

南昌市东一环高架桥下空间大气颗粒物分布特征*

夏磊俊, 黄定晶, 任心怡, 吴瑞鹏, 刘青

江西农业大学园林与艺术学院, 江西 南昌 330045

摘要: 街区尺度的高架结构会阻碍大气颗粒物扩散, 导致污染物局地累积。为探究此类区域污染物的分布特征及其影响因素, 本研究聚焦南昌市东一环高架桥下空间, 通过连续 5 d 覆盖早、中、晚高峰的多点位实地监测 (10 处样地, 30 个采样点), 结合数值模拟 (ANSYS Fluent), 探究桥下空间大气颗粒物 ($PM_{2.5}$ 、 PM_{10}) 的时空分布特征和关键影响因素。研究表明: 1) 时间上, 颗粒物浓度呈现“午高峰>早高峰>晚高峰”特征, 且工作日显著高于非工作日。2) 空间上, 高浓度区域主要集中于十字路口及部分桥阴区, 而低浓度区则多分布于三岔路口及匝道空间。颗粒物浓度较高区域的桥面与路面宽度通常较大, 而浓度较低区域则相反。3) 颗粒物浓度与相对湿度、车流量、黑球温度呈显著正相关, 与气温呈显著负相关。4) 数值模拟表明, 低风速下, 颗粒物浓度与风速呈显著正相关。高架桥导致桥下风速降低, 形成污染滞留区, 不同的高架桥与周边建筑形态会产生不同的风场, 影响颗粒物浓度。本研究可为高架桥下空间环境改善与健康风险防控提供科学依据。

关键词: 桥下空间; 颗粒物; 时空分布; 空气流场; 南昌

中图分类号: X51 文献标志码: A 文章编号: 2097-0137(XXXX)XX-0001-10

Characteristics of atmospheric particulate matter under the East First Ring Elevated Expressway in Nanchang

Xia Leijun, Huang Dingjing, Ren Xinyi, Wu Ruipeng, Liu Qing

College of Landscape Architecture and Art, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

Abstract: Elevated structures at the block scale can hinder the diffusion of atmospheric particulate matter, leading to localized pollutant accumulation. To investigate the distribution characteristics of pollutant matter in these areas and their influencing factors, this study focused on the space under the East First Ring Elevated Expressway in Nanchang. Continuous field monitoring was conducted over 5 days, covering morning, afternoon, and evening rush hours at multiple locations (10 sites and 30 sampling points). This was combined with numerical simulations using ANSYS Fluent to analyze the spatiotemporal distribution of $PM_{2.5}$ and PM_{10} and their key influencing factors. The results indicated that: 1) Temporally, the particulate matter concentrations followed the order "afternoon rush hour> morning rush hour> evening rush hour", and were significantly higher on weekdays than on weekends. 2) Spatially, high-concentration areas are primarily at intersections and zones directly beneath the bridge deck, while low-concentration areas are more prevalent at T-junctions and ramp spaces. Areas with higher concentrations typically featured wider bridge decks and roads. 3) Particulate matter concentration show significant positive correlations with relative humidity, traffic flow, and black globe temperature, and significant negative correlations with air temperature. 4) Numerical simulations

* 收稿日期: 2025-09-07

录用日期: 2026-02-03

网络首发日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(32160401)

作者简介: 夏磊俊(2002年生), 男; 研究方向: 园林设计与大地景观规划; E-mail: 1737838857@qq.com

通信作者: 刘青(1977年生), 男; 研究方向: 园林生态水土保持; E-mail: liuqing8699@jxau.edu.cn

全文阅读



ZR20250191

reveal a significant positive correlation between concentration and wind speed at low wind speeds. The elevated bridge structure reduces wind speed underneath it, creating a stagnation zone for pollutants. Different configurations of the elevated bridges and surrounding buildings generated distinct wind fields, which in turn affect particulate matter concentration variation. This study provides a scientific basis for improving environmental quality and preventing health risks in the spaces under elevated highways.

Key words: under-bridge space; particulate matter; spatio-temporal distribution; air flow field; Nanchang

快速的城市化进程促使全球城市大规模兴建高架桥,以提升交通效率、缓解拥堵。然而,在狭窄街区修建高架桥,可能催生交通拥堵点,并加剧环境污染(Huang et al., 2021)。其中,交通源 $PM_{2.5}$ 中携带的氮氧化物、碳氢化合物等致病物质,人类长期暴露其中可导致心血管疾病与呼吸系统病变,并显著增加死亡概率(Suhaimi et al., 2024)。因此,亟需深入探究高架桥对局部环境与公共健康所产生的影响。

对一般城市道路和含高架桥道路附近细颗粒物污染分布的研究,通常采用实地实验、数值模拟风洞实验等手段,并取得系列进展。已有研究关注城市形态对空气污染扩散的影响,涉及不同尺度与形态要素。在宏观街道尺度,研究表明建筑高度与街道宽度之比,以及高架桥的设置会对颗粒物扩散产生影响(张传福等, 2012);而在街区局部形态方面,弯道、交叉口等微观结构亦被证实对风场及污染分布起关键作用,微小的风向变动即可导致污染格局明显改变(陈同等, 2022)。此外,针对街道峡谷形态的研究指出,对称、阶梯上升与阶梯下降等不同的形态及风向角会影响通风效率与污染物分布,其中阶梯上升型峡谷在垂直风向下通风效果最优(Jon et al., 2023)。相关实地观测进一步发现,早、晚高峰空气质量存在差异,且交叉口污染物浓度相对较低,并存在使污染物浓度最小化的最优两

