不同尺度下户外热舒适性的国际研究进展*

Research Progress on Outdoor Thermal Comfort at Different Urban Scales

周歆喻 施益军 徐丽华 翟 炜 汤俊卿 Zhou Xinyu, Shi Yijun, Xu Lihua, Zhai Wei, Tang Junqing

摘 要 随着全球气候变化与快速城市化进程叠加，城市热环境引发的公共健康风险与人居环境质量下降已成为可持续发展领域的关键挑战。基于空间上的宏观、中观、微观3个尺度，详细梳理户外热舒适性研究在各尺度下的关注重点、评价方法、影响机制及优化策略。宏观尺度侧重气候适应性规划与时空分异，中观尺度聚焦建成环境形态与微气候的量化关联，微观尺度则深入探讨个体与周边环境微气候的耦合机制及其生理热应激与心理热适应交互。整体研究呈现从“区域气候”到“建成环境”再到“个体感知”的逐级深化和反馈的特征。在此基础上总结当前研究存在的跨尺度联动不足、模型与实践脱节、人本因素整合不够等局限，提出未来应加强跨尺度耦合研究、融合智能技术建构适应性设计实践体系，以及深化人本多维的户外热舒适综合评价，以期为提升城市户外空间品质和气候韧性提供参考借鉴。

Abstract Against the backdrop of global climate change compounded by rapid urbanization, public health risks and the degradation of the quality of human settlements induced by the urban thermal environment have emerged as critical challenges in the field of sustainable development. Based on three spatial scales—macro, meso, and micro—this paper comprehensively reviews the research priorities, evaluation methods, impact mechanisms, and optimization strategies of outdoor thermal comfort (OTC) research at each level. The study reveals that the macro scale emphasizes climate-adaptive planning and spatiotemporal heterogeneity. The meso scale focuses on the quantitative correlation between built environment morphology and microclimate. The micro scale delves into the coupling mechanism between individuals and the surrounding microclimate, as well as the interaction between physiological heat stress and psychological thermal adaptation. Collectively, the research demonstrates a characteristic progression of successive deepening and feedback loops, transitioning from “regional climate” to “built environment” and ultimately to “individual perception.” Building upon this foundation, the paper summarizes current limitations, including insufficient cross-scale linkages, the disconnect between simulation models and practical applications, and the inadequate integration of human-centric factors. Furthermore, it proposes future research directions: strengthening cross-scale coupling studies, integrating smart technologies to construct adaptive design practice systems, and deepening the multi-dimensional, human-centric comprehensive evaluation of OTC. This framework aims to provide insights for enhancing the quality of urban outdoor spaces and bolstering climate resilience.

关 键 词 户外热舒适性；多尺度；城市热环境；研究进展

Key words outdoor thermal comfort; multi-scale; urban thermal environment; research progress

文章编号 1673-8985（2026）04-0097-09 中图分类号 TU981 文献标志码 A DOI 10.11982/j.supr.20260414

作者简介

周歆喻
浙江农林大学风景园林与建筑学院 硕士研究生

施益军（通信作者）
浙江农林大学风景园林与建筑学院
副教授，硕士生导师，博士
yijun_shi@zafu.edu.cn

徐丽华
浙江农林大学风景园林与建筑学院
教授，博士生导师，博士

翟 炜
美国得克萨斯大学阿灵顿分校
助理教授，博士生导师，博士

汤俊卿
北京大学城市规划与设计学院
助理教授，博士生导师，博士

0 引言

全球范围内极端高温事件日益频繁，城市居民面临的热暴露和热健康风险持续增加。高温不仅对居民健康与福祉产生直接影响，也进一步暴露出高密度城市建成环境在应对极端气候方面的脆弱性[1-2]。城市是人类活动的核心载体，其户外空间对居民的身心

*基金项目：浙江省高校重大人文社科攻关计划青年重点项目“特大灾害事件扰动下的城市空间韧性评估与应对策略研究”（编号2024QN136）资助。

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

健康至关重要[3]。然而，城市热环境的恶化正直接影响着户外空间的利用率和舒适度。联合国人居署在《2024年世界城市报告》中预测，至2040年，将有37亿城市居民面临气温上升的威胁[4]。因此，在全球气候变化加剧的背景下，如何有效改善城市户外空间的热环境质量，以保障居民健康、提升生活品质，已成为一个重要的课题[5]。

热舒适的城市开放空间能够吸引城市居民进行户外活动，为解决上述问题并提高户外热舒适性，人们需要对城市户外空间的热舒适性进行评估和改善。早在20世纪70年代，Fanger[6]就将热舒适性定义为“个体对周围热环境感到满意的一种心理状态”，这种状态取决于人体与环境之间的热平衡。虽然热舒适理论最早源于室内稳态环境研究，但随着城市热环境问题的加剧，该理论被广泛延伸至受气象、建成环境和多维心理因素剧烈影响的室外复杂开放空间中，由此构成了“户外热舒适性”（Outdoor Thermal Comfort，OTC）这一研究分支。近20年来，全球在户外热舒适性研究方面取得了显著进展[7]，主要集中在物理环境层面的植被覆盖、铺装材料与建筑能源对微气候的调节作用[8]，城市规划层面的热岛效应与土地利用对户外热舒适性的影响[9]1-2，以及微观层面各指标对户外热舒适的作用[10]，[11]4-5。然而，现有研究多局限于单一尺度。本文旨在对不同尺度下户外热舒适性的评价方法、影响因素和应对策略的研究成果进行全面、系统的梳理，以期为城市户外空间气候适应性设计提供参考借鉴。

本文首先基于Web of Science和Scopus数据库，对2000—2025年间的户外热舒适性研究文献进行系统梳理，分析年度发文趋势、研究阶段与高频关键词，然后分别从宏观、中观、微观3个层面概述各尺度下的研究重点。在此基础上，本文指出当前研究在跨尺度联动、模型与实践衔接、人本因素整合及地域适用性方面的局限，并提出未来需强化跨尺度耦合模型、智能化评价工具、多维人本综合评估和情境化适应策略的研究方向。

