

文章编号: 1671-6612 (2026) 03-335-09

夏季校园不同活动强度的室外热舒适研究

张静怡¹ 蒋 婧¹ 周子硕¹ 姜之涛¹ 马 超²

(1. 西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710048;

2. 中建科技集团有限公司 北京 100070)

【摘 要】 校园室外活动空间的热舒适性直接影响使用效率与学生生活品质。为探究高校学生夏季在校园室外空间中进行不同强度活动时的热舒适性, 研究在西安市某大学校园内, 选取不同天空可视因子 (*SVF*) 的九个空间, 通过主观问卷和客观环境测量, 对比静态活动、轻强度、中强度和高强度四种活动强度下的热感受。结果表明: 随活动强度升高, 受试者偏好较低空气温度和较高风速的比例上升, 无不适症状者比例下降。中性生理等效温度 (*PET*) 值随活动强度增加而降低, 静态活动、轻强度、中强度和高强度活动下的中性 *PET* 分别为 27.5℃、26.3℃、24.7℃、23.3℃, 中性 *PET* 范围也相应扩大。研究结论可为校园空间热环境优化与节能设计提供参考。

【关键词】 活动强度; 室外热舒适; 热感觉; 生理等效温度

中图分类号 TU83 文献标志码 A

Research on Outdoor Thermal Comfort of Campus Activities with Different Intensity in Summer

Zhang Jingyi¹ Jiang Jing¹ Zhou Zishuo¹ Jiang Zhitao¹ Ma Chao²

(1. School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048;

2. China Construction Science and Technology Group Co., Ltd, Beijing, 100070)

【Abstract】 The thermal comfort of outdoor activity spaces on campus directly affects the efficiency of use and the quality of student life. To investigate the thermal comfort of college students during summer when engaging in activities of different intensities in outdoor spaces on campus, this study selected nine spaces with different sky visibility factors (*SVF*) in a university campus in Xi'an. Through subjective questionnaires and objective environmental measurements, the thermal sensation was compared under four activity intensities: static activity, light intensity, medium intensity, and high intensity. The results showed that as the activity intensity increased, the proportion of subjects who preferred lower air temperatures and higher wind speeds increased, while the proportion of subjects without discomfort symptoms decreased. The neutral physiological equivalent temperature (*PET*) value decreased with increasing activity intensity. The neutral *PET* values under static activity, light intensity, medium intensity, and high-intensity activity were 27.5℃, 26.3℃, 24.7℃, and 23.3℃, respectively, and the range of neutral *PET* also expanded accordingly. The research conclusion can provide reference for optimizing the thermal environment and energy-saving design of campus space.

【Keywords】 Activity intensity; Outdoor thermal comfort; Thermal sensation; Physiological equivalent temperature

0 引言

大学校园的室外空间是师生进行交流、学习、

休闲和运动的重要场所, 其热舒适性直接影响使用效率与学生生活品质^[1]。然而, 当前校园规划与设

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (51908438)

作者简介: 张静怡 (2001-), 女, 在读研究生, E-mail: jingkook2022@163.com

通讯作者: 蒋 婧 (1989-), 女, 博士, 副教授, E-mail: jiangjing@xpu.edu.cn

收稿日期: 2025-09-30

计往往更强调建筑与景观的空间形态与仪式感,而对户外环境舒适性的关注仍显不足。良好的室外热环境能够有效促进学生更多地参与户外活动和社交互动,对维护其身心健康具有积极意义^[2]。因此,开展校园室外空间热舒适研究具有重要的意义。

室外热舒适性的影响因素涉及多个方面,主要包括气象参数、环境特征与个人因素。这些因素之间相互作用,共同决定了室外环境的热舒适水平。气象参数作为对人体产生直接影响的要素,是其中最为直接的热舒适性影响因素。围绕气象因素对人体舒适性的作用机制,国内外学者已开展了广泛研究。罗薇等人^[3]发现,当受试者对室外环境的空气质量更满意时,他们对环境的热感觉倾向于更热的投票。Xu 等人^[4]的研究表明,在夏季高温热浪期间,高温和强太阳辐射以及地面过热是造成人们不舒适的主要原因。李砚晗等人^[5]的研究发现,空气温度是过渡季老旧住区居民最敏感的热环境参数,其次是太阳辐射。Zhu 等人^[6]也发现空气温度和太阳辐射对室外热感觉影响较大,风速对室外热感觉影响较小。P Kumar 和 A Sharma^[7]也有相同的观点。

天空可视因子 (Sky View Factor, *SVF*) 是表征空间遮蔽度的关键几何参数,与热环境关联显著^[8]。Niu 等人^[9]发现中低 *SVF* 的户外空间有利于夏季进行体力活动,并且在户外活动期间,热症状出现比例与 *SVF* 呈正相关。陈家硕等人^[10]发现遮荫度越高,样地内空气温度越低,相对湿度越高。Sayed 等人^[11]的研究表明,在树木密度较低和 *SVF* 较高的开放空间中空气温度较高,通过增加树木密度可以使平均温度降低 0.7℃。Shata 等人^[12]的研究表明在夏季, *SVF* 对平均辐射温度和生理等效温度 (Physiological Equivalent Temperature, *PET*) 有显著影响。

