

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

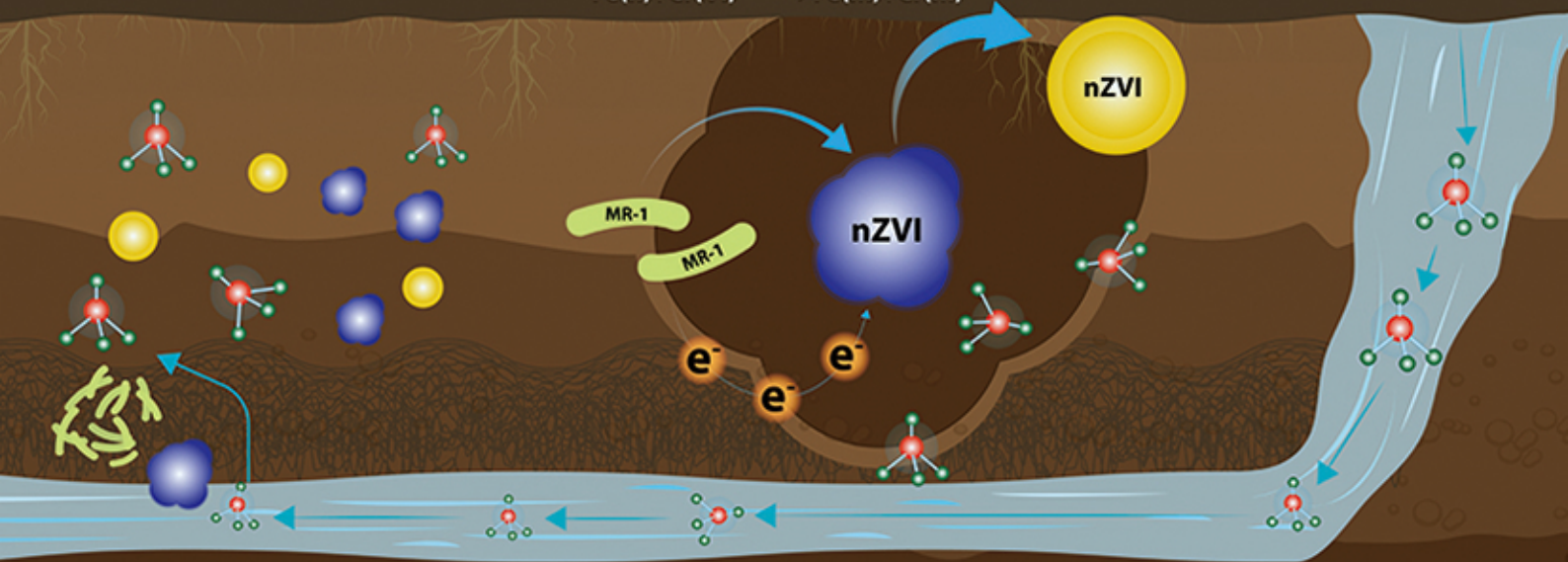
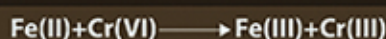
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期
Vol.42 No.9

目次

北京市 2014~2020 年 PM _{2.5} 和 O ₃ 时空分布与健康效应评估	陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)
京津冀地区高分辨率 PM _{2.5} 浓度时空变化模拟与分析	杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)
京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对 PM _{2.5} 污染影响	邵玄逸, 王晓琦, 钟巍盛, 王瑞鹏 (4095)
太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析	王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)
嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析	张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏峰 (4116)
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	魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)
新乡市大气 PM _{2.5} 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险	刘恒嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)
黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化	袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)
天津市 2020 年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源	李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐邈 (4158)
中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素	何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邱彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)
乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究	张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)
珠江三角洲海岸背景区大气 VOCs 污染特征与来源	云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)
永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析	孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)
汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别	程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)
环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估	赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)
柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价	张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)
雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价	师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)
龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价	谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)
硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源	任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)
包头南海湿地磷形态及污染源定量识别	拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)
城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析	李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)
水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析	齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)
锰砂人工湿地对污染物的强化去除	马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)
4 种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果	陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)
输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应	周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)
木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性	孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)
海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用	王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)
纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻 (<i>Scenedesmus obliquus</i>) 生长的拮抗效应及其作用机制	王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)
螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析	武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)
整合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响	廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)
溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响	池玉蕾, 石炬, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)
间歇梯度曝气下缩短 SRT 强化短程 SNEDPR 系统脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)
生物膜系统中部分反硝化实现特性	于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)
厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)
不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)
中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的 Meta 分析	张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)
青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价	杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)
电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价	张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)
改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响	王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)
组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响	周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)
不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响	魏玮, 李平, 郎漫 (4462)
1 株草螺属植物内生菌 R-13 的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响	鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)
不同地区土壤古菌群落对重金属污染响应	李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)
高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征	刘晓华, 魏天兴 (4489)
餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验	邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (4500)
秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系	马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)
电活性微生物激活生物炭/零价铁协同钝化 Cr(VI) 及机制	廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)
降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响	蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)
氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米 N ₂ O 排放的影响	符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)
负载 NH ₄ ⁺ -N 生物炭对土壤 N ₂ O-N 排放和 NH ₃ -N 挥发的影响	马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)
微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响	张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)
1985~2019 年中国全氟辛酸酯基化合物的动态物质流分析	王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)
《环境科学》征订启事 (4201) 《环境科学》征稿简则 (4340) 信息 (4382, 4537, 4565)	

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

魏煜^{1,2}, 徐起翔^{2,3*}, 赵金帅^{1,2}, 张瑞芹^{2,3}

(1. 郑州大学化学学院, 郑州 450001; 2. 郑州大学环境科学研究院, 郑州 450001; 3. 郑州大学生态与环境学院, 郑州 450001)

摘要: 全国各地为了减少新冠疫情对社会和人民生活的影响, 采取了必要的疫情防控措施, 这些措施对空气质量的变化产生了重要的影响, 此外空气质量的变化与气象条件也存在很大的关系. 通过对河南省疫情前(1月1~26日)和疫情管控期(1月27日~2月29日)这两阶段的空气质量分析对比发现, 整个河南省除了 O_3 浓度上升了 69.64% 外, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 CO 和 NO_2 分别降低了 36.89%、34.18%、19.43%、29.85% 和 58.51%; 通过机器学习算法中的长短期记忆型网络 (LSTM) 模拟显示, 气象条件引起污染物浓度的降幅大部分在 15%~30% 之间; 人为排放减少引起的污染物浓度的降幅大部分在 6%~40% 之间. O_3 在疫情期间上升过程中, 气象条件和人为排放两种因素分别占了 34.84% 和 34.81%. 结果表明, 疫情管控期间, 河南省空气质量总体上有所改善, 但是也有重污染发生, 其中 O_3 的浓度对于疫情管控减排的影响不明显, 呈负相关, 需要进一步探索引起臭氧浓度上升的原因, 以此帮助政府合理控制臭氧等前体污染物的减排比例.

关键词: 机器学习; LSTM 算法; 新冠疫情; 减排; 空气质量

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4126-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012288

Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm

WEI Yu^{1,2}, XU Qi-xiang^{2,3*}, ZHAO Jin-shuai^{1,2}, ZHANG Rui-qin^{2,3}

(1. College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Research Institute of Environmental Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To reduce the risks of COVID-19 on society and the health of the general public, necessary prevention and control measures were implemented throughout China in 2020. Consequently, air quality was greatly improved due to lower emissions. However, the improvement of air quality could also be closely related to meteorological conditions. During quarantine (January 27 to February, 2020), reductions were observed in the concentration of all air pollutants in Henan Province ($PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , CO , and NO_2 decreased by 36.89%, 34.18%, 19.43%, 29.85%, and 58.51%, respectively) relative to measurements taken from January 1 to 26, 2020. The only exception was for the concentration of O_3 , which increased by 69.64%. This study evaluates the importance of meteorological conditions in air pollution, through simulation with a long-and-short-term memory network (LSTM) and a machine learning algorithm. Results show that meteorological conditions play a crucial role in air pollutant formation. Given favorable meteorological factors, the concentrations of pollutants could be reduced by 15%-30%, while the reduction due to anthropogenic emission control ranges from 6%-40%. During the epidemic, meteorological conditions and human emissions accounted for 34.84% and 34.81% of the increase in O_3 concentration, respectively. The results show that primary pollutant concentrations are more sensitive to the intensity of anthropogenic emissions. However, secondary pollutants are more dependent on meteorological factors. Furthermore, a nonlinear relationship has been identified between O_3 concentration and to emission intensity. Further investigation into the causes of the rise in O_3 concentration is necessary to gain a greater understanding and better control of particulate matter and O_3 pollution.

Key words: machine learning; long-and-short-term memory network (LSTM); COVID-19; emissions reduction; air quality

2020年初在湖北武汉暴发了新冠肺炎疫情,随后席卷全国.作为与湖北接壤的河南省,在2020年1月26日启动了重大突发公共卫生事件一级响应^[1],全省实施了最为严格的防控措施,这些措施包括了:限制人们的出行^[2,3],这样使得交通旅行大幅度减少;同时工业、建筑和餐饮等行业大规模停摆^[4].由于这些严格防控措施的实施,降低了大气污染的人为源影响,为研究大气污染的人为源和自然源影响程度提供了时机.

