

# 中国城市街道的热舒适研究框架：地域差异、指标阈值和影响因素

Research Framework for Thermal Comfort of Urban Street in China: Geographical Differences, Indicator Thresholds and Influencing Factors

余洋<sup>1\*</sup> 曾庆蕾<sup>1</sup> 陆书铎<sup>2</sup>  
YU Yang<sup>1</sup> ZENG Qinglei<sup>1</sup> LU Shuduo<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学建筑学院, 哈尔滨 150090; 2. 爱丁堡大学, 爱丁堡 EH8 9YL)  
(1. School of Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang, China, 150090; 2. University of Edinburgh, Edinburgh, British, EH8 9YL)

文章编号: 1000-0283(2023)08-0083-09  
DOI: 10.12193/j.laing.2023.08.0083.010  
中图分类号: TU986  
文献标志码: A  
收稿日期: 2023-04-28  
修回日期: 2023-06-26

## 摘要

全球气候变化形势严峻, 街道成为改善城市气候环境不可缺少的要素, 街道的热舒适性品质对人群健康和城市建设发挥着重要的作用。以中国城市街道热舒适性为对象, 基于中国知网和 Web of Science 的检索数据源, 通过文献回溯概述相关研究的热点主题、重点方向、研究内涵和研究方法, 分析地域影响下的热舒适指标阈值差异。基于中国建筑气候区划, 进一步探讨影响街道热舒适的微气候因素、个体因素和空间因素, 尝试表述中国城市街道热舒适的研究框架, 提出建构中国本土的街道热舒适研究体系与评价体系, 聚焦空间环境热舒适的关键科学问题, 以及促进街道热舒适研究成果向设计实践转化, 对积极探索城市宜居环境建设的规划设计具有现实意义。

## 关键词

气候适应; 热舒适; 城市街道; 空间环境; 指标评价

## Abstract

The global climate change situation is complex, and streets are an indispensable means of improving the urban climate, with the thermal comfort qualities of streets playing a vital role in public health and the construction of cities. The research focuses on the thermal comfort of urban streets in China, based on the literature sources from China National Knowledge Infrastructure and the Web of Science. The literature review provides an overview of the relevant studies' hot topics, key directions, research content, and methods. It analyses the differences in thermal comfort indicator thresholds under geographical influence. Based on the architectural climate zoning of China, the article further explores the microclimatic, individual, and spatial factors that influence thermal comfort in streets in an attempt to formulate a research framework for thermal comfort in Chinese urban streets. In this paper, we propose the construction of a local Chinese street thermal comfort research system and evaluation system, focusing on the critical scientific issues of spatial environmental thermal comfort, thereby promoting the transformation of street thermal comfort research results into design practice, which is of practical significance for actively exploring the planning and design of urban livable environment construction.

## Keywords

climate adaptation; thermal comfort; urban street; spatial environment; evaluation of indicators

## 余洋

1976年生/女/黑龙江哈尔滨人/博士/副教授、博士生导师/研究方向为风景园林规划与设计、风景园林理论与历史、环境与健康

## 曾庆蕾

1998年生/女/山东日照人/在读硕士研究生/研究方向为风景园林规划与设计、环境与健康

## 陆书铎

2003年生/男/黑龙江哈尔滨人/在读本科生/研究方向为风景园林规划与设计

2021年“十四五”规划和2035年远景目标纲要提出<sup>[1]</sup>, 中国城市更新需要注重城市品质, 创造舒适的人居环境。然而, 城市夏

季极端高温与冬季极端低温频发, 使得人们的热舒适水平急剧降低, 气候变化导致的城市热环境问题亟需找到解决途径。因此, 在

## 基金项目:

国家自然科学基金面上项目“可持续运维导向下的冰上运动体育馆设计指标评价方法及关键技术研究”(编号: 51978191)



图1 国内文献发表年代分布和主要议题  
Fig. 1 Distribution of publication years and main issues of domestic literature

城市规划和风景园林设计中, 以气候适应为前提营造适宜的城市人居环境, 是城市面向健康发展的核心内容之一。

作为城市空间的骨架, 街道是提升城市人居环境健康品质的主要空间类型。以健康为导向的街道, 成为健康城市背景下的街道发展新模式。改善街道物理环境、提升街道热舒适水平是促进健康城市和健康街道的重要途径<sup>[2]</sup>。人们的热舒适感知和评价是地域气候、个体差异、空间环境的综合作用<sup>[3]</sup>。由于中国地域气候环境差异显著, 因此厘清基于中国气候特征的热舒适研究成果, 有助于构建中国本土气候特征的城市街道热舒适研究框架, 为相关研究提供理论参考, 为城市规划和街道设计提供支撑。

## 1 城市街道热舒适研究概况

### 1.1 国内文献统计分析

利用中国知网数据库, 对“热舒适”“街道”等关键词进行高级精确检索, 共检索219条文献记录。从相关标题、摘要、文献和文章中筛查出与“城市街道”“物理环

境”“热舒适”相关度较高的文献, 共计167篇。从发表时间、作者、发文机构、基金资助、关键词等方面对文献进行分析。

(1) 发表时间。2007-2013年, 文献发表呈平稳状态, 学者主要关注城市形态与城市微气候的关联性<sup>[4]</sup>, 以气候适应的视角探索建筑和公共空间的设计策略。从2014年开始, “热环境”“热舒适”成为关键词并获得持续关注, 空间类型逐渐丰富多元。以夏热冬冷和夏热冬暖地区为例, 包括生活性街道空间、步行空间、小街坊空间和骑楼街空间等。2015年, 严寒地区的研究逐渐开始, 主要探析街道热舒适与空间形态的关联<sup>[5]</sup>。同期, 寒冷地区仍以多元素综合的气候适应性设计为主。2014-2022年, 文献发表数量逐年上升, 至2016年出现第一次高峰期。研究对象由街区特征转向街道的断面特征及空间要素, 空间尺度更加精细<sup>[6]</sup>。2020年文献数量最多, 在健康城市与低碳节能的倡导下, 街道热舒适的实践迈向健康和能耗方向<sup>[2]</sup>。近三年, 研究围绕体力活动水平与热舒适的相关性, 探索提升人群活动水平与健康的空间

