

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

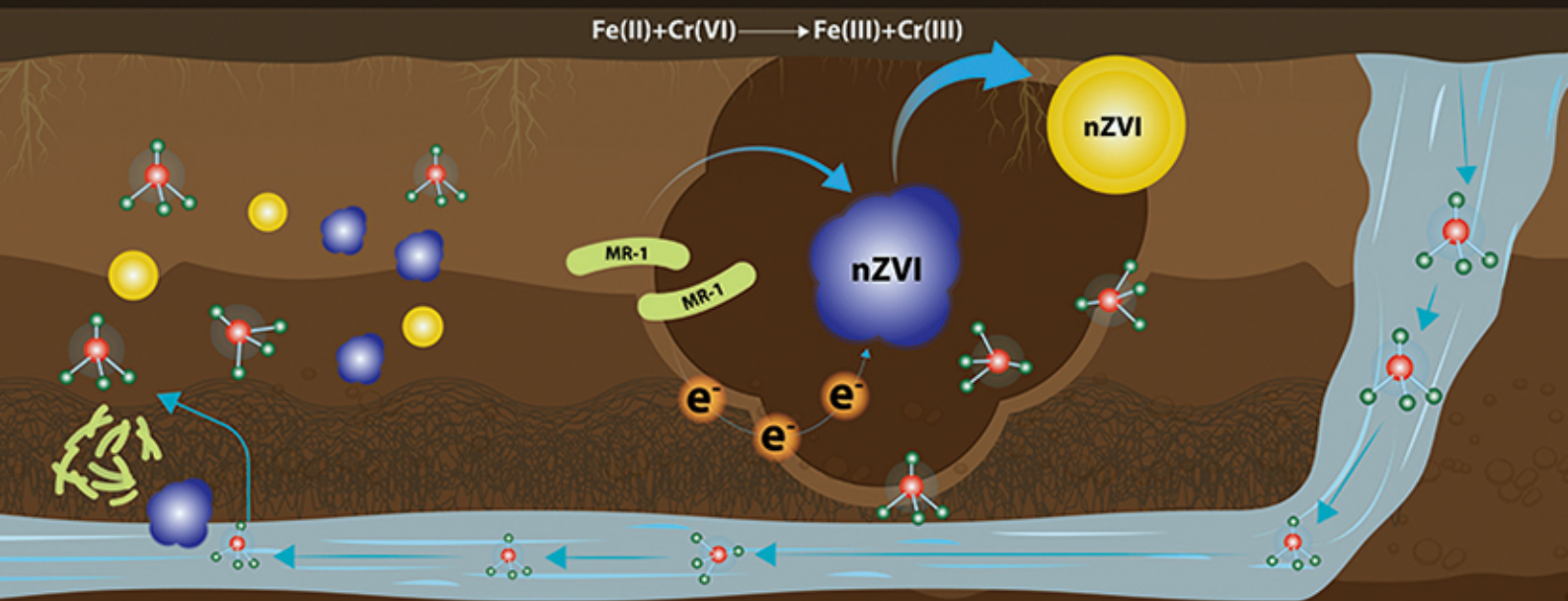
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期
Vol.42 No.9

目次

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

中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素

何超¹, 慕航¹, 杨璐¹, 王丹璐², 邸彦峰³, 叶志祥¹, 易嘉慧¹, 柯碧钦¹, 田雅¹, 洪松^{1*}

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079; 2. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 广西师范大学环境与资源学院, 桂林 541006)

摘要: 中国的近地面臭氧(O_3)浓度在2015~2018年间持续升高, 已成为仅次于颗粒物的重要大气污染物。基于中国337个城市2015~2018年暖季(4~9月)的实时 O_3 浓度数据和气象数据, 利用趋势分析、空间自相关、热点分析和多尺度地理加权回归(MGWR), 研究了2015~2018年中国暖季地表 O_3 浓度的空间演变格局, 探讨了气象因素对其驱动的空间差异性。结果表明: ①中国暖季 O_3 浓度整体呈显著升高趋势($P < 0.05$), 平均升高速率为 $0.28 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$, 其中超过55%的城市 O_3 浓度每年升高 $0.50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; ② O_3 浓度存在明显的区域差异, 高值区(平均浓度 $> 60 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)分布在华东、华北、华中和西北部分地区; 低值区(平均浓度 $< 20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)分布在华南和西南地区; ③ O_3 浓度变化趋势在空间上存在位于华东、华北、西北以及华中地区的热点区域和位于西南、华南(广西)以及东北地区的冷点区域; ④气温是中国暖季 O_3 变化的主要气象驱动因素, 其对华北、西北和东北地区 O_3 浓度的影响显著高于其他地区; 除广西、云南和江西部分地区外, O_3 浓度与气温呈显著正相关; O_3 浓度在华南、华东和华中大部分地区与风速呈显著负相关, O_3 浓度在华北和东北部分地区与风速呈显著正相关; 除辽宁、山东、河北、甘肃、广东及西南部分地区外, O_3 浓度与云层覆盖度呈显著负相关; 除西北和西南部分地区外, O_3 浓度与降水呈显著负相关。

关键词: 臭氧(O_3); 空间格局; 气象要素; 多尺度地理加权回归(MGWR); 中国

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4168-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009228

Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China

HE Chao¹, MU Hang¹, YANG Lu¹, WANG Dan-lu², DI Yan-feng³, YE Zhi-xiang¹, YI Jia-hui¹, KE Bi-qin¹, TIAN Ya¹, HONG Song^{1*}

(1. School of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. College of Environment and Resources, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China)

Abstract: The concentration of surface ozone (O_3) in China increased consistently from 2015 to 2018, and became an important air pollutant, followed by particulate matter. This study uses real-time O_3 and meteorological data, obtained in 337 cities in China during the warm seasons (April to September) of 2015 to 2018, to determine the spatial variation of surface O_3 and its meteorological driving factors in major cities in China, via trend analysis, spatial autocorrelation, hotspot analysis, and multi-scale geographically weighted regression (MGWR) modeling. The results show that: ① during the warm season, O_3 concentrations showed a significant growth trend ($P < 0.05$), with an average growth rate of $0.28 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$, while more than 55% of urban O_3 concentrations increased by $0.50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ annually. ② There were significant regional differences in O_3 concentration. High values ($> 60 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) were distributed over east China, north China, central China, and northwest China, while low values ($< 20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) were distributed over south China and southwest China. ③ The spatial agglomeration of O_3 concentration has been enhanced year by year, with hotspots mainly distributed over east China and central China. In contrast, there are cold spots in northeast China, southwest China, and southern China. ④ Analysis of the MGWR model indicated that temperature, wind speed, cloud coverage, and precipitation all have a significant effect on the distribution of O_3 , although there are also discrepancies in driving factor priorities between the different regions. Temperature was the main meteorological driving factor of O_3 variation during the warm season in China, and its impact on O_3 concentration was significantly higher in north China, northwest China, and northeast China than in other regions; overall, there was a significant positive correlation between O_3 concentration and temperature, except in Guangxi, Yunnan, and Jiangxi. O_3 concentration was negatively correlated with wind speed in most regions of south China, east China, and central China, and positively correlated with wind speed in north China and northeast China. O_3 concentration was significantly negatively correlated with cloud cover, except in Liaoning, Shandong, Hebei, Gansu, Guangdong, and some areas in southwest China. O_3 concentration was significantly negatively correlated with precipitation, except in the northwest and southwest regions.

收稿日期: 2020-09-23; 修订日期: 2021-03-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0206201, 2017YFC0212600)

作者简介: 何超(1989~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气污染与环境正义, E-mail: he_chao@whu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: songhongpu@126.com

Key words: ozone (O_3); spatiotemporal pattern; meteorological factors; multi-scale geographically weighted regression (MGWR); China

近地面臭氧(ozone, O_3)是近年来广受关注的空气污染物,主要通过自然和人为排放的挥发性有机物(VOCs)、氮氧化物(NO_x)和一氧化碳(CO)等前体物,在太阳辐射作用下发生光化学反应生成^[1].长期暴露于 O_3 中,不仅会对人体的呼吸或循环系统造成严重的负面影响,而且还会导致植物细胞死亡和农作物产量下降^[2].中国环境监测总站公布的数据显示,中国338个地级及以上城市的 O_3 日最大小时平均第90百分位浓度由2014年的 $140.0 \mu g \cdot m^{-3}$ 升高至2018年的 $151.0 \mu g \cdot m^{-3}$,超标天数由2014年的6.1%增加至2018年的8.4%^[3].在2013~2019年中国暖季(4~9月) O_3 日最大8 h平均浓度(MDA8)以每年5.0%的速度增加,这种增长速度与对流层 O_3 评估报告(tropospheric ozone assessment report, TOAR)中的全球任何区域相比都要更快^[4].在中国城市颗粒物(particulate matter, PM)污染逐年改善的背景下,近地面 O_3 浓度不降反升,成为重要性仅次于PM的大气污染物^[5~7].自2013年中国开放使用全国空气质量监测网络以来,国内外学者已从不同的时空尺度对中国近地面 O_3 的污染水平^[8,9]、来源^[10]、前体物^[11]、空间分布^[12,13]及其驱动因素^[14,15]进行了广泛的定量研究.

