19].

表1 空气质量观测值与模拟值统计指标

Table 1 Statistical indicators of air quality observations and simulations

污染物	MB	NMB/%	NME/%
$\text{PM}_{2.5}$	4.64	10.41	50.31
PM_{10}	-11.56	-26.71	64.35
NO_2	-12.44	-36.09	77.02
SO_2	-3.96	-29.66	82.44
O_3	20.83	39.23	86.65

2 结果与讨论

2.1 空气质量变化

2020年新冠疫情期间, 四川盆地平均 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{CO})$ 、 $\rho(\text{O}_3)$ 、 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 为:

$6.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $17.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $0.8 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $64.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $51.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $66.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{CO})$ 、 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 同比下降 8%、41%、18%、19% 和 22%, $\rho(\text{O}_3)$ 同比上升 18%. $\rho(\text{NO}_2)$ 大幅下降且降幅明显高于其他污染物, 与疫情期间交通源和工业源 NO_x 排放量大幅度下降有关^[8,20].

2020 年四川盆地内各城市污染物浓度同比变

化如图 1 所示. 宜宾市、泸州市、广安市和内江市等的 $\rho(\text{SO}_2)$ 降幅较大, 同比下降 45%~50%, 与这些城市 SO_2 排放量较高且主要来自于工业燃烧有关^[21]. 各城市 $\rho(\text{NO}_2)$ 均同比下降, 其中成都市、眉山市和遂宁市下降幅度在 50% 以上, 与机动车和工业企业排放相关^[1,8,22]. $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 所有城市均同比下降, 巴中市、乐山市、南充市和宜宾市等下降幅度较大, 与各城市扬尘、工业和机动车等排放, 以及

