

文章编号: 1671-6612 (2025) 04-467-10

高温高湿低压低氧环境下 生理参数变化规律及疲劳预测

张慎为 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】 研究了高温高湿低压低氧环境对长时间耐力作业人员生理参数与疲劳时间的效应, 以及使用生理参数预测作业人员完成任务概率的可靠性。研究设计了一个无平行对照的重复测量试验, 环境因子水平为 $3(33^{\circ}\text{C}, 37^{\circ}\text{C}, 40^{\circ}\text{C}) \times 3(96.5\text{kPa}, 65.7\text{kPa}, 63.2\text{kPa}) \times 80\%\text{RH}$, 受试者为 10 名男性大学生。研究结果发现, 温度对退出时间 (Wald $\chi^2=881.722$, $P=0.001$) 以及退出时的心率 (Wald $\chi^2=76.721$, $P=0.001$)、血氧饱和度 (Wald $\chi^2=38.697$, $P=0.001$)、口腔温度 (Wald $\chi^2=358.792$, $P=0.001$) 效应显著, 压力对退出时间 (Wald $\chi^2=52.653$, $P=0.001$) 以及退出时的口腔温度 (Wald $\chi^2=16.545$, $P=0.001$)、血氧饱和度 (Wald $\chi^2=206.59$, $P=0.001$) 效应显著。温度和压力存在对退出时间和退出时刻血氧饱和度的拮抗作用。使用口腔温度和血氧饱和度可以较好预测受试者完成整个任务的概率, ROC 曲线下面积 $\text{AUC}=0.824$, 预测效果受个体差异影响, 加入个体差异后 $\text{AUC}=0.912$ 。口腔温度和血氧饱和度可以较好的预测高温高湿低压低氧环境作业人员完成任务的能力, 可以为实际作业环境中疲劳的检测和评价方法提供参考。

【关键词】 高温高湿低压低氧环境; 作业疲劳; 生理参数; 疲劳预测

中图分类号 X968 文献标志码 A

The Variation Patterns of Physiological Parameters and Fatigue Prediction under Combined Hot-Humid and Hypobaric Hypoxia

Zhang Shenwei Sun Liangliang Hu Yue Su Xiaowen Yuan Yanping

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

【Abstract】 This study investigated the effects combined hot-humid and hypobaric hypoxia on the physiological parameters and fatigue time of personnel engaged in long-duration endurance tasks, as well as the reliability of using physiological parameters to predict the probability of task completion by the personnel. A non-parallel controlled repeated measurement experiment was designed, with environmental factor levels of $3(33^{\circ}\text{C}, 37^{\circ}\text{C}, 40^{\circ}\text{C}) \times 3(96.5\text{kPa}, 65.7\text{kPa}, 63.2\text{kPa}) \times 80\%\text{RH}$, and 10 male college students were recruited as subjects. The results showed that temperature had significant effects on the exit time (Wald $\chi^2 = 881.722$, $P = 0.001$), heart rate at exit (Wald $\chi^2 = 76.721$, $P = 0.001$), blood oxygen saturation at exit (Wald $\chi^2 = 38.697$, $P = 0.001$), and oral temperature at exit (Wald $\chi^2 = 358.792$, $P = 0.001$), while pressure had significant effects on the exit time (Wald $\chi^2 = 52.653$, $P = 0.001$), oral temperature at exit (Wald $\chi^2 = 16.545$, $P = 0.001$), and blood oxygen saturation at exit (Wald $\chi^2 = 206.59$, $P = 0.001$). There was an antagonistic effect between temperature and pressure on the exit time and blood oxygen saturation at exit. Oral temperature and blood oxygen saturation could be used to predict the probability of completing the entire task by the subjects.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (52038009)

作者简介: 张慎为 (2000.07-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: z2019zhan35@163.com

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: 2025-05-08

relatively well, with an area under the ROC curve (AUC) of 0.824. The prediction effect was influenced by individual differences, and the AUC increased to 0.912 after incorporating individual differences. Oral temperature and blood oxygen saturation can be used to predict the ability of personnel working in high temperature, high humidity, low pressure and low oxygen environments to complete tasks, providing a reference for the detection and evaluation methods of fatigue in actual working environments.

【Keywords】 Hyperthermic Hyper-humidity Hypobaric Hypoxia; Work Fatigue; Physiological indexes; Fatigue prediction

0 引言

藏滇地热带作为中国地热资源六大区带之一,有众多高温地热资源分布^[1]。该地区在建高海拔铁路面临高温低氧作业问题,加上施工过程中的一些降温措施^[2],使得施工现场成为高温高湿低压低氧的耦合环境。在这样的环境下工作,现场的作业人员面临严重的健康威胁^[3]。因此,研究该环境下生理参数变化与疲劳发展的关系可为作业人员疲劳预测提供帮助。

