

缓解热岛效应的研究进展综述

戴铭祺, 施星宇

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年9月10日; 录用日期: 2025年9月18日; 发布日期: 2025年10月22日

摘要

城市热岛效应是指城市中心比郊区温度高的现象, 这种现象不仅会破坏城市与郊区的生态环境平衡, 同时也会对城市居民的生产生活产生负面影响。本文将从评价热岛效应影响的不同角度出发, 讨论当下对缓解热岛效应影响的研究方式以及应对策略。再从学科交叉角度讨论大数据算法在缓解热岛效应研究中的进展, 分析未来在本研究领域可能的发展趋势。

关键词

城市热岛效应, 城市环境, 建筑围护结构, 大数据

Review of Research Progress on Mitigating the Urban Heat Island Effect

Mingqi Dai, Xingyu Shi

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: September 10, 2025; accepted: September 18, 2025; published: October 22, 2025

Abstract

The urban heat island effect refers to the phenomenon where city centers exhibit higher temperatures than surrounding suburban areas. This phenomenon not only disrupts the ecological balance between urban and suburban environments but also negatively impacts the production and daily lives of city residents. This paper will examine the heat island effect from various evaluation perspectives, discussing current research approaches and mitigation strategies. It will further explore, from an interdisciplinary angle, the progress of big data algorithms in heat island mitigation research and analyze potential future development trends in this field.

Keywords

Urban Heat Island Effect, Urban Environment, Building Envelope, Big Data

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球城市化的不断推进,城市热岛效应(Urban Heat Island, UHI)已成为城市规划和管理中一个不可忽视的环境问题。这不仅降低了城市居民的生活舒适度,还可能对居民健康、能源消耗以及生态环境产生负面影响[1]-[3]。

随着对城市热岛效应影响认识的加深[4],有关各种热岛缓解策略的探索也随之发展,旨在降低城市的热岛强度,改善城市环境[5]。这些策略包括增加城市绿地[6][7]、应用高反照率材料[8][9]、改进城市规划设计[10][11]、优化建筑能源效率[12]等。然而,尽管这些措施在理论和实践中都取得了一定的进展,但如何综合考虑经济、社会和环境因素,制定出切实可行的缓解方案,仍是一个亟待解决的问题[13][14]。

目前,缓解热岛效应的综述大多以单一方式的角度进行研究。如 Elmira Jamei 等人研究了不同气候下绿色屋顶对城市热岛的缓解效果,综合发现绿色屋顶在干燥地区的热岛缓解能力最强[15]。而 Youssef Wardeh 等人则研究了路面材料对城市热岛的缓解效果,发现路面的反照率、热导率和蒸发通量是地表温度最大的影响因素[16]。对于多角度缓解热岛效应的研究, Bahador Ziaemehr 等人综述了建筑围护结构的材料以及其太阳反照率,并结合模拟验证的相关研究深度探讨该策略对城市热岛的缓解效果[17]。本研究旨在对目前大多数种类的城市热岛缓解措施进行系统性综述,与以往研究侧重于特定缓解策略的机理分析不同,本文将首先对现有热岛缓解措施的评价标准进行分类讨论,继而对这些措施的实施效果和研究方法进行综合评估。此外,本文将分析当前利用大数据技术进行城市热岛效应优化的研究进展,为城市热岛效应的缓解提供更为全面和深入的视角。

2. 城市热岛效应研究的发展

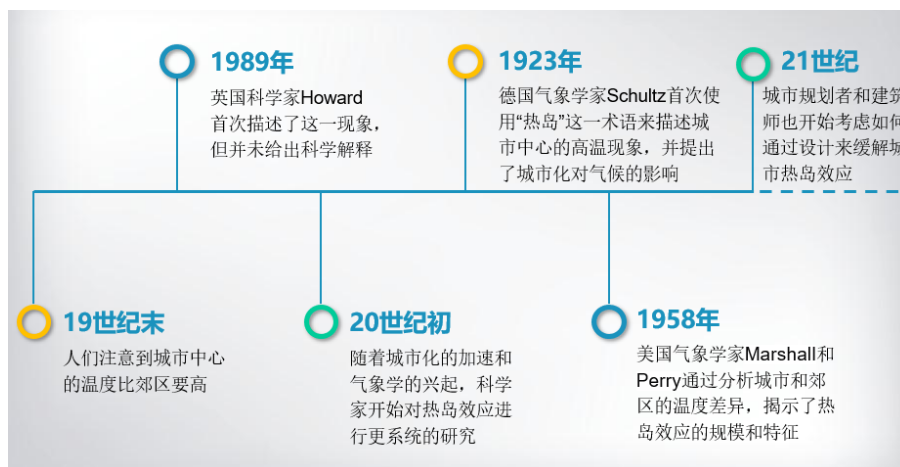


Figure 1. Development timeline of urban heat island effect research

图 1. 城市热岛效应研究的发展历程图

城市热岛效应是近现代逐渐出现并被关注的一个问题, 图 1 展现了它从定义到研究的发展历程。如今, 城市热岛效应是指城市中心比郊区温度高的现象, 且对于城市热岛效应的研究也逐渐完善, 研究方式从过去的单学科研究向多学科研究发展, 地理、建筑、医疗、计算机等多个多学科的交叉研究探索出了多种缓解策略, 如绿色屋顶、城市森林和智能城市技术。

根据所涉及的环境介质的不同, 城市热岛可以大体分为大气城市热岛、地表城市热岛和地下城市热岛[18][19]。尽管不同的城市热岛之间也会相互影响, 但各自也有其不同的特点。其中大气城市热岛可以根据高度分为城市冠层热岛和城市边界层热岛。城市冠层热岛是指城市地表到建筑屋顶之间的空气层, 其形成的因素多与城市人为建设有关[20], 包括建筑材料的吸热和储热能力、城市下垫面的反射率、城市人工热源的排放、绿地和水体的减少等, 因此目前对于缓解热岛效应的研究也大多围绕其展开。而城市边界层热岛是城市冠层之上、行星边界层下层且受城市下垫面影响的大气层, 由于其受到天气和城市热岛环流的影响最大, 在对城市边界层的研究中往往需要更大尺度的城市和天气模型, 其中就有常见的天气研究和预报模型 WRF。

相较于大气城市热岛, 地表城市热岛的研究一部分也依赖于遥感技术的发展。1972 年, 遥感技术被首次应用在了城市热岛的研究中, 研究人员开始可以得到城市及其周边地区的 24 小时地面温度分布, 这迅速推动了城市热岛的研究进展[21], 并弥补了传统气象站温度测点的缺陷[22], 同时也有越来越多的热岛缓解措施研究开始考虑对地表温度的缓解效果。而地下城市热岛则主要是由城市直接热源(地下设施、工业注水等)和居民使用自流水造成的, 在一项莫斯科的研究中发现地下城市热岛在冬季最为强烈, 夏季最为缓和[23], 这对冬季供暖和地源热泵采暖具有一定的借鉴意义, 但其总体对居民和城市的影响力较其他几类城市热岛更小。