策略<sup>[7]</sup> (图1)。

(2) 作者。发文量较多的作者分别是同济大学的刘滨谊(7篇)、同济大学的王一和彭旭路(各4篇)、西安建筑科技大学的董芦笛和樊亚妮(各3篇)。5位活跃作者、合作者和团队成员在国内热舒适研究的不同领域上, 建立起夯实的研究基础, 如刘滨谊团队从小气候角度对热舒适研究进行综述, 研究适宜夏热冬冷地区气候的街道要素构成<sup>[3]</sup>。其他团队的研究者, 如包志毅团队<sup>[8]</sup>从街谷断面空间要素的角度进行热舒适研究分析, 冷红团队<sup>[9]</sup>从城市规划领域探索“冬季友好”的宜居寒地城市设计策略, 李保峰团队<sup>[6]</sup>以建筑学为背景, 提出适应夏热冬冷地区气候的街区尺度建筑设计策略。

(3) 发文机构。发文机构排名靠前的单位是哈尔滨工业大学(17篇)、西安建筑科技大学(17篇)、东南大学(12篇)、同济大学(11篇)和华中理工大学(8篇)。哈尔滨工业大学围绕严寒地区气候特点, 研究适寒性临街建筑布局及绿化; 西安建筑科技大学的研究以夏季热舒适为主, 对不同林阴街谷空间

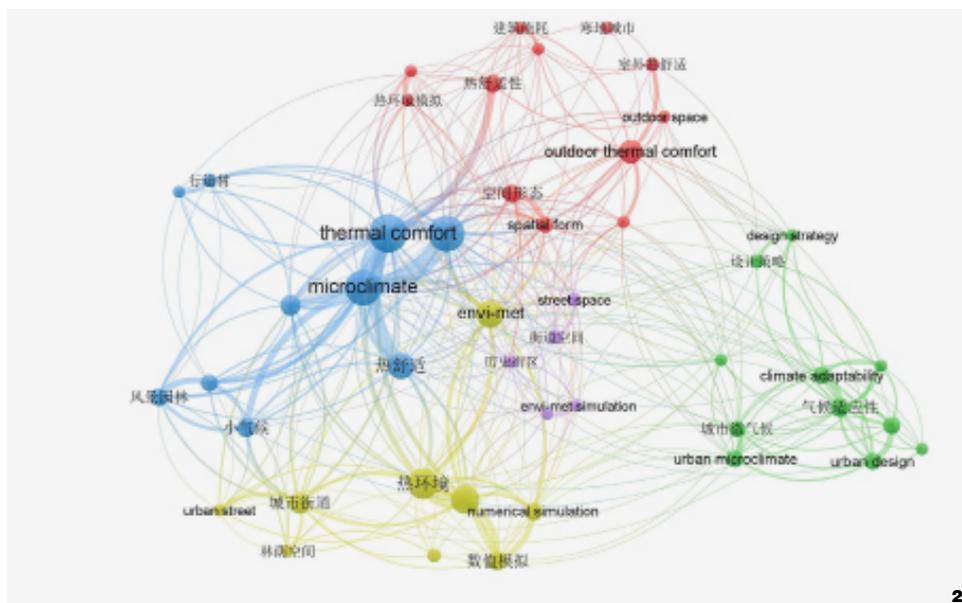
类型进行细致研究;东南大学采用自动寻优的新技术新方法,探索气候适应性的街区空间布局;同济大学为风景园林小气候及热舒适文献分析作出较大贡献;华南理工大学针对湿热地区夏季热舒适,从城市形态、空间布局到绿化类型、骑楼空间尺度进行多维度的研究探索。上述机构分别位于中国东北、西北、华东、华南地区,研究议题体现出鲜明的地域特色。

(4) 基金资助、主题词。基金项目以国家级项目为主,国家自然科学基金66项,国家重点研发计划13项,可以看出国家对该领域大力支持的态度。文献主题词的分析体现出街道热舒适与微气候紧密相关,热环境和风环境是微气候研究的重点。同时,国内街道热舒适的研究注重应用与实践,针对宏观城市形态、中观街区形态及微观街谷空间形态,提出建成环境的街道优化策略(图2)。