有关热或低氧单一环境下的人体生理参数响应情况以及人体运动疲劳特点研究在过去已十分丰富,而热和低氧耦合环境下的研究成果则十分稀少,随着近期热和低氧耦合环境应用需求(例如自行车运动员^[4]、飞行员^[5]、高海拔高温作业人员^[6]等)的增加,开始有学者关注热和低氧结合的环境下,人体的各生理参数响应情况以及运动过程中肌肉、神经等系统的表现。Girard^[7]等通过固定强度运动至力竭以检测受试者的过程运动数据和神经肌肉能力,结果支持了高温低氧耦合环境下力竭时间更短这一假设,同时发现温度和压力效应存在拮抗交互作用。Crowcroft^[8]等研究热和低氧环境下训练使用的监测工具、训练负荷和表现之间的关系。研究结果表明尽管不同环境下的外部训练负荷相同,但运动员对训练强度的感知更为强烈,这可能与环境对运动员负荷感知的影响有关,例如热导致的核心温度升高、低氧导致的大脑氧合降低。Bradbury^[9]等的文章中,报告了热和低氧结合环境下的 15 分钟时间试验更低的工作量和更低的运动强度,其心血管结果中,心率没有工况间的统计学差异。Hu^[6]等在高海拔地区的高地温隧道内进行了现场实测,通过监测不同工作强度的工人生理响应,提出了新的热损伤分类标准,同时强调了心理适应在作业过程中的重要性。在作业过程中,人的生理响应和心理变化与作业时间有明显的相关性,以往高温低氧结合的试验持续时间并不长,并且偏向大负荷运动。对于高海拔作业中常见的长时间中

等劳动强度^[10]诱导的疲劳与生理参数的关系有待明确。

本文将开展高温高湿低压低氧环境下的疲劳作业模拟试验,研究作业时间受环境影响的特点,分析环境对人体重要生理参数口腔温度、心率、血氧饱和度的影响,筛选变量并构建预测模型对能否完成完整试验进行预测,最后评价各变量组合的预测效果。

1 试验与方法

1.1 试验设计

为了研究高温高湿低压低氧环对人体疲劳的效应,本研究开展作业人员疲劳试验。试验为被试内设计,共温度、大气压力两个因素,因素水平设置为 3 (33℃、37℃、40℃) × 3 (96.5kPa、65.7kPa、63.2kPa),共 9 个因子组合。为模拟隧道内作业环境,空气湿度设置为 80%RH。整个研究共包括 1 次熟悉访问,9 次正式访问。本研究在西南交通大学绿色人居环境控制实验室低压模拟舱中进行,模拟舱控温范围为 5~50℃,控制精度为±0.5℃,湿度控制范围为 20%~95%RH,控制精度为±3%。舱内采用真空泵实现低压低氧环境,压力最低可达 50kPa,控制精度±1kPa,由制氧机控制舱内环境氧气参数。所有低压舱操作均由同一个研究团队操作,以保证所有操作可以按照同一标准进行。所有研究团队成员均完成急救培训,整个研究期间,由研究团队保证受试者在低压舱内生命安全。

1.2 受试者

本研究的受试者纳入标准为居住地海拔低于 1000m, BMI 在 18.5~23.9 之间,心电图正常、血压正常,未有认知障碍的年轻人。

受试者的排除标准为:

- (1) 存在神经、精神或呼吸系统疾病史;
- (2) 存在需要医疗护理的疾病;
- (3) 患有与热有关的疾病或心血管疾病;
- (4) 正在服药和接受压力治疗。

团队采用张贴海报的形式,于大学内随机招募受试者。所有受试者均知晓试验流程,了解试验目的和试验工况,清楚结束条件和退出机制,并签署书面知情同意书。受试者在完成所有试验环节之后会获得一定的酬劳。同一个受试者间隔至少 3 天以上安排下一个工况试验以洗脱前一次试验工况的残留效应,在此基础上随机安排试验进行顺序。试验过程温度工况对受试者单盲,由于真空泵的工作可以被受试者感知,因此受试者可以区分常压工况和低压工况,但试验过程低压工况数值对受试者单

盲。在纳入说明会上,实验团队没有对受试者透露有关工况的假设结论。

1.3 测量

试验主要指标为受试者的退出时间以及退出类型(二分类变量,定义为是否完成完整试验),将受试者无法在试验中继续进行作为疲劳标志。当受试者完成整个试验,则记录完成时间为退出时间。心率、血氧饱和度与口腔温度也作为共同主要指标,测量仪器与设备参数如表 1 所示。

表 1 生理参数测量仪器及其性能指标

Table 1 Physiological parameter measuring instrument and its performance index				
测量指标	仪器名称	型号	测量范围	测量精度
口腔温度	电子体温计	MC-342FL	32~42℃	±0.05℃
心率	心率仪	Polar H10	30~240bpm	±1bpm
血氧饱和度	脉搏血氧仪	NONIN 2500 PalmSAT	0~100%	±2%

1.4 试验流程

研究要求受试者试验前 3 天没有大强度力量训练或力竭经历,试验前 24 小时内禁止抽烟喝酒,试验前 12 小时内禁止剧烈运动和摄入咖啡因并保证充分睡眠,试验前 1 小时内禁止进食和喝水。

所有被纳入的受试者需要提前半小时到达实验室,在准备房间(25~26℃,40~60%RH)内更换统一服装(热阻≈0.6clo),测量血压与体重,复习仪器使用方法。在此过程中,使用问卷按照排除标准对受试者进行询问,以确保受试者可以正常进行试验。

