

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

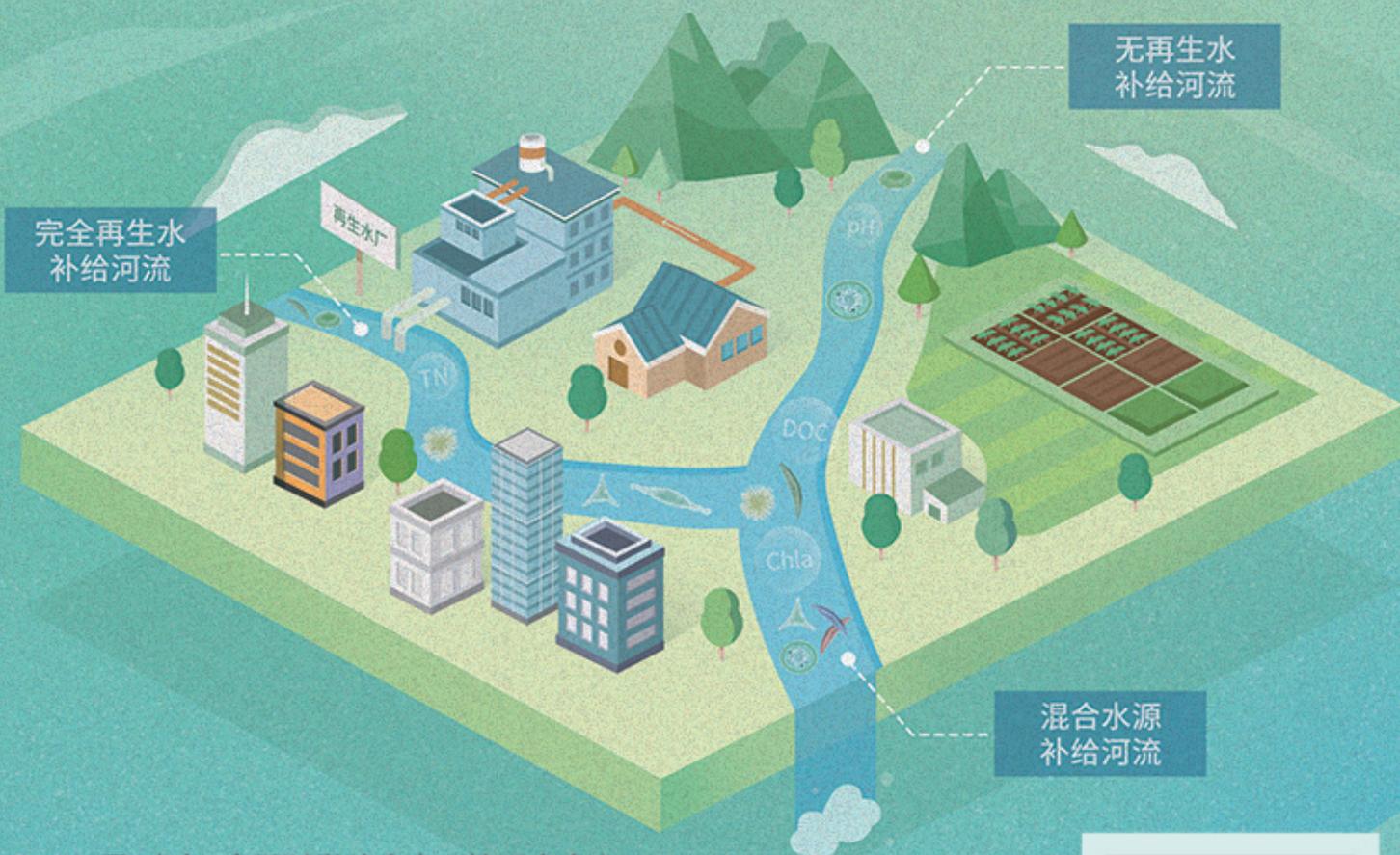
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM<sub>2.5</sub> 时空演变格局及其影响因素 ..... 张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华(5333)

中原城市群 PM<sub>2.5</sub> 浓度驱动因子联动效应及非线性影响 ..... 周志衡, 周廷刚, 秦宁(5344)

长株潭城市群 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度时空分布特征及影响因素分析 ..... 刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅(5354)

张掖市城区大气细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 的化学组成及来源解析 ..... 潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民(5367)

2018~2019年冬季天津和青岛 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征与健康风险评估 ..... 赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳(5376)

青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析 ..... 孔令冬, 祁建华, 张旭(5387)

2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势 ..... 赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳(5399)

海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征 ..... 谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅(5407)

基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别 ..... 杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰(5421)

郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析 ..... 齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵(5429)

兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽(5442)

地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估 ..... 刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧(5453)

缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征 ..... 李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟(5464)

废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测 ..... 严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏(5470)

长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送 ..... 刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱军, 冉祥滨(5478)

澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析 ..... 郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤(5491)

小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系 ..... 肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨(5499)

磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化 ..... 张坤锋, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青(5509)

疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估 ..... 樊月婷, 昌盛, 张坤锋, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青(5522)

北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估 ..... 昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤锋, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星(5534)

平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因 ..... 孙龙, 刘廷奎, 段利民, 张文瑞, 郑国峰(5547)

三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响 ..... 张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博(5560)

不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环 ..... 刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨(5571)

2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析 ..... 谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟(5585)

乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评估 ..... 杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇(5598)

生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制 ..... 苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元(5608)

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 ..... 侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中(5616)

锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用 ..... 高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰(5627)

KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除 ..... 徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁(5635)

改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI) 的吸附机制 ..... 练建军, 邹洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平(5647)

桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI) ..... 刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢颖辉, 鄢俊彬, 李娜(5657)

镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb<sup>2+</sup> 和 Zn<sup>2+</sup> 的去除 ..... 吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江(5667)

钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析 ..... 程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰(5676)

上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评估 ..... 李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏(5687)

重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析 ..... 马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵(5698)

典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析 ..... 官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富(5710)

基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析 ..... 张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌(5718)

香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估 ..... 陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚(5728)

地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例 ..... 刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波(5742)

新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估 ..... 杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖(5751)

肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果 ..... 伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒(5761)

微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累 ..... 杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 唯福庆, 赵鹏(5769)

产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制 ..... 姬明飞, 吴雪姣, 李晚哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩辉(5778)

硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制 ..... 高羽, 刘雨辰, 郭晓芳, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远(5789)

巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响 ..... 王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强(5798)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性 ..... 竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌(5808)

添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响 ..... 赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣(5819)

基于 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性 ..... 朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠(5832)

“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析 ..... 杨柏, 秦广鹏, 郭钦(5840)

长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测 ..... 杨旭, 刘贤赵(5850)

基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析 ..... 张涛, 郑钧文, 孙煜琛, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛(5861)

《环境科学》第43卷(2022年)总目录 ..... (5873)

《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)

# 长株潭城市群 $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ 浓度时空分布特征及影响因素分析

刘贤赵<sup>1</sup>, 张国桥<sup>1</sup>, 杨文涛<sup>1,2\*</sup>, 吴业荣<sup>2</sup>, 李朝奎<sup>2</sup>, 任毅<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学地球科学与空间信息学院, 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学地理空间信息技术国家地方联合工程实验室, 湘潭 411201)

**摘要:** 基于 2015 ~ 2019 年长株潭城市群  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  遥感浓度数据, 利用空间自相关指数和地理加权回归 (GWR) 等方法探究  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  浓度的时空分布特征及相关因素对其影响强度. 结果表明: ①  $PM_{2.5}$  浓度整体呈现出冬季和春季高, 夏季和秋季低的“U”型特征, 而  $O_3$  浓度则表现为夏季和秋季高, 冬季和春季低的“M”型特征,  $PM_{2.5}$  与  $O_3$  年均浓度高低排序为: 长沙市 > 湘潭市 > 株洲市. ②  $PM_{2.5}$  与  $O_3$  浓度在夏季呈现正相关, 秋冬季为负相关, 且具有显著的空间集聚特征,  $O_3$  浓度高-高集聚区的面积呈现逐年增加的趋势. ③ GWR 结果显示: 夜间灯光强度和人口密度都对  $PM_{2.5}$  与  $O_3$  具有正相关效应, 其中, 植被指数 (NDVI)、风速和温度对  $PM_{2.5}$  浓度的影响最为显著, 而风速和温度对  $O_3$  影响强度更为突出, 不同因素对  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  浓度影响具有显著的空间异质性.

**关键词:** 长株潭城市群; 时空分布; 地理加权回归 (GWR); 空间自相关; 空间异质性

中图分类号: X513; X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5354-13 DOI: 10.13227/j.hjck.202201247

## Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of $PM_{2.5}$ and $O_3$ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China

LIU Xian-zhao<sup>1</sup>, ZHANG Guo-qiao<sup>1</sup>, YANG Wen-tao<sup>1,2\*</sup>, WU Ye-rong<sup>2</sup>, LI Chao-kui<sup>2</sup>, REN Yi<sup>1</sup>

(1. School of Earth Science and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. National-Local Joint Engineering Laboratory of Geo-Spatial Information Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Based on the remote sensing concentration data of  $PM_{2.5}$  and  $O_3$  in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration from 2015 to 2019, this research uses spatial autocorrelation index and geographically weighted regression (GWR) to explore the spatial-temporal differentiation characteristics of  $PM_{2.5}$  and  $O_3$  concentrations and the influence intensity of natural and socio-economic factors on them. The results show that: ①  $PM_{2.5}$  concentration presents a u-shaped trend of high concentration in winter and spring and middle concentration in summer and autumn, while  $O_3$  concentration shows an M-shaped law of high concentration in summer and autumn and low concentration in winter and spring. The order of  $PM_{2.5}$  and  $O_3$  concentration in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration is as follows: Changsha > Xiangtan > Zhuzhou. ②  $PM_{2.5}$  and  $O_3$  concentrations were positively correlated in summer, but negatively correlated in autumn and winter, and  $PM_{2.5}$  and  $O_3$  concentrations had significant spatial agglomeration characteristics. ③ GWR results show that among the nine influencing factors, night light intensity and population density have an impact on  $PM_{2.5}$  has a positive correlation effect with  $O_3$ , in which Vegetation Index (NDVI), wind speed and temperature have the most significant effects on  $PM_{2.5}$  concentration, while wind speed and temperature have more prominent effects on  $O_3$  concentration, and different factors have significant spatial heterogeneity on  $PM_{2.5}$  and  $O_3$  concentration.

