

济南市大气PM₁₀、PM_{2.5}时空分布特征与城市街区形态关联分析

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Atmospheric PM₁₀ and PM_{2.5} and Correlation Analysis with Urban Block Morphology in Jinan City

肖华斌^{1,2} 许宇彤^{1,2} 王子康^{1,2} 张小平^{1,2} 李 杰^{3*}
XIAO Huabin^{1,2} XU Yutong^{1,2} WANG Zikang^{1,2} ZHANG Xiaoping^{1,2} LI Jie^{3*}

(1. 山东建筑大学建筑城规学院, 济南 250101; 2. 智慧韧性景观与低碳生态技术济南市工程研究中心, 济南 250101; 3. 山东农业工程学院, 济南 250100)

(1. School of Architecture and Urban Planning, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong, China, 250102; 2. Jinan Engineering Research Center of Smart-Resilient Landscape and Low-Carbon Ecological Technology, Jinan, Shandong, China, 250101; 3. Shandong Agriculture and Engineering University, Jinan, Shandong, China, 250100)

文章编号: 1000-0283(2024)03-0121-10

DOI: 10. 12193 /j. laing. 2024. 03. 0121. 014

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2023-09-21

修回日期: 2023-12-01

摘 要

高密度城市空间的颗粒物浓度分布对居民健康和环境的可持续发展具有重要影响。然而, 当前研究多集中在中宏观尺度, 且不同季节背景对城市形态与颗粒物浓度之间定量关系的影响尚存争议。基于2021年济南市主城区65个空气质量监测站的PM_{2.5}和PM₁₀浓度实时观测数据, 分析了不同季节下城市街区形态对颗粒物浓度(PM_{2.5}和PM₁₀)的影响。结果表明:(1)颗粒物浓度呈双峰型日变化, 且具有显著的U形逐月变化规律, PM_{2.5}呈冬季高夏季低、春秋两季居中, PM₁₀呈春季高夏季低、秋冬两季居中的季节性变化特征, 且呈东南低、西北高的空间分布格局, 高污染区域集中于交通和建筑密集区域, 低污染区域主要分布于大型城市绿地旁。(2)城市街区形态对颗粒物的影响具有明显的季节分异性。PM_{2.5}与绿色空间指标在4个季节的相关性均十分显著, 与绿地覆盖率(GCR)、绿地斑块形状指数(MSI)和绿地最大斑块指数(LPI)呈负相关性, 与绿地斑块密度(PD)呈正相关, 并且PM_{2.5}仅在秋冬季与建筑形态指标相关关系显著, 其中建筑密度(BD)、建筑平均高度(AHV)和建筑平均体积(AV)是最具影响力的指标。PM₁₀仅在春冬两季与绿色空间指标显著相关, GCR和MSI产生的影响较大, 并且与BD、AHV和容积率(FAR)等建筑形态指标仅在秋冬季节相关性显著。

关键词

PM₁₀; PM_{2.5}; 时空特征; 街区形态; 关联分析

Abstract

The distribution of particulate matter concentrations in high-density urban spaces has important implications for the health of the population and the sustainability of the environment. However, most of the current academic research focuses on the meso-macro scale, and the influence of different seasonal contexts on the quantitative relationship between urban form and particulate matter concentrations is still controversial. In this study, the effects of urban neighborhood patterns on particulate matter concentrations under different seasons were analyzed based on real-time observations of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations at 65 air quality monitoring stations in the main urban area of Jinan City in 2021. The results show that: (1) The particulate matter concentration shows a bimodal daily change, and has a significant U-shaped change rule month by month, the PM_{2.5} concentration shows a high in winter and low in summer, and is centered in spring and autumn, the PM₁₀ shows a high in spring and low in

肖华斌

1980年生/男/山东泰安人/博士/教授/
研究方向为国土景观保护与生态修复、健康
人居环境数智化设计

许宇彤

1998年生/女/河北廊坊人/在读硕士研究
生/研究方向为国土景观保护与生态修复

李 杰

1979年生/男/山东泰安人/硕士/副教授/
研究方向为乡村景观设计、健康人居环境数
智化设计

*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: 370542215@qq.com

基金项目:

山东省自然科学基金面上项目“城市复杂建成环境下绿色基础设施组合模式降温效能协同与优化调控研究”(编号: ZR2023ME108); 山东省自然科学基金面上项目“黄河下游城乡水适应景观演变对生态系统服务的影响研究”(编号: ZR2023ME166); 山东省高等学校青创科技支持计划“泰山区域‘山水林田湖草生命共同体’高效韧性服务提升与生态安全格局构建研究”(编号: 2020KJG004); 山东省高等学校青创科技支持计划“生态系统服务与居民福祉耦合的黄河流域下游生态空间评估与优化研究——以大汶河流域为例”(编号: 2022KJ202)

summer, and centered in autumn and winter, and shows a spatial distribution pattern with a low in the southeast direction and a high in the northwest direction, and the high-pollution area is concentrated in the traffic and high-pollution areas are concentrated in traffic and building-intensive areas, and low-pollution areas are mainly distributed next to large urban green areas. (2) There is a clear seasonal variability in the effect of neighborhood patterns on particulate matter concentrations in the city. In all seasons, $PM_{2.5}$ was significantly correlated with green space indicators, showing negative correlation with green space coverage (*GCR*), green space patch shape index (*MSI*), and green space maximum patch index (*LPI*), and positive correlation with green space patch density (*PD*), and $PM_{2.5}$ was significantly correlated with building morphology indicators only in the fall and winter seasons, in which the building density (*BD*), average building height (*AHV*), and average building volume (*AV*) were the most influential indicators. PM_{10} was significantly correlated with the green space indicators only in the spring and winter seasons. PM_{10} was significantly correlated with green space indicators only in spring and winter, *GCR* and *MSI* were more influential, and the correlation with building form indicators such as *BD*, *AHV*, and floor area ratio (*FAR*) was significant only in fall and winter.

Keywords

PM_{10} ; $PM_{2.5}$; spatial-temporal characteristics; block form; correlation analysis

城市景观的快速变化和人造热源排放加剧致使大气污染日益突显，对人类健康、植被生长和环境气候具有重要影响。世界卫生组织提出空气污染是人类健康面临的最大的环境威胁之一，每年约有700万人因空气污染而过早死亡。颗粒物作为大气污染物的主要成分之一，由于来源广泛、物理性质和化学组成复杂，与多种健康效应终点密切相关，例如 $PM_{2.5}$ 等颗粒物会对人体呼吸系统、心血管系统、神经系统、免疫系统、生殖发育等多方面产生不良影响，增加人体患呼吸系统的疾病的风险，如心肺疾病、慢性阻塞肺疾病以及哮喘等^[1-3]。因此，在大气颗粒物污染加剧和居民健康风险不断上升的背景下，城市形态规划应对气候变化及污染物防治机理研究已成为全球范围内的一个紧迫课题。空气污染暴露 (air pollution exposure) 是指个体居民通过直接吸入、摄入和皮肤接触等方式与空气污染物产生接触，其直接决定了人体受污染物损伤的程度以及患病风险^[4]。污染物浓度和居民行为模式是影响大气颗粒污染物暴露过程、状态和强度，即暴露危害的主要影响因素^[5]。

