

文章编号: 1671-6612 (2023) 04-488-07

高温高湿低压低氧环境下人体生理应激反应研究

许国荣 胡 玥 孙亮亮

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 模拟高海拔高温高湿隧道作业环境, 研究环境温度和大气压力及其交互作用对人体生理指标的影响, 分析了人体生理指标受环境参数影响的规律和显著性。实验结果表明, 人体口腔温度、平均皮肤温度、心率、舒张压、血氧饱和度和失水率受环境温度的影响显著 ($p<0.05$); 人体平均皮肤温度、心率、收缩压、舒张压、血氧饱和度和失水率受大气压力的影响显著 ($p<0.05$); 人体平均皮肤温度、心率、血氧饱和度受环境温度和大气压力交互作用的影响显著 ($p<0.05$)。该研究可为高温高湿低压低氧环境下作业人员的生理状态监测提供指导。

【关键词】 高温高湿环境; 低压低氧环境; 生理指标; 变化规律; 交互作用

中图分类号 X91/X968 文献标识码 A

Study of Human Physiological Stress Response under High Temperature, High Humidity, Low pressure and Low Oxygen Environment

Xu Guorong Hu Yue Sun Liangliang

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

【Abstract】 This paper simulates the high altitude, high temperature and high humidity tunnel operating environment, studies the effects of ambient temperature and atmospheric pressure and their interactions on human physiological indicators, and analyzes the laws and significance of human physiological indicators influenced by environmental parameters. The experimental results showed significant differences ($p<0.05$) in the effects of ambient temperature on human oral temperature, mean skin temperature, heart rate, diastolic blood pressure, oxygen saturation, and water loss rate. There were significant differences ($p<0.05$) in the effects of atmospheric pressure on human mean skin temperature, heart rate, systolic blood pressure, diastolic blood pressure, oxygen saturation, and water loss rate. The interaction of ambient temperature and atmospheric pressure significantly affected human mean skin temperature, heart rate, and oxygen saturation ($p<0.05$). This study can guide monitoring the physiological status of operators in high temperature, high humidity, low pressure, and low oxygen environments.

【Keywords】 High temperature and high humidity environment; Low pressure and low oxygen environment; Physiological indexes; Variation patterns; Interactions

0 引言

川藏铁路是一项具有长远意义的重大工程, 但沿线地质条件复杂, 约有 15 个隧道存在高温热害问题^[1], 同时, 沿线隧道海拔高, 空气中氧分压降低, 致使隧道作业人员面临高温高湿低压低氧的作业环境。现场作业人员持续工作时间均不超过两小时, 且出现胸闷、呕吐、乏力、昏厥等症状, 严重

威胁作业人员的健康和安全^[2]。

Zhu 等^[3]认为环境引起的生理应激反应最终受体是人, 评估环境的危害程度应将重点转移在生理反应上。Rowlinson 等^[4]提出可以通过生理指标的个体化监测将其控制在可耐受的限度内, 一劳永逸的完成生理应变管理工作。因此, 学者们分别对高温高湿和低压低氧环境下人体的生理反应进行了

基金项目: 川藏铁路隧道热湿环境调控与火灾安全保障理论与方法 (52038009)

作者简介: 许国荣 (1997.04-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: c_xuguorong@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: 2023-03-17