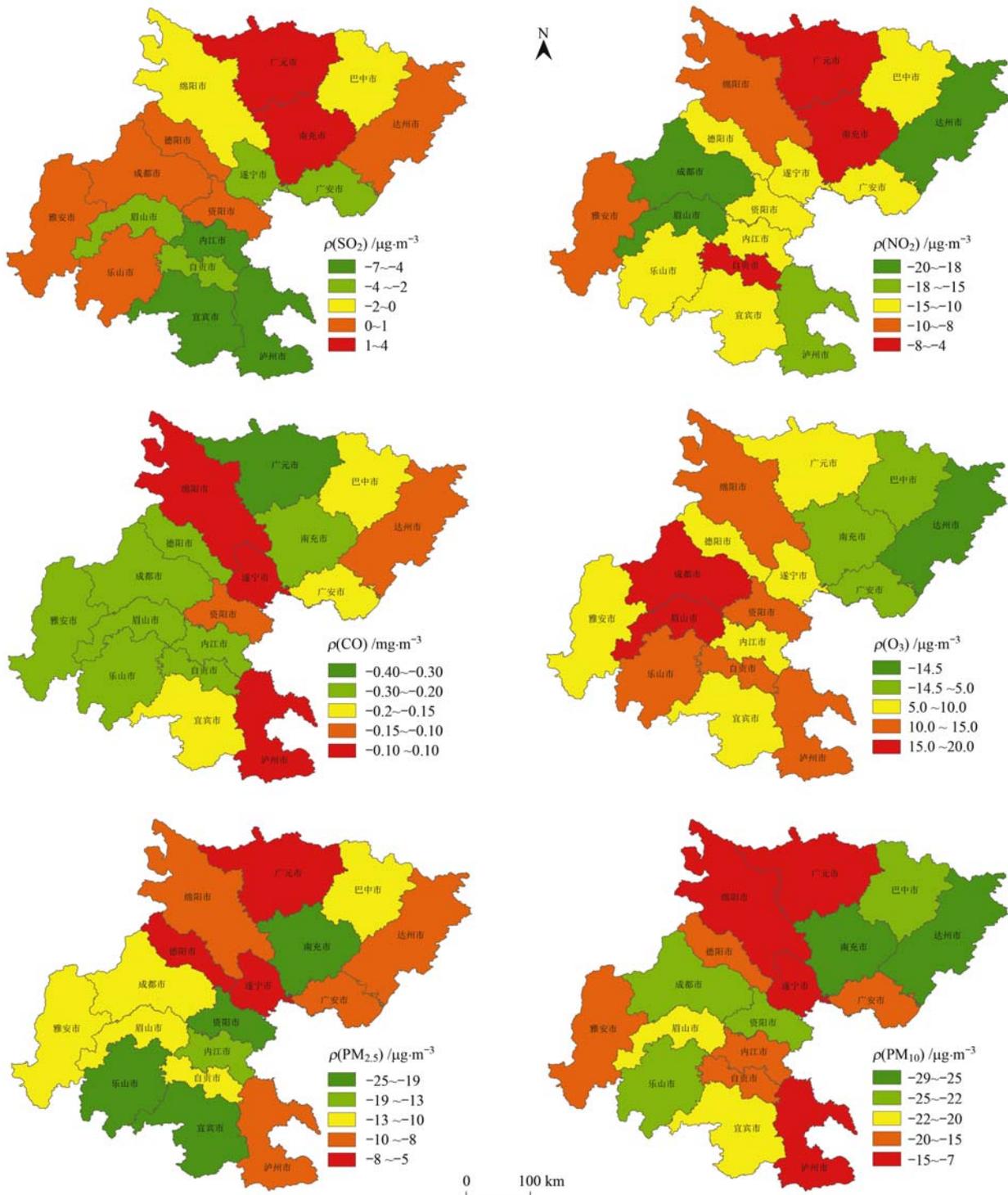


图 1 2020 年新冠疫情期间四川盆地污染物浓度与 2019 年同期差值

Fig. 1 Difference between the concentration of pollutants in the Sichuan Basin during the COVID-19 outbreak in 2020 and the same period in 2019

气象条件密切相关^[8,23]. 除达州市 $\rho(\text{O}_3)$ 同比下降 21% 外, 各城市 $\rho(\text{O}_3)$ 均同比上升, $\rho(\text{O}_3)$ 上升与颗粒物浓度降低和人为排放的 NO_x 大幅度降低导致对处于城区空气站点附近的 O_3 滴定作用减弱有关^[9,24~26]. 达州市 $\rho(\text{O}_3)$ 同比下降可能是由于其 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 下降幅度最低, 且疫情期间 $\rho(\text{NO}_2)$ 较高, 为 $22.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 位于倒数第二位.

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 组分变化

将 2020 年疫情期间 $\text{PM}_{2.5}$ 组分与 2019 年同期对比, 分析疫情期间影响 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的主导因子. 由于 2019 年初四川盆地内 17 市仅成都市有 $\text{PM}_{2.5}$ 组分观测, 因此仅对成都市进行分析. 2020 年疫情期间成都市优良天气和污染过程 $\text{PM}_{2.5}$ 主要组分的浓度和占比与 2019 年比较结果如图 2 和图 3 所示. 与 2019 年同期相比, 除 NH_4^+ 外, 各组分浓度均有不同程度下降, $\rho(\text{Cl}^-)$ 、 $\rho(\text{Al})$ 、 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 、 $\rho(\text{K}^+)$ 和 $\rho(\text{Si})$ 等组分下降均超过 $0.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 从占比来看, OC、 NH_4^+ 和 NO_3^- 均有小幅上升 (2%~3%), Cl^- 、 K^+ 、 Si 、 Al 、 Ca 和 EC 下降 1%~2%. Si 、 Al 和 Ca 等主要来自扬尘源^[27], Cl^- 主要来自生物质燃烧和燃煤源^[28,29], EC 主要来自机动车和生物质燃烧^[28,29], K^+ 主要来自生物质燃烧^[28,29], SO_4^{2-} 主要来自燃煤和 SO_2 二次转化^[29]. 因此, 从组分变化来看, 疫情期间施工工地、机动车、工业燃煤和生物质燃烧排放的减少是 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 下降的主要原因.

