

文章编号: 1671-6612 (2024) 01-032-08

急性缺氧暴露 对人体生理反应及认知能力的影响研究

王杰 孙亮亮 胡玥 苏小文

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 在低压环境舱开展高海拔环境中人体急性缺氧暴露实验,研究环境压力和温度对人体生理参数和认知能力的影响规律。实验结果表明,随大气压力的降低,人体平均皮肤温度、口腔温度、舒张压、心率和心率变异性均呈增加,而血氧饱和度和收缩压呈降低趋势。其中,平均皮肤温度、心率和血氧饱和度具有显著性差异 ($p<0.05$)。随温度的增加,只有血氧饱和度降低,其他生理参数均升高。其中,平均皮肤温度、心率具有显著性差异 ($p<0.05$)。感知能力、记忆能力和反应能力随大气压力的降低而降低,思辨能力反而提高。其中,记忆能力受压力影响具有显著性 ($p<0.05$)。感知能力和记忆能力随温度的增加有所提高,思辨能力在不同压力下随温度的变化规律不同,反应能力随温度的降低而提高。其中反应能力受温度影响具有显著性 ($p<0.05$)。该研究为保障平原地区人员急进高海拔地区生命健康安全提供有力支撑。

【关键词】 高海拔地区; 急性缺氧暴露; 生理反应; 认知能力

中图分类号 TU831.3 文献标志码 A

Effects of Acute Hypoxic Exposure on Human Physiological Response and Cognitive Ability

Wang Jie Sun Liangliang Hu Yue Su Xiaowen

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

【Abstract】 An acute hypoxia exposure experiment was conducted in a low-pressure environment chamber to study the effects of atmospheric pressure and ambient temperature on human physiological parameters and cognitive ability. The experimental results showed that as atmospheric pressure decreased, the average human skin temperature, oral temperature, diastolic blood pressure, heart rate, and heart rate variability increased, while oxygen saturation and systolic blood pressure showed a decreasing trend. Among them, the mean skin temperature, heart rate, and oxygen saturation were significantly different ($p<0.05$). With the increase in temperature, only oxygen saturation decreased, while all other physiological parameters increased. Among them, the mean skin temperature and heart rate were significantly different ($p<0.05$). Perception, memory, and reaction abilities decrease with a reduction in atmospheric pressure, while discernment ability increases instead. Among them, memory ability was significantly affected by pressure ($p<0.05$). Perceptual ability and memory improved as the temperature increased. The discernment ability displayed different patterns of change with temperature under various pressures, whereas the reaction ability increased as the temperature decreased. Among them, reaction ability was significantly affected by temperature ($p<0.05$). This study provides strong support for safeguarding the life and health safety of personnel in plain areas who ascend to high altitudes.

【Keywords】 High-altitude areas; Acute Hypoxic Exposure; Physiological Response; Cognitive Ability

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52038009)

作者简介: 王杰 (1997.12-), 男, 在读研究生, E-mail: wangjie1203@my.swjtu.edu.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: 2023-09-11

0 引言

随着青藏铁路的通车和林芝机场的通航, 西藏旅游业呈现出蓬勃发展的趋势。同时, “一带一路”经济带的发展和西部大开发的持续推进, 川藏铁路雅安至林芝段工程进入施工阶段, 进入高原地区旅游人员数量急剧增加。据统计^[1], 拉萨市 2022 年接待国内外游客高达 2024.12 万人次。

当平原地区人员短时间内进入高海拔地区, 急性暴露在轻、中度缺氧环境中, 人的精神活动、行为能力会受到影响。轻、中度缺氧时人的主观感觉可能无明显变化, 但会引起呼吸系统、心血管系统的生理反应, 更严重的可能导致器官功能障碍^[2]。由于高原地区的大气氧分压比平原地区低, 平原地区人员进入高原后血氧饱和度 (SpO_2) 下降^[3,4]。Siques^[5]研究发现随着高原停留时间增加, SpO_2 逐渐升高, 但是始终低于平原水平。李冬冬等^[6]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。