研究。Epstein Y 等^[5]研究结果表明热负荷对作业人员的心率、直肠温度和失水率有显著影响。Tian 等^[6]研究结果显示, 随着环境温度升高鼓膜温度、心率、皮肤温度、收缩压、呼吸流量和呼吸频率显著升高, 而血氧饱和度下降。王延琦等^[7]对急进高原的人员生理指标进行测量, 发现高原环境会明显影响人体的血氧饱和度、血压和心率。李冬冬等^[8]研究高原环境对卫生人员生理指标的影响, 发现随海拔高度的升高, 呼吸、心率明显加快, 血氧饱和度下降, 血压轻度升高, 体温无明显变化。在两类环境下人体生理指标均会发生变化, 且某些人体生理指标的变化趋势是一致的, 如心率上升, 但也存在相反的生理反应, 如高温高湿环境会使皮肤血管舒张, 增强散热, 而低压低氧环境为代偿缺氧, 皮肤血管收缩。而目前针对高温高湿和低压低氧同时作用对人体的影响研究较少, 因此, 研究这种耦合环境下作业人员生理应激反应具有重要意义。本研究将确定受环境参数影响的显著性生理指标, 通过监测显著性生理指标, 为隧道施工人员的健康安全提供有效保障。

1 实验设计

1.1 实验环境和工况

实验于高海拔低气压实验舱内进行, 实验舱由舱体本身和控制柜组成, 舱体尺寸为 $\phi 2.6\text{m} \times 2.8\text{m}$, 控制柜尺寸为 $1\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m}$, 内部配有加热器和加湿器, 控温范围为 $5\sim 50^\circ\text{C}$, 控制精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$, 湿度控制范围为 $20\%\sim 95\%\text{RH}$, 控制精度为 $\pm 3\%$ 。低压环境由真空泵实现, 舱内氧气由制氧机供给, 舱内配有跑步机, 以模拟作业劳动强度。所有环境参数控制均可在控制面板上进行操作, 实验舱实物图如图 1 所示。

实验环境温度设定为 33°C 、 37°C 和 40°C , 海拔高度设定为 3500m ($P=65.7\text{kPa}$) 和成都海拔约

500m ($P=96.5\text{kPa}$), 后续分析中称为低压和常压环境, 相对湿度为 80% , 空气流速小于 0.1m/s , 将其组合设定为 6 个实验工况。受试者以 4km/h 的速度在跑步机上运动, 以模拟中等劳动强度作业。



图 1 高海拔低气压实验舱实物图

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

1.2 实验样本

根据实验条件, 通过 G*Power 3.1 软件进行先验功效分析^[9], 估算出所需要的样本量为 7 人。经心电图、BMI、有无疾病史和基础生理参数筛选, 最终选择 10 名男性大学生进行实验。受试者平均年龄为 22.2 ± 1.31 岁, 平均身高为 $174.3 \pm 4.87\text{cm}$, 体重为 $66.1 \pm 7.04\text{kg}$ 。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 1 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, 对环境参数和人体生理指标进行测量, 所测人体生理指标包括: 口腔温度、平均皮肤温度、心率、血压、血氧饱和度和失水率。生理指标测量仪器及测量精度见表 1, 平均皮肤温度、心率和血氧饱和度为连续测量, 其他生理指标根据实验过程间断测量。

表 1 生理指标及其测量仪器

Table 1 Physiological indicators and their measuring instruments

生理指标	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	$32\sim 42^\circ\text{C}$	$\pm 0.05^\circ\text{C}$
皮肤温度	iButton 温度传感器	DS1923	$-20\sim 85^\circ\text{C}$	$\pm 0.5^\circ\text{C}$
心率	心率仪	Polar H10	$30\sim 240\text{bpm}$	$\pm 1\text{bpm}$
血氧饱和度	脉搏血氧仪	NONIN 2500 PalmSAT	$0\sim 100\%$	$\pm 2\%$
血压	电子血压计	OMRON J761	$0\sim 299\text{ mmHg}$	$\pm 3\text{mmHg}$
失水率	电子体重秤	上海菁海 YP100KN	$0\sim 100\text{kg}$	2g

皮肤温度采用 ISO 9886 推荐的 8 点法测量^[10], 计算公式如下:

$$T_{sk} = 0.07T_A + 0.175T_B + 0.175T_C + 0.07T_D + 0.07T_E + 0.05T_F + 0.19T_G + 0.2T_H \quad (1)$$

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 为右手上臂温度; 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。