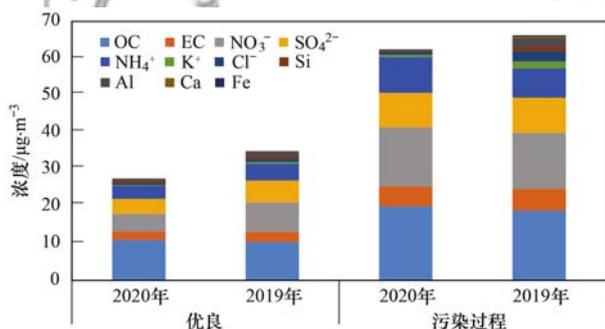


图 2 成都市 2020 年疫情期间不同污染等级 $\text{PM}_{2.5}$ 中主要组分与 2019 年同期对比

Fig. 2 Comparison of the main components of different pollution levels of $\text{PM}_{2.5}$ during the COVID-19 outbreak in Chengdu with the same period in 2019

此外, 2020 年疫情期间, OC/EC 均值为 4.3, 49% 的时间段分布在 4.0~8.5, 19% 的时间段低于 4.0. 2019 年均值为 3.5, 70% 的时间段低于 4.0, 29% 的时间段分布在 4.0~8.5. 相关研究表明, 化石燃料燃烧^[30]、居民燃煤^[31]、生物质燃烧^[32]、餐饮^[28]和锅炉燃烧^[29]的 OC/EC 比值分别为 4.0、8.5~12、10.0~16.3、8.5 和 2.6~13.4, 表明与

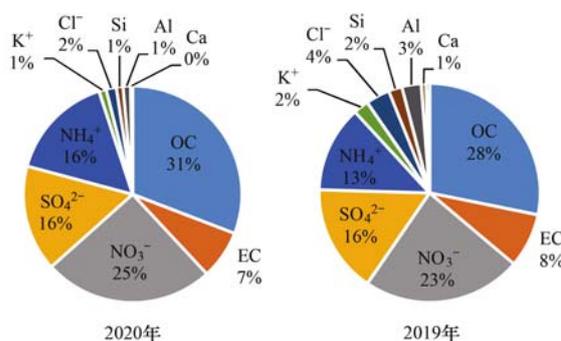


图 3 2020 年疫情期间成都市 $\text{PM}_{2.5}$ 主要组分占比与 2019 年对比

Fig. 3 Comparison of the main components of $\text{PM}_{2.5}$ during the COVID-19 outbreak in Chengdu with the same period in 2019

2019 年同期相比, 2020 年疫情期间机动车和锅炉燃烧等化石燃料燃烧对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 影响降低, 餐饮等排放影响增大.

疫情期间成都市共出现 7 d 轻度污染, 其余均为优良天气. 由优良天气转变为轻度污染过程中, $\rho(\text{NO}_3^-)$ 增幅最快, 轻度污染是优良天气的 2.3 倍, 增长速度是 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的 1.6 倍; 从占比来看, NO_3^- 占比由 12% 上升至 18%, OC 占比由 29% 降低至 22%, NH_4^+ 由 9% 上升至 11%. 2019 年同期成都市共出现 9 d 轻度污染, 由优良天气转变为轻度污染过程中, OC 占比由 27% 下降至 19%, NO_3^- 占比由 20% 上升至 29%, NH_4^+ 占比由 11% 下降至 9%. 对比两年数据发现, 一方面表明成都市污染过程呈现出 NO_3^- 主导特征^[33]; 另一方面, 疫情期间的污染过程, NO_3^- 占比下降明显, NH_4^+ 占比小幅增加, 表明机动车和工业等 NO_x 排放降低, NO_x 二次转化减弱, 而 NH_3 等排放对污染过程的影响增大.

2.3 重点源排放特征变化

2.3.1 机动车

考虑机动车活动水平特征, 同时为避免春节前后特殊时段的影响, 选取 3 个时段分别作为疫情前 (1 月 13~19 日)、疫情中 (2 月 10~16 日) 和疫情后 (4 月 13~19 日) 机动车污染排放的典型时段, 用于分析疫情前后机动车排放情况. 污染物排放量计算方法与潘玉瑾等^[34]的研究结果一致.

