

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2025.0278

王笑笑, 王超起, 张亚丽, 等. 2025. 郑州市 PM_{2.5} 污染和热岛效应的演变规律及其时空关联特征与影响机制[J]. 环境科学学报, 45(11): 329-344
WANG Xiaoxiao, WANG Chaoqi, ZHANG Yali, et al. 2025. Evolution, spatial-temporal correlation characteristics and influencing mechanisms of PM_{2.5} pollution and urban heat island effect in Zhengzhou[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 45(11): 329-344

郑州市 PM_{2.5} 污染和热岛效应的演变规律及其时空关联特征与影响机制

王笑笑¹, 王超起¹, 张亚丽^{1,*}, 李哲^{1,2}, 尹甜梦¹, 穆博¹

1. 河南农业大学, 资源与环境学院, 郑州 450046
2. 南京农业大学, 土地管理学院, 南京 210095

摘要: 大气颗粒物污染和城市热岛效应(Urban Heat Island, UHI)均是制约城市环境质量的关键, 对两者的关联性及其影响机制的认识尚存在分歧. 本研究利用郑州市 2016—2022 年 PM_{2.5} 浓度和气温的实测数据及遥感影像, 基于相关性分析、双变量空间自相关和地理探测器探讨 PM_{2.5} 浓度和城市热岛强度(Urban Heat Island Intensity, UHII)的时空演变规律、多时间尺度时空关联特征并分析其多因素影响机制. 结果表明: ①研究期间郑州市 PM_{2.5} 浓度年均值和 UHII 年均值分别下降 26.02 μg·m⁻³ 和 0.68 °C, PM_{2.5} 浓度夏季低冬季高, UHII 与之相反, 郑州市 PM_{2.5} 浓度整体为西南低、西北部和东部高; 城市高温区白天集中在主城区、南部和东部, 夜晚仅集中在主城区, 低温区多分布在城市西部; ②PM_{2.5} 污染加重时 UHII 通常降低, 两者在日、月和季节尺度上均呈显著负相关, 相关系数取值范围为 -0.292~-0.977, 且整体相关性均值表现为季节均值>月均值>日均值, 年均值在 0.05 水平上呈正相关关系, 相关系数为 0.857, 不同时间尺度 PM_{2.5} 浓度和 UHII 在空间上主要为负相关, 主城区空间聚集类型以低高聚集为主, 夜晚空间相关性高于白天, 白天空间聚集范围大于夜晚; ③降水、NDVI(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)和夜间灯光指数是影响 PM_{2.5} 浓度和昼夜地表温度的主要驱动因素, 降水和 NDVI 对 PM_{2.5} 浓度和地表温度表现为负向驱动作用, 而夜间灯光指数则与两者呈正相关关系, 降水与三产占比的交互作用对白天地表温度起到首要贡献能力, 夜间灯光指数和一产占比的交互作用对夜晚地表温度影响力最大. 研究结果有利于揭示快速城市化地区 PM_{2.5} 污染和热岛效应之间的复杂关联特征与多重影响机制, 为开展联防联控工作, 改善大气环境质量提供参考依据.

关键词: PM_{2.5} 污染; 热岛效应; 关联特征; 影响机制; 郑州市

文章编号: 0253-2468(2025)11-0329-16 中图分类号: X513 文献标识码: A

Evolution, spatial-temporal correlation characteristics and influencing mechanisms of PM_{2.5} pollution and urban heat island effect in Zhengzhou

WANG Xiaoxiao¹, WANG Chaoqi¹, ZHANG Yali^{1,*}, LI Zhe^{1,2}, YIN Tianmeng¹, MU Bo¹

1. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046
2. College of Land Management, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095

Abstract: Atmospheric particulate pollution and the urban heat island (UHI) effect are both critical factors influencing urban environmental quality. However, their interaction mechanisms remain complex and insufficiently understood. Based on ground observations and remote sensing data, this study analyzed the spatiotemporal variations and multi-scale correlation characteristics between PM_{2.5} concentrations and urban heat island intensity (UHII) in Zhengzhou from 2016 to 2022. Correlation analysis, bivariate spatial autocorrelation, and the geographical detector model were employed to examine their interrelations and dominant influencing factors. The results showed that from 2016 to 2022, the annual average PM_{2.5} concentration and UHII in Zhengzhou decreased by 26.02 μg·m⁻³ and 0.68 °C, respectively. PM_{2.5} concentrations were higher in winter and lower in summer, whereas UHII exhibited the opposite seasonal trend. Spatially, PM_{2.5} was higher in the northwest and east, and lower in the southwest. High-temperature zones during the day were mainly located in the central, southern, and eastern parts of the city, while nighttime heat was concentrated in the urban core. Cooler zones were primarily found in the western regions. A significant negative correlation between PM_{2.5} and UHII was observed at daily, monthly, and seasonal scales ($r = -0.292 \sim -0.977$), with correlation strength in the order of seasonal > monthly > daily. In contrast, a significant positive

收稿日期: 2025-05-06 修回日期: 2025-07-27 录用日期: 2025-07-29

基金项目: 河南省高等学校哲学社会科学应用研究重大项目(No.2025-YYZD-09); 国家自然科学基金(No.42101298); 河南省政府决策研究招标课题(No.2023JC014)

作者简介: 王笑笑(1999—), 女, E-mail: wang20232559@163.com; * 责任作者, E-mail: skyali@henau.edu.cn

correlation was found at the annual scale ($r = 0.857$, $p < 0.05$). Spatial correlations were predominantly negative, with low-high clustering patterns prevailing in urban areas. Nighttime correlations were stronger than daytime ones, while daytime patterns exhibited broader spatial clustering. Precipitation, the normalized difference vegetation index (NDVI), and nighttime light intensity were identified as the key factors affecting $PM_{2.5}$ concentration and surface temperature. Precipitation and NDVI had negative effects, whereas nighttime light showed positive associations. Interaction analysis revealed that precipitation and the proportion of the tertiary industry primarily influenced daytime temperature, while nighttime temperature was mainly driven by nighttime light and the primary industry. These findings enhance the understanding of the coupled mechanisms between $PM_{2.5}$ pollution and the UHI effect in rapidly urbanizing areas and provide scientific support for integrated strategies to improve urban atmospheric environmental quality.

Keywords: $PM_{2.5}$ pollution; urban heat island effect; correlation characteristics; influencing mechanism; Zhengzhou

1 引言(Introduction)

在快速城市化和工业化进程中,城市内部的建筑、人口、交通以及工业等高度集中,极易产生大气污染和热岛效应等生态环境问题。 $PM_{2.5}$ 作为大气污染物的重要组成部分,易附带有毒有害物质,且在大气中的停留时间长、输送距离远,对空气质量和城市治理发展等有重要的影响(苏业旺等, 2022)。城市区域气温显著高于周边郊区的城市热岛效应(Urban Heat Island, UHI),易使能源消耗增加,城市居民的日常生活和健康受损(Estoque *et al.*, 2020; 李宇等, 2021; Anser *et al.*, 2025)。研究表明 $PM_{2.5}$ 污染和 UHI 都是快速城市化进程中的负面效应,与工业交通、土地覆被和人类活动的人为热释放密切相关,两者之间相互作用,相互影响(Lin *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2023)。

学者们利用实测数据(Yang *et al.*, 2021; Ngarambe *et al.*, 2021)或遥感数据(Feng *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2025),基于城市群(Jiang *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023)、单个城市(Wu *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2025),从空气动力学(Li *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2023)和统计学角度(Liang *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2025)研究 $PM_{2.5}$ 污染和 UHI 之间的相关关系,时间尺度多以季节尺度(Li *et al.*, 2018; Cao *et al.*, 2024)和年尺度(Wang *et al.*, 2021)为主。一些研究认为两者呈负相关关系,理由主要是 UHI 增加了大气不稳定性 and 垂直速度,从而增加了行星边界层的高度和城市地区的通风,有利于污染物扩散稀释(Lai, 2018; Zhong *et al.*, 2018)。也有学者认为两者为正相关关系,是因为 $PM_{2.5}$ 增加了气溶胶光学厚度,气溶胶在夜间吸收地表长波辐射,并进一步加热了地表空气,使 UHI 增强(Yang *et al.*, 2020)。还有研究认为两者的相关性昼夜存在差异。Wu 等(2021)调查了 $PM_{2.5}$ 的散射和吸收对中国南京城市热岛效应强度(Urban Heat Island Intensity, UHII)的影响,发现 $PM_{2.5}$ 与 UHII 在白天为负相关,夜间为正相关。目前关于两者之间的相关性并未达成一致,主要原因可能包含数据来源较单一,时间尺度不同且不够细化(Feng *et al.*, 2025; Songsom *et al.*, 2025)。

$PM_{2.5}$ 污染和 UHI 的相互作用越来越受到社会关注。学者们从自然环境(Zhao *et al.*, 2024)、土地覆被(Saha *et al.*, 2024)、工业交通(Wu *et al.*, 2025)和社会生活(Feng *et al.*, 2023; Cichowicz *et al.*, 2024)等方面研究 $PM_{2.5}$ 污染和 UHI 的影响机制,结果表明两者有许多相似的诱因。Catton 等(2024)探讨了加拿大东部主要城市温度、降水和空气质量之间的关系,发现降水能有效缓解 UHI 和 $PM_{2.5}$ 浓度。Chang 等(2025)分析京津冀“2+36”城市热岛效应与颗粒物之间的影响因素,表明在 UHI 的作用下,植被增强指数和降水等生态因素会加剧颗粒物污染。Li 等(2022)分析了生物物理梯度和社会经济梯度下北京市 $PM_{2.5}$ 和 UHI 耦合关系,表明植被覆盖率越高、水体密度越大,空气污染与城市热岛耦合协调度越低,人类活动强的区域两者会相互促进。目前关于两者关联影响机制的研究以自然生态因素为主,关于社会经济方面的分析相对较少,且多聚焦于单一因子对两者关系的影响,对于不同因子间的交互作用及其综合影响关注较少,不利于管理部门制定行之有效的联防联控措施。为了有效治理城市大气环境问题,亟需基于不同数据源,从多时间尺度分析快速城市化地区两者之间的关联特征及其多种影响因素。

