

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年3月

第43卷 第3期

Vol.43 No.3

目次

2000~2020年天津PM_{2.5}质量浓度演变及驱动因子分析 蔡子颖, 郝团, 韩素芹, 唐颖潇, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨(1129)

天津市PM_{2.5}-O₃复合污染特征及来源分析 肖致美, 徐虹, 高璟寰, 蔡子颖, 毕温凯, 李鹏, 杨宁, 邓小文, 戴运峰(1140)

基于随机森林模型的武汉市城区大气PM_{2.5}来源解析 张志豪, 陈楠, 祝波, 陶卉婷, 成海容(1151)

华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析 任秀龙, 胡伟, 吴春苗, 胡偲豪, 高娜娜, 张崇崇, 岳亮, 王金喜, 樊景森, 牛红亚(1159)

“大气十条”实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征 吴安南, 黄小娟, 何仁江, 李金建, 叶秋麟, 吴涛, 肖智丹, 刘子锐, 王跃思, 张小玲, 张军科(1170)

郑州市典型污染过程PM₁₀中重金属浓度、来源及健康风险评估 翟诗婷, 王申博, 张栋, 赵孝因, 杨洁茹, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(1180)

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦(1190)

长三角地区PM_{2.5}浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应 周丽霞, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞, 解雪峰(1201)

“2+26”城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析 朱媛媛, 王晓斐, 汪巍, 刀谔, 王帅, 陈善荣(1212)

基于小波变换的山西省PM_{2.5}污染特征及影响因素 张可可, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 段小琳, 尹浩, 王凯, 邓萌杰(1226)

中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估 赵楠, 卢毅敏(1235)

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 刘妍妍, 杨雷峰, 谢丹平, 泽仁央宗, 黄志烟, 杨俊, 赵鹏, 韩静磊, 贾文超, 袁自冰(1246)

山东半岛近地面O₃浓度时空变化及潜在源区解析 李乐, 刘旻霞, 肖仕锐, 王思远, 米佳乐(1256)

COVID-19疫情期间雄安新区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析 刘新军, 王淑娟, 刘程, 范莉茹, 付翠轻, 齐莹, 宿文康(1268)

淄博市城区臭氧超标期间的VOCs污染特征与来源解析 王帅, 王秀艳, 杨文, 王雨燕, 白瑾丰, 程颖(1277)

淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较 秦涛, 徐勃, 王信梧, 李丽明, 杨文, 王晓丽, 耿春梅(1286)

四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单 钱骏, 韩丽, 陈军辉, 王斌, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波(1296)

餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭(1307)

堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构 于奥园, 邢礼军, 孙兴滨, 仇天雷, 王旭明, 高敏(1315)

城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路 李廷昆, 冯银厂, 毕晓辉, 张裕芬, 吴建会(1323)

黄河干流水质评价与时空变化分析 刘彦龙, 郑易安(1332)

典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例 王超, 叶秋, 贾伯阳, 何文战, 党超军, 黄焱, 杜浪(1346)

三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响 黄伟, 张研, 罗晓佼, 张磊(1356)

派河及其支流溶解性有机质分子组成特征 詹亚, 尹浩, 冯景伟, 冯艾荣, 胡艳云, 张刘, 郑刘根(1365)

粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素 崔新月, 莫武秋, 廖建波(1375)

骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评估 龚润强, 赵华璋, 高占欣, 胡冠九, 卜元卿, 张圣虎, 邱惠(1384)

宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估 李富娟, 高礼, 李凌云, 卜兰香, 陶红, 杨桂钦(1394)

百年来北方湖泊沉积物PAHs的变化特征及其对人类活动的响应 龚雄虎, 赵中华, 丁琪琪, 张路, 姚书春, 薛滨(1404)

长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异 胡愈忻, 张静, 黄杰, 段春建, 李天翠, 刘威, 王英才, 胡圣(1414)

河套平原灌溉间歇期乌梁素海水体细菌群落结构特征 史玉娇, 李文宝, 张博尧, 姚国旺, 史小红(1424)

不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响 舒旺, 王鹏, 丁明军, 张华, 黄高翔, 聂明华(1434)

鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征 刘淑丽, 简敏菲, 邹龙, 胡启武(1447)

微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响 陶辉, 戚怡婷, 于多, 杨兰, 顾颖, 厉彦辉(1455)

乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律 刘禹, 史小红, 张生, 郝若男, 孙标, 赵胜男(1463)

老化前后微塑料对富里酸的吸附 宋亚丽, 俞娅, 郑磊, 汪华, 朱文芳(1472)

天津市滨海河流N₂O扩散通量及控制因子 汤梦瑶, 胡晓康, 王洪伟, 王云仓, 常素云, 王松庆, 钟继承(1481)

铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响 陈鑫童, 郝庆菊, 熊艳芳, 胡剑, 江长胜(1492)

降雨径流污染风险等级识别与优化方法 齐小天, 张质明, 赵鑫, 胡文翰, 刘迪(1500)

基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析 江杉杉, 王臻宇, 高权, 杨愿愿, 高方舟, 华佩, 应光国(1512)

聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(III)的选择性吸附效果与机制 赵文金, 张顺, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 曲久辉(1521)

F/M对活性污泥微生物生态网络的影响 张冰, 孙展翔, 文湘华(1529)

城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例 刘书准, 王德伟, 施泽明, 唐亮, 章凤英, 廖程, 李晓雨, 徐文斌(1535)

基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估 王蕊, 陈楠, 张二喜(1546)

湖南锡矿山周边土壤-农作物系统镉迁移转换特征及污染评价 张龙, 宋波, 黄凤艳, 肖乃川, 顿梦杰(1558)

生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土土壤中重金属的阻控效应 杨士, 刘祖文, 龙培, 毕永顺, 林苑, 左华伟(1567)

溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤 闵涛, 罗彤, 陈丽丽, 茹思博, 李俊华(1577)

铁锰氧化物-微生物负载生物炭材料对镉和砷的吸附机制 连斌, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱, 袁峰(1584)

不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异 刘畅, 徐应明, 黄青青, 陶雪莹, 王林, 孙均兵, 赵立杰(1596)

镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性 任超, 任或仲, 王浩, 朱利文, 李竞天, 杜倩倩, 李萍(1606)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响 刘坤和, 薛玉琴, 竹兰萍, 徐飞, 朱志豪, 张拓, 张富斌(1620)

蚯蚓/钾改性生物炭对As污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响 苏倩倩, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧, 刘雪, 耿兵, 田云龙, 黄晓雅(1630)

DA-6和EDDS施用对龙葵生长、Cd吸收和土壤细菌群落结构的影响 罗洋, 孙丽, 刘方, 任军, 郭金梅, 闫修民(1641)

地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响 胡志娥, 肖谋良, 王双, 童瑶瑶, 鲁顺保, 陈剑平, 葛体达(1649)

增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 王佳懿, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(1657)

秸秆还田、地膜覆盖及施肥对冬小麦田N₂O和N₂排放的影响 彭毅, 李惠通, 张少维, 阳婷, 王筱斐, 周春菊, 王林权(1668)

基于Meta分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤挥发性的影响 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 王锐, 彭青, 蔡焕杰(1678)

施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析 冉继伟, 肖琼, 黄敏, 蔡岸冬, 张文菊(1688)

《环境科学》征订启事(1331) 《环境科学》征稿简则(1403) 信息(1462, 1511, 1605)

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

刘妍妍¹, 杨雷峰^{2*}, 谢丹平^{2*}, 泽仁央宗³, 黄志炯⁴, 杨俊⁵, 赵鹏⁶, 韩静磊², 贾文超², 袁自冰⁵

(1. 湖南省生态环境监测中心, 长沙 410014; 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. 香港理工大学土木及环境工程学系, 香港; 4. 暨南大学环境与气候研究院, 广州 511443; 5. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 6. 西交利物浦大学健康与环境科学系, 苏州 215123)

