

城市热岛对城市建筑能耗影响的相关研究文献计量分析

刘亚南, 邹春阳, 蔡贤云, 赖小红

(重庆交通大学 建筑与城市规划学院, 重庆 400074)

摘要: 在国家“双碳”目标背景下, 城市热岛效应 (UHI) 及其对城市建筑能耗的影响备受关注。以 Web of Science 数据库中城市热岛效应和城市建筑能耗相关的期刊论文为研究对象, 使用 CiteSpace 与 VOSviewer 软件, 通过文献计量学方法, 系统探讨了城市热岛效应与城市建筑能耗的相互关系。研究表明, 城市热岛效应的影响因素研究主要集中于城市绿化、城市形态、冷表面、水体和城市通风 5 个方面, 其对城市建筑能耗的影响研究则聚焦于制冷与供暖影响、季节性差异、昼夜差异、地域差异及建成环境差异 5 个方面。通过分析相关文献, 进一步探讨了城市热岛效应的成因、影响因素及其对城市建筑能耗的具体影响, 并提出了未来研究的方向与建议。

关键词: 城市热岛效应; 城市建筑能耗; 文献计量

DOI: 10.33142/dfc.v1i1.20150 **中图分类号:** TU111 **文献标识码:** A

Bibliometric Analysis of Research on the Correlation between Urban Heat Island and Urban Building Energy Consumption

LIU Yanan, ZOU Chunyang, CAI Xianyun, LAI Xiaohong

(College of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Under the national "dual carbon" goals, the urban heat island effect (UHI) and its impact on urban building energy consumption have attracted much attention. Taking the journal papers related to the urban heat island effect and urban building energy consumption in the Web of Science database as the research object, this study used CiteSpace and VOS viewer software and adopted bibliometric methods to systematically explore the interrelationship between the urban heat island effect and urban building energy consumption. The research shows that the studies on the influencing factors of the urban heat island effect mainly focus on five aspects: urban greenery, urban morphology, cold surfaces, water bodies, and urban ventilation. The research on its impact on urban building energy consumption focuses on five aspects: the impact on cooling and heating, seasonal differences, diurnal differences, regional differences, and differences in the built environment. By analyzing the relevant literature, this study further explores the causes, influencing factors, and specific impacts of the urban heat island effect on urban building energy consumption, and puts forward suggestions for future research directions.

Keywords: urban heat island effect; urban building energy consumption; bibliometric analysis

在 2020 年 9 月举行的联合国大会上, 中国政府承诺“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和”。据统计, 2019 年我国建筑行业运营阶段能耗占全国总能耗的 21.2%, 碳排放量占全国总排放量的 21%^[1]。从全球范围看, 城市及建筑领域消耗了超过 2/3 的最终能源, 贡献了超过 70% 的碳排放量^[2]。随着全球城市化进程的持续推进, 建筑领域能耗预计将进一步上升^[3]。因此, 降低建筑能

收稿日期: 2025 年 9 月 28 日

基金项目: 2025 重庆市社会科学规划培育项目 (2025PY37)

第一作者: 刘亚南(1987—), 男, 博士, 副教授。E-mail: lyn3620@cqjtu.edu.cn。

耗、落实城市建筑节能，已成为世界各国共同面临的核心挑战，也是我国实现可持续城市建设与“双碳”目标的关键举措。现有研究表明，城市热岛效应（Urban Heat Island effect, UHI）作为城市化进程中典型的气候环境问题，对城市建筑能耗调控具有不可忽视的作用^[4-6]。具体而言，其影响呈现多维度特征：一方面，通过提升城市区域夏季平均气温与极端高温频次，显著增加建筑空调系统的运行负荷与能耗需求；另一方面，虽可能降低冬季部分区域的基础供暖需求，但城乡热力环境的剧烈差异会加大城市建筑供暖系统的动态调节难度、降低能源利用效率，最终对建筑总能耗的稳定控制造成负面影响^[7]。需要注意，影响强度与作用路径在城乡梯度上差异显著，这是因为城市核心区下垫面硬化率高、人为热排放集中、绿地水体覆盖率低，其建筑能耗受热岛效应的扰动程度远高于郊区及乡村^[8]。因此，研究 UHI 对城市建筑能耗的影响机制，可为城市空间形态优化、绿地系统布局、建筑节能设计等规划实践提供精准的理论支撑与科学依据，助力实现气候适应性城市与低能耗建筑的协同发展目标。

1 研究内容

1.1 UHI 及其影响因素

UHI 是指森林砍伐、城市发展、人口增长和温室气体排放等人类活动，导致城市区域的气温高于周边农村地区的气候现象。联合国的报告显示，2010—2020 年，非洲、亚洲、拉丁美洲等地区的大都市迁入居民超过 6 000 万人^[9]。城市化进程的加速推动了人口集聚，不仅重塑了城市空间结构，更催生了对住房、交通路网及公共服务配套等基础设施的迫切需求。为满足人口增长带来的功能承载需求，大规模基础设施规划与建设随之开展，但此类活动往往伴随城市下垫面的剧烈改变。例如，硬化路面、高密度建筑屋顶逐步取代自然绿地与水体，同时交通尾气排放、建筑施工散热及基础设施运行产生的人为热显著增加。城市人口密度和人类活动的增加，既扩大了建筑能耗需求，又加剧了 UHI^[10]；由基础设施建设和人口增长引发的环境变化，共同构成 UHI 加剧的关键驱动因素：下垫面硬化降低了地表蒸散散热能力，人为热排放则进一步抬升区域气温，两者叠加导致城市核心区与周边郊区温差持续扩大，UHI 的强度与影响范围均显著提升。由于 UHI 已不再局限于气候学领域，而是直接关联城市人居舒适度、建筑能源消耗效率及区域生态系统稳定性，其逐渐跨越单一学科边界，成为城市规划、环境治理与可持续发展领域共同关注的核心议题。

1.2 UHI 对城市建筑能耗的影响

城市建筑能耗是城市范围内各类建筑全生命周期消耗的能源总和，是城市总能耗的核心组成部分，主要集中于运营维护阶段，涵盖采暖、空调、通风、照明、电梯运行及各类生活办公用电等。

UHI 引发的温度变化，会直接影响建筑采暖和空调能耗。一项全球研究的综述报告显示，UHI 可能导致建筑冷却能耗的中位数增加 19.0%，供暖能耗中位数减少 18.7%^[8]。城市气候本身会对建筑能耗产生影响，且在不同建筑气候区中，UHI 对城市建筑能耗的影响程度存在差异^[11]。此外，UHI 对建筑能耗的影响还受到城市规模、土地利用方式、地形地貌、植被覆盖率、城市化率和工业率、季节变化等气象与人为因素的共同作用^[12]。

本文系统回顾了国际上 UHI 与城市能耗关联性的研究进展，梳理了其学术脉络与发展趋势，并在此基础上对未来两者关联性研究提出深入思考与启示。

2 研究现状

2.1 数据获取及分析方法

本文的文献来源于 Web of Science 数据库，检索时间为 2000 年 1 月至 2024 年 12 月。为获取全面的文献资料，采用高级检索方式，以（“urban heat island” OR “HEAT-ISLAND” OR “UHI” OR “Heat island” OR “surface urban heat island”）AND（“building energy consumption” OR “Energy consumption” OR “urban energy”）为检索式筛选文献，并结合人工筛选方式排除与 UHI 和城市建筑能耗无关的文献，最终得到符合要求的外文文献 945 篇，文献主题涵盖了 UHI 及其与城市建筑能耗的相互作用机制。