成都市绕城区域内机动车疫情前后活动水平及排放变化如图 4 所示. 疫情前后成都市中心城区车流量出现较大的变化, 日车流量从疫情前的 253 万辆 $\cdot\text{d}^{-1}$ 下降至 102 万辆 $\cdot\text{d}^{-1}$, 疫情中的车流量仅为疫情前的 40.3%; 与此同时, 疫情中机动车车速较疫情前有所提升, 疫情前的平均车速为 $32 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 疫情中车速提升至 $38.7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 提升

19.7%。机动车疫情前后污染物排放量变化表明,疫情中 NO_x 日排放量从 $32.6 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 下降至 $18.0 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,降幅为 44.7%,VOCs 日排放量从 $21.4 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 下降至 $10.8 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,降幅为 49.6%; CO 日排放量从 $356.1 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$ 下降至 $220.9 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$,降幅为 38.0%。由

于污染物非等比例下降,CO 降幅较其他污染物更低,因此机动车排放的大气氧化性进一步增强^[35]。4 月开始,成都市基本逐渐恢复正常生产阶段,疫情后期,车流量、车速以及污染物排放量基本上恢复到疫情发生前水平。

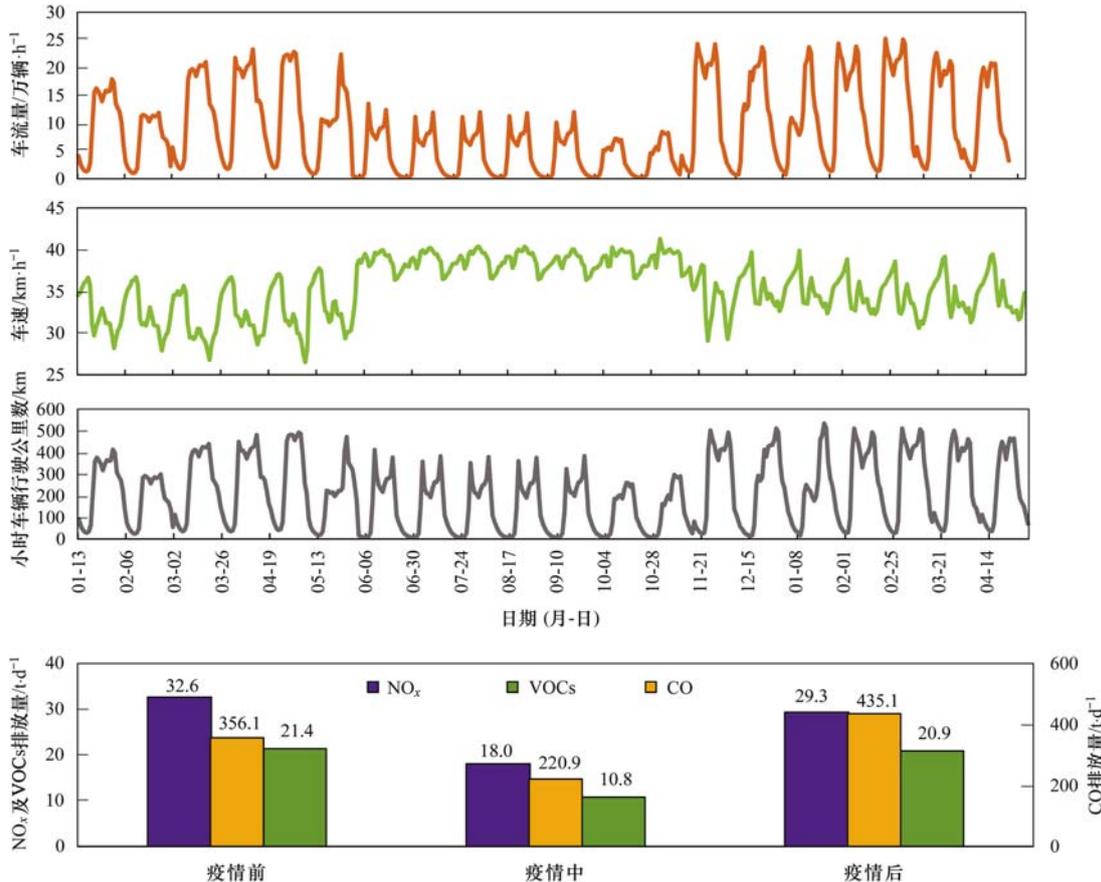


图 4 成都市 2020 年绕城区域内机动车疫情前后活动水平及排放变化

Fig. 4 Changes in activity levels and emissions of motor vehicles before and after the COVID-19 outbreak in the area around Chengdu in 2020