摘要: 近些年来湖南省臭氧(O₃)污染程度呈现持续恶化态势, 针对该区域 O₃ 污染相关研究较为缺乏的现状, 基于观测数据对 2015~2020 年期间湖南省 14 个地级市 O₃ 污染浓度的时空演化特征进行了分析, 并利用广义相加模型(GAM)对 O₃ 污染长期趋势变化的主控因素进行了识别(气象校正)。结果表明, 时间上, 湖南省区域 O₃ 具有明显的日际、月际和季节性变化特征, 不同月份和季节中分别以 5 月、9 月和秋季浓度较高, 在年际变化方面 O₃ 年际 90 百分位数以 4.7 μg·(m³·a)⁻¹ 的速率升高, 空间上, O₃ 浓度的高、低值分别集中在偏东北和偏西部区域。整体上, O₃ 污染长期趋势变化主导因素为前体物排放生成贡献, 气象对 O₃ 浓度的上升起促进作用, 其平均影响的程度达到了 1 μg·(m³·a)⁻¹, 其中对不同季节和区域影响状况有所差异, 体现在对春、夏季和偏东部区域 O₃ 浓度的上升起促进作用, 对秋、冬季和西北区域起抑制作用。与 O₃ 污染不同的是, 气象对颗粒物长期趋势变化的影响较小。本研究结果提示 O₃ 污染防控工作需因地制宜, 在气象不利的时间段和区域需强化前体物的减排力度以抵消气象的副作用, 同时需要加强区域之间的合作以减少上风向的传输作用。

关键词: 臭氧(O₃); 时空变化; 气象校正; 长期趋势; 主控因素

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)03-1246-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104017

Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province

LIU Yan-yan¹, YANG Lei-feng^{2*}, XIE Dan-ping^{2*}, ZE-REN Yang-zong³, HUANG Zhi-jiong⁴, YANG Jun⁵, ZHAO Peng⁶, HAN Jing-lei², JIA Wen-chao², YUAN Zi-bing⁵

(1. Hunan Ecological and Environmental Monitoring Center, Changsha 410014, 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. Department of Civil and Environmental Engineering, Hong Kong Polytechnic University, China; 4. Institute for Environmental and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 511443, China; 5. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 6. Department of Health and Environmental Sciences, Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou 215123, China)

Abstract: Despite the alleviation of particulate matter (PM), the ambient ozone (O₃) concentration is continuously increasing in Hunan province where the investigation of O₃ pollution has been rarely reported. Accordingly, the spatio-temporal evolution of O₃ pollution was first analyzed based on hourly air quality data observed by national monitoring stations from 2015 to 2020 over 14 cities in Hunan province. Afterwards, the combination of meteorological data from the European Center for Medium-range Weather Forecast (ECMWF) and the generalized additive model (GAM) was applied to investigate the driving factors of the O₃ long-term trend during this period. The results presented obvious diurnal, monthly, and seasonal characteristics of O₃ variations. High O₃ concentrations occurred in May and September monthly, and the peak O₃ season was autumn. Furthermore, the 90th percentile O₃ increased at a rate of 4.7 μg·(m³·a)⁻¹ temporally, and high O₃ values mainly occurred in the north-eastern region spatially, in contrast to the low O₃ values in the western region. The modeling results indicated that the increase in O₃ was mainly ascribed to precursor emissions. Furthermore, meteorology promoted a rise in O₃ with the impact magnitude of 1 μg·(m³·a)⁻¹. Remarkably, meteorology accelerated the O₃ increases in spring, summer, and the eastern region, whereas it restrained increases in autumn, winter, and the northwest. The effect of meteorology on PM₁₀ was different from O₃ during this period. Overall, this study highlighted the importance of meteorological impacts when regulating emission reduction measures for O₃ abatement. It required greater effort regarding O₃ mitigation to offset the side-effect from meteorology in meteorology-sensitive seasons and regions. Additionally, the regional corporation is indispensable to reduce O₃ transportation from upwind.

Key words: ozone (O₃); spatial-temporal evolution; meteorological adjustment; long-term trend; driving factor

近些年以来,在环保法规严格约束下,随着前体物减排措施的实施,我国大气环境六大常规污染物中的 5 种包括二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)、一氧化碳(CO)和颗粒物(PM₁₀、PM_{2.5})浓度整体呈现持续下降态势,臭氧(O₃)是唯一的浓度不但不

收稿日期: 2021-04-02; 修订日期: 2021-08-03

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(PM-zx097-202104-065)

作者简介: 刘妍妍(1989~),女,硕士,工程师,主要研究方向为环境空气质量监测及预报, E-mail: 124917785@qq.com

* 通信作者, E-mail: yangleifeng@scies.org; xiedanping@scies.org

减、反而上升的污染物^[1,2]. 在我国三大典型光化学活跃区珠三角 (PRD)、京津冀 (BTH) 和长三角 (YRD), O_3 分别于 2015、2017 和 2018 年成为了首要的大气污染物^[3], 其已经成为继颗粒物之后, 我国下一个阶段大气环境质量持续改善和生态文明建设所需重点防控的对象.

近地面 O_3 污染是其前体物氮氧化物 (NO_x) 和挥发性有机物 (VOCs) 在紫外光作用下发生光化学反应的产物^[4-6], 其与前体物之间存在着高度非线性的关系^[7-10], 同时其浓度受气象条件如太阳辐射、温度和相对湿度等的影响, 因此 O_3 污染浓度趋势变化受气象条件和前体物排放的共同影响^[11-13], 对于一个区域来说了解其污染基本特征、厘清其趋势变化的主控因素是本地范围内前体物减排措施制定的前提和基础, 该类研究在我国主要城市群有较多报道.

湖南省近些年来 O_3 污染状况与我国其他城市类似, 浓度呈现波动上升的趋势^[3], 但是针对该区域 O_3 污染相关的研究几乎空白. 基于该情况, 利用观测数据本研究首先对该区域 O_3 污染的基本特征进行了分析, 以了解污染的基本时空演化特征和规律; 之后对其长期趋势变化的主控因素进行识别, 以为该区域 O_3 污染防控工作提供参考和建议.

1 材料与与方法

1.1 研究区域和数据

湖南省地处我国东南部云贵高原向江南丘陵、南岭山脉向江汉平原过渡的地带, 属于典型的大陆性亚热带季风湿润气候, 冬季寒冷盛行偏北风、夏季酷热盛行偏南风, 春温多变, 秋温陡降, 春夏多雨, 秋冬干旱, 本研究以湖南省 14 个地级市作为对象, 其地理位置以各市气象监测点位所在位置进行标记, 具体区域位置、城市名称、字母缩写以及经纬度信息如图 1 和表 1 所示.

本研究搜集了湖南省 14 个城市范围内空气质量监测站点自 2015 ~ 2020 年对 O_3 、 NO_2 、 CO 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 SO_2 逐小时监测数据 (标准状况浓度), 剔除不同指标观测值与剩余数据均值的偏差超过 3 倍标准差的数据, 缺失值根据其所处年份、月份、天、星期和小时的均值状况进行补充^[14,15]. 计算每个城市范围内所有站点不同污染物浓度的小时均值, 最终每个城市逐小时数据量为 52 608 条. O_3 污染浓度取日 8 h 移动均值最大值, 其他污染物取日均值用于后续分析.

由于气象观测数据时间序列不完整和指标参数较少, 本研究选取欧洲中期数值预报中心风 (10 m

高横向风 u 和纵向风 v)、近地面压强、地表紫外辐射、地表太阳净辐射、总云量、温度、边界层高度和相对湿度共计 9 项指标的逐小时气象数据用于分析气象波动对 O_3 长期趋势变化的影响, 其中风、近地面压强、紫外辐射、太阳辐射和总云量取日际均值, 温度和边界层高度取日际最大值, 相对湿度由温度和露点计算得到取其日际最小值^[14].