人们在户外的活动涉及不同的活动强度和新陈代谢率。目前涉及代谢率的热舒适研究主要集中在室内环境^[13,14],但也有部分学者针对不同活动强度下的室外热舒适进行了研究。蒋毅等人^[15]发现,夏季随着人行空间阴影率的变化,行人的热感觉变化比骑行者更敏感。Fang 等人^[16]的研究发现炎热环境下气温对户外步行训练的大学生群体的热舒适性的影响最显著。董晓涵等人^[17]以健身步道为研究对象,发现冬季随活动强度的增加,人群对空气温度的偏好变化更明显。赵晓龙等人^[18]以城市公园

为研究区域,发现春季随着活动强度的增加,人们对活动场地的温湿需求也越强。但目前研究大多只考虑了部分强度的活动水平,并未将多种强度的活动考虑在内,且目前针对夏季不同活动强度下的室外热舒适研究较少。

本研究在西安市某大学校园的教学科研区、师生生活区及文体活动区,根据 *SVF* 的不同,共选择九个空间作为测点,同时设置四种活动强度,并结合主观问卷调查和客观环境测量,探究学生们在不同校园室外空间中进行不同强度活动时的热舒适性,相关结论可为提高校园活动空间的舒适性提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究地点与时间

本研究的测试于 2025 年 5~6 月在西安市某大学校园内进行,每日测试的具体时间为 9:00~12:00 和 13:30~17:30。在校园的教学科研区、师生生活区及文体活动区,根据 *SVF* 的不同,共选择九个具有典型性且人群活动频繁的户外空间作为测点:教学楼林荫路 (A1)、图书馆旁座椅处 (A2)、学院楼中庭 (A3)、宿舍楼间林荫路 (B1)、澡堂前空地 (B2)、快递站前空地 (B3)、体育场健身器材处 (C1)、体育场座椅处 (C2)、体育场阶梯处 (C3)。各测点实景图及鱼眼照片如图 1 所示。

在 *SVF* 测算方面,本研究使用鱼镜头在各测点距地面 1.5 米高度处拍摄天空鱼眼照片,经 Adobe Photoshop 软件统一裁剪并保存为 .bmp 格式后,导入 RayMan 软件进行天空部分剔除与黑白化处理,最终通过 RayMan 软件计算得到各测点的 *SVF* 值。该方法可以精确表示天空的真实情况,是用来测算 *SVF* 的一种普遍方法^[19],满足本研究对 *SVF* 值的精度要求。此方法的基本原理为:将鱼眼照片划分为多个等宽的同心圆环,然后将每个圆环中天空所占的比率相加,即为 *SVF* 值。具体计算公式如式 (1) 所示^[19]。

$$SVF = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \sin \left[\frac{\pi \left(i - \frac{1}{2} \right)}{2n} \right] \cos \left[\frac{\pi \left(i - \frac{1}{2} \right)}{2n} \right] \alpha_i \quad (1)$$

