

# 全球高密度城市三大关键生态问题及其应对策略的研究进展

## Research Progress on Three Major Ecological Problems and Their Response Strategies in Global High-Density Cities

王云才<sup>1,2,3\*</sup> 刘悦<sup>1</sup> 王育辉<sup>1</sup>  
WANG Yuncai<sup>1,2,3\*</sup> LIU Yue<sup>1</sup> WANG Yuhui<sup>1</sup>

(1. 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092; 2. 同济大学建筑与城市规划学院生态智慧与生态实践研究中心, 上海 200092; 3. 同济大学高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室、国土生态规划设计与环境效应研究中心, 上海 200092)

(1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai, China, 200092; 2. Research Center for Ecological Wisdom and Practice, College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai, China, 200092; 3. Key Laboratory of Ecology and Energy Saving Study of High-Density Habitat, Ministry of Education, and Research Center for Territorial Ecological Planning, Design and Environmental Impact, Tongji University, Shanghai, China, 200092)

文章编号: 1000-0283(2025)06-0004-10  
DOI: 10.12193/j.laing.2025.06.0004.001  
中图分类号: TU986  
文献标志码: A  
收稿日期: 2025-02-09  
修回日期: 2025-04-30

### 摘要

快速城市化与气候变化的共同胁迫使得高密度城市面临多重生态风险, 包括城市热岛、洪涝灾害与空气污染等, 这些生态问题不仅影响城市生态系统的稳定性, 同时威胁人类福祉。因此, 亟需对全球高密度城市的生态问题与应对策略开展研究。以Web of Science和Scopus为文献检索数据源, 通过系统性分析258篇文献揭示全球高密度城市生态问题的研究特征。首先, 对全球高密度城市关键生态问题的数量分布与地理空间分布特征进行分析; 其次, 对三大生态问题的影响因素与尺度差异进行讨论, 并提出城区与场地尺度下生态问题的应对策略; 最后, 研究表明城市三维形态、立体生态空间是未来生态问题的重点。研究结论表明: (1) 亚洲地区对高密度城市生态问题关注度最高, 城市热岛是全球高密度城市研究的热点问题; (2) 景观格局特征与建成环境特征是城市热岛与洪涝的重要影响因素, 生物物理特征与建成环境特征是空气污染的重要影响因素; (3) 优化城市景观构成与空间配置可缓解高密度城市生态问题。研究结果为高密度城市开展生态研究与应对生态风险提供了重要启发。

### 关键词

高密度城市; 城市生态风险; 景观格局优化; 尺度性; 系统性综述

### Abstract

Rapid urbanization and climate change have converged to expose high-density cities to multiple ecological risks, including the urban heat island effect, flooding, and air pollution, which jeopardize the stability of urban ecosystems and threaten human well-being. Consequently, it is imperative to investigate ecological challenges and coping strategies in high-density cities worldwide. Utilizing Web of Science and Scopus as the data sources for literature search, 258 documents were systematically analyzed to elucidate the research characteristics of ecological issues within global high-density cities. Firstly, we analyzed the quantitative distribution and geographical characteristics of the ecological problems in these cities. Secondly, we deliberated on the influencing factors and scale differences associated with three principal ecological challenges as well as coping strategies at both urban and site scales. Lastly, it was indicated that, in the future, three-dimensional urban morphology and vertical greening will be focal points for addressing ecological issues. It can be concluded that: (1) Asia is the region most concerned with high-density ecological challenges, and the urban heat island effect is prevalent in all of high-density cities worldwide; (2) Landscape patterns and built environment characteristics are critical influences on the urban heat island effect and flooding, while biophysical characteristics and built environment characteristics are significantly impact on air pollution; (3) Optimizing the composition and configurations of urban landscapes can mitigate ecological problems associated with high density. The findings of this study provide vital insights for ecological research and risk management in high-density urban areas.

### Keywords

high-density city; ecological risk; landscape pattern optimization; scale characteristic; systematic review

### 王云才

1967年生/男/陕西勉县人/博士/教授、博士生导师/同济大学建筑与城市规划学院生态智慧与生态实践研究中心副主任/同济大学高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室、国土生态规划设计与环境效应研究中心主任/研究方向为图示语言与景观生态规划设计教学、科研和工程实践

### 刘悦

2001年生/女/陕西宝鸡人/在读硕士研究生/研究方向为景观生态规划、风景园林规划设计

### 王育辉

2000年生/男/福建福州人/在读硕士研究生/研究方向为景观生态规划、风景园林规划设计

\*通信作者 (Author for correspondence)  
E-mail: wycl967@tongji.edu.cn

基金项目:  
国家自然科学基金重点项目“宜居城乡景观生态规划理论与方法——以西南山地为例”(编号: 52238003)

随着城市化进程的加快, 研究预测2050年全球城市化率将增加至68%<sup>[1]</sup>, 致密化与集约化将成为大城市不可逆转的发展趋势。虽然紧凑型的城市设计可有效提升土地与资源利用效率<sup>[2]</sup>, 但城市资源过度开发与人口高度聚集造成生态环境恶化与生态系统服务供需严重失衡, 高密度城市面临的热岛效应加剧、洪涝灾害频发与空气污染等一系列问题, 导致能源消耗增加, 环境质量下降及公民健康受到威胁<sup>[3]</sup>, 而城市绿地和生态空间的匮乏, 也使得这些城市在自然资源保护和可持续发展方面面临巨大挑战。

高密度城市是近年来在全球范围内广泛讨论的城市发展概念, 目前, 学术界主要通过人口与建筑密度进行初步判断<sup>[4,5]</sup>, 但高密度城市不能等同于简单的比例, 而是多维度的密集与集聚现象, 其城市形态具有极强的地理特征和社会经济特征。全球范围内, 国际大都市如北京、上海、纽约、东京、巴黎等都属于高密度城市, 这些城市在人口密度、经济活力和建设强度等方面具有共性的显著特征。高密度城市不仅垂直建设强度和承载密度较高<sup>[6]</sup>, 且人口大量集中于中心城区。本文以城市规模与人口密度作为高密度城市界定标准, 城市规模综合考虑城市人口规模和用地规模, 人口密度反映城市地区人口的聚集程度。在本次研究中, 纳入各国城市规模较大与每平方公里居住人口数量多的城市。

在绿色基础设施与城市生态问题的研究中, 城市热岛、洪涝灾害与空气污染的研究数量较多, 呈现增长趋势, 并且与人类健康密切相关, 是全球高密度城市可持续发展面临的关键生态问题<sup>[7,8]</sup>。城市空间的高密度特性, 极大地增强了生态风险的破坏力。高热容量地块集聚与高建筑群阻挡风向使得城市“热浪”频率增加, 持续时间变长, 导致与