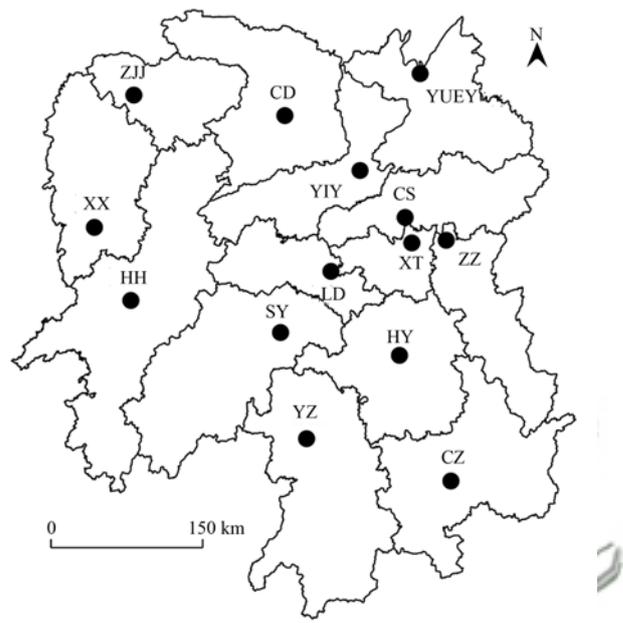


图 1 研究区域和城市站点空间分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of the region and cities investigated

表 1 研究区域城市经纬度信息

城市	缩写	经度/(°)	纬度/(°)
常德	CD	111.7	29.1
长沙	CS	112.8	28.1
郴州	CZ	113.0	25.7
怀化	HH	110.0	27.6
衡阳	HY	112.6	26.9
娄底	LD	112.0	27.7
邵阳	SY	111.5	27.2
湘潭	XT	112.8	27.9
湘西州	XX	109.7	28.2
益阳	YIY	112.4	28.6
岳阳	YUEY	113.1	29.4
永州	YZ	111.6	26.2
张家界	ZJJ	110.2	29.4
株洲	ZZ	113.2	27.9

1.2 研究方法

本文利用湖南省 14 个站点 (表 1) 对不同大气污染物自 2015 ~ 2020 年的小时、月和季节的均值分别分析其日际、月际和季节性整体变化特征; 研究不同污染物年际趋势变化时, O_3 和 CO 取每年日值的 90 和 95 百分位数, 其他污染物取每年日值的均值; 利用 CO 和 NO_2 观测数据分别表征人为源

VOCs 和 NO_x 排放情况来分析 O₃ 趋势变化原因^[16]; 在识别 O₃ 污染长期趋势变化主控因素时, 本文对颗粒物(PM₁₀)的情况也进行了研究, 以分析气象波动对两种污染物影响的差异.

广义相加模型是一种高度非线性模型, 其表达式如公式(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, $S_p(X_p)$ 为第 p 个变量的未知非参数光滑函数, c 为分类变量(年份), S_0 为截距, 因此模型是基于表征因变量和自变量的多个函数来拟合两者之间的关系, 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地应用^[17-19], 因此, 本文利用广义相加模型(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), 以分析长期范围内其趋势变化的主导因素.

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

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.

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

式中, ε 为利用公式(1)和公式(2)计算得到模型的残差 ε , 其反映前体物排放波动的影响^[17,20]. 在本研究过程中以气象状况的平均值作为基准进行气象校正.

大气污染长期时间序列是多个不同时间尺度分量叠加作用的结果, 研究长期趋势变化时需要将不同时间分量予以剥离, KZ(kolmogorov-zrbenko)滤波是常用的一种方法^[21], 其通过选取一定窗口宽度的数据多次取滑动平均以得到不同波动周期的趋势. 公式如下:

$$y_i = \frac{1}{m} \sum_{j=-k}^k X_{i+j} \quad (4)$$

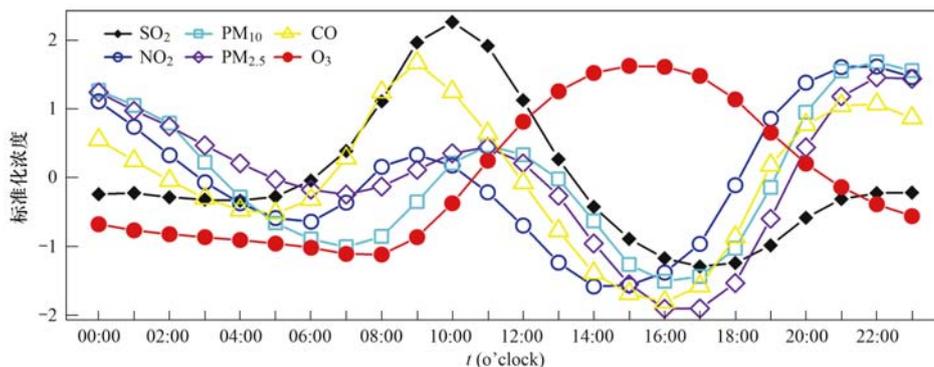


图2 2015~2020年湖南省14个地市SO₂、NO₂、PM₁₀、PM_{2.5}、CO和O₃浓度均值日变化特征

Fig. 2 Diurnal variations in different contaminants (i. e., SO₂, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, CO, and O₃)

of the fourteen cities in Hunan over 2015 to 2020

$$m \times p^{1/2} \leq N \quad (5)$$

式中, X 为变量, i 为时间序列中第 i 个点, j 为移动窗口变量, $m = 2k + 1$ 为滑动窗口的宽度, k 为对 X_i 进行滤波时其两端的移动窗口宽度, 如公式(5)所示, 经过 p 次迭代便可以得到周期大于 p 的时间序列, 在研究长期和季节性变化规律时选取的参数 m 、 p 分别为 365、3 和 20、3^[21].

分别利用 R 语言进行数据的分析建模以及绘图和 Arcgis (10. 2) 进行空间插值(反距离法, IDW).

2 结果与讨论

本研究以 O₃ 污染基本特征分析和长期趋势变化主控因素识别为主要目标, 其中基本特征包括不同时间尺度污染浓度趋势变化和空间分布状况这两个方面.

2.1 基本污染特征分析

2.1.1 日变化特征

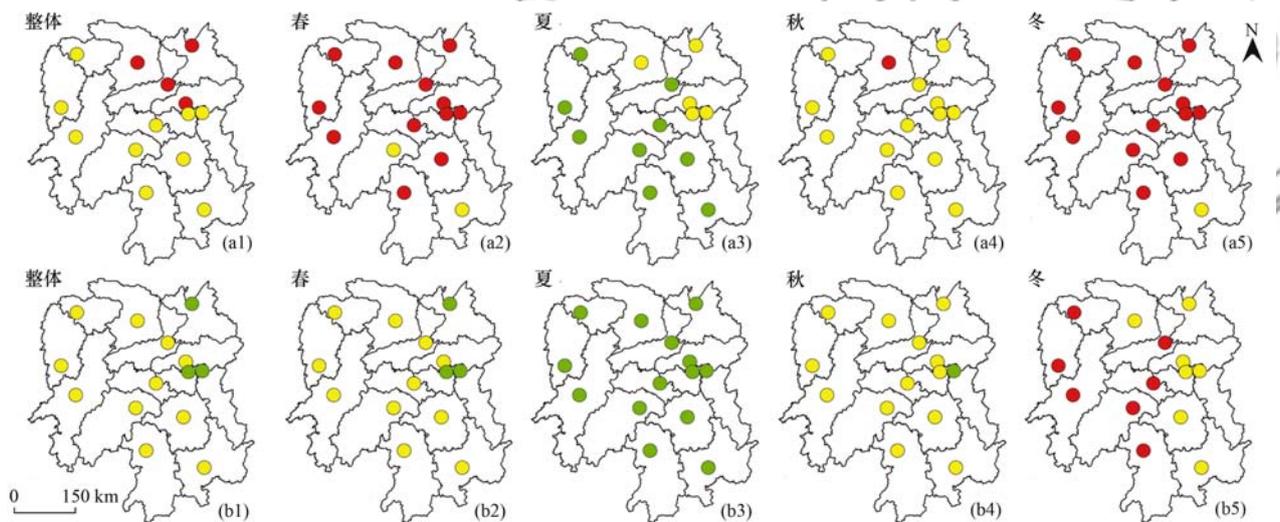
为了方便在同一数量级对多种污染物的变化特征进行分析比较, 利用零均值归一化方法(Z-Score)对数据进行处理. 结果如图2所示, 1 d内O₃浓度呈现出以08:00和15:00为谷值和峰值的“单峰”状态分布. 这主要是因为O₃是光化学二次生成的产物, 早上开始随着时间变化温度升高和太阳辐射增强, NO_x和VOCs光化学反应速率逐步加快使得O₃浓度得到累积. 随着温度和太阳辐射的持续增强, O₃浓度在15:00时达到最高值, 此后光化学反应速率减慢, 同时在物理沉降等作用下污染浓度开始下降, 特别是在夜间NO_x对O₃的滴定作用占据主导地位, 使得O₃污染浓度持续下降, 直到第二天早上, 如此往复^[22-25]. 其他污染物浓度整体呈现出以10:00和22:00为高值的“双峰”状态分布, 其中NO_x和CO早上和夜间出现峰值的原因可能是早高峰人为活动和夜间大货车通行等的影响. 颗粒物(PM₁₀

和 $PM_{2.5}$) 特别是细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 和 SO_2 由于和一次排放有一定的关系, 其趋势变化规律与 NO_x 和 CO 保持相对一致。

