

文章编号: 1671-6612 (2025) 05-613-10

高温高湿低压环境下 基于动态赋权的人体综合应激指标

陈 宁 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】 高海拔隧道施工环境存在高温高湿和氧分压较低等特点, 会导致施工人员的热应激和缺氧应激反应, 持续高强度劳动还会导致疲劳应激反应, 由此给隧道施工作业人员的安全带来较大风险。为了保证工作效率和身体健康, 需要量化施工作业人员在高温高湿低压环境下持续劳动的综合应激水平。考虑到个体在不同环境、不同劳动时长时的生理差异性, 人体综合状态受到生理和心理的共同影响, 由此利用范数灰关联分析提出基于动态赋权的综合应激指标。结果表明: 通过分析环境强度对人体主客观参数的影响, 选择口腔温度、平均皮肤温度、心率、舒张压、RPE 疲劳感觉构成评价指标, 其动态权重区间分别为 0.20-0.32、0.20-0.30、0.00-0.17、0.20-0.28、0.00-0.20, 权重变化极差为 0.2; 所有工况运动开始前, 口腔温度的权重在 0.29-0.31, 平均皮肤温度的权重在 0.29-0.30, 心率的权重在 0.09-0.11, 舒张压的权重为 0.28, RPE 的权重 0-0.06, 随环境工况变化较稳定, 表明短时间的环境效应对主客观指标影响较小; RPE 疲劳感觉的权重在随着劳动时间增加, 心率的权重与口腔温度、平均皮肤温度、舒张压相比, 受温度影响较大, 在高温 ($>34^{\circ}\text{C}$) 下随劳动时间持续增加, 但口腔温度、平均皮肤温度、舒张压一直保持着较大的权重。由此可见, 各指标的权重在不同的环境, 不同的劳动时间后是不同的, 基于动态赋权的评价指标更具有生理意义, 能够为高海拔隧道施工作业人员提供更合理的安全评估。

【关键词】 高温高湿低压环境; 综合应激; 主客观参数; 动态权重

中图分类号 X968 文献标志码 A

Comprehensive Human Stress Index

Based on Dynamic Weighting under High Temperature High Humidity and Low Pressure Environment

Chen Ning Sun Liangliang Hu Yue Su Xiaowen Yuan Yanping

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

【Abstract】 The high-altitude tunnel constructional environment has the characteristics of high temperature, high humidity, and low oxygen partial pressure, which can lead to thermal stress and hypoxia stress reactions in constructional workers. Continuous high-intensity labor can also lead to fatigue stress reactions, thus bringing greater risks to tunnel constructional workers' safety. In order to ensure work efficiency and workers' health, it is necessary to quantify the comprehensive stress level of tunnel constructional workers in high-temperature, high-humidity, and hypobaric environments. Considering the individual differences in different environments and different working hours, human comprehensive state is influenced by both physiological state and psychological state, thus the Comprehensive stress index evaluation system based on Norm Grey Correlation analysis is proposed

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (52038009)

作者简介: 陈 宁 (1999.12-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: ChenNing19991204@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: 2025-04-14

with dynamic weighting. By analyzing the influence of environmental intensity on the main objective and subjective parameters of the human body, the evaluation index system is composed of oral temperature, mean skin temperature, heart rate, diastolic blood pressure, and RPE fatigue perception, the dynamic weight intervals are 0.20-0.32, 0.20-0.30, 0.00-0.17, 0.20-0.28, and 0.00-0.20 respectively, and the range of weight change is 0.2; Before the start of all the working condition exercises, the weights of oral temperature were 0.29-0.31, the weights of average skin temperature were 0.29-0.30, the weights of heart rate were 0.09-0.11, the weights of diastolic blood pressure were 0.28, and the weights of RPE were 0-0.06. They were relatively stable with the changes of environmental working conditions, indicating that the short-term environmental effects had a relatively small impact on subjective and objective indicators; The weight of RPE fatigue sensation increases with working time in different operating conditions, and the weight of heart rate is more affected by temperature than oral temperature, average skin temperature, and diastolic blood pressure. In high temperatures ($>34^{\circ}\text{C}$), the weight of heart rate increases with working time, but the weight of oral temperature, average skin temperature, and diastolic blood pressure remains the highest; It can be seen from this that the weights of each indicator are different in different environments and after different working hours, the index evaluation system based on dynamic weighting is more physiologically meaningful and can provide more reasonable safety assessments for high-altitude tunnel constructional workers.

【Keywords】 High temperature, high humidity and low pressure environment; Comprehensive stress; Subjective and objective parameters; Dynamic weight

0 引言

在海拔深埋隧道中高温热害已经成为一个不可忽视的问题。在高温高湿环境下作业,热应激水平的增加,热平衡遭到破坏,会出现一系列不适应症状^[1,2]。持续作业时还伴随着缺氧应激、疲劳应激反应出现。使得作业人员劳动能力降低,严重降低施工工效^[3]。因此,科学准确地评估高海拔隧道中作业人员的综合应激水平,为其提供安全的保障已经刻不容缓。

