

室内运动场所男女热舒适实验研究

吴金衡 武欣^{通讯作者}

河北建筑工程学院, 河北省张家口市, 075000;

摘要: 室内运动场所热环境是影响运动人群舒适、健康和运动意愿的重要因素。本研究实验室研究的方法, 将现场调查收集到的环境参数和主观问卷数据作为实验基础, 通过气候仓测量获得了不同运动强度下男女代谢率数据。从提高室内热舒适的角度, 探究不同性别在不同运动强度与不同温度环境下存在的差异, 提出适用于不同性别运动人体的热感觉模型, 得到预测中性温度区间, 对现有室内运动场馆设计标准中的环境参数提出建议。研究结果表明: 在 3km/h 的低强度运动下: 男女运动时中性温度区间分别为 15.74~18.90℃ 和 16.01~19.92℃; 恢复阶段为 19.95℃ 和 22.23℃; 在 5km/h 的中强度运动下: 男女运动时中性温度区间分别为 9.92~14.34℃ 和 15.43~18.75℃; 恢复阶段为 16.74℃ 和 20.34℃。男性具有更强的体温调节能力而女性表现出对于环境温度更高的接纳性, 更擅长适应不同的运动环境;

关键词: 室内运动场所; 运动强度; 热舒适; 性别差异; 代谢率

Thermal Comfort Experiment of Males and Females in Indoor Sports Venues

Wu Jin heng Wu Xin^{Corresponding author}

1 Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, Zhangjiakou, Hebei Province, Postal Code 075000

Abstract: This study examines the thermal comfort of males and females in indoor sports venues using on-site surveys and lab experiments. Metabolic rates were measured under different exercise intensities using a climate chamber. Results show that under low-intensity exercise (3km/h), neutral temperature ranges for males and females are 15.74 - 18.90 ° C and 16.01 - 19.92 ° C, respectively, and during recovery, 19.95 ° C and 22.23 ° C. Under moderate-intensity exercise (5km/h), the ranges are 9.92 - 14.34 ° C and 15.43 - 18.75 ° C, respectively, and during recovery, 16.74 ° C and 20.34 ° C. Males exhibit stronger feeling, while females show higher environmental adaptability.

Key words: Indoor sports venues; Exercise intensity; Thermal comfort; Gender differences; Metabolic rate

DOI: 10. 69979/3029-2727. 24. 09. 047

引言

党的十八大以来, 以习近平同志为核心的党中央高度重视体育工作, 将全民健身上升为国家战略, 推动全民健身和全民健康深度融合^[1]。体育产业的发展代表着对大众体育建筑需求的增加。因此体育建筑的舒适性和健康性也越来越受到关注, 如何提高人体热舒适性已经成为体育领域备受关注的研究问题, 人们对体育建筑的要求不再局限于满足使用功能, 而更是追求室内健康舒适的运动环境^[2]。目前我国尚未制定针对体育运动场所的热环境标准, 大多数室内运动空间设计多归为公共建筑类型中的一种, 设计师通常按照国内 GB50189-2015《公共建筑节能设计标准》^[3]依据当地的气候的条件来设计其室内热环境。对于室内运动场所温度的合理设定, 不仅能提升运动人群对热环境的满意程度, 还能实现室内空调系统的节能低耗。因此, 深入研究室内运动场所

的热环境现状与热舒适需求对营造健康舒适的运动场所具有重要意义。

近年来, 学术界对人体热舒适的个体差异产生了极大的关注, 并针对不同性别人群开展了一系列的研究。现有研究发证实: 由于男女生理和心理上的差异, 对环境温度有不同的感受, 不同运动强度下人体代谢率也不同^[4], 因此运动状态及不同运动强度对应的人体热舒适温度范围不同由于男女生理适应性等不同, 对于室内运动场所舒适温度的可接受程度也存在着差异^[5]。本研究采用受试者在人工气候室内进行室内温度自主调控的方法, 分别针对 2 种不同活动强度下男女的生理和心理反应特性进行分析, 探讨运动状态下性别因素驱动的热舒适特性, 降低建筑能耗, 为营造运动类建筑的室内环境提供理论依据, 助力低碳建筑发展。