为开展系统综述分析,本文运用 CiteSpace 和 VOSviewer 两款文献分析工具,对 UHI 与城市建筑能耗等相关领域的研究现状进行深入分析。其中,CiteSpace 作为一种广泛应用于文献可视化分析的软件,在当前科研领域内较为流行。其核心优势在于能通过量化分析特定领域的科学文献,揭示研究新趋势与动态,进而梳理出该领域的研究进展、关键人物、现状及前沿转向。

2.2 文献发表数量趋势分析

2.2.1 城市热岛领域期刊文献年发文量统计

研究采用 Excel 工具对 945 篇英文文献的年发文量进行统计,城市热岛领域期刊文献年发文量统计如图 1 所示。2000—2024 年,UHI 对城市建筑能耗影响的文献发表数量整体呈逐步上升趋势,表明该领域研究热度近年来持续增长。由图 1 可知,2000—2010 年,核心期刊年发文量不超过 10 篇,原因可能是当时计算机模拟软件和气象观测技术尚未成熟;2010 年后,该领域核心文献年发文量不断增长,并于 2023 年达到 110 篇,发文量比往年显著增加,原因可能是 2010 年后学界对 UHI、建筑能耗、建筑节能等的研究处于快速发展阶段,全球范围内对环境保护的日益重视也促进了该领域的进步;2020 年后,该领域的发展趋于稳定,可能是由于研究逐步走向成熟,理论基础研究逐渐饱和。

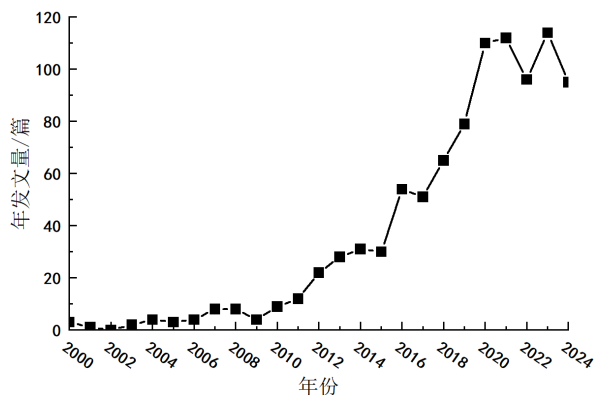


图 1 城市热岛领域期刊文献年发文量统计

Fig.1 Statistics of the annual publication volume of journal articles in the field of urban heat island

2.2.2 发文核心期刊分析

城市热岛领域主要发文期刊统计如图 2 所示,可见《ENERGY AND BUILDINGS》是该领域发文量最高的期刊,共 126 篇;其次为《SUSTAINABLE CITIES AND SOCIETY》《BUILDING AND ENVIRONMENT》《SUSTAINABILITY》《URBAN CLIMATE》,排名前 5 的期刊发文数量占核心文献总数的 39.2%。

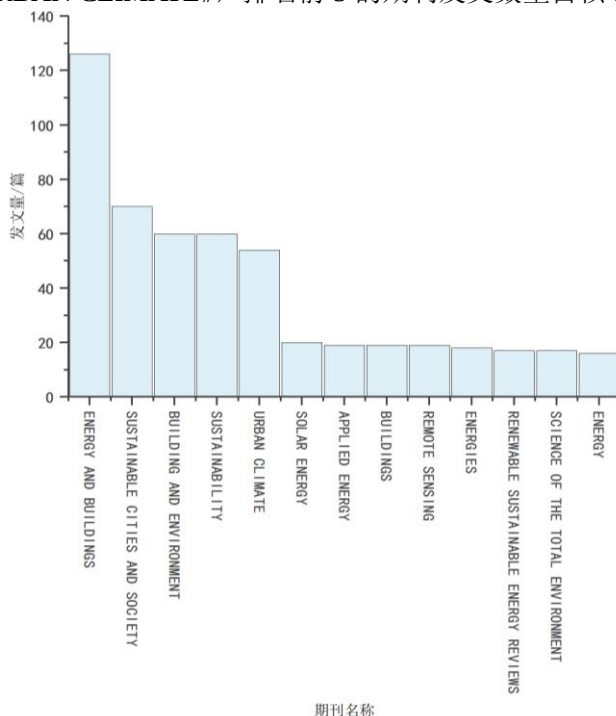


图 2 城市热岛领域主要发文期刊统计

Fig.2 Statistics of the main publishing journals in the field of urban heat island

2.2.3 发文作者分析

本文运用 CiteSpace 工具对 945 篇相关文献的作者发文量进行筛选与可视化分析,设置个人发文量>5,时区为 2000—2024 年。城市热岛领域作者发文网络如图 3 所示。

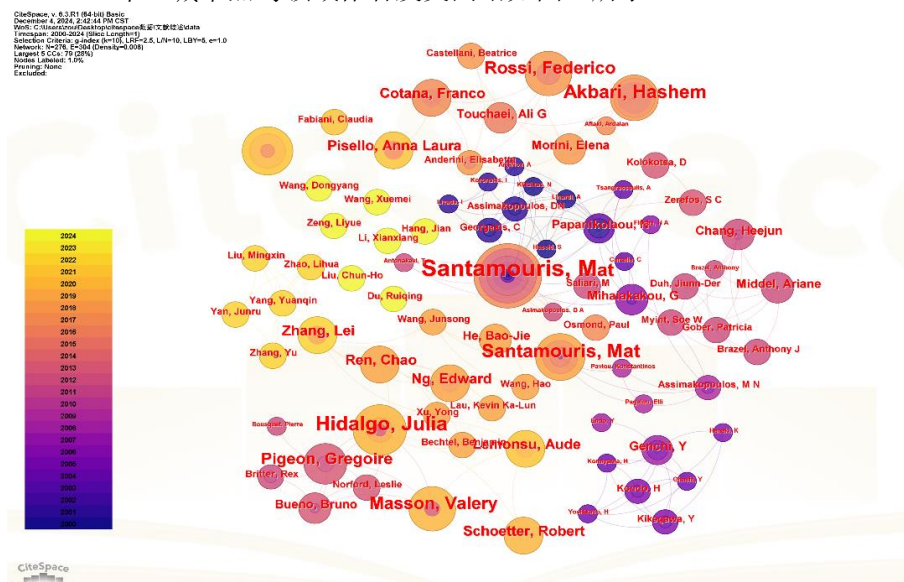


图 3 城市热岛领域作者发文网络

Fig.3 Shows the author Posting network in the field of urban heat island

由图 3 可知, Santamouris, Matthaios 在该领域发文量最高 (13 篇), 主要研究太阳能对城市热环境的影响和建筑节能,并结合卫星遥感和地面数据探索城市地区的热环境及高温缓解策略;其次为 Hidalgo, Julia (8 篇), 其主要探讨了城市气候学在运营、城市规划中的应用,以及气候变化适应与缓解策略,旨在推动气候问题纳入城市政策; Akbari, Hashem 以 7 篇发文量紧随其后。总体而言,该领域学者通常以个体或团队形式开展研究,同时存在部分跨团队合作。