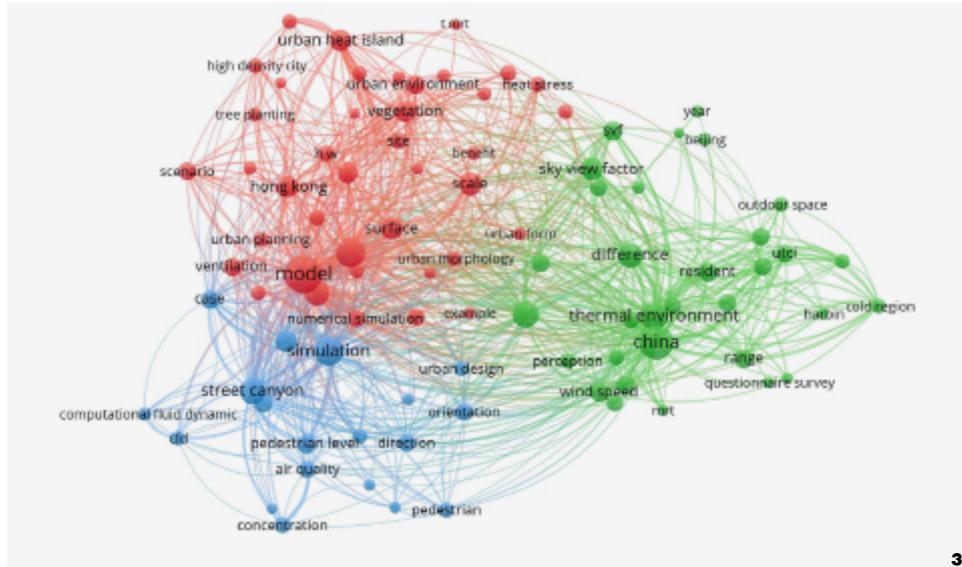
## 1.2 国际文献统计分析

以Web of Science (WoS) 引文数据库中的SCI核心合集文献数据为基础,检索主题词为“thermal comfort” AND “street”,国家及地区选择中国,时间跨度为所有年份,共搜集到258篇相关论文。论文发表从2012年始增幅较大,到2017年,发文量增加3倍,到2022年发文量增加10倍。从2012年伊始,国际文献数量逐年上升,2020-2022年达到波峰。在国际化学术平台中,中国的研究呈现出持续发表的态势,不断累积的研究基础促发了近期密集的学术成果,也呈现出国内学者广泛进行国际学术分享的态势。

根据主题词聚类统计分析,中国街道热舒适研究的国际文献热点主要集中在城市、人、温度、热感知、树、小气候、季节等方面,研究范围以城市为主。微气候因素围绕



2



3

图2 国内文献主题词统计  
Fig. 2 Statistics of domestic literature subject words

图3 国际文献主题词统计  
Fig. 3 Statistics of international literature subject words

温度、风和湿度,从高温和低温两个方面进行讨论,关注季节的影响;空间要素主要是树木对热舒适的影响。在研究方法上,计算机模拟提供了大量的帮助。同时,针对成人、老人、女性的细分研究,提供了新的思路与方向(图3)。

国内外文献体现出街道热舒适研究从优化物理环境、减缓城市热岛的微气候方向,拓展至提升人群热舒适水平和人群活动的健康促进,街道环境与健康的关联成为持续性的热点主题。重点研究方向包括不同气候分区的热环境舒适性评价<sup>[9-11]</sup>、空间设计要

素(绿地系统、建筑布局<sup>[12]</sup>)等对室外热环境、热舒适的影响,以及人群行为与热舒适关联机理<sup>[7,13]</sup>。随着研究的深入,热舒适评价指标和评价体系不断完善和调整,纳入了心理因素、健康因素等内容。同时,热舒适日益受到城市规划的重视,学者们致力于加强理论对实践的指导,探索街道空间的设计途径。

## 2 城市街道热舒适的研究方法

在美国供暖制冷空调工程师学会标准(ASHRAE Standard 55-1992)<sup>[14]</sup>中,热舒适被定义为人们对热环境表示满意的意识状态。关于热舒适的内涵理解一直存在两种观点:一种认为热舒适等价于热感觉,处于热中性附近(即热舒适区内),人就会感觉到热舒适,支持这一观点的有Gagge<sup>[15]</sup>、Fanger<sup>[16]</sup>、刘加平<sup>[17]</sup>、林波荣<sup>[18]</sup>等;另一种是热舒适与热感觉不同,热舒适只存在于某些动态的过程中,而不存在于稳态环境中,持有这些观点的有Hensel<sup>[19]</sup>、赵荣义<sup>[20]</sup>、董芦笛<sup>[21]</sup>、刘滨谊<sup>[3]</sup>等。两种观点产生了不同的研究方法和

数据采集,对研究结果的阐释角度和论述重点也存在差异。

### 2.1 研究方法和测量数据

热舒适的研究方法主要为数据实测与软件模拟。数据实测是在真实城市街道布置测量点,借助微气候测量仪器,定点测量气象数据,利用Rayman软件计算热舒适数据。环境参数以空气温度、相对湿度、风速和太阳辐射4类为主,根据评价指标差异,还可包括衣物热阻及不同活动下的人体代谢量两项个体参数<sup>[3,22]</sup>。数据实测方法具有数据多样性高、贴合实际情况等优点。软件模拟方法是借助计算机程序ENVI-met、RHINO&Grasshopper及插件、SOLWEIG等软件,建立虚拟城市街道模型,计算热舒适值的方法<sup>[23-24]</sup>,具有操作效率高、虚拟模型结果趋于最优目标的优点。

热舒适的测量方式分为主观和客观两种。主观测量指调查问卷和电话访谈,热感觉投票(Thermal Sensation Vote, TSV)和热舒适投票(Thermal Comfort Vote, TCV)是核心数

据。客观测量是在热平衡模型基础上,遵从人体热量平衡原理<sup>[25]</sup>,采集生理等效温度(Physiological Equivalent Temperature, PET)、标准有效温度(Standard Effective Temperature, SET)、通用热气候指数(Universal Thermal Climate Index, UTCI)、预测平均投票(Predicted Mean Vote, PMV)及修正模型PMV-PPD,上述4种测量数据被普遍应用于室外热舒适研究中<sup>[26]</sup>。

### 2.2 地域影响下的热舒适差异

热舒适受到地域差异的较大影响,大量研究通过问卷调查分析不同地区的热感觉投票与PET等热舒适指标,探寻适宜当地气候的热舒适标准,明确不同地区城市空间的实际热中性温度和热舒适范围(表1)。以中国为例,严寒地区四季温差巨大,人的热舒适阈值较官方尺度更加宽泛,对极冷与极热的耐受度较高,对极热感受的阈值比官方尺度高14℃,对极冷感受的阈值比官方尺度低23℃。寒冷地区热舒适阈值与官方尺度相近。在夏热冬暖地区,全年温差较小,平均温度较高,热舒适中性阈值比官

表1 中国不同地区PET评价尺度<sup>[27-28]</sup>  
Tab. 1 Evaluation scale of PET in different regions of China

