

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2023.12.009

夏热冬冷地区室外广场空间冬季热舒适研究

黄海静^{1a,1b}, 彭明熙²

(1. 重庆大学 a. 建筑城规学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆建筑工程职业学院, 重庆 400072)

摘要:随着城市发展及居民室外活动时间不断增多,良好的室外空间环境及热舒适性对居民身心健康具有重要影响。针对关注较少的冬季室外环境热舒适问题,以夏热冬冷地区的重庆三峡广场为例,基于冬季热环境实测和热舒适问卷调查,利用Rayman软件计算PET(生理等效温度值)作为热舒适评价参数,建立TCV(热舒适投票值)、TSV(热感觉投票值)与PET的函数关系式,得到不同室外环境空间的冬季热舒适范围,提出适用于夏热冬冷地区的冬季综合舒适度评价模型。研究成果可为完善夏热冬冷地区的室外热舒适研究提供基础数据参考。

关键词:室外热环境;热舒适;冬季;生理等效温度;评价模型

中图分类号:TU98

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2023)12-096-10

The winter thermal comfort of outdoor square space in hot summer and cold winter area

HUANG Haijing^{1a,1b}, PENG Mingxi²

(1a. School of Architecture and Urban Planning; 1b. Key Lab of Chinese Education Ministry for Construction and New Technology of Mountain Cities, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 3. Chongqing Jianzhu College, Chongqing 400072, P. R. China)

Abstract: With the continuous growth of urban development and outdoor activities, residents are spending more time outdoors. The quality of outdoor environment and thermal comfort significantly impacts the physical and mental health of residents. However, the issue of winter outdoor thermal comfort has received limited attention. Using Chongqing Three Gorges Square in a hot summer and cold winter area as a case study, this research addresses the problem of winter outdoor thermal comfort. By conducting measurements of the winter thermal environment and administering thermal comfort questionnaires, the study utilizes the Rayman software to calculate the PET (physiological equivalent temperature) values as parameters for thermal comfort evaluation. A functional relationship between TCV (thermal comfort voting value), TSV (thermal sensation voting value) and PET is established. This relationship helps define the winter thermal comfort range for various outdoor environmental spaces. Additionally, a comprehensive winter comfort evaluation model suitable for hot summer

收稿日期:2022-06-12

基金项目:国家社会科学基金资助项目(19BGL004);“十三五”国家重点研发计划资助项目(2017YFC0702403);中央高校基本科研费资助项目(2018CDQYJZ0032)。

Supported by the National Social Science Foundation of China (19BGL004), the “13th Five-year Plan” National Key Research and Development Program of China (2017YFC0702403), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2018CDQYJZ0032).

作者简介:黄海静(1974—),女,教授,博士生导师,主要从事城市环境及绿色建筑方向研究,(E-mail)cqhhj@126.com。

and cold winter areas is proposed. The findings of this research serves as essential reference data for advancing the study of outdoor thermal comfort in regions characterized by hot summers and cold winters.

Keywords: outdoor thermal environment; thermal comfort; winter season; physiological equivalent temperature; evaluation model

2018年联合国发布的《可持续发展报告》中提出“建设包容、安全、有能力和可持续的城市和人类住区”。室外空间是人们进行室外活动的主要场所,室外活动有利于人的生理和心理健康,是可持续城市建设的重要内容^[1-2]。室外空间的物理环境特性(包括热、光、声环境等)和社会环境特征影响其空间环境质量^[3],舒适的城市微气候环境吸引人的停留并激发室外活动,而不舒适的微气候环境达到一定阈值时将抑制室外活动的发生^[4-8]。衡量微气候环境舒适度的主要指标为“室外人体热舒适评价指标”,受气象参数(空气温度、相对湿度、风速和热辐射)的影响。热舒适评价指标在城市热环境评价和改善方面应用较多,对促进城市规划和设计起到了积极作用^[9]。

在城市化进程和全球气候变化的背景下,城市中心区比郊区更易受极端天气条件的影响,导致室外空间微气候环境变化更大。城市广场作为城市居民主要的室外活动场所和城市外部空间的核心节点,是室外热舒适研究的重要空间类型之一^[10-11]。在夏热冬冷地区,夏季炎热、冬季湿冷,冬夏两季极端天气较多。现有文献大多关注夏季热环境的影响,却对冬季室外热环境以及活动人群的热舒适状况缺乏研究。城市广场设计也多注重夏季建设而很少考虑冬季使用,影响了冬季广场空间的使用率。文中以夏热冬冷地区的重庆市为例,调查冬季湿冷气候下的城市广场热环境特征,基于人体热舒适评价指标分析室外热舒适感受^[12],通过对热舒适、热感觉与生理等效温度(PET)之间的线性拟合计算,得出冬季室外热舒适范围,为重庆地区建立完整的室外热舒适指标提供参考。