出汗率根据体重差进行计算, 计算公式如下:

$$SR = \frac{W_s + W_w - W_e}{h} \quad (2)$$

式中: SR 为出汗率, g/ming; W_s 为实验前体

重, kg; W_e 为实验后体重, kg; W_w 为实验过程中的饮水量, kg; h 为实验时长, min。

1.4 实验流程和安全保护

受试者提前半小时到达实验室, 更换统一服装, 在实验准备房间内休息 30min, 以稳定受试者的各项生理指标, 在最后 5min 测量受试者的口腔温度、心率和血压, 超过正常范围者不进行后续实验。受试者进入低压舱后开始降压, 参考列车压力波动人体舒适度标准^[11], 降压速率小于 200Pa/s, 降压 15min 后测量受试者的生理指标。之后受试者在跑步机上运动, 每运动 20min, 休息 5min, 在休息时间测量受试者生理指标, 以此重复直到实验结束, 实验阶段总时长 120min。实验过程中, 若实验终止, 则立即测量受试者的各项生理指标。实验具体流程如图 2 所示。

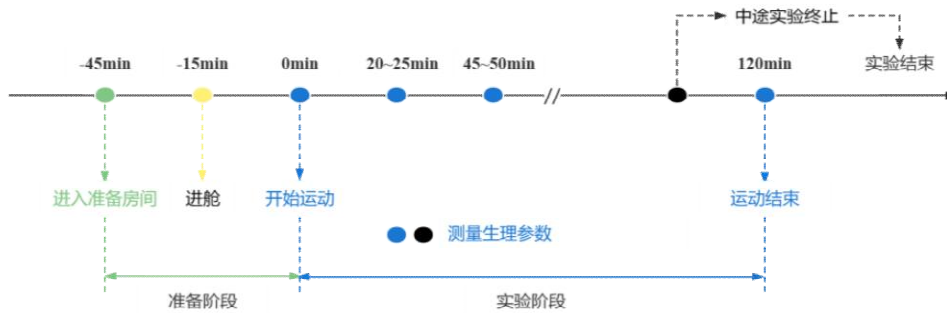


图 2 实验流程图

Fig.2 Experimental flow chart

为充分保障受试者安全, 参考世界卫生组织 (WHO) ^[12]、ISO 9886-2004^[10]关于高温环境对人体健康不产生危害的建议值, 以及血氧饱和度与缺氧反应症状的关系^[13], 出现下列情况之一时终止试验: (1) 受试者口腔温度超过 39℃; (2) 受试者心率连续 3min 超过 180bpm; (3) 受试者血氧饱和度低于 75%; (4) 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; (5) 受试者主动要求停止或实验达到结束时间。

1.5 统计分析方法

为保证数据的完整性, 后续图中的取值只取到每个温度工况下第一个人退出实验时所对应的值, 因此图中数据并未标识至 120min, 连续测量参数

为每 10min 取一个值。本研究统计分析软件为 SPSS, 采用 Shapiro-Wilk 检验法对各工况数据进行正态性检验, 采用重复测量方差分析检验不同工况下的生理指标是否存在显著差异。本研究中, 显著性水平 $\alpha=0.05$, 即当 $p<0.05$ 时, 认为不同工况间的生理指标存在显著差异。

2 实验结果及分析

2.1 实测环境参数

实验过程中, 通过调控实验设备, 严格控制舱内的环境参数, 以满足预先设定的实验工况条件。各工况的实测环境参数如表 2 所示, 相关参数均控制良好, 所有实验工况风速均不超过 0.1m/s。