城市建成环境的优化调控是从城市规划

视角推进健康城市建设，降低居民空气污染暴露风险的重要途径。城市街区形态会直接影响污染物源汇空间分布和城市风环境，间接影响颗粒物污染浓度及分布格局。研究表明，道路、地形、绿色空间和交通设施是颗粒物产生和扩散的关键因素，街道系统和街区格局比建筑布置对颗粒物浓度的影响更大^[6-7]。绿色空间作为消解颗粒物主要的汇空间，主要通过沉降、颗粒物改性以及扩散三种途径缓解颗粒物污染^[8-13]，植被的结构、高度、深度和密度，以及其与排放源和居民活动空间的相对位置关系，均是影响绿地对颗粒物消减作用的关键因素^[14]。因此阐明大气颗粒污染物的动态演变及与城市形态的关联性，有助于预测不同城市形态特征所承载的污染暴露风险，是优化城市建成环境、高效缓解颗粒物污染的关键^[7,15-19]。

在探究颗粒物浓度与城市街区形态的关联性方面，戴菲等^[20]基于武汉市域内18个大气监测点，选取两年6-9月的监测数据，分析了二维和三维两类城市形态与大气污染物浓度之间的关系，得出绿化覆盖率、道路面积率和相对高程对 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 具有显著影响的结论。Ahn等^[21]基于15个大型城市的颗粒

物反演数据，从街区规划、建筑形态和土地利用三个方面综合分析城市街区形态与颗粒物浓度的关系，得出交通高度集中、高层建筑密集的地区以及高度靠近高速公路和高度混合土地利用的区域，颗粒物浓度最高的结论。针对不同季节对二者关联性的影响方面，当前研究存在较大争议。有研究发现，城市形态与颗粒物浓度的相关性在秋季显著性最高，在冬季最不显著^[22]。而有研究却得出了春冬两季比夏秋两季显著性更加明显的结论^[23]。研究结论的不同可能与研究区气候背景差异有关。

目前相关研究受限于数据来源匮乏、空气监测点位分布密度低、遥感反演数据精度较低等问题，研究尺度多集中在城市、区域甚至国家等中宏观尺度，针对高密度建成环境下的街区尺度研究相对较少^[20,24-26]。此外，研究多讨论城市形态特征与颗粒物之间的静态关系，而与城市景观的动态过程及其对颗粒物时空变化的影响并未过多探讨^[6]。鉴于此，本研究利用2021年济南市（国家、省、市、街道、交通）5级监测站点相结合的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 小时浓度数据以及精细化街区空间形态数据，分析街区尺度下颗粒物污染变化的

时空演变特征，探究不同季节背景下街区空间形态对颗粒物时空分布的影响。研究为精细化尺度下探究颗粒物污染时空演变特征、预测颗粒物污染暴露风险、优化城市空间形态提供了新的视角和方向。

1 研究区概况

济南市是山东省省会，是京津冀大气污染传输通道“2+26”城市之一，燃煤、机动车和扬尘是其颗粒物污染的主要来源^[27-28]。2021年，济南市在168个重点城市中，空气质量排名多次出现在倒数20名内，颗粒物污染问题十分严峻，PM₁₀和PM_{2.5}作为首要污染物的天数分别占35.2%、19.8%^[12]。以《济南市城市总体规划（2012-2020年）》划定主城区作为研究范围，该区域具有建设密度高、强度大、人口密集、城市景观类型丰富等特征，具有较好的研究价值和实际意义。主城区东、西、南以济南绕城高速公路为界、北以济广高速公路为界，总面积约535 km²。研究区内共分布75个监测站点，通过监测点的经纬度坐标定位其空间位置，根据尺度，选取监测站点为圆心形成半径为500 m的缓冲区作为后续研究的样本，筛除数据缺失、紧邻工业污染排放源的站点后，共有65个有效样本（图1）。

2 数据来源与研究方法

2.1 颗粒物数据来源和处理

环境监测站点监测的PM₁₀、PM_{2.5}浓度数据为2021全年逐时监测数据，来源于济南公共数据开放网（<http://data.jinan.gov.cn/jinan/catalog/>）。为探究精细尺度下颗粒物浓度的时空变化特征，首先计算所有监测点的月平均浓度数据，分析月份变化特征，其次计算4个季节的时刻平均数据，分析不同季节背景

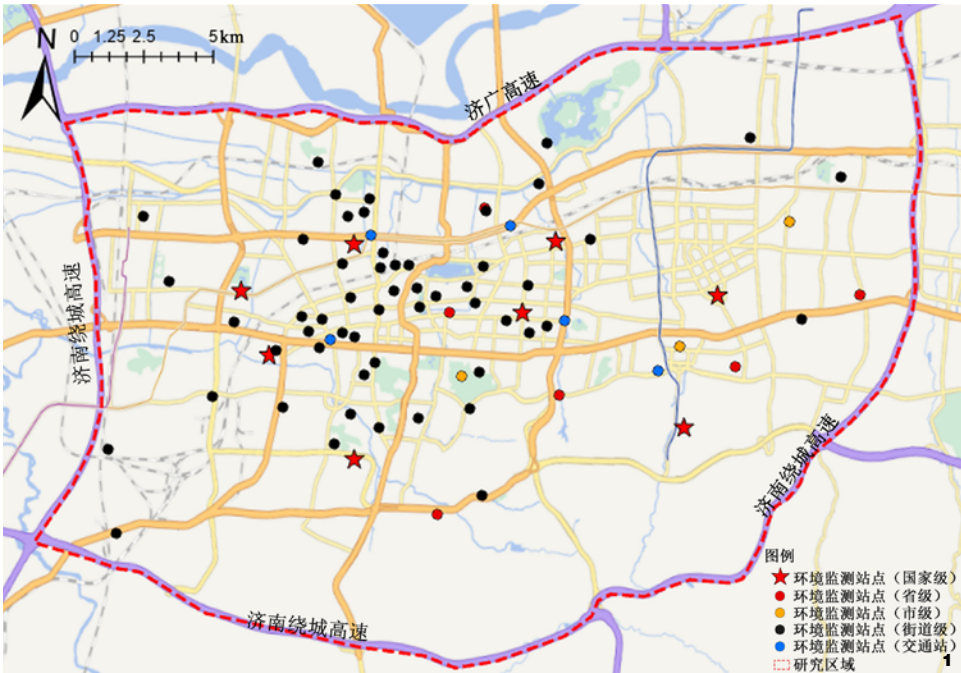


图1 监测站点分布
Fig. 1 Monitoring site distribution

下的日变化特征；为探究城市街区形态对颗粒物浓度数据的影响，选取各季节前后两天均为晴朗无风天气的数据，共215天有效数据，为保证数据间的显著差异，选取各季节每日变化的峰值时刻，计算各站点每季节峰值时刻的平均值，进行后续关联性分析。

