薛维,肖景轩,朱宇赫,等.基于近地面高密度监测传感网的城市尺度颗粒物扩散分布特征:以襄阳市中心城区为例[J].华中农业大学学报,2026,45(1):37-51.DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.01.004

基于近地面高密度监测传感网的城市尺度颗粒物扩散分布特征:以襄阳市中心城区为例

薛维[1,2],肖景轩[1],朱宇赫[1],马轩[3],范域立[4],孔红[5],
吴中华[5],孙志豪[6],许亘昱[7],詹庆明[8]

1.江汉大学精细爆破全国重点实验室/数字建造与爆破工程学院,武汉 430056;
2.东南大学建筑学院,南京 210096;3.长安大学建筑学院,西安 710064;
4.中国地质大学(武汉)公共管理学院/长江流域国土空间治理与绿色发展研究院,武汉 430074;
5.湖北省生态环境厅襄阳生态环境监测中心,襄阳 441021;6.武汉市自然资源保护利用中心,武汉 430014;
7.云南大学建筑与规划学院,昆明 650500;8.武汉大学城市设计学院/数字城市研究中心,武汉 430072

摘要 为解决城市尺度颗粒物扩散特征难以识别、规划可实施性欠缺的问题,在襄阳市中心城区构建146个站点的近地面高密度监测传感网,以获取高空间分辨率的$PM_{2.5}$、PM_{10}、风速和风向数据。在此基础上,提出一种兼顾机理解释性与计算效率的污染识别方法:在高斯扩散机理约束下对工业源、扬尘源及蓝绿空间等影响因素进行多尺度连续表征;提出双精度嵌套策略筛选关键因素;利用地理加权回归解析各因素对颗粒物的空间异质性影响。结果显示:工业源在热电厂和产业园区周边形成1.2~4 km片区集聚,并沿"园区-物流通道"呈走廊增强;工地与货运物流在主要交通轴线形成条带状高影响区,且物流活动对PM_{10}的影响显著高于$PM_{2.5}$;蓝色空间在低开发强度区域与主风道耦合处形成约2 km的污染缓解带,高强度开发则削弱其效应;绿色空间具有消减作用,对PM_{10}更显著,但施工扰动会抵消其短期效益。据此,提出面向规划实践的转译路径:构建"分区-分段-分点"的综合治理优先序;沿物流通道、产业园边界和高暴露区布置带状、片带复合或楔形补绿;在关键节点嵌入口袋式复层绿化;在主风道保持低密度布局与通风连续性。结果表明,相比传统空间统计方法,该识别方法在解释性、精度与算力间实现更优平衡,可识别同源异质与异源叠加的关键区段。

关键词 $PM_{2.5}$; PM_{10}; 扩散分布; 地理加权回归(GWR); 绿地

中图分类号 X513 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)01-0037-15

截至2024年,中国地级及以上城市的$PM_{2.5}$年平均质量浓度已经降至29.3 μg/m^3,这表明我国在颗粒物污染治理方面取得显著成效[1]。然而,这一数值仍然远超出世界卫生组织最新规定的$PM_{2.5}$年均质量浓度指导值(5 μg/m^3)[2]。在此背景下,2025年《政府工作报告》中明确要求"持续推进'蓝天保卫战'"[3]。与此同时,生态环境部指出,我国的颗粒物污染治理已经步入攻坚期,减排空间逐步收窄,大气环境边际递减效应日趋凸显[4]。可以预见,进一步治理颗粒物污染将面临更大挑战,治理思路势必从单一的降低排放量走向兼顾污染的源头控制与过程削减。研究已证实,绿地能够有效降低颗粒物浓度[5-8]。不过,要充分发挥绿地的滞尘效应,前提是明确颗粒物的扩散分布特征[9]。

颗粒物扩散分布特征具有显著的尺度效应,但当前在城市尺度层面的研究相对匮乏。考察颗粒物扩散分布的常用方法有遥感反演、数值模拟以及统计回归。通过遥感反演,能够识别区域及更大尺度(城市群、全球范围等)的污染区域。然而,由于常用于反演的Terra卫星MODIS传感器空间分辨率不超过500 m,所以该方法难以精细到城市尺度[10-12]。受物理机制和计算成本制约,数值模拟应用尺度为区

收稿日期:2025-08-29
基金项目:湖北省教育厅科学研究计划指导项目(B2023254)
薛维,E-mail:xuewei@jhun.edu.cn
通信作者:范域立,E-mail:whu_fanyuli@foxmail.com

域及以上尺度或是局地及以下尺度[13-14]。在区域及以上尺度,区域化学传输模型和轨迹扩散模型为主要工具,但即使通过嵌套将网格精细化到百米级,上述模型也无法准确识别城市尺度污染的冷点-热点结构。计算流体力学仿真被广泛运用于解析局地及以下尺度(街谷、住区等)的污染分布特征和传输路径。不过,高昂的计算成本使得仿真模拟难以拓展至城市尺度[15-16]。

统计回归是构建颗粒物浓度与其影响因素的方程,能够用于各种尺度。最初,以多重线性回归、土地利用回归为主,但是这类全局模型无法充分考虑污染的空间异质性[17-19]。随后,由于能够有效刻画颗粒物驱动因素的空间非平稳性,避免全局模型对污染热点和冷点结构的平均化处理,以地理加权回归(geographically weighted regression,GWR)为代表的空间统计模型逐步流行,并且大量研究证实,GWR是识别污染分布的高贡献区与关键边界的可靠工具[20-23]。然而,一方面,表征污染关键影响因素的指标(如污染源数量、用地面积等)大多不具备空间分布的连续性,这容易产生可变空间单元问题并造成回归系数不稳;另一方面,鲜少有研究考察同一类因素之间个体差异对颗粒物扩散和浓度分布的影响,造成难以精准挖掘污染的扩散范围。

综上所述,当前颗粒物扩散分布研究相对缺乏对城市尺度的深入探索,其瓶颈在于,城市复杂近地面环境下多种因素对污染扩散的显著影响,同时技术门槛与计算成本制约了污染扩散范围的精准挖掘,削弱了规划的可实施性。因此,针对城市尺度颗粒物扩散分布特征的关键问题,本研究选择冬季污染严重且扩散条件不利的襄阳市中心城区为研究区域,构建城市近地面高密度监测传感网,以提供高空间分辨率颗粒物和气象数据;建立"扩散机理约束的变量(污染影响因素)多尺度表征-算力控制的变量和尺度筛选-地理加权的空间归因解析"的识别方法;基于识别结果,提出面向规划实践的转译路径,以期为布局绿地提供明确指导。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究选择襄阳市中心城区为研究区域。选择理由一是冬季中、重度持续型污染时有发生;二是拥有大量污染密集型产业(纺织业、化学制品制造业等);三是岗丘地形不利颗粒物扩散[24]。研究区域属亚热带季风气候,四季分明;其空间格局由水系和高速公路共同塑造,即汉江与唐白河将襄阳市中心城区分割为襄城区、樊城区、襄州区、东津新区和鱼梁洲5个区域,而福银高速、襄阳绕城高速及二广高速则共同构成中心城区建成区的边界(图1)。

1.2 研究数据及方法

本研究针对城市尺度颗粒物扩散分布特征识别难、规划可实施性欠缺的问题,一方面,在城市近地面空间密集构建兼顾污染源及其作用区域的颗粒物和关键气象要素监测传感网(146个站点),为建立城市尺度污染扩散模型提供数据基础;另一方面,在多因素影响的情境下,建立能够兼顾解释性与计算需求的污染识别方法,即扩散机理约束的变量多尺度表征-算力控制的变量和尺度筛选-地理加权的空间归因解析。该方法流程如图2所示。

1)高密度监测传感网构建及数据质量控制。针对现有城市近地面监测站数量有限且分布离散而无法为空间统计模型提供足够样本点的问题,本研究合作单位(湖北省生态环境厅襄阳生态环境监测中心)在研究区域搭建了一套高密度近地面颗粒物和关键气象要素的监测传感网。该网络分2期建设完成,由146台AQMS2000传感器(罗克佳华科技集团股份有限公司,中国)组成,可以自动采集并存储$PM_{2.5}$(单位:μg/m^3)、PM_{10}(单位:μg/m^3)、风速(单位:m/s)、风向(单位:°)、相对湿度(单位:%)和气温(单位:℃)的观测数据。响应时间不超过1 min、分辨率不超过1个单位、数据上传和采样周期为1 h。考虑到研究区域存在大量的污染源,同时为有效捕捉城市尺度"颗粒物排放-扩散分布-作用影响"的全过程,布站一是密切联系污染源,以保证覆盖污染源普查清单的所有对象;二是充分顾及颗粒物的潜在影响区域,以保证覆盖所有类型的城市用地。所有站点位置和分布如图1所示。

为最大程度降低区域传输的外源性污染对研究的干扰,选取污染严重的冬季以及小风的稳定气象条件作为研究场景,以2018年12月1日00:00时至2019年2月28日23:00时的$PM_{2.5}$和PM_{10}观测数据为本研究实验数据,并依次进行缺失值剔除和平行性检验。16个监测站因缺失数据超过20%而被剔除。随后,将监测站点划分为数量相对均衡的2组,计算研究时段内颗粒物观测数据的平均值以及30、50、80和90百分位数以及相对误差(表1)。观测数据均值相对误差均不超过±10%,分位检验的相对