近地面 O_3 化学性质活泼,局部 O_3 浓度的变化更易受到气象因素的显著影响.关于 O_3 浓度和各类气象要素之间的相关性分析是当前的研究热点.已有研究表明,地表 O_3 浓度与气温、辐射强度和日照时间在统计学上呈正相关关系,与降水、风速、相对湿度和能见度呈负相关关系^[16~18].Gong等^[19]的研究基于广义相加模型(generalized additive model, GAM)研究了中国16个城市地面 O_3 的空间分布及其主导气象因子,发现100 mbar(压力单位,1 mbar = 100 Pa)相对湿度、2 m日最高气温、700 mbar日均纬向风速和500 mbar气压在不同城市起着不同的驱动作用.程念亮等^[20]和赵伟等^[21]的研究分析北京市和香港地区 O_3 浓度与气象因素之间的关系发现,两地的 O_3 污染在高温、强辐射和相对湿度小的条件下更容易发生.王玫等^[22]的研究发现,京津冀地区当温度 $>30^\circ C$,相对湿度为50%~60%,风速为 $2 \sim 3 m \cdot s^{-1}$ 时, O_3 浓度超标率最大.胡成媛等^[23]的研究发现,日照时间、相对湿度和气温对四川盆地 O_3 浓度影响较大,风速、气压和降水量对 O_3 浓度影响相对较小.陈志青等^[24]和崔梦瑞等^[25]分

别研究东北地区和京津唐地区 O_3 浓度变化和成因时发现了同样的变化规律.此外,地形对 O_3 的影响也不容忽视,例如,Li等^[15]的研究利用多元线性回归模型定量研究2013~2019年中国 O_3 浓度升高的气象影响时发现,夏季中国 O_3 浓度升高的主要驱动因素是气温,但华北地区 O_3 浓度升高的原因除了气温影响,在6月温暖干燥的空气越过华北地区诸多山脉下沉到北部和西部形成焚风,为生成 O_3 的光化学反应提供了良好的外部条件.

尽管目前对中国地表 O_3 的时空分布规律和驱动因素的研究取得了较为丰硕的成果,但仍然存在以下不足:①2013年之前由于缺乏地面 O_3 监测数据,前人大多使用遥感反演和机器学习的方法生成的 O_3 浓度数据集来开展研究.这类数据是覆盖范围较大的网格化数据,多适用于年际研究,但其时序变化易受到时间精度限制.②由于不同区域和不同时间 O_3 浓度的变化幅度很大,前人常使用的MDA8 O_3 浓度指标并不能客观反映 O_3 浓度的时空变化规律,因此缺乏对 O_3 浓度变化瞬时性和持续性的深入探讨.③线性回归模型和空间统计模型虽然在一定程度上可以解释气象因素对 O_3 的影响,但由于气象因素具有空间异质性,探讨不同区域的气象因素对 O_3 浓度驱动作用的空间差异就更为重要.

针对以上不足,本文利用中国环境监测总站提供的2015~2018年暖季(4~9月)的小时 O_3 浓度监测数据和美国国家环境信息中心提供的同期气象数据,开展了以下工作:①下载了中国337个城市1581个监测站点的40979520条逐时 O_3 数据和674个监测站点的485280条逐日气象数据;②统计了 O_3 浓度的第5百分位(Perc5)、平均值(Mean)、第95百分位(Perc95)和日最大8 h平均浓度(MDA8),利用自然断点法、趋势分析、莫兰指数和热点分析等方法,定量估算了2015~2018年中国暖季 O_3 浓度变化的时空格局;③利用多尺度地理加权回归(MGWR)分析了中国地表 O_3 浓度变化的气象驱动因素及其空间差异.

1 材料与方法

1.1 研究区域

本文主要研究了2015~2018年中国(中国香港、澳门和台湾地区数据暂缺)暖季(每年4~9月)337个城市的地表 O_3 时空演变格局及其与气象要素的相互关系.这337个城市分别划入7个地理大

区,分别是:华北地区、华南地区、华东地区、华中地区、西南地区、西北地区和东北地区.同时,根据经济发展水平、O₃ 污染水平和国内外学者对中国城市地表 O₃ 的研究热点^[14],本研究在 7 个地理大区选择

了福州市、长沙市、广州市、济南市、北京市、成都市、拉萨市、西宁市和乌鲁木齐市等 9 个重点城市来对比研究中国不同地区城市的地表 O₃ 变化和气象要素的相关性(图 1).

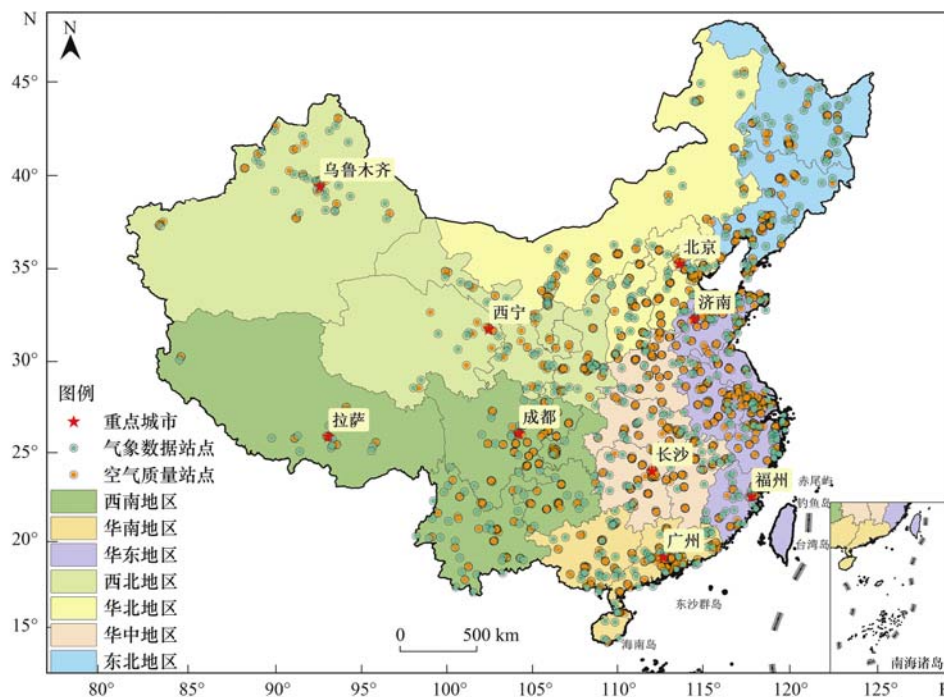


图 1 地表 O₃ 监测站点、气象站点和重点城市空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of surface O₃ monitoring stations, meteorological stations, and key cities

1.2 数据来源

1.2.1 O₃ 数据

为了排除 O₃ 数据在监测过程中造成的数据波动性^[26],本文使用 O₃ 8 h 滑动均值浓度作为研究数据(O₃ 浓度).本文使用的 2015 年 4 月 1 日~2018 年 9 月 30 日 O₃ 浓度数据来源于中国国家环境监测总站 (<http://106.37.208.233:20035/>),从 1 581 个监测站点下载了 40 979 520 条数据.为了确保研究数据的连续性和可靠性,本研究在进行数据分析之前对获取的小时 O₃ 浓度数据按照大气污染物浓度数据有效性规定(GB 3095-2012)进行了严格的数据质量控制以便去除异常数据^[27].

1.2.2 气象数据

本研究使用 2015 年 4 月 1 日~2018 年 9 月 30 日逐日气象数据,来源于美国国家环境信息中心(national centers for environmental information, NCEI, <https://www.ncdc.noaa.gov/>),下载了 674 个监测站点的 485 280 条数据.主要包括:2 m 地表气温(TEM,℃)、近地面 10 m 以上风速(WS, m·s⁻¹)及风向[WD,(°)]、云覆盖度(CLC)和降水(PRE,mm).其中,风向为起风点与正北方向顺时针测量的夹角,风速为空气通过某一个固定点的水平

速度.而云盖度则以 0~9 的整数来表示,例如云盖度为 0 表示空中不存在云层,随着云盖度数值的增加,云量逐渐增多,云盖度为 9 意味着天空模糊或无法计算云量.此外,由于获取的相对湿度缺失值太多,在驱动因子分析中相对湿度不参与运算.

1.3 研究方法

1.3.1 O₃ 统计指标

为了评估 2015~2018 年中国暖季 O₃ 浓度瞬时性和持续性变化,本研究引入前文提到的 4 个统计指标来对比分析 O₃ 污染特征.每个指标的具体计算公式见 Lu 等^[4]的研究.