2.2 街区形态指标计算

综合考量各样本的现状特征，本研究从二维和三维两个维度，建筑、道路和绿色空间三类关键空间要素选取指标来衡量街区形态特征。道路数据利用QGIS在Open Street Map (OSM) 中获取，三维建筑数据利用水经注地图下载，而绿色空间数据通过目视解译获取。指标选取基于以下原则：（1）对颗粒物有潜在影响；（2）便于计算；（3）在规划设计中得以应用；（4）保证各指标间的最小冗余度。其中天空开闭度是利用DEM和3D建筑

数据生成DSM数据，再利用SAGA-GIS软件计算得出，其他指标计算公式如表1。

3 结果分析

3.1 PM₁₀和PM_{2.5}的时空变化特征

3.1.1 时间变化特征

统计2021年各月份颗粒物浓度变化，可以看出，研究区域内PM₁₀和PM_{2.5}浓度总体上均低于二级标准——150 μg/m³和75 μg/m³，仅有1月存在超出二级标准的情况。PM₁₀和PM_{2.5}浓度时间变化特征整体呈现相似的规律，1月污染物浓度最高，7月污染物浓度最低，其中PM₁₀在春季污染程度最高，夏季最低，而PM_{2.5}具有冬季值高，夏季值低的浓度变化趋势。

冬季易出现污染天气，主要由于冬季燃煤需求增加，污染物排放量大，并且济南南部山区地势较高，冬季夜晚山坡散热快，冷

表1 城市街区形态指标
Tab. 1 Block city form index

维度 Dimension	类别 Category	属性 Property	指标名称 Index name	缩写 Abbreviation	公式 Equation	意义 Significance
二维	建筑	规模	建筑密度	BD	$BD = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{A}$	反映统计单元内建筑占地面积情况
		规模	道路密度	RD	$RD = \frac{\sum L_i}{A}$	反映统计单元内交通污染程度
		规模	绿地覆盖率	GCR	$GCR = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{A}$	反映绿色空间的规模
	绿色空间	布局	绿地斑块密度	PD	$PD = \frac{np}{A}$	反映绿色空间破碎化程度
			绿地最大斑块指数	LPI	$LPI = \frac{maxG_i}{A}$	反映绿色空间最大斑块占整个景观面积的比例
			绿地斑块形状指数	MSI	$MSI_i = \frac{C_i}{4n \times \sqrt{G_i}}$	反映绿色空间斑块形状的复杂程度
	建筑	高度	建筑平均高度	VAH	$VAH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i$	反映建筑高度的集中趋势
		体量	建筑平均体积	AV	$AV = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i$	反映建筑物的平均体积
			容积率	FAR	$FAR = \sum_{i=1}^n \left(\frac{H_i}{C} \times S_i \right) / A$	反映建筑物的容纳能力
			空间拥挤度	SCD	$SCD = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{H_{max} \times A} \times 100\%$	反映建筑物在三维空间中的拥挤程度
			天空开阔度	SVF	$SVF = \frac{Area_{sky}}{Area_{total}}$	描述街谷中可见天空或开阔峡谷空间的部分

注：其中， H_i 、 V_i 、 S_i 分别为统计单元内第*i*个建筑物高度、体积、建筑占地面积； G_i 、 C_i 分别为第*i*个绿地斑块的面积、周长； L_i 为统计单元内道路长度； n 为统计单元内建筑物个数； np 为统计单元内绿地斑块数量； A 为统计单元的面积； $C=3\text{m}$ ； H_{max} 为统计单元内建筑物最大高度； $Area_{sky}$ 为天空视域； $Area_{total}$ 为全部视域。

空气循山坡下沉到市区，出现“逆温”现象，促使污染物难以扩散，此外植物在冬季消解颗粒物能力较弱。1月为全年污染浓度最高的月份，主要原因可能为在冬末春初，济南供暖加剧污染排放的同时出现大风扬尘天气，颗粒物浓度会随之升高。夏季由于植被生长旺盛，叶面积总量处于全年最高期，植被消解颗粒物能力强，并且济南市夏季盛行南风受山体阻挡风速较小，更有利于植物进行沉降。值得注意的是，春季的3月份污染浓度出现短暂的升高，这可能由于该月份暖湿气流活跃，冷气流频繁与暖气流进行交替，风力强劲，易引发地面扬尘，不利于颗粒物干沉降，并且由于PM₁₀比PM_{2.5}粒径更大，更易

受到风速影响，因此该时刻PM₁₀上升幅度更高。济南秋季风速仅高于春季，并且植被呈现由茂盛到衰落的过程，温度也呈降低趋势，11月由于供暖，燃煤排放量开始增加，因此颗粒物浓度呈现由低转高的变化趋势。

统计各季节不同时刻浓度的均值，发现PM₁₀与PM_{2.5}浓度在四季的日变化特征均呈现明显的双峰型分布特点(图3)，上午9:00–10:00PM₁₀浓度出现第一个峰值，之后开始下降，在15:00–16:00达到最低，出现谷值，之后浓度又逐渐上升，在20:00–21:00前后达到第二个峰值，22:00之后PM₁₀浓度值缓慢下降，在次日5:00前后再次升高。一方面由于交通排放是济南市PM₁₀的主要来源之一，两

个峰值正处于早晚高峰期间，高排放量导致污染浓度升高。另一方面，入夜时期燃煤需求量增加，累积白天中的生活行动，烟尘排放量在20:00–21:00前后达到峰值。而夜晚相较于白天烟尘排放量降低，PM₁₀浓度也随之减少。特殊的是PM₁₀在春季浓度出现了较大波动，可能因为其粒径相对较大，更易受到风环境的影响。

3.1.2 空间变化特征

利用普通克里金法，对主城区各监测点四季的颗粒物浓度平均数据进行空间插值分析。为保证插值效果，在普通克里金法的基础上，分别用6种半变异函数进行空

间插值，并利用留一交叉验证法对插值结果进行检验（表2）。结果表明三角函数、球面函数效果较好。

选取最优模型绘制颗粒物浓度空间分布图，可以看出PM_{2.5}和PM₁₀浓度分布具有明显的空间差异性，整体均呈东南低西北高的变化趋势（图4）。PM_{2.5}浓度空间分布特征是春冬两季西部及东北部污染高，东南部污染低，中部空间污染异质性较低，夏季中部局部污染程度略高，而秋季高污染区域集中在北部。PM₁₀浓度呈现春夏两季空间浓度差异大，高污染地区集中且呈单点状，而秋冬两季PM₁₀浓度变化平缓，高污染区域集中在北部。

为进一步探究精细尺度下颗粒物污染空间分布规律，选取位于济南市二环以内的监测点做精细尺度分析（图5）。针对PM_{2.5}，春季污染的空间差异性较低，而夏、秋、冬三季的污染特征具有一致性，3号、5号、8号、10号、18号和35号等区域出现了明显的霾岛现象，34号、36号、38号以及39号等区域的污染值明显低于周围区域，并且阻断了上述霾岛间的空间联系。在PM₁₀污染方面，59号区域在四季均呈现明显的霾岛，其次62号、50号以及61号等区域在春冬两季出现霾岛现象，而10号、18号以及5号等区域在夏秋两季出现霾岛现象。