急性暴露缺氧还会影响中枢神经系统, 导致认知功能障碍^[7]。认知障碍是由于大脑缺氧导致脑部代谢功能障碍, 影响神经系统结构的完整性和正常的生理功能。认知障碍会导致人体的感知觉、记忆、注意力、执行能力等认知功能急剧下降, 这将影响到急进高原人员的工作效率^[8]。叶晓江和连之伟等^[9]通过现场实验发现, 稍凉环境更有助于提高认知能力。Gao 等^[10,11]研究发现, 初入高原的军人反应能力的降低主要表现为视听觉注意力降低且反应时间延长。

缺氧对人体生理参数及认知的影响存在累积效应, 并且由于高原习服人体会逐渐适应高原环境, 现场实验不能很好得呈现急进高原人员缺氧暴露时生理反应和认知能力的变化规律。因此, 本研究通过低气压环境舱模拟高原缺氧环境, 探究人体在急性缺氧暴露时的生理反应和认知能力变化, 为保障平原地区赴藏人员生命健康安全提供有力支撑。

1 认知能力测试

1.1 认知方案的选择

认知是一种较为特殊的脑力劳动, 相比于体力劳动, 脑力劳动的评价更加困难。人的所有认知活

动都被认为是对信息的加工处理过程, 人在清醒状态下会不断地接收来自外部环境的刺激信息并对其进行加工处理。

为了探究急性缺氧对人体的认知能力的影响, 寻找合适的研究方法是进行科学研究的重要前提。根据相关学者^[12-15]的研究, 认知能力的评价主要针对受试者的感知觉能力、记忆能力、思维能力和反应能力。目前国内常用的认知功能的计算机软件是 NES-C, 其具有较高的信度及效度, 本实验以上海医科大学神经行为测试系统 NES-C3 为依据, 选择了如下 10 个测试项目, 其对应的能力如表 1 所示。

表 1 认知测试项目

Table 1 Cognitive test items

测试项目	反应的心理品质	参考来源
数字检索	视觉检索能力	吴兴裕, 2002
感知能力	斯特鲁普字色干扰测试	色彩感知能力 刘艳峰, 2021
记忆能力	视选择反应时	视知觉速度 兰丽, 2010
	图形记忆	方位记忆 兰丽, 2010
	记忆扫描	短时记忆能力 吴兴裕, 1999
	符号译码	信息编码能力 刘艳峰, 2021
思辨能力	系列加减	判断运算能力 刘艳峰, 2021
反应能力	空间知觉	空间想象能力 兰丽, 2010
	连续操作	快速反应能力 兰丽, 2010
	注意力调转	视判别反应速度 兰丽, 2010

1.2 认知任务绩效指标

认知能力的评价一般针对反应时间和准确率。准确率表示每个任务的正确率 (AR), 反应时间用速度来表示, 即完成任务所需时间 (T) 的倒数。对于每次测试, 认知能力指标是通过对准准确率和速度进行几何加权得到的, 以反映认知能力的性能指标 (Pi)。根据相关文献^[16], 本文对准准确率和速度赋予相等的权重即均为 0.5。 Pi 计算公式为:

$$Pi = (AR^{0.5} \times (1/T)^{0.5})^2 = AR \times (1/T) \quad (1)$$

本实验从感知能力、记忆能力、思辨能力、反应能力四个方面评判不同环境下的认知能力任务绩效, 由于每项能力间包含不同的测试项目, 因此对各项目的任务绩效进行加权平均处理, 计算公式如式 (2):

$$Pi_m = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Pi_{m,k} \quad (2)$$

式中： Pi_m 为第 m 项认知能力的综合任务绩效， $Pi_{m,k}$ 表示第 m 项认知能力在第 k 个项目下的任务绩效指标， n 为每项认知能力对应的项目数。

2 实验设计

2.1 实验环境及工况

本实验在低气压环境模拟舱内进行，环境舱由两部分构成，分别是舱体本身和控制柜。环境舱控温范围为 $5\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，控制精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ；相对湿度控制范围为 $20\%\sim 95\%\text{RH}$ ，控制精度为 $\pm 3\%$ ，低压环境由真空泵实现，真空度为常压 $\sim 50\text{kPa}$ ，舱外放置有制氧机，可为舱内供氧气。低压环境舱内环境参数控制均可在控制柜面板上进行调控，低压环境舱如图 1 所示。