本研究对不同城市 O_3 浓度日际最大 [图 3 (a1) ~ 3 (a5)]、最小值 [图 3 (b1) ~ (b5)] 出现的时刻进行了分析。结果显示, 整体来说湖南省 O_3 污染浓度最大值出现在 15:00, 早于东北部区域的 16:00 [图 3 (a1)]。进一步地研究发现这种空间分布主要是受夏季状况的影响 [图 3 (a3)], 这首先是因为 O_3 前体物 CO 分布相对均匀, 但是 NO_2 高值集中在偏东部区域 (图 5), 较多的 NO_x 需要经过更长的光化学反应时间使得 O_3 浓度达到峰值。其次, 湖南省属于亚热带季风湿润气候, 夏季盛行偏南风、其中以西南风居多 [26], 西南区域的 O_3 在风的作用下经过一段时间传输到下风向东北区域, 导致下风向 O_3 浓度峰值出现时间推迟。通过

对比发现夏季峰值 [图 3 (a3)] 出现的时间早于秋冬季和秋季 [图 3 (a2)、3 (a5) 和 3 (a4)], 这很可能是夏秋季温度高、太阳辐射强, 导致前体物光化学反应速率较快的原因。

O_3 浓度最小值出现的时刻空间分布整体来说与最大值情况相反, 即东北区域最小值出现的时间早于西南区域 [图 3 (b1)], 这种空间分布主要是春、冬季状况影响的结果 [图 3 (b2) 和 3 (b5)]。首先, 东部较高浓度的 NO_x 对 O_3 的滴定作用较强 [7,8,27,28], 使得东部区域 O_3 浓度更易较快达到最小值。此外, 湖南省春、冬季盛行偏北风 [26], 东部区域 O_3 的传输作用使得下风向污染水平升高, 有可能导致下风向区域需要历经更久时间达到谷值。4 个季节中夏季最小值时刻最早, 则可能是由于此时温度相对于其他季节较高、 NO_x 对 O_3 的滴定作用较强的原因。



(a1) ~ (a5) 表示最大值, (b1) ~ (b5) 表示最小值; 不同颜色圆点表示 O_3 浓度最大(小)值出现的时刻, (a1) ~ (a5) 中绿、黄和红分别表示 14:00、15:00 和 16:00, (b1) ~ (b5) 中绿、黄和红分别表示 07:00、08:00 和 09:00

图 3 2015 ~ 2020 年湖南省 14 个地市 O_3 浓度日最大值和最小值时刻空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the diurnal ozone maximum and minimum concentration hours of the fourteen cities during 2015 to 2020 in Hunan

2.1.2 月和季节性变化特征

O_3 等污染物浓度月际变化特征如图 4 所示, 整体来说 O_3 污染呈现倒“U”型的“双峰”分布特征, 其中以 5 月和 9 月的浓度较高。其主要原因是, 自冬季开始随着时间变化气温回升和太阳辐射增强, O_3 生成速率加快使得浓度升高, 夏季较多的降雨对 O_3 及其前体物的湿沉降作用增强和 O_3 浓度降低, 秋季降雨量减少且天气较为干燥, O_3 累积作用增强, 浓度升高达到峰值, 此后气温下降和太阳辐射减弱, 光化学反应速率减慢使得 O_3 浓度开始下降。其他污染物浓度趋势变化整体来说与 O_3 浓度呈现相反的关系, 即冬季浓度高和夏季浓度低, 这一方面是由于冬季气温低, 燃煤和用电取暖量大, 对化石燃料较多的

消耗量使得前体物排放量较高, 另外一方面是因为冬季光化学反应速率低, 对前体物的消耗量较少, 而夏季光化学作用强烈, 前体物消耗较多。

O_3 、CO 和 NO_2 月均值的空间分布如图 5 所示, CO 和 NO_2 浓度空间分布随月份变化较小 [图 5 (b) 和 5 (c)], 但是 O_3 污染具有明显的空间演化特征 [图 5 (a)], 其中在 3 ~ 10 月 O_3 浓度东北区域高、西南区域低, 其他月份 (主要为冬季) 高值向中部和西南区域转变。原因来源于 2 个方面, 首先, 春、夏和秋季温度高于冬季, 东北部较高的 NO_2 的排放使得 O_3 生成量较高。其次, 此时盛行偏南风, 南部区域的 O_3 传输到下风向在东北区域发生沉降, 两种因素都会使得东部区域 O_3 浓度升高。冬季时间, 东部较

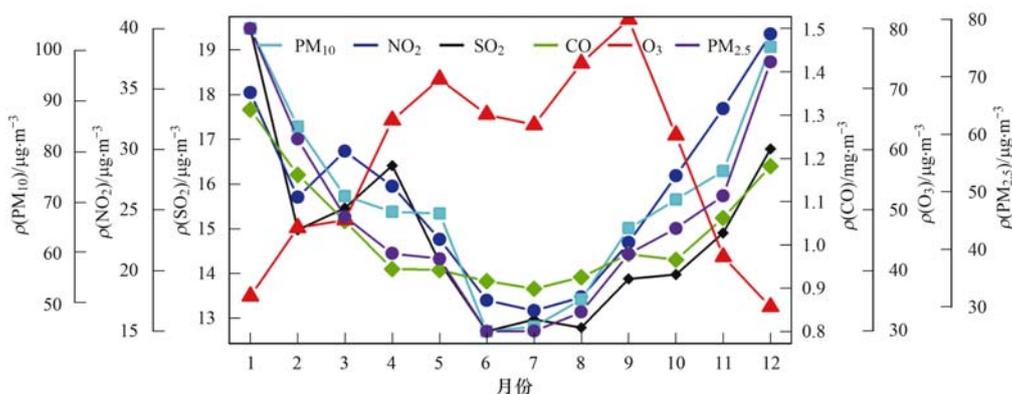


图4 2015~2020年湖南省14个地市不同污染物(PM₁₀、NO₂、SO₂、CO、O₃和PM_{2.5})月均值变化特征

Fig. 4 Monthly averages of different contaminants (i. e., PM₁₀, NO₂, SO₂, CO, O₃, and PM_{2.5}) of fourteen cities in Hunan during 2015 to 2020

多的NO_x对O₃的消耗作用较强,偏北风对东北区域的O₃污染起着稀释作用,同时也会将东北区域的O₃传输到中部和西南区域,使得O₃浓度高值向中部和西南区域转移.该结论同2.1.1节关于O₃浓度高值期间可能存在着西南区域向东北部区域的传输结论保持一致,提示人们针对湖南省污染较为严重的东北区域,O₃污染防控需要在本地前体物控制的基础上进行区域之间的合作以降低区域传输的影响.

2.1.3 O₃污染年际变化特征

2015~2020年期间湖南省14个城市均值的年际90百分位数趋势变化如图6所示,ρ(O₃)由2015年最低值133 µg·m⁻³上升到2019年的183 µg·m⁻³,年平均增幅为4.7 µg·(m³·a)⁻¹,以2018~2019年上升幅度最大为44 µg·m⁻³,2020年期间O₃污染程度相对于前两年有所缓解,年际值为137 µg·m⁻³,较2019年下降的幅度达到了46 µg·m⁻³,趋势变化原因本文将在2.2.1节进行详细地探讨.

不同城市O₃污染年际值90百分位数空间分布特征如图7(a)和图8所示,整体上O₃浓度高值集中在东北区域的岳阳(YUEY)、常德(CD)、湘潭(XT)和株洲(ZZ)一带,低值处于西部的张家界(ZJJ)、湘西州(XX)和怀化(HH).O₃浓度的90百分位数反映的是夏、秋季O₃浓度较高时的状况,此时湖南省主导风向为偏南风,CO排放水平整体来说不同区域分布较为一致[图5(b)],但是O₃浓度高值集中在湖南东部的长沙区域附近[图5(a)],导致O₃污染较多集中在前体物排放较多的下风向区域(东北区域)^[29-31].西部区域由于NO₂排放水平较低,O₃生成速率较慢,同时来自西南方位海上的洁净气团对西南区域的O₃污染起着稀释作用,使得该区域O₃浓度较低.随着时间推移湖南省西部O₃浓度高值有略微下降的趋势,而东部区域浓度上升,

且O₃浓度高值区域的范围有所扩大,这提示湖南省O₃污染防控整体上需要关注偏东部区域.

