

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期
Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征	陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)
面向二/三维城市形态指标的PM _{2.5} 浓度调控模拟	李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)
减排背景下成都大气PM _{2.5} 碳质组分特征	陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)
青岛秋冬季PM ₁ 中金属元素污染特征及健康风险评估	刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)
港口地区大气PM _{2.5} 中多环芳烃污染特征及来源分析	王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王淦铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)
天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析	张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)
北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素	梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)
北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析	孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)
东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源	周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠筠, 张智胜, 陶俊(4497)
生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果	何品晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)
不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比	武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)
沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析	宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)
白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险	许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)
喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子	剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4543)
石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性	陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)
不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源	陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)
晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)
不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)
紫外光化过硫酸盐降解磷酸氯喹	李阳, 许玻琨, 邓琳, 罗伟(4597)
微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除SS和有机性能	刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)
废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响	陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)
生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响	郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)
有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 $phoD$ 基因细菌群落的影响	夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)
煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响	宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)
生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响	袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)
黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化	孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)
模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响	翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性	赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4684)
典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制	龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)
作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响	刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)
不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响	王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)
总氮提标改造工程的微生物群落结构分析	李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培基(4727)
IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析	赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)
黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响	郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)
南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价	王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)
兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析	张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)
石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)
典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价	沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)
有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析	汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)
柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应	唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)
稻田干湿过程甲基化效率变化与关键影响因素分析	张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)
外源茉莉酸对水稻幼苗根系砷积累及抗逆应答效应	李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)
秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响	宋佳杰, 徐郁阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)
冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响	张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)
庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测	李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)
小型养殖塘水体中CH ₄ 、CO ₂ 和N ₂ O浓度的时空变化特征及影响因素	石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)
丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响	胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)
秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征	商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)
黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析	张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)
植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用	马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)
《环境科学》征订启事(4512)	《环境科学》征稿简则(4735)
信息(4696, 4790, 4887)	

面向二/三维城市形态指标的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度调控模拟

李莎¹, 邹滨^{1*}, 刘宁¹, 冯徽徽¹, 陈军², 张鸿辉^{3,4}

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083; 2. 湖南省长沙生态环境监测中心, 长沙 410001; 3. 湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410081; 4. 广东国地规划科技股份有限公司, 广州 510650)

摘要: 城市形态可影响空气污染的源分布与扩散过程, 但如何通过优化城市形态指标缓解城市空气污染一直缺少实用的定量方法与模型. 故以长沙市为例, 定量分析了二/三维城市形态指标对主城区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布的影响, 提出了一种关键因子指标驱动下的城市空气质量优化调控模型(UFR-AQOM), 开展了指标阈值与空气质量目标双约束下的城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度情景模拟实验. 结果表明, 长沙市主城区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值区呈现“一轴两区四节点”的空间格局, 商业服务用地与道路交通用地、高斑块密度与高用地容积率网格 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对较高. 三类城市形态因子指标中, 开发强度对城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间变化的影响程度最大, 景观格局、用地功能次之, 多因子共同作用比单因子影响更加显著. 顾及因子指标贡献差异与交互作用的 UFR-AQOM 模型可有效用于城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的优化调控模拟($R^2 = 0.65$, $\text{RMSE} = 1.40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$). 面向 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达标约束要求, 长沙市主城区宜加强周长面积分维数与斑块密度等景观格局指标的全面管控, 同时应考虑对工业占比与水域占比等城市用地功能指标和用地容积率等城市开发强度指标的分区优化调控. 研究成果将为面向空气质量改善的国土空间规划指标调控提供决策支持.

关键词: 空气污染; 城市形态; 国土空间规划; 优化调控; 地理探测器

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4425-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202111300

Simulation of $\text{PM}_{2.5}$ Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form

LI Sha¹, ZOU Bin^{1*}, LIU Ning¹, FENG Hui-hui¹, CHEN Jun², ZHANG Hong-hui^{3,4}

(1. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Changsha Environmental Monitoring Center of Hunan Province, Changsha 410001, China; 3. School of Geographic Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 4. Guangdong Guodi Planning Science Technology Co., Ltd., Guangzhou 510650, China)

Abstract: It is well known that urban forms can affect the source distribution and diffusion process of air pollution; however, practical quantitative methods and models on alleviating urban air pollution by optimizing urban form indexes are lacking. Using Chang Sha city as an example, we quantitatively analyzed the $\text{PM}_{2.5}$ concentration distribution in terms of 2D/3D urban form indexes (e.g., land use functionality, landscape pattern, and development intensity). Based on this, the urban form regulation-aided air quality optimization model (UFR-AQOM) was proposed and consequently employed to simulate the scene-dependent $\text{PM}_{2.5}$ concentrations under double constraints from both the index threshold and air quality objectives. The results showed that the high value area of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Chang Sha featured a “one axis and four nodes” spatial pattern. $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in grids with commercial or road land applications, high patch density or high Shannon index, and high land plot ratio or low sky openness were shown to be relatively higher. The development intensity indexes had the greatest impact on the spatial variation in $\text{PM}_{2.5}$ concentration, followed by landscape pattern and land use functionality, and the interaction of factor indexes could significantly strengthen their own single contributions. The UFR-AQOM model, taking into account the contribution differences and interactions among different factors, could effectively simulate the spatial variation in $\text{PM}_{2.5}$ concentration in urban areas ($R^2 = 0.65$, $\text{RMSE} = 1.40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$). In order to meet the regulations of $\text{PM}_{2.5}$ standards, the overall management of landscape pattern indexes, such as the integral dimension of the perimeter surface and patch density, should be strengthened in the main urban area of Changsha. Further, the zoned optimization of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations could be implemented by controlling the urban land use indexes, such as the industrial land use ratio and water area ratio, as well as the development intensity indexes such as the land use area ratio. These research results provided support for decisions in the optimization of national territory spatial planning indexes targeting air quality improvement.

Key words: air pollution; urban form; national territory spatial planning; optimized adjustment; geographical detector

城市形态指城市中大规模的、静态的和永久的物质实体^[1], 是城市构成要素外部几何形态与功能地域分异属性的综合表征. 城市人为活动对空气污染形成的主导作用^[2]依附于城市形态, 而且城市形态可以显著改变城市微气候进而影响空气污染物的扩散^[3]. 城市规划作为塑造城市形态的最重要手段, 关乎城市未来发展走向和环境效应^[4], 已在英国等发达国家中被证实为缓解空气污染的有效途径之一^[5], 文献[6]更是明确提出“人类规划建设城市的方式决定了人们呼吸的空气”. 随着国家新型城镇化与新一轮国土空间规划快速推进, 明晰如何通过优化城市形态指标有效改善空气质量已迫在眉

睫. 但目前面向空气质量改善的城市形态因子识别、调控模拟方法研究仍停留在起步阶段.

截止目前, 影响空气质量的城市形态因子研究较多聚焦于城市用地^[7]. 普遍认为空气污染程度与城市用地规模呈正比^[8,9], 建成区面积占比越高 PM_{10} 浓度越高^[10]; 相反, 居住用地面积占比较高的区域 O_3 浓度较低^[11], 绿地覆盖率对 $\text{PM}_{2.5}$ 影响显著^[12,13] 且对周边地区具有明显溢出效应^[14]. 也有学

收稿日期: 2021-11-29; 修订日期: 2022-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871317, 41871318)

作者简介: 李莎(1990~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为城市大气污染模拟与国土空间优化, E-mail: wuda-lisha@whu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: 210010@csu.edu.cn

者从景观配置关系视角展开分析,发现城市紧凑度/破碎度对空气污染的影响在不同规模城市、不同地域存在分异性^[15,16],如空气污染与城市整体破碎度在美国城市研究中表现为正相关^[17,18],在中国城市研究中则表现为负相关^[19,20].不仅如此,此类研究关注的热点近年来正逐步由二维转向三维.有研究综述了城市规模、城市密度和城市形状这3类指标与空气质量的相关性^[21],实证表明污染物浓度与地形起伏度呈负相关^[22],建筑的高度、体积、形状和密度变化对空气污染扩散及分布具有显著影响^[23].

尽管上述关于城市形态因子与空气质量相关性的研究较多,但面向空气质量达标的城市形态指标定量调控方法/模型成果少见.早期研究城市规划对大气环境的影响仅局限于使用风玫瑰图.随着计算机模拟技术与大气环境监测手段的快速发展,本世纪初开始采用耦合流体力学计算模式模拟开展城市规划大气环境影响评估^[3,24,25],评估依据主要为城市通风廊道效应^[26].虽然该方法在表达宏观趋势变化时具有优势,但因模拟过程依赖准确的排放清单、对城市下垫面考虑较为粗糙和未考虑城市规划可调控指标间贡献力差异等原因,在指导具体城市规划调控时仍欠缺实用性与高效性.近年,在城市气候区^[27]基础上,Badach等^[28]面向城市规划提出了依据城市形态通风潜力和污染暴露风险等级划定空气质量管理区的新方法;Chokhachian等^[29]建议采用环境参数化建模的

城市设计方法增强城市环境韧性.上述成果对政府部门确定空气污染重点防治区域、优化城市环境韧性提供了新的思路,但仍然缺乏基于规划因子指标的操作性强的空气质量调控方法和模型.

