文章编号:1674-2869(2025)06-0689-09

武汉城市三维形态对$PM_{2.5}$空间分布的影响及响应研究

史晨茜[1],刘兰君*[1],周 鹏[2],林奕晨[3],许婉清[1],陈 岸[1],伍嘉诚[1]
1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074;
2. 湖北省战略规划中心,湖北 武汉 430071;
3. 永业行规划勘测设计(湖北)有限公司,湖北 武汉 430000

摘 要:在全球高速城市化发展背景下,城市形态的环境效应已经成为当前的热点研究主题,突破传统二维平面视角的局限,以武汉市主城区为研究对象,以“$PM_{2.5}$空间格局分析—城市三维形态测度—作用机制挖掘”为研究主线,通过构建普通线性回归模型(OLS)、空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM)开展武汉城市三维形态对$PM_{2.5}$空间分布的影响及响应研究。研究结果表明:武汉市主城区$PM_{2.5}$浓度整体呈现“西北高东南低”的空间分布趋势,并具有明显的空间自相关特征。对比OLS、SLM和SEM模型的回归结果与检验参数,SEM拟合结果最优。城市形态显著影响$PM_{2.5}$浓度的空间异质性:路网密度对武汉市主城区$PM_{2.5}$浓度有显著的正向影响;土地利用混合度、武汉市地区生产总值等城市二维形态对$PM_{2.5}$浓度具有显著的负效应;交通可达性、高层高密度城市形态、三维绿量、距江距离等城市三维形态对$PM_{2.5}$浓度具有显著的负效应。通过合理控制城市三维形态,有助于削减城市$PM_{2.5}$浓度,改善城市环境,实现可持续发展。

关键词:武汉市主城区;城市三维形态;$PM_{2.5}$污染;影响因素;空间计量分析
中图分类号:X513 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202412015

Impacts of Wuhan's three-dimensional urban morphology on $PM_{2.5}$ spatial distribution and their interactive effects

SHI Chenxi[1], *LIU Lanjun*[*1], *ZHOU Peng*[2], *LIN Yichen*[3], *XU Wanqing*[1], *CHEN An*[1], *WU Jiacheng*[1]
1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Hubei Strategic Planning Center, Wuhan 430071, China;
3. Yongyehang Planning Survey and Design (Hubei) Co., Ltd, Wuhan 430000, China

Abstract: With the rapid global urbanization, the environmental effects of urban morphology have emerged as a prominent research focus. This study broke through the limitations of traditional two-dimensional analyses by examining Wuhan's main urban area through a tripartite framework——“PM2.5 spatial pattern analysis → three-dimensional (3D) urban morphology quantification → mechanistic interpretation”. Using ordinary least squares model (OLS), spatial lag model (SLM), and spatial error model (SEM), we systematically evaluated the impact of 3D urban morphology on $PM_{2.5}$ spatial distribution. The results demonstrated three key findings regarding $PM_{2.5}$ distribution in Wuhan's main urban area: Firstly, $PM_{2.5}$ concentrations exhibited a distinct spatial pattern characterized by higher levels in northwestern sectors and lower concentrations in southeastern zones, with a statistically significant autocorrelation. Secondly, comparative analysis of regression results and

收稿日期:2024-12-18
基金项目:国家自然科学基金(52278076);湖北省社科基金一般项目(HBSKJJ20233316)
作者简介:史晨茜,硕士研究生。Email:22304010022@stu.wit.edu.cn
***通信作者**:刘兰君,硕士,副教授。Email:11090101@wit.edu.cn
引文格式:史晨茜,刘兰君,周鹏,等.武汉城市三维形态对$PM_{2.5}$空间分布的影响及响应研究[J].武汉工程大学学报,2025,47(6):689-697.

test parameters from OLS, SLM and SEM models indicated that SEM provided the optimal fit. Lastly, the urban morphology significantly affected the spatial heterogeneity of $PM_{2.5}$ concentration through three distinct mechanisms: (1) Road network density showed a significant positive correlation with $PM_{2.5}$ levels; (2) Two-dimensional urban morphology indicators—particularly land-use mix diversity and regional GDP density—demonstrated significant negative associations; (3) Three-dimensional urban features including transportation accessibility, high-density building clusters, 3D green biomass, and proximity to the Yangtze River all exhibited substantial negative effects. These findings suggest that rational control of three-dimensional urban morphology can effectively reduce the concentration of $PM_{2.5}$ in the city, improve the urban environment and achieve sustainable development.

Keywords: main urban area of Wuhan; three-dimensional urban morphology; $PM_{2.5}$ pollution; influencing factors; spatial econometric analysis