表 2 各工况实测环境参数

Table 2 Measured environmental parameters for each working condition

工况	干球温度/°C	相对湿度/%	大气压力/kPa	WBGT/°C	氧气体积分数/%
33°C/96.5kPa	33.0±0.2	80.4±1.7	96.5±0.9	32.6±0.2	20.88±0.09
33°C/65.7kPa	32.9±0.2	79.8±1.8	65.5±1.5	32.5±0.1	20.78±0.12
37°C/96.5kPa	36.8±0.1	80.4±1.3	96.5±1.2	36.5±0.2	20.91±0.08
37°C/65.7kPa	36.8±0.2	80.7±1.7	65.6±1.3	36.5±0.1	20.82±0.13
40°C/96.5kPa	39.7±0.3	79.1±2.0	96.6±0.3	39.2±0.2	20.90±0.08
40°C/65.7kPa	39.6±0.2	79.3±2.3	65.6±1.1	39.0±0.2	20.85±0.12

2.2 口腔温度

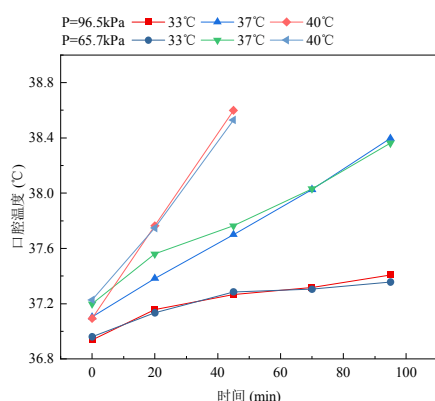


图 3 不同工况下口腔温度随时间的变化

Fig.3 Variation of oral temperature with time under different working conditions

图 3 为各工况下口腔温度随时间的变化。由图可知不同温度间的口腔温度存在明显差异,但常压和低压环境的口腔温度差异不大。33°C 工况下,常压和低压环境下的口腔温度变化规律基本一致,口腔温度在前 45min 有轻微的上升趋势,但由于人体的体温调节使人体散热量增加,口腔温度上升趋势变缓。通过重复测量方差分析检验不同时刻的口腔温度是否有显著差异时发现,从 45min 到实验结束,各时刻的口腔温度均没有显著差异 ($p>0.05$),表明在 33°C 工况下受试者能够维持身体的热平衡。随温度升高,在 37°C 和 40°C 工况下,受试者口腔温度一直呈上升趋势,重复测量方差分析检验发现,直至实验结束常压和低压环境各时刻口腔温度均存在显著差异 ($p<0.05$),表明在 37°C 和 40°C 条件下,人体蓄热量在不断增加,已不能通过对流、辐射和汗液蒸发维持人体的热平衡。

2.3 平均皮肤温度

图 4 为各工况下平均皮肤温度随时间的变化。33°C 工况下,前 20min 内平均皮肤温度上升明显,

在 20~45min 内增长趋势变缓,后续平均皮肤温度呈下降趋势,重复测量方差分析发现,20min 后直至实验结束各时刻的平均皮肤温度没有显著差异 ($p>0.05$),进一步表明在该温度工况下受试者能够维持身体的热平衡。37°C 和 40°C 工况下,前 20min 内平均皮肤温度迅速上升,且上升速率均大于 33°C 工况,皮肤温度上升导致其与环境温度的温差逐渐减小,此时最主要的散热方式是蒸发散热,很难使人体维持热平衡,所以平均皮肤温度变化趋势呈现先升高后平缓再升高。

33°C 工况下,常压下的皮肤温度比低压环境的皮肤温度高,主要是因为环境温度接近常温时,低压环境人体蒸发换热增强^[4],而由心率可看出在 33°C 低压和常压心率均较低且差异不大(见图 5),即低压和常压环境产热量差异不大,所以低压环境平均皮肤温度更低。而对于 37°C 和 40°C 工况,环境恶劣,人体自我保护,产热量下降,因此低压下失水率下降(见图 8),散热量减小,因而低压下的平均皮肤温度比常压下的平均皮肤温度高。