总体而言,已有研究表明空气污染与城市形态特征密切相关,塑造城市形态的城市规划是缓解空气污染的有效途径,但未能定量综合解析二/三维可调控城市形态因子体系对空气污染影响的大小,更缺少面向城市形态因子优化调控模拟的实用方法.对此,本文以长沙市为例,构建影响 $PM_{2.5}$ 浓度分异的二/三维可调控城市形态因子体系,通过城市 $PM_{2.5}$ 浓度精细制图,定量探究 $PM_{2.5}$ 浓度分布对城市形态的依赖特性,建立一种关键因子指标驱动下的城市空气质量模拟优化调控模型,并结合国土空间规划工作实际,提出基于敏感因子指标调控的空气质量超标区域优化策略,以期为空气质量友好型绿色国土空间规划编制提供新的理论与技术支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文选取湖南省长沙市中心城区($112^{\circ}40' \sim 113^{\circ}17'E$, $27^{\circ}58' \sim 28^{\circ}30'N$)为对象,含天心区、开福区、芙蓉区全部和望城区、岳麓区、雨花区和长沙县局部地区,总面积约1 869 km^2 (图1).长沙市是中国长江中下游地区重要的中心城市和交通枢纽,

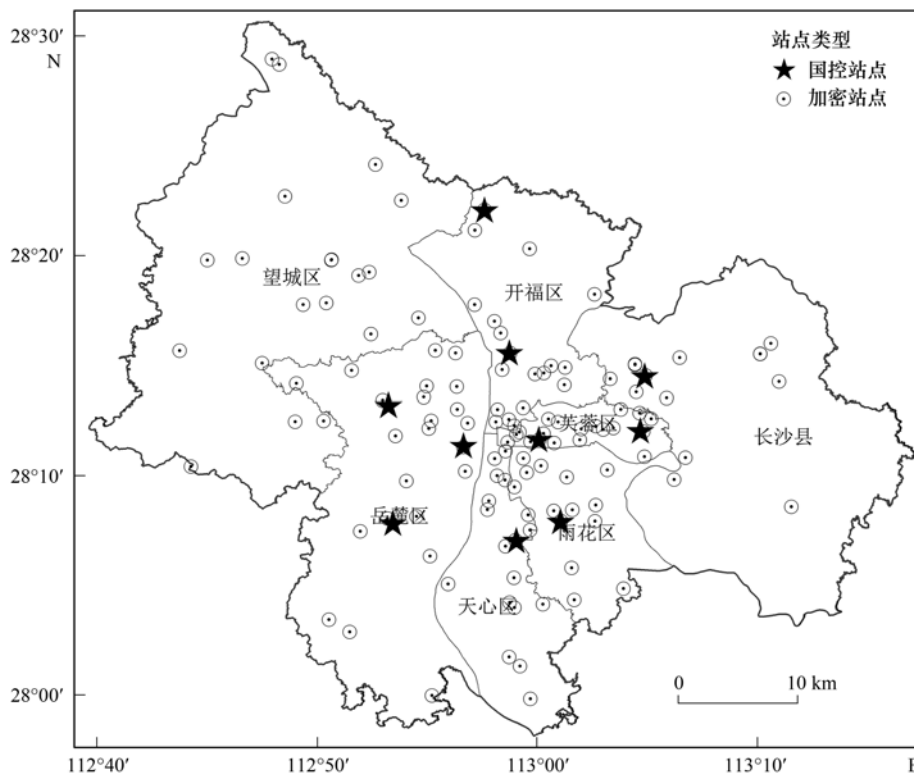


图1 研究区范围与 $PM_{2.5}$ 浓度监测站点分布示意

Fig. 1 Study area and locations of $PM_{2.5}$ concentration monitoring sites

也是中国(大陆)国际形象最佳的山水洲城,更是长株潭两型社会建设示范区的核心区域,其良好的空气质量保障极为必要.然而,研究区四面环山,地势东西高、中间低,湘江自南向北贯穿中心城区,形成东西两岸隔江相望的“马蹄”形空间格局,宏观地理环境导致空气污染扩散条件较差,加之复杂的城市结构、密集的城市活动等原因,PM_{2.5}污染压力大,

且呈现明显的空间异质性^[30].

1.2 研究设计

本研究PM_{2.5}浓度时空变化的城市形态因子识别与优化调控模拟包括图2所示的4个方面:①PM_{2.5}浓度及相关数据收集与预处理;②PM_{2.5}浓度精细制图;③城市形态可调控指标探测;④PM_{2.5}浓度优化调控情景模拟.

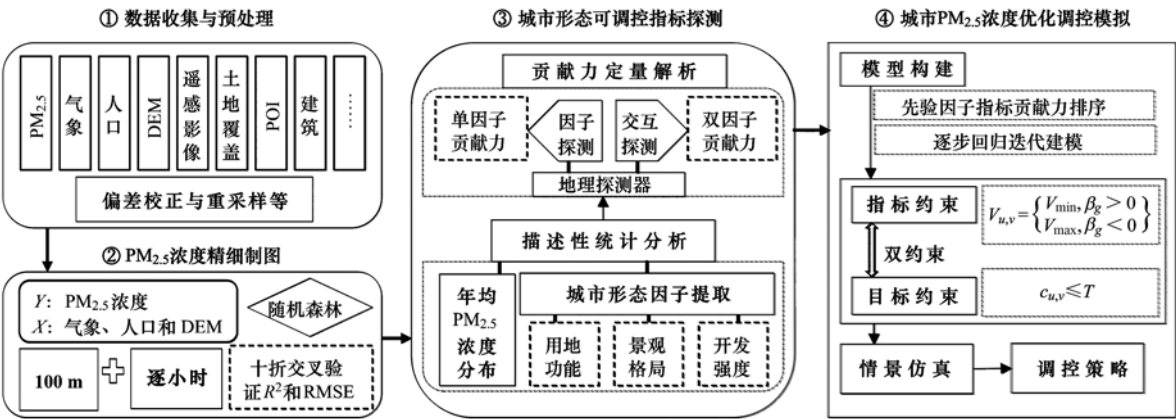


图2 PM_{2.5}浓度空间分异的城形态依赖分析与优化调控模拟研究框架

Fig. 2 Framework of urban form dependence analysis and optimization for spatially differentiated PM_{2.5} concentration

1.2.1 数据收集与预处理

(1) PM_{2.5}浓度及相关数据 PM_{2.5}浓度精细模拟需在站点观测数据基础上,引入影响污染扩散的气象和DEM,以及反映污染排放源分布的人口等辅助数据^[31,32].本研究收集的数据主要包括来自中国环境监测总站10个国控站点(<https://air.cnemc.cn:18007/>)和湖南省长沙生态环境监测中心124个小微站点2020年逐小时PM_{2.5}浓度观测数据,中国气象局陆面同化系统(CLDAS-V2.0)(<http://data.cma.cn>)时空分辨率为6.25 km·h⁻¹的风速(WS)、气温(TEMP)、降水(PRE)、气压(PRS)和比湿(SHU)等气象数据^[33],美国航空航天局30 m分辨率SRTM DEM数据(<http://gdex.cr.usgs.gov/gdex>),以及WorldPop网站100 m分辨率人口密度数据(<https://www.worldpop.org/methods/populations>).针对小微站点数据系统偏差,采用机器学习算法^[34]基于邻近国控站点数据对其进行了误差校正,拟合 $R^2=0.99$, $RMSE=3.11\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,十折交叉验证 $R^2=0.94$, $RMSE=6.86\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,误差校正精度可靠.

(2) 城市形态数据 本研究采用的城市形态数据可分为:①二维城市用地功能划分与景观格局计算基础数据;②三维城市开发强度特征提取数据.前者主要包括地理国情监测云平台30 m分辨率土地覆盖数据(<http://www.dsac.cn/DataProduct/Detail/200804>),百度开放平台涉及购物中心、中

学、小学、住宅区、厂矿、火车站和停车场等183种二级行业分类的共计80 632条POI兴趣点数据记录(<http://lbsyun.baidu.com/>),以及地理空间数据云平台资源三号2.1 m空间分辨率高清卫星影像数据(<http://www.gscloud.cn/sources/index?pid=2&rootid=2>)等.后者主要指包含边界与建筑层数的长沙市建筑矢量数据(<https://www.udparty.com/index.php/lists/data>)等.以上述数据为基础,结合研究区实际情况与相关研究成果,本研究构建了如表1所示的由二维尺度空间的城市用地功能再分类指标与城市景观格局指数指标,和三维尺度空间的城市开发强度指标共同构成的城市形态指标体系,实际应用中该指标体系可根据不同城市特点进行调整扩充.考虑到后续PM_{2.5}浓度制图分辨率要求,基于100m网格对各指标栅格数据进行了重采样处理.