郑州市是河南省会、国家级中心城市和重要的综合交通枢纽,近年来城市规模扩张迅速,人口急剧增加,生态环境问题突出,包括城市大气颗粒物浓度过高和热岛效应明显等方面。因此,本研究以郑州市为研究对象,基于 2016—2022 年 $PM_{2.5}$ 浓度与气温的实测和遥感数据,分析大气 $PM_{2.5}$ 污染和 UHII 演变特征,从昼夜、日、月、季和年多个时间尺度研究郑州市 $PM_{2.5}$ 浓度与 UHII 的时空关联规律,从气象条件、地表覆被、产业

表 1 研究数据及来源

Table 1 Research data and their sources

数据类型	数据名称	时间尺度	空间分辨率	数据来源
实测数据	PM _{2.5}	日	站点	郑州市生态环境局(https://sthjj.zhengzhou.gov.cn/)
	气温	日	站点	河南省气象局(http://ha.cma.gov.cn/)
遥感数据	PM _{2.5}	月	1 km	CHAP 数据集(https://weijing-rs.github.io/product.html)
	昼夜地表温度	月	1 km	NASA LP DAAC 提供的 MOD11A2 数据集(https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11a2v006/)
自然因素数据	风速	年	0.04°	TerraClimate 数据集(https://www.climatologylab.org/terraclimate.html)
	降水	年	1 km	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/home)
	相对湿度	年	1 km	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/home)
	NDVI	年	1 km	NASA 提供的 MOD13A3 数据集(https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a3v006/)
社会经济数据	夜间灯光指数	年	500 m	全球变化科学研究数据出版系统(http://www.geodoi.ac.cn)
	GDP	年	/	
	一产占比	年	/	
	二产占比	年	/	郑州市统计局(https://tjj.zhengzhou.gov.cn)
	三产占比	年	/	

$$T = 0.02 \times \text{DN} - 273.15 \tag{2}$$

式中, T 为地表温度, DN 为遥感影像像元值.

2.3.3 相关系数法 相关系数是用来反映两个变量之间相关关系密切程度的统计指标, 这里使用皮尔逊相关系数法(王莹书等, 2022). 计算公式见式(3).

$$R = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{N \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \tag{3}$$

式中, R 为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和 UHII 的相关系数, x_i 为第 i 个时间点 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值, y_i 为第 i 个时间点 UHII 值, N 为变量总个数. $R > 0$ 表明两者呈正相关, $R < 0$ 表示负相关, R 绝对值越大表明相关性越强.

2.3.4 双变量空间自相关分析 双变量空间自相关包括全局空间自相关(Global Spatial Autocorrelation)和局部空间自相关(Local Indicators of Spatial Association, LISA), 通过莫兰指数(Moran's I)作为相关性判定指标全局自相关指标, 反映总体空间关联程度与空间差异性(Anselin, 1995). 计算公式见式(4).

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{S_0^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \tag{4}$$

式中, I 为全局 Moran 指数, n 为空间单元数, w_{ij} 为空间权重矩阵, x_i 和 y_j 分别为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和 UHII 在空间单元 i, j 的观测值, S_0^2 为样本方差.

局部空间自相关计算公式(沈中健等, 2021)见式(5).

$$I_i = z_i \sum_{j=1}^n w_{ij} z_j \tag{5}$$

式中, I_i 为局部 Moran 指数, z_i, z_j 为空间单元 i, j 观测值的方差标准化, 其余符号同上.

2.3.5 影响因素分析 地理探测器是一种研究地理异质性和两个变量之间可能因果关系的统计工具, 被广泛用于驱动力和因素分析. 该模型是以 q 值为度量各自变量对因变量空间分异性解释程度的指标(Wu et al., 2021). 计算公式见式(6).

表 2 郑州市热岛强度等级划分

Table 2 Classification of heat island intensity in Zhengzhou

等级	分级标准	等级含义
1	$T < u - \text{std}$	低温区
2	$u - \text{std} \leq T < u - 0.5\text{std}$	次中温区
3	$u - 0.5\text{std} \leq T < u + 0.5\text{std}$	中温区
4	$u + 0.5\text{std} \leq T < u + \text{std}$	次高温区
5	$T \geq u + \text{std}$	高温区

注: u 为平均值, std 为标准差.

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (6)$$

式中, q 值为自变量对因变量的影响程度,值域为 $[0,1]$,解释性越高 q 值越大,反之越小; h 为驱动因子的分层; N_h 和 N 分别为某一分层和整个区域的样本数; σ_h^2 、 σ^2 分别为某一层和整个区域的方差和。

交互探测通过对比单因子作用下的 q 值与双因子交互作用下的 q 值差异判定交互类型,具体可分为:非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立、非线性增强(王成等, 2022)。

3 结果与分析(Result and analysis)

3.1 郑州市PM_{2.5}浓度与UHII时空变化特征

3.1.1 郑州市PM_{2.5}浓度时空变化特征 (1)郑州市PM_{2.5}浓度时间变化特征.根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633-2012),对PM_{2.5}浓度日均值进行等级划分(图2).结果显示,2016—2022年郑州市PM_{2.5}浓度日均值多处于优和良等级,2019年前35~75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 占比最高,2019年起0~35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 占比最高,且严重污染天数降为0,空气质量明显好转,污染等级的日均浓度天数整体下降.郑州市PM_{2.5}浓度月均值整体呈“U”型变化(图3a),PM_{2.5}月均浓度峰值多出现在1月和12月,主要是受冬季逆温天气和采暖燃煤等的影响,雾霾天气经常发生(Espina-Martin *et al.*, 2024).同时,郑州市PM_{2.5}浓度季节性差异明显(图3b),表现为冬季最高,夏季最低.其中,2016年冬季季均PM_{2.5}浓度高达121.37 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,2022年夏季季均PM_{2.5}浓度最低,为21.20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.研究期间郑州市PM_{2.5}浓度年均值呈先下降,后略微升高的变化趋势(图2),2022年PM_{2.5}浓度年均值较2016年PM_{2.5}浓度年均值整体减少26.02 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.这与近年来郑州市持续推进“大气污染防治攻坚战”,强化工业源、扬尘源、移动源和面源等多种大气污染源减排措施密不可分。

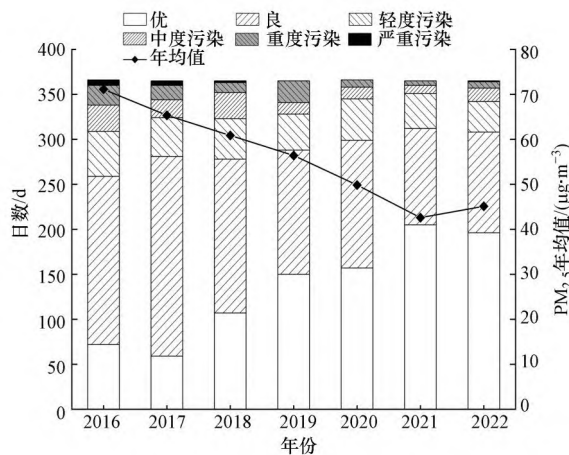


图2 郑州市2016—2022年PM_{2.5}日均浓度分布频次与年均值

Fig.2 Daily average concentration distribution frequency and annual average value of PM_{2.5} in Zhengzhou from 2016 to 2022

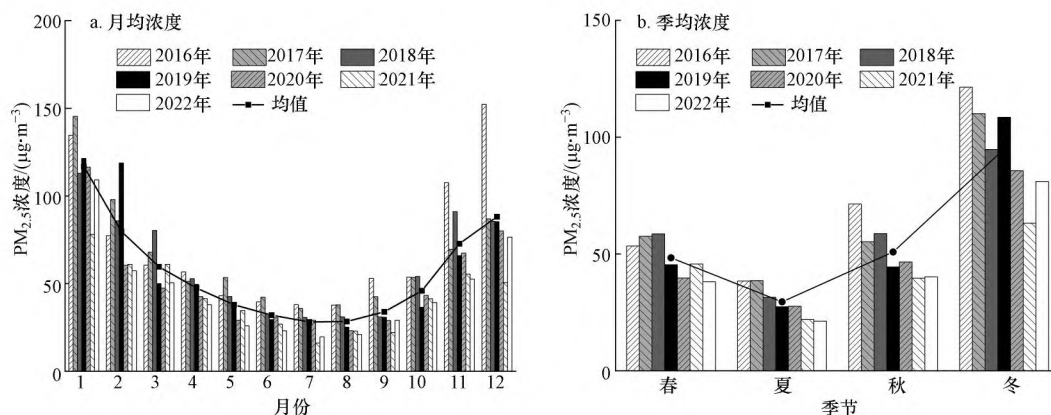


图3 郑州市2016—2022年PM_{2.5}月均和季均浓度值

Fig.3 Monthly and seasonal average PM_{2.5} concentration in Zhengzhou from 2016 to 2022

(2)郑州市PM_{2.5}浓度空间差异特征.选取2022年作为代表年份,从不同时间尺度分别对PM_{2.5}浓度进行分析(图4),可以看出郑州市PM_{2.5}月均浓度空间分布和与之对应的季均浓度空间分布保持一致.夏季PM_{2.5}浓度高值区主要分布在郑州市西北部,冬季PM_{2.5}浓度高值区集中在郑州市东部,春季和秋季PM_{2.5}浓度高值

区则主要分布在郑州市西北部和东部.郑州市春、秋两季干燥多风,西北部和东部平原地区工业布局密集,PM_{2.5}浓度较高;郑州市夏季盛行东南风,且雨水天气较多,导致PM_{2.5}浓度最低,而冬季供暖等导致PM_{2.5}排放量大,受盛行的西北风影响,导致PM_{2.5}高值区集中在郑州市东部.