热感觉投票 Thermal sensation vote	官方PET尺度 /℃ Official PET scale	严寒地区(哈尔滨)PET 尺度/℃ PET scale in severe cold zone (Harbin)	寒冷地区(天津)PET 尺度/℃ PET scale in cold zone (Tianjin)	夏热冬冷地区(南京)PET 尺度/℃ PET scale in hot summer and cold winter zone (Nanjing)	夏热冬暖地区(香港)PET 尺度/℃ PET scale in hot summer and warm winter zone (Hongkong)
极热	—	—	>40	—	>41
十分热	>41	>55	(35, 40]	(41, 48]	(37, 41]
热	(35, 41]	(40, 55]	(29, 35]	(34, 41]	(33, 37]
温暖	(23, 35]	(25, 40]	(23, 29]	(27, 34]	(29, 33]
舒适	(18, 23]	(10, 25]	(18, 23]	(14, 27]	(25, 29]
凉爽	(8, 18]	(-4, 10]	(13, 18]	(8, 14]	(21, 25]
冷	[4, 8]	[-19, -4]	(8, 13]	(2, 8]	(17, 21]
十分冷	<4	<-19	[4, 8]	[-5, 2]	[13, 17]
极冷	—	—	<4	—	<13

注:以PET官方7个分级为基准,对各地区的PET分级进行了汇总,部分研究细化分为9个分级,表中“—”表示7个分级中的“极热”“极冷”的热感觉标度无对应温度区间。

方尺度高7~8℃, 耐寒性较弱, 阈值高于官方尺度10℃。

### 3 城市街道热舒适的影响因素

城市街道的热舒适是微气候、个人和空间的综合叠加。为了清晰表述具有中国本土气候特征的街道热舒适研究, 文章基于中国建筑气候区划, 从上述三个维度进行讨论。由于温和地区全年气候较为适宜, 热舒适问题不明显且研究文献量较少, 故不在本文中详细评述。

#### 3.1 城市街道热舒适的微气候因素

城市街道热舒适的微气候因素主要为温度、湿度、风速和太阳辐射<sup>[3,22]</sup>, 在不同地区甚至同一地区的不同季节, 4类因素的影响排序不同(表2)。

严寒地区四季分明, 差异显著。以哈尔滨市为例, 居民适应了寒冷的气候, 冬季的热感觉是“较冷”和“适中”, 微气候因素对舒适度影响的排序为: 温度、风速、太阳辐射、相对湿度<sup>[27]</sup>。在夏季, 空气温度和太阳辐射是影响街道热感觉的主要物理因素。春

秋两季(过渡季节)的微气候影响因素主要为风速、空气温度及空气相对湿度, 其中风速与空气温度是影响微气候热舒适最关键的两个因素, 空气相对湿度对微气候热舒适的影响非常微弱<sup>[5]</sup>。总体来说, 温度和风速是严寒地区全季节热舒适的两项首要影响因素。

在寒冷地区, 冬季的太阳辐射对室外环境的热感觉影响最大(正相关), 相对湿度次之(正相关), 风速最弱(负相关)<sup>[13]</sup>。对于夏季室外热环境, PET和空气温度显著正相关, PET和相对湿度显著负相关, PET和瞬时风速显著负相关<sup>[29]</sup>。由此看出, 在寒冷地区, 相对湿度在冬夏季节对热舒适的影响截然相反, 在冬季相对湿度越高, 热舒适水平越高; 而在夏季, 相对湿度越高, 热舒适水平越低, 太阳辐射、空气温度与热舒适的相关性在冬夏表现为一致的正相关, 风速表现为一致的负相关。

夏热冬冷地区的热舒适研究表明, 影响夏季PET的小气候要素是太阳辐射和空气温度, 影响TSV和TCV的小气候要素是空气温度和相对湿度<sup>[17]</sup>。在秋冬两季, 温度、太阳辐射和湿度均与人体热感觉呈正相关关系, 风

速与人体的热感觉呈负相关性, 受访者对于微气候因素影响舒适度重要性的排序均为: 温度、风速、太阳辐射、相对湿度<sup>[30]</sup>。人体热感在不同季节受到不同气象因素的影响, 居民在冬季喜欢强烈的太阳辐射, 但在夏季喜欢较快的风速<sup>[31]</sup>。

夏热冬暖地区年平均温度为21℃, 年平均相对湿度78%, 引发夏季人群不舒适的因素主要是太阳辐射和气温, 其次是风速和空气湿度<sup>[32]</sup>。影响居民热感觉变化的环境参数, 在兼具遮阳与开敞空间的新建高层居住区是空气温度, 在以建筑和广场为主导的商业区是太阳辐射<sup>[9]</sup>。春秋两季(过渡季)是夏热冬暖地区一年中时间长度仅次于夏季的重要季节, 气候相对舒适, 空气温度是居民最敏感的热环境参数, 其次是太阳辐射<sup>[10]</sup>。

#### 3.2 城市街道热舒适的个体因素

热舒适的个体因素包括个体特征、个体类型和个体行为三个方面(图4)。在个体特征方面, 生理条件及心理预期对热舒适感受的影响可能超越实际微气候因素的影响, 情绪状况、期望、偏好等心理因素对户外舒适

表2 中国各地区热舒适微气候影响因素  
Tab. 2 Microclimate factor of thermal comfort in various regions of China

建筑气候区 Architectural climate zoning	季节 Season	微气候影响因素 (影响程度越大颜色越深) Microclimate factor			
		温度	相对湿度	风速	太阳辐射
严寒地区	冬季	正相关		负相关	正相关
	夏季	负相关			负相关
	过渡季节				
寒冷地区	冬季		正相关	负相关	正相关
	夏季	正相关	负相关	负相关	
夏热冬冷地区	夏季	负相关	正相关	正相关	负相关
	秋冬季	正相关	正相关	负相关	正相关
夏热冬暖地区	夏季	负相关		正相关	
	过渡季节				