根据近几年城市热岛研究的发展可以发现, 现有的热岛缓解措施大多作用于与之相邻的地表城市热岛和城市冠层热岛。一方面这些热岛缓解措施对这两类热岛的影响更为直接有效, 另一方面也可能是由于对城市边界层热岛和地下城市热岛的影响需要更长周期的研究, 但目前仍缺乏这方面的数据支持。因此本文将着重描述前两类热岛当前的缓解研究进展。

3. 研究方式

对热岛效应进行研究, 就需要考虑各参数对热岛的影响能力, 目前科研的方式主要分为建立数值模型、软件模拟和实验测量三种。

建立数值模型是最传统的研究方式, 这需要详细描述研究对象的所有传热过程。并且在大部分研究中, 由于理论模型和实际模型传热过程中会有一定的差异, 因此建立数值模型时往往会省略一部分影响较小的参数, 以达到简化模型的目的。Laura Carlosena 等人[24]则开发了一种传热模型, 该模型模拟水平平板, 采用有限差分法计算表面向下的导热率。下表面为对流传热系数几乎为零的绝缘表面, 上表面考虑对流换热、太阳辐射以及与大气的辐射换热, 其中大气辐射采用光谱选择性天空模型[25], 可将天空条件定义为晴朗天空、全覆盖天空和部分覆盖天空。研究分析了不同材料在不同光谱波段下的传热效益, 发现为达到最好的热缓解效益, 材料在不同光谱波段分别需要更高反射率和发射率。

Xie 等[26]结合长期路面性能(LTPP)数据库, 研究了一种带有前置玻璃的光伏路面, 该研究通过建立二维有限元模型探讨了此光伏路面材料在不同应用下的传热效益, 发现其较传统沥青路面具有更低的表面温度, 能减少路面对大气 12% 的热输出。

软件模拟是当下最主要的研究方式, 由于其方便性和广泛性而在大多数科研中被应用到。例如 Farhadi 等[27]在德黑兰地区的一项研究中使用 ENVI-met 软件进行模拟发现, 冷材料和绿色措施都对建筑表面温度产生正面效果, 但缓解热舒适度的作用不大, 而将建筑朝向避免下午太阳直射后可以使附近气温降低

1.96℃。Mohammed 等[28]则利用 CitySim 结合单层城市冠层模型对城市尺度不同功能的建筑群进行能耗模拟，分析热岛缓解措施对建筑表面显热通量的优化效果。Georgakis 等[29]通过 ANSYS Fluent 建立城市峡谷模型进行模拟分析，发现冷材料可以通过降低建筑间的太阳能反射，有效降低峡谷壁面和地表温度[29]。表 1 展示一些通过数值模型和软件模拟的研究进展。

Table 1. Research progress on mitigating the urban heat island effect through numerical simulation and software simulation
表 1. 通过数值模拟与软件模拟对缓解热岛效应的研究进展表

年份	研究内容	研究结果	参考文献
2020	计算流体力学模型、热量 - 空气 - 湿度 (BE-HAM)模型、辐射模型以及风驱雨 (WDR)模型通过 OpenFOAM 2.4 耦合，计算地面空隙率对地表温度影响	干燥条件下冷却效果随反照率的增加而提高。在潮湿环境下，较干燥的路面冷却效果更好，而反照率越低的路面冷却效果越好	[30]
2023	通风走廊模型 Circuit VRC 参数对地表气流气温的影响	当气流值从 0 增加到 0.5 时可以显著降低地表温度。容积率降低 0.1 时通风走廊气流值最大增加 17.8%	[31]
2022	将城市闹市区和规划区分为 6 个子区域后，通过 ENVI-met 分别模拟增加绿化、使用绿色屋顶，以及组合措施在各个子区域的影响	绿化屋顶可以降低平均气温 0.2℃~0.4℃，与城市绿化结合最大可以降低地表温度 0.4℃~1.1℃	[32]
2023	采用热有限元分析与整栋建筑动态模拟相结合，通过 ANSYS 模拟以评估光伏建筑一体化(BIPV)系统在建筑立面或屋顶上的热传输特性	无隔热和有隔热 BIPV 膜可以减少 8%和 15%的冷负荷，且在全年能耗减少量呈正效益	[33]
2022	使用 EnergyPlus 和 Urban Tethys-Chloris 对四个能效级别的建筑物进行年度能耗模拟	优化后的第四能效级别建筑较 2018 年的室内热暴露减少 20.7%，室外热暴露减少 1.4%	[34]

相较于数值模型和软件模拟的研究方式，一部分研究也通过实验的方式观测缓解措施的效益。Jonghoon Park 等[35]的研究就将韩国首尔城区分为小型绿地、建筑遮阴和暴露于太阳辐射的城市街道 3 类区块，研究发现绿地区块的平均气温低于整体区域温度的 0.41℃，低于空旷街道区域温度 1℃，而建筑遮阴虽然有一定缓解气温的效果，但一部分监测数据显示，其容易受到空调室外机废热和附近道路热量的影响，从而失去冷却效果。

Ananyeva 等[36]根据英国格拉斯哥市的“林荫道计划”，收集了 2021 年夏季当地的气候数据和近 3 年的历史天气数据，分析了采取计划后当地的气候变化，并利用 ENVI-met 模拟当地小气候，验证了“林荫道计划”可以使当地夏季平均气温降低 0.91℃，并提高了行人高度的热舒适度。表 2 为其他研究内通过实验对缓解热岛效应的研究。

Table 2. Research progress on mitigating the urban heat island effect through experiments
表 2. 通过实验对缓解热岛效应的研究进展表

实验周期	实验内容	实验结论	参考文献
连续两年夏季，共 12 个浇水日以及 28 个参考日	在巴黎进行路面喷水实验，并测量空气温湿度、平均辐射温度等指标，并以凌晨 3 点~6 点的平均气温为热岛缓解指标	对路面喷水后，1.5 米和 4 米高度最大降幅分别为气温 0.79℃和 0.57℃，平均辐射温度 1.67℃，但热岛缓解仅 0.22℃	[37]

续表

从 2011 年 7 月到 2013 年 6 月, 每 2 小时一次, 降雨期间除外。每次观察持续约 30 分钟, 在两年内进行了 7011 次测量	通过多地测量获取高分辨率温度数据, 分析不同土地利用类型在城市热浪(连续三天气温达 35℃)前后的气温变化	在非热浪条件下, 深圳市热岛强度为 $0.56^{\circ}\text{C} \pm 0.50^{\circ}\text{C}$, 而在热浪条件下, 热岛强度上升到 $0.68^{\circ}\text{C} \pm 0.65^{\circ}\text{C}$ 。如果自然地表覆盖面积增加 10%, 则夜间热岛强度可分别在非热浪和热浪条件下降低 0.38°C 和 0.39°C	[38]
2005 年 7 月、8 月、9 月和 12 月以及 2006 年 3 月、7 月、8 月和 9 月。每天 24 小时	使用热电偶监测各停车场内的地表温度和地下温度, 并测量空气温湿度与风速	与沥青表面相比, 草坪停车场在白天可减少约 $100\sim 150\text{ W/m}^2$ 的显热通量, 夜间可减少约 50 W/m^2 的显热通量。通过在整个停车场推广草坪覆盖, 可以使周围空气温度下降约 0.1°C	[39]