PM_{2.5}浓度低值区多分布在郑州市西南部,北部和东部地区PM_{2.5}浓度则整体偏高.这主要与郑州市地形地貌特征和人口产业分布差异有关,西南地区海拔较高,植被覆盖度相对较高,大气质量较好.北部和东部多为平原地区,人口密集,工业较多,导致PM_{2.5}污染浓度较高.由此可见,郑州市应加强北部和东部地区的大气污染防治工作,深化重点行业大气污染治理,同时结合城市绿化和水系工程建设,增加绿地水域等开敞空间缓解PM_{2.5}污染.

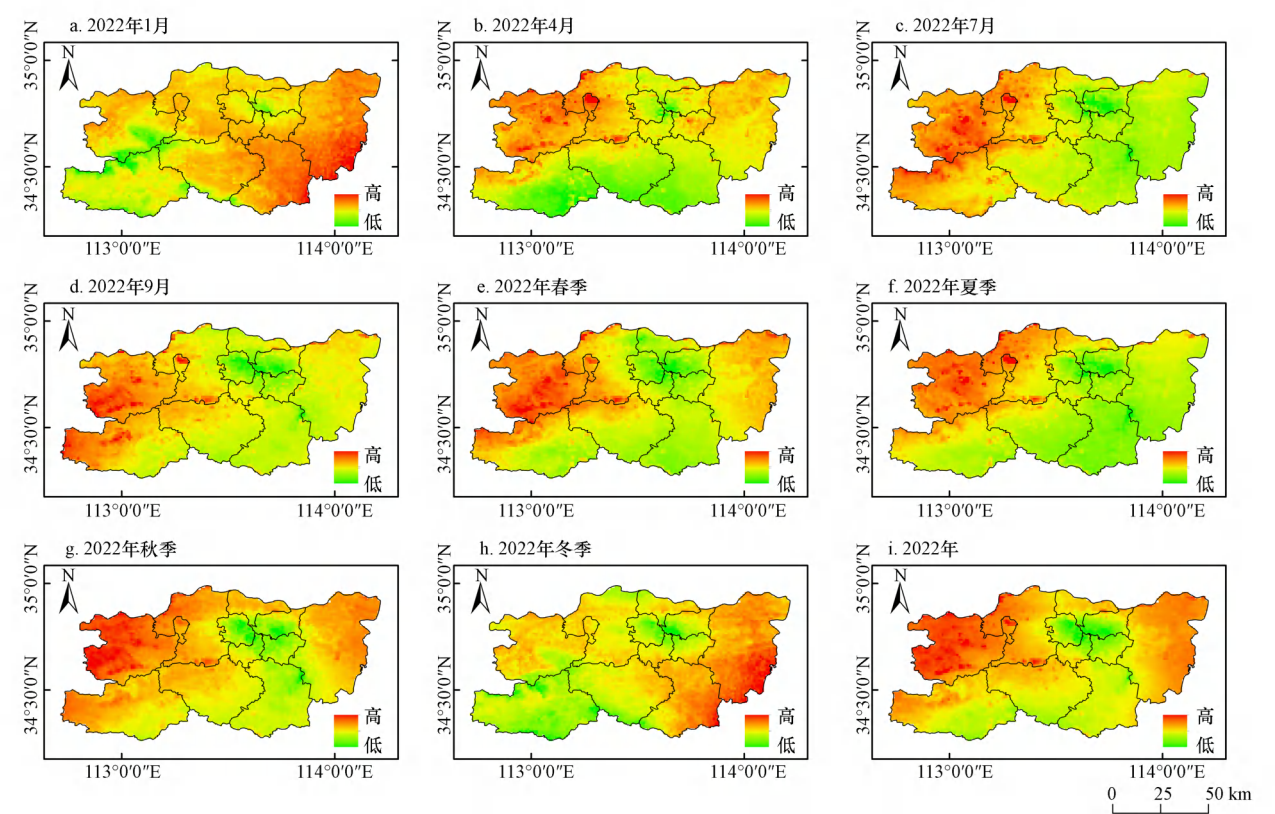


图4 郑州市2022年PM_{2.5}月均、季均和年均浓度空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of monthly, quarterly and annual average PM_{2.5} concentrations in Zhengzhou in 2022

3.1.2 郑州市UHII时空变化特征 (1)郑州市UHII时间变化特征.2016—2022年郑州市日最大UHII呈波动变化(表3),其中,2016—2017年上升0.4℃,2017—2020年持续下降,整体下降0.24℃.最大UHII出现在2021年(高达5℃),最低UHII出现在2016年(为-3.13℃).郑州市UHII月均值整体呈倒“U”型变化趋势(图5a),6月和7月是城市极强热岛高发时期,而1月和12月常为UHII最低时段.郑州市UHII季节性差异明显,具体表现为夏季>春季>秋季>冬季(图5b).其中,2018年夏季UHII最高,均值为3.04℃;2021年冬季UHII最弱,均值为0.78℃.夏季太阳辐射强烈,城区地表不透水面积大,易吸收太阳辐射,导致气温升高(Sharma *et al.*, 2020),而郊区植被覆盖度相对较高,可缓解局部高温(Zhang *et*

表3 2016—2022年郑州市年均值热岛强度			
Table 3 Average annual heat island intensity of Zhengzhou from 2016 to 2022			
年份	最大热岛强度/℃	最小热岛强度/℃	平均热岛强度/℃
2016年	4.07	-3.13	2.25
2017年	4.47	-2.07	2.36
2018年	4.37	-1.63	2.30
2019年	4.27	-2.77	2.04
2020年	4.23	-0.97	2.13
2021年	5.00	-2.18	1.36
2022年	3.40	-1.05	1.57

al., 2024), 因此 UHI 更为明显. 冬季由于太阳光照时间较短, 城市吸收的光照减少, UHI 相对较弱 (Jia et al., 2019). 2016—2022 年郑州市 UHI 年均值降低 0.68 °C, UHI 现象有所减缓.

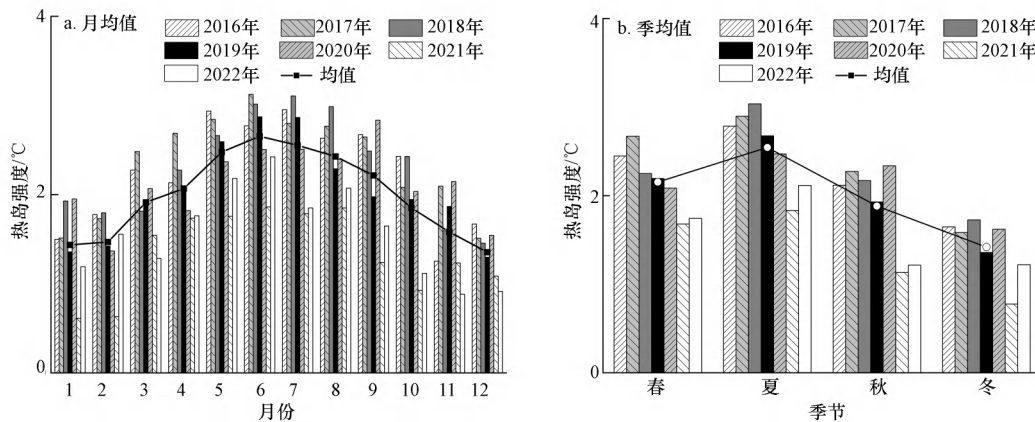


图5 郑州市2016—2022年热岛强度月均和季均值

Fig.5 Monthly mean value of heat island intensity in Zhengzhou from 2016 to 2022

(2) 郑州市 UHI 空间变化特征. 对比郑州市 2022 年不同时间尺度白天 (图 6) 和夜晚 (图 7) 的 UHI 空间分布图可以看出, 月尺度与相对应的季节尺度的 UHI 空间分布相符: 春季白天高温区主要分布在新郑市和中牟县, 夏季高温区范围明显扩大, 主要集中在主城区、新郑市和登封市南部, 秋季高温区范围主要分布在新郑市和中牟县, 冬季高温区主要分布在郑州市南部. 这是因为相比主城区冬季的集中供暖, 郑州市南部地区的区县更多依赖独立的燃煤和燃气取暖. 分散式的取暖系统会释放大量的废热 (姚华等, 2021), 导致这些区域的温度明显升高. 年尺度上, 高温区主要分布在人口、产业和建筑更为密集的郑州市主城区和中牟县南部和新郑市; 低温区持续分布在植被覆盖率高的巩义南部和登封北部.

夜晚郑州市各地区 UHI 季节变化幅度较小 (图 7), 这与李宇等 (2023) 对中国主要城市 UHI 的研究结论一致. 4 个季节高温区持续分布在主城区, 秋、冬两季高温区自主城区沿西南方向向巩义市扩散, 低温区多分布在登封市及郑州市东部地区. 整体而言, 夜晚的 UHI 较白天更为显著, 这主要是因为城市不透水地面和建筑比郊区的绿色植物反照率低, 增加了白天的热量储存并增强了夜间的长波热量释放. 此外, 夜间城区因空气流动受限, 热量扩散不畅, 高温区更加集中 (蔡智等, 2021). 因此, 一方面应增加郑州市主城区公园、绿地和屋顶花园, 铺装渗透性好的地面材料, 使用反射率高的建筑材料材料, 减少热量的吸收和储存. 另一方面应结合老旧片区改造, 降低土地开发强度和建筑容积率, 控制人口密度和机动车规模, 同时加强城市通风廊道体系构建, 促进空气流通.