有研究表明,大气污染过程主要是由人为排放污染物和气象条件的共同作用影响产生的^[5~7].近期大量国内外专家对新冠疫情的管控措施,以及管控期间的气象条件对空气质量的相互影响做了大量的研究. Zhao等^[8]通过对京津冀地区疫情暴发期间

收稿日期: 2020-12-30; 修订日期: 2021-03-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212400)

作者简介: 魏煜(1984~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气环境污染与防治, E-mail: zzuweiyu@163.com

* 通信作者, E-mail: xuqixiang@zzu.edu.cn

大规模空气污染事件的特征和来源分布进行分析,在疫情管控期间虽然总体上空气质量有所好转,但是不利的气象条件也会影响空气质量变化. Li 等^[4]将 WRF/CAMx 建模系统与监测数据一起应用,研究分析了长江三角洲地区疫情防控期间空气质量变化, SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 等主要污染物都显著降低. 但是,在锁定期间,每天的 $\text{PM}_{2.5}$ 仍在 $15 \sim 79 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,并且 O_3 同时升高了 20.5%. Wang 等^[9]通过 CMAQ 模型对珠江三角洲地区疫情防控 3 个阶段(前、中和后期)的空气质量变化进行模拟分析,比较这 3 个时期的污染物水平,评估由封锁导致的人为排放量减少的影响,结果表明,疫情防控在一段时间内改善了空气污染状况,但是当排放量增加时,在气象条件的共同影响下污染将逐渐恢复. Cole 等^[10]利用机器学习方法分析了疫情防控对武汉市空气质量变化的影响,其研究发现在防控期间, NO_2 的浓度下降了多达 $24 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (比防控前的水平降低了 63%),而 PM_{10} 的浓度下降了类似的量,但持续时间较短. 封锁对 SO_2 或 CO 的浓度没有明显影响. Lovrić 等^[11]利用机器学习算法对疫情管控期间奥地利格拉茨地区的空气质量进行模拟分析,结果表明:疫情管控对 NO_2 和 O_3 浓度的变化有明显影响,同时也证明了机器学习算法是分析大气排放快速变化的事件期间污染变化的一种合适工具.

以上研究表明,由于疫情期间采取了严密的防控措施,导致污染物排放大幅度减少,大部分地区的空气质量比历史同期都有较大地改善,但是空气质量的改善幅度与污染物减排幅度不呈正比,某些污染物如 O_3 反而在某些条件下呈上升趋势. 由于天气

对污染趋势的影响往往是非线性的,且具有时间变化规律,长短期记忆网络(long-and-short-term memory network, LSTM)算法模型可以解决有关时间序列的短期相关性和长期依赖性的问题^[12]. 因此在疫情防控期间人为源减少的情况下,机器学习算法中的 LSTM 模型是分析大气污染变化的合适工具之一. 本研究以河南省为例,分析了疫情管控前(1 月 1~26 日)和管控期(1 月 27 日~2 月 29 日)空气质量的变化,基于机器学习算法中的长短期记忆网络(LSTM),解析了疫情期间影响空气质量浓度的气象条件和人为减排比例,以为改善河南省未来的空气质量和制定减排措施提供一定的技术参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域

河南省位于中国中部,河南省位于北纬 $31^\circ 23' \sim 36^\circ 22'$,东经 $110^\circ 21' \sim 116^\circ 39'$ 之间,东接安徽和山东,北接河北和山西,西连陕西,南临湖北,总面积 16.7 万 km^2 ^[13]. 河南素有“九州腹地、十省通衢”之称,是全国重要的综合交通枢纽和人流物流信息流中心. 河南省内大部分城市,都属于华中地区主要的发展中城市,也是京津冀及周边地区“2+26”城市的主要成员^[14],大部分城市属北温带大陆性季风气候,冬季盛行极地大陆气团,干燥寒冷^[15]. 本文研究区域主要是河南省 18 个省属地市以及其中主要的 3 个重点城市,例如:京津冀及周边地区“2+26”城市中的安阳市、郑州市以及靠近湖北省的信阳市(图 1).

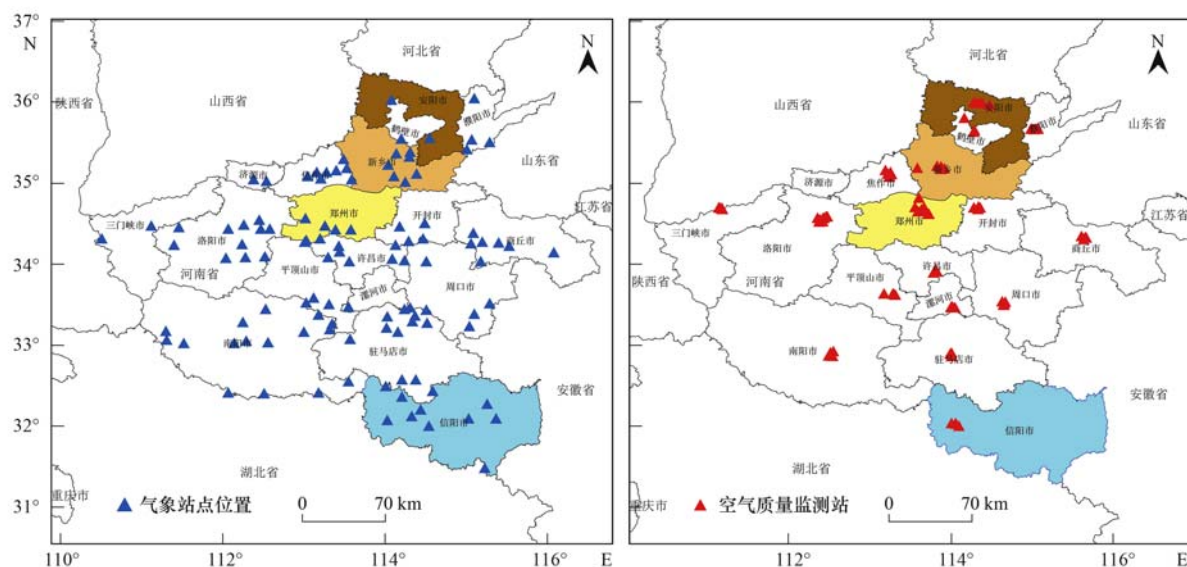


图 1 河南省空气质量和气象监测点位分布

Fig. 1 Air quality and meteorological monitoring stations in Henan Province

1.2 研究数据

大气污染物($\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 、 SO_2 、 NO_2 和 CO) 浓度数据来自于河南省 82 个空气质量自动监测站点历史小时浓度数据,数据下载来源为中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台(<http://106.37.208.233:20035/>); 相同时段的气象数据来自于河南省 116 个气象站点的常规气象观测数据,数据下载来源为中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),数据选取时段为疫情防控前(1 月 1 ~ 26 日)和疫情防控期(1 月 27 日 ~ 2 月 29 日)以及 2019 年历史同期。

1.3 潜在源贡献因子法(WPSCF)

潜在源贡献因子法(potential source contribution

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00 & 3n_{\text{avg}} < n_{ij} \\ 0.70 & 1.5n_{\text{avg}} < n_{ij} \leq 3n_{\text{avg}} \\ 0.40 & n_{\text{avg}} < n_{ij} \leq 1.5n_{\text{avg}} \\ 0.17 & n_{ij} \leq n_{\text{avg}} \end{cases} \rightarrow \text{WPSCF} = W_{ij} \times \text{PSCF} \quad (2)$$

1.4 关联度分析

主要污染物浓度受到许多因素影响,主要影响因素是大气污染因子和气象因子. 对于两个系统之间的因素,其随时间或不同对象而变化的关联性大小的量度,称为关联度^[17]. 在系统发展过程中,若两

$$\xi_i(k) = \frac{\min_{\min} |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_{\max} |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_{\max} |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (3)$$

式中, $\xi_i(k)$ 表示关联系数,设评价对象有 m 个,评价指标有 n 个,参考数列为 $x_0 = \{x_0(k) | k=0,1,2, \dots, n\}$,比较数列为 $x_i = \{x_i(k) | k=0,1,2, \dots, n\}$, $i=0,1,2, \dots, m$, ρ 为分辨系数,范围是(0,1),经常取 0.5^[20]. 式中的 $\min_{\min} |x_0(k) - x_i(k)|$ 表示求两列数据的两级最小差, $\max_{\max} |x_0(k) - x_i(k)|$ 表示求两列数据的两级最大差。

关联度 r 的公式如下:

$$r = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (4)$$

r 越接近 1,说明关联度越好. 本文利用灰色关联分析模型分析气象要素与各污染物浓度之间的相近程度。

本研究选取了 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 、 CO 、温度、湿度、风速、风级、气压、能见度、过去 6 h 降水量和平均总云量作为主要气象和污染物参考因子,模型中主要选取每个因子前一个小时的观测值作为模型输入因子,通过灰色关联分析得出以下结果(图 2)。

从图 2 可以看出,污染物浓度与前 1 h 的污染物残留浓度和气象因子有较强的关联度,每个当前污染物浓度与前 1 h 的污染物浓度和气象因子关联度均大于 0.7,除了平均总云量气象因子外. 因此在

function, PSCF) 是所选研究区域内经过网格的污染轨迹数与经过该网格的所有轨迹数的比值,即每个网格中污染轨迹所占的比例多少,反映了潜在源区的分布. 公式如下:

$$\text{PSCF}_{ij} = m_{ij}/n_{ij} \quad (1)$$

式中, m_{ij} 是经过网格 ij 的污染轨迹数, n_{ij} 是经过网格 ij 的所有轨迹数。

当 n_{ij} 较小时, PSCF 的结果就会偏大,具有很大的不确定性. 为了降低这种不确定性,引入了权重函数 W_{ij} ,当某一网格中的 n_{ij} 小于研究区域每个网格平均轨迹端点数的 3 倍时,就需要 W_{ij} 来降低结果的不确定性^[16]. 权重公式为:

个因素变化的趋势具有一致性,即同步变化程度较高,即可谓二者关联程度较高;反之,则较低. 因此,灰色关联分析方法,是根据因素之间发展趋势的相似或相异程度,亦即“灰色关联度”,作为衡量因素间关联程度的一种方法^[18]. 其公式如下^[19]:

模型选择输入因子时选择了前 1 h 的污染物浓度以及平均温度、湿度、风速、气压、能见度和降水量等 6 种气象因子。

1.5 长短期记忆型网络模型

1.5.1 模型介绍

长短期记忆网络(long-short-term-memory, LSTM)是一种时间循环神经网络,是为了解决一般的 RNN(循环神经网络)存在的长期依赖问题而专门设计出来的, LSTM 在 1997 年首次由 Hochreiter 等提出^[21]. 由于独特的设计结构, LSTM 适合于处理和预测时间序列中间隔和延迟非常长的重要事件,现阶段已经有大量的研究表明 LSTM 适合预测具有时间序列特征的空气质量预测^[12,22,23].