2.3.2 工业企业

本研究获取了成都及周边地区、川南和川东北这三大区域重点城市重点行业疫情期间产品产量以及 2019 年同期产品产量,疫情期间产品产量同比下降幅度如表 2 所示。火电、钢铁、石油加工和炼焦等行业,疫情期间产能下降幅度较小,为 12%~15%。玻璃制造行业中,平板玻璃由于停窑造成经济损失较大,产能只有小幅下降,日用玻璃和玻璃纤维等下降幅度较大,玻璃行业整体下降幅度为 21%。水泥、陶瓷、砖瓦、家具制造、酒、饮料及精制茶制造、木材加工、印刷、印染、食品制造和农副食品加工等行业下降幅度较大,均大于 40%。采用徐晨曦等^[21]的研究方法,认为企业除产品产量外,其他与污染物排放量计算相关参数无变化,测算得到,疫情期间工业源 SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 下降比例分别为 32%、31%、40%、39% 和 41%。VOCs 和 PM_{10} 排放量下降比例较大,与唐倩等^[36]的研究结果基本

一致。

2.4 气象条件变化对空气质量的影响

采用空气质量模拟法,用相同的污染源排放清单,2019 年和 2020 年实际气象条件,模拟计算 2020 年疫情期间气象条件变化对空气质量的影响,用空气质量同比变化减去气象条件影响值,得到扣除气象条件变化影响后空气质量的变化值,结果如表 3 所示。

与 2019 年同期相比,疫情期间气象条件对各污染物均较为不利。在假设污染物排放量不变的情况下,气象条件变化使得四川盆地 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{O}_3)$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 分别上升 1.2、0.8、1.5、4.1 和 $5.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,按比例分别上升 2%、4%、23%、6% 和 8%。

疫情期间,除 $\rho(\text{O}_3)$ 外,扣除气象条件变化影响后,各污染物浓度均显著下降,改善幅度最大的是 NO_2 ,四川盆地平均改善率为 45%,下降 8.0

表 2 2020 年疫情期间重点行业产品产量同比下降幅度¹⁾/%

Table 2 Decline in product output in key industries during the COVID-19 outbreak in 2020/%

行业	乐山市	达州市	宜宾市	泸州市	成都市	城市平均
火电	0	25	25	27	0	15
钢铁	0	25	/	/	/	13
石油加工及炼焦	/	25	/	12	0	12
玻璃	10	25	50	21	0	21
水泥	32	25	50	64	50	44
陶瓷	40	25	/	65	/	43
砖瓦	57	50	45	/	50	50
化学纤维制造	/	25	45	/	45	38
化学原料及化学制品制造	42	25	50	23	43	36
医药制造	30	25	10	/	35	25
有色金属冶炼及压延加工	33	25	50	/	/	36
橡胶及塑料制品	35	25	50	/	45	39
家具制造	46	45	50	/	45	46
酒、饮料及精制茶制造	34	45	50	51	/	45
木材加工	46	45	48	/	43	45
汽车制造	0	/	50	/	50	33
印刷	45	25	48	/	45	41
农副食品加工	30	55	35	/	40	40
食品制造	38	55	40	35	40	44
印染	35	45	50	/	/	43
造纸及纸制品	21	45	40	38	48	38

1)“/”为未获得数据或无该行业,城市平均为获取数据城市的算术平均值

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 德阳市、成都市、绵阳市和遂宁市等改善幅度均大于 50%。扣除气象条件变化影响后,四川盆地 $\rho(\text{SO}_2)$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 平均改善率分别为 31% 和 30%, 分别下降 $2.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $20.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 眉山市、绵阳市、遂宁市和宜宾市等 $\rho(\text{SO}_2)$ 改善幅度均大于 50%, 成都市、德阳市、绵

