

DOI: 10.20103/j.stxb.202408292064

左进, 张海陵, 于沐生, 魏清松, 王子楠, 范家琿. 湿热地区高密度老旧社区室外热舒适多维评价——以厦门市深田社区为例. 生态学报, 2025, 45(12): 5674-5689.

Zuo J, Zhang H L, Yu M S, Wei Q S, Wang Z N, Fan J H. Multi-dimensional evaluation of outdoor thermal comfort in built environments of high-density old communities in humid and hot areas: a case study of Shentian Community in Xiamen. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12): 5674-5689.

湿热地区高密度老旧社区室外热舒适多维评价 ——以厦门市深田社区为例

左 进^{1,2,*}, 张海陵^{1,2}, 于沐生^{1,2}, 魏清松^{1,2}, 王子楠^{1,2}, 范家琿^{1,2}

1 天津大学建筑学院, 天津 300072

2 天津大学天津市健康人居环境与智慧技术重点实验室, 天津 300072

摘要: 城市热岛效应致使高密度老旧社区的热环境情况日益恶化。当前老旧社区室外热舒适评价相关研究仍存在评价维度相对单一、量化指标相关性不清晰、社区典型空间差异化对比不深入等问题。以厦门市高密度老旧社区深田社区为研究对象, 基于现场实测、问卷调查以及相关性分析等方法, 聚焦老旧社区复杂空间中室外热舒适的细微差异, 从微气候因子-主客观热舒适度-人群活动多个维度构建了更全面、对实际指导作用更强的多维度热舒适评价方案。分析了三者之间的定量关系和影响机制, 建立了更为准确的热感觉基准量表。结果表明: (1) 厦门高密度社区中性生理等效温度 (PET, Physiological Equivalent Temperature) 为 23.14°C, 舒适层级对应的 PET 值 $\leq 29.53^\circ\text{C}$ 。在不同的空间类型下, 引起 TCV 和 TSV 变化所需的生理等效温度有较明显的差异; (2) 各个气象因子对热感觉投票 (TSV, Thermal Sensation Vote) 和对热舒适投票 (TCV, Thermal Comfort Vote) 的影响程度不同, 太阳辐射是影响主观热舒适度的主要因素; (3) 空间使用率可以较好表征湿热地区整体的社区热舒适情况, PET 每增加 1°C, 街区室外整体空间使用率 (Usage Rate, UR) 将下降约 2%。但在老旧社区不同空间类型下居民的空间使用意愿对热舒适度变化的耐受阈值和敏感度不同。研究结果增强了主客观热舒适度耦合分析的系统性和应用性, 提高了老旧社区进行热舒适定量表征的精准度, 为社区规划和更新工作者改善室外空间热环境提供了重要的数据支撑和决策依据。

关键词: 高密度街区; 热环境; 热舒适度; 生理等效温度; 人群活动; 湿热地区

Multi-dimensional evaluation of outdoor thermal comfort in built environments of high-density old communities in humid and hot areas: a case study of Shentian Community in Xiamen

ZUO Jin^{1,2,*}, ZHANG Hailing^{1,2}, YU Musheng^{1,2}, WEI Qingsong^{1,2}, WANG Zinan^{1,2}, FAN Jiahui^{1,2}

1 School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2 Tianjin Key Laboratory of Healthy Living Environment and Smart Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: The Urban Heat Island (UHI) effect has led to the deterioration of the thermal environment in high-density old neighborhoods. However, current studies on outdoor thermal comfort evaluation in communities still face issues such as a relatively singular evaluation dimension, unclear correlations between quantitative indicators, and a lack of in-depth comparison of typical spatial differentiation within communities. Taking Shentian Community, a high-density old community in Xiamen City, as the research subject, a multidimensional evaluation scheme of microclimatic factors, subjective and objective thermal comfort, and crowd activities was constructed, based on on-site measurements, questionnaire surveys, and

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2022YFF1301304); 天津大学自主创新基金 (2024XSC-0063)

收稿日期: 2024-08-29; **网络出版日期:** 2025-04-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zuojin0117@tju.edu.cn

correlation analyses, focusing on the nuances of outdoor thermal comfort in the complex spaces of old communities. The quantitative relationships and influence mechanisms among these factors were also analyzed, and a more accurate baseline heat stress scale was established. The results showed that (1) the neutral Physiological Equivalent Temperature (PET) in the high-density community in Xiamen was 23.14°C, and the corresponding PET value for the “comfort” tier was $\leq 29.53^\circ\text{C}$. Under different space types, there are more obvious differences in the physiological equivalent temperatures required to cause changes in TCV and TSV; (2) the degree of influence of each meteorological factor on the Thermal Sensation Vote (TSV) and on the Thermal Comfort Vote (TCV) were different, and global radiation was the main factor influencing subjective thermal comfort; (3) space occupancy can better characterize the overall community thermal comfort in hot and humid areas, and for every 1°C increase in PET, the overall Usage Rate (UR) of the outdoor space in the neighborhood will decrease by about 2%. However, the tolerance thresholds and sensitivities of residents' willingness to use space in response to changes in thermal comfort vary across different space types in older neighborhoods. The results of the study enhance the systematicity and applicability of the coupled subjective-objective thermal comfort analysis, improve the precision of quantitative characterization of thermal comfort at the community scale, and provide important scientific support and decision-making basis for community planning and renewal practitioners to improve the thermal environment of outdoor spaces.

Key Words: high-density neighborhoods; thermal environment; thermal comfort; physiological equivalent temperature (PET); crowd activity; hot and humid areas

全球变暖和快速城市化加剧了城市热岛效应^[1-3],改变了局地热量平衡和风环境,导致城市居民热舒适度显著下降^[4-5]。室外热舒适(OTC, Outdoor Thermal Comfort)是影响城市宜居性以及室外空间质量的核心要素,较差的热舒适情况会严重限制诸多户外活动^[6],尤其是在炎热的夏季^[7]。而在城市高密度建成区特别是老旧社区,存在建成环境复杂且空间质量较差等特点,室外热舒适问题尤为严重^[8],对其热舒适和热环境开展准确深入评价是老旧社区户外热舒适研究的基础环节^[9],也是更科学地落实老旧社区更新改造工作的前提和关键。

当前已有诸多学者于不同地区和城市开展了热舒适相关研究。热舒适评价维度方面,国内外学者主要从客观热舒适度指标测算与基于问卷调查的主观热舒适度评价两方面进行。室外客观热舒适度指标中,生理等效温度(PET, Physiological Equivalent Temperature)在不同气候带和季节得到广泛应用,且已有研究证明了其在厦门的适用性^[10];主观热舒适度评价方面,多数致力于建立热感觉与气象因子的线性模型,如Chen等^[11]以广场为对象,建立了严寒地区哈尔滨市热感觉投票(TSV, Thermal Sensation Vote)预测公式;Lai等^[12]为武汉开发了TSV模型。大部分研究都聚焦于热感觉投票,很少涉及热舒适投票(TCV, Thermal Comfort Vote),但已有研究强调了热感觉中的“中性”感觉并不一定对应“舒适”^[11]。此外,良好的户外环境对自发性活动的发生起到直接的促进作用,且已有研究发现户外活动与开放空间的热舒适之间存在明确的关系^[13-16],是评价其设计成功与否的关键标准^[17]。尽管以往热舒适评价相关研究在各方面均取得了一定进展,但尚未解决老旧社区热舒适评价所面临的问题。

一方面,老旧社区承载着繁杂多样的物理环境条件和居民感受模式,内部空间功能类型复合多元,在不同细分空间类型中,同地居民的热舒适耐受阈值往往有所浮动。因此,需要更科学地耦合主客观多项指标,并将人群活动作为重要维度考量^[18]相互夯实印证,开展多维度综合评价;另一方面,需要面向不同选点的差异性开展横向对比。当前研究多局限于单一类型空间如广场^[19]、校园^[20-21]等,少有研究关注高密度社区内部复杂室外空间的差异性对比。抑或聚焦于热舒适评价本身而忽略了其表现绩效,即对人群活动产生的影响,对实际规划更新工作的指导缺乏说服力。总的来说,当前热舒适评价的全面性和可靠性均有待提升。

针对当前老旧社区热舒适评价维度不全面、量化指标相关性不清晰、空间差异性关注不足等问题,本研究

以厦门市深田社区为典型研究区,在微气候因子、主客观热舒适度和人群活动三个维度间建立定量关系,进行不同调查点位的横向对比和耦合分析,建立了一套面向湿热地区高密度老旧社区的多维度热舒适评价方法。以期更准确地确定湿热地区局地实际热舒适区间,识别潜在作用优异的微气候因子。提升热舒适改善工作周期的针对性、应用性,满足高密度老旧社区实际规划和更新工作的差异化需求,为后续的优化决策提供科学支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

