

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例 杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)

基于不同电力需求的中国减污降碳协同增效路径 向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)

城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用 张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)

基于可解释性机器学习的城市 O₃ 驱动因素挖掘 董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)

基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析 朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)

基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O₃ 来源解析 王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)

基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测 朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)

2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析 李婉苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)

夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响 杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)

气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别 杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)

2000~2021 年成渝城市群 PM_{2.5} 时空变化及驱动机制多维探测 徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)

基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM_{2.5} 小时浓度估算 吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)

2013~2021 年邢台 PM_{2.5} 重污染过程输送和增长特性 江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)

基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源 朱书慧 (3760)

机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征 于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢锋, 曹芳, 章炎麟 (3771)

沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献 关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)

疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估 云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)

西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势 王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)

淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价 徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)

雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应 王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)

流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例 刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)

南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化 郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)

闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析 杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)

金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素 燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)

嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性 竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郑伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)

水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响 王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)

典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探 吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)

太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响 俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)

基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算 张育福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)

千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别 俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)

沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征 李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)

外秦淮河底泥污染及疏浚效果 张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)

新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为 葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)

镉在针铁矿界面共吸附的相互作用机制 苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)

环糊精键合 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H₂O₂ 氧化水中有机微污染物 刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)

Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制 朱敬林, 汪舒 (3990)

微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征 谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)

中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价 王静, 魏恒, 潘波 (4006)

渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价 蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)

基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例 方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)

乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价 范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)

荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制 黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)

近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展 赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)

改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展 吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)

沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析 赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)

两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果 梁成冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)

秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响 王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)

秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质 赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)

基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断 黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)

地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (4142)

浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险 张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)

生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响 刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)

低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响 周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡廷江 (4170)

沼液施用对麦茬茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响 乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)

大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征 刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)

马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响 姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)

《环境科学》征订启事(3648) 《环境科学》征稿简则(3659) 信息(3714, 4150, 4178)

气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018 ~ 2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别

杨俊¹, 杨雷峰², 丁华^{3*}, 谢丹平^{2*}, 刘妍妍³, 余涛³, 吕明³, 袁自冰¹

(1. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 2. 生态环境部华南环境科学研究所华南生态环境监测分析中心(南海生态环境监测评价研究中心), 广州 510655; 3. 湖南省生态环境监测中心, 长沙 410014)

摘要: 针对湖南省臭氧(O₃)污染加剧但是相关的研究较为缺乏的现状,以长沙市为研究区域,基于观测数据,结合气象校正、基于经验的模型(EOF)和绝对得分受体模型(APCs),识别量化了2018~2020年气象、本地光化学生成和外围传输对O₃污染相对贡献的影响,分析了2018~2019年和2019~2020年O₃趋势变化的主控因素.结果表明,短期范围内,气象条件是O₃污染事件发生的重要诱发因素.对长沙市整体来说,在时间上,2018~2019年期间,气象和本地前体物排放影响作用的增强是O₃浓度升高的关键驱动因子.2019~2020年期间,气象、本地前体物排放和外围传输影响均呈现下降的趋势,是导致O₃浓度降低的重要影响因素.空间上,2018~2020年时间段,气象、本地前体物排放和外围传输主要影响区域分别为长沙市偏东、偏北和偏南部区域.其中,外围传输的作用持续减弱,2018~2019年期间,长沙市北部天然源排放水平的升高使得O₃浓度上升,南部区域NO_x排放量升高导致滴定作用加强,使得O₃浓度降低,在此期间气象条件对整个区域的影响作用增强.2019~2020年期间,本地前体物排放水平不同的变化趋势使得对长沙市O₃浓度的影响与2018~2019年状况相反,在此期间气象条件的影响作用减弱.

关键词: 臭氧; 气象校正; 本地排放影响; 外围传输; 主控因素

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-3715-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202207262

Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020

YANG Jun¹, YANG Lei-feng², DING Hua^{3*}, XIE Dan-ping^{2*}, LIU Yan-yan³, YU Tao³, LÜ Ming³, YUAN Zi-bing¹

(1. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. South China Center of Ecological Environmental Monitoring and Analysis (South China Sea Research Center of Ecological Environmental Monitoring and Evaluation), South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655, China; 3. Hunan Ecological and Environmental Monitoring Center, Changsha 410014, China)

Abstract: Ozone (O₃) pollution in Hunan province has become the most important factor among the six common conventional pollutants (i. e., NO₂, SO₂, CO, O₃, PM₁₀, and PM_{2.5}) in the atmospheric environment. Further investigation has indicated that the relevant studies of O₃ are insufficient. Therefore, it is essential to clarify the key driving factors of O₃ variations for government regulators. In this study, a combined method consisting of a generalized additive model (GAM), empirical orthogonal function (EOF), and absolute principal component scores (APCs) model was employed to identify and quantify the impacts of meteorology and local photochemical generation (local) and that transported from outside (nonlocal) on O₃ variations from 2018-2020. Simultaneously, the driving factors of O₃ annual values from 2018 to 2019 and from 2019 to 2020 in Changsha were analyzed. The results showed that O₃ episodes were commonly caused by meteorology when the relative contribution from precursors was high, on the short-term time scale. Overall, on the temporal scale, meteorology and local were the driving factors for the increasing annual O₃ from 2018 to 2019. Additionally, the contribution from meteorology, local, and nonlocal decreased from 2019 to 2020, leading to a lower level of O₃ concentration in 2020. Geographically, the east, north, and south of Changsha were mainly affected by meteorology, local, and nonlocal, respectively. Throughout the three years, nonlocal exhibited a sustained decreasing trend, whereas the tendencies from meteorology and local varied by year and geography. Local contribution in the north of Changsha increased from 2018 to 2019, which was likely attributed to the increasing biogenic volatile organic compound emission (BVOCs), and it became lower in the south owing to the strengthened consumption by NO_x. Impacts from meteorology on O₃ in all sites were enhanced from 2018 to 2019. By contrast, local contribution decreased in the north and increased in the south with the decline in BVOC and NO_x emissions from 2019 to 2020, when the meteorological impacts on O₃ in the whole area became weak.

Key words: ozone (O₃); meteorological adjustment; local impacts; nonlocal; driving factors

随着我国经济的快速发展,工业化和城市化进程快速推进,我国大气环境质量的迅速恶化是由此导致的不良影响结果之一^[1,2].在环保部门和相关法规的严格约束下,以颗粒物为代表的大气污染物恶化的态势得到有效地遏制,且呈现逐年下降的趋势.但是与此同时,臭氧(O₃)污染的浓度不但没有降低,反而呈现波动上升的趋势,已经成为我国重要城市群大气环境的首要污染物^[3~5],厘清O₃趋势变

化的影响因素对于评估以往防控措施成效和制定下一步减排方案均具有重要的参考意义.