1.2.2 PM_{2.5}浓度精细制图

PM_{2.5}浓度精细制图是开展城市形态可调控指标探测的数据基础.鉴于随机森林(random forest, RF)^[34,38]方法在多维分类和回归分析中有应用普遍、精度高、过拟合概率低和可解释性强等优势,本研究构建了小时尺度地表PM_{2.5}浓度制图RF模拟模型.模型结构如下:

$$\begin{aligned} \text{PM}_{2.5} \sim \text{RF}(\text{WS}, \text{TEMP}, \text{PRE}, \text{PRS}, \\ \text{SHU}, \text{Pop}, \text{DEM}) \end{aligned} \quad (1)$$

式中,PM_{2.5}为站点观测浓度;WS、TEMP、PRE、

表 1 二/三维城市形态指标体系
Table 1 2D/3D index system of urban form

因子类型	功用	指标	含义
二维城市用地功能 ^[35]	展现城市功能的地域分异格局	耕地占比	种植农作物土地面积占总用地面积比例
		林地占比	生长乔木、竹类和灌木的土地占总用地面积比例
		居住占比	用于生活居住的房基地及其附属设施土地占总用地面积比例
		管理服务占比	公共管理与公共服务用地和公用设施用地占总用地面积比例
		商业服务占比	商业、商务金融以及娱乐康体等设施用地占总用地面积比例
		工业占比	工矿用地和仓储用地占总用地面积比例
		道路交通占比	交通运输用地和农业设施建设用地占总用地面积比例
		绿地占比	公园绿地、防护绿地和广场等用地占总用地面积比例
		水域占比	河流、湖泊、水库和坑塘等水面占总用地面积比例
		其他占比	除上述用地功能外的其他类型土地占总用地面积比例
二维城市景观格局 ^[36]	表征城市功能的空间配置关系	最大斑块指数	LPI (largest patch index), 面积边缘类指数, 大小决定了景观优势种丰度
		周长面积分维数	PAFRAC (perimeter-area fractal dimension), 形状类指标, 表征景观形状的复杂程度
		斑块密度	PD (patch density), 聚集类指数, 反映单位面积上的斑块数量
		聚合度	AI (aggregation index), 聚集类指数, 反映单位面积上的一定景观组成的节点相似的最大可能性
		香农均度指数	SHEI (Shannon's evenness index), 为香农多样性指数除以给定景观丰度下的最大可能多样性, 反映景观异质性
三维城市开发强度	反映城市建筑空间组织面貌与密集程度	建筑高度	网格中最高建筑高度
		建筑密度	建筑占地面积与总用地面积的比值
		用地容积率	建筑面积与用地面积的比值
		天空开敞度	三维空间封闭程度, 用以表征城市环境的通风潜力 ^[37]

PRS、SHU、Pop 和 DEM 分别为上述预处理提取的站点风速、气温、降水、气压、比湿、人口和地形高程变量值。模型精度采用基于样本的与基于站点的十折交叉验证方法^[39], 借助拟合优度 (R^2) 和均方根误差 (RMSE) 这 2 个指标进行评价。

1.2.3 城市形态可调控指标探测

城市形态可调控指标探测包括厘清 $PM_{2.5}$ 浓度和城市形态指标空间分异特征关系的描述性统计分析和基于地理探测器定量解析城市形态指标对 $PM_{2.5}$ 浓度分异的贡献强度计算^[40]。

地理探测器是王劲峰等^[41,42] 结合空间分异理论、空间叠加技术和集合论提出的探测空间分异性并揭示其背后驱动因子的统计学方法。地理探测器采用统计量 q 值表示单变量 X 对属性 Y 的空间分异解释力。在评估多个自变量对因变量的交互作用时, 可分别计算两种自变量因子 X_1 和 X_2 与因变量 Y 的 q 值 $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$, 以及两因子叠加交互后与 Y 的 q 值 $q(X_1 \cap X_2)$ 。通过交互前后的 q 值大小比较区分交互作用类型: ①非线性减弱: $q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}[q(X_1), q(X_2)]$; ②单因子非线性减弱: $\text{Min}[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$; ③双因子增强: $q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$; ④独立: $q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$; ⑤非线性增强: $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$ 。 q 值计算表达式为:

$$q = 1 - (N\sigma^2)^{-1} \cdot \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (2)$$

式中, L 为变量 Y 的分层; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的样本数量; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区 Y 值的方差。 q 的取值范围为 $[0, 1]$, 值越大表明解释力越强, 反之则越弱。

1.2.4 空气质量优化调控 UFR-AQOM 建模

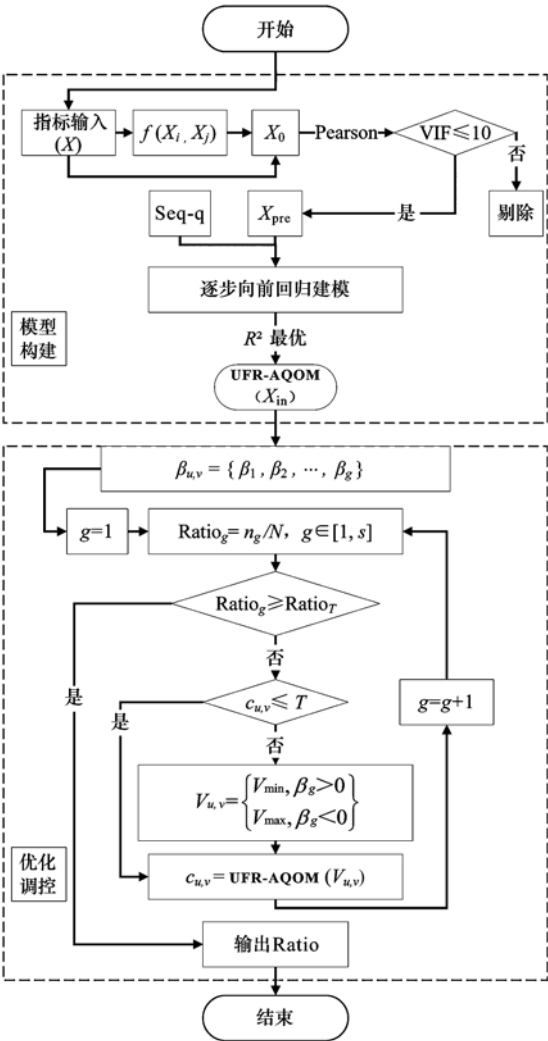
城市形态可调控指标的地理探测虽可识别影响城市 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异的全局地理因子, 但仍无法直接指导基于该因子的城市局地 $PM_{2.5}$ 浓度优化调控模拟。对此, 本研究构建了一种基于地理探测器先验城市形态指标的空气质量优化调控模型 (urban form regulation-aided air quality optimization model, UFR-AQOM) (图 3)。模型实现过程主要包括: 逐步回归迭代建模和面向目标约束的情景优化调控仿真这 2 个部分, 模型结构与实现算法如下:

$$Y(u, v) = \beta_0(u, v) + \sum_{i=1}^{n_1} \beta_i(u, v) X_i + \sum_{i,j=1}^{n_2} \beta_{i,j}(u, v) f(X_i, X_j) + \varepsilon(u, v)$$
$$f(X_i, X_j) = \sum_{k=0}^p A_k \cdot \exp \left[- \frac{(X_i - \theta_{x_i}^k)^2}{(\sigma_{x_i}^k)^2} - \frac{(X_j - \theta_{x_j}^k)^2}{(\sigma_{x_j}^k)^2} \right] \quad (3)$$

式中, Y 为标准化后地表 $PM_{2.5}$ 浓度; X_i 为地理探测强贡献先验单因子; $f(X_i, X_j)$ 为 X_i 和 X_j 双因子对地表 $PM_{2.5}$ 浓度的交互作用影响; n_1 和 n_2 分别为单因子与双因子作用的城市形态指标 (组合) 个数;

(u, v) 为地表 PM_{2.5} 浓度待优化调控网格的地理坐标; 回归系数 $\beta_i(u, v)$ 和 $\beta_{(i,j)}(u, v)$ 分别为城市不同单元单因子与双因子交互作用对地表 PM_{2.5} 浓度的影响系数, 绝对值越大影响越强, 正负值系数分别为正影响与负影响. $\beta_i(u, v)$ 和 $\beta_{(i,j)}(u, v)$ 采用地理加权回归进行估计^[43,44]; 截距 $\beta_0(u, v)$ 为其他因素对地表 PM_{2.5} 浓度的影响; $\varepsilon(u, v)$ 为模型随机误差. 双因子交互作用 $f(X_i, X_j)$ 采用耦合多个高斯核函数拟合描述, 其中参数 $\theta_{x_i}^l$ 与 $\theta_{x_j}^k$ 为第 k 个高斯核函数峰值的中心坐标, 参数 $\sigma_{x_i}^k$ 与 $\sigma_{x_j}^k$ 为第 k 个高斯函数标准差, 参数 A_k 为第 k 个高斯核函数的峰值. 高斯核函数的个数 p 需在拟合前设定, 其决定了 $f(X_i, X_j)$ 对地表 PM_{2.5} 浓度的整体解释程度, 本文通过最小化 $PM_{2.5} \sim f(X_i, X_j)$ 拟合 R^2 与双因子交互作用力 q 值差值确定 p 的取值.

(1) 逐步回归迭代建模 ①选择地理探测过程



N 为研究区网格总数, n 为达标网格数,
 s 为城市形态指标数, g 为优化迭代次数
图3 UFR-AQOM 模型构建及优化调控过程示意
Fig. 3 Schematic diagram of UFR-AQOM model
construction and optimization process

中双因子非线性增强组合(X_i, X_j)构建非线性拟合方程, 计算非线性增强新指标 $f(X_i, X_j)$; ②针对通过显著性检验的地理探测先验指标和非线性增强新指标共同构成的指标集合 X_0 , 以方差膨胀系数(VIF)取值 10 为标准去除潜在局部共线性影响指标, 构成指标集合 X_{pre} ; ③对 X_{pre} 按照因子贡献力大小排序 Seq-q, 基于因子顺序建立因变量 PM_{2.5} 浓度与 X_{pre} 的前向逐步回归模型, 共 $s-1$ 个; ④计算各模型拟合优度 R^2 , 筛选 R^2 最高的模型作为 UFR-AQOM 原型, 该模型因子指标集合定义为 X_{in} .