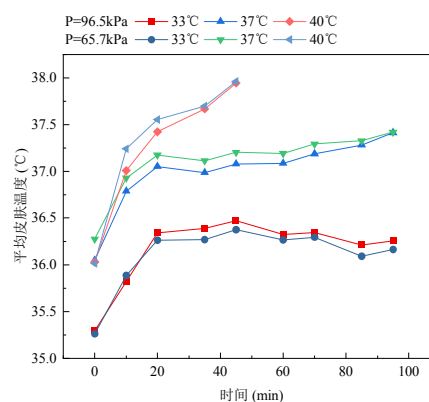


图 4 不同工况下平均皮肤温度随时间的变化

Fig.4 Variation of average skin temperature with time under different working conditions

2.4 心率

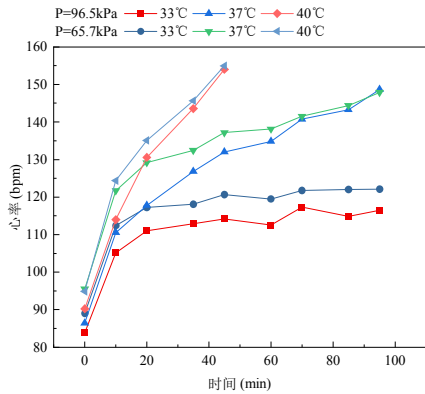


图5 不同工况下心率随时间的变化

Fig.5 Variation of heart rate with time under different working conditions

图5为各工况下心率随时间的变化。33℃工况下，心率在前10min迅速上升，后基本保持稳定，结合口腔温度和平均皮肤温度可以看出，在该温度

下，人体通过出汗、皮肤血管扩张等体温调节方式可以维持人体热平衡，因而心率维持在相对稳定的范围。37℃和40℃工况一样，由于环境温度过高，人体蓄热量不断累积，心率持续上升，各时刻的心率均存在显著差异 ($p < 0.05$)，生理应变加剧，已很难通过生理调节维持人体热平衡。所有温度工况，低压环境心率均比常压环境心率高，这主要是因为，低压环境氧含量降低，人体为代偿缺氧应激使心率加快。

2.5 血压

图6为各工况下血压随时间的变化。随温度的升高和时间的延长，收缩压变化没有明显规律，各温度工况下常压环境下的收缩压均高于低压环境，而舒张压减小，呈下降趋势，原因是温度升高，人体蓄热量增加，皮肤温度扩张，作用于单位面积血管壁的压力减小，即舒张压减小，各温度工况下常压环境下的舒张压均高于低压环境。

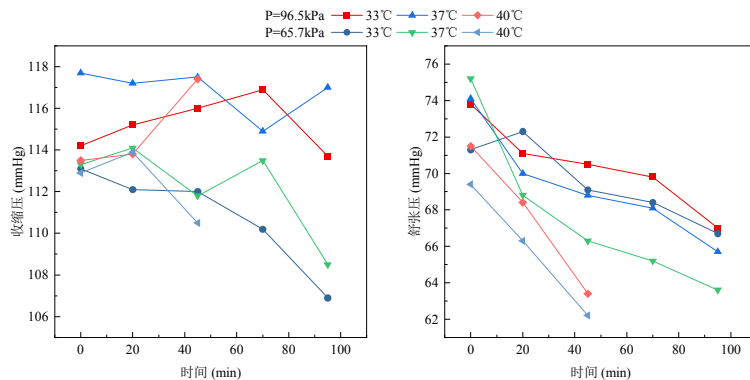


图6 不同工况下血压随时间的变化

Fig.6 Variation of blood pressure with time under different working conditions

2.6 血氧饱和度

图7为各工况下血氧饱和度随时间的变化。常压环境下，血氧饱和度随温度升高和实验时间延长均呈下降趋势。33℃和37℃工况，血氧饱和度变化范围均在正常值95%以上，而40℃工况，血氧饱和度下降至94.3%，人体处于缺氧状态。血氧饱和度下降的原因是随着热负荷的增加，心输出量增加，更多血液流向皮肤用于散热，致使微循环中用于进行物质交换的血液减少，造成人体轻度缺氧^[15]。低压环境，各温度工况血氧饱和度在刚开始的10min均下降，这可能是因为人体刚进入低压环境中，且开始运动，需氧量增加，后保持稳定或上升趋势，能够基本维持在65.7kPa所对应的血氧饱和度值。