国内外研究人员提出了大量的人体热应激评价指标用于高温工作环境的评价依据。主要从两个方面分类:环境的热应力、人体生理热应激反应。

从环境带给人体的热应力来说,常见的单一指标对整体环境热负荷的评价性较低。研究者们相继提出 ET、DI、ESI 等^[4-6]综合指标,但缺乏考虑不同适用环境和适用人员而产生的影响。左淳莹^[7]研究发现 DI 和 ET 指标都高估了热湿地区人员所受的热应力大小。杨心诚^[8]发现 WBGT 指数因为湿球温度和黑球温度的权重固定为 0.7 和 0.3,低估了干热环境下的热负荷和热应激,权重系数应该根据环境而改变。在现实劳动中,由于劳动者空间位移的不确定性,且工人劳动节奏并非维持恒定,因此环境参数难以评估劳动者的综合应激。

从人体生理热应激反应评价来说,常见的单一生理指标往往只能反映人体单个生理系统的应激

反应,且个体差异较大。PHS 模型以人体热平衡为基础,迭代计算人体热生理反应及安全暴露时间^[9],但其是基于常压下经验所得,在低压下不适合。许国荣^[10]选取了 5 个生理参数,通过因子分析方法建立了人体综合应激评价指标,但各参数权重固定,没有考虑不同生理系统的重要性随环境和劳动时间而改变。童兴^[11]考虑到“风箱效应”,对煤矿人员的工作服进行动态热阻和湿阻修正,改进 PHS。郑国忠^[12]为了使生理应激指数(Physiological Strain Index, PSI)更具有生理意义,将核心温度和心率的权重修正为 5.6 和 4.4。李珂^[13]在评价高温环境对青年人昼夜节律影响时,采用敏感性分析确定各指标随环境变化的动态权重,由于整个实验属于轻微脑力活动,受试者状态趋于稳态,动态权重变化较小。Zheng^[14]建立了基于动态权重的生理指标评价工人的应激状态,但该实验属于轻度劳动,心率的权重始终较低,且只考虑了工人的热应激,并未考虑劳动带来的疲劳应激。且研究表明^[15]主观工作满意度对工作效率影响较大,在对作业人员进行综合评价时,应该加入主观感受。

作业人员的综合状态会被其生理状态、心理状态、劳动习惯等直接影响,单一参数在评估人体综合状态时,忽略掉了大量生理信息和心理信息。而目前的研究中综合指标在不同状态下的权重是固定的,忽视了个体差异性,也没有考虑到个

体在不同环境、不同劳动时间下的差异性。因此, 本研究将结合主观评价和生理参数, 建立基于动权赋权的综合应激指标。

1 实验设计

1.1 研究对象

本次实验选择的受试者是在校男大学生 9 名, 考虑到在高温湿隧道中作业人群的特殊性, 进行筛选时对受试者有以下要求: (1) 居住地海拔低于 1000m; (2) 能 15min 内匀速跑完 3km; (3) 身体质量指数 BMI 在 18.5~23.9 之间。筛选后的受试者平均年龄是 (23.6±1.24) 岁, 平均身高是 (172±4.47) cm, 平均体重是 (63.3±4.27) kg, 平均 BMI 是 (21.42±1.36) kg/m²。受试者提前了解实验的基本内容和流程, 并在正式实验前开展预实

验, 充分感受实验内容。所有受试者自愿参加, 并签署书面知情同意书。在实验过程中, 受试者穿着统一服装, T 恤、短裤、运动鞋, 服装热阻大约 0.6clo。

1.2 实验环境及工况

本实验探究温度和压力对作业人员的生理、心理应激的综合影响, 在西南交通大学的高温高湿低压实验舱里进行。考虑到高原隧道施工环境中高温高湿和缺氧的特点, 本实验选取了 3 种温度工况 (31℃、34℃、37℃) 和 2 种压力工况 (65.7kPa、96.5kPa), 相对湿度选择 70%, 受试者全程在无坡度的跑步机上以 4km/h 的速度运动。

1.3 测量参数及设备

实验测量参数包含客观参数和主观感知。客观参数及设备如表 1 所示。

表 1 客观参数及其测量设备

Table 1 Objective parameters and their measuring instruments

客观参数	设备名称	设备型号	测量范围	精度
温湿度、大气压力	电子温湿度及压力记录仪	Testo 176P1	温度: -20~70℃	温度: ±0.2℃
			相对湿度: 0~100%RH 压力: 600hPa~1100hPa	相对湿度: ±3%RH 压力: ±3hPa
黑湿球温度	WBGT 指数仪	JTR10	5~120℃	±0.5℃
口腔温度	体温探头	YSI400	25~45℃	±0.1℃
心率	心率仪	PolarH10	30~240bpm	±1bpm
皮肤温度	温度传感器	iButton	-20~85℃	±0.1℃
血压	电子血压计	OMRONJ176	0~299mmHg	±3mmHg
血氧饱和度	脉搏血氧仪	NONIN2500PalmSAT	0~100%	±2%
失水率	电子体重秤	上海菁海 YP100KN	0~100kg	2g

平均皮肤温度采用 ISO9886 中推荐的 8 点法测量^[6], 通过 iButton 测得 8 个点位的皮肤温度, 再进行加权求和, 计算公式如式 (1) 所示。

$$T_{sk} = 0.07T_a + 0.175T_b + 0.175T_c + 0.07T_d + 0.07T_e + 0.05T_f + 0.19T_g + 0.20T_h \quad (1)$$

式中: T_a 为额头温度; T_b 为右肩胛骨温度; T_c 为左胸温度; T_d 为右上手臂温度; T_e 为左手前臂温度; T_f 为左手背温度; T_g 为右大腿前侧温度; T_h 为左小腿后温度。