侧街谷比与路网密度(柴晋鹏等, 2021)。

上述研究表明,城市形态的多尺度特征与污染物扩散之间存在系统关联。然而,既有研究多将高架桥作为城市形态的要素之一进行宏观分析,对其自身形态、周边建筑布局及其交互作用如何具体影响污染扩散与浓度分布,特别是桥下空间的微观机理与时空规律,尚缺乏深入、系统的探讨。为明确城市高架桥附近污染物浓度分布特征,以及高架桥形态与周边建筑的变化对颗粒物浓度的影响机理。本研究利用实地观测结合数值模拟的方式,分析桥下空间细颗粒物浓度时空演变规律,探讨高架桥形态与周边建筑的变化对细颗粒物浓度的影响,以期为高架桥下空间环境改善与健康风险防控提供科学依据。

1 研究对象与方法

1.1 研究区域与采样点选取

研究区域为江西省南昌市东一环连续 5.2 km 的桥下空间,南北朝向,依据场地空间异质性划定 16 处初选区域,综合桥下空间属性筛选 10 处目标样地(图 1)。样地构成包括桥下人行通道 3 处,匝道空间(李文博, 2015)3 处,三岔、十字路口各 2 处,样地 50 m 范围内的建筑分布情况见表 1。以分车绿带为基准将样地,细分为东、中、西 3 个点位,总计布设 30 个采样点。



图 1 样点分布图

Fig. 1 Sample distribution map

表1 样地 50 m 范围内的建筑分布情况
Table 1 Distribution of buildings within 50 m of the sampling site

样地道路节点	桥面宽/m	路面宽/m	建筑平均高度/m	建筑分布情况
① 桥下人行道	44.9	55.2	12.8	两侧有建筑
② 三岔路口	26.0	47.0	13.9	东侧有建筑
③ 匝道空间	8.0, 17.3, 8.6	63.8	16.8	两侧有建筑
④ 三岔路口	23.0	49.0	0.0	无建筑
⑤ 匝道空间	30.0, 7.0	59.8	29.8	西侧有建筑
⑥ 十字路口	32.0	66.0	16.7	东侧有建筑
⑦ 桥下人行道	39.7	54.5	5.0	东侧有建筑
⑧ 匝道空间	8.5, 23.5, 6.5	63.1	22.8	两侧有建筑
⑨ 桥下人行道	34.4	49.5	15.6	两侧有建筑
⑩ 十字路口	37.0	60.0	20.2	西侧有建筑

1.2 基础数据和环境变量采集

采用 DE 款红光测距仪与 HT-PF7 激光测距望远镜, 实地测量高架桥的高、宽和建筑高度等空间几何参数。基于 Figshare 平台发布的中国属性建筑数据集 (CMAB), 提取研究区域 2024 年的建筑数据 (Zhang et al., 2025)。

一般情况下, 全年中夏季的背景浓度最低 (李超等, 2025), 夏季监测有利于更好表征桥下空间与整体环境差异 (王耕等, 2025)。因此, 本研究的实地监测选在 2025 年 7 月 4—8 日进行, 其中 2025 年 7 月 5—6 日 2 d 为非工作日, 其余 3 d 为工作日。监测时段参考南昌市交管局的交通高峰时段, 早高峰为 07:00—09:00、午高峰为 11:30—14:30、晚高峰为 17:00—19:00; 因颗粒物探测需要在 45 min 内完成, 将调研时段设定为早高峰的 07:30—08:30、午高峰的 11:30—12:30 及晚高峰的 17:30—18:30。监测均在非降水、非强风天气条件下开展。

采用 NK-5400 气象仪测量空气温度、相对湿度、气压、黑球温度和风速; 利用塞纳威 CW-HAT200 手持检测仪测量 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度; 车流量为样地③、⑧的观测值 (不含辅路)。

为分析高架桥下空间的颗粒物浓度增量效应并获取背景气候条件, 选取距样地约 1 km 的江西省环境监测中心站作为背景参照点, 取早间 (07:00—09:00)、午间 (11:00—13:00)、晚间 (17:00—19:00) 时段颗粒物数浓度的算术平均值, 气温、风速、湿度等参数参考青山湖区行政单元监测数据。

1.3 Spearman 分析

由于本研究的样本数据经检验不服从正态分布, 不满足参数检验的前提假设。因此, 采用对数

据分布形态无要求的非参数方法 Spearman 秩相关系数 (r) 进行分析 (周永江, 2020):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}}, \quad (1)$$

式中 R_i 、 S_i 分别为变量在各自顺序排列样本中所占位置的次序 (即秩), \bar{R} 、 \bar{S} 为 R_i 、 S_i 的均值, n 为样本个数。

1.4 计算模型与验证

1.4.1 计算模型

桥下空间风场变化规律的模拟, 采用 ANSYS 2024 R2 中 Fluent 为基本程序, 选用标准 $k-\epsilon$ 方程, 其在湍流模型中总体预测效果最佳 (黄远东等, 2008), 在稳态街道污染物扩散研究中已被广泛验证。测量期间, 背景风速均为 2 级风 (1.6~3.3 m/s), 因此将速度入口风速统一为 2 m/s, 出风口设置为“压力出口”。颗粒物浓度利用离散模型 (DPM) 进行计算, 颗粒物粒径设为 2.5~10 μg 。速度与压力耦合项的处理采用 SIMPLE 算法, 迭代收敛准则为各控制方程的相对残差量小于 10^{-4} 。

利用 SketchUp Pro2022 数字建模并导入 Fluent, 场地模型尺寸依据样地的高架桥、建筑、路宽等尺寸的均值计算得出 (表 2、图 2)。其中, 桥面厚度为 1.5 m, 高架桥与建筑的距离为 23.5 m, 匝道空间高架桥面水平间距为 6.6 m。