**Key words:** Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration; temporal and spatial distribution; geographically weighted regression (GWR); spatial autocorrelation; spatial heterogeneity

近年来,我国城市大气的细颗粒物 ( $PM_{2.5}$ ) 污染浓度总体呈下降态势,但仅次于  $PM_{2.5}$  的臭氧 ( $O_3$ ) 污染问题日渐突出,部分城市以  $O_3$  为首要污染物的天数呈逐年上升趋势<sup>[1-5]</sup>,区域性复合型大气污染日益凸显.为此,我国在“十四五”规划与 2035 远景目标纲要中明确指出:“加强城市大气质量达标管理,推进  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  协同控制,地级及以上城市  $PM_{2.5}$  浓度下降 10%,有效遏制  $O_3$  浓度增长趋势,基本消除重污染天气”<sup>[6]</sup>.由于大气污染受污染物的性质、气象条件和地表性质等因素影响,往往具有复杂的时空分异性.因此,探究区域  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  浓度的影响因素及其关联性对复合型大气污染协同控制至关重要.

目前,针对复合型大气污染时空分布特征及其影响因素研究已取得了丰硕成果.例如,陈优良等<sup>[7]</sup>采用空间自相关等数理统计方法,分析了 2017 年长三角地区  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  的变化特征,结果表明内陆城市的  $PM_{2.5}$  浓度高于沿海城市,  $O_3$  浓度由北到南逐渐降低;赵淑婷等<sup>[8]</sup>利用空气监测站点及其气象参数对 2013 ~ 2019 年邯郸市复合污染特征进行了探究,发现温度、湿度和气压对大气复合污染影响较明显,当温度、湿度较高和气压偏低时,更容易发生复合污染.姚懿娟等<sup>[9]</sup>基于四类国控站点监测数

收稿日期: 2022-01-24; 修订日期: 2022-04-05

基金项目: 湖南省自然科学基金项目 (2020JJ4296, 2020JJ5165)

作者简介: 刘贤赵 (1970 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为大气环境质量监测与评估, E-mail: 1100095@hust.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: yangwentao8868@126.com

据,分析了广州各站点 PM<sub>2.5</sub>和 O<sub>3</sub> 的季节性污染特征,结果显示不同类型站点 PM<sub>2.5</sub>的浓度总体呈下降趋势,而 O<sub>3</sub> 浓度则呈上升趋势. Chen 等<sup>[10]</sup>基于空气监测站点数据,运用 Pearson 相关系数探讨了中国区域不同时间尺度和地理分区下 PM<sub>2.5</sub>和 O<sub>3</sub> 之间的相关性,发现两者在夏季呈现正相关,在冬季呈现负相关,且表现出显著的空间差异,即在中国南部存在正相关,北部存在负相关. 然而,现有研究大多以空气监测站点为数据源,站点监测数据分布不均和稀疏状况容易引起分析结果偏差,较难全面揭示整个研究区的污染物分布特征及其影响机制<sup>[11~15]</sup>. 此外,目前研究主要集中于单一污染物的时空分布或影响因素分析<sup>[16~19]</sup>,忽略了不同污染物影响因素的关联特征,难以有效服务于 PM<sub>2.5</sub>与 O<sub>3</sub> 的协同控制.

本研究选取长株潭城市群为研究区域,基于遥感反演数据和空气质量监测站点数据,采用空间自相关和地理加权回归等方法分析该区域 2015~2019 年 PM<sub>2.5</sub>和 O<sub>3</sub> 的时空分布特征,并探讨研究区域内人口密度、夜间灯光和气候等因素对 PM<sub>2.5</sub>和 O<sub>3</sub> 浓度的影响及其关联特征,旨在为长株潭城市群科学制定复合型大气污染协同治理策略提供有效的信息支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

长株潭城市群是湖南省经济发展和城市化的核心区域,由长沙、株洲和湘潭三市构成(图 1). 城市群沿湘江呈“品”字形分布,地势“南高北低”<sup>[20]</sup>,夏

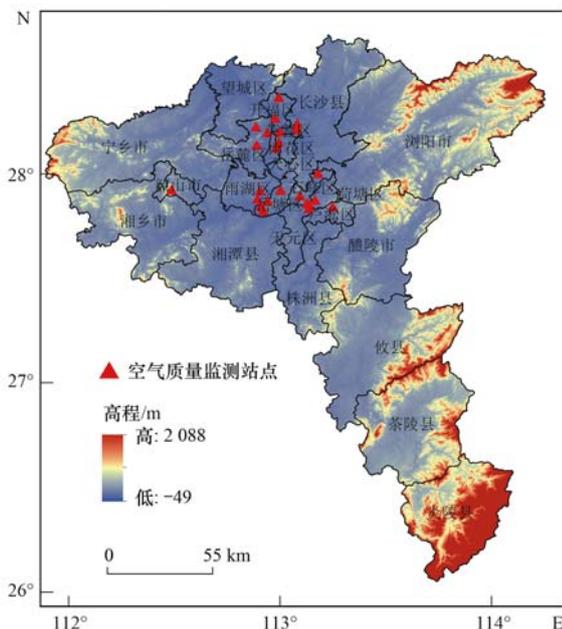


图 1 研究区位置示意

Fig. 1 Location of the study area

季高温多雨,冬季温和少雨,属典型的亚热带季风气候.

### 1.2 数据来源与处理

#### 1.2.1 PM<sub>2.5</sub>和 O<sub>3</sub> 数据

考虑到研究区地面空气质量监测站点的分布不均匀,选取 CHAP (China high air pollutants) 数据集集中的 PM<sub>2.5</sub>和 O<sub>3</sub> 年均浓度遥感产品作为数据源 (<https://weijingrs.github.io/product.html>), 时间跨度为 2015~2019 年,空间分辨率分别为 1 km 和 10 km. 该数据由丰富的地面观测数据、卫星遥感产品、大气再分析和模式模拟等资料生产得到. 通过数据格式转换、栅格裁剪和重采样,将 PM<sub>2.5</sub>和 O<sub>3</sub> 浓度数据空间分辨率统一到 1 km. 为了验证该数据集在研究区域内的可靠性,使用国家生态环境部 (<https://www.mee.gov.cn/hjzl/dqhj/>) 发布的 2015~2019 年长株潭城市群地面监测 PM<sub>2.5</sub>和 O<sub>3</sub> 月均浓度数据对其进行质量检验,发现二者回归方程的  $R^2$  系数分别为 0.897 (PM<sub>2.5</sub>) 和 0.887 (O<sub>3</sub>), 表明 CHAP 的 PM<sub>2.5</sub>和 O<sub>3</sub> 浓度数据具有较高的准确度,可用于长株潭城市群空气质量分析. 鉴于此,本研究以 5 km × 5 km 的空间网格作为评价单元,统计得到 1571 个空间单元,图 2 和图 3 分别为长株潭城市群 2015~2019 年 PM<sub>2.5</sub>和 O<sub>3</sub> 年均浓度的空间分布.

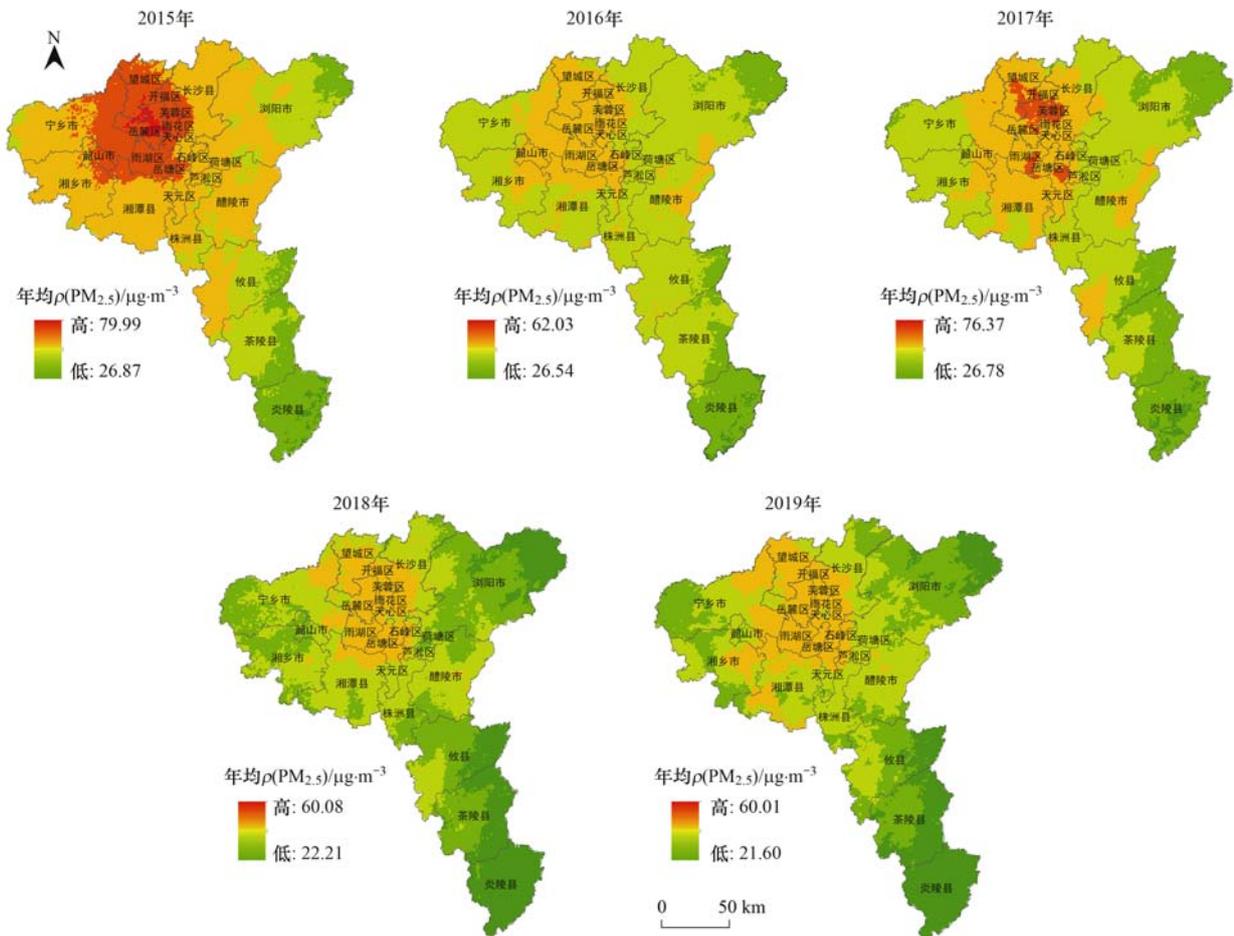
#### 1.2.2 其它数据

本研究所用的影响因素包括:气候变量(年均气温、年降水量、年平均风速和年均相对湿度)、地形变量(高程 DEM 和地形起伏度)、植被指数 (NDVI)、人口密度和夜间灯光亮度. 其中,气象数据来自国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/myspace/userInfo/>), 通过栅格计算提取、整理获得各指标的年均数据集. 地形数据(用高程和地形起伏度表征,是衡量空气污染物转移的重要空间约束)、植被指数(反映地表植被覆盖变化<sup>[21]</sup>) 和人口密度(表征该地区人口的集聚程度)数据均来自中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>); 夜间灯光数据来自美国国家海洋和大气管理局 (NOAA, <https://eogdata.mines.edu/products/vnl/>). 所有数据时间跨度为 2015~2019 年,空间分辨率均为 1 km. 此外,基础地理信息数据来自国家地理信息资源目录服务系统 (<https://www.webmap.cn/>). 通过分区统计将所有影响因素的栅格数据统一到格网中,各影响因素的空间分布如图 4 所示.