热效应相关的死亡与发病人数不断上升<sup>[9-10]</sup>; 城市不透水面密集导致地表径流量增加和洪涝灾害频发, 造成人员伤亡和经济损失<sup>[11]</sup>; 而复杂的人群活动与空间拥挤促使空气质量下降, 危害人类健康并增加许多疾病发病率<sup>[12-13]</sup>。高密度城市生态问题将更加综合与复杂, 然而现有研究缺少对全球高密度城市生态问题的系统分析, 且由于高密度城市定义的模糊性, 缺少整体性的综述。因此, 本文通过对全球高密度城市生态问题相关研究进行综述, 了解世界范围内高密度城市面临的核心生态问题与解决策略, 主要解决三个问题: (1) 识别全球高密度城市关键生态问题研究的分布特征; (2) 揭示三大关键生态问题研究的影响因素与尺度差异; (3) 明确城市应对不同生态问题的策略。

## 1 研究方法

系统性综述是一种使用明确定义的标准审阅大量文献的方法<sup>[7]</sup>, 本文使用系统性文献综述的方法, 对研究高密度城市生态问题的现有文献进行检索、筛选与信息提取(图1)。本次研究选用国际上常用且权威的文献数据库Web of Science与Scopus进行文献检索, 根据已有文献研究, 主要研究与气候变化相关的三大生态问题: 城市热岛、洪涝灾害与空气污染<sup>[7,8]</sup>。本研究的检索词主要由三大部分组成: (urban area\* OR high density city OR high density cities OR city OR cities) AND (green

infrastructure\* OR green space\* OR ecological network\*) AND (urban heat island OR stormwater run-off OR flood disaster\* OR air pollution OR air quality OR ecological risk\* OR ecological problem\*), 将其应用于标题、摘要或关键词, 对2000年1月-2024年10月有关城市地区生态问题研究的同行评审出版物进行检索, 初始共获得文献7 035篇。在删除了重复文献、灰色文献、扩展摘要、书籍章节、非英语语言文献、不可获取的出版物和文献后, 将文献的数量减少至4 557篇。为评估这些文章是否与本研究目的相关, 首先通过阅读摘要与标题, 筛除非城市生态问题与绿色基础设施或绿色空间研究类文章, 在此过程中有3 718篇被排除。其次, 对剩余文章进行全文阅读, 应用三个排除标准: (1) 研究不属于实证研究, 即不包含明确的研究地区与应对的生态问题; (2) 研究地区不位于本文界定的高密度城市范围; (3) 文章未具体提到绿色基础设施或绿色空间的量化指标, 在此过程中有581篇被排除, 最终纳入本次文献综述的文章共258篇。

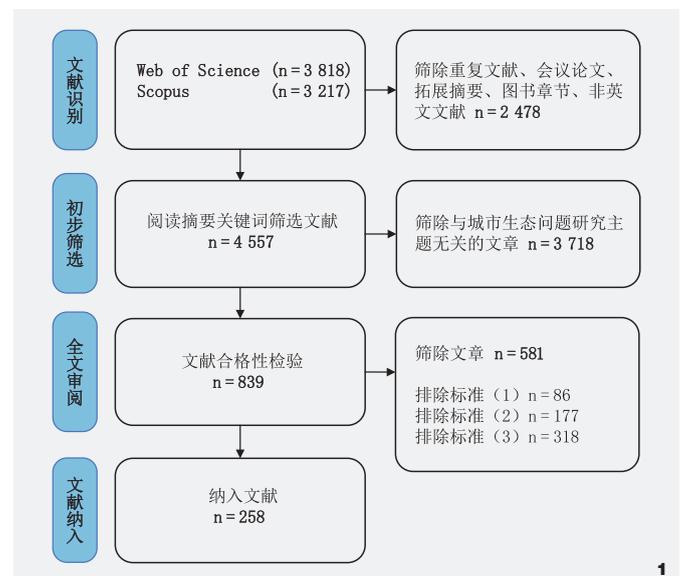


图1 文献筛选流程  
Fig. 1 Process of literature screening

## 2 全球高密度城市关键生态问题研究数量与地理空间分布

通过统计(表1), 研究数量前5的国家依次为中国(82篇)、美国(36篇)、韩国(14篇)、英国(14篇)与德国(13篇)。对纳入文献进行整体分析, 全球各地对高密度城市面临的生态问题均有所研究, 研究地区主要集中在北半球区域, 其中亚洲地区文献数量最多, 这与人口的地理分布特征相一致。此外, 在各类生态问题占比分析中, 城市热岛是全球高密度城市研究关注度最高的生态问题, 其数量占比68.8%, 中国、美国、韩国与德国是对城市热岛关注度较高的国家; 其次是洪涝灾害, 数量占比为16.9%, 中国、美国、英国与澳大利亚等国家对于洪涝灾害关注度较高; 空气污染数量占比14.3%, 中国、英国、德国、意大利等国家对其关注度较高。

由于各国社会经济发展水平和人口数量特征的差异, 高密度城市在全球范围内对生态问题的关注呈现出显著差异。尤其是在亚洲, 高密度城市生态问题受到了更高的关注。根据生态问题研究数量排序, 中国与韩国高密度城市的研究数量超过美国与欧洲国家, 这与高密度城市形态与分布特征密切相关<sup>[6]</sup>。亚洲不仅是全球高密度城市数量最多的地区, 其高密度城市也多呈现高密度高聚集特征<sup>[6]</sup>, 而对比美国与欧洲, 其超大城市形态多呈现多中心与高聚集型<sup>[6]</sup>, 研究数量分布比较分散。

## 3 全球高密度城市关键生态问题研究及其应对策略

针对本研究中的三大关键生态问题, 本文构建城区、场地多尺度分析框架, 通过统计各生态问题研究的指标频次与结果讨论, 从生物物理、建成环境、景观格局与社会经

表1 各国高密度城市生态问题研究数量

Tab. 1 Research volume and percentage of ecological issues in high-density cities across nations

国家 Nation	城市热岛 / 个 Urban heat island	洪涝灾害 / 个 Flood	空气污染 / 个 Air pollution	总计 / 个 Total
中国	55	16	11	82
美国	26	8	2	36
韩国	10	3	1	14
英国	5	3	6	14
德国	9	0	4	13
澳大利亚	7	3	1	11
伊朗	5	1	2	8
印度	8	0	0	8
意大利	2	1	3	6
葡萄牙	3	0	3	6
日本	5	0	0	5
巴西	2	3	0	5
巴基斯坦	4	0	0	4
埃及	4	0	0	4
埃塞俄比亚	4	0	0	4
斯里兰卡	4	0	0	4
加拿大	2	0	1	3
印度尼西亚	2	0	1	3
土耳其	2	1	0	3
尼日利亚	3	0	0	3
比利时	1	2	0	3
泰国	2	0	1	3
希腊	2	1	0	3
新加坡	2	0	0	2
芬兰	1	0	1	2
菲律宾	2	0	0	2
西班牙	2	0	0	2
贝宁	1	1	0	2
加纳	1	0	0	1
匈牙利	0	0	1	1
哥斯达黎加	0	1	0	1
尼泊尔	1	0	0	1
布基纳法索	1	0	0	1
智利	0	1	0	1
法国	1	0	0	1
波兰	1	0	0	1
津巴布韦	1	0	0	1
阿尔及利亚	1	0	0	1
阿根廷	1	0	0	1
总计	183	45	38	266