(2) 面向目标约束的情景优化调控仿真 ①设定调控区 PM_{2.5} 浓度阈值标准 T 和达标网格优化目标 $Ratio_T$, 同时参考各城市形态指标值域范围现状设定城市形态指标阈值可调控区间 $V_{min \sim max}$; ②构造 Student t 显著性检验统计指标^[45], 筛选不同空间点位(u, v)显著城市形态指标回归系数, 基于系数大小对指标开展城市局地形态指标重要性排序; ③进入第 g 次城市形态指标优化调整迭代过程, 统计调控区 PM_{2.5} 浓度达到阈值标准 T 的达标网格占比 $Ratio_g$, $Ratio_g$ 大于预期目标 $Ratio_T$ 时结束迭代, 否则进入第④步; ④针对 PM_{2.5} 浓度超标空间单元, 根据回归系数正负方向、城市形态指标重要性排序和阈值可调控区间 $V_{u,v}$, 调整第 g 个城市形态指标的大小; ⑤根据式(3)输入调整后的城市形态指标计算得出第 g 次优化调整后各空间单元 PM_{2.5} 浓度值 $c_{u,v}$; $g = g + 1$, 不断循环步骤③~⑤直至实现预期优化目标 $Ratio_T$.

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 浓度城市形态依赖性统计分析

2.1.1 PM_{2.5} 浓度空间分布特征

PM_{2.5} 浓度精细模拟的拟合 $R^2 = 0.91$, RMSE = $8.31 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 基于样本的验证 $R^2 = 0.81$, RMSE = $12.39 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 基于站点的验证 $R^2 = 0.77$, RMSE = $13.67 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 模型精度可靠. 考虑到年尺度上 PM_{2.5} 浓度变化相比季节/月/小时尺度更加平稳^[46], 可近似认为不同年份城市形态指标对 PM_{2.5} 浓度空间分异的影响相似, 统计 PM_{2.5} 浓度年均值空间分布如图 4. 研究区年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最高为 $42 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 最低为 $31 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均值为 $36.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 比照文献[47]中规定的年均基准值 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 研究区大部分区域(82.52%)年均 PM_{2.5} 浓度超过国家标准, 整体空气质量压力较大且呈现出明显空间分异性, PM_{2.5} 浓度自中心向四周逐级递减趋势. 年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 达标区域($\leq 35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

仅限于西部望城和东部长沙县山地起伏区,此类区域人为活动稀疏且开发强度低,本地污染排放少,而高覆盖度植被可进一步促进细颗粒物的吸收沉降.年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值区形成“一轴两区四节点”的空间格局:其中“一轴”是指纵贯南北的湘江轴线,地势开阔,受沿江两侧高强度经济活动影响较大,年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 多为 $38\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右;“两区”分别指湘江东岸北起捞刀河、东达浏阳河南段的城主体区和湘江西岸的岳麓片区,区内人口与经济活动密集,污染排放量大,且地势低污染扩散难,年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 多超过 $39\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;“四节点”分别是指望城区高星工业园组团、开福区金霞中转联运组团和长沙县星马产业园组团、空港组团,与自身排放量高密切相关.

2.1.2 城市形态指标值空间分布特征

图5为长沙市主城区城市形态指标值的空间分

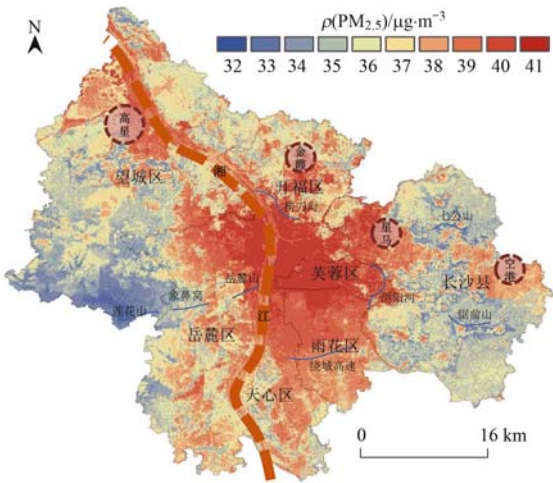


图4 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年均值空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual mean value of $\text{PM}_{2.5}$ concentration

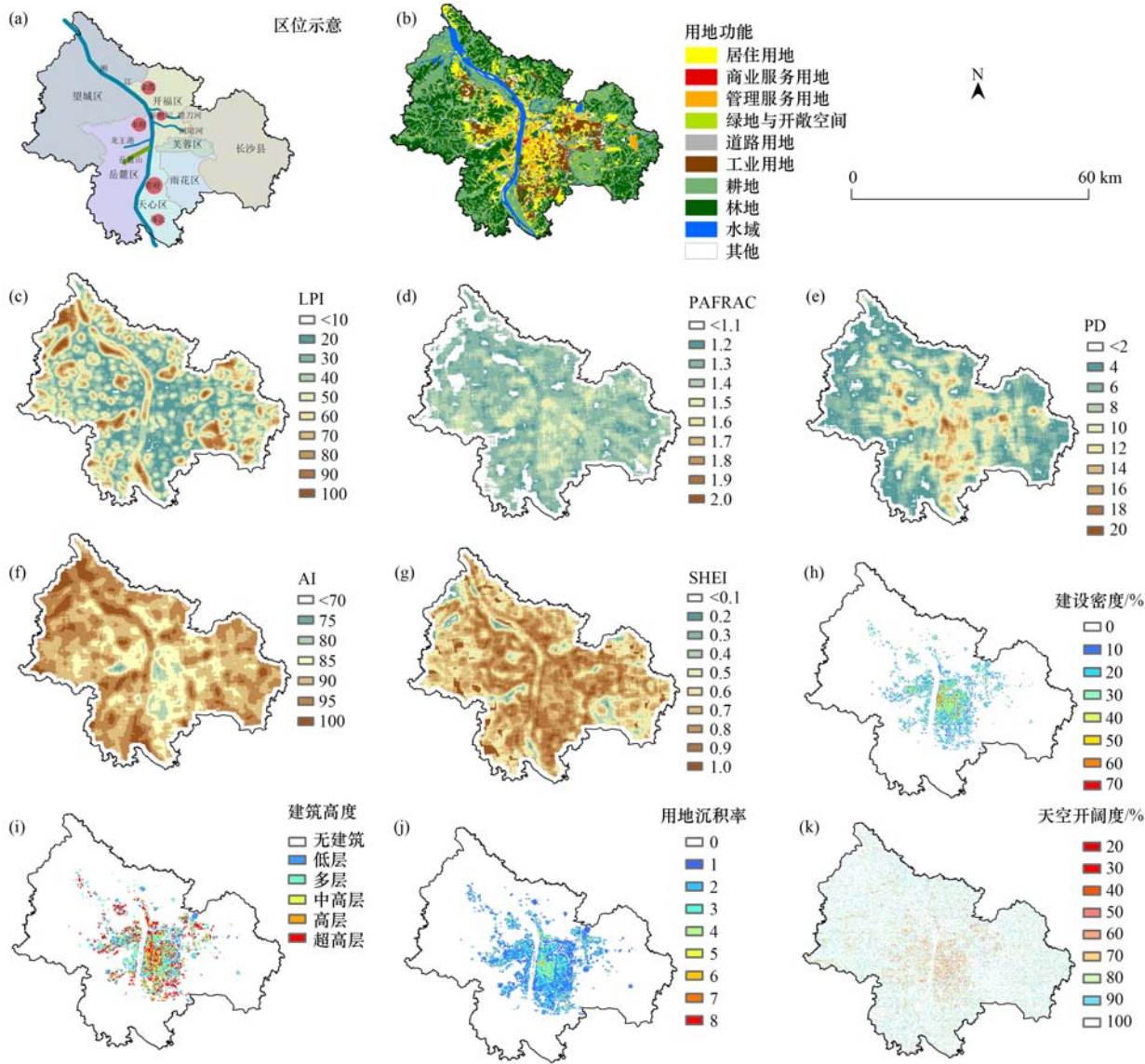


图5 城市形态指标值空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of urban form index value

布特征. 结合重点区位示意来看[图 5(a)], 二维城市用地功能分布呈现出明显的“山水洲城”特色[图 5(b)]. 耕地(32.9%)和林地(29.8%)面积占比大且集中连片环绕外围布局, 湘江、浏阳河和龙王港等水系将建设用地分割, 复合城市功能呈“组团式”、“多中心”布局其中, 如污染排放量大的工业功能主要集中布局于西北望城和东部长沙县的工业物流园区. 景观指数值分布展示出“聚集”与“均质”的功能空间配置关系[图 5(c)~5(g)]. 整体 LPI 较低但 AI 和 SHEI 较高, 即景观优势种丰度小但聚集性、均质性强, 单一城市功能斑块作用有限, 但复合城市功能斑块内部连通性强, 交互作用时易产生规模效应加强对空气污染的影响. 高聚

集、均质区主要集中在自然耕地、林地和水域等人为活动较少的区域. 从开发强度指标值分布可知[图 5(h)~5(k)], 研究区整体开放强度不高, 建筑占地面积仅占总用地面积的 3.2%, 天空开阔度平均值高达 92%, 但空间分异明显. 高开发强度区主要位于湘江东岸、岳麓山北侧和望城东南等建筑低矮且密集成片的老城区, 以及新世纪、省府和暮云等新聚集中心, 易通过阻挡气流、减缓风速和产生街道风“峡谷效应”等方式改变局地微气候进而影响局地空气污染扩散.