3.2 郑州市 PM_{2.5} 浓度与热岛强度的关联特征

3.2.1 相关性分析 根据 PM_{2.5} 污染等级划分, 统计研究期间各年份不同污染条件下的 UHI (图 8), 结果表明, 当 PM_{2.5} 浓度增加时, UHI 均值往往降低. 2016—2022 年 PM_{2.5} 污染等级由优恶化至重度污染时, UHI 均值分别下降 2.12、2.22、1.86、1.57、1.52、0.90 和 1.22 °C. 利用 SPSS 统计分析软件对不同时间段 PM_{2.5} 浓度和 UHI 实测值进行皮尔逊相关性分析 (表 4). 结果表明, 研究期间各年份的郑州市 PM_{2.5} 浓度和 UHI 的日、月和季均值均为负相关关系, 相关性显著. 随着研究尺度扩大, 相关系数逐渐变大. 其中, PM_{2.5} 浓度和 UHI 月均值多在 0.01 水平呈显著负相关, 相关系数范围为 -0.714~ -0.882, 2020 年和 2022 年则在 0.05 水平上呈显著负相关, 相关系数为 -0.598 和 -0.687. 各年季节均值均在 0.05 水平上呈负相关关系, 相关系数范围为 -0.752~ -0.977, 呈波动下降趋势. 这与近几年来郑州市大气污染治理工作成效显著, PM_{2.5} 浓度大幅下降有关, 同时也表明 PM_{2.5} 浓度的降低会减弱其与 UHI 之间的相关性.

对郑州市 2016—2022 年不同时间尺度的 PM_{2.5} 浓度与 UHI 的均值进行相关性分析, 可知两者在日、月和季节尺度上仍为负相关关系, 相关系数分别为 -0.456 (在 0.01 水平上极显著相关)、-0.771 (在 0.01 水平上极显著相关) 和 -0.898 (在 0.05 水平上显著相关), 相关性与各年内日、月和季节分析结果一致. 与此相反, 2016—2022 年 PM_{2.5} 浓度与 UHI 在年尺度上为正相关, 相关系数为 0.857.

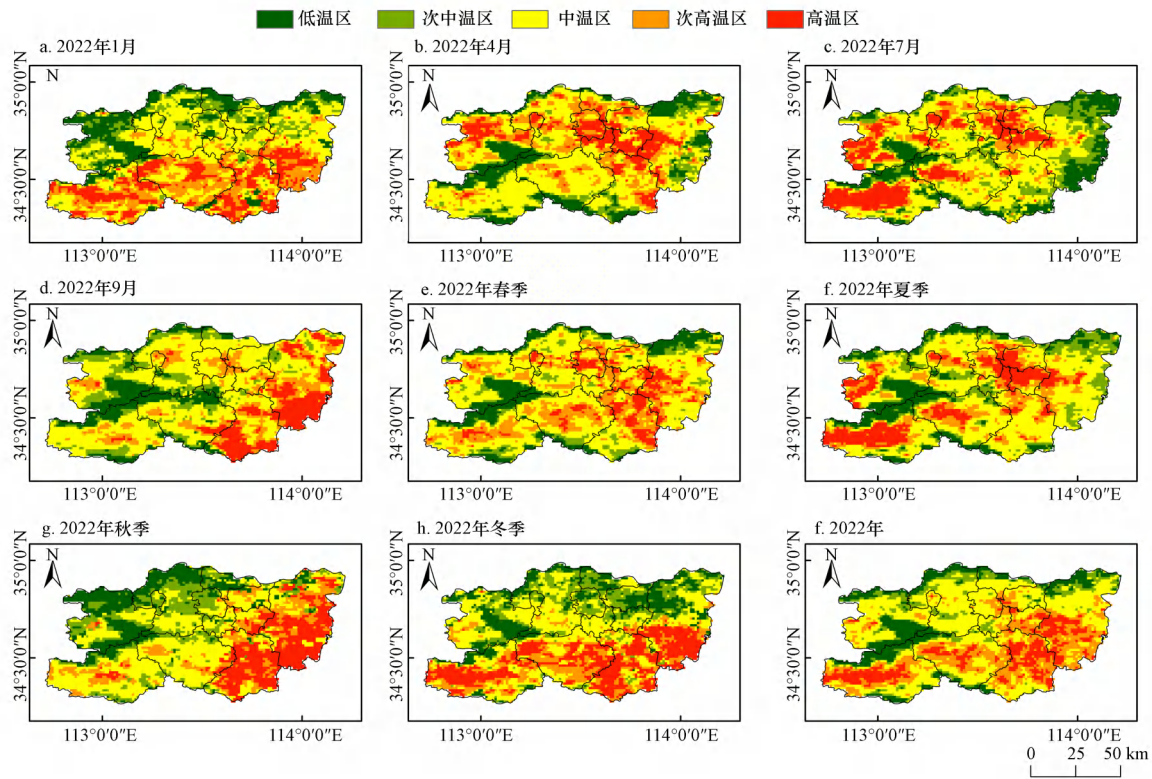


图 6 郑州市 2022 年不同时间尺度白天热岛效应空间分布图

Fig.6 Spatial distribution of daytime heat island effect at different time scales in Zhengzhou in 2022

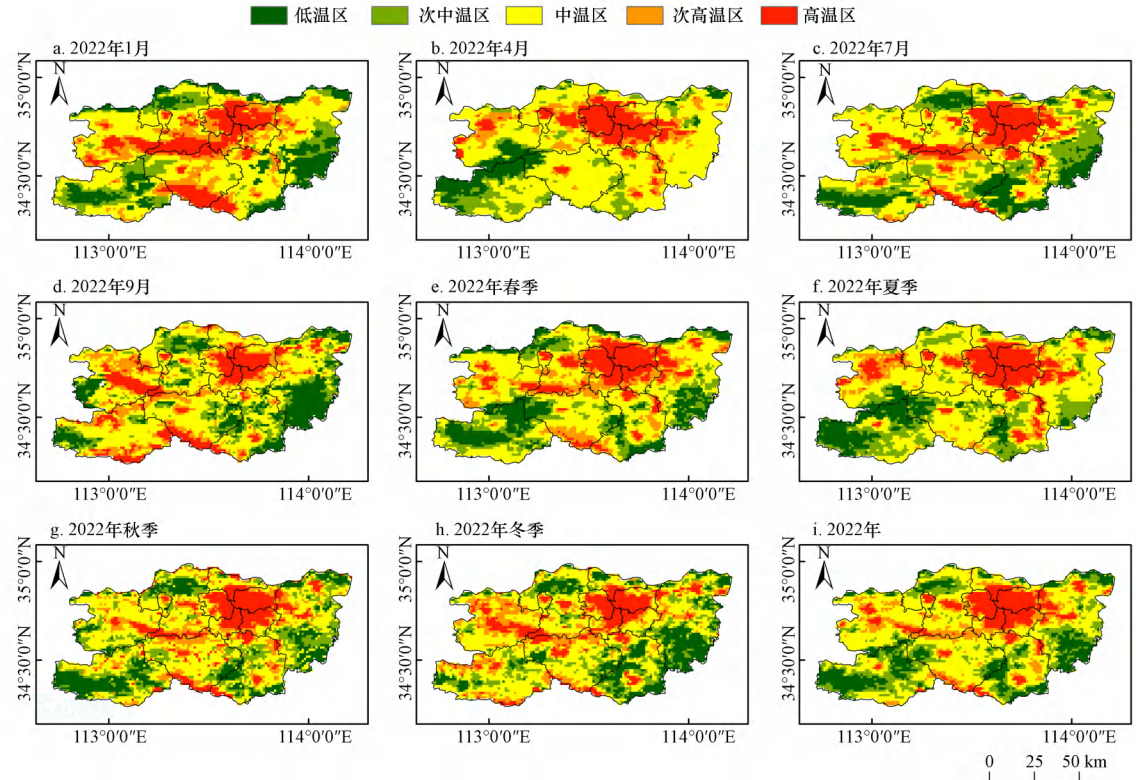


图 7 郑州市 2022 年不同时间尺度夜晚热岛效应空间分布图

Fig.7 Spatial distribution of night heat island effect at different time scales in Zhengzhou in 2022