阳市和达州市等 $\rho(\text{PM}_{10})$ 改善幅度较大,均在 40% 以上。 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 改善幅度为 21%, 低于各一次污染物,与刘厚凤等^[8]的研究结果一致。扣除气象条件变化影响后, $\rho(\text{O}_3)$ 不降反升,成都、绵阳等城市上升幅度较大,这主要与 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{NO}_2)$ 降低有关^[5,37-39]。

表 3 气象条件变化和人为减排对污染物浓度影响/%

Table 3 Impact of changes in meteorological conditions and emissions reduction on pollutant concentrations/%

项目	气象变化影响模拟值					扣除气象条件变化影响后污染物浓度变化值				
	PM _{2.5}	NO ₂	SO ₂	O ₃	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO ₂	SO ₂	O ₃	PM ₁₀
成都市	15	18	10	-6	29	-34	-68	-9	42	-55
德阳市	15	43	56	-13	24	-27	-81	-45	27	-42
乐山市	0	-8	7	13	1	-33	-33	4	17	-27
眉山市	0	-5	35	10	3	-21	-45	-61	20	-29
绵阳市	13	37	63	-12	25	-27	-65	-69	35	-40
遂宁市	0	-3	45	11	6	-14	-51	-67	6	-25
巴中市	-12	-4	11	3	-10	-7	-39	-30	7	-19
达州市	18	8	41	25	20	-31	-53	-36	-46	-48
广安市	9	-21	33	42	10	-25	-22	-78	-33	-30
泸州市	-1	1	2	11	2	-12	-49	-51	21	-16
内江市	9	28	26	0	17	-29	-76	-71	17	-36
宜宾市	-1	9	27	0	4	-29	-53	-78	19	-26
自贡市	0	6	24	4	7	-14	-36	-46	20	-27
四川盆地平均	2	4	23	6	8	-21	-45	-31	12	-30

3 结论

(1)2020 年新冠疫情期间,四川盆地除 $\rho(\text{O}_3)$ 同比上升 18% 外, $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{CO})$ 、

$\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 均明显下降,同比下降幅度为 8%、41%、18%、19% 和 22%。

(2) 与 2019 年同期相比,疫情期间成都市 PM_{2.5}组分中 OC、NH₄⁺ 和 NO₃⁻ 占比上升 2%~3%,

Cl⁻、K⁺、Si、Al、Ca 和 EC 占比下降 1%~2%；污染过程中 NO₃⁻ 占比下降 11%，NH₄⁺ 占比上升 2%，表明疫情期间施工工地、机动车、工业燃煤和生物质燃烧排放减少，且污染过程中 NO_x 二次转化减弱，NH₃ 排放影响增大。

(3) 火电、钢铁、石油加工与炼焦等行业疫情期间产能下降幅度较小，为 12%~15%，水泥、陶瓷、砖瓦、家具制造、酒、饮料及精制茶制造、木材加工、印刷、印染和食品制造等行业下降幅度均大于 40%，据测算，工业源 SO₂、NO_x、PM₁₀、PM_{2.5} 和 VOCs 下降比例分别为 32%、31%、40%、39% 和 41%。

(4) 疫情对成都市机动车活动水平有较大影响，疫情期间的车流量仅为疫情前的 40.3%，车速提升 19.7%，NO_x、VOCs 和 CO 日排放量降幅分别为 44.7%、49.6% 和 38.0%，污染物的非等比例下降使得机动车排放贡献的大气氧化性增强。