式中: n 为鱼眼照片被划分的圆环总数; i 为圆环指数; α_i 为第 i 个圆环中天空所占的角宽度。

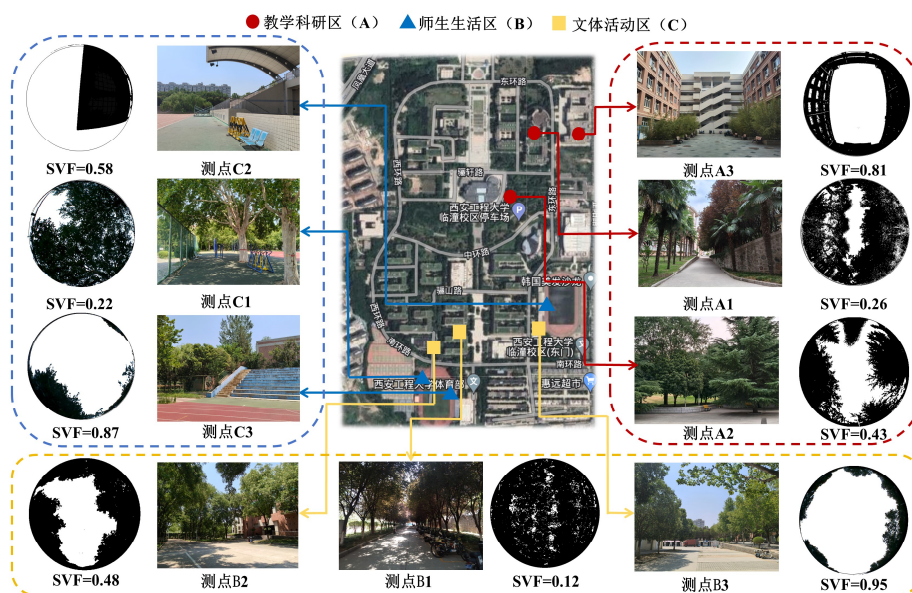


图 1 各测点实景图及鱼眼照片

Fig.1 Realistic pictures and fisheye photos of each measuring point

1.2 受试者及服装热阻

参与测试的受试大学生均自愿加入, 无严重疾病史、行为障碍及神经/精神类疾病, 且均在西安生活一年以上, 已熟悉当地气候。本研究的测试共有 80 名学生 (男生、女生各 40 名) 参与, 男生年龄 (24.3 ± 0.7) 岁、身高 (175.4 ± 3.5) cm、体重 (72.4 ± 5.2) kg; 女生年龄 (23.7 ± 0.6) 岁、身高 (162.2 ± 2.5) cm、体重 (52.5 ± 4.1) kg。共收集有效问卷 712 份。测试期间对受试者的服装进行了统一 (总热阻值为 0.22clo): 白色短袖、黑色短裤、白色短袜、运动鞋和内衣裤, 以消除个体间服饰差异的影响^[20]。

1.3 活动强度选择

根据《体育活动纲要》^[21]将不同的体力活动分为四种代谢当量水平 (Metabolic Equivalent of Task, MET): 静态活动 ($1.0 \sim 1.5\text{MET}$)、轻强度 ($1.6 \sim 2.9\text{MET}$)、中强度 ($3.0 \sim 5.9\text{MET}$) 和高强度 ($\geq 6.0\text{MET}$), 选择静坐 (1.0MET)、慢走 ($0.89 \sim 1.07\text{m/s}$, 2.8MET)、快走 ($1.56 \sim 1.74\text{m/s}$, 4.8MET)、跳绳 (<100 跳/min, 8.3MET) 四种体力活动内容分别代表四种活动强度进行现场测试。在测试中利用节拍器分别将慢走、快走控制为 1m/s 、 1.65m/s , 跳绳个数控制为 80 跳/min。

1.4 测试流程

测试均在晴天进行。每组测试共需 50 分钟, 每组测试 4 人, 随机选择两男两女, 分别对应四种活动强度。由于人体的热感觉在代谢改变后 15~20 分钟内趋于稳定^[22], 因此受试者先静坐 20 分钟以适应当前的测试环境, 随后利用 5 分钟填写主观评价问卷, 在第 25 分钟时开始在测量仪器安装的 20 米范围内进行 20 分钟的活动。最后 5 分钟再次填写主观评价问卷。测试期间持续对客观环境参数进行监测。测试流程如图 2 所示。

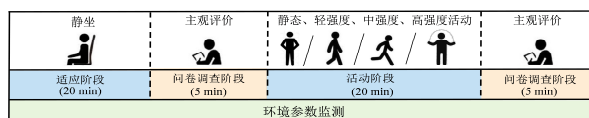


图 2 测试流程

Fig.2 Test process

1.5 主观问卷调查

主观问卷主要包括三个部分。第一部分为受试者的基本信息, 包括性别、年龄、体重和身高; 第二部分为受试者的主观评价, 包括热感觉投票、相对湿度感觉投票、风速感觉投票、空气温度偏好投票、相对湿度偏好投票以及风速偏好投票, 各主观评价标尺如表 1 所示; 第三部分为热症状调查, 主要询问受试者是否出现头疼、头晕、恶心、多汗、胸闷、烦躁不安、心跳加快、呼吸困难等不适感觉。

表 1 主观评价标尺

Table 1 Subjective evaluation criteria

类型	标尺
热感觉	冷 (-3)、凉 (-2)、稍凉 (-1)、适中 (0)、 稍暖 (+1)、暖 (+2)、热 (+3)
相对湿度 感觉	很干燥 (-2)、干燥 (-1)、适中 (0)、潮 湿 (+1)、很潮湿 (+2)
风速感觉	无风 (-2)、较小 (-1)、适中 (0)、较大 (+1)、太大 (+2)
空气温度 偏好	降低 (-1)、不变 (0)、升高 (+1)
相对湿度 偏好	降低 (-1)、不变 (0)、升高 (+1)
风速偏好	变小 (-1)、不变 (0)、变大 (+1)

1.6 客观环境测量

客观环境参数采用以下仪器进行测量: 温湿度自记仪 (WSZY-1A) 用于测量空气温度和相对湿度, 其温度量程为 -40~100℃ (精度±0.3℃), 湿度量程为 0~100% (精度±3%); 万向风速大气压力记录仪 (WFDYZY-1) 用于测量风速, 量程为 0.05~30m/s (精度±(4%实测值+0.1) m/s); 热力指数计 (AZ8778) 用于测量黑球温度, 量程为 0~80℃ (精度±1℃)。本研究遵循标准测量规范^[23], 所有仪器在安装前均已完成校准。安装时, 统一将仪器置于距地面 1.5 米的高度。为保障数据稳定可靠, 仪器提前布置于测点, 静置至少 20 分钟, 待其与周围环境充分平衡后再开始正式测试。测试过程中, 所有环境参数均按每分钟一次的频率连续自动记录。