从表 2 与表 3 中可以看出, 无论是自行建立数值模型还是通过软件模拟, 关键都在于研究对城市热岛效应的传热过程, 在参数的选取定义上需要更加精准, 但可以考虑的范围更广。而实测测量则重在周期长、工作量大的特点上, 而且相关研究主要聚焦在便于观测的数值, 同时可能受到环境、人为等不稳定参数的影响。

4. 模型尺度

由于热岛效应是一个大范围、多因素共同影响的结果, 因此在不同尺度下[40]-[42], 研究热岛的影响因素也有所不同。主要的研究方式分为微气候模型和中尺度城市模型, 微气候模型关注局部温度模式和趋势, 而中尺度模型考虑土地利用和城市密度, 为城市规划和政策提供特定区域的局部温度分布预测。

在微气候模型的相关研究中, 城市绿色基础设施被证明对减少城市地表热岛效应非常有效。通过增加绿色空间、树木和植被覆盖, 可以降低城市的温度, 并提供更舒适的热环境[43]。Wang Chengcong 等人[44]研究发现大规模的城市绿地对缓解热岛效应有很大的影响力, 绿地面积越大, 效果更加显著。其中自然和人为因素对城市绿地降温效应的总体解释率为 53.5%, 且自然因素的影响力是人为因素的两倍, 因为降温效应主要体现在热带和干旱地区。Marco Noro 等人[45]模拟了意大利帕多瓦市一个著名的广场(Prato della Valle), 通过绿色地面和冷却铺装改造, 发现绿色地面情景下, 夜间和白天的空气温度分别降低了 1.4°C 和 3°C , 而冷却铺装情景下, 对应的温度降低分别为 1.8°C 和 4°C 。Zhao Tianfu 等人对绿化、水体和道路进行了详细的研究。在第一部分对校园的环境模拟中, 发现了绿地与水体的热岛缓解能力, 而不同反照率的地面可能产生对人体舒适度负面的影响[46]。而第二部分的研究则增加了树木与景观表面混合的情况, 并发现这项措施的热岛缓解效果较其他方式更好[47]。

相较于小气候模型, 中尺度模型大多需要更大规模的城市和气候模型, 是主要对城市边界层热岛进行的研究。天气研究和预报模型(WRF)就是一种常被应用于热岛研究中的模拟预报天气和天气数据的气候系统[48]。Tewari 等[49]通过天气模型 WRF 与单层城市冠层模型(SLUCM)耦合, 研究了绿色屋顶和冷屋顶对区域温度和城市环境的影响潜力, 发现绿色屋顶可以使白天平均城市炎热指数降低 10°C 以上, 冷屋顶的降温效果约为 5°C 。而城市冠层模型(UCM)是一种用于模拟城市区域的大气-地表相互作用的数值模型, 其结合 WRF 可以修改模型的物理参数来考虑城市环境对蒸发率、太阳辐射的吸收和反射、热量储存以及风和湍流场的影响, 并模拟街道和建筑物对城市冠层的影响[50]。在城市冠层模型基础上, 耦合建筑能量模型 BEM 不仅可以分析城市尺度的温度变化[51], 还能进一步计算带有制冷和供暖系统的建筑能源预算, 以及从建筑物到屋顶的热量释放量[52]。表 3 为其他不同尺度下对环境热岛效应的研究。

Table 3. Research on mitigating the urban heat island effect at different scales
表 3. 不同尺度下对缓解热岛效应的研究

年份	研究内容	研究结果	参考文献
2023	模拟在都灵和罗马冬季、夏季和热浪期间绿色屋顶、绿色立面和绿色墙体的热岛缓解效果	绿色立面可使周围步行区域温度下降约 0.8℃,而绿色屋顶仅可下降约 0.5℃。单个建筑应用仅能降低不到 0.5℃的气温,但广泛应用建筑综合植被技术时可以降低区域气温 1℃	[53]
2024	模拟研究不同铺装材料对行人环境的影响,以沥青为对照	高反照率花岗岩路面可以产生更低的空气和地表温度,但会产生更高的平均辐射温度和生理等效温度。同时其 NO 的排放量较少	[54]
2023	耦合 WRF、SLUCM,研究凉爽屋顶和绿色屋顶的热岛缓解效果	效果最佳的白色屋顶可使全市 2 m 气温和地面城市热岛强度在中午分别降低 1.5 ℃和 4.8℃	[55]
2016	耦合 WRF、UCM,研究路面反照率对城市热岛效应的影响	高反照率路面的冷却效果随城市峡谷长宽比的降低而降低	[56]
2024	耦合 WRF、UCM、BEM,研究绿色植被覆盖率和不透水地表热特性对城市热岛效应的影响	住宅区绿化可将城市热岛强度和空调负荷分别降低 106.26%和 53.13%	[57]

5. 建筑围护结构的优化方式

热岛效应作为一种区域性环境现象,同时受到区域内各因素的反向影响。建筑在城市区域内所占面积比例最大,同时对热岛效应和居民生活环境的影响也更明显,针对建筑围护结构的优化可以降低建筑表面的温度和区域环境温度,从而直接达到缓解热岛效应的目的。节约能耗也是一种可持续发展策略,在夏季,能耗的降低缓解了空调对区域的散热,同时也减小了能源生产侧对热岛效应的影响[58]。现有研究主要从建筑墙体和建筑屋顶两个方向角度对建筑进行优化。

5.1. 建筑墙体

建筑墙体在传统建筑过程中一直具有较高的关注度,因此对于如何通过建筑墙体的改造缓解热岛效应,也是研究的一大重点。目前改造建筑墙体的研究主要分为两个方向:一种是通过改变外墙表面条件,降低墙体白天的辐射得热量;另一种则通过改变墙体材料,减少墙体与外界环境的传热量。这两个方案都是通过减少建筑物从环境中的得热量,从而降低建筑表面和区域空气温度,达到缓解热岛效应的目的。

王鹏飞等人[59]就通过实验研究发现采用浅色墙壁较深色墙壁在下午 1 点时,壁温降低 17℃左右,而采用内保温温度峰值降低了 3.7℃。之后采用 Fluent 建立区域模型,发现当建筑表面反射率从 0.10 提高到 0.25 后,建筑南向壁面全天平均壁面温度分别降低 1.2℃,最大温降值约 5.1℃;建筑群内日间温度最大可被降低 0.68℃,日平均温度可降低 0.35℃。而通过 Surjamanto 等人[60]的模拟实验可以发现,东、西立面的温度行为很大程度上取决于立面类型,研究还发现若在墙体内部加入气隙,在夏季虽然有益于室内空气温度,但对室外空气环境具有负面效果,会导致热岛效应的加剧。