图 1 低压环境舱

Fig.1 Low-pressure experiment chamber

实验根据拉萨（3650m）和成都（500m）的海拔高度设置大气压力 $P=65.4\text{kPa}$ 和 $P=96.5\text{kPa}$ ，后续分析中称为低压和常压环境。根据国家标准《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》（GB 50736-2012）^[17]，供热工况热舒适等级 I 要求温度

为 $22\sim 24^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\geq 30\%$ ；等级 II 要求温度为 $18\sim 22^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度不做要求。因此实验设置 21°C 和 24°C 两个温度工况。考虑拉萨当地较为干燥，在满足舒适前提下尽量处于较干燥环境，因此相对湿度设置为 40% 。具体实验工况如表 2 所示。

表 2 实验设计工况

Table 2 Experimental design conditions

大气压力/kPa	温度/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/%
96.5	21	40
	24	
65.4	21	
	24	

2.2 受试者

本实验选择健康男性志愿者 6 名，平均年龄 23.4 ± 1.56 岁，平均身高 $172.2\pm 5.78\text{cm}$ ，平均体重 $62.8\pm 5.22\text{kg}$ 。既往无神经精神病史及其他慢性病史，无烟酒嗜好，近期无高原热湿环境暴露经历。实验过程中受试者统一服装，穿着毛衣、穿秋衣、秋裤、运动外套、薄棉袜、休闲鞋，服装热阻为 0.9clo 。

2.3 实验测量指标

实验过程中，记录舱内的环境参数和人体生理参数。环境参数包括空气温度、相对湿度、黑湿球温度、大气压力、氧气体积分数。人体生理参数包括血压、血氧饱和度、平均皮肤温度、口腔温度、心率和心率变异性。生理参数测量仪器及测量精度如表 3 所示。血氧饱和度、平均皮肤温度和心率为连续测量，其他生理参数根据实验过程间断测量，所有参数均取受试者在实验环境下稳定 30min 后的数据。

表 3 生理指标测量仪器

Table 3 Physiological indexes and their measuring instruments

测量指标	仪器名称	型号	测量范围	测量精度
口腔温度	体温探头	T2252-AG	$25\sim 45^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
平均皮肤温度	iButton 温度传感器	DS1923	$-20\sim 85^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
心率/心率变异性	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	$0\sim 299\text{ mmHg}$	$\pm 3\text{mmHg}$

平均皮肤温度采用 ISO9886 推荐的 8 点法测量^[18]，计算公式如式（3）：

$$T_{sk} = 0.07T_A + 0.175T_B + 0.175T_C + 0.07T_D + 0.07T_E + 0.05T_F + 0.19T_G + 0.2T_H \quad (3)$$

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。

2.4 实验流程

实验要求受试者提前半小时到达实验室, 更换统一服装, 佩戴测量仪器, 在准备室内休息 30min, 稳定各项生理参数, 以消除外界环境带来影响。受试者进入低压环境舱在常压环境下静坐适应 40min, 期间

每隔 10min 填写一次问卷和测量生理参数, 之后受试者开始认知测试任务。完成测试后改变压力工况。降压时, 参照列车压力波动人体舒适度标准^[9], 降压速率小于 200Pa/s。压力达到实验工况后, 重复常压实验流程, 实验阶段持续 130min。实验为避免不同实验工况之间的相互影响, 受试者连续参加 2 个实验工况之间间隔至少 3 天。实验前一天, 受试者被告知禁止吸烟和食用咖啡等刺激神经和心血管系统的饮品。实验具体流程如图 2 所示。

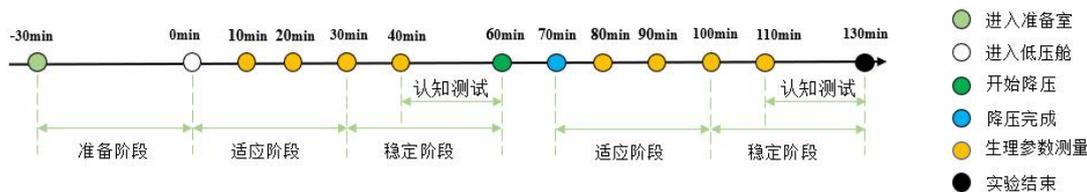


图 2 实验流程

Fig.2 Experimental process

2.5 数据分析

本研究使用 SPSS26.0 进行统计结果分析。采用重复测量方差分析检验不同工况下的认知能力和生理参数是否存在显著差异。本研究中, 显著性水平 $\alpha=0.05$, 即当 $p<0.05$ 时, 认为不同工况间的存在显著差异。