1.3.2 趋势分析

趋势分析通常用于大气污染物的时间动态分析,以探索污染物的年际变化特征^[28,29].本文基于趋势分析方法分析了 2015~2018 年中国暖季地表 O₃ 浓度增长速率的空间演变格局,具体计算如公式(1):

$$\text{Trend} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times O_{3i}) - \left(\sum_{i=1}^n i \right) \left(\sum_{i=1}^n O_{3i} \right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中, O_3 为每个城市的 O_3 浓度, n 为时间跨度, 此处时间跨度为 4; i 为时间年份; O_{3i} 表示第 i 年的 O_3 浓度. 以时间为横轴, 对 O_3 时间序列数据进行一元线性回归, 得到反映 O_3 浓度变化趋势的斜率. 理论上, 如果变量平稳变化, 则该斜率很可能与变化率相似, 可以反映该组数据的变化趋势. 斜率的显著正值表明 O_3 浓度有增长趋势, 而斜率的显著负值则反映了相反的趋势. 同时运用 Mann-Kendall 法对完整的 O_3 浓度时间序列进行趋势检验, 可以检测到该时间序列中是否存在单调的增加或减小的趋势, 以及检测到的趋势是否具有统计学意义. 当检验统计量的绝对值 ≥ 1.96 时, 表示通过了置信度 95% 的检验, 具有高置信水平^[29].

1.3.3 空间自相关分析

本文使用全局莫兰指数 (global Moran's I) 衡量近地面 O_3 浓度的全局空间自相关性, 使用局部莫兰指数 (angelina local Moran's I) 挖掘近地面 O_3 污染的局部空间自相关性, 对空间集聚和空间异质进行识别. 对于第 i 个空间单元, 全局 Moran's I 和局部 Moran's I 计算分别如公式 (2) 和公式 (3) 所示:

$$I_G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (2)$$

$$I_L = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2} \quad (3)$$

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

$$Z(I) = [I - E(I)] / \sqrt{V[I]} \quad (5)$$

$$E[I] = -1 / (n - 1) \quad (6)$$

$$V[I] = E[I^2] - E[I]^2 \quad (7)$$

式中, n 为空间单元 (本文中为 337 个地级市) 的数量, x_i 和 x_j 分别为空间单元 i 和 j 的 O_3 浓度, $\bar{x}$ 为所有单元 O_3 浓度的平均值. W_{ij} 为单元 i 和 j 的空间权重矩阵, 若 $W_{ij} = 1$ 则表明空间单元 i 和 j 间有公共边, 反之 $W_{ij} = 0$. 对于 Moran's I , 可以用标准化统计量 $Z(I)$ 检验是否存在空间自相关关系 [式 (5)]. Moran's I 的取值在 $[-1, 1]$ 之间, $Z(I)$ 的取值在 $[-1.96, 1.96]$ 之间. 在 0.05 的显著水平下, 通过分析 Moran's I 的显著性水平和 $Z(I)$ 的取值范围可以得到 4 种不同空间自相关聚类关系类型: ①若 Moran's $I > 0$ 且 $Z(I) > 1.96$, 为“高-高”类型 (HH), 表示该单元和邻近单元 O_3 浓度均高于平均值, 即“热点”区域; ②若 Moran's $I > 0$ 且 $Z(I) < -1.96$, 为“低-低”类型 (LL), 表示该单元和邻近单元 O_3 浓

度均低于平均值, 即“冷点”区域; ③若 Moran's $I < 0$ 且 $Z(I) > 1.96$, 为“高-低”类型 (HL), 表示高 O_3 浓度的单元被低 O_3 浓度单元围绕; ④ Moran's $I < 0$ 且 $Z(I) < -1.96$, 为“低-高”类型 (LH), 表示低 O_3 浓度单元被高 O_3 浓度单元^[30].

1.3.4 多尺度地理加权回归 (MGWR)

相比经典地理加权回归 (GWR) 模型而言, MGWR 是一种灵活的回归模型, 每个回归系数都是基于局部回归得到的, 且带宽具备特异性^[31]. 此外, GWR 模型在拟合运算过程中使用了加权最小二乘估计方法, 而 MGWR 则相当于一个广义相加模型 (GAM), 该模型可以对线性或非线性关系的空间变量进行回归分析, 同时也是处理各种具有空间变量复杂非线性关系的有效工具. 在本研究中 MGWR 的计算如公式 (8) 所示:

$$y(O_3) = \beta_{bw1}(u_i, v_i) TEM_i + \beta_{bw2}(u_i, v_i) WS_i + \beta_{bw3}(u_i, v_i) CLC_i + \beta_{bw4}(u_i, v_i) PRE_i + \varepsilon_i \quad (8)$$

式中, $y(O_3)$ 表示因变量 O_3 浓度, TEM 、 WS 、 CLC 和 PRE 分别表示自变量的不同气象因素, β_{bwi} 表示回归系数, (u_i, v_i) 表示位置 i 的经纬度坐标, ε_i 表示位置 i 的残差. 以上模型的模拟计算工作均在 MGWR 2.2 软件中进行, 其中模型运行过程中选择的核函数类型为 Bisquare, 带宽搜索类型为 Golden, 模型参数初始化类型以 GWR 估计作为初始估计模型.

2 结果与讨论

2.1 O_3 浓度时空分布

图 2 表示 2015 ~ 2018 年 4 ~ 9 月不同统计指标 O_3 浓度空间分布. 结果发现, 不同统计指标 O_3 浓度空间分布具有一致性, O_3 浓度高值区 (平均浓度 $> 60 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 位于人类活动密集的华东地区, 华北地区, 华中地区和西北部分地区; 低值区 (平均浓度 $< 20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 主要分布在华南地区和西南地区, 与 Li 等^[15] 的研究结果一致. 其中, 华北地区、华东地区和华南地区 Mean O_3 浓度和 Perc95 O_3 浓度增长水平均超过了 10%, 这与该区域城市 O_3 浓度超标程度加重的特征一致^[22]. 从时间变化来看, 在 2016 年以前, Mean O_3 浓度 $> 60 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ [图 2(b)] 和 MDA8 O_3 浓度 $> 120 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ [图 2(d)] 的区域主要集中分布在华北地区 (如北京市、天津市、河北省等) 和华东地区 (如上海市、江苏省、浙江省等). 自 2016 年以后, O_3 污染的区域开始向西扩展到西北地区 (陕西和甘肃等), 向南延伸到了长江中下游平原 (湖北省、湖南省和江西省等). Perc5 和 Perc95 的 O_3 浓