1 户外热舒适性研究的总体概况

1.1 研究历程与热点

本文基于Web of Science和Scopus两个国际综合性学术数据库进行研究。两者收录范围涵盖城市规划、建筑科学、环境科学、地理学及生物气象学等与户外热舒适性研究密切相关的学科领域，且在期刊覆盖范围上具有一定互补性，有利于降低单一数据库造成的文献遗漏。本文以“outdoor thermal comfort”和“thermal comfort indices”为关键词检索2000年1月至2025年2月的文献，共获得747篇文章，去重和筛选后最终确定243篇相关研究作为分析对象。整体来看，2000—2025年户外热舒适性研究呈显著增长趋势（见图1），大体经历了3个阶段：(1) 2000—2010年为探索阶段，研究数量有限，重点在指标引入与初步应用；(2) 2010—2018年为拓展阶段，受极端气候事件影响，研究数量快速增长，内容转向多源数据融合与微气候模拟；(3) 2018—2025年为深化阶段，随着大数据和人工智能的应用，研究关注点拓展至气候变化背景下的多尺度热舒适优化与人本响应机制。

为深化对研究热点的认识，本文利用CiteSpace对文献关键词进行科学计量分析（见图2）。结果显示，“outdoor thermal comfort”“thermal comfort”等为核心高频词，反映了研究主题的集中性；“thermal indices”“thermal sensation”“PET”等体现了多元化的评估体系；“mean radiant temperature”揭示了常用的数据获取方式；“climate change”“urban heat island”“street canyon”等则表明气候因素与城市建成环境对户外热舒适性具有显著影响。

1.2 户外热舒适性的研究尺度

通过对已有研究梳理发现，户外热舒适性研究在空间维度上可清晰地分为宏观、中观与微观3个尺度，各尺度在研究对象、影响因素及研究方法上呈现出显著分异（见表1）。

宏观尺度以整个城市或区域为研究对象，聚焦大范围内热环境与气候系统的交互

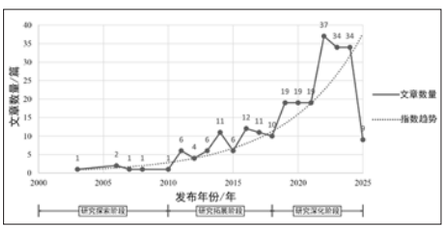


图1 2000—2025年户外热舒适研究年度发文总量及增长趋势

Fig.1 Annual publication volume and growth trend of outdoor thermal comfort research from 2000 to 2025

资料来源：笔者自绘。



关键词	出现频率
outdoor thermal comfort 户外热舒适	95
thermal comfort 热舒适	75
mean radiant temperature 平均辐射温度	24
climate change 气候变化	15
thermal indices 热指数	13
thermal sensation 热感觉	13
physiological equivalent temperature 生理等效温度	12
urban heat island 城市热岛	12
street canyon 街道峡谷	11
urban microclimate 城市微气候	10

图2 关键词共现及频率图

Fig.2 Keyword co-occurrence and frequency network

资料来源：笔者自绘。

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

机制。研究侧重户外热舒适性的空间分异规律、气候适应性规划策略及跨尺度政策协同。中观尺度以街区或城市片区为研究对象，解析建成环境形态参数与微气候的量化关联。研究重点包括街区形态对户外热舒适性的空间异质性塑造、局地气候分区的适应性优化设计以及进行热舒适评估[9]5。微观尺度则聚焦个体所处的微环境界面，重点解析微空间要素通过物理能量交换作用于人体生理热应激、通过空间感知传导调节心理热适应的耦合机制。

2 宏观尺度：城市—区域层级

宏观尺度研究聚焦时空分异规律与驱动机制解析，创新多源数据与智能技术融合的分析方法，并探索气候适应性规划调控路径，为解析区域热环境演变规律、提升气候韧性及人居环境可持续性提供理论依据与实践支撑。

2.1 户外热舒适性的影响机制

宏观尺度下户外热舒适性的影响机制研究主要致力于揭示气候背景与城市化过程交织作用下的热环境演变规律，逐步形成“自然背景—人文扰动—中介过程—热舒适性格局”的多因素耦合作用链（见图3）。

现有研究从城市扩张、土地利用变化与生态调控等方面系统揭示宏观尺度下户外热舒适性的主要驱动机制。有学者研究发现城市形态的致密化与地表不透水化通过降低反照率和通风效率加剧热量积聚[14]，且形态参数对热感知存在复杂的非线性效应[15]。土地利用变化与人为热排放则共同改变了地表能量平衡，导致城市高温加剧[16]。这些人为扰动与自然背景耦合，在复杂地形区会增强热环境的空间异质性[17-18]，在湿热地区则以“协同胁迫”机制加剧人体热应激[19]。作为重要的调控手段，城市绿地等生态系统能够通过蒸散与遮阴效应有效缓解热不适，为改善局地户外热舒适性提供了重要途径[20]。

宏观尺度研究已成功识别出城市化背景下的关键驱动因子，并揭示了城市建成环境与气候、地形等自然要素的交互作用如何决定户外热舒适性的空间格局。然而，当前研究仍存在跨尺度联动不足、参数敏感性分析不充分与模型不确定性较高等问题。未来应加强高分辨率建模与多源数据融合，拓展从区域到城市群层级的耦合研究，进一步揭示不同驱动因子在不同时空情境下的权重与反馈机制。

2.2 户外热舒适性的空间分异特征

城市气候效应的系统性探究可追溯至1833年霍华德（Howard）对伦敦的开创性研究[21]。自此，宏观尺度的户外热舒适性研究由早期的现象描述阶段，进入复杂的时空异质性特征研究层面。在本文所界定的宏观尺度内部，现有研究广泛涵盖了全球不同地域，并依据研究范围的空间跨度，形成了全球、国家、区域及城乡梯度等不同层级的分析框架（见图4）。全球层级研究强调纬度梯度与地形驱动作用，揭示热舒适区正向两极扩展，东西半球差异显著，奠定了预测性框架[22]；国家层级下聚焦于跨气候带的空间分异特征，揭示了不同纬度、地形和气候背景下户外热舒适性格

表1 不同尺度下户外热舒适性研究概述
Tab.1 Overview of outdoor thermal comfort research at different scales

尺度	核心研究维度	研究对象	调控方向
宏观	自然—人文耦合机制	城市、区域	气候适应性规划、绿色基础设施网络、跨区域热风险评估[12]8-11
中观	建成环境—微气候关联	街区、社区	社区空间形态优化、遮阴设施分级布局、地表反射率调控[13]
微观	个体—环境交互感知	个体及其周边微环境	个体尺度的环境参数调控、热应激响应关系、热舒适主观感知[11]3-14

