

中文引用格式:游波,王思奇,刘何清,等. 基于 EWM-VIKOR 模型的人体热应激评价指标研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(6): 232-239.

英文引用格式:YOU Bo, WANG Siqu, LIU Heqing, et al. Research on human heat stress evaluation indexes based on EWM-VIKOR model[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 232-239.

基于 EWM-VIKOR 模型的人体热应激评价指标研究^{*}

游波^{1,2,3}教授, 王思奇¹, 刘何清¹教授, 罗骁¹, 杨明^{**2}教授, 高科³教授

(1 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2 河南理工大学

瓦斯地质与瓦斯治理省部共建国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454003;

3 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室, 辽宁 葫芦岛 125105)

中图分类号: X968

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.1171

基金项目: 国家自然科学基金资助(52174179); 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地开放基金资助(WS2023B09); 辽宁工程技术大学矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室基金资助(JSK202204); 湖南省自然科学基金资助(2022JJ30255)。

【摘要】 人体长时间处于高温高湿环境中易引发热疾病, 为评估室内高温高湿环境人体热应激水平, 利用熵权法(EWM)确定平均皮肤温度(MST)、心率(HR)、口腔温度(OT)、耳膜温度(TT)测量参数的权重, 基于多准则妥协解排序法(VIKOR)模型建立新的综合评价指标 QI, 与主观参数、环境参数进行拟合以验证 QI 的合理性, 通过改进生理应激指标(PHSI)的热应力强度分级确定 QI 的分级。结果表明: TT、MST、OT、HR 的权重范围分别为 0.151 9~0.421 1、0.193 5~0.345 2、0.160 4~0.426 9、0.134 8~0.339 1, MST 的权重均值较高, 受环境因素及劳动因素影响较大; QI 的安全范围[0, 0.36), 热耐受范围[0.36, 0.57], 危险范围(0.57, 1]。

【关键词】 熵权法(EWM); 多准则妥协解排序法(VIKOR); 热应激; 评价指标; 高温高湿

Research on human heat stress evaluation indexes based on EWM-VIKOR model

YOU Bo^{1,2,3}, WANG Siqu¹, LIU Heqing¹, LUO Xiao¹, YANG Ming², GAO Ke³

(1 School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China; 2 State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003, China; 3 Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control of Ministry of Education, Huludao Liaoning 125105, China)

Abstract: The human body is susceptible to heat diseases when exposed to high temperature and high humidity for a long period of time. In order to assess the level of human heat stress in indoor high temperature and high humidity environments, the paper utilized the EWM to determine the weights of measurement parameters such as Mean Skin Temperature (MST), Heart Rate (HR), Oral Temperature (OT) and Tympanic Temperature (TT). A new comprehensive evaluation index QI was established based

* 文章编号: 1003-3033(2025)06-0232-08; 收稿日期: 2025-02-14; 修稿日期: 2025-04-18

** 通信作者: 杨明(1982—), 男, 安徽怀宁人, 博士, 教授, 主要从事瓦斯灾害预测与防治、通风理论与技术、职业安全与健康等方面的研究。E-mail: yming@hpu.edu.cn。

on VIKOR model. The reasonableness of QI was validated by fitting with the subjective parameters and the environmental parameters. The grading of QI was determined by improving the thermal stress intensity grading of the physiological stress indicator PHSI. The results show that the weight ranges of TT, MST, OT and HR are 0.151 9 – 0.421 1, 0.193 5 – 0.345 2, 0.160 4 – 0.426 9 and 0.134 8 – 0.339 1, respectively. MST has a high mean value of weight, which is greatly affected by environmental factors and labor factors. QI's safety range [0, 0.36), thermal tolerance range [0.36, 0.57] and hazardous range (0.57, 1].

Keywords: entropy weight method (EWM); vlskriterijumska optimizacija i kompromis-no resenine (VIKOR); heat stress; evaluation indicators; high temperature and high humidity

0 引言

高温环境一般指温度在 35 ℃ 及以上的生活环境与生产环境,相对湿度在 60% 以上的环境称为高湿环境^[1-2]。劳动者在高温高湿环境中作业产生的热应力会造成人体意识模糊、疲劳乏力,并且由于能量代谢速率和产热速率升高,为增强向环境散热,人体的心率加快,皮肤血管扩张,出汗量增大,如果产热不能及时散出,体内将产生蓄热,造成体温升高,热应力强度变大,达到一定强度时可导致人体热疾病甚至死亡^[3]。