1 实验概述

1.1 实验设置

重庆夏季高温闷热,冬季阴冷潮湿。自然气候条件虽然严苛,但人们喜好室外活动,城市中室外广场分布较多。三峡广场位于重庆市沙坪坝中心区,总面积约8 hm²,绿地率37%,是兼具步行交通、商业娱乐、景观休闲功能的复合型广场,也是居民、游客聚集活动的重要场所。按环境特征不同,广场空间主要有三类:一是植物绿化区的树下空间;二是活动通行区的开敞空间;三是浅水景观区的滨水空间。以不同特征环境对冬季室外热舒适的影响为研究目标,在每类广场空间各设置一处实验观测点:1号测点位于树冠覆盖的树下空间;2号测点位于周围无遮挡的开敞空间;3号测点位于三峡景观园的滨水空间,如图1所示。

1.2 微气候实测

实验采用美国 OREGON SCIENTIFIC WMR300 小型移动气象站及热辐射仪进行气象测试,将仪器架设在1.5 m高的支架上,与人体头颈部高度相近,测得气象数据包括总热辐射、风速、气温和相对湿度,每15 min记录1次。实验在2019年1月11日至13日进行,共3个测试日,每个测试日的实验时间为8:00-19:00。

1.3 问卷调查

在固定观测点5 m范围内,对广场内室外活动人群展开问卷调查。问卷内容包含两部分,第一部分为受访者的基本状态信息,包括年龄、性别、衣着、活动状态等;第二部分为受访者对实时微气候热环境的主观感受投票,包括热舒适投票值(TCV,使用五点标度)和热感觉投票值(TSV,使用七点标度)。同时,记录实时微气候数据,包括空气温度、相对湿度、风速和辐射。

1.4 热舒适评价指标

热舒适评价是依据热舒适标准对所研究的热环境中人的热舒适程度进行评价,分为经验指标和机理指标两大类^[13-14]。“经验性热舒适评价指标”出现较早,未考虑人体热调节机制和环境多因子的综合作用,现应用较少。后期提出的“机理性热舒适评价指标”以肌体热交换为核心,用于不同气候条件下的热环境评价。主



图 1 实验测点分布图

Fig. 1 distribution of test points

要有热舒适指标(PMV)、通用热气候指标(UTCI)、人体局部温差及均质等效温度(EHT)3个室内热环境评价指标和有效温度(T_e)、标准有效温度(SET*)和生理等效温度(PET)3个室外热环境评价指标。其中,PET指标综合考虑人的活动产热、新陈代谢率、服装热阻等个体参数,在室外热环境质量综合评价上具有优势^[15-16](见表1)。因此,文中以PET作为热舒适评价指标。

表 1 常用热舒适评价指标

Table 1 Common thermal comfort evaluation indexes

分类	热舒适指标	定义(指标描述)	规定气象参数	计算公式	夏季热舒适域
经验指标	有效温度 ET* (effective temperature)	通过受试者对不同空气温度、相对湿度、风环境的主观反映得出具有相同热感觉的综合指标。	RH=50%,0.8 clo,1 hmet, w=0.4	$ET^* = T_a + w_{i_m} LR(p_a - 0.5p_{ET^*,s})$	23 °C ≤ ET* ≤ 26 °C
	表观温度 AT (apparent temperature)	与真实空气温度、相对湿度和太阳辐射条件所达到的舒适程度所对应的参照湿度水平下的空气温度值。			
	风冷指数 WCI (wind chill index)	基于裸露皮肤的散热率,用于评价风速与空气温度对人体综合影响的指标。适用于低温环境热舒适度评价。			