1 研究方法

1.1 实验设计

本实验在河北建筑工程学院的人工环境气候室中进行。如图 1 所示,该气候室包括两相邻房间,室内舱内净面积约 30 m²,长宽高为 6500×4500×4000mm。

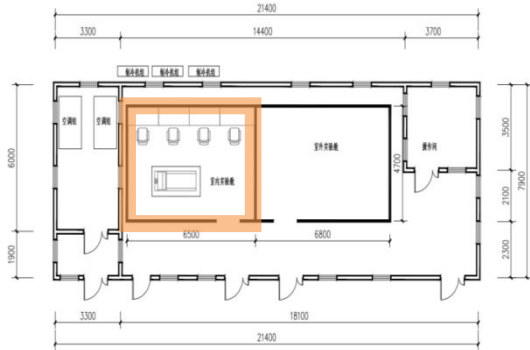


图 1 人工环境气候室

Fig.1 Artificial Environment Climate Chamber

本实验将实验舱的空气温度设定为 18°C、20°C、22°C 和 24°C 四个实验工况,空气湿度设定为 50%。空气温度的实测精度在±0.2°C,相对湿度的实测精度在±3%。实验开始前 2 小时受试者需要停止食物摄入,提前 10 min 到达实验室,更换统一运动衬衫和便裤,服装热阻为 0.6clo。实验人员提前 45 min 完成 CosmedK5、心率带、皮肤温湿度仪的初始信息设置。随后实验人员协助受试者进行佩戴,仪器佩戴好之后开始在跑步机上以预设步速 (3, 5 km/h) 的速度进行实验,具体实验流程见图 2。

实验流程如下:

- 1) 受试者将各种仪器进行佩戴,随即进行 10min 的预暴露,此阶段是为了使受试者达到稳定状态;
- 2) 受试者在跑步机上进行持续 35 分钟的运动,期间每 5 分钟进行主观问卷填写,血压在运动第 20 分钟与第 35 分钟进行测量。
- 3) 受试者进行 15 分钟的静息恢复,期间每 2 分钟进行主观问卷填写。

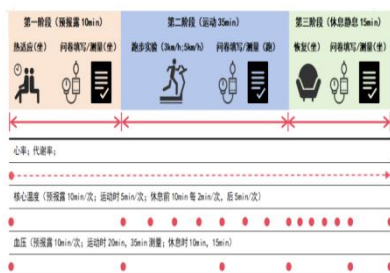


图 2 实验流程图

Fig.2 Experimental Flowchart

1.2 受试者情况

实验分别招募校内作息规律、身体健康、个人卫生状况良好各 20 名作为受试者,男女各 10 人,其详细信息见表 1。他们均为长期生活在京津冀冬季室外寒冷环境的北方人。身体体重指数 (BMI) 控制在 18.5~23.9 的健康区间。招募过程中需通过 IPAQ 国际体力活动量表进行筛选^[7],尽量选择每周活动强度评价为高的受试者。

表 1 受试者详细信息 (平均值±标准差)

Table.1 Detailed information of subjects (mean ± standard deviation)

性别	年龄 (岁)	身高 (cm)	体重 (kg)	BMI (kg/m ²)	BFP (%)
男性 (n=10)	24.6±2.3	176.3±6.2	72.3±6.1	23.2±2.3	17.2±3.8
女性 (n=10)	23.8±1.6	161±4.2	50.3±4.6	19.3±1.8	23.6±4.1
总计 (n=20)	24.2±1.9	168.8±8.1	61.3±5.5	21.2±1.9	20.4±6.2