近地面O₃是其前体物氮氧化物(NO_x)和挥发

收稿日期: 2022-07-27; 修订日期: 2022-09-26

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(PM-zx703-202201-005); 2021年湖南省环保科研项目(HBKT-2021019)

作者简介: 杨俊(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气污染成因机制分析, E-mail: 18779478518@163.com

* 通信作者, E-mail: 345489954@qq.com; xiedanping@scies.org

性有机物(VOCs)在紫外光等气象条件的作用下发生光化学反应的产物,在前体物不同排放比例下, O_3 生成与前体物之间呈现高度非线性的关系^[6,7],再加上 O_3 的光化学寿命较长,在区域之间可做相互传输,导致其浓度受气象、本地光化学生成和外围传输综合作用的影响^[8~10],因此 O_3 污染趋势变化的原因分析需要对三要素的相对贡献予以识别量化。

传统上,基于排放源清单的空气质量模型是用于识别 O_3 污染影响因素最常用的技术手段^[11~13]。近些年来,随着观测数据的增多,一些数学模型如广义相加模型(generalized additive models, GAM)、神经网络和多元线性回归等被用来识别气象和前体物排放对 O_3 污染的影响(气象校正)^[14~19],基于经验的模型(empirical orthogonal function, EOF)是“臭氧污染源解析技术指南”指定的识别本地光化学生成和外围传输的影响方法之一^[20]。Yang等^[21]结合气象校正、 O_3 源解析(EOF)和绝对得分受体模型(absolute principal component score, APCs)技术手段,对珠三角区域的情况进行研究,发现长期范围内气象条件抑制了 O_3 污染的上升,由于 O_3 生成机制的差异,本地光化学生成对不同区域的影响有较大的差异。

长沙市作为湖南省的省会,近些年来 O_3 污染年际值呈现持续上升的态势^[22],严重影响着当地大气环境质量的持续改善。自2018年始,长沙市采取了多种大气污染前体物管控措施,如划定高污染燃料禁燃区、重点行业工业企业挥发性污染深度治理和加油站油气回收等措施^[23]。截至到2020年,监测数据显示 O_3 污染年际值有所下降^[24],但是在此期间,关于气象、本地光化学生成和外围传输对 O_3 污染趋势变化的影响的报道较为缺乏。针对该现状,以长沙市为研究区域,基于观测数据和结合多种数学模型,量化了2018~2020年期间长沙市不同区域气象、本地光化学生成和外围传输的相对贡献,结合

O_3 的生成机制状况,分析了长沙市不同区域 O_3 污染浓度趋势变化的主控因素,以期为该区域 O_3 污染的防控工作提供参考和建议。

1 材料与方法

1.1 研究区域和数据

本研究以长沙市10个子站作为对象,其具体区域位置、站点名称、字母缩写以及经纬度信息如图1和表1所示。收集了来自湖南省环境监测中心2018~2020年 O_3 、 NO_x 和CO这3个指标的逐小时监测数据,观测值与剩余数据均值的偏差超过3倍标准差时作为缺失值进行处理,根据缺失值所处年份、月份、天、星期和小时的均值状况进行补全^[14,21]。由于1月份数据缺失较多,保留了2~12月的数据,取日际值用于建模分析,其中 O_3 污染浓度取日8h滑动平均最大值(daily maximum 8-hour average concentration, MDA8), NO_x 和CO取日均值。在分析年际值的趋势变化时, O_3 、CO和 NO_x 分别取日值的第90百分位数、第95百分位数和均值。

表1 研究区域站点经纬度信息

Table 1 Longitudes and latitudes of different sites involved			
站点	缩写名	经度/(°)	纬度/(°)
高新区环保局	GKHB	112.89	28.22
湖南师范大学	HNSD	112.94	28.19
湖南中医药大学	HNZY	112.89	28.13
火车新站	HXCZ	113.00	28.19
经开区环保局	JKHB	113.08	28.23
马坡岭	MPL	113.08	28.21
沙坪	SP	112.96	28.36
天心区环保局	TXHB	112.98	28.12
伍家岭	WJL	112.98	28.26
雨花区环保局	YHBB	113.02	28.13

选取欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)ERA5气象再分析数据资料中风(10 m高横向风 u 和纵向风 v)、近地面气压、地表紫外辐射、地表太

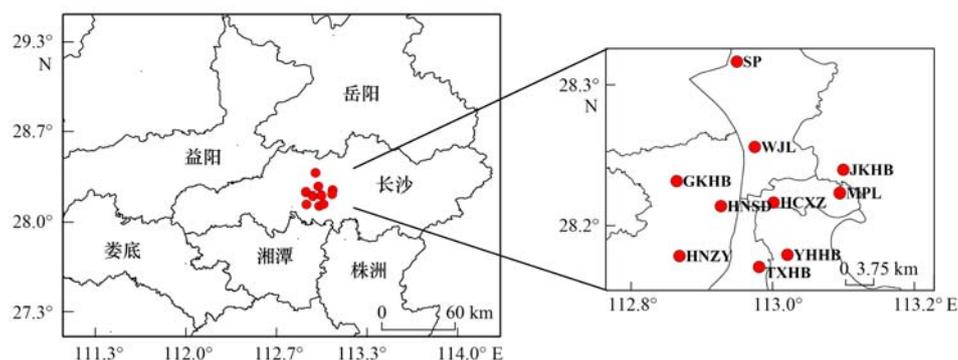


图1 研究区域和站点空间分布

Fig. 1 The area and spatial distribution of ozone monitoring sites in the study

阳净辐射、总云量、温度、边界层高度和露点这 9 项指标的数据(时间和空间分辨率分别为 1 h 和 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$), 其中风、近地面气压、紫外辐射、太阳辐射和总云量取日际小时均值, 温度和边界层高度取日际小时最大值, 相对湿度由温度和露点计算得到取其日际小时值最小值^[21,24], 根据临近原则对 O_3 和气象数据进行匹配。

选取长沙高新区 9 月 57 种 O_3 前体物 VOCs 组分(PAMS)逐小时在线观测数据对长沙市的 O_3 生成机制进行识别, 剔除缺失数据, 最终保留了 43 种 VOCs 组分。

1.2 研究方法

在本研究中, 利用 GAM 对气象的相对贡献予以剥离, 以得到前体物排放对 O_3 的相对贡献。在此基础上, 利用 EOF 和 APCs 识别量化本地前体物排放和外围传输的影响, 以分析 O_3 浓度趋势变化原因, 具体方法如下。