3 实验结果

3.1 实测环境参数

根据实验设计工况, 通过调节实验设备, 严格控制低压环境舱内的环境参数, 以满足设定的实验工况。各实验工况下的实际环境参数如表 4 所示, 所有实验工况风速均不超过 0.2m/s。

表 4 各工况实测环境参数

Table 4 Measured environmental parameters of 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/%
21°C/96.5kPa	21.0±0.2	42.3±1.7	96.5±0.9	20.7±0.2	20.88±0.09
21°C/64.5kPa	20.9±0.2	40.5±1.8	65.4±1.5	21.2±0.1	20.78±0.12
24°C/96.5kPa	24.2±0.1	43.2±1.3	96.5±1.2	24.1±0.2	20.91±0.08
24°C/64.5kPa	23.9±0.2	40.8±1.7	65.4±1.3	24.2±0.1	20.82±0.13

3.2 不同环境对生理参数的影响

3.2.1 平均皮肤温度

图 3 为不同环境下平均皮肤温度的变化情况。在相同压力条件下, 平均皮肤温度随着温度增加而上升, 其差异具有统计学意义 ($p<0.05$)。在相同温度条件下, 平均皮肤温度随着压力的降低而升高, 其差异具有统计学意义 ($p<0.05$)。低压下平均皮肤温度的升高可能是低压环境下人体代谢率增加^[20], 产热量较大, 虽然低压环境人体蒸发换热增强^[21], 但产热量大于散热量。因此, 低压下的平均皮肤温度比常压时高。

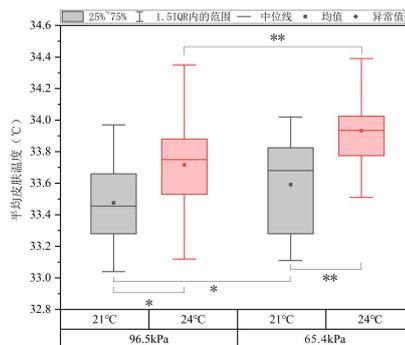


图 3 不同环境下的平均皮肤温度

Fig.3 Average skin temperature under different environments

注: *表示 $p<0.05$, **表示 $p<0.001$

3.2.2 口腔温度

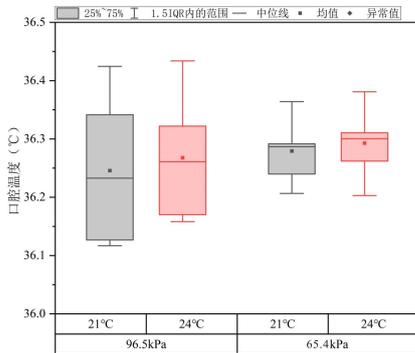


图 4 不同环境下的口腔温度

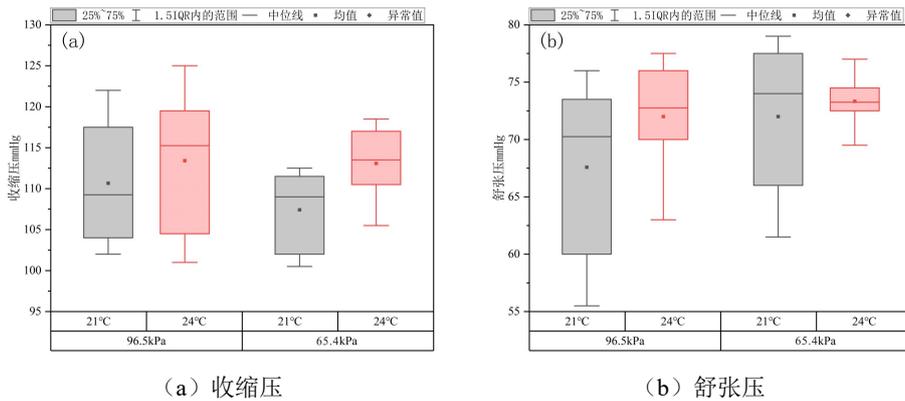
Fig.4 Oral temperature under different environments