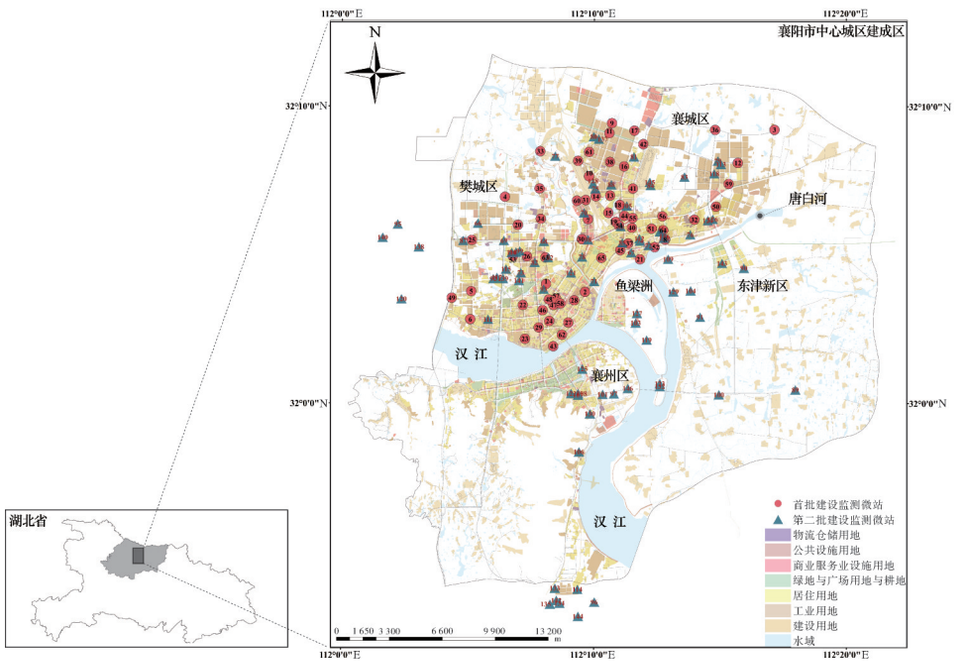


图 1　襄阳市中心城区建成区范围的高密度近地面监测传感网的所有站点空间分布

Fig. 1　Spatial distribution of all stations in the high-density near-surface monitoring sensor network within the built-up area of central Xiangyang

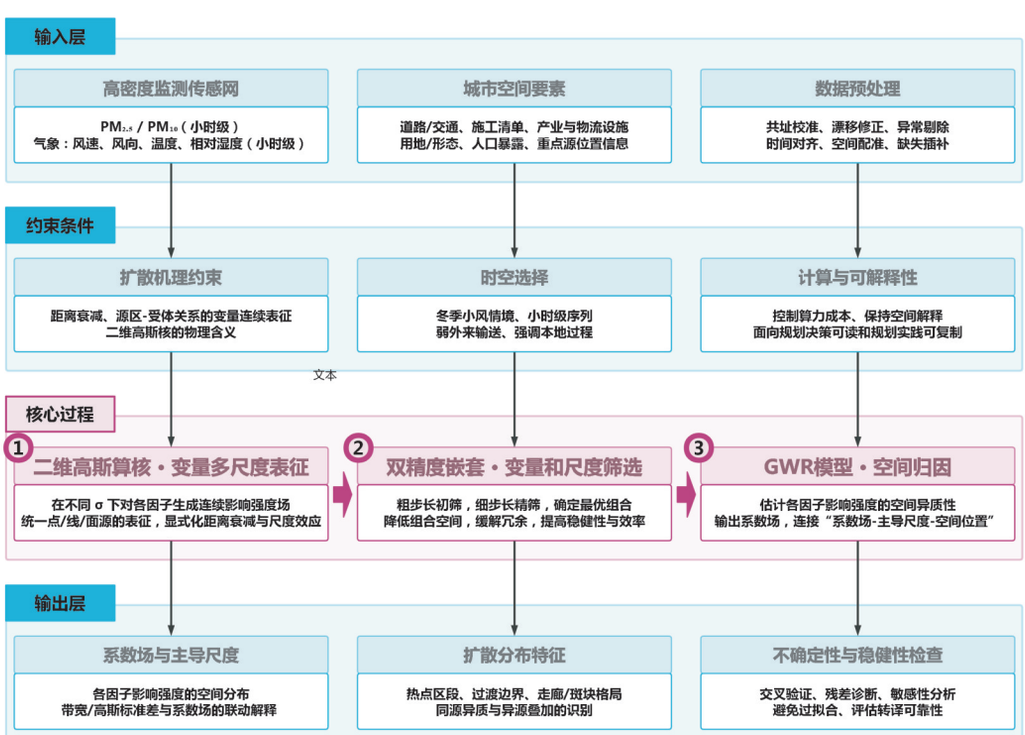


图 2　“扩散机理约束的变量多尺度表征-算力控制的变量和尺度筛选-地理加权的空间归因解析”识别方法的流程示意图

Fig. 2　Workflow schematic of the identification method：multi-scale representation of diffusion-mechanism-constrained variables-computation-controlled selection of variables and scales-geographically weighted spatial attribution analysis

误差均不超过±15%，符合HJ/T 655—2013《环境空气颗粒物（PM_{10}和$PM_{2.5}$）连续自动监测系统安装和验收技术规范》的要求，检验通过。

表1 城市近地面高密度监测传感网的$PM_{2.5}$和PM_{10}观测数据的平行性检验结果

Table 1 Parallel test results for $PM_{2.5}$ and PM_{10} observations from the citywide near-surface high-density sensor network

检验指标 Examination indicators	组别 Group	$PM_{2.5}$/（μg/m³）	PM_{10}/（μg/m³）	相对误差限/% Relative error limit
均值 Average	一组 Group 1	137.81	177.90	±10
	二组 Group 2	143.72	183.51	
30百分位 30th percentile	一组 Group 1	81.63	114.81	±15
	二组 Group 2	78.91	103.04	
50百分位 50th percentile	一组 Group 1	96.75	133.00	±15
	二组 Group 2	95.32	121.58	
80百分位 80th percentile	一组 Group 1	120.31	162.45	±15
	二组 Group 2	121.97	154.53	
90百分位 90th percentile	一组 Group 1	131.36	173.46	±15
	二组 Group 2	134.64	168.04	

2）颗粒物污染识别方法。首先，在高斯扩散机理约束下，采用不同标准差的二维高斯算核对城市的污染源与下垫面要素进行多尺度连续表征。由于研究区域的颗粒物污染源主要为工业生产排放的NO_x、SO_2和VOC_s颗粒物前体物以及工地扬尘，所以提取NO_x、SO_2和VOC_s年排放量、扬尘源（施工工地点位空间信息、物流设施兴趣点）以及下垫面形态指标（城市用地构成和面积、容积率、建筑密度）共15个因素，数据来源和提取操作如表2所示。

针对上述潜在影响因素，不直接采用离散计数或面积等指标，而是按照公式1，进一步计算各因素在不同高斯标准差σ下的二维核密度分布，即不同尺度下该因素对颗粒物扩散的影响强度场$g(d)$，以刻画各因素随距离d衰减的潜在作用及其多尺度特征，从而将异质性的空间关联显式化、连续化。该步骤既统一了点源、线源与面源的表征方式，也为后续回归系数的空间解释提供了相容的量纲与物理含义。

$$g(d)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma}\exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma^2}\right) \tag{1}$$

其次，遵循最优子集法思路，设计“400 m粗步长-100 m细步长”的双精度嵌套，筛选最优变量（污染影响因素）及其尺度组合。考虑到全因素与多尺度的交叉组合（污染影响因素×尺度）搜索空间庞大，单纯穷举不仅成本高，而且会引入冗余变量而降低稳定性。为此，本研究设计双精度嵌套筛选策略：对$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度进行反距离插值，以实现污染浓度数据的空间化，并通过留一法验证插值精度，调整后可决系数（调整后R^2）分别为0.81、0.85，均方根误差分别为5.47、9.24；以空间化颗粒物质量浓度与变量和尺度的交叉组合线性拟合的调整后R^2作为评价指标，先以较粗的σ步长进行初筛，快速定位表现较优的变量与尺度的交叉组合；再在其邻域内以较细步长精筛，确定最终进入后续回归模型的最优变量与尺度交叉组合集合。通过前期测试，实验中采用400 m与100 m 2个层级步长完成筛选与收敛。筛选结果如表3所示。该策略在保证筛选质量的同时显著降低了计算量。

最后，基于GWR模型量化各因素对颗粒物的空间异质性影响，获得“系数场（影响强度）-主导尺度-空间位置”的三元输出。在变量表征和筛选完成后，根据公式（2）～（3）构建GWR模型，式（2）～（3）中，x为最优表征尺度下的因素高斯算核核密度值；y代表栅格化的$PM_{2.5}$、PM_{10}质量浓度；每个样本点i的空间位置由坐标(u_i,v_i)定义；其第k个回归系数记为$\beta_k(u_i,v_i)$，且空间权重矩阵$W(u_i,v_i)$由自适应二次核函数生成。

$$y_i=\beta_0(u_i,v_i)+\sum_{k=1}^{p}\beta_k(u_i,v_i)x_{ik}+\varepsilon_i \tag{2}$$

$$\widehat{\beta_k}(u_i,v_i)=\left[X^{\mathrm{T}}W(u_i,v_i)X\right]^{-1}X^{\mathrm{T}}W(u_i,v_i)Y \tag{3}$$

根据模型的回归系数值及其空间分布，揭示各因素对$PM_{2.5}$和PM_{10}扩散“影响强度-主导尺度-空间位置”的三元对应关系，以识别同源异质和异源叠加的关键区段与边界。以同样的自变量和因变量构建最小二乘法模型（ordinary least squares，OLS），并对比二者的性能指标，即赤池信息准则值（akaike information criterion，AIC_c）、贝叶斯信息准则值（Bayesian information criterion，BIC_c）以及残差平方和（residual sum of squares，RSS），以验证模型精度。该模型让整个识别方法在解释性、精度与算力成本之间取得

表 2　颗粒物影响因素的数据来源及提取方法

Table 2　Data sources and extraction methods for the explanatory variables of particulate matter