2.2.4 发文机构分析

研究使用 CiteSpace 软件对 945 篇文献的发表机构进行数据可视化分析,得到城市热岛领域主要研究机构关系,如图 4 所示。

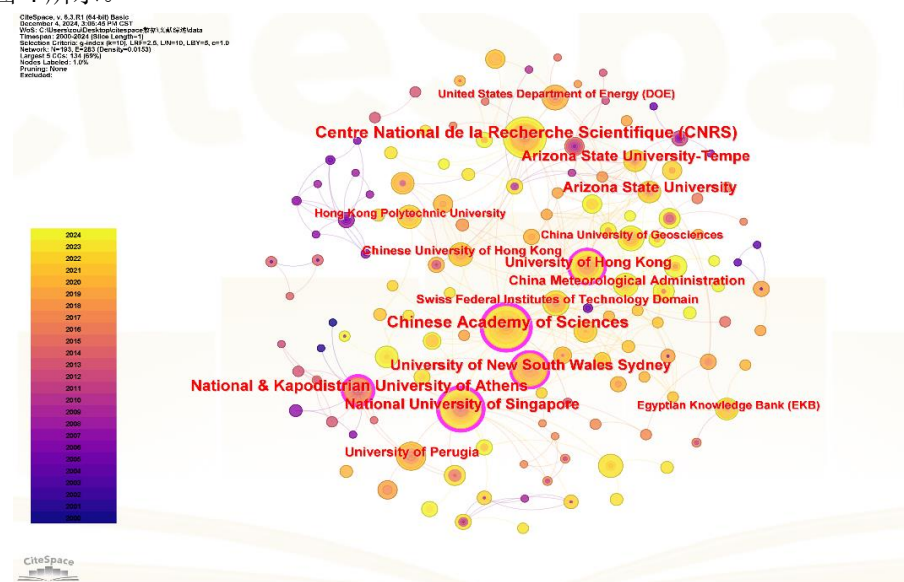


图 4 城市热岛领域主要研究机构关系

Fig.4 Shows the relationship among the main research institutions in the field of urban heat island

2.3.1 研究热点分析

[illegible]

Fig.5 Keyword clustering in the urban heat island field

(1) 城市绿化

建筑物和道路等人造城市用地通常被不透水面覆盖,这类表面主要通过减少蒸发冷却、增加热量积累和传递、降低空气流动来加剧 UHI^[13];城市植被可清洁空气、调节气温、调控局部气候,维系城市生态系

统的健康^[14]。大量研究评估了潜在的城市绿化措施,以减轻温度升高对人类健康的影响^[15-16];研究成果证实,城市公园、屋顶花园和立体绿化等城市绿化措施,至少能在局部范围产生降温效应。

城市绿色空间可有效降低环境温度、缓解空气污染、提升居民舒适度,并减少夏季空调能耗^[14-16]。通过合理的景观设计,城市绿地能产生城市冷岛效应,有效缓解热岛现象^[16]。Tan 等^[14]的研究表明,植树遮阳及绿地面积较小的公园可显著降温并内部形成城市冷岛,且这种冷却效应能扩散至公园边界处,影响范围与周边环境特征密切相关^[17-18]。Yan 等^[17]的研究发现,公园的降温效果可扩展至边界外约 1.4 km; Chang 等^[18]指出,园区规模越大,城市冷岛效应越强。另有研究分析了城市绿地在减少区域冷却能耗中的潜在效益。香港地区研究显示,当城市绿地覆盖率达到 30%时,夏季日均能耗可至少减少 1 900 kW·h;南京地区的研究发现,炎热夏季的白天因城市绿地冷却效应,能源节省可达 1.3 万 kW·h^[19]; Zhang 等^[20]的研究发现,北京城市绿地的降温作用可显著降低 60%的净降温能耗,且该效果与城市区域结构类型紧密相关。城市绿地的冷却效果主要受植被类型、树冠密度、绿地规模及形态影响; Xiao 等^[21]探讨了不同规模城市绿地对 UHI 的缓解作用,发现相较于大型绿地,小型绿地不仅未能发挥冷却和增湿效果,部分情况下甚至产生保温效应;不同形态绿地的城市冷岛强度排序为楔形绿地>放射状绿地>点状绿地>条状绿地^[22]。

屋顶绿化又称生态屋顶、绿色屋顶或屋顶花园,由于屋顶占城市总面积的 20%~25%,对城市环境具有显著的影响潜力^[23]。北京、上海、重庆和香港等主要城市建筑物密集,实施屋顶绿化可有效提升城市绿化覆盖率、节省能源、降低噪声和空气污染^[24-26]。尽管屋顶绿化的初期投资高于传统屋顶,但绿色植被能显著提高反照率并减少向建筑内部的热量传递,有效缓解了 UHI^[27-28]。He 等^[29]通过敏感性分析发现,增加基质层厚度或在非隔热建筑上应用屋顶绿化,可在夏季和冬季实现更佳的热效能; Tam 等^[30]对 3 个案例的研究表明,屋顶绿化能显著降低顶层室内温度,降幅高达 3.4 °C; He 等^[29]发现,上海地区屋顶绿化的降温效果在夏季最强、冬季最弱。

垂直绿化又称垂直绿化系统 (Vertical Greenery Systems, VGS),因体积小、美学价值高且具备缓解热岛效应的能力,在城市绿化中应用日益广泛。该系统可进一步对心理健康和声学防护、建筑围护结构保护及生物多样性维持产生积极影响^[31-32]。根据结构特性,绿色立面和生命墙是 VGS 中应用最广泛的类型^[31,33-35],其中绿色立面可分为传统绿色立面(又称直接绿色立面)、双层绿色立面和生活墙系统 3 类^[36-37]。

(2) 城市形态

城市规划既能塑造城市结构、影响城市气候,又可通过优化策略调节城市气候以适应居民需求^[38]。通过调整或优化城市形态^[39-40]来减轻特定区域的 UHI,是城市规划与设计的重要环境价值体现,城市规模、城市布局和植被覆盖则是塑造城市热环境的核心形态要素。

Hu 等^[40]指出,城市区域的紧凑度是决定 UHI 强度的关键因素,紧凑度提升通常伴随 UHI 增强,与离散形态不同,区域平均天空视域因子 (Sky View Factor, SVF) 较大的紧凑形态可能更有利于降低 UHI; Wei 等^[41]研究了 SVF、容积率、场地覆盖率和建筑楼层数等形态参数对城市小气候的影响,发现 25% 的建筑覆盖率是缓解夏季夜间 UHI 的最佳选择; Lin 等^[42]的研究表明,较高的容积率、建筑密度和树木覆盖率有助于降低高密度城市区域白天的热岛强度; Tong 等^[43]发现,高层建筑附近通常遮蔽性较好、SVF 较低,有助于降低白天的环境温度,但夜间高层建筑与低 SVF 形成的狭窄街道峡谷易积聚热量,可能加剧 UHI; Zhou 等^[44]的研究指出,建筑密度是影响 UHI 强度的首要因素,其次为体积比和绿化覆盖率; Xu 等^[45]的研究进一步证实,绿化覆盖率可解释约 50% 的 UHI 变化; Yue 等^[46]揭示了 UHI 与城市布局的关联性:一是在总建筑面积固定的情况下,建筑面积越小、分布越分散, UHI 越弱;二是单个地块形状复杂度较高,越能减轻 UHI。

(3) 冷表面

UHI 与城市结构布局和物质构成密切相关,且城市形态一旦确立便具有持久性,改变难度较大。因此,可通过在城市地区采用浅色低热材料,缓解 UHI 对城市微气候的过热影响^[47]。