1.2.1 广义相加模型(GAM)

GAM 表达形式如公式(1)所示:

$$g(\mu) = S_0 + S_1(X_1) + S_2(X_2) + \dots + S_p(X_p) + S(c) \quad (1)$$

式中, $g(\mu)$ 为因变量的连结函数, $S_p(X_p)$ 和 $S(c)$ 为第 p 个变量和分类变量的未知非参数光滑函数, S_0 为截距, 该模型拟合的是表征因变量和自变量函数之间的关系, 能够真实地反映出自变量对因变量的非线性影响, 在大气环境污染研究领域具有广泛的应用^[14,17,21,24]。本文利用 GAM 来识别量化气象和前体物排放波动变化对大气污染的影响(即气象校正), 方法如公式(2)和公式(3):

$$n = S_0 + \sum_{i=1}^p S_i(X_i) \quad (2)$$

$$\varepsilon = g(\mu) - n \quad (3)$$

式中, n 为模型的预测值, 反映的是气象波动对污染物的影响, i 为第 i 个变量(气象和分类变量年份), ε 为利用公式(1)和公式(2)计算得到模型的残差, 反映的是前体物排放波动的影响^[21,24]。本研究过程中以 2018 年气象状况的平均值作为基准进行气象校正。

1.2.2 基于经验的模型(EOF)和绝对得分受体模型(APCs)

本地范围内, 不同站点前体物排放状况有较大差异, 使得其对不同区域 O_3 的影响不同。外围传输是上风向 O_3 及其前体物在大尺度环流作用下的结果, 其明显的特征是对一个区域不同站点的影响具有一定的共性特征。因此, 根据本地光化学生成和外围传输对不同站点 O_3 浓度影响的特

征不同, 可对不同因子的物理意义予以识别, EOF 是常用方法之一^[25-27], 在此基础上利用 APCs 便可对不同因子的贡献进行量化, 其表达如公式(4)和公式(5)所示:

$$Z_{it} = (C_{it} - C_i) / S_i \quad (4)$$

$$Z_{it} = L_i \cdot P_i \quad (5)$$

$$(Z_0)_i = \frac{(0 - C_i)}{S_i} = -C_i / S_i \quad (6)$$

$$APCs_i = P_i - P_{0i} \quad (7)$$

$$C_i = (b_0)_i + \sum APCs \cdot b_i \quad (8)$$

式中, C_{it} 和 Z_{it} 为第 i 个站点第 t 个时间点 O_3 浓度归一化的值, C_i 和 S_i 为第 i 个站点 O_3 浓度的均值和标准差, L_i 为第 i 个主因子的载荷以及 P_i 是因子的得分。之后再利用 APCs 对每个因子的贡献进行计算, 如公式(6)~(8)所示, $(Z_0)_i$ 为第 i 个站点引入的 0 样本标准化的值, $APCs_i$ 、 P_i 和 P_{0i} 分别为第 i 个因子的绝对得分、原始数据和 0 样本的得分, $(b_0)_i$ 为回归参数, $\sum APCs \cdot b_i$ 为因子对每个站点所承担的贡献^[21]。

1.2.3 基于观测数据的模型(observation-based model, OBM)

为更好地分析 O_3 污染浓度空间分布和趋势变化的原因, 利用 OBM 对 O_3 的生成机制进行识别。OBM 是以观测数据(O_3 、气象、 NO_x 和 VOCs)为基础, 采用多种化学机制(MCM、CBM 和 RACM 等, 本研究采用 MCM 机制), 模拟大气污染物光化学反应过程的盒子模型。相对增量反应活性(relative incremental reactivity, RIR)是其核心概念, 反映的是 O_3 光化学生成对前体物排放变化的敏感性^[28,29], 计算方法如公式(9)所示:

$$RIR(x) = \frac{P_{O_3-NO(x)} - P_{O_3-NO(x-\Delta x)}}{P_{O_3-NO(x)}} \bigg/ \frac{\Delta S(x)}{S(x)} \quad (9)$$

式中, $RIR(x)$ 为物种 x 的相对增量反应活性, x 为特定组分, Δx 为物种 x 排放的变化量, $P_{O_3-NO(x)}$ 为 O_3 生成减去 NO 对 O_3 的消耗速率(O_3 净生成), $P_{O_3-NO(x-\Delta x)}$ 是物种 x 变化 Δx 后的 O_3 净生成, $S(x)$ 是物种的排放总量, $\Delta S(x)$ 是排放总量的变化。对 NO_x 和人为源(除天然源异戊二烯外的物种)分别削减 15% 以计算 RIR, RIR 为正和负值时分别表明 O_3 生成与前体物排放量呈现正和负相关的关系。

利用 R 语言进行数据分析建模以及绘图, 利用 ArcGIS(10.2)进行空间插值(反距离法, IDW)可视化展示。

2 结果与讨论

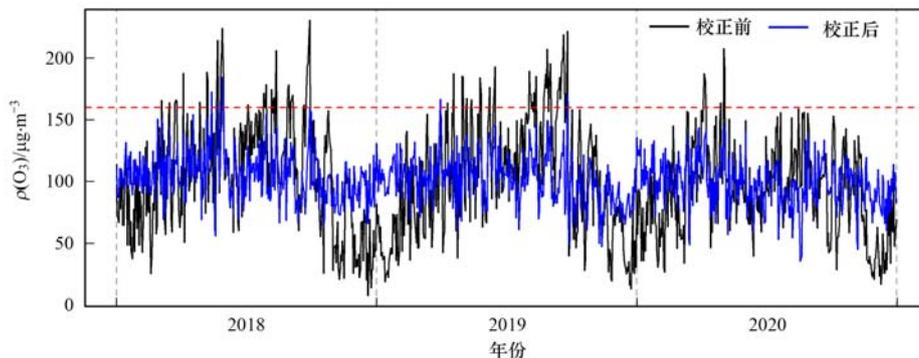
2.1 气象校正前后臭氧浓度时间和空间演化特征

2.1.1 2018~2020年气象校正前后臭氧浓度时间变化特征

长沙市 10 个站点气象校正前后的时间变化平均状况如图 2 所示,2018~2020 年期间,原始 O_3 浓度波动幅度为 $0 \sim 250 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,去除气象波动影响之后(气象校正),其上下波动的范围为 $50 \sim 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,说明气象条件是造成 O_3 极值发生的重要驱动因素。一般来说,在短期范围内一个区域前体物