核心温度被认为是核心组织的温度(如: 大脑、心脏等)的温度, 通过体温调节, 这些核心组织的温度可以保持在一个狭窄的范围内。常用的核心温度测点包括: 食道、胃肠道、直肠、鼓膜、口腔。

本实验选择口腔温度作为人体核心温度, 如图 4 所示, 口腔温度随温度的增加略微增加, 随着压力的降低略微增加, 但各工况下受试者的口腔温度差异不具有统计学意义 ($p>0.05$), 基本维持在 36.1~36.4°C 之间。核心温度的上升或下降, 均会对人体的健康、舒适度和行为表现产生影响^[22], 该实验中口腔温度变化不大, 说明各工况均处于人体能够接受, 可以调节的范围内。

3.2.3 血压

图 5 展示了不同环境下人体的血压变化情况。受到温度和大气压力的影响, 人体的血压会发生变化。随着压力的降低, 收缩压降低, 舒张压升高, 这与现有的研究结论^[23,24]是一致的。收缩压和舒张压均随着温度的增加呈上升趋势, 但温度和大气压力对受试者血压的影响差异均不具有统计学意义 ($p>0.05$)。



(a) 收缩压

(b) 舒张压

图 5 不同环境下的人体血压

Fig.5 Human blood pressure under different environments

3.2.4 血氧饱和度

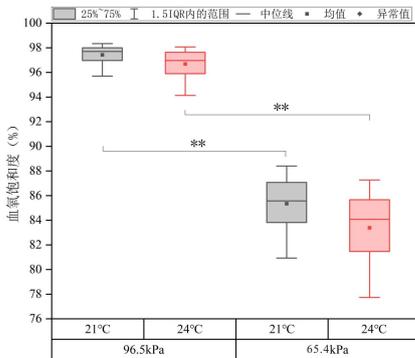


图 6 不同环境下的血氧饱和度

Fig.6 Blood oxygen saturation under different environments

注: *表示 $p<0.05$, **表示 $p<0.001$

图 6 显示了不同环境下血氧饱和度的变化情况。在常压环境下, 血氧饱和度主要集中在 97% 左右, 随温度的增加略有降低。在低压环境下, 由于人体处于缺氧状态, 血氧饱和度降低至大气压力 65.4kPa 所对应的范围, 主要集中在 86% 左右, 与常压环境的差异具有统计学意义 ($p<0.05$)。随温度的上升进一步加剧了血氧饱和度的降低, 血氧饱和度降至 82% 左右。下降的原因可能是温度的增加, 导致人体心输出量增加, 更多的血液用于皮肤散热, 而用于进行物质交换的血液量减少^[25]。

3.2.5 心率

图 7 显示了不同环境下人体心率的变化情况。在各温度工况下, 心率随着压力的降低而升高, 其差异具有统计学意义 ($p<0.05$)。主要是因为低压

环境氧气含量减少, 人体缺氧代偿应激导致心率加快。压力一定时, 心率随温度的降低而增加, 可能是由于温度降低, 人体为维持热平衡, 通过皮肤血管收缩等方式调节体温, 以及人体新陈代谢量增加, 因而心率增加。且低压环境下, 温度降低引起的心率变化, 其差异具有统计学意义 ($p<0.05$)。