2.2 O₃和颗粒物污染长期趋势变化主控因素的识别

2.2.1 O₃和颗粒物污染气象校正前后整体长期趋势变化

以上分析了O₃污染浓度的基本时空演化特征,以下对其长期趋势变化的主导因素进行识别,同时对颗粒物的状况进行分析以研究气象对O₃和颗粒物影响的差异.O₃和颗粒物受气象和前体物排放综合作用的影响,气象校正之后的结果反映着前体物排放的相对贡献,整体情况结果如图9所示,对O₃污染来说,短期内气象校正之后日际之间的波动幅度明显小于原始数据,说明了O₃浓度极大值和极小值是在前体物生成贡献较多和较少的情况下气象条件的诱发所致^[14,32].由于气象状况难以控制,在不利的天气条件下通过降低前体物排放以减少O₃的光化学生成,是降低O₃污染事件发生行之有效的一种控制措施,同时在不利的天气条件下需要强化前体物的减排力度以抵消气象的不利影响.

长期来看,气象校正前后O₃浓度整体变化趋势保持一致,均呈现上升的趋势,说明O₃浓度升高的关键驱动因素为前体物排放.自2015~2020年期间气象校正前ρ(O₃)由2015年的最小值79 µg·m⁻³最高上升到了2019年的100 µg·m⁻³,年际平均升幅为4.2 µg·(m³·a)⁻¹,气象校正之后浓度由2015年的最小值82 µg·m⁻³最高上升到了2019年的98 µg·m⁻³,年际平均升幅为3.2 µg·(m³·a)⁻¹,即气象的存在使得O₃的年际平均增幅提高了1 µg·(m³·a)⁻¹,说明气象促进了O₃浓度的上升,即长期来看湖南省O₃污染程度恶化是前体物排放生成贡献增多和气象强化作用的结果.由于CO和人为源VOCs排放源一致,因此CO浓度的波动在一定程度上可以反映着人为源VOCs的变化.长期范围

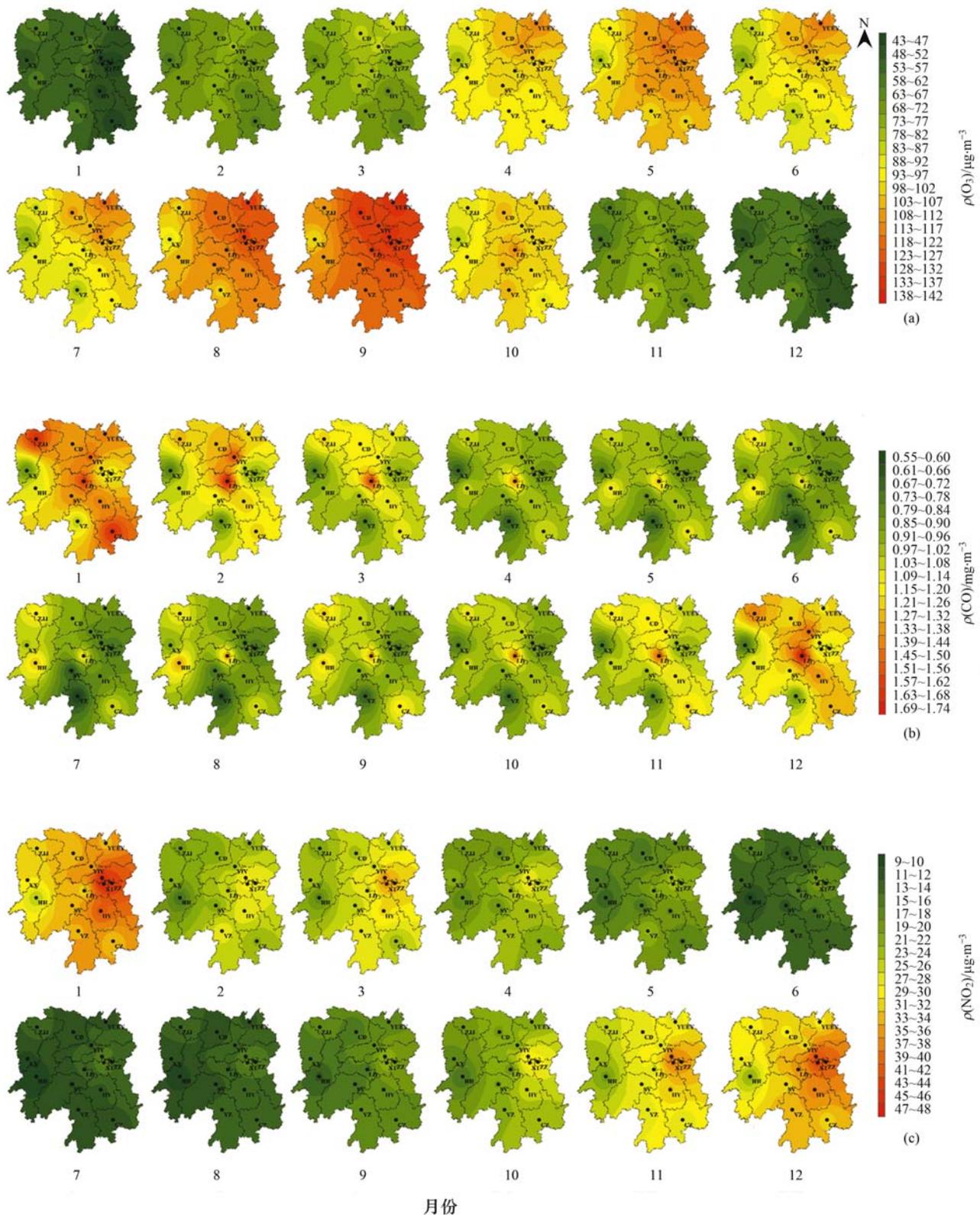


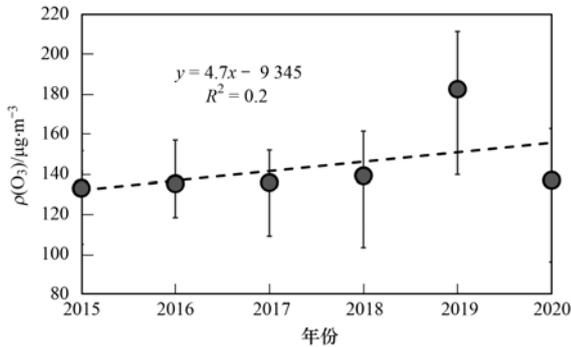
图5 2015~2020年湖南省14个城市 O_3 、CO和 NO_2 月均值空间分布特征

Fig. 5 Spatial distributions of O_3 , CO, and NO_2 monthly averages of the fourteen cities in Hunan during 2015 to 2020

内CO和 NO_2 均呈现出下降的趋势(图10),因此推断对湖南省整体来说,不当的前体物减排比例很可能是导致 O_3 污染浓度上升的重要原因.在全球气温变暖、极端气象事件增多的情况下,识别 O_3 的生成机制、制定适宜的前体物减排比例,并在不利的气

象条件下强化前体物的减排,是湖南省下一个阶段遏制 O_3 上升态势和降低污染事件发生频率所需要进行的重点工作.

2019年是较为特殊的一年,体现在该年秋季较往年气温、气压较高,降雨量、湿度和云覆盖量较



蓝色的线为5%误差棒,公式为利用年份与O₃浓度年际值建立的线性回归方程

图6 2015~2020年期间湖南省14个站点O₃浓度均值的年际90百分位数变化特征

Fig. 6 Interannual variation in the 90th quantile in O₃ concentration averages of the fourteen cities from 2015 to 2020 in Hunan