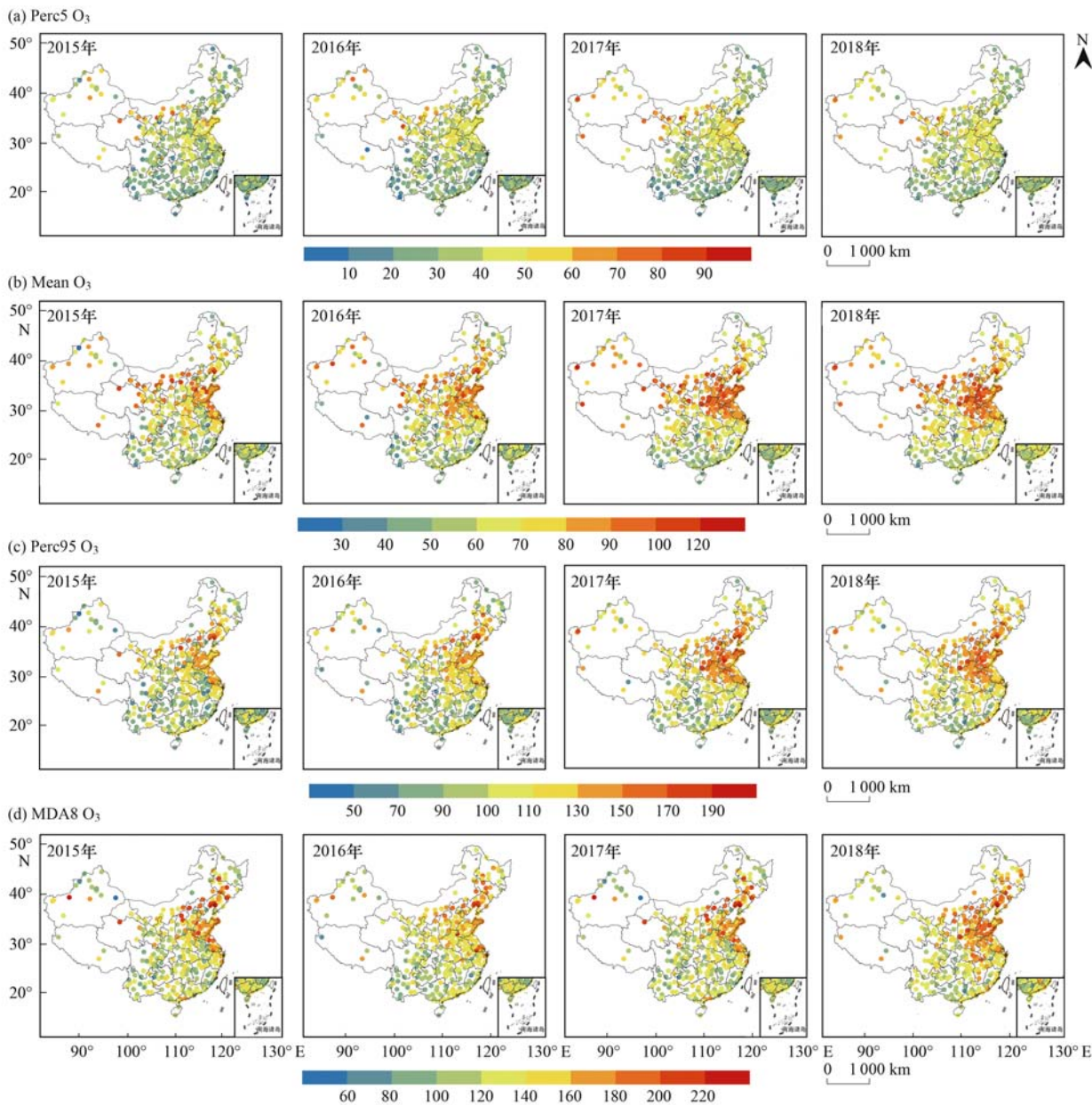


图2 中国暖季不同统计指标 O_3 浓度 ($\mu g \cdot m^{-3}$) 时空分布

Fig. 2 Spatiotemporal distribution of O_3 concentration according to various metrics during the warm season in China

度表现为同样的时空分布规律. 此外, 统计发现 Mean O_3 浓度 $> 60 \mu g \cdot m^{-3}$ 的监测站点占所有站点的比例由 2015 年的 26.43% 增长到 2018 年的 39.24%.

2.2 O_3 浓度增长速率的空间差异

本研究期间中国暖季 O_3 浓度呈增长趋势, Perc5、Mean、Perc95 和 MDA8 O_3 浓度增长速率分别为 0.15 、 0.28 、 0.43 和 $0.46 \mu g \cdot (m^3 \cdot a)^{-1}$ [图 3 (a) ~ 3 (d)]. 其中, 超过 55% 的城市平均 O_3 浓度以超过 $0.5 \mu g \cdot (m^3 \cdot a)^{-1}$ 的速度增长. 就 Mean O_3 浓度而言 [图 3 (b)], 在 337 个研究城市中有 211 个城市平均 O_3 浓度增长速率呈增长状态, 其中 93 个城市平均 O_3 浓度增长速率范围为 $0 \sim 0.5$

$\mu g \cdot (m^3 \cdot a)^{-1}$, 65 个城市浓度增长速率范围为 $0.5 \sim 1 \mu g \cdot (m^3 \cdot a)^{-1}$ 之间, 41 个城市浓度增长速率范围为 $1 \sim 2 \mu g \cdot (m^3 \cdot a)^{-1}$, 12 个城市 O_3 浓度增长速率 $> 2 \mu g \cdot (m^3 \cdot a)^{-1}$. 从不同地理大区来看, 东北地区 Perc5、Mean 和 Perc95 O_3 浓度增长速率分别下降 0.14 、 0.11 和 $0.03 \mu g \cdot (m^3 \cdot a)^{-1}$, MDA8 O_3 浓度增长速率升高 $0.05 \mu g \cdot (m^3 \cdot a)^{-1}$. 其他 6 个地理区域, O_3 浓度增长速率都呈增长趋势 (表 1). 其中, 华东、华北和华中地区 Mean O_3 浓度增长速率超过了 $0.5 \mu g \cdot (m^3 \cdot a)^{-1}$, 分别为 0.54 、 0.56 和 $0.55 \mu g \cdot (m^3 \cdot a)^{-1}$; 西北、西南和华南地区相比其他地区 O_3 浓度增长速率较小, 分别为 0.33 、 0.01 和 $0.07 \mu g \cdot (m^3 \cdot a)^{-1}$, 其他指标的 O_3 浓度增长速率

如表 1. 对于 9 个重点城市而言,拉萨市 O_3 浓度呈逐年下降趋势, Perc5、Mean、Perc95 和 MDA8 O_3 浓度增长速率分别为 -0.58 、 -1.12 、 -1.50 和 $-1.52 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$. 有研究表明,拉萨市 O_3 污染表现为“来得早,去得快”的特征,与内地城市相比,拉萨市 O_3 在 3 月达到全年平均值,9 月低于全年平均值,并在春末夏初达到峰值,这也就合理地解释了拉萨市 O_3 浓度暖季下降的原因^[32]. 北京市 Perc5 和 MDA8 O_3 浓度每年分别下降 $0.85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $1.90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, Mean O_3 浓度和 Perc95 O_3 浓度增长速率分别以 $0.13 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ 和 $0.16 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ 速度增加,这与王玫等^[22]的研究结果相似. 其他重点城市如长沙市、济南市、乌鲁木齐市和福州市, O_3 浓度所有指标以每年超过 $0.50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的速度持续增长(表 1).

表 1 2015 ~ 2018 年不同区域和城市不同统计指标
 O_3 浓度增长速率/ $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$

Table 1 Growth rate of O_3 concentration according to various metrics in different regions and cities of China from 2015 to 2018

地区和城市	/ $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$			
	Perc5 O_3	Mean O_3	Perc95 O_3	MDA8 O_3
西北地区	0.22	0.33	0.49	0.49
华北地区	0.30	0.54	0.76	0.83
西南地区	0.02	0.01	0.08	0.09
华东地区	0.30	0.56	0.83	0.85
华中地区	0.30	0.55	0.78	0.79
华南地区	0.08	0.07	0.08	0.09
东北地区	-0.14	-0.11	-0.03	0.05
北京市	-0.85	0.13	0.16	-1.90
长沙市	0.76	0.85	1.26	1.34
济南市	-0.21	0.56	0.81	0.78
乌鲁木齐市	0.64	0.96	1.20	1.26
福州市	0.58	0.75	1.24	1.17
拉萨市	-0.58	-1.12	-1.50	-1.52
西宁市	0.14	0.16	0.48	0.47
成都市	0.41	0.00	0.12	0.22
广州市	0.21	0.35	0.01	-0.18

2.3 O_3 浓度增长速率的空间聚类格局

通过计算全局 Moran's I 指数发现,研究时段内全局 Moran's I 指数均为正值,且通过显著性检验($P=0.05$),表明 O_3 浓度增长速率在空间上呈现显著的空间正自相关,空间集聚特征明显. 基于局部自相关分析[图 3(e) ~ 3(h)]和热点分析[图 3(i) ~ 3(l)]清楚地发现, O_3 浓度变化趋势在空间上存在一个显著的热点和两个显著的冷点区域. 热点区域,即 O_3 浓度增长速率高值集聚区(HH),主要集中在华东地区的山东省、安徽省和江西省;华南地区的福建省周围区域;华北地区的天津市、河北省和山西省;西北地区的陕西省以及华中地区的河南

省和湖北省等区域,这些区域是 O_3 污染最严重的区域. 冷点区域,即 O_3 浓度增长速率低值集聚区(LL),主要集中分布在西南地区的云南省,华南地区的广西壮族自治区以及东北地区的黑龙江省、吉林省和辽宁省,这些区域 O_3 污染相对较低,这与中国 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空间集聚格局相似^[30], Li 等^[1]的研究认为,中国华北等地 O_3 污染加重的一个重要因素是 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度减少了 40%,因为 $\text{PM}_{2.5}$ 的急剧减少会导致对 O_3 前体物的非均相吸收,从而进一步加剧 O_3 的光化学反应. 此外,在热点区域伴随着零星的“低-高”(LH)的聚类类型,即低 O_3 浓度增长速率的城市被高 O_3 浓度增长速率的城市围绕;同样地,在冷点区域伴随着“高-低”(HL)的聚类类型,即高 O_3 浓度增长速率的城市被低 O_3 浓度增长速率的城市围绕.