LSTM 网络相比传统 RNN 网络,增加了 Cell 状态参数和遗忘门、输入门和输出门^[24]. 具体计算公式如下:

$$C^t = Z^f \times C^{t-1} + Z^i \times Z \quad (5)$$

$$h^t = Z^o \times \tanh(C^t) \quad (6)$$

$$y^t = \sigma(W^t h^t) \quad (7)$$

式中, C^t 为当时时刻的 Cell 状态,其中 $Z^f \times C^{t-1}$ 为忘记门计算部分,这部分主要是用来控制 Cell 的下一个状态中哪些需要记住,哪些需要忘记; $Z^i \times Z$

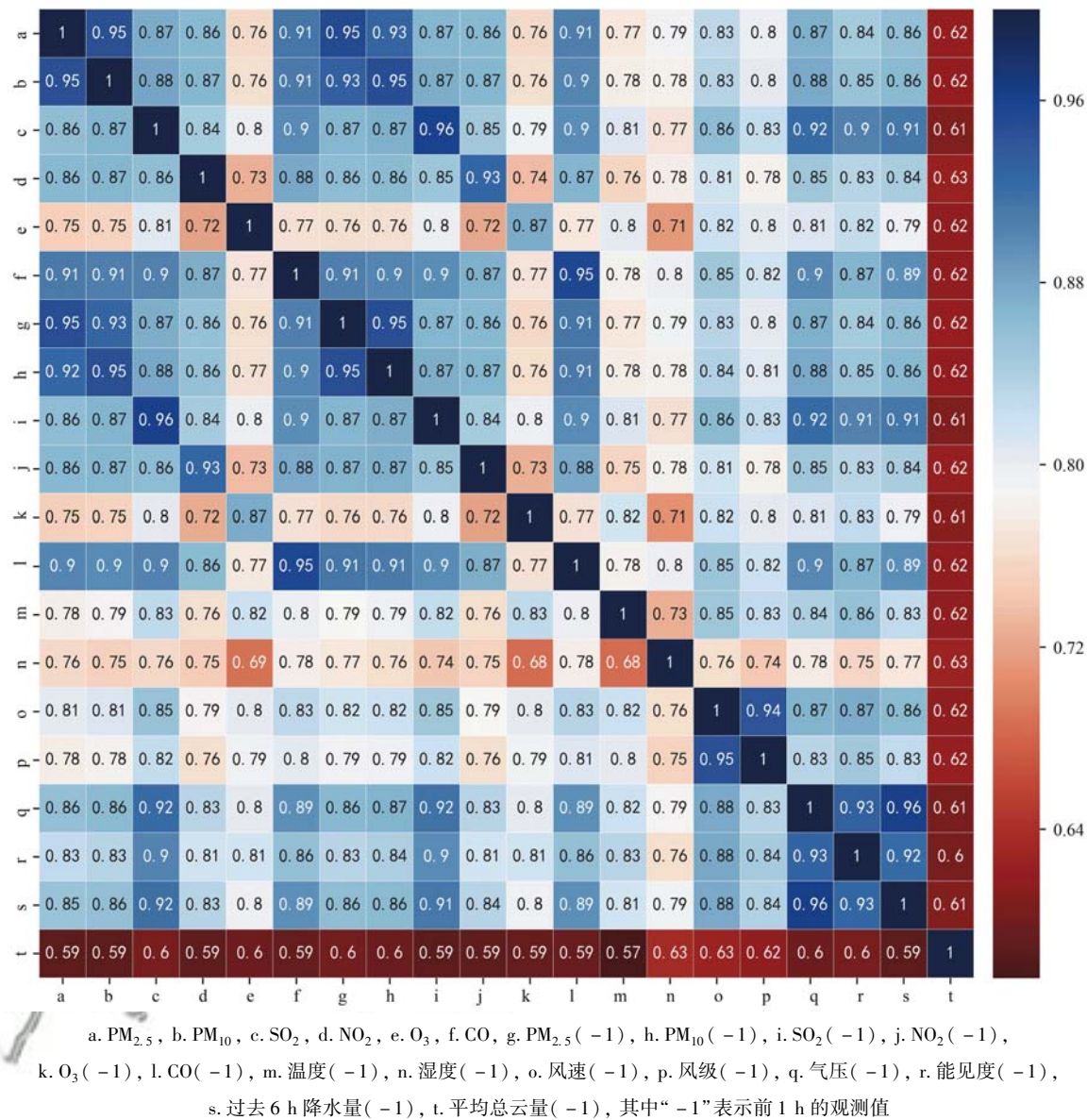


图2 空气污染物与气象要素相关性

Fig. 2 Correlation coefficients between air pollutants and meteorological parameters

为选择性记忆阶段,当前的输入内容由前面计算得到的 Z 表示,而选择的门控信号则是由 Z^i (i 表示information)来进行控制;将上面两步得到的结果相加,即可得到传输给下一个状态的 C' 。

式(5)属于输出门的输出阶段,主要通过 Z^o 进行控制,并对上一阶段得到 C' 用 $\tanh$ 激活函数进行放缩变化,得到一个当前状态的输出。式(6)与普通RNN类似,输出 y' 往往最终也是通过 h' 变化得到。

本文选取的训练与测试的数据时间段是2014~2019年每一年的1月和2月,数据区域范围是河南省18地市的国家和省级监测站的污染物和气象因子的观测值。在处理数据阶段,用平均值处理缺失数据,保证数据的有效性,提高预测精度,同时对其进行归一化处理,范围为(0,1)。本研究中使用2014~2018年每一年的1月和2月的数据进行模型训

练,并用训练的模型模拟2019年1月和2月的污染物浓度值,并与观测值进行比较,修正训练模型参数。

1.5.2 模型构造

研究采用LSTM神经网络实现下1h污染物浓度的预测,模型主要根据前1h的污染物浓度和气象因子,来预测下1h的污染物浓度,这是一个典型的时间序列预测,LSTM神经网络能很好地处理时序数据^[25],具体网络模型的结构如图3。

基于LSTM的预测模型由输入层、隐藏层和输出层组成,其中核心部分是中间的隐藏层,如图3所示,其中设置了1层LSTM隐藏单元,同时设置了25个神经元,通过向前操作,将前1h的信息以记忆流的形态不断向后传递,影响每个新输入数据的处理和每个阶段的输出。输入层的输入数据包含12个

特征(前 1 h 的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 CO 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 、平均温度、湿度、风速、气压、能见度和降水量). 输出层是一个用于预测每个污染物浓度的神经元.

1.6 基于 LSTM 的空气质量模拟结果检验

本研究选取了郑州市的 9 个国控监测站、安阳市的 5 个国控监测站、新乡市的 5 个国控监测站和信阳市的 4 个国控监测站来模拟 2020 年新冠疫情封控前后的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的浓度(图 4). 选取这 4 个城市的原因是,信阳市离疫情暴发地湖北省紧邻,安阳市、新乡市和郑州市是京津冀大气污染传输通道“2+26”城市中污染较重的城市代表. 同时使用 LSTM 算法模拟的优点是可以自由选择需要哪些输入特征来作为预测的影响条件,并且该算法可以保