排放状况相对稳定^[30],因前体物排放变化导致的 O_3 浓度波动的幅度相对较小,而气象条件则可能发生较大变化,不利的气象条件如强辐射、高温、干旱、弱风等可使得 O_3 浓度急剧升高。如图 2 所示,在去除气象条件波动影响状况下, O_3 浓度几乎全部低于国家二级标准($160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), O_3 超标事件(浓度高于 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)往往是在前体物排放影响较大情况下,不利的气象条件诱发所致^[21],因此建立基于气象状况变化的 O_3 前体物减排预案对 O_3 污染防治具有重要意义。

2018~2020年长沙市气象校正前、后和气象影



黑色实线、蓝色实线分别表示 O_3 浓度气象校正前、后的时间序列,红色虚线标注的是环境空气中 O_3 浓度二级标准限值($160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

图 2 2018~2020年长沙市 O_3 浓度气象校正前、后时间序列趋势变化平均状况

Fig. 2 Time series of ozone concentration before and after meteorological adjustment in Changsha from 2018 to 2020

响年际值趋势变化如图 3 所示。3 个时间段内,气象校正之前 O_3 浓度整体呈现先上升后下降的趋势,气象校正之后 O_3 年际值随时间波动的幅度显著降低 ($P < 0.05$),说明气象条件的波动是导致 2019 年 O_3 浓度高值和 2020 年低值的重要原因,监测数据显示 2019 年 9 月,我国范围内(包括湖南省)温度较常年同期偏高 $2 \sim 4^\circ\text{C}$,与此同时伴随着降雨偏少、湿度低、高辐射和低云量的气象状况,2020 年气象条件异常状况有所缓解^[31,32],该现状与气象条件对 O_3 污染的影响状况保持一致。进一步分析结果显示,2018~2019 年气象影响使得 O_3 浓度年际值增加了 $8.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,前体物排放的影响呈现略微下降的趋势,2019~2020 气象影响使得 O_3 浓度年际值下降了 $22.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,前体物排放的影响下降了 $6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,因此,该时间段气象条件是导致长沙市 2019 年 O_3 浓度上升和 2020 年 O_3 浓度下降的关键驱动因素。

2.1.2 气象校正前后臭氧浓度和气象影响空间分布特征

不同站点气象校正前后 O_3 浓度和气象影响均空间分布整体状况如图(4)所示。 O_3 原始浓度[图 4(a)]高值主要集中在偏东南区域,以 MPL 站点 $\rho(O_3)$ 最高,为 $160.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,低值处于中部,以

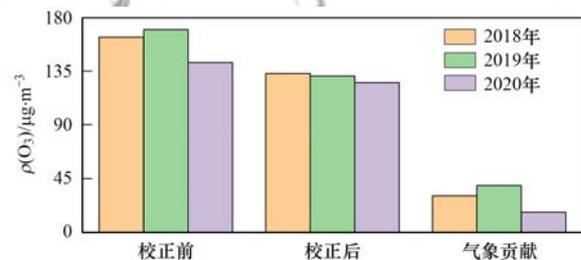


图 3 2018~2020年长沙市气象校正前、后及气象贡献的 O_3 浓度年际值整体趋势变化

Fig. 3 Annual variations in ozone concentration before and after meteorological adjustment and meteorological impacts in Changsha from 2018 to 2020

HNZY 站点 $\rho(O_3)$ 最低,为 $156.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [图 4(a)]. O_3 浓度高值空间分布整体上与 NO_x 呈现相反的趋势(图 5),这是因为长沙市 O_3 生成整体上以 VOCs 控制区为主(O_3 高值月份 VOCs 和 NO_x 的 RIR 分别约为 1.5 和 -0.5),中部区域(WJL、HNSD、HNZY 和 WJL)较高的 NO_x 排放对 O_3 起消耗作用。东南区域(MPL、YHHB 和 TXHB) NO_x 排放相对较低,对 O_3 的消耗作用较少,再加上风向湘潭和株洲等区域 O_3 及其前体物传输作用的影响^[24],使得长沙市东南区域 O_3 浓度较高。

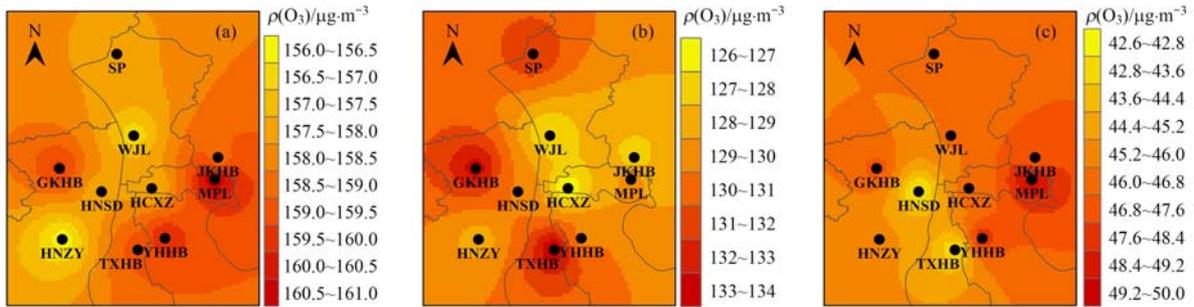
气象校正之后, O_3 浓度高低值空间分布发生了

变化,高值和低值分别处于西部和东部区域[图 4 (b)],气象主要影响的为东部区域[图 4(c)],这主要是因为东部区域前体物排放相对较多,由于 O_3 是其前体物光化学反应的产物,其浓度累积受气象作用的影响,在 O_3 前体物排放较多的区域,气象对 O_3 的影响程度越大^[33,34].

