

文章编号: 1671-6612 (2025) 06-795-10

高温高湿环境暴露下人体疲劳变化规律研究

白 灵 孙亮亮 胡 玥 苏小文 袁艳平

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 研究旨在探究高温高湿环境下高强度劳动对人体生理与主观疲劳的影响规律。通过模拟施工现场环境(温度35°C, 湿度70%RH), 选取9名健康受试者进行个性化高强度运动实验, 监测心率、血压、皮肤温度、口腔温度、鼓膜温度及主观疲劳指数等指标。实验结果表明, 高温高湿环境下劳动显著加剧生理负荷: 心率、皮肤温度、口腔温度、鼓膜温度与主观疲劳指数显著上升($p<0.05$), 体力工作效率(握力值)显著下降($p<0.05$), 脑力工作效率无显著差异($p>0.05$)。研究揭示了高温高湿环境下高强度劳动后疲劳的变化规律, 以及相应的健康风险, 为优化施工环境管理、制定劳动保护措施提供了科学依据。

【关键词】 高温高湿环境; 高强度劳动; 生理指标; 疲劳

中图分类号 R135.3 文献标志码 A

Study on the Variation Patterns of Human Fatigue Under High-Temperature and High-Humidity Conditions

Bai Ling Sun Liangliang Hu Yue Su Xiaowen Yuan Yanping

(Southwest Jiaotong University, School of Mechanical Engineering, Chengdu, 610031)

【Abstract】 This study aims to investigate the impact of high-intensity labor on human physiological responses and subjective fatigue under high-temperature and high-humidity environments. By simulating on-site construction conditions (temperature: 35°C, humidity: 70% RH), nine healthy participants were recruited for personalized high-intensity exercise experiments. Key indicators, including heart rate, blood pressure, skin temperature, oral temperature, tympanic temperature, and subjective fatigue index, were monitored. Results revealed that high-temperature and high-humidity environments significantly exacerbated physiological stress: heart rate, skin temperature, oral temperature, tympanic temperature, and subjective fatigue index increased markedly ($p < 0.05$), while physical work efficiency (measured by grip strength) declined significantly ($p < 0.05$). No significant difference was observed in mental work efficiency ($p > 0.05$). The study elucidates fatigue accumulation patterns and associated health risks under such extreme environmental conditions, providing a scientific basis for optimizing construction environment management and formulating labor protection measures.

【Keywords】 High-temperature and high-humidity environment; High-intensity labor; Physiological indicators; Fatigue

0 引言

疲劳指因从事体力活动而导致的身体工作能力下降^[1], 是一个复杂的心理与生理过程, 劳动强

度的增加, 会使心率、鼓膜温度、平均皮肤温度、呼吸频率和收缩压升高, 同时热感觉、主观疲劳感觉等心理反应也随着增加。在劳动密集型的建筑行

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52038009)

作者简介: 白 灵(1999.06-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: bai_ling@189.cn

通讯作者: 孙亮亮(1982.04-), 女, 博士, 副教授, E-mail: sunliangliang@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2025-04-25

业中,工人常在施工现场承受持续的身体疲劳。研究表明,建筑工地中 20%~40% 的不同工种工人在工作中,会频繁超过体力劳动的一般生理负荷阈值^[2]。

从生理层面看,高强度劳动引发的疲劳会显著扰乱机体内稳态:心血管系统因持续高负荷导致心率加快、血压波动及血流再分配失衡^[3];体温调节系统因代谢产热与环境热应力叠加,引发核心温度上升与散热效率下降,加剧热蓄积风险^[4]。同时,肌肉乳酸堆积与能量底物耗竭进一步削弱运动耐力,形成恶性循环^[5]。心理层面,疲劳通过中枢神经系统代谢压力降低认知功能,表现为注意力分散、反应速度迟滞及决策能力下降^[6];主观疲劳感知的升高还可能诱发情绪倦怠,降低工作动机^[7]。上述生理与心理的交互作用,最终映射至工作效率的显著衰退:体力劳动输出减少、操作失误率上升,且在高温高湿等恶劣环境下,疲劳与环境的协同效应可能成倍放大安全风险^[2]。例如,建筑工人在高温环境中作业时,疲劳导致的动作精度下降可使事故概率增加 40% 以上^[8]。

施工现场往往环境恶劣,高温高湿作为典型环境因素,可能加剧体力疲劳的负面影响,形成恶性循环。高温高湿条件下,皮肤散热效率显著受限^[9],迫使机体依赖代偿性生理反应以延缓核心温度上升,这一过程伴随能量消耗增加、心血管系统负荷加重及神经肌肉功能下降,最终导致疲劳积累^[10]。

因此,高温高湿环境下人体更易产生疲劳^[4],而体力活动又会增加身体产热,进一步放大高温的影响。而目前针对高温高湿环境劳动后人体疲劳变化规律的研究较少,本研究旨在研究高温高湿环境下人体进行高强度劳动的疲劳规律研究,通过监测相关指标变化情况,为高温高湿环境施工人员的健康安全提供有效保障。

1 研究方法

1.1 实验环境和工况

本实验采用西南交通大学绿色人居环境控制与建筑工程实验室的高海拔低气压实验舱 GDTC-10000 模拟高温高湿工作环境,内置加热器、加湿器及采用制冷压缩机改变舱内空气温度和相对湿度,所有环境参数控制均可在控制面板上进