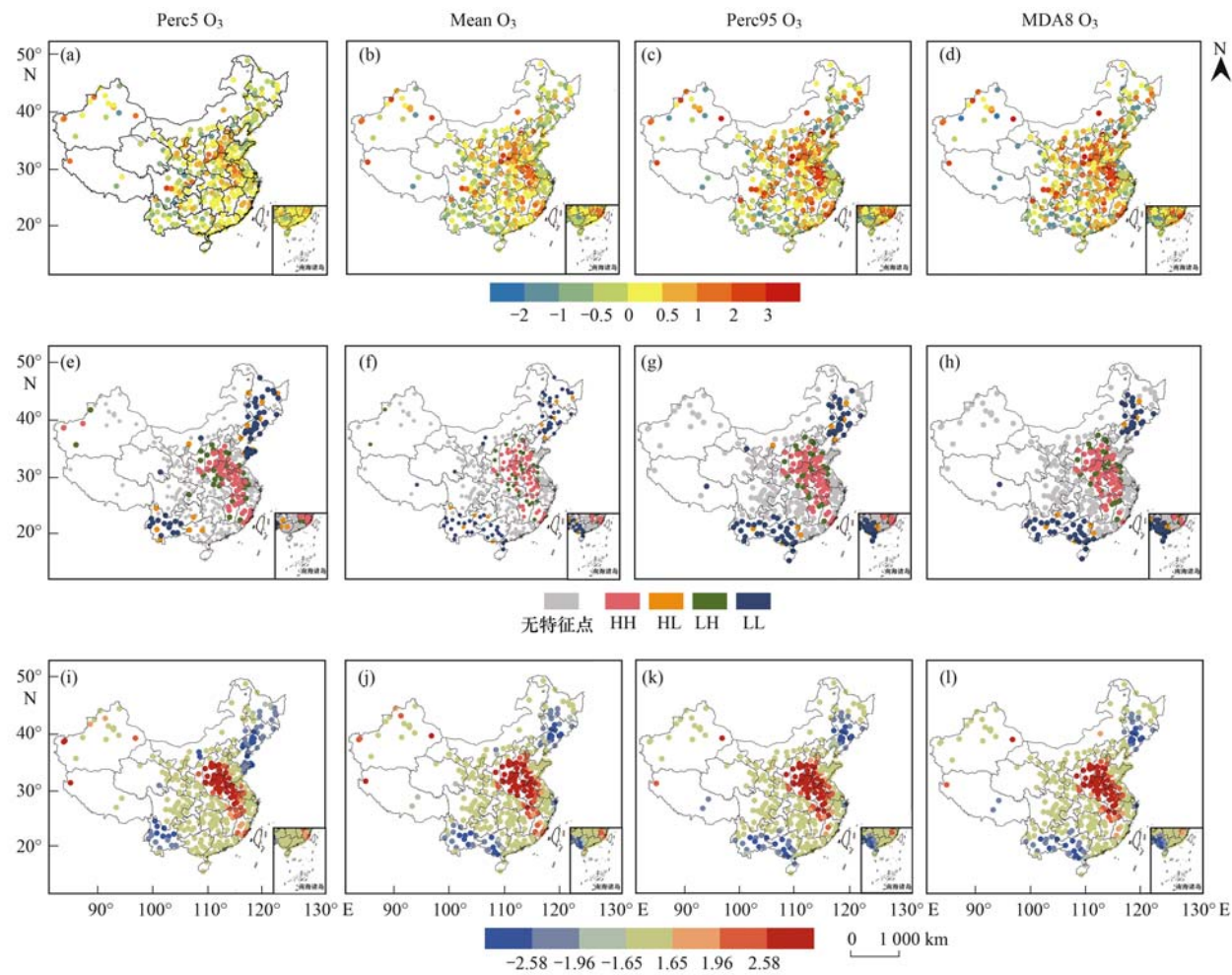
2.4 O_3 浓度的气象驱动因素及其空间差异分析

为了深入地对 O_3 浓度变化的气象驱动因素进行细致分析,本文选取了 2015 ~ 2018 年 160 个城市的面板数据,共计 574 965 个数据样本,利用 MGWR 对每个回归系数都是基于局部回归的统计优势,揭示其气象驱动因子对中国 O_3 浓度的影响,回归系数的大小可以判断对 O_3 影响最重要的气象因子. 各气象因素的回归系数的绝对值越大(即高值区),其对 O_3 的影响程度越大^[33]. 在进行回归分析之前,为了检验解释变量之间是否存在多重共线性的问题,本研究利用 SPSS 25.0 软件对每个解释变量进行共线性检验并得到方差膨胀因子(VIF),检验结果表明气温、风向、风速、云盖度和降水量的 VIF 值分别为 1.29、1.45、1.39、1.47 和 1.29,均小于 10,表明解释变量之间不存在明显的多重共线性影响,可进行下一步的回归分析,模型回归结果如表 2 和图 4 所示. 在有效的参数数量方面,从全局回归结果分析来看,拟合优度(R^2)为 0.275,残差平方和(RSS)为 25 880.217(表 2),而且 MGWR 的各个系数在整体上均显著($P < 0.05$). 从局部回归结果来看,超过 60% 的城市回归结果的残差小于 $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [图 4(a)],同时超过 55% 的城市局部 R^2 超过 0.45,其中 13% 的城市超过 0.60[图 4(b)],这些回归结果表明, MGWR 使用更少的参数得到了更接近真实值

表 2 全局回归结果

Table 2 Global regression results

模型评价指标	数值
残差平方和(residual sum of squares, RSS)	25 880.217
对数似然值(log-likelihood)	-44 935.485
赤池信息量准则(AICc)	89 892.977
拟合优度(R^2)	0.276
调整 R^2 (adjust R^2)	0.275



(a) ~ (d) 表示 O_3 浓度增长速率的空间分布 ($P < 0.05$), 图例表示 O_3 浓度增长速率, 单位 $\mu g \cdot (m^3 \cdot a)^{-1}$; (e) ~ (h) 表示 O_3 浓度增长速率的空间聚类, 图例表示聚类类型, 无单位; (i) ~ (l) 表示 O_3 浓度增长速率的热点和冷点分析, 图例表示热点分析取值范围, 无单位

图 3 中国暖季不同指标 O_3 浓度增长速率空间格局演变

Fig. 3 Spatial variation of the growth rate of O_3 concentration, with different metrics, during the warm season in China

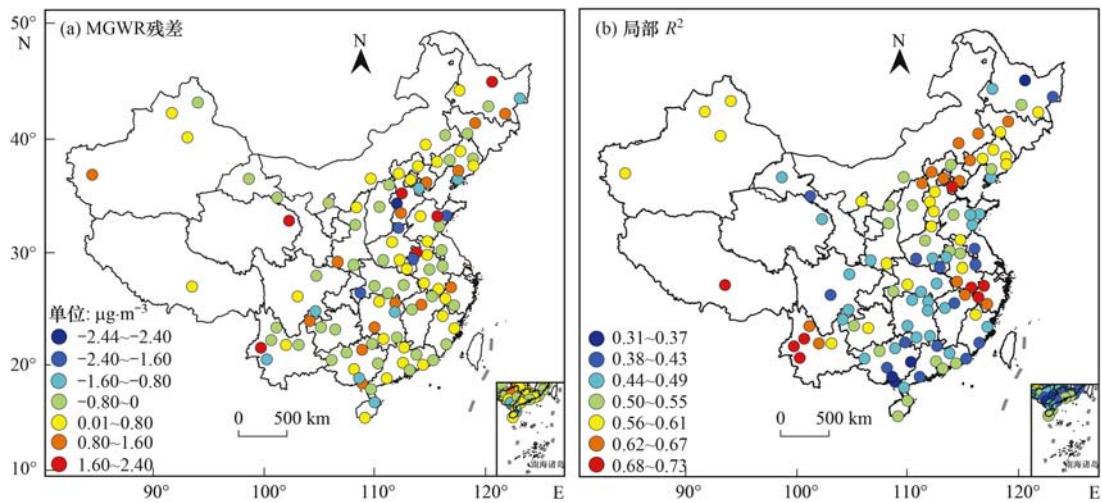


图 4 MGWR 回归残差和局部 R^2 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of regression residual and local R^2 in the MGWR model

的回归结果,完全可以用来评估 O_3 污染与气象因素之间的关系.