1.4.2 模型验证

为了对计算模型和计算方法进行可靠性验证, 对污染物浓度进行无量纲化处理 (顾兆林等, 2011):

$$C^* = C \cdot U \cdot H / Q, \quad (2)$$

式中 C^* 表示无量纲污染物浓度, C 为污染物质量浓

表2 模型概况¹⁾
Table2 Overview of the model

模型	L/m	W/m	H/m
建筑	30.0	10.0	15.0
匝道高架中部	30.0	9.0	10.7
匝道高架两侧	30.0	9.0	6.0
桥阴高架	30.0	34.3	10.7
桥柱	2.0	2.0	9.2
计算域	50.0	110.3	35.0
路宽	30.0	80.3	—

1) L、W、H分别为y、x、z轴的数据,“—”代表无数据。

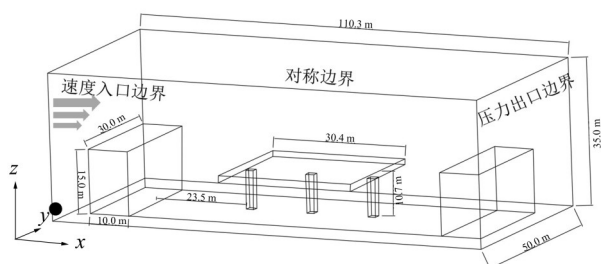


图2 三维模型计算域

Fig. 2 Calculation domain of the 3D model

度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), U 为参考速度 (m/s), H 为建筑物高度 (m), Q 为污染物排放强度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$).

模型拟合效率通过决定系数 (R^2)、均方根误差 (x_{RMSE}) 和相对误差 (x_{RE}) 3 个指标进行评估。其中, R^2 越接近 1, 表示实测值与模拟值之间的误差越小; x_{RMSE} 用于衡量模型拟合程度, 其值越小, 表明模拟结果与实测结果之间的偏差越小, 模拟效果越好; $|x_{\text{RE}}|$ 越小, 则代表模拟值与实测值的误差越小, 拟合效果越优。计算公式如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3)$$

$$x_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \quad (4)$$

$$x_{\text{RE}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n y_i} - 1, \quad (5)$$

式中 x_i 为实测值, y_i 为模拟值, \bar{x} 为实测值的平均值, n 为样本数。

本研究采用离散相模型 (DPM) 和控制方程, 数值模型的模拟点与实际样地的采样点 (东、中、西 3 点, 以及和桥柱的位置关系) 一致。模型中, 迎风侧和背风侧分别代表东、西方向, 模拟不同高架桥与周边建筑形态。在来流风速为 $2 \text{ m}/\text{s}$ 的条件下, 参考

顾兆林等 (2011) 和秦成君等 (2018) 的方法, 结合实地情况, 确定 Q 为 $0.1 \text{ g}/\text{m}/\text{s}$ 。

对实测值与模拟值进行无量纲处理, 并运用 RStudio 分别计算东、中、西 3 个分区及 3 个分区综合数据的 x_{RMSE} 、 x_{RE} 与 R^2 , 结果如图 3 所示。

从整体模拟性能看, 模型在各分区均展现出一定的解释力, R^2 介于 $0.73\sim 0.87$, 表明其能够捕捉浓度变化的主要趋势。综合结果的 x_{RE} 为 -0.01 接近 0, 反映系统整体偏差较小。然而, 综合 x_{RMSE} 仍处于较高水平 (25.50), 且分区 x_{RMSE} 介于 $22.45\sim 27.83$, 说明模拟值与实测值之间存在不容忽视的绝对偏差。这一偏差可能源于实际环境中未被模型完全刻画的多因素干扰, 例如大型车辆通行、商业排放等局部污染源的动态影响, 导致实测序列出现模型未能复现的波动。

综上, 该模型在表征桥下颗粒物浓度空间分布与变化趋势上基本可靠, 适用于进一步的对比分析与机理探讨, 但其在绝对浓度精度上的局限提示, 在应用于定量评估时需结合不确定性分析。

2 结果与分析

2.1 桥下空间环境因子基本特征

通过背景数据 (表 3) 与实测数据 (表 4) 的对比研究发现, 实时颗粒物质量浓度值常高于背景数据。实测较背景 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 质量浓度增量分别介于 $1\sim 38.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $-5.33\sim 35.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 这表明桥下空间整体上会加剧颗粒物浓度的累积, 而 PM_{10} 会在部分时段低于背景浓度值。利用标准偏差对比分析, 背景数据较实测数据更稳定, 其中 PM_{10} 质量浓度受局部扰动最强, 而风速波动则最低。此外, 实测数据平均值和中位数几乎相同, 说明极端值干扰较小, 数据较为稳定, 可信度较高。

2.2 颗粒物时空特征

2.2.1 时间差异 早、中、晚 3 个时段中, 颗粒物浓度整体呈现晚间最低、午间最高的特点 (图 4)。其日变化规律呈“午高峰>早高峰>晚高峰”的趋势, 主要受气象条件与大气化学过程的共同影响。清晨, 大气结构相对稳定, 易形成逆温层, 垂直扩散弱, 导致早高峰污染物累积 (Stull, 1998)。午间, 由于夏季强烈的太阳辐射, 光化学反应成为主导过程, 机动车尾气等排放的氮氧化物、挥发性有机物等气态前体物在紫外线驱动下, 迅速转化为硫酸盐、硝酸盐及二次有机气溶胶等细颗粒物, 生成速率超过当时的扩散能力 (Huang et al., 2014), 浓度达到峰值。傍