随着全球工业化、城市化的进一步推进,城市建设发展与环境保护之间的矛盾不断激化,$PM_{2.5}$污染问题成为各国学者共同关注的重点议题。随着有关$PM_{2.5}$污染研究的不断深入推进,研究者们发现城市$PM_{2.5}$污染不仅与工业能耗和汽车尾气排放有关,其与城市内部形态特征同样具有显著的关联性。城市形态对$PM_{2.5}$空间分布的作用机制复杂,对其内部驱动机制的探讨应结合多维度、多角度综合探讨。目前,有关影响$PM_{2.5}$浓度的城市形态因子主要聚焦于城市用地规模、城市景观格局、社会经济形态等二维形态方面[1-3]。基于研究尺度分析,现有研究主要从国家[4-6]、省份[7-9]、城市[10-12],或者不同区域[13-15]、流域[16-17]、城市群[18-19]等尺度对$PM_{2.5}$污染特征展开研究与分析;基于研究方法分析,现有研究大多数基于统计学方法和空间计量学展开,主流方法包括多元线性回归、地理加权回归、空间回归、随机森林模型等[20-21]。城市形态已被证实对$PM_{2.5}$浓度分布变化具有显著影响,利用塑造城市形态的城市规划手段缓解$PM_{2.5}$污染问题,是应对城市大气污染问题的新思路[22]。但现有研究表明,目前多数关于城市形态与$PM_{2.5}$空间分布的关联性和作用机制的研究仍停留在城市二维平面层面,鲜少考虑城市三维空间的形态异质性。随着地理信息技术和高分辨率遥感技术的进一步发展,城市立体形象的刻画和三维空间分异研究有了更科学的理论和技术基础。尤其是随着城市立体化的高速发展,城市研究视角从二维到三维的拓展与转变是大势所趋。

基于此,本文以武汉市主城区为研究对象,突破二维视角,围绕"$PM_{2.5}$空间格局—城市三维形态测度—作用机制挖掘"为研究主线,开展武汉城市三维形态对$PM_{2.5}$空间分布的影响及响应研究。本研究首先分析武汉市主城区$PM_{2.5}$空间分布格局及空间自相关特征,然后研究武汉城市三维形态对$PM_{2.5}$空间分布的影响机制,最后立足清洁空气品质目标,对武汉城市三维形态布局开展优化策略研究。

1 实验部分

1.1 研究区

武汉市地处中国腹地中心,是长江经济带核心城市。武汉市主城区是中国中部地区人口、经济、产业、用地高度集聚的区域,是新时期高速推进城市现代化、立体化建设的标榜。

为实现精细化研究,研究区设定为武汉市主城区,如图1(a,b,c)所示。考虑可获取数据的分辨率,将研究区基本单元设定为1 km ×1 km栅格单元。

1.2 数据来源

1.2.1 $PM_{2.5}$数据来源与预处理 本文的研究重点为城市三维空间形态,2021年武汉市冬季受静稳天气影响显著,逆温现象频发,大气扩散条件较差,$PM_{2.5}$浓度通常达到全年峰值;此外,冬季集中供暖及工业排放稳定,有利于排除其他季节(如春季沙尘、夏季光化学反应)的干扰,更聚焦于城市形态对污染分布的内在机制。因此,本研究选择以2021年12月份作为研究期。

1.2.2 城市三维形态测度指标数据来源与预处理 本研究主要从城市功能用地规模、土地利用景观格局、社会经济形态、建筑景观格局、立体建筑形态及立体景观形态等角度探究$PM_{2.5}$浓度变化的影响因素和内在驱动机制。城市三维形态测度的原始数据涵盖以下几类:城市土地使用功能分类信息(源自星云数据服务平台)、土地覆盖与利用分类数据(采用中国年度土地覆盖数据集)、社会经济统计资料,以及综合建筑大数据集(通过水经注万能地图下载器获取)。其他数据来源如表1所示。

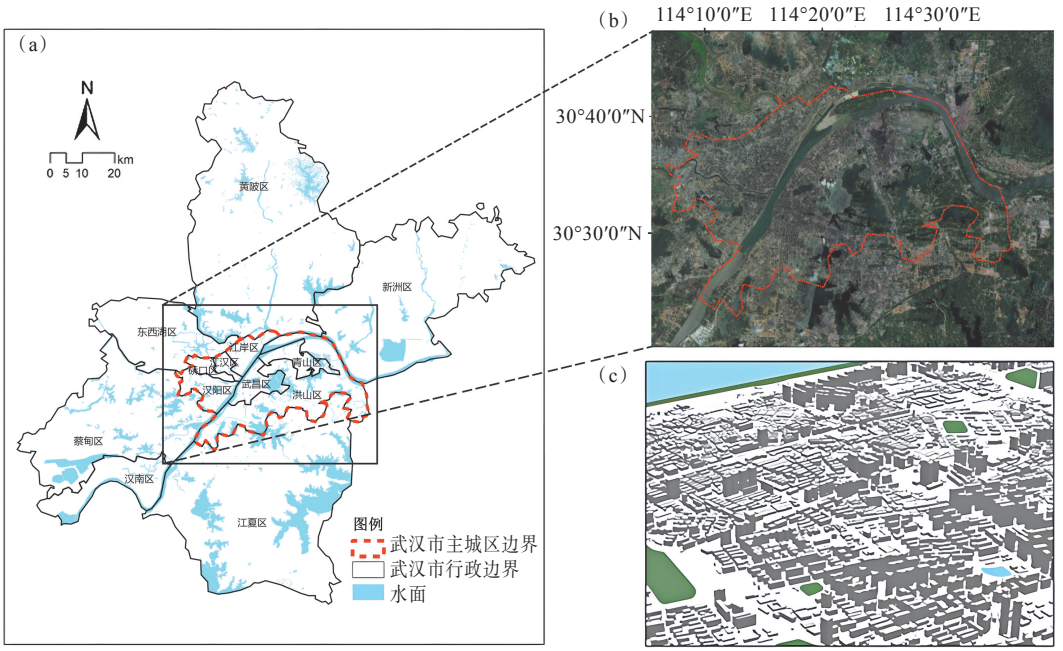

图1　研究区概况：(a)武汉市主城区范围，(b)武汉市主城区遥感影像，(c)武汉市主城区三维形态

Fig. 1　Overview of the study area: (a) the scope of the main urban area of Wuhan, (b) remote sensing images of the main urban area of Wuhan, (c) three-dimensional morphology of the main urban area of Wuhan

