

中文引用格式:杨杰,马瑞甜,王兴明. 高温环境下 BMI 差异对人体主客观热反应的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(10):239-246.

英文引用格式:YANG Jie, MA Ruitian, WANG Xingming. Effects of BMI difference on physiological and perceptual responses in hot environments [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(10):239-246.

高温环境下 BMI 差异对人体主客观热反应的影响研究*

杨杰¹教授, 马瑞甜¹, 王兴明^{**2}

(1 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

2 中国矿业大学(徐州) 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116)

中图分类号:X968

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.1714

资助项目:“十四五”国家重点研发子课题项目(2022YFC300610502)。

【摘要】 为提升高温作业人员个性化热防护效果、明确不同体型人群差异化防护策略,探究不同身体质量指数(BMI)人群在高温环境中的生理与主观热反应,揭示其热暴露过程中的差异性调节能力。首先,通过人工气候室设置中性((25.1±0.4)℃,(52.8%±1.9%)相对湿度(RH),0.1 m/s)与高温((35.0±0.5)℃,(50.0%±2.9%)RH,0.1 m/s)2个工况,选取20名男性被试,将其分为偏胖组(BMI≥24 kg/m²)与偏瘦组(BMI<18.5 kg/m²);其次,被试先在中性环境静坐10 min,随后进入高温环境交替进行运动与休息,同步记录生理参数与主观评价指标;最后,通过分析这2组被试主客观指标的差异,评估BMI对热反应的调节机制和影响程度。结果表明:偏瘦组与偏胖组核心温度分别升高0.46、0.55℃,存在显著的统计学差异($p<0.001$);偏胖组与偏瘦组平均皮肤温度各升高4.2、2.9℃,表明偏胖组对高温更敏感;偏胖组出汗总量和心率均显著高于偏瘦组,但心率不存在显著性差异;BMI差异导致主观评价参数存在统计学差异($p<0.05$),不仅影响热反应强度,还会导致调节机制的模式差异,高温防护应依据体型特征制定差异化策略。

【关键词】 高温环境; 身体质量指数(BMI); 主观评价; 热应激; 气候室

Effects of BMI difference on physiological and perceptual responses in hot environments

YANG Jie¹, MA Ruitian¹, WANG Xingming²

(1 College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710054, China; 2 College of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Xuzhou), Xuzhou Jiangsu 221116, China)

Abstract: To enhance the personalized thermal protection effectiveness for workers exposed to hot environments and clarify the individualized protection strategies with different body types, this study investigated the physiological and perceptual responses with different BMI in hot environments to explore individual thermoregulation capacity during heat exposure. First, two hot environments were set in a

* 文章编号:1003-3033(2025)10-0239-08; 收稿日期:2025-05-11; 修稿日期:2025-07-12

** 通信作者:王兴明(1996—),男,陕西汉中,博士研究生,主要研究方向为人体热应激。E-mail:xmwang@cumt.edu.cn。

climate chamber, including neutral ($(25.1 \pm 0.4)^\circ\text{C}$, $(52.8\% \pm 1.9\%)$ Relative Humidity (RH), 0.1 m/s) and high temperature ($(35.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$, $(50.0\% \pm 2.9\%)$ RH, 0.1 m/s). Twenty male participants were recruited and divided into two groups: overweight ($\text{BMI} \geq 24$) and underweight ($\text{BMI} < 18.5$). Second, participants were initially seated in neutral environment for 10 minutes, then performed alternating cycles of exercise and recovery in the hot environment. Physiological and perceptual responses parameters were recorded during the human trials. Finally, the regulatory mechanism of BMI on thermal responses and the extent of its impact were evaluated by analyzing the differences in subjective and objective indicators between the two groups of subjects. The results indicated that the two groups significantly ($p < 0.001$) differed in core temperature, with the increase of 0.55°C for the overweight group and 0.46°C for the underweight group. The mean skin temperature of overweight and underweight participants increased by 4.2 and 2.9°C , respectively, indicating that overweight individuals were more sensitive to high temperatures. The total sweat rate and heart rate of overweight participants were significantly higher than those of underweight participants, while no significant difference was observed for heart rate between the two groups. Differences in BMI led to statistically significant differences in perceptual responses parameters ($p < 0.05$), not only affecting the intensity of thermal responses but also inducing differences in the patterns of regulatory mechanisms. Therefore, individualized thermal protection strategies should be formulated based on body type characteristics.

