

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势	杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)
交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测	郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)
基于扩展 STIRPAT 模型 LMDI 分解的碳排放脱钩因素	张江艳 (1888)
基于 LEAP 模型的工业园区碳达峰路径: 以南京某国家级开发区为例	李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)
高校碳排放核算与分析: 以北京 A 高校为例	曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)
北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素	俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)
碳排放权交易价格与全要素生产率: 来自中国的证据	吴雪萍 (1926)
中国城市 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 时空分布特征和影响因素分析	李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)
2017~2021 年苏皖鲁豫交界区域 PM _{2.5} 和 O ₃ 时空变化特征及影响因素	陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)
疫情管控期西安 PM _{2.5} 和 O ₃ 污染特征及成因分析	原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)
苏南五市秋冬季 PM _{2.5} 化学组成特征和空间差异	冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)
湖北咸宁细颗粒物 PM _{2.5} 来源	罗怡, 朱宽广, 陈璞琰, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)
邢台氨减排对京津冀 PM _{2.5} 改善的溢出效益	边泽君, 闻超玉, 郎建奎, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)
聊城市冬季 PM _{2.5} 载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析	张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)
高原城市拉萨典型 VOCs 排放源成分谱特征	郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)
北京市工业园区 VOCs 污染特征及健康风险评估案例: 高新技术产业的环境影响	王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海林, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)
高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析	雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)
水环境中抗病毒药物的存在、行为与风险	葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)
黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险	王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)
藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素	李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)
西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源	张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)
基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程	孟令华 (2096)
丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素	张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)
金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素	王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)
德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价	刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橹橹 (2129)
典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征	许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)
抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析	王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)
过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能	曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲予, 李大鹏, 黄勇 (2160)
矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应	刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张勇 (2171)
生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展	孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)
微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制	练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠华, 陈波 (2195)
紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制	马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)
土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应	郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)
鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度	喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)
典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系	刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琮, 周瑞娟, 李霖 (2233)
污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响	郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)
宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能	胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)
大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制	郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)
基于连续小波变换、SHAP 和 XGBoost 的土壤有机质含量高光谱反演	叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)
秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响	叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)
长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响	王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)
土壤盐分变化对 N ₂ O 排放影响: 基于 Meta 分析	黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)
基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测	郑慧玲, 郑辉峰 (2321)
基于 InVEST 模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟	张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)
防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系	徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)
长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力	赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)
冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和 AMF 多样性的影响	鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)
辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应	周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)
高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征	张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)
生物炭与不同类型氮肥配施对菜地土壤反硝化细菌群落的影响	柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)
太岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征	马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)
基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法	张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 邹允兵 (2417)
基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)
西南不同类型紫色土 pH 变化、重金属累积与潜在生态风险评估	张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)
重庆某铁矿区周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析	廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)
金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)
赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果	刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)
施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响	张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

疫情管控期西安PM_{2.5}和O₃污染特征及成因分析

原晓红, 张强*, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋

(西北大学城市与环境学院, 西安 710127)

摘要: 基于西安疫情管控期空气监测数据, 分析PM_{2.5}和O₃的时空序列特征, 从PM_{2.5}源解析、O₃前体物VOCs溯源、气象要素和区域传输方向探讨污染成因. 结果表明: ①管控期PM_{2.5}和O₃分别同比上升20.39%和23.72%, 其他参数均下降; 与管控前后时期相比, 管控期PM_{2.5}和PM₁₀日均值协同变化趋势减弱, O₃和NO₂此消彼长趋势增强; 相比去年同期, PM_{2.5}小时值升高11~19 μg·m⁻³, O₃小时值夜间18:00~23:00升幅增大, 为10~19 μg·m⁻³. ②污染物浓度变化呈现一定的空间聚集协同性; 受地形及植被阻滞吸附影响, PM_{2.5}污染集中在北部, 由于城郊NO₂滴定效果弱于城区, 表现为南部郊区O₃污染较为严重. ③管控期移动源对PM_{2.5}贡献降低, 化石燃料燃烧源和工艺过程源贡献升高; 为防控疫情大量喷洒强氧化性的消杀剂使得含氧VOCs的体积分数升高, 占比86.02%, O₃前体物VOCs中乙醛、丙醛和丁烯醛是优先管控物种; 气象要素对于污染物浓度的影响并非简单线性关系, 在RH < P75区间, PM_{2.5}浓度平均值随RH增大而升高, 在T > P25区间, O₃浓度平均值随T升高而升高; 聚类分析表明与其他时期相比, 管控期本地贡献率较高, 为32.80%, 由于管控期O₃激增促进PM_{2.5}的二次生成, 区域重污染传输增强了PM_{2.5}的不降反升情况.

关键词: PM_{2.5}; 臭氧(O₃); PMF源解析; 臭氧生成潜势(OFP); 聚类分析

中图分类号: X513; X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-1963-12 DOI: 10.13227/j.hjkk.202304199

Analysis of the Characteristics and Causes of PM_{2.5} and O₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period

YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang*, LI Qi, XIE Wen-hao, LIU Yue-ting, FAN Ting-ting, JIANG Xu-peng

(College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: Based on the air monitoring data during the epidemic lockdown period in Xi'an, the spatiotemporal characteristics of PM_{2.5} and O₃ were analyzed, and the pollution sources of PM_{2.5}, VOCs as O₃ precursors, meteorological factors, and regional transport directions were discussed to explore the causes of pollution. The results showed that: ① during the lockdown period, PM_{2.5} and O₃ increased by 20.39% and 23.72%, respectively, compared to that in the same period the previous year, whereas other parameters decreased. Compared with that in the period before and after lockdown, the co-variation trend of PM_{2.5} and PM₁₀ daily averages weakened during the lockdown period, whereas the trend of O₃ and NO₂ showed an opposite change. Compared with that in the same period the previous year, the hourly PM_{2.5} values increased by 11~19 μg·m⁻³, and the hourly O₃ values increased during the night from 18:00 to 23:00 by 10~19 μg·m⁻³. ② The change in pollutant concentrations showed a certain spatial clustering effect; due to the influence of topography and vegetation adsorption, PM_{2.5} pollution was concentrated in the northern part, whereas O₃ pollution was more severe in the southern suburban area due to the weaker effect of NO₂ titration in the suburbs compared to that in the urban area. ③ During the lockdown period, the contribution of mobile sources to PM_{2.5} decreased, whereas the contribution of fossil fuel combustion sources and industrial processes increased. The volume fraction of oxygen-containing VOCs increased due to the large-scale spraying of highly oxidizing disinfectants for epidemic prevention and control, accounting for 86.02% of the total VOCs, and acetaldehyde, propionaldehyde, and butenal were identified as priority control species among the VOCs as O₃ precursors. The impact of meteorological factors on pollutant concentrations was not a simple linear relationship; in the RH < P75 range, the mean PM_{2.5} concentration increased with the increase in RH, whereas in the T > P25 range, the mean O₃ concentration increased with the increase in temperature. Cluster analysis showed that the local contribution rate was higher during the lockdown period, accounting for 32.80%, the significant increase in O₃ during the lockdown period promoted the secondary formation of PM_{2.5}, and regional heavy pollution transport enhanced the situation of non-decrease and rebound of PM_{2.5}.

Key words: PM_{2.5}; O₃; PMF source apportionment; ozone formation potential (OFP); cluster analysis

疫情管控作为一种特殊减排情景的模拟, 对空气质量影响显著^[1~4], 不同污染物的变化水平也存在明显差异^[5~7], 探究此背景下重点污染物PM_{2.5}和O₃的污染特征及成因对于城市大气污染防治具有重要意义^[8~11].

疫情期间各区域的污染情况及减排成效不尽相同^[12,13], 代兴良等^[14]研究证实在一次排放和二次生成前体物都下降的情况下, 咸阳市疫情期间PM_{2.5}降幅低于预期, 而O₃浓度升高50.9%; 陈军辉等^[15]研究发现疫情期间四川盆地O₃同比上升, 其他污染物均降低; 余锋等^[16]研究发现疫情期间关中盆地仍呈

现以PM_{2.5}为主的复合污染特征, 西安和咸阳等盆地内城市的PM_{2.5}污染程度高于宝鸡和铜川等地势较高地区.

在探究污染成因上, 许多研究着眼于PM_{2.5}和O₃

收稿日期: 2023-04-23; 修订日期: 2023-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277414); 国家重点研发计划项目(2019YFC0214203); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41807342); 大气重污染成因与治理攻关项目(DQ3GG-05-32, DQGG202110)

作者简介: 原晓红(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市PM_{2.5}和O₃污染特征及成因探究, E-mail: 202133204@stumail.nwu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zhang-qiang@nwu.edu.cn

的来源解析^[17,18], 如 Liu 等^[19]研究表明临汾市 2020 年疫情期间 PM_{2.5} 的 6 个污染源中机动车源和降尘源的削减幅度较高; Wang 等^[20]评估了 COVID-19 封控对 VOCs 来源的影响, 发现非甲烷总烃在封控期间下降, 但 O₃ 形成率没有下降. 气象条件对于污染物的生成及扩散有直接影响^[21~23], 刘厚凤等^[24]证实疫情期间山东省的一次污染物对减排响应更敏感, 二次污染物则呈现滞后性且受气象因素影响更显著; Khan 等^[25]研究表明 YRD、NCP 和 IGP 地区的 O₃ 升高主要和气象因素以及疫情管控期 NO_x 的空前减少有关; 尹晓梅等^[26]研究发现与同期 5a 相比, 北京冬季疫情期间 PM_{2.5} 浓度反弹明显, 气象影响占比 70.1%. 区域污染传输对空气质量的影响亦不容忽视, 李政^[27]研究表明疫情期间聊城地区气团较不稳定且方向多变, 受外来污染传输影响较大, 污染来源较为复杂; Fang 等^[28]对东北地区的气团轨迹分析表明, 超过 74% 的气团轨迹在 3 个重污染城市之间相互传输, 其中 PM_{2.5} 最高均值达 222.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 主要受近距离的区域内输送的影响, 区域间的远距离输送也是重要的影响因素.