注: 橙色越深表示该因素影响程度越大, 白色表示影响程度不明确, 空格表示该影响因素的正负相关性不明确。



微气候影响因素	空间影响因素	研究结论
温度	空间属性	
	街道朝向	新加坡的热舒适度研究，西北-东南方向的街道在下午比东北-西南街道热舒适压力更大
	高宽比	在严寒地区，一定范围内高宽比小的街道冬季热环境要优于高宽比大的街道。通过模拟结果发现在广州街道高宽比对热环境的改善作用微弱
	天空可视因子(SVF)	天空可视因子(SVF)与PET表现出很强的相关性，SVF对生理等效温度和热感觉投票有显著的正效应
	建筑界面	
	建筑高度	建筑环境产生的阴影对于提高城市的热舒适度和城市宜居性的重要性较强，建筑悬挑空间高大，提高人体热舒适度
	建筑立面连续性	在相同街道朝向和高宽比条件下，立面连续性被打断的门洞口附近空气温度略高于同一街道内其他测点
	建筑容积率	当高层建筑容积率超过3.0时，平均风速比低于20%，而平均一次太阳辐射比低于6%
	绿化界面	
	植被覆盖率	街道峡谷内10%的树冠覆盖率降低街道平均T-air约1 K。
植被空间类型	乔木所占比例越高，其对环境的冷却效果越强，影响范围越大。	
植物单体	以杭州11种常见乔木植物为研究对象，表明双属结构特征对植物降温微气候和不舒适指数有着重要的调节作用。	
下垫面		
材料反射率	反射率与下垫面的颜色、光滑程度和使用情况有关。湿泥土、铺面砖和沥青三者的光透程度依次降低，热舒适度依次降低，但单纯提高反射率不一定能改善室外热环境。	
材料透水率	建议选择导热系数小、吸收系数小、反射率高的材质及多透水性生态型，透水型地面可有效改善室外热舒适。	

图4 个体影响因素分析  
Fig. 4 Analysis of individual factors

图5 街道空间影响因素分析  
Fig. 5 Analysis of street space factors

度影响显著<sup>[33]</sup>。严寒地区的本地游客和外地游客的冬季热舒适存在差异，本地游客更期望于升高温度和增强阳光辐射，而当热环境变暖时，偏离了外地游客体验寒地旅游的心理预期，舒适度和满意度均明显下滑<sup>[34]</sup>。除生理和心理外，文化也是影响热舒适的成因，如巴基斯坦学生因为饮食习惯和服装不同，比中国学生更耐受西安的寒冷条件<sup>[35]</sup>；墨尔本游客在热感知方面存在文化差异；亚洲游客穿衣较多，而女性更喜欢遮盖防晒以保持皮肤白皙<sup>[36]</sup>。

在个体类型方面，老年人热感觉中性范围较混合年龄层更窄，对偏凉感觉更舒适，对室外热环境敏感度明显高于混合年龄层<sup>[11]</sup>。夏热冬冷地区的儿童对气象因素的敏感性低于看护者，对寒冷环境的耐受性更好，太阳辐射和气温是影响儿童热感觉的主要气象因子<sup>[37]</sup>。研究探讨了在严寒和寒冷地区，住宅空间或住区广场热舒适与老年人行为之间的关系，关于街道空间热舒适与特定人群的关联尚需进一步研究。

在个体行为方面，室外停留时长及行为强度可以影响热舒适感受。夏热冬冷地区的春季、秋季和冬季，室外较长时间的适应提高了人群对热环境的忍耐程度<sup>[38]</sup>。活动水平也影响热舒适，当人体在夏季接近静止状态时，热舒适指标与室外环境接近，当代谢率达到跑步水平时，人体的感觉温度比实际空气温度高10℃以上，人将感觉“热、很不舒适”<sup>[39]</sup>。

### 3.3 城市街道热舒适的空间因素

街道空间由建筑界面、绿化界面和下垫面组成，同时街道朝向、高宽比以及天空可视因子表征出街道的空间属性(图5)，上述因素如何影响街道热舒适的量化研究已趋

于成熟。

建筑界面的研究主要与建筑高度、建筑立面连续性及建筑密度、容积率等相关。在夏热冬暖地区，建筑物的围合可以使人行道的平均PET值下降达 $6.7^{\circ}\text{C}$ <sup>[40]</sup>。在夏热冬冷地区，建筑悬挑空间会影响冬季太阳直射，低温阴影区影响了人体热舒适<sup>[41]</sup>。在严寒地区，多层建筑和高层建筑的容积率变化，对改善冬季室外热舒适的影响存在差异，土地开发需要从气候规划的角度进行分析和考虑<sup>[42]</sup>。在夏热冬暖地区，适宜的 building 密度 (0.45 ~ 0.6) 可以促进室外空间因遮阴变得更为舒适，但建筑密度的提升将增强热岛效应<sup>[43]</sup>。

在绿化界面的研究中，探讨植物改善热舒适的成果数量众多，植被覆盖率、植被组合方式、植物种类、树冠直径均对街道热舒适产生影响。在宏观层面，树冠覆盖率高的街道与没有树阴的街道相比，下午气温和平均辐射温度分别降低 $3.3^{\circ}\text{C}$ 和 $13.9^{\circ}\text{C}$ <sup>[44]</sup>。在中观层面，夏热冬冷地区绿化组合对热环境有直接影响，当乔灌比为7:3时，空气温度的最大冷却值为 $0.18^{\circ}\text{C}$ ，平均辐射温度最大冷却值为 $12.29^{\circ}\text{C}$ ，对PMV最大下降幅度为0.65；当乔灌比为4:6时，带来的冷却效益最大<sup>[45]</sup>。在微观层面，大量研究针对街道的植物细节进行讨论，如行道树种差异、叶片、株距等，内容复杂且地域特点明显。包志毅等研究表明乔木状竹类植物日平均降温范围在 $1.5 \sim 2.6^{\circ}\text{C}$ ，日平均增湿范围为 $3.0\% \sim 7.9\%$ ，具有明显的降温增湿效应<sup>[46]</sup>。三维空间的量化指标绿景指数 (GVI) 对生理等效温度也有显著的正向影响，但对热感觉投票没有影响。