2.1.3 $PM_{2.5}$ 浓度城市形态指标空间依赖性

关联统计 $PM_{2.5}$ 浓度和城市形态指标分布特征发现(图 6, 已剔除样本数小于 100 的非典型类

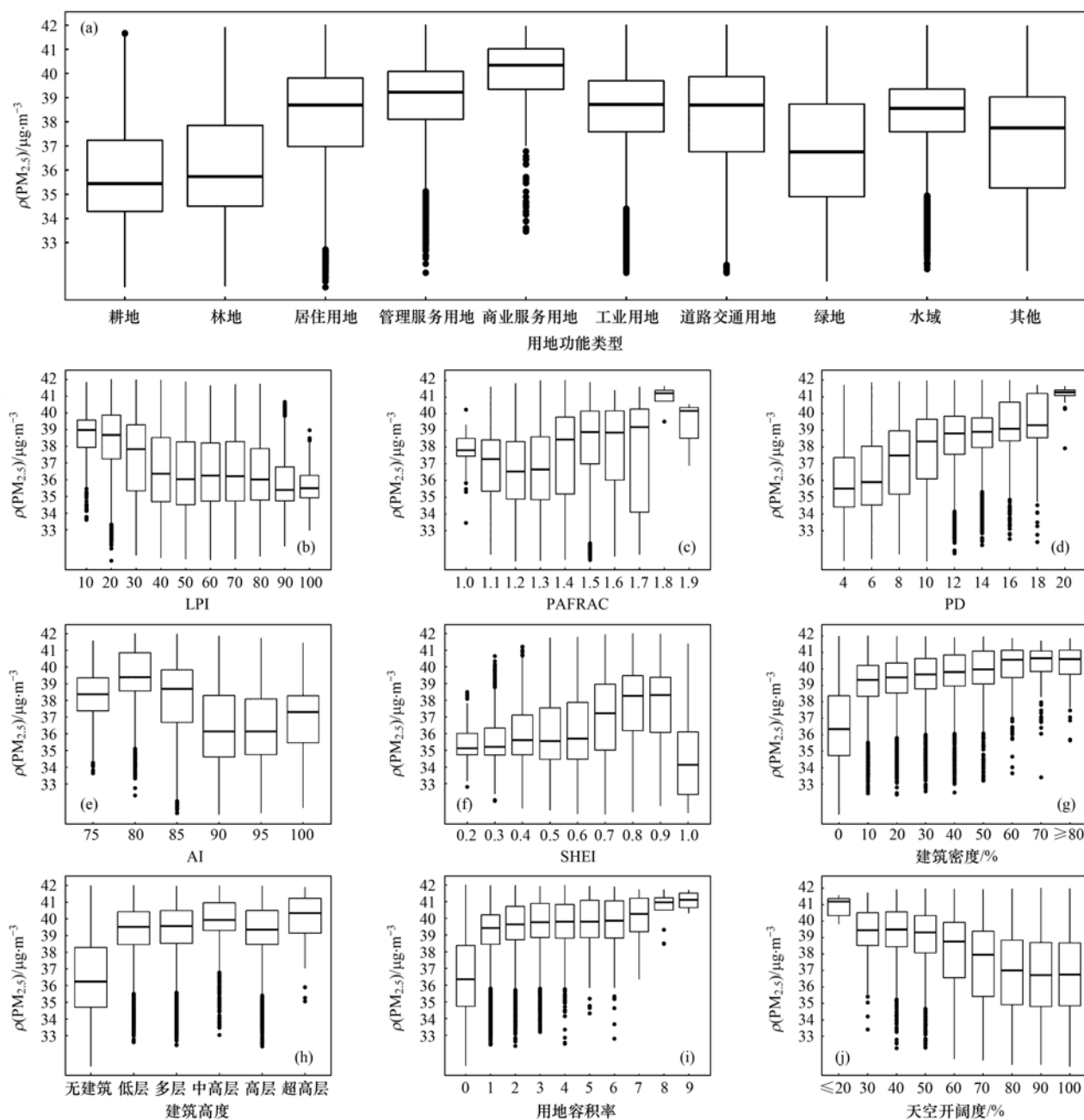


图 6 城市形态指标影响下的 $PM_{2.5}$ 浓度差异

Fig. 6 Difference in $PM_{2.5}$ concentration under the influence of various urban form indexes

别), $PM_{2.5}$ 浓度空间变化对所有本研究选取城市形态指标均具有依赖性,符合“地理场景越相似,地理特征越相近”的地理学第三定律. 具体而言, $\rho(PM_{2.5})$ 达标网格 ($\leq 35 \mu g \cdot m^{-3}$) 主要位于耕地或林地功能主导且低破碎度、高天空开阔度区域. $PM_{2.5}$ 浓度随着主导用地功能类别、PD 和天空开阔度等级变化差异明显. 从用地功能来看,商业服务用地 $\rho(PM_{2.5})$ 最高 ($40.16 \mu g \cdot m^{-3}$),道路交通用地次之 ($39.04 \mu g \cdot m^{-3}$),绿地、耕地和林地整体空气质量优,与商业经济活动密集且开发强度大、高覆盖率植被有利于吸附颗粒物^[13] 等原因有关. 从景观配置关系来看, $PM_{2.5}$ 浓度在高 PD/SHEI 和低 LPI 网格单元更高,且随着 PAFRAC 升高先降后升 (PAFRAC 为 1.2 左右达到最低),随着 AI 升高先升后降 (AI 为 80 左右达到最高),林地和水体等汇景观的影响主导了该依赖特性的形成^[48]. 从开发强度来看, $PM_{2.5}$ 浓度在高建筑密度/建筑高度/用地容积率和低天空开阔度网格单元更高,但是 $PM_{2.5}$ 浓度随各指标等级变化差异程度不同,如建筑密度大于 70% 时 $PM_{2.5}$ 浓度不再发生明显改变和天空开阔度在 50%~80% 之间 $PM_{2.5}$ 浓度下降趋势最为明显等. 各网格单元 $PM_{2.5}$ 浓度差异与多城市形态指标复杂交互作用机制密切相关.

表 2 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异作用单因子贡献力¹⁾

Table 2 Single factor contribution on spatial difference in $PM_{2.5}$ concentration							
用地功能占比				景观指数		开发强度	
因子	贡献力	因子	贡献力	因子	贡献力	因子	贡献力
耕地占比	0.14 **	工业占比	0.09 **	LPI	0.10 **	建筑密度	0.19 **
林地占比	0.08 **	道路交通占比	0.06 **	PAFRAC	0.04 **	建筑高度	0.19 **
居住占比	0.10 **	绿地占比	0.00 **	PD	0.19 **	用地容积率	0.22 **
管理服务占比	0.04 **	水域占比	0.04 **	AI	0.16 **	天空开阔度	0.03 **
商业服务占比	0.02 **	其他占比	0.01 **	SHEI	0.10 **		

1) ** 表示在 0.01 级别 (双尾), 相关性显著

2.2.2 双因子复合贡献力解析

$PM_{2.5}$ 浓度空间分异的 城市形态指标双因子贡献力如图 7 所示,任意两个指标复合贡献力均大于各指标单独作用. 交互作用类型显示非线性增强与双因子加强比例达到 49:122,复合指标与 $PM_{2.5}$ 浓度在空间趋势变化上同步性强,交互作用可增强城市形态指标对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的解释力^[40]. 三大类因子间强交互作用主要存在于城市用地功能因子与其他因子间,用地功能与景观指数/开发强度交互作用中非线性/双因子增强比例分别达到 14:36/11:29. 其中驱动 $PM_{2.5}$ 浓度空间变化的最大复合贡献力来自耕地占比 $\cap$ 用地容积率 ($q=0.31$),考虑城市三维开发强度特征与城市用地功能的交互影响

2.2 $PM_{2.5}$ 浓度分异的 城市形态指标贡献力解析

2.2.1 单因子贡献力解析

城市形态指标对 $PM_{2.5}$ 浓度的单因子贡献力结果如表 2 所示,各项指标均通过了 0.01 级别显著性检验. 单因子贡献力整体呈现出三维开发强度 ($q:0.03 \sim 0.22$) > 二维景观格局 ($q:0.04 \sim 0.19$) > 二维用地功能 ($q:0 \sim 0.14$) 的趋势. 三维开发强度作用强烈,与研究区局地传输强^[49] 且局地传输易受扩散条件影响有关. 开发强度指标中用地容积率 ($q=0.22$) 最能解释 $PM_{2.5}$ 浓度的空间分异性,天空开阔度的贡献力相对较小. 二维城市景观格局聚集程度是影响 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异的主要空间配置指数,表现为聚集类指数 PD/AI 对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的作用 ($q:0.16 \sim 0.19$) 比其他景观指数作用 ($q \leq 0.1$) 更强烈. 二维城市用地功能指标贡献力排序则明显受到各类城市功能规模的影响. 贡献力最大的指标为耕地占比 ($q=0.14$),与其可有效促进 $PM_{2.5}$ 干湿沉降,且常连片布局易产生规模效应有关. 同样对细颗粒物具有吸附作用的绿地占比贡献力却表现较低,主要归因于研究区内极其有限的绿地面积,与已有研究中论述的不同植被覆盖等级会影响 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异相符^[50]. 另外,居住占比、工业占比等与污染排放密切相关的城市形态指标对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的作用也较大,与之前的研究结果一致^[51].