2.2 2018 ~ 2020 年本地前体物光化学生成和外围传输影响的时空演化特征

2.2.1 本地前体物排放和外围传输影响的识别和量化

气象校正去除了气象波动对 O_3 趋势变化的影响,得到的 O_3 浓度时间序列反映的是前体物排放相



(a)、(b)和(c)分别表示气象校正前、后及气象贡献的 O_3 浓度

图 4 2018 ~ 2020 气象校正前、后及气象贡献的 O_3 浓度年际值空间分布整体状况

Fig. 4 Spatial distribution of ozone annual concentration before and after meteorological adjustment and meteorological impacts from 2018 to 2020

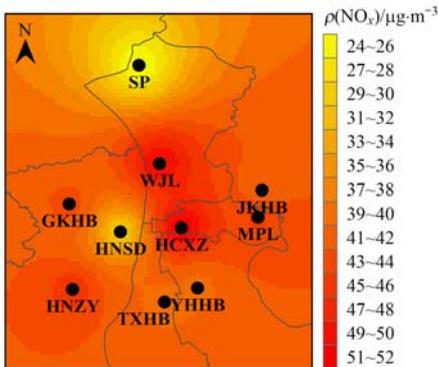
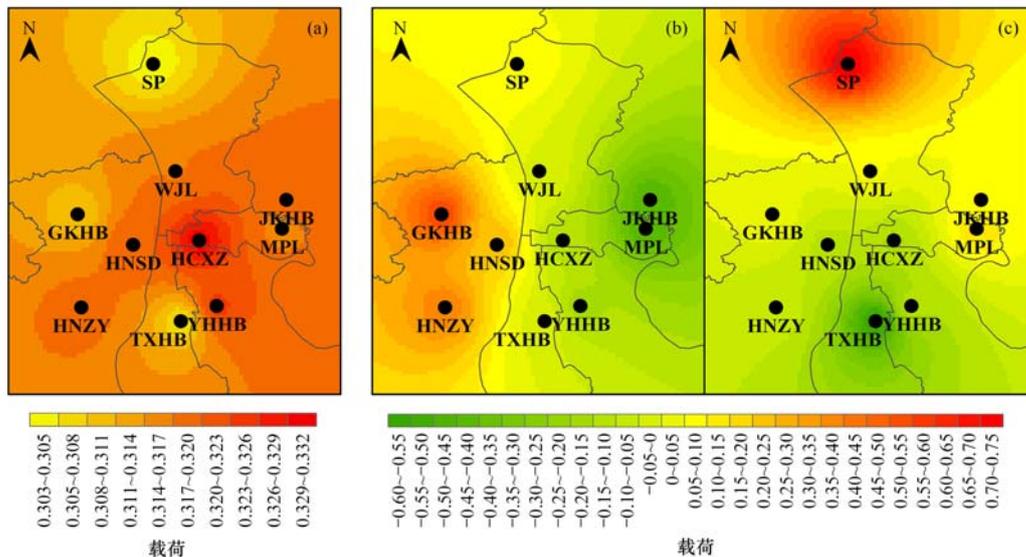


图 5 2018 ~ 2020 年 NO_x 浓度年际值空间分布整体状况

Fig. 5 Overall spatial distributions of NO_x annual average from 2018 to 2020

对贡献的趋势变化,由于其是本地前体物光化学生成和外围传输影响作用的叠加结果,本文利用 EOF + APCs 模型对两者进行识别和量化. 最终保留了 3 个因子,共计解释了原始变量 81% 的方差解释比(图 6),第一因子载荷值的大小范围为 0.30 ~ 0.33 [图 6(a)],方差解释比为 72%. 大小较为一致的载荷值表明,该因子对不同站点的影响状况具有一定的共性,推断其为在大尺度风的作用下外围传输的影响. 第二因子和第三因子载荷在空间上分别呈现出东西和南北方位正负值不同的差异 [图 6(b)和 6(c)],说明在同一时间内,这两个因子对不同区域的影响状况截然相反,这是因为,一方面,本地范围



(a)、(b)和(c)分别表示第一、第二和第三因子

图 6 EOF 模型不同因子载荷值大小空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of different principal components loadings of EOF

内 O_3 生成机制存在差异,本地排放的前体物对排放区域附近和下风向的影响状况有所不同,另一方面,本地范围内 O_3 污染的传输会使得上风向 O_3 浓度降低,下风向浓度升高,因此将具有这种载荷值属性的因子归为本地前体物排放的影响. 研究过程中,本地前体物排放的相对贡献为原始数据与外围传输贡献的差值^[21,24,35].

2.2.2 2018~2020年本地前体物排放和外围传输影响的时空演化

本地前体物排放和外围传输影响年际值整体趋势变化及其空间分布如图7和图8所示. 整体上,随着时间变化,本地前体物排放的影响则呈现先上升后下降的趋势,外围传输的影响则逐年下降. 具体地,2018~2019年时间段本地影响增加了 $3.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,外围传输下降了 $4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,2019~2020年时间段,两者均呈现出下降的趋势. 结合2.1.1节研究结果可推断出,2018~2019年导致 O_3 浓度上升的关键驱动因素为气象和本地前体物排放的影响,外围传输在一定程度上抑制了 O_3 浓度的上升,否则长沙市2019年 O_3 浓度将会更高. 2019~2020年 O_3 浓度降低则是气象、本地前体物排放和外围传输影响作用均有所减弱的结果.

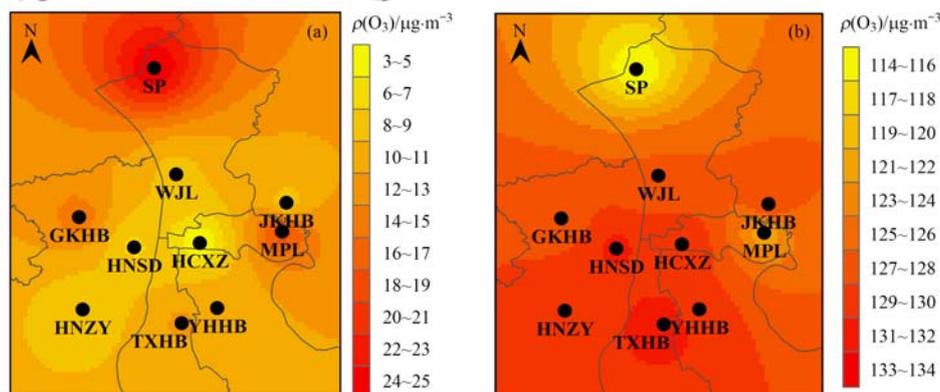
空间上,对不同站点来说,本地前体物排放对长沙市北部的沙坪(SP)站点影响最大,而对中部区域的影响相对较小[图8(a)]. 这是因为 O_3 高值期间

湖南省主导风向为偏南风^[24],南部和中部的 O_3 在风的作用下发生传输作用使得下风向污染浓度升高. 另外,由于SP站点附近植被覆盖量较多,天然源排放量较大,使得该区域 O_3 生成机制向过渡区或 NO_x 控制区转变,上风向中部 NO_x 的传输对下风向SP站点的 O_3 生成产生促进作用. 外围传输影响大小的空间分布与本地前体物相反[图8(b)],体现在高值集中在长沙市的南部区域,低值集中在北部,这很可能是因为长沙南部的株洲、湘潭和衡阳等站点 O_3 浓度较高,在偏南风作用下,上风向高浓度 O_3 最先影响长沙市南部区域,使得南部区域 O_3 浓度较高^[24],因此长沙市南部区域 O_3 污染的防控需要考虑外围传输的影响.