(5) 气象条件变化使得四川盆地 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{O}_3)$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 按比例分别上升 2%、4%、23%、6% 和 8%，扣除气象条件变化影响后， $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{SO}_2)$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 按比例分别下降 21%、45%、31% 和 30%， $\rho(\text{O}_3)$ 上升 12%。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] Domínguez-Amarillo S, Fernández-Agüera J, Cesteros-García S, *et al.* Bad air can also kill: residential indoor air quality and pollutant exposure risk during the COVID-19 crisis [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(9), doi: 10.3390/ijerph17197183
- [3] Chen K, Wang M, Huang C H, *et al.* Air pollution reduction and mortality benefit during the COVID-19 outbreak in China [J]. *The Lancet Planetary Health*, 2020, **4**(6): e210-e212.
- [4] Nichol J E, Bilal M, Ali A, *et al.* Air pollution scenario over China during COVID-19[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(13), doi: 10.3390/rs12132100
- [5] Li L, Li Q, Huang L, *et al.* 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[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **732**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139282.
- [6] Lu D B, Mao W L, Zheng L L, *et al.* Ambient PM_{2.5} estimates and variations during COVID-19 pandemic in the Yangtze River Delta using machine learning and big data [J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(8), doi: 10.3390/rs13081423
- [7] 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), doi: 10.3390/atmos11040433
- [8] 刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 等. 2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1215-1227. Liu H F, Xu W, Wei M, *et al.* Impact of pollutant emission reduction on air quality during the COVID-19 pandemic control in early 2020 based on RAMS-CMAQ[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1215-1227.
- [9] Le T H, Wang Y, Liu L, *et al.* Unexpected air pollution with marked emission reductions during the COVID-19 outbreak in China[J]. *Science*, 2020, **369**(6504): 702-706.
- [10] Zhao X J, Zhao P S, Xu J, *et al.* Analysis of a winter regional haze event and its formation mechanism in the North China Plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(11): 5685-5696.
- [11] Song C B, Wu L, Xie Y C, *et al.* Air pollution in China: status and spatiotemporal variations [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **227**: 334-347.
- [12] 皮冬勤, 陈焕盛, 魏巍, 等. 京津冀一次重污染过程的成因和来源[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(5): 1899-1908. Pi D Q, Chen H S, Wei W, *et al.* The causes and sources of a heavy-polluted event in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(5): 1899-1908.
- [13] 张建忠, 李坤玉, 王冠岚, 等. 京津冀 4 次重度污染过程的气象要素分析[J]. *气象与环境科学*, 2016, **39**(1): 19-25. Zhang J Z, Li K Y, Wang G L, *et al.* Meteorological element analysis of four severe pollution processes in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2016, **39**(1): 19-25.
- [14] Wang Q Y, Cao J J, Shen Z X, *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} during dust storms and air pollution events in Chengdu, China[J]. *Particology*, 2013, **11**(1): 70-77.
- [15] Chen Y, Xie S D. Long-term trends and characteristics of visibility in two megacities in Southwest China: Chengdu and Chongqing [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2013, **63**(9): 1058-1069.
- [16] 陈源, 谢绍东, 罗彬. 成都市大气细颗粒物组成和污染特征分析(2012-2013 年) [J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(3): 1021-1031. Chen Y, Xie S D, Luo B. Composition and pollution characteristics of fine particles in Chengdu from 2012 to 2013 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(3): 1021-1031.
- [17] 叶宏, 陈军辉, 孙蜀, 等. 四川省污染防治技术水平与绩效评估(2018)-大气污染防治卷[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2019.
- [18] 赵斌. 细颗粒物化学组成及其对前体物排放响应的数值模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2015. 77-117.
- [19] Wang L T, Jang C, Zhang Y, *et al.* Assessment of air quality benefits from national air pollution control policies in China. Part II: evaluation of air quality predictions and air quality benefits assessment [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(28): 3449-3457.
- [20] Li R, Mei X, Wei L F, *et al.* Study on the contribution of transport to PM_{2.5} in typical regions of China using the regional air quality model RAMS-CMAQ[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **214**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116856.
- [21] 徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 等. 四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4482-4494.
- [22] Xu C X, Chen J H, Li Y, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollution sources based on second pollution source census data in Sichuan Province [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4482-4494.
- [22] 周子航, 邓也, 谭钦文, 等. 四川省人为源大气污染物排放清单及特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5344-5358.