行操作。舱体尺寸为 $\varphi 2.6\text{m} \times 2.8\text{m}$, 控温范围为 5~50℃, 控制精度为 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$, 湿度控制范围为 20%~95%RH, 控制精度为 $\pm 3\%$, 实验舱实物如图 1 所示。



图 1 实验舱实物图

Fig.1 Plan and section of high altitude low-pressure experiment chamber

根据某隧道实测空气温度为 35℃, 湿度为 70%RH~80%RH, 确定本实验模拟施工环境工况温度为 35℃。根据 Hu 等^[11]学者的研究数据, 某高地温隧道施工期间的环境相对湿度测量值范围为 50% 至 80%。在对某高地温和高水温共同作用下的隧道施工环境的现场测试中, 相对湿度超过 70% 的隧道段落长度占进尺长度的 87.5%^[12]。基于这一实测数据, 本研究将实验环境的相对湿度工况设定为 70%, 以模拟隧道施工中的高湿度环境条件。

1.2 实验样本

本次实验对招募的受试者进行了严格心电图、相关病史和常住地的筛选和基本指标测量,共选拔了 9 名西南交通大学的学生作为受试者。受试者平均年龄为 23.9 ± 0.6 岁, 平均身高为 $173.7 \pm 5.0\text{cm}$, 体重为 $65.5 \pm 4.7\text{kg}$ 。实验时穿着统一服装, T 恤、短裤、短袜和运动鞋, 服装热阻约为 0.6clo。同一受试者, 实验间隔在 2 天以上, 每次实验安排在一天中的相同时间段进行, 以减少近日节律对人体生理指标的影响。

1.3 实验测量指标

实验过程中, 生理参数的测量包括心率、心率变异性、口腔温度、鼓膜温度、皮肤温度、摄氧量、呼吸商和血压。各生理参数测试仪器如表 1 所示。心率和皮肤温度为连续测量, 其他生理指标根据实验安排间断测量。

表1 生理参数测试仪器

Table 1 Physiological indicators and their measuring instruments

设备	型号	测量范围
心率传感器	Polar H10	心率: 30~240beat; 精度±1beat 涡轮流量: 0.08~16L/s
遥测新陈代谢仪	COSMED K5	氧分析器范围: 0~100%; 精度: ±0.02% 二氧化碳范围: 0~12%; 精度: ±0.01%
上臂式血压计	OMRONJ760	血压: 0~299mmHg; 精度: ±3mmHg
欧姆龙电子体温计	MC-341	口腔温度: 32~42°C; 精度: ±0.1°C
iButton 温度传感器	DS1923	皮肤温度: -20~85°C; 精度: ±0.1°C

平均皮肤温度的测量选用使用广泛的四点法^[13], 四个测点分别为上臂、前胸、大腿和小腿, 计算方法如式(1)所示。

$$T_{sk} = 0.3T_{chest} + 0.3T_{arm} + 0.2T_{thigh} + 0.2T_{shin} \quad (1)$$

式中: T_{chest} 为左胸皮肤温度, °C; T_{arm} 为右

上臂皮肤温度, °C; T_{thigh} 为右大腿皮肤温度, °C; T_{shin} 为右小腿皮肤温度, °C。

主观参数的测量为主观疲劳指数, 采用 Borg CR-10 量表^[7], 具体问卷如表 2 所示。

表2 Borg 10 级量表

Table 2 Borg's CR-10

等级	疲劳描述	含义
0	一点也不	没有感觉到任何费力, 没有肌肉劳累, 没有气喘吁吁或呼吸困难
0.5	极其轻微	非常非常轻微的呼吸困难或疲劳, 几乎难以察觉(若有若无)
1	非常弱	非常轻微的呼吸困难或疲劳(相当于按照自己的节奏慢慢行走)
2	弱	轻度的呼吸困难或疲劳
3	中等	中度的呼吸困难或疲劳(不困难, 可以继续进行)
4		略严重的呼吸困难或疲劳
5	强	严重的呼吸困难或疲劳(可以坚持继续, 约为最大值的一半)
6		5~7 之间
7		非常严重的呼吸困难或疲劳(不得不强迫自己继续)
8	非常强	7~9 之间
9		非常非常严重的呼吸困难或疲劳(几乎达到最大值)
10	极其强	极度的呼吸困难或疲劳, 达到极限 (目前为止所经历的最强烈的程度)

工作效率的评估分为体力工作效率和脑力工作效率两个维度, 如图 2 所示。脑力工作效率采用

安菲莫夫计量表进行测量, 计算方法如式(2)所示, 体力工作效率采用惯用手握力值。

$$\text{脑力工作效率} = \left(\frac{\text{阅读字数}}{2} \right) \times \left(\frac{\text{应选字数} - \text{错选字数}}{\text{应选字数}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