为有效预防人体在高温暴露下的热伤害,文献[4]规定了分析评估和解释被试在炎热环境中所经历热应力的方法,引入预测热应激(Predicted Heat Stress, PHS)模型应用于高温作业环境下人体热应激预测评价,但该模型没有考虑个体差异性的影响。Fiala 模型的拟真度更高,但是计算响应时间间隔过长^[5]。ANKIT 等^[6]提出完整的人体热生理反映虚拟 3D 模型,为分析实际热环境和服装环境下人体热应激提供工具。基于以上预测热应激模型的不足,发现多准则妥协解排序法(Vlskriterijumska optimizacija I Kompromis-no Resenine, VIKOR)是一种折中多属性决策方法(简称 VIKOR 模型)^[7]。YADAV 等^[8]使用熵-VIKOR 模型对牙科修复复合材料进行选择与排序。KUMAR 等^[9]使用熵-VIKOR 模型证明了丙烯酸酯类共聚物增容剂(Acrylic Copolymer-2, ACR-2)合金复合材料可优化整体性能。因而引入熵-VIKOR 模型评价高温高湿环境人员热应激和生理状态安全。热应激预测模型通常依赖于综合环境指数等评价指标来评估和预测人体在特定环境条件下的热应激反应。国内外学者提出许多综合环境指数以使人体热应激预测更加准确,THOM^[10]为解决当地气象局统计研究大气环境与人体热疾病提出不适指数(Discomfort index,

DI)。MORAN 等^[11]基于环境温度、太阳辐射与相对湿度建立影响因素更全面的环境应力指数。针对上述常用指标的不足,有学者修正这些指标并提出新的指标。如胡琴^[12]基于人体热平衡方程与二节点模型建立热积累来评估人体热应变水平。KURAZUMI 等^[13]提出增强传导校正修正有效温度作为室外热环境评价指标。SAKOI 等^[14]通过使用人体热平衡方程来建立等效湿球温度。CHEN 等^[15]建立了改良生理等效温度。

综上所述,现有热应激预测模型在高温高湿环境下的预测结果存在误差,同时,评价指标的选取多集中于评价热环境,缺少对人体热生理评估指标的选取;现有研究中对人体热生理评估指标的利用难度高,在大规模应用中难以实现,且部分生理指标在实际环境中测量难度较大,如直肠温度、出汗量、脱水率等。鉴于此,笔者在室内高温高湿环境下开展试验,选取人体平均皮肤温度(Mean Skin Temperature, MST)、心率(Heart Rate, HR)、口腔温度(Oral Temperature, OT)、耳膜温度(Tympanic Temperature, TT)作为测量参数,采用熵权法(Entropy Weight Method, EWM)确定各测量参数的权重,并基于 VIKOR 模型建立一种新的人体热应激水平评价指标(Quantitative Index, QI),将 QI 分别与主观参数、环境参数进行拟合以验证 QI 的有效性。根据生理应激指标(Physiological Heat Stress Index, PHSI),确定 QI 的安全范围、耐受范围和危险范围,以期定量实时评估高温高湿环境下工作人员的生理状态,从而保证人员的身体健康。

1 熵-VIKOR 模型

熵最初是一个热力学概念,后来被引入信息论以反映信息量。EWM 是信息论中用于加权的一种客观方法,权重是根据数据的变化程度确定的。VIKOR 法为一种多准则决策方法,用于解决具有不

可比较和冲突标准的离散决策问题。熵- VIKOR 模型凭借更为合理的多属性决策方法与全面的指标体系,现已在工程技术、金融经济等领域取得广泛应用。熵- VIKOR 模型综合了多种生理因素进行综合评估,并且能够实时评估高温高湿环境下人体热生理状态,生理指标简单易测,后续可通过编程的方式和现代手环等电子产品绑定,进行实时评估。

熵- VIKOR 的计算过程如下:

1) 数据归一化处理:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & y_j^0 \leq y_{ij} \leq y_j^* \\ 1 - \frac{y_{ij} - y_j^*}{y_j'' - y_j^*} & y_{ij} > y_j^* \\ 0 & y_{ij} > y_j'' \end{cases} \quad (1)$$

式中: r_{ij} 为第 j 个指标下第 i 个项目评价值; y_{ij} 为第 j 个指标下第 i 个项目原始值; $[y_j^0, y_j^*]$ 为第 j 个指标原始值的最优区间; y_j'' 为第 j 个指标原始值无法容忍上限。

2) EWM 确定指标权重。现有 m 个待评价项目, n 个待评价指标, e 是每个指标通过熵值公式计算得出的标准化熵值,范围在 $[0, 1]$ 之间。形成原始数据矩阵 $\mathbf{X} = (r_{ij})_{m \times n}$,第 j 个指标的熵权 w_j :