实验中采用主观问卷测量受试者的主观感知, 主要包含热感觉问卷、耐受程度问卷、RPE 疲劳问卷。依据 ISO-10551, 热感觉问卷采用 9 点标度量表 (从“-4”很冷到“+4”很热), 是对 ASHARE7

点标度量表的扩展^[17]。但由于本实验均为高温环境, 因此热感觉问卷的标度仅保留“0”到“+4”^[10]。耐受程度问卷采用 5 点标度量表 (从“0”完全可耐受到“4”无法耐受)。RPE 疲劳问卷采用已经经过验证的 Borg15 点量表^[18] (评分从“6”非常轻松到“20”精疲力竭), 已经广泛用于运动科学中的疲劳评估, 尤其是跑步运动中。

1.4 实验过程

实验前, 受试者在 (25~26℃, 40~60%RH) 的准备房间休息半个小时, 以稳定各项生理参数。受试者进入实验舱 10min 后开始测量其生理参数并填写主观问卷, 之后在跑步机上以 4km/h 的速度运动, 每组运动 20min, 休息 5min, 在休息时测量

受试者的生理参数并填写主观问卷,循环五组,实验阶段总时长 120min。实验中,当受试者出现以下任意一种情况立刻终止实验:口腔温度达到

39℃;心率连续 3min 超过 180bpm;血氧饱和度连续 3min 低于 75%;面色苍白,步调不稳;主动要求停止。实验流程图如图 1 所示。

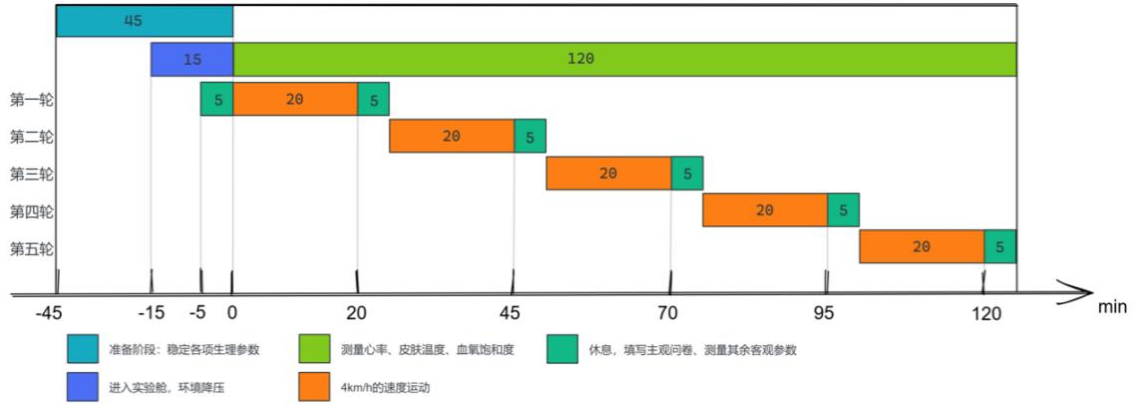


图 1 实验流程图

Fig.1 Experimental flow chart

2 范数灰关联度理论

灰色关联度分析是从随机的行为特征中确定因素间的关联程度的分析方法,可以分析各因素的主次关系和对目标序列的贡献程度^[19]。范数常常被用来度量某个向量空间或矩阵中的每个向量的长度或大小。张岐山^[20]基于范数的概念,引入了理想序列和负理想序列以及近距和远距等理论,提出了范数灰关联度分析方法,结果表明更具有整体接近性,已被证明可以提高多目标综合分析的准确性^[21]。

(1) 指标一致化处理

为了消除原始指标的量纲差异,首先必须先对各指标进行一致化处理。假设有 m 个评价对象,有 n 个评价指标, x_{ij} 为第 i 个评价对象的第 j 个原始评价值,设 Z_{ij} 为一致化指标值。

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij}}{M_j} (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: M_j 为 j 指标的极限值。

(2) 确定参考序列

参考序列是能反应系统行为特征的数据序列。确定参考序列有两种方法:一是根据指标是效应型指标或成本型指标,从而选择各指标的最大值或者最小值最为参考序列;二是根据评价的目的定义一系列参考值作为参考序列。本实验旨在评价人体综合应激状态,因此选择将受试者的主观耐受程度评价

作为参考序列。

(3) 两级最大差和最小差

$$\Delta_{ij} = |Z_{ij} - Z_{i0}| \quad (3)$$

式中: Z_{i0} 为参考序列值。

(4) 计算灰色关联系数

通过比较序列和参考序列计算灰色关联系数。

$$r_{ij} = \frac{\min \Delta_{ij} + \rho * \max \Delta_{ij}}{\Delta_{ij} + \rho * \max \Delta_{ij}} \quad (4)$$

式中: $\min \Delta_{ij}$ 是差序列中的最小值; $\max \Delta_{ij}$

是差序列中的最大值。 ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$, 一般 ρ 取 0.5, 可以用来提高关联系数间的显著差异性^[24]。

(5) 计算关联系数理想列和负理想列

根据灰色关联系数,可以计算理想列与负理想列。

$$\eta^+ = \begin{cases} \max r_{ij} & \text{效应型指标} \\ \min r_{ij} & \text{成本型指标} \end{cases} \quad (5)$$

$$\eta^- = \begin{cases} \min r_{ij} & \text{效应型指标} \\ \max r_{ij} & \text{成本型指标} \end{cases} \quad (6)$$