安菲莫夫字母表 1

姓名: _____ 轮次: _____

请在一分钟内划掉规定字母, 注意不要用手指或者笔尖进行协助。

KEKHBAEBXKXBECKACNABECAEKACXKHCBKXBHE
 HCBAKXXCAXNKHXNIECHBAHKENXCKBWHCANXEANX
 ABXKACENKXEHNEABKCEKHCALKCABHCBKNNXNHBXAB
 NEHXBHNAHECAHCEBHEXCHNBKAXHEAHXKANEXBCXNACK
 XBKNAACHENCAHNCNBKCBAXKBENCBKHEXKEKEBXHC
 BAHKEKXBIIKXCEABKEXANHCEBKHNAAEXHBNEXKHONA
 HXENACBANCKBCANCKEXNEXCABXKHNAACKXHNEBKHN
 CBXHNCXKAQEAXBKHENCABKEXCAXNXHKCBKENHEB
 HKNEXCAKNAEBEHANCKABHKCBHKXEBHAENHAKENBX
 BECXBACCHNXCNXHEBEKCBENCBNAKNCABNEXCANHE
 XNAKHBNKBNKBNCHEBEXCHKAHBCKNBHEXANKXEC
 ACXEKAXCACKHBXHEAHSENKEBIIKXEABKEXABKEHCN
 KHNAEBHXCXHEHCSNAHCEACBANCBCNCAESENAXNEXA
 CKBNHXBKEHNLEBIXLNCBKAAXKHNAKXHNEBAHCBX
 NCHBXKAHEACBKHENCAKEXCAXNBHCKBKEHNEANX
 AHBNACXABKNCEXKHEBHNKAHECXBEXCABKCHNX

(a) 安菲莫夫字母表



(b) 电子握力计

图 2 工作效率测试

Fig.2 Work efficiency test

1.4 实验流程

为了避免自然环境（例如夏天的热服习）对本实验造成的影响，本实验在 2024 年 10 月至 2025 年 1 月之间进行。

根据《ACSM 运动测试与运动处方指南（第 10 版）》中认为 $60\% \dot{V}O_2 \text{ max}$ 的强度属于较大强度，对应“有些吃力到很吃力”（RPE14~17）的疲劳程度^[14]。对于大多数未经训练的人群而言，乳酸阈值通常出现在 $\dot{V}O_2 \text{ max}$ 的 40% 至 60% 之间^[15]，当运动强度超过乳酸阈，无氧糖酵解比例增加，乳酸生成速度超过清除能力，导致血乳酸浓度显著上升，引发疲劳。因此，在本次研究中，选择 $60\% \dot{V}O_2 \text{ max}$ 的运动强度模拟高强度劳动，减小个体差异对疲劳状态的影响。

最大摄氧量的测量采用采用 Bruce 跑台方案实现递增负荷^[16]，如表 3 所示。从初始运动负荷速度 2.7km/h、坡度 10% 开始，每 3 分钟增加一次运动强度直至力竭。由于高温高湿环境所产生热应力对受试者心肺功能影响较大^[3]，对过去测试方法中的经典判断依据综合比较^[17~21]，确定以下判断标准，选取运动结束前一分钟平均摄氧量作为最大摄氧量测试结果。测试有效的判断标准为以下四条满足三条：（1）呼吸熵 ≥ 1.1 ；（2）心率达到 190bpm；（3）负荷增加，但 $\dot{V}O_2$ 趋于平稳；（4）受试者有力竭表现，主动停止。

表 3 Bruce 跑台方案^[14]Table 3 Bruce treadmill protocol^[14]

阶段	速度/(km/h)	坡度/%	持续时间/min
1	2.7	10	3
2	4	12	3
3	5.4	14	3
4	6.7	16	3
5	8	18	3
6	8.8	20	3
7	9.6	20	3

在劳动过程中，基于每位受试者最大摄氧量，制定个人 $60\% \dot{V}O_2 \text{ max}$ 劳动强度的运动方案，从而确保每位受试者在后续疲劳恢复实验中达到相同疲劳程度。参考《ACSM 运动测试与运动处方指南》对运动强度的推荐计算方法^[14]如式（3）所示，根据 Bruce 跑台方案初始坡度 10%，计算对应速度，对不同受试者制定个性化运动方案。

$$\text{速度} = \frac{60\% \dot{V}O_2 \text{ max} - 3.5}{0.29} \quad (3)$$

该公式适用于速度 $> 5.6 \text{ km/h}$ 的跑步活动时最准确，式中速度单位：m/min。受试者的摄氧量测试结果和计算所得个性化运动方案如表 4 所示。

表4 受试者个性化运动方案

Table 4 Personalized exercise program for subjects

受试者	60% $\dot{V}O_2$ max/ [mL/(kg·min)]	坡度/%	速度/(km/h)
1	36.6	10%	6.8
2	34.2	10%	6.4
3	37.1	10%	6.9
4	38.0	10%	7.1
5	34.6	10%	6.4
6	33.0	10%	6.1
7	40.2	10%	7.6
8	38.4	10%	7.2
9	35.2	10%	6.6

基于每个受试者最大摄氧量指定个性化高强度运动方案, 用于疲劳诱导实验中, 实验流程如图 3 所示。实验分为准备阶段、热适应阶段和高强度

运动阶段。其中, 考虑到人体在热应力的影响下, 最大摄氧量和最大心率会受损^[3,22], 而人体进入新的环境需要约 20~30 分钟达到稳定状态^[23], 增加了 30 分钟的热适应阶段, 保证相对强度的一致性。