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (2)$$

3) 确定待评估指标的正理想解与负理想解。正理想解:

$$f_j^+ = \begin{cases} \max_i r_{ij} & \text{正向指标} \\ \min_i r_{ij} & \text{逆向指标} \end{cases} \quad (3)$$

负理想解:

$$f_j^- = \begin{cases} \min_i r_{ij} & \text{正向指标} \\ \max_i r_{ij} & \text{逆向指标} \end{cases} \quad (4)$$

式中: f_j^+ 为第 j 个指标的正理想解; f_j^- 为第 j 个指标的负理想解。

4) 计算待评估指标的群体效益值 S_i 与个体遗憾值 R_i :

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^+ - r_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \quad (5)$$

$$R_i = \max_j \left\{ w_j \frac{f_j^+ - r_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \right\} \quad (6)$$

5) 计算待评估指标的效益比率 Q 值:

$$Q_i = v \frac{S_i - S^-}{S^+ - S^-} + (1 - v) \frac{R_i - R^-}{R^+ - R^-} \quad (7)$$

式中: $S^- = \min_i S_i, S^+ = \max_i S_i, R^- = \min_i R_i, R^+ = \max_i R_i$; v 为决策机制系数, $v < 0.5$ 时,偏向个体遗憾决策; $v > 0.5$ 时,偏向群体效益决策; $v = 0.5$ 时,选择折中的方式进行决策。 v 一般取值 0.5,平衡决策者决策风险。 Q 取值范围 $[0, 1]$,利益比率值越接近 0,说明评估对象状态越佳,利益比率值越接近 1,说明评估对象状态越差。

2 高温高湿环境人体热生理试验

2.1 人体热生理试验目的

通过试验验证一种新的 QI ,该指标基于 EWM 和 VIKOR 模型,用于评估室内高温高湿环境下人体的热应激状态。试验的目的是确定 QI 的安全范围、耐受范围和危险范围,以定量评价人体实时的生理安全状态。

2.2 人体热生理试验设备及对象

气候舱用于模拟室内高温高湿环境,能够精确控制温度、湿度、风速等环境参数;生理参数监测设备包括心率监测仪、耳温枪、口腔温度计和皮肤温度传感器,见表 1,用于实时监测被试的生理参数;数据采集与分析系统用于记录和处理试验过程中收集的生理参数数据。

表 1 人体热生理参数测量仪器

Table 1 Instrument for measuring human thermal physiological parameters

测量指标	仪器	精度
口腔温度/ $^{\circ}\text{C}$	电子体温计	± 0.1
皮肤温度/ $^{\circ}\text{C}$	温度传感器	± 0.01
耳膜温度/ $^{\circ}\text{C}$	电子体温计	± 0.2
心率/ $\%$	电子血压计	± 5

选取 32 名身体健康无疾病史的男性在校大学生参加试验,年龄范围为 20~25 岁、平均身高为 $(175 \pm 5) \text{ cm}$ 、平均体质量为 $(62 \pm 7) \text{ kg}$,体表面积为 $(1.8359 \pm 0.1132) \text{ m}^2$,身体质量指数居于正常值 $18.5 \sim 24 \text{ kg/m}^2$ 。被试身体健康,各项指标良好,无不良嗜好,在试验过程中保持心理情绪稳定,试验前做好安全培训,且近期没有进行剧烈的运动,试验前半小时内不得进食,以保证试验结果的准确性。

2.3 人体热生理试验环境及流程

试验在人工环境舱中进行,环境舱温度和相对湿度模拟温度范围为 $-15 \sim 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$,误差范围为 ± 0.5

℃,相对湿度范围为 30%~95%,误差范围为±2%。以温度高于 35℃时为高温环境、相对湿度高于 60%为高湿环境,共设计 16 种环境工况以 4 个温度(32、34、36、38℃)和 4 个湿度(60%、70%、80%、90%)两两组合而成,轻度、中度、重度 3 种劳动强度,共计 48 种试验工况,其中,轻度劳动以静坐代替,根据美国政府工业卫生学家委员会的劳动强度分级^[17],从事中、重度劳动的新陈代谢量分别为 160、220 W/m²,同等新陈代谢量相对应的运动速度分别为 3.5、5.5 m/s。