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 空间自相关分析

选取全局和局部 Moran's  $I$  指数评估长株潭城

图2 2015~2019年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 空间分布Fig. 2 Spatial distribution of  $\rho(\text{PM}_{2.5})$  from 2015 to 2019

市群  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  污染物的空间集聚特性<sup>[22,23]</sup>. 全局 Moran's  $I$  指数的计算公式如下:

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中,  $x_i$  和  $x_j$  为网格  $i$  和  $j$  上的  $\text{PM}_{2.5}$  或  $\text{O}_3$  浓度;  $n$  为网格数量;  $\bar{x}$  为  $\text{PM}_{2.5}$  或  $\text{O}_3$  浓度平均值;  $w_{ij}$  为空间权重矩阵, 因  $\text{PM}_{2.5}$  或  $\text{O}_3$  在大气中传输距离较远, 采用 Queen 二阶邻接规则构建, 即有二阶公共边或公共点的网格单元视为相邻, 相邻的权重值为 1, 否则为 0;  $S_0$  为所有权重的和;  $I \in [-1, 1]$ ,  $I > 0$  表示正相关,  $I < 0$  表示负相关,  $I = 0$  表示不相关,  $|I|$  越大, 表示空间自相关性越强.  $I$  的显著性采用双侧  $Z$  统计量检验, 其表达式如下:

$$Z(I) = [I - E(I)] / \sqrt{\text{Var}(I)} \quad (2)$$

式中,  $E(I)$  和  $\text{Var}(I)$  分别为  $I$  的数学期望和方差. 同时利用局部 Moran's  $I$  指数来度量每个网格和周边网格间的空间聚集程度. 对于第  $i$  个网格空间单元, 其局部 Moran's  $I$  指数计算为:

$$I_i = Z_i \sum_{j=1}^n w_{ij} Z_j \quad (3)$$

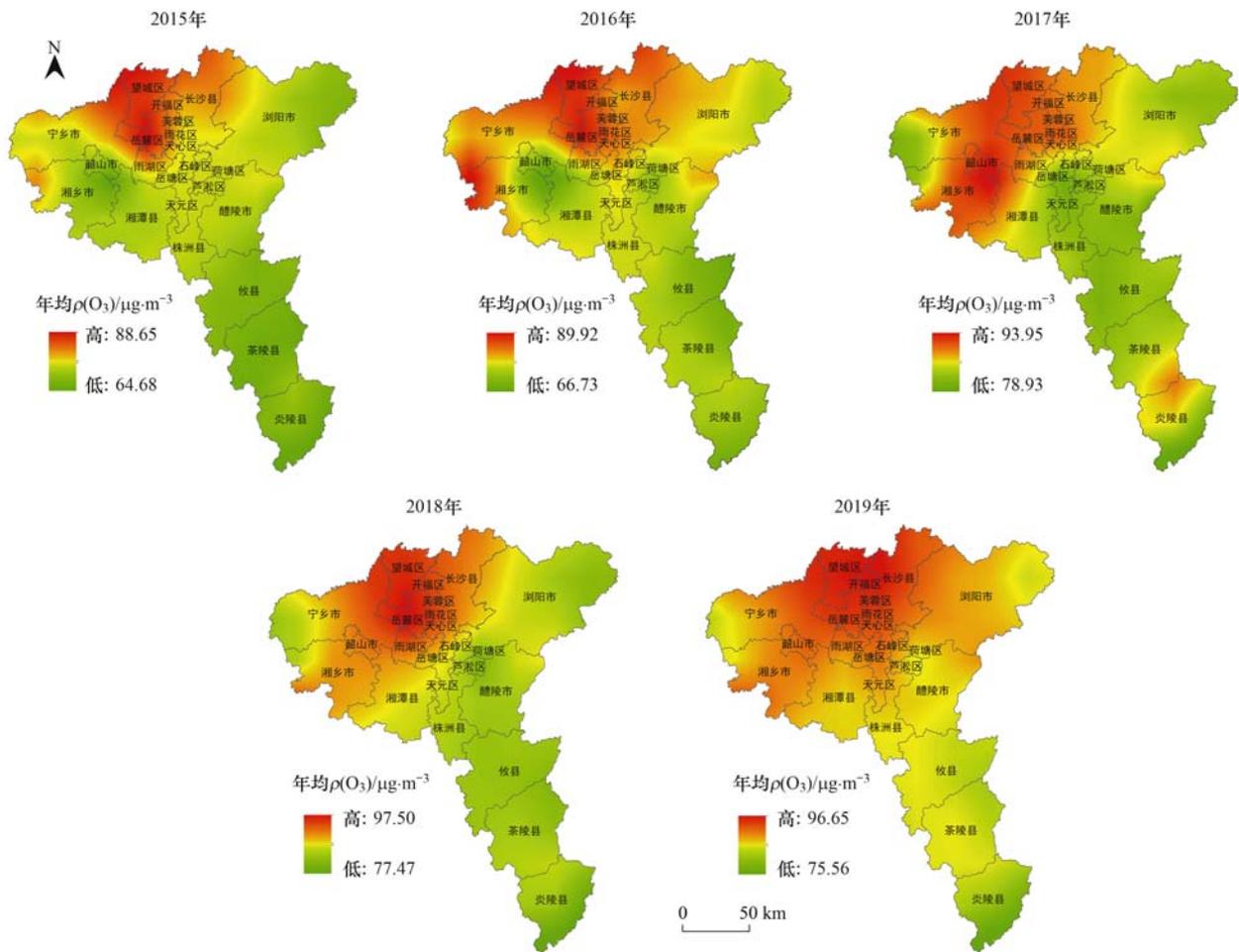
式中,  $Z_i$  和  $Z_j$  分别为网格  $i$  和  $j$  上  $\text{PM}_{2.5}$  或  $\text{O}_3$  浓度值. 根据 Moran's  $I$  指数的显著性水平和  $Z(I)$  的符号将研究单元划分为高-高集聚、低-低集聚、高-低集聚和低-高集聚这 4 种类型.

### 1.3.2 地理加权回归

地理加权回归 (GWR) 通过建立空间范围内每个点处的局部回归方程, 使得变量间的关系可以随地理位置的改变而变化, 并且可以反映被忽略的局部特性<sup>[24,25]</sup>. 其表达式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^m \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (4)$$

式中,  $y_i$  为  $i$  网格单元的因变量解释值;  $(u_i, v_i)$  为  $i$  网格单元的地理坐标;  $x_{ik} (i=1, 2, \dots, n)$  为网格单元  $i$  的自变量解释值;  $\beta_0(u_i, v_i)$  为截距项,  $\beta_k(u_i, v_i)$  为网格单元  $(u_i, v_i)$  处的回归系数;  $\varepsilon_i$  为随机误差项.  $\varepsilon_i > 0$  时为解释变量和被解释变量之间呈正相关, 反之为负相关. GWR 的核心是空间权函数的选取, 数据的空间关联性通过空间权重矩阵来实现, 研究中选择 Gauss 函数法来确定空间权重.

图3 2015~2019年 $\rho(\text{O}_3)$ 空间分布Fig. 3 Spatial distribution of  $\rho(\text{O}_3)$  from 2015 to 2019

## 2 结果与讨论

### 2.1 PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度的时空分布特征

#### 2.1.1 PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度的时间变化特征

2015~2019年长株潭城市群PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度随月度、季度和年度的变化如图5所示。PM<sub>2.5</sub>月均值曲线大致呈“U”形分布,冬季(12、1和2月)浓度明显高于夏季(6~8月),季节分布特征明显,由高到低的顺序为:冬季(82.2 μg·m<sup>-3</sup>) > 春季(45.4 μg·m<sup>-3</sup>) > 秋季(40.1 μg·m<sup>-3</sup>) > 夏季(28.1 μg·m<sup>-3</sup>)。除夏季外,其余季节浓度均高于国家二级标准限值。出现上述情形的原因可能是:冬季逆温频率高、时间长和强度大,不利于颗粒物扩散;此外,长株潭城市群冬季降雨量少,冬季盛行的偏北风将北方地区空气污染物携带至长株潭地区,从而导致冬季PM<sub>2.5</sub>浓度最高<sup>[26]</sup>。

$\rho(\text{O}_3)$ 月均值变化大体呈“M”型,主要集中在50~210 μg·m<sup>-3</sup>。两个峰值分别出现在5月和9月,5月 $\rho(\text{O}_3)$ 月均值分别为118.2、112.8、148.4、125.1和165.7 μg·m<sup>-3</sup>,9月 $\rho(\text{O}_3)$ 月均值分别为

148.1、149.8、142.5、170.3和206.1 μg·m<sup>-3</sup>;高浓度峰值均出现在8~10月,较低浓度主要集中于11、12和1月,即夏、秋季浓度高,冬、春季浓度低。O<sub>3</sub>浓度整体呈现上升趋势,逐渐代替PM<sub>2.5</sub>成为首要污染物。

#### 2.1.2 PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度的相关性特征

由2015~2019年长株潭城市群PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度年均值Pearson相关系数可知(图6),夏季PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub>的相关系数表现为显著的正相关,而冬季更趋于负相关,总体上以负相关为主,夏季和冬季相关系数的绝对值均达到峰值。这可能由于夏季高温,日照充足,太阳辐射较强,光化学反应加快促进前体排放物向O<sub>3</sub>和PM<sub>2.5</sub>转化形成污染<sup>[27]</sup>,故表现为正相关特征;而冬季易形成逆温且秸秆焚烧较多,虽易形成PM<sub>2.5</sub>污染,但此时光照较弱,不利于前体排放物转化O<sub>3</sub>,故表现为负相关特征。

### 2.2 PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度的空间集聚特征

全局Moran's I指数显示(表1和表2),2015~2019年PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度年均值均具有显著的空间正相关性,且呈逐年上升趋势。局部LISA集聚图显