以厦门地区为代表的湿热地区夏季老旧社区居民承受着相当高的热应激,严重影响了人群室外出行和活动需求,致使人们户外活动的的时间和频率减少,成为室外环境的主要问题。厦门市冬季温暖湿润,夏季炎热潮湿,年平均气温 21.30℃,是典型的湿热地区。由于地域狭小、城镇化水平高、人口集中等因素,城市热岛效应日益凸显^[22]。深田社区位于厦门本岛的厦门市思明区(区位条件如图 1),是一个功能复合、建筑组合形式复杂的综合型高密度老旧社区。社区室外活动空间总量较少,面积较小,但这些空间种类丰富且特征各异,具有不同的建成环境和微气候特点,同时具有老旧社区空间精细化不足、设施陈旧等共性。行政范围 37.4 hm²,常住人口 10440 人。局部街坊建筑密度达 60% 以上。另一方面深田社区人口密度 27914 人/km²,远高于厦门岛内人口密度 13358 人/km²,也高于中国城市建成区平均人口密度 8279 人/km²(2016 年)^[23]。微气候实测、问卷调查和人群活动记录等研究环节和方法在社区内的公园,生活性街道等多种类型的室外活动空间进行。



图 1 研究区区位条件

Fig.1 Location of study area

1.2 数据来源及预处理

数据来源包括基础数据、气象因子数据、主观感知数据和人群活动数据。基础数据包括空间数据和气候数据等信息,源自厦门市城市规划设计研究院和中国气象局官方网站;微气候因子数据基于专业仪器的现场实测获取;主观感知数据包括居民热感觉投票、热舒适投票、热可接受性及热偏好投票等,通过现场问卷调查及访谈获取;人群活动数据包括所在空间活动人数等指标主要通过 PSPL (Public Space and Public Life Survey) 调研法的现场人群行为注记环节获取。

1.3 研究方法

首先利用 ENVI-met 微气候模拟软件,基于 2022 年典型夏日数据,对研究区热环境空间分异现状进行大致模拟并初步选择在公园、街道、住区不同空间类型下的主客观热舒适度调查点位,便于在分析阶段进行各点位横向对比。随后,采用气象参数实测、主观问卷调查和活动记录等实验方法,以生理等效温度和热舒适投票、热感觉投票、空间使用率等为核心指标,对室外空间主客观热舒适进行实地测算和耦合分析,获取主导微气候因子、热舒适量表等定量数据和相关性,形成对湿热地区高密度老旧社区室外热舒适情况的整体认知和不同空间类型的差异性评价。并通过开发空间使用率模型^[24]将室外空间人群活动与室外热舒适度联系起来,丰富评价维度,从对室外居民活动影响的角度出发全方位表征社区室外热舒适情况。详细技术路线如图 2 所示。

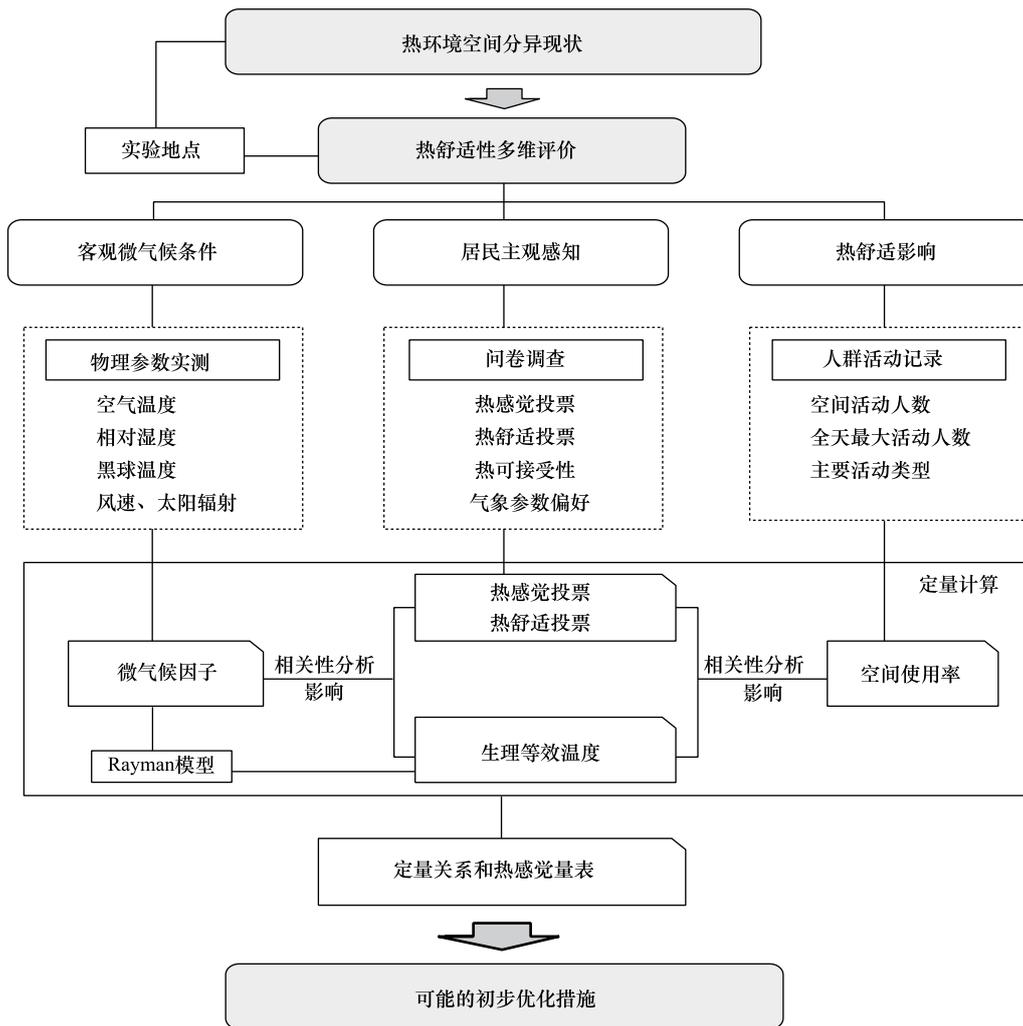


图 2 技术路线

Fig.2 Technical route

1.3.1 微气候实地测量方法

首先确定热舒适调查点位。ENVI-met 气候模拟软件可以对微气候和室外热舒适进行较好的初步预测^[25-26],因此,通过 ENVI-met 模拟 2022 年典型夏日 7 月 12 日气候情况并选取实验测点。利用 BioMET 工具计算日最高温时刻研究区 PET 空间分异情况,得出研究区典型夏日的 PET 大致范围为 34.46—66.82℃。用自然断点法将场地划分成高、低两类空间。结合预调研对各个室外活动空间的观察,在相对偏高和偏低 PET

的空间内分别选取 4 个实验点(图 3), 总共进行 8 次实验, 实验空间中包括了住区活动空间、公园、街道三种空间类型。

随后确定测量和调查时间。根据厦门市气温波动和同类气候带的季节划分^[10,27], 可知 5 月—9 月为夏季。为避开台风、阴雨天等, 最终选择 2023 年 9 月 9 日—9 月 12 日作为实验测量时间, 可以代表典型夏季炎热天气。综合考虑到日落时间和居民室外活动时间, 将实验时段确定为 8:00—18:00, 在天气情况相似的实验日进行测量。通过调研确定了各个空间的特性, 并拍摄鱼眼导入 Rayman 模型中计算天空开阔度(SVF, Sky View Factor), 以反映其被遮蔽情况从而便于计算生理等效温度。共获取了气象数据 4960 组(主要分析时段数 4800 组), 各空间测量时间及空间特性如表 1 所示。