1.7 热舒适评价指标计算

PET 是基于人体热量平衡模型提出的综合评价指标^[24], 该指标已被广泛应用于多地的室外热环

境评估研究^[25-28], 是可靠的数据分析处理手段。因此本研究选用 PET 作为评价指标。

采用 SPSS27.0 数据分析软件对采集的主观问卷数据和客观环境参数数据进行统计检验和数据分析。采用 RayMan 软件计算 PET, 计算输入的初始条件包括四种气象参数 (空气温度、相对湿度、风速和平均辐射温度) 以及受试者的年龄、性别、体重、身高、活动强度和服装热阻。其中, 空气温度、相对湿度和风速通过实测直接得到, 而平均辐射温度 (T_{mrt}) 根据 ISO 7726^[23]采用黑球温度测算法计算, 计算公式如式 (2) 所示。

$$T_{mrt} = [(T_g + 273)^4 + \frac{1.10 \times 10^8 V a^{0.6}}{\varepsilon D^{0.4}} (T_g - T_a)^{\frac{1}{4}} - 273] \quad (2)$$

式中: T_g 为黑球温度; T_a 为空气温度; Va 为风速; ε 为黑球发射率, 0.95; D 为球体直径, 0.05m。

2 结果与讨论

2.1 室外热环境

各测点环境参数测量结果如表 2 所示。可以看出, 空气温度、黑球温度与平均辐射温度在 A3、B3、C3 测点均较高, 这些测点 SVF 大, 太阳辐射直接输入多, 下垫面吸热后热量难以散失, 易累积升温; 相反, SVF 小的 B1、A1、C1 测点由于建筑、植被遮挡多, 太阳辐射受阻挡, 热量输入少, 因此空气温度、黑球温度与平均辐射温度较小。风速的最大值也出现在 A3、B3、C3, 这些测点 SVF 大, 空气流动受阻挡少, 易形成高速风。相对湿度的最大值出现在 A1、B1、C1 这些 SVF 小的区域, 植被、建筑的遮挡使通风弱, 水汽蒸发后难以扩散; 相对湿度的最小值出现在 A3、B3、C3, 这些测点 SVF 大, 通风强, 水汽易扩散, 湿度难以维持。

表 2 各测点环境参数测量结果

Table 2 Measurement results of environmental parameters at each measuring point

		A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
空气温度/℃	最大值	37.1	37.4	38.3	36.5	37.5	38.8	36.7	37.8	38.6
	最小值	23.8	24.2	24.4	23.3	24.3	24.7	23.5	24.5	24.6
	平均值	30.2	31.5	32.9	29.6	31.7	33.4	29.9	32.3	33.1
相对湿度/%	最大值	83.7	83.2	82.4	84.8	82.1	80.3	84.2	82.2	81.4
	最小值	23.2	22.9	21.3	24.4	22.3	19.8	23.9	21.5	20.2
	平均值	51.5	47.3	44.7	52.2	46.5	43.1	51.8	45.3	43.8

续表 2 各测点环境参数测量结果

Table 2 Measurement results of environmental parameters at each measuring point

		A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
风速/(m/s)	最大值	2.5	2.8	4.1	2.2	3.2	4.4	2.3	3.5	4.4
	最小值	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均值	0.6	0.7	1.1	0.3	0.7	1.4	0.5	0.9	1.2
黑球温度/℃	最大值	38.5	42.8	50.6	35.3	44.7	51.6	37.3	45.4	51.5
	最小值	25.1	25.7	28.8	22.6	26.3	30.5	24.2	26.7	30.3
	平均值	33.2	34.1	42.0	31.3	34.6	42.4	32.2	35.5	42.1
平均辐射温度/℃	最大值	45.9	69.7	112.0	28.8	81.2	116.7	40.4	85.2	117.0
	最小值	25.1	25.7	28.8	22.6	26.3	30.5	24.2	26.7	30.3
	平均值	40.3	40.8	68.1	34.1	42.0	71.7	37.2	44.9	69.2