每位被试在自然日的同一时段进行试验,试验的顺序采取随机原则,避免人体生理节律对试验的影响。试验准备阶段,向被试介绍试验流程与注意事项,佩戴皮肤温度测量仪器。试验开始前,被试需在休息室休息 30~40 min 来稳定各项生理参数。进入环境舱前测量 0 时刻的各项生理指标以及填写主观评分表。随后按照不同劳动强度进行运动,每隔 10 min 测量一次生理指标并填写主观评分表,每组试验持续 60 min。若有被试中途身体不适或主动诉停,测试人员测量停止时刻的各项指标并要求被试填写主观评分表。

2.4 人体热生理试验数据处理

平均皮肤温度采用 4 点测量法^[16],由下式计算:

t = 0.3(t_c + t_f) + 0.2(t_l + t_a) (8)

式中:t 为平均皮肤温度,℃;t_c 为前胸温度,℃;t_f 为前臂温度,℃;t_l 为大腿内侧温度,℃;t_a 为小腿内侧温度,℃。

首先,进行数据预处理,清洗和去噪处理收集到的生理参数数据,剔除异常值和缺失值,确保数据的准确性和完整性。其次,采用 EWM 确定权重,计算各生理参数的信息熵和权重,具体步骤包括数据标准化、计算各指标的比值、求各指标的信息熵和权重。再次,VIKOR 模型建立 QI,将确定的权重和生理参数数据代入 VIKOR 模型,计算每个被试的 QI 值。然后,进行拟合与验证,拟合 QI 与主观参数(如热感觉投票、热舒适投票)和环境参数(如温度、湿度),验证 QI 的有效性。最后,划分安全范围,根据 PHS 指数,将 QI 值划分为安全范围、耐受范围和危险范围,为人体热应激的实时监测和预警提供依据。

3 人体热应激综合评价指标

3.1 新评估指标 QI 的建立

耳膜温度安全范围 35.5~37.4℃,危险值 38

℃。平均皮肤温度安全范围为 32.8~33.8℃;危险值设置为 38.7℃。口腔温度安全范围为 36.3~37.2℃,世界卫生组织建议,在高温高湿环境下作业的工人,工作期间身体内部核心温度不能超过 38℃,或口腔温度不能超过 37.5℃^[17],因此,将口腔温度的危险值设置为 37.5℃。心率安全范围为 60~95 次/min,危险值设置为 146 次/min。将热应激值(Thermal Stress Value, TSV)安全范围设置为 1~2,危险值设置为 3。

由于生理参数的安全范围属于区间型数据,需将试验测得的数据进行归一化处理转化为极大型数据,以第 1 组试验数据为例,计算权重和建立新评估指标的步骤如下:

1) 将危险值、试验测量值、最优区间构成 3 个待测项目,并与 4 项生理参数(从左至右依次为:TT、MST、OT、HR)形成原始数据矩阵。

原始数据矩阵 X₀:

X_0 = [38 37.6 37.5 146 ; 37.7 35.4 37.1 88 ; [35.5,37.4] [32.8,33.8] [36.3,37.2] [60,95]]

根据式(1)可求出归一化后的数据矩阵:

X = [0 0 0 0 ; 0.5 0.578 9 1 1 ; 1 1 1 1]

根据式(2)可求出本组测量 4 项生理参数数据的权重:

w_j = (0.269 5 0.257 5 0.236 5 0.236 5)

根据本组数据,TT、MST、OT、HR 的权重分别为 0.269 5、0.257 5、0.236 5、0.236 5,剩余测量数据的权重可根据上述过程计算。试验测得的所有数据的生理参数权重范围如图 1 所示。TT、MST、OT、HR 的权重范围分别是:0.151 9~0.421 1、0.193 5~0.345 2、0.160 4~0.426 9、0.134 8~0.339 1。4 项生理参数的权重值比较均衡,通过均值可发现被试的 MST 的权重占比高于其他 3 项生理参数,说明被试的 MST 相较于 TT、OT、HR 受高温高湿及劳动强度影响程度更大。

2) 确定正理想解与负理想解,生理参数构成原始数据矩阵并进行归一化处理后,数值越接近 1,说明生理参数越接近舒适区间。因此,正理想解取值 1,负理想解取值 0,即正理想解: f₁⁺ = (1 1 1 1);负理想解: f₁⁻ = (0 0 0 0)。