Anurag Kandya 等人[61]根据印度独特的环境和材料优势,研究了混凝土石膏加竹层的新型墙体材料应用到实际建筑上的效果,发现其不仅能大大降低建造成本,而且当墙体内嵌入双层竹层(4 英寸)时,夏季空间制冷能耗降低了 6.7%~6.8%。相变材料(PCM)作为一种能够随温度变化而改变形态并能提供潜热的物质,也逐渐被考虑应用在建筑墙体上。Karlessi 等人[62]通过不同颜色、熔点、浓度的有机石蜡进行模拟建筑外墙表面实验,研究发现了金色是使墙体升温最少的颜色,而当气温在有机石蜡的熔点附近变

化时, 它最高可以降低建筑表面温度 8°C 。

垂直绿化作为一种新型建筑构造, 在冬季和夏季对环境的优化作用都十分显著, 因此近年来的研究和实地建设越来越多, 其在遮阳作用、蒸散作用、隔热作用和控风作用四方面相较传统建筑都有很大的优势[63]。Elham Shafiee 等人[64]首先通过实验验证了垂直绿化对墙体表面的优化作用, 根据温湿度传感器记录, 发现垂直绿化在高温期间最大降低紧贴壁面处的空气温度 8.7°C , 提高全天空气湿度 9.97%。之后通过 ENVI-met 建模模拟所得出的结论约为 8.1°C 和 6%, 因此垂直绿化对环境温湿度的优化是可以肯定的。

5.2. 建筑屋面

近年来, 不同屋顶类型的应用愈加受到重视。与建筑墙体改造不同的是, 由于屋顶在日常生产生活中人为接触的更少, 因此对其的改造应用可以更加直接有效, 且受到的人为影响因素更低。但作为建筑外围护结构的一部分, 屋面的改造原理和手段又相似于墙体改造, 大致分为冷屋顶、绿色屋顶和 PCM 屋顶三类, 目前研究的主要目的都是通过降低屋面得热量来缓解热岛效应。

绿色屋顶由于其优秀的蒸腾作用, 可以有效优化区域热环境, 在降低缓解温度的基础上, 增加区域湿度, 降低建筑冬夏季能耗, 提高建筑区域的热舒适性。这类屋顶设施大多不受人为活动影响, 相较垂直绿化建造所需考虑的人为因素更少。Wang Xun 等人[65]利用 WRF 和 UCM 建立模型, 模拟了柏林地区夏季采用绿色屋顶和冷屋顶情况下, 对环境温度和能耗的影响。发现绿色屋顶和冷屋顶分别可以降低地表温度 2.76°C 和 3.1°C , 且当绿色屋顶每天没有灌溉时, 这个效果会降低 14%; 冷屋顶的屋顶反照率从 0.85 降至 0.5 时(模拟屋面老化导致反照率降低), 冷却效果会下降 47%。Imran 等[66]将 WRF 和单层城市冠层模型耦合, 研究发现在墨尔本极端热浪天气下, 90%的绿色屋顶面积最高可降低 3°C 的热岛强度, 且与传统屋顶相比, 使屋顶上空的湍流动能减少了 $0.2\sim 1.5\text{ m}^2/\text{s}^2$ 。梁锦等人[67]研究发现高反射率屋顶能使空调系统耗能降低 $0.91\text{ W}/\text{m}^2$, 最高降低 $1.14\text{ W}/\text{m}^2$, 全天平均降幅约为 5.3%。同时令空调系统对外释放的感热通量白天减少 $4.03\text{ W}/\text{m}^2$, 有效减少了空调排热 7.1%, 而且这个效果随着屋面反射率和建筑密度的提高仍会持续提高。

冷屋顶利用其对阳光的高反射率, 大大降低了夏季白天屋顶的辐射得热, 对降低屋面温度、优化区域热环境有很好的效果。一项用 ENVI-met 软件对德黑兰一住区进行考察的研究, 模拟了反照率 0.6 的冷屋顶和 10%植被覆盖率的绿色模型, 发现冷屋顶下午最大冷却温度为 $5.32^{\circ}\text{C}\sim 6.96^{\circ}\text{C}$, 而绿色屋顶的最大影响时间在上午 9 点左右, 使环境温度下降了 9.36°C [27]。而这个效果也会随着冷屋顶屋面反照率的提升而提升, 也有研究就发现每提升 0.1 的屋面反照率, 城市环境平均温度可以得到 $0.1\text{ K}\sim 0.33\text{ K}$ 的缓解 [68]。Mohammad Hossein Jahangir 等人[69]通过模拟研究发现, 当增加屋顶绿化的应用建筑时, 区域的热岛面积平均减少了 38.58%, 热岛强度平均降低 0.68°C 。

不太常见的 PCM 材料由于不同的材料特性, 对热岛效应的影响会有很大的变化。在高温时段, PCM 材料通过相变吸热可以有效缓解时下的高温压力, 使得环境温度峰值降低。Kibria K. Roman 等[70]通过 DesignBuilder 研究了不同屋顶反照率和五种 PCM 材料对屋顶热通量的影响情况, 发现 BioPCM 和 $\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 在高峰端 TRHG 通量最低, 仅为 $3.25\text{ W}/\text{m}^2$ 和 $8.51\text{ W}/\text{m}^2$, 这一效果远远超出高反射率冷屋顶, 约是冷屋顶的 1/2。Bader Alshuraiaan 等[71]的研究发现 PCM 材料的应用温度需要达到材料的熔点温度, 否则会对能耗产生负面影响。而当环境温度达到熔点温度时, PCM 材料的液相分数达到了 70%~100%, 热流密度可达原来的 50%, 仅在 $2\text{ W}/\text{m}^2\sim 10\text{ W}/\text{m}^2$ 震荡, 可有效降低建筑能耗。因此综合研究发现, 对于不用熔点和浓度的 PCM 材料, 需要与设计地区的实际温度变化相适应, 才能产生最大的效益。表 4 为其他研究内各种建筑围护结构优化的相关研究结果。

Table 4. Related research results of various building envelope optimization studies in other studies
表 4. 其他研究内各种建筑围护结构优化的相关研究结果

年份	优化方式	研究结果	参考文献
2015	仿生逆反射表面	建筑总能耗和制冷能耗分别降低 8.2%和 9.8%	[72]
2023	绿色屋顶	最高降低行人层面气温 0.41℃，分别减少高温区和亚高温区面积 52.55%和 29.17%	[73]
2024	高反射材料、额外灌溉或非灌溉绿化、高层与低层灌木等	良好灌溉的绿色屋顶情况下最高使城市地表温度降低 3.5℃~7.3℃。提高城市反照率使白天环境温度峰值下降 0.2℃~2.2℃	[74]
2022	0.2、0.4、0.6 屋面反照率和不同传热系数工况	反照率 0.6 时屋面温度降低最大，达 5.5 K。传热系数均为最低的工况下室外气温也最低	[75]
2017	微晶玻璃镀膜	在夏季约节能 21%	[76]
2019	冷屋顶与热致变色材料屋面	冷屋顶降低冷负荷 7.84%，但在冬季增加 5.87%热负荷。热致变色表面降低 6.59%冷负荷，仅增加 0.07%热负荷	[77]