受试者到达实验室后更换统一服装, 进入实验准备房间佩戴心率带、手表和皮肤温度计, 静坐休息 30 分钟, 以稳定受试者生理状态。最后 5 分钟测量受试者基础心率、血压、口腔温度和鼓膜温度, 填写主观问卷和疲劳指数, 并完成工作效率测试。随后进入高温高湿环境 (35°C, 70%) 静坐 30 分钟, 每十分钟测量受试者、血压、口腔温度和鼓膜温度, 填写主观疲劳指数, 静坐 30 分钟后完成工作效率测试, 随后站上跑步机开始运动。运动阶段, 受试者以表 3 所示运动方案开始运动, 每三分钟询问其疲劳情况, 直至力竭。运动结束后测量受试者心率、血压、口腔温度和鼓膜温度, 填写主观疲劳指数, 并完成工作效率测试。

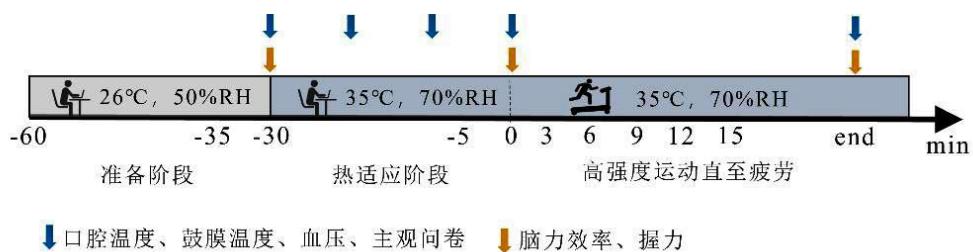


图3 高温高湿环境疲劳实验流程

Fig.3 Fatigue test protocol in high-temperature and high-humidity environment

在运动过程中, 陪护人员观测受试者心率、核心温度, 满足以下任意一条标准^[24], 结束受试者运动: (1) 受试者出现面色苍白、气喘不定、步伐踉跄等症状; (2) 受试者感到力竭, 主动要求停止; (3) 受试者心率达到 180bpm 持续 3 分钟。

1.5 统计分析方法

本研究采用 IBM SPSS 和 Origin 进行统计分析, 所有测试数据均以“均值±标准差” ($\bar{x} \pm s$) 来表示。数据处理遵循以下流程: 首先通过箱线图法 (四分位距法) 识别并剔除超出 1.5iQR 范围的异常值; 随后运用 Shapiro-Wilk 检验 ($\alpha=0.05$) 对样本数据进行正态性检验。针对重复测量设计的数据, 正态分布数据采用重复测量方差分析, 辅以 Greenhouse-Geisser 校正处理球形假设违例; 非正态分布数据则选用非参数 Wilcoxon 秩和检验法分

析。

2 实验结果与分析

2.1 心率

疲劳实验的心率变化如图 4 所示, 由于心率为 1 分钟平均值, 时间样本点较多, 选取静息、热适应 30 分钟和运动结束三个时间点的心率数据进行分析, 分析结果如图 4 (b) 所示。在静息阶段心率为 81 ± 8 bpm, 在进入高温高湿环境后, 心率出现波动, 在高温高湿环境热适应 30 分钟后, 心率上升至 87 ± 8 bpm, 与静息心率呈现差异显著 ($p < 0.05$), 表明高温高湿环境下, 受到环境温度和热辐射的影响, 机体为维持热平衡状态, 会增加心率, 以提高血液循环速度和血流量, 以促进机体散热^[25]; 同时身体交感神经系统受到刺激, 释放更多的肾上腺素, 使得心跳加快^[26]。

开始运动后, 心率剧烈上升, 以应对代谢强度加大带来的供氧需求增加, 心脏通过调节心输出量保证身体肌肉组织的物质代谢需求。在运动结束

时, 心率达到 186 ± 9 bpm, 与运动前心率呈现差异显著 ($p < 0.05$), 接近人体最大心率, 若持续上升, 有潜在的健康风险。

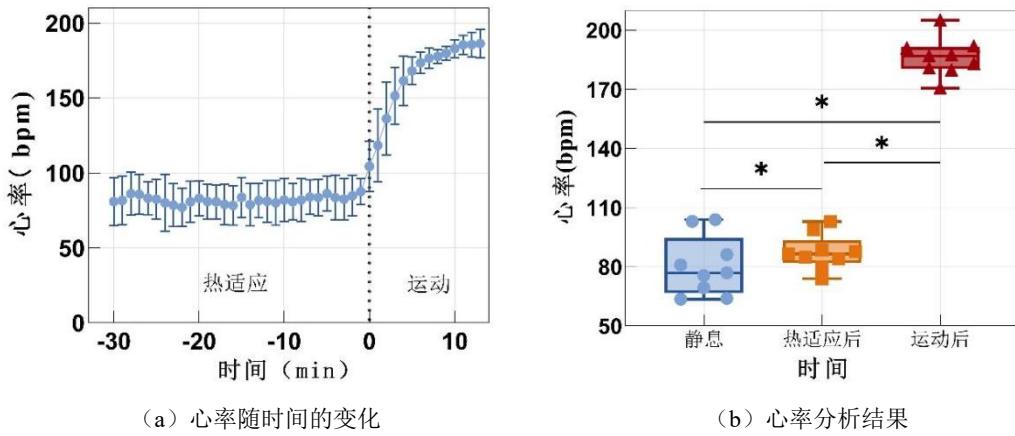


图 4 心率变化情况

Fig.4 Heart rate changes

2.2 血压

血压的变化情况如图 5 所示。收缩压的实验结果, 在静息状态和热适应 30 分钟的收缩压分别为 116 ± 8 mmHg、 114 ± 9 mmHg, 结合显著性分析, 认为进入高温高湿环境对人体收缩压没有统计学上的差异。这是因为输出量与血管阻力双重调节的精准平衡, 一方面高温高湿环境使皮肤表现血管扩张以提高散热效率, 皮肤血管阻力下降, 血流量增加, 使得血压有所下降^[8]; 另一方面, 心输出量增加使