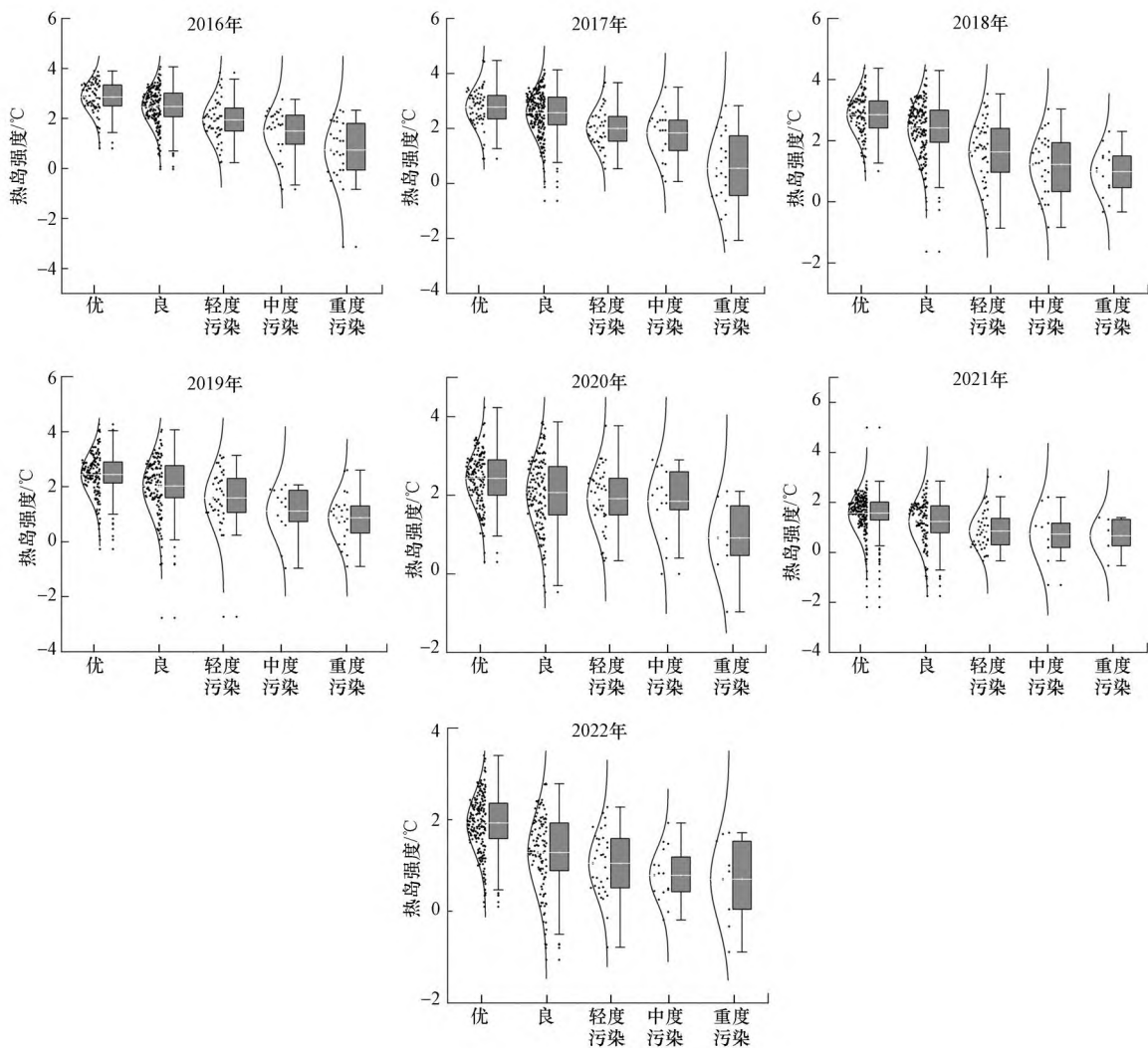


图8 2016—2022年郑州市不同污染等级热岛强度分布

Fig.8 Distribution of heat island intensity of different pollution levels in Zhengzhou from 2016 to 2022

表4 2016—2022年郑州市PM_{2.5}浓度与热岛强度相关系数

Table 4 Correlation of the heat island intensity and PM_{2.5} concentration in Zhengzhou in 2016—2022

年份	日均值	月均值	季节均值	年均值
2016年	-0.612**	-0.856**	-0.977*	0.857*
2017年	-0.547**	-0.842**	-0.946*	
2018年	-0.531**	-0.882**	-0.959*	
2019年	-0.420**	-0.815**	-0.924*	
2020年	-0.330**	-0.598*	-0.924*	
2021年	-0.292**	-0.714**	-0.805*	
2022年	-0.458**	-0.687*	-0.752*	
均值	-0.456**	-0.771**	-0.898*	

注：“*”表示在0.05水平上显著相关，“**”表示在0.01水平上极显著相关。

3.2.2 空间相关性分析 (1)PM_{2.5}浓度与热岛强度空间自相关分析.基于Geoda软件,建立空间邻近权重矩阵,以最近的2022年各时间尺度为代表对郑州市PM_{2.5}浓度和UHII进行双变量空间自相关分析.由于UHI在

白天和夜晚差异明显,因此对不同时间尺度进行昼夜划分,深入研究PM_{2.5}浓度和UHII的空间相关性.

根据表5可知,郑州市PM_{2.5}浓度和UHII在不同时间尺度上均表现出显著的空间自相关性($p<0.001$).具体而言,月尺度上,昼夜空间相关性差异明显,白天PM_{2.5}浓度与UHII多呈显著的空间正相关关系,表明白天高污染区域与强热岛区域重叠;夜晚多为负相关关系,这种昼夜差异是源于辐射收支变化、边界层湍流交换以及下垫面参数的时段调节作用(Matak *et al.*, 2025).季节尺度上,郑州市春季、夏季和秋季昼夜均为负相关关系,冬季白天为正相关,夜晚为负相关.年尺度上,PM_{2.5}浓度和UHII昼夜均为负相关关系,且夜晚的空间相关性高于白天,这是因为白天人类活动更为复杂,影响PM_{2.5}浓度和UHII的因素更多.

表5 郑州市PM_{2.5}浓度与热岛强度莫兰指数
Table 5 Moran's I between the heat island intensity and PM_{2.5} concentration in Zhengzhou

尺度	时间	Moran's I(正负相关)	Z值(聚集性)	p值(显著性)
月尺度	2022年1月白天	0.1285	9.0770	0.001
	2022年1月夜晚	-0.2116	-16.6278	0.001
	2022年4月白天	0.1087	8.0402	0.001
	2022年4月夜晚	0.0564	4.3131	0.001
	2022年7月白天	0.1097	8.2770	0.001
	2022年7月夜晚	-0.2116	-16.0141	0.001
	2022年9月白天	-0.1822	-14.1141	0.001
	2022年9月夜晚	-0.0725	-5.4745	0.001
季节尺度	2022年春季白天	-0.1055	-8.0547	0.001
	2022年春季夜晚	-0.1248	-9.5741	0.001
	2022年夏季白天	-0.1302	-10.3849	0.001
	2022年夏季夜晚	-0.0784	-6.1466	0.001
	2022年秋季白天	-0.2281	-17.9167	0.001
	2022年秋季夜晚	-0.1785	-13.8644	0.001
	2022年冬季白天	0.1187	8.4707	0.001
	2022年冬季夜晚	-0.2469	-19.2669	0.001
年尺度	2022年白天	-0.1046	-8.1019	0.001
	2022年夜晚	-0.1616	-12.8897	0.001

(2)PM_{2.5}浓度和热岛强度的空间集聚变化.运用双变量局部Moran'I进一步探索郑州市PM_{2.5}浓度和UHII的空间集聚格局及其差异变化(图9).根据图9可以看出,两者在不同月份空间聚集情况差异较大,月尺度上,1月和7月与对应的季节尺度空间分布情况基本保持一致.4月低高聚集主要分布在郑州市主城区,夜晚高高聚集连片分布在荥阳市和巩义市南部;9月昼夜空间聚集分布差异明显,白天低高聚集出现在新郑市和中牟县,夜晚分布在郑州市主城区.

季节尺度上,春季、夏季和秋季昼夜均以低高聚集为主,主要分布在主城区,其中秋季白天低高聚集向东部地区转移,这是因为郑州市东部地区耕地资源相对丰富,秋收后出现大面积土地裸露,吸收太阳辐射后升温迅速,导致UHI升高(Na *et al.*, 2023).冬季白天以低高聚集和高高聚集为主,分别分布在登封市南部;新密市、新郑市和中牟县.夜晚以低高聚集为主,范围集中缩小在主城区.

年尺度上,白天低高聚集更加集中连片,分布在主城区、中牟县和新郑市,这是因为这些地区地势平坦,工业区和城市区域集中,地表反照率低,白天吸收太阳辐射后迅速升温,形成连片高温区,但气象扩散条件优越,形成低高聚集区.夜晚则由于工业活动减少,热岛现象明显减缓,而主城区因密集建筑阻碍散热,UHI显著,导致低高聚集范围缩小并集中于主城区.由上分析可知,应重视缓解主城区的UHI现象,同时控制周边地区PM_{2.5}排放,注重绿色发展理念,加大水体和绿地等开敞空间营建,控制中心城区人口规模和开发强度,优化用地结构和空间布局.