对解释空气污染空间分异具有重要意义,与文献 [52] 中提到的产业功能与地形交互作用主导影响 $PM_{2.5}$ 浓度分异的结论类似. 从各因子内部交互作用来看,用地功能指标间交互作用最为强烈,非线性/双因子增强比例达到 21:24,非线性增强主要存在于林地占比 $\cap$ 耕地占比、工业占比 $\cap$ 商业服务占比、以及绿地/水域/其他占比与其他指标交互过程中. 景观指数指标间交互作用程度一般,非线性/双因子增强比例达到 3:7,非线性增强主要存在于 PAFRAC 与其他指标的交互作用过程中.

2.3 城市 $PM_{2.5}$ 浓度优化调控模拟分析

2.3.1 模型优选与情景调控参数设定

基于 UFR-AQOM 逐步回归迭代建模算法,依据

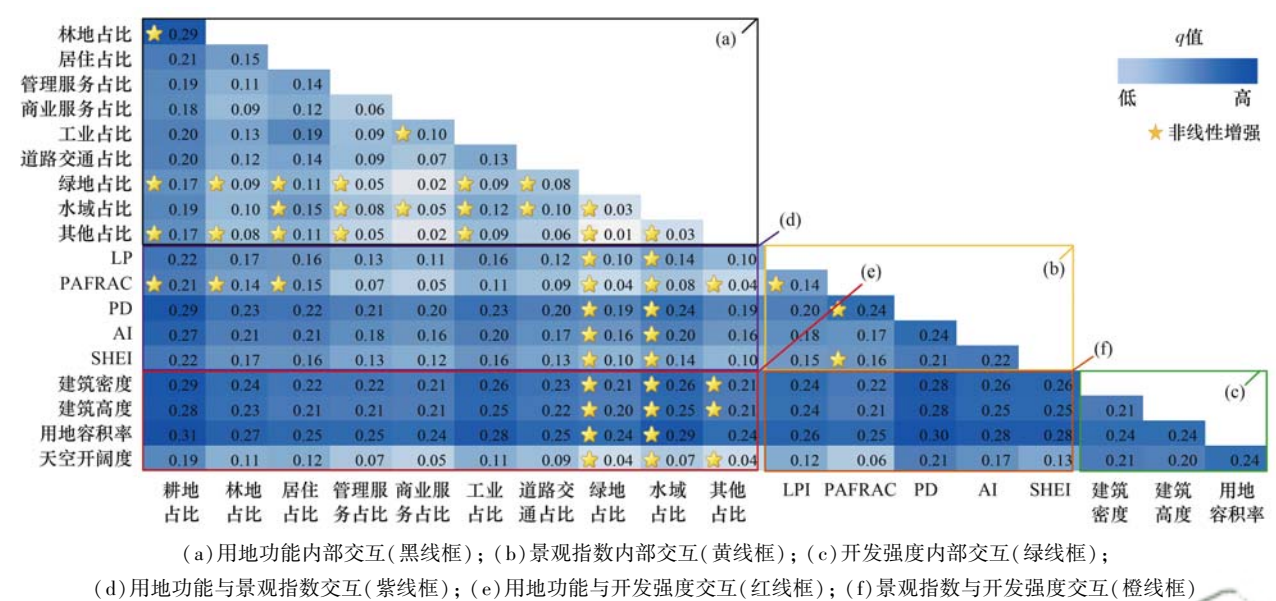


图 7 PM_{2.5} 浓度空间分异作用双因子复合贡献力

Fig. 7 Compound factor contribution on spatial difference in PM_{2.5} concentration

PM_{2.5} 浓度分异的城市形态指标贡献力大小,依次引入用地容积率、用地容积率∩绿地占比、用地容积率∩水域占比、PD、PD∩PAFRAC、建筑密度、建筑密度∩其他占比、建筑高度、耕地占比、居住占比、LPI、SHEI、工业占比、工业∩商业服务占比、道路交通占比、管理服务占比和天空开阔度指标,开展逐步向前回归建模,基于 R^2 等统计指标检验 UFR-

AQOM 模型优化调控 PM_{2.5} 浓度的有效性. 结果表明 (图 8), 包含了用地容积率等 12 个指标的模型 M15 效果最优,拟合 $R^2 = 0.65$, $RMSE = 1.40 \mu g \cdot m^{-3}$, 所筛选的城市形态指标可较好模拟解释城市 PM_{2.5} 浓度空间分异. 该模型中用地容积率、PD 等以单因子形式产生作用,绿地占比、水域占比和其他占比则主要以与其他指标双因子交互形式发挥作用.

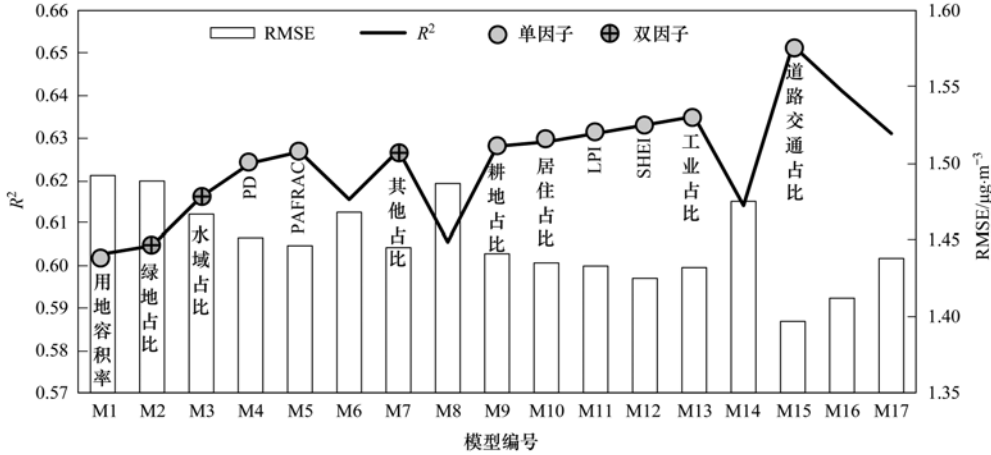


图 8 UFR-AQOM 模型逐步向前回归建模结果

Fig. 8 Stepwise forward regression results of UFR-AQOM

UFR-AQOM 情景优化调控仿真算法需对阈值标准 T 、优化比例目标 $Ratio_T$ 、城市形态指标阈值可调控区间 V 这 3 项指标和情景设定标准予以明确. 本研究中 T 取值为我国 $\rho(PM_{2.5})$ 年均限值 $35 \mu g \cdot m^{-3}$ [47], $Ratio_T$ 取值为该标准下我国达标城市数目占比 46.6% [53]. 不同城市形态指标阈值 V 的设定以实际最小值 V_{min} 为下限,以最大值 V_{max} 为上限,即 $LPI \in [0, 100]$, $PAFRAC \in [0, 2]$, $PD \in [0, 21]$, 用地容积率 $\in [0, 11]$, 其他指标 $\in [0, 1]$, 具

体规划实践中宜根据上位规划调整城市形态指标阈值. 为证明 UFR-AQOM 空气污染优化调控的有效性,首先计算局地城市形态指标的重要性结果并展开排序,对 PM_{2.5} 浓度尚未达标(高于阈值标准 T)区域,逐网格调控首要城市形态指标,开启第一轮空气污染模拟优化(情景一). 对仍未达标区域,进一步调控次要城市形态指标,实施第二轮空气污染再次优化(情景二). 重复上述优化调控步骤,直至空气污染优化比例达到 $Ratio_T$ 为止.

2.3.2 模拟调控结果分析

长沙市主城区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度三轮情景优化调控结果表明(图9),调整城市形态指标可以优化空气质量. 经过本研究设置的第一、第二、第三轮情景优化调控,长沙市主城区整体 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达标面积占比,可逐步从现状 18.48% 提升至 33.25%、40.65% 和 47.31%,达到预设调控目标. 污染超标严重的“一轴两区四节点”重点地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值也将显著下降.