3.2 城市街区形态与PM_{2.5}和PM₁₀的关联性分析

研究选取5个低污染和6个高污染监测站点所构成的缓冲区样本来说明不同缓冲区的街区城市形态模式（图6）。可以看出21号、22号、36号以及55号等监测站点颗粒物浓度在多数季节下均处于较低水平，这是因为监测点周围分布有济南森林公园、济南市中山公园、五龙潭公园以及大明湖等大型绿色空

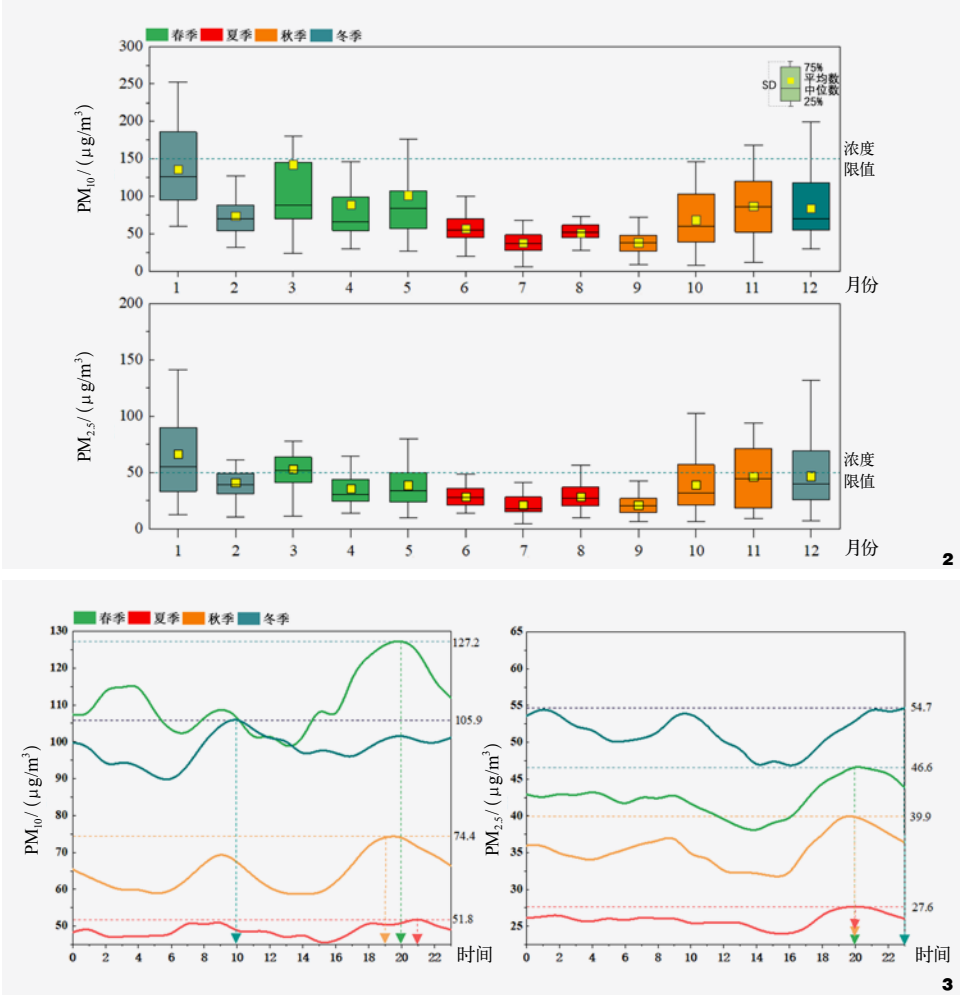
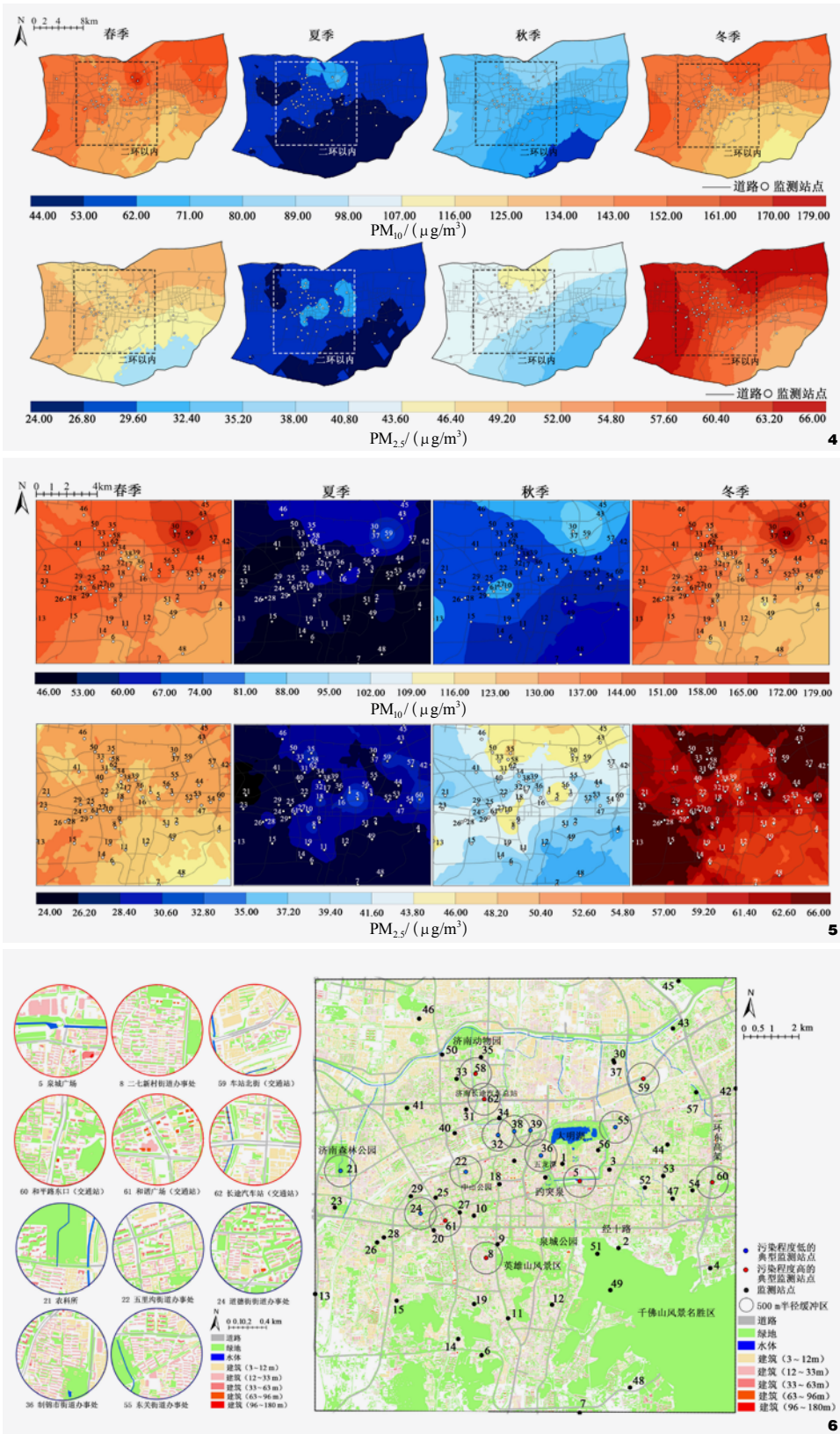