图7 2018~2020年长沙市本地前体物排放和外围传输相对贡献年际值整体趋势变化

Fig. 7 Variations in local and nonlocal annual impacts of Changsha from 2018 to 2020



(a)和(b)分别表示本地前体物排放和外围传输

图8 2018~2020年本地前体物排放和外围传输对长沙市不同站点相对贡献年际值空间分布整体状况

Fig. 8 Spatial distribution of local and nonlocal impact averages from 2018 to 2020 on different sites of Changsha

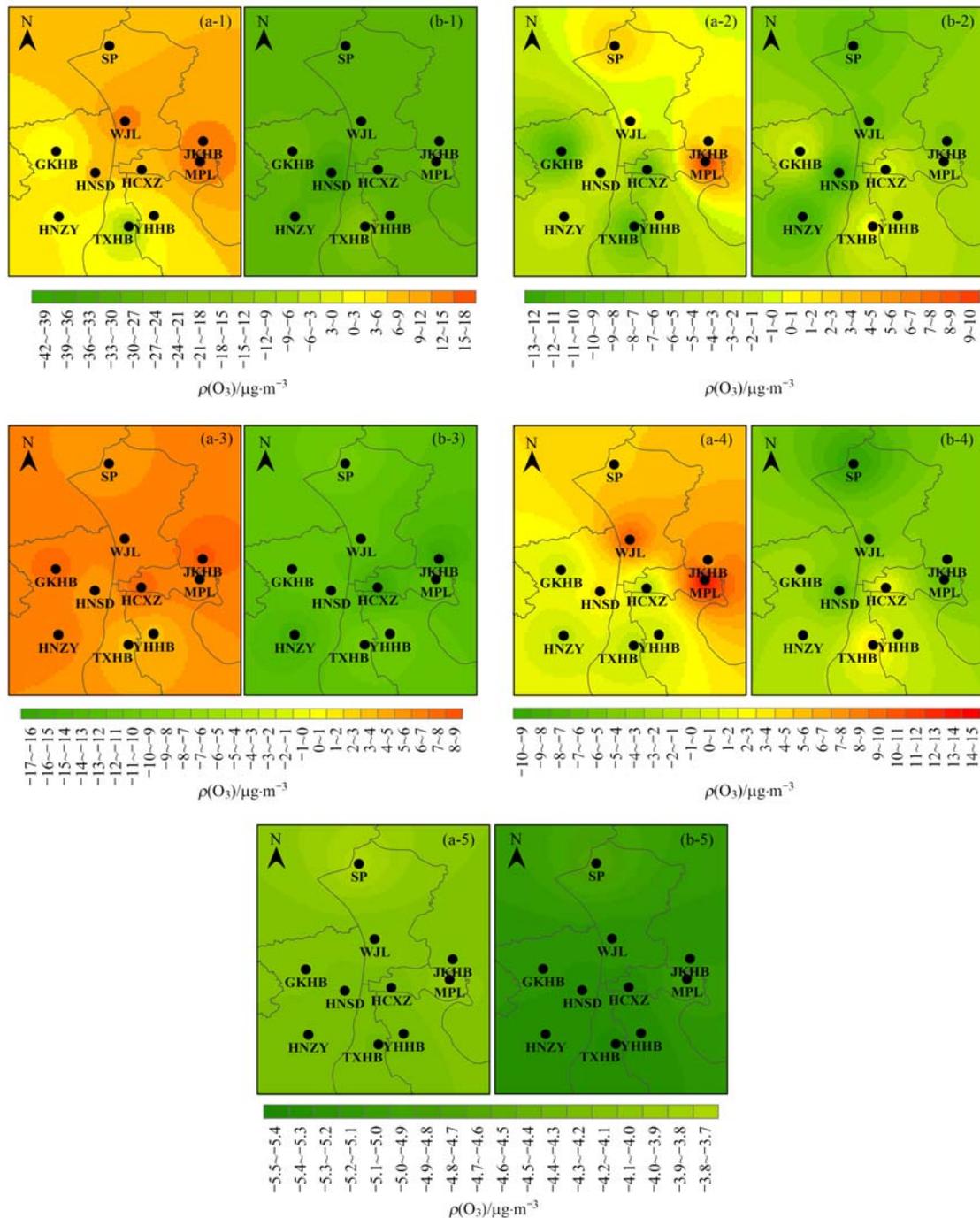
2.2.3 2018~2020年长沙市不同站点臭氧污染影响因素趋势变化

为了更好地分析2018~2020年 O_3 污染趋势变化原因,对2018~2019年和2019~2020年气象校正前后、气象影响、本地前体物排放和外围传输相对贡献分别进行了差值运算,结果如图9所示. 2018~2019年时间段,气象校正之前大部分站点 O_3 浓

度呈现上升的趋势[图9(a-1)],去除气象波动的影响之后,前体物排放对长沙市东北区域 O_3 污染的影响作用增强,对中部和西南区域影响作用降低[图9(a-2)],这主要是本地前体物排放影响的原因[图9(a-4)]. 长沙市 O_3 生成机制整体处于 VOCs 控制区(如2.1.2节所述),东北区域植被覆盖较多,在2019年高温等气象条件影响下,天然

源的排放增多,导致光化学反应速度升高, O_3 浓度增加.南部区域影响下 NO_x 排放量上升[图 10 (a)],增加了对 O_3 的消耗,使得南部区域 O_3 浓度降低.与 2018 年相比,2019 年的气象条件对长沙市不同站点 O_3 浓度的影响均呈现增加的趋势[图

9(a-3)],这主要是 2019 年温度和辐射相对较高,降雨少,湿度和云量等气象条件不利于 O_3 浓度的下降导致.于此同时,2019 年 9 月风速减弱,导致外围传输对长沙市整个区域的影响作用减小[图 9(a-5)].



a 和 b 分别为 2018 ~2019 年和 2019 ~2020 状况,1 ~5 分别表示气象校正前、气象校正后、气象影响、本地前体物排放和外围传输的年际差

图 9 2018 ~2020 年气象校正前后、气象影响、本地前体物排放和外围传输相对贡献的年际差值空间分布

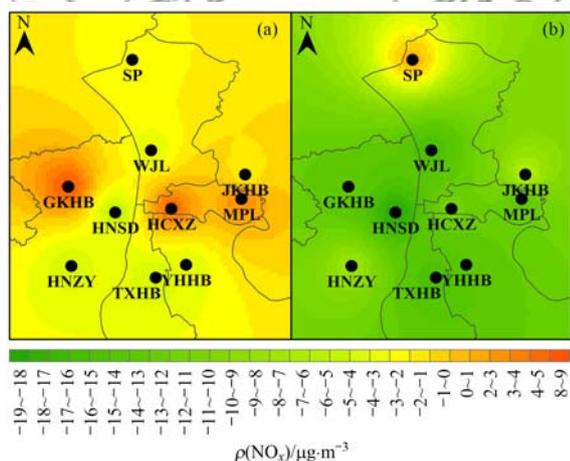
Fig. 9 Spatial distribution of the difference in ozone concentration before and after meteorological adjustment, meteorological effects and nonlocal and local emissions from 2018 to 2019 and from 2019 to 2020

与 2018 ~2019 年不同的是,2019 ~2020 年时间段,不同站点 O_3 浓度均呈现下降的趋势[图 9(b-1)],以 HNSD 站点下降幅度最高为 $39.7 \mu g \cdot m^{-3}$.