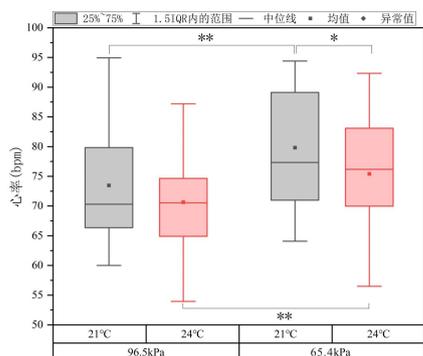


图 7 不同环境下的人体心率

Fig.7 Human heart rate under different environments

注: *表示 $p<0.05$, **表示 $p<0.001$

3.2.6 心率变异性

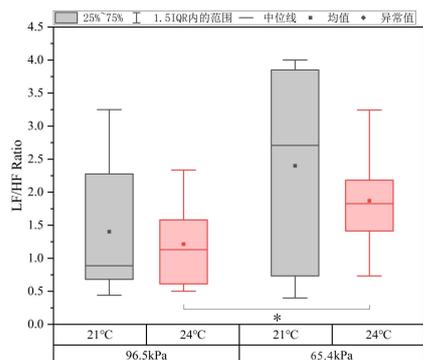


图 8 不同环境下的 LF/HF 值

Fig.8 Values of LF/HF ratio values under different environments

注: *表示 $p<0.05$, **表示 $p<0.001$

心率变异性分析就是分析交感神经和迷走神经的兴奋状况及张力变化。通过频域分析将心率波动信号分解为高频段 (HF)、低频段 (LF) 和超低频段 (VLF)。其中副交感神经 (PNS) 主要影响 HRV 的高频分量, 交感神经 (SNS) 影响 HRV 的低频分量。图 8 为不同环境下的 LF/HF 值。LF/HF 值随温度的降低而升高, 可能是由于温度降低, 人体为适应环境的变化, 出现寒颤、皮肤血管收缩等调节活动, 交感神经兴奋^[26]。LF/HF 值随着压力的降低而增加, 和心率变化具有一致性, 可能是低压

环境下人体缺氧导致交感神经的兴奋。在 24°C 条件下, 不同压力下的心率变异性差异具有统计学意义 ($p<0.05$)。

3.3 环境对认知能力的影响

3.3.1 感知能力

图 9 为评价感知能力项目的任务绩效指标 P_i 变化情况。数字检索项目绩效随温度的增加而增加, 随压力的降低而降低。视选择反应时项目绩效随压力的降低有所降低, 随温度变化没有规律。Stroop 项目绩效随温度降低而降低, 随压力无明显变化。受试者的综合感知能力任务绩效 P_i 随压力的降低而降低, 在 21°C 时, P_i 降低了 1.98%; 24°C 时, P_i 降低了 1.63%。所有压力工况下, 综合感知能力任务绩效 P_i 均随温度的增加而增加, 常压下增加了 4.12%, 低压下增加了 4.5%。综合感知能力随大气压力和环境温度的变化差异无统计学意义 ($p>0.05$)。

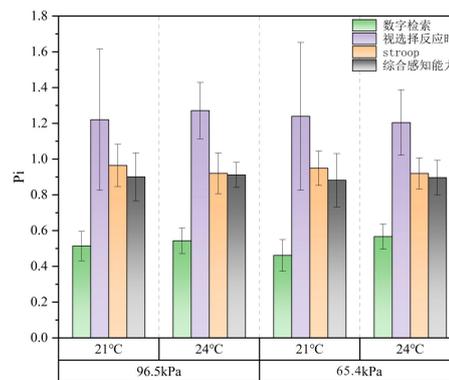


图 9 不同环境下感知能力的任务绩效指标

Fig.9 Task performance indicators of perceptual competence under different environments

3.3.2 记忆能力

图 10 为评价记忆能力项目的任务绩效指标 P_i 变化情况。记忆扫描项目绩效在低压下随温度增加有所提升, 在常压无明显变化。图形记忆项目绩效随温度的增加有略微增加。符号译码项目绩效没有一致的规律。受试者的综合记忆能力任务绩效 P_i 随压力的降低而降低, 其差异有统计学意义 ($p<0.05$)。21°C 时, P_i 降低了 10.45%; 24°C 时, P_i 降低了 9.49%。所有压力工况下, 综合记忆能力任务绩效 P_i 均随温度的增加略微增加, 常压下增加了 0.51%, 低压下增加了 1.65%, 但差异无统计学意义 ($p>0.05$)。

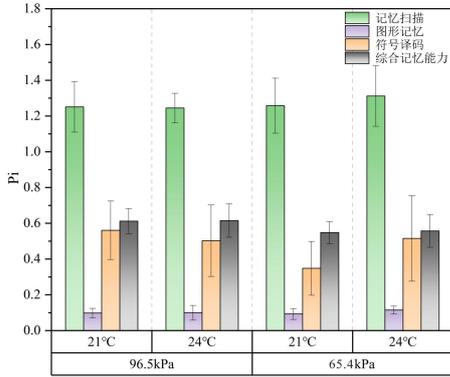


图 10 不同环境下记忆能力的任务绩效指标

Fig.10 Task performance indicators of memory ability under different environments