在舱内试验流程如图 1 所示,进入舱内经过适应阶段后,开展第一次数据采集,随后开始在无坡度的跑步机上以 4km/h 的速度行走。按照时间要求

进行对应的项目,在数据采集期间停止行走。完整试验流程一共 170 分钟,期间经历 5 轮 20 分钟行走与 6 轮 5 分钟口腔温度数据采集,在采集过程中受试者呈坐姿休息。

试验的中止标准为:

- (1) 受试者开始试验前血压高压超过 139/89mmHg, 低压低于 90/60mmHg;
- (2) 受试者口腔温度超过 39℃;
- (3) 受试者心率连续 3min 超过 180bpm;
- (4) 受试者血氧饱和度连续 3min 低于 75%;
- (5) 实验过程中观察到受试者有面色苍白、步态不稳等危险症状;
- (6) 受试者主动要求停止或试验达到结束时间。

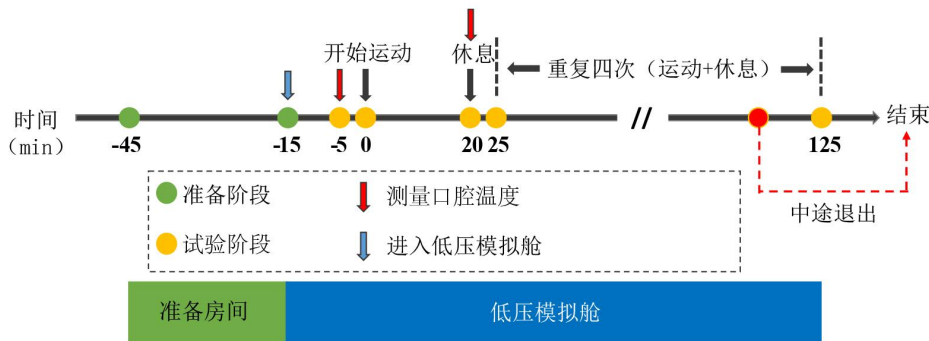


图 1 试验流程
Fig.1 Trial Procedure

1.5 数据分析方法

所要分析的结局变量类型既有连续变量也有分类变量, 试验为单组无对照试验, 各工况之间的测量不独立, 存在一定相关性, 因此采用广义估计方程 (GEE) 分析环境参数对生理参数的影响以及对退出结局显著的参数。对于退出类型预测使用广义线性混合模型 (GLMM), 使用 ROC 曲线下面积 (AUC) 评价 GLMM 分类预测效果。两相关样本对比使用 Wilcoxon 检验以保证可能存在的异常值的信息可以被包含在对比之内以及配合 GEE 结果。

本研究中, 显著性水平 α 设为 0.05, 检验效能 $1-\beta$ 设为 0.8, P 值小于 0.001 的情况均标注为 0.001。由于环境因素水平设置的不等距特性, 并且每个因素水平间的效应不平均, 所以将环境因素哑变量化, 进行无序分类变量转换, 以 33℃ 和 96.5kPa 为参考层。本文采用 SPSS30 进行 GEE、GLMM 统计分析以及 Wilcoxon 检验。ROC 分析使用 R(version4.4.2) 的 pROC 包。

1.6 样本量

采用 PASS2021 进行样本量估计和功效检验, 依据设定的显著性水平和检验功效水平, 基于 Geisser-Greenhouse 前提求解样本量。试验有两个组内因素, 无组间因素, 考虑均值影响和交互作用。对主要结局指标退出时间、口腔温度、心率, 参照前人研究^[11]计算均值。试验设计的等效海拔高度较低 ($\leq 3000\text{m}$), 本试验设计的海拔高度更高, 因此对于压力的效应估计将会稍作放大。由于其中没有报告受试者变异程度, 所以在样本量计算过程中进行保守设定。受试者间变异设定退出时间、口腔温度、心率的标准差依次为 $\sigma=10$ 、0.2、10, 自相关系数 $\rho=0.4$, 参数用于协方差矩阵估计。综合试验流程设计以及试验场地限制, 考虑到试验成本, 采用样本量大小为 10。对样本量进行功效计算^[12], 对心率受环境影响的交互作用检验效能不达 0.8, 环境对心率的交互作用已有报告^[13]。

2 结果

2.1 受试者

在大学内招募了共十名受试者, 身体状况如表 2 所示, 数据表达采用平均值 $\pm$ 标准差形式。所有受试者均完成所有工况的试验, 无数据缺失, 无不

良事件发生。

表 2 受试者基本信息

Table 2 Basic information of the subject				
年龄	身高/cm	体重/kg	BMI	居住地 海拔/m
22.2 $\pm$ 1.31	174.3 $\pm$ 4.87	66.1 $\pm$ 7.04	21.71 $\pm$ 1.43	447 $\pm$ 97

2.2 退出时间

所有工况下, 90 人次的参与试验时间分布如图 2 所示。在 37℃ $\times$ 63.2kPa 工况和 40℃ 的所有工况下, 均无受试者完成全部流程。在所有实验工况退出个案中, 有 1 个个案的心率超标, 有 13 个个案的口腔温度超标。在所有退出原因中, 有 50 个个案为主动提出试验中止, 占有所有退出个案的 79%。