1.3 主观问卷内容

问卷内容包括受试者的个人基本资料和热感觉,主观问卷设置为受试者在平板电脑上点触问卷。热感觉投票设置为 ASHRAE 标准 9 级指标^[8]。热舒适度和热可接受度投票皆采用断裂标尺,正值段代表受试者满意程度,负值段代表受试者不满意程度,同时受试者对热期望值进行了投票。问卷设置如图 3 所示。

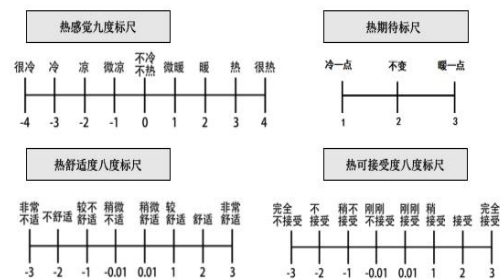


图 3 主观问卷投票

Fig.3 Subjective Questionnaire Voting

1.4 生理参数测量

在实验过程中,我们对受试者的代谢率、皮肤温度、心率以及血压进行了测试。其中,代谢率的测量采用 CosmedK5 便携式可穿戴气体代谢分析仪进行 60min 全过程测量,通过实时监测受试者呼出的气体,依据间接测热法原理,结合其耗氧量 (V_{O2})、二氧化碳 (V_{CO2}) 生成速率、呼吸商和体表面积等参数^[9],并根据式 (1~3)

计算得出新陈代谢率具体数据:

$$RQ = (VC02 / VO2) \quad (1)$$

$$EE = (0.23RQ + 0.77) \times 5.88 \quad (2)$$

$$M = (EE \cdot VO2) / ADu \quad (3)$$

其中, M 为人体新陈代谢率, W/m^2 (其中 $1 \text{ met} = 58.2 \text{ W/m}^2$); RQ 为呼吸商, 无量纲; $VC02$ 为二氧化碳产生量, W/L ; $VO2$ 为氧气消耗量, W/L ; EE 为代谢当量; ADu 为人体体表面积, m^2 。

采用纽扣式温度记录仪 (iButton, 精度为 $\pm 0.5^\circ C$, 量程为 $-20 \sim 85^\circ C$, 测试时间间隔为 10 s) 测量皮肤温度, 测量位置为胸部、上臂、大腿、小腿 4 个点。

采用心率带 (Polar H10, 测试时间间隔为 1 s) 对受试者的心率进行连续测试。采用手指式血压仪 (JZ-253A) 对受试者左手中指尖的血压进行测试。

2 实验结果

2.1 主观反映

2.1.1 热感觉投票

图 4 显示了男女受试者在 $18, 20, 22, 24^\circ C$ 四个温度工况下进行 3 km/h 与 5 km/h 的运动所得到的热感觉投票平均值图热感觉投票。可以看出: 两种运动强度下男女平均热感觉数值都随温度上升而提高。在 3 km/h 的低强度运动下的男性受试者热感觉变化范围在 “ $-1.50 \sim 2.60$ ”, 5 km/h 的中强度运动下为 “ $-0.87 \sim 2.80$ ”。同时女性受试者低强度下变化范围在 “ $-1.70 \sim 1.93$ ”, 中强度下为 “ $-1.16 \sim 2.13$ ”。根据数据可知: 男性热感觉变化大于女性且热感觉值高于女性。这可能是因为男性普遍代谢率高于女性所导致的。在低强度运动下: 女性与男性的平均热感觉投票值差值 $18^\circ C$ 下最大, 这说明: 相较男性, 女性在 $18^\circ C$ 环境下容易有更多的冷感。在中强度运动下: 男女差值在 $20, 22^\circ C$ 下略小, 说明在此区间温度男女热感觉的性别差异较小。