心率和每搏量增加, 两者相互作用维持血压稳定。在经过高强度运动后, 收缩压大幅增加至 130 ± 11 mmHg, 与其他时间点收缩压表现出显著差异 ($p < 0.05$), 其生理机制使心输出量的增加维持机体代谢所需供氧。

舒张压的实验结果显示, 在静息状态、热适应 30 分钟和高强度运动后的舒张压分别为 70 ± 10 mmHg、 68 ± 8 mmHg 和 72 ± 13 mmHg, 分析显示舒张压的变化无显著差异。

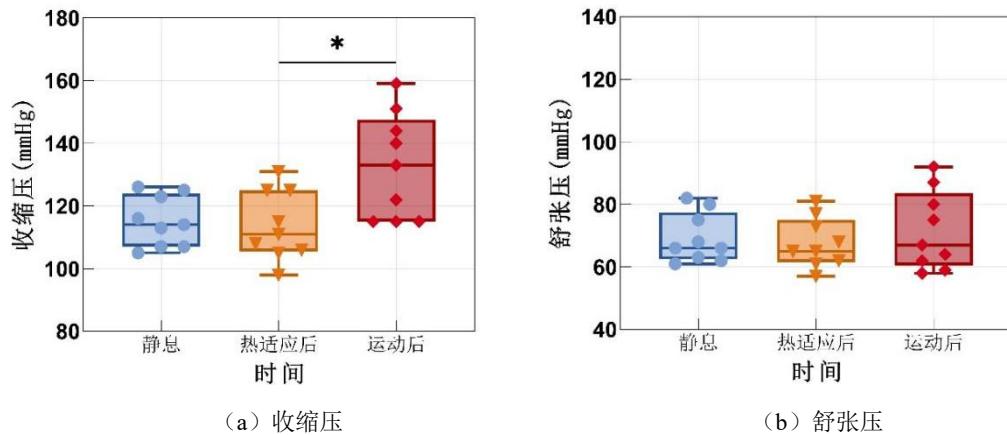


图 5 血压变化情况

Fig.5 Blood pressure changes

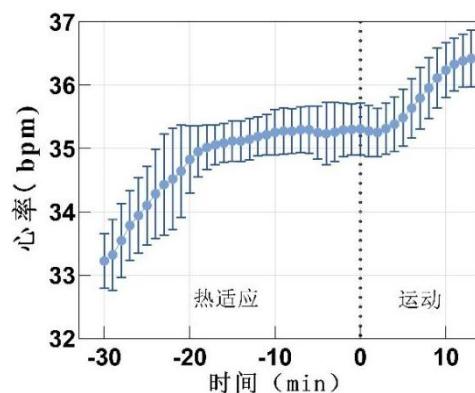
2.3 皮肤温度

皮肤温度的变化情况如图 6 所示。在静息环境 (26°C) 下, 人体平均温度约在 $33.2 \sim 33.4^{\circ}\text{C}$ 之间, 根据热舒适相关理论, 可认为人体处于舒适状

态^[23]。进入高温高湿的热适应环境, 人体迅速对环境的变化做出反应, 由于在高温环境下血管扩张和出汗增加的生理适应调节, 平均皮肤温度快速上升, 约 20 分钟后稳定至 $35.4 \pm 0.45^{\circ}\text{C}$, 并相较于静

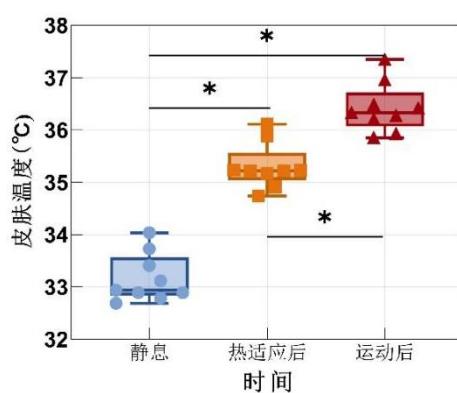
息状态表现出显著差异性 ($p<0.05$)。在高温环境下, 平均皮肤温度已高于环境温度, 根据热交换相关理论, 此时体内产生的热量超过了皮肤温度散发的热量, 导致体内产生的热量累积。而较高的环境湿度下 (70%), 汗液蒸发的效率较低, 使得皮肤难以通过蒸发散热, 从而增加热应激的风险。

开始运动后, 剧烈运动导致代谢产热激增, 身体需通过皮肤快速散热, 皮肤温度迅速升至 $36.5\pm0.27^{\circ}\text{C}$, 与运动前皮肤温度呈现显著差异



(a) 皮肤温度随时间的变化

($p<0.05$)。从图 6 (a) 可见, 皮肤温度在运动的前 5 分钟并未发生有效上升, 这是因为体温调节系统的滞后性。运动带来的代谢增加产生大量热量, 身体对热量进行调节和分配主要通过血液循环系统, 运动开始时, 心脏泵送的血液量和循环速度逐渐增加, 以供给肌肉更多的氧气和营养物质。在此过程中, 血流首先会集中供应正在活动的肌肉以保持机体运动输出, 其次是皮肤表面的血管扩张。