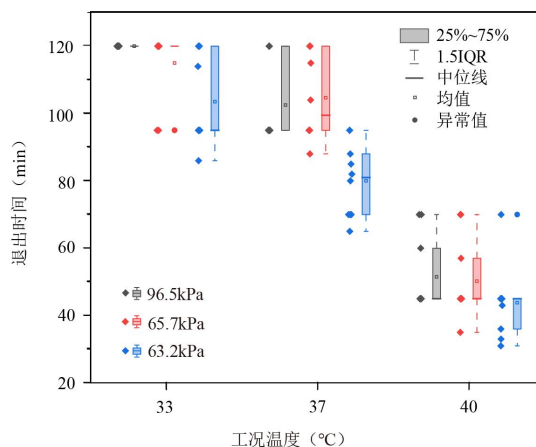


图 2 受试者退出时间

Fig.2 Time of subject withdrawal

如表 3 所示, 温度 ($\text{Wald } \chi^2=881.722, P=0.001$) 和压力 ($\text{Wald } \chi^2=52.653, P=0.001$) 的作用均显著, 温度 40℃ 水平下的平均工作时间不足 33℃ 的一半。63.2kPa 对应 3800m 的等效海拔, 尽管只比 65.7kPa 对应海拔高 300m, 但是对劳动时间的减少效果增加。退出时间在 65.7kPa 水平下与常压相比虽存在一些较小值, 但效应没有达到统计学上的差异要求, 仍不能说明该压力会造成退出时间缩短, 可能该样本量的功效并不足以检测出劳动时间上限这一指标在 65.7kPa 下与常压差异的显著性结果。同时注意到温度和压力的拮抗交互作用显著 ($\text{Wald } \chi^2=27.79, P=0.001$), 在 40℃ $\times$ 63.2kPa 和 37℃ $\times$ 65.7kPa 组合水平下, 检测到了交互作用对劳动时间的延长。

表 3 退出时间 GEE 参数估计
Table 3 GEE parameters of withdrawal time

参数	β	SE	95%CI		Wald χ^2	P
			下限	上限		
截距	120		---			0.001
40℃	-68.5	3.24	-74.859	-62.141	445.819	0.001
37℃	-17.5	3.62	-24.601	-10.399	23.333	0.001
63.2kPa	-16.5	3.99	-24.326	-8.674	17.074	0.001
65.7kPa	-5	3.16	-11.198	1.198	2.500	0.114
40℃*63.2kPa	8.8	4.34	0.294	17.306	4.111	0.043
40℃*65.7kPa	3.7	3.29	-2.747	10.147	1.265	0.261
37℃*63.2kPa	-6	6.1	-17.954	5.954	0.968	0.325
37℃*65.7kPa	7.2	3.55	0.238	14.162	4.109	0.043

2.3 退出时刻生理参数

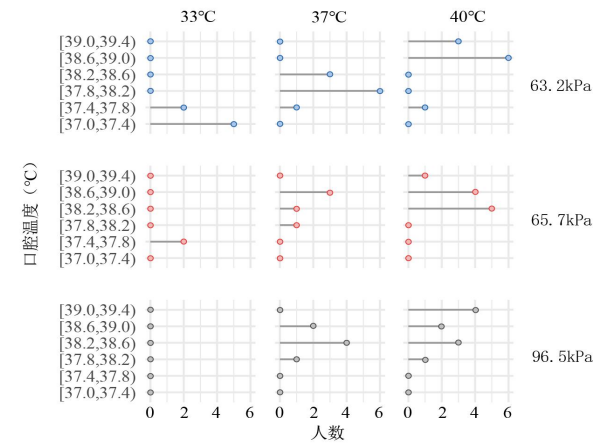


图 3 受试者中途退出时口腔温度

Fig.3 Oral temperature upon subject withdrawal

表 4 退出时刻口腔温度 GEE 参数

Table 4 GEE parameters for oral temperature at discharge

参数	β	SE	95%CI		Wald χ^2	P
			下限	上限		
截距	37.515	0.0513	37.414	37.616	533856.634	0.001
40℃	1.351	0.1082	1.139	1.563	155.820	0.001
37℃	0.910	0.0533	0.805	1.014	291.004	0.001
63.2kPa	-0.173	0.0460	-0.263	-0.083	14.110	0.001
65.7kPa	-0.081	0.0404	-0.160	-0.002	4.014	0.045

图 4 是受试者结束试验时的心率, 63.2kPa 工况下的退出心率分布与 96.5kPa、65.7kPa 工况下的分布不同, 在较低心率出现聚集, 代表 63.2kPa 工况下退出时的身体体力负荷强度与 96.5kPa、65.7kPa 工况并不相同。心率受温度影响显著(Wald

图 3 展示了未完成完整流程的受试者退出时口腔温度分布情况, 绝大部分个案的口腔温度处于安全范围, 仅 40℃工况下存在超过口腔温度 39℃的情况。尤其是在 63.2kPa 的工况下, 33℃工况下存在较多口腔温度较低的情况。因此对于低压工况下的退出个案, 口腔温度并不能单独作为评价标准。

温度、压力对退出时刻口腔温度影响如表 4 所示, 温度(Wald $\chi^2=358.792$, $P=0.001$)和压力(Wald $\chi^2=16.545$, $P=0.001$)的效应均显著。分析结果中交互作用显著, 但是交互各项未达到显著性水平, 并未纳入最终方程。尽管压力效应存在显著性, 但其造成的口腔温度下降较小, 生理学意义有限。