6. 大数据分析优化

随着计算机算法的发展，大数据的概念逐渐被广泛应用到各个领域上[78]，人工神经网络算法和机器学习也为优化城市热岛缓解策略和研究热岛效应提供了新的方法。通过这些方式能够整合多源数据、挖掘关键影响因素[79]，以及自动优化城市形态、绿地布局和地表材料[78]，进一步完善对城市热岛的研究。

基于大量的数据采集得到一个长时间、多点位的数据库，通过这个数据库就可以进行人工神经网络的构建。通过人工神经网络，可以根据一系列基础数据的计算分析，预测城市未来的天气变化[80]，而通过这些预测，也能评估热岛缓解措施在实施后的实际应用效果[81]。人工神经网络隶属于深度学习，是机器学习的一个重要分支，属于人工智能范畴。近年来，有研究通过构建的框架模型对多目标进行综合优化，利用大量数据训练人工智能，计算得出了指定参数下最优的城市热缓解策略[82]。

Hou 等[83]根据不同气候区城市的归一化差异植被指数、地表反照率、城市形态和夜间光图像等参数，通过基于随机森林算法的机器学习研究不同城市不同季节的热岛强度，及不同参数对热岛效应的影响大小。研究发现对城市热岛强度影响最大的是城市绿化覆盖率，其次是地表反照率。绿化在夏秋两季影响最大，而地表反照率的影响主要体现在春冬两季。研究认为该随机森林算法是适用于非线性回归问题的机器学习算法的一种，后续仍可以采用多种机器学习算法对比分析得出最优算法。

Fei 等[84]基于人工神经网络的微气候影响耦合机制模型，研究城市蓝绿设施对冬季热岛的影响大小，研究发现绿化和路面分别在距水面 4 m 和 6 m 处达到温度增益的最大值，热岛强度最大的影响因素是滨水绿地的气温。研究通过调查模拟发现人工神经网络能够更有效地预测热岛强度，且模型精度高，从而得到了一个耦合机制的新小气候影响。

Mazzeo 等[85]建立了基于 Levenberg-Marquardt 算法的人工神经网络模型，研究土壤基质和植被的特征参数，以及对绿色屋顶内外表面温度以及空气温度的影响。该研究采用人工神经网络模型，具有较好的模拟预测能力，其预测结果与实际测量以及动力学仿真软件 DesignBuilder 的误差最大值仅在 0.3℃以下，研究结果发现绿色屋顶较传统屋顶的屋面温度低 5℃~15℃。

7. 结论与展望

随着全球气候变暖和城市化进程推进，热岛效应对城市发展和居民生活的负面影响也日益加剧。为了应对这一气候变化，目前缓解热岛效应的研究主要从以下几种措施入手：

1) 建筑表面添加绿化, 以绿色墙面和绿化屋顶为主。经许多研究发现, 绿色植物对城市热岛效应有着十分显著的缓解效果, 这不仅直观体现在空气和建筑表面温度上, 也对空气湿度、居民热舒适有着良好影响。但值得注意的是, 这类优化措施需要长期的灌溉和保养, 在建设和维护成本上较其他方式更高。

2) 高太阳反照率表面是目前最常用到的热岛缓解措施之一。得益于可以大量减少来自日间的辐射得热且不需要大量的后期维护, 高太阳反照率表面被广泛应用于建筑和道路表面。而其不足之处在于屋面的老化会逐渐降低反照率, 从而降低热岛缓解效果, 应用在道路面上则需要考虑道路眩光等问题。

3) 随着材料学的发展, 常有新型材料被考虑应用到缓解热岛效应中去, 其中不仅有高反照率或高热阻的材料, 也有利用材料传热特性优化建筑围护结构温度的 PCM 材料。这类材料往往有更好的传热学特性, 但目前在实际应用上仍处于探索阶段。

4) 对于整个城市热岛效应而言, 除了大面积在建筑和道路上的优化, 还需要一定的蓝绿措施对城市热岛进行缓解。大量研究和测量均发现, 尤其在热浪期间, 城市绿化和水体长期对热岛效应有着良好的缓解效果。

总之, 通过本研究可以看出目前传统热岛缓解措施的研究已较为全面。而由于近年来大数据和人工智能研究的飞速发展, 也有一部分学者利用计算机算法对热岛缓解措施进行优化, 为缓解热岛效应的研究又提供了一个新的思路。因此, 随着材料、遥感、计算机等学科的发展, 学科交叉所带来的方式拓展将为缓解热岛效应的研究带来更高的效益和更广阔的未来。

参考文献

- [1] Yadav, N., Rajendra, K., Awasthi, A., Singh, C. and Bhushan, B. (2023) Systematic Exploration of Heat Wave Impact on Mortality and Urban Heat Island: A Review from 2000 to 2022. *Urban Climate*, **51**, Article 101622. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101622>
- [2] Kumari, P., Garg, V., Kumar, R. and Kumar, K. (2021) Impact of Urban Heat Island Formation on Energy Consumption in Delhi. *Urban Climate*, **36**, Article 100763. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100763>
- [3] Zhao, H., Fang, Y. and Xu, X. (2024) Quantifying Morphology Evolutions of Urban Heat Islands and Assessing Their Heat Exposure in a Metropolis. *Sustainable Cities and Society*, **102**, Article 105244. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105244>
- [4] Cheval, S., Amihăse, V., Chitu, Z., Dumitrescu, A., Falcescu, V., Irașoc, A., et al. (2024) A Systematic Review of Urban Heat Island and Heat Waves Research (1991-2022). *Climate Risk Management*, **44**, Article 100603. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2024.100603>
- [5] Akbari, H. and Kolokotsa, D. (2016) Three Decades of Urban Heat Islands and Mitigation Technologies Research. *Energy and Buildings*, **133**, 834-842. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.067>
- [6] Liao, J., Dai, Y., An, L., Hang, J., Shi, Y. and Zeng, L. (2023) Water-Energy-Vegetation Nexus Explain Global Geographical Variation in Surface Urban Heat Island Intensity. *Science of The Total Environment*, **895**, Article 165158. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165158>
- [7] Chen, J., Jin, S. and Du, P. (2020) Roles of Horizontal and Vertical Tree Canopy Structure in Mitigating Daytime and Nighttime Urban Heat Island Effects. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **89**, Article 102060. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102060>
- [8] Pomerantz, M. (2018) Are Cooler Surfaces a Cost-Effect Mitigation of Urban Heat Islands? *Urban Climate*, **24**, 393-397. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.04.009>
- [9] Zhang, L., Fukuda, H. and Liu, Z. (2019) The Value of Cool Roof as a Strategy to Mitigate Urban Heat Island Effect: A Contingent Valuation Approach. *Journal of Cleaner Production*, **228**, 770-777. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.338>
- [10] Abed, S.A., Halder, B. and Yaseen, Z.M. (2024) Investigation of the Decadal Unplanned Urban Expansion Influenced Surface Urban Heat Island Study in the Mosul Metropolis. *Urban Climate*, **54**, Article 101845. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101845>
- [11] Renc, A. and Łupikasza, E. (2024) Changes in the Surface Urban Heat Island between 1986 and 2021 in the Polycentric Górnośląsko-Zagłębiowska Metropolis, Southern Poland. *Building and Environment*, **247**, Article 110997. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110997>