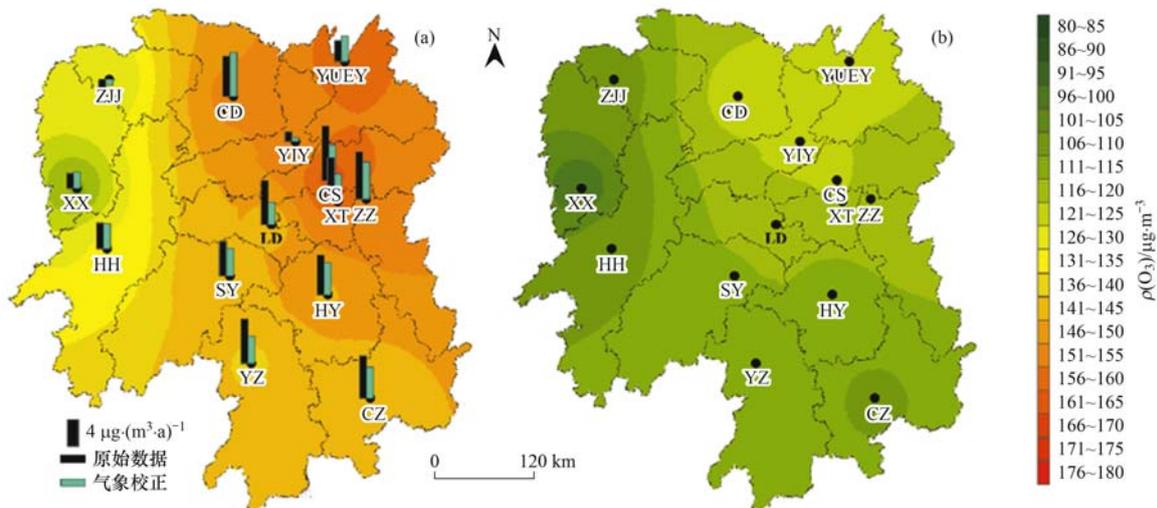
低,较高的温度会导致 VOCs 的排放量升高[图 10(a)],较高的气压和较低的云量有利于光化学反应的进行,较低的降雨量和湿度减少了 O₃ 及其前体物的沉降作用,即这些气象状况均有利于 O₃ 浓度的累积,因此导致了 2019 年 O₃ 浓度与 2018 年相比剧烈上升.气象对颗粒物的影响与 O₃ 的差异较大,首先体现在短期内气象对冬季和夏季颗粒物分别起着抑制和促进作用[图 9(b)中黑色实点和蓝色实线],这很可能是冬季较低温度不利于颗粒物的产生、而夏季较强的太阳辐射和较高温度等有利于颗粒物的光化学生成的原因;其次表现在气象对长期范围内的趋势变化影响较小[图 9(b)黑色和蓝色粗线],其主要原因为 O₃ 是其前体物光化学二次生成的产物,易受气象条件的影响,而颗粒物除了受气象影响

外,还受一次排放的影响,因此相对来说受气象条件的影响较小.

不同季节 O₃ 和颗粒物污染浓度年际值趋势变化如图 11 所示, O₃ 年际 90 百分位数上升速率为 $4.8 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$,不同季节上升幅度不同,以春季上升速率最快为 $6.4 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$,其次是夏季和秋季,冬季基本上保持稳定[图 11(a1)].气象校正之后整体、春季和夏季上升速率降低但是秋、冬季升高[图 11(a2)],表明气象加快了春、夏季 O₃ 上升的速率、抑制了秋、冬季 O₃ 浓度的上升.颗粒物整体呈现下降的趋势,其中冬季下降最快,其次是春季、夏季和秋季[图 11(b1)],气象校正之后,春、夏和秋季下降速率增大、冬季下降速率减小[图 11(b2)],即气象抑制了春、夏和秋季颗粒物的下降、但是促进了冬季时段颗粒物的下降.上述研究结果表明长期范围内气象条件对 O₃ 与颗粒物的趋势变化有着不同的影响,对 O₃ 污染来说,在夏、秋季两个 O₃ 高值阶段,由于气象的不同影响,夏季的防控效果要差于目标预期结果、秋季则会好于目标预期,因此夏季时段需要在强化减排措施以抵消气象的作用.在颗粒物污染较为严重的冬季,其防控效果要好于预期.

2.2.2 不同区域 O₃ 和颗粒物污染气象校正前后趋势变化及空间分布

整体上气象条件对不同城市 O₃ 浓度的影响状况如图 7,首先湖南省区域除了张家界(ZJJ)之外,其他城市 O₃ 污染浓度均呈现上升的趋势,以浓度较高的长沙(CS)和湘潭(XT)站点上升速度最大接近



(a)和(b)分别表示气象校正前和,柱状图表示年际值的增长速率,填充色表示 O₃ 污染的浓度

图7 2015~2020年湖南省不同城市 O₃ 污染气象校正前后年际第 90 百分位数均值及其长期趋势变化空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of the ozone interannual 90th quantile averages and its increasing rate before and after meteorological adjustment in different cities of Hunan

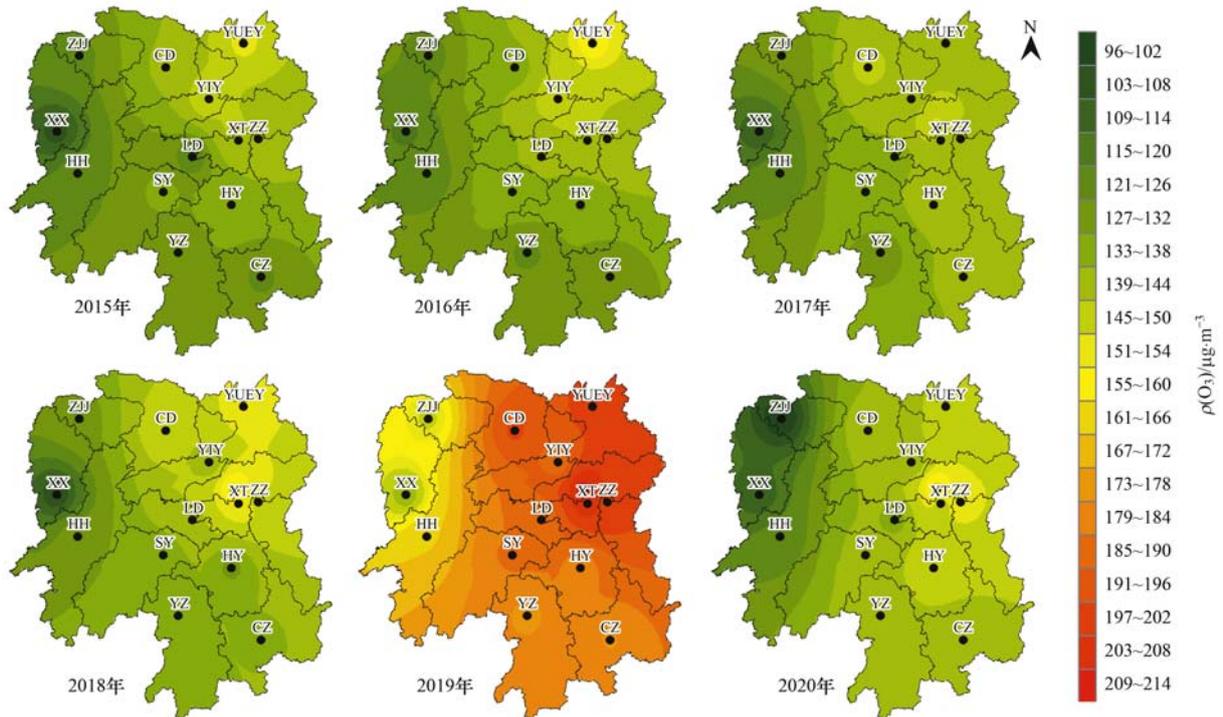
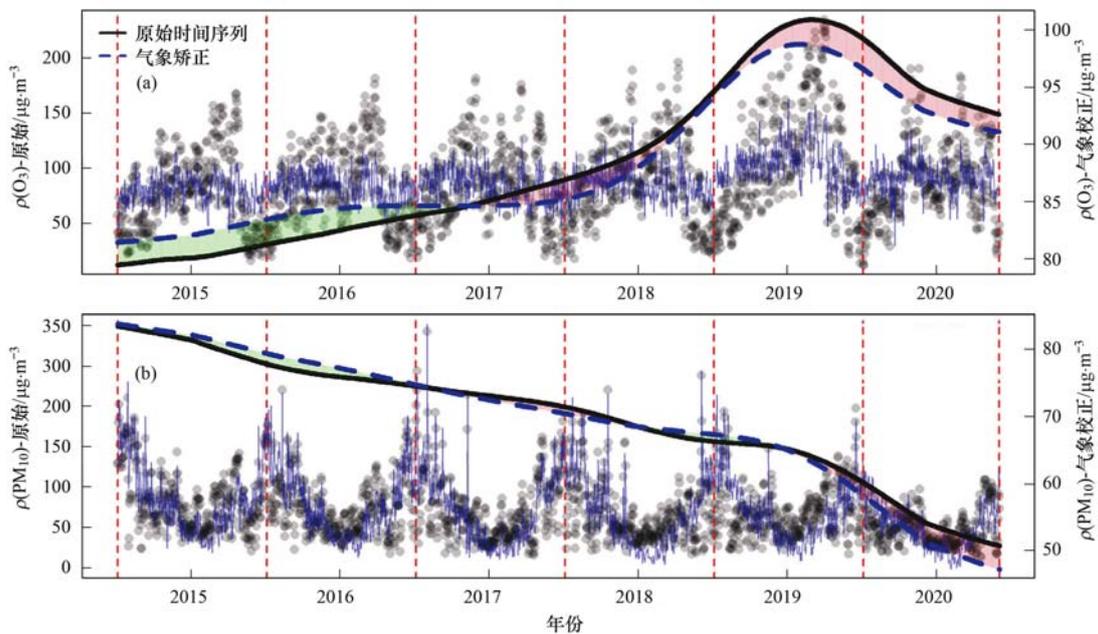