下垫面材料的反射率和透水率是影响街道空间热舒适的重要因素。反射率与下垫面

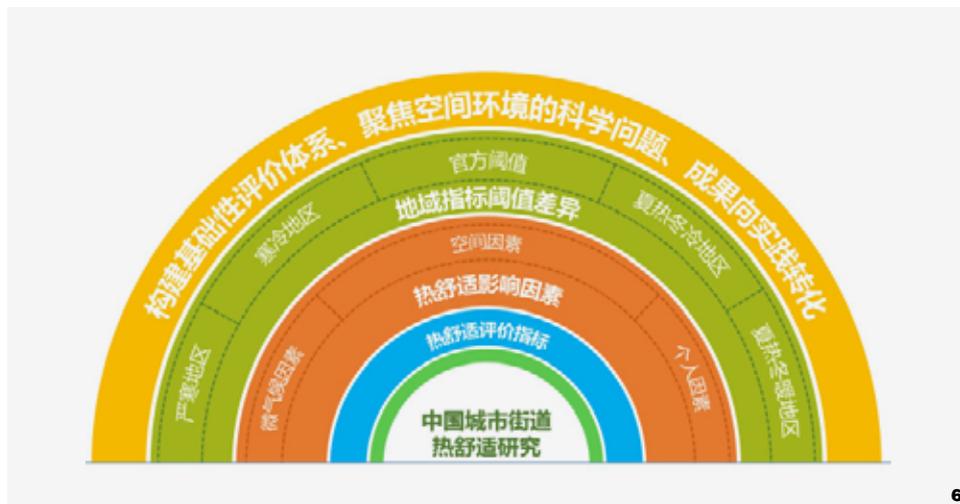


图6 中国城市街道热舒适研究框架  
Fig. 6 A framework for studying thermal comfort in Chinese urban streets

的颜色、光滑程度和使用情况有关，刘加平等<sup>[47]</sup>研究下垫面对夏季城市局部地区微气候的影响机制，发现草地、混凝土、铺面砖、沥青的热舒适依次降低。林波荣<sup>[18]</sup>指出在地面蒸发率增加 $0.05 \text{ g} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1})$ 时，地面温度下降约 $18.5^{\circ}\text{C}$ ； $1.5 \text{ m}$ 高处气温平均下降约 $2.3^{\circ}\text{C}$ ， $1.5 \text{ m}$ 高处的平均辐射温度MRT下降约 $7^{\circ}\text{C}$ 。Huang<sup>[48]</sup>发现下垫面性质对冬季地表温度有显著影响，低反射率的塑胶地面比大理石地面温度高 $4.5^{\circ}\text{C}$ 。严寒地区针对特色的冰雪下垫面环境开展研究，发现积雪覆盖率提升，平均气温降低，但需进一步量化研究。

关于街道朝向、高宽比及天空可视因子 (SVF) 等空间属性的研究成为热点。多数研究支持街道高宽比与热环境二者的关联性，但在影响规律及适宜值域的量化成果上存在差异。严寒地区的街道在朝向相同的情况下，高宽比为0.9在夏季表现出最佳的热舒适，高宽比为0.3在冬季的热舒适最优<sup>[49]</sup>。在夏热冬暖地区，西北—东南方向的街道在下午比东北—西南街道热舒适压力更大，高宽比为3被认为是室外热舒适度的阈值<sup>[50]</sup>。

邬尚霖和孙一民<sup>[51]</sup>通过模拟发现街谷高宽比对热环境的改善作用微弱。与高宽比不同，SVF与PET表现出很强的相关性，在改善热舒适效应方面，SVF对生理等效温度和热感觉投票有显著的正效应<sup>[52]</sup>。He<sup>[53]</sup>分析结果表明，阴影程度有助于热感知分布的变化。与中度阴影区域 ( $0.3 < \text{SVF} < 0.3$ ) 和轻度阴影区域 ( $\text{SVF} > 0.5$ ) 相比，高度阴影区域 ( $\text{SVF} < 0.5$ ) 通常在夏季表现出较少的炎热可能，冬季可忍受更长的寒冷不适，反之亦然。夏热冬暖地区，天空可视因子每增加74%，夏季UTCI值降低 $10.0^{\circ}\text{C}$ <sup>[54]</sup>。寒冷地区，SVF增加0.1会导致冬季白天每小时地表温度下降 $0.06 \sim 0.49^{\circ}\text{C}$ <sup>[55]</sup>。SVF在研究中已被广泛使用，大量学者致力于借助SVF研究太阳辐射量和室外热舒适环境的确切指标。

#### 4 框架构建和展望

本文立足城市街道尺度，以中国城市街道热舒适作为研究对象，在厘清相关研究脉络的基础上，尝试提出一个中国城市街道热舒适的研究框架，重点关注严寒地区、寒冷

地区、夏热冬冷地区、夏热冬暖地区, 内容包括地域差异、指标阈值和影响因素(图6)。地域差异是热舒适评价丰富性和不确定性的基础, 基于地域特性和文化习俗的街道热舒适研究, 在研究和实践的过程中出现了明显的指标阈值差异, 因此考量和评估城市街道环境的热舒适品质较难采用统一的标准, 如何调整和明确符合地域气候条件的评价指标是研究的关键。综合来看, 温度成为各地区影响热舒适的首要因素, 太阳辐射次之, 相对湿度的影响程度最弱。同时, 以个体为核心的研究热点呈现出多元化的态势, 促使街道设计更加人性化。大数据技术可以精准识别和评估街道空间的特征, 量化分析单一空间因素和多因素综合对热舒适的影响, 极大扩展了街道空间研究的范畴。面向中国城市的未来发展, 中国的街道热舒适研究需要尝试思考三个趋势。