Keywords: hot environment; body mass index (BMI); perceptual responses; heat stress; climate chamber

0 引言

近年来,温室效应加剧引发全球变暖,高温危害凸显,热射病等热相关疾病因频发且致死率高,已成为备受关注的公共健康议题^[1-3]。2019年,日本严重热浪致百余人死亡、1.8万人住院,给医疗系统带来巨大负担^[4];2022年夏季,全球多地高温破记录,中国中东部极端高温干旱对经济、农业和民生造成严重影响^[5]。高温危害广泛存在于生产生活中,尤其是建筑施工、矿业等高温环境作业人群最易受热应激影响^[6]。因此,探究高温环境下人体生理反应的个体差异,对提升高温作业人员个性化热防护效果具有重要的支撑作用。

在高温环境下准确预测人体热应激水平对提升工作效率和保障生命健康至关重要。随着研究深入,个体差异,尤其是年龄和性别,在热应激反应中的重要性愈发显著。年龄方面,人体热调节能力随年龄的增加而减弱,这与心血管功能退化、皮肤血流及汗腺数量减少、出汗能力下降等生理退变密切相关^[7]。老年人在温暖环境中更易出现核心体温升高和皮肤温度下降(寒冷条件下趋势相反)^[8],且年龄相关的慢性疾病也可能加重其高温下的健康负担^[9],其中汗腺结构的退化是热调节能力下降的主因之一^[10]。性别差异的影响同样突出:在 $22\sim 35^\circ\text{C}$

的中等温度范围,女性皮肤血流调节和出汗反应通常弱于男性^[11],热暴露初期更易产生不适;而极端高温下,男性因体型较大、代谢率较高,热负荷更大且中暑风险更高^[12]。此外,YASUOKA等^[13]发现,性别差异导致的基础代谢率、体表面积及环境温度偏好不同,也会影响热应激反应。而在体型方面,对于作为主要劳动力的男性青年,身高、体质量、身体质量指数(Body Mass Index, BMI)等体型因素是影响热调节的主要因素。不同BMI个体的体内温度分布和热感觉存在差异^[14-15],肥胖者因脂肪组织比热($2.51\text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$)显著低于其他组织($3.65\text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$)^[16],传热效率受影响且散热能力弱,更易引发热应激^[10,17]。偏瘦者虽代谢率高、体温调节能力较强,但在高温环境中更容易脱水和电解质紊乱^[18]。

综上,现有研究大多聚焦于性别与年龄对人体热反应和热舒适的影响,针对BMI差异的探讨较少,且相关研究多在中性环境中开展^[19]。鉴于此,笔者拟依托人工气候室开展高温环境(35°C 以上^[20])下的人体热生理试验,分析肥胖和偏瘦人群的热生理和心理参数差异,旨在揭示BMI差异对热应激调节机制和主观热感知的影响特征,为不同体型人群在高温作业下的差异化防护策略提供理论依据。

1 BMI 差异下的试验设计

1.1 基于 BMI 差异的试验对象筛选与分组

招募 20 名身体健康的男性大学生为被试,其信息见表 1。依据《成人体重判定》^[21]的 BMI 分类标准(偏瘦: BMI < 18.5 kg/m²; 偏胖: BMI ≥ 24 kg/m²),将被试分为 2 组,被试的 BMI 分布如图 1 所示。经

GPower 3.0 软件计算,所需样本量至少为 18 名,当前人数满足统计分析要求。所有被试均无体态异常,能够完成试验任务并准确反馈舒适性感受,且试验前 24 h 内无剧烈运动、未服用药物或酒精等刺激性食物。所有被试均自愿参与,同时,熟悉试验流程和主观感受等级评价标准。

表 1 被试信息

Table 1 Participants' information

体型	数量	年龄/岁	身高/cm	体质量/kg	BMI/(kg·m ⁻²)	初始核心温度/℃	初始皮肤温度/℃
偏胖者	10	24.2±1.4	176±3	86.2±9.1	27.7±2.7	37.2	31.9
偏瘦者	10	24.6±1.5	175±3	52.4±3.9	17.1±1.4	36.8	33.1

