

文章编号: 1671-6612 (2024) 05-589-09

# 高温高湿低压低氧环境认知测试项目筛选及 认知表现变化规律研究

徐原均 胡玥 苏小文 孙亮亮

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘要】** 筛选了高温高湿低压低氧环境下认知功能的测试项目,并在温度37℃、相对湿度80%、海拔高度3500m环境下开展认知实验,研究人体运动状态时认知表现的变化规律。通过测试项目难度评价筛选出视觉保留、数字检索、注意力调转、视选择反应时和斯特鲁普等5个认知测试项目;对测试项目的刺激限时、应答限时和刺激量进行调整,调整后的刺激限时评价、综合难度评价和时长接受度评价达到适中或正好可接受,调整后的总测试时长约为710s。认知实验结果显示,心率、口腔温度和血氧饱和度均在安全限值内,口腔温度最高达到38.3℃。受试者的认知测试成绩在实验过程中呈现升高的趋势,表明认知表现由于运动得到改善,但为维持认知测试成绩,受试者需要付出更多的主观努力而导致脑力负荷增大。研究成果可为复杂环境下认知测试项目筛选以及认知表现变化规律研究提供参考。

**【关键词】** 高温高湿低压低氧环境; 认知测试项目; 认知表现; 脑力负荷

中图分类号 R339.5 文献标志码 A

## Screening of Cognitive Test Items in High Temperature, High Humidity, Low Pressure and Low Oxygen Environments and Study on the Changing Rules of Cognitive Performance

Xu Yuanjun Hu Yue Su Xiaowen Sun Liangliang

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

**【Abstract】** In this study, we screened the test items of cognitive function under high temperature, high humidity, low pressure and low oxygen environment, and carried out cognitive experiments under the temperature of 37℃, relative humidity of 80%, and altitude of 3,500m, to study the change rule of cognitive performance in the human movement state. Five cognitive test items, including visual retention, digit retrieval, attention reversal, visual choice reaction time and Stroop, were screened out through the evaluation of test item difficulty; the stimulus limit, response limit and stimulus amount of the test items were adjusted, and the adjusted stimulus limit evaluation, comprehensive difficulty evaluation and duration acceptance evaluation reached moderate or just acceptable, and the adjusted total test duration was about 710 s. The results of the cognitive experiment showed that the heart rate, oral temperature and oxygen saturation were all within the safety limits, and the oral temperature reached a maximum of 38.3℃. The subjects' cognitive test scores tended to increase during the experiment, indicating that the cognitive performance was improved by exercise, but to maintain the cognitive test scores, the subjects needed to put in more subjective efforts resulting in an increased brain load. The research results of this paper can provide a reference for the screening of cognitive test items and the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52038009)

作者简介: 徐原均 (1997.10-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 1573183100@qq.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: 2024-05-08

study of the change rule of cognitive performance in complex environments.

【Keywords】 Low pressure and low oxygen environment; Cognitive test item screening; Cognitive performance; Mental load

### 0 引言

在高原隧道内，因热泉、地热及高岩温的影响而形成了高温高湿低压低氧的环境<sup>[1]</sup>。研究发现，人体长时间暴露在高温高湿或低压低氧环境下，认知功能就会受到影响<sup>[2-4]</sup>。一些研究结果显示高温环境会对认知功能造成损伤。Mazloumi A 等<sup>[5]</sup>在研究热应激对高温行业工人认知功能的影响发现，长时间的热暴露会导致感知觉、注意力受损。Chen 等<sup>[6]</sup>通过实验研究发现，中度劳动强度下，温度升高会导致认知的准确性降低。张景钢等<sup>[7]</sup>发现当人体暴露在热湿环境下，注意力和反应力随温湿度升高而下降，动觉方位辨别能力随温湿度升高呈现先升高后降低的趋势。但也有一些结果显示在高温高湿环境下运动可以改善认知功能。David 等<sup>[8]</sup>通过研究 16 名受试者在温度 35℃、相对湿度 60% 的环境下运动前后的反应时间和感知觉发现，运动后受试者的反应时间缩短，但是对周围环境的感知觉下降。Mcmorris 等<sup>[9]</sup>研究发现，在高温环境下，人体应激水平更加强烈，大脑产内儿茶酚胺浓度升高，体内产生更多的去甲肾上腺激素和多巴胺等，导致人体的肌肉器官活动更加活跃，进而缩短反应时间。