西安作为关中平原的中心城市, 是西北地区的重要交通枢纽, 位于喇叭口地形中部, 由于特殊的地形条件及产业结构, 空气质量形势严峻, 是汾渭平原的典型重污染城市之一. 本文基于 2021 年 12 月 23 日至 2022 年 1 月 23 日(管控期)西安气态污染物、气象、PM_{2.5} 水溶性离子和 VOCs 等数据, 分析管控期 PM_{2.5} 和 O₃ 的污染特征及成因. 本研究在疫情管控的特殊减排情境下, 较为全面地探究污染特征及成因, 摸清减排治污痛点, 以期为大气污染防治工作提供支撑.

1 材料与方法

1.1 研究数据

空气污染物和气象数据来源于西安市智慧环保系统管理, 共采用 229 个监测站点的数据, 包括 196 个市控站点, 33 个省控站点, PM_{2.5} 水溶性离子和 VOCs 数据来源于高新区空气质量在线监控系统(简称高新区组分站, 周边多为工业园区, 因此选取此站点进行研究), 监测站点分布见图 1. 为对比疫情管控的影响, 将同期 3 a 即 2018-12-23 ~ 2019-01-23、2019-12-23 ~ 2020-01-23、2020-12-23 ~ 2021-01-23 和管控期 2021-12-23 ~ 2022-01-23 这 4 个时期分别用 A、B、C 和 D 表示.

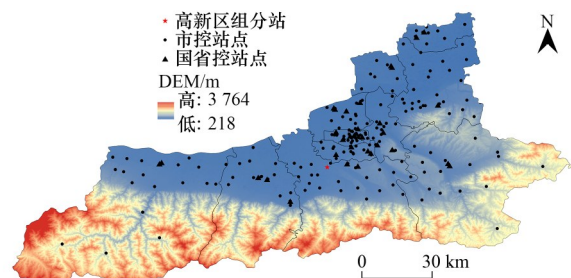


图 1 西安空气质量监测站点分布示意

Fig. 1 Distribution of air quality monitoring stations in Xi'an

1.2 研究方法

1.2.1 ArcGIS 反距离权重法

采用 ArcGIS 反距离权重法分析污染物在空间上的差异, 由于此方法结构简单且通用性较好, 常应用于研究空气质量、气象和环境等方面的问题.

1.2.2 正定矩阵因子分解(PMF)

正定矩阵因子分解(PMF)是目前在污染源分析方面较为完善的定量分析的最优化选择, 易于使用, 带 bootstrap 不确定性分析, 有效解决了原有主成分分析等其他受体模型中容易产生的非负等无法解释因子载荷现象.

1.2.3 臭氧生成敏感性分析

根据 VOCs/NO_x 来判断 O₃ 生成是受 NO_x 控制还是 VOCs 影响更大, 相关研究表明, VOCs/NO_x 临界值一般为 4:1 或 8:1, 比值大于 8:1 为 NO_x 控制区, 在 4:1 ~ 8:1 区间处于过渡区, 小于 4:1 为 VOCs 控制区^[29].

1.2.4 臭氧生成潜势(OFP)

为探讨不同 VOCs 物种对 O₃ 生成的贡献水平, 本研究采用 Carter^[30]提出的 OFP 法来表示不同种类 VOCs 体积分数的变化影响其生成 O₃ 的潜势, 公式如下:

$$\text{OFP}_i = \text{MIR}_i \times \varphi_i(\text{VOC})$$

式中, i 为任意一种 VOC, OFP _{i} 为 VOC 的臭氧生成潜势, %; $\varphi_i(\text{VOC})$ 为 VOC 所占总 VOCs 的体积分数, %; MIR _{i} 为 VOC 的最大增量反应性.

1.2.5 后向轨迹模型

本研究采用 Meteoinfo 软件进行气团移动后向轨迹的聚类分析, 可以直观地确定气流轨迹的来源, 被广泛用于远距离排放源的传输分析. 本研究设定受点坐标为 (34°26'N, 108°57'E), 选取 500 m 高度, 后向时间尺度 48 h, 时间分辨率 1 h 进行模拟, 500 m 高度空气流场能够较为准确地反映大气边界层的变化特征, 从而反映气团传输对污染物的影响, 后向时间 48 h 可以较为全面地获得污染物输送的轨迹路线^[31].

2 结果与讨论

2.1 管控期时间序列特征

2.1.1 PM_{2.5} 和 O₃ 同比上升

管控期西安 $\rho(\text{PM}_{10})$ 、 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{CO}_{95\text{per}})$ 和 $\rho(\text{O}_{3-90\text{per}})$ 分别为 $79\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $94\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $36\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $1.7\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $82\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，其中， PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 和 $\text{CO}_{95\text{per}}$ 浓度分别同比下降 69.43%、56.55%、46.98% 和 6.34%，而 $\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{O}_{3-90\text{per}}$ 浓度不降分别反升 20.39% 和 23.72%。总体来看空气质量有所改善，综合指数为 5.8，同比下降 12.46%，见表 1。

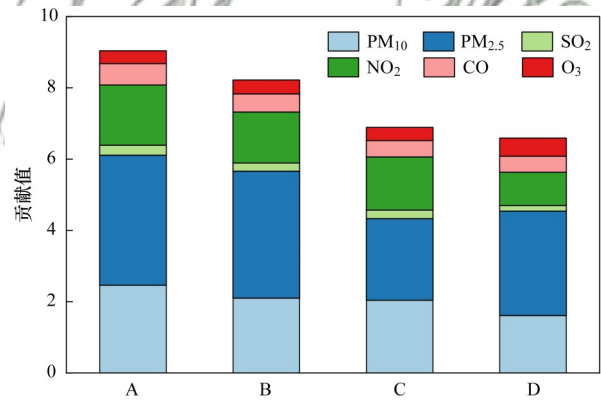
表 1 西安管控期污染物浓度和综合指数

Table 1 Concentration of pollutants and comprehensive index during the lockdown period in Xi'an

时段	$\rho(\text{PM}_{10})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{PM}_{2.5})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{SO}_2)$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{NO}_2)$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{CO}_{95\text{per}})$ / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{O}_{3-90\text{per}})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	综合 指数
2020-12-23 ~ 2021-01-23	134	74	14	56	1.8	62	6.5
2021-12-23 ~ 2022-01-23	79	94	9	36	1.7	82	5.8
同比变化率/%	-69.43	20.39	-46.98	-56.55	-6.34	23.72	-12.46

2.1.2 PM_{2.5} 和 O₃ 贡献值升高

综合指数是各污染物的贡献值加和，表征区域总体空气质量的无量纲指数，数值越大表示污染越严重。由图 2 可知， PM_{10} 贡献值逐年降低，D 相比 C 时期降幅较大，为 0.43；D 时期 NO_2 的贡献值最低，相比 C 时期降低了 0.56；较为反常的是 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献值在 A、B 和 C 这 3 个时期逐年降低，而 D 时期显著升高，相比 C 时期升幅为 0.64； O_3 贡献值在 A、B 和 C 这 3 个时期差异较小，而 D 时期相比 C 时期大幅升高了 0.14。



A 表示 2018-12-23 ~ 2019-01-23, B 表示 2019-12-23 ~ 2020-01-23, C 表示 2020-12-23 ~ 2021-01-23, D 表示 2021-12-23 ~ 2022-01-23

图 2 2018 ~ 2022 年西安管控期同期 6 个参数对综合指数的贡献值
Fig. 2 Contribution of six parameters to the composite index for the same period of Xi'an lockdown period from 2018 to 2022

2.1.3 日均值变化特征

由于每年的气象条件和污染物排放强度均有所差异，本文采用相对比值法，即用管控期污染物日均浓度和前 3 a 同期浓度平均值进行比较，选取管控期及前后 1 个月对比分析，由于 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 关联度高， O_3 和 NO_2 存在光化学反应平衡关系，因此进行分类对比，突出管控对不同污染物影响的差异性，见图 3。