3.3.3 思辨能力

图 11 为评价思辨能力项目的任务绩效指标 P_i 变化情况。系列加减项目在常压下随温度增加略微降低，在低压下反而增加了。空间知觉项目随温度的升高有所增加，随着压力降低有所降低。不同压力环境下，综合思辨能力综合任务绩效 P_i 随温度的变化趋势不同。常压环境下， P_i 随温度的增加而降低，降低了 1.26%；低压环境下， P_i 随温度的增加而增加，增加了 2.09%。各温度工况下，受试者的综合思辨能力任务绩效 P_i 随着压力的降低而提高，21°C 时，增加了 0.47%；24°C 时，增加了 3.89%。低压环境思辨能力没有降低反而提高，可能是急性暴露在缺氧环境下，人体生理应激反应对氧气的利用率提高了^[27]，大脑的供氧量充足，提升了能力。综合思辨能力随大气压力和环境温度的变化差异无统计学意义 ($p > 0.05$)。

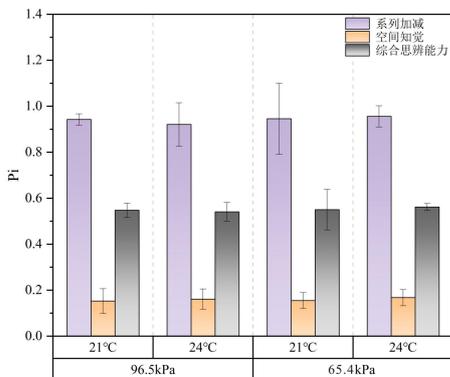


图 11 不同环境下思辨能力的任务绩效指标

Fig.11 Task performance indicators of critical thinking ability under different environments

3.3.4 反应能力

图 12 为评价反应能力项目的任务绩效指标 P_i 变化情况。注意力调转项目绩效随温度的增加而降低，随压力变化没有规律。连续操作项目绩效随温度的增加而降低，随着压力的降低而降低。不同温度条件下，综合反应能力任务绩效 P_i 随着压力的变化趋势不同。21°C 时， P_i 随压力的降低而增加，增加了 0.56%；24°C 时， P_i 随压力的降低而降低，降低了 3.23%，但差异无统计学意义 ($p > 0.05$)。综合反应能力任务绩效 P_i 随温度的增加而降低，常压下降了 6.11%，低压降低了 9.64%，其差异有统计学意义 ($p < 0.05$)，说明偏冷的环境有利于提高人体注意力，提升反应能力。

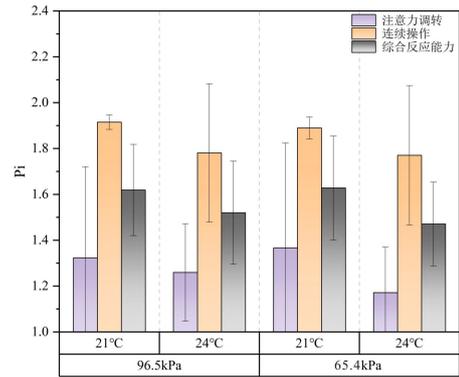


图 12 不同环境下反应能力的任务绩效指标

Fig.12 Task performance indicators of responsiveness under different environments

4 结论

本文对急性缺氧暴露下人体生理反应及认知能力的影响进行实验研究，测量了受试者的各项生理参数以及认知能力绩效，得到了生理参数和认知能力在不同环境下的变化规律，主要结论如下：

(1) 随大气压力的降低，平均皮肤温度、口腔温度、舒张压、心率和心率变异性均是增加的，血氧饱和度和收缩压是降低的。其中，平均皮肤温度、心率和血氧饱和度受压力影响显著。随温度的增加，只有血氧饱和度降低，其他生理参数均升高。其中，平均皮肤温度、心率受温度影响显著。