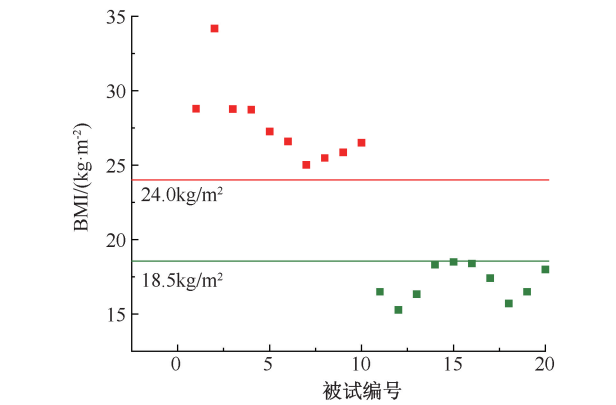


图 1 被试的 BMI 分布

Fig. 1 BMI distribution of participants

1.2 热生理参数监测

试验过程中,全程记录被试的核心温度、平均皮肤温度、心率以及出汗量等关键热生理指标,各项指标及对应的监测设备见表 2。

表 2 监测指标与设备

Table 2 Monitoring metrics and equipment

设备	监测参数	备注
核心温度胶囊	核心温度	采样频率为 2 次/min
皮肤温度监测仪	皮肤温度	—
心率监测仪	心率	采样频率为 60 次/min
精密台秤	出汗量	量程为 100 kg、精度为 10 g
跑步机	代谢率	—

试验前,分别称重服装与毛巾质量 M_{c1} ,被试着试验服时的体质量 M_{s1} ;试验后,对应称重服装与毛巾质量 M_{c2} ,被试着试验服的体质量 M_{s2} 。汗液蒸发量 M_e 、汗液未蒸发量 M_n 及总出汗量 M_t 的计算如下:

$M_e = M_{s1} - M_{s2}$ (1)

$M_n = M_{c2} - M_{c1}$ (2)

$M_t = M_{s1} - M_{s2} + M_{c2} - M_{c1}$ (3)

采用 4 点皮温法^[22]测定被试的平均皮肤温度,取左手、右小腿、右肩胛、后颈部处的局部皮肤温度,加权计算如下:

$\theta_m = 0.28 \times (\theta_n + \theta_s + \theta_c) + 0.16 \times \theta_h$ (4)

式中: θ_m 为平均皮肤温度,℃; θ_n 、 θ_s 、 θ_c 、 θ_h 分别为后颈部、右肩胛、右小腿、左手的局部皮肤温度,℃。

试验过程中,每 5 min 记录被试的主观热感受,包括热感受(对环境冷热程度的主观判断)、热舒适度(对当前冷热环境的满意程度)、皮肤和服装湿润程度(对皮肤及衣物潮湿状态的主观体验^[23])及疲劳程度(采用 Borg 量表评估运动或热暴露下的身体疲劳状态),同时记录各项评分结果。以上心理指标评价量表如图 2 所示。

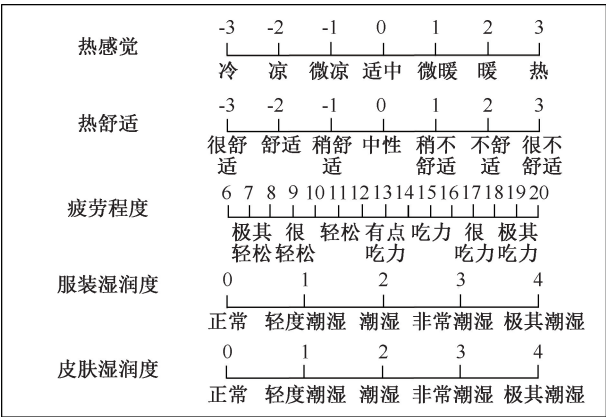


图 2 心理指标评价量表

Fig. 2 Psychological index evaluation scale

1.3 多工况下的试验流程

试验当天 8:00,被试正常进食早餐,餐前吞食核心温度胶囊^[24]。随后,试验人员准备测量仪器、调控室内温湿度并将其引导至人工气候室

(10:00),记录初始服装参数与毛巾质量。试验人员首先说明试验注意事项(期间禁止饮水及如厕),随后协助其佩戴小型心率带,粘贴皮肤温度传感器并更换试验服装。试验于10:30正式开始,后续流程按既定方案执行。