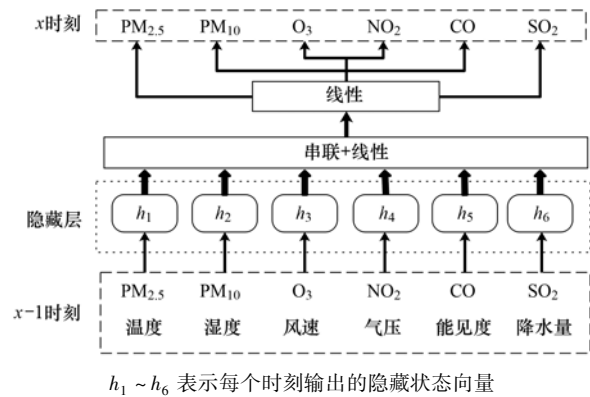


图 3 LSTM 网络模型结构

Fig. 3 Structure diagram of LSTM network model

留时间序列数据中的时间特征变化趋势,计算时间

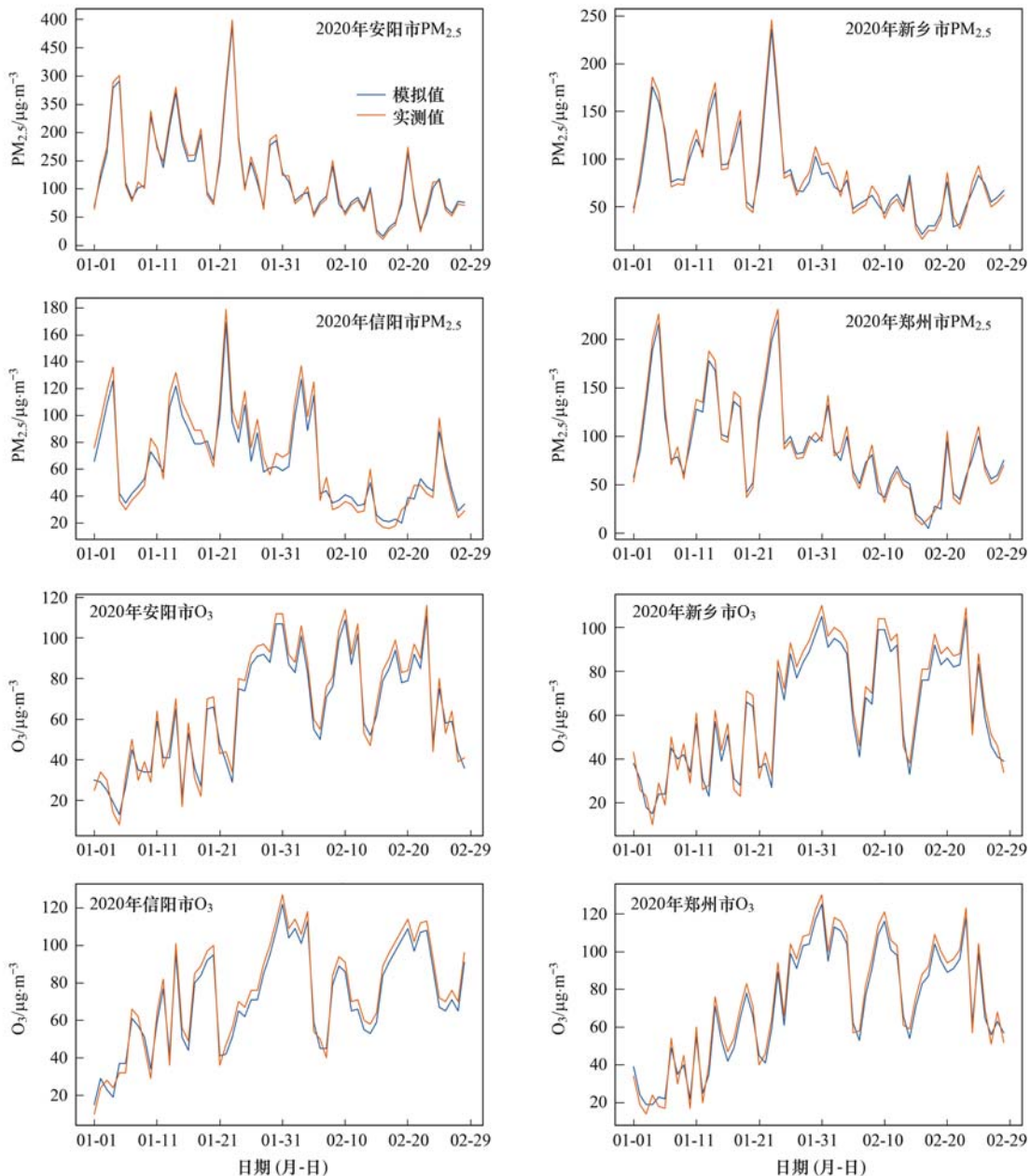


图 4 4 个地市的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 模拟结果检验

Fig. 4 Simulated $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 concentration results for four cities

也比传统数值模式要快得多. 通过调整设置 LSTM 网络参数发现, 当 LSTM 模型网络层数为 3, 神经元数为 50, 并且损失函数使用 MSE, 优化函数为 adam, 训练次数为 100 时, 模拟速度和效果最好, 6 种污染物的拟合评估指标 R^2 值均高于 0.8, 模拟效果如图 4 所示. 从中可知, 4 个城市的 O_3 模拟结果的变化趋势都符合观测值的变化趋势, 其中管控前的模拟结果与观测值比较接近, 管控期的模拟值比观测值略高, 说明模拟值符合没有实施管控措施时空气质量变化趋势. 导致模拟值与观测值有偏差原因可能是 O_3 的模拟可能只考虑了单个站点的排放, 而没有考虑其他原因导致 O_3 浓度的升高, 也没有考虑节假日等因素的情况^[26]. 另外, 4 个城市的 $PM_{2.5}$ 模拟结果的变化趋势也与观测值的变化趋势相符合, 4 个城市的模拟值与观测值较为接近, 但是模拟值与观测值有偏差, 原因可能是实际中的污染源排放强度要大于模拟值^[27]. 此外模型输入特征因素没有考虑冬季取暖引起大量污染物排放, 以及西北风、东北风等风向因素, 这些因素可能会使空气质量发生显著变化^[28]. 但是总体上模拟结果与观测值的偏差在可接收范围内, 也符合观测值的变化趋势.

2 结果与讨论

2.1 河南省疫情前期与疫情管控期间空气质量对比

图 5 表示 2020 年河南省 18 地市疫情前和疫情

管控期间的空气质量呈显著变化. 可以明显看到, 除了臭氧浓度上升了 $33.12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 上升幅度为 69.64%; 其余污染物浓度都有明显降低, 其中 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 CO 浓度分别降低 $44.56 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $47.67 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $2.19 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $26.98 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.44 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 降幅分别为 36.89%、34.18%、19.43%、58.51% 和 29.85%. 其中 NO_2 降幅最为明显, 原因很有可能是因为管控期间人为源排放减少, 特别是交通移动源和工业源的 NO_x 排放减少^[29]. SO_2 浓度的改善最小, 原因可能是冬季取暖期居民燃煤的排放并未减少, 同时农历新年的烟花燃放也会产生部分 SO_2 ; 另外一个原因可能是近年来河南政府一直在开展燃煤火电厂脱硫工作, 因此 SO_2 的整体变化水平不大^[30]. CO 浓度的降低是因为疫情管控使得机动车的出行减少, 降低了汽车尾气等 CO 气体的排放^[31]. 河南省疫情期间臭氧污染依然没有减少, 反而升高. 可能是由于氮氧化物排放的减少, 使得臭氧与氮氧化物的“滴定反应”减弱, 滴定反应主要的作用是高浓度的氮氧化物可以通过化学反应去除 O_3 ^[32,33]. 此外管控后气象条件改善, 使得能见度变好, 光照加强, 温度上升, 光化学反应加强, 也促使了 O_3 的生成.

从图 6 可以看出, 河南省 18 个地市除了 O_3 浓度上升外, 其他污染物浓度指标都有不同程度地改善. 其中, 颗粒物浓度的改善率有较大差异, 濮阳市、

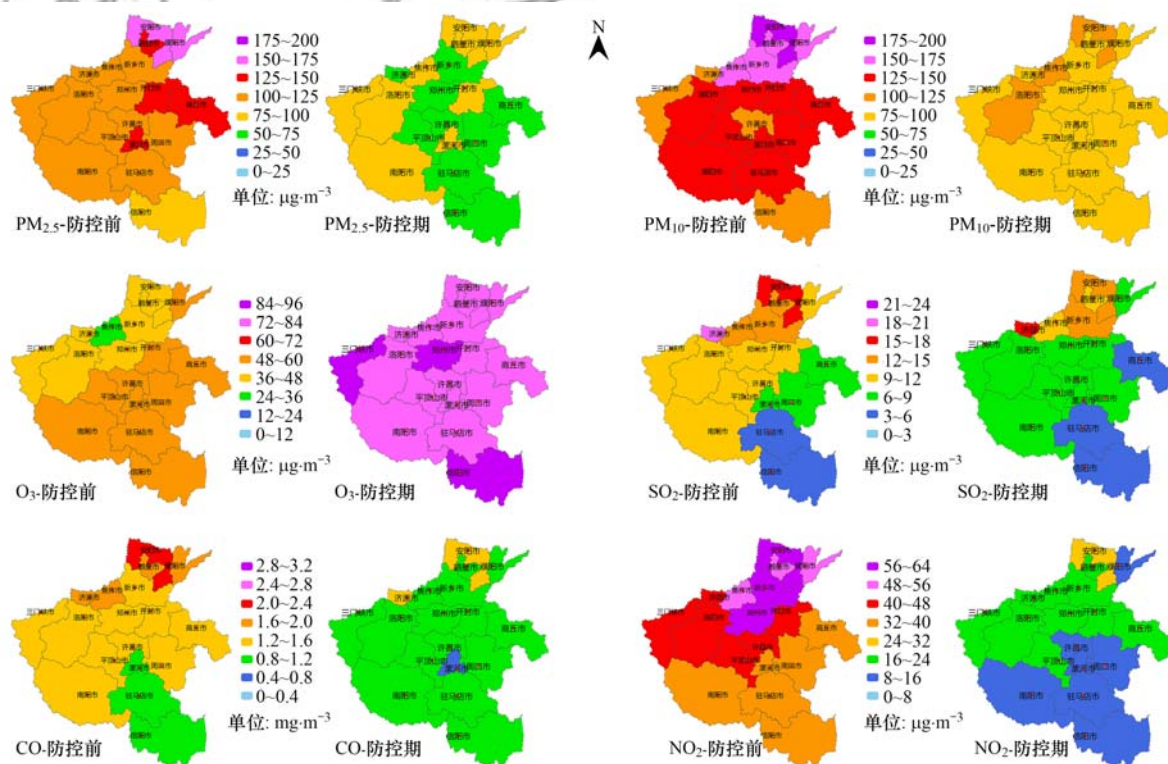


图 5 河南省防控前和防控期间空气质量变化

Fig. 5 Air quality before and during the implementation of critical COVID-19 control measures in Henan Province

商丘市和开封市这 3 个地市的 $\text{PM}_{2.5}$ 改善率排在前列, 分别是 45%、42% 和 41%; 鹤壁市、濮阳市和安阳市这 3 个地市的 PM_{10} 改善率排在前列, 分别是 41%、40% 和 40%; 洛阳市、开封市和商丘市这 3 个地市的 SO_2 改善率排在前列, 分别是 33%、29% 和 27%; 安阳市、鹤壁市和濮阳市这 3 个地市的 CO 改善率排在前列, 分别是 39%、39% 和 38%; 濮阳市、新乡市和信阳市这 3 个地市的 NO_2 改善率排在前列, 分别是 69%、63% 和 63%; 焦作市、郑州市和鹤壁市这 3 个地市的 O_3 浓度上升幅度排在前列, 分别是 133%、115% 和 109%。从以上数据可以看出, 濮阳市在疫情防控中, 污染物浓度改善较大。各地污染物浓度改善情况各有差异, 与它们各自所处地理环境的污染物排放和气象条件变化差异有较大的关系。北方地区位于京津冀大气污染传输通道, 工业电厂、燃煤燃烧等污染排放较严重, 因此疫情防控带来的人为源排放降低对北方地区的空气质量变化有较大的影响。南方城市空气质量优于北方城市, 主要原因是南方城市的地理自然条件优于北方城市, 特别是信阳市, 群山环绕, 绿化面积广阔。

河南省 18 地市 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、CO 和 NO_2 的平均改善率分别是 36%、34%、19%、29% 和 58%, 改善幅度要大于全国平均水平, Bao 等^[34]的研究表明中国 44 个城市在疫情管控期间 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、CO 和 NO_2 的浓度分别下降了 5.93%、13.66%、6.76%、4.58% 和 24.67%; Li 等^[4]的研

究得出长江三角洲地区在疫情管控阶段 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度分别降低了 16%~26%、29%~47% 和 27%~46%。在疫情管控期间, 河南省 SO_2 改善幅度低于长江三角洲地区, 原因是疫情管控期间河南省北部地区处于冬季供暖期, 仍然有大量燃煤排放, 加上政府的脱硫政策, 使得 SO_2 的变化幅度并不大, 导致 SO_2 的浓度改善不明显。