(1) 建构中国本土的街道热舒适研究体系与评价体系。热舒适评价受到地域气候条件与当地人群习性制约, 中国地域面积广阔, 不仅区别于国外地理气候, 国内不同地区气候及人群适应性也有所差异。因此立足本土气候特征和文化特征, 探索适合中国的研究路径, 形成多内涵、全方面的指标评价体系。学者可在此基础上筛选本地特征的评价指标, 拓展地域性研究。

(2) 空间环境是热舒适研究中的关键科学问题。热舒适的量化评估是开展空间研究的科学基础和前置工具, 空间指标优化既是机理研究的深入探索, 也是热舒适研究的直接途径。目前, 空间研究主要通过分析微气候因素探讨热舒适, 直接评价热舒适的空间指标尚未明确, 而空间环境的热舒适对于步入存量规划和城市更新阶段的中国更具现实意义。

(3) 街道热舒适研究向实践转化是促进人类健康、创造宜居城市的有效途径。以研究成果为基础制定城市街道热舒适评价标准, 将其纳入城市政策的顶层设计, 编制城市热舒适的指南、导则和规范, 内容涵盖热舒适环境的规划、设计、营建、管护等各个方面。既有成果多聚焦于阐述机理和量化评估, 虽提出了改善热舒适的环境策略, 但這些成果亟需转化落地。

在全球气候变化形势严峻、极端天气现象频发的背景下, 城市街道是改善城市气候环境, 提升人体舒适感受不可缺少的手段。城市街道热舒适评价从物理环境角度, 将自然气候、人群生理和心理、活动需求、文化背景和空间设计耦合起来, 是城市设计的重要内容, 是创造美好人居的重要途径。

#### 参考文献

[1] 国务院. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. [2021-03-13]. [https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm)

[2] 余洋, 蒋雨芊, 李磊. 城市公共空间的健康途径: 健康街道的内涵、要素与框架[J]. 中国园林, 2021, 37(03): 20-25.

[3] 刘滨谊, 彭旭路. 城市街道小气候舒适性研究进展与启示[J]. 中国园林, 2019, 35(10): 57-62.

[4] 丁沃沃, 胡友培, 窦平平. 城市形态与城市微气候的关联性研究[J]. 建筑学报, 2012, 527(07): 16-21.

[5] 冷红, 马彦红. 应用微气候热舒适分区的街道空间形态初探[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(06): 63-68.

[6] 王振, 李保峰, 黄媛. 从街道峡谷到街区层状: 城市形态与微气候的相关性分析[J]. 南方建筑, 2016, 173(03): 5-10.

[7] 冷红, 张钰佳, 袁青. 基于提升老年人体力活动水平的寒地城市公园热舒适性研究——主观感知和客观监测[J]. 建筑科学, 2023, 39(04): 81-89.

[8] 郭晓晖, 包志毅, 吴凡, 等. 街道可视因子对夏季午后

城市街道峡谷微气候和热舒适度的影响研究[J]. 中国园林, 2021, 37(09): 71-76.

[9] 张进, 李坤明, 赵立华. 湿热地区夏季不同室外空间的主观热舒适评价特点研究[J]. 建筑科学, 2019, 35(08): 18-24.

[10] 李砚晗, 李琼. 广州老旧小区过渡季室外热舒适评价及调控范围研究[J]. 建筑科学, 2022, 38(02): 71-81.

[11] 方小山, 胡静文. 湿热地区老年人夏季室外热舒适阈值研究[J]. 南方建筑, 2019(02): 5-12.

[12] 王琨, 薛思寒. 城市住区建筑、绿化布局与夏季舒适度相关性测析——以寒冷地区郑州市为例[J]. 建筑科学, 2021, 37(04): 53-59.

[13] 王琨, 王雅瑞, 薛思寒. 基于不同活动强度的寒冷地区城市公园冬季热舒适研究[J]. 建筑科学, 2023, 39(04): 97-103.

[14] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. ASHRAE Standard-55[S]. 1992.

[15] GAGGE A P. An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response[J]. Ashrae Trans, 1971, 77(1): 21-36.

[16] FANGER P O. Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering[J]. Thermal Comfort Analysis & Applications in Environmental Engineering, 1970: 225-240.

[17] 李俊鸽, 杨柳, 刘加平. 夏热冬冷地区人体热舒适气候适应模型研究[J]. 暖通空调, 2008, 213(07): 20-24.

[18] 林波荣. 绿化对室外热环境影响的研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.

[19] HENSEL H. Thermoreception and Temperature Regulation[J]. Monographs of the Physiological Society, 1981, 38(1): 1-321.

[20] 赵荣义. 关于“热舒适”的讨论[J]. 暖通空调, 2000(03): 25-26.

[21] 樊亚妮, 董芦笛. 西安城市街道“单拱”型林荫街谷空间冬季微气候测试分析[J]. 中国园林, 2022, 38(02): 115-120.

[22] REITER S. Correspondences Between the Conception Principles of Sustainable Public Spaces and the Criteria of Outdoor Comfort[J]. Eindhoven, 2004: 1-6.

[23] 卢薪升, 杨鑫. 基于ENVI-met软件小气候模拟与热舒适度体验的城市更新研究——以北京石景山北辛安地区为例[J]. 城市发展研究, 2018, 25(04): 147-152.

[24] 郑舰, 王国光. 传统街区更新中微气候环境模拟应用与方案优化——以肇庆包公府街区为例[J]. 规划师, 2019, 35(15): 79-86.