在高原环境下，由于缺氧对人的大脑的影响，会造成认知功能的下降。Dykiert 等<sup>[11]</sup>通过实验发现在海拔 4000m 以上反应力会受到损伤。彭丽<sup>[2]</sup>对高海拔地区汽车兵进行声音选择反应时间、注意力分配和记忆力测试，结果表明，认知功能随海拔升高受损越严重。Andrew 等<sup>[12]</sup>在环境舱内模拟 1524m、2438m 和 3658m 海拔进行认知测试，通过与常压海拔认知测试成绩对比发现，在 1524m 和 2438m 处的认知测试成绩较常压海拔成绩下降的幅度较小，在 3658m 处的认知成绩较常压海拔成绩出现显著下降。

目前，国内外针对高温高湿和低压低氧环境对认知功能的影响较多，但不同学者研究受环境影响的认知功能并不完全一致，使用的认知测试项目也不同。然而，尚未有学者研究高温高湿低压低氧耦合环境下认知功能的变化规律。因此，本文基于已

有的研究，筛选出受高温高湿低压低氧环境影响的认知功能和测试项目，然后通过调整认知测试项目参数来调整测试项目难度和时长，最后开展实验来探究高温高湿低压低氧环境下认知功能的变化规律。本研究为筛选高温高湿低压低氧环境认知测试项目及研究此环境下认知功能变化规律提供借鉴。

### 1 认知项目筛选及项目参数调整测试

#### 1.1 认知项目筛选

为准确测量高温高湿低压低氧环境对作业人员认知功能的影响，需要选择受环境影响较大的认知功能。基于前人研究，选择受环境影响较大的四项认知功能，分别为记忆力、感知觉、注意力和反应时，具体对应的认知功能如表 1 所示。

表 1 认知功能分类

Table 1 Classification of cognitive functions

认知功能分类	具体认知功能	参考来源
记忆力	瞬时记忆能力	C. Cian <sup>[13]</sup> , 2001
	瞬时记忆能力	Lindseth <sup>[14]</sup> , 2013
	瞬时记忆能力	Lindseth, 2013
	短时记忆能力	Lan L <sup>[15]</sup> , 2009
	短时记忆能力	Edward T <sup>[16]</sup> , 2021
感知觉	视觉检索能力	Wesley K <sup>[17]</sup> , 2016
	空间知觉能力	C. Cian, 2001
	色彩感知能力	Doohan <sup>[18]</sup> , 2022
注意力	持续注意能力	C. Cian, 2001
	持续注意能力	Weilin Cui <sup>[19]</sup> , 2013
反应力	视快速反应能力	Simmons S E <sup>[20]</sup> , 2008
	视快速反应能力	Dominika <sup>[21]</sup> , 2010
	视判别反应能力	Wesley K, 2016

目前国内常用测试认知功能的软件是 NES-C3，其系统具有操作简便和使用灵活的特点<sup>[22]</sup>，常被用于测量高温高湿环境对认知功能的影响<sup>[3,23,24]</sup>。且经过多年发展和不断优化，NES-C3 系统逐渐完善。因此，本实验选择 NES-C3 作为测试软件，其对应认知功能的测试项目如表 2 所示。

表 2 NES-C3 对应认知测试项目

Table 2 Cognitive test items corresponding to the

NES-C3

对应的认知功能	对应认知测试项目
瞬时记忆能力	视觉保留
	记忆扫描
	连续识别记忆
短时记忆能力	符号译码
	听数据广度
视觉检索能力	数字检索
空间知觉能力	形状知觉
色彩感知能力	斯特鲁普
持续注意能力	注意力调转
	视注意广度
视快速反应能力	视简单反应时
	视复杂反应时
视判别反应能力	视选择反应时

由于内容难度较大或较小的项目,受环境影响较小,不能准确反映环境对认知功能的影响程度及认知功能的变化规律。因此,选取 4 名受试者在办公室舒适环境下开展测试,对内容难度进行评价,评价采用问卷形式,如图 1 所示。



图 1 难度评价问卷

Fig.1 Difficulty evaluation questionnaire

内容难度评价得分如表 3 所示。根据评价得分,剔除了难度评价得分较大或较小的项目,保留了难度评价得分在 2-适中附近的测试项目,分别为视觉保留、数字检索、斯特鲁普、注意力调转、视选择反应时。5 个测试项目的内容如表 4 所示。