根据ASHRAE Standard 55的规定,设置中性环境^[25]((25.1±0.4)℃,(52.8%±1.9%)相对湿度(Relative Humidity, RH),0.1 m/s)与高温环境^[26]((35.0±0.5)℃,(50.0%±2.9%)RH,0.1 m/s)这2个工况。试验流程如下:①被试先在中性环境中静坐10 min,随后进入高温环境,依次完成5 km/h(代谢率200 W/m²)的匀速跑动20 min、3 km/h(代谢率140 W/m²)的匀速跑动10 min;②跑步结束后,在气候室内休息10 min并称量体质量;③重复上述运动过程,最后休息20 min。整个试验时长为100 min,具体流程如图3所示。试验期间,需持续监测被试的身体状态,若出现头晕、胸闷等不适症状或被试主动提出终止,应立即停止试验。

采用方差分析、*t*检验和非参数检验等方法统计处理采集的数据,以判断不同组别或变量间的显著性差异,并分析数据的整体趋势与特征。

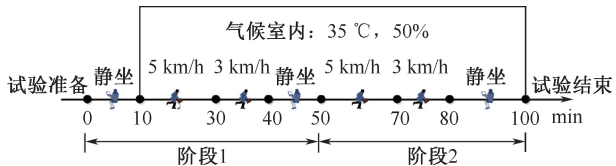


图3 试验流程
Fig. 3 Experimental flow

2 BMI 差异对人体主客观热反应的影响

2.1 BMI 差异对核心温度的影响

偏胖组与偏瘦组被试的核心温度均呈缓慢上升趋势,且均未进入热应激状态(核心温度未超过38℃)。尽管整体趋势相似,但2组在不同阶段的表现存在明显差异。偏胖组和偏瘦组核心温度如图4所示。

由图4可知:在静坐阶段结束、跑步初期,偏胖者的核心温度迅速上升,幅度明显大于偏瘦者,且此后持续高于偏瘦组;40~50 min 休息阶段,偏胖组的核心温度短暂下降,偏瘦组则持续上升并逐渐接近偏胖组;在70~80 min 时,偏胖者温度回升至峰值,偏瘦者仍处于逐步升高状态。这是因为高BMI个体的脂肪组织导热性差,使得核心层热量难以向皮

肤表面传递,造成体内热量蓄积,且偏胖者体质量较大,运动过程中产生的热负荷更高,共同导致核心温度上升更快^[27]。而核心温度的升高会触发身体更活跃的散热反应(如出汗增多),以避免核心温度过高。

偏胖者的平均核心温度为37.2℃,显著高于偏瘦组的36.8℃;试验全程偏胖组的温度平均上升0.55℃,高于偏瘦组的0.46℃。统计分析表明:2组核心温度在各阶段的差异均具有显著性(*p*<0.001)。

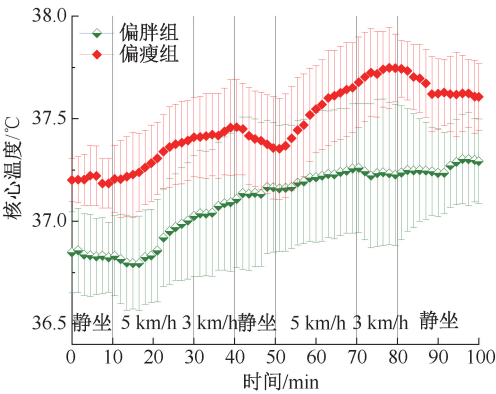


图4 偏胖组和偏瘦组核心温度
Fig. 4 Core temperature in the overweight and underweight groups

2.2 BMI 差异对平均皮肤温度的影响

平均皮肤温度可客观反映被试对热环境的感受。偏瘦组与偏胖组平均皮肤温度如图5所示,2组的变化趋势基本一致。由图5可知:进入气候室前(0~10 min),被试处于温暖环境,平均皮肤温度略有波动;正式进入气候室后,平均皮肤温度迅速上升,前10 min 增幅尤为显著,随后升温速率逐渐放缓;40~50 min 时,皮肤温度略有回落,至休息恢复期(80~100 min)后再次趋于下降。

尽管趋势相似,2组平均皮肤温度在各阶段仍存在统计学差异(*p*<0.001)。特别是在初期阶段(0~10 min),偏胖者初始平均皮肤温度为31.9℃,较偏瘦者低1.2℃,该BMI差异导致的平均皮肤温度差异与ZHOU Xin等^[28]的研究结果高度一致。在高温暴露条件(35℃、50%RH)下,2组皮肤温度均迅速升高,并在约30 min 时进入平台期。试验结束前,偏瘦组的平均皮肤温度仍明显高于偏胖组,差值持续存在。从整体升温幅度看,偏胖者与偏瘦者的平均皮肤温度分别上升4.2和2.9℃,表明偏胖个体更易受高温环境中皮肤散热效率下降的影响。