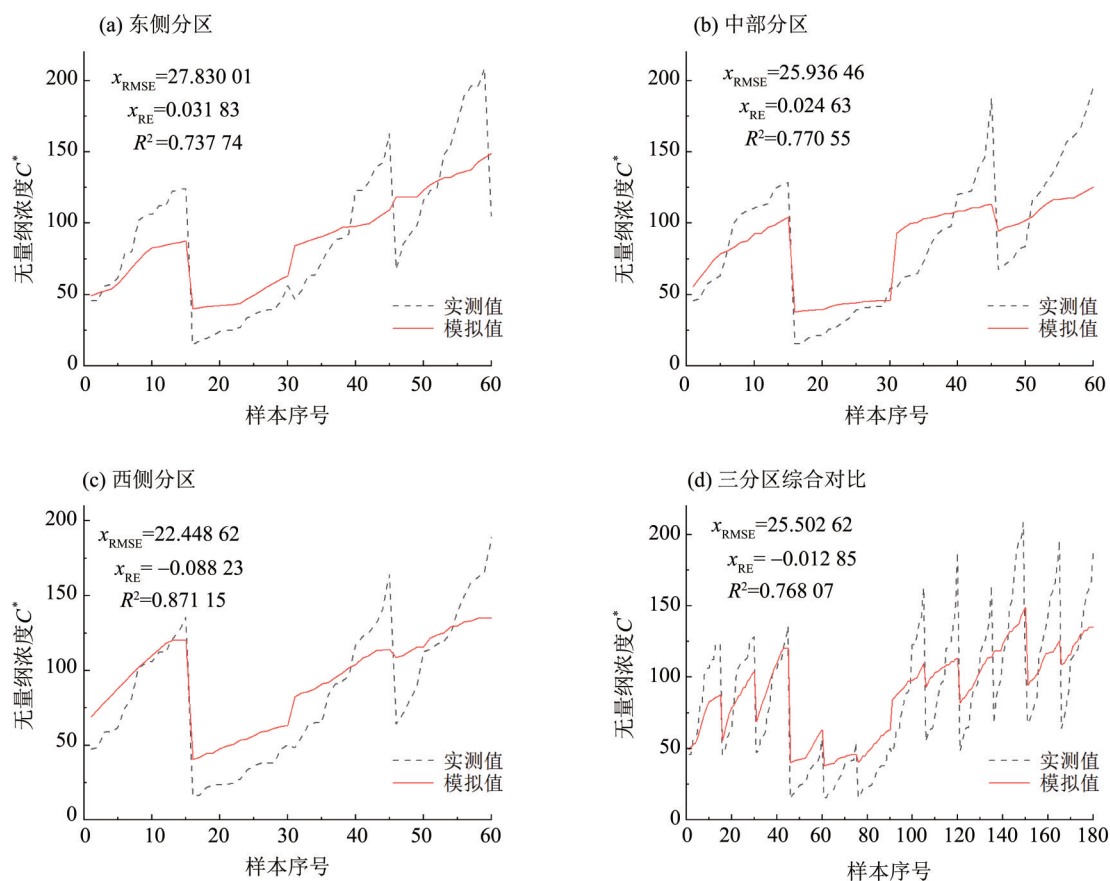


图3 数值模拟与实测的无量纲浓度对比

Fig. 3 Comparison of dimensionless concentration between numerical simulation and field measurement

表3 大气颗粒物及气象条件背景数据情况¹⁾

Table 3 Background data of atmospheric particulate matter and meteorological conditions

统计指标	PM _{2.5} 质量浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	PM ₁₀ 质量浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	空气温度/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/%	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
平均值	17.56	36.49	36.00	54.58	1.72
中位数	17.67	39.33	37.00	54.42	1.81
标准偏差	4.86	9.47	2.17	3.74	0.21
最小值	9.67	20.00	32.00	50.02	1.36
最大值	23.67	50.67	38.00	59.75	1.92

1)数据来源于江西省环境监测中心站。

晚太阳辐射减弱,光化学反应基本停止;此时大气层结最不稳定,热力湍流旺盛,边界层高度达到峰值,为污染物提供了巨大的稀释空间,致使晚高峰的排放被有效扩散(Oke, 1998),故浓度维持在较低水平。

利用非参数Kruskal-WallisH检验,分析PM_{2.5}和PM₁₀在每日的分布差异。结果显示,PM_{2.5}和PM₁₀分布情况均一致,非工作日2 d的差异无统计学意义($P>0.05$),工作日3 d的差异也无统计学意义($P>0.05$),但非工作日的颗粒物浓度显著低于工作

日($P<0.05$)。

2.2.2 空间差异 高架桥下颗粒物浓度分布情况如图5所示,颗粒物受道路节点和建筑分布情况影响,呈现出明显的不均匀性,高质量浓度区域主要集中在十字路口及部分桥阴区域(样地①、⑥、⑨、⑩),低质量浓度区则分布于匝道空间及三岔路口区域(样地②、③、④、⑤)。

根据东、中、西3个分区的监测数据分析(图5),各样地均存在差异,如样地⑨中部颗粒物质量浓度

表4 大气颗粒物及气象条件实测数据情况

Table 4 Measured data on atmospheric particulate matter and meteorological conditions

统计指标	PM _{2.5} 质量浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	PM ₁₀ 质量浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	空气温度/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/%	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	黑球温度/ $^{\circ}\text{C}$	气压/Pa
平均值	27.18	38.72	35.2	62.27	0.64	31.03	1 002.41
中位数	27.33	40.00	35.72	61.83	0.63	31.10	1 001.93
标准偏差	10.60	15.33	1.44	7.60	0.27	1.09	2.08
最小值	10.67	14.67	31.23	46.83	0.00	27.57	998.97
最大值	62.33	86.33	37.4	78.77	1.57	33.8	1 006.2