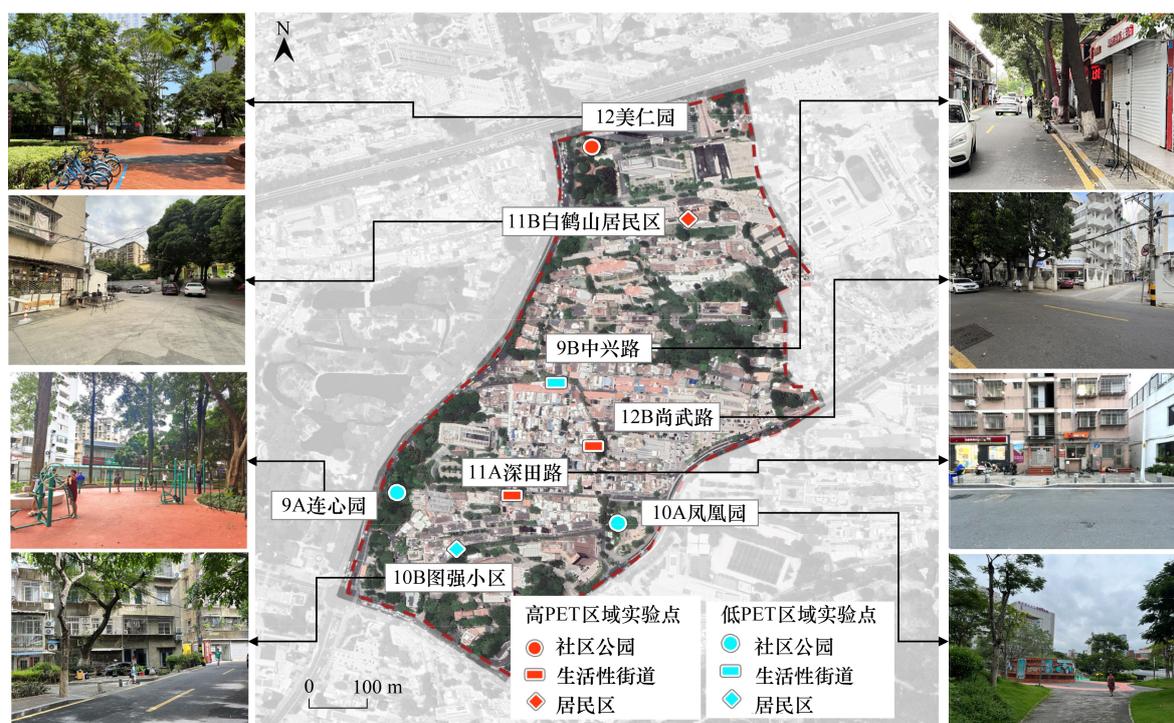


图 3 实验点位选取

Fig.3 Experimental sites

表 1 各实验点特征及调研日期与天气

Table 1 Characteristics of each experimental site and research date and weather

空间名称 Name of sites	天空视域因子 Sky view factor	测量时间 Measurement time	天气情况 Weather conditions	最高气温/℃ Highest temperature	最低气温/℃ Lowest temperature
9A 连心园 9A Lianxin park	0.053	2023-09-09	多云	30	24
9B 中兴路 9B Zhongxing road	0.168	2023-09-09	多云	30	24
10A 凤凰园 10A Fenghuang park	0.680	2023-09-10	多云转晴	30	24
10B 图强小区 10B Tuqiang complex	0.093	2023-09-10	多云转晴	30	24
11A 深田路 11A Shentian road	0.287	2023-09-11	晴	31	25
11B 白鹤山 11B Baihe mountain	0.553	2023-09-11	晴	31	25
12A 美仁园 12A Meiren park	0.387	2023-09-11	晴	31	25
12B 尚武路 12B Shangwu road	0.469	2023-09-12	晴	31	25

每个点位都安装了一组微气候测试设备来分别测量空气温度、相对湿度、风速、太阳辐射和黑球温度, 配备仪器安装在距地面 1.5m。仪器的选择均基于 ISO 标准, 其精度及量程如表 2 所示, 所有测量均以 1min 为

间隔自动记录。

表 2 选用仪器及精度

Table 2 Selected instruments and accuracy

测量指标 Factors	测量仪器 Measuring devices	仪器量程 Measurement range	仪器精度 Precision of measurement
空气温度 Temperature of air (T_a)	87786 WBGT Logger	0—20℃	±0.6℃
空气湿度 Relative Humidity (RH)	87786 WBGT Logger	0—100%	±3%
黑球温度 Temperature of globe thermometer (T_g)	87786 WBGT Logger	0—80℃	±1.5℃
风速 Velocity of air (V_a)	avm-07	0—45 m/s	±0.3m/s±3%
太阳辐射 Global radiation (G)	TES-1333R	0—2000w/m ²	±5%

1.3.2 问卷调查和活动记录

在气象测量的同时对调查空间中活动的居民进行了问卷调查和活动记录。第一部分为人口统计信息(性别、年龄、身高、体重、穿着的衣服和过去 20min 的主要活动),第二部分记录了他们对所处室外环境的热感觉投票(TSV)、热舒适投票(TCV)和热可接受性,TSV 根据 ASHRAE 七级量表进行评级,TCV 根据 5 级量表;第三部分收集居民对室外环境的热偏好(PV, Preference Vote),包括对气温、相对湿度、风速、太阳 S 辐射等热环境参数期望偏好,采用 3 度标尺,问卷标度如图 4 所示。空间活动记录方面,对测量装置 5m 内的行人进行问卷调查。由于每个区域的大小和特性不同,直接比较其人群数量是不可取的^[24]。因此本文利用空间使用率(UR, Usage rate)来表征人群活动强度(户外空间中的实际人数,占在同一空间观察到的最大人数比例),每隔 15min 记录一次空间人数与活动类型(骑车穿行,跑步通过等快速穿行不记录在内)。每时段的问卷数量不是固定的,取决于各空间的实际居民数量。共发放问卷 476 份,(有效问卷 458 份),获取人群活动数据 328 组。

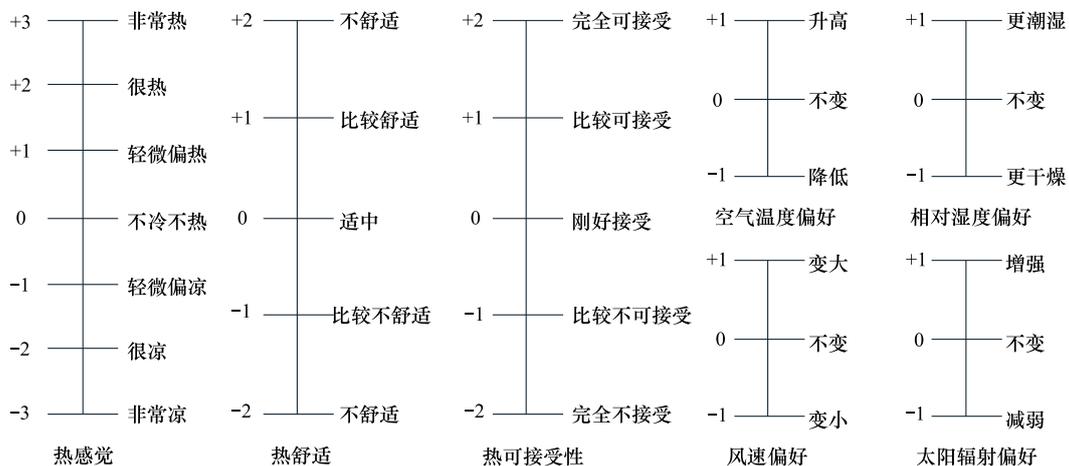


图 4 问卷标度

Fig.4 Scale of questionnaire

-1、0、1 等数字均为右侧标度的对应量化取值

1.3.3 热舒适指标计算方法

在最常用的热舒适指标中生理等效温度(PET, Physiological Equivalent Temperature)^[28]已广泛应用于不同气候区的多项室外热舒适研究。同时 PET 在德国工程师协会(VDI, Verein Deutscher Ingenieure) 3787 指南中得到推荐,因此使用 PET 作为客观热舒适度评价指标。本研究使用德国弗莱堡大学的教授及其团队开发的 RayMan pro 模型来计算 PET,以评估高密度社区环境中的室外热舒适情况。计算所需参数主要包括空气

温度、平均辐射温度等气象参数以及身高、年龄和衣着指数等人体参数。人体生理指标基于标准化人,即男性,身高 175cm,35 岁,体重 75kg;服装热阻设置为 0.5 个标准单位(克罗值)即夏季平均衣着的衣阻;平均辐射温度(T_{mrt} , The mean radiant temperature)是最重要的决定因素之一,是基于黑球温度、风速等气象参数计算得出。具体计算公式如下。

$$T_{\text{mrt}} = \left[(T_g + 273.15)^4 + \frac{1.10 \times 10^8 V_a^{0.6}}{\varepsilon D^{0.4}} (T_g - T_a) \right]^{0.25} - 273.15$$

T_g : 黑球温度; V_a : 风速; T_a : 空气温度; ε_g : 黑色地球的发射率; ε : 黑色球体反射率,取值 0.95; D : 黑球直径,取值 0.075m。

1.3.4 多维度评价分析方法

采用 SPSS(Statistical Package for the Social Sciences)软件对各个气象因子对主客观热舒适度的影响进行 spearman 相关分析。利用线性回归模型探讨了 PET 与 TCV、TSV 之间的相关程度,得到预测模型确定热舒适量表,最后通过相同方法开发空间使用率模型将室外空间的使用与室外热舒适度联系起来。

2 结果

2.1 主客观热舒适度特征及分析

2.1.1 客观热舒适度特征

客观热舒适指标计算结果(表 3)显示,PET 数据变化范围为 24.3—59.6℃。12B 点测得最大值,9A 点测得实验范围内最低值。12B 点几乎全天 PET 值均在社区平均水平之上,是研究区内“最热”的点;同样 9A 几乎全天 PET 值均在平均水平之下,是最“凉爽”的点。从空间类型来看,公园类的空间 PET 相对较低,但 12A 点的 PET 值与其他两个实验点差异较大。将 PET 计算结果进行每半小时进行平均,以消除偶然性波动,并观测日间的逐时变化趋势。整体客观热舒适度变化情况如图 5,公园类的 PET 一天内波动相对较大,而街道类较平稳。社区整体 PET 10:00 开始上升、15:00 左右开始下降。

表 3 各实验点 PET 结果

Table 3 Results of PET (°C) at each experimental point

取值类型 Value types	社区公园 Spots in parks			生活性街道 Spots in streets			住宅开放空间 Spots in residential outdoor areas	
	9A	10A	12A	9B	11A	12B	10B	11B
日平均值 Mean value of the day/°C	30.1	31.1	36.2	30.7	32.7	39.8	37.0	35.2
日最大值 Maximum value of the day/°C	37.4	44.7	59.4	38.8	40.5	59.6	59.1	58.8
日最小值 Minimum value of the day/°C	24.3	25.0	27.0	24.4	26.8	27.9	27.0	28.6