数据名称 Data	数据来源 Data source	提取方法 Extraction method
NO_x年排放量/t Annual NO_x emissions	襄阳市2017年污染源普查清单 Xiangyang 2017 pollution source survey list	利用工厂名称和百度拾取坐标系统获取污染源百度坐标；完成CGCS2000坐标转换
SO_2年排放量/t Annual SO_2 emissions	襄阳市2017年污染源普查清单 Xiangyang 2017 pollution source survey list	利用工厂名称和百度拾取坐标系统获取污染源百度坐标；完成CGCS2000坐标转换
VOC_s年排放量/t Annual VOC_s emissions	襄阳市2017年污染源普查清单 Xiangyang 2017 pollution source survey list	利用工厂名称和百度拾取坐标系统获取污染源百度坐标；完成CGCS2000坐标转换
施工工地点位空间信息 Construction site location spatial information	襄阳市人民政府网 Xiangyang municipal people's government website	在襄阳市人民政府网中爬取工地名称；利用百度拾取坐标系统获取污染源百度坐标；完成CGCS2000坐标转换
物流设施兴趣点 Logistics facility points of interest	高德地图 Amap	完成CGCS2000坐标转换
各类城市用地的面积/hm^2 Areas of different types of urban land use	襄阳市自然资源和城乡建设局网站公示的规划图纸 Planning drawings published on the website of Xiangyang Municipal Bureau of Natural Resources and Urban-rural	转绘成矢量数据；在ArcGIS软件中提取8类用地面积
容积率栅格数据（网格尺寸：500 m） Floor area ratio raster data (grid size 500 m)	襄阳市自然资源和城乡建设局网站公示的规划图纸 Planning drawings published on the website of Xiangyang Municipal Bureau of Natural Resources and Urban-rural	转绘成矢量数据；在Matlab软件中对建筑矢量数据栅格化；根据容积率为网格内总建筑面积除以网格内土地面积求解得到
建筑密度栅格数据（网格尺寸：500 m） Building density raster data (grid size 500 m)	襄阳市自然资源和城乡建设局网站公示的规划图纸 Planning drawings published on the website of Xiangyang Municipal Bureau of Natural Resources and Urban-rural	转绘成矢量数据；在Matlab软件中对建筑矢量数据栅格化；根据建筑密度为网格内土地面积除以网格内建筑基底面积求解得到

较为稳健的平衡，而且所得结果更易转译为规划实践中的具体措施。

2　结果与分析

2.1　模型精度对比与统计量分析

由表4可知，GWR模型比OLS模型的精度更高，GWR模型调整后R^2明显高于OLS模型；GWR模型的AIC_c、BIC_c以及RSS均显著低于OLS模型。

GWR模型的回归分析涉及1 495个空间像元，其中$PM_{2.5}$模型的解释变量带宽确定为165（样本占比11.04%）；PM_{10}模型的解释变量带宽则降至116（样本占比7.76%）。统计学显著（$|t|>1.96$）的模型空间回归系数统计量分析结果如表5所示。

2.2　工业源对颗粒物扩散作用特征分析

工业源对颗粒物扩散的影响可以分为2类：一是以NO_x与SO_2为代表的燃烧型无机前体物工业源（主要对应热电机组与燃烧相关排放）；二是以VOC_s为代表的工业过程有机前体物工业源（主要对应喷涂、印刷、制药等过程排放以及无组织逸散）。总体而言，燃烧型工业源的正向回归系数，即NO_x二维高斯算核核密度值（DE_NO_x）和SO_2二维高斯算核核密度值（DE_SO_2），在东风电厂集群、华电电厂-余家湖工业产业集群以及闽顺达新型建材有限公司毗邻区域呈现集聚，且其在$PM_{2.5}$模型中的正系数均值普遍高于PM_{10}，表明燃烧相关前体物对细粒子污染的空间加剧效应更为突出。

进一步比较NO_x与SO_2对颗粒物扩散的影响作用可知，二者虽同属燃烧型工业源，但在主导影响半径与影响作用峰值位置上存在稳定差异。首先，对于东风电厂集群，NO_x更偏近场增强，而DE_SO_2峰值则相对外移。以烟囱为中心，$PM_{2.5}$和PM_{10}模型中DE_NO_x峰值分别集中于1.2～2.4 km（图3A）和1.2～3.0 km（图3B）。影响作用在空间上覆盖谢洼、云湾、桐树店以及车城湖4个社区，结合统计年鉴人口数据与腾讯人口热力图可知，这会给近7.28万居民带来健康风险。DE_SO_2以烟囱为中心随距离增大而作用衰减，且在2.0～4.0 km区间出现显著峰值（图4），影响云湾、西湾以及红星3个社区近16万居民的健康。其次，对于华电电厂，2种前体物均表现为更靠近烟囱的峰值响应，即DE_NO_x和DE_SO_2在距离烟囱中心约1.3 km处出现峰值（图3B、图4）。其中，NO_x对$PM_{2.5}$的加剧作用与余家湖工业园形成复合污染带（图3A）。在影响人群方面，枣林村与赵庄村2个社区受2种前体物叠加影响，涉及约0.26万居民。

表3 双精度嵌套筛选法的结果

Table 3 Results of the dual-precision nested screening method

调整后R^2 Adjusted R^2	影响因素 Influencing factor	高斯算核标准差/m Gaussian kernel standard deviation
59.82	NO_x年排放量 Annual NO_x emissions	2 000
	SO_2年排放量 Annual SO_2 emissions	1 900
	VOC_s年排放量 Annual VOC_s emissions	1 200
	施工工地点位空间信息 Construction site location spatial information	1 400
	物流设施兴趣点 Logistics facility points of interest	700
	蓝色空间面积 Areas of blue spaces	1 000
	绿色空间面积 Areas of green spaces	400
48.94	NO_x年排放量 Annual NO_x emissions	1 900
	SO_2年排放量 Annual SO_2 emissions	2 500
	VOC_s年排放量 Annual VOC_s emissions	2 500
	施工工地点位空间信息 Construction site location spatial information	1 200
	物流设施兴趣点 Logistics facility points of interest	600
	蓝色空间面积 Areas of blue spaces	600
	绿色空间面积 Areas of green spaces	500

表4 地理加权回归模型与普通最小二乘法的拟合效果比较

Table 4 Comparison of model fit between the geographically weighted regression model and ordinary least squares

颗粒物 Particulate matter	模型性能指标 Model performance indicator	GWR	OLS
$PM_{2.5}$	调整后R^2 Adjusted R^2	0.84	0.60
	AIC_c	9 318.12	10 606.08
	BIC_c	10 079.91	10 669.59
	RSS	35 666.97	103 795.40
PM_{10}	调整后R^2 Adjusted R^2	0.84	0.49
	AIC_c	9 276.37	10 865.63
	BIC_c	10 270.29	10 929.13
	RSS	31 891.41	123 474.23

注 Note：DE：二维高斯算核核密度值 Two-dimensional Gaussian kernel density value.

与燃烧型工业源不同，VOC_s对颗粒物扩散影响的空间效应呈现两大特征（图5）：对PM_{10}的加剧作用更强且范围更广，以及园区集聚效应更突出。VOC_s二维高斯算核核密度值（DE_VOC_s）在PM_{10}模型中的正回归系数均值高于$PM_{2.5}$，同时高值区多集中于航空航天工业园、襄阳汽车工业园及华中药业-雪美实业等工业过程（如印刷、喷涂、制药等）密集区，表现为典型的产业集群主导型影响格局。VOC_s的影响范围较SO_2和NO_x显著扩展，并且对周边社区的影响更为广泛。在襄阳汽车工业园周边的8个社区（孙庄社区、车城湖社区、桐树店社区、东风社区、施坡社区、米庄社区、鼎府社区、顺正河社区）中，受到VOC_s影响的居民约有5.74万人。此外，华中药业-雪美实业周围的4个社区（钱营社区、王家洼社区、观庞公祠社区、观音阁社区）亦受影响，但程度相对较轻，约1.5万居民受影响。

2.3 扬尘源对颗粒物扩散作用特征分析

施工工地和物流设施在PM_{10}模型中均具有显著的正回归系数，尤其在工业区与交通走廊等高密度区域，表现出明显的集聚效应。施工工地的影响主要表现为局部区域的短期加剧。由图6可知，施工工地二维高斯算核核密度值（DE_施工工地）集聚在3个区域，包括东津世纪城商业广场工地集群（8个活跃工地）、襄州区焦柳铁路线东侧工地集群（21个活跃工地）、樊城区卧龙大道沿线工地集群（22个活跃工地）。值得注意的是，在研究时段内，鱼梁洲由于裸土未覆盖、洒水降尘措施不到位等问题，导致PM_{10}回归系数值异常高，表明在该区域加强降尘措施的重要性。

DE_施工工地负回归系数说明，部分工地的施工作业对局地颗粒物浓度未产生显著影响。为进一步解释此结果，开展实地调研发现，负回归系数对应的工地均严格执行了襄阳城市建设委员会要求的局地降尘措施，包括空中或移动喷雾、轮胎喷洒等，而正回归系数对应的工地，其喷淋设备在不同程度上出现损坏。这也验证了局地降尘措施的有效性。考虑到工地建成后都有配套绿地，所以正回归系数对应的51个活跃工地，建议加强对局地降尘措施的落实。

PM_{10}模型中物流设施二维高斯算核核密度值的（DE_物流设施）回归系数平均值显著高于$PM_{2.5}$，这一结果与柴油车排放及道路烟尘的粒径特征相符。回归分析显示，物流设施的正回归系数在$PM_{2.5}$和PM_{10}模型中具有相似的空间分布模式，其高值区主要集中在樊城区、襄州区以及襄城区的多个工业区交通走廊，尤其是滨江大道-环城南路、襄阳汽车工业园周边的焦柳铁路线-东风汽车大道、长虹路-襄阳市东西轴线以及航空航天工业园毗邻的二广高速-卧龙大道等交通繁忙区域（图7）。