表1　其他数据来源

Table 1　Other data sources

数据类别	数据来源	说明
Landsat遥感影像数据	地理空间数据云平台	影像范围：武汉市全域
高精度绿地数据	中国31个主要城市细粒度城市绿地数据集(UGS-1m)	数据分辨率近1.1 m
$PM_{2.5}$月均浓度数据	国家地球系统科学数据中心2022年发布的《中国高分辨率高质量逐月$PM_{2.5}$数据集(1 km，2000—2021年)》	—

2　研究方法

2.1　武汉城市三维形态测度指标体系构建

本研究突破传统城市形态二维平面视角局限，耦合二维形态(各类城市功能用地规模、土地利用景观格局、社会经济形态)与三维形态(建筑景观格局、立体建筑形态、立体景观形态、空间距离要素)等7类一级指标，选取30个二级指标，构建武汉城市三维形态测度体系。

岳峰等[23]的研究表明，利用叶面积指数(leaf area index，LAI)度量三维绿量是可行的，并且武汉市基于比值植被指数(relative vegetation index，RVI)与LAI建立的三维绿量估算方程拟合效果最好。其中RVI通过Landsat影像的近红外与红光波段计算，原影像分辨率为30 m，经重采样至1 km栅格匹配研究单元。LAI的计算公式为：

$$I_{LAI} = 0.012I_{RVI}^{3} - 0.207I_{RVI}^{2} + 2.061I_{RVI} - 0.508 \quad (1)$$

式(1)中：I_{LAI}为叶面积指数；I_{RVI}为比值植被指数。

2.2　空间回归模型构建

研究分别采用普通线性回归模型(ordinary least squares，OLS)、空间滞后模型(spatial lag model，SLM)与空间误差模型(spatial error model，SEM)，对武汉城市三维形态测度与$PM_{2.5}$数值进行模型分析。

2.2.1　OLS构建　OLS是最常见的回归模型，其模型表达式为：

$$Y_{OLS} = \sum_{j=1}^{n} \alpha_j X_j + \varphi_j \quad (2)$$

式(2)中：Y_{OLS}表示被解释变量；X_j表示第j个自变量；n是自变量的总数；α_j表示与X_j对应的回归系数；φ_j表示误差项。

2.2.2　SLM构建　SLM是考虑因变量的空间相关性的自回归模型，其模型表达式为：

$$Y_{SLM} = \beta \boldsymbol{W} y + \boldsymbol{X} \gamma + \boldsymbol{\varphi} \quad (3)$$

式(3)中：Y_{SLM}表示被解释变量；$\boldsymbol{X}$表示$m \times n$维自

表2 武汉市主城区城市三维形态测度指标体系

Table 2 Three-dimensional morphology measurement index system of Wuhan main urban area

维度	一级指标	二级指标	指标含义
二维	X_1:各类城市功能用地规模	X_{1-1}:居住用地规模	居住用地面积(hm^2)
		X_{1-2}:商业服务业设施用地规模	商业服务业设施用地面积(hm^2)
		X_{1-3}:工业用地规模	工业用地面积(hm^2)
		X_{1-4}:公共管理与公共服务设施用地规模	公共管理与公共服务设施用地面积(hm^2)
		X_{1-5}:绿地与广场用地规模	绿地与广场用地面积(hm^2)
		X_{1-6}:水域规模	水域用地面积(hm^2)
		X_{1-7}:路网密度	城市道路总长度与单元总面积的比值(km/km^2)
	X_2:土地利用景观格局	X_{2-1}:土地利用混合度	不同类型用地的比例分布,用香农多样性指数表示
		X_{2-2}:斑块密度	每100 hm^2用地斑块的数量,反映用地破碎化程度(个)
		X_{2-3}:周长面积分维数	用地斑块不规则形状的非整数维数;1≤周长面积分维数≤2
	X_3:社会经济形态	X_{3-1}:人口密度	1 km范围内的人口数量(人/km^2)
		X_{3-2}:第二产业产值	区域第二产业的生产总值(亿元)
		X_{3-3}:地区生产总值	地区所有常驻生产活动的最终生产总值(亿元)
三维	X_4:建筑景观格局	X_{4-1}:建筑密度	建筑物的基底面积总和占单元总面积的比例(%)
		X_{4-2}:平均斑块面积	建筑斑块的平均面积(m^2)
		X_{4-3}:最大斑块指数	最大建筑斑块占单元总面积的比例(%)
		X_{4-4}:聚集度	建筑斑块的集聚指数;0 < 聚集度≤100,聚集度越小,建筑越分散
		X_{4-5}:交通可达性	研究单元内的交通通达程度
	X_5:立体建筑形态	X_{5-1}:平均建筑高度	建筑的平均高度(m)
		X_{5-2}:最大建筑高度	建筑的最高高度(m)
		X_{5-3}:高层高密度城市形态	高层数和高密集度的复合建筑形态,以平均建筑高度大于21 m,且建筑密度大于16%为判定标准;取值为0和1,0表示不属于高层高密度城市形态,1表示属于高层高密度城市形态
		X_{5-4}:建筑起伏度	研究单元内建筑高度的变异程度,取值越大,表示建筑高度变化越剧烈
		X_{5-5}:总建筑体积	研究单元内建筑体积总量(m^3)
		X_{5-6}:容积率	研究单元内建筑总面积与单元用地面积的比值
		X_{5-7}:占空比	研究单元内建筑体积总量与其最大建筑高度所在范围的空间总体积的比值
		X_{5-8}:天空开阔度	研究单元内地面上指定一点可见天空的面积与整个天空圆顶面积的比值
	X_6:立体景观形态	X_{6-1}:三维绿量	研究单元内所有生长植物的叶片面积总量(m^2)
		X_{6-2}:绿量-绿地面积比	研究单元内三维绿量与绿地面积的比值,用以描述区域植被高度差异
		X_{6-3}:建筑-植物体量比	研究单元内总建筑面积与三维绿量的比值
	X_7:空间距离要素	X_{7-1}:距江距离	栅格单元中心点至最近江岸的欧氏距离(km)