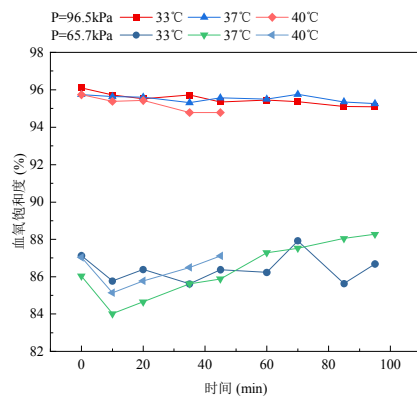


图7 不同工况下血氧饱和度随时间的变化

Fig.7 Variation of blood oxygen saturation with time under different working conditions

2.7 失水率

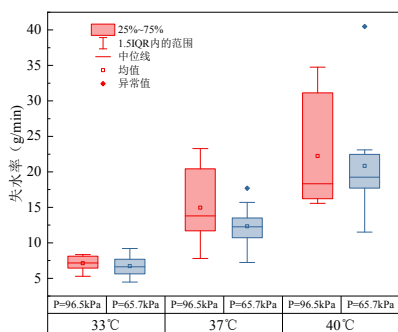


图 8 不同工况下的失水率

Fig.8 Water loss rate under different working conditions

在热环境中, 汗液蒸发是最有效的换热方式, 每蒸发 1L 汗液, 可损失 580kcal 的热量^[6], 对维持人体热平衡有重要意义。图 8 为各工况下的失水速率, 可以看出, 失水率随温度升高而显著上升, 37°C 工况失水率约为 33°C 工况失水率的两倍, 40°C 工况失水率约为 33°C 工况失水率的三倍, 常压环境的失水率均高于低压环境的失水率。

采用重复测量方差分析检验不同工况下的生理指标是否存在显著差异, 在各工况数据满足正态性检验、方差齐性检验和球形检验的前提下, 得到如表 3 所示的重复测量方差分析结果。

表 3 各生理指标重复测量方差分析结果

Table 3 Analysis of variance (ANOVA) results for repeated measurements of each physiological index

生理指标		口腔温度	平均皮肤温度	心率	收缩压	舒张压	血氧饱和度	失水率
温度	<i>F</i>	47.207	1061.779	169.457	1.306	11.507	67.271	30.263
	<i>p</i>	<0.001	<0.001	<0.001	0.279	<0.001	<0.001	<0.001
	偏 η^2	0.619	0.960	0.794	0.043	0.283	0.605	0.771
大气压力	<i>F</i>	1.344	51.583	302.222	14.325	4.489	8272.820	5.112
	<i>p</i>	0.256	<0.001	<0.001	0.001	0.043	<0.001	0.050
	偏 η^2	0.044	0.540	0.873	0.331	0.134	0.995	0.362
温度*大气压力	<i>F</i>	1.127	254.248	36.633	0.524	0.158	145.769	0.417
	<i>p</i>	0.316	<0.001	<0.001	0.595	0.854	<0.001	0.665
	偏 η^2	0.037	0.852	0.454	0.018	0.005	0.768	0.044