资料来源：笔者自制。

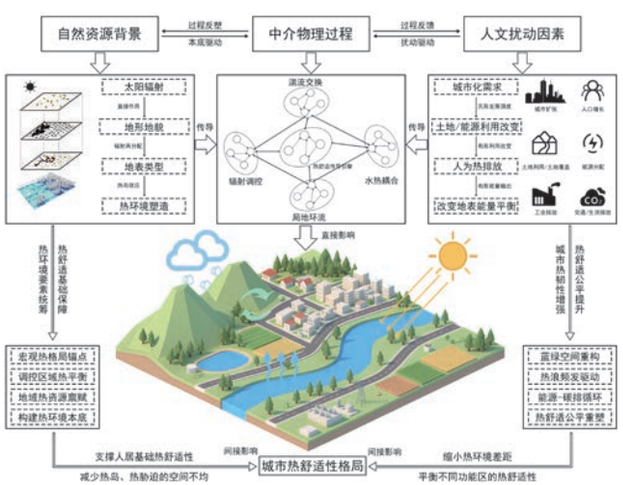


图3 宏观尺度下户外热舒适性影响机制图
Fig.3 Influence mechanisms of outdoor thermal comfort at the macro scale

资料来源：笔者自绘。



图4 宏观尺度下不同层级户外热舒适性解析框架
Fig.4 Analytical framework of outdoor thermal comfort at different hierarchical levels at the macro scale

资料来源：笔者自绘。

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

局的空间异质性，并通过定量建模绘制了国家级的高分辨率热暴露图谱[23-24]；针对大型城市群或流域带的区域层级则重点解析沿海与内陆、平原与山地等特定地理条件下的热环境格局，验证了多源自然因子对缓解区域热胁迫的贡献度，并证实了评价指标在复杂地域中的多尺度适用性[25-26]；城乡层级聚焦政策与社会经济因素，结果显示政策虽可缓解城市热岛，但城乡差异仍在扩大，公平性与可持续性成为重要研究议题[27-28]。

目前，宏观尺度下户外热舒适性的时空格局研究已取得显著进展，清晰地揭示了全球变暖背景下热环境变化的复杂性、区域差异性与多重驱动机制。未来的研究趋势与挑战将主要体现在多层级耦合与精细化，需要在宏观格局认知的基础上，进一步探索不同层级户外热舒适性格局之间的相互作用与影响机制，实现更精细化的时空动态模拟与预测。

2.3 户外热舒适性的评价方法

在宏观尺度层面，户外热舒适性评价方法正呈现出多学科交叉与技术融合的发展趋势，形成了“机理驱动—数据驱动”协同演进的研究范式。在现有研究方法技术上，可归纳为地理空间与气候模型集成、多源多模态数据耦合、物理指标拓展与长时序连续评价，以及基于深度学习的数据驱动预测方法（见表2）。

遥感反演、气候模型与GIS空间分析等技术的集成，有效突破了传统气象站点数据在时空分辨率上的局限，实现了区域尺度下热环境特征的动态监测与空间异质性识别。研究者逐步引入人口加权模型与社会公平性指标，通过“物理环境—社会公平”耦合评价框架，拓展了户外热舒适性的社会维度内涵，增强了其政策可操作性[29]。随着人工智能与遥感技术的融合，基于深度学习的户外热舒适性评价模型开始广泛运用[30]。通过随机森林等算法，实现了城市大范围参数的自动化提取与热舒适指标的高精度分布式预测，能够对极端高温事件进行动态预警。部分研究进一步结合数字孪生技术，揭示了多因子交互作用下的个体热舒适机理，推动户外热舒适性研究拓展更具智能化与个性化的研究方向。

尽管上述研究成果卓有成效，但在多尺度模型嵌套、城市异质性精细化表征及热暴露人群复杂时空行为耦合等方面仍存在方法论瓶颈。未来研究亟需加强多源异构数据的高效同化、提升深度学习模型的可解释性，并构建统一的跨尺度热舒适评价标准体系，以推动该领域在理论框架与实践应用上的进一步深化。

2.4 户外热舒适性的规划政策调控

宏观尺度下规划政策对户外热舒适性的调控研究呈现“目标导向—技术驱动—空间正义”三位一体的演进特征，通过制度创新与规划工具迭代，构建适应气候变化的多层级动态响应系统（见表3）。不同国家结合自身因素，制定了具有差异化的技术路线，逐步形成“风险评估—技术控制—形态优化”的全链条调控政策。

综合来看，规划政策层面的研究已呈现3方面进展：(1) 户外热舒适性由环境评价拓展为城市韧性与公共健康的重要维度；(2) 数字技术与政策工具融合，推动形成可量化的治理范式；(3) 通过空间形态、生态系统与社会过程的耦合干预，缓解热岛效应并提升热舒适公平性。然而，模型与规划执行的衔接不足及城乡政策传导差异仍是突出挑战。未来需加强跨尺度评估工具与政策路径建设，并在全球经验与地方实践的结合中探索适应性与公平性更高的调控方案。

3 中观尺度：街区—社区层级

中观尺度研究聚焦于建成环境形态与微气候的量化关联，通过参数化模拟、多源数据融合与机器学习等方法，系统揭示了街区形态、生态配置及材料界面对户外热舒适性的综合影响。研究构建“模拟—评估—优化”的技术闭环，可以为城市局部空间的热环境精准调控与适应性设计提供参考依据和优化路径。

表2 宏观尺度下户外热舒适性评价方法

Tab.2 Evaluation methods for outdoor thermal comfort at the macro scale

类别	主要方法/技术	优势	劣势
地理空间与气候模型集成	遥感反演；气候模型重构；GIS空间分析[31-32]	实现大范围、动态的热环境监测；提高时空分辨率，突破传统气象站点的离散性	对模型参数与初始条件敏感；数据同化与校准工作量大
多源多模态数据耦合	遥感与气象数据融合人口加权模型；社会经济指标量化资源分配公平性[12]2-10	将热舒适与人群分布和公平性紧密关联；支持决策制定中的社会公正考量	数据来源多样、标准不一，融合难度高；社会数据隐私与获取成本
深度学习的数据驱动预测方法	人工神经网络模型[33]；LCZ-ANN（Local Climate Zone-Artificial Neural Network）混合框架[34]；随机森林多尺度遥感数据融合[35]；数字孪生平台[36]	自动化提取城市形态参数；强大的非线性建模与分布式预测能力；支持极端事件动态预警	模型可解释性差，易过拟合；对标注数据与算力依赖高；跨尺度迁移能力有待验证