表 5　地理加权回归模型系数的统计量分析

Table 5　Statistical analysis of coefficients in the geographically weighted regression model

颗粒物 Particulate matter	影响因素 Influencing factor	平均值 Average	标准偏差 Standard deviation	极大值 Maximum	极小值 Minimum	中位数 Median
$PM_{2.5}$	DE_NO_x	−2.95	9.86	15.02	−28.02	−5.72
	DE_SO_2	3.16	12.18	30.11	−30.30	8.36
	DE_VOC_s	−0.52	11.31	24.23	−21.15	−2.53
	DE_施工工地 DE_Construction	1.33	9.61	15.69	−15.69	4.94
	DE_物流设施 DE_Logistics	2.53	3.54	8.49	−9.92	3.19
	DE_蓝色空间 DE_Blue	−0.72	6.61	11.78	−13.97	−2.72
	DE_绿色空间 DE_Green	−1.28	2.78	5.17	−8.25	−1.19
PM_{10}	DE_NO_x	0.52	5.89	41.84	−31.96	0.59
	DE_SO_2	−3.37	9.16	19.60	−34.54	−5.56
	DE_VOC_s	3.63	15.22	21.89	−26.11	11.74
	DE_施工工地 DE_Construction	−1.33	11.73	16.87	−18.32	−7.48
	DE_物流设施 DE_Logistics	3.06	3.59	11.01	−7.91	3.18
	DE_蓝色空间 DE_Blue	−0.83	6.10	12.36	−10.32	−3.28
	DE_绿色空间 DE_Green	1.51	16.98	25.57	−24.98	9.15

2.4　蓝绿空间对颗粒物扩散作用特征分析

蓝色空间的二维高斯算核核密度值(DE_蓝色空间)回归系数呈正负相间态势，且$PM_{2.5}$模型的回归系数绝对值均值更大。回归分析结果发现，在城市开发强度较高的核心区域，回归系数表现为正值；与之形成鲜明对比的是，在容积率和建筑密度低于中心城区平均水平的空间范围内，如襄州区的珠海大道-奔驰大道西侧延伸带中、鱼梁洲的环岛绿道-东津新区南山路，该系数为负值(图8)。

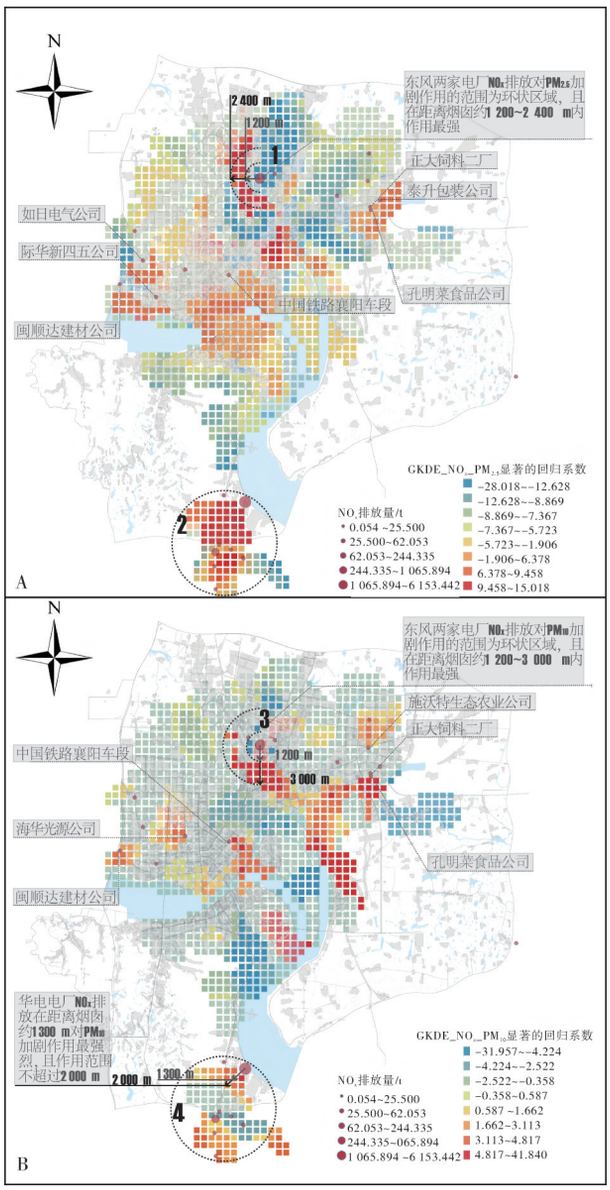
由此可知，蓝色空间对污染的消减效应在城市低强度开发区域表现显著，但高强度城市开发会削弱该效应。特别需要指出的是，DE_蓝色空间负回归系数在珠海大道-奔驰大道呈现出约2 km宽的污染缓解带(图8)，其空间分布与襄阳市“唐白河-汉江”主风道高度耦合。基于此，建议襄州区的珠海大道-奔驰大道西侧延伸带、鱼梁洲的环岛绿道-东津新区南山路维持现有的低密度开发模式，以确保蓝色空间对颗粒物的消减效应得到充分发挥。

回归分析结果显示，绿色空间的二维高斯算核核密度值(DE_绿色空间)回归系数在模型中普遍为负值，且在PM_{10}模型中回归系数绝对值均值更大。这表明，绿色空间存在显著的颗粒物消减效应，并且该效应对大粒径的颗粒物更有效。模型负回归系数在空间分布上呈现显著集聚特征，主要分布于3个区域(图9)：襄州区机场路-襄阳大道-汉丹铁路-奔驰大道围合区，襄城区汉江-焦柳铁路-岘山-卧龙大桥围合区，以及邓城大道-春园路沿线。这些区域普遍具有连片耕地或高密度公园。

然而，在鱼梁洲，DE_绿色空间回归系数在统计上不显著($|t|\leqslant 1.96$)，说明研究期间，其作为城市绿心的实际颗粒物消减效应未达到预期。根据调研记录，这一问题源于鱼梁洲环岛景观带大型绿化项目建设中产生的扬尘。未来需要通过提升绿地建设质量和规范施工管理，以充分发挥绿心功能。

3　讨　论

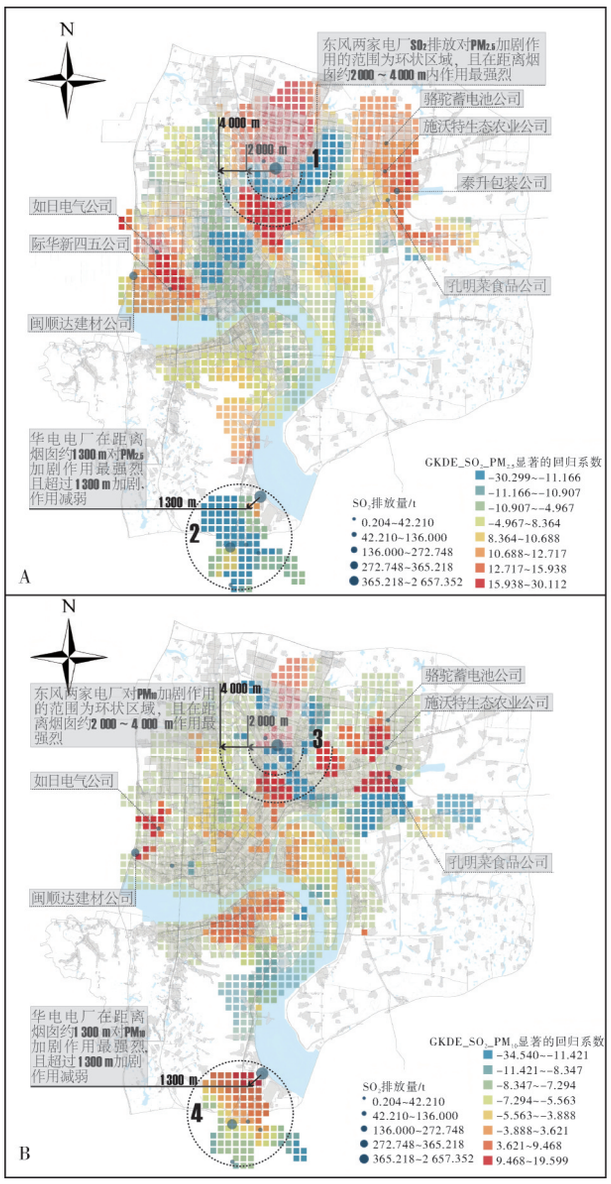
本研究在城市近地面空间构建了高密度监测传感网。基于该网络采集的数据，提出“扩散机理约束的变量多尺度表征-算力控制的变量和尺度筛选-地理加权的空间归因解析”的污染识别方法，并在襄阳市中心城区开展实证研究。该方法通过二维高斯算核对变量(污染影响因素)的多尺度表征以及GWR



A：$PM_{2.5}$影响区 $PM_{2.5}$ impact zone；1：东风电厂集群NO_x排放主导的$PM_{2.5}$强影响区 $PM_{2.5}$ high-impact zone dominated by NO_x emissions from the Dongfeng Power Plant cluster；2：华电电厂-余家湖产业集群NO_x排放主导的片状$PM_{2.5}$强影响区 Patch-like $PM_{2.5}$ high-impact zone dominated by NO_x emissions from the Huadian Power Plant-Yujiahu industrial cluster；B：PM_{10}影响区 PM_{10} impact zone；3：东风电厂集群NO_x排放主导的PM_{10}强影响区 PM_{10} high-impact zone dominated by NO_x emissions from the Dongfeng Power Plant cluster；4：华电电厂NO_x排放主导的距离衰减型PM_{10}强影响区 Distance-decaying PM_{10} high-impact zone dominated by NO_x emissions from the Huadian Power Plant.