2.2 河南省疫情防控期间空气质量变化与气象条件影响分析

2.2.1 2020 疫情防控期间与 2019 年同期污染物与气象条件的对比分析

河南省地域广阔, 各地区气象条件南北相差较大, 本研究选取了安阳市、郑州市和信阳市这 3 个具有各自区域气象特点的城市作为分析城市对象。安阳市位于河南省北部, 属于京津冀大气污染传输通道河南省影响比较大的城市之一; 郑州市是河南省省会, 位于河南省中部, 属于中原经济政治中心; 信阳市位于河南省南部, 接近疫情中心——湖北省。因此这 3 个城市可以代表河南省北、中、南地区的气象特点。

从图 7 可以看出: ①2019 年和 2020 年疫情前后气象变化主要在于风速、温度和湿度变化比较显著。风向和风速在这 3 个城市中, 2020 年的风速变化明显比 2019 年要大, 且在 2020 年偏南风的天数也比 2019 年的天数要多; 此外这 3 个城市 2020 年的气温在疫情管控期间和疫情前与 2019 年相比要

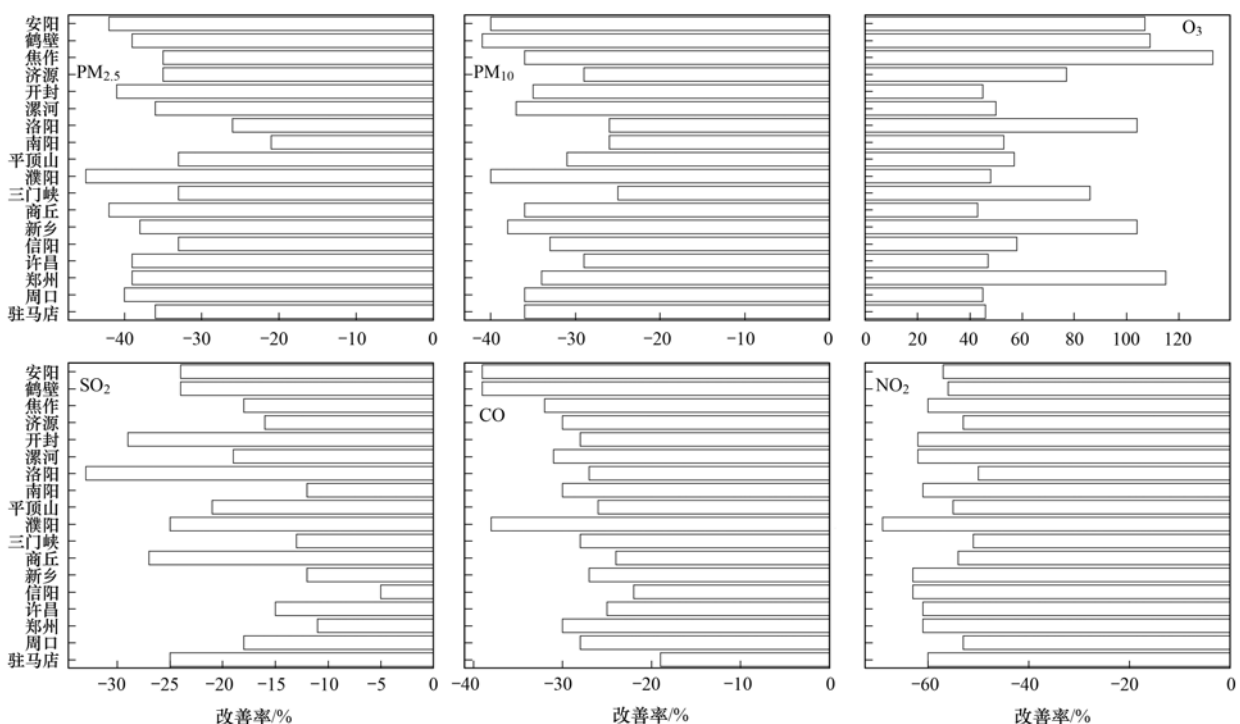
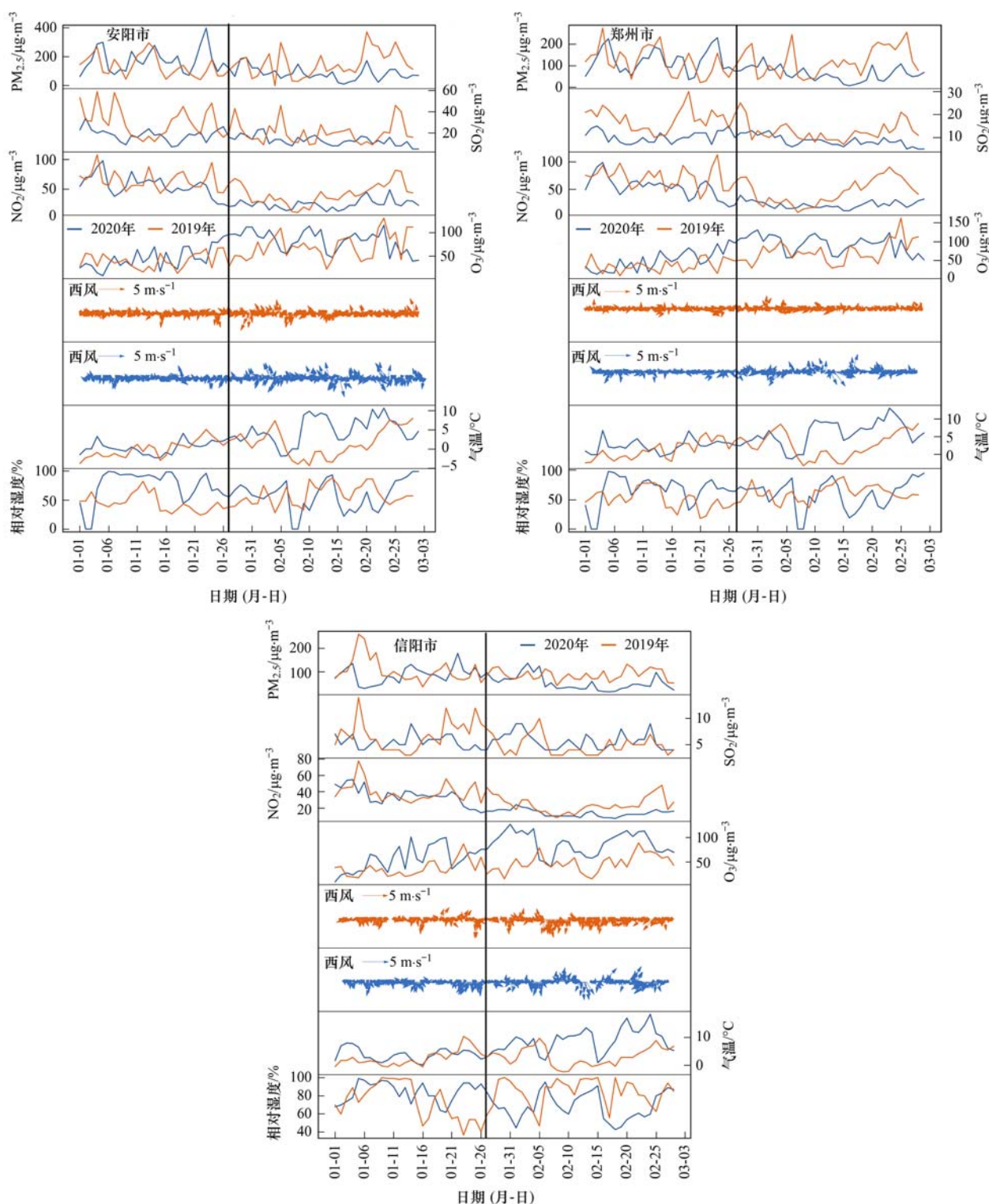


图 6 河南省 18 地市 6 种污染物指标改善率

Fig. 6 Improvement before and during implementation of COVID-19 controls, in the 18 cities of Henan Province



黑线为疫情防控开始时间2020年1月27日

图7 2019年和2020年疫情管控同期安阳市、郑州市和信阳市污染物浓度及气象条件对比

Fig. 7 Comparison of pollutant concentrations and meteorological conditions in Anyang, Zhengzhou, and Xinyang in 2019 and 2020

高;湿度2020年和2019年相比,北方城市要比南方城市变化幅度大.②以 $PM_{2.5}$ 为代表的颗粒物在疫情期间变化情况看,3个城市在疫情管控前,2020年颗粒物要比2019年偏高,1~2月欧亚中高纬大气环流以纬向型为主,冷空气势力较弱,京津冀和汾渭平原地区大气污染扩散条件整体偏差,北方地区

在1~2月容易受到西北部沙尘气候的影响,因此高温、高湿、强氧化性等环境条件加速了污染物的非均相反应,特别是春节前期、城市封锁前期和解封后期外出机动车氮氧化物的二次转化,进一步推高了 $PM_{2.5}$ 浓度^[35,36],因此这3个城市在1~2月都有污染加重的现象发生.2月颗粒物浓度下降的原因除

了排放减少外,主要是风速增大,风向主要以偏南风为主,温度偏高,湿度相比 1 月偏低,污染物扩散条件良好。③ NO_2 浓度在疫情前后有明显降低的趋势,主要是由于疫情防控措施导致人为源、交通源等排放源减少。 SO_2 浓度在疫情前后变化不大,原因是疫情前后属于冬季取暖期, SO_2 的排放和 2019 年同期比并没有减少很多,同时农历新年的烟花燃放也是 SO_2 排放的主要贡献源。同时,低温,低风速,高湿的气象条件,容易使 SO_2 等气态污染物积累,并向二次细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 转化^[19]。 NO_2 浓度的降低,使得臭氧与氮氧化物的“滴定反应”减弱,同时温度上升,能见度变好,光照加强,促进了光化学反应,从而引起 O_3 浓度的增加,加强了大气环境中的氧化能力。同时高湿的气象条件,容易使 NO_2 、 SO_2 和 VOC 等一次污染物转化为硝酸盐、硫酸盐和二次有机气溶胶等^[37],而这些物质又是二次细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要成分。