资料来源：笔者自制。

表3 各国的户外热舒适性调控政策

Tab.3 Regulatory policies for outdoor thermal comfort in various countries

演进特征	政策与设计标准	核心调控策略	代表政策/指南	挑战
目标导向	强制性热风险清单；社区适应性量化目标	热岛动态监测网络；公共空间适应性；知识共享平台推广	《荷兰国家气候适应战略》《乌得勒支省气候适应规划》[37-38]	地方实施协调不足；成本与收益分配不均
技术驱动	强制性户外热舒适性评估；规划审批流程整合	微气候模拟与整合；适应性设计标准制定；热应激指标纳入国家监测	《英国国家规划政策框架》《伦敦金融城开发项目热舒适指南》[39-40]	高密度开发形成微气候冲突；多因素整合的复杂性
空间正义	发布气候韧工具包；社区福祉优先导向	社区参与热暴露绘图；绿色基础设施网络规划；弱势群体优先干预	《美国市长气候保护协议》《剑桥气候变化应对与韧性手册》[41]	韧性评估体系的指标缺失；策略侧重短期应对，缺乏长效机制

资料来源：笔者自制。

《上海城市规划》 https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

3.1 建成环境形态对户外热舒适性的影响机制

中观尺度的城市空间形态对户外热舒适性的研究已由早期对单一几何参数的探索演进为基于多源指标融合的综合评估体系（见表4），并在模拟与数据驱动方法的共同作用下实现了对局地热环境与中观尺度研究揭示规律的精细刻画。

综合来看，现有研究在指标构建与方法路径上已形成较为完善的框架，覆盖了从街区群体空间形态配置、蓝绿基础设施网络构建到公共空间与人群活动协同的多维管控视角。然而，多数研究仍聚焦于模型验证与定量关联，存在复杂模型计算效率与验证的挑战。另外，研究结论在不同气候区和城市类型间的普适性与地方性差异的平衡存在一定的研究空白。

3.2 户外热舒适性的评价方法

中观尺度下的户外热舒适性评价研究，一方面持续推进新型评价模型构建与既有模型改进，另一方面通过融合定点与移动气象监测、遥感、街景图像、主观问卷及建筑能耗等多源异构数据，依托数值模拟与数据驱动双路径，揭示城市几何形态、空间结构、景观特征等对户外热舒适空间分布规律的作用机理（见表5）。

户外热舒适性评价方法经历了由经验模型到智能算法的演进。早期研究主要依托ETU、UTCI等基于能量交换的指标，通过解析辐射、风速、湿度等因子建立物理基础[47]562-563。随着计算能力提升与数据获取手段多样化，贝叶斯回归、随机森林、XGBoost等非线性模型被引入，以更好地刻画环境要素与主观热感的复杂关联。近年来，多源动态测量、遥感影像语义分割及图神经网络等前沿技术的应用，进一步突破时空分辨率与实时性限制，推动评价体系向精细化、动态化与多维化发展[51]1-3，[53]。

总体而言，当前研究正朝着物理机理与数据驱动的深度协同、时空数据实时耦合及跨气候多场景泛化3个方向迈进。不同评价方法在空间覆盖范围、计算成本与模型可解释性方面各有优势，其适用性仍取决于街区形态、气候背景和数据条件。未来应构建兼具可解释性与泛化能力的混合模型框架，优化移动与遥感数据的融合算法，并通过开放标准化数据集与工具链的建设，推动方法在不同气候区与空间形态中的广泛应用与对比验证。

表4 户外热舒适性关键指标及应用方向

Tab.4 Key indicators and application directions of outdoor thermal comfort

维度	具体指标	应用
街区空间形态优化	建筑密度与高度组合、街网结构与朝向、通风廊道宽度与连通度、街谷高宽比、天空可视因子（SVF）	解析不同形态组合对风热环境的空间扰动，定量评估阴影网络覆盖率，识别中观尺度热舒适阈值[42]
公共空间与功能协同	高热风险空间暴露度、公共活动空间可达性、人群时空分布密度、气候适应性设施复合度	基于空间位置数据精准识别热高风险区，优化户外活动节点布局，实现人群活动轨迹与微气候环境的动态匹配[43]11-15，[44]
蓝绿基础设施网络	绿地斑块规模与布局、蓝绿空间连通度、冷岛面积占比、街区不透水面比例、地表反射率	定量评估生态网络遮蔽与长波辐射的缓解作用，统筹测算街区地表感热通量与蓄热潜能[45]，[46]4-5

资料来源：笔者自制。

表5 中观尺度下户外热舒适性评价方法

Tab.5 Evaluation methods for outdoor thermal comfort at the meso scale

类别	主要方法/技术	优点	缺点
经验/能量平衡模型	SET（Standard Effective Temperature）、UTCI（Universal Thermal Climate Index）等物理模型[47]2-11	机理清晰，可解析单因子作用	难适应环境异质性与动态变化
机器学习集成方法	贝叶斯回归与随机森林集成；XGBoost（Extreme Gradient Boosting）等梯度提升算法[43]6-8	揭示非线性关系，鲁棒性强	需大量高质量训练样本；黑箱特性较强，解释性相对较弱
混合仿真—数据驱动模型	CFD（Computational Fluid Dynamics）模拟结合空间句法[48]	再现流场并融合监测数据，分辨率高	部署与校正复杂，难大规模应用
多源动态监测与信息融合	GIS、遥感；街景图像解析[49]；传感采集[50]	数据多样，提升时空连续性与可靠性	数据预处理与融合流程复杂；分辨率匹配难度大，影响模型一致性
图注意力网络与深度学习	图注意力网络（GAT）耦合建筑BEM与微气候拓扑[51]2-8；深度卷积网络解析空间拓扑与形态因子[52]	自动学习耦合关系，泛化潜力强	结构复杂，算力需求高，解释性不足且对多源异构输入敏感

资料来源：笔者自制。

3.3 户外热舒适性的规划设计优化

在中观尺度下，户外热舒适性优化策略的研究已由早期的单一指标控制向系统化、多维度的空间肌理综合调控演进，形成了以街区建筑形态重塑、蓝绿网络格局配置、公共空间功能协同为核心的规划框架（见图5）。