表 3 内容难度评价得分

Table 3 Content difficulty evaluation scores

认知功能分类	认知测试项目	评价得分
记忆力	视觉保留	1.8
	记忆扫描	1.0
注意力	连续识别记忆	3.8
	符号译码	3.3
	听数据广度	3.5

续表 3 内容难度评价得分

Table 3 Content difficulty evaluation scores

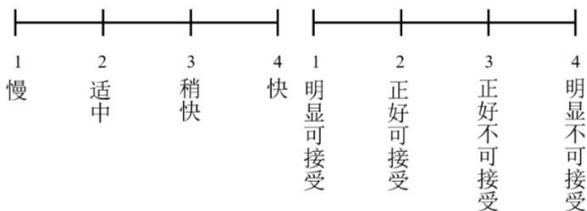
认知功能分类	认知测试项目	评价得分
感知觉	数字检索	2.0
	形状知觉	2.3
	斯特鲁普	2.0
注意力	注意力调转	2.0
	视注意广度	2.8
反应时	视简单反应时	1.0
	视复杂反应时	1.0
	视选择反应时	1.8

表 4 认知测试项目

Table 4 Cognitive test items

测试项目	测试项目内容
视觉保留	从 4 幅图片中选择之前出现的图片,刺激限时 5s, 应答限时 8s, 刺激量 10 组
数字检索	在下排 20 个数字中判断是否含有特定的 2 个数字,作答后自动跳转,刺激量 15 组
斯特鲁普	判断字色和字义,刺激限时应答限时无法更改,刺激量 2×20 组
注意力调转	判断十字出现和箭头指向的方向,刺激限时 3s,需在刺激呈现期间作答,刺激量 3×20 组
视选择反应时	点击上下左右出现与屏幕中间笑脸相同的笑脸,刺激限时 3s, 应答限时 2s, 刺激量 3×12 组

1.2 认知项目参数调整



(a) 认知测试刺激限时评价 (b) 认知测试时长接受度评价

图 2 刺激限时及时长接受度评价问卷

Fig.2 Stimulus time-limited evaluation questionnaire and duration acceptability evaluation questionnaire

因为测试项目系统默认参数是基于实验后台数据得出,不能很好满足本次实验环境测试需要。所以,就需要对保留的 5 个项目进行测试项目的刺激限时、应答限时与刺激量的调整。选择与 1.1 节相同的 4 名受试者,在办公室舒适环境下开展测试。通过调整 5 个测试项目的刺激限时、应答限时与刺激量,让受试者评价项目调整前后的刺激限

时、综合难度和时长接受度。刺激限时评价问卷如图 2 (a) 所示, 综合难度评价问卷, 如图 1 所示。时长接受度评价问卷, 如图 2 (b) 所示。在测试前让受试者进行多次练习, 保证达到测试的平台期, 即测试成绩不会因为练习而提高。

评价得分如表 5 所示。评价得分结果显示, 视觉保留的刺激限时和应答限时缩短、刺激量增加 10 组后, 刺激限时评价得分趋于 2-适中, 综合难度评价得分趋于 2-适中, 时长接受度评价得分趋于 1-明显可接受。数字检索增加 15 个刺激量后, 综合难度评价得分为 2-适中, 没有变化, 时长接受度评价得分趋于 2-正好可接受。注意力调转的刺激限

时缩短, 刺激限时评价得分趋于 2-适中, 综合难度评价得分为 2-适中, 时长接受度评价得分趋于 2-正好可接受。视选择反应时刺激间隔时间缩短 1s, 增加 18 个刺激量, 刺激限时和综合难度评价得分无变化, 时长接受度评价得分趋于 2-正好可接受。斯特鲁普测试前时长接受度评价得分为 2-正好可接受, 所以未更改刺激量, 因此各项评价得分无变化。因此, 选择调整后的项目参数作为实验时的项目参数。未改变测试项目参数前的整体测试时长约为 660s (11 分钟), 更改后整体测试时长约为 710s (11 分钟 50s)。

表 5 参数设置及评价得分

Table 5 Parameter settings and evaluation scores

	视觉保留 (前)	视觉保留 (后)	数字检索 (前)	数字检索 (后)	注意力调转 (前)	注意力调转 (后)	视选择反应时 (前)	视选择反应时 (后)	斯特鲁普 (前)	斯特鲁普 (后)
刺激限时/刺激间隔 (s)	5	3	—	—	3	2	3	2	3	3
设置 应答限时 (s)	8	3	—	—			1.2	1.2		
刺激量 (组)	10	20	15	30	3×20	3×20	3×12	3×18	2×20	2×20
评价 刺激限时评价	1.3	2.0	—	—	1.3	1.5	2.0	2.0	1.8	1.8
综合难度评价	1.3	2.0	2.0	2.0	1.5	2.0	1.8	1.8	2.0	2.0
得分 时长接受度评价	2.2	1.5	1.6	1.75	2.4	2.2	2.2	2	2	2