2.2.2 潜在源分析

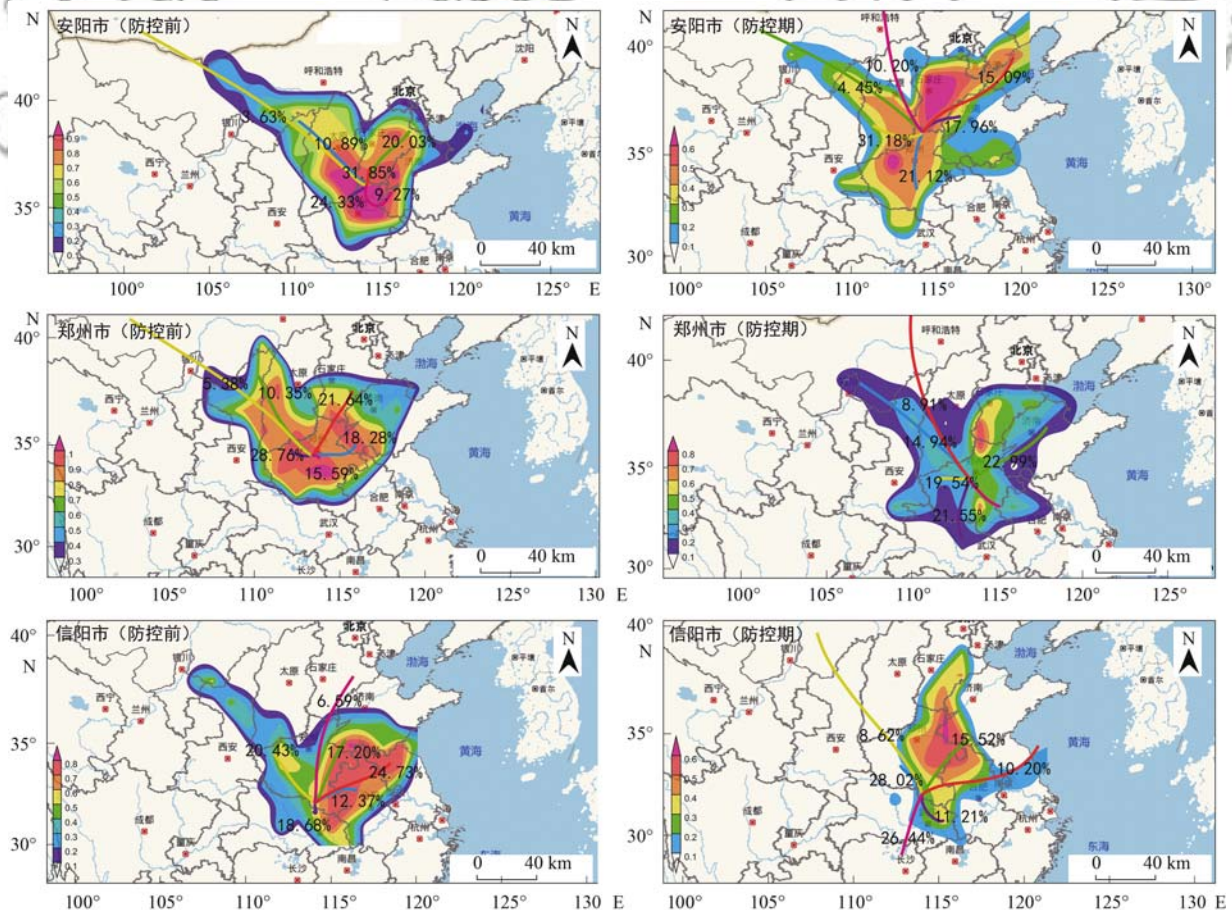
每个地区污染物浓度的变化不仅受到本地排放的影响,更重要的是来自于污染物的区域传输和传输过程中前体物的化学、物理变化过程,为了了解疫

情防控前后河南各地市污染物传输过程,本文主要使用后向轨迹和潜在贡献源因子法 (WPSCF) 来分析。

本文潜在源分析使用的软件是 MeteoInfo 软件中的 TrajStat 插件,研究时间为防控前 (2020 年 1 月) 和防控期 (2020 年 2 月),研究区域为安阳市 ($\text{E}114^\circ21'$, $\text{N}36^\circ06'$)、郑州市 ($\text{E}113^\circ40'$, $\text{N}34^\circ46'$) 和信阳市 ($\text{E}114^\circ04'$, $\text{N}32^\circ07'$),网格分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,高度为 500 m,计算时间间隔 1 h,时区使用 UTC + 8, $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 使用的阈值为国家标准规定的超标污染物阈值 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

$\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染浓度在防控前和防控期的气团变化和潜在来源如图 8 和图 9 所示:3 个代表城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的潜在源来源区域在防控前和防控后都分别有扩大和缩小的趋势。

根据后向轨迹来看,疫情防控前,3 个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均受到来自于安阳市方向的气团和陕西、湖北方向气团的影响; O_3 浓度则主要受到西部地区的影响。疫情防控期间,3 个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度则主要受到了来自湖北方向、驻马店市方向和山东方向气团的影响; O_3 浓度则主要受到西部和西南地



图例表示该网格区域污染轨迹的 WPSCF 值,不同颜色线带百分数表示这个方向上风向轨迹聚类的占比,下同

图 8 防控前和防控后安阳、郑州和信阳的 $\text{PM}_{2.5}$ 潜在源分析

Fig. 8 Potential source analysis of $\text{PM}_{2.5}$ for Anyang, Zhengzhou, and Xinyang before and after plague prevention

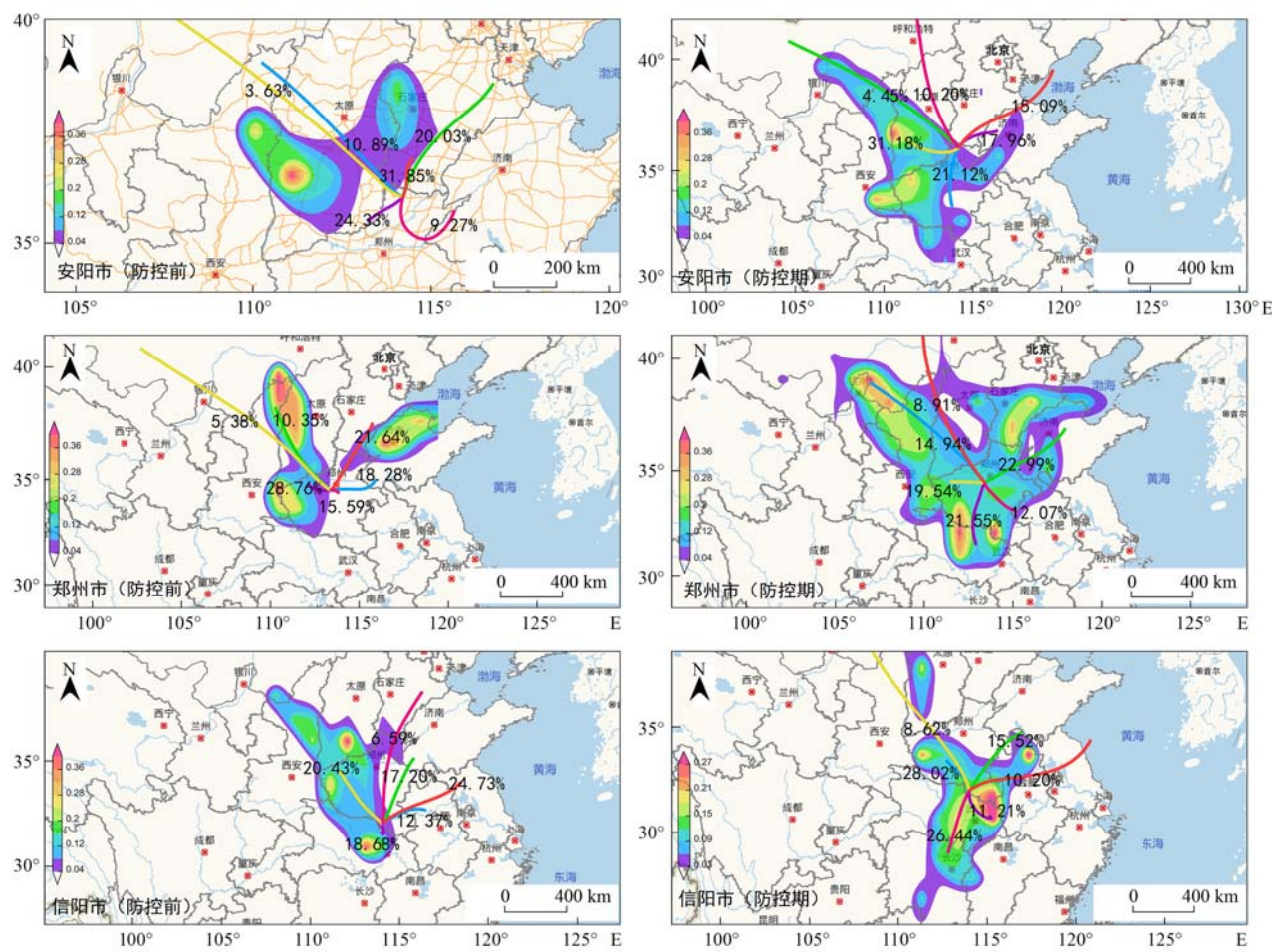


图9 防控前和防控后安阳市、郑州市和信阳市 O₃ 潜在源分析

Fig. 9 Potential source analysis of O₃ for Anyang, Zhengzhou and Xinyang before and after plague prevention

区气团的影响。

根据潜在源分析方法来看,疫情防控前北方城市安阳市和郑州市 PM_{2.5}的潜在源来源范围比较大,主要来源是东北方向的“京津冀污染传输通道”和西北方向陕北、内蒙地区,南方城市信阳市的潜在源主要是河南省东部地区;防控期间,潜在源来源主要是本省南北方向传输,西北方向的来源影响减弱。防控前北方城市安阳市和郑州市 O₃ 的潜在源来源范围主要是外部影响较大;防控期间潜在源来源范围扩大,本地周围来源变为主要来源。