续表 1

分类	热舒适指标	定义(指标描述)	规定气象参数	计算公式	夏季热舒适域
	湿球黑球温 WBGT (wet bulb globe temperature)	用以评价人体的平均热负荷,单位为 °C。采用自然湿球温度和黑球温度,露天情况下加测空气干球温度。			
	平均辐射温度 MRT (mean radiant temperature)	一个假想的等温围合面表面温度,它与人体间的辐射换热量等于人体周围实际的非等温围合面与人体间的辐射换热量,考虑了风速、气温、长短波辐射对人体的影响。	1.1 met, 0.6 clo, $T_a = \text{MRT}$, RH=50%, $V=0.5 \text{ m/s}$	$\text{MRT} = \frac{t_g - t_a \left[1 - \frac{1}{1 + 1.13v^{0.6}d^{-0.4}} \right]}{\frac{1}{1 + 1.13v^{0.6}d^{-0.4}}}$	17 °C ≤ MRT ≤ 26 °C
	标准有效温度 SET* (standard effective temperature)	是在 EI* 的基础上考虑不同活动水平和衣服热阻得到的指数。			23 °C ≤ SET* ≤ 26 °C
	室外标准有效温度 OUT-SET*	是在 SET* 基础上考虑太阳辐射强度得到的室外热舒适评价指数。			
	预计热舒适指数 PMV-PPD(predicted mean vote)	代表同一环境中大多数人的平均热舒适程度。通过气象因子和人体活动的代谢率以及衣服热阻来估算。		$\text{PPD} = 100 - 95 \exp\left(-0.03353\text{PMV}^4 - 0.2179\text{PMV}^2 \right)$	PMV: -0.5~0.5 PPD < 10%
机理 指标	生理等效温度 PET (physiological equivalent temperature)	某一室内或室外环境中,人体皮肤温度和体内温度达到典型室内环境同等的热状态所对应的气温。	0.9 clo, 1.4 met, MRT= T_a , $V=0.1 \text{ m/s}$, $P_a=12 \text{ hpa}$		18 °C ≤ PET 23 °C
	通用热气候指数 TCI (universal thermal climate index)	为达到相同舒适水平的标准室内环境所对应的气温。	RH=50%, $T_{\text{min}} = T_a$, $v < 0.15 \text{ m/s}$, $v_p < 20 \text{ hpa}$		
	等效均匀温度 EHT (equivalent homogeneous temperature)	无风封闭的车厢环境中,人体与外界湿热交换率与实际环境相同时的温度。	$V=0 \text{ m/s}$	当 $v \leq 0.1 \text{ m/s}$, $\text{EHT} = t_0 = \frac{t_a + \text{MRT}}{2}$; 当 $> 0.1 \text{ m/s}$, $\text{EHT} = 0.55t_a + 0.45\text{MRT} + \frac{0.24 - 0.75\sqrt{v}}{1 + I} (36.5 - t_a)$	15 °C ≤ EHT ≤ 33 °C
	有效温度 T_a	人体辐射及对流换热量与实际环境相同时的温度。	N/A	当 $\text{MRT} - T_a < 4 \text{ °C}$ or $v < 0.2 \text{ m/s}$, $t_0 = \frac{\text{MRT} + t_a}{2}$ 对其他情况, $t_0 = At_a + (1 - A)\text{MRT}$	24.5 °C ±1.5 °C

2 室外空间冬季热环境分析

空气温度、空气相对湿度、太阳辐射和风速是影响人体热反应的主要气候因素,分析不同广场空间中的热环境特征及微气候变化规律,为下一步热舒适的探讨提供基础。

测试时,同步记录测试点所在的沙坪坝区天气情况。测试期间,沙坪坝区温度为6.7~10.4℃,相对湿度为70%~90%,3天皆为阴天,云层较厚,平均风速变化范围为1~2 m/s。

2.1 空气温度分析

对比分析各测点温度变化折线图,如图2所示。由图可知,各测点的空气温度变化规律相似,最高温度均出现在下午15:00-16:00,与记录的沙坪坝区天气变化情况一致,温度变化范围为8.0~11.6℃,比沙区平均温度略高;广场上3个测点平均温度差异较小。但从变化趋势上看,1号测点树下空间受树冠遮挡影响,温差较小,最高温度也普遍低于其他测点;2号测点开敞空间周围无遮挡,且地表为硬质铺装,受气温变化影响较大,最大温差达3.2℃;3号测点位于水体景观边,温度变化幅度居中。

2.2 相对湿度分析

各测点在实验日中的相对湿度变化如图3所示,3个测点湿度变化趋势相似,但由于3号测点在水体景观边,所以湿度始终高于其他测点;与之相反,2号测点位于硬质铺装的空旷场地,湿度最低。3个实验测试日虽均为多云天,但室外广场空间的相对湿度值仍然高达61.5%~85.3%,均高于人体舒适的空气相对湿度建议值(40%~60%)^[17]。