表 3 和图 5 分别表示 MGWR 各系数的统计描

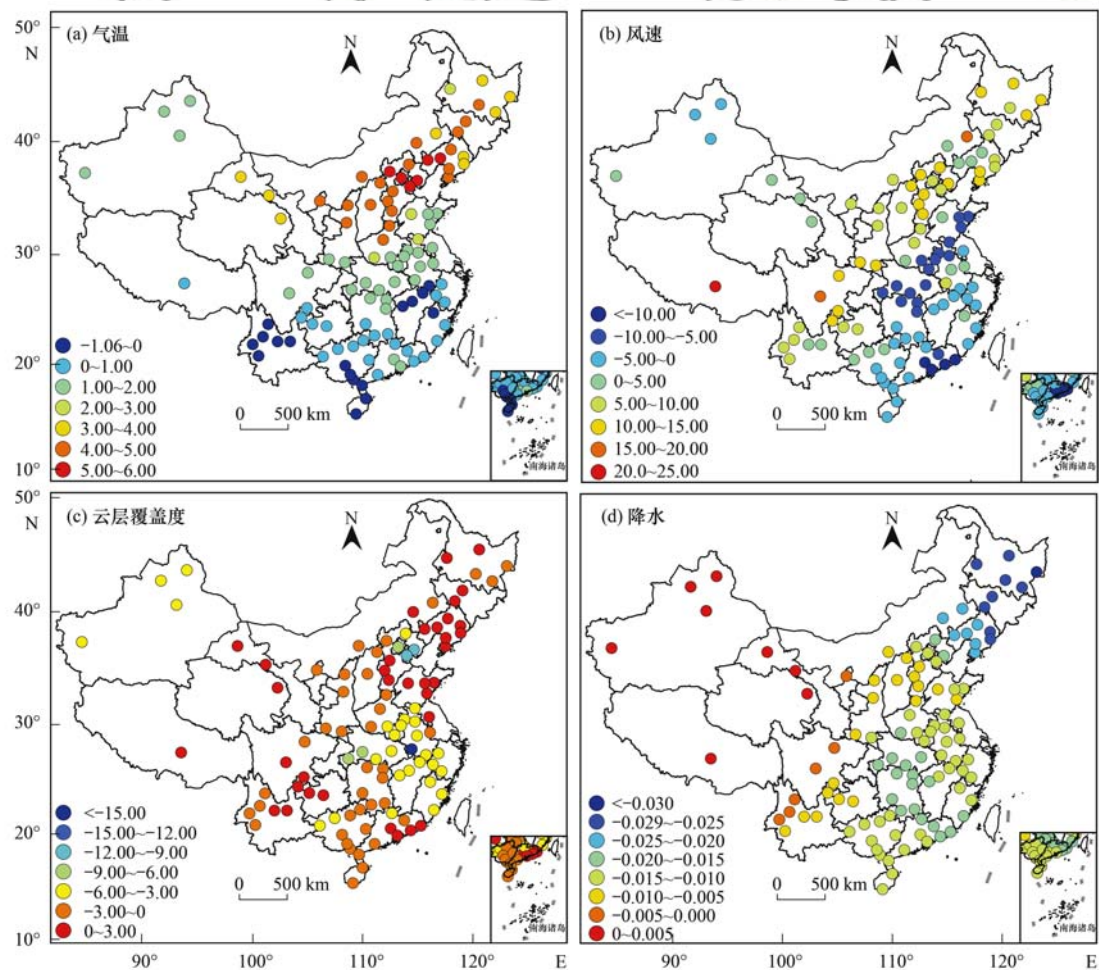
述和空间分布. 表 3 可以看出,气温和风速与 O_3 浓度呈显著正相关,其回归系数分别为 0.33 和 0.16; 云层覆盖度和降水与 O_3 浓度呈显著负相关,其回归

系数分别为 -0.07 和 -0.05 , 这与 Yu 等^[16] 和 Gu 等^[34] 的研究结果相同. 从各回归系数的绝对大小来看, 气温是中国暖季 O_3 变化的主要驱动力, 其次是风速、云层覆盖度和降水(表 3). 从空间分布来看, 气温回归系数 >3.0 的高值区域区主要集中在气温高、太阳辐射强的华北地区(天津市、河北省和山西省), 西北地区(陕西省和甘肃省)以及东北地区(吉林省、辽宁省和黑龙江)等地区[图 5(a)], 表明这些地区 O_3 浓度相比其他区域更易受到气温的影响. 以前的研究表明, 太阳辐射是光化学反应的环境条件, 太阳辐射强的区域一般伴随着高气温和较长的日照时间, 因而气温与 O_3 浓度多呈正相关关系^[35]. 气温回归系数 <0 的区域主要集中在太阳辐射相对

较弱、湿度较大的华南地区的广西、西南地区的云南和华东地区的江西, 表明这些地区 O_3 浓度与气温呈负相关关系. 气温的影响为负显然与其他的 研究结果相悖, 通过查阅中国累计降水量空间分布 (<http://map.ps123.net/china/17868.html>) 发现这些区域暖季年降水量在 $3\,000\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 远高于周边其他区域, 即华南的广西、西南地区的云南和华东地区的江西部分地区在暖季受梅雨和季节性降雨的影响 O_3 浓度受到降水的冲刷清除而降低, 导致气温与 O_3 浓度在空间分布上呈负相关关系, 并非其真实作用的反映, 陈志青等^[24] 在研究东北地区 O_3 变化和气象要素的关系时发现了同样的变化规律.

表 3 MGWR 参数拟合系数汇总统计

Table 3 Summary statistics of fitting coefficients for MGWR parameter estimates						
气象因素	平均值	标准差	最小值	中位数	最大值	P 值
气温(TEM)	0.33	0.08	0.11	0.32	0.51	0.00
风速(WS)	0.16	0.07	-0.002	0.162	0.36	0.00
云层覆盖度(CLC)	-0.07	0.06	-0.20	-0.08	0.14	0.00
降水(PRE)	-0.05	0.02	-0.07	-0.06	0.004	0.00



图例表示 MGWR 中不同气象参数的回归系数, 无单位

图 5 MGWR 回归系数空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of regression coefficients in the MGWR model

一般认为风速影响污染物在大气中的扩散和区域性迁移^[36],与 O_3 浓度呈负相关关系.然而,本文发现华北、华南和东北部分区域风速与 O_3 浓度呈正相关关系且对华北地区的正相关影响要高于其他地区,Li等^[15]的研究认为华北地区风速与 O_3 浓度呈正相关关系是由于暖季焚风的影响,特别是每年6~8月,焚风从山区吹向华北平原的北部和西部,带来干燥的热空气进一步导致该区域气温升高,在一定程度上加速了 O_3 生成的光化学反应,这与欧盛菊等^[11]对华北地区 O_3 与气象因素的研究结果相似.风速回归系数 <0 的高值区域主要集中在华南、华东和华中大部分区域,其回归系数范围为 $-10.0 \sim -2.5$,表明这些区域风速与 O_3 浓度呈显著负相关关系,其中一个最重要的原因是每年的5~9月是中国南部和东部台风发生的集中时间,强劲的风速为污染物的扩散提供了便利输送条件^[37].云层覆盖度回归系数在空间上没有明显的高值聚集特征,其表现为一种混合的空间变化规律,除辽宁、山东、河北、甘肃、广东及西南部分地区外, O_3 浓度与云层覆盖度呈显著负相关.Li等^[37]的研究认为云层覆盖度与天气系统存在密切的联系,在高纬地区高空容易形成低压槽天气系统,此时空气干燥、天气晴朗、云量减少,对流层顶高度降低,平流层向下延伸,导致 O_3 总量增加(如新疆和黑龙江);相反,在低纬度地

区容易形成反气旋天气系统,此时空气潮湿,对流层顶升高,云量增加,平流层被抬高, O_3 总量减少(如海南和福建).

降水在西北地区的新疆、甘肃和西南地区的西藏部分区域与 O_3 浓度呈正相关[图5(d)],这显然与传统认识相悖,可能原因在于受季风的影响西北和西南地区在4~9月降水量整体较少,清除污染物能力弱,未能改变 O_3 浓度变化,因而降水与 O_3 浓度在空间分布上呈正相关关系^[38].其他区域 O_3 浓度与降水呈显著负相关关系,其降水回归系数范围为 $-0.03 \sim -0.01$.其中,降水回归系数 <0 的高值中心主要集中在华东地区的福建、华南地区的广东、华中地区的湖北和湖南以及东北三省,表明这些地区降水对 O_3 浓度的影响程度更大,特别是每年5~6月长江中下游的梅雨季节和东北地区的集中降水,对大气污染物的冲刷和清除作用非常明显,导致该地区 O_3 浓度急剧下降^[10,21,23].此外,本研究发现降水与 O_3 的回归系数明显小于其他因素,一方面可以解释为降水与 O_3 之间负相关关系较弱,另一方面可以解释为降水不仅清除大气污染前体物,同时也会促进植被生长,使得植被排放产生的挥发性有机物增加,这些有机物一般不会被降水消除净化,进而在高温高热所主导的光化学反应中进一步转化为 O_3 等污染物加剧 O_3 污染^[5].