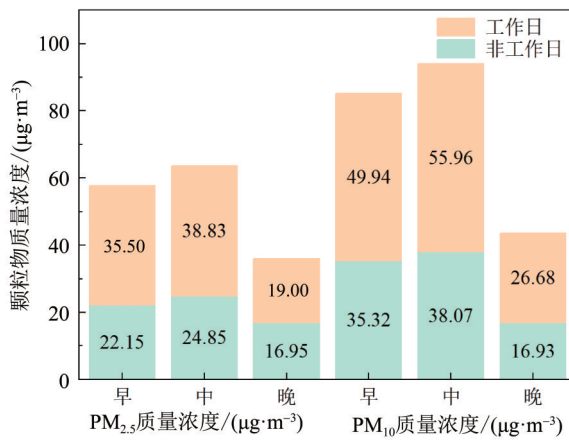


图4 颗粒物浓度时间分布堆积图

Fig. 4 Stacked column of particulate matter concentration over time

明显高于东侧和西侧,样地⑩东侧颗粒物质量浓度明显高于中部和西侧。利用 ArcGIS 10.8.1 软件,计算各采样地周边 50 m 缓冲区的建筑密度(建筑垂直

投影面积占比)(图6),结合克里金插值法生成的颗粒物空间分布图(图7,PM_{2.5}与PM₁₀空间格局高度一致,利用两者平均值制作)。分析结果表明,不同的高架桥与周边建筑形态的变化(特别是空间围合度)对颗粒物质量浓度产生影响。

2.3 颗粒物与其他因子的相关性

为探究影响高架桥下空间颗粒物的因素,对桥下空间颗粒物与其他因子进行 Spearman 相关性分析。该方法不依赖于变量的具体分布形式,通过计算变量秩次之间的相关性来评估其单调关系强度。在双侧检验中,若 $P < 0.05$,认为在 0.05 水平上相关性显著。

结果表明(图8),PM_{2.5}与PM₁₀呈极显著正相关($r=0.986, P < 0.001$),说明二者具有极高的同源性。PM_{2.5}和PM₁₀均与相对湿度(r 分别为0.665和0.650, $P < 0.05$)、黑球温度(r 分别为0.329和0.316, $P < 0.05$)、气压(r 分别为0.278和0.262, $P < 0.05$)呈显著

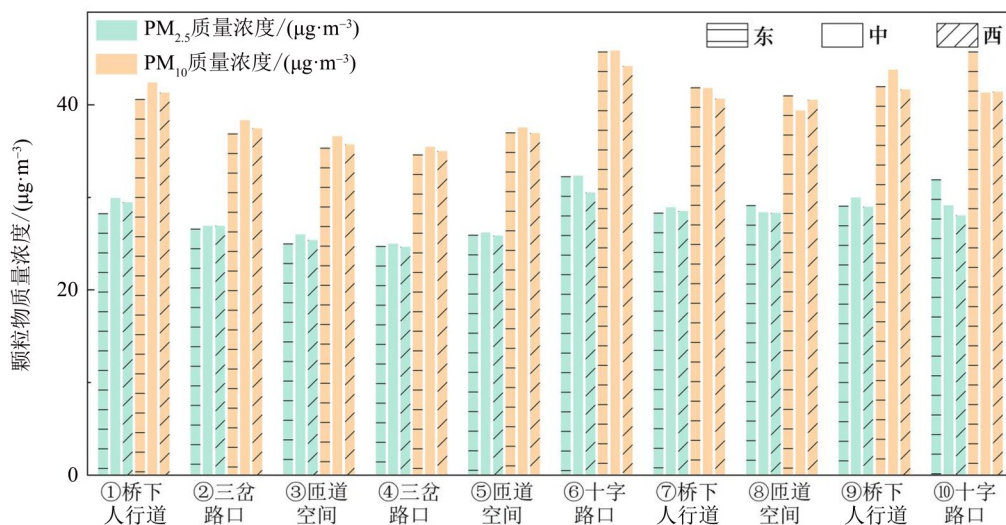


图5 颗粒物浓度空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of particulate matter concentration