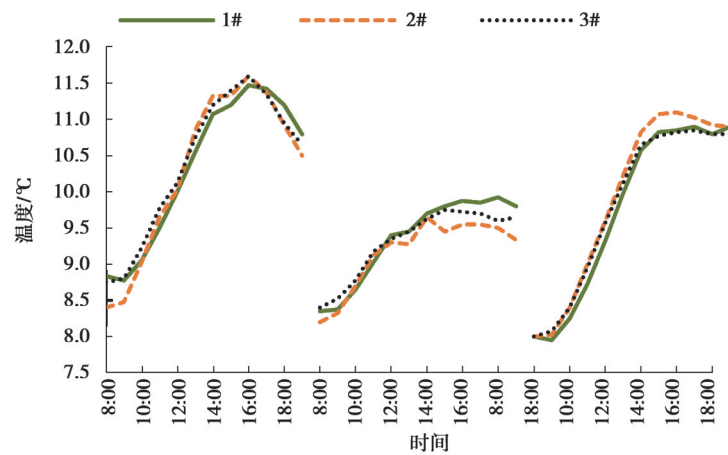


图2 实验日各测点温度

Fig. 2 temperature of test points

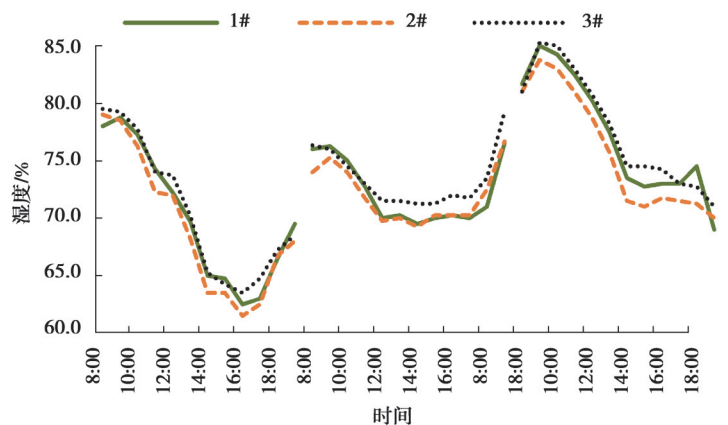


图3 实验日各测点湿度

fig. 3 related humidity of test points

2.3 总热辐射分析

通过太阳辐射获得热量是冬季提高环境空气温度的重要途径。但是,重庆属于光气候V区,年日照时间短,日照率仅为25%~35%,且季节差异明显,夏季日照炽烈、太阳辐射强劲,冬季日照匮乏、太阳辐射微弱。城市所受到的辐射包括太阳短波辐射、太阳长波辐射和周围建筑物及地面发出的长波辐射,因此,在测试时测得总辐射作为研究的主要气候要素之一。实测结果如图4所示,1号测点因树冠对太阳辐射及周围辐射的阻挡,测试期间总热辐射均为0 W/m²。2、3号测点的热辐射变化趋势相同,2号测点开敞空间总热辐射量833.9 W/m²,最高热辐射92.8 W/m²;3号测点水体边总热辐射量最多,达1 094.3 W/m²,且热辐射最高,为97.8 W/m²,说明水面反射及水体高蓄热性会影响周围环境的热辐射。

2.4 风效应分析

在冬季,遮挡寒风来袭,降低风速,是提高室外热舒适度的方法之一。如图5所示,各测点的风速变化无明显规律可循,但开敞空间(2号测点)、滨水空间(3号测点)的风速明显高于树下空间(1号测点),这是因为1号测点的树冠起到挡风的作用。而2号和3号测点在测试期间风速普遍都在1.5 m/s以上,且2号测点最高风速达到2.1 m/s。虽然,各测点风速均不大,但是由于天气阴寒,湿度大(61.5%~85.3%),加上重庆被群山环绕,常年风速较低,在冬季湿冷的气候环境下,风速增加带来的冷感更为明显^[18],吹风感会被主观放大,对人体来说1~2 m/s的适宜风速,会对重庆地区热舒适感受造成较大影响。