冷屋顶是指具有较高太阳反射率和热辐射率的屋顶系统^[48],例如在重庆和广东地区,涂覆白色涂料的屋顶可分别降低表面温度约 20 和 17 °C;在重庆、上海、武汉和广州等夏季高温城市,使用反射率为 0.6 的白色屋顶替代反射率为 0.2 的灰色屋顶,可有效减少建筑能耗。Han 等^[49]发现,与传统材料相比,屋顶冷涂层可使室内温差超过 4.5 °C;Lu 等^[50]开发了一种结合相变材料与蓄冷材料的新型蓄冷屋顶,实地测试证实其具有出色的保温和隔热性能,并能达到降低温度峰值的效果。此外,冷屋顶作为缓解 UHI 的关键措施,已被广泛纳入绿色建筑评价体系。

除了屋顶,道路表面也会改变天然地面的原始热特性:路面温度升高会带动周围空气升温,进而促成 UHI^[51-52]。因此,用冷路面替代传统路面以降低道路温度,可有效缓解 UHI;当前采用的降温措施主要包括提升太阳辐射反射率、增强蒸发作用、减少城市大气中的显热传递及改造路面结构^[53-54]。与冷路面相关的技术分为反射路面、蒸发路面和热利用路面^[53]。路面的反射率是评估其辐射反射性能的指标,与路面温度成反比^[55]。需要注意,在高楼密集区域,反光路面的 UHI 缓解效果不及开阔街道^[51]。Qin 等^[56]提出,当城市峡谷高宽比低于 1.0 时应采用反光路面;Jiang 等^[52]研制的太阳能反射涂层,可使沥青路面温度降低 8.5~9.5 °C;Chen 等^[57]的研究表明,高导热性的混凝土路面相较于传统混凝土,表面最高温度可降低 13 °C。

(4) 水体

水体在城市区域同样发挥着关键作用,其具有较大的热容量和较低的导热系数,可有效缓解 UHI^[58]。城市水体的冷却效果被视为重要的生态调节服务,不仅有助于减少能源消耗、提升户外行人的热舒适度,还能形成城市冷岛^[59-60],具有多重潜在效益。

城市水体(如河流、湖泊和水库)是形成城市冷岛效应的关键要素之一^[61]。Yang 等^[58]的研究表明,在亳州区域,水域是夏季城市降温的主要因素;Wang 等^[62]的研究发现,湿地对温度具有显著的调节作用,且越接近城市湿地,效果越显著;Xue 等^[63]指出,长春市湿地的归一化制冷能力指数(Normalized Cooling Capacity Index, NCCI)是绿地的 42.3 倍,与其他水体相连的湿地 NCCI 值为孤立湿地的 6 倍,其中河流的降温效果尤为突出;Du 等^[16]观察到,城市河流可影响周边气流,使河流附近的城市热岛强度(Urban Heat Island Intensity, UHII)维持在较低水平;Syafii 等^[60]通过试验证实,人工池塘对城市热环境具有积极影响,且白天大表面积池塘的降温效果更显著;Xu 等^[64]得出结论,水体中心区域的冷却效果最强,最高可达 0.8 °C 以上;Du 等^[65]的研究还表明,由多面水体构成的城市冷岛效应,强度高于线性水体。

(5) 城市通风

城市通风措施利用自然风力将郊区新鲜空气引入城市中心,是缓解 UHI 的重要手段之一^[65-66]。这种通风不仅能促进热量散发,还对提高居住环境品质、降低空气污染和节能具有显著作用^[66-67]。以深圳某新开发区为例,由于城市发展未遵循原定通风规划,风道受阻,进一步加剧了 UHI^[68];同时,结合我国城市地面气溶胶污染加剧、冬季雾霾频发,以及 UHI 与通风不畅的关联性,制定城市通风规划显得尤为迫切^[67-69]。

Xu 等^[70]基于典型气象条件下的日平均温度分布,分析了城市热岛与冷源的空间格局,并建议通过规划城市通风通道缓解 UHI;Su 等^[67]针对新城区的城市通风廊道,明确了具体位置、数量及规划控制要求;Luo 等^[68]以广西荔浦县为研究对象,从道路布局、建筑规划、绿地配置、开放休闲空间等多个维度,提出了改善城市通风的具体措施。Guo 等^[71]针对大连市高密度城市扩张导致的风速下降问题,利用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)模拟工具评估了不同建筑形态的自然通风效能,结果表明:长条形公寓、高层大平台等围合结构不利于自然通风;而保留开放空间、规划通风通道、适度提升建筑高度、减少低层大平台、采用流线型建筑设计及缩减建筑立面面积等措施,可有效促进通风,减轻 UHI。此外,非均匀建筑高度在低密度区域通风效能较差,在高密度区域则相反^[72]。

2.3.1.2 UHI 对城市建筑能耗的影响研究

通过对 945 篇文献的梳理,本文将 UHI 与城市建筑能耗的核心关联影响因素归纳为制冷与供暖影响、季节性差异、昼夜差异、地域差异及建成环境差异 5 类。

(1) 制冷与供暖影响

UHI 对建筑能耗最直接的影响体现在制冷与供暖需求上。Li 等^[8]的研究表明, UHI 可通过增加空间制冷需求和减少空间供暖需求, 对建筑能耗产生显著影响; Tariku 等^[7]发现, UHI 使总制冷能耗增加 23%, 总供暖能耗降低 29%, 整体对建筑总能耗产生负面影响; Tian 等^[73]指出, UHI 对建筑能耗的影响, 很大程度上取决于当地小气候、城市区域特征及建筑类型与属性, 在以空调为主的城市, UHI 可能导致冷却能耗增加 10%~16%; Yang 等^[74]根据锋面面积指数将我国 31 个主要城市的通风条件划分为 4 个等级, 并分析了 5 个气候带城市的自然通风效果, 发现改善通风可直接或间接减少城市能源消耗, 通风良好区域的能源需求最高可降低 6.704%。Zhao 等^[75]基于城市天气生成器 (Urban Weather Generator, UWG) 的计算结果, 通过建筑能源建模 (Building Energy Modeling, BEM) 分析了 UHI 对建筑能源需求的直接与间接影响, 结果表明: 气温升高使制冷需求平均增加 16%~46%, 供暖需求减少 8%~17%; 与独立建筑相比, 周围建筑的遮阳作用使供暖需求增加 7%~36%, 制冷需求减少 14%~48%, 且遮阳的直接影响在双鸭山、徐州和福州尤为突出, 分别占建筑能耗变化的 50%、80%和 57%。

(2) 季节性差异

季节变异是评估 UHI 影响的关键因素: 夏季 UHI 会加剧冷却负荷, 冬季则可能通过减少供暖需求实现节能, 尤其在供暖主导的气候区, 其净效应取决于主导气候模式。在我国不同气候区, UHI 使空间制冷需求增加 16%~46%, 供暖需求减少 8%~17%, 且季节互动存在显著的区域差异^[75]。该研究通过 UWG 模拟证实, 供暖主导季节受益于 UHI, 而制冷主导季节的能耗需求会因 UHI 进一步放大。在美国中西部, 当前 UHI 使制冷能耗强度增加 7%, 供暖能耗减少 2.7%; 预计到 2080 年, 受未来气候影响, 制冷需求可能增加 154%, UHI 将额外使夏季制冷需求增加 6.2%, 冬季供暖需求减少 3.1%^[76], 这些结果凸显了季节不对称性, 即夏季升温对能耗的影响更显著。