- [12] Ling, H.M., Yew, M.C., Yew, M.K. and Saw, L.H. (2024) Analyzing Recent Active and Passive Cool Roofing Technology in Buildings, Including Challenges and Optimization Approaches. *Journal of Building Engineering*, **89**, Article 109326. <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2024.109326>
- [13] Zhang, L., Yang, X., Fan, Y. and Zhang, J. (2021) Utilizing the Theory of Planned Behavior to Predict Willingness to Pay for Urban Heat Island Effect Mitigation. *Building and Environment*, **204**, Article 108136. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108136>
- [14] Xi, C., Han, L., Wang, J., Feng, Z., Kumar, P. and Cao, S. (2023) How Can Greenery Space Mitigate Urban Heat Island? An Analysis of Cooling Effect, Carbon Sequestration, and Nurturing Cost at the Street Scale. *Journal of Cleaner Production*, **419**, Article 138230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138230>
- [15] Jamei, E., Chau, H.W., Seyedmahmoudian, M. and Stojcevski, A. (2021) Review on the Cooling Potential of Green Roofs in Different Climates. *Science of The Total Environment*, **791**, Article 148407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148407>
- [16] Wardeh, Y., Kinab, E., Escadeillas, G., Rahme, P. and Ginestet, S. (2022) Review of the Optimization Techniques for Cool Pavements Solutions to Mitigate Urban Heat Islands. *Building and Environment*, **223**, Article 109482. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109482>
- [17] Ziaemehr, B., Jandaghian, Z., Ge, H., Lacasse, M. and Moore, T. (2023) Increasing Solar Reflectivity of Building Envelope Materials to Mitigate Urban Heat Islands: State-of-the-Art Review. *Buildings*, **13**, Article 2868. <https://doi.org/10.3390/buildings13112868>
- [18] Wu, Z. and Ren, Y. (2019) A Bibliometric Review of Past Trends and Future Prospects in Urban Heat Island Research from 1990 to 2017. *Environmental Reviews*, **27**, 241-251. <https://doi.org/10.1139/er-2018-0029>
- [19] Oke, T.R. (1995) The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects. In: Cermak, J.E., Davenport, A.G., Plate, E.J. and Viegas, D.X., Eds., *Wind Climate in Cities*, Springer, 81-107. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3686-2_5
- [20] Tian, W., Yang, Y., Wang, L., Zong, L., Zhang, Y. and Liu, D. (2023) Role of Local Climate Zones and Urban Ventilation in Canopy Urban Heat Island-Heatwave Interaction in Nanjing Megacity, China. *Urban Climate*, **49**, Article 101474. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101474>
- [21] Diem, P.K., Nguyen, C.T., Diem, N.K., Diep, N.T.H., Thao, P.T.B., Hong, T.G., et al. (2024) Remote Sensing for Urban Heat Island Research: Progress, Current Issues, and Perspectives. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **33**, Article 101081. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101081>
- [22] Zhou, D., Sun, S., Li, Y., Zhang, L. and Huang, L. (2023) A Multi-Perspective Study of Atmospheric Urban Heat Island Effect in China Based on National Meteorological Observations: Facts and Uncertainties. *Science of The Total Environment*, **854**, Article 158638. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158638>
- [23] Lokoshchenko, M.A. and Korneva, I.A. (2015) Underground Urban Heat Island Below Moscow City. *Urban Climate*, **13**, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.04.002>
- [24] Carlosena, L., Ruiz-Pardo, Á., Feng, J., Irulegi, O., Hernández-Minguillón, R.J. and Santamouris, M. (2020) On the Energy Potential of Daytime Radiative Cooling for Urban Heat Island Mitigation. *Solar Energy*, **208**, 430-444. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.015>
- [25] Berger, X. and Bathiebo, J. (1989) From Spectral Clear Sky Emissivity to Total Clear Sky Emissivity. *Solar & Wind Technology*, **6**, 551-556. [https://doi.org/10.1016/0741-983x\(89\)90090-8](https://doi.org/10.1016/0741-983x(89)90090-8)
- [26] Xie, P. and Wang, H. (2021) Potential Benefit of Photovoltaic Pavement for Mitigation of Urban Heat Island Effect. *Applied Thermal Engineering*, **191**, Article 116883. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116883>
- [27] Farhadi, H., Faizi, M. and Sanaieian, H. (2019) Mitigating the Urban Heat Island in a Residential Area in Tehran: Investigating the Role of Vegetation, Materials, and Orientation of Buildings. *Sustainable Cities and Society*, **46**, Article 101448. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101448>
- [28] Mohammed, A., Khan, A., Saeed Khan, H. and Santamouris, M. (2024) On the Cooling Energy Impacts of Combined Urban Heat Mitigation Strategies in Subtropical Urban Building Environment. *Energy and Buildings*, **309**, Article 113918. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113918>
- [29] Georgakis, C., Zoras, S. and Santamouris, M. (2014) Studying the Effect of “Cool” Coatings in Street Urban Canyons and Its Potential as a Heat Island Mitigation Technique. *Sustainable Cities and Society*, **13**, 20-31. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.04.002>
- [30] Ferrari, A., Kubilay, A., Derome, D. and Carmeliet, J. (2020) The Use of Permeable and Reflective Pavements as a Potential Strategy for Urban Heat Island Mitigation. *Urban Climate*, **31**, Article 100534. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100534>
- [31] Fang, Y., Zhao, L., Dou, B., Li, Y. and Wang, S. (2023) Circuit VRC: A Circuit Theory-Based Ventilation Corridor Model for Mitigating the Urban Heat Islands. *Building and Environment*, **244**, Article 110786.