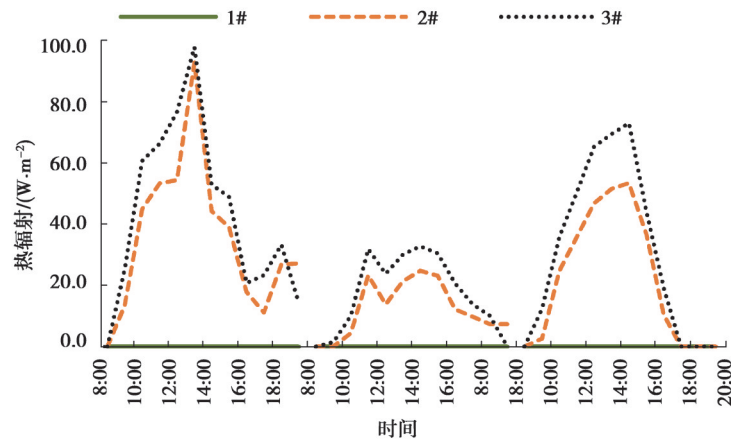


图4 实验日各测点热辐射

Fig. 4 heat radiation of test points

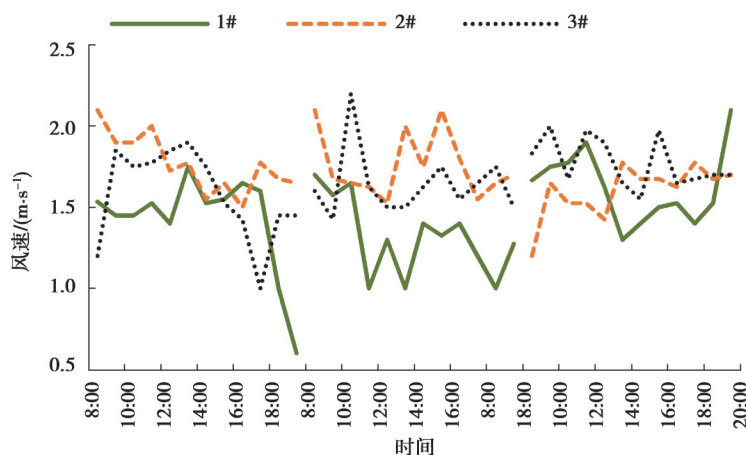


图5 实验日各测点平均风速

fig. 5 average wind speed of test points

3 室外空间冬季热舒适评价

3.1 热舒适主观感受统计分析

本次主观感受问卷调查对象主要是经常在三峡广场进行室外活动的周边居民(约62.4%),另有重庆其他地区居民(约29.1%)和少量外地游客(约8.5%)。发放问卷500份,收回有效问卷484份,其中,1号、2号、3号各测点分别占29.55%、34.30%、36.16%。

针对热舒适的问卷统计结果如图6所示,3个测点的“不舒适”及以下的比例和“舒适”及以上的比例,都在1/3左右;其中,1号、3号测点“舒适”及以上的比例分别为39.16%和36%,2号测点最低,仅24.70%。说明对于冬季室外微气候环境,多数人的热舒适感虽然不高,但也能接受。针对热感受的问卷统计结果如图7所示,3个测点的“适中”及以上的比例都不到1/3;其中,1号、2号测点“适中”及以上的比例分别为27.27%和26.51%,3号测点最低,仅10.28%。说明当人体热感觉偏离“适中”,感觉“稍冷”或“冷”时,也能热感受“中立”或“舒服”。此外,广场树下空间(1号测点)热舒适感及热感受的综合表现最好。

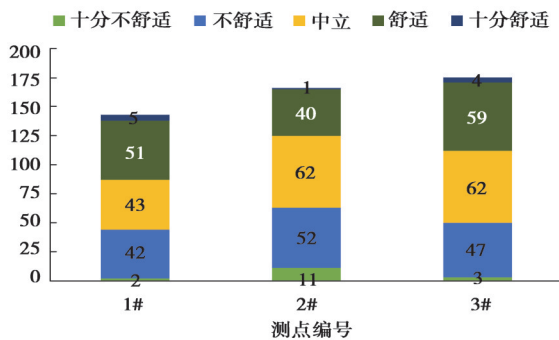


图6 各测点热舒适投票比例

Fig. 6 Thermal comfort vote at each location

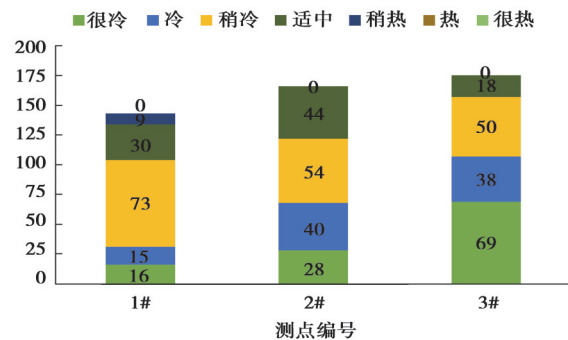


图7 各测点热感受投票比例

Fig. 7 Thermal sensation vote at each location.

3.2 生理等效温度计算与分析

运用RayMan模型软件分别计算3个测点的生理等效温度(PET),计算结果数据统计如图8所示,PET最小值为4.2℃,出现在3号测点;最大值为16.9℃,出现在2号测点。各测点PET最小值相近,但最大值相差较大,1号测点与2号测点差值达到2.4℃。

同时,1号与3号测点平均值相近,为7.8℃,2号测点均值为8.1℃。其中,2号和3号测点所在位置无树荫、无遮挡,长时间受太阳直射,在测试期间PET波动较大;而1号测点位于树荫之下,PET较稳定,集中在5~10℃。由此可见,生理等效温度与太阳辐射密切相关。

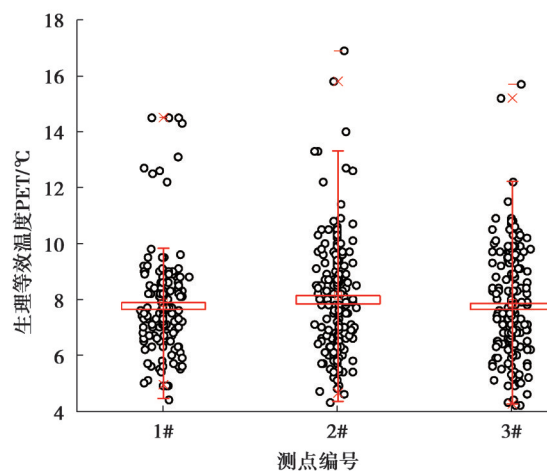


图8 各测点PET分析

Fig. 8 PET of each location.