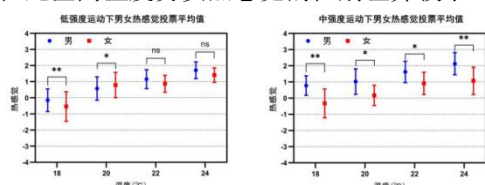


图 4 不同工况下男女热感觉投票平均值

Fig.4 Average thermal sensation votes by gender

2.1.2 热可接受度与热舒适投票

图 5 为男女在经历 60 min 不同工况下的热可接受度

(TAV) 与热舒适 (TCV) 投票平均值的对比情况。从图中可以看出: 男女热可接受度与热舒适的投票值随温度的变化而变化, 在 $24^\circ C$ 的工况下, 不同性别的平均热可接受度、热舒适有显著性差异。低强度运动下男女热可接受度与热舒适投票区间相似, $22^\circ C$ 下对环境的接受程度与舒适度最高。在 $18^\circ C$ 的偏冷环境下, 男性的整体热可接受度与热舒适要高于女性; 随着温度的上升男性对环境热可接受度与热舒适数值越低。这说明, 女性偏好 $20^\circ C$ 以上的偏暖的环境, 男性偏好偏冷的环境。男女受试者在中强度运动下热可接受度与热舒适度投票数值变化区间并不相似。男性在 $20^\circ C$ 的环境下对环境的接受度最高, 且热舒适数值最高, 女性则是在 $22^\circ C$ 环境。与低强度运动相比 $18^\circ C$ 偏冷环境下男女变化并不明显, 随着运动强度的增加, 其余工况下投票数据均下降 0.85 , 温度越高, 男女热感觉与热可接受度差值越大。

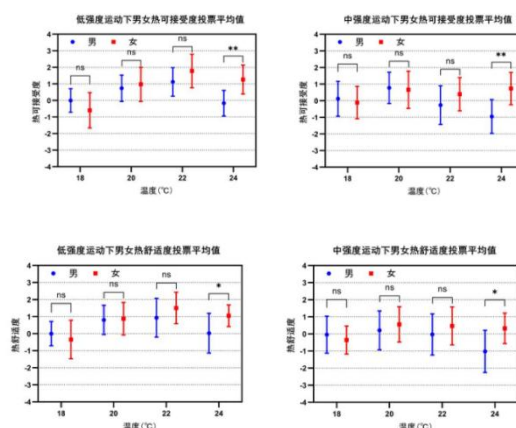


图 5 不同工况下男女热可接受度与热舒适投票平均值

Fig.5 Average Thermal acceptability and comfort votes for males and females

2.2 生理反应

2.2.1 代谢率

图 6 为运动阶段男女代谢率平均值。在 3 km/h 的低强度运动中, $18^\circ C$ 下男女代谢率具有显著性; 在 5 km/h 的中强度运动中, $20, 24^\circ C$ 温度下有显著性; 在 $20, 22^\circ C$ 环境下, 男女代谢率无明显差异; $18^\circ C$ 下男性相较女性有更高的代谢率, $24^\circ C$ 下则是女性相对更高; 在低强度运动中, 男女的代谢率都处在了相似水平区间, 集中在 “ $2.50 \sim 4.00$ ” met 区间; 以往研究表示: 男性的基础代谢率普遍高于女性, 发生图中现象: 可能是因为