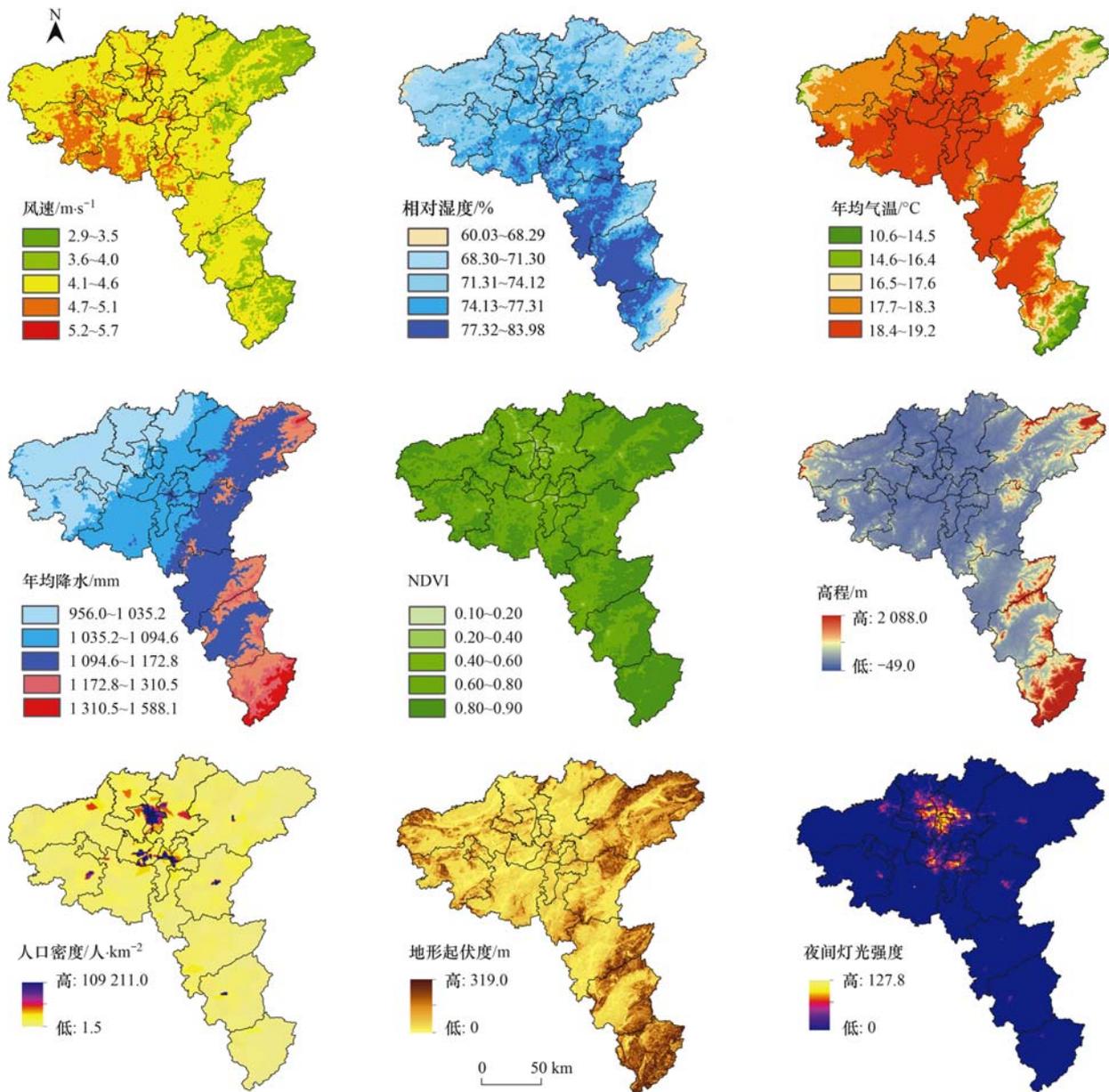


图 4 影响因素空间分布

Fig. 4 Spatial distribution map of influencing factors

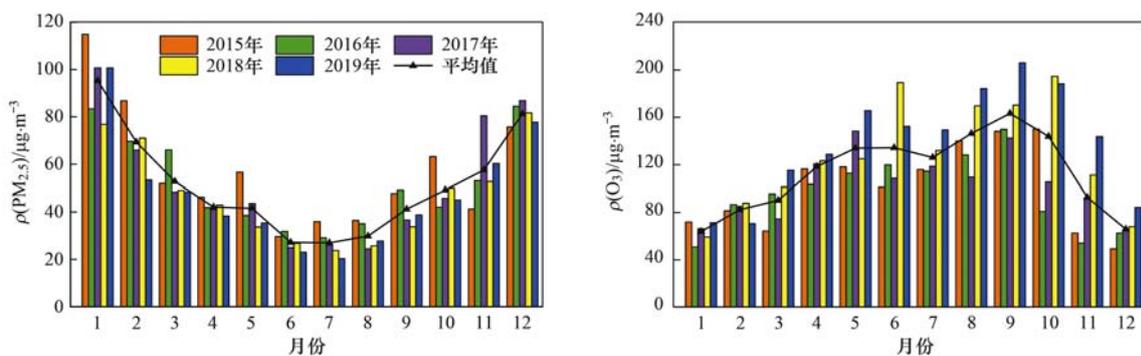


图 5 2015 ~ 2019 年  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  月均浓度

Fig. 5 Monthly average concentrations of  $PM_{2.5}$  and  $O_3$  from 2015 to 2019

示(图 7 和图 8):① $PM_{2.5}$  年均浓度高-高集聚的网格数量呈上下波动趋势,主要集中在长沙市的芙蓉区

和雨花区,湘潭市的雨湖区和岳塘区附近;而低-低集聚的网格数量有逐渐增加的趋势,主要分布在株

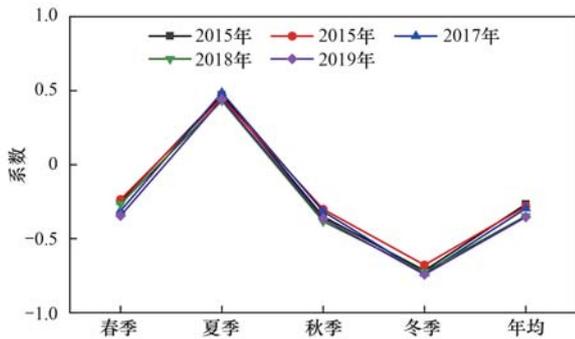


图6 2015~2019年 PM<sub>2.5</sub>和 O<sub>3</sub> 浓度年均值 Pearson 系数

Fig. 6 PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> annual concentration Pearson coefficient from 2015 to 2019

洲市的攸县、茶陵县、炎陵县和长株潭城市群的东北部区域。② O<sub>3</sub> 年均浓度高-高集聚网格总体呈现增加趋势,主要集中在城市群中心,即长沙市的岳麓区和望城区,且有向周边地区扩散的态势;而低-低集聚的网格有逐渐降低的趋势,主要集中在城市群南部的炎陵县附近。

2.3 PM<sub>2.5</sub>和 O<sub>3</sub> 空间分布的影响因素分析

本研究运用地理加权回归模型(GWR)对长株潭城市群PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度影响因素的空间异质性进

表1 2015~2019年 PM<sub>2.5</sub>全局 Moran's I 指数

Table 1 Global Moran's I index of PM<sub>2.5</sub> from 2015 to 2019

项目	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
Moran's I	0.418	0.488	0.494	0.593	0.612
Z	5.593	6.333	6.404	7.527	9.324
P	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

表2 2015~2019年 O<sub>3</sub>全局 Moran's I 指数

Table 2 Global Moran's I index of O<sub>3</sub> from 2015 to 2019

项目	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
Moran's I	0.469	0.525	0.598	0.624	0.638
Z	6.185	6.645	7.812	9.527	9.869
P	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

行分析. 为避免因子相互影响对估计结果造成偏差, 先对影响因子进行共线性检验. 表3显示, 各影响因素的方差膨胀因子(VIF)值均小于10, 表明所选取的指标不存在共线性. 基于GWR得到的拟合优度(R<sup>2</sup>)分布在0.60~0.86之间, 表明选择的9个指标对长株潭城市群PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度的综合解释能力较强. 进一步将各个影响因素的回归系数进行可视化, 探讨各因素对PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>影响的空间异质性.