## 2 实验设计

### 2.1 实验环境与工况

认知实验在低压环境舱内进行, 环境舱能营造温度范围 5~50℃、相对湿度范围 20%~95%和大气压力范围 50kPa~常压的环境, 环境参数能通过控制面板进行调控。舱内配跑步机来模拟劳动。环境舱如图 3 所示。



图 3 低压环境舱外观图

Fig.3 Hypobaric chamber exterior image

根据 Hu 等人<sup>[1]</sup>的研究, 本次实验设定温度为

37℃, 相对湿度为 80%, 海拔高度为 3500m ( $P=65.7kPa$ )。在实验过程中, 保证舱内空气流速小于 0.1m/s。根据吴秋军等<sup>[25]</sup>的研究, 发现隧道内大部分施工工序在海平面主要以中度劳动强度为主。因此, 本实验选择了中度劳动强度。根据《热环境人类工效学-代谢率的测定》(GB/T 18048-2008)<sup>[26]</sup>中的规定, 在海平面中度劳动强度对应的行走速度为 4km/h。但根据谢文强<sup>[27]</sup>的研究, 在 3500m 海拔环境下, 此速度对应的劳动强度可能会对应中度及以上劳动强度。

### 2.2 实验样本

本次实验选择身体素质良好的 10 名男性受试者, 筛选标准为 3km 耗时小于 15min、心电图和 BMI 及基础生理参数正常、无任何疾病史的受试者。受试者平均年龄为 23.6±1.24 岁, 平均身高为 172±4.47cm, 体重为 63.3±4.27kg, BMI 为 21.4±1.36。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, 每次实验安排在一天中上午的相同时段进行。所有受试者均签署了知情同意书。本研究经伦理委员会批准(批准号 SWJTU-23011-SCS(126))。

2.3 实验参数测量

本次实验测量四部分内容, 分别为: 生理参数、环境参数、认知功能和脑力负荷。其中生理参数包括口腔温度、心率和血氧饱和度。环境参数包括黑湿球温度、空气温度、相对湿度、大气压力、二氧化碳浓度、氧气体积分数及风速。测量设备见表 6。

表 6 生理参数及环境参数测量仪器

Table 6 Physiological and environmental parameter measurement instruments

测量参数	仪器型号	测量范围	精度
口腔温度	尤迈重复性体温探头 140010009	25~45℃	±0.1℃
心率	Polar H10	30~240bpm	±1bpm
血氧饱和度	NONIN 2500 PalmSAT	0~100%	±2%
黑湿球温度	WBGT 指数仪 JTR10	5~120℃	±0.5℃
温度、相对湿度、气压	Testo 176P1	温度: 20~70℃	温度: ±0.2℃
		相对湿度: 0~100%RH	相对湿度: ±3%RH
		压力: 600hPa~1100 hpa	压力: ±3hPa
二氧化碳	Vaisala GMP252	0~20000ppm	±40ppm
氧气	Testo 340	0~25%vol	±0.2%vol
风速	Testo 405i	0~30m/s	±0.1m/s(0~2m/s)
			±0.3m/s(2~15m/s)

认知功能的测试成绩从两个角度评价, 一是准确率 (Accuracy rate), 二是反应时间 (Time)。针对每项测试, 采用对准确率和反应时间的加权的综合指标来评价受试者的认知功能绩效指标 (Performance Index, PI)。对准确率和耗时赋以相同的权重<sup>[4]</sup>, 均为 0.5, 如式 (1) 所示:

$$PI = \frac{Accuracy^{0.5}}{Mean Reaction Time^{0.5}} \quad (1)$$

在评价每组认知测试表现优劣时, 由于各项测试内容不同导致反应时间和准确率不同, 所以在衡量每组测试的整体表现时, 就不能直接求 5 个项目认知绩效的均值。首先将每个项目的认知绩效进行标准化, 得到每个项目标准化的认知绩效, 认知绩效标准化计算公式如式 (2) 所示<sup>[29]</sup>。然后再求每组测试所有受试者 5 个项目标准化绩效的均值, 计算公式如式 (3) 所示。得到综合认知绩效, 以综合认知绩效衡量每组认知测试表现的优劣。

$$PI_{(i,j)} = \frac{PI_{i,j}}{\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 PI_{i,j}} \quad (2)$$

$$PI_i = \frac{1}{5} (PI_{(i,1)} + \dots + PI_{(i,5)}) \quad (3)$$

其中:  $PI_{i,j}$  为第  $i$  次测试时第  $j$  个项目的绩效;  $PI_{(i,j)}$  为标准化后的认知绩效;  $PI_i$  为第  $i$  次 5 个测试项目标准化绩效的均值。