3) 根据式(5)、式(6)计算本组生理参数的群

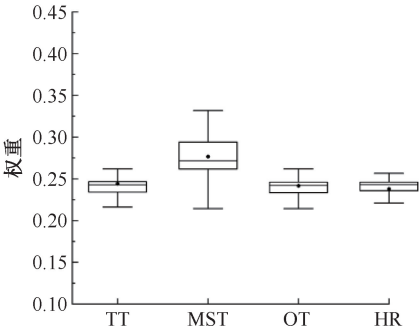


图1 试验数据的生理参数权重范围

Fig.1 Box-plot of physiological parameters weights from experimental data

体效益值与个体遗憾值,如下:

$$S_i = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.243\ 2 \\ 0 \end{bmatrix} R_i = \begin{bmatrix} 0.269\ 5 \\ 0.134\ 8 \\ 0 \end{bmatrix}$$

4) 根据式(7)计算本组试验数据的 Q 值,具体见下式:

$$Q = 0.5 \times \frac{S_1 - S^-}{S^+ - S^-} + 0.5 \times \frac{R_1 - R^-}{R^+ - R^-} = 0.371\ 6 \tag{9}$$

剩余生理参数的效益比率 Q 值计算过程同上,此处不再赘述。计算得出的 Q 在权重的基础上考虑了4种生理参数,可综合评价高温高湿环境中人员的实时安全生理状态,具有全面性。因此,将其定义为综合生理评价指标 QI , QI 的计算如下式:

$$QI = 0.5 \times \frac{\sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^+ - r_{2j}}{f_j^+ - f_j^-} - \min \left\{ \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^+ - r_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \right\}}{\max \left\{ \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^+ - r_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \right\} - \min \left\{ \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^+ - r_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \right\}} + 0.5 \times \frac{\max_j \left\{ \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^+ - r_{2j}}{f_j^+ - f_j^-} \right\} - \min_j \left\{ \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^+ - r_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \right\}}{\max_j \left\{ \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^+ - r_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \right\} - \min_j \left\{ \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^+ - r_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \right\}} \tag{10}$$

QI 值的区间 $[0, 1]$, 1 代表非常危险, 0 代表绝对安全, 即数值越接近 0, 人体的生理状态越安全, 数值越接近 1, 人体的生理状态越危险。通过数值定量表达高温高湿环境下人员的生理安全状态, 具有直观性。

试验记录了被试在 16 种环境工况下模拟 3 种劳动强度运动的 QI 值随时间的变化趋势, 每个工况节点取所有被试 QI 的平均值。不同工况下 QI 值分

布见表 2, 环境条件越恶劣, 劳动强度越大, 劳动时长越长, QI 值就越大, 人体受热应力强度升高, 生理状态也越危险。3 种劳动强度下, 环境温度相同时, 环境相对湿度 80%、90% 与 60%、70% 的 QI 存在显著差异。

表 2 不同工况下 QI 值分布

Table 2 QI value distribution under different working conditions

劳动强度	环境温度/℃	QI 值分布
轻度劳动强度	32	[0.08, 0.27]
	34	[0.07, 0.32]
	36	[0.22, 0.62]
	38	[0.22, 0.90]
中度劳动强度	32	[0.18, 0.40]
	34	[0.22, 0.62]
	36	[0.28, 0.93]
	38	[0.30, 0.98]
重度劳动强度	32	[0.20, 0.49]
	34	[0.22, 0.71]
	36	[0.23, 0.98]
	38	[0.41, 1]

3.2 QI 指标验证与分级

为验证新综合评价指标的合理性, 将 QI 分别与热感觉评分 (Thermal Sensation Vote, TSV)、热舒适评分 (Thermal Comfort Vote, TCV)、PHSI、热湿指数 (Thermal Humidity Index, THI)、热指数 (Heat Index, HI)、有效温度 (Effective Temperature, ET)、标准有效温度 (Standard Effective Temperature, SET) 进行拟合, 其中, 热感觉与热舒适为主观参数, PHSI 为基于人体口腔温度与心率的生理应激指标, 测量指标种类较少, 误差较低, 能综合评价不同环境条件和不同着装下人体的生理应激水平, THI、HI、ET、SSI 为 4 种环境指数。

3.2.1 IPSI 与主观参数的关系

满意度指数 (iPerceptions Satisfaction Index, IPSI) 与主观参数拟合如图 2 所示。在炎热潮湿环境中, 当被试自身感受热舒适性很低时, 其生理指标也处于较差的状态。根据拟合关系式可知: IPSI 与 TSV、TCV 存在线性关系, 且拟合优度分别为 $R^2 = 0.835\ 7$ 和 $R^2 = 0.828$, 拟合优度一般。试验在环境舱中进行, 不同被试在不同温湿度环境及不同劳动强度下从事劳动, 其热适应能力不同, 人体的热心理反应不同, 以上因素可能会导致拟合优度不高。