- <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110786>
- [32] Cortes, A., Rejuso, A.J., Santos, J.A. and Blanco, A. (2022) Evaluating Mitigation Strategies for Urban Heat Island in Mandaue City Using Envi-Met. *Journal of Urban Management*, **11**, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2022.01.002>
 - [33] Jhumka, H., Yang, S., Gorse, C., Wilkinson, S., Yang, R., He, B., *et al.* (2023) Assessing Heat Transfer Characteristics of Building Envelope Deployed BIPV and Resultant Building Energy Consumption in a Tropical Climate. *Energy and Buildings*, **298**, Article 113540. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113540>
 - [34] Baniassadi, A., Heusinger, J., Meili, N., Izaga Gonzalez, P. and Samuelson, H. (2022) Urban Heat Mitigation through Improved Building Energy Efficiency. *Energy and Climate Change*, **3**, Article 100078. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2022.100078>
 - [35] Park, J., Kim, J., Sohn, W. and Lee, D. (2021) Urban Cooling Factors: Do Small Greenspaces Outperform Building Shade in Mitigating Urban Heat Island Intensity? *Urban Forestry & Urban Greening*, **64**, Article 127256. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127256>
 - [36] Ananyeva, O. and Emmanuel, R. (2023) Street Trees and Urban Heat Island in Glasgow: Mitigation through the 'Avenues Programme'. *Urban Forestry & Urban Greening*, **86**, Article 128041. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128041>
 - [37] Hendel, M., Gutierrez, P., Colombert, M., Diab, Y. and Royon, L. (2016) Measuring the Effects of Urban Heat Island Mitigation Techniques in the Field: Application to the Case of Pavement-Watering in Paris. *Urban Climate*, **16**, 43-58. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.02.003>
 - [38] Zou, Z., Yan, C., Yu, L., Jiang, X., Ding, J., Qin, L., *et al.* (2021) Impacts of Land Use/ Land Cover Types on Interactions between Urban Heat Island Effects and Heat Waves. *Building and Environment*, **204**, Article 108138. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108138>
 - [39] Takebayashi, H. and Moriyama, M. (2009) Study on the Urban Heat Island Mitigation Effect Achieved by Converting to Grass-Covered Parking. *Solar Energy*, **83**, 1211-1223. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.01.019>
 - [40] Kim, S.W. and Brown, R.D. (2023) Development of a Micro-Scale Heat Island (MHI) Model to Assess the Thermal Environment in Urban Street Canyons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **184**, Article 113598. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113598>
 - [41] Martin, M., Ramani, V. and Miller, C. (2024) Infrared Investigation in Singapore (IRIS) Observatory: Urban Heat Island Contributors and Mitigators Analysis Using Neighborhood-Scale Thermal Imaging. *Energy and Buildings*, **307**, Article 113973. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113973>
 - [42] Qian, J., Meng, Q., Zhang, L., Schlink, U., Hu, X. and Gao, J. (2023) Characteristics of Anthropogenic Heat with Different Modeling Ideas and Its Driving Effect on Urban Heat Islands in Seven Typical Chinese Cities. *Science of The Total Environment*, **886**, Article 163989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163989>
 - [43] Abdulateef, M.F. and Al-Alwan, H.A.S. (2022) The Effectiveness of Urban Green Infrastructure in Reducing Surface Urban Heat Island. *Ain Shams Engineering Journal*, **13**, Article 101526. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.06.012>
 - [44] Wang, C., Ren, Z., Dong, Y., Zhang, P., Guo, Y., Wang, W., *et al.* (2022) Efficient Cooling of Cities at Global Scale Using Urban Green Space to Mitigate Urban Heat Island Effects in Different Climatic Regions. *Urban Forestry & Urban Greening*, **74**, Article 127635. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127635>
 - [45] Noro, M. and Lazzarin, R. (2015) Urban Heat Island in Padua, Italy: Simulation Analysis and Mitigation Strategies. *Urban Climate*, **14**, 187-196. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.04.004>
 - [46] Zhao, T.F. and Fong, K.F. (2017) Characterization of Different Heat Mitigation Strategies in Landscape to Fight against Heat Island and Improve Thermal Comfort in Hot-Humid Climate (Part I): Measurement and Modelling. *Sustainable Cities and Society*, **32**, 523-531. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.03.025>
 - [47] Zhao, T.F. and Fong, K.F. (2017) Characterization of Different Heat Mitigation Strategies in Landscape to Fight against Heat Island and Improve Thermal Comfort in Hot-Humid Climate (Part II): Evaluation and Characterization. *Sustainable Cities and Society*, **35**, 841-850. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.006>
 - [48] Zhu, D. and Ooka, R. (2023) WRF-Based Scenario Experiment Research on Urban Heat Island: A Review. *Urban Climate*, **49**, Article 101512. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101512>
 - [49] Tewari, M., Yang, J., Kusaka, H., Salamanca, F., Watson, C. and Treinish, L. (2019) Interaction of Urban Heat Islands and Heat Waves under Current and Future Climate Conditions and Their Mitigation Using Green and Cool Roofs in New York City and Phoenix, Arizona. *Environmental Research Letters*, **14**, Article 034002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf431>
 - [50] Li, X. and Norford, L.K. (2016) Evaluation of Cool Roof and Vegetations in Mitigating Urban Heat Island in a Tropical City, Singapore. *Urban Climate*, **16**, 59-74. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.12.002>
 - [51] Morini, E., Touchaei, A.G., Rossi, F., Cotana, F. and Akbari, H. (2018) Evaluation of Albedo Enhancement to Mitigate Impacts of Urban Heat Island in Rome (Italy) Using WRF Meteorological Model. *Urban Climate*, **24**, 551-566. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.08.001>