变量矩阵；$\boldsymbol{W}$表示$K \times K$维空间权重矩阵；$\boldsymbol{W}y$表示空间滞后因子；β表示空间效应系数；γ表示自变量的系数；$\boldsymbol{\varphi}$表示$n \times 1$维随机误差向量。

2.2.3　SEM构建　SEM是考虑随机干扰项（误差项）存在空间相关性的一种空间回归模型，认为误差项对因变量存在重要的空间影响。其模型表达式为：

$$Y_{\mathrm{SEM}} = \boldsymbol{X}\rho + \boldsymbol{\epsilon}, \boldsymbol{\epsilon} = \omega \boldsymbol{W}\boldsymbol{\epsilon} + \varepsilon \quad (4)$$

式（4）中：Y_{SEM}为被解释变量；$\boldsymbol{X}$表示$m \times n$维自变量矩阵；ρ表示自变量系数；$\boldsymbol{\epsilon}$表示$K \times 1$维随机误差向量；ω表示误差项的空间自回归系数；$\boldsymbol{W\epsilon}$代表空间权重矩阵与误差项的乘积，表示误差项的空间自相关；ε表示SEM的误差项。

空间计量模型SLM和SEM充分考虑了变量的空间自相关性，二者的区别在于：SLM的空间滞后项作为模型的解释变量，是由空间权重矩阵与因变量的乘积构成；而SEM的空间误差项是由空间权重矩阵与误差项乘积构成，仅作为误差项的解释变量，而不作为因变量的解释变量。

3　结果与讨论

3.1　武汉市主城区三维形态分析

使用ArcGIS10.8对矢量数据用同一坐标系重新投影后，采用克里金插值法空间化处理离散数据并与矢量数据配准，在ArcGIS中将城市形态空间数据与研究区单元进行空间连接。在城市功能用地规模中，城市居住用地规模最大，沿长江两岸分布，呈现显著的空间集聚性；工业用地连通性和整体性最强，其分布以青山区为主。可以看出主城区中部、江岸区、江汉区、武昌区西部和青山区的土地利用混合度指数、斑块密度和周长面积分维数指数均较低，此类区域的用地多样性和景观形状复杂程度较低。武汉市主城区人口密度、路网密度和地区生产总值的空间分布具有一定的相似性，均呈现“西高东低”、沿长江两岸集聚的趋势，如图2所示。

城市三维形态视角，建筑密度在长江西侧江岸区、江汉区、硚口区和汉阳区北部以及长江东侧青山区、武昌区及洪山区西部较高，平均斑块面积在汉阳区南部和青山区较高。武汉市主城区城市三维空间沿长江两岸立体空间开发强度最高。三维绿量较高的区域主要集中在洪山区和汉阳区西南部，与绿地与广场用地规模的分布空间相关性显著，且洪山区中部有众多生态公园，立体绿化建设程度高，如图3所示。

3.2　武汉城市三维形态对$PM_{2.5}$空间分布的影响机制研究

3.2.1　空间计量模型实验结果　以武汉市主城区$PM_{2.5}$浓度为因变量，以$X_{1\text{-}7}$、$X_{2\text{-}1}$、$X_{3\text{-}3}$、$X_{4\text{-}5}$、$X_{5\text{-}3}$、$X_{6\text{-}1}$、$X_{7\text{-}1}$为自变量构建空间计量模型，检验结果如表3所示。

为确定本研究适宜使用的空间计量模型方法，先采用OLS对模型进行估计，然后进行拉格朗日乘数（Lagrange multiplier，LM）检验以及稳健拉格朗日乘数（robust Lagrange multiplier，RLM）检验。其中，LM检验输出的LM-lag和LM-err统计量分别用于检验空间滞后模型和空间误差模型；robust Lagrange multiplier-lag（Robust LM-lag）和robust Lagrange multiplier-err（Robust LM-err）是对LM检验的稳健性补充，其值均由RLM检验输出。若LM-lag统计显著性高于LM-err，同时Robust LM-lag显著性高于Robust LM-err，则使用空间滞后模型SLM。反之，LM-lag统计显著性低于LM-err，同时Robust LM-lag显著性低于Robust LM-err，则使用空间误差模型SEM。

由于Robust LM-err在0.01的水平显著，故选用SEM模型进行后续研究。

为了便于比较和验证，本研究同时给出OLS、SEM和SLM的回归结果，包括回归系数、p值、常数（constant，cons）、对数似然值（Log-Like lihood）、赤池信息量准则（Akaike information criterion，AIC）值和施瓦茨准则（Schwarz criterion，SC）值，如表4所示。