注: 纳入文献258篇, 其中2篇文献研究地区包含2个国家, 6篇文献包含2个生态问题, 所以各生态问题总计为266篇。

济4大指标维度分析不同生态问题的重要影响因素, 从而提出应对生态问题的具体策略。

### 3.1 关键问题一：城市热岛问题研究及其策略

#### 3.1.1 城市热岛的影响因素及其尺度性

为探讨不同生态问题的尺度异质性, 将其分为城区尺度与场地尺度。城区尺度主要指以高密度城市中心城区作为研究范围, 以城市中心区、城市功能区<sup>[14]</sup>、绿地或街区缓冲区和不同尺度网格<sup>[15]</sup>为统计单元; 场地尺度则指以少数典型公园或街区<sup>[16]</sup>为研究范围, 并将单个公园或街区整体作为统计单元。

城区与场地尺度下, 景观格局指标与建成环境指标是热岛类研究关注的重点(图2)。在城区尺度下, 研究侧重于绿地景观格局与环境特征对城市冷岛降温强度与距离的影响, 以及不同景观格局指标的阈值特征<sup>[17]</sup>。研究通过GIS与Fragstats软件量化城市土地利用或覆被的景观格局特征, 并采用相关性分析与回归分析等数理统计方法揭示地表温度或降温能力和绿地景观格局的关系。在城区尺度下, 与绿地大小、形态、连接相关的指标如绿化覆盖率、景观形状指数、平均斑块面积、最大斑块指数、聚集度指数、斑块密度、平均斑块形状指数是最常用的指标; 在场地尺度下, 研究通常关注局部环境因素, 如建筑物、道路和植被等对热岛效应的影响, 其中绿地面积、建筑高度、不透水率、建筑密度、植被覆盖率是最常用的指标。

与生物物理指标、建成环境指标与社会经济指标相比, 景观格局指标在城市热岛类研究的关注度越来越高, 研究选取的指标可分为两种类型: 景观构成侧重于描述土地覆被的丰度和多样性, 而景观配置主要描述土地覆被的空间特征、排列、位置或方向<sup>[18]</sup>。在城市热岛类研究中, 景观构成指标对城市热岛

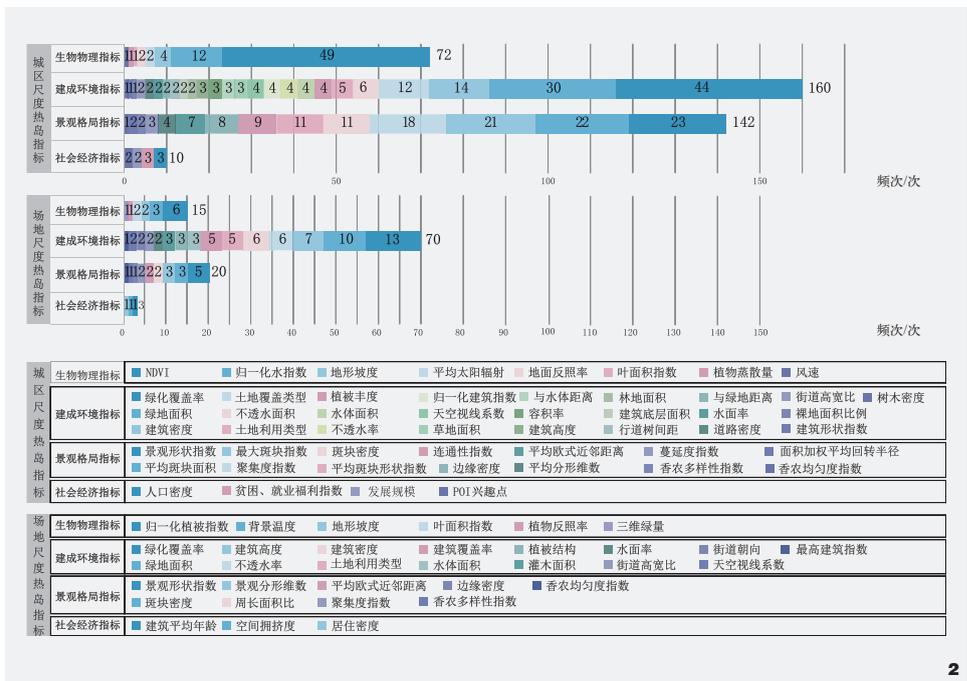


图2 城区、场地尺度城市热岛研究常用指标频次  
Fig. 2 Frequency of common indicators used in urban heat island studies at city and site scales

影响更大。中国杭州城区的研究表明城市绿地的绿化覆盖率和最大斑块指数对地表温度的影响最大<sup>[19]</sup>, 并且不同国家的研究均证明增加绿化覆盖率与树木密度可最快实现城市有效降温。此外景观形状指数、平均斑块形状指数、聚集度指数、斑块密度等景观配置指标, 也被用来研究绿地形状与分布特征对城市热岛的影响, 多数研究证明景观破碎化使得景观形状指数与斑块密度增加, 导致地表温度上升, 而通过增加绿地聚集度指数, 即聚集和均匀排列绿色斑块可缓解此热岛效应。

城区尺度下不同研究采用统计单元的尺度不同, 景观格局指标出现异质性特征。因此对城区尺度常用景观格局指标与地表温度的正负效应进行数量统计(表2), 其中描述景观复杂性的景观形状指数、平均斑块形状指数、边缘密度, 在不同研究中存在争议。伊斯兰堡与拉合尔城区的研究表明, 绿地形

状复杂性增加会降低绿地的降温能力<sup>[20]</sup>, 而美国多个中心城市与天津城区的研究指出, 绿地形状复杂性增加会提升绿地的降温能力<sup>[21]</sup>, 已有研究讨论中提出: 绿地形状复杂性增加可增强城市绿地与周围环境的能量互动, 边缘密度增加可增强城市线性绿地空间的遮阴能力, 但却影响绿地斑块的整体蒸散降温能力, 这些指标对地表温度的正负效应是绿地遮阴、蒸发散热和空气对流综合权衡的结果。而这些差异也可能由城市空间结构、气候地理环境与研究单元大小不同而引起, 不同指标的尺度特征和最佳研究单元尺度有待进一步具体分析。

场地尺度下, 城市热舒适研究揭示了人体生理与心理维度对不同热环境的反应状态。研究多采用ENVI-met模型模拟或实测等研究方法, 并以生理等效温度(PET)、感知热舒适度(PTC)、预测平均投票数(PMV)等热舒适

表2 城市热岛对景观格局的响应 (城区尺度)  
Tab. 2 Positive and negative effects of urban heat island landscape pattern indicators (urban scale)