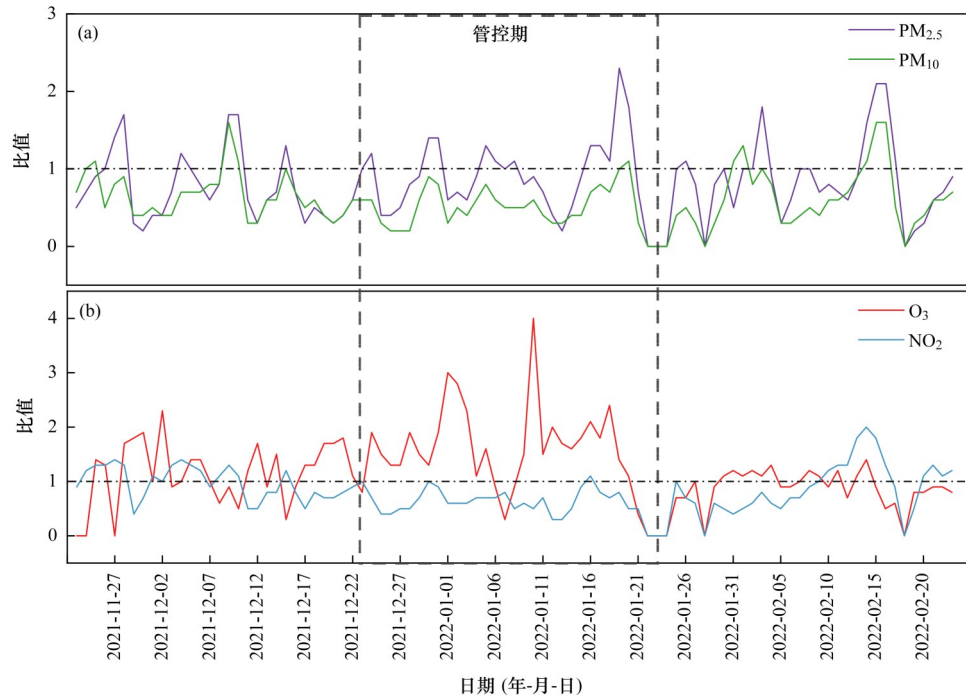
由图 3(a) 可看出，管控前后时期 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 与

各自前 3 a 浓度平均值的比值变化趋势较为一致，而管控期的相应比值差距明显提高，表明两者协同变化的趋势减弱，管控期 PM_{10} 比值基本低于 1， $\text{PM}_{2.5}$ 有 12 d 比值大于 1，最高可达 2.3，由此可知 PM_{10} 对疫情管控的减排响应较为显著。由图 3(b) 可看出，管控期 O_3 激增明显，比值最高达 4，而 NO_2 比值基本低于 1， O_3 和 NO_2 相应比值呈现此消彼长的趋势，管控期这一趋势更为突出，解除管控后交通限制逐步放开， NO_2 比值逐渐升高， O_3 比值回归到 1 上下波动。

2.1.4 小时值变化特征

如图 4 所示，管控期(D) $\text{PM}_{2.5}$ 各时次的浓度平均值相比去年同期(C) 升高 $11 \sim 19\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ， $\text{PM}_{2.5}$ 在 A、B、C 和 D 这 4 个时期的小时浓度变化趋势基本一致，呈单谷值分布，污染集中在 00:00 ~ 10:00 和 21:00 ~ 23:00，由于夜间至凌晨时段大气边界层降低且伴随逆温情况发生，使得 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度持续较高，午后 12:00 ~ 16:00 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度略有下降，此时段大气湍流增强，有利于污染物的垂直扩散^[32]。 PM_{10} 在 A、B 和 C 这 3 个时期呈多峰型分布，峰值出现在 02:00、10:00 和 23:00，而在 D 时期 PM_{10} 浓度变化较为平缓，体现了管控期工地扬尘和机动车扬尘源减排对 PM_{10} 峰值浓度的影响较为显著。

O_3 日变化特征呈单峰型分布，于 16:00 达峰值，值得注意的是 A、B 和 C 这 3 个时期夜间 18:00 ~ 23:00 O_3 浓度较为接近，而此时段 D 时期显著高于同期 3 a， $\rho(\text{O}_3)$ 相比 C 时期升高 $10 \sim 19\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，主要由于管控期交通源排放减少，表现为晚高峰导致的 NO_2 峰谷值差距相比同期 3 a 显著减小，且全天各时次的 NO_2 浓度均大幅降低，使得大气中氮氧自由基含量减少，NO 对 O_3 的滴定作用减弱($\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$)，从而减少了 O_3 的消耗，造成夜间 O_3 浓度相比同期 3 a 降幅变缓^[33,34]。



虚线框表示管控期, 比值 = 1 的分界线来评估污染物升高或降低的水平

图3 管控期污染物日均浓度和前3 a 同期浓度平均值的比值

Fig. 3 Ratio of pollutant concentration during the lockdown period to the average concentration of the first 3 a in the same period

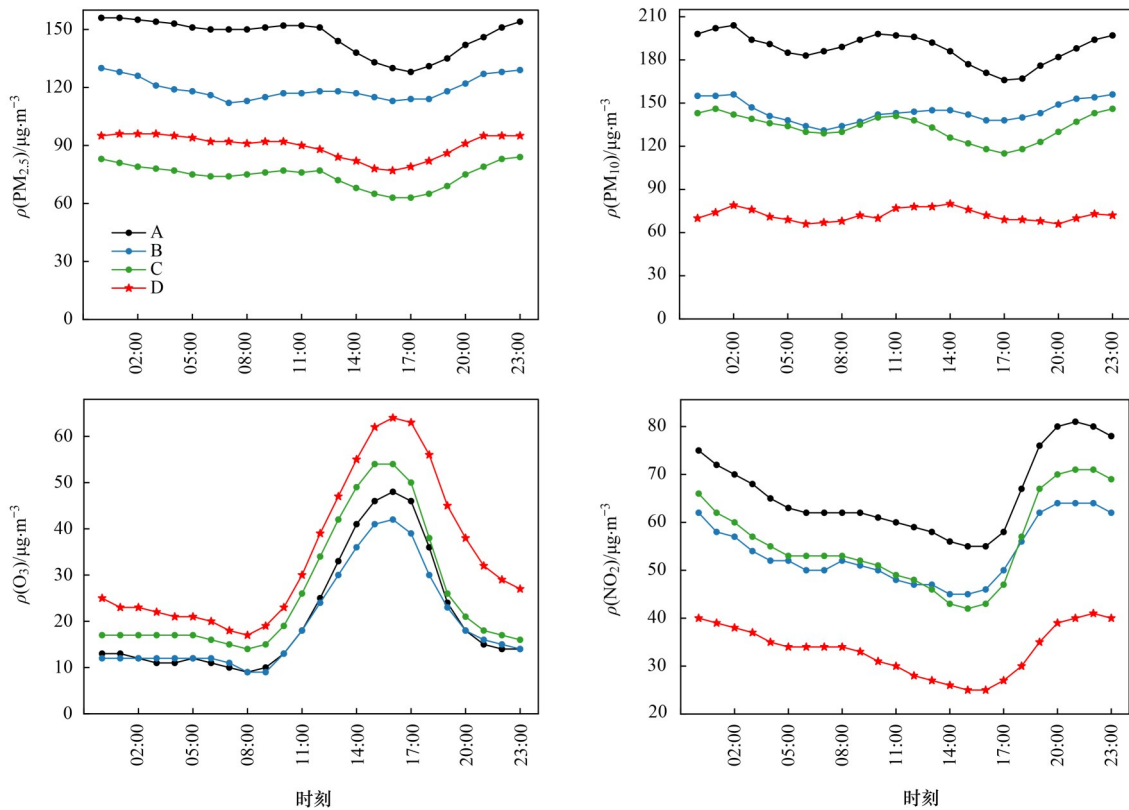


图4 2018~2022年西安管控期同期污染物小时浓度变化

Fig. 4 Hourly concentration of pollutants during the lockdown period of Xi'an from 2018 to 2022

2.2 管控期空间污染特征

2.2.1 空间分布变化

管控期各区县污染物浓度同比变化见图5。除未央区PM_{2.5}浓度下降外, 其他区县均呈升高, 其中南

部周至县、鄠邑区和蓝田县的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 显著升高了25~32 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 中部的灞桥区、新城区、碑林区、雁塔区和长安区的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 升高18~25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 主要受本地排放、地形地势和扩散条件的差异性影

响. O₃ 浓度整体同比上升, 蓝田县 $\rho(\text{O}_3)$ 升高幅度最大, 为 $31 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其次, 靠近中心城区的未央区、莲湖区、碑林区、雁塔区、新城区和长安区 $\rho(\text{O}_3)$ 升高水平较为接近, 在 $20 \sim 27 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内波动, 主要由于中部地区道路交通密度较高, 而疫情管控使得移动源大幅减排, 进而影响 O₃ 和 NO_x 浓度平衡, O₃ 消耗减少. 总体来看, 污染物浓度变化呈现一定的空间聚集协同性.

2.2.2 PM_{2.5} 浓度北部高, O₃ 高值在南部

从区域整体来看, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染区一致, 均集中在北部, O₃ 和 NO₂ 污染区呈现显著的空间互异特征, O₃ 浓度南部高, NO₂ 高值集中在北部偏中心城区, 见图 6. 颗粒物呈现北部污染高, 中部次之, 主要由于西安北部临近黄土高原, 易受西北方向沙尘传输影响, 余倩楠等^[35]研究中也提到北部城市以第二产业为主, 污染物排放量大, 且西北气流占主导, 空间传输效应显著; 朱燕等^[21]和 Sbrinowska 等^[36]研究表明植被可以阻滞吸附颗粒物, 植被覆盖面积较广的地区颗粒物浓度较低, 由图 1 可知, 西安中部及北部为平原地区, 南部为秦岭地带, 植被覆盖率相对较高. O₃ 浓度南部高, 中部至北部污染逐步递减, 其中周至县、鄠邑区、长安区及蓝田县 O₃ 污染较为严重. Zhang 等^[37]研究发现 NO_x 滴定主要发生在城市地区夜间去除 O₃, 在远郊发生的化学反