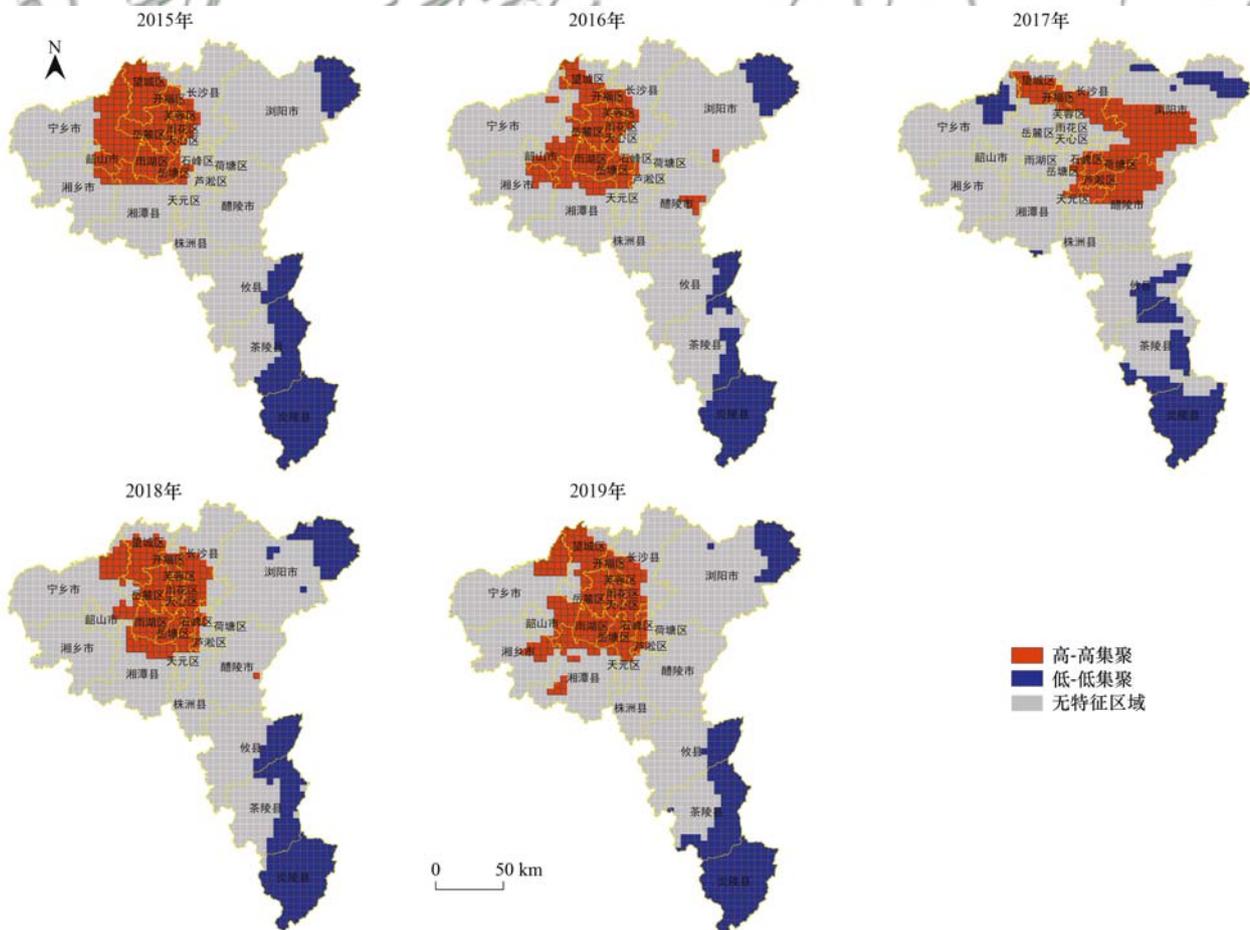


图7 2015~2019年 PM<sub>2.5</sub>的LISA分析

Fig. 7 LISA analysis of PM<sub>2.5</sub> from 2015 to 2019

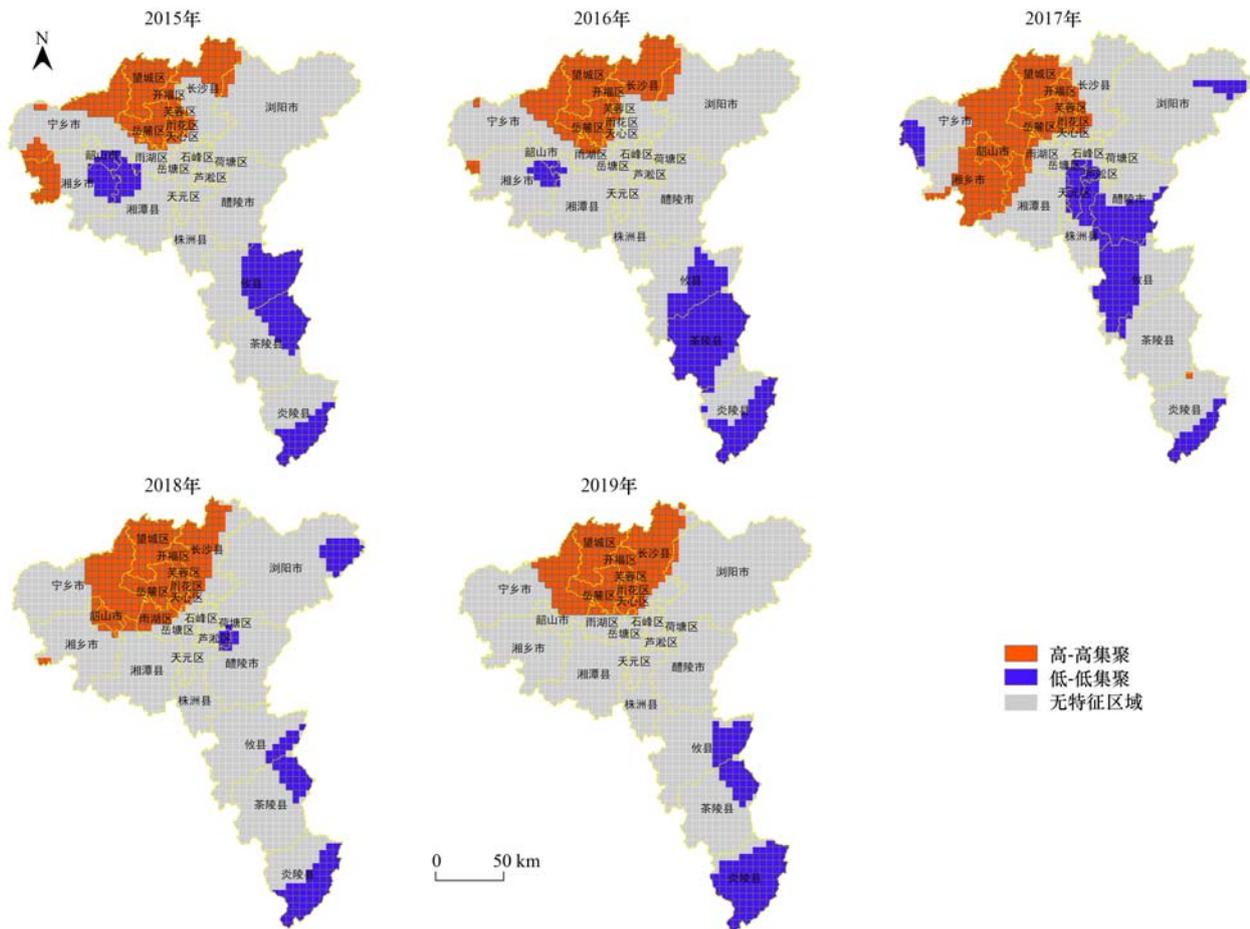
图 8 2015~2019 年 O<sub>3</sub> 的 LISA 分析Fig. 8 LISA analysis of O<sub>3</sub> from 2015 to 2019

表 3 影响因素共线性检验

Table 3 Collinearity inspection of the influencing factors

影响因子	容差 (T)	VIF
DEM/m	-12.993	1.746
NDVI	-3.326	1.327
人口密度/人·km <sup>-2</sup>	-1.552	1.031
相对湿度/%	-0.887	2.181
夜间灯光	9.244	1.074
降水量/mm	-1.549	3.723
温度/°C	2.254	4.682
风速/m·s <sup>-1</sup>	-0.657	1.655
地形起伏度/m	-2.564	1.689

### 2.3.1 PM<sub>2.5</sub> 的影响因素分析

由 PM<sub>2.5</sub> 浓度和影响因素回归系数空间分布可知,自然因素的各个指标和 PM<sub>2.5</sub> 浓度主要呈负相关效应,而社会经济指标表现为正相关效应.影响强度由高到低依次为:NDVI > 风速 > 温度 > 人口密度 > 地形起伏度 > 夜间灯光 > 相对湿度 > 降水量 > 高程.

NDVI 对 PM<sub>2.5</sub> 浓度呈显著负相关效应[图 9(a)],回归系数绝对值较高的区域集中在浏阳市、醴陵市北部和湘潭县,低值区则集中在宁乡市、望城

区和株洲攸县东部,这些高值区域主要位于罗霄幕阜山脉,植被分布广泛,对 PM<sub>2.5</sub> 的吸附、阻碍和拦截作用在一定程度上可以有效抑制区域的污染程度<sup>[28,29]</sup>.地形起伏度和 DEM 对 PM<sub>2.5</sub> 浓度主要呈现负相关效应[图 9(e)和 9(i)],长株潭城市群位于地形起伏度低的平原或低缓丘陵地区,人类活动强度较大,污染物的排放量较高,从而容易形成高污染<sup>[30]</sup>.

风速对 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响表现出明显的东西差异[图 9(b)],长株潭城市群西部的回归系数普遍高于东部,长沙市中西部和湘潭市的风速强于东部地区(图 4),风速的增大有助于 PM<sub>2.5</sub> 的扩散<sup>[31]</sup>.温度对 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响主要表现为负相关效应[图 9(c)],但也存在正相关效应,高值区主要在宁乡市和湘乡市的部分区域,而低值区集中在长株潭城市群的中部地区,温度升高不仅加速 PM<sub>2.5</sub> 的运动,而且使空气对流相对活跃<sup>[32]</sup>,有利于大气污染物的稀释和扩散,从而具有负相关效应,而具有正相关效应的原因可能是温度在变化的过程中容易出现逆温<sup>[33,34]</sup>,进而阻碍热力环流的形成,使污染物扩散能力下降,造成局部 PM<sub>2.5</sub> 浓度增大.相对湿度对

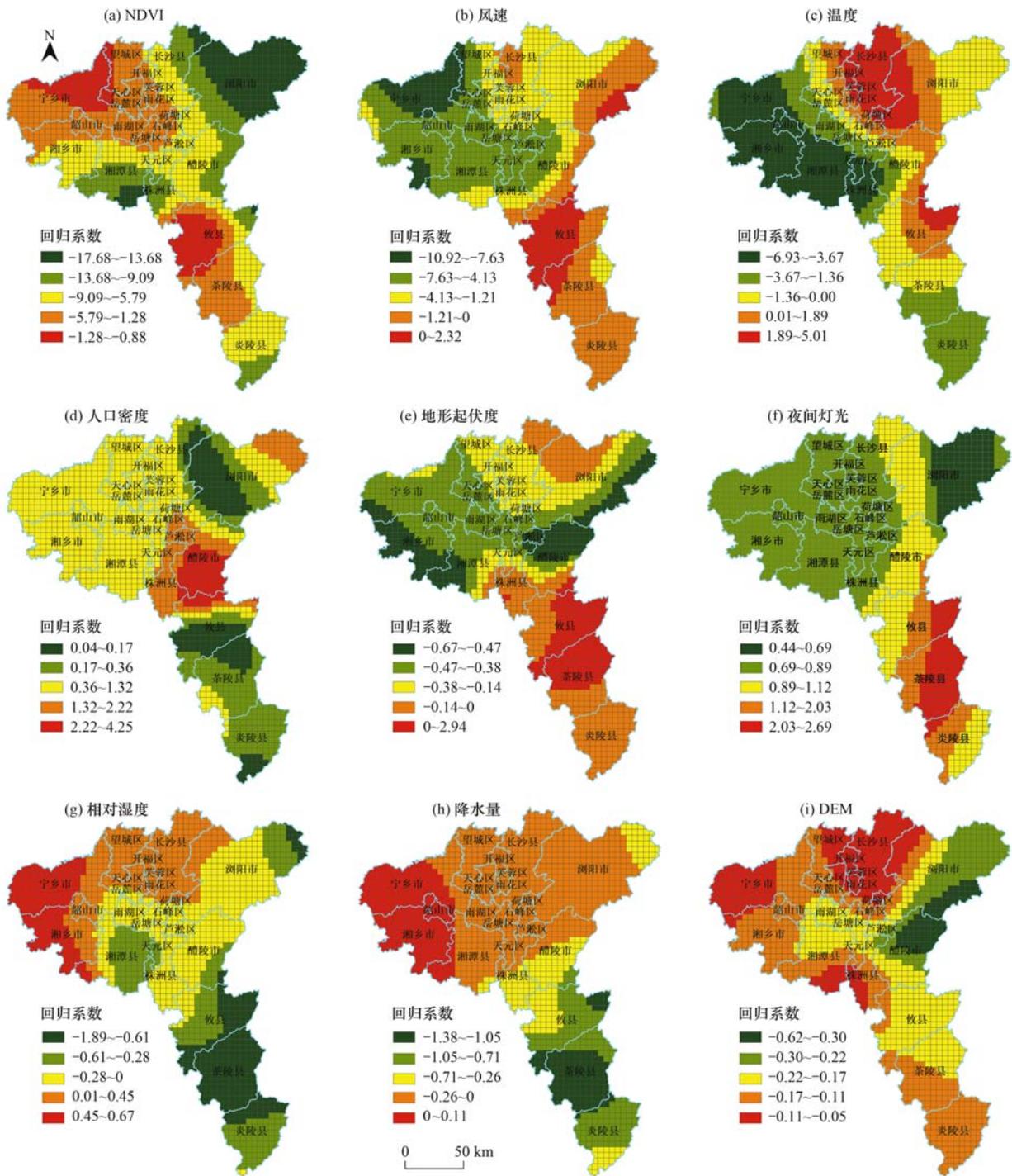


图9 PM<sub>2.5</sub> 浓度和影响因素回归系数空间分布

Fig. 9 PM<sub>2.5</sub> spatial distribution of regression coefficient between concentration and influencing factors