焦点生态问题 Key ecological problem	响应变量 Response variable	解释变量 Interpretative variable	正向效应 频次 / 次 (占比 / %) Positive effect frequency (percentage)	负向效应 频次 / 次 (占比 / %) Negative effect frequency (percentage)	
城市热岛	景观构成指标	绿化覆盖率	0 (0)	44 (100)	
		最大斑块指数	0 (0)	22 (100)	
		平均斑块面积	0 (0)	21 (100)	
	地表温度	景观形状指标	景观形状指数	21 (92)	2 (8)
			聚集度指数	0 (0)	18 (100)
		景观配置指标	斑块密度	10 (91)	1 (9)
			平均斑块形状指数	2 (18)	9 (82)

指标作为响应变量。埃及开罗一项研究表明, 城市形态、天空视角因子 (SVF) 和阴影是影响小气候条件的主要影响因素, 通过街区纵横比与方向优化可显著增强人体热舒适度<sup>[22]</sup>; 西班牙马德里的研究论证了大型城市公园会产生较强热舒适的心理感受, 但这种感知会随距离增加降低<sup>[23]</sup>; 伊朗大不里士研究表明, 在垂直于盛行风的方向上, 外行种植常绿乔木, 内行种植落叶乔木是提高热舒适的最佳方案<sup>[24]</sup>; 此外, 绿色屋顶、绿墙也被证明对提高热舒适度有一定影响, 但其影响程度受街区密度、空间模式、与地面距离的影响。

### 3.1.2 城市热岛问题应对策略

根据已有研究结论, 城区尺度下, 城市绿地的规模特征如绿化覆盖率、最大斑块指数与平均斑块大小对缓解城市热岛具有显著效果, 因此高密度城市集约紧凑的空间特征仍然需要规划与保留大型绿色斑块。多项研究发现, 绿地大小与其降温能力的关系是非线性的, 存在最佳面积阈值, 北京城区绿地实现降温的最佳面积阈值为 16 hm<sup>2</sup><sup>[17]</sup>, 而上海城区绿地实现降温的最佳面积阈值为 40 hm<sup>2</sup><sup>[25]</sup>, 在最佳阈值范围内增加绿地面积可显著提高降温效应。城市绿地的形状特征如

景观形状指数、平均斑块形状指数、边缘密度也会影响城市绿地的降温能力。在城区尺度上应该降低整体景观形状指数, 避免大规模绿色斑块复杂化与破碎化, 同时适当增加中等规模城市绿地边缘的形状复杂性与边缘密度, 从而提升城市绿地的遮阴效果和周围环境的冷热空气对流。此外, 增加高密度建筑区域内的小型绿色斑块数量并增加绿色斑块的聚集度指数也可以实现局部降温。

场地尺度下, 优化绿地空间内部布局与增加植被结构复杂性可提高降温效应。关于绿地空间内部布局与降温效果的研究表明, 城市绿地的降温能力受到绿地内不透水面比例、水面比例与树木覆盖率的影响, 因此在绿地中增加水体与树木覆盖率可增强绿地的降温效果。而关于绿地植被结构的研究表明植物物种群落、平均叶面积指数、平均冠层密度可显著影响绿地降温效果, 且以乔木—灌木—草本为主的城市绿地具有最高的冷却效率。因此在进行城市绿地植物配植时, 应选择合适植物物种, 丰富植被垂直结构并增大绿地三维绿量; 此外, 对城市绿地进行适量灌溉、修剪等管理和维护策略, 可确保其降温效果的稳定发挥<sup>[26]</sup>, 在高度建成的环境中, 增加绿色屋顶与绿墙也是提高人体热舒

适度的有效策略。

## 3.2 关键问题二: 城市洪涝灾害问题研究及其策略

### 3.2.1 洪涝灾害的影响因素及其尺度性

通过指标统计结果的对比分析 (图3), 城市洪涝研究在不同尺度上具有显著差异。在城区尺度上, 研究聚焦于景观格局特征与城市洪涝分布的关系, 探讨城市绿地规模、形态及分布特征如何减少地表径流。研究多采用GIS与Fragstats量化城市空间的景观格局特征, 通过城市洪涝数量或密度<sup>[27]</sup>、地表径流指数<sup>[28]</sup>、洪涝风险指数<sup>[29]</sup>等衡量不同绿地空间特征对洪涝的影响程度。其中绿化覆盖率、斑块密度、连通性指数、最大斑块指数、景观形状指数、聚集度指数是最常用的指标。在场地尺度上, 低影响开发模式的布局、组合与结构特征是研究的重点, 研究多采用雨洪情景模拟<sup>[30]</sup>与实测结果对比衡量不同景观模式的滞洪能力, 从而确定有效减少地表径流的低影响开发景观模式。

在城区洪涝类研究中, 通过平衡城市景观构成与优化空间配置能够提升城市整体滞蓄能力, 减少地表径流。绿化覆盖率、最大斑块指数与地表径流量显著相关, 增加绿地

的渗透、储存和拦截能力会减少径流<sup>[29]</sup>，而斑块密度的增加会造成景观破碎化，使得地表径流增加。部分景观格局指标对城市洪涝的影响存在尺度异质性，通过对城区尺度常用景观格局指标与地表径流量的正负效应进行数量统计(表3)，描述景观配置的指标如景观形状指数、聚集度指数、连通性指数在不同研究中存在争议，广州城区的研究表明规模较大、聚集度指数较高的绿地景观格局可减少雨水径流<sup>[31]</sup>，而北京的一项研究表明，景观斑块的聚集度指数增加，降低了绿地的径流保留能力，从而增加地表径流<sup>[32]</sup>；此外，德克萨斯州4个大都市研究表明，景观连通性指数在不同尺度对地表径流的正负效应不同<sup>[29]</sup>，在较大尺度上，绿地斑块的连通性增加可减少地表径流，而在小尺度上绿地连通性增加会提升地表径流速度，增大局部地区的峰值流量。已有研究通过多网格尺度分析证明不同景观格局指标存在最优统计分析尺度，不同尺度的景观格局对城市洪涝的复杂影响机制需要进一步研究。

城市多尺度竖向关系(高程、地形坡度)也是洪涝灾害的主要影响因素，杭州主城区模型模拟与实践研究表明，城市空间高程与坡度和洪涝灾害呈负相关，当城市空间高程 > 40 m，坡度 > 10° 时可减缓城市洪涝风