能量消耗相对较低, 男女之间生理上的差异影响被削弱了。在中强度运动中, 男性代谢率变化明显高于女性。

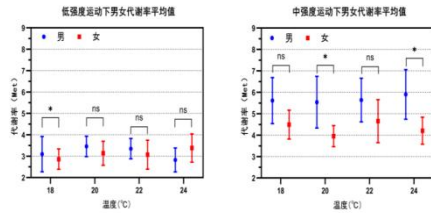


图 6 不同工况下男女代谢率平均值

Fig. 6 Average metabolic rates for males and females

2.2.2 皮肤温度

图 7 为不同运动强度下男女皮肤温度的平均值。根据对比不同运动强度下受试者的平均皮肤温度, 相同空气温度下, 男女的皮肤温湿度均具有差异性, 女性的平均皮肤温度低于男性。随着温度和运动强度的增加, 男女皮肤温度的变化呈现出正相关性。低强度运动下的男性受试者平均皮肤温度变化范围在“32.50~33.05°C”, 中强度运动为“33.51~34.41°C”。低强度女性受试者平均皮肤温度变化范围“31.32~33.32°C”, 中强度运动为“31.66~33.35°C”。男女皮肤温度都随着温度的上升而上升, 运动强度升高, 整体皮肤温度的变化范围也会增加; 同时男女皮肤温度差异性随着温度增高而减少, 表现出一种接近的趋势。

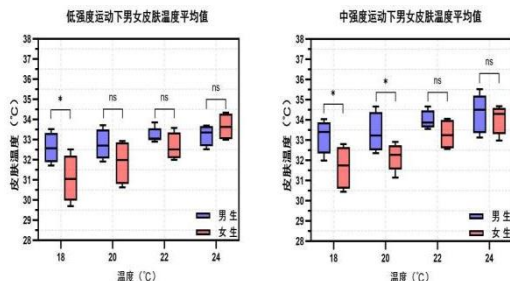


图 7 不同工况下男女皮肤温度的平均值

Fig. 7 Average skin temperature for males and females

2.2.3 心率与血压

图 8 为不同运动强度下男女心率与血压的平均值。低强度运动下的男性受试者心率变化范围在“75.95~115.06bpm”, 中强度运动为“96.45~144.55bpm”。低强度女性受试者心率变化范围“78.90~121.83bpm”, 中强度运动“111.49~147.65bpm”。男性心率随着温度的上升而上升, 在 20~22°C 下增长速率减缓; 女性则是在 18~20°C 的温度下心率数值激增, 随后在 22~24°C 的温度范围内略微下降后趋于稳定提升; 在不同强度中, 随

着温度与运动强度的提升, 性别差异性明显减弱, 男性和女性的心率数据趋于一致。不同运动强度下 20°C 下男女心率差值最大, 分别为 14bpm 与 5.64bpm。22°C 下男女个体差异性最低, 心率数值较为集中, 波动范围较小。低强度运动下男性收缩压变化范围在“115.25~128.35mmHg”, 舒张压在“72.48~77.80mmHg”; 中强度运动收缩压在“120.96~129.05mmHg”, 舒张压在“75.75~84.60mmHg”。女性低强度收缩压变化范围在“107.25~114.35mmHg”, 舒张压在“61.35~72.04mmHg”; 中强度运动收缩压在“106.88~118.85mmHg”, 舒张压在“68.60~76.74mmHg”。男女收缩压的平均值在运动强度提升的情况下保持相对稳定。舒张压则随运动强度的增强呈现上升态势; 男性血压数值普遍高于女性。在低强度运动中: 20、22°C 的温度下, 男性和女性的血压数值相较于 18°C 有所下降, 24°C 时数值又重新上升; 在中强度运动中: 男女血压随着温度的上升而上升; 男女性别差异性明显。