(2) 感知能力、记忆能力和反应能力随大气压力的降低而降低，思辨能力反而增加，仅有记忆能力受压力的影响显著。感知能力和记忆能力随温度的增加有所提高，思辨能力在不同压力下随温度

的变化规律不同,而反应能力随温度的降低而提高,仅有反应能力受温度影响显著。

参考文献:

- [1] 拉萨市统计局,国家统计局拉萨调查队.拉萨市2022年国民经济和社会发展统计公报[N].拉萨日报,2023-04-24(005).
- [2] 李永达.高原医学与生理学[M].天津:天津科技翻译出版公司,1995.
- [3] Modesti P A, Rapi S, Paniccia R, et al. Index measured at an intermediate altitude to predict impending acute mountain sickness[J]. *Medicine & science in Sports & Exercise*, 2016,43(10):1811.
- [4] 唐红英,张民,汪涛,等.新兵乘火车入藏途中血氧饱和度及急性高原病发生情况的动态研究[J].第三军医大学学报,2011,33(8):863-865.
- [5] Siques P, Brito J, Banegas J R, et al. Blood pressure responses in young adults first exposed to high altitude for 12 months at 3550 m[J]. *High Altitude Medicine & Biology*, 2009,10(4):329-335.
- [6] 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.
- [7] 程宏伟,马瑞山.急性缺氧状态脑功能评定方法[J].航空军医,1999,(2):85-88.
- [8] Pun M, Hartmann S E, Furian M, et al. Effect of acute, subacute, and repeated exposure to high altitude (5050 m) on psychomotor vigilance[J]. *Frontiers in physiology*, 2018,9:677.
- [9] 叶晓江,连之伟,李慈珍,等.室内热环境、热舒适与工作效率关系的研究[J].人类工效学,2006,12(3):4-6.
- [10] Gao Y X, Li P, Jiang C H, et al. Psychological and cognitive impairment of long-term migrators to high altitudes and the relationship to physiological and biochemical changes[J]. *European Journal of Neurology*, 2015:1363-1369.
- [11] Zhang G, Zhou S M, Yuan C, et al. The Effects of Short-Term and Long-Term Exposure to a High Altitude Hypoxic Environment on Neurobehavioral Function[J]. *High altitude medicine & biology*, 2013,14(4):338-341.
- [12] 吴兴裕,李学义,王家同,等.《基本认知能力要素测试系统》的编制与信度、效度分析[J].第四军医大学学报,1999,(9):835-837.
- [13] Lan L, Wargocki P, Lian Z. Thermal effects on human performance in office environment measured by integrating task speed and accuracy[J]. *Applied Ergonomics*, 2014,45(3):490-495.
- [14] Liu Y, Huang L, Song C, et al. Effect of hypoxia on human cognitive ability and indoor oxygen environment demand for sojourners at high altitude[J]. *Building and Environment*, 2021,194:107678.
- [15] 吴兴裕,李学义,王家同等.模拟高原低氧对人的认知能力影响的研究[J].中国应用生理学杂志,2002,(1):35-38.
- [16] Lan W Pawel, ZW Lian. Quantitative measurement of productivity loss due to thermal discomfort[J]. *Energy Build*, 2011,43:1057-1062.
- [17] 徐伟,邹瑜,徐宏庆,等.民用建筑供暖通风与空气调节设计规范,GB 50736-2012[J].建设科技(建设部),2015,10.
- [18] ISO9886. Ergonomics-Evaluation of thermal strain by physiological measurements[S]. Geneva: Second International Standard Organisation, 2004.
- [19] 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.
- [20] Cui W, Wang H, Wu T, et al. The influence of a low air pressure environment on human metabolic rate during short-term (< 2 h) exposures[J]. *Indoor air*, 2017,27(2):282-290.
- [21] 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.
- [22] Parsons K. Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance [M]. CRC Press, Inc, 2014.
- [23] 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.
- [24] 刘国丹.无症状高原反应域低气压环境下人体热舒适研究[D].西安:西安建筑科技大学,2008.
- [25] 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.
- [26] 吕国蔚.医学神经生物学[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [27] 崔惟霖.大型客机座舱热舒适的影响因素及评价方法研究[D].北京:清华大学,2017.