这是因为偏胖者较大的身体表面积和较厚的皮肤脂肪层降低了散热效率,导致其皮肤温度上升更快,对环境温度变化更为敏感。

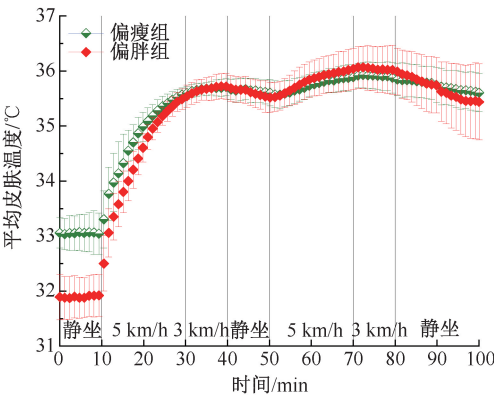


图 5 偏胖组和偏瘦组平均皮肤温度

Fig. 5 Average skin temperature in the overweight and underweight groups

2.3 BMI 差异对出汗量的影响

被试的总出汗量涵盖阶段 1(0~50 min)、阶段 2(50~100 min) 的出汗量及服装吸附的汗液质量。偏胖组与偏瘦组总出汗量如图 6 所示。

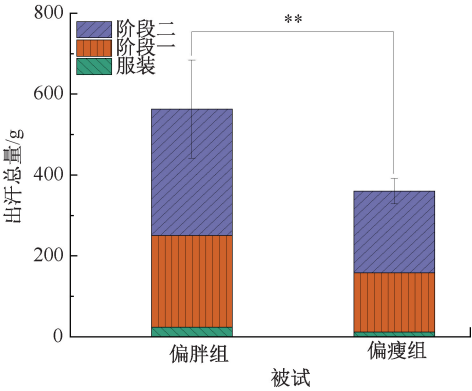


图 6 偏胖组与偏瘦组总出汗量

Fig. 6 Total sweating in the overweight and underweight groups

由图 6 可知:偏胖组与偏瘦组的出汗总量存在显著差异,偏胖组的出汗总量明显高于偏瘦组($p<0.001$)。这种差异是因为偏胖者体内积热更多,需通过出汗散失更多的热量^[29],同时,其汗腺分布可能更密集,且较高的身体脂肪含量会增强皮肤的湿度感和不适感,进而促进机体维持更高的出汗率以保持热平衡^[30]。

偏胖组与偏瘦组在阶段 2 的出汗量均多于阶段 1。阶段 1(刚进入气候室并开始低速运动)为热暴露初期,被试核心与皮肤温度逐渐升高,体温调节

机制启动,汗腺开始分泌汗液,此时散热尚不充分,汗液主要通过蒸发调节体温。该阶段偏胖组出汗量明显高于偏瘦组,反映其对热刺激的反应更强。进入阶段 2(持续中等强度运动),热量积累加剧,核心体温持续升高,汗腺高度活跃,出汗量显著上升。与阶段 1 相比,体温调节机制更充分,蒸发成为主要散热方式。偏胖者在此阶段出汗量达到峰值且远高于偏瘦者,表明其在高热负荷下更依赖出汗维持热平衡。

此外,服装吸附的汗液量同样显示偏胖者高于偏瘦者的特征,这可能与其总出汗量大、部分汗液未及时蒸发而滞留于衣物有关,同时也表明偏胖者受未蒸发汗液质量及蒸发效率下降的影响更为显著。