图2 PM₁₀和PM_{2.5}月浓度变化
Fig. 2 Changes in monthly concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5}

图3 PM₁₀和PM_{2.5}日浓度变化及峰值时刻
Fig. 3 Change of PM₁₀ and PM_{2.5} daily concentration and peak time

表2 6种半变异函数模型的插值精度比较
Tab. 2 Comparison of interpolation accuracy of six semi-variogram models

半变异函数 Semi-variogram	PM ₁₀ 平均误差/ (μg/m ³) Average error of PM ₁₀				PM _{2.5} 平均误差/ (μg/m ³) Average error of PM _{2.5}			
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
三角函数	-0.124	-0.018	-0.024	0.017	0.002	-0.061	-0.028	-0.042
球面函数	-0.132	0.14	0.014	0.074	-0.007	-0.057	-0.024	-0.035
指数函数	-0.101	0.224	0.042	0.130	0.068	-0.011	-0.022	-0.036
高斯函数	-0.154	-0.003	-0.319	0.048	-0.027	-0.045	-0.054	-0.054
J-Bessel函数	-0.255	-0.019	-0.365	0.211	-0.035	-0.023	-0.061	-0.062
K-Bessel函数	-0.056	0.226	0.050	0.116	-0.047	-0.012	-0.053	-0.041
模型选择	K-Bessel 函数	三角 函数	球面 函数	三角 函数	三角 函数	指数 函数	指数 函数	球面 函数



间，且绿色空间多位于监测点盛行风上侧，能够更好地发挥绿地对颗粒物的消减能力。同时，59号、60号、61号以及62号监测点颗粒物浓度水平明显高于其他区域，原因是这部分监测站点邻近车站、高架桥等交通密集区域，汽车尾气排放会产生大量的有害残留物，加速地面扬尘，促进 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 等颗粒物的形成。并且立体交通加剧了颗粒物在垂直方向的扩散，进一步促进了颗粒物的湍流和转移，致使区域内颗粒物浓度快速上升。研究发现监测站点除了受到绿色空间的影响外，还受建筑密度、建筑体量等其他城市街区形态的共同影响。例如，5号和8号监测站点周围分布有大面积的绿色空间，然而颗粒物浓度水平却远高于周围的监测站点，这是因为监测站点盛行风下侧的大体量建筑阻挡了颗粒物的扩散，导致局部地区颗粒物浓度升高。

为深入分析城市街区形态对颗粒物浓度变化的影响机制，基于各形态参数与颗粒物的相互作用，将各季节 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 日峰值时刻的平均浓度作为自变量，所选城市街区形态作为自变量，通过皮尔森 (Pearson) 双变量相关分析定量分析形态参数与颗粒物的关联性。

3.2.1 城市街区形态与 $PM_{2.5}$ 的关联性分析

根据相关性分析结果 (图7) 可以发现，绿色空间指标与 $PM_{2.5}$ 在四季均呈现出显著

图4 济南市主城区 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 污染浓度空间分布差异图
Fig.4 Spatial distribution of PM_{10} , $PM_{2.5}$ pollution concentration in the main urban area of Jinan

图5 济南市二环以内 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 污染浓度空间分布差异图
Fig. 5 Spatial distribution difference of PM_{10} , $PM_{2.5}$ pollution concentration within the second ring road of Jinan

图6 典型监测站点及其城市要素空间分布
Fig. 6 Typical monitoring stations and their spatial distribution of urban elements

且一致的相关关系，与 *GCR*、*MSI*、*LPI* 呈负相关，与 *PD* 呈正相关。绿色空间主要通过沉降、颗粒物改性以及扩散三种途径缓解颗粒物污染。沉降作用即通过“吸附”或重力沉降等方式促使颗粒物在物体表面实现暂时或永久停留，植物可通过叶片表面的承载或叶片气孔“吸收”，实现颗粒物的沉降^[29]。改性是植物通过选择性吸收颗粒物局部组分、微生物作用、化学凝固等方式改变粒径、毒性等颗粒物固有特性^[29]。而扩散是指植物利用自身特性改变颗粒物的轨迹、速度以及整个大气在局部的运动模式，进而降低颗粒物浓度，并改变其成分。沉降是绿色空间消减颗粒物最主要的途径，并且沉降和改性作用都是基于叶片与颗粒物发生接触，因此，*GCR* 越高，意味着植被量越大，植被可与颗粒物接触的叶表面积越多，消减能力越强^[29]。*MSI* 反映了绿色空间斑块形状的复杂程度，斑块形状越复杂，边界效应更明显，复杂边界的绿地能够吸收更多不同来源的颗粒物。*LPI* 和 *PD* 的影响机制相似，绿地斑块越聚集、最大斑块优势度越高，可以加强斑块间的连通性，提升绿色空间的稳定性，发挥更大的消减作用。

PM_{2.5} 仅在秋冬两季与街区建筑形态指标相关关系显著。表征建设强度的 *BD*、*FAR* 与 PM_{2.5} 呈正相关，*BD* 和 *FAR* 的消极作用可能因为建筑密度和容积率的增加导致建筑表面摩擦力的增加，促使风速降低，形成不利于颗粒物污染扩散的静风区，这验证了建筑建设强度对 PM_{2.5} 浓度的不利影响。同时，*VAH*、*AV* 与 PM_{2.5} 呈负相关，这是因为建筑体量和建筑平均高度的提升可能形成峡谷效应，街谷是城市街道两旁建筑与地面组合成的“峡谷”空间，当气流由开阔区域流入街谷时，由于空流不能大量堆积，于是加速流过峡谷，风速增大，促进了 PM_{2.5} 的分散。在风速较高的春