脑力负荷测量采用 NASA-TLX 问卷, 如表 7 所示。此问卷由美国航天局开发, 用于评价工作时的脑力负荷, 也被用于评价认知测试时的脑力负荷。

表 7 脑力负荷问卷

Table 7 Mental workload questionnaire

评价指标	各指标的定义
任务难度	在本次测试中, 测试的难度如何?
努力程度	在本次测试中, 你作出了多大的努力?
时间压力	在本次测试中, 测试速度让你感到多大的时间压力?
工作能力	在本次测试中, 你对自己能力的评价如何?
工作表现	在本次测试中, 你对自己表现的满意程度如何?

此问卷采用 VAS 视觉模拟评价法, 即每个因素的评价在一条横线上进行, 从左至右, 评价从低到高, 对应评分为 0-100。受试者根据主观感受在横线上标记, 其得分计算公式如式 (4) 所示:

$$p = \frac{s}{S} \times 100 \quad (4)$$

其中： $p$  为得分，采用百分制； $s$  为横线标记处到横线左端点的距离； $S$  为横线长度。

### 2.4 实验流程

受试者提前半个小时达到实验室，更换统一服装，在实验准备房间内休息 30min，期间进行认知测试。在受试者进入低压环境舱后开始降压，参考列车压力波动人体舒适度标准<sup>[28]</sup>，降压速率小于

200Pa/s。降压 15min 后开始运动，每运动 20min，休息 5min。以此重复直到实验结束，实验阶段总时长 120min。实验采用运动—认知同时范式进行，即在运动开始后同时进行运动和认知测试，每次测试时长大约 12min，认知测试结束后填写认知主观问卷，休息时测量受试者的口腔温度，在整个实验过程中持续测量受试者的心率和血氧饱和度。实验过程中，受试者可以在休息阶段补水。若受试者主动要求实验终止，则立即停止运动，待舱内外气压平衡后，退出低压环境舱。实验流程如图 4 所示。

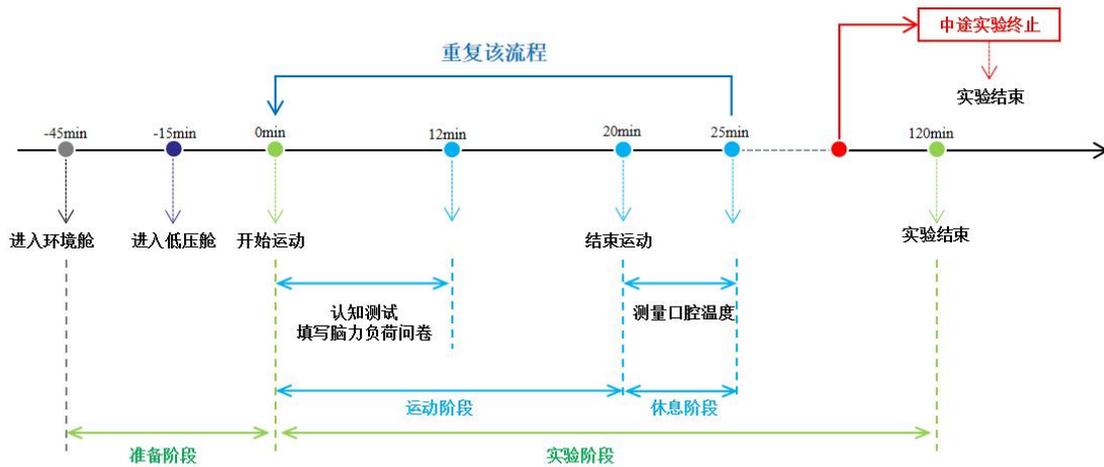


图 4 实验流程

Fig.4 Experimental process

为保障受试者安全，参考世界卫生组织(WHO)<sup>[30]</sup>、ISO 9886-2004<sup>[31]</sup>关于高温环境对人体健康不产生危害的建议值，出现下列情况之一时终止实验：(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。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 实测环境参数