[25] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[26] 金虹, 王博. 城市微气候及热舒适性评价研究综述

- [J]. 建筑科学, 2017, 33(08): 1-8.
- [27] 陈昕. 哈尔滨室外人群热舒适动态变化规律及预测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [28] 翁惟繁. 大学校园灰空间形态与热舒适度的关联机制与优化策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [29] 保娟娟, 黄琼, 张安晓, 等. 天津原租界街区夏季室外热舒适研究[J]. 南方建筑, 2021(05): 108-118.
- [30] 水滔滔, 符扣锁, 李金伟. 夏热冬冷地区秋冬季节室外热舒适研究[J]. 安徽建筑大学学报, 2022, 30(06): 54-61.
- [31] WEI, D, YANG, L C, BAO, Z K. Variations in Outdoor Thermal Comfort in an Urban Park in the Hot-Summer and Cold-Winter Region of China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 77: 103535.
- [32] 蒋毅, 徐峰, 熊鹰, 等. 基于遮阴率的湿热地区慢行道热舒适特征研究[J]. 中国园林, 2021, 37(10): 71-76.
- [33] PENG, Y, FENG, T, TIMMERMANS, H J P. Expanded Comfort Assessment in Outdoor Urban Public Spaces Using Box-Cox Transformation[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 190: 103594.
- [34] 席天宇, 王翹楚, 丁建华, 等. 寒地城市景点旅游人群热舒适差异化对比研究[J]. 建筑科学, 2019, 35(10): 124-129.
- [35] HE X Y, AN L, HONG B. Cross-cultural Differences in Thermal Comfort in Campus Open Spaces: A Longitudinal Field Survey in China's Cold Region[J]. *Building and Environment*, 2020, 172: 106739.
- [36] LAM C K C, HANG J. Solar Radiation Intensity and Outdoor Thermal Comfort in Royal Botanic Garden Melbourne During Heatwave Conditions[J]. *Procedia Engineering*, 2017: 3456-3462.
- [37] GU H, HU Q Q, ZHU D S. Research on Outdoor Thermal Comfort of Children's Activity Space in High-Density Urban Residential Areas of Chongqing in Summer[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(12): 2016.
- [38] 王一, 叶昕, 黄子硕. 不同季节室外停留时长对热感觉的影响——以陆家嘴街区为例[J]. 建筑科学, 2020, 36(12): 117-125.
- [39] 朱岳梅, 姚扬, 马最良, 等. 室外环境热舒适性模型的建立[J]. 建筑科学, 2007, 119(06): 1-3.
- [40] MA X T, LEUNG T M, CHAU C K. Analyzing the Influence of Urban Morphological Features on Pedestrian Thermal Comfort[J]. *Urban Climate*, 2022, 44: 101192.
- [41] 张德顺, 王振. 高密度地区广场冠层小气候效应及人体热舒适度研究——以上海创智天地广场为例[J]. 中国园林, 2017, 33(04): 18-22.
- [42] 朱岳梅, 李炳熙, 刘京, 等. 高纬度严寒地区建筑容积率对局地热气候的影响[J]. 建筑科学, 2012, 28(06): 78-83.
- [43] 肖俊. 基于UTCI评价的亚热带城市肌理计算性设计探究——以广州地区为例[C]// 全国高等学校建筑类专业教学指导委员会, 建筑学专业教学指导分委员会, 建筑数字技术教学工作委员会. 数智赋能: 2022全国建筑院系建筑数字技术教学与研究学术研讨会论文集, 2022: 6.
- [44] HUANG Z D, WU C G, TENG M J. Impacts of Tree Canopy Cover on Microclimate and Human Thermal Comfort in a Shallow Street Canyon in Wuhan, China[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(6): 588.
- [45] 谭兴, 廖建军, 王志远, 等. 居住区不同绿化组合比率的绿地热环境模拟[J]. 中国城市林业, 2022, 20(04): 37-42.
- [46] 吴仁武, 晏海, 舒也, 等. 竹类植物夏季微气候特征及其对人体舒适度的影响[J]. 中国园林, 2019, 35(07): 112-117.
- [47] 刘大龙, 马岚, 刘加平. 城市下垫面对夏季微气候影响的测试研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(01): 107-112.
- [48] HUANG, Z F, GOU Z H, CHENG B. An Investigation of Outdoor Thermal Environments with Different Ground Surfaces in the Hot Summer-Cold Winter Climate Region[J]. *Journal of Building Engineering*, 2019, 27: 100994.
- [49] 崔鹏. 基于微气候舒适性提升的商业街区形态要素优化设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [50] WEI Y, NYUK H W, LI C Q. Effect of Street Design on Outdoor Thermal Comfort in an Urban Street in Singapore[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2016, 142(1): 05015003.
- [51] 郭尚霖, 孙一民. 城市设计要素对热岛效应的影响分析——广州地区案例研究[J]. 建筑学报, 2015(10): 79-82.
- [52] CHIANG Y C, LIU H H, LI D Y. Quantification Through Deep Learning of Sky View Factor and Greenery on Urban Streets During Hot and Cool Seasons[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2023, 232: 104679.
- [53] HE, X D, MIAO S G, SHEN S H. Influence of Sky View Factor on Outdoor Thermal Environment and Physiological Equivalent Temperature[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2015, 59(3): 285-297.
- [54] YI P L, LU Y, ZHANG M H. Study on the Coupling Relationship Between Thermal Comfort and Urban Center Spatial Morphology in Summer[J]. *Sustainability*, 2023, 15(6): 5084.
- [55] GE J J, WANG Y P, AKBARI H. The effects of Sky View Factor on Ground Surface Temperature in Cold Regions: A case from Xi'an, China[J]. *Building and Environment*, 2022, 210: 108707.

## 《园林》 学刊征稿啦

为紧贴时代脉搏, 突显时代主题, 集中展示中国风景园林标志事件和新时代重大规划, 《园林》学刊后续专题如下:

植物园规划设计、自然保护地及人地协调、东亚绿色城市、蓝绿空间与环境效应、城市绿地生态网络、江南园林遗产可持续发展研究。请踊跃投稿!

投稿系统: <https://www.gardenmagazine.cn>, 编辑部邮箱: LA899@vip.163.com。稿件自发稿之日起3个月内未接到本编辑部任何通知, 可自行处理。

稿件具体要求可关注“园林杂志”公众号。