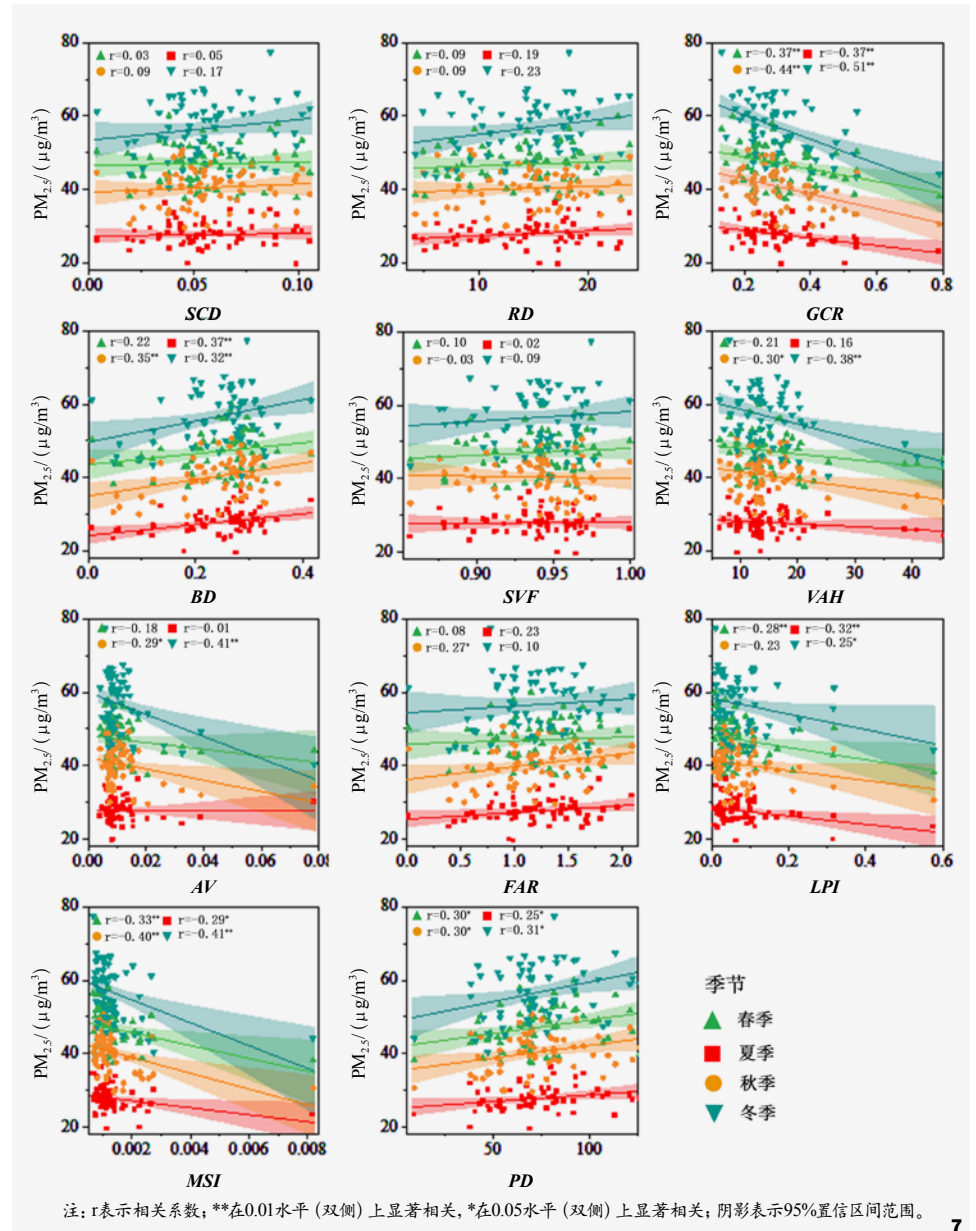


图7 PM_{2.5} 与城市街区形态指标相关性分析
Fig. 7 Correlation analysis between PM_{2.5} and urban morphology indicators

季，PM_{2.5} 由于粒径小、重量小的物理特征，相比建筑形态更容易受到风环境的影响，因此在春季 PM_{2.5} 与建筑形态指标相关关系并不显著。而夏季风速过低，在无风天气下，建筑对 PM_{2.5} 的影响被削弱，因此在夏季相关关系也不显著。并且，一些街区形态指标与

PM_{2.5} 之间在任何季节都没有显著的相关关系，比如反映建筑三维布局的 *SCD* 和 *SVF*。

3.2.2 城市街区形态与 PM₁₀ 的关联性分析

PM₁₀ 与 *GCR* 在四季均呈负相关，与其余街区绿色空间指标仅在春冬两季相关性较

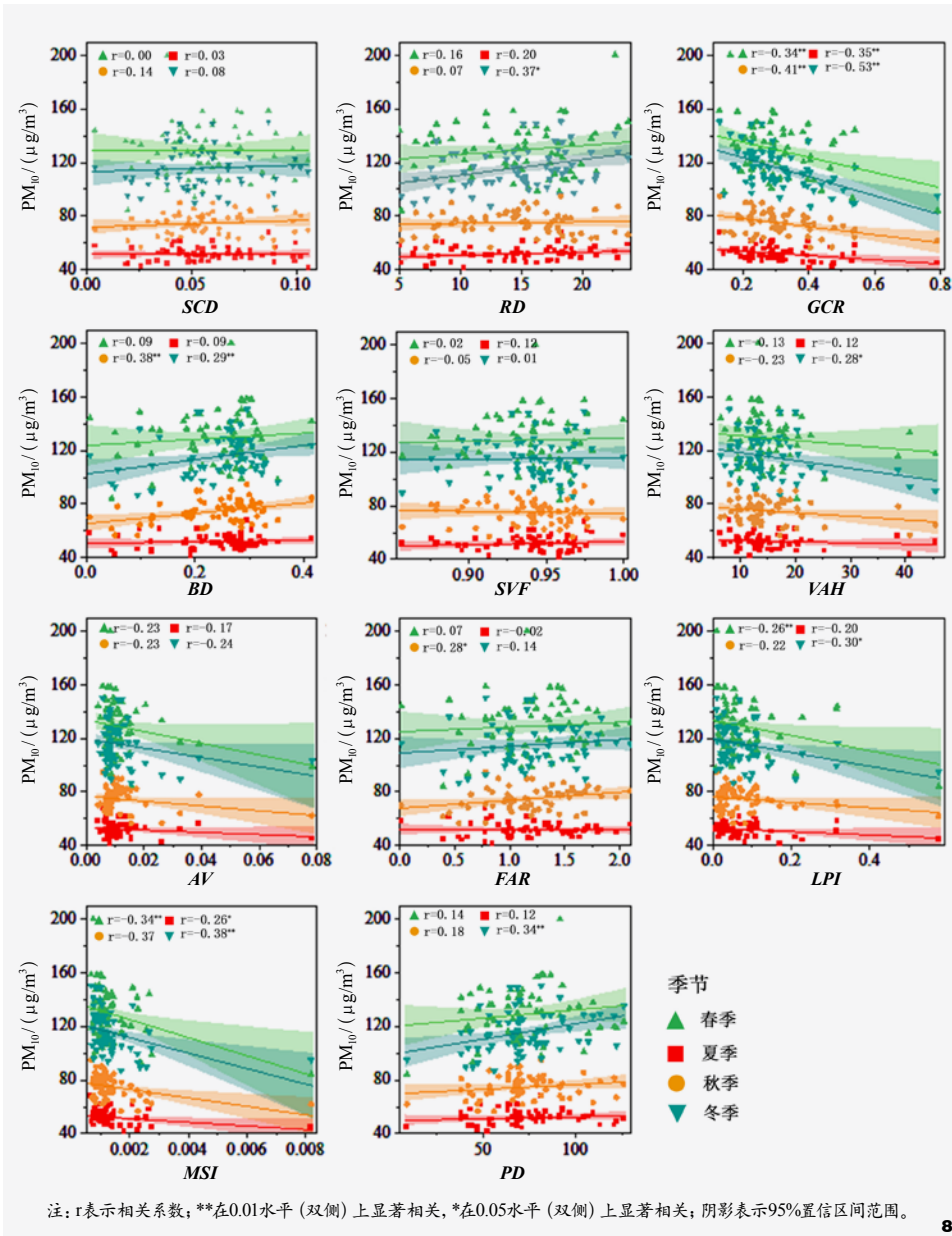


图8 PM_{10} 城市形态指标相关性分析
Fig. 8 Correlation analysis between PM_{10} and urban morphology indicators