从表 3 中的 *p* 值和效应量偏 η^2 可以看出, 口腔温度受环境温度影响显著, 不受大气压力的影响, 收缩压受大气压力的影响显著, 不受环境温度的影响; 心率和血氧饱和度受环境温度和大气压力的影响均显著, 均为大气压力的影响程度大于温度, 且受环境温度和大气压力交互作用的影响; 皮肤温度受环境温度和大气压力的影响均显著, 环境温度的影响程度大于大气压力, 且受环境温度和大气压力交互作用的影响; 舒张压和失水率受环境温度和大气压力的影响均显著, 且均为环境温度的影响程度大于大气压力, 但不受环境温度和大气压力交互作用的影响。

血氧饱和度和失水率在不同环境参数下的变化规律, 并通过重复测量方差分析, 确定了受环境温度和大气压力显著影响的生理指标, 主要结论如下:

(1) 口腔温度、平均皮肤温度、心率、舒张压、血氧饱和度和失水率受环境温度的影响显著。平均皮肤温度、心率、收缩压、舒张压、血氧饱和度和失水率受大气压力的影响显著。平均皮肤温度、心率和血氧饱和度受环境温度和大气压力交互作用的影响显著。

(2) 收缩压虽然受大气压力的影响显著, 但在实验过程中收缩压均在正常范围内波动, 不适合作为生理状态评价指标。

3 结论

本文开展了高温高湿低压低氧环境下作业人员的生理应激实验, 测量了受试者的各项生理指标, 得到了口腔温度、平均皮肤温度、心率、血压、

参考文献:

[1] 郑宗溪,孙其清.川藏铁路隧道工程[J].隧道建设,2017, 37(8):1049-1054.
[2] 严健,何川,曾艳华,等.川藏铁路高地温隧道降温技术

- 及效果分析[J].中国铁道科学,2019,40(5):53-62.
- [3] Zhu N, Chong D. Evaluation and improvement of human heat tolerance in built environments: A review[J]. Sustainable Cities and Society, 2019,51:101797.
- [4] Rowlinson S, Yunyanjia A, Li B, et al. Management of climatic heat stress risk in construction: A review of practices, methodologies, and future research[J]. Accident Analysis & Prevention, 2014,66(3):187-198.
- [5] Epstein Y, Keren G, Moisseiev J, et al. Psychomotor deterioration during exposure to heat[J]. Aviation, space, and environmental medicine, 1980,51(6):607-610.
- [6] Tian X, Deng Y, Wargocki P, et al. Effects of increased activity level on physiological and subjective responses at different high temperatures[J]. Building and Environment, 2021,201(3):108011.
- [7] 王延琦,陈亚妮,刘晓峰,等.高原环境下试验人员血氧饱和度、血压和心率的变化规律[J].职业与健康,2018,34(6):733-736,741.
- [8] 李冬冬,孙克悝,邓传恺,等.高原环境对卫生人员救护能力影响的研究[J].军事医学,2020,(10):4.
- [9] Kang H. Sample size determination and power analysis using the G*Power software[J]. Journal of Educational Evaluation for Health Professions, 2021,18:17.
- [10] ISO9886. Ergonomics-Evaluation of thermal strain by physiological measurements[S]. Geneva: Second International Standard Organisation, 2004.
- [11] 王建宇,万晓燕,吴剑.高速铁路隧道内瞬变气压和乘车舒适度准则[J].现代隧道技术,2008,(2):1-5,10.
- [12] WHO. Health factors involved in working under conditions of heat stress: report of a WHO scientific group [Z]. Geneva; World Health Organization, 1969.
- [13] 孙志涛.高海拔隧道施工氧含量安全控制标准研究[J].西部交通科技,2017,(5):40-45.
- [14] 胡松涛,辛岳芝,刘国丹,等.高原低气压环境对人体热舒适性影响的研究初探[J].暖通空调,2009,39(7):5.
- [15] 孙于萍.基于敏感参数的高温高湿环境人体生理响应研究[D].天津:天津大学,2012.
- [16] Williams W J. Behavioral and Technological Adaptation[M]. HOSOKAWA YURI. Human Health and Physical Activity During Heat Exposure. Cham; Springer International Publishing, 2018:85-99.