2.2 室外热舒适

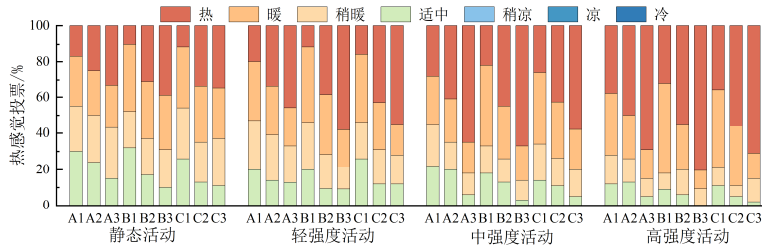
2.2.1 微气候感觉

参与者在不同活动强度下的微气候感觉投票情况如图 3 所示。可以看出：对于热感觉，所有活动强度下均无“稍凉”等偏冷感觉。“热”、“暖”、“稍暖”的比例随活动强度的升高整体呈上升趋势。并且每种活动强度下，*S1F* 大的测点感到“热”的比例均最大，这说明即便人体活动强度保持一致，其所处的空间环境差异也会导致热感觉评价存在显著不同。*S1F* 大的测点由于吸收了充沛的太阳辐射，加之大面积硬质铺装对长波辐射的高反射率，致使该空间的空气温度与平均辐射温度均显著

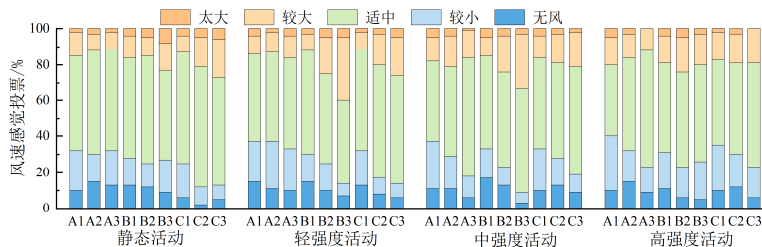
上升，增加了热不适的风险。

对于风速感觉，不同测点的不同活动强度下“适中”均占比较大，说明受试者对风速的接受度较高。另一方面，随着活动强度的升高，“较大”、“太大”的占比增大，“较小”、“无风”的占比减小，这是由于人体在进行高强度活动时需更大的风速散热。

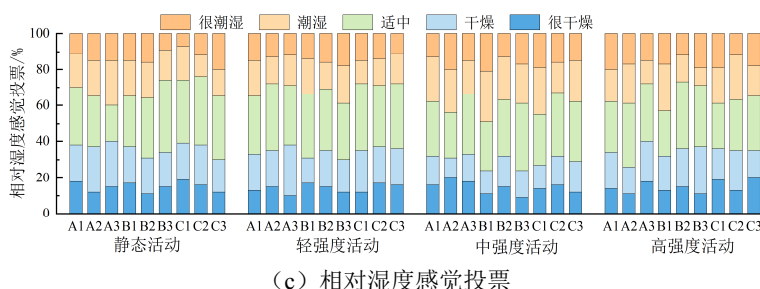
对于相对湿度感觉，“适中”在各活动强度下均占比较大。其他感觉的占比随活动强度的升高有所波动但相对均衡，这表明与空气温度和风速相比，相对湿度对人体热舒适感的影响不如前两者显著。



(a) 热感觉投票



(b) 风速感觉投票



(c) 相对湿度感觉投票

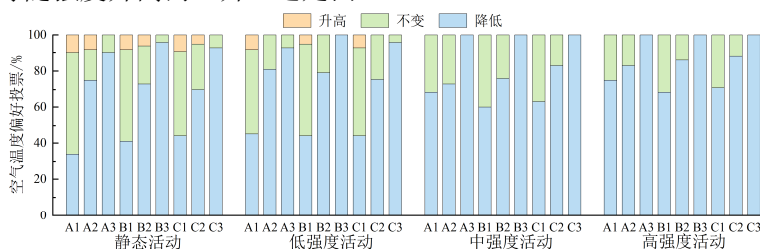
图 3 不同活动强度下的微气候感觉投票情况

Fig.3 Microclimate perception voting status under different activity intensity

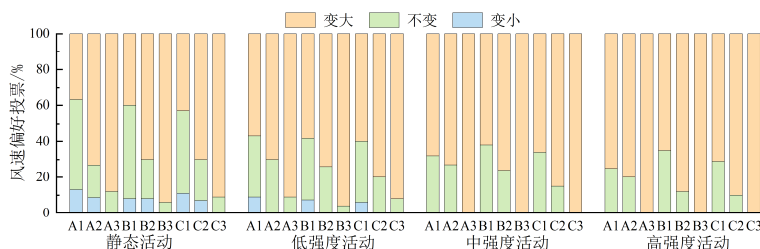
2.2.2 微气候偏好

参与者在不同活动强度下的微气候偏好投票情况如图 4 所示。可以看出：对于空气温度偏好，随活动强度升高，“降低”占比上升，“升高”占比下降，体现活动产热对降温需求的增强。对于风速偏好，“变大”偏好随强度升高而上升，这是由