Du 等^[77]借助遥感数据、统计数据和气象数据, 评估了长江三角洲城市群 (Yangtze River Delta Urban Agglomeration, YRDUA) 的地表 UHI 及其与土地类型、气象条件、人为热源和城市规模的关系, 发现 YRDUA 的 UHI 强度在夏季最强 (0.84 °C), 其次为秋季 (0.81 °C)、春季 (0.78 °C), 冬季 (0.53 °C) 最弱; 白天的 UHI 强度 (0.98 °C) 高于夜间 (0.50 °C); 人口密度与 UHI 强度相关性不显著, 能耗、平均气温和城市面积与 UHI 强度呈显著正相关, 平均风速和平均降水量与 UHI 强度呈显著负相关。

(3) 昼夜差异

昼夜模式对 UHI 产生细微影响, 因城市热容量, 夜间热量释放缓慢, UHI 强度通常夜间更强, 这可能延长夜间制冷需求或减少供热需求, 且能耗与 UHI 的相关性夜间更强。例如, 在首尔, 夜间 UHI 每增加 0.5 K, 冷却能耗增加 0.69~1.51 kW·h/m², 而白天仅增加 0.17~0.38 kW·h/m², 突显了夜间 UHI 对能耗波动的主导作用^[78]。Cao 等^[79]对我国地表 UHI 的研究显示, 夏季白天地表 UHI 强度高于夜间, 但三维城市形态对夜间温度的影响更显著, 导致高密度区夜间能耗潜在增加; Mathew 等^[80]对印度城市的分析发现, 地表 UHI 在夜间更显著, 白天可能呈负值, 说明时间维度的观察对能耗研究至关重要。

(4) 地域差异

北方城市冬季 UHI 可能减少供暖需求, 形成正面影响; 南方城市夏季制冷需求激增, 受 UHI 的负面影响更突出, 且 UHI 强度对能耗的影响随纬度、气候带不同而变化。Cao 等^[81]的研究表明, 在我国寒冷气候区, 城市干燥岛 (Urban Dry Island, UDI) 使供暖期显热负荷降低 15.1%, 但制冷期增加 4.6%, 南方温暖区则呈相反趋势; Magli 等^[82]的全球视角研究显示, 冬季城市供暖需求比乡村低 30%~50%, 北方城市受益更显著, 南方城市夏季制冷需求翻倍; Ma 等^[83]基于香港一个城市和一个农村站点长达 30 年的实测气象数据, 结合典型气象年 (Typical Meteorological Year, TMY) 数据, 利用 EnergyPlus 进行模拟, 研究发现高层写字楼在湿热环境下的能耗对温度和湿度变化的敏感度高于寒冷干燥环境。

(5) 建成环境差异

建成环境因素会调制 UHI 与能耗的关联: 相同 UHI 强度下, 大规模城市由于热惯性更大, 能耗变化更剧烈。Hirano 等^[84]研究指出, UHI 增加了东京都市区的商业能耗, 但降低了住宅能耗, 能源消耗总体呈净减少趋势, 这表明 UHI 缓解措施应重点针对商业建筑集中的市中心, 而在住宅区引入缓解措施前需进行充分评估; Assimakopoulos 等^[85]借助 TRNSYS 模型, 计算了大雅典地区 20 个不同地点夏季典型建筑的能耗, 发现 UHI 显著影响了建筑物的热行为, 郊区的冷负荷成本和能源成本远低于城区; Meng 等^[86]对天津地区的研究证实, 与郊区和近郊区相比, 城市中心年平均供暖强度分别下降 8.08% 和 10.30%, 气温分别上升 1.46 和 1.90 °C, 且城市中心与郊区的小时平均供暖强度 (HMHI, Hourly Mean Heating Intensity) 差异在早上 07:00 达到峰值, HMHI 从郊区到城市中心逐渐减小。

Lu 等^[87]发现, 增加城市绿地总面积和聚集水平, 可有效缓解研究区 UHI 的负面影响; Spyrou 等^[88]指出, 在半干旱地区 200 m×200 m 的城市街区, 广泛种植植物, 并将建筑面积减少约 10%, 可使区域气温下降 1.5 °C; Gao 等^[89]基于北半球 17 座大型工厂的研究, 探讨了周边景观对地表工业热岛效应的影响, 结果表明不透水表面覆盖率是影响环境地表温度的主导因素, 工业类型和纬度为次要影响因素, 且景观斑块大小和宽度相较于厂房尺寸, 对地表温度冷却速度有显著影响; Shen 等^[90]对比了西湖和西溪湿地周边典型的办公楼在不同生态资源开发场景下的制冷能耗, 发现若将两块湿地均改造为建筑施工区, 则城市平均气温与热强度将增加 0.5 °C 以上, 且环境温度每升高 0.5 °C, 夏季典型办公楼的制冷需求将增加 10.8%; Du 等^[91]的研究指出, 各研究年度平均地表温度从高到低依次为建设用地、裸地、绿地、农业用地和湿地, 其中建设用地对 UHI 的贡献最大, 湿地与绿地则是缓解 UHI 的核心土地类型。

城市建筑能耗作为人为热排放的核心来源, 与 UHI 形成复杂的双向反馈机制。建筑能耗通过直接废热排放与间接环境干预双重路径作用于 UHI 演化: 一方面, 暖通空调系统运行产生的瞬时高负荷热量直接抬升局地气温, 多项研究表明, 建筑空调系统等冷却设备产生的热排放可使城市局部气温升高 0.5~2.0 °C, 导致 UHI 峰值增加 5%~10%, 从而提升峰值电力需求并使整体冷却能耗增加 20%~35%^[8,92]; 另一方面, 高能耗建筑往往伴随高密度不透水面与低反照率围护结构, 削弱城市蒸散发冷却效应, 最终形成能耗-热岛-更高能耗的正反馈循环。

2.3.2 研究趋势分析

本文利用 CiteSpace 工具对 945 篇英文文献进行关键词突变分析, 形成城市热岛领域研究热点突变图, 如图 6 所示。结合图 6, 将 UHI 对城市能耗影响的研究热点划分为 3 个发展阶段。

(1) 2000—2006 年: 突现关键词主要为“参数化”“区域”“边界层”等, 表明此阶段研究主要基于当时技术对 UHI 的粗略分析。

(2) 2007—2020 年: 突现关键词集中于“能量平衡模型”“冷屋面”“绿色屋面”和“微气候”等, 表明研究者开始利用更先进的计算机模拟软件与材料技术, 对 UHI 和城市能耗开展更深入细致的研究。

(3) 2021—2024 年: 突现关键词主要为“热环境”“城市设计”和“热浪”等, 研究热点进一步深化, 这与全球“碳中和”目标推进、我国 2020 年提出的“2030 碳达峰、2060 碳中和”目标, 以及学界开始关注全产业链、全生命周期节能降碳密切相关。

总体而言, “土地利用”和“地区”等关键词贯穿研究全程; 从整体趋势来看, UHI 对城市能耗研究的深化既依赖计算机技术的发展水平 (更多高精度模拟软件投入应用), 又得益于全球对环境保护和绿色低碳领域的重视。