2.1.2 主观热舒适度特征

主观热舒适指标计算结果(图 6、图 7)显示,研究区域最多的热舒适投票(TCV)为适中(0)和比较不舒适(-1)。9A 连心园 TCV>0 的比例最高,且仅有 9A 一个点的日平均 TCV 在 0 以上。而 10A 凤凰园 TCV>0 的比例最小。“不舒适”选项占比最多,即最多居民反映不舒适的实验点为 11B 白鹤山居民区;与此同时,社区整体热感觉投票(TSV)主要为轻微偏热(1)和不冷不热(0),主观感觉相对偏“热”的实验点为 11B 和 12A;

而根据热可接受性调研(图 8),深田社区居民整体对热环境的接受性较好,可接受(≥ 0)比例为 79.3%,而有 20.7%的受访者选择了不可接受。大部分受访者选择了“刚刚可以接受”,认为完全可以接受的比例较少。其中 9A 点的热可接受性达到了 100%,11B 点仅有 61.0%,且该点选择完全不可接受的比例也最高。

但居民对这些参数的偏好并不相同,图 9 显示了他们在不同空间的热偏好投票。可以看出,在夏季典型日,人们整体更偏爱更低的空气温度和相对湿度,较低的阳光辐射和较高的风速。这可能是由于炎热季节的高水蒸气压和低风速会降低皮肤水分的蒸发速率以及皮肤与环境空气之间的对流热交换速率^[29]。其中对风

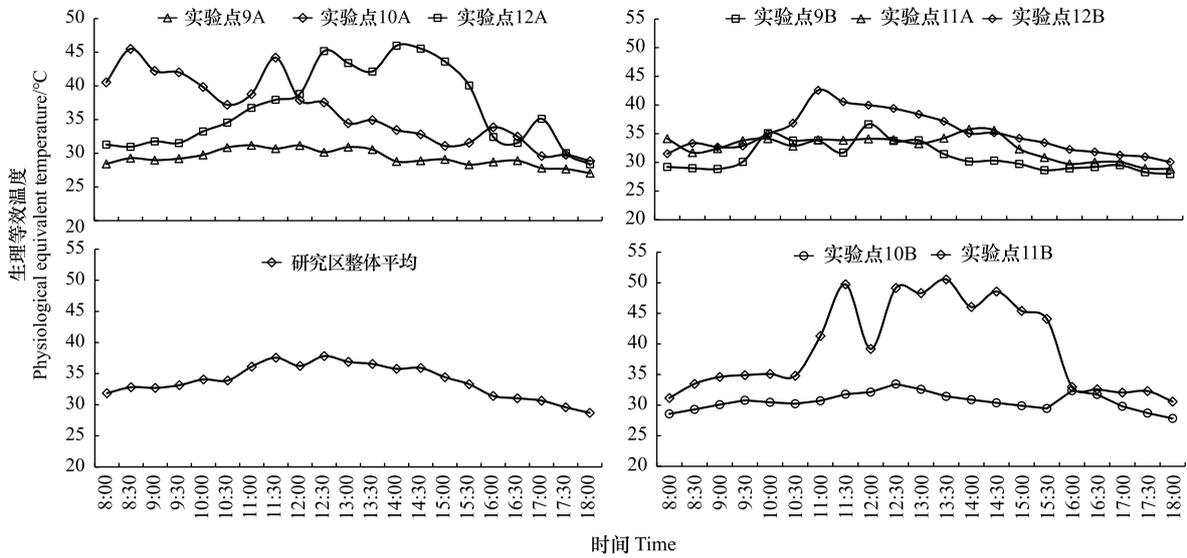


图 5 PET 逐时变化规律

Fig.5 PET hourly changes during the day

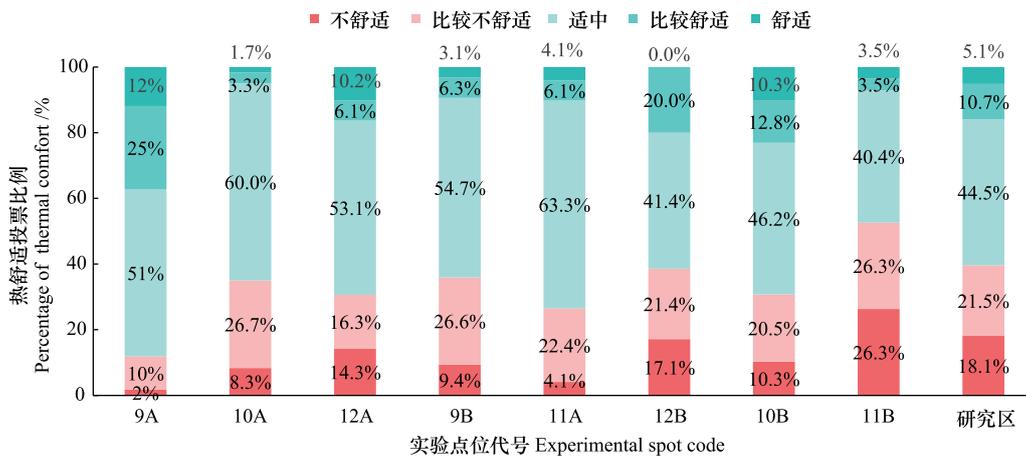


图 6 各实验点 TCV 问卷结果

Fig.6 TCV data statistics for each experimental site

速的偏好最为明显,67%的人偏好更高的风速。而对相对湿度的偏好最不明显,选择希望不变的人最多。实验点之间的偏好差异较为显著,例如 9A 连心园过半的受访者选择了空气温度和风速不变;而 12B 尚武路约 95%的受访选择空气温度更低,95.7%的偏好风速更高。

2.1.3 主客观热舒适度耦合分析

为了确立主客观热舒适性的关系,研究将客观指数 PET 与主观热舒适的核心指标 (TCV, TSV) 进行耦合分析。为消除微气候因子波动的影响,将问卷提交前 5 min 内的平均 PET 作为主观热舒适度对应的客观热舒适度指标。同时为了减少个体差异,采用平均热感觉投票 (mTSV, Mean Thermal Sensation Vote) 和平均热舒适投票 (mTCV, Mean Thermal Comfort Vote) 来进行热舒适度分析,即平均热舒适投票和平均热感觉投票来代替线性回归中的实际值。因此本文计算 1℃ 的每个热舒适指数箱内的平均 TSV 和平均 TCV (为减少偶然性影响,剔除 1℃ 箱内样本数量小于 3 的数据),并对数据进行拟合。

如图 10 所示,在湿热地区的典型夏季,TCV 随着 PET 的升高而降低,所得方程的 *P* 值均小于 0.001,表明显著相关。PET 值每变化 6.9℃,热舒适会改变一个等级。公园、街道和住区的斜率分别为 -0.102、-0.086 和 -0.094,可看出湿热地区高密度街区在公园的人比街道和住区的人对热环境的感受更加敏感。舒适的温度范

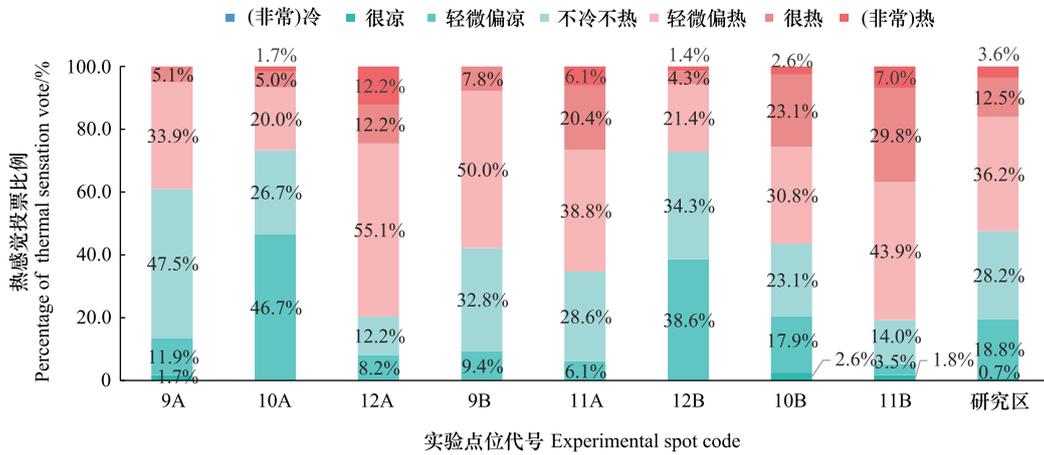


图7 各实验点 TSV 问卷结果

Fig.7 TSV data statistics for each experimental site

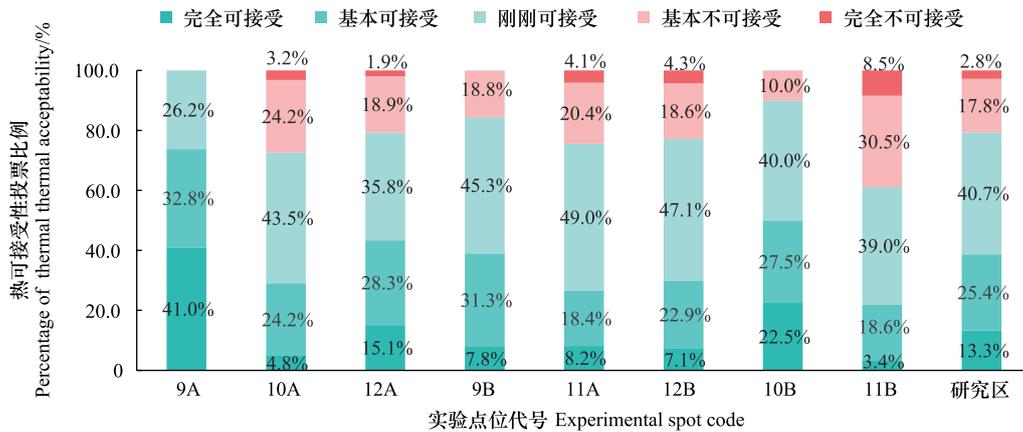


图8 热可接受性投票结果

Fig.8 Results of the vote on thermal acceptability

围可以通过将 $mTCV = 0$ 代入计算,研究区夏季时适中舒适温度为 29.53°C ,表明只有 $PET \leq 29.53^{\circ}\text{C}$ 时,居民才会处于舒适状态,且当 $PET < 8.69^{\circ}\text{C}$ 时,是居民相对最舒适的状态。深田社区舒适度量表对应 PET 范围见表 4。