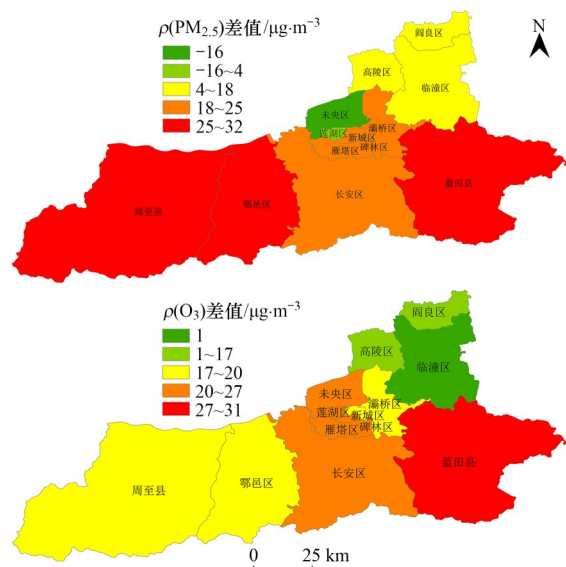


图 5 管控期各区县 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度与去年同期差值

Fig. 5 Difference in PM_{2.5} and O₃ concentrations between the lockdown period and the same period last year in various districts and counties

应较弱, 表现为远离市区的 O₃ 浓度较高, 因此南部郊区 O₃ 浓度高于中部城区地带; NO₂ 污染集中在北部偏中心城区, 如未央区、莲湖区及雁塔区. 刘彬^[38]研究表明机动车排放的 NO_x 已成为西安大气中 NO_x 的最主要来源, NO₂ 浓度和交通密度呈正相关关系^[39], 由于主城区及周边分布较多交通枢纽, 机动车排放量相对较大, 使得 NO₂ 浓度较高.

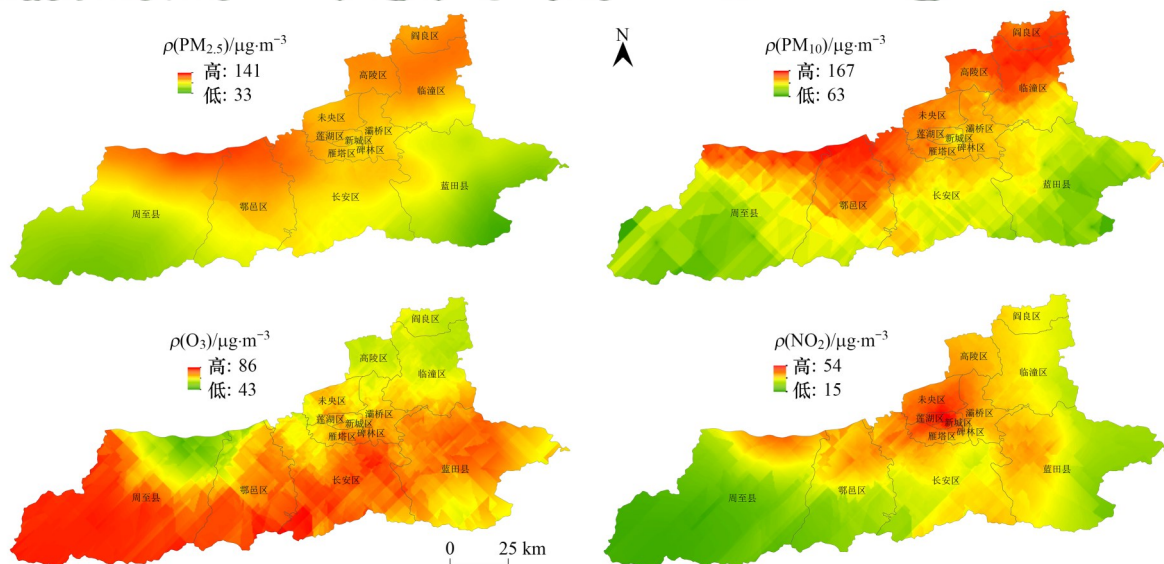


图 6 管控期西安污染物浓度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of pollutant concentration in Xi'an during the lockdown period

2.3 管控期 PM_{2.5} 和 O₃ 污染成因

2.3.1 PM_{2.5} 来源解析

选取管控期水溶性离子 NO₃⁻、NH₄⁺、SO₄²⁻、Cl⁻、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺ 和 Na⁺ 进行 PM_{2.5} 源解析, 其中 NO₃⁻ 主

要来源于道路移动源, SO₄²⁻ 主要来源于化石燃料燃烧, Cl⁻ 主要来源于工业生产及金属冶炼, K⁺ 主要来源于生物质燃烧, Na⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 来源于建筑及土壤风沙^[40].

管控期 PMF 源解析结果见图 7, 因子 1 中负载较高的为 NO_3^- , 标识为移动源; 因子 2 中负载较高的为 SO_4^{2-} , 标识为化石燃料燃烧源; 因子 3 中负载较高的为 Cl^- , 标识为工艺过程源; 因子 4 中负载较高的为 K^+ , 标识为生物质燃烧源; 因子 5 中负载较高的为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ , 标识为建筑及土壤扬尘源。各污染源对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率依次为: 移动源 (46.79%) > 化石燃料燃烧源 (31.38%) > 工艺过程源 (14.49%) > 生物质燃烧源 (5.05%) > 建筑及土壤扬尘源 (2.29%), 因此管控期西安城区内 $\text{PM}_{2.5}$ 主要受到移动源和化石燃料燃烧源影响。

为分析疫情管控对本地排放的影响, 对比管控期及其前后 1 个月污染源的贡献变化, 见图 8, 这 3 个时期对 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献较高的均为移动源、化石燃料燃烧源和工艺过程源, 管控期移动源排放比管控前降低 $4.43 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 解封后相比管控期排放增加 $8.17 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 由于管控期交通限行有效减少了移动源的排放量, 而解封后迎来春节返乡潮, 移动源排放量显著增加; 化石燃料燃烧源在这 3 个时期排放水平

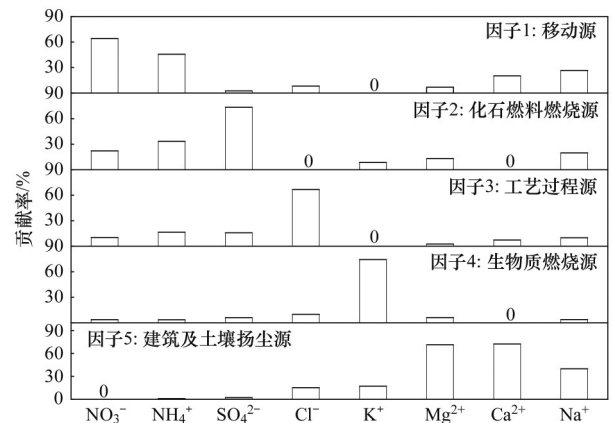


图 7 管控期 $\text{PM}_{2.5}$ 的 PMF 解析因子谱图

Fig. 7 PMF analytical factor spectrum of $\text{PM}_{2.5}$ during the lockdown period

依次递增, 推测伴随秋冬季冷空气频发, 且在管控期及解封后 (春节期间), 供热需求及居民烹饪增加, 造成化石燃料燃烧排放量增加; 工艺过程源在管控期排放高于管控前及解封后, 表明管控期间企业污染物排放量升高, 也是造成 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高的原因之一。

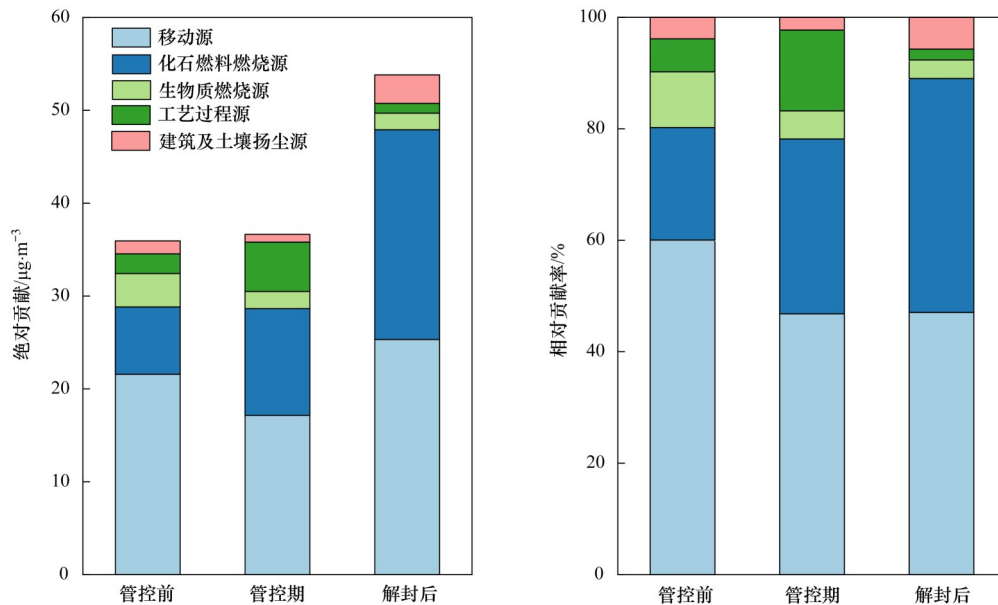


图 8 管控期及前后时期污染源贡献对比

Fig. 8 Comparison of pollution source contribution during the lockdown period and the periods before and after