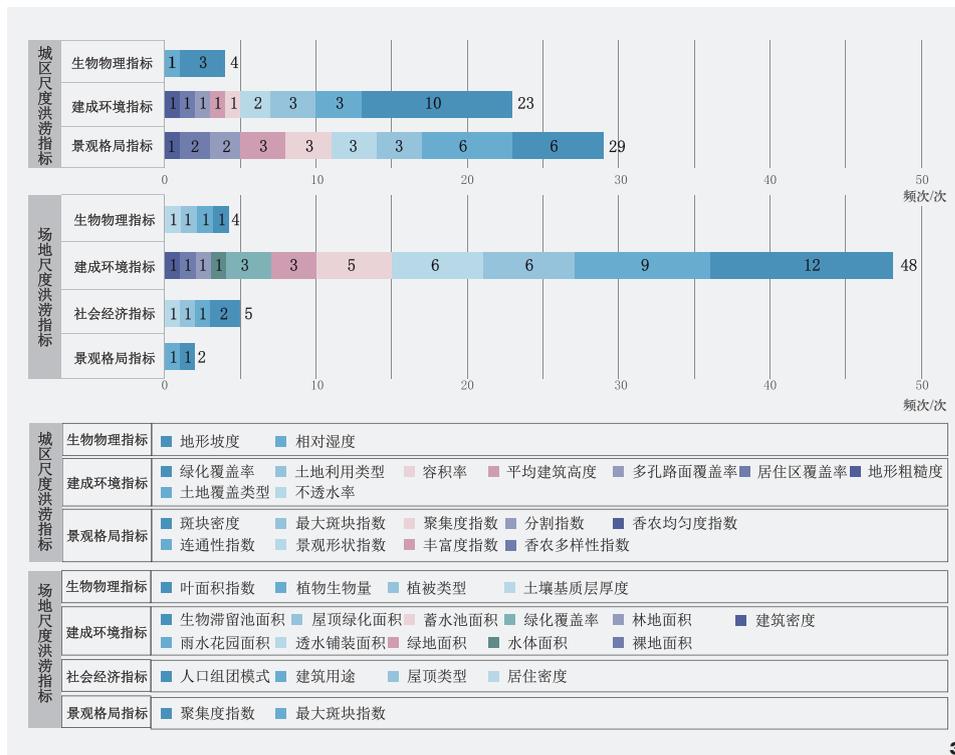


图3 城区、场地尺度洪涝研究常用指标频次  
Fig. 3 Frequency of common indicators used in urban and site-scale flooding studies

险<sup>[33]</sup>，与景观构成和景观配置等空间格局指标相比，地形梯度的合理分配是小尺度下的有效措施。城市地表径流模拟通过精确模拟不同情境下的径流变化，为城市防洪减灾规划和布置绿色基础设施提供指导。研究利用SWMM模型模拟不同降水情景下的地表径流，

分析洪水成因及关键子集水区；另有研究基于InfoWorks综合流域模型(ICM)模拟城市内涝过程，得出绿色屋顶在减少洪涝灾害方面比透水路面更为有效<sup>[34]</sup>。通过调整建成区与绿地比例、优化绿地形状和连通性，可以有效改善城市内涝状况。

表3 城市洪涝对景观格局的响应(城区尺度)  
Tab. 3 Positive and negative effects of urban flood landscape pattern indicators (urban scale)

焦点生态问题 Key ecological problem	响应变量 Response variable	解释变量 Interpretative variable	正向效应 频次 / 次(占比 / %) Positive effect frequency (percentage)	负向效应 频次 / 次(占比 / %) Negative effect frequency (percentage)	
城市洪涝	地表径流量	景观构成指标	绿化覆盖率	0 (0)	10 (100)
			最大斑块指数	0 (0)	3 (100)
		景观配置指标	斑块密度	6 (100)	0 (0)
			连通性指数	1 (17)	5 (83)
			景观形状指数	1 (33)	2 (67)
			聚集度指数	1 (33)	2 (67)

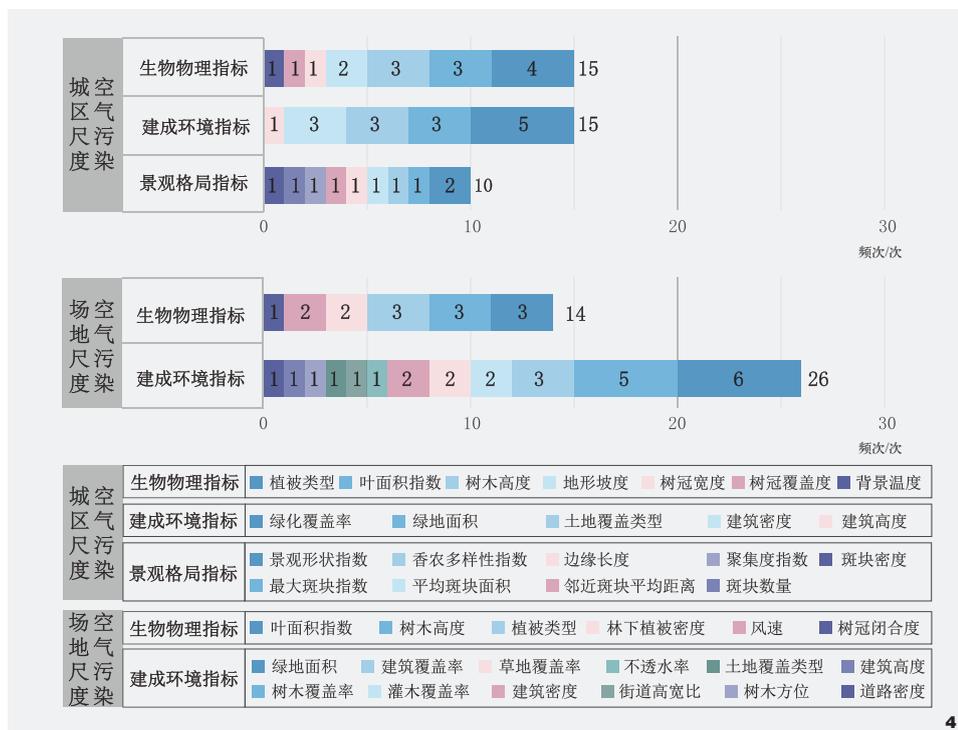


图4 城区、场地尺度空气污染研究常用指标频次  
Fig. 4 Frequency of common indicators used in urban and site-scale air pollution studies

### 3.2.2 城市洪涝灾害的应对策略

高密度城市不透水面的连续分布，导致城市中心城区洪涝事件的空间分布呈现出聚集模式。城市绿地规模、形状复杂性、连通性可有效减少地表径流。在城区尺度下，尽可能增加城市绿地，增大林地斑块规模；通过城市绿廊提升城市绿地的连通性，增加城区整体景观的滞蓄能力；适度增加城市绿地边缘的复杂性，以延长地表径流时间并增加雨水下渗。在场地尺度下，增加屋顶绿化面积，综合考虑绿色基础设施、社区道路、雨水设施的分布与连通性<sup>[3]</sup>；其次采用综合的绿色基础设施配置，如生物滞留池、透水路面、雨水花园等低影响开发模式综合布局，北京的多项研究表明，与单一绿色基础设施实施效果对比，综合绿色基础设施配置具有有效的滞蓄能力，且综合设施的经济可行性