$\chi^2=76.721$, $P=0.001$), 受压力影响不显著(Wald $\chi^2=4.408$, $P=0.110$)。对 63.2kPa 工况和 65.7kPa 工况的退出时刻的心率分析, 63.2kPa 与 65.7kPa 存在显著性差异($Z=-2.314$, $P=0.021$)。

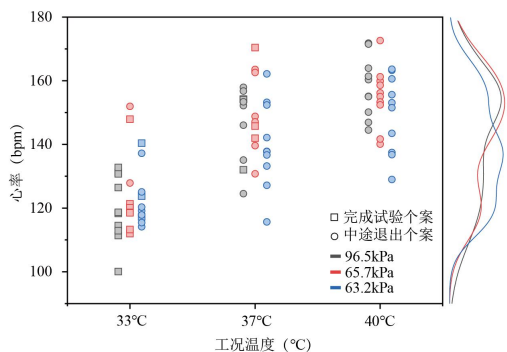


图 4 受试者退出时心率

Fig.4 Heart rate upon subject withdrawal

参考体力活动强度和生理负荷强度计算方法^[14],通过平均心率计算各环境因素对生理负荷的影响效应,结果如表 5 所示。温度(Wald $\chi^2=145.51$, $P=0.001$)和压力(Wald $\chi^2=17.505$, $P=0.001$)存在显著主效应,交互作用不显著。尽管 40℃工况下,平均心率较高,但是由于其较短的试验时间,总的体力强度并没有其余工况高。

表 5 平均心率 GEE 参数

Table 5 GEE parameters of mean heart rate

参数	β	SE	95%CI		Wald χ^2	P
			下限	上限		
截距	107.912	2.4863	103.039	112.785	1883.832	0.001
40℃	22.477	1.9141	18.725	26.228	137.891	0.001
37℃	12.407	2.5294	7.450	17.365	24.060	0.001
63.2kPa	5.156	3.2762	-1.266	11.577	2.476	0.116
65.7kPa	5.772	1.4641	2.902	8.641	15.543	0.001

平均血氧饱和度随时间的变化如图 5 所示,低压和常压工况区别明显。在低压工况前两轮运动结束(20~25 分钟、45~50 分钟),可以观察到血氧饱和度的回升趋势。退出时刻血氧饱和度受温度(Wald $\chi^2=38.697$, $P=0.001$)、压力(Wald $\chi^2=206.59$, $P=0.001$)以及交互作用(Wald $\chi^2=52.616$, $P=0.001$)影响显著,交互作用为拮抗交互作用。

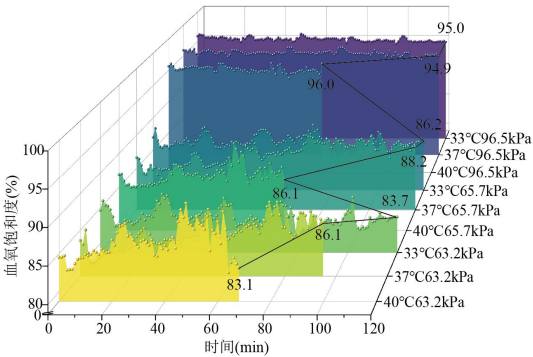


图 5 血氧饱和度随时间变化

Fig.5 Blood oxygen saturation changes over time

2.4 退出个案预测

在前一小节针对退出时刻的生理参数分析已经得知,口腔温度和心率在各温度下拥有较大的差

异,但是低压下数值与常压相比,差异较小,血氧饱和度则是拥有较好的压力区分能力。因此对各压力下退出个案与完成完整流程个案的第一轮运动结束时心率与口腔温度情况进行分析,如图 6 所示。心率和口腔温度对退出结果在各压力下的效应如表 6 所示。

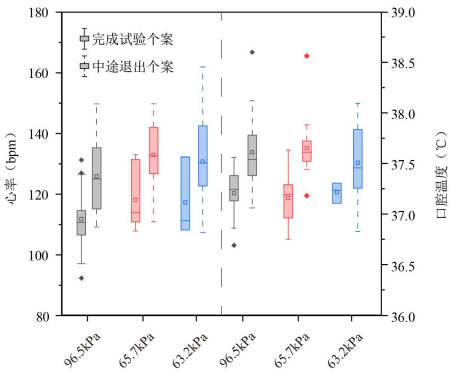


图 6 第一轮结束时心率和口腔温度

Fig.6 Heart rate and oral temperature measured at the end of the first round

在各压力下使用第一轮运动结束时心率和口腔温度构建退出结局的广义估计方程,结果如表 6 所示。心率在低压下对退出结果的估计不存在显著

性结果,口腔温度在常压和大气压力=65.7kPa 时效应显著。综合来看,低压情况下由于退出还受个体缺氧情况影响,受试者即使心率不高,也有可能退出,造成了心率分布出现重合。因此对于低压工况下,心率不适宜作为预测指标。

表 6 退出结局 GEE 分析结果

Table 6 The results of GEE analysis of withdrawn outcome

大气压力	心率		口腔温度	
	Wald χ^2	P	Wald χ^2	P
96.5 kPa	4.667	0.031	6.121	0.013
65.7 kPa	0.031	0.860	5.185	0.023
63.2 kPa	0.893	0.345	2.325	0.127