图3 NO_x排放源对颗粒物扩散影响的范围和强度分析

Fig. 3 Analysis of the spatial extent and intensity of NO_x emission sources' impacts on particulate matter dispersion

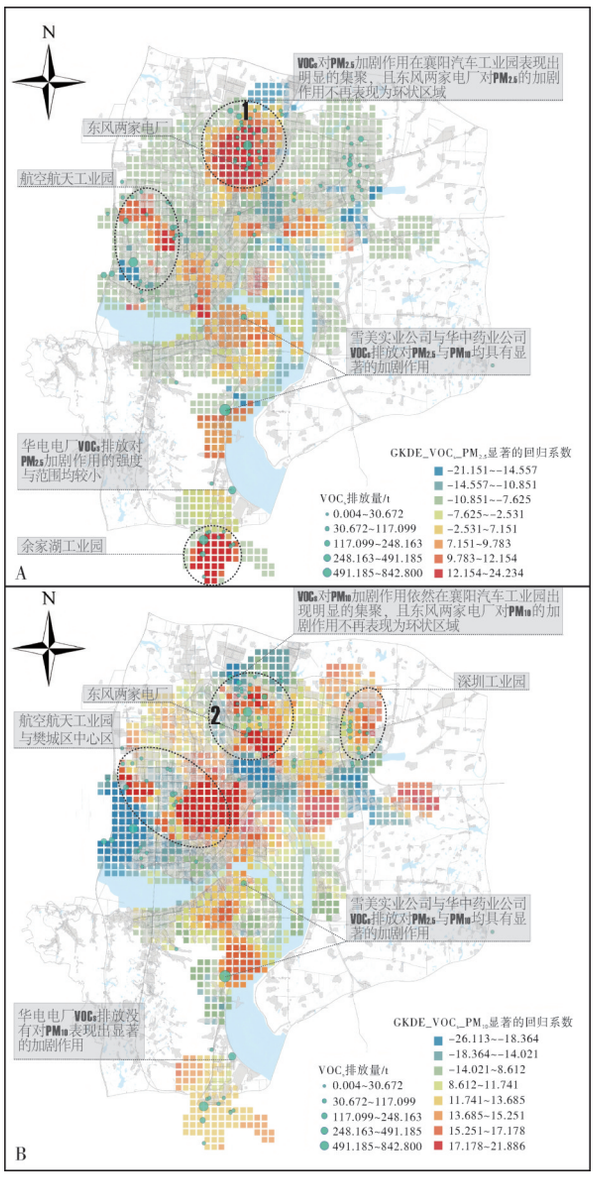


A：$PM_{2.5}$强影响区 $PM_{2.5}$ high impact zone；1：东风电厂集群SO_2排放主导的$PM_{2.5}$强影响区 $PM_{2.5}$ high-impact zone dominated by SO_2 emissions from the Dongfeng Power Plant cluster；2：华电电厂SO_2排放主导的$PM_{2.5}$强影响区 $PM_{2.5}$ high-impact zone dominated by SO_2 emissions from the Huadian Power Plant；B：PM_{10}影响区 PM_{10} impact zone；3：东风电厂集群SO_2排放主导的PM_{10}强影响区 PM_{10} high-impact zone dominated by SO_2 emissions from the Dongfeng Power Plant cluster；4：华电电厂SO_2排放主导的距离衰减型PM_{10}强影响区 Distance-decaying PM_{10} high-impact zone dominated by SO_2 emissions from the Huadian Power Plant.

图4 SO_2排放源对颗粒物扩散影响的范围和强度分析

Fig. 4 Analysis of the spatial extent and intensity of SO_2 emission sources' impacts on particulate matter dispersion

模型系数的空间化输出，能够较清晰地分辨同源异质，即同类污染源在不同区段的影响差异。具体而

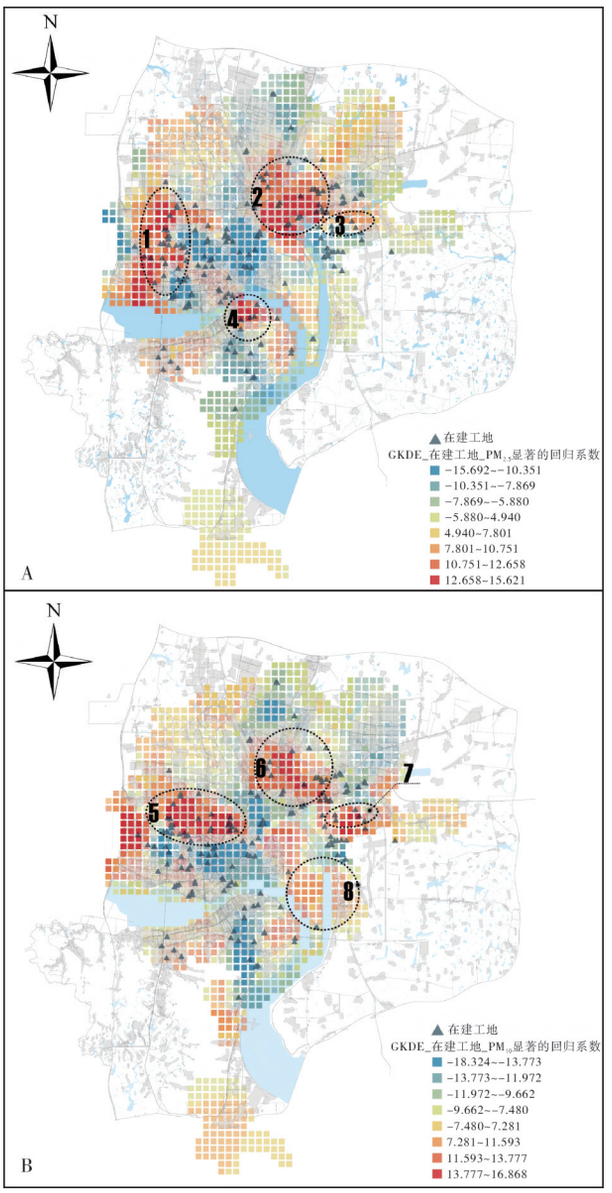


A：$PM_{2.5}$强影响区 $PM_{2.5}$ high-impact zone；1：襄阳汽车工业园 VOC_s排放主导的$PM_{2.5}$强影响区 High-impact zone of $PM_{2.5}$ dominated by VOC_s emissions from the Xiangyang Automobile Industrial Park；B：PM_{10}强影响区 PM_{10} high-impact zone；2：襄阳汽车工业园 VOC_s排放主导的PM_{10}强影响区 High-impact zone of PM_{10} dominated by VOC_s emissions from the Xiangyang Automobile Industrial Park.

图 5　VOC_s排放源对颗粒物扩散影响的范围和强度分析

Fig. 5　Analysis of the spatial extent and intensity of VOC_s emission sources' impacts on particulate matter dispersion

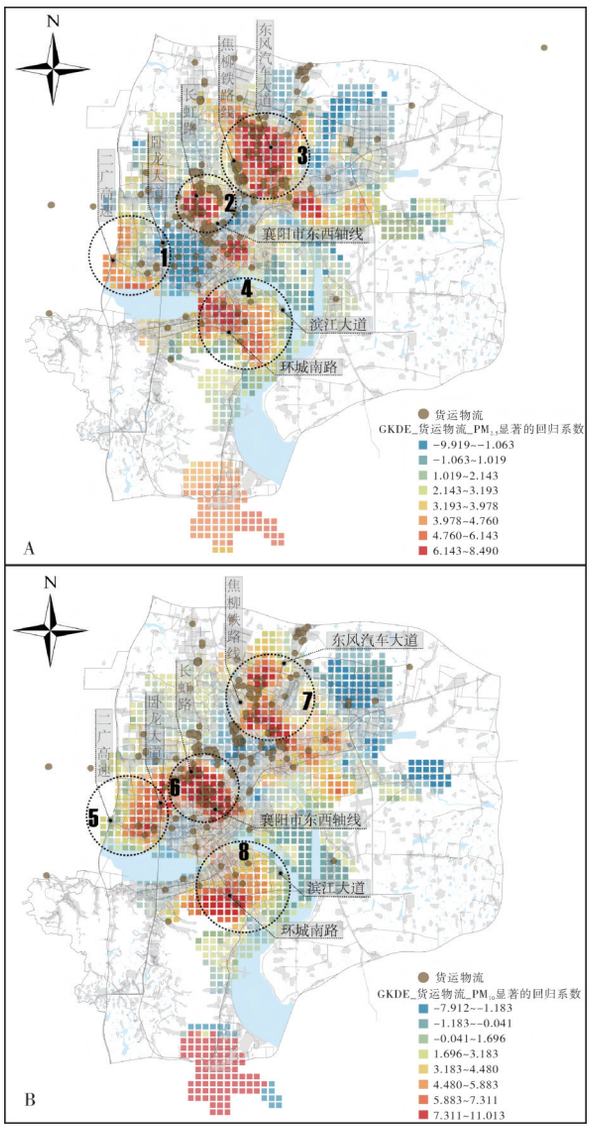
言：NO_x排放源的主要影响带约 1.2～3 km、SO_2排放源约 2～4 km、VOC_s排放源影响与周边工厂组团叠加而外扩形成复合污染带，从粒径上看，NO_x、SO_2对污染的加剧强度对$PM_{2.5}$更高，而VOC_s对PM_{10}的加



A：$PM_{2.5}$强影响区 $PM_{2.5}$ high-impact zone；1：卧龙大道沿线工地集群 Cluster of construction sites along Wolong Avenue；2：焦柳铁路线东侧工地集群 Cluster of construction sites east of the Jiaoliu Railway；3：东津世纪城工地集群 Dongjin Shijicheng construction-site cluster；4：襄城滨江工地集群 Xiangcheng riverside construction-site cluster；B：PM_{10}强影响区 PM_{10} high-impact zone；5：卧龙大道至二广高速工地集群 Construction-site cluster from Wolong Avenue to the Erguang Expressway；6：焦柳铁路至六两河大桥工地集群 Construction-site cluster from the Jiaoliu Railway to the Liulianghe Bridge；7：东津世纪城工地集群 Dongjin Shijicheng construction-site cluster；8：鱼梁洲工地 Yuliangzhou construction site.