根据回归结果，SLM和SEM的空间回归系数均在0.01的水平显著，说明武汉市主城区$PM_{2.5}$浓度分布确实存在显著的空间自相关性。通常，模型的Log-Like lihood值越大，且AIC值和SC值越小时，模型解释力越强。因此，SEM的解释力更好，也与拉格朗日检验和稳健性拉格朗日检验的结果相吻合；同时，SEM的拟合优度R^2也最优。综上，本研究采用SEM进行分析。

根据SEM分析结果，$X_{1\text{-}7}$、$X_{2\text{-}1}$、$X_{3\text{-}3}$、$X_{4\text{-}5}$、$X_{5\text{-}3}$、$X_{6\text{-}1}$、$X_{7\text{-}1}$等城市三维形态指标因子对$PM_{2.5}$污染有显著影响。其中$X_{1\text{-}7}$对$PM_{2.5}$浓度呈现显著的正向影响，说明科学规划路网、合理控制路网密度、控制道路通车量，有利于改善城市$PM_{2.5}$污染；$X_{2\text{-}1}$、$X_{3\text{-}3}$、$X_{4\text{-}5}$、$X_{5\text{-}3}$、$X_{6\text{-}1}$、$X_{7\text{-}1}$对$PM_{2.5}$浓度具有显著的负效应，说明提高城市内部土地利用类型的多样化程度、推进社会经济绿色发展、提升道路通行效率，合理设计城市建筑高度变化，提高城市立体绿

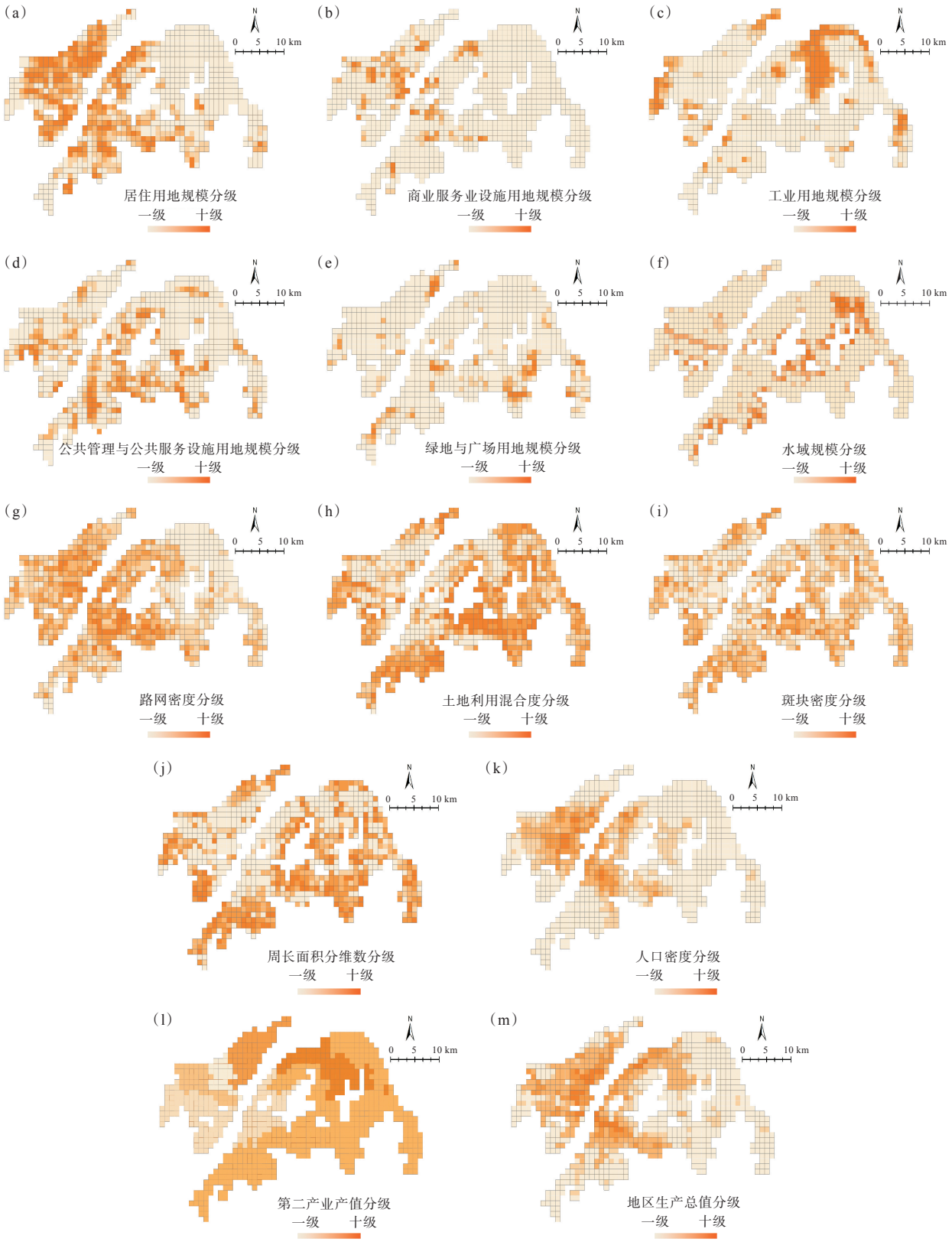

图2 武汉市主城区城市二维形态测度指标空间分布图:(a)居住用地规模,(b)商业服务业设施用地规模,(c)工业用地规模,(d)公共管理与公共服务设施用地规模,(e)绿地与广场用地规模,(f)水域规模,(g)路网密度,(h)土地利用混合度,(i)斑块密度,(j)周长面积分维数,(k)人口密度,(l)第二产业产值,(m)地区生产总值