η^+ 刻划的是距参考序列距离最近的比较序列, η^- 刻划的是距参考序列距离最远的比较序列。

(6) 计算第 j 个比较序列的关联系数序列的范数

设 $\eta_j (j=1,2,\dots,n)$ 表示第 j 个比较序列的联系数列, 则第 j 个比较序列的联系数列的 2-范数可定义为:

$$d_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\eta_j - \eta^+)^2} \quad (7)$$

$$d_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (\eta_j - \eta^-)^2} \quad (8)$$

式中: d_j^+ 为第 j 个比较序列的近距; d_j^- 为第 j 个比较序列的远距。在考虑联系数列之间的关系时, 所需要的是近距越小越好, 远距越大越好。

(7) 计算范数灰关联度

范数灰关联度可定义为:

$$\varepsilon_j = \frac{d_j^-}{d_j^+ + d_j^-} (j=1,2,\dots,n) \quad (9)$$

当 ε_j 趋于 0 时, 说明该比较序列为较弱关联序列; 当 ε_j 趋于 1 时, 说明该比较序列为较强关联序列。

(8) 计算权重

将范数灰关联度进行归一化作为各指标的权重系数, 则第 j 个指标的权重系数可定义为:

$$w_j = \frac{\varepsilon_j}{\sum_{j=1}^n \varepsilon_j} (j=1,2,\dots,n) \quad (10)$$

3 结果

3.1 确定综合应激指标的因子

受试者因热环境和持续劳动影响所作出的反应存在个体差异, 其生理参数变化对应的其主观感觉的变化不一致, 已有研究表明人体的主观评价和情绪会先于生理指标发生变化, 因此为了确保评价受试者整体状态的全面性, 本研究提出的综合应激指标将主观评价指标和客观生理指标相结合。主观问卷在使用前应该进行有效性验证。《热环境人类工效学》中指出客观性数据和主观性数据之间存在某种关系时, 可以反映主观性数据的有效性^[22]。因此, 采用相关性分析法分析客观生理指标和主观评

价指标之间是否存在关系^[10], 验证主观问卷的可靠性。

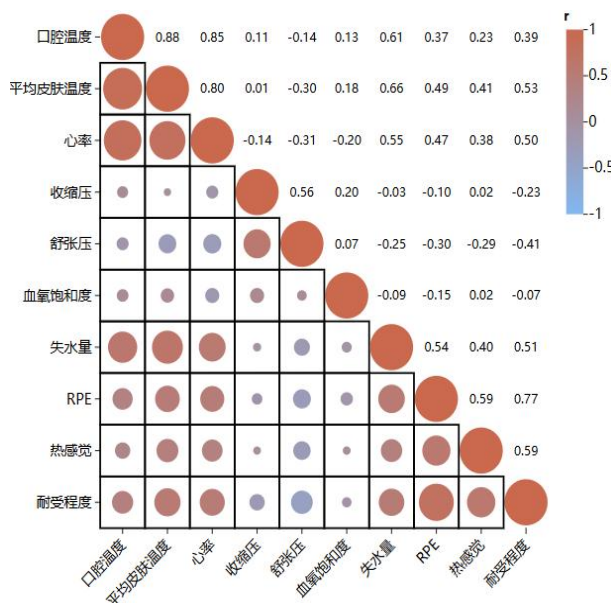


图2 客观生理指标与主观评价指标的相关性 heatmap

Fig.2 Heatmap of correlation between objective physiological indexes and subjective evaluation indexes

对符合正态分布的数据采用 Pearson 相关性分析法, 不服从正态分布的数据采用 Spearman 相关性分析法。如图 2 所示, RPE 疲劳感觉问卷、耐受程度问卷与口腔温度、舒张压、平均皮肤温度、心率和失水量具有相关性, 相关系数大于 0.3^[23]。热感觉问卷与后三者具有相关性。主观问卷与收缩压和血氧饱和度的相关系数低于 0.3, 不具有相关性, 这与收缩压和血氧饱和度的变化在环境温度、劳动时间改变时没有明显规律有关。由上述分析可知, 主观评价指标与客观生理指标之间具有相关性, 主观评价指标可以有效评价人体的生理应激水平。

建立综合指标时要考虑该指标评价人体生理应激状态是否具有代表性, 应找到受环境因子影响显著的生理参数和主观参数, 显著性分析结果如表 2 所示。显著性水平 $\alpha=0.05$, 即当 $p<0.05$ 时, 认为不同工况间的测量参数存在显著差异。结果显示, 受温度影响显著的参数有口腔温度、平均皮肤温度、心率、失水量、RPE、热感觉、耐受程度; 受压力影响显著的指标有心率、血氧饱和度、舒张压。

表 2 显著性检验结果

Table 2 Results of significance test

生理参数	温度		压力		温度*大气压力	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
口腔温度	71.048	<0.001*	3.168	0.113	0.471	0.633
平均皮肤温度	122.398	<0.001*	1.575	0.245	0.194	0.825
心率	41.886	<0.001*	39.228	<0.001*	5.432	0.026*
收缩压	0.093	0.823	2.676	0.141	0.626	0.546
舒张压	2.881	0.085	6.178	0.038*	4.936	0.021*
血氧饱和度	3.221	0.067	176.642	<0.001*	2.716	0.097
失水量	23.803	<0.001*	0.255	0.627	0.168	0.846
RPE	10.852	0.001*	4.278	0.072	1.234	0.317
热感觉	12.870	0.005*	1.730	0.225	0.675	0.498
耐受程度	26.576	<0.001*	3.408	0.102	0.416	0.667