2.3.2 O_3 污染溯源

(1) 臭氧生成控制敏感性分析 为研究不同浓度水平 O_3 生成的敏感性, 以 2021 年 O_3 小时浓度的第 25%、50% 和 75% 分位数作为分界点, 即划分为 0 ~ 14、14 ~ 33、33 ~ 58 和 $> 58 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 这 4 个区间, 绘制 NO_x -VOCs- O_3 的三维散点图, 见图 9. 不同区间的 VOCs/NO_x 值均 < 8 , $\rho(\text{O}_3) < 58 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时部分比值 > 4 , 处于 NO_x 和 VOCs 过渡区, $\rho(\text{O}_3) > 58 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 区间, $\text{VOCs}/\text{NO}_x < 4$, 说明 O_3 污染高值时段为 VOCs

控制区, 且 O_3 浓度受 NO_x 和 VOCs 的减排比例影响^[41], NO_x 减排量超过 VOCs 使得 O_3 浓度升高, 因此, 在 NO_x 浓度较低时, 对于 O_3 生成前体物 VOCs 的合理管控是控制 O_3 污染的关键。

(2) VOCs 的臭氧生成潜势 VOCs 对 O_3 的贡献需综合考虑其浓度和光化学反应活性, 本研究测算了管控期及前后时期的 66 种 VOCs 物种数据。由表 2 可知, 管控期各类 VOCs 的体积分数大小依次为: 含氧 VOCs (151.65×10^{-9}) > 芳香烃 (12.87×10^{-9}) > 烷

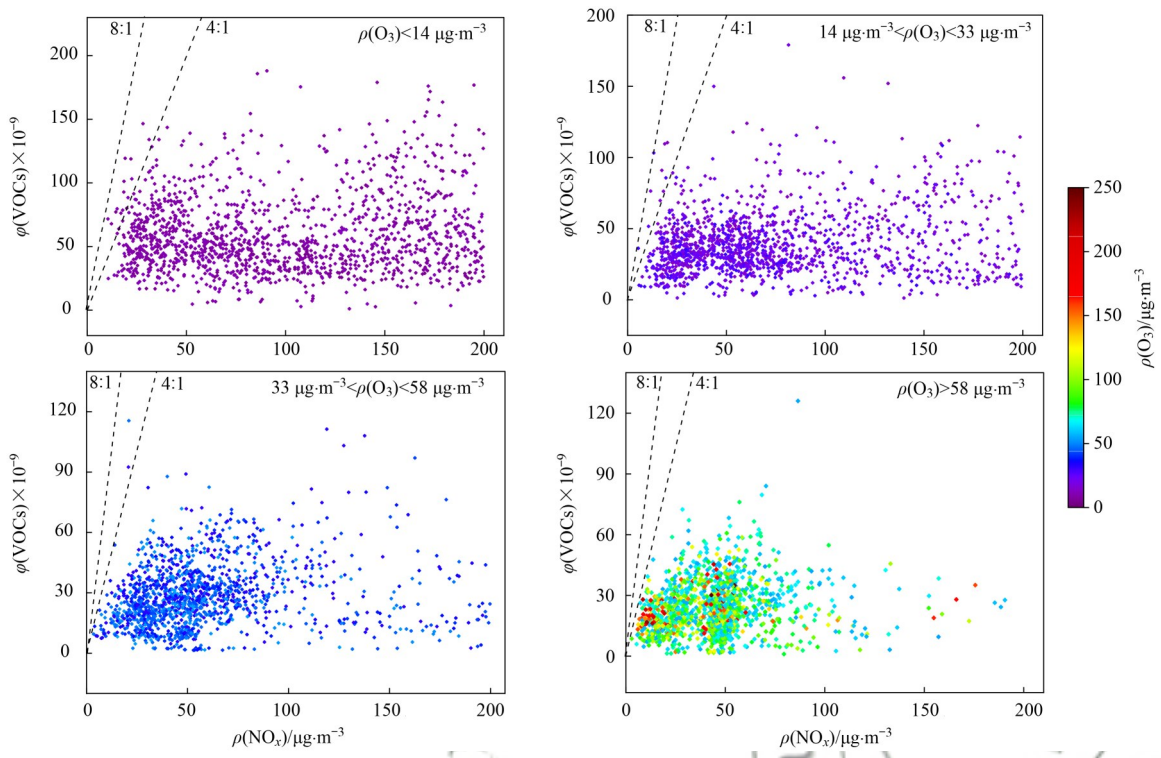


图9 不同O₃浓度区间NO_x-VOCs-O₃散点图

Fig. 9 Scatter plot of NO_x-VOCs-O₃ at intervals with different O₃ concentrations

烃(8.46×10^{-9}) > 烯烃(2.74×10^{-9}) > 炔烃(0.58×10^{-9}), 与管控前后时期相比, 管控期 $\phi(\text{TVOCs})$ 升高, 为 176.3×10^{-9} , 其中, $\phi(\text{含氧 VOCs})$ 显著上升, 相比管控前后时期升高 $9.08 \times 10^{-9} \sim 18.16 \times 10^{-9}$, 占

比为86.02%, 由于疫情期间大面积喷洒含次氯酸和过氧化物类等氧化性较强的消毒剂, 影响大气光化学氧化反应过程, 使得大气中含氧VOCs物种体积分数升高^[42].

表2 不同时期VOCs的体积分数和占比

Table 2 Volume fraction and proportion of VOCs in different periods

VOCs类别	管控前		管控期		解封后	
	体积分数 × 10 ⁻⁹	占比/%	体积分数 × 10 ⁻⁹	占比/%	体积分数 × 10 ⁻⁹	占比/%
含氧 VOCs	133.49	79.70	151.65	86.02	142.57	90.84
芳香烃	15.66	9.35	12.87	7.30	6.56	4.18
烷烃	12.26	7.32	8.46	4.80	5.17	3.29
烯烃	4.31	2.57	2.74	1.56	1.85	1.18
炔烃	1.78	1.06	0.58	0.33	0.79	0.50
TVOCs	167.49	100.00	176.30	100.00	156.94	100.00

由表3可知, 管控期及前后时期的OFP排名前3的均为乙醛、丙醛和丁烯醛, 作为O₃污染管控的优先物种, 管控期对/间-二甲苯的OFP相比管控前后时期升高1.37%~13.1%, 其他重点物种包括: 己醛、甲基丙烯醛、戊醛、2-丁酮、甲苯、乙烯和丙烯.

综上所述, 在NO_x浓度较低时, 控制O₃污染应重点关注含氧VOCs(乙醛、丙醛和丁烯醛)和芳香烃(对/间-二甲苯和甲苯), 其次, 烯烃中的乙烯和丙烯也不容忽视. 上述优先管控物种的主要排放源为: 石油化工、汽油挥发、建筑涂料、印刷印染、表面涂装和医药制造等, 为有效减轻西安O₃污染, 应加

强管控以上重点行业.

2.3.3 气象要素的影响

气象因素影响污染物在大气中的迁移扩散和转化, 城市污染特征和重污染天气均与本地气象条件密切相关^[43], PM_{2.5}和O₃均为二次污染物, 对气象条件更为敏感. 管控期PM_{2.5}和O₃小时浓度、相对湿度(RH)、温度(*T*)及风速(*WS*)的变化趋势见图10, 污染物和气象参数的皮尔逊相关矩阵见图11.

受管控期重污染过程(2022年的1月3~6日和1月17~20日)影响, PM_{2.5}浓度在这2个时段显著升高, 在此期间相对湿度和PM_{2.5}浓度变化趋势较为一致, 皮尔逊相关矩阵表明PM_{2.5}和RH表现为较强的

表 3 不同时期 OFP 排名前 10 物种
Table 3 Top ten species of OFP in different periods

管控前		管控期		解封后	
物种	OFP/%	物种	OFP/%	物种	OFP/%
乙醛	156.02	乙醛	152.29	乙醛	179.40
丙醛	65.38	丙醛	87.17	丙醛	86.94
丁烯醛	49.58	丁烯醛	74.10	丁烯醛	69.96
乙烯	22.56	对/间-二甲苯	18.20	己醛	19.70
己醛	17.26	己醛	16.57	甲基丙烯醛	17.87
对/间-二甲苯	16.83	甲基丙烯醛	16.09	2-丁酮	17.30
2-丁酮	15.65	2-丁酮	13.90	乙烯	8.56
甲基丙烯醛	14.84	乙烯	12.83	戊醛	7.00
丙烯	8.75	甲苯	10.16	对/间-二甲苯	5.10
甲苯	7.98	丙烯	9.90	丙烯	5.03

正相关性，为 43%，RH 较高时污染物易二次转化^[44,45]，对 PM_{2.5} 浓度升高有一定影响。

O₃ 的生成主要受光化学反应和温度影响，由图 11 可知 O₃ 和 T 的正相关系数较高，为 62%。图 10 可看出，O₃ 浓度和 T 的变化趋势显著协同，午间高而凌晨和夜间降低，呈现峰值谷值交替变化的规律。值得注意的是在 1 月 7 ~ 9 日，O₃ 峰值相比

其他时段显著降低，由于该时段 T 降低，太阳辐射强度有所减弱^[46]，RH 在 75% 左右，且 RH 和 O₃ 呈显著负相关为 67%，由于高湿条件下气态污染物易转化为细颗粒物，且水汽较多使得云的分布范围更广，两者的消光效应降低了光化学反应强度^[47,48]，风速略有增强，有利于 O₃ 的前体物扩散稀释^[49]。