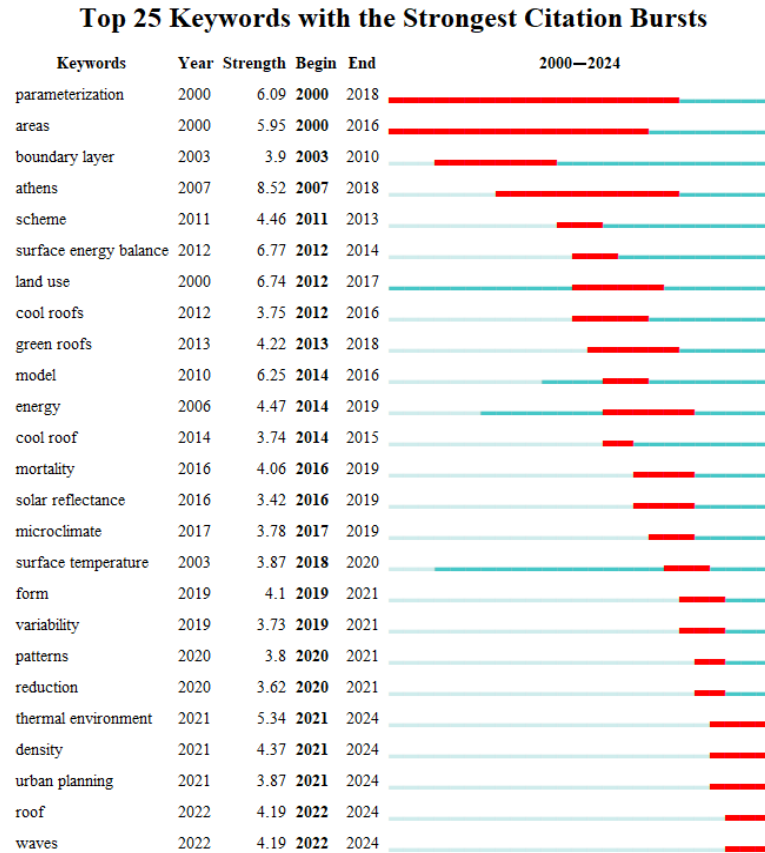


图6 城市热岛领域研究热点突变图

Fig.6 A sudden change map of research hotspots in the field of urban heat islands

3 挑战和未来研究

3.1 挑战

UHI 的研究主要面临两方面挑战。一方面，缺乏具有高空间分辨率和大空间覆盖范围的数据，如 UHI 有无对比的温度数据、建筑详细特征数据等。以往研究报告显示，城市热岛对能耗的影响呈现城市中心最强、向边缘递减的空间模式，但这种模式主要基于有限数量的观测点，缺乏对空间变化细节的揭示；即便采用地统计技术将观测点数据在空间上插值至全城，但空间细节仍局限于热岛影响的光滑表面^[93]。另一方面，缺乏大尺度模型研究方法。现有研究多集中于重点大型城市热环境的时空变化及驱动机制，对大规模城镇地表城市热岛的分析尤为不足。因此，开发并应用可跨越不同城市规模和气候区的大尺度模型，对深入理解 UHI 及其能耗影响具有重要意义。

3.2 城市热岛缓解策略

(1) 优化城市绿化。植被通过蒸腾和遮荫作用降低环境温度，是缓解 UHI 的关键手段，城市公园、绿色屋顶等绿化措施均能有效降温。设计时，需综合考虑公园面积、形状、植被覆盖度、植物种类、硬质铺装比例等因素，以提升降温效果。

(2) 推广“冷材料”应用。“冷材料”是指高反射率、高红外辐射率的材料，通过减少热量吸收、增加热量释放降低表面温度，主要包括高反射率/高辐射率冷材料、含相变材料的冷色调涂料及热敏变色材料等。在城市建筑屋顶和道路中广泛应用此类材料，是缓解 UHI 的有效策略。

(3) 合理规划土地利用。城市土地利用类型与布局直接影响城市气候，植被覆盖率高的区域地表温

度较低,分散布局比集中布局更有助于缓解 UHI;可利用地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 空间分析技术与遥感影像进行地表温度的反演分析,明确土地利用与 UHI 的关联。

(4) 构建通风廊道。城市通风通道可提升空气流动性,避免废热再循环,对缓解 UHI 具有积极作用。设计时需综合考虑城市地理条件、气候特点和建筑分布,根据城市的实际情况制定规划方案。

(5) 升级空调系统。引入新型空调系统和冷凝热回收技术,可有效减少建筑向环境的排热量,降低周边大气温度,既能减轻 UHI,又能提升建筑能效。

3.3 对相关研究的启示

在学术领域,UHI 与城市能耗关联性研究已历经数十年,形成较为系统全面的研究体系。该体系深入探讨了不同场景下 UHI 与城市能耗的耦合机制及量化关系。基于此,研究者们开发了多种城市能耗评估模型,并将其应用于城市能源规划与节能城市设计领域,初步构建了从理论到实践的框架,用以研究城市形态与建筑能耗的关联性,具有重要的参考意义和借鉴价值。

然而,受气候、地理、文化背景及治理体制差异的影响,我国与西方国家在该领域的研究现状存在显著不同。此外,气候条件和用户用能行为的差异也导致建筑用能特征不同。因此,有必要开展针对性的本土化研究,深入探讨 UHI 与城市能耗的关联性,推动城市建筑的节能发展。

4 结论

尽管城市热岛对建筑能耗的作用机理与总体方向已获广泛共识,但在不同气候区、城市形态与时段尺度下,定量影响的研究仍存在证据不足的问题。既有研究多采用物理模型结合城乡站点气温差的方式表征典型城市的热岛及其空间变化,但受限于站点稀疏、城市内部异质性强及能耗数据可得性差等问题,该路径难以准确刻画热环境与建筑能耗的跨尺度耦合强度及时空演变规律,也无法直接支撑情景评估与治理决策。因此,未来研究中应建立城市尺度高精度温—湿—风—辐射与建筑存量多源数据底座,并推动数据开放共享;同时,构建气候变化—城市扩张—UHI—建筑能耗的多尺度耦合模型与标准化评估框架,加强对发展中国家与快速城镇化地区的实证与对比分析,将健康、韧性、电力峰荷管理及碳减排目标协同纳入综合评价与决策支持体系,强化从模型构建到工程落地的闭环验证与经济性分析,并开展分区、分时的精细化治理研究。

参考文献

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Research Center for Building Energy Efficiency, Tsinghua University. Annual development research report on building energy conservation in China[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [2] RIBEIRO H V, RYBSKI D, KROPP J P. Effects of changing population or density on urban carbon dioxide emissions[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 3204.
- [3] HUO T F, MA Y L, CAI W G, et al. Will the urbanization process influence the peak of carbon emissions in the building sector? A dynamic scenario simulation[J]. Energy and Buildings, 2021, 232: 110590.
- [4] STRØMANN-ANDERSEN J, SATTRUP P A. The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(8): 2011-2020.
- [5] KO Y, RADKE J D. The effect of urban form and residential cooling energy use in Sacramento, California[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2014, 41(4): 573-593.
- [6] LI C S, SONG Y, KAZA N. Urban form and household electricity consumption: A multilevel study[J]. Energy and Buildings, 2018, 158: 181-193.
- [7] TARIKU F, GHARIB MOMBENI A. ANN-based method for urban canopy temperature prediction and building energy simulation with urban heat island effect in consideration[J]. Energies, 2023, 16(14): 5335.