最高<sup>[35]</sup>，上海的一项研究证明了实施综合低影响开发模式，可控制较长降雨时间下的潜在洪涝风险<sup>[30]</sup>。

### 3.3 关键问题三：城市空气污染问题研究及其策略

#### 3.3.1 全球城市空气污染影响因素及其尺度性

对于关于空气污染的研究分尺度进行指标统计（图4），城区尺度与场地尺度对指标类型选择的影响不大，高密度城市空气污染类研究主要关注建成环境指标与生物物理指标，其中绿化覆盖率、绿地面积、土地覆盖类型、建筑密度、建筑高度多被用来描述建成环境，而植被类型、叶面积指数、树木高度、树冠宽度和树冠覆盖度则被作为关键指标描述植物物种特征。

在城区尺度下，蓝绿空间格局与建成环

境特征是影响空气污染物浓度的关键指标类型。江苏城市群研究表明增加城市森林斑块的形状复杂性、斑块面积可在冬季减少空气污染物<sup>[36]</sup>；中国杭州研究表明不同尺度下主导影响因素存在差异，在3~5 km网格尺度上，绿化覆盖面积的影响更占优势，而在2 km或更小尺度上，绿地边缘总长度对空气颗粒物的影响大于绿化覆盖面积<sup>[37]</sup>。多项研究表明，复杂分散的城市蓝绿空间会导致其净化能力减弱，形状简单、分布集中的森林与城市公园可有效吸附空气污染物与缩短扩散距离；分散和复杂分布的建筑区会加剧污染水平。美国的研究表明空气质量与社会经济因素密切相关，城市绿化程度、人口密度、紧凑性和循环性增加可有效减少空气污染致死人数<sup>[38]</sup>。

在场地尺度下，空气污染研究侧重于植物生物物理特征对减少空气污染颗粒物的影响，以及影响空气颗粒物浓度的微气候与环境特征。关于植物生物物理特征，植物的叶片大小、叶表面特征与树木高度会影响植被吸附空气悬浮颗粒的能力。意大利罗马一项研究表明，夏季常绿阔叶树减少空气悬浮颗粒最有效<sup>[39]</sup>，而英国伯明翰的研究表明具有毛状和蜡质表面的小叶子，可从空气中去除空气悬浮颗粒<sup>[40]</sup>，芬兰一项研究认为城市植被去除空气污染物的能力很小<sup>[41]</sup>。关于树木高度，研究表明树木的影响是局部的，其减少空气污染的程度因高度和街道位置而异<sup>[42]</sup>。关于减少空气污染的绿化类型，意大利一项研究表明，绿色屋顶的应用既可以在夏季和冬季实现节能，也可有效捕获空气污染物<sup>[43]</sup>；澳大利亚墨尔本研究表明与树木、屋顶绿化相比，绿墙在去除PM<sub>10</sub>方面更有效；关于影响空气颗粒物的微气候特征，风向风速、地表温度、地形坡向等因素影响空气流

通而改变空气污染浓度。英国伦敦的研究表明, 种植新树可适当改变平行风, 通过导流与湍流将污染物带离地面<sup>[42]</sup>; 德国汉诺威一项研究表明, 城市峡谷内污染物浓度会由于纵横比增大而降低<sup>[44]</sup>; 而城市地表温度增加导致的局部环流, 影响中心城区污染物向外扩散。因此, 在城市地区内, 保持自然通风对减少空气污染与建筑节能具有重大影响<sup>[45]</sup>, 可促进空气流通并减少空气颗粒物浓度。

### 3.3.2 城市空气污染应对策略

根据已有研究结论, 城区尺度下, 绿化覆盖率与通风廊道是减少空气污染物浓度的关键影响因素。在城区尺度上, 提升大型绿地斑块的连通性并规划城市通风廊道, 减少城市绿地的分散性与复杂性, 通过集聚分布高度建成区中的小型绿色斑块, 增强对空气污染物吸附效果<sup>[46]</sup>; 针对不同城市空间的异质性, 采取不同的绿色基础设施, 如在高度密集的城市建筑空间内, 可通过增加屋顶花园、绿色立面改善空气质量; 而在城市商业区或工业区, 应适当增加绿地斑块并丰富植被垂直结构<sup>[43]</sup>。在场地尺度下, 树木高度、树冠宽度、树木方位与叶面积指数是影响植物减少空气污染的关键因素, 较大的叶面积指数与中等的树木高度可有效改善空气质量, 沿风主导方向种植树木也可降低城市空气污染物浓度。

## 4 讨论

### 4.1 三大生态问题影响因素的尺度性

如上文所述, 关于城市热岛, 描述景观复杂性的景观形状指数、平均斑块形状指数、边缘密度在不同研究中结论存在差异。已有研究通过逐步回归分析讨论不同指标的边际效应和阈值<sup>[17,25]</sup>, 但由于指标选取、研

究单元尺度与地理环境特征不同, 不同研究中城市热岛的主导影响因素与适用性仍需进一步研究; 关于洪涝灾害, 描述绿地连通性、聚集度的指标在不同研究结论中存在争议, 这与研究范围和研究单元尺度相关, 其尺度差异使单元内各类用地比例与分布特征发生改变, 影响景观格局内在规律<sup>[47]</sup>。此外城市管网、地形特征、降水强度也会影响洪涝灾害分布<sup>[34]</sup>; 关于空气污染, 城区尺度的景观格局特征显著影响空气污染物浓度, 而场地尺度下植物类型与方位、绿化类型、微气候是影响空气污染的重要影响因素<sup>[42]</sup>, 此外有研究表明, 在城市群尺度下, 社会经济因素如人口密度、城市规模是影响城市空气污染强度的主导因素<sup>[38]</sup>。

### 4.2 应对生态问题的规划设计与政策工具

针对高密度城市日益严峻的生态风险, 从政策工具和规划设计两个层面探讨应对生态问题的策略具有重要意义。(1) 政策工具层面: 城市用地管控与开发方式的转变是关键。通过棕地改造或开发未利用地进行填充式开发, 可以减少城区蔓延式扩张<sup>[38]</sup>, 提高城市空间建设效率; 此外, 城市规划应鼓励适度分散、多中心的发展模式, 以优化城市形态并缓解生态压力。(2) 规划设计层面: 优化城市用地布局与配置, 构建绿色基础设施网络是缓解城市生态风险的有效手段。科学规划绿色廊道并构建绿色基础设施网络, 促进城区绿地的连通性和有效通风, 有助于改善空气质量、缓解城市热岛, 并促进生物多样性。在城市设计中, 应避免大规模绿地形状的复杂性, 并适当丰富绿地植被结构。此外, 结合紧凑的中、高层建筑与开放式绿色空间, 增加复合立体生态空间, 如屋顶花园与垂直绿化<sup>[24]</sup>, 不仅能改善人体热舒适度,