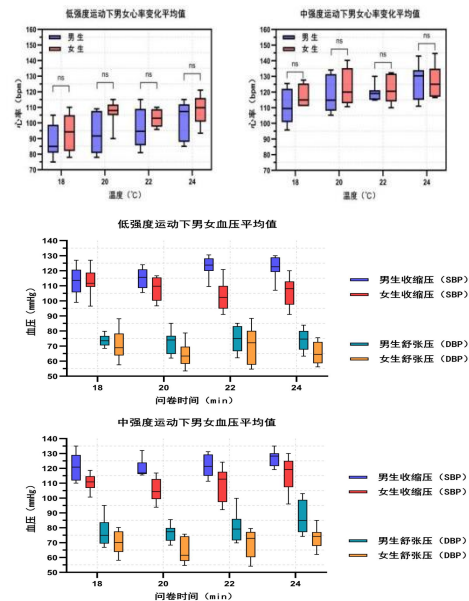


图 8 不同工况下男女心率与血压平均值

Fig. 8 Average heart rate and blood pressure for males and females

3 结果与讨论

3.1 男女热感觉模型

本文采用了温度频率法统计分析^[10], 计算出室内温度对应区间内男女的平均热感觉 (MTSV)。建立了男女热感觉与室外热环境的关系, 将实际热感觉投票值 TSV 与环境温度进行拟合, 并与 PMV (预测热感觉投票) 进

行比较,得到各工况下的实际热感觉和预测热感觉与环境温度的关系。

图 9 为男女的不同运动下实际热感觉 TSV 投票值和 PMV 对比的结果,其中 PMV 是基于实际实验工况下的参数进行计算的结果。为保证数据准确:运动阶段 TSV 为每个工况下运动后 30 min 内的热感觉投票的平均值;恢复阶段 TSV 为 15min 静息内的热感觉投票的平均值。

对比上图男女热感觉投票与空气温度的关系可以发现:男性的热感觉投票值普遍高于女性;在低强度运动中:随着温度的升高,男女在热感觉上的性别差异变得更加明显,在恢复阶段女性对偏冷环境有更多的冷不适感,随着温度提升,男性和女性表现出对于温度不敏感,投票值均为中性,在相同的偏热环境下,女性的热感觉投票值低于男性,男性对于偏热环境有更多的热不适感。在中强度运动中:女性相较男性对温度更加敏感,这可能是和运动强度增加有关,在恢复阶段男女在不同温度下表现出相似的变化趋势,这表明无明显性别差异。

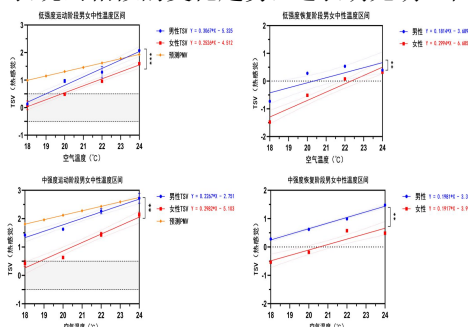


图 9 不同工况下男女实际热感觉与预测热感觉的关系

Fig.9 Relationship between actual and predicted thermal sensation by gender

3.2 预测中性温度

中性温度是人体感觉冷热最适中的温度,反应人们感觉舒适时的热舒适需求。热舒适标准 ISO7730—2005 将 PMV 指标推荐值为“-0.5~0.5”区间内视为 90%的人可接受的环境温度^[11],本文通过线性分析环境温度和热感觉投票 TSV 的定量关系,在男女实际热感觉 TSV 和室内温度的拟合方程中:运动阶段将 $TSV = (-0.5 \sim 0.5)$ 代入热感觉预测模型,在恢复阶段代入 $TSV = 0$ 得到实测男女热中性温度。根据表 2 中男女 TSV 与空气温度的线性回归方程可计算出男女在低强度运动阶段:男女中性温度区间分别为 15.74~18.90°C 和 16.01~19.92°C;恢复阶段为 19.95°C 和 22.23°C;中强度运动阶段:男女中

性温度区间分别为 9.92~14.34°C 和 15.43~18.75°C;恢复阶段为 16.74°C 和 20.34°C。从拟合结果来看,男女预测热中性温度均有显著的差异性。模型的斜率可以表征人群对于热环境的敏感度,斜率越大说明人群对温度的变化更敏感,在低强度运动下女性相较男性对环境的耐接受度较高,随着运动强度的提升,男性中性温度区间大于女性,更容易出现极值数据。

通过对比分析:在低强度运动下男女中性温度差值为 0.27~1.02°C,恢复状态下为 2.28°C;中强度运动下差值为 4.41~5.51°C,恢复状态下为 3.60°C;可以看出:随着运动强度的提高,男性与女性之间的中性温度差异也随之增大。