为了避免放入过多的参数放大综合指标的累计误差，应对参数进一步降维处理。失水量是过程量，不易测量，不作为评估指标。血氧饱和度主要受劳动强度影响很大，在一定劳动强度内，人体自身调节达到稳定，本实验全程属于有氧运动，劳动时间有限，血氧饱和度会有回升且都在安全范围内，所以血氧饱和度可以作为监控人体安全的指标，但不作为评估指标。因此客观生理参数选择口腔温度、平均皮肤温度、心率、舒张压。口腔温度和平均皮肤温度用于评价环境和劳动对人体体温

调节系统的影响，心率和舒张压用于评价环境和劳动对人体心血管系统的影响。主观评价参数选择环境影响最为显著的 RPE，代表心血管系统、呼吸系统、肌肉骨骼系统对于环境影响的反馈，从复杂系统的角度提供疲劳感觉的全面描述，能提供单一生物力学或生理参数所提供不了的信息^[25]。耐受程度则作为评价目的。

3.2 实验结果

根据 3.1 节的分析，所筛选出用于评价人体综合应激的指标的实验结果如图 3 所示。

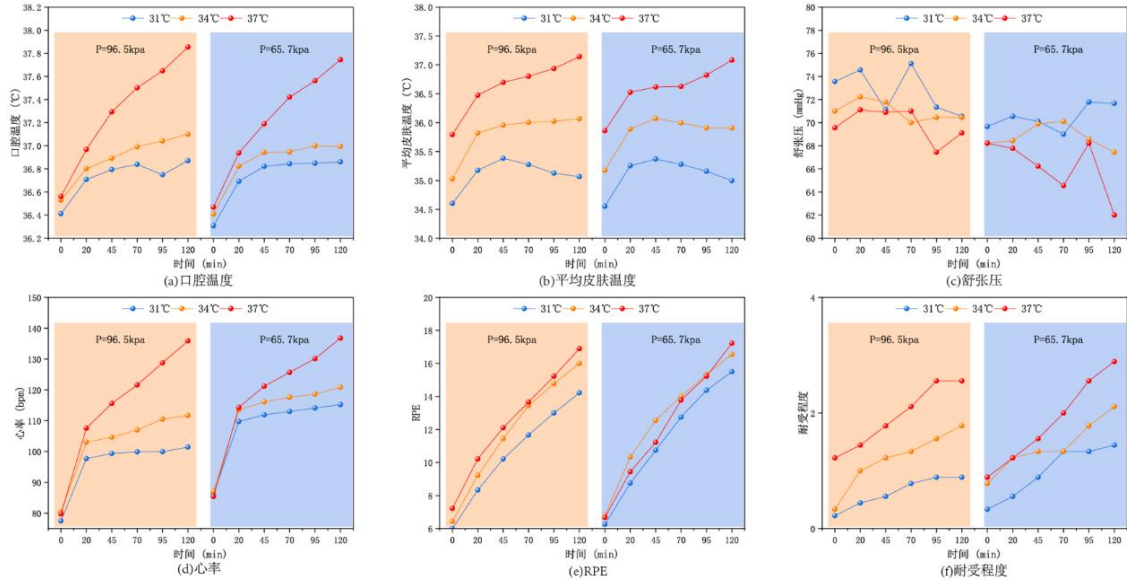


图 3 实验结果

Fig.3 Experimental result

在31℃和34℃时，口腔温度和平均皮肤温度在第二组运动后开始稳定，经显著性分析发现，45min

后的均没有显著差异（ $p>0.05$ ），口腔温度和平均皮肤温度直至实验结束低于37.2℃和36.1℃，人

体始终处于有效代偿生理区。37℃时, 人体无法达到热平衡, 在运动80min 后口腔温度超过37.6℃, 达到工效限度。平均皮肤温度在运动45min 就超过36.7℃, 人体处于部分代偿, 表明此时有部分热量无法散出, 在体内开始累积。

在31℃和34℃时, 心率在第二组运动后稳定, 无显著性差异。37℃时, 各时刻下的口腔温度和心率均存在显著差异 ($p<0.05$)。人体在缺氧时, 会通过提高心率来对缺氧进行代偿, 因此大气压力对心率有显著性影响 ($p<0.05$)。在31℃时心率基本都处于有效代偿区。34℃常压, 运动80min 时心率增加量达到45bpm, 达到工效限度, 而低压时45min 即达到工效限度。37℃常压运动90min 时心率增加量达到60bpm, 达到热耐受限, 而低压时则提前20min 达到。

高温使舒张压降低和持续运动使舒张压升高同时作用, 使舒张压的变化没有明显规律, 但总体趋势呈下降趋势。大气压力对舒张压的降低有显著

影响 ($p<0.05$)。在31℃的低压工况下已经有受试者的舒张压低于正常值60mmHg。

各工况下, RPE 疲劳感觉从第一组运动到实验结束均没有稳定, 经显著性分析存在显著性差异 ($p<0.05$)。环境温度对 RPE 疲劳感觉有显著影响, 表明高温带来的热应激会增加 RPE 反应, 诱导了更大的疲劳应激。耐受程度反应出受试者的总体状态, 随着环境温度升高、大气压力降低和持续运动逐渐到达无法耐受, 也表明了人体综合状态是由热应激、缺氧应激、疲劳应激共同作用。