Fig. 2 Spatial distribution of 2D urban morphology metrics in Wuhan's main urban area:(a) residential land scale,(b) commercial service facilities land scale,(c) industrial land scale,(d) public management and public service facilities land scale,(e) green space and square land scale,(f) water area scale,(g) road network density,(h) land use mixing degree,(i) patch density (j) perimeter area fractal dimension,(k) population density,(l) secondary industry output value,(m) gross regional product

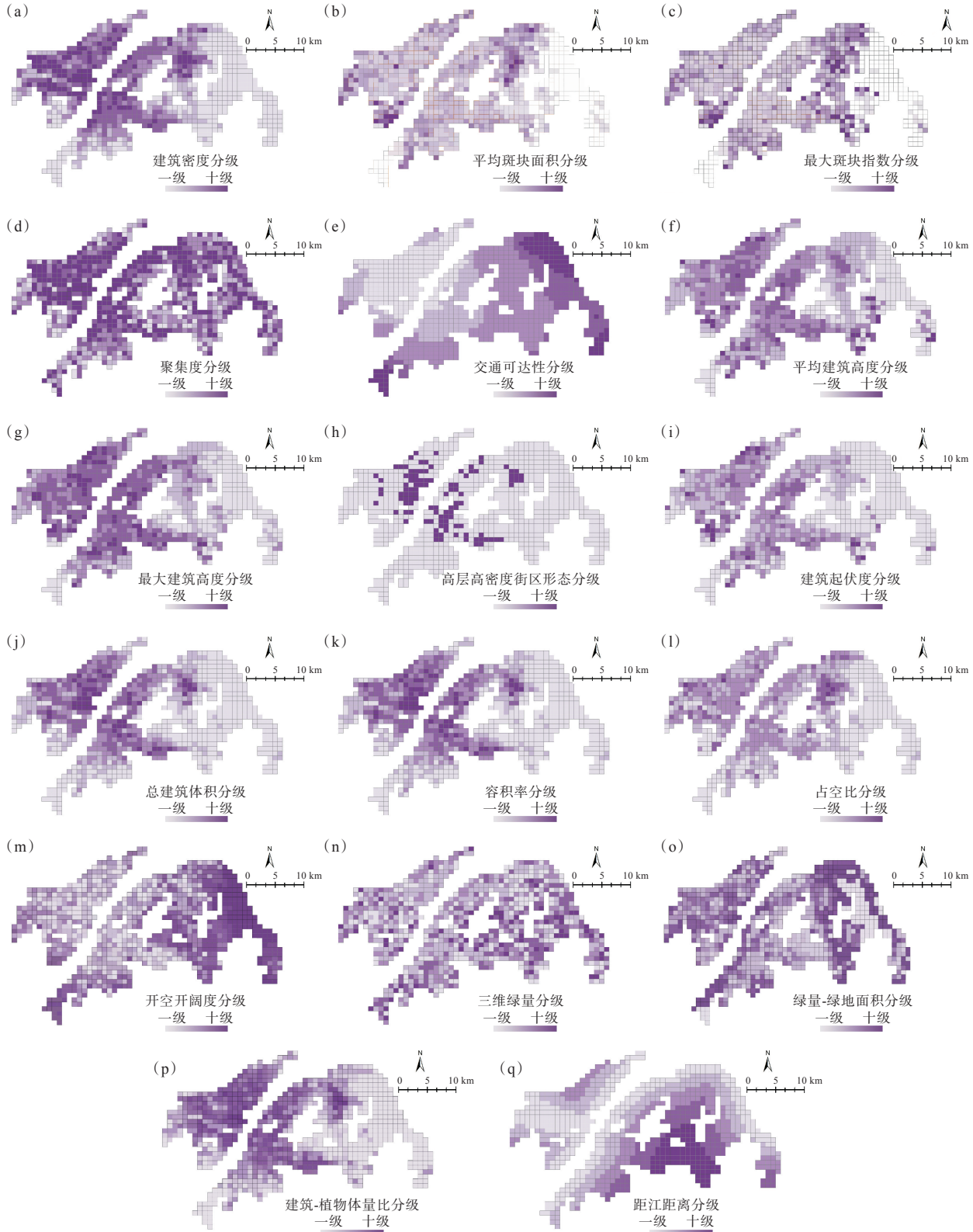

图3　武汉市主城区城市三维形态测度指标空间分布图：(a)建筑密度，(b)平均斑块面积，(c)最大斑块指数，(d)聚集度，(e)交通可达性，(f)平均建筑高度，(g)最大建筑高度，(h)高层高密度城市形态，(i)建筑起伏度，(j)总建筑体积，(k)容积率，(l)占空比，(m)天空开阔度，(n)三维绿量，(o)绿量-绿地面积比，(p)建筑-植物体量比，(q)距江距离