在此期间前体物排放整体影响的变化较小[图 9(b-2)],约为 $-5.5 \mu g \cdot m^{-3}$. 进一步分析发现气象条件是导致 2020 年 O_3 浓度降低的关键驱动因素[图 9

(b-3)], 其对不同站点的影响为 $-16.7 \sim -9.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 从图 9(b-4) 可知, 本地前体物排放对长沙市南部和北部区域影响作用分别呈现增强和减弱的趋势, 这很可能是因为 2020 年南部 NO_x 排放量减少[图 10(b)], 使得对 O_3 的滴定作用减弱, 导致 O_3 浓度升高. 在气象条件影响下, 北部区域天然源排放量的下降对 O_3 的促进作用降低, 使得 O_3 浓度降低. 相对于 2019 年, 2020 年不利的气象条件变得缓和, 使得长沙市周围各城市站点 O_3 浓度均呈现下降的趋势^[24], 进而使得外围传输对长沙市整个区域影响作用减弱[图 9(b-5)].

基于以上研究结果可知, 在不同时间段和不同区域, O_3 污染趋势变化的原因和关键影响因素有较大差异, O_3 污染防治需要在厘清 O_3 生成机制的基础上, 结合气象条件、本地光化学生成和外围传输影响状况的差异采取适宜的控制方案. 对于长沙市来说, 在 O_3 生成机制以 VOCs 控制为主的情况下, 在对 NO_x 进行控制的同时, 需要加强 VOCs 的控制以降低 NO_x 减少导致的 O_3 浓度的增加, 同时需要加强与周边城市的区域联防联控以降低外围传输的影响.



(a) 和 (b) 分别表示 2018 ~ 2019 年和 2019 ~ 2020 年 NO_x 浓度变化

图 10 2018 ~ 2020 年 NO_x 浓度年际值变化空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of NO_x annual variations from 2018 to 2019 and from 2019 to 2020

3 结论

(1) 整体上, 对长沙市来说, 在 2018 ~ 2020 年期间短期范围内, O_3 超标事件是在前体物影响较高的前提下不利的气象条件诱发所致. 在年际变化上, 前体物排放对 O_3 浓度的影响均呈现下降的趋势, 气象条件和本地前体物排放是导致 2019 年 O_3 浓度升高的驱动因素, 2020 年 O_3 浓度下降的原因是气象、本地前体物排放和外围传输影响均有所降低的结果.

(2) 在空间上, 受前体物排放水平和 O_3 生成机制的影响, 长沙市 O_3 高值集中在东南区域, 低值处于中部区域. 气象条件、本地前体物排放和外围传输主要影响的区域分别为长沙市东部、北部和南部区域.

(3) 2018 ~ 2019 年不利的气象条件使得整个区域 O_3 浓度上升, 本地前体物排放对长沙市南部和北部的影响分别呈现减小和增强的趋势. 2019 ~ 2020 年, 气象条件的影响作用减弱, 本地前体物排放的变化分别使得长沙市南部和北部 O_3 浓度上升和下降. 在 2018 ~ 2020 年期间, 外围传输的影响作用持续减弱.

参考文献:

- [1] Liu H, Liu S, Xue B R, *et al.* Ground-level ozone pollution and its health impacts in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **173**: 223-230.
- [2] Fan H, Zhao C F, Yang Y K. A comprehensive analysis of the spatio-temporal variation of urban air pollution in China during 2014-2018 [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **220**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117066.
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 2019 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202006/P020200602509464172096.pdf>, 2020-06-02.
- [4] Mousavinezhad S, Choi Y, Pouyaei A, *et al.* A comprehensive investigation of surface ozone pollution in China, 2015-2019: separating the contributions from meteorology and precursor emissions [J]. *Atmospheric Research*, 2021, **257**, doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105599.
- [5] Guan Y, Xiao Y, Wang Y M, *et al.* Assessing the health impacts attributable to $\text{PM}_{2.5}$ and ozone pollution in 338 Chinese cities from 2015 to 2020 [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **287**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117623.
- [6] 李光耀, 陈强, 郭文凯, 等. 基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 616-623.
- [7] Li G Y, Chen Q, Guo W K, *et al.* Nonlinear response characteristics and control scheme for ozone and its precursors based on orthogonal experimental methods [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 616-623.
- [8] Sillman S. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(12): 1821-1845.
- [9] Liu P F, Song H Q, Wang T H, *et al.* Effects of meteorological conditions and anthropogenic precursors on ground-level ozone concentrations in Chinese cities [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114366.
- [10] Zhao W, Fan S J, Guo H, *et al.* Assessing the impact of local meteorological variables on surface ozone in Hong Kong during 2000-2015 using quantile and multiple line regression models [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **144**: 182-193.
- [11] 伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 等. 不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 160-169.
- [12] Wu Y K, Chen W H, Yan F H, *et al.* Nonlinear response relationship between ozone and precursor emissions in the Pearl River Delta region under different transmission channels [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 160-169.