图 6　施工工地对颗粒物扩散影响的范围和强度分析

Fig. 6　Analysis of the spatial extent and intensity of construction sites' impacts on particulate matter dispersion



A：$PM_{2.5}$强影响区 $PM_{2.5}$ high impact zone；1：航空航天工业园旁二广高速-卧龙大道 Erguang Expressway-Wolong Avenue corridor adjacent to the Aerospace Industrial Park；2：长虹路-襄阳市东西轴线 Changhong Road-east-west urban axis corridor of Xiangyang；3：襄阳汽车工业园焦柳铁路线-东风汽车大道 Jiaoliu Railway-Dongfeng Automobile Avenue corridor in the Xiangyang Automobile Industrial Park；4：滨江大道-环城南路 Binjiang Avenue-Huancheng South Road corridor；B：PM_{10}强影响区 PM_{10} high impact zone；5：航空航天工业园旁二广高速-卧龙大道 Erguang Expressway-Wolong Avenue corridor adjacent to the Aerospace Industrial Park；6：长虹路-襄阳市东西轴线 Changhong Road-east-west urban axis corridor of Xiangyang；7：襄阳汽车工业园焦柳铁路线-东风汽车大道 Jiaoliu Railway-Dongfeng Automobile Avenue corridor in the Xiangyang Automobile Industrial Park；8：滨江大道-环城南路 Binjiang Avenue-Huancheng South Road corridor.

图7 物流设施对颗粒物扩散影响的范围和强度分析

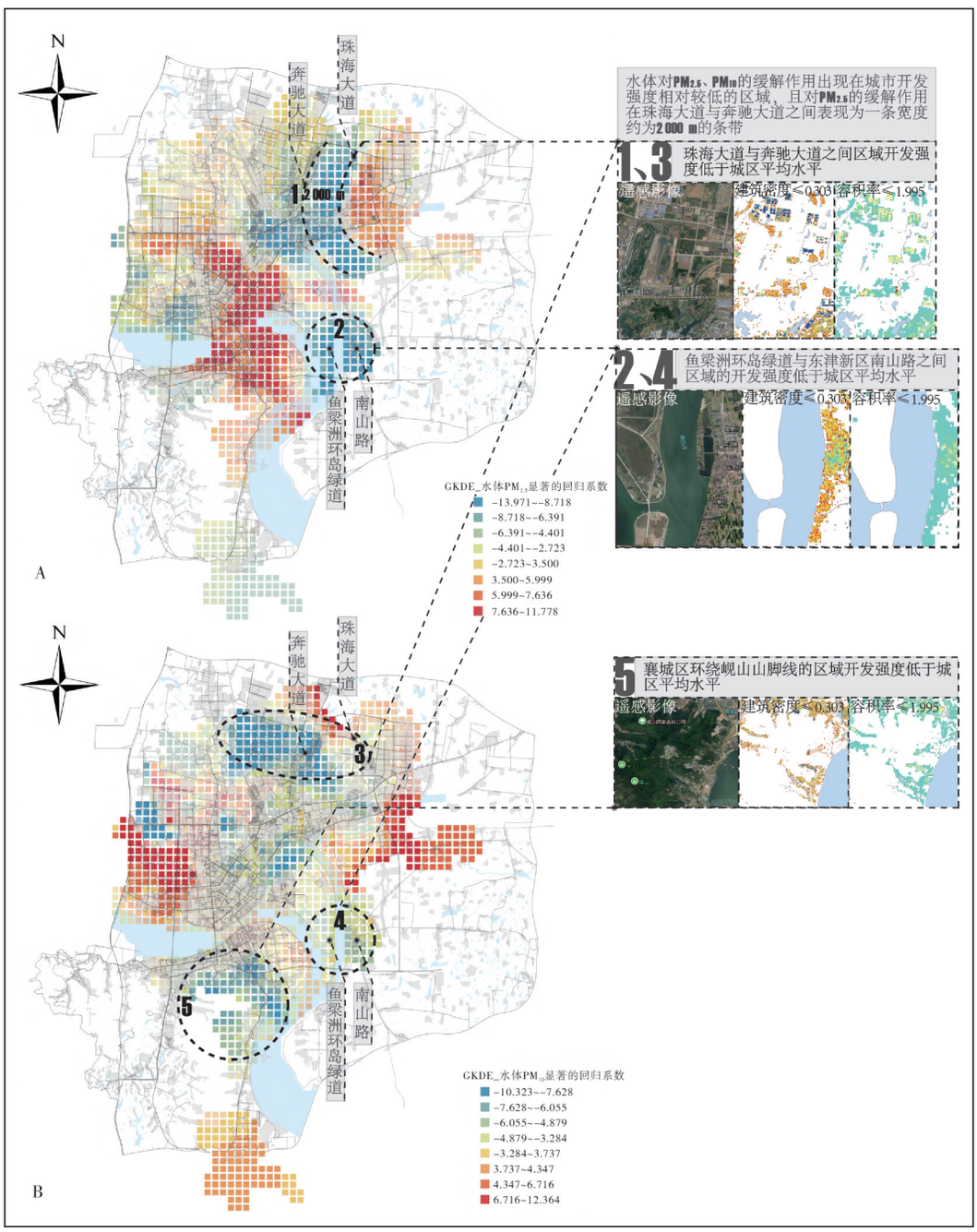
Fig. 7 Analysis of the spatial extent and intensity of logistics facilities' impacts on particulate matter dispersion

剧显著强于$PM_{2.5}$；工地扬尘对PM_{10}的加剧更显著，并沿大型项目与交通轴线呈走廊集聚，局地降尘（喷淋等）可将影响由正转负；货运物流沿工业区通道形成连续增强带，对PM_{10}的影响强于$PM_{2.5}$；蓝色空间在低强度开发区且与主风道耦合处形成宽约2 km的污染缓解带，但高强度开发可能会抑制该效应，而绿色空间对颗粒物普遍为削减效应，对PM_{10}的减效更强，但施工扰动可抵消短期降尘效益。

既有研究显示，工业园区和电厂组团周边的$PM_{2.5}$质量浓度普遍呈显著空间集聚，而以重型柴油车为主的货运走廊及与之相连的港口通道沿线则形成连续的高排放和高暴露带，施工扬尘和道路再悬浮对大粒径颗粒物的贡献尤为突出，这与本研究识别出的“燃烧型工业源和工业过程工业源在局地风环境和地形边界的共同作用下表现为片状集聚”以及“货运物流廊道易形成条带状的污染增强区”的差异化格局基本一致[25-27]。同时，有关蓝绿空间的研究表明，沿河湖及主导风向布设的蓝绿廊道可在约1～3 km尺度上显著降低$PM_{2.5}$和PM_{10}的扩散距离，公园、带状与街旁绿地对PM_{10}的削减率通常高于对$PM_{2.5}$的削减率，这与本研究识别的蓝色空间约2 km污染缓解带及绿色空间对PM_{10}更强减效的结论相互印证[28-31]。上述结果也验证了本方法在识别同源异质方面的有效性。

本研究结果可以为面向颗粒物污染改善的绿地增量配置提供可操作的选址依据与形态指引：依据正向系数叠加与主导尺度，先识别“高贡献-高暴露-绿地不足”的关键区段，再结合通风廊道与道路断面条件确定补绿位置与形态类型。对于片区型集聚区（工业园区、电厂组团等），宜在下风侧边缘与潜在回流区布置块状或楔形绿地，并通过与既有绿地拼接扩展迎风面宽以形成连续缓冲带；对于条带型高影响区（货运物流走廊），优先在源-受体之间的道路或用地边界构建带状或片状绿地，以线性绿带、分隔岛与绿篱共同塑造稳定沉降界面，其长度与间距以主导尺度为参照；对于系数突变的过渡边界与关键节点，在交叉口、匝道口与街谷瓶颈嵌入口袋式复层绿化，实现对局地暴露的针对性缓释；对于主通风廊道，强调通风连续性与透风性，避免以致密林带造成过强阻隔，采用离散组团与低、中层复层配置实现“导流不阻风”。