Fig. 3　Spatial distribution of 3D urban morphology metrics in Wuhan's main urban area: (a) building density, (b) average patch area, (c) maximum patch index, (d) aggregation, (e) traffic accessibility, (f) average building height, (g) maximum building height, (h) high-rise high density urban morphology, (i) building undulation, (j) total building volume, (k) floor area ratio, (l) duty cycle, (m) sky openness, (n) three-dimensional green biomass, (o) green biomass-green area ratio, (p) building-plant volume ratio, (q) distance from river

表3 空间计量模型拉格朗日乘数检验结果

Table 3 Lagrange multiplier test results for spatial econometric model

检验指标	检验统计量	p值
LM-lag	56.736**	0.013
LM-err	43.257***	0.004
Robust LM-lag	23.360	0.258
Robust LM-err	12.482***	0.003

注:**、***分别表示在0.05、0.01的水平显著。

表4 OLS、SEM、SLM模型回归结果

Table 4 Regression results of OLS, SEM, and SLM models

变量	OLS		SEM		SLM	
	回归系数	p值	回归系数	p值	回归系数	p值
$X_{1\text{-}7}$	−0.066**	0.031	0.029**	0.012	0.013	0.188
$X_{2\text{-}1}$	−0.097***	0.000	−0.015*	0.072	−0.019***	0.006
$X_{3\text{-}3}$	0.060*	0.069	−0.037***	0.006	−0.010	0.330
$X_{4\text{-}5}$	−0.290***	0.000	−0.170***	0.002	−0.018**	0.027
$X_{5\text{-}3}$	0.023	0.115	−0.010**	0.043	−0.005	0.304
$X_{6\text{-}1}$	−0.085***	0.000	−0.014**	0.056	−0.020***	0.008
$X_{7\text{-}1}$	−0.215***	0.000	−0.252***	0.000	−0.017***	0.008
cons	0.664***	0.000	0.587***	0.000	73.935***	0.000
R^2	0.428		0.944		0.942	
Log-Likelihood	603.742		1 489.787		1 484.34	
AIC	−1 191.48		−2 963.57		−2970.67	
SC	−1 153.38		−2 925.47		−2937.81	

注:*、**、***分别表示在0.10、0.05、0.01的水平显著。

化建设强度,合理控制$PM_{2.5}$排放点与江岸、水岸等冬季逆温现象多发地带的距离,对降低城市$PM_{2.5}$浓度具有一定积极作用。

3.2.2 城市三维形态对$PM_{2.5}$空间分布的影响探究 各类城市功能用地规模与土地利用景观格局对$PM_{2.5}$污染的影响。武汉市主城区路网密度对$PM_{2.5}$浓度有正向影响,通过优化路网排布,降低路网密度,可减少汽车尾气排放、降低$PM_{2.5}$浓度。武汉市主城区土地利用混合度对$PM_{2.5}$浓度有负向影响,说明复合用地模式可降低$PM_{2.5}$浓度。江汉区、武昌区等老城区的空气状况佐证了该观点:这些区域用地类型单一,斑块规整,单一种类建设活动持续产生的污染难以通过其他用地类型的功能稀释,进而导致该地区$PM_{2.5}$浓度相对较高。

城市社会经济形态对$PM_{2.5}$污染的影响。武汉市主城区地区生产总值对$PM_{2.5}$浓度有负向影响,表明社会经济绿色发展带来的产业结构升级、清洁技术应用、严格环境监管以及公众环保意识提升等多维效果可系统性降低污染排放强度,实现经济增长与空气质量改善的协同效应。

城市建筑景观格局对$PM_{2.5}$污染的影响。武汉市主城区建筑交通可达性对$PM_{2.5}$浓度有负向影响。高可达性区域路网、建筑布局规整,可形成有效通风廊道,使近地面风速提升,促进污染物扩散,$PM_{2.5}$浓度较低。同时交通可达性提升有利于减少机动车怠速时间,直接降低局地$PM_{2.5}$排放强度。建议大力推广电动汽车,同步建设BRT快速公交走廊,并在主干道部署绿波通行系统,优化交通流组织,降低汽车怠速状态下污染物排放量,全面提升城市通风与减排效能。

城市立体建筑形态对$PM_{2.5}$污染的影响。武汉市主城区的高层高密度形态对$PM_{2.5}$浓度有负效应,高层建筑群以建筑立面为根据,改变局部风场结构,促进垂直方向的空气流动,加速污染物的垂直扩散,减少地面$PM_{2.5}$的积聚;高密度开发能集中能源供应和配套设施,减少分散式排放源,并有利于集中治理单位面积的污染物排放总量。因此,应开展合理的城市规划与建筑布局,避免过于封闭的建筑布局。

城市立体景观形态对$PM_{2.5}$污染的影响。武汉市主城区三维绿量被证实对武汉市主城区$PM_{2.5}$浓度具有显著的负效应。植物绿化对大气污染物具有吸收和净化作用,城市立体空间的景观生态廊道也对改善城市微气候和促进大气环流具有显著积极作用,故可考虑在城市绿化建设过程中提高城市三维层面的绿化总量,在有限的城市用地中增大城市绿容积率,提升城市绿化生态功能水平。

城市空间距离要素对$PM_{2.5}$污染的影响。武汉市主城区距江距离对武汉市主城区$PM_{2.5}$浓度具有显著的负效应。长江与汉江水面形成天然通风廊道,可促使污染物水平扩散;同时近江区域相对湿度较内陆高,对气溶胶有湿沉降效果,故在城市规划与用地规划过程中注重水岸开阔空间的穿插,积极打造开阔水域通风廊道与气溶胶沉降空间,提升城市自净与污染拦截能力。