街区建筑形态重塑主要通过街区走向、建筑密度、容积率及街谷高宽比的合理配置，在街区内部构建贯通的城市通风廊道并优化整体阴影网络[54-55]；蓝绿网络格局配置侧重于提升街区冷岛斑块的连通度与完整性，依托廊道效应实现冷空气向高密度建成区的输送，并协同街区不透水面比例与整体反照率的管控，从总量上削减地表蓄热潜能[56]；公共空间功能协同则强调基于高热风险空间的精准识别，优化公共活动空间的布局与时序，结合人群使用特征在热暴露节点植入气候适应性设施，实现人居活动与户外热舒适的动态契合[57]。同时，参数化设计技术通过街区形态的动态推演，有效应对昼夜与季节交替下的气候波动[46]6-11。在此基础上，多源数据融合模型与性能导向平台为策略的定量评估与路径优化提供支撑，推动中观尺度热舒适设计走向实践[58]。

研究者通过量化模拟与参数化优化技术，为差异化气候与城市肌理提供了可操作的设计范式。然而，当前工作仍需进一步加强真实场景下的动态反馈验证与长期性能监测，并将优化策略系统性地纳入规划流程，以提升其在城市规划与设计实践中的落地与可持续性。

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

4 微观尺度:个体—微环境界面

微观尺度作为连接中观建成环境与个体热感知的桥梁,其研究核心在于探讨具体的微环境空间要素对局部微气候的改变,及其与人体生理、心理响应的耦合机制。局部微气候指小尺度区域的独特气候,其温度、风、湿度等气象变量,与所在区域的整体气候条件存在细微差异;而微环境空间要素则是指直接塑造该微气候的实体要素,包括单体树木特征、遮阳设施、细部铺装材质、微水体及建筑底层界面等。微观尺度研究不再聚焦大范围的气候均值,而是强调个体所处即时空间界面的高分辨率物理参数变化。因此,该尺度下的研究逐步形成“微环境空间要素—局部微气候—个体热响应—户外热舒适”的分析链条,并为面向个体实际使用需求的精细化空间设计提供依据。

4.1 微环境空间要素与户外热舒适的生理响应

在微观尺度下,人体热平衡受微环境中高度复杂的空间异质性所驱动。建筑几何边界、植被冠层遮蔽、下垫面材质属性等空间要素,造成微空间内长短波辐射与温湿风场的不均匀分布,形成高度分化的近地平均辐射温度场,是引发生理热应激的物理前提[59]。在户外热舒适的生理量化评估方面,早期盖奇(Gagge)等人通过多部位皮肤温度加权平均,确立了皮肤温度作为热舒适核心生理指标的理论基础,并纳入美国采暖、制冷与空调工程师学会标准(ASHRAE),为后续模型提供了统一的生理量化标准[60];随着人体能量平衡的模型不断完善,揭示了生理过程与环境要素的耦合规律。在此基础上,研究者进一步探讨了短期与长期的热适应机制,以及行为—环境反馈对生理平衡的影响,使热舒适研究由静态指标向多因素耦合演进(见表6)。

总体而言,微观尺度的生理热舒适研究已高度聚焦于空间形态如何改变热环境进而影响户外热舒适性,未来需进一步强化高精度微气候模拟结果与具体景观参数的量化衔接,以提升成果在场地设计中的落地性。

4.2 微空间特征与户外热舒适的心理响应

微观尺度下的户外热舒适性感知不仅是生理机能的被动响应,更受到个体对当前微空间特征的主观认知与心理状态的深刻调节。这种心理响应形成了动态重构的“微空间特征—心理适应—热舒适”反馈机制[66]。这一转向促使研究者从单向因果分析转向交互认知模式,强调了在城市规划与设计中响应个体心理文化需求的必要性(见图6)。

表6 微观尺度下典型热舒适模型对比

Tab.6 Comparison of typical thermal comfort models at the micro scale

模型类型	代表模型	核心原理	主要参数	优势	劣势
经验生理模型	皮肤温度加权模型[61]	多部位皮肤温度加权,作为热平衡核心指标	多部位皮肤温度	简单易行,标准化强	静态评估,忽略代谢与行为动态变化
等效温度模型	生理等效温度模型(PET)[62]	将热平衡响应等效为空气温度,便于对比	辐射、风速、代谢率、服装阻抗	指标通用,可与气象数据对接	对参数敏感;过度简化部分生理与行为反馈
热舒适预测模型	预测平均投票模型(PMV)[63]	基于能量平衡与舒适投票,通过方程计算热压力	代谢率、服装阻抗、空气温度、湿度、风速、辐射温度	标准化广泛应用,模型计算便捷	忽略个体差异与动态行为
生物物理模型	UTCI-Fiala多节点模型[64]	多参数耦合实现统一评价	辐射、风速、代谢率、服装阻抗、核心体温	国际公认标准;适用于多区域对比	模型算法复杂;对输入参数敏感
生理—行为耦合模型	三维动态环境行为选择模型[65]	将生理反馈与行为决策耦合	遮荫时长、暴露路径长度、微气候参数	全面反映个体主动调节策略	高度情境依赖;模型普适性差

资料来源:笔者自制。

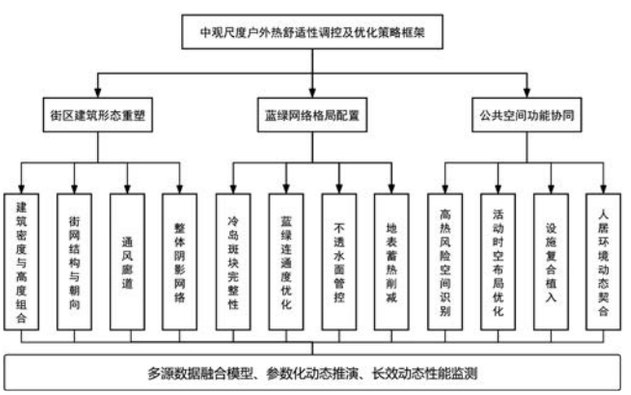


图5 中观尺度户外热舒适性调控及优化策略框架

Fig.5 Framework of meso-scale regulation and optimization strategies for outdoor thermal comfort