2.4 BMI 差异对心率的影响

心率是反映高温环境下机体心脏负荷的重要指标。偏胖组与偏瘦组心率变化如图 7 所示,2 组整体趋势一致,组间无显著差异,但在部分时间点的数值和变化幅度存在差异。

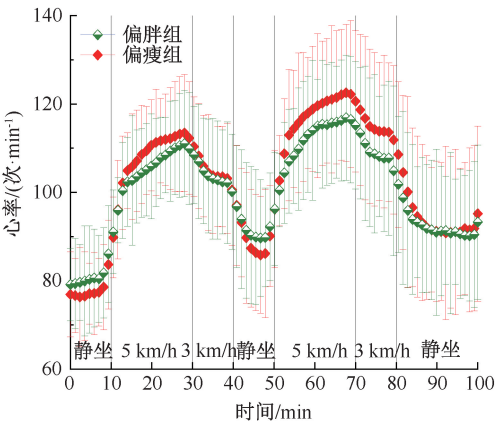


图 7 偏胖组和偏瘦组心率

Fig. 7 Heart rate in the overweight and underweight groups

2 组被试在 0~10 min 时心率均保持稳定。进入气候室并开始慢跑后,随着代谢水平提升,心率显著上升。当运动强度由 5 km/h 降至 3 km/h 并进入休息阶段(40~50 min)时,心率略有回落,表明心率变化与活动水平密切相关。恢复期内,心率继续下降并趋于平稳,表明机体逐渐完成热应激后的自我调节。运动阶段(10~40 min, 50~80 min)中,偏胖组在运动期间的心率水平普遍高于偏瘦组,表明其在维持体温和代谢稳定时承担更大的生理负荷。由图 7 可知:偏胖者心率上升幅度更大且恢复速度相对较慢,表明其心脏调节能力在热环境和运动负荷下承受更大压力。休息阶段(0~10 min、40~50 min)中,偏瘦组的心率略高于偏胖组,但在最终恢

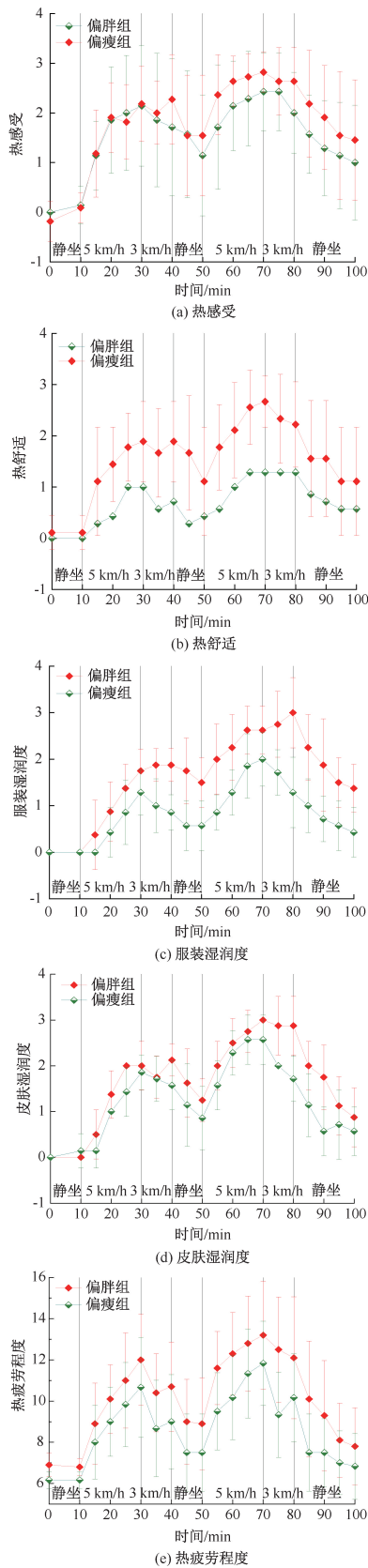


图8 偏胖组和偏瘦组主观评价指标

Fig.8 Subjective evaluation indexes in the overweight and underweight groups

复阶段(80~100 min),2组心率逐渐接近,差异不再明显,这表明偏瘦者的心率对代谢状态的波动反应较小,偏胖者则更依赖休息过程降低心率、恢复稳态。

2.5 主观评价

偏胖组与偏瘦组的主观评价指标如图8所示,由图8可知:偏胖组各项主观评价指标的评分均高于偏瘦组。试验初期(0~10 min),2组差异较小,主观感受接近;而进入高温环境并开始运动后,偏胖组的热感受、热不适、湿润感与疲劳感评分逐步升高,与偏瘦组的差距逐渐扩大。

整个试验过程中,偏胖者在热感相关指标上的评分始终高于偏瘦者,表明其在高温条件下承受了更大的心理与生理压力。这种差异可能与其体热积聚更快、散热效率较低、体表温度较高等因素有关,进而使其感受到更明显的不适与疲劳。偏瘦组与偏胖组主观评价指标显著性分析结果见表3。

表3 偏瘦组与偏胖组主观评价指标显著性分析结果

Table 3 Significance analysis of subjective evaluation

indexes of obese and thin participants

主观评价参数	正态分布性	统计方法	方差齐性	p 值
热感受	非正态分布	非参数性检验	—	0.136
热舒适	正态分布	t 检验	方差齐	0.000
服装湿润度	正态分布	t 检验	方差齐	0.001
皮肤湿润度	正态分布	t 检验	方差齐	0.106
热疲劳程度	正态分布	t 检验	方差齐	0.011