图 8 2015 ~ 2020 年湖南省不同城市 O₃ 浓度 90 百分位数空间分布年际变化

Fig. 8 Interannual variation in ozone concentration 90th quantile spatial distribution of different cities during 2015 to 2020 in Hunan



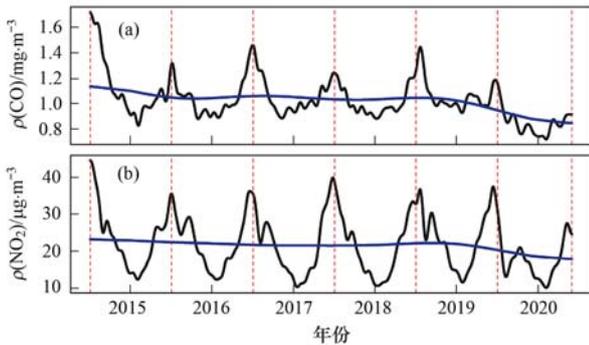
黑色点和细蓝线为原始时间序列,黑色粗实线和蓝色粗虚线为气象校正前后的长期趋势,绿色和红色填充色指示着气象有利年和不利年

图 9 2015 ~ 2020 年期间 O₃ 和 PM₁₀ 气象校正前后长期趋势变化

Fig. 9 Long-term variations from 2015 to 2020 in ozone and PM₁₀ concentration before and after meteorological adjustment

$8 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$,西部区域上升幅度最小. 进一步研究发现气象校正之后,西北区域 O₃ 浓度上升的速度增大,中东及偏东南区域上升的速度降低,这说明气象对西北和中东部 O₃ 浓度的上升分别起着抑制和促进的作用[图 7(a)]. 此外,气象校正前后 O₃ 浓

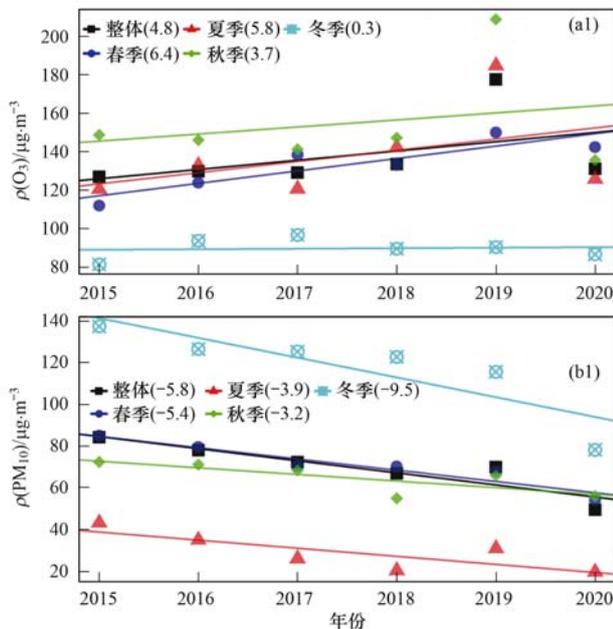
度高低值的空间分布格局没有发生变化(图 7),即 O₃ 污染浓度的空间分布格局由前体物排放光化学生成的贡献所主导. 本研究提示人们在 O₃ 污染浓度较高的偏东部区域,本地范围内除了必要的减排措施来抑制 O₃ 浓度的上升之外,还需要强化前体物的



(a)和(b)分别为CO和NO₂长期(蓝色)和季节性(黑色)趋势变化状况

图10 2015~2020年期间CO和NO₂长期以及季节性趋势变化

Fig. 10 Long-term and seasonal variations in CO and NO₂ concentration from 2015 to 2020



(a)和(b)分别为气象O₃和PM₁₀校正前[(a1)和(b1)]后[(a2)和(b2)]状况,

图例中括号内数据为污染物年际值增长速率,O₃和PM₁₀年际值分别为90百分数和均值

图11 2015~2020年湖南省O₃颗粒物气象校正前后整体以及不同季节年际趋势变化

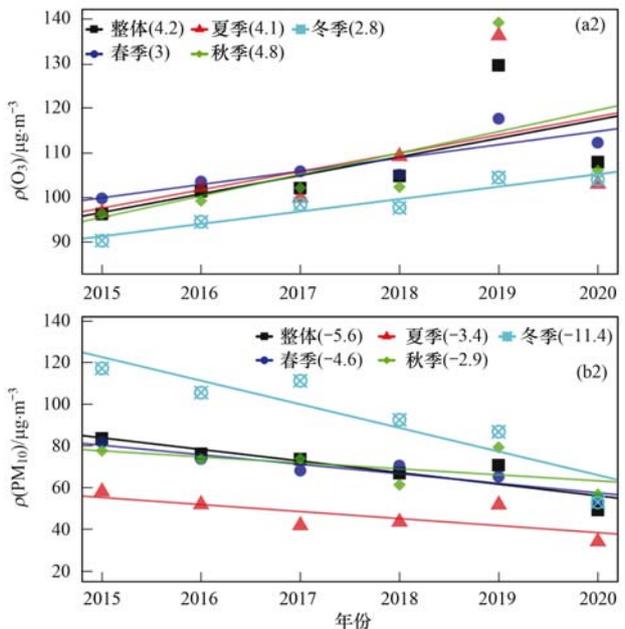
Fig. 11 Interannual variation in ozone and PM₁₀ before and after adjustment from 2015 to 2020 overall and in different seasons in Hunan

减排力度来抵消气象的不良影响.

3 结论

(1)湖南省O₃污染具有明显的日、月和季节变化特征,整体来说,时间上,高值出现在1d中的15:00左右、一年之中的5月和9月以及4个季节中的秋季;空间上,O₃高值集中在偏东北部区域.随着时间推移,O₃以4.7 μg·(m³·a)⁻¹的速率升高,且高值区域有扩大的趋势.

(2)长期范围内O₃浓度趋势变化的主控因素为前体物排放的光化学生成贡献的影响,气象对污染浓度的上升整体上起促进作用,其影响程度达到1 μg·(m³·a)⁻¹.在不同季节里,气象的影响情况不



同,其对春、夏季O₃浓度的上升起促进作用,对秋、冬季则起抑制作用.气象条件没有改变O₃污染浓度的空间分布格局,其对湖南省西北和偏东部区域O₃浓度的上升分别起着抑制和促进作用.

(3)气象对颗粒物影响与O₃有所差异,其对PM₁₀长期趋势变化以及空间分布影响较小.本研究结论提示人们O₃污染防控需要结合气象状况制定适宜的前体物减排措施,并在气象不利的时段(春、夏季)强化减排力度以抵消气象的副作用,同时需要加强区域之间的合作以降低上风向的传输作用.

参考文献:

[1] Lu X, Hong J Y, Zhang L, et al. Severe surface ozone pollution

in China: a global perspective [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2018, 5(8): 487-494.

[2] Zhang X Y, Zhang W T, Lu X H, et al. Long-term trends in NO₂ columns related to economic developments and air quality policies from 1997 to 2016 in China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 639: 146-155.

[3] 中华人民共和国生态环境部. 2019年中国环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202006/P020200602509464172096.pdf>, 2020-06-01.

[4] Chameides W L, Lindsay R W, Richardson J, et al. The role of biogenic hydrocarbons in urban photochemical smog: atlanta as a case study [J]. Science, 1988, 241(4872): 1473-1475.

[5] Cleveland W S, Graedel T E. Photochemical air pollution in the northeast United States [J]. Science, 1979, 204(4399): 1273-1278.