就区县而言,雨花区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度模拟调控效果最好,新增达标面积占比达到该区总面积的 43.92%,其次为望城区(35.15%)和长沙县(34.4%),芙蓉区、天心区、开福区和岳麓区新增达标面积占比较小,均在 30% 以下. 究其原因,调控效果很大程度受到现状 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响,现状浓度基数较小的区域调控效果更加明显. 追溯新增达标网格的优化指标发现,各行政区侧重优化的城市形态指标存在差异,其中雨花区为 PAFRAC、SHEI 和工业占比;芙蓉区为

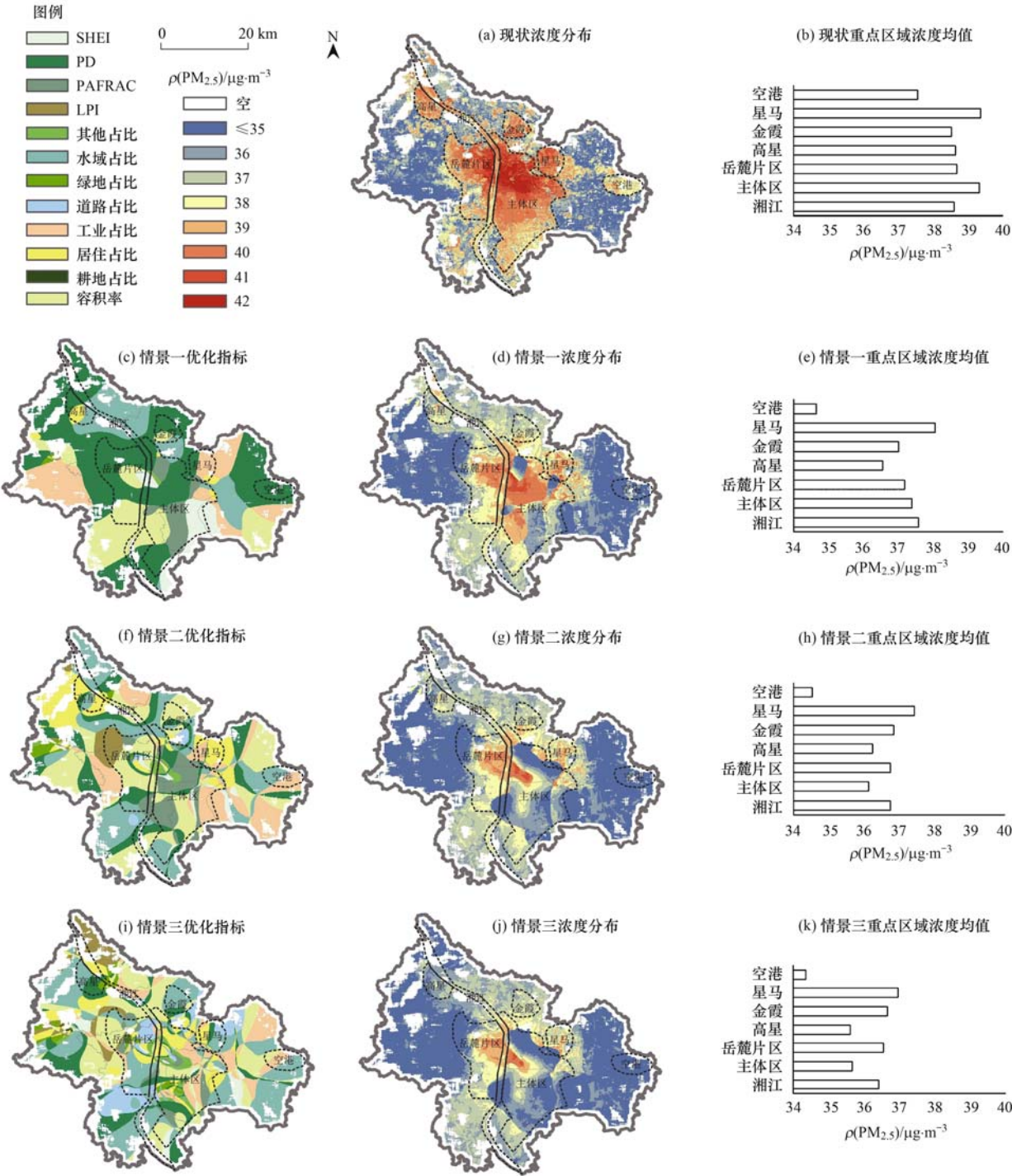


图9 研究区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度多情景优化调控结果

Fig. 9 Multi-scenario optimization results of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in the study area

PAFRAC、工业占比和 PD;望城区为 PD、水域占比和容积率;长沙县为工业占比、水域占比和 PD;天心区为 PAFRAC、容积率和 PD;开福区为 PAFRAC、PD 和居住占比;岳麓区为 PD、容积率和工业占比。就区内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平较高的“一轴两区四节点”而言,空港组团调控效果最好, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值降低程度大,经过第一轮调整, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值即可从现状 $37.56 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降低至 $34.65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,主要调整指标为 PD,与空港现状斑块密度小、调控难度小有关;其次为主体区, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度调控模拟难度相对较大,经过三轮调整 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值可从现状 $39.32 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降低至 $35.67 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,主要调整指标为 PAFRAC、容积率,与主体区景观形状复杂、开发强度较大密切相关。金霞组团调控效果相对较差, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值经三轮调整仅可降低 $1.85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,说明影响该组团 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布的城市形态影响因素复杂,仅调控 PD 和水域占比等重要指标调控效果有限。

2.3.3 调控对策分析

对比 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度调控前后长沙市主城区城市形态指标值域分布发现,各因子指标调整方向和调整幅度存在差异。二维城市用地因子中的绿地占比、耕地占比和其他占比指标上调,其余因子指标均下调。其中工业占比(均值从 0.107 调降至 0.08)、水域占比(均值从 0.054 调降至 0.024)、容积率(均值从 0.265 调降至 0.136)和 PD(均值从 6.946 调降至 4.004)等指标调整幅度较大,耕地占比、道路交通占比和 LPI 等指标调整幅度较小。工业占比调整后,工业占比为 100% 的网格明显减少,工业占比居中的网格有所增加,表明工业过度集聚会促使 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增高,应加强工业用地与绿地、水域等其他用地的混合利用模式。水域占比调整后,有水域占比的网格数均有所减少,容积率调整则主要出现在低容积率向无建筑转变网格中。PD 是调整幅度最大的指标,调整后高斑块密度网格数减少,斑块密度为 5 左右网格数减少量最大。

尽管本研究中城市形态指标均在阈值范围内调整,理论可行。但实际调控过程中各城市形态指标调控存在难易程度差异,如调增绿地占比容易,调降容积率则相对较难。故面向 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达标约束要求,考虑到城市形态指标对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度作用和实际调控难度的空间非平稳性,建议研究区采取“整体全面管控+分区重点优化+局部因地制宜”调整策略。首先针对 PAFRAC 和 PD 等在整个研究区存在重要影响的指标实行全面管控。然后对仅在部分区域作用明显的指标实行重点优化,如雨花区、芙蓉区、

长沙县和岳麓区宜加强优化工业占比,望城区、天心区、岳麓区应控制容积率,望城区和长沙县需加强优化水域占比。而对“一轴两区四节点”等高值区还需进一步结合实际调控难度确定优先调控指标。

3 结论

(1)长沙市主城区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值区呈现“一轴两区四节点”的空间格局,其空间分异特征对城市形态具有高度依赖性,依赖程度整体表现为:开发强度 > 景观格局 > 用地功能,且各因子指标对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分异的影响存在复杂非线性交互作用。

(2)基于先验城市形态指标的空气品质优化调控模型(UFR-AQOM),对城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分异解释程度可达 65%,可有效应用于城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的优化调控模拟,对面向空气品质优化的国土空间规划多情景方案比选具有重要意义。

(3)对于城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度优化调控,长沙市主城区可以采取“整体全面管控+分区重点优化+局部因地制宜”调整策略,重点关注“一轴两区四节点”的 PD、PAFRAC、用地容积率等指标优化。

参考文献:

- [1] Lynch K. A theory of good city form[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1981.
- [2] Feng H H, Zou B. Satellite-based separation of climatic and surface influences on global aerosol change[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(14): 5443-5456.
- [3] 《北京城市规划建设与气象条件及大气污染关系研究》课题组. 城市规划与大气环境[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- [4] 王桂林, 张炜. 中国城市扩张及空间特征变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3447-3456.
Wang G L, Zhang W. Effects of urban expansion and changes in urban characteristics on $\text{PM}_{2.5}$ pollution in China[J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3447-3456.
- [5] Stone R. Air pollution. Counting the cost of London's killer smog[J]. Science, 2002, 298(5601): 2106-2107.
- [6] UN-HABITAT, World Health Organization. Integrating health in urban and territorial planning: a sourcebook[R]. Geneva: UN-HABITAT, World Health Organization, 2020.
- [7] Tian Y, Yao X A, Mu L, et al. Integrating meteorological factors for better understanding of the urban form-air quality relationship[J]. Landscape Ecology, 2020, 35(10): 2357-2373.
- [8] Stone B Jr. Urban sprawl and air quality in large US cities[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 86(4): 688-698.
- [9] Li F, Zhou T. Effects of urban form on air quality in China: An analysis based on the spatial autoregressive model[J]. Cities, 2019, 89: 130-140.
- [10] Zou B, Xu S, Sternberg T, et al. Effect of land use and cover change on air quality in urban sprawl[J]. Sustainability, 2016, 8(7), doi: 10.3390/su8070677.
- [11] Kang J E, Yoon D K, Bae H J. Evaluating the effect of compact urban form on air quality in Korea[J]. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 2019, 46(1): 179-200.
- [12] Yan J W, Tao F, Zhang S Q, et al. Spatiotemporal distribution