(b) 皮肤温度分析结果

图 6 皮肤温度变化情况

Fig.6 Skin temperature changes

2.4 口腔温度

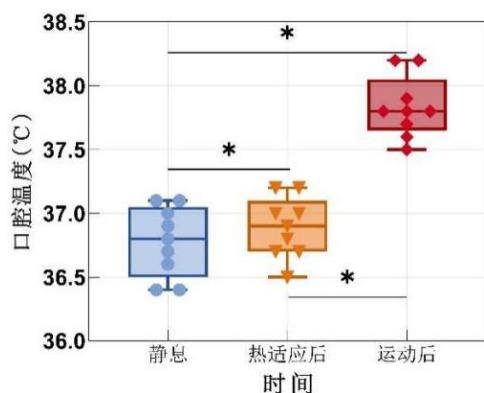


图 7 口腔温度变化情况

Fig.7 Oral temperature changes

口腔温度的实验结果如图 7 所示。在静息状态下, 受试者口腔温度为 $36.8\pm0.35^{\circ}\text{C}$, 处于人体口腔温度正常范围^[27]。人体进入高温高湿环境, 口腔温度持续上升, 在热适应 30 分钟和运动后, 分别为 $36.9\pm0.24^{\circ}\text{C}$ 和 $37.8\pm0.24^{\circ}\text{C}$, 在统计学上表现出显著差异 ($p<0.05$)。口腔温度受体内和外部温度的影响较为缓慢, 口腔是相对封闭空间, 有较强血

液循环, 受外部环境影响较小。开始运动后, 代谢强度的剧烈增加使机体产生大量热, 使口腔温度达到 $37.8\pm0.24^{\circ}\text{C}$, 接近安全极限水平^[28], 反应体内热量累计和核心温度的上升, 此时机体处于较强的能量消耗阶段, 容易产生中暑等相关疾病风险。

2.5 鼓膜温度

本次研究中鼓膜温度的测量采用红外线耳温枪, 实验结果如图 8 所示。鼓膜温度测量位置靠近大脑, 可作为人体生理研究中用于代替核心温度的参数, 能够有效衡量人体核心的热状态。下丘脑体温调节中枢感知核心温度上升后, 通过交感神经兴奋引发外周血管扩张, 耳部皮肤血管舒张使局部血流量激增, 导致耳道内热辐射增强。

结合鼓膜温度的实验结果, 发现其随时间呈上升趋势, 且在运动后的鼓膜温度与其他时间表现出显著差异。在静息状态下, 受试者鼓膜温度为 $36.8\pm0.25^{\circ}\text{C}$, 处于人体口腔温度正常范围^[27]。人体进入高温高湿环境后 30 分钟和运动后, 鼓膜温度持续上升, 分别为 $36.9\pm0.22^{\circ}\text{C}$ 和 $38.0\pm0.26^{\circ}\text{C}$, 运动后鼓膜温度显著上升 ($p<0.05$)。

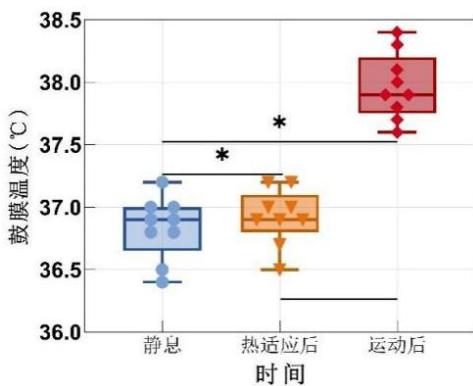


图 8 鼓膜温度变化情况

Fig.8 Tympanic temperature changes

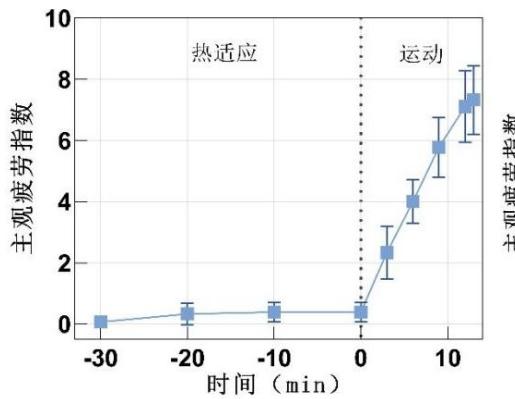
2.6 主观疲劳指数

本实验采用 10 级疲劳量表, 从 0 (一点也不疲劳) 到 10 (极其强的疲劳), 反应人体基于自

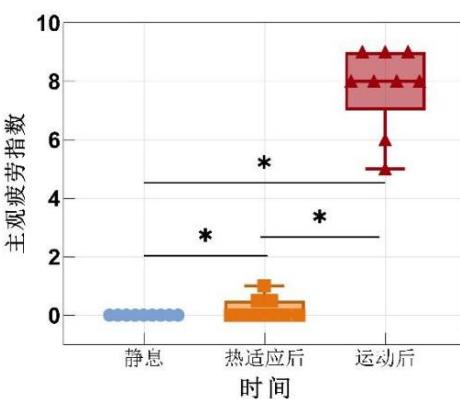
身疲劳情况的主观评价, 实验结果如图 9 所示。

在静息状态, 受试者疲劳评价为 0.06 ± 0.17 (一点也不疲劳), 满足实验对受试者实验基础状态的要求。在进入高温高湿环境后, 受试者在热适应 30 分钟后的疲劳指数 0.39 ± 0.33 , 与静息时主观疲劳指数呈现显著差异。这可能是因为高温高湿环境对人体疲劳感的影响存在但有限, 在人体处于静坐的低代谢状态下, 主观疲劳指数不会出现大幅增加的现象。