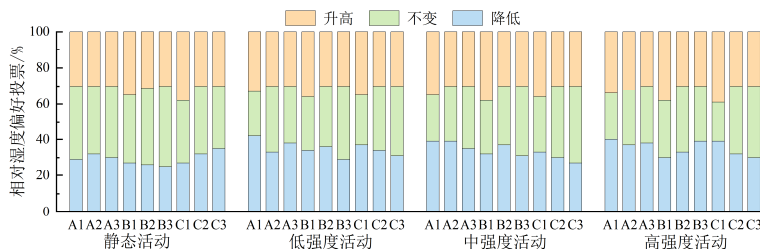
于高强度活动需更强风速散热。对于相对湿度偏好，“降低”、“不变”、“升高”的占比随活动强度的升高有所波动但相对均衡，这也表明相比于空气温度和风速，相对湿度对于热舒适的影响并不显著。



(a) 空气温度偏好投票



(b) 风速偏好投票



(c) 相对湿度偏好投票

图 4 不同活动强度下的微气候偏好投票情况

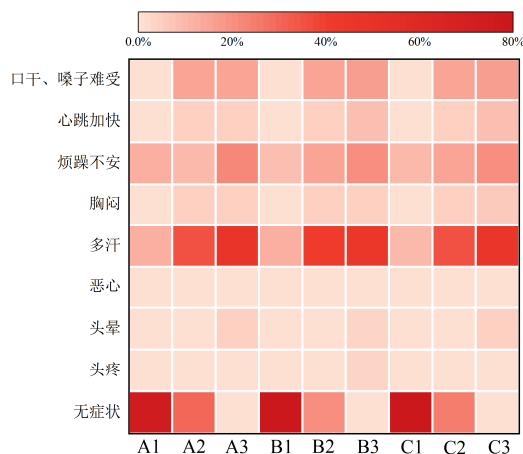
Fig.4 Microclimate preference voting under different activity intensities

2.3 不适症状

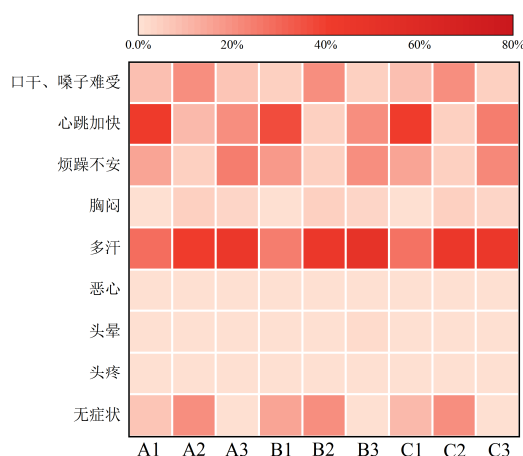
参与者在不同活动强度下的不适症状比例情况如图 5 所示。可以看出：“无症状”的占比随活动强度的升高而降低，高强度活动时，没有受试者

表示“无症状”。每种活动强度下，每个测点均出现了一定比例的不适症状。静态活动下，“无症状”和“多汗”的比例较高，而其他三种活动强度下，“多汗”和“心跳加快”的比例较高。这是由于静

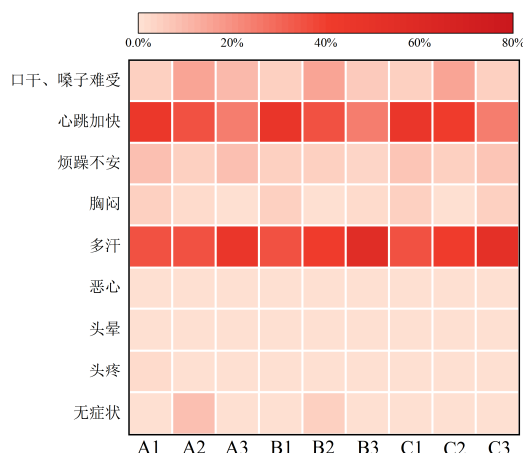
态活动时人体代谢率低、对微气候容忍度高, 而高强度活动时人体因产热和耗氧多, 易引发不适。此外, 还可以看出, 在每种活动强度下, 同一功能区中, SVF 较大的测点, “多汗”的热症状比例明显高于 SVF 较小的测点。