还能减少地表径流和空气污染。在实际规划建设, 应结合城市形态、建筑特点与空地的存在, 确定优先改造区域与绿化方式。

### 4.3 研究局限性

本研究系统梳理了高密度城市生态问题的研究进展, 揭示了景观格局指标的多尺度效应及其对生态过程的影响机理。然而仍存在以下研究局限: 其一, 研究视角聚焦于景观格局指标与生态问题的关联性, 对城市三维形态特征、社会经济活动等要素的耦合作用缺乏系统性探讨; 其二, 应对策略的普适性受限于异质性地理环境, 现有结论在温带湿润气候区验证较充分, 但针对寒带低温或热带湿热环境下的适应性亟待通过跨区域实证研究深化; 其三, 研究样本城市存在规模单一局限性, 以超大城市为案例虽具典型性, 但未能揭示城市规模梯度差异对生态问题研究的非线性影响。

## 5 全球应对关键生态问题的研究方向

城市绿色基础设施能够有效改善高密度城市的生态问题, 但由于土地资源有限和高度集约化, 绿地面积的增加受到限制。因此, 三维城市形态与立体生态空间对生态问题的影响正逐渐成为研究重点。

### 5.1 三维城市形态对高密度城市生态问题的系统研究

尽管已有研究初步揭示了城市三维形态(如容积率、天空可视因子、建筑高度)与局地气候调节的关联性<sup>[42]</sup>, 但并未揭示多维形态指标对生态问题的动态影响, 有研究表明街道高宽比、地表粗糙度对蓝绿空间降温扩散路径有一定协同作用, 且会影响局部环境的风场, 这对二维景观格局因素的定量分

析有很大补充; 也有学者提出使用空间回归模型探索城市形态对空气污染物的影响会为现有城市形态与空气质量关系的知识提供额外的理解<sup>[45]</sup>; 通过ENVI-met模型精细刻画三维城市空间, 模拟不同建筑布局、道路走向和绿地分布等规划方案下的微气候状况。未来研究可通过多尺度建模解析三维城市形态和二维景观格局对生态问题的综合影响, 从而确定主导影响因素并优化城市公共空间设计。

## 5.2 高密度城市立体生态空间协同增效研究

高密度城市多项研究表明, 屋顶花园、绿墙等立体生态空间对减少城市热岛、地表径流与空气污染具有一定影响, 但研究多为场地的案例研究, 缺少从城市整体生态系统角度的协同增效研究。高密度城市土地资源紧张, 通过发展立体绿化, 可以有效增加城市绿色空间, 改善空气质量, 缓解城市热岛效应, 并促进水资源循环利用<sup>[46]</sup>。在未来研究中, 应综合考虑城市绿地系统与立体生态空间对缓解城区生态风险的影响, 关注如何通过多层次立体绿化实现多目标协同增效; 此外, 还需探索立体绿化在不同气候条件下的适应性及成本收益, 适宜立体绿化的植被类型与影响其功能稳定性的环境特征与管理措施<sup>[40]</sup>, 从而确保实施效果, 并推动其在更广泛区域的实践应用。

## 6 结论

全球化与城市化推动了高密度城市数量和经济重要性的增长, 但其面临的复杂生态问题亟需解决<sup>[4]</sup>。本文系统回顾了全球高密度城市三大关键生态问题的研究进展, 得出以下结论: (1) 亚洲地区对高密度城市生态问题关注度最高, 城市热岛是全球高密度城市

普遍关注的生态问题; (2) 景观格局特征与建成环境特征是城市热岛与洪涝的关键影响因素, 生物物理特征与建成环境特征是空气污染的关键影响因素; (3) 城区尺度下, 提升绿化覆盖率, 减少景观形状复杂性, 增加大型绿地连通性、小型绿地斑块聚集性, 并规划通风廊道, 可缓解高密度城市生态问题带来的负面影响; (4) 场地尺度下, 适度增加绿地内水体比例与植被结构复杂性, 采用综合绿色基础设施布局, 选择高度适中与叶面积指数较大的植物物种, 并沿主导风向种植树木可优化局部城市环境。本文指出未来高密度城市研究应更多关注三维城市形态对局部尺度环境的影响, 并从城市整体生态系统角度探讨立体生态空间的协同增效。

注: 文中图表均由作者绘制。

## 参考文献

[1] ZHAO S, DONG J, GUO F, et al. Optimization of Green Space in High-density Built-up Areas Based on Cooling Simulations: A Case Study in Xi'an, China[J]. *Urban Climate*, 2024, 58: 102225.

[2] SMITH W S. Mass-Transport for High-Rise High-Density Living[J]. *Journal of Transportation Engineering-Asce*, 1984, 110(6): 521-535.

[3] CHEN Y, LIU T, CHEN R, et al. Influence of the Built Environment on Community Flood Resilience: Evidence from Nanjing City, China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(6): 2401.

[4] YAO M, YAO B, CENCI J, et al. Visualisation of High-Density City Research Evolution, Trends, and Outlook in the 21st Century[J]. *Land*, 2023, 12(2): 485.

[5] 李敏, 叶昌东. 高密度城市的门槛标准及全球分布特征[J]. *世界地理研究*, 2015, 24(1): 38-45.

[6] 焦利民, 王玉, 马森, 等. 城市形态的多维特征与模式识别——以中美欧实体城市为例[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, 49(06): 1005-1017.

[7] SHEN J, PENG Z, WANG Y. From GI, UGI to UAGI: Ecosystem Service Types and Indicators of Green Infrastructure in Response to Ecological Risks and Human Needs in Global Metropolitan Areas[J].

*Cities*, 2023, 134: 132-143.

[8] PIRACHA A, CHAUDHARY M T. Urban Air Pollution, Urban Heat Island and Human Health: A Review of the Literature[J]. *Sustainability*, 2022, 14: 9234.

[9] NICHOL J. An Emissivity Modulation Method for Spatial Enhancement of Thermal Satellite Images in Urban Heat Island Analysis[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2009, 75(5): 547-556.

[10] NORWINE J. City Size and Urban Heat Island-Observed Effects at Small Cities in a Subtropical Environment[J]. *Texas Journal of Science*, 1976, 27(3): 383-396.

[11] WANG J, ZHAO M, XU M, et al. Effect of Land Cover Types Evolution in Megacities on Flood Regulation Capacity: The Case of Zhengzhou Since 1990[J]. *Natural Hazards*, 2025, 121(3): 3001-3021.

[12] ZHONG T, ZHANG N, WANG B, et al. Observed Neighborhood-Scale Meteorology and Air Quality Characteristics in Downtown Area of Nanjing[J]. *Urban Climate*, 2023, 51: 101604.

[13] BORCK R, SCHRAUTH P. Population Density and Urban Air Quality[J]. *Regional Science and Urban Economics*, 2021, 86: 103596.

[14] YIP P, LIU L, HUANG Y, et al. Study on the Coupling Relationship Between Thermal Comfort and Urban Center Spatial Morphology in Summer[J]. *Sustainability*, 2023, 15(6): 5084.

[15] YANG F, YOUSEFPOUR R, ZHANG Y, et al. The Assessment of Cooling Capacity of Blue-green Spaces in Rapidly Developing Cities: A Case Study of Tianjin's Central Urban Area[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 99: 104918.