- Zhou Z H, Deng Y, Tan Q W, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in the Sichuan province[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5344-5358.
- [23] 李晓红, 李万伟, 徐东群. 西安市空气质量与气象因素的典型相关分析[J]. *环境卫生学杂志*, 2017, **7**(3): 203-208.
Li X H, Li W W, Xu D Q. Relationship between meteorological factors and air quality in Xi'an city[J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2017, **7**(3): 203-208.
- [24] Bao R, Zhang A C. Does lockdown reduce air pollution? Evidence from 44 cities in northern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **731**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139052.
- [25] Hans B. Air pollution goes down as Europe takes hard measures to combat coronavirus[EB/OL]. <https://www.eea.europa.eu/highlights/air-pollution-goes-down-as>, 2020-11-23.
- [26] Collivignarelli M C, Abbà A, Bertanza G, *et al.* Lockdown for COVID-2019 in Milan; what are the effects on air quality? [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **732**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139280.
- [27] 赵普生. 城市建筑施工及铺装道路扬尘污染评估与防治技术研究[D]. 天津: 南开大学, 2008. 58-89.
- [28] 张丹, 周志恩, 张灿, 等. 重庆市主城区 PM_{2.5} 污染源成份谱的建立[J]. *三峡环境与生态*, 2011, **33**(5): 14-18.
Zhang D, Zhou Z E, Zhang C, *et al.* The PM_{2.5} source profile in the Chongqing urban areas[J]. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 2011, **33**(5): 14-18.
- [29] 冯小琼, 陈军辉, 熊文朋, 等. 四川省典型工业行业 PM_{2.5} 成分谱分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1043-1051.
Feng X Q, Chen J H, Xiong W P, *et al.* Fine particulate matter source profile of typical industries in Sichuan province [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1043-1051.
- [30] Koch D. Transport and direct radiative forcing of carbonaceous and sulfate aerosols in the GISS GCM[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, **106**(D17): 20311-20332.
- [31] Cao J J, Wu F, Chow J C, *et al.* Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **5**(11): 3127-3137.
- [32] Tao J, Zhang L M, Engling G, *et al.* Chemical composition of PM_{2.5} in an urban environment in Chengdu, China; importance of springtime dust storms and biomass burning[J]. *Atmospheric Research*, 2013, **122**: 270-283.
- [33] 冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 等. 成都市冬季 3 次灰霾污染过程特征及成因分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4382-4391.
Feng X Q, Chen J H, Yin H M, *et al.* Characteristics and formation mechanism of three haze pollution processes in Chengdu in winter [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4382-4391.
- [34] 潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 等. 基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3581-3590.
Pan Y J, Li Y, Chen J H, *et al.* Method for high-resolution emission inventory for road vehicles in Chengdu based on traffic flow monitoring data [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3581-3590.
- [35] Lv Z, Wang X T, Deng F Y, *et al.* Source-receptor relationship revealed by the halted traffic and aggravated haze in Beijing during the COVID-19 lockdown [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(24): 15660-15670.
- [36] 唐倩, 郑博, 薛文博, 等. 京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1591-1599.
Tang Q, Zheng B, Xue W B, *et al.* Contributors to air pollutant emission changes in autumn and winter in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1591-1599.
- [37] 刘长焕, 邓雪娇, 朱彬, 等. 近 10 年中国三大经济区太阳总辐射特征及其与 O₃、PM_{2.5} 的关系 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(8): 2820-2829.
Liu C H, Deng X J, Zhu B, *et al.* Characteristics of GSR of China's three major economic regions in the past 10 years and its relationship with O₃ and PM_{2.5} [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(8): 2820-2829.
- [38] 余益军, 孟晓艳, 王振, 等. 京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 106-114.
Yu Y J, Meng X Y, Wang Z, *et al.* Driving Factors of the Significant Increase in Surface Ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, During 2013-2018 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 106-114.
- [39] 姚青, 韩素芹, 张裕芬, 等. 天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1573-1581.
Yao Q, Han S Q, Zhang Y F, *et al.* Effects of VOCs on ozone formation in the Tianjin suburbs in summer [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1573-1581.

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China; Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sizozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)