表4 热舒适量表

Table 4 A scale of thermal comfort

热舒适投票 Thermal comfort vote	生理等效温度 Physiological equivalent temperature/ $^{\circ}\text{C}$	热舒适投票 Thermal comfort vote	生理等效温度 Physiological equivalent temperature/ $^{\circ}\text{C}$
很不舒适 Very uncomfortable	>50.36	比较舒适 Relatively comfortable	$8.69-22.58$
比较不舒适 Relatively uncomfortable	$36.47-50.36$	很舒适 Comfortable	<8.69
适中 Mild	$22.58-36.47$		

将 PET 值与对应的 mTSV 进行线性回归,分析结果如图 11 所示。研究区拟合模型 R^2 为 0.805,各类空间的决定系数 R^2 均在 0.75 以上。在湿热地区的典型夏季,随着生理等效温度的升高,热感觉升高。拟合结果中公园、街道和住区的斜率分别为 0.111、0.086 和 0.093,这表明,公园 PET 值变化约为 9°C 就会引起单位热

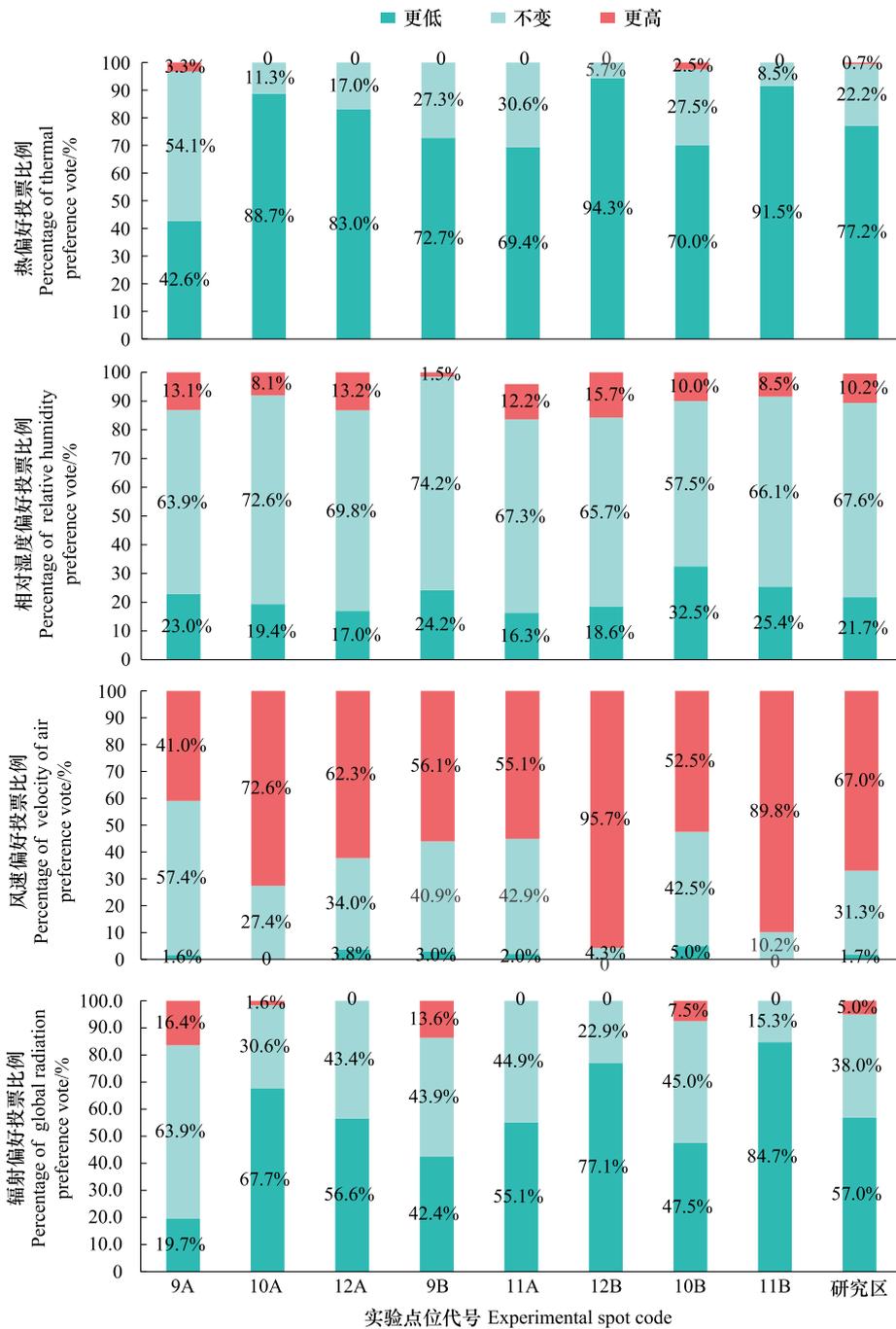


图9 各实验点热偏好投票结果

Fig.9 Results of the vote on thermal acceptability

感觉的变化,而在街道 11.6℃ 的 PET 变化、住区类空间 10.75℃ 的变化才会引起热感觉变化,湿热地区高密度街区在公园的人比街道和住区的人对热环境的感受更加敏感。通过在方程中代入 $mTSV = \pm 0.5$,可以得出夏季湿热地区,人们感到“不冷不热”的中性热感对应 PET 范围是 16.73—29.55℃,中性温度为 23.14℃。此外,根据回归结果,研究得出热感觉量表如表 5 所示。

2.2 微气候参数对热舒适度影响

微气候参数测量数据如表 6 所示,各个空间的微气候因子呈显著差异,数据分布跨度较大。研究区整体 T_a 范围为 11.7℃ 至 33.1℃, V_a 范围为 0 至 4m/s, RH 范围为 46.2% 至 89.8%,总辐射范围为 1.2 至 1263