注:p<0.05 表示数据间存在统计学差异性,p<0.001 表示数据间存在极显著差异性。

统计分析结果表明:在该试验条件下,偏瘦组与偏胖组在热舒适度、服装湿润度和热疲劳程度这3项指标上存在显著性差异(p<0.05),仅在热感受和皮肤湿润度指标中不存在统计学差异性。由此可知:不同 BMI 人群对热环境的主观反应存在个体差异,具体表现为高 BMI 被试在高温环境下更易感受到不适,且衣物潮湿感更强、疲劳程度更高。

3 结 论

1) 高温环境中,BMI 差异对被试核心温度和总出汗量存在显著影响(p<0.001)。偏胖者和偏瘦者核心温度平均升高 0.55、0.46℃,且偏胖者总出汗量显著高于偏瘦者。

2) 环境温度对不同 BMI 被试平均皮肤温度的影响,会随热暴露时长增加而减弱。试验初始

10 min 内,偏胖者平均皮肤温度(31.9℃)显著低于偏瘦者(33.1℃), $p<0.001$ 。热暴露后,偏胖者平均皮肤温度增幅(4.2℃)显著高于偏瘦组(2.9℃)。

3) BMI 差异导致热舒适、服装湿润度和热疲劳程度存在显著性差异($p<0.05$),且试验全程偏胖者

各项主观评价指标均高于偏瘦者。

4) 由于样本规模和群体结构存在局限性,后续研究可扩展至女性、老年人等多样化人群,进一步探究 BMI 差异与性别、年龄等因素的交互作用,并结合热适应性评估构建个体化热风险模型。

参 考 文 献

[1] 谈建国,殷鹤宝,林松柏,等. 上海热浪与健康监测预警系统[J]. 应用气象学报, 2002, 13(3): 356-363.
TAN Jianguo, YIN Hebao, LIN Songbai, et al. Shanghai heat wave/health warning system[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2002, 13(3): 356-363.

[2] SEMENZA J. Excess hospital admissions during the July 1995 heat wave in Chicago[J]. American Journal of Preventive Medicine, 1999, 16(4): 269-277.

[3] WEISSKOPF M G, ANDERSON H A, FOLDY S, et al. Heat wave morbidity and mortality, Milwaukee, Wis, 1999 vs 1995: an improved response? [J]. American Journal of Public Health, 2002, 92(5): 830-833.

[4] 欧银萍. 热浪与寒潮期间老年人热反应研究[D]. 长沙:中南大学, 2022.
OU Yinping. Thermal responses of the elderly during heat wave and cold period [D]. Changsha: Central South University, 2022.

[5] 张翼,班婕,陈晨,等. 居民对热浪健康防护相关措施的支付意愿调查研究[J]. 环境与健康杂志, 2015, 32(8): 705-711.
ZHANG Yi, BAN Jie, CHEN Chen, et al. Willingness to pay (WTP) for preventive measures of heat wave adverse effects on health in Beijing[J]. Journal of Environment and Health, 2015, 32(8): 705-711.

[6] HEIDARI H, GOLBABAIE F, SHAMSIPOUR A, et al. Outdoor occupational environments and heat stress in Iran[J]. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2015, 13(1): 48-56.

[7] HELLON R F, LIND A R, WEINER J S. The physiological reactions of men of two age groups to a hot environment[J]. The Journal of Physiology, 1956, 133(1): 118-131.

[8] DAVOODI F, HASSANZADEH H, ZOLFAGHARI S A, et al. A new individualized thermoregulatory bio-heat model for evaluating the effects of personal characteristics on human body thermal response [J]. Building and Environment, 2018, 136: 62-76.

[9] MEADE R D, AKERMAN A P, NOTLEY S R, et al. Physiological factors characterizing heat-vulnerable older adults: a narrative review[J]. Environment International, 2020, 144: DOI: 10.1016/j.envint.2020.105909.

[10] COULL N A, WEST A M, HODDER S G, et al. Body mapping of regional sweat distribution in young and older males[J]. European Journal of Applied Physiology, 2021, 121:109-125.

[11] HARDY J D, DU BOIS E F. Differences between men and women in their response to heat and cold[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1940, 26(6): 389-398.