为显著，与 MSI 和 LPI 呈负相关，与 PD 呈正相关（图8）。在夏秋两季，部分指标的相关性并不显著可能与 PM_{10} 污染程度相对较低有关，因为在污染浓度低的情况下，绿色空间布局的聚集性及形态复杂所发挥的消减作用被削弱。同时，在冬季， PM_{10} 与绿色空间指标

的相关关系较为显著，也表明植被即使在冬季进入休眠期或者落叶的衰败状态，仍对颗粒物有一定的消减作用。此外， PM_{10} 与街区建筑形态指标的相关关系仅在个别季节显著，与 BD 在秋冬两季呈正相关，与 AVH 在冬季呈负相关，与 FAR 在冬季呈正相关。这可

能因为 PM_{10} 粒径更大，在春季更容易受到风环境的影响，高风速容易促进 PM_{10} 的扩散，但也会产生扬尘，导致污染浓度上升，因此建筑形态与 PM_{10} 的影响关系更为复杂，难以洞悉。并且与其他季节相比，夏季可能因为 PM_{10} 污染浓度相对较低，所以相关关系并不显著。 RD 与 PM_{10} 在冬季呈显著负相关，可能与冬季 PM_{10} 污染程度较高， PM_{10} 的污染源中交通排放占比更高，交通排放的有害物质更容易与微小颗粒物结合而形成粒径更大的 PM_{10} 有关。

4 结论与讨论

4.1 研究结论

本研究重点分析了济南市主城区 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度的时空变化特征，并且探讨了城市街区形态对颗粒物浓度的影响。主要结论如下：

（1）颗粒物浓度具有明显的季节性时空分异特征。颗粒物浓度呈双峰型日变化，且具有显著的U形逐月变化规律， $PM_{2.5}$ 呈冬季高夏季低、春秋两季居中， PM_{10} 呈春季高夏季低、秋冬两季居中的季节性变化特征，且呈东南低、西北高的空间分布格局，高污染区域集中于交通和建筑密集区域，低污染区域主要分布于大型城市绿地旁。

（2）城市街区形态对颗粒物的影响在冬季最突显，而在夏季显著性最低。绿色空间指标与 $PM_{2.5}$ 在四季均显著相关，与 PM_{10} 仅在污染程度较高的春冬两季显著相关，建筑形态指标仅在秋冬两季与颗粒物浓度相关关系显著。相比于其他三季，夏季全年风速最低，建筑的阻挡作用被削弱，因此在夏季建筑形态与颗粒物浓度的相关性并不突显。

（3）研究证实绿色空间的规模、布局和形态以及交通对颗粒物浓度有较大影响，其

次是交通设施、建筑密度和建筑平均高度。城市绿色空间与颗粒物在4个季节均呈现显著相关关系，且绿地覆盖率、绿地最大斑块指数和绿地斑块形状指数均呈正相关，绿地斑块密度呈负相关。同时，建筑形态指标中，建筑密度、容积率与颗粒物污染呈正相关，建筑平均高度与建筑平均体积与颗粒物污染呈负相关。

4.2 优化策略

根据研究结论，提出以下缓解颗粒物污染的策略：

(1) 重点调控关键区域街区形态。颗粒物浓度季节性空间分异特征明显，应优先对关键区域进行街区形态的优化提升。立体交通设施附近的街区在所有季节都具有高污染特征，因此应重点优化此类区域的街区形态，整体把握污染扩散路径与街区形态及各要素的关系，比如北园高架路、二环东高架、济南市长途汽车总站、工人新村和八立交桥等区域。

(2) 增加高效消减绿色空间屏障。增大绿色空间的规模、布局紧凑度，以及形态复杂度是缓解颗粒物污染的核心策略^[30]。加强绿色空间与建筑和道路等建成环境要素间的协同规划^[31]，将绿色空间设置在污染源盛行风的下侧，形成高效消减颗粒物的绿色屏障，增加绿色空间的最大斑块面积和空间连通性，提升常绿树种占比，完善立体交通的三维绿化等都是缓解颗粒物污染的有效措施。

(3) 优化促进消散建筑布局形式。优化建筑形态，有效促进颗粒污染物的消散。建筑物的垂直布局对风速影响较大，低密度高层建筑群相比于高密度低层建筑群具有更好的风环境，在建筑容积率一致的同时，增加

建筑间距，可有效促进颗粒物污染的消散^[9,15]。然而这并不意味着追求绝对的建筑高度，相关研究表明减少建筑高度的同质性，即建筑高度不均匀，并且高度保持在60 m范围内有利于确保风速大于1.3 m/s^[32]。

4.3 研究展望

本研究重点关注高密度城市建成环境下颗粒物的时空变化特征，以及由绿色空间、建筑空间和道路三种主要空间要素构成的城市形态对颗粒物浓度分布的影响。由于数据来源的限制，未能考虑风速、温度以及湿度等气象环境指标对研究的影响，使得研究结论仍有一定的片面，因此本文在数据选取时也尽量避免因颗粒物数据天数较少而产生的偶然性，尽可能使用大量数据的平均值来消除掉众多因素对颗粒物浓度变化的瞬时影响，后续的研究可将风速、温度以及湿度等气象环境要素考虑在内，消除微气候的影响，使研究结果更科学。

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

[1] THOMPSON J E. Airborne Particulate Matter Human Exposure and Health Effects[J]. Journal of Occupational and Environmental Medicine, 2018, 60(5): 392-423.

[2] KIM K H, KABIR E, KABIR S. A Review on the Human Health Impact of Airborne Particulate Matter[J]. Environment International, 2015, 74: 136-143.

[3] ZHANG Y Q, XIANG Q, YU C H, et al. Asthma Mortality is Triggered by Short-term Exposures to Ambient Air Pollutants: Evidence from a Chinese Urban Population[J]. Atmospheric Environment, 2020, 223: 117271.

[4] STEINLE S, REIS S, SABEL C E. Quantifying Human Exposure to Air Pollution-Moving from Static Monitoring to Spatio-Temporally Resolved

Personal Exposure Assessment[J]. Science of the Total Environment, 2013, 443: 184-193.