PM<sub>2.5</sub> 浓度同时表现出正、负两种效应[图 9(g)], 高值区集中在长沙市的开福区、芙蓉区、雨花区和长沙县等, 低值区则分布在湘乡市、湘潭县和株洲县部分区域, 相对湿度高有助于大气气溶胶粒子吸湿增长, 并逐步向积聚模态转化, 从而造成 PM<sub>2.5</sub> 浓度升高<sup>[35]</sup>. 降水量对 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响主要表现为负相关效应[图 9(h)], 高值区主要集中在株洲市南部, 而低值区则在宁乡市和湘乡市东部, 株洲地区降水量和其回归系数较高, 表明降水对大气中 PM<sub>2.5</sub> 有一

定的清除作用<sup>[36,37]</sup>.

人口密度对 PM<sub>2.5</sub> 浓度具有正相关效应[图 9(d)], 高值区主要分布在株洲市的中心城区, 低值区则在长沙市的周边, 由于人口密度较大区域的生产规模和交通流量较大(图 4), 工业发展较快, 往往造成区域 PM<sub>2.5</sub> 浓度升高, 这与长沙市 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度较高、污染严重具有一致性. 夜间灯光对 PM<sub>2.5</sub> 浓度具有正相关效应如图 9(f), 已有研究表明夜间灯光亮度值可以反映社会经济活动和城市的发展状

况<sup>[38~40]</sup>,夜间灯光强度越高表明人类活动相对较多,经济发展状况较好,更易造成区域  $PM_{2.5}$  浓度偏高。

### 2.3.2 $O_3$ 的影响因素分析

从 GWR 模型的回归系数来看,除夜间灯光、人口密度对  $O_3$  浓度具有正相关效应外,其余影响因素均呈现正、负两种效应.影响强度由高到低依次为:风速 > 温度 > NDVI > 夜间灯光 > 人口密度 > 相对湿度 > 高程 > 降水 > 地形起伏度。

风速对  $O_3$  浓度整体上具有负相关效应[图 10(a)],通常风对大气污染物有冲淡和扩散作用,风速越大,越有利于污染物的稀释,长株潭城市群大部分地区年均风速超过  $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,因而对  $O_3$  扩散有一定的促进作用.温度对  $O_3$  浓度主要表现为正相关效应[图 10(b)],温度升高有利于  $O_3$  光化学反应速率加快,使得氮氧化物( $NO_x$ )和挥发性有机物(VOCs)向  $O_3$  转化<sup>[41]</sup>,从而促进区域  $O_3$  浓度升高.降水量对  $O_3$  浓度主要具有负相关效应[图 10

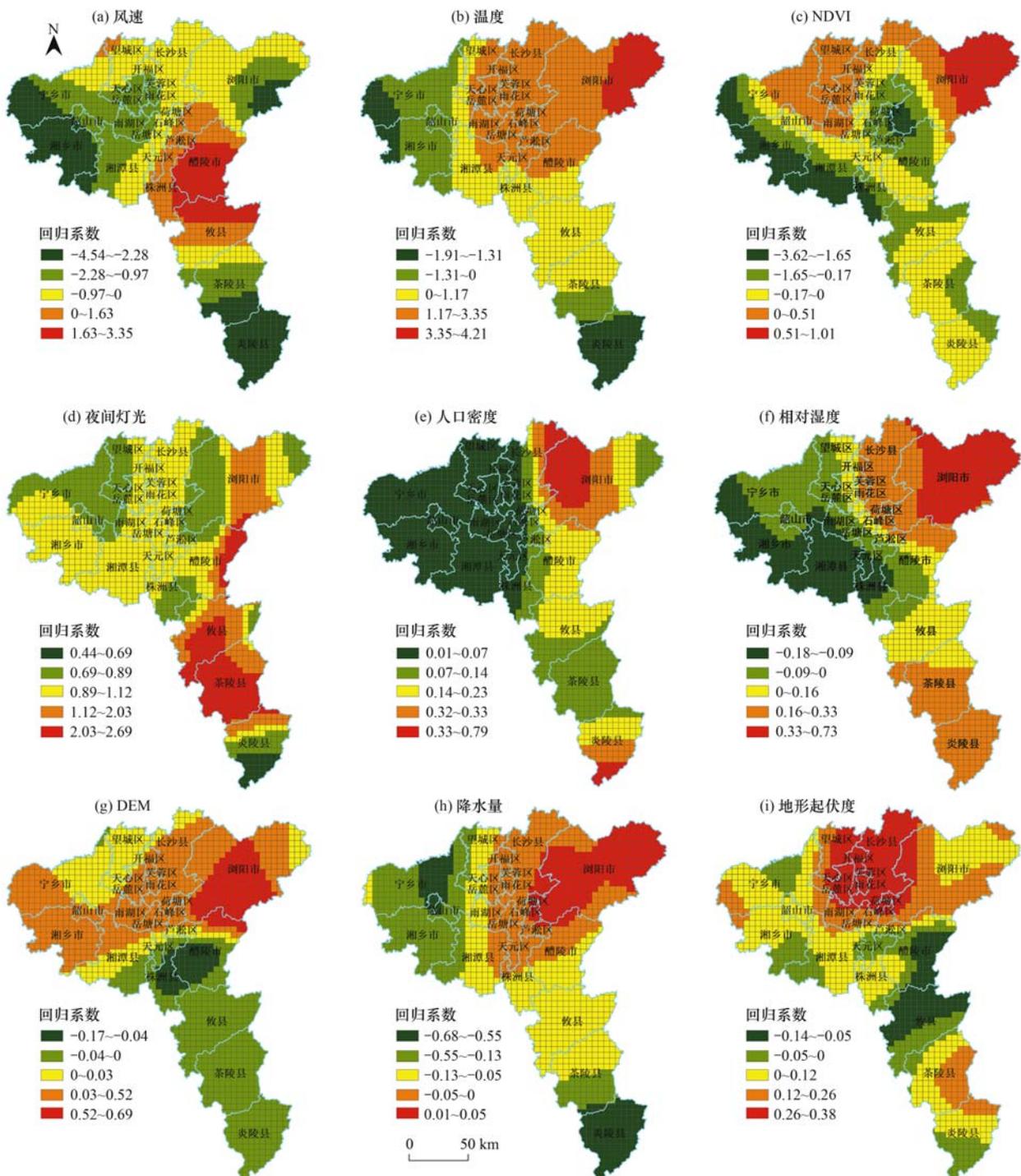


图 10  $O_3$  浓度和影响因素回归系数空间分布

Fig. 10  $O_3$  spatial distribution of regression coefficient between concentration and influencing factors

(h) ], 高值区集中于株洲市炎陵县, 而低值区则分布在长沙市中西部, 这可能与降水对污染物冲刷和稀释作用相关<sup>[42,43]</sup>, 株洲和湘潭降水量高于长沙(图 4), 更有利于降低区域 O<sub>3</sub> 浓度. 相对湿度对 O<sub>3</sub> 具有正相关效应 [图 10(f)], 且表现出明显的东西差异, 即长株潭东部的回归系数普遍高于西部, 长株潭城市群东部地区年均相对湿度高于西部地区(图 4), 其中浏阳市受相对湿度的影响最强, 相对湿度

越低, 易形成降雨且太阳辐射加强, 有利于光化学反应生成 O<sub>3</sub>.

NDVI 对 O<sub>3</sub> 浓度总体上具有显著的负相关效应 [图 10(c)], 高值区集中在植被覆盖度高的长株潭周边区域和株洲的淞沪、荷塘区, 植被指数越高的区域通常具有较高的空气污染物净化能力, 从而使得 O<sub>3</sub> 浓度降低. 高程和地形起伏度对 O<sub>3</sub> 浓度主要具有正相关效应 [图 10(g) 和 10(i)], O<sub>3</sub> 主要集中