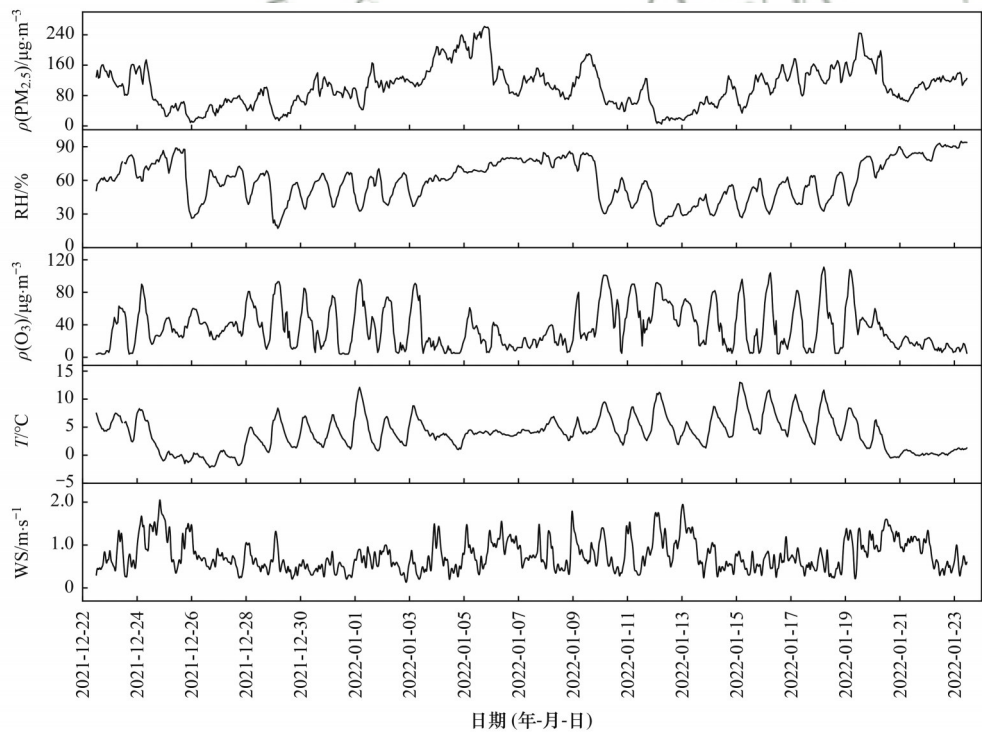


图 10 管控期 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度及气象要素变化

Fig. 10 Changes in PM_{2.5} and O₃ concentration and meteorological factors during the lockdown period

为对比气象要素对 PM_{2.5} 和 O₃ 污染的影响，统计管控期(D)和去年同期(C)气象要素不同区间污染物的浓度分布，由于不同时期气象条件波动较大，分别以 C、D 时期的 RH 和 T 的第 25%、50% 和 75% 分位数作为分界点，各自划分为 4 个区间(即 P1 ~ P25、P25 ~ P50、P50 ~ P75 和 P75 ~ P100，Pi 表示第 i 百分

位数)，保证每组数据量基本一致，见图 12。由图 12 (a)可看出，RH 在 P1 ~ P25、P25 ~ P50 和 P50 ~ P75 这 3 个区间内，管控期和去年同期的 PM_{2.5} 浓度依次递增，且管控期 PM_{2.5} 浓度平均值和最高值均高于去年同期，而 P75 ~ P100 区间内，管控期 PM_{2.5} 浓度有所降低。由图 12(b)可看出，T 在 P25 ~ P50、P50 ~

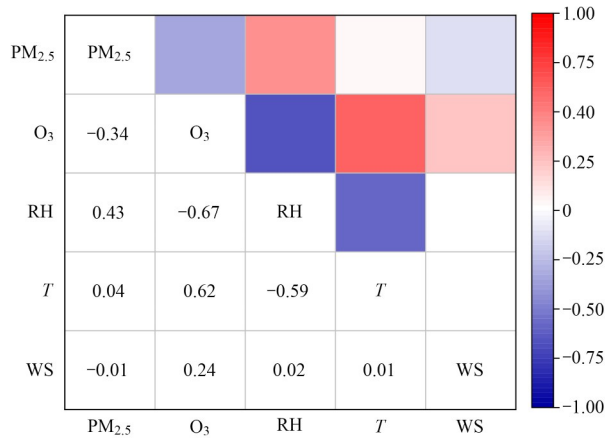


图 11 PM_{2.5}和 O₃及气象要素的皮尔逊相关矩阵
Fig. 11 Pearson correlation matrix of PM_{2.5} with O₃ and meteorological factors

P75 和 P75 ~ P100 这 3 个区间内，O₃浓度依次递增，且管控期 O₃均值和最高值均高于去年同期，第 4 个区间 O₃均值差距最为显著。以上分析表明，气象要素对于污染物浓度的影响并非简单线性关系，相对湿度在一定区间内即 RH < P75 时，PM_{2.5}浓度平均值随 RH 增大而升高；在较高温度范围即 T > P25，O₃浓度平均值随 T 升高而升高。

2.3.4 气团传输路径分析

为探究管控期和其他时期区域传输影响的差异性，以 PM_{2.5}为代表污染物，绘制不同时期西安 500 m 后向轨迹聚类见图 13，表 4 为不同时期气流轨迹

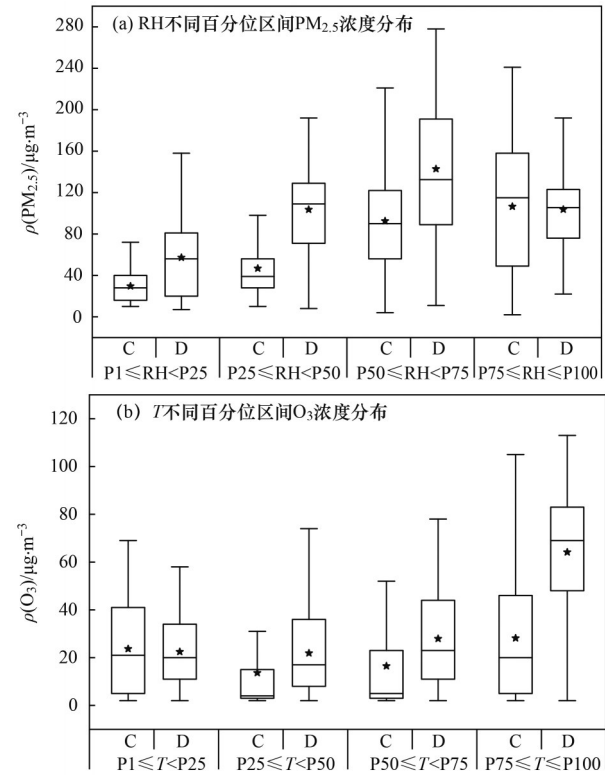


图 12 气象要素不同百分位区间对应的 PM_{2.5}和 O₃ 浓度分布
Fig. 12 Distribution of PM_{2.5} and O₃ concentrations corresponding to different percentile ranges of meteorological factors

途经地区、占比和 PM_{2.5}浓度平均值。管控期来自西安本地轨迹 1 的近距离传输占比最大，为 32.80%，且 ρ(PM_{2.5})平均值最高，为 126 μg·m⁻³，其次，来自

表 4 不同时期各类轨迹信息和 PM_{2.5} 浓度平均值

Table 4 Track information and PM_{2.5} mean concentration in different periods

时期	轨迹编号	气流轨迹途经地区	占比/%	ρ(PM _{2.5})平均值/ μg·m ⁻³
管控期	1	西安本地	32.80	126
	2	甘肃南和宝鸡	20.70	101
	3	郑州、洛阳和商洛	16.67	94
	4	内蒙西、宁夏北、甘肃东和咸阳	13.04	62
	5	内蒙西南、宁夏北和咸阳	10.48	71
	6	新疆东南、内蒙西南、宁夏中和咸阳	6.32	52
管控期的 2020年同期	1	甘肃北、内蒙西南、宁夏中和咸阳	31.32	49
	2	安康、商洛	30.38	141
	3	新疆北、甘肃、宁夏南和咸阳	21.51	40
	4	内蒙南、宁夏北和咸阳	16.80	98
管控前	1	内蒙西南、宁夏南、甘肃东和咸阳	29.70	82
	2	安康	22.98	83
	3	新疆东南、甘肃西北和宁夏南	19.09	42
	4	内蒙南、榆林、延安和渭南	17.07	56
	5	甘肃西北、内蒙西南和宁夏南	11.16	49
解封后	1	延安、铜川和渭南	26.04	97
	2	汉中和安康	19.35	95
	3	内蒙西南、宁夏中、甘肃东和咸阳	19.20	67
	4	河南西和商洛	18.45	85
	5	甘肃北、内蒙西南、宁夏中和咸阳	8.93	61
	6	新疆东、甘肃北、内蒙西南、宁夏南和咸阳	8.04	30

甘肃南途经宝鸡的轨迹2占比20.70%, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值为 $101 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 轨迹3来自河南北部开封, 途经洛阳、郑州和商洛, 此区域重污染企业较多, 且存在燃煤供暖, 污染物排放量大, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值为 $94 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 管控期的2020年同期轨迹2的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值最高, 为 $141 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占比30.38%, 来自安康和商洛的短距离传输; 管控前轨迹1、2的占比及 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值较为接近, 分别来自西北部区域和安康; 解封后轨迹1、2均来源于陕西省内, 途经延安、铜川、渭南、汉中和安康, 占比共计45.39%; 结合图12和表6可以看出, 不同时期来自新疆地区的长距离气流(图13中绿色线条)的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值

均为最低值, 推测由于此类气团移速较快, 且大多途经污染源较少的高原地区, 对西安地区的污染影响较小^[50].