本研究提出的污染识别方法在技术层面实现了方法解释性、精度和算力之间的平衡：以扩散机理为

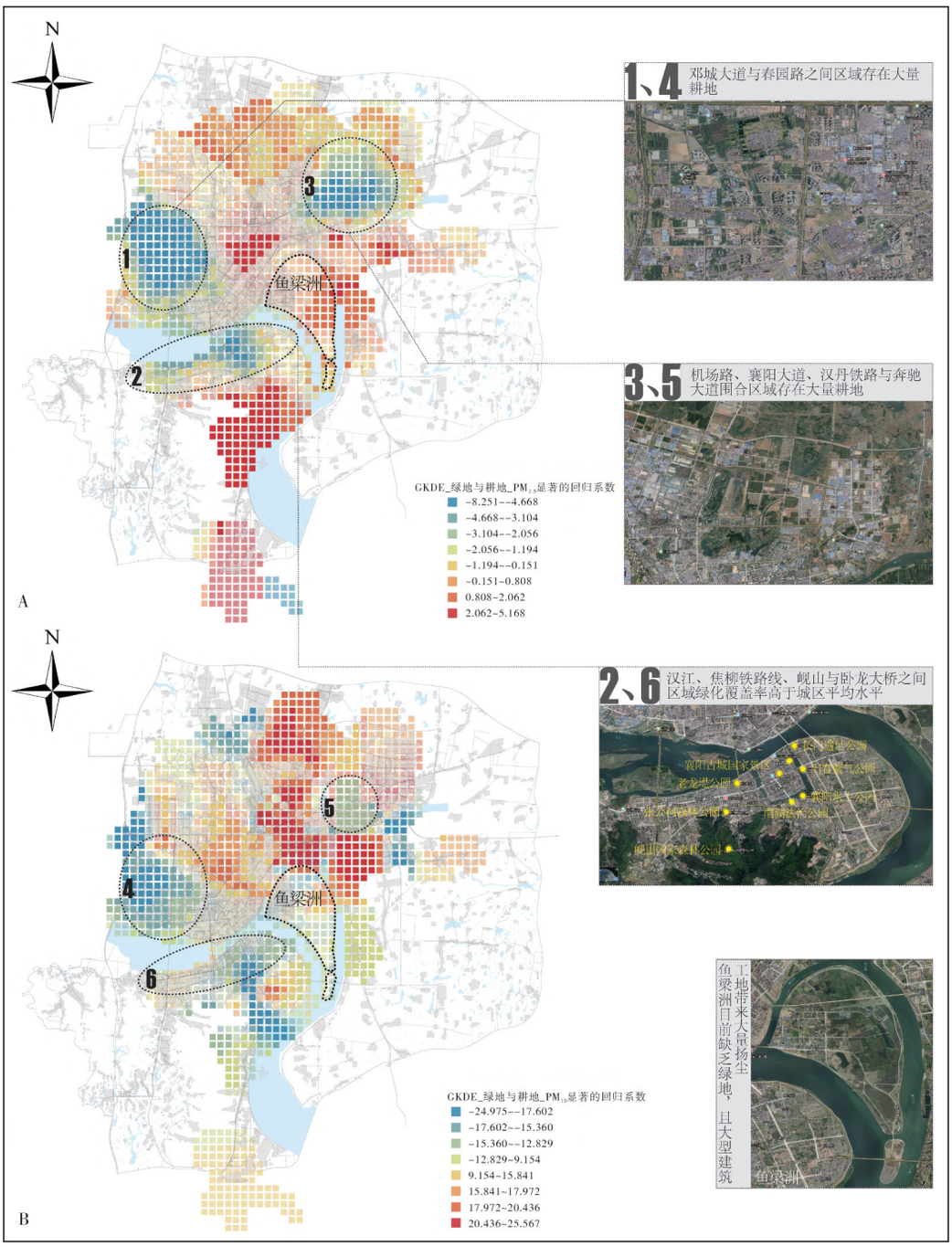


A：$PM_{2.5}$抑制区 $PM_{2.5}$ mitigation zone；1：珠海大道-奔驰大道西侧延伸带旁的$PM_{2.5}$强抑制带状区 Strong $PM_{2.5}$ mitigation belt adjacent to the westward extension of the Zhuhai Avenue-Benz Avenue corridor；2：鱼梁洲环岛绿道-东津新区南山路旁的$PM_{2.5}$强抑制区 Strong $PM_{2.5}$ mitigation zone along the Yuliangzhou ring greenway-Nanshan Road corridor in the Dongjin New District；B：PM_{10}抑制区 PM_{10} mitigation zone；3：奔驰大道西侧延伸带旁的PM_{10}强抑制区 Strong PM_{10} mitigation zone adjacent to the westward extension belt west of Benz Avenue；4：鱼梁洲环岛绿道-东津新区南山路的PM_{10}抑制区 PM_{10} mitigation zone along the Yuliangzhou ring greenway-Nanshan Road corridor in the Dongjin New District；5：岘山山脚沿线的PM_{10}抑制区 PM_{10} mitigation zone along the foothill corridor of Xianshan Mountain.

图 8　蓝色空间对颗粒物扩散影响的范围和强度分析

Fig. 8　Analysis of the spatial extent and intensity of blue spaces' impacts on particulate matter dispersion

约束，将离散的点、线、面源统一为多尺度连续的影响强度场，使得颗粒物影响因素作用半径与尺度效应显示化；然后通过粗、细两级步长的双精度筛选变量和尺度组合的搜索空间，降低穷举依赖，避免单一变量、单一尺度主导下的伪精细化，提升常规算力条件下的估计稳健性；最终，以GWR模型输出具有直



A：$PM_{2.5}$抑制区 $PM_{2.5}$ mitigation zone；1：邓城大道-春园路沿线的$PM_{2.5}$强抑制区 Strong $PM_{2.5}$ mitigation zone along the Dengcheng Avenue-Chunyuan Road corridor；2：襄城区汉江-焦柳铁路-岘山-卧龙大桥的$PM_{2.5}$抑制区 $PM_{2.5}$ mitigation zone within the Han River-Jiaoliu Railway-Xianshan Mountain-Wolong Bridge belt in Xiangcheng District；3：襄州区机场路-襄阳大道-汉丹铁路-奔驰大道的$PM_{2.5}$强抑制区 Strong $PM_{2.5}$ mitigation zone within the Jichang Road-Xiangyang Avenue-Handan Railway-Benz Avenue belt in Xiangzhou District；B：PM_{10}抑制区 PM_{10} mitigation zone；4：邓城大道-春园路沿线的PM_{10}强抑制区 Strong PM_{10} mitigation zone along the Dengcheng Avenue-Chunyuan Road corridor；5：襄州区机场路-襄阳大道-汉丹铁路-奔驰大道的PM_{10}抑制区 PM_{10} mitigation zone within the Jichang Road-Xiangyang Avenue-Handan Railway-Benz Avenue belt in Xiangzhou District；6：襄城区汉江-焦柳铁路-岘山-卧龙大桥的PM_{10}抑制区 PM_{10} mitigation zone within the Han River-Jiaoliu Railway-Xianshan Mountain-Wolong Bridge belt in Xiangcheng District.

图9 绿色空间对颗粒物扩散影响的范围和强度分析

Fig. 9 Analysis of the spatial extent and intensity of green spaces' impacts on particulate matter dispersion

接空间解释力的系数场与主导尺度，建立“主导尺度-空间位置-影响强度”的对应关系，从而支撑“分区-分段-分点”的精细化绿地选址空间指引和差异化污染治理对策。然而，本研究存在2点局限：一是研究样本为历史数据，虽然该时段（2018至2019年）监测站点数量最多且数据缺失最少，但是历史数据对应的排放结构具有阶段性特征；二是研究结果以空间归因为主，并且更适用于弱外来输送的稳定气象条件。在未来，还需要对模型进行多情景气象驱动的尺度选择与核带宽优化以及评估绿地规划后的降尘效益。

参考文献 References

[1] 生态环境部.2024中国生态环境状况公报[EB/OL].(2025-11-2)[2025-08-29].https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202506/P020250604527010717462.html.Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2024 Bulletin of China's ecological and environmental conditions [EB/OL].(2025-11-2)[2025-08-29]. https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202506/P020250604527010717462 (in Chinese).

[2] 新华社.持续改善！2024年蓝天碧水“成绩单”出炉[EB/OL].(2025-02-13)[2025-08-29].https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202501/content_6998941. html. Xinhua News Agency. Continuously Improving! “Report Card” for Blue Skies and Clear Waters in 2024 Released [EB/OL].(2025-02-13) [2025-08-29]. https://www. gov. cn/lianbo/bumen/202501/content_6998941.html (in Chinese).

[3] 新华社.政府工作报告[EB/OL].(2025-02-13)[2025-08-29]. https://www. gov. cn/yaowen/liebiao/202503/content_7013163.html.Xinhua News Agency. Government Work Report [EB/OL]. (2025-02-13) [2025-08-29]. https://www.gov. cn/yaowen/liebiao/202503/content_7013163. html (in Chinese).

[4] 生态环境部.生态环境部召开4月例行新闻发布会[EB/OL].(2025-11-2)[2025-08-29].https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk15/202005/t20200515_779537.html.Xinhua News Agency, Ministry of Ecology and Environment of China. The Ministry of Ecology and Environment held its regular press conference in April[EB/OL].(2025-11-2)[2025-08-29]. https://www. mee. gov. cn/xxgk2018/xxgk/xxgk15/202005/t20200515_779537.html.

[5] CORADA K, WOODWARD H, ALARAJ H, et al.A systematic review of the leaf traits considered to contribute to removal of airborne particulate matter pollution in urban areas [J/OL]. Environmental pollution, 2021, 269: 116104 [2025-08-29].https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116104.

[6] BARWISE Y, KUMAR P. Designing vegetation barriers for urban air pollution abatement: a practical review for appropriate plant species selection[J/OL].NPJ climate and atmospheric science, 2020, 3: 12[2025-08-29].https://doi.org/10.1038/s41612-020-0115-3.

[7] HAN D H, SHEN H L, DUAN W B, et al.A review on particulate matter removal capacity by urban forests at different scales [J/OL]. Urban forestry & urban greening, 2020, 48: 126565 [2025-08-29].https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126565.

[8] 戴菲，陈明，傅凡，等.基于城市空间规划设计视角的颗粒物空气污染控制策略研究综述[J].中国园林，2019，35(2)：75-80.DAI F, CHEN M, FU F, et al.A review of control strategies for particulate matter air pollution based on urban space planning and design[J].Chinese landscape architecture, 2019, 35(2): 75-80 (in Chinese with English abstract).

[9] 范域立.住区户外空间受外源性颗粒物影响及提升改善研究[D].武汉：武汉大学，2022.FAN Y L.Study on the influence of exogenous particles on outdoor space of residential area and its improvement[D].Wuhan: Wuhan University, 2022(in Chinese with English abstract).

[10] LIN H, WANG X, JIA C, et al.Estimation of ultrahigh resolution $PM_{2.5}$ in urban areas using satellite and geographic features [J/OL]. Remote sensing, 2025, 17(15): 2609[2025-08-29]. https://doi.org/10.3390/rs17152609.

[11] HANDSCHUH J, ERBERTSEDER T, BAIER F.Systematic evaluation of four satellite aod datasets for estimating $PM_{2.5}$ using a random forest approach[J/OL].Remote sensing, 2023, 15(8): 2064[2025-08-29].https://doi.org/10.3390/rs15082064.