[16] AMANI-BENI M, ZHANG B, XIE G-D, et al. Impacts of Urban Green Landscape Patterns on Land Surface Temperature: Evidence from the Adjacent Area of Olympic Forest Park of Beijing, China[J]. *Sustainability*, 2019, 11(2): 513.

[17] DU H, CAI W, XU Y, et al. Quantifying the Cool Island Effects of Urban Green Spaces Using Remote Sensing Data[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 27: 24-31.

[18] MCGARIGAL K. Landscape Pattern Metrics[EB/OL]. (2014-09-29)[2025-01-01]. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat07723>

[19] SONG Y, SONG X, SHAO G. Effects of Green Space Patterns on Urban Thermal Environment at Multiple Spatial-Temporal Scales[J]. *Sustainability*, 2020, 12(17): 6850.

[20] KHAN M S, LI Y. Comparative Study and Effects of

- Urban Green Scape on the Land Surface Temperature of a Large Metropolis and Green City[J]. *Heliyon*, 2024, 10(3): e24912.
- [21] LI X, ZHOU W. Optimizing Urban Greenspace Spatial Pattern to Mitigate Urban Heat Island Effects: Extending Understanding from Local to the City Scale[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 41: 255-263.
- [22] ABDELMEJEED A Y, GRUEHN D. Pedestrian Dynamic Thermal Comfort Analysis to Optimize Using Trees in Various Urban Morphologies: A Case Study of Cairo City[J]. *Land*, 2024, 13(9): 1489.
- [23] ARAM F, SOLGI E, HIGUERAS GARCIA E, et al. The Cooling Effect of Large-scale Urban Parks on Surrounding Area Thermal Comfort[J]. *Energies*, 2019, 12(20): 3904.
- [24] ABDI B, HAMI A, ZAREHAGHI D. Impact of Small-scale Tree Planting Patterns on Outdoor Cooling and Thermal Comfort[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 56: 102085.
- [25] WU C, LI J, WANG C, et al. Estimating the Cooling Effect of Pocket Green Space in High Density Urban Areas in Shanghai, China[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9: 657969.
- [26] CUTHBERT M, RAU G, BATES A, et al. Global Climate-Driven Trade-offs Between the Water Retention and Cooling Benefits of Urban Greening[J]. 2021, 13(1): 518.
- [27] WANG Y, LI C, LIU M, et al. Spatial Characteristics and Driving Factors of Urban Flooding in Chinese Megacities[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 613: 128464.
- [28] KIM H W, PARK Y. Urban Green Infrastructure and Local Flooding: The Impact of Landscape Patterns on Peak Runoff in Four Texas MSAs[J]. *Applied Geography*, 2016, 77: 72-81.
- [29] KIM H Y. Analyzing Green Space as a Flooding Mitigation-Storm Chaba Case in South Korea[J]. *Geomatics Natural Hazards & Risk*, 2021, 12(1): 1181-1194.
- [30] XIE J, CHEN H, LIAO Z, et al. An Integrated Assessment of Urban Flooding Mitigation Strategies for Robust Decision Making[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 95: 143-155.
- [31] ZHANG Q, WU Z, ZHANG H, et al. Identifying Dominant Factors of Waterlogging Events in Metropolitan Coastal Cities: The Case Study of Guangzhou, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 271: 110951.
- [32] LIU W, ZHANG X, FENG Q, et al. Analyzing the Impacts of Topographic Factors and Land Cover Characteristics on Waterlogging Events in Urban Functional Zones[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 904: 166669.
- [33] 翁媛媛, 温日琨, 杨玲. 杭州主城区暴雨水淹灾害模拟与影响因子分析[J]. *风景园林*, 2023, 30(06): 105-113.
- [34] WANG L, LI Y, HOU H, et al. Analyzing Spatial Variance of Urban Waterlogging Disaster at Multiple Scales Based on a Hydrological and Hydrodynamic Model[J]. *Natural Hazards*, 2022, 114(2): 1915-1938.
- [35] LIU W, CHEN W, FENG Q, et al. Cost-Benefit Analysis of Green Infrastructures on Community Stormwater Reduction and Utilization: A Case of Beijing, China[J]. *Environmental Management*, 2016, 58(6): 1015-1126.
- [36] LIN Y, YUAN X, ZHAI T, et al. Effects of Land-use Patterns on PM<sub>2.5</sub> in China's Developed Coastal Region: Exploration and Solutions[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 135602.
- [37] WU H, YANG C, CHEN J, et al. Effects of Green Space Landscape Patterns on Particulate Matter in Zhejiang Province, China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, 9(5): 923-933.
- [38] ABDOLLAHPOUR S S, QI M, LE H T K, et al. Urban Spatial Structure and Air Quality in the United States: Evidence from a Longitudinal Approach[J]. *Environment International*, 2024, 190: 108871.
- [39] SILLI V, SALVATORI E, MANES F. Removal of Airborne Particulate Matter by Vegetation in an Urban Park in the City of Rome (Italy): An Ecosystem Services Perspective[J]. *Annali Di Botanica*, 2015, 5: 53-62.
- [40] WEERAKKODY U, DOVER J W, MITCHELL P, et al. Particulate Matter Pollution Capture by Leaves of Seventeen Living Wall Species with Special Reference to Rail-traffic at a Metropolitan Station[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 27: 173-186.
- [41] SETALA H, VIIPPOLA V, RANTALAINEN A L, et al. Does Urban Vegetation Mitigate Air Pollution in Northern Conditions?[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 183: 104-112.
- [42] BUCCOLIERI R, JEANJEAN A P R, GATTO E, et al. The Impact of Trees on Street Ventilation, NO<sub>x</sub> and PM<sub>2.5</sub> Concentrations Across Heights in Marylebone Rd Street Canyon, Central London[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 41: 227-241.
- [43] CIACCI C, BANTI N, DI NASO V, et al. Green Strategies for Improving Urban Microclimate and Air Quality: A Case Study of an Italian Industrial District and Facility[J]. *Building and Environment*, 2023, 244: 110762.
- [44] TOMSON M, KUMAR P, BARWISE Y, et al. Green Infrastructure for Air Quality Improvement in Street Canyons[J]. *Environment International*, 2021, 146: 106288.
- [45] TONG Z, CHEN Y, MALKAWI A, et al. Energy Saving Potential of Natural Ventilation in China: The Impact of Ambient Air Pollution[J]. *Applied Energy*, 2016, 179: 660-668.
- [46] LIU H L, SHEN Y S. The Impact of Green Space Changes on Air Pollution and Microclimates: A Case Study of the Taipei Metropolitan Area[J]. *Sustainability*, 2014, 6(12): 8827-8855.
- [47] 黎贝, 焦胜, 周敏, 等. “城市—街区”尺度下绿地景观格局对雨洪滞蓄效能的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(02): 533-542.
- [48] LI F, ZHOU T. Effects of Urban Form on Air Quality in China: An Analysis Based on the Spatial Autoregressive Model[J]. *Cities*, 2019, 89: 130-140.