对第一轮运动结束时血氧进行环境效应分析,结果如表 7 所示。结果显示温度和压力的交互作用显著,但仅在最极端的情况下,若不考虑交互作用,则温度主效应在 40℃ 的时候显著,压力的主效应在各因素水平均显著。血氧饱和度在不同压力下有更好的区分度,可以作为压力敏感型预测指标。

表 7 第一轮结束血氧饱和度 GEE 参数

Table 7 GEE parameters for oxygen saturation at the end of the first round

参数	β	SE	95%CI		Wald χ^2	P
			下限	上限		
截距	95.517	0.1874	95.150	95.884	259797.084	0.001
40℃	0.005	0.2971	-0.577	0.587	0.001	0.986
37℃	0.086	0.2336	-0.371	0.544	0.137	0.712
63.2kPa	-13.014	1.1970	-15.360	-10.668	118.212	0.001
65.7kPa	-10.833	0.6701	-12.147	-9.520	261.334	0.001
40℃*63.2kPa	3.014	0.8177	1.412	4.617	13.591	0.001
40℃*65.7kPa	1.280	0.9220	-0.527	3.087	1.927	0.165
37℃*63.2kPa	-0.001	1.0989	-2.155	2.153	0.001	0.999
37℃*65.7kPa	-0.117	0.7010	-1.490	1.257	0.028	0.868

由于口腔温度的连续变化尺度较小,为配合血氧饱和度联合预测,将口腔温度归一化,根据试验过程中的低值和中止标准,取36.5℃为下限,39℃为上限,与血氧饱和度作为预测指标,使用广义线性混合模型,模型设置如表8所示,其中Tc为口腔温度、SpO₂为血氧饱和度、BMI为身体质量指数、age为年龄、HR为心率、Tcb为开始运动前的口腔温度、ID为受试者的编号。在模型4纳入受试者间效应、温度和压力在受试者间的随机截距和随机斜率。

表 8 GLMM 设置与结果

Table 8 Set and result of GLMM

名称	模型设置	120分钟退出预测结果	
		-2对数似然值	AUC
模型1	Tc+SpO ₂	361.495	0.824
模型2	Tc+SpO ₂ +BMI+age	360.549	0.824
模型3	Tc+SpO ₂ +HR+BMI+age+Tcb	381.999	0.860
模型4	Tc+SpO ₂ +BMI+age+(ID ID)+(温度 ID)+(压力 ID)	356.913	0.912

GLMM的分类结果使用ROC分析结果,如图7所示,使用口腔温度和血氧饱和度对于退出结果预测具有良好的分类效果。在进一步加上个体特征BMI和年龄之后,模型效果没有大的区别。进一步引入心率与适应环境之后的口腔温度,模型的-2对数似然值上升,但是AUC上升,但差异均不大。最后纳入随机效应,结果与模型1相比有较大改善。

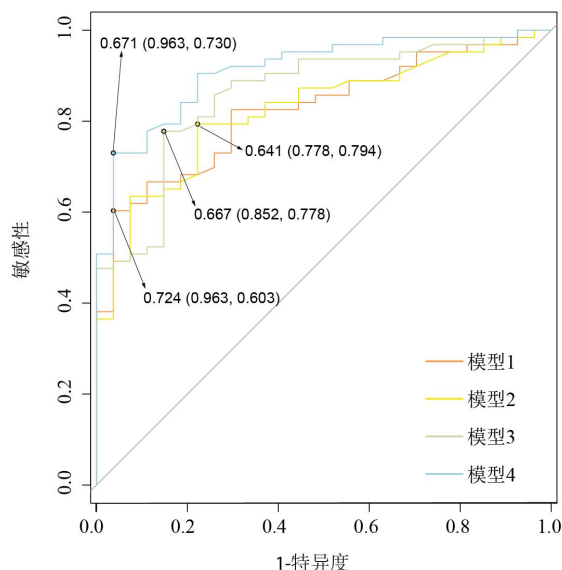


图7 ROC分析结果

Fig.7 The results of ROC analysis

3 讨论

3.1 疲劳时间

本研究分析了高温高湿低压低氧环境对中等强度运动的人体影响,温度和压力的效应对退出时间的影响显著,并且退出主要原因为主观意愿达到极限。在高温和低氧条件下进行的长时间运动会致大脑皮层活动的变化,例如前额区域的 α 波活动降低,初级体感皮层与运动皮层的 α 和 β 波的活动减少,特别是在与注意力控制、运动控制和认知功能相关的区域,这些变化可能与运动表现的降低、感知努力的增加和热舒适度的降低有关^[15]。在高温和低氧下运动的人体,主观意愿达到极限与感知努力的增加、热舒适度降低等有关,因此疲劳时间受到温度和压力的影响。以中等强度运动的身体难以在高温和低压环境下保持稳态,在核心温度为 38°C 的时候,皮肤血流量的升高与皮肤温度和核心温度的梯度降低倍率在一定区间成正比^[16],导致了高温环境下的肌肉灌注能力降低。运动期间和运动之后