[6] Sillman S. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments [J]. Atmospheric

- Environment, 1999, **11**(12): 1821-1845.
- [7] Chameides W F, Fehsenfeld F, Rodgers M O, *et al.* Ozone precursor relationships in the ambient atmosphere[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, **97** (D5): 6037-6055.
- [8] Belanger W E, Ortman G C. An ozone precursor monitor for analyzing the ozone-forming potential of the atmosphere [J]. Atmospheric Environment, 1984, **18**(7): 1447-1452.
- [9] 严茹莎. 德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 3961-3968.
- Yan R S. Ozone sensitivity analysis and emission controls in Dezhou in summer[J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 3961-3968.
- [10] 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.
- 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.
- [11] Elminir H K. Dependence of urban air pollutants on meteorology [J]. Science of the Total Environment, 2005, **350**(1-3): 225-237.
- [12] Kovač-Andrić E, Brana J, Gvozdić V. Impact of meteorological factors on ozone concentrations modelled by time series analysis and multivariate statistical methods [J]. Ecological Informatics, 2009, **4**(2): 117-122.
- [13] 余益军, 孟晓艳, 王振, 等. 京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 106-114.
- Yu Y J, Meng X Y, Wang Z, *et al.* Driving factors of the significant increase in surface ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China, during 2013-2018 [J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 106-114.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Baker A K, Beyersdorf A J, Doezema L A, *et al.* Measurements of nonmethane hydrocarbons in 28 United States cities [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(1): 170-182.
- [17] Boleti E, Hueglin C, Takahama S. Trends of surface maximum ozone concentrations in Switzerland based on meteorological adjustment for the period 1990-2014 [J]. Atmospheric Environment, 2019, **213**: 326-336.
- [18] Pearce J L, Beringer J, Nicholls N, *et al.* Investigating the influence of synoptic-scale meteorology on air quality using self-organizing maps and generalized additive modelling [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(1): 128-136.
- [19] Li X B, Wang D F, Lu Q C, *et al.* Three-dimensional analysis of ozone and PM_{2.5} distributions obtained by observations of tethered balloon and unmanned aerial vehicle in Shanghai, China [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2018 **32**(5): 1189-1203.
- [20] 白鹤鸣, 师华定, 高庆先, 等. 基于气象调整的京津冀典型城市空气污染指数序列重建[J]. 生态与农村环境学报, 2015, **31**(1): 44-49.
- Bai H M, Shi H D, Gao Q X, *et al.* Re-ordination of air pollution indices of some typical cities in Beijing-Tianjin-Hebei region based on meteorological adjustment [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, **31**(1): 44-49.
- [21] Wise E K, Comrie A C. Meteorologically adjusted urban air quality trends in the Southwestern United States [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(16): 2969-2980.
- [22] Ahamad F, Latif M T, Tang R, *et al.* Variation of surface ozone exceedance around Klang Valley, Malaysia [J]. Atmospheric Research, 2014, **139**: 116-127.
- [23] Latif M T, Huey L S, Juneng L. Variations of surface ozone concentration across the Klang Valley, Malaysia [J]. Atmospheric Environment, 2012, **61**: 434-445.
- [24] Awang N R, Elbayoumi M, Ramli N A, *et al.* Diurnal variations of ground-level ozone in three port cities in Malaysia [J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2016, **9**(1): 25-39.
- [25] 李凯, 刘敏, 梅如波. 泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3539-3546.
- Li K, Liu M, Mei R B. Pollution characteristics and sensitivity analysis of atmospheric ozone in Taian city [J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3539-3546.
- [26] 郭海宇, 陈华忠, 汤翔宇, 等. 湖南省风的时空分布特征及大风概念模型研究[J]. 中低纬山地气象, 2019, **43**(4): 55-59.
- Guo H Y, Chen H Z, Tang X Y, *et al.* Time-space climatic characteristics of wind in Hunan province and conceptual model study of the case [J]. Mid-low Latitude Mountain Meteorology, 2019, **43**(4): 55-59.
- [27] Luo H H, Yang L F, Yuan Z B, *et al.* Synoptic condition-driven summertime ozone formation regime in Shanghai and the implication for dynamic ozone control strategies [J]. Science of the Total Environment, 2020, **745**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141130.
- [28] Cheng H R, Guo H, Wang X M, *et al.* Erratum to: on the relationship between ozone and its precursors in the Pearl River Delta: application of an observation-based model (OBM) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2010, **17**(8): 1491-1492.
- [29] 刘芷君, 谢小训, 谢旻, 等. 长江三角洲地区臭氧污染时空分布特征[J]. 生态与农村环境学报, 2016, **32**(3): 445-450.
- Liu Z J, Xie X X, Xie M, *et al.* Spatio-temporal distribution of ozone pollution over Yangtze River Delta Region [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016, **32**(3): 445-450.
- [30] 林燕芬, 王茜, 伏晴艳, 等. 上海市臭氧污染时空分布及影响因素[J]. 中国环境监测, 2017, **33**(4): 60-67.
- Lin Y F, Wang Q, Fu Q Y, *et al.* Temporal-spatial characteristics and impact factors of ozone pollution in Shanghai [J]. Environmental Monitoring in China, 2017, **33**(4): 60-67.
- [31] 段玉森, 张懿华, 王东方, 等. 我国部分城市臭氧污染时空分布特征分析[J]. 环境监测管理与技术, 2011, **23**(S1): 34-39.
- Duan Y S, Zhang Y H, Wang D F, *et al.* Spatial-temporal patterns analysis of ozone pollution in several cities of China [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2011, **23**(S1): 34-39.
- [32] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, *et al.* Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects [J]. Science of the Total Environment, 2016, **575**: 1582-1596.

CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of PM _{2.5} Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020	CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (1140)
Source Analysis of Ambient PM _{2.5} in Wuhan City Based on Random Forest Model	ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, <i>et al.</i> (1151)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China	REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, <i>et al.</i> (1159)
Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan	WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, <i>et al.</i> (1170)
Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM ₁ Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou	ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, <i>et al.</i> (1180)
Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of PM _{2.5} in the Yangtze River Economic Belt	WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, <i>et al.</i> (1190)
Spatial Heterogeneity of PM _{2.5} Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region	ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, <i>et al.</i> (1201)
Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2 + 26" Cities	ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (1212)
Pollution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} in Shanxi Province Based on Wavelet Transform	ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (1226)
Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China	ZHAO Nan, LU Yi-min (1235)
Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province	LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, <i>et al.</i> (1246)
Temporal and Spatial Variation in O ₃ Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas	LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-ni, <i>et al.</i> (1256)
Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an	LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, <i>et al.</i> (1268)
Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City	WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (1277)
Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo	QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province	QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants	YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, <i>et al.</i> (1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (1323)
Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin	LIU Yan-long, ZHENG Yi-an (1332)
Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing	WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, <i>et al.</i> (1346)
River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment	HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, <i>et al.</i> (1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries	ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, <i>et al.</i> (1365)
Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guanglong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors	CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo (1375)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers	GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, <i>et al.</i> (1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (1394)
Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years	GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, <i>et al.</i> (1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangs Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain	SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River	SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i> (1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the <i>Grus leucogeranus</i> Reserve of Poyang Lake	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, <i>et al.</i> (1447)
Influence of Microplastics on the Development of <i>Proteus</i> Biofilm	TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, <i>et al.</i> (1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangs Lake	LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, <i>et al.</i> (1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics	SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, <i>et al.</i> (1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N ₂ O from Coastal Rivers in Tianjin City	TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (1481)
Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland	CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, <i>et al.</i> (1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level	QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network	JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, <i>et al.</i> (1512)
Selective Adsorption of Au(III) by Activated Carbon Supported Polythioamides and Adsorption Mechanism	ZHAO Wen-jin, ZHANG Shen, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (1521)
Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge	ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua (1529)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District	LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, <i>et al.</i> (1535)
Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (1546)
Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province	ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, <i>et al.</i> (1558)
Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide	YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, <i>et al.</i> (1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM	MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, <i>et al.</i> (1577)
Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(II) and As(III)	LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties	LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress	REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River	LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, <i>et al.</i> (1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil	SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by <i>Solanum nigrum</i> L. and on the Soil Bacterial Community Structure	LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, <i>et al.</i> (1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, <i>et al.</i> (1649)
Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N ₂ O and N ₂ Emission in a Winter Wheat Field	PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, <i>et al.</i> (1668)
Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis	ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis	RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, <i>et al.</i> (1688)