由此可知, 各指标在不同环境工况、不同运动时长时达到的生理限度不同, 重要性在发生改变。因此在评价人体综合状态时, 指标权重应该随环境和劳动时间而改变。

3.3 综合应激指标建立

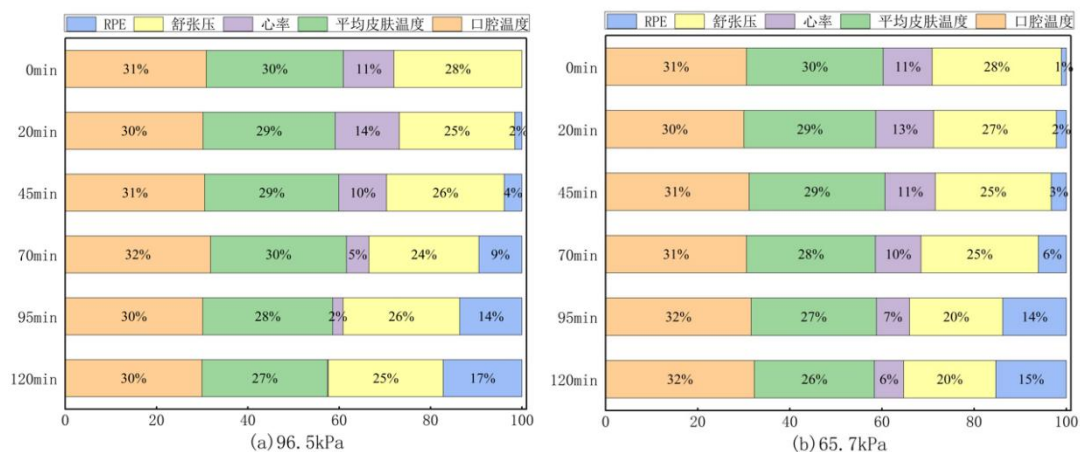


图 4 31℃下动态权重变化图

Fig.4 Graph of weight changes of each index at 31°C

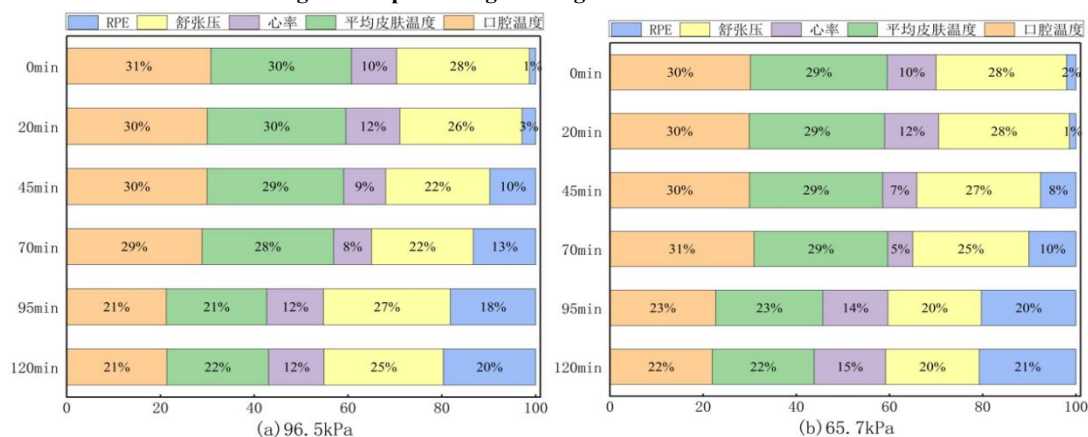


图 5 34℃下动态权重变化图

Fig.5 Graph of weight changes of each index at 34°C

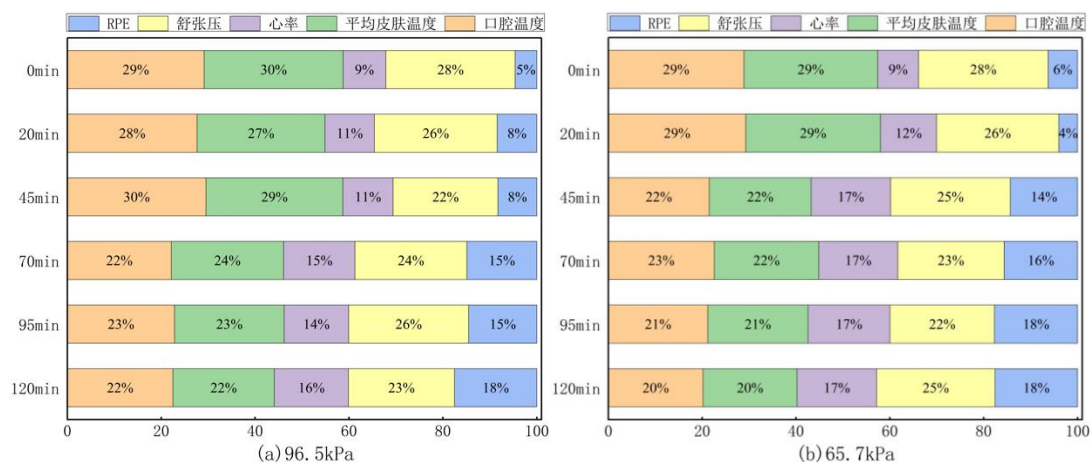


图 6 37°C下冬天权重变化图

Fig.6 Graph of weight changes of each index at 37°C

图 4 至图 6 为 31°C、34°C 和 37°C 温度工况下动态权重变化规律。31°C 时，口腔温度的权重较为稳定；皮肤温度和环境稳定相差较大，人体在逐渐达到热平衡状态后，随着出汗量的增加，蒸发散热增加，皮肤温度开始降低，平均皮肤温度的权重略微下降，和理论相符；心率从第一组运动后就稳定，舒张压在较小范围内波动，所以心率和舒张压的权重随着 RPE 权重升高而下降。运动 120min 时口腔温度的权重稳定在 0.30-0.32，平均皮肤温度的权重稳定在 0.26-0.28，心率的权重在 0.00-0.06，舒张压的权重稳定在 0.20-0.25，RPE 的权重稳定在 0.15-0.17。