3.2.2 QI 与 PHSI 的关系

PHSI^[7] 是在 MORAN 提出的生理应激指标即

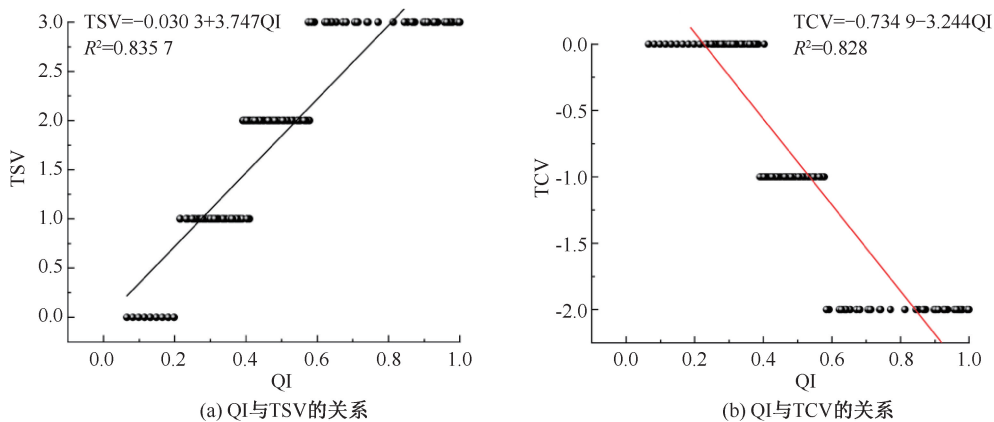


图 2 CRI 与主观参数的关系

Fig. 2 Fitting relationship between CRI and subjective parameters

PSI 的基础上改进的,PHSI 将试验易测量的口腔温度代替难以测量的直肠温度,能够更容易获得热应力指标值,及时得到人员的耐反映。计算式如下:

$$PHSI = 5 \times \frac{t_{oi} - t_{o0}}{39.5 - t_{o0}} + 5 \times \frac{HR_i - HR_0}{180 - HR_0} \tag{11}$$

式中: t_{oi} 为实时的口腔温度,℃; t_{o0} 为初始时刻的口腔温度,℃;39.5 为热暴露时口腔温度极限值; HR_i 为实时心率,次/min; HR_0 为初始时刻的心率,次/min;180 为热暴露时心率极限值。PHSI 对应的热应力强度分级见表 3。

表 3 PHSI 热应力强度分级

Table 3 PHSI thermal stress intensity grading	
热应力强度	PSI 数值
无或轻度	-1、0、1、2
稍轻	3、4
中度	5、6
重度	7、8
非常重	9、10、11、12

QI 与 PHSI 拟合如图 3 所示。PHSI 随着 QI 的增大而增大,说明 QI 越接近理想值,热应力强度越低,人体舒适程度越高。其中, $R^2=0.901$,这是因为 QI 为基于 4 种参数经计算得出的综合评价指标,而 PHSI 只考虑 HR 与 OT 这 2 项生理参数,没有估算其他生理参数的影响,从而对 R^2 数值造成一定影响。

3. 2. 3 QI 与环境指标的关系

图 4 为 QI 与有效温度 ET、温湿度指数 THI、热指数 HI、夏季闷热指数 SSI 的关系,随着 QI 值的增大,4 项环境指数的值随之上升,这表明:环境温度与湿度的上升,人员的舒适度逐渐下降,生理参数的值逐渐偏离理想状态。QI 与 4 项环境指数呈多项

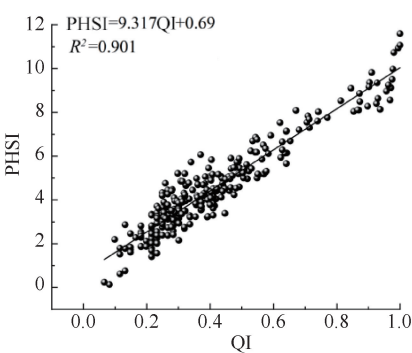


图 3 QI 与 PHSI 的关系

Fig. 3 Relationship between QI and PHSI

式关系,且 R^2 均较高,说明 QI 能够很好地评价高温高湿环境中人员的生理状态,并且 QI 受环境温湿度影响显著。

文中 4 个生理参数的权重相对均衡,从均值来看,MST 的权重高于其他 3 个生理参数。这一发现与其他学者的研究结果一致。如 YOU Bo 等^[18]指出,人体的 HR、SBP 和 SDP 与环境温度呈正相关,与湿度呈负相关,且随着温湿度的增加,对 HR 的影响更加显著。在深层地下空间对人体生理应激和心理应激的影响研究中,高温对 TSV 和 HRV 的影响较大,温度和相对湿度对心理和生理应激的综合影响大于对单一指标的影响,证明了 CRI 综合考虑 TSV 和其他生理指标的合理性^[19]。热湿环境综合影响人体的生理和心理应激,不同个体对热湿环境具有不同程度的热适应性和热耐受性。