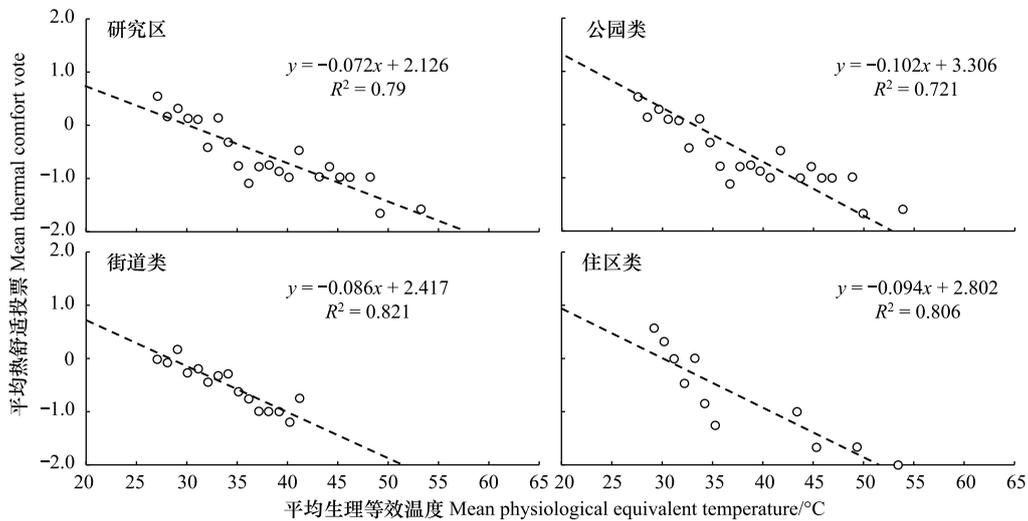


图 10 典型研究区 PET 与 TCV 关系

Fig.10 The relationship between PET and TCV in typical study area

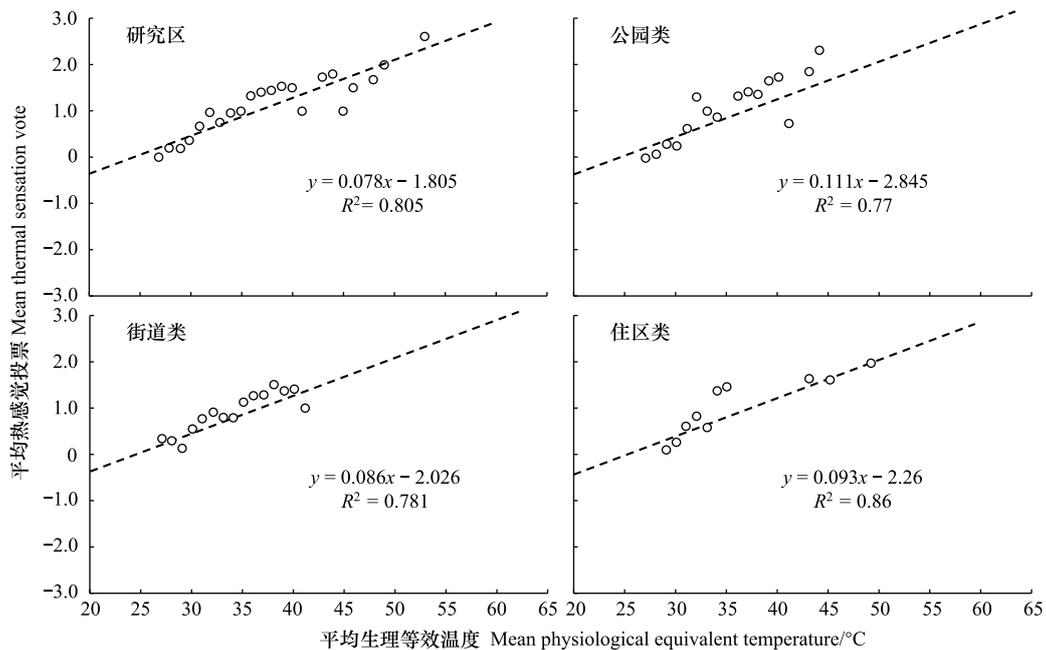


图 11 典型研究区 PET 与 TSV 关系

Fig.11 The relationship between PET and TSV in typical study area

W/m^2 。整体来看,社区最高空气温度在 11B 点测得,最低空气温度为 9A 点测得,极值跨度 $14.3^{\circ}C$ 。相对湿度最高值为 78%,对应出现 9A 连心园点,最低值为 38.6%,极值跨度 $14.3^{\circ}C$ 。风速极大值出现在 12A 美仁园。太阳辐射极大值在 10A 凤凰园测得,极小值为 11A 点测得。就日平均值而言,平均空气温度最高点为 11B;平均最湿润的实验点为 9A;日平均风速最大的为 11A;太阳辐射平均最高点为 11B,最低为 9A。

随后,将微气候因子与 TCV、TSV 进行相关性分析。因 TCV、TSV 并非正态分布,为了量化这些微气候参数对 TCV 和 TSV 的影响,本研究使用 Spearman 相关系数对气象变量因子和 TCV/TSV 进行了相关性分析。将问卷结束前 5min 的气象因子平均值作为 TCV/TSV 对应的气象因子数据。

表 5 热感觉量表

Table 5 A scale of thermal sensation

热感觉 Thermal sensation	热应激程度 Level of thermal stress	对应生理等效温度 Physiological Equivalent Temperature/°C
极热 Extreme hot	极端热应激	>68.01
很热 Very hot	强烈的热应激	55.19—68.01
热 Hot	中度热应激	42.37—55.19
轻微偏热 Warm	轻微的热应激	29.55—42.37
不冷不热 Mild	无热应激	16.73—29.55
轻微凉爽 Chilly	轻微的冷应激	3.91—16.73
凉爽/冷 Cold	中度冷应激	-8.91—-3.91
很冷 Very cold	强冷应激	-21.73—-8.91
极冷 Extreme cold	极度寒冷应激	<-21.73

表 6 微气候测量数据统计

Table 6 Statistical results of microclimate measurements

指标 Factors	取值类型 Value types	社区公园各实验点 Spots in the parks			生活性街道各实验点 Spots in streets			住宅开放空间各实验点 Spots in residential outdoor areas	
		9A	10A	12A	9B	11A	12B	10B	11B
空气温度 (T_a) Temperature of air/°C	平均值	28.7	32.3	31.8	29.7	31.2	33.3	29.6	34.7
	最大值	30.6	37.3	35.6	32.9	33.7	39.0	31.8	41.6
	最小值	27.3	28.3	28.0	27.9	28.9	29.5	27.7	29.9
相对湿度 (RH) Relative Humidity/%	平均值	67.8	54.4	61.0	63.9	61.6	57.6	62.2	52.2
	最大值	78.0	71.0	76.7	75.6	73.8	68.0	71.3	67.7
	最小值	57.0	39.2	51.9	51.4	50.0	45.3	55.4	38.6
微风风速 (V_a) Velocity of air/(m/s)	平均值	0.4	0.5	0.7	0.5	0.8	0.3	0.2	0.8
	最大值	2.7	3.2	4.0	2.5	2.7	2.7	3.1	3.1
	最小值	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
太阳辐射 (G) Global radiation/(W/m ²)	平均值	69.2	268.7	374.4	122.1	94.3	242.2	81.8	457.5
	最大值	485.5	1263.0	935.9	724.1	347.4	826.5	500.9	1212.0
	最小值	6.5	7.2	14.5	2.3	1.2	11.3	4.7	19.8
平均辐射温度 (T_{mrt}) The mean radiant temperature/°C	平均值	29.7	39.7	42.4	32.3	34.9	36.0	30.7	50.4
	最大值	54.9	86.8	93.4	57.7	49.7	78.1	51.2	96.0
	最小值	26.9	27.6	28.2	26.9	28.5	28.6	26.2	26.8

结果如表 7 和表 8 所示,各气象参数与 TCV 均存在显著相关性($P<0.01$),相对湿度与 TCV 是正相关,而空气温度、风速、相对湿度、太阳辐射与 TCV 是负相关。在湿热地区的夏季,黑球温度 T_g (ρ 研究区 = -0.449, ρ 公园 = -0.444)、太阳辐射 (ρ 住区 = -0.620) 被认为是影响受访者热感知的主要因素,其次是相对湿度 RH (ρ 公园 = 0.319)。气象因子对 TSV 和 TCV 的影响程度不同,二者相比,空气温度、相对湿度、太阳辐射和黑球温度均对 TSV 的影响更大,只有风速对 TCV 的影响相对更明显。

表 7 微气候因子与热舒适投票相关性分析

Table 7 Correlation analysis between microclimate factors and thermal comfort TCV

不同空间 类型 TCV TCV of different types of space	与空气温度 相关性 Correlation with T_a	与风速 相关性 Correlation with V_a	与相对湿度 相关性 Correlation with RH	与太阳辐射 相关性 Correlation with G	与黑球温度 相关性 Correlation with T_g
研究区 TCV TCV of the study area	-0.408 **	-0.173 **	0.428 **	-0.451 **	-0.449 **
公园 TCV TCV of the parks	-0.426 **	-0.128 **	0.370 **	-0.407 **	-0.444 **
街道 TCV TCV of the streets	-0.279 **	-0.059	0.349 **	-0.345 **	-0.333 **
住区 TCV TCV of the residential areas	-0.45 **	-0.349 **	0.608 **	-0.620 **	-0.563 **

** .在 0.01 级别相关性显著

表 8 微气候因子与热感觉 TSV 相关性分析

Table 8 Correlation analysis between microclimatic factors and thermal sensation TSV

不同空间类型 TSV TSV of different types of space	空气温度 Correlation with T_a	风速 Correlation with V_a	相对湿度 Correlation with RH	太阳辐射 Correlation with G	黑球温度 Correlation with T_g
研究区 TSV TSV of the study area	0.460**	0.158**	-0.467**	0.507**	0.496**
公园 TSV TSV of the parks	0.476**	0.062	-0.360**	0.510**	0.505**
街道 TSV TSV of the streets	0.408**	0.110	-0.484**	0.431**	0.429**
住区 TSV TSV of the residential areas	0.421**	0.315**	-0.597**	0.583**	0.523**

** .在 0.01 级别相关性显著

2.3 热舒适对空间使用率的影响

热舒适对人群活动产生重要影响,直接体现为户外空间的使用率,而户外空间使用率反过来也可以科学地表征热舒适情况。首先对空间使用率调研结果进行分析,如图 12 所示。研究区空间的日平均使用率 UR 为 39%。公园 UR 是三类空间中最低的(仅为 27%),街道类空间最高(38%),住区类为 29%,但两个住区空间的差异较大。不同类型空间的使用率日变化趋势差别较为显著,公园类 UR 早晚高于其他时间的趋势较为明显,其余时间人群活动水平较低,尤其在中午时段,由于日常生活习惯影响导致 UR 不高。街道空间的 UR 变化较为平缓,其中 11A 深田路的使用率相对较高,9B 中兴路由于业态丰富且离菜市场入口较近,午饭和晚饭时间点的使用率有激增趋势。住区类空间中,11B 区的 UR 除附近幼儿园接送时间段外,均在 20% 以下。