综上所述, 与其他时期相比, 管控期本地贡献率较高, 占比32.80%, 且外来传输的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值显著升高, 推测由于管控期西安 O_3 浓度激增, 大气氧化性增强, 促进 $\text{PM}_{2.5}$ 的二次生成^[51,52], 且管控期存在两次重污染过程, 外来传输增强了 $\text{PM}_{2.5}$ 的不降反升情况, 其他研究也提到气团轨迹与区域污染传输的方向一致, 即气象条件会影响空间污染的联系强度, 因此实施区域联防联控对避免重污染天至关重要^[53,54].

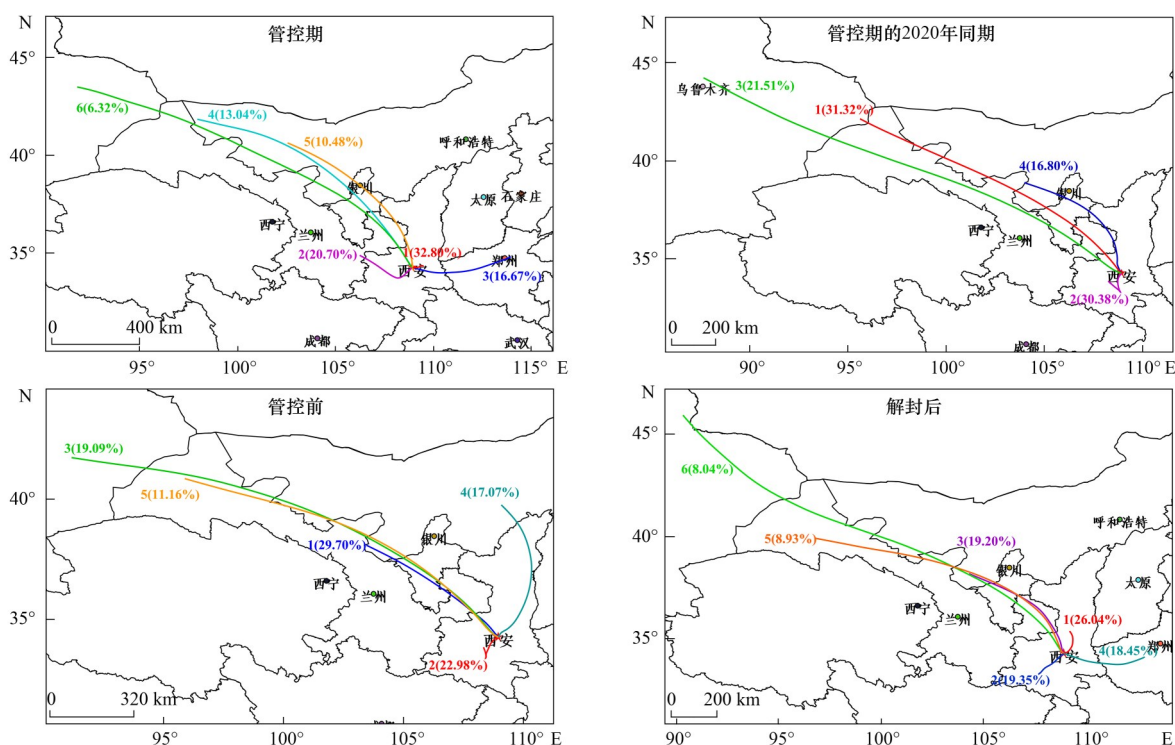


图13 不同时期西安500 m后向轨迹聚类

Fig. 13 Cluster plot of the 500m posterior trajectory in Xi'an in different periods

3 结论

(1) 管控期 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 _{8h-90per}浓度同比分别上升20.4%和23.7%, PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 和 $\text{CO}_{95\text{per}}$ 同比分别下降69.4%、56.6%、47.0%和6.3%, 综合指数下降12.5%; 对比前3 a同期, $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 贡献值升高, 而 PM_{10} 和 NO_2 贡献值下降显著。

(2) 时间序列特征为: 与管控前后时期相比, 管控期 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 日均值变化协同趋势减弱, O_3 激增且与 NO_2 的此消彼长趋势明显增强; 相比去年同期, 管控期 $\text{PM}_{2.5}$ 小时值升高11~19 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, O_3 小时值夜间18:00~23:00升幅增大, 为10~19 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 空间污染特征为: 污染物浓度变化呈现一定的空间

聚集协同性, 受地形及植被阻滞吸附影响, $\text{PM}_{2.5}$ 污染集中在北部, 由于城郊 NO_2 滴定效果弱于城区, 表现为南部郊区 O_3 污染较为严重。

(3) $\text{PM}_{2.5}$ 源解析结果表明: 管控期移动源对 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献降低, 化石燃料燃烧源和工艺过程源贡献升高; O_3 污染溯源显示: O_3 污染高值时段为VOCs控制区, 为防控疫情大量喷洒强氧化性的消杀剂使得含氧VOCs体积分数升高, 占比86.02%, O_3 前体物VOCs中乙醛、丙醛和丁烯醛是优先管控物种; 气象要素对于污染物浓度的影响并非简单线性关系, 在 $\text{RH} < \text{P75}$ 区间, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值随 RH 增大而升高, 在 $T > \text{P25}$ 区间, O_3 浓度平均值随 T 升高而升高; 聚类分析表明与其他时期相比, 管控期本地

贡献率较高, 为 32.80%, 由于管控期 O₃ 激增促进 PM_{2.5} 的二次生成, 区域重污染传输增强了 PM_{2.5} 的不降反升情况。

参考文献:

- [1] Chen Z F, Hao X Y, Zhang X Y, *et al.* Have traffic restrictions improved air quality? A shock from COVID-19 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **279**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123622.
- [2] Wang H L, Tan Y, Zhang L X, *et al.* Characteristics of air quality in different climatic zones of China during the COVID-19 lockdown [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, **12**(12), doi: 10.1016/j.apr.2021.101247.
- [3] 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.
- [4] Yang J P, Ji Q, Pu H Z, *et al.* How does COVID-19 lockdown affect air quality: Evidence from Lanzhou, a large city in Northwest China [J]. *Urban Climate*, 2023, **49**, doi: 10.1016/j.uclim.2023.101533.
- [5] 亓浩云, 王晓琦, 程水源. 基于 LSTM 算法和 WRF-CMAQ 模型的疫情期间邢台市不同因素对空气质量变化影响的定量分析 [J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(8): 3512-3521.
- Qi H Y, Wang X Q, Cheng S Y. Quantitative analysis of the impact of different factors on air quality changes in Xingtai city during the epidemic period based on LSTM algorithm and WRF-CMAQ model [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(8): 3512-3521.
- [6] 王爱平, 朱彬, 秦玮, 等. 新冠疫情严控期间南京市空气质量 [J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(7): 3088-3095.
- Wang A P, Zhu B, Qin W, *et al.* Air quality in Nanjing during COVID-19 lockdown period [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(7): 3088-3095.
- [7] 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.
- [8] 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 Y Y, 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.
- [9] Gao C C, Li S H, Liu M, *et al.* Impact of the COVID-19 pandemic on air pollution in Chinese megacities from the perspective of traffic volume and meteorological factors [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **773**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145545.
- [10] Chu B W, Zhang S P, Liu J, *et al.* Significant concurrent decrease in PM_{2.5} and NO₂ concentrations in China during COVID-19 epidemic [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **99**: 346-353.
- [11] 刘婵芳, 张傲星, 房庆, 等. 深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析 [J]. *环境科学*, 2023, **44**(6): 3117-3129.
- Liu C F, Zhang A X, Fang Q, *et al.* Impacts of COVID-19 lockdown on air quality in Shenzhen in spring 2022 [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(6): 3117-3129.
- [12] Wang S Y, Chu H J, Gong C Y, *et al.* The effects of COVID-19 lockdown on air pollutant concentrations across China: A Google Earth Engine-Based analysis [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, **19**(24), doi: 10.3390/IJERPH192417056.
- [13] Gharibvand L K, Jamali A A, Amiri F. Changes in NO₂ and O₃ levels due to the pandemic lockdown in the industrial cities of Tehran and Arak, Iran using Sentinel 5P images, Google Earth Engine (GEE) and statistical analysis [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2023, **37**(5): 2023-2034.
- [14] 代兴良, 宋国君, 姜晓群, 等. 新冠肺炎疫情对咸阳市空气质量的影响 [J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(7): 3106-3114.
- Dai X L, Song G J, Jiang X Q, *et al.* Impacts of the COVID-19 pandemic on air quality in Xianyang [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(7): 3106-3114.
- [15] 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.
- [16] 余锋, 李小飞, 李锦雯, 等. 新冠疫情对关中盆地空气质量的影响 [J]. *陕西科技大学学报*, 2021, **39**(4): 28-39.
- Yu F, Li X F, Li J W, *et al.* Effects of Corona virus disease 2019 on air quality in Guanzhong Basin [J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 2021, **39**(4): 28-39.
- [17] Shu L, Wang T J, Xie M, *et al.* Episode study of fine particle and ozone during the CAPUM-YRD over Yangtze River Delta of China: Characteristics and source attribution [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **203**: 87-101.
- [18] Wang G, Zhu Z Y, Liu Z L, *et al.* Ozone pollution in the plate and logistics capital of China: Insight into the formation, source apportionment, and regional transport [J]. *Environmental Pollution*, 2022, **313**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.120144.
- [19] Liu W J, Mao Y, Hu T P, *et al.* Variation of pollution sources and health effects on air pollution before and during COVID-19 pandemic in Linfen, Fenwei Plain [J]. *Environmental Research*, 2022, **213**, doi: 10.1016/j.envres.2022.113719.
- [20] Wang M, Lu S H, Shao M, *et al.* Impact of COVID-19 lockdown on ambient levels and sources of volatile organic compounds (VOCs) in Nanjing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **757**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143823.
- [21] 朱燕, 赵天良, 白永清, 等. 两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4669-4677.
- Zhu Y, Zhao T L, Bai Y Q, *et al.* Characteristics of atmospheric particulate matter pollution and the unique wind and underlying surface impact in the Twain-Hu Basin in winter [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4669-4677.
- [22] Zhao Z Z, Zhou Z M, Russo A, *et al.* Impact of meteorological conditions at multiple scales on ozone concentration in the Yangtze River Delta [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(44): 62991-63007.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Khan R, Kumar K R, Zhao T L. Assessment of variations of air pollutant concentrations during the COVID-19 lockdown and impact on urban air quality in South Asia [J]. *Urban Climate*, 2021, **38**, doi: 10.1016/j.uclim.2021.100908.
- [26] 尹晓梅, 李梓铭, 乔林, 等. 北京冬季疫情期间空气质量及气象影响分析 [J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(5): 1985-1994.
- Yin X M, Li Z M, Qiao L, *et al.* Effect analysis of meteorological conditions on air quality during the winter COVID-19 lockdown in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(5): 1985-1994.
- [27] 李政. 新冠肺炎疫情期间聊城市单颗粒气溶胶的污染特征与来源 [D]. 聊城: 聊城大学, 2022.