表 2 男女热感觉回归方程与预测中性温度

Table.2 Regression equations and predicted neutral temperatures by gender

	回归方式	R ²	预测中性温度
低强度运动阶段(男性)	$Y = 0.3067X - 5.325$	0.9804	15.74~18.90°C
低强度运动阶段(女性)	$Y = 0.2526X - 4.512$	0.9999	16.01~19.92°C
低强度恢复阶段(男性)	$Y = 0.1814X - 3.689$	0.6622	19.95°C
低强度恢复阶段(女性)	$Y = 0.2994X - 6.685$	0.9315	22.23°C
中强度运动阶段(男性)	$Y = 0.2267X - 2.751$	0.9489	9.92~14.34°C
中强度运动阶段(女性)	$Y = 0.2982X - 5.103$	0.9474	15.43~18.75°C
中强度恢复阶段(男性)	$Y = 0.1981X - 3.317$	0.9909	16.74°C
中强度恢复阶段(女性)	$Y = 0.1917X - 3.939$	0.8524	20.34°C

3.3 热感觉与热舒适

为了探究不同环境温度下和运动强度下人体平均热感觉投票和热舒适投票之间的关系,本研究对两者进行了分析回归,如图 10 所示。不同温度工况下热感觉和热舒适投票都呈现良好的二次多项式关系。拟合关系呈现抛物曲线,这也是由于随着运动时间的增加,人体的生理热调节机制逐渐成为主导因素。各不同工况下男女热感觉与热舒适关系表现出相似的趋势,即当热感觉升高时,热舒适出现下降的趋势,符合我们日常生活的感受;但在 18°C 低强度运动下随着热感觉的升高热舒适也逐渐提升,说明在实际的运动过程中,人们并非喜欢更低的温度工况,当运动强度较低时其产生的热量不足以满足体温也可能导致人们感到不适,在此温度下:平均热感觉受空气温度的影响程度大于受运动强度的影响程度,女性相比男性有更多的冷不适感。

在 18°C、20°C、22°C 和 24°C 的温度下,当热舒适投票(TCV)=0 时,男女的热感觉投票分别为:低强度运动下,男性为 0.00、1.15、1.45、1.00,女性为 1.75、0.80、1.80、1.80;在中强度运动下,男性为 0.80、0.75、0.80、0.60,女性为-0.15、1.00、0.50、1.20;在达

到热舒适状态下, 男女热感觉投票区间分别为 $0.00 \sim 1.45$ 与 $-0.15 \sim 1.80$ 。

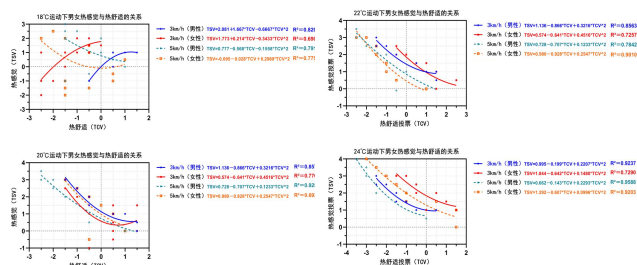


图 10 不同工况下男女热感觉与热舒适的拟合关系

Fig.10 Fitting relationships of thermal sensation and comfort by gender

4 结语

本文选取了 8 种不同工况, 通过让男女受试者在气候仓进行问卷投票方式, 得到了室内运动场所不同活动下的舒适温度区间, 在满足不同性别人群的热需求基础上也能减小建筑能耗。同时对不同性别人群的生理和主观热响应特征进行分析, 讨论了运动状态下性别因素驱动的热舒适差异, 得到如下结论。