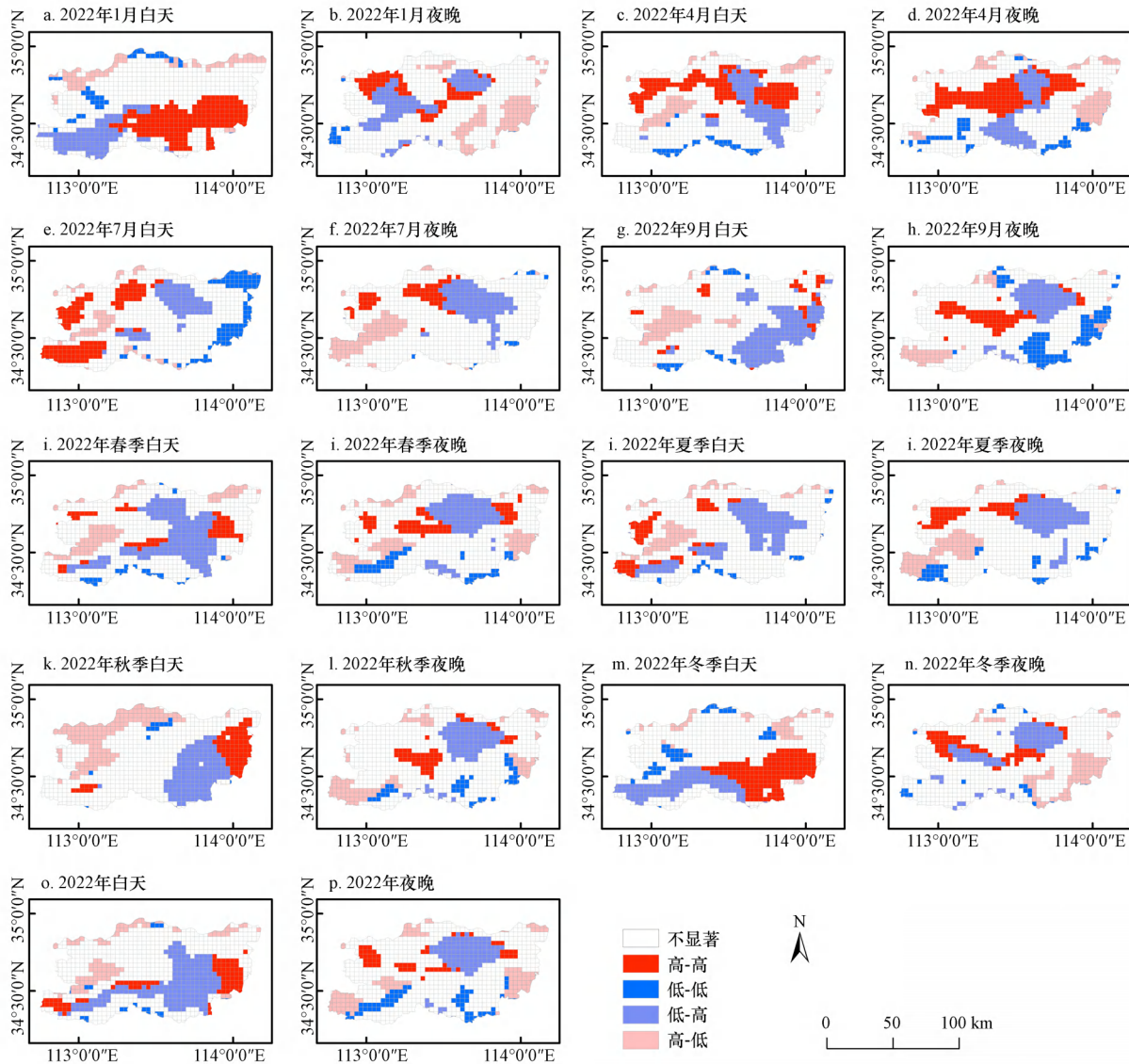


图9 郑州市月、季节和年尺度上PM_{2.5}浓度和热岛强度的空间昼夜空间聚集状况

Fig.9 Spatial diurnal spatial aggregation of PM_{2.5} concentration and heat island intensity at monthly, seasonal, and annual scales in Zhengzhou

3.3 PM_{2.5}浓度和热岛效应关系影响因素分析

3.3.1 影响因素相关性分析 研究表明,PM_{2.5}浓度和UHII与研究区的自然条件和社会经济因素密切相关(Kazemi *et al.*, 2025).为深入探究郑州市PM_{2.5}浓度和UHI关联性的影响因素,选取风速(X_1)、降水(X_2)、相对湿度(X_3)、NDVI(X_4)、夜间灯光指数(X_5)、GDP(X_6)、一产产值占比(X_7)、二产产值占比(X_8)和三产产值占比(X_9)作为自变量,以2016—2022年各影响因素的均值进行相关性分析。

由表6可知,风速、降水、相对湿度、NDVI、一产占比和二产占比与PM_{2.5}浓度均在0.01水平上呈负相关,夜间灯光指数、GDP和三产占比与PM_{2.5}浓度在0.01水平上呈正相关关系,这与因子与地表温度的相关性结果相似.其中,降水与PM_{2.5}浓度相关系数最大,高达-0.780,其次为NDVI,达到-0.434.NDVI与白天地表温度相关性最高,相关系数为-0.568,表明白天植被覆盖能够有效缓解热岛效应,而夜晚地表温度则与反映人口密度、交通出行等人类活动强度指标的夜间灯光指数相关性最强,相关系数为0.605.这一方面说明植被覆盖对两者均有较好的缓解作用,同时还表明夜晚热岛效应与人类活动密切相关(Chen *et al.*, 2024),因此,郑州市白天低温区主要出现在巩义市南部和登封市北部,夜晚高温区集中在主城区。

表6 郑州市PM_{2.5}浓度和昼夜地表温度影响因素相关性分析

Table 6 Correlation analysis of factors affecting PM_{2.5} concentration and diurnal surface temperature in Zhengzhou

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
PM _{2.5}	-0.369**	-0.780**	-0.234**	-0.434**	0.253**	0.188**	-0.122**	-0.225**	0.190**
白天地表温度	-0.177**	-0.084**	-0.200**	-0.568**	0.406**	0.144**	-0.061**	-0.403**	0.332**
夜晚地表温度	-0.006	-0.252**	-0.536**	-0.551**	0.605**	0.339**	-0.512**	-0.241**	0.426**

注：“*”表示在0.05水平上显著相关，“**”表示在0.01水平上显著相关。

3.3.2 影响因素驱动力分析 为探究郑州市PM_{2.5}浓度和UHI的影响因素和对其解释力度,将上述影响因子进行地理探测器分析(图10).单因子探测结果表明,各因子均通过显著性检验,其中对PM_{2.5}浓度的解释力最强的是降水(0.564),其次是三产占比(0.477)和一产占比(0.471),表明PM_{2.5}浓度主要受到气象条件与区域产业结构的综合影响.对白天地表温度的解释力最强的是NDVI(0.356),其次是降水(0.262)和风速(0.255),而对夜晚地表温度的解释力最强的是夜间灯光指数(0.418),其次是一产占比(0.407)和三产占比(0.383),可见热岛效应在昼夜间影响机制差异明显,白天热岛效应主要由自然因素主导,而夜晚热岛效应则主要由社会经济因素主导,自然因素在夜间的调控能力相对减弱.因此,在城市建设中应注重雨水的资源化利用,统筹蓝绿空间布局,优化产业空间结构,实现城市大气环境的多要素协同治理.

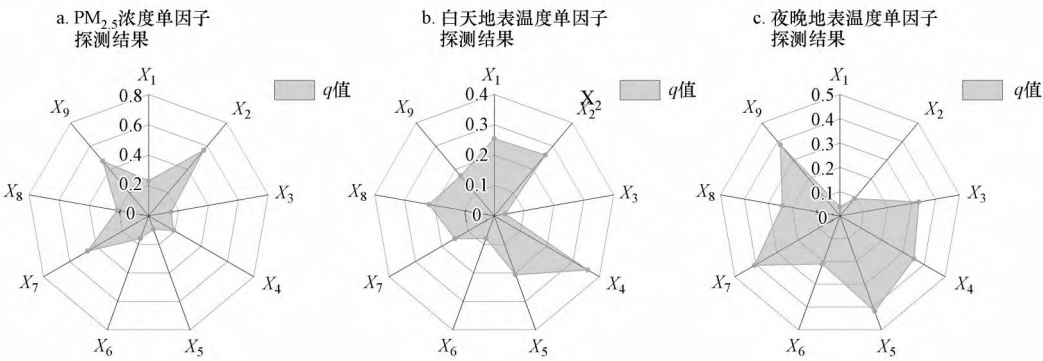


图10 郑州市PM_{2.5}浓度和昼夜地表温度影响因素单因子探测结果

Fig.10 Single factor detection results of factors influencing PM_{2.5} concentration and diurnal surface temperature in Zhengzhou

为进一步探究PM_{2.5}浓度与地表温度之间的影响因素,以昼夜地表温度作为因变量,将PM_{2.5}浓度(X_{10})作为新自变量与上述因子进行交互探测(图11).探测结果以双因子增强和非线性增强为主,表明任意两个因子间的交互影响均大于其本身对其功能探测的影响.其中,降水与三产占比的交互作用(0.543)对白天地表

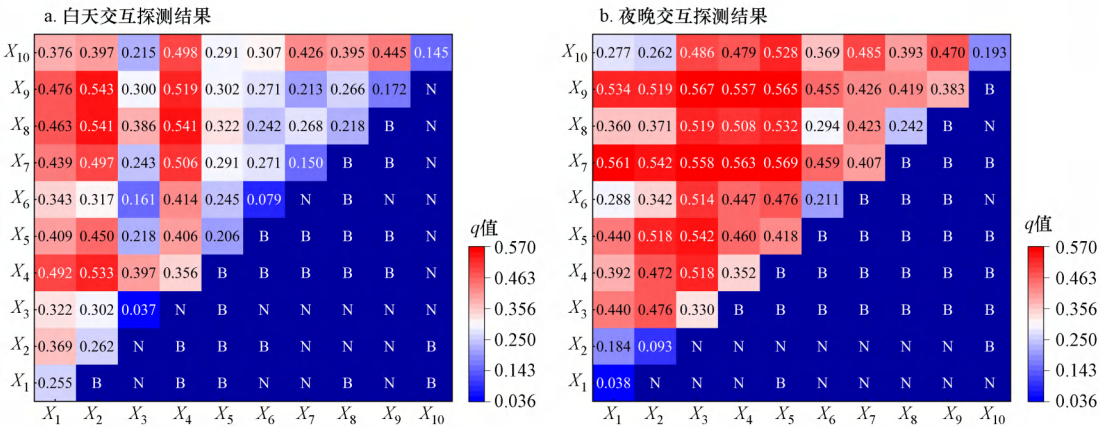


图11 郑州市昼夜地表温度影响因素因子交互探测结果

Fig.11 Results of factor interaction detection of diurnal surface temperature in Zhengzhou

温度起到首要贡献能力,夜间灯光指数与一产占比的交互作用(0.569)对夜晚地表温度影响力最大.PM_{2.5}浓度对昼夜地表温度的单因子解释力分别为0.145和0.193,与其他因子交互后,解释力显著增强.其中PM_{2.5}浓度与NDVI的交互作用对白天地表温度变化解释力达0.498;PM_{2.5}浓度与夜间灯光指数的交互作用对夜间地表温度解释力高达0.528.可见,研究区PM_{2.5}浓度和UHI的时空变化和关联机制是受多种影响因素综合作用的结果,两者之间影响机制关系复杂.在改善城市环境时,单纯控制PM_{2.5}浓度对缓解热岛效应的效果可能有限,需结合多因素制定综合调控策略.