3.3 热舒适阈值讨论

针对不同测点的TCV(热舒适)、TSV(热感觉)与PET(生理有效温度)之间的关系,研究以PET作为自变量,各测点的投票值TSV和TCV分别作为因变量,对问卷调查投票结果与生理有效温度的变化关系做回归分析。

TCV与PET的拟合曲线如图9所示,回归方程式如下:

$$TCV_{1\#} = 0.409PET - 0.012PET^2 - 3.080 \quad (R^2 = 0.660), \quad (1)$$

$$TCV_{2\#} = 0.476PET - 0.008PET^2 - 4.246 \quad (R^2 = 0.885), \quad (2)$$

$$TCV_{3\#} = 0.433PET - 0.007PET^2 - 3.941 \quad (R^2 = 0.850). \quad (3)$$

对PET对应的热舒适范围进行计算,得到:当TCV=0时,各测点对应的PET值分别为11.04℃、11.05℃和11.07℃;当TCV≥1时,对应的PET热舒适范围分别是11.04±6.71℃、11.05±3.82℃和11.07±3.96℃。分析可见,3个测点的热中性温度值十分接近;其中,1号测点热中性温度值稍低,但其热舒适区间较2号、3号测点有所拓宽。

TSV与PET的拟合曲线如图10所示,回归方程式如下:

$$TSV_{1\#} = 0.436PET - 4.416 \quad (R^2 = 0.678), \quad (4)$$

$$TSV_{2\#} = 0.424PET - 4.748 \quad (R^2 = 0.701), \quad (5)$$

$$TSV_{3\#} = 0.449PET - 5.434 \quad (R^2 = 0.673). \quad (6)$$

同样,当TSV=0时,各测点对应的PET分别为10.12℃、11.19℃和12.10℃;当TSV=-0.5~0.5时,对应的PET热中性范围分别是10.12℃±1.15℃、11.19℃±1.17℃和12.10℃±1.12℃。分析可见,1号测点的热中性温度值最低,说明人的热感觉敏感程度最小,原因是此处有较密集的行道树分布,并设有休闲座椅,且风速较小,一定程度上降低了人们对热感觉的关注度,主观上增加了人体对寒冷的忍耐力,能接受较低的PET为适中状态。

将计算所得TCV和TSV的PET热中性温度及阈值范围与标准PET热舒适范围(18℃≤PET≤23℃)相比较,其最小值小于标准值约7℃。说明在夏热冬冷的重庆地区,室外活动人群通过增加自身的衣服热阻,增加室外活动量,对于冬季室外热舒适感受可适当降低其标准。

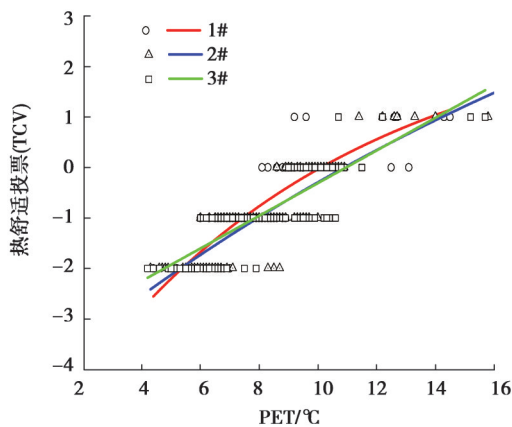


图9 各测点热舒适投票TCV与PET的关系

Fig. 9 The correlations between the thermal comfort voting TCV and PET at each location.

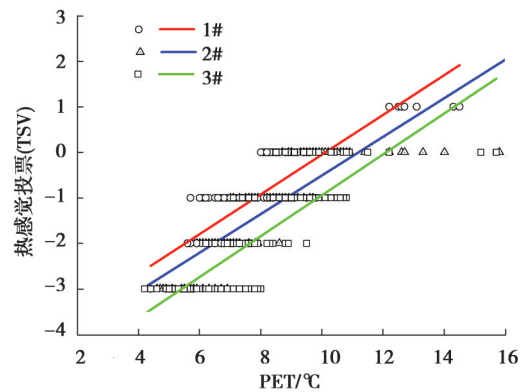


图10 各测点热感觉投票TSV与PET的关系

Fig. 10 The correlation between the thermal sensation voting TSV and PET at each location.