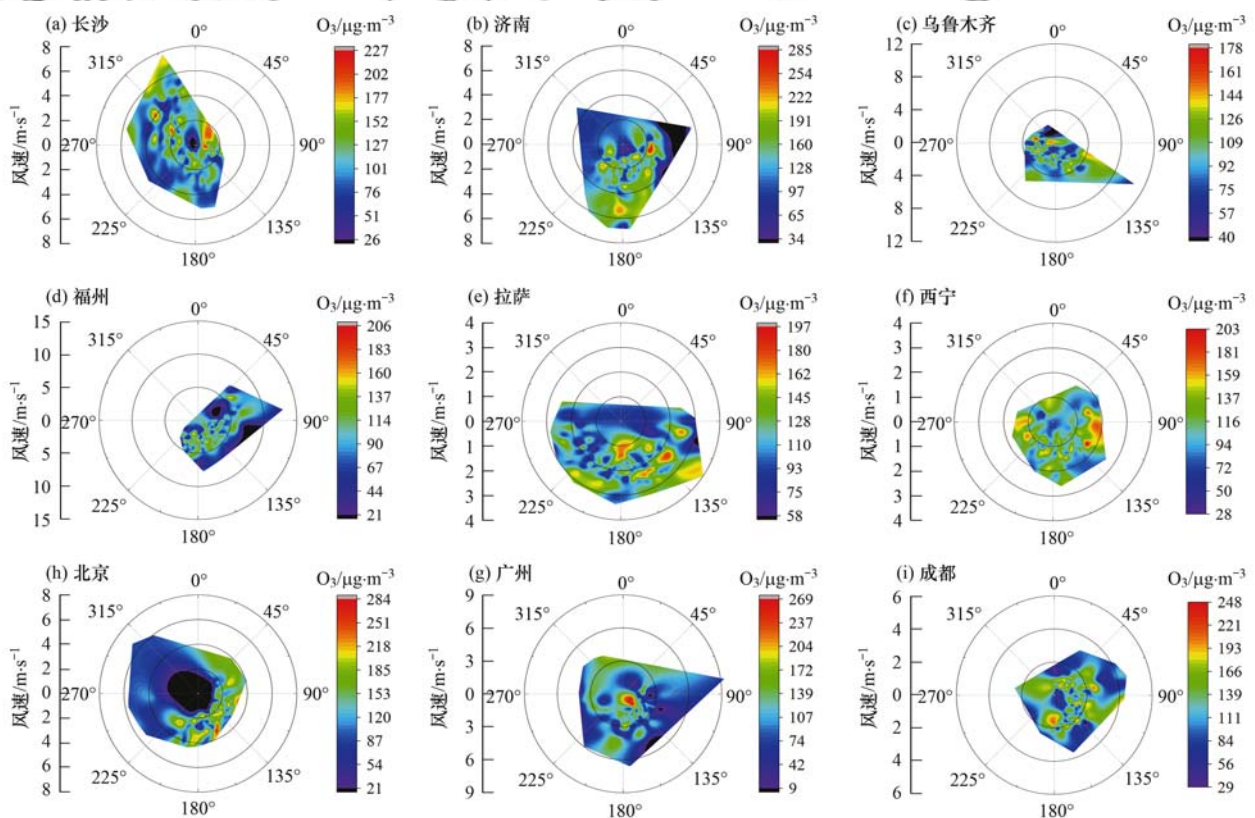


图6 9个重点城市 O_3 浓度与风场依赖关系

Fig. 6 Wind dependency map of O_3 concentration in nine key cities

对于 9 个重点城市而言, 气温仍然是 O_3 浓度变化的重要驱动因素, 呈正相关关系. 其中, 气温对北京市、济南市、西安市的 O_3 浓度影响高于其他 6 个城市[图 5(a)]. 风速在北京、西宁和成都与 O_3 浓度表现为弱正相关关系, 在拉萨呈显著正相关关系, 而在其他 5 个城市则表现为显著负相关关系[图 5(b)]. 云层覆盖度在广州市、成都市和拉萨市与 O_3 浓度表现为正相关关系, 与其他 6 个城市呈负相关关系[图 5(c)]. 降水在拉萨市和乌鲁木齐市 O_3 浓度表现为弱正相关关系, 在其他

7 个城市则表现为显著负相关关系. 图 6 和图 7 分别表示中国 9 个重点城市 O_3 浓度与风场依赖关系分布和风玫瑰统计. 长沙市在西北风风速为 $2 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时高浓度 O_3 容易聚集[图 6(a) 和图 7(a)], 济南市在偏南风风速为 $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、拉萨市和西安市风速为 $2 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时高浓度 O_3 容易聚集[图 6(b) 和 6(e), 图 7(b) 和 7(e)], 北京市和成都市受东南风的影响在风速为 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时高浓度 O_3 容易聚集[图 6(h) 和 6(i), 图 7(h) 和 6(i)].

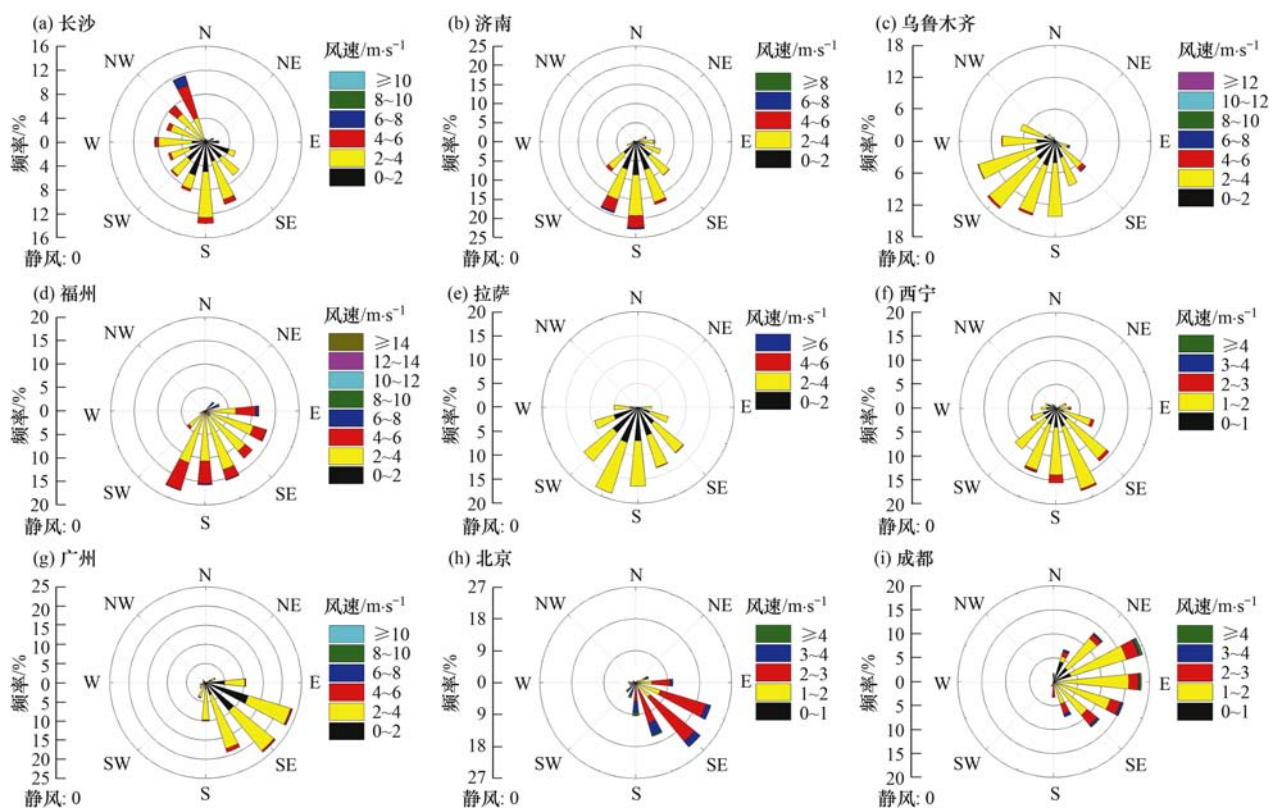


图 7 9 个重点城市风玫瑰

Fig. 7 Wind rose diagrams for nine key cities

3 结论

(1) 中国暖季 O_3 浓度逐年呈显著升高趋势, 平均增长速度为 $0.28 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$. Perc5、Perc95 和 MDA8 O_3 浓度增长速率分别为 0.15、0.43 和 $0.40 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$. 华东、华北和华中地区 O_3 浓度上升最快, 年均升高 $>0.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 东北地区 O_3 浓度年均下降 $0.10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 其他地区 O_3 浓度增长速率均有不同程度地升高 [$0.01 \sim 3.30 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$].

(2) 中国暖季 O_3 浓度存在着明显的空间分布差异. O_3 浓度的高值区 (8 h 滑动月均浓度 $>60 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 主要集中在华东、华北、华中和西北部分地

区; 低值区 (平均浓度 $<20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 主要分布在华南和西南地区. Perc5、Perc95 和 MDA8 O_3 浓度具有相似的空间分布规律.

(3) 中国 O_3 浓度空间集聚性逐年增强. 中国暖季 O_3 浓度增长速率的热点区域主要分布在华东的山东、安徽、江西和福建部分区域; 华北的天津、河北和山西部分区域; 西北的陕西与华中的河南、湖北部分区域; 冷点区域主要分布在西南的贵州和云南、华南的广西以及东北三省的部分区域. Perc5、Perc95 和 MDA8 O_3 浓度增长速率具有相似的空间聚类特征.

(4) 气温和风速是中国暖季 O_3 浓度分布的主要气象驱动因素, 云层覆盖度和降水次之, 但不同尺度、不同地区的气象驱动因素有明显差异. 从全国尺

度来看,气温对 O_3 浓度的影响最大,是中国暖季 O_3 变化的主要驱动力.从不同地区来看,气温对华北的天津、河北和山西、西北的陕西和甘肃和东北三省部分区域 O_3 浓度的影响显著高于其他地区;除广西、云南和江西部分地区外, O_3 浓度与气温呈显著正相关. O_3 浓度在华南广西、广东、华东和华中大部分地区与风速呈显著负相关, O_3 浓度在华北和东北地区与风速呈显著正相关.除辽宁、山东、河北、甘肃、广东及西南部分地区外, O_3 浓度与云层覆盖度呈显著负相关.除西北新疆、甘肃和西藏部分地区外, O_3 浓度与日均降水量呈显著负相关.