4 讨论(Discussion)

4.1 PM_{2.5}浓度和热岛效应的时空演变及相关性

基于郑州市2016—2022年PM_{2.5}浓度和UHI的实测和遥感数据,对两者的时空变化及关联特征进行多时段分析.结果表明,郑州市PM_{2.5}浓度季节特征表现为冬季>秋季>春季>夏季,这与张剑飞等(2020)研究结果一致.其中,冬季PM_{2.5}季均浓度偏高主要是由于低温环境下供暖需求激增引发燃煤消耗增加(赵孝因等, 2021),而夏季降水充沛且植被覆盖度较高,有利于PM_{2.5}的沉降与吸附,因此导致PM_{2.5}浓度较低(慕石雷等, 2024).研究期间郑州市PM_{2.5}年均浓度整体下降趋势,这与大气污染防治行动计划以来,郑州市优化能源结构和提升机动车及工业排放标准等密切相关,空气污染状况得到有效改善(徐艺斐等, 2024).2016—2022年郑州市UHI呈夏季高冬季低季节特征,且夏季的高温区主要集中在城市建成区密集分布的地方,这与Wang等(2025)在哈尔滨中心城区的研究结果一致.此外,与白天UHI受地表反射率、植被覆盖和日照时长等多种因素影响相比,夜晚UHI更多取决于城市地表空间结构(Siddiqui *et al.*, 2021),高温区主要分布在城市中心区域,昼夜空间分布差异明显.因此,在城市建设过程中应充分考虑绿化覆盖面积,优化建筑结构(Bahadori *et al.*, 2025),从而缓解UHI现象.

从不同时间尺度对郑州市PM_{2.5}浓度和UHI进行相关性分析,结果显示,郑州市PM_{2.5}浓度和UHI在日、月和季节上均为显著的负相关,这与Jiang等(2023)和Zhang等(2023)在长三角城市群的研究一致.年尺度上两者呈正相关关系,与Yuan等(2018)基于269个中国地级市的研究一致.近年来郑州市PM_{2.5}污染和UHI均有所改善,两者年际变化的趋势整体一致,因而可能掩盖了其年内波动变化且差异较大的特征,导致两者呈正相关关系.由此说明,仅采用年尺度研究两者的关联性不够合理,应从不同时间尺度予以细化.在对不同季节PM_{2.5}浓度和昼夜UHI进行空间相关性分析时,发现两者在冬季白天呈正相关,夜晚呈负相关,其余季节昼夜均为负相关,这与Yang等(2021)对北京市PM_{2.5}浓度和UHI相关性分析的结论一致.而Zheng等(2018)认为北京市冬季PM_{2.5}浓度与UHI之间为正相关,利用Granger因果检验法分析表明PM_{2.5}浓度对夜间UHI有更明显的增强作用.这说明即使研究区域一致,研究方法不同,也可能会有不同结论.本研究细化了不同时间尺度PM_{2.5}浓度和UHI的空间关联特征,发现月和季两者的昼夜全局空间自相关性和空间聚集情况均存在较大差异,今后还需要在其它区域进一步验证.

4.2 PM_{2.5}浓度和热岛效应的影响机制

PM_{2.5}浓度与UHI通常受到自然和人为因素的多重影响.本研究结果表明风速、降水、相对湿度和NDVI等自然因素与PM_{2.5}浓度和UHI呈显著负相关关系,夜间灯光指数和GDP等社会经济因素与两者呈正相关关系,这与Liu等(2023)和Nakyai等(2025)的研究结果一致.但Songsom等(2025)在泰国曼谷地区的研究表明NDVI与两者多数呈显著正相关,个别区域也表现出显著负相关.这表明区域环境特征不同可能导致NDVI调节效应出现差异.Li等(2020)研究表明,产业结构对城市环境具有显著影响,二产占比与PM_{2.5}浓度和UHI呈负相关关系,三产占比与两者呈正相关关系,与本研究结果一致.本研究进一步引入一产占比作为补充,发现一产占比与PM_{2.5}浓度和夜晚UHI均呈显著负相关,并具有较强的空间解释力,说明以农业为主的区域因人类活动强度较低、地表自然覆盖较高,在污染控制和热环境调节中具有重要作用.

影响PM_{2.5}浓度和昼夜地表温度的主导因素不同且差异较大.本研究结果表明降水对PM_{2.5}浓度的影响最大,NDVI对白天地表温度影响最大,而夜间地表温度则主要受夜间灯光指数,即人类活动的影响.曹畅等(2017)基于全国尺度分析发现白天UHI主要受人口、农田灌溉和NDVI影响,夜晚UHI则主要受纬度、降水

量和反照率影响.由此可见均认为NDVI和降水等因素对两者关系影响较大,但由于研究尺度、区域特征及变量选取的不同,各因素在不同时间段存在一定的差异.本研究首次通过因子交互影响探测,发现降水与三产占比的交互作用对白天地表温度影响力最大,夜间灯光指数与一产占比的交互作用对夜晚地表温度起到首要贡献能力,还需要在其它地区进一步验证.总体而言,PM_{2.5}浓度和UHII的关联特征和影响机制复杂,今后应剖析不同地理区位和时空尺度下PM_{2.5}浓度和UHII的关联特征,细化自然和人为等多种因素的影响机制,以制定行之有效的城市环境改善对策.

5 结论(Conclusions)

1)郑州市PM_{2.5}日峰值由2016年的597.2 μg·m⁻³下降至2022年的262.3 μg·m⁻³,PM_{2.5}月均值呈“U”型变化,冬季最高,夏季最低,年均值在研究期间均呈波动下降趋势.春季和秋季PM_{2.5}高值区分布在郑州市北部和东部,是PM_{2.5}污染的重点治理区域;夏季高值区向西移动;冬季高值区集中在东部,西南地区始终处于低值区.

2)郑州市UHII峰值由2016年4.07℃下降至2022年3.4℃,月均值呈倒“U”型变化,UHII季节变化为夏季最高,冬季最低,年均热岛强度持续下降,UHI有所好转.热岛强度昼夜空间分布差异明显,白天高温区分布在主城区、新郑市和中牟县南部,低温区分布在巩义南和登封北;夜晚高温区则集中分布在主城区,郑州市西南地区和东部均有低温区分布.

3)郑州市2016—2022年的UHII通常随着PM_{2.5}污染等级升高而降低,两者的日、月和季均值均为负相关关系,平均相关系数分别为-0.456、-0.771和-0.898,表明季节性变化对两者之间关系的影响最为明显.两者各年的日月季相关性均有所减弱,相关系数分别下降了0.154、0.169和0.225.年尺度上,PM_{2.5}浓度和UHII在0.05水平上呈显著正相关关系,相关系数为0.857.

4)郑州市PM_{2.5}浓度与UHII在月尺度上昼夜空间相关性差异明显,白天多呈正相关关系,夜晚多为负相关关系.春季、夏季和秋季昼夜均为负相关关系,冬季白天为正相关,夜晚为负相关.年尺度上,夜晚的空间相关性高于白天.PM_{2.5}浓度与UHII的空间聚集类型以高低聚集为主,多分布在主城区和新郑市.其中,冬季由于燃煤取暖,导致高高聚集占比较大,主要分布在新密市和中牟县南部.

5)风速、降水、相对湿度、NDVI、一产占比和二产占比与PM_{2.5}浓度均呈负相关,夜间灯光指数、GDP和三产占比与PM_{2.5}浓度呈正相关关系,各因子与地表温度的相关性结果相似.降水、NDVI和人类活动强度分别是影响PM_{2.5}浓度和昼夜地表温度的关键驱动因素.降水与三产占比的交互作用对白天地表温度起到首要贡献能力,夜间灯光指数与一产占比的交互作用对夜晚地表温度影响力最大.

参考文献(References):

- Anser M K, Nassani A A, Al-Aiban K M, *et al.* 2025. Urban heat islands and energy consumption patterns: Evaluating renewable energy strategies for a sustainable future[J]. *Energy Reports*, 13:3760-3772
- Anselin L. 1995. Local indicators of spatial association: LISA. *Geographical Analysis*, 27(2): 93-115
- Bahadori E, Rezaei F, He B, *et al.* 2025. Evaluating urban heat island mitigation strategies through coupled UHI and building energy modeling[J]. *Building and Environment*, 280:113111
- 蔡智,唐燕,刘畅,等.2021.三维城市空间形态演进及其地表热岛效应的规划应对——以北京市为例[J]. *国际城市规划*,36(5):61-68
- Carton C, Barbecot F, Birks J, *et al.* 2024. Improved understanding of the impact of urbanization on the temperature, precipitation, and air quality of major eastern Canadian cities[J]. *Urban Climate*, 53:101781
- 曹畅,李旭辉,张弥,等.2017.中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析[J]. *环境科学*,38(10):3987-3997
- Cao W, Zhou W, Yu W, *et al.* 2024. Combined effects of urban forests on land surface temperature and PM_{2.5} pollution in the winter and summer[J]. *Sustainable Cities and Society*, 104:105309
- Chang Y H, Guo X M. 2025. Disparities in the impact of urban heat island effect on particulate pollutants at different pollution stages - A case study of the “2 + 36” cities[J]. *Urban Climate*, 59:102273
- Chen B, Kong F, Meadows M E, *et al.* 2024. The evolution of social-ecological system interactions and their impact on the urban thermal environment [J]. *Npj Urban Sustainability*, 4(1):3-11
- 陈松林,王天星.2009.等间距法和均值标准差法界定城市热岛的对比研究[J]. *地球信息科学学报*,11(2):145-150