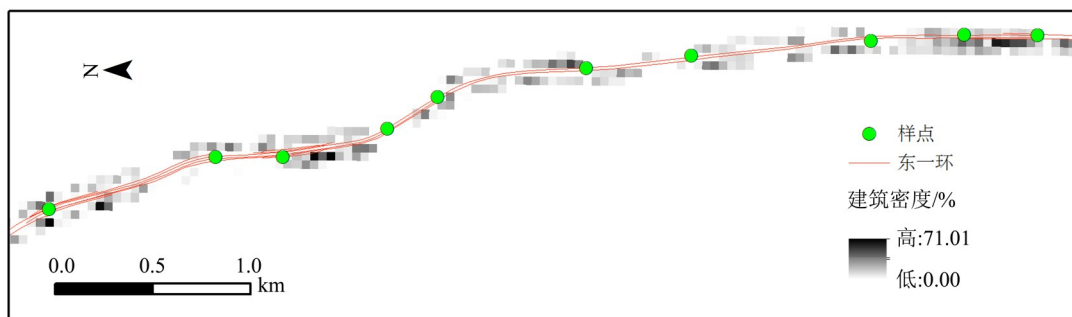


图6 样地 50 m 缓冲区内建筑密度

Fig. 6 Building density within the 50 m buffer zone of the sample plot

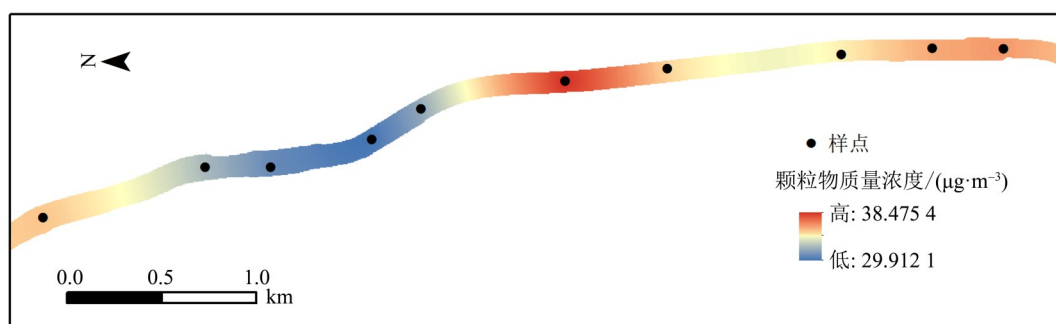
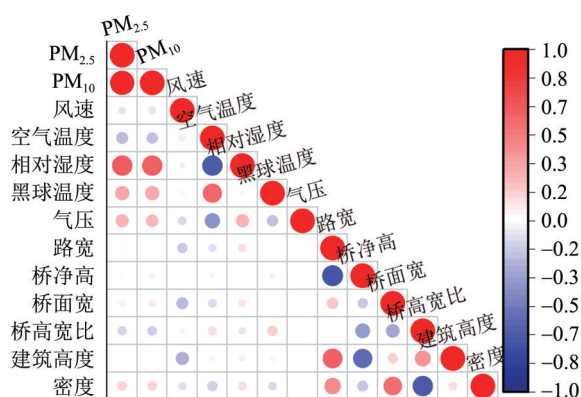


图7 样地 50 m 缓冲区颗粒物浓度

Fig. 7 The particulate matter concentration in the 50 m buffer zone of the sample plot



红色代表正相关关系,蓝色代表负相关关系,颜色越深、圆圈越大表明 r 越大, $r=0$ 则不显示。

图8 变量间斯皮尔曼相关系数热力图

Fig. 8 Spearman correlation heatmap of variables

正相关,与空气温度(r 分别为-0.223和-0.216, $P < 0.05$)呈显著负相关。而颗粒物浓度与高架桥周边建筑密度的相关性未达统计学显著水平($P > 0.05$)。

为探究车流量与颗粒物浓度的关系,基于样地③和⑧的调研数据(表5),通过 Spearman 相关性检验解析颗粒物与车流量关系。分析结果表明, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度与车流量呈显著正相关(r 分别为0.379和0.321, $P < 0.05$),这表明桥下空间的颗粒物污染与交通活动密切相关,其主要来源于交通源排

放(包括机动车尾气、轮胎及刹车磨损、道路扬尘再悬浮等)(He et al., 2024)。

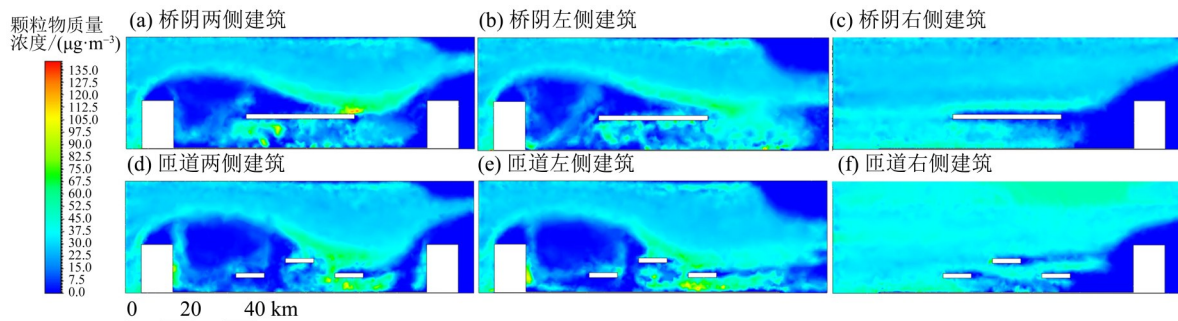
2.4 Fluent 模拟结果

提取离地面 1.5 m 处的颗粒物质量浓度与风速进行 Spearman 相关性分析,初步结果显示,两者呈显著正相关($r=0.248$),与一般认知不符。通过调整风速(5 m/s)重新分析,结果两者呈显著负相关($r=-0.399$),这表明在桥下空间,较低风速会造成颗粒物扬起与滞留,而较高风速则有利于其扩散。

利用 Fluent 模拟 6 种高架桥与周边建筑形态的颗粒物和风速分布情况(图9、10)。整体上,桥下空间风速降低、易形成污染物滞留区,部分匝道空间风速较高,颗粒物浓度相对降低。具体来看,建筑布局会影响风场及颗粒物浓度分布:1)迎风侧受建筑阻挡,易产生明显的尾流。2)双侧建筑,桥阴空间风速明显降低(均值 ≤ 1 m/s),空气交换效率降低,桥下两侧易形成漩涡,促使颗粒物滞留;匝道空间因“狭管效应”,局部风速提高,可吹散或滞留颗粒物。3)左侧建筑,因建筑和高架桥阻挡,建筑和高架桥间形成漩涡区,无建筑一侧风速降低,颗粒物下沉并滞留。4)右侧建筑,缺少左侧建筑的阻挡,气流易进入桥下,因建筑对气流阻挡而形成上升气流,导致迎风侧颗粒物浓度高于背风侧。