(5)本文选择的9个重点城市中,拉萨市 O_3 浓度增长速率呈下降趋势[$-1.12 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$],其他城市 O_3 浓度增长速率不同程度升高.气温对北京市、济南市和西安市的 O_3 浓度影响显著,呈显著正相关.9个重点城市的 O_3 浓度均与云层覆盖度和日均降水量呈显著负相关.长沙市在西北风风速为 $2\sim 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时高浓度 O_3 容易聚集,济南市在偏南风风速为 $4\sim 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、拉萨市和西安市风速为 $2\sim 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时高浓度 O_3 容易聚集,北京市和成都市受东南风的影响在风速为 $2\sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时高浓度 O_3 容易聚集.

参考文献:

- [1] Li K, Jacob D J, Liao H, *et al.* Anthropogenic drivers of 2013–2017 trends in summer surface ozone in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(2): 422–427.
- [2] 叶伟鹏, 刘苗苗, 毕军. 中国臭氧短期暴露与人群死亡之间关系的 Meta 分析研究[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(7): 2644–2651.
Ye W P, Liu M M, Bi J. Meta-analysis of the associations between short-term ozone exposure and human mortality in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(7): 2644–2651.
- [3] 中国环境监测总站. 2018 年 4~9 月中国城市空气质量报告[EB/OL]. http://www.cnemc.cn/jcbg/kqzlzkgb/index_1.shtml, 2018-12-05.
- [4] Lu X, Zhang L, Wang X L, *et al.* Rapid increases in warm-season surface ozone and resulting health impact in China since 2013[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2020, **7**(4): 240–247.
- [5] 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*, 2017, **575**: 1582–1596.
- [6] Zhao X L, Zhou W Q, Han L J, *et al.* Spatiotemporal variation in $\text{PM}_{2.5}$ concentrations and their relationship with socioeconomic factors in China's major cities[J]. *Environment International*, 2019, **133**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105145.
- [7] Li Y, Cheng M M, Guo Z, *et al.* Increase in surface ozone over Beijing-Tianjin-Hebei and the surrounding areas of China inferred from satellite retrievals, 2005–2018[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2020, **20**(10): 2170–2184.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Hong Y Y, Liu Y M, Chen X Y, *et al.* The role of anthropogenic chlorine emission in surface ozone formation during different seasons over eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **723**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137697.
- [11] 欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 等. 华北地区典型重工业城市夏季近地面 O_3 污染特征及敏感性[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3085–3094.
Ou S J, Wei W, Wang X Q, *et al.* Pollution characteristics and sensitivity of surface ozone in a typical heavy-industry city of the north China plain in summer[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3085–3094.
- [12] Wang X, Shen Z X, Tang Z Y, *et al.* Characteristics of surface ozone in five provincial capital cities of China during 2014–2015 [J]. *Atmosphere*, 2020, **11**(1), doi: 10.3390/atmos11010107.
- [13] Liu R Y, Ma Z W, Liu Y, *et al.* Spatiotemporal distributions of surface ozone levels in China from 2005 to 2017: a machine learning approach[J]. *Environment International*, 2020, **142**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105823.
- [14] Liu H L, Zhang M G, Han X. A review of surface ozone source apportionment in China[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2020, **13**(5): 470–484.
- [15] Li K, Jacob D J, Shen L, *et al.* Increases in surface ozone pollution in China from 2013 to 2019: anthropogenic and meteorological influences [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(19): 11423–11433.
- [16] Yu Y J, Wang Z, He T, *et al.* Driving factors of the significant increase in surface ozone in the Yangtze River Delta, China, during 2013–2017[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10**(4): 1357–1364.
- [17] 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.
- [18] 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 等. 气象因素和前体物对中国东部 O_3 浓度分布的影响[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(6): 2273–2282.
Huang X G, Shao T J, Zhao J B, *et al.* Impact of meteorological factors and precursors on spatial distribution of ozone concentration in Eastern China [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(6): 2273–2282.
- [19] Gong X, Hong S, Jaffe D A. Ozone in China: spatial distribution and leading meteorological factors controlling o_3 in 16 Chinese cities[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, **18**(9): 2287–2300.
- [20] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2041–2051.
Cheng N L, Li Y T, Zhang D W. Characteristics of ozone over standard and its relationships with meteorological conditions in Beijing city in 2014[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6):

- 2041-2051.
- [21] 赵伟, 高博, 刘明, 等. 气象因素对香港地区臭氧污染的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 55-66.
Zhao W, Gao B, Liu M, *et al.* Impact of meteorological factors on the ozone pollution in Hong Kong [J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 55-66.
- [22] 王玫, 郑有飞, 柳艳菊, 等. 京津冀臭氧变化特征及与气象要素的关系[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(7): 2689-2698.
Wang M, Zheng Y F, Liu Y J, *et al.* Characteristics of ozone and its relationship with meteorological factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(7): 2689-2698.
- [23] 胡成媛, 康平, 吴锴, 等. 基于 GAM 模型的四川盆地臭氧时空分布特征及影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(3): 809-820.
Hu C Y, Kang P, Wu K, *et al.* Study of the spatial and temporal distribution of ozone and its influence factors over Sichuan Basin based on generalized additive model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(3): 809-820.
- [24] 陈志青, 邵天杰, 赵景波, 等. 东北地区臭氧浓度空间格局演变规律及影响因素[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(9): 3071-3080.
Chen Z Q, Shao T J, Zhao J B, *et al.* Evolution and influencing factors of ozone concentration spatial distribution in Northeastern region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(9): 3071-3080.
- [25] 崔梦瑞, 白林燕, 冯建中, 等. 京津唐地区臭氧时空分布特征与气象因子的关联性研究[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(2): 373-385.
Cui M J, Bai L Y, Feng J Z. Analysis of temporal and spatial variations of ozone coupling with dynamics of meteorological factors in the Beijing-Tianjin-Tangshan region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(2): 373-385.
- [26] He C, Yang L, Cai B F, *et al.* Impacts of the COVID-19 event on the NO_x emissions of key polluting enterprises in China[J]. Applied Energy, 2021, **281**, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116042.
- [27] 中华人民共和国生态环境部. 环境空气质量标准[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqhjbh/dqhjlz/201203/t20120302_224165.shtml, 2016-01-01.
- [28] Bai K X, Ma M L, Chang N B, *et al.* Spatiotemporal trend analysis for fine particulate matter concentrations in China using high-resolution satellite-derived and ground-measured PM_{2.5} data [J]. Journal of Environmental Management, 2019, **233**: 530-542.
- [29] Cao S S, Zhao W J, Guan H L, *et al.* Comparison of remotely sensed PM_{2.5} concentrations between developed and developing countries: results from the US, Europe, China, and India[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, **182**: 672-681.
- [30] Zhou L, Zhou C H, Yang F, *et al.* Spatio-temporal evolution and the influencing factors of PM_{2.5} in China between 2000 and 2015 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, **29**(2): 253-270.
- [31] 沈体雁, 于瀚辰, 周麟, 等. 北京市二手住宅价格影响机制——基于多尺度地理加权回归模型(MGWR)的研究[J]. 经济地理, 2020, **40**(3): 75-83.
Shen T Y, Yu H C, Zhou L, *et al.* On hedonic price of second-hand houses in Beijing based on multi-scale geographically weighted regression: scale law of spatial heterogeneity [J]. Economic Geography, 2020, **40**(3): 75-83.
- [32] 王彩红, 张惠芳, 尼霞次仁, 等. 青藏高原典型城市拉萨市近地面臭氧污染特征[J]. 中国环境监测, 2017, **33**(4): 159-166.
Wang C H, Zhang H F, Ciren N, *et al.* The pollution characteristics of surface ozone in Lhasa-typical city over the Tibetan Plateau[J]. Environmental Monitoring in China, 2017, **33**(4): 159-166.
- [33] Wu C, Ren F, Hu W, *et al.* Multiscale geographically and temporally weighted regression: exploring the spatiotemporal determinants of housing prices [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2019, **33**(3): 489-511.
- [34] Gu Y X, Li K, Xu J M, *et al.* Observed dependence of surface ozone on increasing temperature in Shanghai, China [J]. Atmospheric Environment, 2020, **221**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117108.
- [35] 杨显玉, 易家俊, 吕雅琼, 等. 成都市及周边地区严重臭氧污染过程成因分析[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(5): 2000-2009.
Yang X Y, Yi J J, Lu Y Q, *et al.* Characteristics and formation mechanism of a severe O₃ episode in Chengdu and surrounding areas[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(5): 2000-2009.
- [36] He J J, Gong S L, Yu Y, *et al.* Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014-2015 in major Chinese cities[J]. Environmental Pollution, 2017, **223**: 484-496.
- [37] Li Y T, Pizer W A, Wu L B. Climate change and residential electricity consumption in the Yangtze River Delta, China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, **116**(2): 472-477.
- [38] 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 等. 中国城市 O₃ 浓度时空变化特征及驱动因素[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1120-1131.
Huang X G, Zhao J B, Cao J J, *et al.* Spatial-temporal variation of ozone concentration and its driving factors in China [J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1120-1131.

CONTENTS

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