资料来源:笔者自绘。

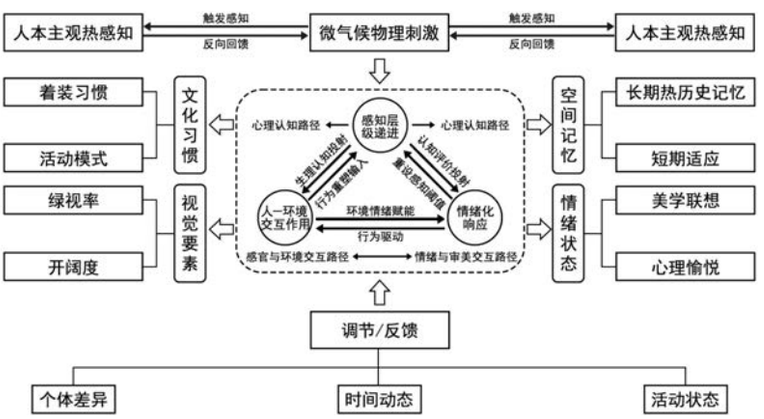


图6 心理热舒适调节机制图

Fig.6 Regulatory mechanism of psychological thermal comfort

资料来源:笔者自绘。

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

微观尺度的心理调控更依赖于人眼视角的精细化景观要素。在环境刺激层面，高品质的自然景观细部构建起积极的视觉基础，有效激发情绪愉悦感并产生“美学补偿效应”[67]；在此基础上，视觉体验进一步与微水体、休憩设施等跨感官交融，唤醒个体长期积淀的文化习惯与场所记忆，修正热感知阈值[68]。与此同时，这些精细化景观与设施的物理布局直接重塑了行人的微观活动轨迹，促使其主动采取探寻阴凉庇护等空间适应策略，借由行为反馈反向调节热状态[69-70]，为兼顾物理降温与人文体验的精细化设计提供支撑[71]。

微观尺度心理热舒适研究已突破单一物理驱动逻辑，构建起微空间要素作用于主观热评价的传导框架，推动研究向物理—心理—文化耦合的综合模型演进。但不同空间场景与文化语境下，微环境心理调控效应的共性规律与地方差异仍待厘清。后续需强化空间设计参数与心理机制的量化关联，为精细化热舒适优化提供理论支撑。

4.3 微空间户外热舒适的规划设计优化

基于微观尺度热响应机制，规划设计应摒弃单一指标的极值追求，转向多要素的非线性协同。微空间的绿化配置必须与高宽比等三维形态严格匹配。同时，需警惕物理要素间的负向协同，在高密度植被遮蔽区采用高反照率铺装会引发短波辐射加剧，导致热应激加剧[72]。

此外，需针对季节气候矛盾进行植被三维形态的精细化管控。植被的冠幅、枝下高及灌木覆盖度对局地微气候具有显著的季节差异影响。设计应灵活混植常绿与落叶乔木，并通过精准控制枝下高，以兼顾夏季林下通风排热与冬季底层防风保温。在热暴露高风险节点还可植入微水体景观，在利用相变潜热降温的同时，激发多感官交融的心理热适应[73]。

5 结论与未来展望

应对全球气候变化与改善人居环境已成为城市可持续发展的核心议题，户外热舒适性研究作为关键环节，在宏观、中观、微观3个空间尺度的探索中取得了丰硕成果。宏观尺度研究揭示了城市化、土地利用变化等因素驱动下户外热舒适性的时空分异规律，为气候适应性规划与政策调控提供了顶层设计依据。中观尺度研究聚焦建成环境，通过量化街区形态、绿化配置及材料属性与微气候的关联，为城市设计提供了可操作的优化策略。微观尺度研究则落脚于微环境空间，系统解析微空间要素通过能量交换引发生理热应激、通过空间感知调节心理热适应的双重作用机制，推动研究从建成环境形态深化至人本体验层面。这种从宏观、中观到微观的逐级深入，系统地构建了户外热舒适性研究的理论框架与方法体系。

然而，现有研究仍面临诸多挑战：(1) 跨尺度联动机制研究不足，研究多在宏观、中观或微观的单一尺度内深度探索，但对不同尺度间的相互作用与反馈机制揭示不够，导致多尺度干预策略难以协同增效。(2) 技术模型与规划设计实践存在脱节，尽管算法技术得到广泛应用，但其高昂的计算成本、庞大的数据需求及部分模型的“黑箱”特性，限制了其在常规城市规划与设计项目中的普及，成果向实用性导则的转化效率有待提高。(3) 人本动态因素整合不够深入，心理、文化、行为等因素对热感知的关键影响在更高尺度的评价中常被简化，未能充分反映真实世界中个体时空行为的复杂性与社会群体的多样性需求。(4) 研究结论的普适性与地方性平衡不足，大量成果基于特定气候区，其跨区域适用性有待验证，普适性规律与地方性特征间难以取得平衡。

针对上述问题，未来研究可从以下几个方面进一步深化：(1) 加强跨尺度研究。构建“宏观气候—中观形态—微观感知”一体化模型，以气候预测数据驱动微气候模拟，并结合人群行为与热舒适反馈，形成动态闭环的分析框架。(2) 融合智能技术优化设计。推动热舒适评价工具的轻量化与智能化，发展可解释性模型，将动态模拟嵌入规划全周期，实现兼顾普适性与地方性的优化路径。(3) 深化以人为本的综合评价。结合多源大数据与群体差异研究，将社会公平与环境正义纳入核心维度，并通过跨文化比较揭示心理与文化因素在热适应中的作用。

参考文献 References

[1] Zhang W X, Clark R, Zhou T J, et al. Weather and climate extremes hitting the globe with emerging features[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2024, 41(6): 1001-1016.

[2] Dubray M V, Stotts R, Southee R, et al. Beyond extreme: heat emergency and water insecurity for people experiencing houselessness in Phoenix, Arizona, USA during and after the heatwave of 2023[J]. Human Ecology, 2023, 51: 799-808.

[3] Shi Y J, Zhai G F, Xu L H, et al. Assessment methods of urban system resilience: from the perspective of complex adaptive system theory[J]. Cities, 2021, 112: 103141.

[4] United Nations Human Settlements Programme. World cities report 2024: cities and climate action[R]. 2024.

[5] 张莹，李怡然. 城市发展的可持续转型：趋势、挑战与关键路径[J]. 阅江学刊，2024，16（1）：71-82.
Zhang Ying, Li Yiran. Sustainable transformation of urban development: trends, challenges, and key paths[J]. Yuejiang Academic Journal, 2024, 16(1): 71-82.

[6] Fanger P O. Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering[M]. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970: 244.

[7] 张丽华，刘瀚阳. 全球气候治理嵌套式机制互动研究——以《联合国气候变化框架公约》与粮农组织为例[J]. 阅江学刊，2023，15（5）：47-57.
Zhang Lihua, Liu Hanyang. Research on the interaction of the nested regimes for global climate governance: taking UNFCCC and FAO as example[J]. Yuejiang Academic Journal, 2023, 15(5): 47-57.

[8] Shooshtarian S. Theoretical dimension of outdoor thermal comfort research[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 47: 101495.