- Li Z. The pollution characteristics and sources of atmospheric single particles in Liaocheng during the COVID-19 event[D]. Liaocheng: Liaocheng University, 2022.
- [28] Fang C S, Wang L Y, Li Z Q, *et al.* Spatial characteristics and regional transmission analysis of PM_{2.5} pollution in Northeast China, 2016-2020 [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, **18** (23), doi: 10.3390/ijerph182312483.
- [29] 李磊, 赵玉梅, 王旭光, 等. 廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4100-4107.
- Li L, Zhao Y M, Wang X G, *et al.* Influence factors and sensitivity of ozone formation in Langfang in the summer [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4100-4107.
- [30] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [31] Zhang C Y, Luo S Z, Zhao W T, *et al.* Impacts of meteorological factors, VOCs emissions and inter-regional transport on summer ozone pollution in Yuncheng [J]. *Atmosphere*, 2021, **12** (12), doi: 10.3390/atmos12121661.
- [32] 刘敬乐, 史静, 姚青, 等. 天津大气扩散条件对污染物垂直分布的影响研究[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(4): 1575-1584.
- Liu J L, Shi J, Yao Q, *et al.* Effects of atmospheric diffusion conditions on vertical distribution of pollutants in Tianjin[J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(4): 1575-1584.
- [33] Shai S E, Mejjad N, Norelyaqine A, *et al.* Air quality change during the COVID-19 pandemic lockdown over the Auvergne-Rhône-Alpes region, France [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2021, **14**(5): 617-628.
- [34] Shi Z B, Song C B, Liu B W, *et al.* Abrupt but smaller than expected changes in surface air quality attributable to COVID-19 lockdowns [J]. *Science Advances*, 2021, **7** (3), doi: 10.1126/sciadv.abd6696.
- [35] 余倩楠, 徐茜, 周陶冶, 等. 长三角地区2015年大气重污染特征及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(8): 3185-3196.
- She Q N, Xu Q, Zhou T Y, *et al.* Characteristics of heavy air pollution episode and its impacting factors in the Yangtze River Delta during 2015 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38** (8): 3185-3196.
- [36] Sbrinowska M, Andova V, Mateska A K, *et al.* The effect of small green walls on reduction of particulate matter concentration in open areas[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **279**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123306.
- [37] Zhang S X, Zhang Z Z, Li Y, *et al.* Formation processes and source contributions of ground-level ozone in urban and suburban Beijing using the WRF-CMAQ modelling system [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2023, **127**: 753-766.
- [38] 刘彬. 西安市机动车污染排放及其对空气质量的潜在影响[D]. 西安: 陕西师范大学, 2020.
- [39] Malinović-Miličević M S, Doljak D, Stanojević G, *et al.* Impact of the COVID-19 restrictive measures on urban traffic-related air pollution in Serbia [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, **10**, doi: 10.3389/FENV.2022.823973.
- [40] Zhang M, Jia J, Wang B, *et al.* Source apportionment of fine particulate matter during the day and night in Lanzhou, NW China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, **19**(12), doi: 10.3390/IJERPH19127091.
- [41] Lu B Q, Zhang Z K, Jiang J K, *et al.* Unraveling the O₃-NO_x-VOCs relationships induced by anomalous ozone in industrial regions during COVID-19 in Shanghai [J]. *Atmospheric Environment (Oxford, England: 1994)*, 2023, **308**, doi: 10.1016/J.ATMOENV.2023.119864.
- [42] 陈曦, 李杏茹. 大气中挥发性含氧有机物研究进展[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2018, **39**(3): 45-55.
- Chen X, Li X R. Study advance on oxygenated volatile organic compounds in atmosphere[J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, **39**(3): 45-55.
- [43] 郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 基于模式过程分析技术天津地区PM_{2.5}污染气象成因分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2373-2382.
- Hao J, Cai Z Y, Han S Q, *et al.* Research on causes of severely polluted weather in Tianjin based on process analytical technology [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2373-2382.
- [44] Feng X Y, Wei S M, Wang S G. Temperature inversions in the atmospheric boundary layer and lower troposphere over the Sichuan Basin, China: Climatology and impacts on air pollution [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **726**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138579.
- [45] Shao M, Xu X Y, Lu Y T, *et al.* Spatio-temporally differentiated impacts of temperature inversion on surface PM_{2.5} in eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **855**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158785.
- [46] 宋晓伟, 郝永佩, 朱晓东, 等. 临汾市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(8): 3626-3634.
- Song X W, Hao Y P, Zhu X D, *et al.* Variations in ozone pollution and their meteorological influences and transmission sources in Linfen city of China [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42** (8): 3626-3634.
- [47] 黄俊, 廖碧婷, 王春林, 等. 广州逐时臭氧污染气象条件指数研究及应用[J]. *环境科学学报*, 2023, **43**(1): 63-75.
- Huang J, Liao B T, Wang C L, *et al.* Meteorological condition index (MCI) for hourly ozone pollution in Guangzhou: Development and application [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, **43**(1): 63-75.
- [48] 钱悦, 许彬, 夏玲君, 等. 2016~2019年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2190-2201.
- Qian Y, Xu B, Xia L J, *et al.* Characteristics of ozone pollution and relationships with meteorological factors in Jiangxi province [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2190-2201.
- [49] 符传博, 徐文帅, 丹利, 等. 2015~2020年海南省臭氧时空变化及其成因分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 675-685.
- Fu C B, Xu W S, Dan L, *et al.* Temporal and spatial variations in ozone and its causes over Hainan province from 2015 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 675-685.
- [50] 李培荣, 姚静, 张熙庭, 等. 西安冬季不同环流形势下大气细颗粒物的输送特征研究[J]. *陕西气象*, 2022, (4): 7-14.
- Li P R, Yao J, Zhang X T, *et al.* Study on the transport of atmospheric fine particles under different circulation in winter in Xi'an [J]. *Journal of Shaanxi Meteorology*, 2022, (4): 7-14.
- [51] 张晨悦. 伦敦疫情封控期间O₃激增成因及其对二次PM_{2.5}生成影响研究[D]. 西安: 西北大学, 2022.
- Zhang C Y. Study on the causes of O₃ surge and its impact on PM_{2.5} during the COVID-19 lockdown in London [D]. Xi'an: Northwest University, 2022.
- [52] 姜楠, 郝雪新, 郝祺, 等. COVID-19管控前后不同污染阶段PM_{2.5}中二次无机离子变化特征[J]. *环境科学*, 2023, **44**(5): 2430-2440.
- Jiang N, Hao X X, Hao Q, *et al.* Changes in secondary inorganic ions in PM_{2.5} at different pollution stages before and after COVID-19 control [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 2430-2440.
- [53] 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 等. 石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演变特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 2679-2690.
- Wang S, Nie S S, Feng Y P, *et al.* Spatio-temporal evolution characteristics and source apportionment of O₃ and NO₂ in Shijiazhuang [J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (6): 2679-2690.
- [54] Zhao W, Tang G Q, Yu H, *et al.* Evolution of boundary layer ozone in Shijiazhuang, a suburban site on the North China Plain [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **83**: 152-160.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i>	(1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie	(1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan	(1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i>	(1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu	(1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i>	(1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping	(1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao	(1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shangdong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing	(1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i>	(1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i>	(1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i>	(1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i>	(1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i>	(2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i>	(2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i>	(2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i>	(2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i>	(2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i>	(2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i>	(2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i>	(2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua	(2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i>	(2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i>	(2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i>	(2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin	(2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i>	(2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i>	(2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i>	(2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i>	(2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i>	(2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei	(2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i>	(2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i>	(2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i>	(2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i>	(2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i>	(2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i>	(2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i>	(2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i>	(2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i>	(2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i>	(2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng	(2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i>	(2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i>	(2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i>	(2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yu, LI Zhi-xian, <i>et al.</i>	(2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i>	(2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i>	(2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i>	(2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i>	(2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i>	(2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i>	(2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i>	(2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i>	(2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i>	(2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i>	(2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seeding Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i>	(2480)