肌肉激活和收缩功能的下降对不同的体内平衡紊乱很敏感,这样的紊乱可以被身体感知,并反馈大脑形成疲劳感,使主观退出意愿增加,缩短达到疲劳的时间。大脑对人体存在保护机制,会保护身体在高温和缺氧的状态下不受损伤,因此不会允许身体长时间工作在极端环境,使用主动性疲劳来限制人体表现^[17]。低压还会导致更大的通气反应,增加呼吸肌的疲劳和运动时来自心肺功能的疼痛感。在大脑主动限制和来自身体的热感觉、疼痛感等因素的共同作用下,人体会在身体达到真正的危险情况前,产生脱离该环境的强烈愿望。主观退出意愿越强烈,达到疲劳的时间越短,并且造成了主观退出意愿先于生理参数达到极限的结果。

由于所招募的受试者为校园里的大学生,尽管对身体条件进行了一些限制,但是受限于试验协议,没有充足的动机保证受试者可以在极端环境中充满积极的情绪。试验采用了无平行对照的重复测量设计,受试者经受的洗脱期只能洗脱环境对人体残留的影响,但在受试者对于结束时间经验^[18]等方面,无法做出限制,存在可能的受试者由于没有提前退出惩罚等原因,导致主观退出意愿增长变快。广义估计方程结果展示了高温和低氧对退出时间的效应存在拮抗交互作用,这与前人的研究结果一致^[4],热习服和提前的高温适应可以提高对低氧环境的抵抗,归功于可能的HIF-1 α 因子的激活^[19]。

3.2 退出时刻生理参数

核心温度是身体内各器官的工作温度,该指标具有较强的生理学意义,其数值高低与运动能力强弱有较强的相关性^[20]。在环境温度没有使身体达到热不可补偿阶段的时候,核心温度可以与基线核心温度保持较小的差距,所以 33°C 工况下的结果与一般环境下工作能达到的核心温度相差不大。 37°C 与 40°C 工况下由于皮肤难以利用热对流散热,甚至会因为温度梯度逆向增加核心温度,所以核心温度不能保持稳态,其在初期的升高会与较低温度工况产生比较大的区别。即使这两个工况的持续时间不长,在退出时刻的口腔温度与 33°C 相比也会存在显著的上升。低压会导致身体通气反应增加,以及相关的神经活动加强、内分泌系统调节等,间接导致能量代谢强度增强。在GEE结果中压力的系数是负向的,可能是因为低压会导致受试者提前退出。

心率反应了人体的心血管系统应变程度,不同温度间退出时刻的心率数值随温度有明显的变化趋势。对于压力来说,在63.2kPa可以观察到不同的退出时刻的心率数值分布规律。这可能与63.2kPa下人体因缺氧等因素提前退出,心血管漂移程度不相同有关。温度对心率升高的效应显著,这与人体在环境中增强散热有关。更高的心率会代表更高的心血管负荷,尽管升高的心率并不全部用于提供更高的能量供应,但是激活的散热系统和消化系统等仍然会加重身体负担。血氧饱和度则与众多研究一样,在常压和低压之间有明显的区别,并且在运动和休息时也能观察到一些不同的趋势。

3.3 退出预测结果

由图6可知,在第一轮运动结束时,为满足更极端环境下工作的心血管要求,提前退出个案的心率有更高的平均值。但是由于在低压下存在另外导致受试者主动停止的原因,对于温度较低的低压工况,心率并不能很好的评价退出结果。在最初的20分钟时刻,口腔温度代表了人体热应激程度,其数值大小可以区分人体能否稳定应对高热环境。在完成试验的个案中,可以观察到相似的平均值和数据分布,而未完成个案拥有较为明显的更高的口腔温度。

ROC结果说明了口腔温度和血氧饱和度作为预测指标的良好判别能力($AUC>0.8$),可以对能否完成整个流程进行初步的预测。同时模型4的 $AUC>0.9$,该结果也强调口腔温度和血氧饱和度作为判别性测量指标的预测结果也受到参与者个体间差异的影响。当加入受试者的个体特征时候,模型2和模型3的曲线下面积有所改善。考虑到受试者对热应激和低氧应激的生理反应会因个体变异而独立改变,预测的结果也受到不同个体对于温度和压力两个因素的适应情况以及个体对于试验完成的心理预期影响。实际工作中,复杂的个体特征(健康状况^[21]、年龄^[22]、性别^[23]等)会和高温低氧条件下工作时的口腔温度、血氧饱和度等指标的变化一起对工作耐受性产生显著抑制作用,凸显了热应激中生理因素的复杂交互作用。同时,在加入心率和运动前口腔温度之后, AUC 有了小幅提升。本文所探讨的预测指标获取简单,可以使用低成本、便携式和轻便的监测仪方便地测量。这些指标的变化受环境影响,对于受试者的身体状态有很好

的反映能力,可以在实际工作过程中,根据预先确定的阈值,为管理层早期检测作业人员疲劳提供手段。

4 结论与展望

本文开展了有关高温高湿低压低氧环境作业人员的疲劳试验,测量了口腔温度、心率、血氧饱和度等生理参数,研究了环境对生理指标与作业时间的影响规律,筛选变量并构建了退出预测模型,并通过ROC分析对预测模型进行评价。主要结论如下:

(1)在完成试验的90个个案中,有50个个案主动提出试验中止,占有退出个案的79%,表明主观意愿先于生理参数达到极限。退出时间对温度和压力效应显著,并且温度和压力对退出时间的影响存在拮抗交互效应。

(2)温度对退出时的心率、血氧饱和度、口腔温度效应显著;压力对退出时的口腔温度、血氧饱和度效应显著。温度和压力存在对退出时刻血氧饱和度的拮抗作用。温度和压力对试验过程中的平均心率效应显著。

(3)第20分钟的口腔温度和血氧饱和度可以较好预测受试者第120分钟的退出概率,该概率的ROC分析结果 $AUC=0.824$ 。预测结果受个体差异影响,加入个体差异后, $AUC=0.912$,效果得到进一步改善。本研究选用身体素质较好的大学生开展了测量次数较多的重复测量试验设计,并且在试验中没有加入正向心理激励,因此疲劳时间和生理参数的具体数值估计与实际工作环境中的数值存在偏差。未来可开展随机对照试验,或开展横断面研究以获得更加准确的环境效应估计。

参考文献

- [1] 耿莉萍.中国地热资源的地理分布与勘探[J].地质与勘探,1998,34(1):50-54.
- [2] 朱宇,周佳媚,赵大权,等.高地温隧道施工期降温隔热技术研究[J].现代隧道技术,2019,56(S2):563-571.
- [3] 唐仕川,邢娟娟,张超,等.高温职业危害风险分级与分级管理研究[J].中国安全生产科学技术,2015,11(7):156-161.
- [4] Maciejczyk M, Palka T, Wiecek M, et al. Effects of concurrent heat and hypoxic training on cycling

- anaerobic capacity in men[J]. *Scientific Reports*, 2024,14(1):22879.
- [5] Xue L, Zhou B, Ding L, et al. Effects of simulated high altitude on body temperature and heart rate in pilot reserves during the hot-dry exposure[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2023,117:103685.
- [6] Yunpeng H, Mingnian W, Qiling W, et al. Field test of thermal environment and thermal adaptation of workers in high geothermal tunnel[J]. *Building and Environment*, 2019,160:106174.
- [7] Girard O, Racinais S. Combining heat stress and moderate hypoxia reduces cycling time to exhaustion without modifying neuromuscular fatigue characteristics[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2014,114(7):1521-1532.
- [8] Crowcroft S, Duffield R, McCleave E, et al. Monitoring training to assess changes in fitness and fatigue: The effects of training in heat and hypoxia[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2015,25(S1): 287-295.
- [9] Bradbury K E, Coffman K E, Mitchell K M, et al. Separate and combined influences of heat and hypobaric hypoxia on self-paced aerobic exercise performance[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2019,127(2):513-519.
- [10] 吴秋军,于丽,谢文强,等.高海拔隧道施工关键工序劳动强度分级标准研究[J].*现代隧道技术*,2016,53(6):44-48,88.
- [11] 李国建.高温高湿低氧环境下人体热耐受性研究[D].天津:天津大学,2008.
- [12] Muller K E, LaVange L M, Ramey S L, et al. Power Calculations for General Linear Multivariate Models Including Repeated Measures Applications[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1992,87(420): 1209-1226.
- [13] Périard J D, Racinais S. Performance and Pacing during Cycle Exercise in Hyperthermic and Hypoxic Conditions[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2016,48(5):845.
- [14] 杨川川.普通高校身体运动功能训练课程生理负荷强度的研究[J].*体育世界(学术版)*,2019(6):118-119.
- [15] Périard J D, De Pauw K, Zanow F, et al. Cerebrocortical activity during self-paced exercise in temperate, hot and hypoxic conditions[J]. *Acta Physiologica*, 2018,222(1):e12916.
- [16] Nybo L, Rasmussen P, Sawka M. Performance in the Heat-Physiological Factors of Importance for Hyperthermia-Induced Fatigue[J]. *Comprehensive Physiology*, 2014,4:657-689.
- [17] Ely B R, Cheuvront S N, Kenefick R W, et al. Aerobic Performance Is Degraded, Despite Modest Hyperthermia, in Hot Environments[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2010,42(1):135.
- [18] Behm D G, Carter T B. Effect of Exercise-Related Factors on the Perception of Time[J]. *Frontiers in Physiology*, 2020,11.
- [19] 黄碧君,程晓曙.热耐受与缺氧诱导因子-1 α 的研究进展[J].*重庆医学*,2013,42(19):2283-2284.
- [20] Périard J D, Racinais S. Performance and Pacing during Cycle Exercise in Hyperthermic and Hypoxic Conditions[J]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2016,48(5):845.
- [21] Zijdwind I, Hyngstrom A, Hunter S. Editorial: Fatigability and Motor Performance in Special and Clinical Populations[J]. *Frontiers in Physiology*, 2021,11.
- [22] Sundberg C W, Prost R W, Fitts R H, et al. Bioenergetic basis for the increased fatigability with ageing[J]. *The Journal of physiology*, 2019,597(19):4943-4957.
- [23] Ansdell P, Škarabot J, Atkinson E, et al. Sex differences in fatigability following exercise normalised to the power-duration relationship[J]. *The Journal of Physiology*, 2020,598(24):5717-5737.