- Chen X, Wei F. 2025. Combined effects of urban morphology on land surface temperature and PM_{2.5} concentration across fine-scale urban blocks in Hangzhou, China[J]. *Building and Environment*, 278:112979
- Cichowicz R, Bochenek A D. 2024. Assessing the effects of urban heat islands and air pollution on human quality of life[J]. *Anthropocene*, 46:100433
- Estoque R C, Ooba M, Seposo X T, *et al.* 2020. Heat health risk assessment in Philippine cities using remotely sensed data and social-ecological indicators[J]. *Nature Communications*, 11(1):1581
- Espina-Martin P, Perdrix E, Alleman L Y, *et al.* 2024. Origins of the seasonal variability of PM_{2.5} sources in a rural site in Northern France[J]. *Atmospheric Environment*, 333:120660
- Feng Z, Wang X, Yu M, *et al.* 2025. PM_{2.5} reduces the daytime / nighttime urban heat island intensity over China's mainland[J]. *Sustainable Cities and Society*, 118:106001
- Feng Z, Wang X, Yuan J, *et al.* 2023. Changes in air pollution, land surface temperature, and urban heat islands during the COVID-19 lockdown in three Chinese urban agglomerations[J]. *Science of the Total Environment*, 892:164496
- Jia W Q, Ren G Y, Suonan K Z, *et al.* 2019. Urban heat island effect and its contribution to observed temperature increase at Wuhan station, Central China[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 25(1):102-113
- Jiang Y, Lin W, Di Xu, *et al.* 2023. Spatio-temporal variation of the relationship between air pollutants and land surface temperature in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 91:104429
- Kazemi A, Cirella G T, Hedayatighmashhadi A, *et al.* 2025. Temporal-Spatial Distribution of Surface Urban Heat Island and Urban Pollution Island in an Industrial City: Seasonal Analysis[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 18:7100-7116
- Lai L. 2018. The influence of urban heat island phenomenon on PM concentration: an observation study during the summer half-year in metropolitan Taipei, Taiwan[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 131(1/2):227-243
- Li H, Meier F, Lee X, *et al.* 2018. Interaction between urban heat island and urban pollution island during summer in Berlin[J]. *Science of the Total Environment*, 636:818-828
- Li J, Zhou M, Lenschow D H, *et al.* 2020. Observed relationships between the urban heat island, urban pollution island, and downward longwave radiation in the Beijing Area[J]. *Earth and Space Science*, 7:e2020EA001100
- 李宇,周德成,闫章美. 2021. 中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因子[J]. *环境科学*, 42(10):5037-5045
- 李宇,李亚琴,赵居双. 2023. 中国主要城市大气与地表热岛效应的对比研究[J]. *气候变化研究进展*, 19(5):605-615
- Li Y, Sun Y, Li J, *et al.* 2020. Socioeconomic drivers of urban heat island effect: Empirical evidence from major Chinese cities[J]. *Sustainable Cities and Society*, 63:102425
- Li Z, Xie M, Wang H, *et al.* 2022. The spatiotemporal heterogeneity of the relationship between PM_{2.5} concentrations and the surface urban heat island effect in Beijing, China[J]. *Progress in Physical Geography-Earth and Environment*, 46(1):84-104
- Liang Z, Huang J, Wang Y, *et al.* 2021. The mediating effect of air pollution in the impacts of urban form on nighttime urban heat island intensity[J]. *Sustainable Cities and Society*, 74:102985
- Lin Y, Wang Z, Jim C Y, *et al.* 2020. Water as an urban heat sink: Blue infrastructure alleviates urban heat island effect in mega-city agglomeration [J]. *Journal of Cleaner Production*, 262:121411
- Liu R, Han Z, Li J, *et al.* 2023. The impacts of urban anthropogenic heat and surface albedo change on boundary layer meteorology and air pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Urban Climate*, 47:101358
- Lu S, Li X, Zhao T, *et al.* 2023. Impact of thermal structure of planetary boundary layer on aerosol pollution over urban regions in Northeast China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 14:101665
- Matak L, Momen M. 2025. Enhancing air pollution forecasts in cities by characterizing the urban heat island effects on planetary boundary layers[J]. *Atmospheric Research*, 315:107923
- 慕石雷,杨玉欢,乌日陶克套胡. 2024. 黄河流域五大城市群 PM_{2.5} 时空演变与影响因素探讨[J]. *干旱区地理*, 47(4):707-719
- Na N, Xu D, Fang W, *et al.* 2023. Automatic detection and dynamic analysis of urban heat islands based on landsat images[J]. *Remote Sensing*, 15(16): 4006
- Nakyai T, Santasnachok M, Thetkathuek A, *et al.* 2025. Influence of meteorological factors on air pollution and health risks: A comparative analysis of industrial and urban areas in Chonburi Province, Thailand[J]. *Environmental Advances*, 19:100608
- Ngarambe J, Joen S J, Han C, *et al.* 2021. Exploring the relationship between particulate matter, CO, SO₂, NO₂, O₃ and urban heat island in Seoul, Korea[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 403:123615
- Rajagopal P, Priya R S, Senthil R. 2023. A review of recent developments in the impact of environmental measures on urban heat island[J]. *Sustainable Cities and Society*, 88:104279
- Saha M, Kafy A A, Bakshi A, *et al.* 2024. The urban air quality nexus: Assessing the interplay of land cover change and air pollution in emerging South Asian cities[J]. *Environmental Pollution*, 361:124877
- Sharma A, Wuebbles D J, Kotamarthi R, *et al.* 2020. Urban scale processes in high-spatial-resolution earth system models[J]. *Bulletin of the American*

- Meteorological Society, 101(9): E1555-E1561
- 沈中健, 曾坚. 2021. 闽南三市城镇发展与地表温度的空间关系[J]. 地理学报, 76(3): 566-583
- Siddiqui A, Kushwaha G, Nikam B, *et al.* 2021. Analysing the day/night seasonal and annual changes and trends in land surface temperature and surface urban heat island intensity (SUHI) for Indian cities[J]. Sustainable Cities and Society, 75: 103374
- Songsom V, Jaruk P, Suteerasak T. 2025. Examining the spatiotemporal dynamics of urban heat island and its impact on air pollution in Thailand[J]. Environmental Challenges, 19:101120
- 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 等. 2022. 华中地区夏季 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 43(2):619-628
- 王成, 吴昕玥. 2022. 重庆市乡村生产空间系统韧性扰动因素的空间效应及作用关系[J]. 资源科学, 44(8):1604-1614
- Wang L, Li R, Jia J, *et al.* 2025. Integrating morphology and vitality to quantify seasonal contributions of urban functional zones to thermal environment [J]. Sustainable Cities and Society, 120:106136
- Wang Y, Guo Z, Han J. 2021. The relationship between urban heat island and air pollutants and them with influencing factors in the Yangtze River Delta, China[J]. Ecological Indicators, 129:107976
- 王莹书, 石培基, 赵武生, 等. 2022. 兰州市热环境时空特征及影响因素研究[J]. 生态科学, 41(2):59-65
- Wei J, Li Z, Lyapustin A, *et al.* 2021. Reconstructing 1-km-resolution high-quality PM_{2.5} data records from 2000 to 2018 in China: spatiotemporal variations and policy implications[J]. Remote Sensing of Environment, 252:112136
- Wu H, Wang T, Liu D, *et al.* 2023. An idealized sensitivity study of fine particles ' impact on the urban vertical temperature structure[J]. Urban Climate, 49:101492
- Wu H, Wang T, Riemer N, *et al.* 2017. Urban heat island impacted by fine particles in Nanjing, China[J]. Scientific Reports, 7:11422
- Wu H, Wang T, Wang Q, *et al.* 2021. Radiative effects and chemical compositions of fine particles modulating urban heat island in Nanjing, China[J]. Atmospheric Environment, 247:118201
- Wu T, Qiao Z. 2025. Synergistic governance of urban heat islands, energy consumption, carbon emissions, and air pollution in China: Evidence from a Spatial Durbin Model[J]. Environmental Pollution, 372:126025
- 徐艺斐, 袁明浩, 王晶晶, 等. 2024.《大气污染防治行动计划》对郑州市冬季 PM_{2.5} 浓度及化学组成影响[J]. 环境科学, 45(7):3849-3857
- Yang G, Ren G, Zhang P, *et al.* 2021. PM_{2.5} Influence on Urban Heat Island (UHI) effect in Beijing and the possible mechanisms[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 126(17):e2021JD035227
- Yuan M, Huang Y, Shen H, *et al.* 2018. Effects of urban form on haze pollution in China: Spatial regression analysis based on PM_{2.5} remote sensing data[J]. Applied Geography, 98:215-223
- Yang Y, Zheng Z, Yim S Y L, *et al.* 2020. PM_{2.5} pollution modulates wintertime urban heat island intensity in the Beijing-Tianjin-Hebei Megalopolis, China[J]. Geophysical Research Letters, 47:e2019GL084288
- 姚华, 黄云, 徐敬英, 等. 2020. 我国北方地区清洁供暖技术现状与问题探讨[J]. 中国科学院院刊, 35(9):1177-1188
- Zhang H, Kang M, Guan Z, *et al.* 2024. Assessing the role of urban green infrastructure in mitigating summertime Urban Heat Island (UHI) effect in metropolitan Shanghai, China[J]. Sustainable Cities and Society, 112:105605
- Zhang J, Hong S, Chen B, *et al.* 2025. Multiscale synergistic effects of urban green space morphology on heat-pollution: A case study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China[J]. Ecological Indicators, 173:113390
- 张剑飞, 姜楠, 段时光, 等. 2020. 郑州市 PM_{2.5} 化学组分的季节变化特征及来源解析[J]. 环境科学, 41(11):4813-4824
- Zhang P, Zhang J, Liu Z, *et al.* 2025. Relationship between land surface temperature and air quality in urban and suburban areas: Dynamic changes and interaction effects[J]. Sustainable Cities and Society, 118:106043
- Zhang Q, Liu L, Yang G, *et al.* 2023. Effects of wintertime haze on regional thermal environment and urban heat island in the Yangtze River Delta, China[J]. Urban Climate, 47:101354
- Zhao C, Sun Y, Yang J, *et al.* 2024. Observational evidence and mechanisms of aerosol effects on precipitation[J]. Science Bulletin, 69(10):1569-1580
- 赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 等. 2021. 郑州市 PM_{2.5} 组分、来源及其演变特征[J]. 环境科学, 42(8):3633-3643
- Zheng Z, Ren G, Wang H, *et al.* 2018. Relationship between fine-particle pollution and the urban heat island in Beijing, China: Observational evidence[J]. Boundary-Layer Meteorology, 169(1):93-113
- Zhong S, Qian Y, Sarangi C, *et al.* 2018. Urbanization effect on winter haze in the Yangtze River Delta Region of China[J]. Geophysical Research Letters, 45(13):6710-6718