- [8] LI X M, ZHOU Y Y, YU S, et al. Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings[J]. *Energy*, 2019, 174: 407-419.
- [9] TACOLI C, MCGRANAHAN G, SATTERTHWAIT D. Urbanisation, rural-urban migration and urban poverty[M]. London: Human Settlements Group, International Institute for Environment and Development, 2015.
- [10] KOLOKOTRONI M, GIRIDHARAN R. Urban heat island intensity in london: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer[J]. *Solar Energy*, 2008, 82(11): 986-998.
- [11] WANG S P, WANG Z H, ZHANG Y C, et al. Characteristics of urban heat island in China and its influences on building energy consumption[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(15): 7678.
- [12] TZAVALI A, PARAVANTIS J P, MIHALAKAKOU G, et al. Urban heat island intensity: A literature review[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2015, 24(12): 4537-4554.
- [13] ONISHI A, CAO X, ITO T, et al. Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2010, 9(4): 323-332.
- [14] TAN Z, LAU K K, NG E. Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 114: 265-274.
- [15] XU X Y, SUN S B, LIU W, et al. The cooling and energy saving effect of landscape design parameters of urban park in summer: A case of Beijing, China[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 149: 91-100.
- [16] DU X Y, LI Q. The effect of Pearl River on summer urban thermal environment of Guangzhou[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 205: 1785-1791.
- [17] YAN H, WU F, DONG L. Influence of a large urban park on the local urban thermal environment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622: 882-891.
- [18] CHANG C R, LI M H. Effects of urban parks on the local urban thermal environment[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014, 13(4): 672-681.
- [19] KONG F H, SUN C F, LIU F F, et al. Energy saving potential of fragmented green spaces due to their temperature regulating ecosystem services in the summer[J]. *Applied Energy*, 2016, 183: 1428-1440.
- [20] ZHANG B, XIE G D, GAO J X, et al. The cooling effect of urban green spaces as a contribution to energy-saving and emission-reduction: A case study in Beijing, China[J]. *Building and Environment*, 2014, 76: 37-43.
- [21] XIAO X D, DONG L, YAN H N, et al. The influence of the spatial characteristics of urban green space on the urban heat island effect in Suzhou Industrial Park[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 40: 428-439.
- [22] DU H Y, CAI Y L, ZHOU F Q, et al. Urban blue-green space planning based on thermal environment simulation: A case study of Shanghai, China[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 106: 105501.
- [23] BESIR A B, CUCE E. Green roofs and facades: A comprehensive review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 915-939.
- [24] KOKOGIANNAKIS G, TIETJE A, DARKWA J. The role of green roofs on reducing heating and cooling loads: A database across Chinese climates[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 11: 604-610.
- [25] WONG J K W, LAU L S K. From the 'urban heat island' to the 'green island'? A preliminary investigation into the potential of retrofitting green roofs in Mongkok district of Hong Kong[J]. *Habitat International*, 2013, 39: 25-35.
- [26] LUO H B, HUANG B, LIU X L, et al. Green roof assessment by GIS and google earth[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 2307-2313.

- [27] CHEN C F. Performance evaluation and development strategies for green roofs in Taiwan: A review[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 52: 51-58.
- [28] KOKOGIANNAKIS G, DARKWA J. Support for the integration of green roof constructions within Chinese building energy performance policies[J]. *Energy*, 2014, 65: 71-79.
- [29] HE Y, YU H, OZAKI A, et al. Long-term thermal performance evaluation of green roof system based on two new indexes: A case study in Shanghai area[J]. *Building and Environment*, 2017, 120: 13-28.
- [30] TAM V W Y, WANG J Y, LE K N. Thermal insulation and cost effectiveness of green-roof systems: An empirical study in Hong Kong[J]. *Building and Environment*, 2016, 110: 46-54.
- [31] OMRANY H, GHAFARIANHOSEINI A, GHAFARIANHOSEINI A, et al. Application of passive wall systems for improving the energy efficiency in buildings: A comprehensive review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 62: 1252-1269.
- [32] WONG I, BALDWIN A N. Investigating the potential of applying vertical green walls to high-rise residential buildings for energy-saving in sub-tropical region[J]. *Building and Environment*, 2016, 97: 34-39.
- [33] SAFIKHANI T, ABDULLAH A M, OSSEN D R, et al. A review of energy characteristic of vertical greenery systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 40: 450-462.
- [34] YIN H W, KONG F H, MIDDEL A, et al. Cooling effect of direct green façades during hot summer days: An observational study in Nanjing, China using TIR and 3DPC data[J]. *Building and Environment*, 2017, 116: 195-206.
- [35] DAHANAYAKE K C, CHOW C L, GUO L H. Selection of suitable plant species for energy efficient Vertical Greenery Systems (VGS)[J]. *Energy Procedia*, 2017, 142: 2473-2478.
- [36] MEDL A, STANGL R, FLORINETH F. Vertical greening systems – A review on recent technologies and research advancement[J]. *Building and Environment*, 2017, 125: 227-239.
- [37] SEYAM S. The impact of greenery systems on building energy: Systematic review[J]. *Journal of Building Engineering*, 2019, 26: 100887.
- [38] ZHAO C J, FU G B, LIU X M, et al. Urban planning indicators, morphology and climate indicators: A case study for a north-south transect of Beijing, China[J]. *Building and Environment*, 2011, 46(5): 1174-1183.
- [39] ZHOU X F, CHEN H. Impact of urbanization-related land use land cover changes and urban morphology changes on the urban heat island phenomenon[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 1467-1476.
- [40] HU Y P, WHITE M, DING W W. An urban form experiment on urban heat island effect in high density area[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 169: 166-174.
- [41] WEI R H, SONG D X, WONG N H, et al. Impact of urban morphology parameters on microclimate[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 169: 142-149.
- [42] LIN P Y, LAU S S Y, QIN H, et al. Effects of urban planning indicators on urban heat island: A case study of pocket parks in high-rise high-density environment[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 48-60.
- [43] TONG S S, WONG N H, JUSUF S K, et al. Study on correlation between air temperature and urban morphology parameters in built environment in northern China[J]. *Building and Environment*, 2018, 127: 239-249.
- [44] ZHOU Y, ZHUANG Z, YANG F, et al. Urban morphology on heat island and building energy consumption[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 205: 2401-2406.
- [45] XU D, ZHOU D, WANG Y P, et al. Field measurement study on the impacts of urban spatial indicators on urban climate in a Chinese basin and static-wind city[J]. *Building and Environment*, 2019, 147: 482-494.
- [46] YUE W Z, LIU X, ZHOU Y Y, et al. Impacts of urban configuration on urban heat island: An empirical study