[9] Patel S, Indraganti M, Jawarneh R N, et al. A comprehensive systematic review: impact of

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

Land Use/Land Cover (LULC) on Land Surface Temperatures (LST) and outdoor thermal comfort[J]. Building and Environment, 2024, 249: 111130.

[10] Tao Z Y, Zhu X D, Xu G Q, et al. A comparative analysis of outdoor thermal comfort indicators applied in China and other countries[J]. Sustainability, 2023, 15(22): 16029.

[11] Zhang Y C, Lin Z, Zheng Z M, et al. A review of investigation of the metabolic rate effects on human thermal comfort[J]. Energy and Buildings, 2024, 315: 114300.

[12] Wu S B, Yu W B, Chen B. Observed inequality in thermal comfort exposure and its multifaceted associations with greenspace in United States cities[J]. Landscape and Urban Planning, 2023, 233: 104701.

[13] Liu Z M, Li J, Xi T Y. A review of thermal comfort evaluation and improvement in urban outdoor spaces[J]. Buildings, 2023, 13(12): 3050.

[14] Ren Z B, Fu Y, Dong Y L, et al. Rapid urbanization and climate change significantly contribute to worsening urban human thermal comfort: a national 183-city, 26-year study in China[J]. Urban Climate, 2022, 43: 101154.

[15] Deng X W, Cao Q, Wang L C, et al. Characterizing urban densification and quantifying its effects on urban thermal environments and human thermal comfort[J]. Landscape and Urban Planning, 2023, 237: 104803.

[16] Qian J K, Zhang L L, Schlink U, et al. Impact of urban land use and anthropogenic heat on winter and summer outdoor thermal comfort in Beijing[J]. Urban Climate, 2025, 59: 102306.

[17] Shahfahad, Naikoo M W, Islam A R M T, et al. Land use/land cover change and its impact on surface urban heat island and urban thermal comfort in a metropolitan city[J]. Urban Climate, 2022, 41: 101052.

[18] Zheng Z F, Lin X L, Chen L, et al. Effects of urbanization and topography on thermal comfort during a heat wave event: a case study of Fuzhou, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 102: 105233.

[19] Emmanuel R. Thermal comfort implications of urbanization in a warm-humid city: the Colombo Metropolitan Region (CMR), Sri Lanka[J]. Building and Environment, 2005, 40(12): 1591-1601.

[20] Kim Y J, Yu S Y, Li D Y, et al. Linking landscape spatial heterogeneity to urban heat island and outdoor human thermal comfort in Tokyo: application of the outdoor thermal comfort index[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 87: 104262.

[21] Landsberg H E. The urban climate[M]. New York: Academic Press, 1981.

[22] Zheng J, Du Y X, Zhu X, et al. Mapping global human thermal comfort: spatiotemporal variability of UTCI regions under climate change[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 119: 106111.

[23] Wu F F, Yang X H, Shen Z Y. Regional and seasonal variations of outdoor thermal comfort in China from 1966 to 2016[J]. Science of the Total Environment, 2019, 665: 1003-1016.

[24] Thapa S, Rijal H B, Zaki S A. District wise evaluation of meteorological factors and outdoor thermal comfort in India using UTCI – Insight into future climatic scenario[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 116: 105840.

[25] Wu J S, Li X C, Li S, et al. Spatial heterogeneity and attribution analysis of urban thermal comfort in China from 2000 to 2020[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(9): 5683.

[26] Van Hove L W A, Jacobs C M J, Heusinkveld B G, et al. Temporal and spatial variability of urban heat island and outdoor thermal comfort within the Rotterdam agglomeration[J]. Building and Environment, 2015, 83: 91-103.

[27] Xu W, Li B Y, Liu Y Y, et al. Trends and attributions of the long-term thermal comfort across the urban-rural gradient in major Chinese cities[J]. Applied Geography, 2024, 164: 103221.

[28] Mashhoodi B, Kasraian D. Heatwave exposure inequality: An urban-rural comparison of environmental justice[J]. Applied Geography, 2024, 164: 103216.

[29] Zou B W, Fan C L, Wang M, et al. How do urban-rural and regional summer heat exposures evolve? A case study of 301 cities in China from 2000 to 2020[J]. Building and Environment, 2025, 271: 112584.

[30] Luo T Z, Chen M Z. Advancements in supervised machine learning for outdoor thermal comfort: a comprehensive systematic review of scales, applications, and data types[J]. Energy and Buildings, 2025, 329: 115255.

[31] Xu W, Li B Y, Yao L. Investigating urban and rural heat risk over long time-series: a case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in China[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 119: 106081.

[32] Deng X W, Cao Q, Wang L C, et al. Characterizing urban densification and quantifying its effects on urban thermal environments and human thermal comfort[J]. Landscape and Urban Planning, 2023, 237: 104803.

[33] Zhang J, Zhang F, Gou Z H, et al. Assessment of macroclimate and microclimate effects on outdoor thermal comfort via artificial neural network models[J]. Urban Climate, 2022, 42: 101134.

[34] Jia S Q, Wang Y H, Wong N H, et al. A hybrid framework for assessing outdoor thermal comfort in large-scale urban environments[J]. Landscape and Urban Planning, 2025, 256: 105281.

[35] Chen D S, Zhang F, Zhang M R, et al. Landscape and vegetation traits of urban green space can predict local surface temperature[J]. Science of The Total Environment, 2022, 825: 154006.

[36] Liu X, Gou Z H, Yuan C. Application of human-centric digital twins: predicting outdoor thermal comfort distribution in Singapore using multi-source data and machine learning[J]. Urban Climate, 2024, 58: 102210.

[37] Meijs S, Deelstra Y, Grinwis A, et al. Adapting with ambition: National Climate Adaptation Strategy 2016 (NAS)[R]. The Hague: Ministry of Infrastructure and the Environment, 2016.

[38] Utrecht Province. Uitvoeringsprogramma Klimaatadaptatie 2025-2028[R]. Utrecht, Netherlands: Provincie Utrecht, 2024.

[39] United Kingdom Government. National planning policy framework[R]. London: Department for Levelling Up, Housing and Communities, 2023.

[40] City of London Corporation. Thermal comfort guidelines for developments in the city of London[R]. London: City of London Corporation, 2020.

[41] City of Cambridge. Resilient Cambridge handbook: preparedness and resiliency strategies[R]. Cambridge, MA: Community Development Department, 2020.

[42] Zhao Y F, Chen Y H, Li K N. Revealing the impacts of 3D urban morphology on surface temperature considering geometry heterogeneity, component contribution, and scale effect[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 119: 106093.