34°C 时，心率一开始很快稳定，但因为温度的升高，使得随运动时间增加，耗氧量增加，心跳频率增快以保证供氧，因此心率的权重先下降再升高，主观疲劳程度随运动时间增加逐渐增加，所以 RPE 的权重也随之升高。因此口腔温度、平均皮肤温度和舒张压的权重随心率和 RPE 的升高而下降，但仍然占较大权重。运动 120min 时，口腔温度和平均皮肤温度的权重稳定在 0.21-0.22，心率的权重稳定在 0.12-0.15，舒张压的权重稳定在 0.20-0.25，RPE 的权重稳定在 0.20-0.21。

37°C 时，随着人体蓄热量增加，人体通过自身调节没有达到热平衡，且随着运动时间增加，耗氧量增加，劳动强度增大，心率和主观疲劳程度增加较快，没有达到稳定，因此心率和 RPE 的权重一直增加，口腔温度、平均皮肤温度和舒张压的权重随心率和 RPE 的升高而下降，但仍然占较大权重。运动 120min 时，口腔温度和平均皮肤温度的权重稳定在

0.20-0.22，心率的权重稳定在 0.16-0.18，舒张压的权重稳定在 0.23-0.25，RPE 的权重为 0.18。

随着人体蓄热量的增加，皮肤血管扩张，作用于单位面积血管壁的压力减小，舒张压减小，在 31°C 开始已经有受试者的舒张压低于正常值 60mmHg；核心温度和平均皮肤温度是蓄热量增加时，参与体温调节系统作用的关键生理参数，因此口腔温度、平均皮肤温度和舒张压一直占较大权重，这也与以往大多数研究相符。

口腔温度和平均皮肤温度代表体温调节系统，反映的是环境热强度的大小，在不变的环境中，会自我调节使人体达到有效代偿。而心率反应的是劳动强度的大小，随着不断劳动带来的累积效应，在同一时间内付出相同劳动的成本增加，心率增加。因此环境工况的变化对心率影响较小，而劳动强度和劳动时长对其影响显著，随着运动时间增加，心率的权重增大。由于高温作业时人体存在自我保护机制和主动停止行为，主观感受极大影响了工作效率和作业人员安全，随着运动时间增加，代谢产物堆积，人体疲劳感持续增加，RPE 疲劳感觉的权重增大。而本实验中受试者的口腔温度、平均皮肤温度和舒张压变化较慢，即使在 37°C 运动 120min 后，仅只有少部分达到了危险的生理限度。因此口腔温度、平均皮肤温度和舒张压的权重在各工况下随运动时间保持不变或减小。

本实验中受试者的口腔温度、平均皮肤温度和 RPE 疲劳感觉随大气压力变化没有统计学差异。舒张压虽然受大气压力显著影响但仍有较小波动。仅心率随大气压力降低而显著升高，且规律明确。因

此各环境温度下,仅心率的权重在低压工况时高于常压工况。

从图4至图6可以看出,环境温度对动态权重有较大影响,环境压力并不影响动态权重变化趋势。所有工况运动开始前,口腔温度的权重在0.29-0.31,平均皮肤温度的权重在0.29-0.30,心率的权重在0.9-0.11,舒张压的权重为0.28,RPE的权重0-0.06,随环境工况变化较稳定,表明单纯的环境效应对主客观指标影响较小。RPE的变化幅度大于各生理指标,表明人体的主观评价会先于生理指标发生变化。

动态权重区间如图7所示,结果显示,口腔温度的权重区间为0.20-0.32,平均皮肤温度的权重区间为0.20-0.30,心率的权重区间为0.00-0.17,舒张压的权重区间是0.20-0.28,RPE的权重区间为0.00-0.20,权重变化极差为0.2,变化较大。由此可见,各指标的权重在不同的环境,不同的劳动时间后是不同的。

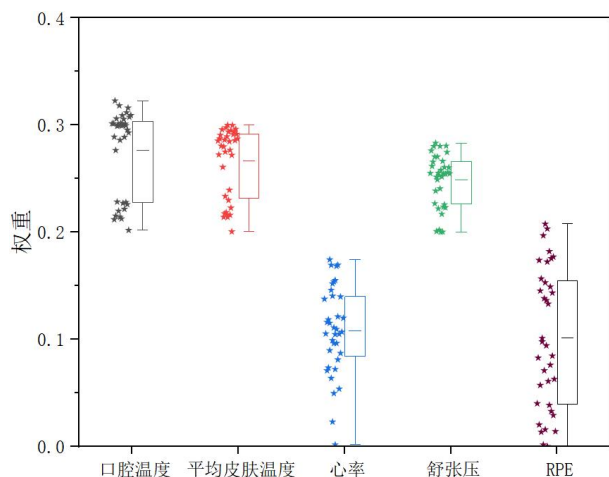


图7 动态权重区间图

Fig.7 Weight interval plot of each indicator

4 结论

为了更合理地评估人员综合应激水平,本文结合客观生理指标和主观评价,提出综合应激指标,并对各参数进行动态赋权。

(1) 根据显著性分析,确定评价高温高湿低压环境下人体综合应激的参数为口腔温度、平均皮肤温度、心率、舒张压和RPE疲劳感觉。通过对其实验结果分析,发现各参数在不同温度、大气压力和运动时间下所达到的生理限度不同,重要性随