[12] XIONG Jing, LIAN Zhiwei, ZHOU Xin, et al. Investigation of gender difference in human response to temperature step changes[J]. Physiology & Behavior, 2015, 151: 426-440.

[13] YASUOKA A, KUBO H, TSUZUKI K, et al. Interindividual differences in thermal comfort and the responses to skin cooling in young women[J]. Journal of Thermal Biology, 2012, 37(1): 65-71.

[14] WANG Xingming, WANG Yijiang, LAI Xiaojuan, et al. Investigation of heat stress and thermal response in deep hot-humid underground environments: a field and experimental study[J]. Building and Environment, 2025, 270: DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.112506.

[15] 姚旺轩,赵胜凯,翟永超. 冷环境下不同身体质量指数人群热舒适对比研究[J]. 暖通空调, 2024, 54(4): 87-93.
YAO Wangxuan, ZHAO Shengkai, ZHAI Yongchao. Comparative study on thermal comfort of people with different body mass index in colder environment[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2024, 54(4): 87-93.

[16] WANG Xingming, ZHANG Yutao, HUANG Yiming, et al. Development and validation of an individualized predicted

- heat strain model for simulating physiological responses in various conditions[J]. *Building and Environment*, 2022, 214: DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.108922.
- [17] KEATINGE W R. Winter mortality and its causes[J]. *International Journal of Circumpolar Health*, 2002, 61(4): 292–299.
- [18] MARSHALL C H, FERGUSON A R, NIMMO A M. Human resting extracellular heat shock protein 72 concentration decreases during the initial adaptation to exercise in a hot, humid environment[J]. *Cell Stress Chaperones*, 2006, 11(2):129–134.
- [19] ZHOU Haixia, XIE Dong, XIAO Peilin. Research on thermal comfort of obese and overweight people during indoor running exercise[J]. *Building and Environment*, 2023, 242: DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110574.
- [20] 田水承, 周润康, 杨杰. 高温环境下降温服对消防员热反应的影响[J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(4): 166–171.
TIAN Shuicheng, ZHOU Runkang, YANG Jie. Effects of cooling garments on firefighters' thermal responses under high temperature[J]. *China Safety Science Journal*. 2020, 30(4): 166–171.
- [21] WS/T 428—2013, 成人体重判定[S].
WS/T 428—2013, Criteria for adult body weight assessment[S].
- [22] ISO 9886—2004, Ergonomics: evaluation of thermal strain by physiological measurements[S].
- [23] ZHANG Zhaohua, TANG Xiangning, LI Jun, et al. The effect of dynamic friction with wet fabrics on skin wetness perception[J]. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2020, 26(2): 370–383.
- [24] DOLSON C M, HARLOW E R, PHELAN D M, et al. Wearable sensor technology to predict core body temperature: a systematic review[J]. *Sensors*, 2022, 22(19): 7 639–7 655.
- [25] FAN Yuanchao, MCCOLL A K. Widespread outdoor exposure to uncompensable heat stress with warming[J]. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5(1): 762–774.
- [26] 曾朴, 朱能. 高温环境热习服训练中 PSI 与 PeSI 的研究[J]. *中国安全科学学报*, 2017, 27(11): 1–6.
ZENG Pu, ZHU Neng. Study on PSI and PeSI during heat acclimatization training in high-temperature environment[J]. *China Safety Science Journal*, 2017, 27(11): 1–6.
- [27] 吴雨曦. 面向高龄女性的智能调温加热服开发与舒适性研究[D]. 上海: 东华大学, 2020.
WU Yuxi. Study of smart temperature-regulating heating clothing and the thermal comfort for the elderly women[D]. Shanghai: Donghua University, 2020.
- [28] ZHOU Xin, LIAN Zhiwei, LAN Li. An individualized human thermoregulation model for Chinese adults[J]. *Building and Environment*, 2013, 70: 257–265.
- [29] 余娟. 不同室内热经历下人体生理热适应对热反应的影响研究[D]. 上海: 东华大学, 2012.
YU Juan. Studies on the effects of physiological acclimatization on thermal responses of people accustomed to different thermal indoor environments[D]. Shanghai: Donghua University, 2012.
- [30] 张子扬. 温度突变对人体热反应的影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
ZHANG Ziyang. Research on the influence of temperature step change on human thermal response[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023.

作者简介: 杨杰 (1987—),男,山西大同人,博士,教授,主要从事个体防护方面的研究。E-mail: jyang@xust.edu.cn。