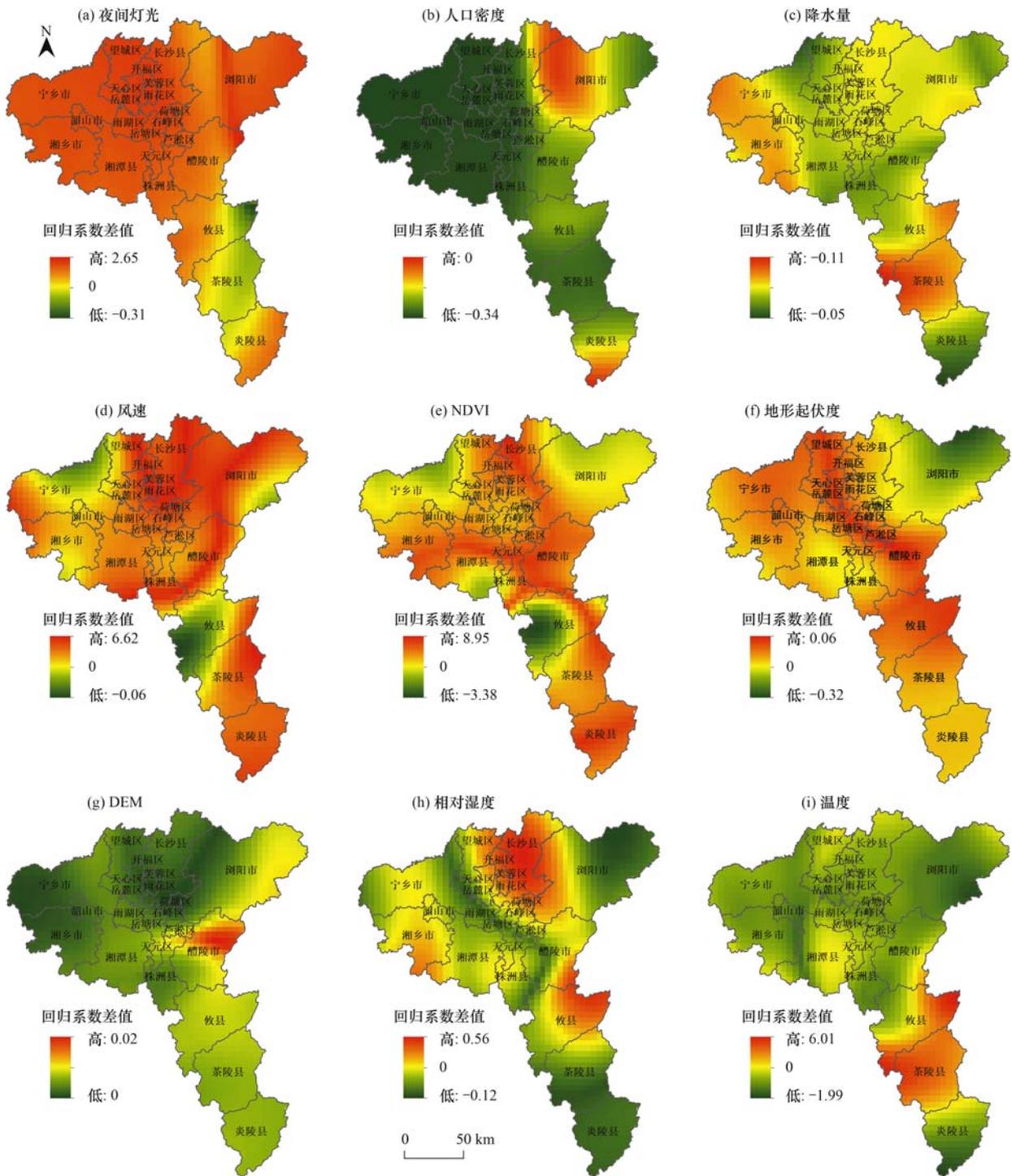


图 11 影响强度差值分布

Fig. 11 Distribution of influence intensity difference

在地形起伏度较小的长株潭城市群中部地区,当地形起伏度较大或海拔较高时,易对气流形成阻挡效应,气流无法快速扩散,从而加重  $O_3$  污染程度。

夜间灯光和人口密度对  $O_3$  浓度具有正相关效应 [图 10(d) 和 10(e)], 人口密度较大和夜间灯光亮度值较高区域的能源需求量和交通排放量较高,可能导致  $O_3$  前体排放量增大,使得区域  $O_3$  浓度增高,长沙市、湘潭市和株洲市城区表现最为突出,同时城市化引起的城市热岛效应加快光化学反应,加上形成的热岛环流有利于污染物积聚<sup>[44,45]</sup>。

### 2.3.3 $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ 影响因素的比较分析

为进一步揭示各个影响因素对  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  浓度影响强度的差异性,取各影响因素回归系数绝对值的差值,若该值大于 0,则表明该因子对  $PM_{2.5}$  浓度的影响强度大,反之,对  $O_3$  浓度的影响强度更大。由强度差值空间分布(图 11)可知:①夜间灯光强度、风速和地形起伏度对长株潭城市群  $PM_{2.5}$  浓度的影响强度更为突出,相对湿度、温度和人口密度对  $O_3$  浓度的影响更大,而降水量、NDVI 和 DEM 对  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  浓度的影响强度相当。②对  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  浓度影响强度差异较大的为 NDVI、风速、温度和夜间灯光强度。NDVI 和风速对  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  浓度具有负相关效应,细颗粒物能被吸收和扩散作用更为显著,而温度也是引起光化学反应和造成“逆温”的直接因素,夜间灯光强度与城市化程度和能源消耗具有较强的相关性,因而是造成  $PM_{2.5}$  污染的内因,故对  $PM_{2.5}$  影响强度更大。③回归系数差值大体上呈现“中部高、四周低”的分布格局,区域异质性较为显著,因素影响强度差异较大的区域集中在长株潭城市群中部,如:长沙的雨花区和芙蓉区,湘潭的雨湖区和岳塘区等,影响强度相当的区域则位于浏阳市东北部和湘乡市、攸县等周边区域。

## 3 结论

(1)长株潭城市群  $PM_{2.5}$  的浓度呈现“U”型特征,季节特征为春冬高、夏秋居中,三市的平均值高低依次为长沙市、湘潭市和株洲市。 $PM_{2.5}$  浓度在空间上具有显著的集聚特征,高-高集聚区主要集中在工业较为发达的长沙市芙蓉区、雨花区和湘潭市的雨湖区、岳塘区等,而低-低集聚区主要在株洲市攸县、茶陵县和长株潭城市群的东北部; $O_3$  浓度则呈现“M”型规律,季节特征为夏秋高,春冬低,且  $O_3$  浓度高-高集聚区的面积呈现逐年增加的趋势。长株潭城市群  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  具有一定的相关性,表现为夏季  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  浓度呈现正相关,而秋冬季表现为较弱的负相关特征。

(2)GWR 模型的结果显示,自然和社会经济因素对  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  浓度的影响表现为显著的空间异质性。自然因素对  $PM_{2.5}$  浓度主要呈负相关效应,而社会经济因素则表现为正相关效应,NDVI、风速和温度对  $PM_{2.5}$  浓度的影响最为显著。除夜间灯光和人口密度对  $O_3$  浓度具有正相关效应,其余影响因素均呈现正、负两种效应,风速和温度对  $O_3$  浓度的影响最为显著。

(3)从自然和社会经济因素对长株潭城市群  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  浓度的影响强度差异来看:夜间灯光强度、风速和地形起伏度对  $PM_{2.5}$  浓度的影响强度更为突出,相对湿度、温度和人口密度对  $O_3$  浓度的影响更大,降水量、NDVI 和 DEM 对  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  浓度的影响强度相当。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杨云芸, 胡燕, 肖童觉, 等. 湖南省长株潭城市群臭氧分布特征研究及分析[J]. *灾害学*, 2021, **36**(2): 97-103.  
Yang Y Y, Hu Y, Xiao T J, *et al.* Distribution characteristics of ozone in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration of Hunan province [J]. *Journal of Catastrophology*, 2021, **36**(2): 97-103.
- [3] 姚青, 马志强, 郝天依, 等. 京津冀区域臭氧时空分布特征及其背景浓度估算[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(11): 4999-5008.  
Yao Q, Ma Z Q, Hao T Y, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics and background concentration estimation of ozone in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(11): 4999-5008.
- [4] 栗泽苑, 杨雷峰, 华道柱, 等. 2013—2018 年中国近地面臭氧浓度空间分布特征及其与气象因子的关系[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(9): 2094-2104.  
Li Z Y, Yang L F, Hua D Z, *et al.* Spatial pattern of surface ozone and its relationship with meteorological variables in China during 2013-2018 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(9): 2094-2104.
- [5] 汪宇, 彭钰雯, 陈多宏, 等. 珠三角城市近地面臭氧污染分布特征及变化趋势[J]. *环境污染与防治*, 2019, **41**(9): 1103-1107.  
Wang Y, Peng Y W, Chen D H, *et al.* Distribution and trends of ground level  $O_3$  pollution in the Pearl River Delta cities [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2019, **41**(9): 1103-1107.
- [6] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[EB/OL]. [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm), 2021-03-13.
- [7] 陈优良, 李亚倩. 长三角  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  变化特征及与气象要素的关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, **30**(2): 382-396.  
Chen Y L, Li Y Q. Characteristics of  $O_3$  and  $PM_{2.5}$  and its relationship with meteorological factors in Yangtze River Delta [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, **30**(2): 382-396.
- [8] 赵淑婷, 王丽涛, 齐孟姚, 等. 邯郸市  $PM_{2.5}$ - $O_3$  复合污染特