[5] 马静, 柴彦威, 符婷婷. 居民时空行为与环境污染暴露对健康影响的研究进展[J]. 地理科学进展, 2017, 36(10): 1260-1269.

[6] ZHANG A Q, XIA C, LI W F. Relationships Between 3D Urban Form and Ground-Level Fine Particulate Matter at Street Block Level: Evidence from Fifteen Metropolises in China[J]. Building and Environment, 2022, 211: 108745.

[7] GAO Y, WANG Z Y, LI C Y, et al. Assessing Neighborhood Variations in Ozone and PM_{2.5} Concentrations Using Decision Tree Method[J]. Building and Environment, 2021, 188: 107479.

[8] 张灵芝, 秦华. 城市园林绿地滞尘研究进展及发展方向[J]. 中国园林, 2015, 31(01): 64-68.

[9] 苗纯萍, 何欢, 陈玮, 等. 城市绿地——三维建筑格局对大气污染物的影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2022, 41(08): 1628-1634.

[10] YIN S, CHEN D L, ZHANG X Y, et al. Review on the Multi-Scale Interactions of Urban Forests and Atmospheric Particles: Affecting Factors are Scale-Dependent Among Tree, Stand and Region[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2022, 78: 127789.

[11] DIENER A, MUDU P. How Can Vegetation Protect Us from Air Pollution? A Critical Review on Green Spaces' Mitigation Abilities for Air-Borne Particles from a Public Health Perspective-With Implications for Urban Planning[J]. Science of the Total Environment, 2021, 796: 148605.

[12] 济南市生态环境局. 环境质量简报 2021年济南市环境质量简报[EB/OL]. [2023-08-31]. http://jnepb.jinan.gov.cn/art/2022/2/28/art_10451_4780771.html

[13] 殷杉, 刘春江. 城市植被对大气颗粒物的防控功能及应用[J]. 园林, 2013(06): 16-19.

[14] DESHMUKH P, ISAKOV V, VENKATRAM A, et al. The Effects of Roadside Vegetation Characteristics on Local, Near-Road Air Quality[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2019, 12(3): 259-270.

[15] 戴菲, 陈明, 王敏, 等. 城市街区形态对PM₁₀、PM_{2.5}的影响研究——以武汉为例[J]. 中国园林, 2020, 36(03): 109-114.

[16] 李杨, 刘永和, 王西岳, 等. 焦作市PM_{2.5}和PM₁₀时空变化特征及其与气象因子的关系[J]. 环境工程, 2022, 40(09): 44-53.

[17] 么相株, 赵文吉, 杨振宇, 等. 基于Ward系统聚类的京津冀城市群空气质量时空变化特征与成因分析[J]. 生态环境学报, 2021, 30(02): 340-350.

[18] 高振翔, 叶剑, 周红根, 等. 江苏省PM_{2.5}和PM₁₀时空变化特征及其与气象因子的关系[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(07): 51-58.

[19] 刘杰, 李鹏飞. 汉中市中心城区PM_{2.5}时空变化特

征及影响因素分析[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(13): 258-263.

[20] 戴菲, 陈明, 王敏, 等. 城市街区形态对PM₁₀、PM_{2.5}的影响研究——以武汉为例[J]. 中国园林, 2020, 36(03): 109-114.

[21] AHN H, LEE J, HONG A Y. Urban form and Air Pollution: Clustering Patterns of Urban form Factors Related to Particulate Matter in Seoul, Korea[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 81: 103859.

[22] CAI L, ZHUANG M, REN Y. Spatiotemporal Characteristics of NO₂, PM_{2.5} and O₃ in a Coastal Region of Southeastern China and Their Removal by Green Ppases[J]. International Journal of Environmental Health Research, 2022, 32(1): 1-17.

[23] SHI K, LI Y, CHEN Y, et al. How Does the Urban Form-PM_{2.5} Concentration Relationship Change Seasonally in Chinese Cities? A Comparative Analysis Between National and Urban Agglomeration Scales[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 118088.

[24] GAO G H, PUEPPKE S G, TAO Q, et al. Effect of Urban Form on PM_{2.5} Concentrations in Urban Agglomerations of China: Insights from Different Urbanization Levels and Seasons[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 327: 116953.

[25] MAO X L, WANG L C, PAN X, et al. A Study on the Dynamic Spatial Spillover Effect of Urban Form on PM_{2.5} Concentration at County Scale in China[J]. Atmospheric Research, 2022, 269: 106046.

[26] PARK Y, SHIN J, LEE J Y. Spatial Association of Urban Form and Particulate Matter[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(18): 9428.

[27] 张文娟, 孙晓艳, 李敏, 等. 济南市空气质量特征及重污染期间PM_{2.5}成分谱分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(S1): 71-75.

[28] 张晓凯, 于蕾, 孙苗苗, 等. 济南市春季大气中PM_{2.5}、PM₁₀颗粒物分布状态及元素分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(25): 278-285.

[29] JANHALL S. Review on Urban Vegetation and

Particle Air Pollution - Deposition and Dispersion[J]. Atmospheric Environment, 2015, 105: 130-137.

[30] 雷雅凯, 段彦博, 马格, 等. 城市绿地景观格局对PM_{2.5}、PM₁₀分布的影响及尺度效应[J]. 中国园林, 2018, 34(07): 98-103.

[31] 肖华斌, 郭妍馨, 王玥, 等. 我国绿色基础设施空间响应与规划技术研究进展与展望[J]. 园林, 2022, 39(03): 54-62.

[32] CAO Q, LUAN Q Z, LIU Y P, et al. The Effects of 2D and 3D Building Morphology on Urban Environments: A Multi-Scale Analysis in the Beijing Metropolitan Region[J]. Building and Environment, 2021, 192: 107635.

《园林》创刊40周年刊庆征稿启事（二）

2024年是《园林》创刊40华诞，也是《园林》拥抱新时代、奋进新征程的重要里程碑。40年来，《园林》始终贯彻服务学科学者、支持行业发展的办刊理念，主动服务国家战略，精准把脉发展规律，见证了风景园林蓬勃发展、走向世界的铿锵历程，记录下风景园林人凝心聚魂、蝶变成长的历史瞬间。

40年砥砺前行，40年硕果累累。赓续根脉、茹古涵今，以“风景园林文脉传承”为主题，秉承“续过去历史文脉、装现在河山锦绣、绘未来国土丹青”理念，特开展主题文章征稿工作，具体要求通知如下：

一、征稿内容

- 1. 坚持正确的政治导向，坚持文化自信，紧扣“风景园林文脉传承”主题，展现快速发展的行业精神面貌和时代特征；
- 2. 从风景园林文化视角，展现如何守正创新、保护传承，如何服务人民新需求、构建美丽中国国土空间；
- 3. 立意新颖、主题明确、逻辑严谨。

二、征稿要求

- 1. 来稿须为本人原创。
- 2. 来稿须为综述型或研究型论文，符合《园林》学刊基本格式和要求，录用后刊登于学刊2024年5月专栏。
- 3. 投稿至www.gardenmagazine.cn，选择“热点专题”。