- in China mega-cities[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 671: 1036-1046.
- [47] SHI Y, SONG Z, ZHANG W, et al. Physicochemical properties of dirt-resistant cool white coatings for building energy efficiency[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells: An International Journal Devoted to Photovoltaic, Photothermal, and Photochemical Solar Energy Conversion*, 2013, 110: 133-139.
- [48] ZHANG L, FUKUDA H, LIU Z H. The value of cool roof as a strategy to mitigate urban heat island effect: A contingent valuation approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 228: 770-777.
- [49] HAN A J, YE M Q, LIU L L, et al. Estimating thermal performance of cool coatings colored with high near-infrared reflective inorganic pigments: Iron doped $\text{La}_2\text{Mo}_2\text{O}_7$ compounds[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 84: 698-703.
- [50] LU S L, CHEN Y F, LIU S B, et al. Experimental research on a novel energy efficiency roof coupled with PCM and cool materials[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 127: 159-169.
- [51] CHEN J Q, WANG H, ZHU H Z. Analytical approach for evaluating temperature field of thermal modified asphalt pavement and urban heat island effect[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 113: 739-748.
- [52] JIANG L, WANG L C, WANG S Y. A novel solar reflective coating with functional gradient multilayer structure for cooling asphalt pavements[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 210: 13-21.
- [53] QIN Y H. A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 52: 445-459.
- [54] LIU Y, LI T, PENG H Y. A new structure of permeable pavement for mitigating urban heat island[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 1119-1125.
- [55] CHEN J, ZHOU Z, WU J T, et al. Field and laboratory measurement of albedo and heat transfer for pavement materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 202: 46-57.
- [56] QIN Y H. Urban canyon albedo and its implication on the use of reflective cool pavements[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 96: 86-94.
- [57] CHEN J Q, CHU R X, WANG H, et al. Alleviating urban heat island effect using high-conductivity permeable concrete pavement[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237: 117722.
- [58] YANG L, QIAN F, SONG D X, et al. Research on urban heat-island effect[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 169: 11-18.
- [59] LI A N, DENG W, KONG B, et al. A comparative analysis on spatial patterns and processes of three typical wetland ecosystems in 3H area, China[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 315-332.
- [60] SYAFII N I, ICHINOSE M, KUMAKURA E, et al. Thermal environment assessment around bodies of water in urban canyons: A scale model study[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 34: 79-89.
- [61] CHENG L D, GUAN D J, ZHOU L L, et al. Urban cooling island effect of main river on a landscape scale in Chongqing, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 47: 101501.
- [62] WANG C Y, ZHU W P. Analysis of the impact of urban wetland on urban temperature based on remote sensing technology[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 1546-1552.
- [63] XUE Z S, HOU G L, ZHANG Z S, et al. Quantifying the cooling-effects of urban and peri-urban wetlands using remote sensing data: Case study of cities of Northeast China[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 182: 92-100.
- [64] XU X Y, LIU S M, SUN S B, et al. Evaluation of energy saving potential of an urban green space and its water bodies[J]. *Energy and Buildings*, 2019, 188: 58-70.
- [65] HSIEH C M, HUANG H C. Mitigating urban heat islands: A method to identify potential wind corridor for cooling and ventilation[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2016, 57: 130-143.

- [66] SU N, ZHOU D, JIANG X T. Study on the application of ventilation corridor planning in urban new area: A case study of Xixian new area[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 169: 340-349.
- [67] YANG L N, LI Y G. Thermal conditions and ventilation in an ideal city model of Hong Kong[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(5): 1139-1148.
- [68] LUO Y W, HE J, NI Y L. Analysis of urban ventilation potential using rule-based modeling[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2017, 66: 13-22.
- [69] REN C, YANG R Z, CHENG C, et al. Creating breathing cities by adopting urban ventilation assessment and wind corridor plan – The implementation in Chinese cities[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 182: 170-188.
- [70] XU D, ZHOU D. Research on the planning methods of mitigating summer urban heat island effects among basin cities: A case study at Xi' an, China[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 169: 248-255.
- [71] GUO F, ZHU P S, WANG S Y, et al. Improving natural ventilation performance in a high-density urban district: A building morphology method[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 205: 952-958.
- [72] WANG W W, NG E, YUAN C, et al. Large-eddy simulations of ventilation for thermal comfort: A parametric study of generic urban configurations with perpendicular approaching winds[J]. *Urban Climate*, 2017, 20: 202-227.
- [73] TIAN L, LI Y C, LU J, et al. Review on urban heat island in China: Methods, its impact on buildings energy demand and mitigation strategies[J]. *Sustainability*, 2021, 13(2): 762.
- [74] YANG J, WANG Y C, XUE B, et al. Contribution of urban ventilation to the thermal environment and urban energy demand: Different climate background perspectives[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 795: 148791.
- [75] ZHAO Y M, DING X T, WU Z Y, et al. Impact of urban form on building energy consumption in different climate zones of China[J]. *Energy and Buildings*, 2024, 320: 114579.
- [76] HASHEMI F, NAJAFIAN P, SALAH N, et al. The impact of the urban heat island and future climate on urban building energy use in a Midwestern U.S. neighborhood[J]. *Energies*, 2025, 18(6): 1474.
- [77] DU H Y, WANG D D, WANG Y Y, et al. Influences of land cover types, meteorological conditions, anthropogenic heat and urban area on surface urban heat island in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 461-470.
- [78] SU M A, NGARAMBE J, SANTAMOURIS M, et al. Empirical evidence on the impact of urban overheating on building cooling and heating energy consumption[J]. *iScience*, 2021, 24(5): 102495.
- [79] CAO S S, CAI Y L, DU M Y, et al. Seasonal and diurnal surface urban heat islands in China: An investigation of driving factors with three-dimensional urban morphological parameters[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2022, 59(1): 1121-1142.
- [80] MATHEW A, KHANDELWAL S, KAUL N. Analysis of diurnal surface temperature variations for the assessment of surface urban heat island effect over Indian cities[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 159: 271-295.
- [81] CAO J F, LI M C, YANG X S, et al. The impact of urban dry island on building energy consumption is overlooked compared to urban heat island in cold climate[J]. *Energy and Buildings*, 2024, 320: 114655.
- [82] MAGLI S, LODI C, LOMBROSO L, et al. Analysis of the urban heat island effects on building energy consumption[J]. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2015, 6(1): 91-99.
- [83] MA Y X, YU C. Impact of meteorological factors on high-rise office building energy consumption in Hong Kong: From a spatiotemporal perspective[J]. *Energy and Buildings*, 2020, 228: 110468.

- [84] HIRANO Y, FUJITA T. Evaluation of the impact of the urban heat island on residential and commercial energy consumption in Tokyo[J]. *Energy*, 2012, 37(1): 371-383.
- [85] ASSIMAKOPOULOS M N, MIHALAKAKOU G, FLOCAS H A. Simulating the thermal behaviour of a building during summer period in the urban environment[J]. *Renewable Energy*, 2007, 32(11): 1805-1816.
- [86] MENG F C, LI M C, GUO J, et al. Impact of urban heat island effect on building heating intensity in Tianjin, China[J]. *International Journal of Global Warming*, 2020, 21(1): 20.
- [87] LU L L, WENG Q H, XIAO D, et al. Spatiotemporal variation of surface urban heat islands in relation to land cover composition and configuration: A multi-scale case study of Xi' an, China[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2713.
- [88] SPYROU G, IOANNOU B, SOULIOTIS M, et al. The adaptability of cities to climate change: evidence from cities' redesign towards mitigating the UHI effect[J]. *Sustainability*, 2023, 15(7): 6133.
- [89] GAO J F, MENG Q Y, ZHANG L L, et al. How does the ambient environment respond to the industrial heat island effects? An innovative and comprehensive methodological paradigm for quantifying the varied cooling effects of different landscapes[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2022, 59(1): 1643-1659.
- [90] SHEN T, CHOW D H C, DARKWA J. Simulating the influence of microclimatic design on mitigating the Urban Heat Island effect in the Hangzhou Metropolitan Area of China[J]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2013: ctt050.
- [91] DU H Y, ZHOU F Q, LI C L, et al. Analysis of the impact of land use on spatiotemporal patterns of surface urban heat island in rapid urbanization, a case study of Shanghai, China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(3): 1171.
- [92] SANTAMOURIS M. On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 82: 100-113.
- [93] SANTAMOURIS M, PAPANIKOLAOU N, LIVADA I, et al. On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings[J]. *Solar Energy*, 2001, 70(3): 201-216.