表 5 样地③、⑧每日车流量
Table 5 Daily traffic volume of plots③and⑧

样地	时段	车流量/(辆·h ⁻¹)					平均
		周五	周六	周日	周一	周二	
③	早	668.00	325.00	318.00	679.00	637.00	521.80
	中	537.00	500.00	467.00	509.00	434.00	
	晚	692.00	475.00	434.00	593.00	559.00	
⑧	早	638.00	483.00	429.00	738.00	798.00	599.13
	中	579.00	596.00	504.00	592.00	529.00	
	晚	658.00	571.00	563.00	660.00	649.00	



迎风侧(左侧)代表实测的东点位,背风侧(右侧)代表实测的西点位。

图 9 不同高架桥与周边建筑形态对颗粒物影响模拟图

Fig. 9 Simulation diagram of the impact of different elevated bridges and surrounding building forms on particulate matter

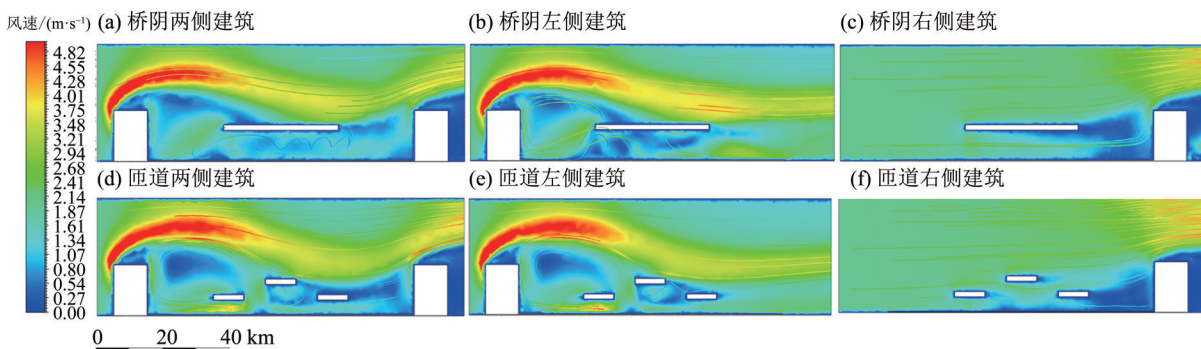


图 10 不同高架桥与周边建筑形态对风速影响模拟图

Fig. 10 Simulation diagram of the impact of different elevated bridges and surrounding building forms on wind speed

模拟数据与实测结果在变化趋势上表现出高度一致性。1)模拟数据与样地①、⑨(桥阴空间,两侧有建筑)趋势一致,均表现为中部颗粒物质量浓度高于东、西侧(图 9a)。2)模拟数据与样地⑥、⑦(桥阴空间,仅东侧有建筑)趋势一致,桥下空间颗粒物浓度出现两侧交替较高现象(图 9b)。3)模拟数据与样地⑩(桥阴空间,仅西侧有建筑)趋势一致,东侧颗粒物浓度明显高于中部和西侧(图 9c)。4)模拟数据与样地③(匝道空间,两侧有建筑)一致,东侧颗粒物浓度较低,西侧较高(图 9d)。

3 讨论

本研究样地在延伸型高架桥沿线均匀布设采样点(间隔约 300~500 m),并划分为东、中、西 3 个分区。与以往垂直测量、多点持续测量及移动监测(柴晋鹏等,2021;陈同等,2022;刘永红等,2024)等方法有所不同,本方案针对交通高峰期、道路节点类型以及周边建筑环境开展测量。与秦成君等(2018)、陈同等(2022)利用数值模拟探究颗粒物时变以及风向对颗粒物浓度分布有所不同,本研究侧

重于高架桥周边建筑对于桥下空间颗粒物浓度分布的影响。

结果表明,风因为建筑的阻挡,形成建筑尾流,这与杨巧兰等(2024)模拟情况一致,建筑的变化导致风场变化,影响颗粒物分布。常出现迎风侧颗粒物浓度升高、背风侧下降的现象,这与邱兆文等(2022)研究结果一致。颗粒物5 d平均质量浓度变化显示,大部分路段呈日间高、傍晚低的趋势,部分路段存在差异,与刘永红等(2024)及吴佳媚等(2025)的研究一致,其浓度变化图中也呈现类似趋势,但部分路段傍晚浓度最高。此外,部分时段还存在实测 PM_{10} 质量浓度低于背景值,这与Yu et al.(2022)研究结论一致,无风条件导致颗粒物下沉,使低风速区域(如隧道、桥洞)的粗颗粒物(PM_{10})浓度显著低于开阔道路。由于车流湍流作用使颗粒物多处于悬浮状态,该现象在本研究中出现较少。

桥下3类交通道路节点(十字路口、三岔路口、桥下人行通道)中,十字路口的颗粒物浓度最高,桥下人行通道次之,三岔路口最低,与李青好等(2022)及吴海玲等(2025)的结论一致,车辆在十字路口受信号灯控制易出现短时滞留,在红绿灯周边形成颗粒物高浓度区。

本研究受实际条件限制测量高度单一,未能反映颗粒物垂直变化,未来可测量不同高度,并结合CFD模拟及其他因素的变化,更深入地探究影响颗粒物浓度变化的原因。

4 结 论

本研究以南昌市东一环为例,利用实测结合数

值模拟的方式,探究高架桥与周边建筑形态对桥下空间颗粒物分布的影响,实测和模拟结果较为一致,并利用实测数据分析了颗粒物浓度在时间上的变化。对桥下空间颗粒物与其他因子进行Spearman相关性分析。结果表明:

在时间差异上,颗粒物浓度总体呈现“午高峰>早高峰>晚高峰”的特征,且工作日浓度普遍高于非工作日。在空间差异上,桥下空间颗粒物浓度受道路节点类型、桥面宽度及周边建筑布局等因素影响,表现出空间差异性。