3. 2. 4 QI 的分级

室内高温高湿环境会导致工作人员的不适甚至死亡,对这种环境条件的预测显得尤为重要。根据 QI 和各项指标的关系,发现 QI 与夏季闷热指数 SSI 的拟合优度最高, $R^2=0.974 9$,但查阅资料发现,这

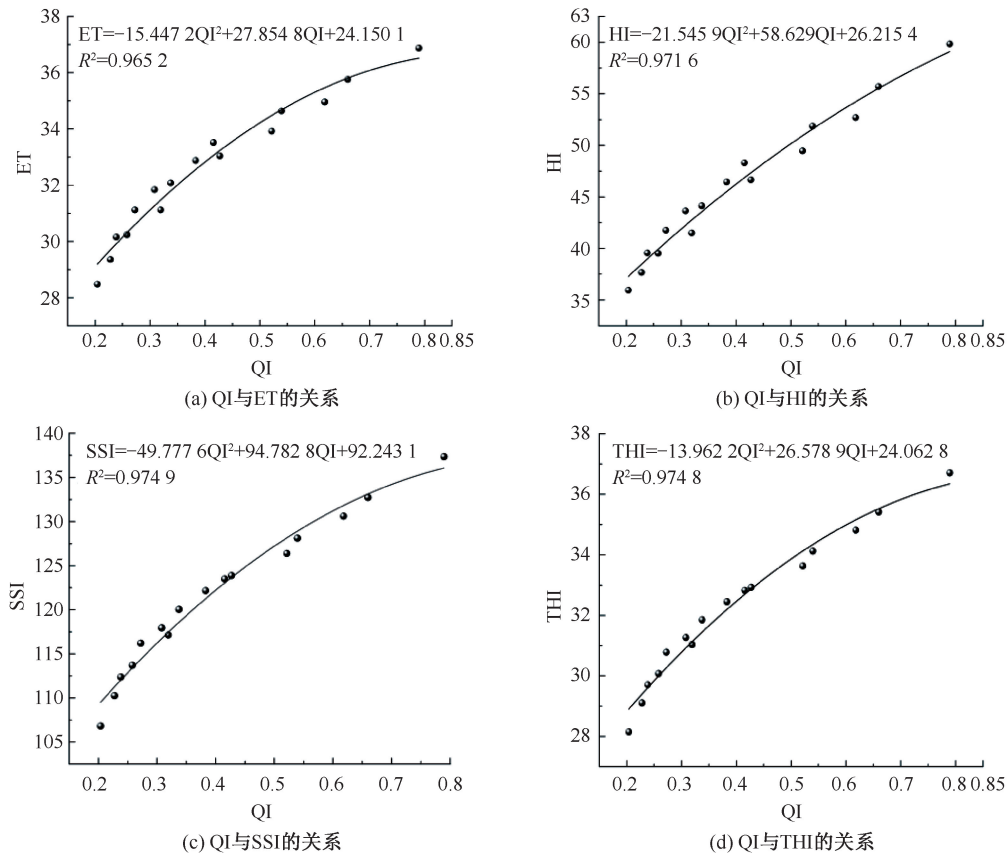


图 4 QI 与 4 种环境指数的关系
Fig. 4 Relationship between QI and four environmental indexes

4 种环境指数的分级不能很好地用于 QI 的预警,通过 PHSI 指标的热应力强度分级来实现 QI 的预测。在此将 PHSI 中“无或轻度”表征为 QI 的安全范围;将 PHSI 中稍轻、中度表征为 QI 的热耐受范围;将 PHSI 中重度、非常重表征为 QI 的危险范围。根据 PHSI 的热应力强度分级,通过拟合公式计算得出 QI 的安全范围为[0,0.36),热耐受范围为[0.36,0.57],危险范围为(0.57,1]。

4 结 论

1) 4 项生理参数 TT、MST、OT、HR 的实时动态

权重范围:0.151 9~0.421 1、0.193 5~0.345 2、0.160 4~0.426 9、0.134 8~0.339 1,通过均值发现,MST 的权重占比高于其他 3 项生理参数,说明 MST 受环境及劳动因素影响程度更大。