在开始运动后对疲劳指数的记录频次变为 3 分钟一次, 便于及时掌握受试者是否达到力竭状态。在开始运动后, 受试者疲劳指数不断增加, 在运动 13 分钟后达到 7.38 ± 1.12 , 对应疲劳描述中“非常强”的疲劳等级, 满足诱导实验的疲劳设定目标, 显著高于运动前主观疲劳指数。



(a) 主观疲劳指数随时间的变化



(b) 主观疲劳指数分析结果

图 9 主观疲劳指数

Fig.9 Subjective fatigue index

2.7 工作效率

脑力效率的测量在静息状态结束、热适应 30 分钟和运动结束三个时间进行测量, 通过安菲莫夫字母表测试评估了高温环境下短时高强度运动对脑力效率的影响, 实验结果如图 10 (a) 所示。分析发现三个时间点的数据之间没有表现出显著差异, 这可能是因为不同脑力测试对不同的工况有影响, 而本次短时高强度疲劳对安菲莫夫字母表这一种测试工具的结果不产生明显影响。

体力工作效率的测量利用惯用手的握力值 (kg)

表示, 实验结果如图 10 (b) 所示。对三次握力测试结果进行分析, 发现各状态下握力表现出较强的显著性 ($p < 0.05$), 在运动后受试者的惯用手握力均有所减少, 作为体力表征良好, 受试者在进入高温高湿环境热适应 30 分钟后, 其握力水平从相较于静息状态 43.6 ± 8.3 kg 显著减少至 41.2 ± 7.9 kg, 这可能是热应激水平上升和主观感受带来的体力水平下降。在运动后, 其惯用手的握力减少至 38.3 ± 7.6 kg, 体现了通过跑台进行高强度劳动对身体疲劳的影响是全面的, 表现为握力的显著减少。

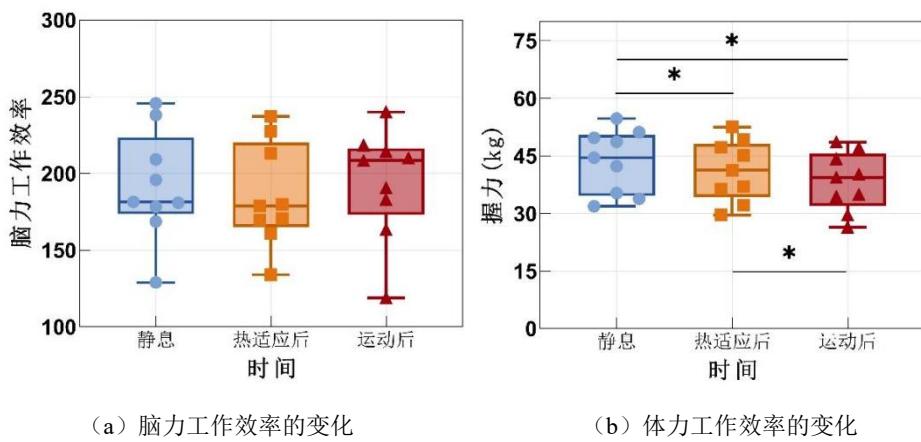


图 10 工作效率

Fig.10 Work efficiency

3 结论

本研究通过模拟高温高湿环境下人体疲劳实验, 测试了受试者心率、血压、皮肤温度、口腔温度、鼓膜温度、主观疲劳指数和工作效率, 揭示了生理指标和工作效率的疲劳变化规律, 主要结论如下:

(1) 心率在高强度劳动后由 $87 \text{ bpm} \pm 8 \text{ bpm}$ 增加为 $186 \pm 9 \text{ bpm}$ ($p < 0.05$), 接近最大心率阈值; 收缩压在运动后由 $114 \pm 9 \text{ mmHg}$ 显著升高至 $130 \pm 11 \text{ mmHg}$ ($p < 0.05$), 表明心输出量需求激增与代谢压力加剧。皮肤温度在运动后升至 $36.5^\circ\text{C} \pm 0.27$ ($p < 0.05$), 口腔温度与鼓膜温度分别升高为 $37.8 \pm 0.24^\circ\text{C}$ 和 $38.0 \pm 0.26^\circ\text{C}$ ($p < 0.05$), 表明体内热蓄积严重, 高湿环境下汗液蒸发受阻, 导致核心温度恢复延迟, 加剧热应激风险。

(2) 工作效率

体力工作效率(握力值)在高温高湿环境下显著下降为 $38.3 \pm 7.6 \text{ kg}$ ($p < 0.05$), 反映肌肉疲劳与神经肌肉功能抑制; 而脑力工作效率(安菲莫夫测试)未呈现显著变化 ($p > 0.05$), 可能与测试工具敏感性或短时疲劳对复杂认知任务影响有限有关。结果表明, 高温高湿环境对体力劳动的安全与效率威胁更为直接, 需优先优化体力作业的轮班制度与机械化替代方案。