之不同。

(2) 环境温度对各参数的动态权重变化规律有较大影响,环境压力并不影响动态权重变化趋势。所有工况运动开始前,口腔温度的权重在0.29-0.31,平均皮肤温度的权重在0.29-0.30,心率的权重在0.09-0.11,舒张压的权重为0.28,RPE的权重0-0.06,随环境工况变化较稳定,表明短时间的环境效应对主客观指标影响较小;

(3) RPE疲劳感觉的变化幅度大于生理参数,表明人体的主观评价会先于生理指标发生变化。RPE的权重在各工况下随着劳动时间增加,心率的权重与口腔温度、平均皮肤温度、舒张压相比,受温度影响较大,因应激累积在高温($>34^{\circ}\text{C}$)下随劳动时间增加,但口腔温度、平均皮肤温度和舒张压一直保持着最大的权重,表明人体体温调节系统和心血管系统在作业过程中监测人员实时安全始终起重要作用。

但本研究在实验工况上,只考虑3个环境温度、2个大气压力以及单一环境湿度和劳动强度,工况梯度较大,对实际施工环境的覆盖不足。以后应增加工况,细化工况范围,并将风速、热辐射强度等影响因素考虑进来。

参考文献:

- [1] 孙莹,程艳爽,高天赐,等.热应激负载降温的研究现状和展望[J].中国急救复苏与灾害医学杂志,2023,18(8): 1103-1106.
- [2] Giersch GEW, Garcia CK, Stachenfeld NS, et al. Are there sex differences in risk for exertional heat stroke? A translational approach [J]. Exp Physiol, 2022,107(10): 1136-1143.
- [3] 刘金松.川藏铁路高地温隧道施工关键技术研究[J].施工技术,2018,47(1):100-102.
- [4] HOUGHTON F C, YAGLOGLIOU C P. Determining equal comfort lines[J]. Journal of the American Society of Heating and Ventilating Engineers, 1923,29:165-176.
- [5] Thom E C. The discomfort index[J]. Weatherwise, 1959,12(2):57-61.
- [6] MORAN D S, PANDOLF K B, SHAPIRO Y, et al. An environmental stress index (ESI) as a substitute for the wet bulb globe temperature (WBGT)[J]. Journal of thermal biology, 2001,26(4):427-431.

- [7] 左淳莹.高温环境热应力指标适用性评价及安全限值确定[D].长沙:中南大学,2022.
- [8] 杨心诚.湿球黑球温度对高温环境的适用性及安全热暴露时长的研究[D].重庆:重庆大学,2014.
- [9] Malchaire J, Piette A, Kampmann B. Development and Validation of the Predicted Heat Strain Model[J]. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2001,45(2):123-135.
- [10] 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.
- [11] 童兴.高温煤矿作业人员热反应规律及热应激计算评价模型研究[D].北京:中国矿业大学,2018.
- [12] 郑国忠.高温高湿环境下相关人群的生理应激响应研究[D].天津:天津大学,2013.
- [13] 李珂.室内高温对青年人生理昼夜节律的影响[D].保定:华北电力大学,2019.
- [14] Guozhong Z, Zhuangzhuang F, Meng G, et al. Establishing a warning index for evaluating the physiological stress of sanitation workers in high temperature weather[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2021,100(p republish):103074.
- [15] Yingni Z, Xinta W, Haobo N, et al. Fuzzy Comprehensive Evaluation of Human Work Efficiency in a High-Temperature Thermal-Radiation Environment[J]. *Sustainability*, 2022,14(21):13959.
- [16] ISO9886. Ergonomics-Evaluation of thermal strain by physiological measurements[S]. Geneva: Second International Standard Organisation, 2004.
- [17] ISO10551. Ergonomics of the thermal environment-assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgement scales[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1995.
- [18] Borg A V. Psychophysical bases of perceived exertion[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1982,14(5):377-381.
- [19] 邓聚龙.灰色系统理论教程[M].武汉:华中理工大学出版社,1990.
- [20] 张岐山,梁亚东,吕作良,等.灰关联度计算的新方法[J]. *大庆石油学院学报*,1999,(4):63-65,110.
- [21] 张尹哲,王建青,王璟,等.范数权重灰关联度超声电火花优化试验研究[J]. *机械制造与自动化*,2019,48(1):26-29.
- [22] GB/T 18977-2003,热环境人类工效学-使用主观判定量表评价热环境的影响[S].北京:中国标准出版社,2003.
- [23] 薛薇.基于 SPSS 的数据分析[M].北京:中国人民大学出版社,2017.
- [24] 陶志穗,魏航,林健良.基于信噪比与范数灰关联度的工艺参数设计[J]. *机械设计*,2009,26(8):69-72.
- [25] Venhorst A, Micklewright D, Noakes T D. Perceived fatigability: utility of a three-dimensional dynamical systems framework to better understand the psychophysiological regulation of goal-directed exercise behaviour[J]. *Sports Medicine*, 2018,48(11):2479-2495.