- 征及相互影响研究[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(6): 2250-2261.
- Zhao S T, Wang L T, Qi M Y, *et al.* Study on the characteristics and mutual influence of PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub> complex pollution in Handan [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(6): 2250-2261.
- [9] 姚懿娟, 王美圆, 曾春玲, 等. 广州不同站点类型 PM<sub>2.5</sub>与 O<sub>3</sub> 污染特征及相互作用[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(10): 4495-4506.
- Yao Y J, Wang M Y, Zeng C L, *et al.* Pollution characteristics and interaction between PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> at different types of stations in Guangzhou [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(10): 4495-4506.
- [10] Chen J J, Shen H F, Li T W, *et al.* Temporal and spatial features of the correlation between PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> concentrations in China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(23): 4824.
- [11] 刘可欣, 卢苗苗, 张裕芬, 等. 天津市夏秋季 O<sub>3</sub>-PM<sub>2.5</sub> 复合污染特征及气象成因分析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(9): 3650-3662.
- Liu K X, Lu M M, Zhang Y F, *et al.* Analysis of characteristics and meteorological causes of O<sub>3</sub>-PM<sub>2.5</sub> compound pollution in summer and autumn over Tianjin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(9): 3650-3662.
- [12] 王占山, 张大伟, 李云婷, 等. 北京市夏季不同 O<sub>3</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 污染状况研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 807-815.
- Wang Z S, Zhang D W, Li Y T, *et al.* Different air pollution situations of O<sub>3</sub> and PM<sub>2.5</sub> during summer in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 807-815.
- [13] 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 等. 中国 PM<sub>2.5</sub> 污染空间分布的社会经济影响因素分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2498-2504.
- Duan J X, Zhai W X, Cheng C Q, *et al.* Socio-economic factors influencing the spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> concentrations in China: an exploratory analysis [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2498-2504.
- [14] 杨冕, 王银. 长江经济带 PM<sub>2.5</sub> 时空特征及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, **27**(1): 91-100.
- Yang M, Wang Y. Spatial-temporal characteristics of PM<sub>2.5</sub> and its influencing factors in the Yangtze River Economic Belt [J]. *China Population Resources and Environment*, 2017, **27**(1): 91-100.
- [15] 周磊, 武建军, 贾瑞静, 等. 京津冀 PM<sub>2.5</sub> 时空分布特征及其污染风险因素[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(4): 483-493.
- Zhou L, Wu J J, Jia R J, *et al.* Investigation of temporal-spatial characteristics and underlying risk factors of PM<sub>2.5</sub> pollution in Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(4): 483-493.
- [16] 郑印, 周广柱, 李洋, 等. 莆田市 O<sub>3</sub> 污染来源解析模拟研究[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(8): 1340-1347.
- Zheng Y, Zhou G Z, Li Y, *et al.* Analysis and source apportionment of ozone pollution in Putian city [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(8): 1340-1347.
- [17] 张森, 丁椿, 李彦, 等. 山东省 O<sub>3</sub> 时空分布及影响因素分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 5723-5735.
- Zhang M, Ding C, Li Y, *et al.* Spatial and temporal distribution of ozone and influencing factors in Shandong province [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5723-5735.
- [18] 夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 等. 2000~2019 年中国 PM<sub>2.5</sub> 时空演化特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4832-4843.
- Xia X S, Wang J H, Song W D, *et al.* Spatio-temporal evolution of PM<sub>2.5</sub> concentration during 2000-2019 in China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4832-4843.
- [19] 时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 等. 近 20 年来中国 PM<sub>2.5</sub> 污染演变的时空过程[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 1-13.
- Shi Y, Liu R M, Luo Y, *et al.* Spatiotemporal variations of PM<sub>2.5</sub> pollution evolution in China in recent 20 years [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 1-13.
- [20] 丁莹, 冯微微, 邹滨, 等. 长株潭城市群气溶胶时空分布与传输规律[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(5): 1906-1914.
- Ding Y, Feng H H, Zou B, *et al.* Spatial-temporal distribution and transport characteristic of aerosol in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(5): 1906-1914.
- [21] 张蓓蓓, 蔡宏, 田鹏举, 等. 2000~2017 年贵州省植被覆盖时空变化特征及其对气候变化的响应[J]. 地球与环境, 2020, **48**(4): 461-470.
- Zhang B B, Cai H, Tian P J, *et al.* Spatiotemporal variation of the vegetation coverage in Guizhou from 2000 to 2017 and its response to the climate change [J]. *Earth and Environment*, 2020, **48**(4): 461-470.
- [22] 昌晶亮, 余洪, 罗伟伟. 珠三角地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度空间自相关分析[J]. 生态与农村环境学报, 2015, **31**(6): 853-858.
- Chang J L, Yu H, Luo W W. Spatial autocorrelation analysis of PM<sub>2.5</sub> concentration in the Pearl River Delta [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, **31**(6): 853-858.
- [23] Li H, Fu P H, Yang Y, *et al.* Exploring spatial distributions of increments in soil heavy metals and their relationships with environmental factors using GWR [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2021, **35**(10): 2173-2186.
- [24] Brunson C, Fotheringham S, Charlton M. Geographically weighted local statistics applied to binary data [A]. In: *Second International Conference on Geographic Information Science* [C]. Boulder, USA: Springer, 2002. 38-50.
- [25] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity [J]. *Geographical Analysis*, 2010, **28**(4): 281-298.
- [26] Li Z Q, Guo J P, Ding A J, *et al.* Aerosol and boundary-layer interactions and impact on air quality [J]. *National Science Review*, 2017, **4**(6): 810-833.
- [27] 颜敏, 黄晓波, 陈丹, 等. 深圳市臭氧污染特征及其与前体物关系分析[J]. 生态环境学报, 2021, **30**(4): 763-770.
- Yan M, Huang X B, Chen D, *et al.* Characteristics of ozone pollution and relationship between ozone and precursors in Shenzhen [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2021, **30**(4): 763-770.
- [28] 赵晨曦, 王玉杰, 王云琦, 等. 细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)与植被关系的研究综述[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(8): 2203-2210.
- Zhao C X, Wang Y J, Wang Y Q, *et al.* Interactions between fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) and vegetation: a review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(8): 2203-2210.
- [29] Yang H O, Chen W B, Liang Z F. Impact of land use on PM<sub>2.5</sub> pollution in a representative city of middle China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, **14**(5), doi: 10.3390/ijerph14050462.
- [30] 宋明, 韩素芹, 张敏, 等. 天津大气能见度与相对湿度和 PM<sub>10</sub> 及 PM<sub>2.5</sub> 的关系[J]. 气象与环境学报, 2013, **29**(2): 34-41.
- Song M, Han S Q, Zhang M, *et al.* Relationship between visibility and relative humidity, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> in Tianjin [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2013, **29**(2): 34-41.
- [31] 黄小刚, 赵景波, 辛未冬. 基于网格的长三角 PM<sub>2.5</sub> 分布影

- 响因素及交互效应[J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3107-3117.
- Huang X G, Zhao J B, Xin W D. Factors and their interaction effects on the distribution of PM<sub>2.5</sub> in the Yangtze River Delta based on grids [J]. Environmental Science, 2021, **42**(7): 3107-3117.
- [32] 陈静锋, 柴瑞端, 闫浩, 等. 基于高斯烟羽模型的PM<sub>2.5</sub>污染源扩散规律模拟分析[J]. 系统工程, 2015, **33**(9): 153-158.
- Chen J F, Chai R R, Yan H, *et al.* PM<sub>2.5</sub> pollution source diffusion law and simulation analysis based on the Gauss plume model[J]. Systems Engineering, 2015, **33**(9): 153-158.
- [33] 张忠地, 邵天杰, 黄小刚, 等. 2017年京津冀地区PM<sub>2.5</sub>污染特征及潜在来源分析[J]. 环境工程, 2020, **38**(2): 99-106, 134.
- Zhang Z D, Shao T J, Huang X G, *et al.* Characteristics and potential sources of PM<sub>2.5</sub> pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2017[J]. Environmental Engineering, 2020, **38**(2): 99-106, 134.
- [34] 杨云芸, 周慧, 王晓雷, 等. 南方长株潭与北方京津冀城市群一次重污染天气过程对比分析[J]. 灾害学, 2017, **32**(2): 141-145.
- Yang Y Y, Zhou H, Wang X L, *et al.* Comparison and analysis of a heavy pollution weather process in the south Changsha-Zhuzhou-Xiangtan and north Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration[J]. Journal of Catastrophology, 2017, **32**(2): 141-145.
- [35] 郭雯雯, 陈永金, 刘阁, 等. 2016—2019年长江中游城市群空气质量时空变化特征及影响因素分析[J]. 生态环境学报, 2020, **29**(10): 2034-2044.
- Guo W W, Chen Y J, Liu G, *et al.* Analysis on the characteristics and influencing factors of air quality of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River in 2016 to 2019 [J]. Ecology and Environment Sciences, 2020, **29**(10): 2034-2044.
- [36] 樊高峰, 马浩, 任律, 等. 分钟降水量对能见度及PM<sub>2.5</sub>浓度影响研究[J]. 气象, 2017, **43**(12): 1527-1533.
- Fan G F, Ma H, Ren L, *et al.* Impact of precipitation on atmospheric visibility and the PM<sub>2.5</sub> concentration based on the minute-scale high-resolution observations [J]. Meteorological Monthly, 2017, **43**(12): 1527-1533.
- [37] 柏中强, 王卷乐, 杨雅萍, 等. 基于乡镇尺度的中国25省区人口分布特征及影响因素[J]. 地理学报, 2015, **70**(8): 1229-1242.
- Bai Z Q, Wang J L, Yang Y P, *et al.* Characterizing spatial patterns of population distribution at township level across the 25 provinces in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, **70**(8): 1229-1242.
- [38] 陈佐旗. 基于多源夜间灯光遥感影像的多尺度城市空间形态结构分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- Chen Z Q. A multiscale analysis on urban area and spatial structure based on nighttime light data [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.
- [39] 郑伯红, 王志远, 汪华. 基于DMSP/OLS数据的长株潭城市群建成区演变特征研究[J]. 国土资源遥感, 2020, **32**(4): 172-181.
- Zheng B H, Wang Z Y, Wang H. A study of the evolution characteristics of built-up areas in Chang-Zhu-Tan urban agglomeration based on DMSP/OLS data[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2020, **32**(4): 172-181.
- [40] 陈J Q, 魏H, 李N, *et al.* Exploring the spatial-temporal dynamics of the Yangtze River Delta Urban agglomeration based on night-time light remote sensing technology[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020, **13**: 5369-5383.
- [41] 严仁嫦, 叶辉, 林旭, 等. 杭州市臭氧污染特征及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(3): 1128-1136.
- Yan R C, Ye H, Lin X, *et al.* Characteristics and influence factors of ozone pollution in Hangzhou [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(3): 1128-1136.
- [42] 曹杨, 刘伟桦, 王晨曦, 等. 成都市降水对大气污染物的清除效果分析[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(2): 305-311.
- Cao Y, Liu W H, Wang C X, *et al.* Scavenging effect of precipitation on removal of atmospheric pollutants in Chengdu City[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(2): 305-311.
- [43] 肖辉, 沈志来, 黄美元, 等. 我国西南地区地面和低层大气臭氧的观测分析[J]. 大气科学, 1993, **17**(5): 621-628.
- Xiao H, Shen Z L, Huang M Y, *et al.* Measurements and analyses of ozone concentrations at the ground surface and in the lower troposphere in Southwest China[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1993, **17**(5): 621-628.
- [44] 顾莹. 上海城市化对臭氧污染影响的数值模拟[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
- Gu Y. Numerical simulation of the impact of urbanization on ozone in Shanghai [D]. Shanghai: East China Normal University, 2010.
- [45] 寿亦萱, 张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望[J]. 气象学报, 2012, **70**(3): 338-353.
- Shou Y X, Zhang D L. Recent advances in understanding urban heat island effects with some future prospects [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, **70**(3): 338-353.

## CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM <sub>2.5</sub> and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration .....	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i> (5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM <sub>2.5</sub> Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration .....	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning (5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China .....	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Zhangye City .....	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i> (5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM <sub>2.5</sub> Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019 .....	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i> (5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao .....	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu (5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021 .....	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i> (5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province .....	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i> (5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification .....	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i> (5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China .....	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i> (5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou .....	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i> (5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage .....	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles .....	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i> (5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste .....	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i> (5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River .....	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i> (5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River .....	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i> (5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River .....	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i> (5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources .....	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic .....	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i> (5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River .....	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i> (5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area .....	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i> (5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir .....	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water .....	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i> (5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019 .....	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i> (5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake .....	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i> (5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff .....	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i> (5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources .....	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i> (5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs .....	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i> (5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution .....	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i> (5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI) .....	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i> (5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar .....	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i> (5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus .....	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i> (5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan .....	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i> (5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai .....	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i> (5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing .....	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i> (5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites .....	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i> (5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model .....	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County .....	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China .....	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i> (5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China .....	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland .....	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i> (5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils .....	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i> (5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat .....	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i> (5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils .....	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i> (5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant .....	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i> (5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River .....	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i> (5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan .....	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i> (5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> .....	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i> (5832)
Analysis of Provincial CO <sub>2</sub> Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals .....	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin (5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration .....	YANG Xu, LIU Xian-zhao (5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification .....	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i> (5861)