4 结 论

本文以武汉市主城区为研究对象,突破传统城市形态二维平面视角的局限,耦合二维城市形态与三维城市形态,挖掘城市三维形态对$PM_{2.5}$空间分布的影响机制。

(1)武汉市主城区$PM_{2.5}$浓度呈“西北高东南低”分布,长江中北部区域浓度最高,向外递减。

存在显著空间自相关，高浓度主要集聚于江岸、江汉、硚口东部、武昌和青山西部。

（2）构建OLS、SLM和SEM模型，SEM结果最优。城市三维形态显著影响$PM_{2.5}$浓度空间异质性。路网密度对$PM_{2.5}$浓度有正向影响；地区生产总值、高层高密度形态、土地利用混合度、交通可达性、距江距离和三维绿量有负效应。合理控制城市形态要素可降低$PM_{2.5}$浓度。

（3）城市形态影响$PM_{2.5}$污染多样。提出武汉城市三维形态布局优化策略：打造多中心城市结构，优化交通布局，推进产业结构转换，优化建筑空间组织，提升三维绿容积率。

参考文献

[1] 叶深，王鹏，黄祎，等.长三角城市群城市空间形态对$PM_{2.5}$与O_3污染空间异质性特征的影响研究[J].生态环境学报，2023，32(10)：1771-1784.

[2] 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.

[3] BADACH J，WOJNOWSKI W，GĘBICKI J. Spatial aspects of urban air quality management：estimating the impact of micro-scale urban form on pollution dispersion [J]. Computers，Environment and Urban Systems，2023，99：101890.

[4] 孙梦竹，杨昆，杨玉莲，等.基于MODIS的中国$PM_{2.5}$污染时空分布特征研究[J].环境科学与技术，2017，40(11)：53-58.

[5] 韩婧，李元征，李锋.2000—2015年中国$PM_{2.5}$浓度时空分布特征及其城乡差异[J].生态学报，2019，39(8)：2954-2962.

[6] 宋俊.中国$PM_{2.5}$污染影响因素及健康风险研究[D].济南：山东师范大学，2024.

[7] 刘芮男，寇星霞，高怡，等.近年来云南省$PM_{2.5}$浓度变化趋势与潜在区域来源分析[J].气候与环境研究，2023，28(5)：509-517.

[8] 李飞，董珑，孔少杰，等.我国省域CO_2-$PM_{2.5}$-O_3时空关联效应与协同管控对策[J].中国环境科学，2023，43(12)：6246-6260.

[9] YANG Y，CHRISTAKOS G. Spatiotemporal characterization of ambient $PM_{2.5}$ concentrations in Shandong Province (China) [J]. Environmental Science & Technology，2015，49(22)：13431-13438.

[10] 陈美娟，刘静，刘利民，等.基于MODIS数据的沈阳市$PM_{2.5}$反演研究[J].环境科学与技术，2016，39(12)：87-93.

[11] 刘迅，廖珊慧，李智恒，等.基于MSPA分析绿地形态空间格局对$PM_{2.5}$的消退作用——以广州市、深圳市为例[J].生态科学，2024，43(3)：186-195.

[12] YU L D，WANG G F，ZHANG R J，et al. Characterization and source apportionment of $PM_{2.5}$ in an urban environment in Beijing [J]. Aerosol and Air Quality Research，2013，13(2)：574-583.

[13] 陈辉，厉青，王中挺，等.利用MODIS资料监测京津冀地区近地面$PM_{2.5}$方法研究[J].气象与环境学报，2014，30(5)：27-37.

[14] 施婷婷，王帅，杨立娟，等.中国华东地区$PM_{2.5}$浓度时空变化及与景观格局关联研究[J].遥感技术与应用，2024，39(2)：435-446.

[15] DENG C X，QIN C Y，LI Z W，et al. Spatiotemporal variations of $PM_{2.5}$ pollution and its dynamic relationships with meteorological conditions in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Chemosphere，2022，301：134640.

[16] 徐建辉，江洪.长江三角洲$PM_{2.5}$质量浓度遥感估算与时空分布特征[J].环境科学，2015，36(9)：3119-3127.

[17] HO K F，HO S S H，LEE S C，et al. Summer and winter variations of dicarboxylic acids，fatty acids and benzoic acid in $PM_{2.5}$ in Pearl Delta River Region，China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics，2011，11(5)：2197-2208.

[18] 巫燕园，刘逸凡，汤蓉，等.中国特大城市群$PM_{2.5}$污染及健康负担的时空演变特征[J].南京大学学报(自然科学)，2024，60(1)：158-167.

[19] 张军，刘磊玉，张腾飞，等.中国城市群$PM_{2.5}$人口暴露风险时空格局及其驱动机制[J].环境科学，2025，46(8)：5000-5012.

[20] HUANG C Y，HU T T，DUAN Y S，et al. Effect of urban morphology on air pollution distribution in high-density urban blocks based on mobile monitoring and machine learning [J]. Building and Environment，2022，219：109173.

[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.

[22] 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，2020，54：101941.

[23] 岳峰，傅凡，戴菲，等.基于遥感反演的特大城市颗粒物浓度与三维绿量相关性研究[J].中国园林，2021，37(3)：83-88.

本文编辑：苗　变