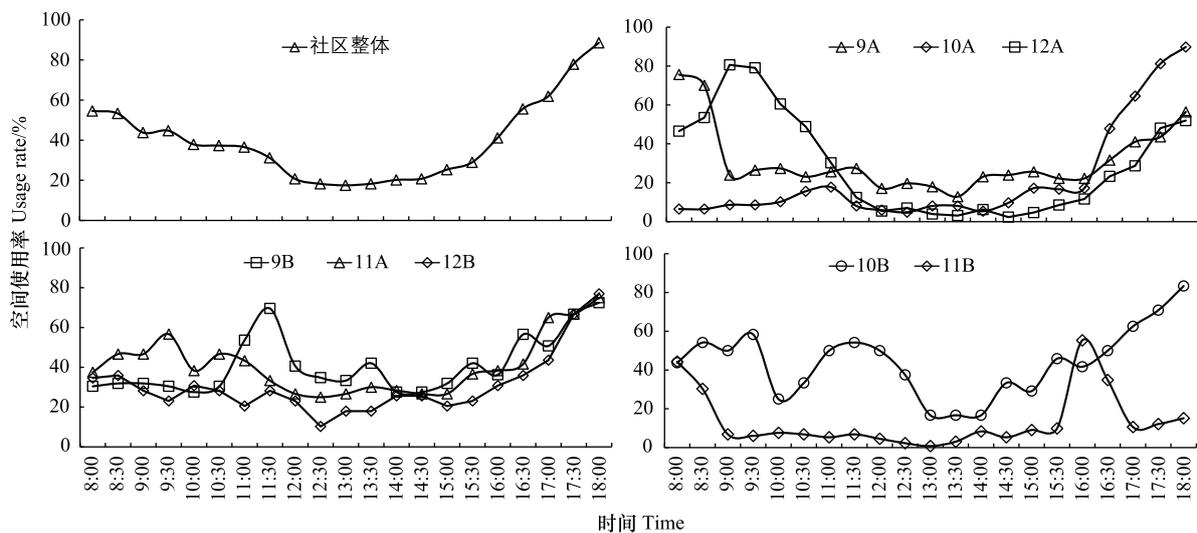


图 12 典型研究区 PET 值日变化规律

Fig.12 Typical daily variation patterns of PET values in the study area

随后对热舒适度与人群室外活动情况两个指标进行关联分析。将热舒适度以半小时为间隔进行划分并取平均值,使之与空间使用率(UR)的取值方式相同。为避免特定空间的使用率离群值造成误差,将每个观测值分组到对应 PET 的 1℃箱中,再进行 UR 与 PET 的相关分析,拟合结果如图 13 所示。

客观热舒适度与空间使用率层面,整体来看社区室外空间整体 UR 与 PET 呈负相关。高密度社区的 PET 越高,UR 越低,PET 每增加 1℃,街区室外空间整体 UR 将下降约 2%,当 PET 达到 46.8℃左时,UR 趋近于 0,在深田社区,几乎没有人会在 PET 大于 46.8℃进行室外活动。

主观热舒适度与空间使用率层面(图 14),从 TCV 与人群活动线性回归发现,深田社区整体的空间使用率随着主观热舒适度值的上升而上升。TCV 每提升一个等级,室外空间使用率提升 55.9%。当舒适度值为约 -0.9 时,UR 为 0,即人们感到“较不舒适”时,就几乎不进行室外活动了。所有空间类型的 TCV 和空间使用率 UR 均显著相关($P < 0.05$),但不同空间类型使用对热舒适的敏感程度不同。热舒适的变化对街道类空间影响

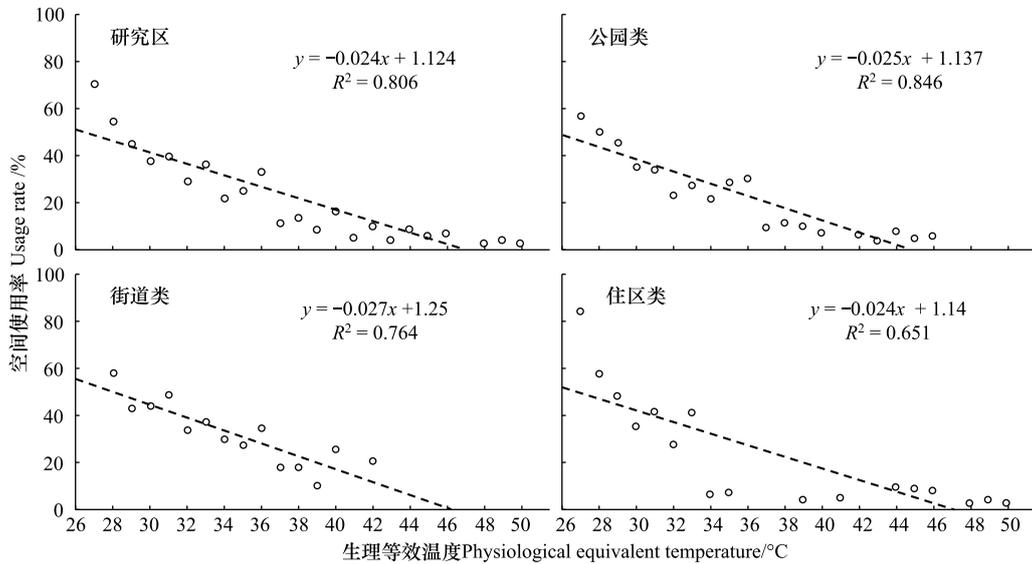


图 13 典型研究区空间使用率 UR 与 PET 关系图

Fig.13 The relationship between UR and PET in a typical study area

最大,公园类热舒适每变化 1 级,UR 提升约 49%;街道类空间热舒适每变化 1 级,UR 提升约 50.7%;但在住区空间中,热舒适每变化 1 级,UR 仅提升 26.2%。以上结果说明居民在不同空间接受阈值有所不同,在公园空间活动的接受跨度最低,住区的最高。

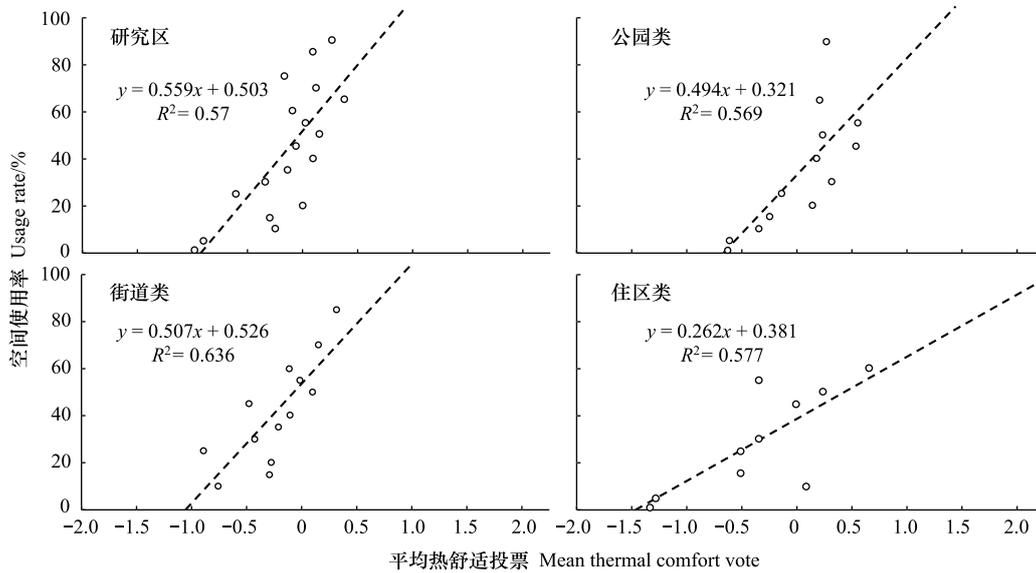


图 14 典型研究区 UR 与 TCV 关系图

Fig.14 The relationship between UR and TCV in a typical study area

3 讨论

客观热舒适度指标上,10A、11B 及 12B 点的波动较大。10A 点变化规律与其他实验点较为不同,上午 PET 值较高而下午较低,可能由于该点位于场地最东侧,上午受到较多太阳直射导致较高的 PET。结合其他湿热地区的研究结果可知,厦门老旧社区大于 90%的可接受比率范围计算为 $PET \leq 30.1^{\circ}C$,与中国台湾台中

地区的 21.3—28.5℃^[30] 上限值相近。其他地区如西安中性 PET 为 14.2—32.4℃^[31], 天津中性 PET 为 11—24℃^[29], 成都中性 PET 范围为 19.65—24.4℃^[32]。这可能是因为湿热地区夏季较长, 当地居民对夏季热环境变化不敏感, 对炎热的耐受能力比其他地区的居民更好。同时本研究得出的中性 PET 范围较宽, 跨度达到 13℃, 这可能是由于生理适应导致他们的热感觉范围更宽。