- [11] Godowitch J M, Gilliland A B, Draxler R R, *et al.* Modeling assessment of point source NO_x emission reductions on ozone air quality in the eastern United States [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(1): 87-100.
- [12] Foley K M, Hogrefe C, Pouliot G, *et al.* Dynamic evaluation of CMAQ part I: separating the effects of changing emissions and changing meteorology on ozone levels between 2002 and 2005 in the eastern US [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **103**: 247-255.
- [13] Sun L, Xue L K, Wang Y H, *et al.* Impacts of meteorology and emissions on summertime surface ozone increases over central eastern China between 2003 and 2015 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(3): 1455-1469.
- [14] Zheng J Y, Swall J L, Cox W M, *et al.* Interannual variation in meteorologically adjusted ozone levels in the eastern United States: a comparison of two approaches [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(4): 705-716.
- [15] 吴琳, 薛丽坤, 王文兴. 基于观测的臭氧污染研究方法[J]. *地球环境学报*, 2017, **8**(6): 479-491.
Wu L, Xue L K, Wang W X. Review on the observation-based methods for ozone air pollution research [J]. *Journal of Earth Environment*, 2017, **8**(6): 479-491.
- [16] 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 等. 基于 GAM 模型的西安市 O₃ 浓度影响因素解析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1535-1543.
Huang X G, Shao T J, Zhao J B, *et al.* Influencing factors of ozone concentration in Xi'an based on generalized additive models [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1535-1543.
- [17] Gao S, Bai Z P, Liang S, *et al.* Simulation of surface ozone over Hebei province, China using Kolmogorov-Zurbenko and artificial neural network (KZ-ANN) combined model [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **261**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118599.
- [18] Cifuentes F, Gálvez A, González C M, *et al.* Hourly ozone and PM_{2.5} prediction using meteorological data-alternatives for cities with limited pollutant information [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2021, **21**(9), doi: 10.4209/AAQR.200471.
- [19] Gao D, Xie M, Liu J, *et al.* Ozone variability induced by synoptic weather patterns in warm seasons of 2014-2018 over the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(8): 5847-5864.
- [20] 中华人民共和国生态环境部. 环境空气臭氧污染来源解析技术指南(试行) [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/201807/W020180926550435480461.pdf>, 2018-07-03.
- [21] Yang L F, Luo H H, Yuan Z B, *et al.* Quantitative impacts of meteorology and precursor emission changes on the long-term trend of ambient ozone over the Pearl River Delta, China, and implications for ozone control strategy [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(20): 12901-12916.
- [22] 亚洲清洁空气中心. 大气中国 2021: 中国大气污染防治进程 [EB/OL]. <http://www.allaboutair.cn/a/reports/2021/1027/622.html>, 2021-10-27.
- [23] 中华人民共和国生态环境部. 清风漫卷白云飞——长沙打赢蓝天保卫战综述 [EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/dfnews/202009/t20200908_797383.shtml, 2020-09-08.
- [24] 刘妍妍, 杨雷峰, 谢丹平, 等. 湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1246-1255.
- [25] Liu Y Y, Yang L F, Xie D P, *et al.* Analysis of ozone pollution spatio-temporal evolution characteristics and identification of its long-term variation driving factor over Hunan province [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1246-1255.
- [26] Berlin S R, Langford A O, Estes M, *et al.* Magnitude, decadal changes, and impact of regional background ozone transported into the greater Houston, Texas, area [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(24): 13985-13992.
- [27] Guo H, Wang T, Louie P K K. Source apportionment of ambient non-methane hydrocarbons in Hong Kong: application of a principal component analysis/absolute principal component scores (PCA/APCS) receptor model [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **129**(3): 489-498.
- [28] 高东峰, 张远航, 曹永强. 应用 OBM 模型研究广州臭氧的生成过程 [J]. *环境科学研究*, 2007, **20**(1): 47-51.
Gao D F, Zhang Y H, Cao Y Q. Process analysis of ozone formation in Guangzhou: application of observation based model [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, **20**(1): 47-51.
- [29] Cardelino C A, Chameides W L. An observation-based model for analyzing ozone precursor relationships in the urban atmosphere [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1995, **45**(3): 161-180.
- [30] 罗恢泓, 袁自冰, 郑君瑜, 等. 上海夏季臭氧生成机制时空变化特征及其影响因素研究 [J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(1): 154-168.
Luo H H, Yuan Z B, Zheng J Y, *et al.* Spatio-temporal variation of summertime ozone formation mechanism in Shanghai and its impact factors [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(1): 154-168.
- [31] 中国气象局. 2019 中国气候公报 [EB/OL]. <http://zwgk.cma.gov.cn/zfxgk/gknr/qxbg/202102/P020210224554207380732.pdf>, 2020-02-25.
- [32] 中国气象局. 2020 中国气候公报 [EB/OL]. <http://www.cma.gov.cn/zfxgk/gknr/qxbg/202104/P020210406329803273684.pdf>, 2021-02-09.
- [33] Wang Y P, Yu C, Tao J H, *et al.* Spatio-temporal characteristics of tropospheric ozone and its precursors in Guangxi, South China [J]. *Atmosphere*, 2018, **9**(9), doi: 10.3390/atmos9090355.
- [34] Seo J, Youn D, Kim J Y, *et al.* Extensive spatiotemporal analyses of surface ozone and related meteorological variables in South Korea for the period 1999-2010 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(12): 6395-6415.
- [35] 梁昱, 刘禹含, 王红丽, 等. 基于主成分分析的上海春季近地面臭氧污染区域性特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(10): 3807-3815.
Liang Y, Liu Y H, Wang H L, *et al.* Regional characteristics of ground-level ozone in Shanghai based on PCA analysis [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(10): 3807-3815.
- [36] 中国气象网. 国家气象科学数据中心 [EB/OL]. <http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/A.0012.0001.html>, 2021-07-02.

CONTENTS

Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region	YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)
Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China	XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)
Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance	ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)
Revealing Driving Factors of Urban O ₃ Based on Explainable Machine Learning	DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)
Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology	ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)
Analysis of O ₃ Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model	WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)
Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM	ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)
Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province	LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)
Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China	DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)
Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020	YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)
Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM _{2.5} Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021	XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)
Estimation of PM _{2.5} Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model	WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)
Transmission and Growth Characteristics of Severe PM _{2.5} Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei	JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers	ZHU Shu-hui (3760)
Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles	YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)
Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer	GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)
Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area	YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)
Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an	WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)
Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei	XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)
Spatio-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area	WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)
Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City	LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)
Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang	ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin	YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River	YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)
Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River	ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)
Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction	WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)
Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas	WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)
Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region	YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)
Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches	ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)
Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region	YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)
Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River	LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)
Sediment Pollution and Dredging Effect of Waiqinhuai River	ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)
Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)
Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite	SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H ₂ O ₂ and Oxidize Organic Micropollutants in Water	LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)
Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrilotris (Methylene Phosphonic Acid)	ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)
Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics	XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)
Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China	WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)
Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing	JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)
Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province	FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi	FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)
Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)
Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review	ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059)
Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review	LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)
Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis	ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)
Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)
Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation	WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)
Application of Desulfurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta	ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)
Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA	HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)
Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)
Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province	ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)
Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i>	LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)
Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk	ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-yue, <i>et al.</i> (4170)
Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period	QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong	LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)
Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning	YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)