颗粒物高质量浓度区主要分布于十字路口及部分桥阴区,而低质量浓度区则多位于三岔路口及匝道空间。颗粒物质量浓度较高区域的桥面与路面宽度通常较大,而质量浓度较低区域则相反。颗粒物质量浓度与相对湿度、车流量、黑球温度、建筑密度呈显著正相关,与气温呈显著负相关。

模拟结果显示,在低风速条件下,颗粒物质量浓度与风速呈显著正相关;而在高风速条件下,二者呈显著负相关。空间分布上,桥下区域普遍呈现风速降低、颗粒物质量浓度升高的滞留特征;与之相反,匝道部分区域因风速较高,颗粒物质量浓度相对较低。不同高架桥与周边建筑形态会形成差异化的风场结构,进而影响颗粒物的扩散与积聚。在双侧建筑围合情况下,桥下风速有所减弱并易形成涡旋,导致颗粒物持续滞留。当仅左侧存在建筑时,迎风侧易生成涡旋,无建筑一侧风速降低,促使颗粒物下沉并滞留;而在仅右侧有建筑的情形下,颗粒物易进入桥下,受建筑阻挡形成滞留。

参考文献:

- 柴晋鹏,陈学刚,赵直,2021.基于移动监测的城市街谷交通相关污染物浓度时空变化研究[J].地球与环境,49(4):389-399.
- 陈同,罗银萍,陈进财,等,2022.含高架桥的实际街区交通颗粒物扩散模拟[J].中山大学学报(自然科学版)(中英文),61(4):119-132.
- 顾兆林,张云伟,雷康斌,2011.不同大气稳定度下绿化街谷流动的大涡模拟[J].中国科学:技术科学,41(1):109-118.
- 黄远东,王守生,金鑫,等,2008.城市街道峡谷内污染物扩散模拟中不同湍流模型比较研究[J].水动力学研究与进展A辑,23(2):189-195.
- 李超,何红弟,彭仲仁,2025.基于无人机观测的城市郊区临街区域颗粒物时空分布[J].同济大学学报(自然科学版),53(6):934-943.
- 李青好,胡婷蕊,陈楠,等,2022.某高密度街区大气颗粒物质量浓度分布特征实测研究[J].环境污染与防治,44(2):206-211+217.
- 李文博,2015.郑州市高架桥下环境场所的营造及景观再利用研究[D].西安:西安建筑科技大学:10.
- 刘永红,付恽昕,徐锐,等,2024.高架街谷中交通污染物的垂直分布和时变特征研究[J].环境科学学报,44(8):70-82.
- 秦成君,宋翀芳,王世杰,等,2018.城市高架桥街谷空气环境和污染物扩散的数值模拟[J].华侨大学学报(自然科学版),39(5):714-719.

- 邱兆文, 王樽, 李唯真, 2022. 城市高架桥对颗粒物扩散分布的影响[J]. 中国公路学报, 35(5): 202-210.
- 王耕, 庞小兵, 邢波, 等, 2025. 基于激光散射传感器地面走航研究长三角城市大气颗粒物时空变化[J]. 环境科学学报, 45(4): 341-350.
- 吴海玲, 吴旗韬, 沈堪海, 等, 2025. 基于道路走航式监测的城市道路碳排放时空分布特征[J]. 环境污染与防治, 47(6): 143-149.
- 吴佳媚, 刘燕珍, 钟子豪, 等, 2025. 湿热地区高架桥下空间夏季微环境及人体舒适度研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 57(6): 931-940.
- 杨巧兰, 李平, 夏冬, 等, 2024. 裙楼对住宅小区室外风环境影响的数值模拟分析[J]. 中山大学学报(自然科学版中英文), 63(3): 38-47.
- 张传福, 曾建荣, 文谋, 等, 2012. 高架桥对街道峡谷内大气颗粒物运输的影响[J]. 环境科学研究, 25(2): 159-164.
- 周永江, 姚宜斌, 熊永良, 等, 2020. 基于 Spearman 秩相关系数的 PWV 与 $PM_{2.5}$ 相关性研究[J]. 大地测量与地球动力学, 40(3): 236-241.
- He C, Jiang W, Xiao Q, et al, 2024. A review of non-exhaust emissions on pavement area: Sources, compositions, evaluation and mitigation[J]. J Traffic Transp Eng Engl Ed, 11(6): 1243-1258.
- Huang R J, Zhang Y, Bozzetti C, et al, 2014. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. Nature, 514(7521): 218-222.
- Huang Y, Lei C, Liu C H, et al, 2021. A review of strategies for mitigating roadside air pollution in urban street canyons[J]. Environ Pollut, 280: 116971.
- Jon K S, Huang Y, Sin C H, et al, 2023. Influence of wind direction on the ventilation and pollutant dispersion in different 3D street canyon configurations: Numerical simulation and wind-tunnel experiment[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 30(11): 31647-31675.
- Oke T R, 1988. Boundary layer climates [M]. London: Routledge:4.
- Stull R B, 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology [M]. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Suhaimi N F, Jalaludin J, Roslan N I S, 2024. Traffic-Related Air Pollution (TRAP) in relation to respiratory symptoms and lung function of school-aged children in Kuala Lumpur[J]. Int J Environ Health Res, 34(3): 1384-1396.
- Yu Y T, Xiang S, Li R, et al, 2022. Characterizing spatial variations of city-wide elevated PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations using taxi-based mobile monitoring[J]. Sci Total Environ, 829: 154478.
- Zhang Y, Zhao H, Long Y, 2025. CMAB: A multi-attribute building dataset of China[J]. Sci Data, 12: 430.

(责任编辑 江 睿)