3.4 室外热舒适评价模型

为进一步揭示室外环境的综合舒适度与室外微气候因素之间的关系,采用多元线性回归方法,将温度、湿度、室外风速和总辐射作为自变量,综合舒适度投票值作为因变量,建立重庆地区冬季室外热舒适预测模型,得到关系式如下:

$$OCV = 0.384T_a + 0.01RH + 0.07R - 1.037W - 3.860, \quad (7)$$

式中:OCV为综合舒适度投票值,范围为1~7; T_a 为空气温度,°C;RH为相对湿度; R 为总辐射, W/m^2 ; W 为风速, m/s 。

分析可见,冬季室外温度(T_a)、相对湿度(RH)和总辐射(R)都与热舒适(OCV)呈正相关关系,当室外温度升高,辐射增加时,可有效提升室外热舒适感受;从系数来看,三者对热舒适影响的比重从大到小依次为:温度>太阳辐射>相对湿度,相对湿度的系数值仅为0.01,其变化对室外热舒适感受的影响最小,虽然,相对湿度在模型中系数正相关,但是在夏热冬冷地区,冬夏两季湿度都较高,潮湿水汽从人体中吸收热量^[9],冬季湿度过高会使人体感觉寒冷。在四项变量中,只有冬季室外风速(W)与热舒适(OCV)呈负相关,且风速的系数在4个变量中最大,说明在冬季寒风对热舒适的影响最大,在温度与湿度恒定的环境下,高风速会增加人体与周围环境的换热,因此,冬季室外环境空间应该着重考虑遮挡寒风,同时增加辐射得热。

4 基于热舒适的广场空间设计建议

营造良好的城市外部空间冬季热环境,可促进人们的冬季户外活动,既有益于人们身体健康,又可提升城市宜居性和城市活力。针对夏热冬冷地区冬季室外热环境问题,分析城市广场不同空间环境的微气候特征,研究广场中人体热舒适感受及其评价,结论如下:

1)冬季室外树下空间热舒适感及热感受的综合表现最好。由于树冠可有效遮挡寒风,树下有休闲椅供行人使用,使人们对热感觉的关注度降低,主观上增加了人体对寒冷的忍耐力,能接受较低的PET(10.12 ± 1.15 °C)为适中状态;其次,冬季室外热舒适感受可适当降低其标准。由于人体具有环境适应性,以及冬季增加的衣服热阻和室外活动等原因,冬季室外空间人们的热中性温度偏向各标准规定的下限值;再次,冬季应着重考虑寒风遮挡效应,同时增加太阳辐射得热,以提高室外人体热舒适度。冬季室外温度、相对湿度和太阳辐射都与热舒适呈在正相关,而风速与之呈负相关,对热舒适影响的比重为:风速>温度>太阳辐射>相对湿度。

夏热冬冷地区具有双极端性气候特点,既要求冬季增加太阳辐射、提高空气温度、阻挡寒风和降低湿度,又要求夏季减少太阳辐射、降低空气温度、促进通风和减少湿度。因此,城市广场设计必须综合考虑冬、夏热环境特征和热舒适要求,综合城市广场构成要素及热舒适评价,提出城市广场空间设计建议。

1)绿化系统设计

统筹考虑植物绿化的风屏作用和遮挡太阳辐射的矛盾,合理组织绿化布置。在冬季上风向种植大树冠的常绿乔木,在座椅周围布置能挡风的灌木丛,减少冷风渗透;下风向种植落叶乔木,减少树木对冬季太阳辐射的遮挡,夏季则可起到遮阴作用,以此创造冬夏热环境相对稳定的舒适空间。

2)水体景观设计

水具有较好的蓄热性和明显的增湿效应。广场水体景观宜静态水(如水池)与动态水(如喷泉)相结合布置。冬季以静水景观为主,利用水体吸收太阳辐射,改善局部空气温度稳定性;同时,控制动水景观开放时间,避免形成大量水雾而增加空气湿度,宜在正午太阳辐射较强烈时开放,白天蓄热,晚上放热,弥补夜晚空气降温。夏季动水景观也可分时段开放,在午后最热时段,利用喷泉水与空气的热交换,调节广场微气候。

3)地面铺装设计

一是采取低吸热性材料,夏季防止因地面高温导致过多长波辐射,而影响广场周围环境空气温度;二是采取透水性材料,冬季加速降水自然渗透,防止广场地面雨水滞留或结露,抑制因地表面蒸发而增加空气湿冷感。

4)广场设施设计

在布局上,广场小品设施宜与树木绿化相结合,利用植物遮阳或挡风;在形式上,宜开敞或镂空造型,以落叶植物作为覆盖,夏季可遮阳,冬季可日照;在材质上,综合冬夏两季需求宜采用导热性差、耐久性好的材料,即:木材、塑料>混凝土、石材>金属,提高设施使用的舒适感,吸引人们的驻足停留。