2.3 空气质量变化的气象影响与管控措施减排影响的模拟分析

2.3.1 气象影响的模拟分析

空气质量变化一般是由人为减排和气象条件影响引起的。为了区分二者之间的贡献,一般研究采用的是模拟计算的方法。主要计算公式为^[38]:人为减排引起的空气质量变化值=空气质量总的变化值-气象条件影响的空气质量变化值。本文假设人为源排放和自然源排放量不变,利用2014~2019年每一年的1月和2月的观测数据,使用机器学习算法

(LSTM 算法)训练和模拟2020年1月和2月的污染物排放,并计算出疫情前和疫情管控后受到气象条件影响的空气质量变化值,如图10所示。

图10模拟结果显示,在假设污染物排放量不变的情况下,只考虑气象因素变化的影响,河南省疫情管控期 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、CO 和 NO₂ 浓度均比管控前降低,其平均浓度分别下降 24.33 μg·m⁻³、19.9 μg·m⁻³、5.45 μg·m⁻³、0.32 mg·m⁻³ 和 6.82 μg·m⁻³。此外由于社会生产和人民生活变化导致的污染物排放数据难以获得,可以采用空气质量模拟法来反推空气质量受人为减排的影响值,即用疫情管控期与疫情前观测污染物浓度改善值 Δc (c_{疫情期} - c_{疫情前}) 减去由模拟获取的气象因素引起的污染物浓度改善值(即图10中的变化值),即为人为减排导致的空气质量改善值(Δc - c_{气象变化值})^[38]。由模拟结果可知,气象条件造成的各污染物浓度改善率分别是 24.62%、15.01%、29.33%、22.31% 和 18.75%。疫情防控期间由于实施了部分管控措施,使得机动车出行,工业生产等人为排放减少,气象条件对空气污染的影响显著增加,例如:疫情防控期间

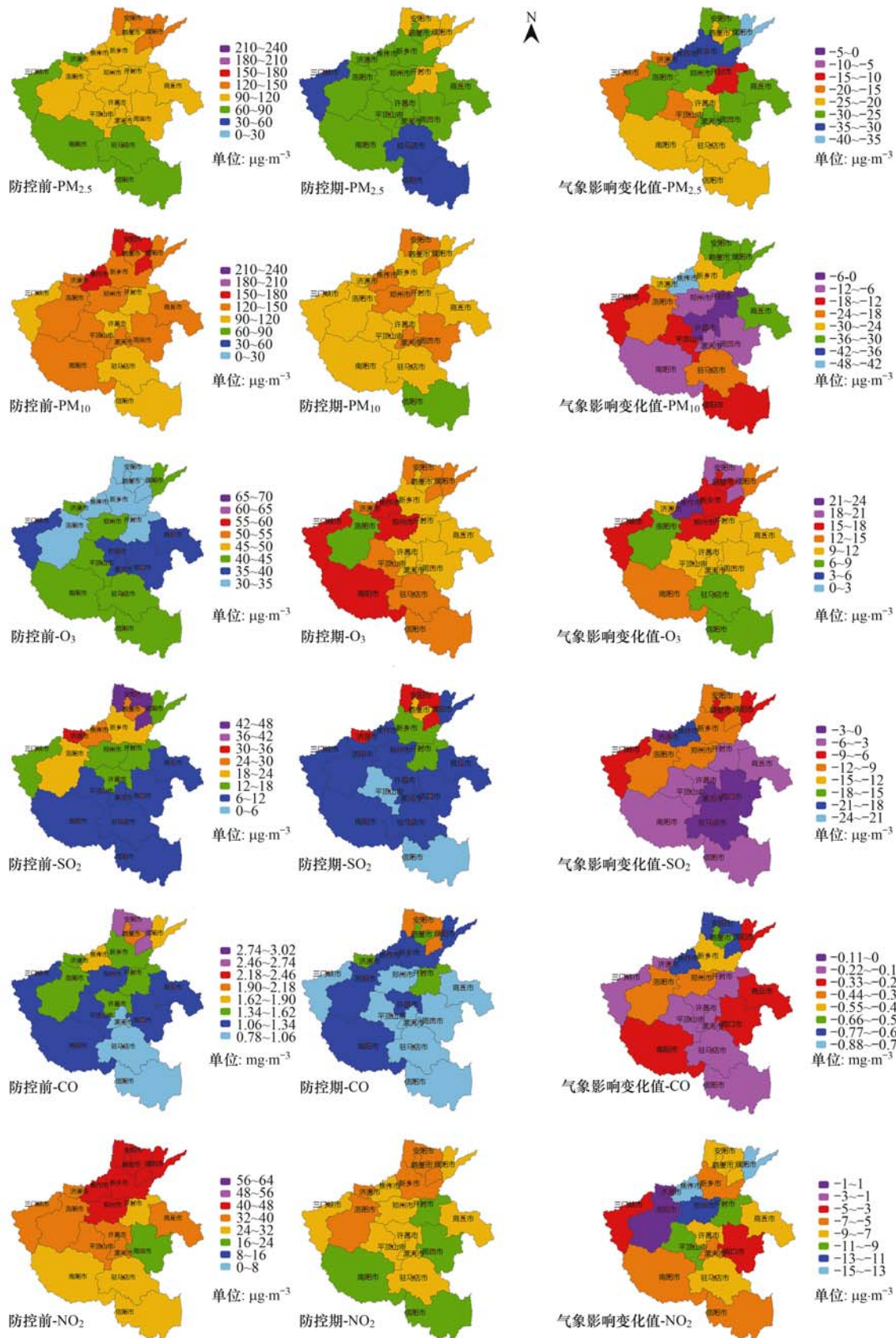


图 10 相同污染源排放情景下河南省疫情管控期与管控前污染物模拟浓度及变化值

Fig. 10 Simulated pollutant concentrations and variation during the implementation of COVID-19 control measures in Henan

O₃ 浓度升高,气象条件的影响幅度达 13.3%. O₃ 对气象条件反应机制比较复杂,疫情防控期间太阳辐射强、气温升高有利于大气光化学反应的进行^[39].

高温、低湿和大风的气象条件,容易使 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 等颗粒物扩散. 从图 10 中可以看出,在 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度的空间变化上,河南北部城市(例如:安阳

市、鹤壁市、鹤壁市和焦作市等)要比中南部城市变化大,可能由于北方城市污染排放基数较大,疫情防控期间人为排放相应减少,加上气象条件的影响,颗粒物浓度变化幅度相应增加.在O₃浓度的空间变化上,也呈现豫北地区要比豫南地区变化大,主要原因是豫北地区的颗粒物排放减少,能见度增加,温度升高,促使了O₃的生成,说明O₃浓度与颗粒物在某些条件作用下呈现负相关.SO₂、CO和NO₂等污染物浓度变化也呈现豫北地区比豫南地区变化大,主要原因也是中北部地区的人为排放相比南部地区减少得要多.总体上来讲,模拟结果符合气象条件对于污染物浓度变化的影响,也符合观测值的空间分布情况.

2.3.2 人为管控减排影响的模拟分析

疫情管控期间人为减排的空气质量改善幅度总体上要小于气象因素(见表1),其中北方城市的空气污染受气象条件的影响要比南方城市大,人为减排影响也是北方城市大于南方城市.其中人为减排改善幅度最大的是NO₂,改善幅度为39.76%,降低了20.16 μg·m⁻³,安阳市、信阳市和郑州市NO₂分

别降低了3.58、5.07和3.71 μg·m⁻³.人为减排影响最大的是PM₁₀,全省平均降低了27.77 μg·m⁻³,其中信阳市PM₁₀的浓度下降最大(2.11 μg·m⁻³),其次是安阳市(1.99 μg·m⁻³).SO₂浓度除了安阳市外,包括18地市的平均值中都处于上升趋势,说明疫情管控期间处于北方冬季,居家取暖导致燃煤和电厂排放并未降低,人为减排并未大幅度影响SO₂的浓度改善.疫情管控期间,O₃浓度并未降低,反而上升,一方面颗粒物浓度降低,使得能见度升高,太阳辐射增强,加速光化学反应,促使O₃浓度的升高^[40];另一方面由于交通源等人为排放NO_x的减少,使得监测站点附近O₃的滴定效应减弱.18地市的平均CO浓度变化幅度小于其它污染物浓度,其中安阳市和郑州市在人为减排影响下分别下降了0.95 mg·m⁻³和1.00 mg·m⁻³,但是信阳市的CO浓度没有明显受到人为减排的影响,说明信阳市的CO浓度与平时变化不大.疫情期间的管控措施,使得机动车数量减少,导致汽车尾气排放的CO减少;其中CO的另一个主要排放源是燃煤^[41],在疫情期间燃煤需求量也并未出现较大波动.

表1 假定排放源不变情况下疫情管控前后空气质量、气象和减排影响模拟值
Table 1 Simulated values of meteorological and emission reduction impacts on air quality, before and after implementation of COVID-19 control measures, under the same emission sources

地市	污染物	疫情前模拟 (a, 01-01~01-26)	疫情期模拟 (b, 01-27~02-29)	气象条件影响模拟值 (b-a)	人为减排影响
安阳	PM _{2.5}	176.00	106.00	-70.00	-1.62
	PM ₁₀	197.00	123.00	-74.00	-1.99
	SO ₂	27.00	23.00	-4.00	-0.31
	CO	10.80	10.90	0.10	-0.95
	NO ₂	66.00	35.00	-31.00	-3.58
信阳	PM _{2.5}	93.00	65.00	-28.00	-0.30
	PM ₁₀	121.00	86.00	-35.00	-2.11
	SO ₂	15.00	14.00	-1.00	0.70
	CO	7.90	7.40	-0.50	0.26
	NO ₂	43.00	24.00	-19.00	-5.07
郑州	PM _{2.5}	127.00	82.00	-45.00	-1.63
	PM ₁₀	138.00	96.00	-42.00	-1.81
	SO ₂	19.00	16.00	-3.00	1.86
	CO	7.70	8.30	0.60	-1.00
	NO ₂	64.00	32.00	-32.00	-3.71
18 地市平均	PM _{2.5}	98.83	74.50	-24.33	-20.23
	PM ₁₀	132.60	112.70	-19.90	-27.77
	SO ₂	18.58	13.13	-5.45	3.26
	CO	1.45	1.13	-0.32	-0.12
	NO ₂	36.39	29.57	-6.82	-20.16

1) CO 单位为mg·m⁻³, PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂和SO₂单位为μg·m⁻³

3 结论

(1)疫情管控阶段河南省主要污染物除O₃浓度上升外,PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、CO和NO₂浓度明显下

降,全省平均下降幅度分别为36.89%、34.18%、19.43%、29.85%和58.51%.