- [52] Touchaei, A.G. and Akbari, H. (2015) Evaluation of the Seasonal Effect of Increasing Albedo on Urban Climate and Energy Consumption of Buildings in Montreal. *Urban Climate*, **14**, 278-289. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.09.007>
- [53] Jung, S.J. (2024) Pedestrian-Path Pavement Materials to Improve Microclimate and Air Quality on Current Pedestrian Paths. *Urban Climate*, **55**, Article 101973. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101973>
- [54] Susca, T., Zanghirella, F. and Del Fatto, V. (2023) Building Integrated Vegetation Effect on Micro-Climate Conditions for Urban Heat Island Adaptation. Lesson Learned from Turin and Rome Case Studies. *Energy and Buildings*, **295**, Article 113233. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113233>
- [55] Wang, X., Liu, G., Zhang, N., Liu, H., Tang, X., Lyu, M., *et al.* (2023) Effects of Cooling Roofs on Mitigating the Urban Heat Island and Human Thermal Stress in the Pearl River Delta, China. *Building and Environment*, **245**, Article 110880. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110880>
- [56] Yang, J., Wang, Z., Kaloush, K.E. and Dylla, H. (2016) Effect of Pavement Thermal Properties on Mitigating Urban Heat Islands: A Multi-Scale Modeling Case Study in Phoenix. *Building and Environment*, **108**, 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.021>
- [57] Du, R., Liu, C. and Li, X. (2024) A New Method for Detecting Urban Morphology Effects on Urban-Scale Air Temperature and Building Energy Consumption under Mesoscale Meteorological Conditions. *Urban Climate*, **53**, Article 101775. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101775>
- [58] Sezer, N., Yoonus, H., Zhan, D., Wang, L., Hassan, I.G. and Rahman, M.A. (2023) Urban Microclimate and Building Energy Models: A Review of the Latest Progress in Coupling Strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **184**, Article 113577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113577>
- [59] 王朋飞, 崔展, 柳靖. 建筑围护结构热工特征对住区热环境影响的研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(2): 82-86.
- [60] Wonorahardjo, S., Sutjahja, I.M., Mardiyati, Y., Andoni, H., Achsani, R.A., Steven, S., *et al.* (2022) Effect of Different Building Façade Systems on Thermal Comfort and Urban Heat Island Phenomenon: An Experimental Analysis. *Building and Environment*, **217**, Article 109063. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109063>
- [61] Kandya, A. and Mohan, M. (2018) Mitigating the Urban Heat Island Effect through Building Envelope Modifications. *Energy and Buildings*, **164**, 266-277. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.014>
- [62] Karlessi, T., Santamouris, M., Synnefa, A., Assimakopoulos, D., Didaskalopoulos, P. and Apostolakis, K. (2011) Development and Testing of PCM Doped Cool Colored Coatings to Mitigate Urban Heat Island and Cool Buildings. *Building and Environment*, **46**, 570-576. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.09.003>
- [63] 潘澜, 郑晓娜, 罗霜, 等. 垂直绿化的建筑节能与室外降温效应研究进展[J]. 应用生态学报, 2023, 34(10): 2871-2880.
- [64] Shafiee, E., Faizi, M., Yazdanfar, S. and Khanmohammadi, M. (2020) Assessment of the Effect of Living Wall Systems on the Improvement of the Urban Heat Island Phenomenon. *Building and Environment*, **181**, Article 106923. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106923>
- [65] Wang, X., Li, H. and Sodoudi, S. (2022) The Effectiveness of Cool and Green Roofs in Mitigating Urban Heat Island and Improving Human Thermal Comfort. *Building and Environment*, **217**, Article 109082. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109082>
- [66] Imran, H.M., Kala, J., Ng, A.W.M. and Muthukumar, S. (2018) Effectiveness of Green and Cool Roofs in Mitigating Urban Heat Island Effects during a Heatwave Event in the City of Melbourne in Southeast Australia. *Journal of Cleaner Production*, **197**, 393-405. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.179>
- [67] 梁锦, 罗坤, 王强, 等. 高反照率屋顶对城市热岛及空调能耗的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(10): 1993-2000.
- [68] Santamouris, M. (2014) Cooling the Cities—A Review of Reflective and Green Roof Mitigation Technologies to Fight Heat Island and Improve Comfort in Urban Environments. *Solar Energy*, **103**, 682-703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- [69] Jahangir, M.H., Zarfeshani, A. and Arast, M. (2024) Investigation of Green Roofs Effects on Reducing of the Urban Heat Islands Formation (The Case of a Municipal District of Tehran City, Iran). *Nature-Based Solutions*, **5**, Article 100100. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100100>
- [70] Roman, K.K., O'Brien, T., Alvey, J.B. and Woo, O. (2016) Simulating the Effects of Cool Roof and PCM (Phase Change Materials) Based Roof to Mitigate UHI (Urban Heat Island) in Prominent US Cities. *Energy*, **96**, 103-117. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.082>
- [71] Alshuraiaan, B. (2022) Efficient Utilization of PCM in Building Envelope in a Hot Environment Condition. *International Journal of Thermofluids*, **16**, Article 100205. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100205>
- [72] Han, Y., Taylor, J.E. and Pisello, A.L. (2015) Toward Mitigating Urban Heat Island Effects: Investigating the Thermal-

- Energy Impact of Bio-Inspired Retro-Reflective Building Envelopes in Dense Urban Settings. *Energy and Buildings*, **102**, 380-389. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.040>
- [73] Fang, Y., Du, X., Zhao, H., Hu, M. and Xu, X. (2023) Assessment of Green Roofs' Potential to Improve the Urban Thermal Environment: The Case of Beijing. *Environmental Research*, **237**, Article 116857. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116857>
- [74] Haddad, S., Zhang, W., Paolini, R., Gao, K., Altheeb, M., Al Mogirah, A., et al. (2024) Quantifying the Energy Impact of Heat Mitigation Technologies at the Urban Scale. *Nature Cities*, **1**, 62-72. <https://doi.org/10.1038/s44284-023-00005-5>
- [75] 周文倩, 李祥立, 端木琳, 等. 建筑围护结构热工性能对城市热岛强度影响研究[J]. 大连理工大学学报, 2022, 62(5): 485-492.
- [76] Enríquez, E., Fuertes, V., Cabrera, M.J., Soares, J., Muñoz, D. and Fernández, J.F. (2017) New Strategy to Mitigate Urban Heat Island Effect: Energy Saving by Combining High Albedo and Low Thermal Diffusivity in Glass Ceramic Materials. *Solar Energy*, **149**, 114-124. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.011>
- [77] Fabiani, C., Pisello, A.L., Bou-Zeid, E., Yang, J. and Cotana, F. (2019) Adaptive Measures for Mitigating Urban Heat Islands: The Potential of Thermochromic Materials to Control Roofing Energy Balance. *Applied Energy*, **247**, 155-170. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.020>
- [78] Jang, S., Bae, J. and Kim, Y. (2024) Street-Level Urban Heat Island Mitigation: Assessing the Cooling Effect of Green Infrastructure Using Urban IoT Sensor Big Data. *Sustainable Cities and Society*, **100**, Article 105007. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105007>
- [79] Zheng, Z., LixiongWang, and HienWong, N. (2016) Intelligent Control System Integration and Optimization for Zero Energy Buildings to Mitigate Urban Heat Island. *Procedia Engineering*, **169**, 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.012>
- [80] Mokarram, M., Taripana, F. and Pham, T.M. (2023) Investigating the Effect of Surface Urban Heat Island on the Trend of Temperature Changes. *Advances in Space Research*, **72**, 3150-3169. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.06.048>
- [81] Asadi, A., Arefi, H. and Fathipour, H. (2020) Simulation of Green Roofs and Their Potential Mitigating Effects on the Urban Heat Island Using an Artificial Neural Network: A Case Study in Austin, Texas. *Advances in Space Research*, **66**, 1846-1862. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.06.039>
- [82] Qi, J., Ding, L. and Lim, S. (2023) Application of a Decision-Making Framework for Multi-Objective Optimisation of Urban Heat Mitigation Strategies. *Urban Climate*, **47**, Article 101372. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101372>
- [83] Hou, H., Longyang, Q., Su, H., Zeng, R., Xu, T. and Wang, Z. (2023) Prioritizing Environmental Determinants of Urban Heat Islands: A Machine Learning Study for Major Cities in China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **122**, Article 103411. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103411>
- [84] Fei, F., Wang, Y., Wang, L., Fukuda, H., Yao, W., Zhou, Y., et al. (2023) Mechanisms of Urban Blue-Green Infrastructure on Winter Microclimate Using Artificial Neural Network. *Energy and Buildings*, **293**, Article 113188. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113188>
- [85] Mazzeo, D., Matera, N., Peri, G. and Scaccianocce, G. (2023) Forecasting Green Roofs' Potential in Improving Building Thermal Performance and Mitigating Urban Heat Island in the Mediterranean Area: An Artificial Intelligence-Based Approach. *Applied Thermal Engineering*, **222**, Article 119879. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119879>