2) QI 与 PHSI、ET、THI、HI、SSI 的拟和关系较好,根据 PHSI 的热应力强度分级,通过拟合公式计算得出 QI 的安全范围[0,0.36),热耐受范围[0.36,0.57],危险范围(0.57,1]。

3) 试验中的环境温度与环境湿度设置为固定值,并且为静态组合,以后的研究应考虑动态热湿环境下从事劳动人体热应激的变化。

参 考 文 献

[1] 张志宇, 朱能. 16 个高温高湿环境工况等级划分[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(5): 184-190.
ZHANG Zhiyu, ZHU Neng. Classification of 16 high temperature and high humidity environmental conditions[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(5): 184-190.

[2] YOU Bo, WANG Siqi, YANG Ming, et al. Simulation study of heat transfer in the space under the clothing of mining ventilation suits in typical human labour positions[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025, 208: DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2024.109423.

[3] 王梦飞, 金龙哲, 于露, 等. PPG 信号用于高温高湿伤害预警的可行性研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版,

2020, 51(5): 1 424–1 430.

WANG Mengfei, JIN Longzhe, YU Lu, et al. Feasibility study of PPG signal for early warning of high temperature and high humidity injury[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2020, 51(5): 1 424–1 430.

- [4] ISO 7933–2004, Ergonomics of the thermal environment-analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain[S].
- [5] FIALA D, HAVENITH G. Modelling human heattransfer and temperature regulation[M]. Cham: Springer International Publishing, 2015:265–302.
- [6] JOSHI A, WANG Faming, KANG Zhanxiao, et al. A three-dimensional thermoregulatory model for predicting human thermophysiological responses in various thermal environments[J]. Building and Environment, 2022, 207: DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108506.
- [7] OPRICOVIC S, TZENG G H. Compromise solution by MCDM methods: a comparative analysis of VIKOR and TOPSIS[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 156(2): 445–455.
- [8] YADAV R, SINGH M, MEENA A, et al. Selection and ranking of dental restorative composite materials using hybrid Entropy-VIKOR method: an application of MCDM technique[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2023, 147: DOI: 10.1016/J.JMBBM.2023.106103.
- [9] KUMAR A, KUMAR M, VERMA P C. Ranking analysis of AA7075-Cr alloy composites based on physical, mechanical, and sliding wear assessment using hybrid ENTROPY-VIKOR approach[J]. International Journal of Metalcasting, 2024, 18(1): 352–372.
- [10] THOM C E. The discomfort index[J]. Weatherwise, 2010, 12(2): 57–61.
- [11] 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(4/5): 427–431.
- [12] 胡琴. 基于热平衡理论的人体热应激水平评估[D]. 武汉:武汉理工大学,2017.
- HU Qin. Evaluation of human heat stress level based on heat balance theory[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [13] KURAZUMI Y, TSUCHIKAWA T, MATSUBARA N, et al. Evaluation of enhanced conduction-corrected modified effective temperature ETFe as the outdoor thermal environment evaluation index[J]. Energy and Buildings, 2011, 43: 2 926–2 938.
- [14] SAKOI T, MOCHIDA T. Concept of the equivalent wet bulb globe temperature index for indicating safe thermal occupational environments[J]. Building Science, 2013, 67: 167–178.
- [15] CHEN Y C, MATZARAKIS A. Modified physiologically equivalent temperature: basics and applications for western European climate[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 132: 1 275–1 289.
- [16] ZHENG Guozhong, LI Cong, FENG Yinshuai. Developing a new index for evaluating physiological safety in high temperature weather based on entropy-TOPSIS model: a case of sanitation worker[J]. Environmental Research, 2020, 191(8): DOI: 10.1016/j.envres.2020.110091.
- [17] 吕石磊. 极端热环境下人体热耐受力研究[D]. 天津:天津大学, 2007.
- LYU Shilei. Study on human thermal tolerance under extreme thermal environment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [18] YOU Bo, WU Chao, LI Ji, et al. Physiological responses of people in working faces of deep underground mines[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2014, 24(5): 683–688.
- [19] YANG Bin, YAO Huangcheng, YANG Pengfei, et al. Effects of thermal and acoustic environments on workers' psychological and physiological stress in deep underground spaces[J]. Building and Environment, 2022, 212: DOI: 10.1016/J.BUILDENV.2022.108830.

作者简介: 游波 (1986—),男,湖南娄底人,博士,教授,主要从事矿井热害防治与职业安全健康方面的研究。E-mail: 494907336@qq.com。