但本研究仍存在不足, 研究对象为有锻炼习惯的大学生, 他们与高温环境工作者在身体指标和热适应程度上存在差异, 建议以后的研究可以考虑选择工人进行实验室或实地研究。另外, 本研究仅考

虑高温高湿单一工况下的人体疲劳, 未来应增加风速、辐射等环境因素, 并扩大温湿度研究范围。

参考文献:

- [1] Gawron V J, French J, Funke D. An overview of fatigue[M]. Stress, workload, and fatigue. Mahwah, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 2001: 581-595.
- [2] Abdelhamid T S, Everett J G. Physiological Demands during Construction Work[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2002, 128(5):427-437.
- [3] Sawka M N, Young A J, Cadarette B S, et al. Influence of heat stress and acclimation on maximal aerobic power[J]. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 1985, 53(4):294-298.
- [4] Nybo L, Rasmussen P, Sawka M N. Performance in the Heat—Physiological Factors of Importance for Hyperthermia-Induced Fatigue[M]. Comprehensive Physiology. John Wiley & Sons, Ltd, 2014:657-689.
- [5] Parkin J M, Carey M F, Zhao S, et al. Effect of ambient temperature on human skeletal muscle metabolism during fatiguing submaximal exercise[J]. Journal of Applied Physiology, 1999, 86(3):902-908.
- [6] Ouyang Y, Luo X. Effects of physical fatigue superimposed on high temperatures on construction workers' cognitive performance[J]. Safety Science, 2025, 181:106705.
- [7] Borg G. Psychophysical scaling with applications in

physical work and the perception of exertion.[J]. Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, 1990,16(1):55-58.

[8] 何佳泽.基于生理参数监测的建筑工人高温热应激劳动保护研究[D].重庆:重庆大学,2019.

[9] Bright F M, Clark B, Jay O. Elevated Humidity Impairs Evaporative Heat Loss and Self-Paced Exercise Performance in the Heat[J]. SCANDINAVIAN JOURNAL OF MEDICINE & SCIENCE IN SPORTS, 2025,35(3):e70041.

[10] Kenny G P, McGinn R. Restoration of thermoregulation after exercise[J]. Journal of Applied Physiology, 2017,122(4):933-944.

[11] Yunpeng H, Mingnian W, Qiling W. Field test of thermal environment and thermal adaptation of workers in high geothermal tunnel[J]. Building and Environment, 2019,160:106174.

[12] 于丽,唐永红,路明,等.高温高湿隧道工人劳动强度和劳动时间研究[J].地下空间与工程学报,2024,20(5):1665-1675.

[13] Ramanathan N L. A new weighting system for mean surface temperature of the human body[J]. Journal of Applied Physiology, 1963,19(3):531-533.

[14] 美国运动医学学会.ACSM 运动测试与运动处方指南(第 10 版) [M].王正珍,译.北京:北京体育大学出版社,2019.

[15] Belman M J, Gaesser G A. Exercise training below and above the lactate threshold in the elderly[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 1991,23(5):562.

[16] Kozlov S, Caprnada M, Chernova O, et al. Peak Responses during Exercise Treadmill Testing using Individualized Ramp Protocol and Modified Bruce Protocol in Elderly Patients[J]. Folia Medica, 2020,62(1):76-81.

[17] Hermansen L, Saltin B. Oxygen uptake during maximal treadmill and bicycle exercise.[J]. Journal of Applied Physiology, 1969,26(1):31-37.

[18] Howley E T, Bassett D R, Welch H G. Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary[J]. Medicine & Science in Sports & Exercise, 1995,27(9):1292.

[19] Hue O, Antoine-Jonville S, Galy O, et al. Maximal oxygen uptake, ventilatory thresholds and mechanical power during cycling in Tropical climate in Guadeloupean elite cyclists[J]. Journal of Science and Medicine in Sport, 2010,13(6):607-612.

[20] Gallego-Selles A, Galvan-Alvarez V, Martinez- Canton M. Fast regulation of the NF- κ B signalling pathway in human skeletal muscle revealed by high-intensity exercise and ischaemia at exhaustion: Role of oxygenation and metabolite accumulation[J]. Redox Biology, 2022,55:102398.

[21] Unhjem R J. Changes in running economy and attainable maximal oxygen consumption in response to prolonged running: The impact of training status[J]. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 2024,34(5):e14637.

[22] Zhao J, Lorenzo S, An N. Effects of heat and different humidity levels on aerobic and anaerobic exercise performance in athletes[J]. Journal of Exercise Science & Fitness, 2013,11(1):35-41.

[23] 刘蔚巍.人体热舒适客观评价指标研究[D].上海:上海交通大学,2007.

[24] 许国荣.高温高湿低压低氧环境作业人员综合生理指标及耐受时间研究[D].成都:西南交通大学,2023.

[25] 季月萌.高温高湿环境下不同降温方式对运动后四千米计时赛及恢复的影响[D].北京:首都体育学院,2024.

[26] 何博.高温作业下人体热反应影响因素及热应力评估[D].重庆:重庆大学,2023.

[27] 许国荣,胡玥,孙亮亮.高温高湿低压低氧环境下人体生理应激反应研究[J].制冷与空调,2023,37(4):488-494.

[28] 王廷宇.高温矿井热湿环境对劳动效率的影响研究[D].西安:西安建筑科技大学,2020.