[12] MA Z, 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/OL].Remote sensing of environment, 2022, 269: 112827[2025-08-29]. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112827.

[13] 王伟武，王智伟，梁静宜.我国城市住区风环境研究现状及展望[J].西部人居环境学刊，2021，36(3)：57-64.WANG W W, WANG Z W, LIANG J Y.Research progress and prospect of wind environment in urban settlements in China[J].Journal of human settlements in west China, 2021, 36(3): 57-64 (in Chinese with English abstract).

[14] ZHENG X, CHEN L, YANG J, et al.Simulation framework for early design guidance of urban streets to improve outdoor thermal comfort and building energy efficiency in summer[J/OL].Building and environment, 2023, 228: 109815[2025-08-29]. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109815.

[15] 尹杰，詹庆明.基于GIS和CFD的城市街道通风廊道研究：以武汉为例[J].中国园林，2019，35(6)：84-88.YIN J, ZHAN Q M.Urban street wind path research based on GIS and CFD: a case study of Wuhan [J]. Chinese landscape architecture, 2019, 35(6): 84-88 (in Chinese with English abstract).

[16] BLOCKEN B. Computational fluid dynamics for urban physics: importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations[J]. Building and environment, 2015, 91: 219-245.

[17] ZHU C Y, PRZYBYSZ A, CHEN Y R, et al. Effect of spatial heterogeneity of plant communities on air PM_{10} and $PM_{2.5}$ in an urban forest park in Wuhan, China[J/OL]. Urban forestry & urban greening, 2019, 46: 126487 [2025-08-29]. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126487.

[18] 孙伊湄,朱春阳.基于LUR模型的城市带状绿地冬季降减空气PM_{10}和$PM_{2.5}$效应研究[J].华中农业大学学报,2024,43(6):150-160.SUN Y M, ZHU C Y. Effects of urban greenbelt on mitigating PM_{10} and $PM_{2.5}$ in winter based on land use regression (LUR) model[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(6): 150-160 (in Chinese with English abstract).

[19] 王婧,朱春阳.城市湖泊湿地周边建成环境绿地结构对空气PM_{10}、$PM_{2.5}$的影响[J].中国城市林业,2022,20(5):1-9. WANG J, ZHU C Y. Effects of green spaces structures in built environment around urban lake wetland on atmospheric PM_{10} and $PM_{2.5}$[J]. Journal of Chinese urban forestry, 2022, 20(5): 1-9 (in Chinese with English abstract).

[20] 刘超,金梦怡,朱星航,等.多尺度时空$PM_{2.5}$分布特征、影响要素、方法演进的综述及城市规划展望[J].西部人居环境学刊,2021,36(4):9-18.LIU C, JIN M Y, ZHU X H, et al. Review of patterns of spatiotemporal $PM_{2.5}$, driving factors, methods evolvement and urban planning implications[J]. Journal of human settlements in west China, 2021, 36(4): 9-18 (in Chinese with English abstract).

[21] 谢晓苇,李代超,卢嘉奇,等.基于移动监测数据的不同城市场景下$PM_{2.5}$浓度精细模拟与时空特征解析[J].地球信息科学学报,2022,24(8):1459-1474.XIE X W, LI D C, LU J Q, et al. Fine simulation and analysis of temporal and spatial characteristics of $PM_{2.5}$ concentration distribution in different urban scenarios based on mobile monitoring data[J]. Journal of geo-information science, 2021, 36(4): 9-18 (in Chinese with English abstract).

[22] WANG J, WANG S, LI S. Examining the spatially varying effects of factors on $PM_{2.5}$ concentrations in Chinese cities using geographically weighted regression modeling[J]. Environmental pollution, 2019, 248: 792-803.

[23] 宋洁,周素红,彭伊侬,等.基于移动监测的城市$PM_{2.5}$污染时空模式研究:以广州市中心区为例[J].热带地理,2020,40(2):229-242.SONG J, ZHOU S H, PENG Y N, et al. Analysis of spatio-temporal $PM_{2.5}$ patterns obtained using mobile monitoring: case study conducted in central district of Guangzhou[J]. Tropical geography, 2020, 40(2): 229-242 (in Chinese with English abstract).

[24] 襄阳市统计局.襄阳统计年鉴—2019[R].襄阳:襄阳市统计局,2019. Xiangyang Municipal Bureau of Statistics. Xiangyang statistical yearbook-2019[R]. Xiangyang: Xiangyang Municipal Bureau of Statistics, 2019.

[25] LIN X L, CHAMECKI M, YU X P. Aerodynamic and deposition effects of street trees on $PM_{2.5}$ concentration: from street to neighborhood scale [J/OL]. Building and environment, 2020, 185: 107291 [2025-08-29]. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107291.

[26] ZHAO R, ZHAN L P, YAO M X, et al. A geographically weighted regression model augmented by Geodetector analysis and principal component analysis for the spatial distribution of $PM_{2.5}$[J/OL]. Sustainable cities and society, 2020, 56: 102106 [2025-08-29]. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102106.

[27] LIN Z, JI Y Q, LIN Y, et al. PM_{10} and $PM_{2.5}$ chemical source profiles of road dust over China: composition, spatio-temporal distribution, and source apportionment [J]. Urban climate, 2023, 51: 101672 [2025-08-29]. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101672.

[28] 薛维.建成区对大气颗粒物扩散的影响机理与规划应对研究:以襄阳市中心城区为例[D].武汉:武汉大学,2022. XUE W. Study on the influence mechanism of built-up area on atmospheric particulate matter diffusion and planning countermeasures: a case study of Xiangyang City center[D]. Wuhan: Wuhan University, 2022 (in Chinese with English abstract).

[29] 陈明,胡义,戴菲.城市绿地空间形态对$PM_{2.5}$的消减影响:以武汉市为例[J].风景园林,2019,26(12):74-78.CHEN M, HU Y, DAI F. Influence of urban green space forms on $PM_{2.5}$ reduction: a case study of Wuhan[J]. Landscape architecture, 2019, 26(12): 74-78 (in Chinese with English abstract).

[30] 雷雅凯,段彦博,马格,等.城市绿地景观格局对$PM_{2.5}$、PM_{10}分布的影响及尺度效应[J].中国园林,2018,34(7):98-103. LEI Y K, DUAN Y B, MA G, et al. Influence of urban green landscape pattern on the concentration of $PM_{2.5}/PM_{10}$ and scale effect in Zhengzhou, China[J]. Chinese landscape architecture, 2018, 34(7): 98-103 (in Chinese with English abstract).

[31] JIANG R Y, XIE C K, MAN Z H, et al. Effects of urban green and blue space on the diffusion range of $PM_{2.5}$ and PM_{10} based on LCZ [J/OL]. Land, 2023, 12(5): 964 [2025-08-29]. https://doi.org/10.3390/land12050964.

Near-surface high-density monitoring sensor network-based dispersion pattern of urban-scale particulate matter : taking central urban area of Xiangyang City as an example

XUE Wei[1,2], XIAO Jingxuan[1], ZHU Yuhe[1], MA Xuan[3], FAN Yuli[4], KONG Hong[5], WU Zhonghua[5], SUN Zhihao[6], XU Genyu[7], ZHAN Qingming[8]

1.*School of Digital Construction and Blasting Engineering/State Key Laboratory of Precision Blasting, Jianghan University, Wuhan 430056, China*;
2.*School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, China*;
3.*School of Architecture, Chang' an University, Xi' an 710064, China*;
4.*School of Public Administration/Institute for Territorial Spatial Governance and Green Development of the Yangtze River Basin, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China*;
5.*Xiangyang Ecological Environment Monitoring Center, Hubei Province Department of Ecology and Environment, Xiangyang 441021, China*;
6. *Wuhan Natural Resources Protection and Utilization Center, Wuhan 430014, China*;
7.*School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming 650500, China*;
8.*School of Urban Design/Digital City Research Center, Wuhan University, Wuhan 430072, China*

Abstract　A near-surface high-density sensor network with 146 sites in the central urban area of Xiangyang City, Hubei Province, China, was established to collect high-resolution data on $PM_{2.5}$, PM_{10}, wind speed, and wind direction to solve the problem of difficulty in identifying the dispersion patterns of urban-scale particulate-matter (PM) and the lack of planning feasibility. On this basis, a method of identifying pollution that balances the interpretability of mechanism and the efficiency of computation was proposed. Multi-scale continuous characterization of affecting factors including industrial emissions, fugitive dust, and blue-green spaces was conducted under the constraints of Gaussian diffusion mechanism. A dual-precision nested strategy was proposed to screen key factors. The geographically weighted regression (GWR) was used to analyze the spatial heterogeneity effects of various factors on particulate matter. The results showed that industrial sources clustered in a 1.2-4 km area around thermal power plants and industrial parks, and intensified along the "park-logistics corridor" pathways. The construction sites and freight logistics formed banded high-impact zones along the major transportation axes, and the effect of logistics activities on PM_{10} was significantly higher than that on $PM_{2.5}$. The blue spaces formed about 2-kilometer-wide mitigation belts at the coupling point between the area with low-intensity of development and the main ventilation corridors, while the high-intensity of development weakened its effect. The green spaces generally reduced PM, especially PM_{10}, but short-term benefits was offset by construction disturbances. Based on this, a translation path with a "zone-corridor-node" priority scheme, targeted greening configurations along logistics corridors and park edges, pocket-scale multilayer planting at key nodes, and continuity of low-density layouts and ventilation corridors for planning practice was proposed. It is indicated that the established method achieves a better balance between the interpretability, accuracy, and the computational power compared to the traditional methods of spatial statistics, and can identify key segments of homologous heterogeneity and exogenous overlap.

Keywords　$PM_{2.5}$; PM_{10}; dispersion pattern; geographically weighted regression (GWR); green space

(责任编辑：葛晓霞)