(2)LSTM预测模型对污染物浓度变化的模拟显示出良好的性能,表明模型选择的特征变量可以

用来解释污染物浓度的变化的趋势. 模拟结果显示, 防控阶段气象条件导致污染物浓度平均降低约 22%, 人为减排平均降低约为 18%. 防控期间河南省 O_3 浓度平均上升 69.64%, 气象因素和人为活动的影响分别占 34.84% 和 34.81%, 因此 O_3 污染的控制需对不同污染物实施科学地减排比例.

(3) 从观测值和模拟值的空间变化上可以看出, 污染物浓度的变化幅度豫北地区比豫南地区大, 因此需要对豫北地区的污染物排放进行科学地研判, 并实施严格的减排措施.

参考文献:

- [1] 河南省人民政府. 河南省启动重大突发公共卫生事件一级响应 [EB/OL]. <http://www.henan.gov.cn/2020/01-26/1285076.html>, 2020-12-20.
- [2] Tian H Y, Liu Y H, Li Y D, *et al.* An investigation of transmission control measures during the first 50 days of the COVID-19 epidemic in China [J]. *Science*, 2020, **368**(6491): 638-642.
- [3] Wang P F, Chen K Y, Zhu S Q, *et al.* Severe air pollution events not avoided by reduced anthropogenic activities during COVID-19 outbreak [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, **158**, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104814.
- [4] 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.
- [5] 张小曳, 徐祥德, 丁一汇, 等. 2013~2017 年气象条件变化对中国重点地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度下降的影响 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, **50**(4): 483-500.
Zhang X Y, Xu X D, Ding Y H, *et al.* The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on $PM_{2.5}$ mass reduction in key regions in China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62**(12): 1885-1902.
- [6] Xue W, Zhan Q M, Zhang Q, *et al.* Spatiotemporal variations of particulate and gaseous pollutants and their relations to meteorological parameters: the case of Xiangyang, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **17**(1), doi: 10.3390/ijerph17010136.
- [7] von Schneidemesser E, Steinmar K, Weatherhead E C, *et al.* Air pollution at human scales in an urban environment: impact of local environment and vehicles on particle number concentrations [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **688**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.309.
- [8] Zhao N, Wang G, Li G H, *et al.* Air pollution episodes during the COVID-19 outbreak in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China: an insight into the transport pathways and source distribution [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115617.
- [9] Wang S Y, Zhang Y L, Ma J L, *et al.* Responses of decline in air pollution and recovery associated with COVID-19 lockdown in the Pearl River Delta [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **756**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143868.
- [10] Cole M A, Elliott R J R, Liu B W. The impact of the Wuhan Covid-19 lockdown on air pollution and health: a machine learning and augmented synthetic control approach [J]. *Environmental and Resource Economics*, 2020, **76**(4): 553-580.
- [11] Lovrić M, Pavlović K, Vuković M, *et al.* Understanding the true effects of the COVID-19 lockdown on air pollution by means of machine learning [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **274**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115900.
- [12] Bai Y, Zeng B, Li C, *et al.* An ensemble long short-term memory neural network for hourly $PM_{2.5}$ concentration forecasting [J]. *Chemosphere*, 2019, **222**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.01.121.
- [13] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国中央人民政府网站-河南 [EB/OL]. http://www.gov.cn/guoqing/2018-01/17/content_5257444.htm, 2020-12-20.
- [14] 中华人民共和国生态环境部. 关于印发《京津冀及周边地区 2017-2018 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》的通知 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201708/W020170824378273815892.pdf>, 2020-12-20.
- [15] 杜晓轩, 楚明浩, 杨磊. 霾高发季节郑州五城区 $PM_{2.5}$ 污染水平的对比分析及影响因素初探 [J]. *绿色科技*, 2016, (14): 101-103, 108.
Du X X, Chu M H, Yang L. Comparative analysis and influencing factors of $PM_{2.5}$ pollution in five districts in Zhengzhou during haze seasons [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2016, (14): 101-103, 108.
- [16] Dimitriou K, Kassomenos P. Combining AOT, angstrom exponent and PM concentration data, with PSCF model, to distinguish fine and coarse aerosol intrusions in southern France [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 172-173: 74-82.
- [17] 孙亚南. 南通旅游业与三次产业的灰色关联实证分析 [J]. *集团经济研究*, 2006, (25): 144-145.
- [18] 刘思峰, 杨英杰, 吴利丰. 灰色系统理论及其应用 [M]. (第七版). 北京: 科学出版社, 2014. 62-63.
- [19] 赵雪, 沈楠驰, 李令军, 等. COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1205-1214.
Zhao X, Shen N C, Li L J, *et al.* Analysis of changes and factors influencing air pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei region during the COVID-19 pandemic [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1205-1214.
- [20] Xie R, Sabel C E, Lu X, *et al.* Long-term trend and spatial pattern of $PM_{2.5}$ induced premature mortality in China [J]. *Environment International*, 2016, **97**: 180-186.
- [21] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long short-term memory [J]. *Neural Computation*, 1997, **9**(8): 1735-1780.
- [22] Huang C J, Kuo P H. A deep CNN-LSTM model for particulate matter ($PM_{2.5}$) forecasting in smart cities [J]. *Sensors*, 2018, **18**(7), doi: 10.3390/s18072220.
- [23] Lee M, Lin L, Chen C Y, *et al.* Forecasting air quality in Taiwan by using machine learning [J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1), doi: 10.1038/s41598-020-61151-7.
- [24] 陈诚. 人人都能看懂的 LSTM [EB/OL]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/32085405>, 2020-12-20.
- [25] 段大高, 赵振东, 梁少虎, 等. 基于 LSTM 的 $PM_{2.5}$ 浓度预测模型 [J]. *计算机测量与控制*, 2019, **27**(3): 215-219.
Duan D G, Zhao Z D, Liang S H, *et al.* Research on $PM_{2.5}$ concentration prediction based on LSTM [J]. *Computer Measurement & Control*, 2019, **27**(3): 215-219.
- [26] 蔡旺华. 运用机器学习方法预测空气中臭氧浓度 [J]. *中国环境管理*, 2018, **10**(2): 78-84.
Cai W H. Using machine learning method for predicting the concentration of ozone in the air [J]. *Chinese Journal of*

- Environmental Management, 2018, **10**(2): 78-84.
- [27] Han X, Zhang M G, Zhu L Y, *et al.* Assessment of the impact of emissions reductions on air quality over North China Plain[J]. Atmospheric Pollution Research, 2016, **7**(2): 249-259.
- [28] Zhao J C, Deng F, Cai Y Y, *et al.* Long short-term memory-fully connected (LSTM-FC) neural network for PM_{2.5} concentration prediction[J]. Chemosphere, 2019, **220**: 486-492.
- [29] Nichol J E, Bilal M, Ali M A, *et al.* Air pollution scenario over China during COVID-19[J]. Remote Sensing, 2020, **12**(13), doi: 10.3390/rs12132100.
- [30] Otmani A, Benchrif A, Tahri M, *et al.* Impact of Covid-19 lockdown on PM₁₀, SO₂ and NO₂ concentrations in Salé City (Morocco)[J]. Science of the Total Environment, 2020, **735**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139541.
- [31] 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.
- [32] Sillman S, Logan J A, Wofsy S C. The sensitivity of ozone to nitrogen oxides and hydrocarbons in regional ozone episodes[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1990, **95**(D2): 1837-1851.
- [33] Silver B, He X Y, Arnold S R, *et al.* The impact of COVID-19 control measures on air quality in China[J]. Environmental Research Letters, 2020, **15**(8), doi: 10.1088/1748-9326/aba3a2.
- [34] 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.
- [35] 朱彤, 尚静, 赵德峰. 大气复合污染及灰霾形成中非均相化学过程的作用[J]. 中国科学: 化学, 2010, **40**(12): 1731-1740.
- Zhu T, Shang J, Zhao D F. The roles of heterogeneous chemical processes in the formation of an air pollution complex and gray haze[J]. Science China Chemistry, 2011, **54**(1): 145-153.
- [36] 彭玢, 赵媛媛, 赵吉麟, 等. 京津冀大气污染传输通道区大气污染时空格局研究[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(2): 449-458.
- Peng L, Zhao Y Y, Zhao J L, *et al.* Spatiotemporal patterns of air pollution in air pollution transmission channel of Beijing-Tianjin-Hebei from 2000 to 2015 [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(2): 449-458.
- [37] Sun Y L, Lei L, Zhou W, *et al.* A chemical cocktail during the COVID-19 outbreak in Beijing, China: insights from six-year aerosol particle composition measurements during the Chinese New Year holiday[J]. Science of the Total Environment, 2020, **742**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140739.
- [38] 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.
- [39] 王莉, 贺玉川, 于光, 等. 泰州市 PM_{2.5} 与常规空气污染物及气象因素的相关性分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2018, **28**(22): 2788-2792, 2795.
- Wang L, He Y C, Yu G, *et al.* Correlation analysis of PM_{2.5} and conventional air pollutants and meteorological factors in Taizhou City[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2018, **28**(22): 2788-2792, 2795.
- [40] 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.
- [41] 谢静芳, 董伟, 王宁, 等. 吉林省冬季燃煤民居室内 CO 污染监测分析[J]. 气象与环境学报, 2014, **30**(1): 75-79.
- Xie J F, Dong W, Wang N, *et al.* Analysis of residential indoor CO concentration due to coal-burning during winter in Jilin province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2014, **30**(1): 75-79.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (<i>Nereididae</i>) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China; 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)