影响居民热舒适度的主要因子在不同地区有所差异。本研究在湿热地区老旧社区中得出的主要影响参数为太阳辐射, 与在广州、深圳等湿热城市的结论相同。而在寒冷地区特别是中国北方地区, 如天津、北京、哈尔滨等城市热舒适性的核心影响因子为空气温度。这可能是由于湿热地区夏季时间较长, 通常位于低纬度地区, 太阳直射角度较大, 从而导致太阳辐射强度较大, 影响热舒适性。此外, 根据相关性分析, 可以识别出在热舒适提升中最有潜力的因子, 提出针对性优化措施。例如, 湿热地区主要影响因子为太阳辐射值, 在实际规划中应以减少太阳辐射干扰为主要导向, 根据公园绿地、住宅用地等不同土地利用性质和道路朝向, 在社区中增添绿篱、冠幅更大或叶面积指数较高的落叶乔木以及人工遮阳设施。并充分优化宅旁绿地以提高遮阴率, 降低天空可视域。同时积极扩充社区内东西向的街道的活动内容, 弱化南北向街道的游憩功能。

空间使用率回归模型对公园空间的预测性较低, 仅能解释 45.3% 的变化, 而街道类较高。对于居住区户外空间, 通过热感受投票指标预测出该类型空间的使用率的趋势与其他几类空间显著不同, 且与现有研究规律差异也较大, 可能是因为住区类空间整体使用率不高, 热感觉的变化无法引起使用率的明显波动, 此外数据偶然性也有一定影响。而相比于 TCV 与 TSV, 空间使用率与 PET 变化具有更显著的相关性。总的来说, 识别出 PET 的上限值以及找到热舒适与空间使用率的关联性, 可以间接探寻影响人们活动趋向的环境因素, 同时得出居民在不同空活动时对热舒适性的耐受性。在社区规划和建设实践中, 可以根据研究结果进行差异化的设计优化探索。例如, 居民在公园进行活动时耐受阈值较低, 反映了其对公园空间较高的期望。因此置入降温遮阳的热舒适调节设施时要兼顾美观性和趣味性, 提高空间吸引力, 缓解热不适的同时能一定程度提高心理耐受水平。

4 结论与展望

(1) 厦门高密度社区中性 PET 为 23.14℃, 舒适层级对应的 PET 值 ≤ 29.53 ℃。在不同的空间类型下, 引起 TCV 和 TSV 变化所需的生理等效温度有较明显的差异; (2) 各个气象因子对 TSV 和对 TCV 的影响程度不同, 太阳辐射是影响主观热舒适度的主要因素; (3) 空间使用率可以较好表征湿热地区整体的社区热舒适情况, PET 每增加 1℃, 街区室外空间整体 UR 将下降约 2%。但在老旧社区不同空间类型下居民的空间使用意愿对热舒适的耐受阈值和敏感度不同。

本研究虽然建立了环境参数-热舒适度-人群活动的评价方案, 但关于热环境的探讨仅于夏季进行, 未来可进一步考虑在不同气候条件及季节下进行研究, 以便得出全年普适的热基准量表, 以期在城市规划中制定更好的调控标准。另一方面, 热环境作为一个复杂系统, 受到天气和各种外界偶然和突发因素的影响, 每个实验点仅用一套设备进行测试可能会限制所得出模型的精准性。未来研究可考虑在实验点不同特性的点位进行测试, 采用更高精度的实验设备, 再通过取平均值等数据处理方式提高数据的合理性和稳定性。

参考文献 (References):

- [1] Ouyang Z T, Sciusco P, Jiao T, Feron S, Lei C, Li F, John R, Fan P L, Li X, Williams C A, Chen G Z, Wang C H, Chen J Q. Albedo changes caused by future urbanization contribute to global warming. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3800.
- [2] 阳文锐, 李锋, 何永. 2003—2011 年夏季北京城市热景观变化特征. *生态学报*, 2014, 34(15): 4390-4399.
- [3] Oreskes N. Beyond the Ivory tower. The scientific consensus on climate change. *Science*, 2004, 306(5702): 1686.
- [4] 黄大田. 全球变暖、热岛效应与城市规划及城市设计. *城市规划*, 2002, 26(9): 77-79.
- [5] Wei D, Yang L C, Bao Z K, Lu Y, Yang H T. Variations in outdoor thermal comfort in an urban park in the hot-summer and cold-winter region of China. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 77: 103535.

- [6] Li Y, Ren T, Kinney P L, Joyner A, Zhang W. Projecting future climate change impacts on heat-related mortality in large urban areas in China. *Environmental Research*, 2018, 163: 171-185.
- [7] Du M, Hong B, Gu C J, Li Y C, Wang Y Y. Multiple effects of visual-acoustic-thermal perceptions on the overall comfort of elderly adults in residential outdoor environments. *Energy and Buildings*, 2023, 283: 112813.
- [8] Yang J Y, Shi B X, Xia G Y, Xue Q, Cao S J. Impacts of urban form on thermal environment near the surface region at pedestrian height: a case study based on high-density built-up areas of Nanjing city in China. *Sustainability*, 2020, 12(5): 1737.
- [9] 刘滨谊, 魏冬雪. 城市绿色空间热舒适评述与展望. *规划师*, 2017, 33(3): 102-107.
- [10] Zhou Z Q, Dong L. Experimental investigation of the effect of surgical masks on outdoor thermal comfort in Xiamen, China. *Building and Environment*, 2023, 229: 109893.
- [11] Chen X, Gao L X, Xue P N, Du J, Liu J. Investigation of outdoor thermal sensation and comfort evaluation methods in severe cold area. *Science of the Total Environment*, 2020, 749: 141520.
- [12] Lai D Y, Zhou C B, Huang J X, Jiang Y, Long Z W, Chen Q Y. Outdoor space quality: a field study in an urban residential community in Central China. *Energy and Buildings*, 2014, 68: 713-720.
- [13] Huang J X, Zhou C B, Zhuo Y B, Xu L Y, Jiang Y. Outdoor thermal environments and activities in open space: an experiment study in humid subtropical climates. *Building and Environment*, 2016, 103: 238-249.
- [14] Chen L, Ng E. Outdoor thermal comfort and outdoor activities: a review of research in the past decade. *Cities*, 2012, 29(2): 118-125.
- [15] Andrade H, Alcoforado M J, Oliveira S. Perception of temperature and wind by users of public outdoor spaces: relationships with weather parameters and personal characteristics. *International Journal of Biometeorology*, 2011, 55(5): 665-680.
- [16] 刘畅, 徐宁, 宋靖达, 胡尚春. 城市森林公园游人热舒适感受与空间选择. *生态学报*, 2017, 37(10): 3561-3569.
- [17] Lenzholzer S, Duchhart I, Koh J. 'Research through designing' in landscape architecture. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 113: 120-127.
- [18] Nikolopoulou M, Lykoudis S. Use of outdoor spaces and microclimate in a Mediterranean urban area. *Building and Environment*, 2007, 42(10): 3691-3707.
- [19] 黄海静, 彭明熙. 夏热冬冷地区室外广场空间冬季热舒适研究. *重庆大学学报*, 2023, 46(12): 96-105.
- [20] 蒋毅, 赵立华, 孟庆林. 湿热地区夏季城市人行空间热舒适研究. *土木与环境工程学报: 中英文*, 2020, 42(3): 174-182.
- [21] Zhang T, Su M F, Hong B, Wang C S, Li K K. Interaction of emotional regulation and outdoor thermal perception: a pilot study in a cold region of China. *Building and Environment*, 2021, 198: 107870.
- [22] 沈中健. 厦门市建设用地功能区的热环境分异研究. *地理科学*, 2022, 42(9): 1627-1637.
- [23] 杜春萌, 焦利民, 许刚. 中国地级以上城市建成区 2006—2016 年人口密度变化的时空格局及驱动因素. *热带地理*, 2018, 38(6): 791-798.
- [24] Mi J Y, Hong B, Zhang T, Huang B Z, Niu J Q. Outdoor thermal benchmarks and their application to climate-responsive designs of residential open spaces in a cold region of China. *Building and Environment*, 2020, 169: 106592.
- [25] 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. *城市发展研究*, 2018, 25(4): 147-152.
- [26] 蒋毅, 徐峰, 熊鹰, 刘之欣, 赵立华. 基于遮阴率的湿热地区慢行道热舒适特征研究. *中国园林*, 2021, 37(10): 71-76.
- [27] Wang Y F, Ni Z B, Peng Y Z, Xia B C. Local variation of outdoor thermal comfort in different urban green spaces in Guangzhou, a subtropical city in South China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 32: 99-112.
- [28] Höppe P. The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 1999, 43(2): 71-75.
- [29] Lai D Y, Guo D H, Hou Y F, Lin C Y, Chen Q Y. Studies of outdoor thermal comfort in northern China. *Building and Environment*, 2014, 77: 110-118.
- [30] Lin T P. Thermal perception, adaptation and attendance in a public square in hot and humid regions. *Building and Environment*, 2009, 44(10): 2017-2026.
- [31] Zhen M, Zou W H, Zheng R, Lu Y J. Urban outdoor thermal environment and adaptive thermal comfort during the summer. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 29(51): 77864-77883.
- [32] Zeng Y L, Dong L. Thermal human biometeorological conditions and subjective thermal sensation in pedestrian streets in Chengdu, China. *International Journal of Biometeorology*, 2015, 59(1): 99-108.