[43] Xia Y, Lu W S, Peng Z Y, et al. Understanding the impacts of space design on local outdoor thermal comfort: an approach combining DepthmapX and XGBoost[J]. Energy and Buildings, 2025, 332: 115451.

[44] Zhang J L, Li Z, Hu D. Effects of urban morphology on thermal comfort at the micro-scale[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 86: 104150.

[45] Liu H Z, Lim J Y, Thet B W H, et al. Evaluating the impact of tree morphologies and planting densities on outdoor thermal comfort in tropical residential precincts in Singapore[J]. Building and Environment, 2022, 221: 109268.

[46] Gai Z Y, Yin H W, Kong F H, et al. How does shade infrastructure affect outdoor thermal comfort during hot, humid summers? Evidence from Nanjing, China[J]. Building and Environment, 2025, 267(C): 112320.

[47] Watanabe S, Nagano K, Ishii J, et al. Evaluation of outdoor thermal comfort in sunlight, building shade, and pergola shade during summer in a humid subtropical region[J]. Building and Environment, 2014, 82: 556-565.

[48] Back Y, Kumar P, Bach P M, et al. Integrating CFD-GIS modelling to refine urban heat and thermal comfort assessment[J]. Science of The

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

Total Environment, 2023, 858(1): 159729.
[49] Qin J, Tian M, Xu X S, et al. Mapping high-resolution spatio-temporal patterns of pedestrian thermal comfort at different scales using street view imagery and deep learning[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 121: 106209.
[50] Deng P, Li Z, Wang X X, et al. Comparing fixed and mobile measurement techniques for evaluating outdoor thermal comfort[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 124: 106330.
[51] Zheng L, Lu W S. Urban micro-scale street thermal comfort prediction using a 'graph attention network' model[J]. Building and Environment, 2024, 262: 111780.
[52] Kim Y J, Li D Y, Xu Y Y, et al. Heat vulnerability and street-level outdoor thermal comfort in the city of Houston: application of google street view image derived SVFs[J]. Urban Climate, 2023, 51: 101617.
[53] Kim Y J, Yu S Y, Li D Y, et al. Linking landscape spatial heterogeneity to urban heat island and outdoor human thermal comfort in Tokyo: application of the outdoor thermal comfort index[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 87: 104262.
[54] Zheng J, Ou Z X, Xiang Y F, et al. How can street interface morphology effect pedestrian thermal comfort: a case study of the old town of Changsha, China[J]. Urban Climate, 2025, 60: 102341.
[55] Haeri T, Hassan N, Ghaffarianhoseini A. Evaluation of microclimate mitigation strategies in a heterogenous street canyon in Kuala Lumpur from outdoor thermal comfort perspective using Envi-met[J]. Urban Climate, 2023, 52: 101719.
[56] Lai D Y, Liu W Y, Gan T T, et al. A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces[J]. Science of the Total Environment, 2019, 661: 337-353.
[57] Nicholson S, Nikolopoulou M, Watkins R, et al. Data driven design for urban street shading: validation and application of ladybug tools as a design tool for outdoor thermal comfort[J]. Urban Climate, 2024, 56: 102041.
[58] Arrar H F, Kaoula D, Santamouris M, et al. Coupling of different nature base solutions for pedestrian thermal comfort in a Mediterranean climate[J]. Building and Environment, 2024, 256: 111480.
[59] Coccolo S, Kämpf J, Scartezzini J L, et al. Outdoor human comfort and thermal stress: a comprehensive review on models and standards[J]. Urban Climate, 2016, 18: 33-57.
[60] Gagge A P, Stolwijk J A J, Hardy J D. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures[J]. Environmental Research, 1967, 1(1): 1-20.
[61] Luo M X, Guo F, Tang H Q, et al. A systematic review of the influence of physiological factors on outdoor thermal comfort[J]. Human Settlements and Sustainability, 2025, 1(1): 27-40.
[62] Cohen P, Potchter O, Matzarakis A. Human thermal perception of Coastal Mediterranean outdoor urban environments[J]. Applied Geography, 2013, 37: 1-10.
[63] Lam C K C, Cui S H, Liu J R, et al. Influence of acclimatization and short-term thermal history on outdoor thermal comfort in subtropical South China[J]. Energy and Buildings, 2021, 231: 110541.
[64] Joshi A, Twidwell B, Park M, et al. Comparative analysis of thermoregulation models to assess heat strain in moderate to extreme heat[J]. Journal of Thermal Biology, 2025, 127: 104035.
[65] Kim S W, Brown R D. Pedestrians' behavior based on outdoor thermal comfort and micro-scale thermal environments, Austin, TX[J]. Science of the Total Environment, 2022, 808: 152143.
[66] Klemm W, Heusinkveld B G, Lenzholzer S, et al. Psychological and physical impact of urban green spaces on outdoor thermal comfort during summertime in the Netherlands[J]. Building and Environment, 2015, 83: 120-128.
[67] Xin B, Zhu C F, Geng J J, et al. Emotional perceptions of thermal comfort for people exposed to green spaces characterized using streetscapes in urban parks[J]. Land, 2024, 13(9): 1515.
[68] Lam C K C, Gao Y P, Yang H Y, et al. Interactive effect between long-term and short-term thermal history on outdoor thermal comfort: comparison between Guangzhou, Zhuhai and Melbourne[J]. Science of The Total Environment, 2021, 760: 144141.
[69] Lehnert M, Geletič J, Kopp J, et al. Comparison between mental mapping and land surface temperature in two Czech cities: a new perspective on indication of locations prone to heat stress[J]. Building and Environment, 2021, 203: 108090.
[70] Lehnert M, Pánek J, Kopp J, et al. Thermal comfort in urban areas on hot summer days and its improvement through participatory mapping: a case study of two Central European cities[J]. Landscape and Urban Planning, 2023, 233: 104713.
[71] Liu Y, Yu Z Y, Song Y F, et al. Psychological influence of sky view factor and green view index on daytime thermal comfort of pedestrians in Shanghai[J]. Urban Climate, 2024, 56: 102014.
[72] Majidi P, Nasrollahi N. Microclimate modeling of urban residential courtyard geometry and outdoor thermal comfort in a Mediterranean climate using multiple machine-learning approaches[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2026, 81: 107916.
[73] Li T, Gao Q, Wang Y, et al. Effect of vegetation morphological characteristics on microclimate and outdoor thermal comfort in residential areas: A case study[J]. Energy and Buildings, 2026, 367: 117749.

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.