参考文献

- [1] Chen L, Ng E. Outdoor thermal comfort and outdoor activities: a review of research in the past decade[J]. *Cities*, 2012, 29(2): 118-125.
- [2] Yao J W, Yang F, Zhuang Z, et al. The effect of personal and microclimatic variables on outdoor thermal comfort: a field study in a cold season in Lujiazui CBD, Shanghai[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2018, 39: 181-188.
- [3] Boumaraf, Hocine, et al. Thermal comfort in outdoor urban spaces[J]. *Annals of the University of Oradea, Geography Series / Analele Universitatii din Oradea, Seria Geografie*, 2012, 22(2): 279-283.
- [4] Nikolopoulou M, Lykoudis S. Thermal comfort in outdoor urban spaces: analysis across different European countries[J]. *Building and Environment*, 2006, 41(11): 1455-1470.
- [5] Huang J X, Zhou C B, Zhuo Y B, et al. Outdoor thermal environments and activities in open space: an experiment study in humid subtropical climates[J]. *Building and Environment*, 2016, 103: 238-249.
- [6] 陈睿智, 董靓. 基于游憩行为的湿热地区景区夏季微气候舒适度阈值研究: 以成都杜甫草堂为例[J]. *风景园林*, 2015(6): 55-59.
Chen R Z, Dong L. Study of summer microclimate comfort threshold based on recreational behavior in hot-humid scenic spots: A case study of du fu thatched cottage in Chengdu city[J]. *Landscape Architecture*, 2015(6): 55-59.(in Chinese)
- [7] 张琛浩, 程小玲, 苏小超, 等. 地下空间覆土厚度对地面绿化配置及室外热环境的影响研究[J]. *环境科学与管理*, 2020, 45(3): 84-89.
Zhang C H, Cheng X L, Su X C, et al. Influence of underground space overburden thicknesses on ground greening configuration and outdoor thermal environment[J]. *Environmental Science and Management*, 2020, 45(3): 84-89.(in Chinese)
- [8] 王巧雯, 汪磊磊. 基于室外风环境 CFD 模拟的住宅小区设计策略[J]. *新建筑*, 2018(5): 69-71.
Wang Q W, Wang L L. Design strategy of residential quarters based on CFD simulation of outdoor wind environment[J]. *New Architecture*, 2018(5): 69-71.(in Chinese)
- [9] 朱岳梅, 姚杨, 马最良, 等. 室外环境热舒适性模型的建立[J]. *建筑科学*, 2007, 23(6): 1-3.
Zhu Y M, Yao Y, Ma Z L, et al. Development of outdoor thermal comfort model[J]. *Building Science*, 2007, 23(6): 1-3.(in Chinese)
- [10] 刘滨谊, 魏冬雪, 李凌舒. 上海国歌广场热舒适研究[J]. *中国园林*, 2017, 33(4): 5-11.
Liu B Y, Wei D X, Li L S. A study of thermal comfort at Shanghai guo ge square[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2017, 33(4): 5-11.(in Chinese)
- [11] 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(4): 18-22.
Zhang D S, Wang Z. Micro-climate effect and human thermal comfort of square canopy in dense habitat: a case study of Shanghai knowledge and innovation community square[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2017, 33(4): 18-22.(in Chinese)
- [12] Ketterer C, Matzarakis A. Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 122: 78-88.
- [13] Aynsley R, Spruill M. Thermal comfort models for outdoor thermal comfort in warm humid climates and probabilities of low wind speeds[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990, 36: 481-488.
- [14] 吴志丰, 陈利顶. 热舒适度评价与城市热环境研究: 现状、特点与展望[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(5): 1364-1371.
Wu Z F, Chen L D. Thermal comfort assessment and urban thermal environment research: review and prospective[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(5): 1364-1371.(in Chinese)
- [15] 薛思寒. 基于气候适应性的岭南庭园空间要素布局模式研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
Xue S H. Study on layout mode of spatial elements of Lingnan garden based on climate adaptability[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [16] 陈卓伦. 绿化体系对湿热地区建筑组团室外热环境影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
Chen Z L. Study on the influence of greening system on outdoor thermal environment of building groups in hot and humid areas[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [17] 王春. 空气湿度对人体热舒适的影响[J]. *暖通空调*, 2004, 34(12): 43-45, 65.
Wang C. Impact of air humidity on thermal comfort[J]. *Hv & Ac*, 2004, 34(12): 43-45, 65.(in Chinese)
- [18] 陈睿智, 杨青娟. 冬季湿冷气候城市户外休憩的微气候适应性研究: 以成都市老人为例[J]. *风景园林*, 2018, 25(10): 16-20.
Chen R Z, Yang Q J. Microclimate adaptability for outdoor recreation in humid and cold cities in winter: a case study of the elderly in Chengdu city[J]. *Landscape Architecture*, 2018, 25(10): 16-20.(in Chinese)
- [19] 刘伟毅. 夏热冬冷地区城市广场气候适应性设计策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
Liu W Y. Study on climate adaptability design strategy of city square in hot summer and cold winter area[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)