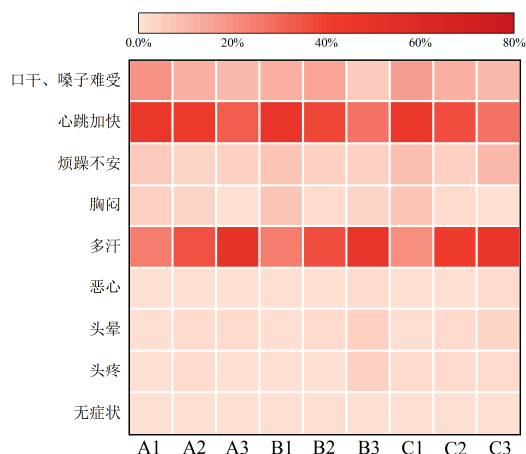
(a) 静态活动



(b) 轻强度活动



(c) 中强度活动



(d) 高强度活动

图 5 不同活动强度下的不适症状比例

Fig.5 Proportion of discomfort symptoms under different activity intensities

2.4 热基准

通过 RayMan 软件计算得到 PET , 计算每 1°C PET 的加权平均热感觉投票 (Mean Thermal Sensation Vote, $MTSV$)。将 PET 与 $MTSV$ 做回归分析, 建立不同活动强度下室外热舒适指标 PET 与 $MTSV$ 的回归模型公式, 如式 (3) 所示。可以看出, 四种活动强度下的回归模型公式的 R^2 全部大于 0.7。该结果表明, 无论活动强度如何, PET 均与 $MTSV$ 呈强线性正关联, 具体表现为 $MTSV$ 随 PET 增长而增大。除此之外, 回归模型公式斜率的下降表明随着活动强度的升高, 热感觉的变化速率趋于平缓, 反映出个体对热环境变化的敏感度有所下降。

$$\begin{cases} \text{静态: } MTSV = 0.1223PET - 3.3673 (R^2 = 0.8686) \\ \text{轻强度: } MTSV = 0.1171PET - 3.0786 (R^2 = 0.8541) \\ \text{中强度: } MTSV = 0.1123PET - 2.7747 (R^2 = 0.8744) \\ \text{高强度: } MTSV = 0.1107PET - 2.5812 (R^2 = 0.8735) \end{cases} \quad (3)$$

根据回归模型公式得到不同活动强度下的中性 PET 和中性 PET 范围, 如表 3 所示。其中, 中性温度是指人体处于热中性状态, 即没有冷或热感觉时的环境温度。 $MTSV=0$ 所对应的即为中性 PET , $MTSV=-0.5\sim 0.5$ 所对应的即为中性 PET 范围^[29]。可以看出: 中性 PET 随活动强度的升高持续降低, 这是由于活动强度逐渐升高时, 人体产热增加, 需要更低的温度才能感到舒适。中性 PET 范围随活动强度的升高持续扩大, 低强度时人体对环境温度

适应区间大,高强度因产热差异大,需更宽区间平衡热舒适。

本研究得到的静态活动下的中性 *PET* (27.5℃) 和中性 *PET* 范围 (23.5~31.6℃) 与另一项在西安高校进行的研究^[30]得到的值接近,但与另一项在长沙进行的研究^[31]得到的中性 *PET* (18.6℃) 和中性 *PET* 范围 (15.0~22.0℃) 相差较大,导致该差异的原因可能是由于长沙的研究数据来源于公园环境中常住居民全年的热感觉投票,覆盖了多个季节;而本研究的调查则集中于夏季,并以对本地热环境具有充分适应性与心理预期的高校学生为研究对象。

表 3 各不同活动强度下的中性 *PET* 和中性 *PET* 范围

Table 3 Neutral *PET* and neutral *PET* range under different activity intensities

活动强度	中性 <i>PET</i> /℃	中性 <i>PET</i> 范围/℃
静态	27.5	23.5~31.6
轻强度	26.3	22.0~30.6
中强度	24.7	20.3~29.2
高强度	23.3	18.8~27.8

3 结论

本文在西安市某大学校园选择了九个 *SVF* 不同的空间作为测点,设置了四种活动强度进行主观问卷调查和客观环境测量,以探究学生们在校园室外空间中进行不同强度活动时的热舒适性。主要结论如下:

(1)在本研究中,*SVF*>0.80 的为高 *SVF* 区域,这些区域易出现高温、低湿、高辐射温度;*SVF*<0.30 的为低 *SVF* 区域,这些区域靠遮挡削弱辐射,形成相对凉爽、高湿环境。因此在校园规划与景观设计中,应重视空间遮荫与微气候调节。对于 *SVF* 较高的区域可通过增设乔木、廊架或遮阳设施降低辐射温度、缓解高温;对于 *SVF* 较低的区域则应适度加强通风,避免湿度过高带来闷热感,从而实现热环境的差异化调控。

(2)在不同活动强度下,空间 *SVF* 越大,感觉“热”的比例越高。随着活动强度增加,更多人偏好较低空气温度和较高风速,且无不舒适症状者减少。相对湿度对热舒适的影响弱于空气温度和风速。静态活动时“无症状”和“多汗”较多,其余

强度下“多汗”和“心跳加快”更常见。因此在校园室外空间设计中,应注重通过植被与遮荫优化 *SVF* 分布,在高强度活动较集中的区域加强遮阳与通风,静态活动较集中的区域注重防风与微气候营造。

(3)中性 *PET* 随活动强度升高而降低;中性 *PET* 范围随活动强度升高持续扩大。四种活动强度下的中性 *PET* 依次为 27.5℃、26.3℃、24.7℃、23.3℃,中性 *PET* 范围依次为 23.5~31.6℃、22.0~30.6℃、20.3~29.2℃、18.8~27.8℃。此结论可作为校园室外热环境评价与优化设计的科学依据,促进构建更健康、可持续的校园室外环境。

参考文献:

- [1] 黄泽峰.基于舒适度的绵阳地区大学校园室外活动空间设计策略研究[D].绵阳:西南科技大学,2020.
- [2] Lai D, Liu W, Gan 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.
- [3] 罗薇,殷颖迪,井文强,等.感知空气品质对户外空间室外热舒适的影响[J].制冷与空调,2025,39(2):224-232.
- [4] XU T, YAO R, DU C, et al. Outdoor thermal perception and heatwave adaptation effects in summer - A case study of a humid subtropical city in China[J]. URBAN CLIMATE, 2023,52:101724.
- [5] 李砚晗,李琼.广州老旧住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(2):71-81.
- [6] ZHU Z, LIANG J, SUN C, et al. Summer outdoor thermal comfort in urban commercial pedestrian streets in severe cold regions of China[J]. Sustainability, 2020, 12(5):1876.
- [7] KUMAR P, SHARMA A. Assessing the thermal comfort conditions in open spaces: a transversal field survey on the university campus in India[J]. International Journal of Built Environment and Sustainability, 2021,8(3):77-92.
- [8] ZHANG J, GOU Z, LU Y, et al. The impact of sky view factor on thermal environments in urban parks in a subtropical coastal city of Australia[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2019,44.
- [9] NIU J, HONG B, GENG Y, et al. Summertime

- physiological and thermal responses among activity levels in campus outdoor spaces in a humid subtropical city[J]. *Science of The Total Environment*, 2020,728: 138757.
- [10] 陈家硕,荣立苹,高玉福,等.不同遮荫环境的温湿效应及其对人体舒适度的影响[J].*西北林学院学报*,2022,37(3):254-260,274.
- [11] ABDALLAH A S H, HUSSEIN S W, NAYEL M. The impact of outdoor shading strategies on student thermal comfort in open spaces between education building[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020,58:102124.
- [12] SHATA R O, MAHMOUD A H, FAHMY M. Correlating the sky view factor with the pedestrian thermal environment in a hot arid university campus plaza[J]. *Sustainability*, 2021,13(2):468.
- [13] WANG H, HU S. Experimental study on thermal sensation of people in moderate activities[J]. *Building and Environment*, 2016,100:127-134.
- [14] ZHANG Y, ZHOU X, ZHENG Z, et al. Experimental investigation into the effects of different metabolic rates of body movement on thermal comfort[J]. *Building and Environment*, 2020,168:106489.
- [15] 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[J].*土木与环境工程学报(中英文)*,2020,42(3): 174-182.
- [16] FANG Z, XU X, ZHOU X, et al. Investigation into the thermal comfort of university students conducting outdoor training[J]. *Building and Environment*, 2019,149:26-38.
- [17] 董晓涵,王岩,谢榕,等.天津市公共健身步道冬季热环境特性研究[J].*建筑科学*,2023,39(12):61-67,77.
- [18] 赵晓龙,卞晴,侯韞婧,等.寒地城市公园春季休闲体力活动水平与微气候热舒适关联研究[J].*中国园林*,2019,35(4):80-85.
- [19] Gál T M, Rzepa M, Gromek B, et al. Comparison between sky view factor values computed by two different methods in an urban environment[J]. *Acta Climatologica et chorologica*, 2007,40:17-26.
- [20] ASHRAE 55-2023, Thermal Environment Conditions for Human Occupancy[S]. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 2023.
- [21] Herrmann S D, Willis E A, Ainsworth B E. The 2024 Compendium of Physical Activities and its expansion[J]. *Journal of sport and health science*, 2024,13(1):1-2.
- [22] Goto T, Toftum J, de Dear R, et al. Thermal sensation and thermal physiological responses to metabolic step-changes[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2006,50(5):323-332.
- [23] ISO 7726, Ergonomics of the thermal environment-Instruments for measuring physical quantities[S]. International Organization for Standardization, Geneva, 1998.
- [24] HÖPPE P. Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort[J]. *Energy and buildings*, 2002,34(6):661-665.
- [25] 金虹,乔梁,崔鹏.基于户外活动的严寒地区校园冬季热舒适度研究[J].*建筑科学*,2021,37(8):87-92,103.
- [26] CAI X, SHAN X, ZHOU Z, et al. Investigation and prediction of outdoor thermal comfort under different protection and activity intensity conditions in summer in Wuhan[J]. *Sustainability*, 2024,16(9).
- [27] 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(4):97-103.
- [28] 韩佳勤.高海拔气候区大学校园室外热舒适实验研究[D].成都:西南交通大学,2024.
- [29] LAI D, LIU W, GAN 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.
- [30] 牛佳琦.夏季校园开放空间不同活动强度下热舒适和生理响应研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2021.
- [31] Liu W, Zhang Y, Deng Q. The effects of urban microclimate on outdoor thermal sensation and neutral temperature in hot-summer and cold-winter climate[J]. *Energy and Buildings*, 2016,128:190-197.