不同运动下男性热感觉变化普遍大于女性且热感觉值高于女性, 男性在 20°C 的环境下热可接受度最高, 且热舒适数值最高, 女性则是在 22°C 环境。男性具有更强的体温调节能力而女性表现出对于环境温度更高的接纳性, 更擅长适应不同的运动环境; 在低强度运动下男女热可接受度与热舒适投票区间相似, 随着运动强度的增加, 温度越高, 男女之间热舒适与热可接受度差值越大;

男性代谢率与皮肤温度数值变化普遍大于女性且高于女性, 在运动过后: 男女数值都略高于运动前的水平; 在低强度运动下, 18°C 、 24°C 下男女心率数值无明显差异, 20°C 、 22°C 下女性相对男性数值更高, 在中强度运动下, 男女血压波动幅度与温度和运动强度呈正相关关系; 女性皮肤温度增长速度较男性更为显著, 随着运动强度升高, 男女皮肤温度差异性相对不显著, 全过程中男性皮肤温度普遍高于女性;

在 3km/h 的低强度运动下: 男女运动时中性温度区间分别为 $15.74 \sim 18.90^{\circ}\text{C}$ 和 $16.01 \sim 19.92^{\circ}\text{C}$; 恢复阶段为 19.95°C 和 22.23°C ; 在 5km/h 的中强度运动下: 男女运动时中性温度区间分别为 $9.92 \sim 14.34^{\circ}\text{C}$ 和 $15.43 \sim 18.75^{\circ}\text{C}$; 恢复阶段为 16.74°C 和 20.34°C 。在低

强度运动下男女中性温度差值为 $0.27 \sim 1.02^{\circ}\text{C}$, 恢复状态下为 2.28°C ; 中强度运动下差值为 $4.41 \sim 5.51^{\circ}\text{C}$, 恢复状态下为 3.60°C 。

参考文献

- [1] 李中文, 胡果, 杜尚泽, 2017. 习近平在会见全国体育先进单位和先进个人代表等时强调开创我国体育事业发展新局面加快我国建设成为体育强国[N]. 人民日报, 2017-8-28(1)
- [2] 高亚萍, 肖勇强. 基于运动人体热舒适的体育场馆环境温度参数优化研究[J]. 中国体育科技, 2021, 57(4): 25-33.
- [3] 刘实, 周政翰, 朱颖心, 等. 室内中高强度运动人体热舒适研究[J]. 暖通空调, 2023, 53(8): 66-71, 110.
- [4] 黄崇耘, 张宇峰, 阙嘉欣. 支持有氧运动, 舒适和节能的夏季健身房室温现场试验与建议值[J]. 建筑科学, 2021, 37(10): 24-32.
- [5] 季泰, 袁伟琪, 李登峰, 等. 2015 环境参数对运动人体热舒适性影响的理论模型与实验研究[J]. 体育科学, 35(3): 67-72.
- [6] 中国建筑科学研究院. 建筑气候区划标准: GB 50178—93[S]. 北京: 中国计划出版社, 1994: 6-15.
- [7] 尹慧, 狄育慧, 王丽娟, 2017. 不同运动水平下生理参数与人体主观感受测定[J]. 西安工程大学学报, 31(2): 204-208.
- [8] 李百战, 李百战. 室内热环境与人体热舒适[M]. 重庆大学出版社, 2012.
- [9] 刘荣向. 基于新陈代谢率及皮肤温度的人体热舒适实验研究[D]. 青岛理工大学, 2010.
- [10] ISO. Ergonomics of the thermal environment: analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria: ISO7730: 2005[S]. Geneva: IOS, 2005: 8-10
- [11] International Fitness Association. Gym temperature standards[EB/OL]. [2021-01-10]. <https://www.ifafitness.com/health/temperature.htm>.

作者简介: 吴金衡(1999.7~)男, 在读研究生. 研究方向: 建筑节能、运动状态下人体热舒适。

通信作者: 武欣(1983.9~)女, 研究生导师, 副教授. 研究方向: 绿色建筑、建筑微气候。