- characteristics and driving forces of PM_{2.5} in three urban agglomerations of the Yangtze River Economic Belt [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, **18**(5), doi: 10.3390/ijerph18052222.
- [13] 岳峰, 戴菲, 郭晓华. 基于遥感反演的武汉市空气污染物与植被覆盖度相关性研究[J]. *风景园林*, 2019, **26**(1): 76-81.
Yue F, Dai F, Guo X H. Study on correlation between air pollutants and vegetation coverage in Wuhan based on remote sensing inversion[J]. *Landscape Architecture*, 2019, **26**(1): 76-81.
- [14] Liu H M, Fang C L, Zhang X L, *et al.* The effect of natural and anthropogenic factors on haze pollution in Chinese cities: A spatial econometrics approach [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **165**: 323-333.
- [15] Liang Z, Wei F L, Wang Y Y, *et al.* The context-dependent effect of urban form on air pollution: a panel data analysis[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(11), doi: 10.3390/rs12111793.
- [16] Shi K F, Wang H, Yang Q Y, *et al.* Exploring the relationships between urban forms and fine particulate (PM_{2.5}) concentration in China: A multi-perspective study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **231**: 990-1004.
- [17] McCarty J, Kaza N. Urban form and air quality in the United States [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, **139**: 168-179.
- [18] Lee C. Impacts of multi-scale urban form on PM_{2.5} concentrations using continuous surface estimates with high-resolution in US metropolitan areas [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2020, **204**, doi: 10.1016/j.landurbplan.2020.103935.
- [19] Tao Y, Zhang Z, Ou W X, *et al.* How does urban form influence PM_{2.5} concentrations: Insights from 350 different sized cities in the rapidly urbanizing Yangtze River Delta region of China, 1998-2015 [J]. *Cities*, 2020, **98**, doi: 10.1016/j.cities.2019.102581.
- [20] Wang M M, Zhang B B. Examining the impact of polycentric urban form on air pollution: evidence from China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(34): 43359-43371.
- [21] 方怡青, 曲凌雁. 城市空间形态与空气质量相关性研究综述 [J]. *现代城市研究*, 2018, (8): 88-94.
Fang Y Q, Qu L Y. Study on the correlation between urban form and air quality [J]. *Modern Urban Research*, 2018, (8): 88-94.
- [22] 黄小刚, 赵景波, 辛未冬. 基于网格的长三角 PM_{2.5} 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_{2.5} in the Yangtze River Delta based on grids [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3107-3117.
- [23] Yang J Y, Shi B X, Shi Y, *et al.* Air pollution dispersal in high density urban areas: Research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, **54**, doi: 10.1016/j.scs.2019.101941.
- [24] 汪光焘, 王晓云, 苗世光, 等. 现代城市规划理论和方法的一次实践——佛山城镇规划的大气环境影响模拟分析 [J]. *城市规划学刊*, 2005, (6): 18-22.
Wang G T, Wang X Y, Miao S G, *et al.* A practice on the modern urban planning concept and method: Modeling analysis of the atmospheric environment impacts in FOSHAN town planning [J]. *Urban Planning Forum*, 2005, (6): 18-22.
- [25] 余庄, 张辉. 城市规划 CFD 模拟设计的数字化研究 [J]. *城市规划*, 2007, **31**(6): 52-55.
Yu Z, Zhang H. Digital model of CFD simulation design in urban planning [J]. *City Planning Review*, 2007, **31**(6): 52-55.
- [26] He B J, Ding L, Prasad D. Enhancing urban ventilation performance through the development of precinct ventilation zones: a case study based on the Greater Sydney, Australia [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, **47**, doi: 10.1016/j.scs.2019.101472.
- [27] Houet T, Pigeon G. Mapping urban climate zones and quantifying climate behaviors - an application on Toulouse urban area (France) [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(8-9): 2180-2192.
- [28] Badach J, Voordeckers D, Nyka L, *et al.* A framework for air quality management zones - useful GIS-based tool for urban planning: case studies in Antwerp and Gdańsk [J]. *Building and Environment*, 2020, **174**, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.106743.
- [29] Chokhachian A, Perini K, Giulini S, *et al.* Urban performance and density: Generative study on interdependencies of urban form and environmental measures [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, **53**, doi: 10.1016/j.scs.2019.101952.
- [30] 胡晨霞, 邹滨, 李沈鑫, 等. 城市微环境 PM_{2.5} 浓度空间分异特征分析 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(3): 910-916.
Hu C X, Zou B, Li S X, *et al.* Spatial heterogeneity analysis of PM_{2.5} concentrations in intra-urban microenvironments [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(3): 910-916.
- [31] Ma Z W, Dey S, Christopher S, *et al.* A review of statistical methods used for developing large-scale and long-term PM_{2.5} models from satellite data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, **269**, doi: 10.1016/j.rse.2021.112827.
- [32] 时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 等. 近 20 年来中国 PM_{2.5} 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_{2.5} pollution evolution in China in recent 20 years [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 1-13.
- [33] 韩帅, 师春香, 姜志伟, 等. CMA 高分辨率陆面数据同化系统 (HRCCLAS_V1.0) 研发及进展 [J]. *气象科技进展*, 2018, **8**(1): 102-108, 116.
Han S, Shi C X, Jiang Z W, *et al.* Development and progress of high resolution CMA land surface data assimilation system [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2018, **8**(1): 102-108, 116.
- [34] Breiman L. Random forests [J]. *Machine Learning*, 2001, **45**(1): 5-32.
- [35] 中华人民共和国自然资源部. 自然资源部办公厅关于印发《国土空间调查、规划、用途管制用地用海分类指南(试行)》的通知 [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-11/22/content_5563311.htm, 2020-11-17.
- [36] Feng H H, Zou B, Tang Y M. Scale- and region-dependence in landscape-PM_{2.5} correlation: Implications for urban planning [J]. *Remote Sensing*, 2017, **9**(9), doi: 10.3390/rs9090918.
- [37] 刘勇洪, 徐永明, 张方敏, 等. 城市地表通风潜力研究技术与应用——以北京和广州中心城为例 [J]. *规划师*, 2019, **35**(10): 32-40.
- [38] Liu Y H, Xu Y M, Zhang F M, *et al.* Research and application of urban surface ventilation potential: cases of Beijing and Guangzhou [J]. *Planners*, 2019, **35**(10): 32-40.
- [38] 夏晓圣, 陈菁菁, 王佳佳, 等. 基于随机森林模型的 PM_{2.5} 浓度影响因素分析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2057-2065.

- Xia X S, Chen J J, Wang J J, *et al.* PM_{2.5} concentration influencing factors in China based on the random forest model [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2057-2065.
- [39] Li T W, Shen H F, Zeng C, *et al.* A validation approach considering the uneven distribution of ground stations for satellite-based PM_{2.5} estimation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, **13**: 1312-1321.
- [40] 葛岂序, 刘岩, 杨洪, 等. 2015 ~ 2019 年河南省 PM_{2.5} 时空特征与驱动因素分析 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 1697-1705.
- Ge Q X, Liu Y, Yang H, *et al.* Analysis on spatial-temporal characteristics and driving factors of PM_{2.5} in Henan province from 2015 to 2019 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 1697-1705.
- [41] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. *地理学报*, 2017, **72**(1): 116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1): 116-134.
- [42] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, *et al.* An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, **57**(5): 593-610.
- [43] Fotheringham A S, Brunson C, Charlton M. Geographically weighted regression: The analysis of spatially varying relationships [M]. Chichester, UK: Wiley, 2002.
- [44] Fotheringham A S, Yue H, Li Z Q. Examining the influences of air quality in China's cities using multi-scale geographically weighted regression [J]. *Transactions in GIS*, 2019, **23**(6): 1444-1464.
- [45] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M. Some notes on parametric significance tests for geographically weighted regression [J]. *Journal of Regional Science*, 1999, **39**(3): 497-524.
- [46] Ma Z W, Hu X F, Sayer A M, *et al.* Satellite-based spatiotemporal trends in PM_{2.5} concentrations: China, 2004-2013 [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2016, **124**(2): 184-192.
- [47] GB 3095-2012, 环境空气质量标准 [S].
- [48] 谢舞丹, 吴健生. 土地利用与景观格局对 PM_{2.5} 浓度的影响——以深圳市为例 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, **53**(1): 160-170.
- Xie W D, Wu J S. Effects of land use and urban landscape pattern on PM_{2.5} concentration: A Shenzhen case study [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2017, **53**(1): 160-170.
- [49] 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.
- [50] 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 等. 1998 ~ 2016 中国八大经济区植被覆盖对 PM_{2.5} 浓度时空分布的影响 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5100-5108.
- Yang Y L, Yang K, Luo Y, *et al.* Effect of vegetation coverage on the temporal and spatial distribution of PM_{2.5} concentration in China's eight major economic regions from 1998 to 2016 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5100-5108.
- [51] Liu Y P, Wu J G, Yu D Y. Disentangling the complex effects of socioeconomic, climatic, and urban form factors on air pollution: a case study of China [J]. *Sustainability*, 2018, **10**(3), doi: 10.3390/su10030776.
- [52] 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 等. 长江经济带 PM_{2.5} 空间异质性和驱动因素的地理探测 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1290-1200.
- Wang L L, Liu X J, Li D, *et al.* Geographical detection of spatial heterogeneity and drivers of PM_{2.5} in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1290-1200.
- [53] 中华人民共和国生态环境部. 2019 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202006/P020200602509464172096.pdf>, 2020-05-18.

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i> (4413)
Simulation of PM _{2.5} Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i> (4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengdu Under the Background of Emission Reduction	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM ₁ During Autumn and Winter in Qingdao	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i> (4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM _{2.5} -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i> (4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i> (4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i> (4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i> (4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i> (4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i> (4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i> (4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i> (4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i> (4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i> (4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i> (4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i> (4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i> (4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i> (4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i> (4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i> (4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i> (4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i> (4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i> (4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i> (4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i> (4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risk in Soils of Southern Hilly Areas	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i> (4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i> (4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i> (4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass (<i>Pennisetum purpureum</i> Schum)	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i> (4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i> (4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i> (4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i> (4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i> (4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb ²⁺ and Cd ²⁺ Adsorption by Soil Around a Dressing Plant	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i> (4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i> (4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4911)