实验工程中，低压环境舱内风速均小于 0.1m/s。各实测参数范围如表 8 所示，相关参数均控制良好。

表 8 实测环境参数

空气温度 (°C)	相对湿度 (%)	大气压力 (kPa)	黑湿球温度 (°C)	氧气体积分数 (%)
37.1±0.1	81.1±1.5	65.6±1.3	36.5±0.1	20.8±0.1

### 3.2 生理参数测量结果

无受试者中途退出实验。口腔温度、心率和血氧饱和度测试结果如表 9 所示。口腔温度和心率随时间一直增加，表示受试者热应激状态逐渐加重，受试者的生理状态已经不能通过自主调整恢复。血氧饱和度在 85%附近波动，表示人体一直处于缺氧状态。所有时间下，口腔温度平均值未超过 39℃，心率平均值未超过 180bpm/min，血氧饱和度平均值未低于 75%。

表 9 生理参数随时间变化情况

时间	0min	20min	45min	70min	95min	120min
口腔温度 (°C)	36.7	37.2	37.6	37.8	38.0	38.3
心率 (bpm)	98	127	137	148	156	162
血氧饱和度 (%)	84	82	83	83	86	86

### 3.3 认知测试结果

认知测试结果如表 10 所示。视觉保留反应时间在五次测试中逐渐缩短, 准确率在五次测试中先升高后降低, 认知绩效在五次测试中先升高后稳定再升高。数字检索反应时间在五次测试中逐渐缩短, 准确率在五次测试中基本不变, 认知绩效在五次测试中先升高后稳定。斯特鲁普的反应时间在五次测试中逐渐缩短, 准确率在五次测试中基本不变, 认知绩效在五次测试中先升高后降低再升高。注意力调转的反应时间在五次测试中呈现波动的趋势, 准确率在五次测试中基本不变, 认知绩效在五次测试中先升高后降低。视选择反应时反应时间在五次测试中先缩短再增加, 准确率在五次测试中

波动上升, 认知绩效在五次测试中一直升高。

通过分析综合认知绩效的变化规律可知, 综合认知绩效值在五次测试中逐渐增大, 这表明认知测试表现逐渐上升, 认知功能得到改善, 高温高湿低压低氧环境并未使认知测试表现降低。由表 8 可知, 本次测试口腔温度最高达到 38.3℃, 相关研究发现当人体口腔温度达到 38.6℃时, 认知表现才会出现下降<sup>[10]</sup>。口腔温度并未达到认知表现出现下降的临界值。并且根据“唤醒假说”<sup>[32]</sup>, 运动是一种刺激源, 可以激活自主神经系统, 提升生理与心理的唤醒水平, 个体在运动期间出现脑部新陈代谢加快, 大脑皮层血流量增加等生理变化, 可以由此优化认知资源的分配, 促进认知加工效率的提升。

表 10 认知测试结果

Table 10 Results of cognitive testing

组次	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	
视觉保留	反应时间 (s)	1.31±0.16	1.25±0.16	1.20±0.12	1.20±0.12	1.17±0.10
	准确率 (%)	0.85±0.14	0.94±0.07	0.88±0.15	0.91±0.06	0.93±0.1
	PI	0.81±0.1	0.87±0.08	0.86±0.1	0.87±0.07	0.89±0.08
	PI <sub>(i,1)</sub>	0.94	0.97	1.00	0.97	0.99
数字检索	反应时间 (s)	1.97±0.52	1.83±0.35	1.81±0.39	1.77±0.4	1.75±0.36
	准确率 (%)	0.95±0.05	0.94±0.06	0.96±0.04	0.94±0.05	0.94±0.06
	PI	0.71±0.08	0.72±0.05	0.74±0.07	0.74±0.07	0.74±0.06
	PI <sub>(i,2)</sub>	1.01	0.99	0.98	0.98	1.00
斯特鲁普	反应时间 (s)	1.20±0.2	1.17±0.18	1.16±0.12	1.15±0.15	1.15±0.16
	准确率 (%)	0.97±0.03	0.98±0.02	0.96±0.05	0.96±0.04	0.97±0.03
	PI	0.91±0.08	0.92±0.07	0.91±0.05	0.92±0.07	0.93±0.06
	PI <sub>(i,3)</sub>	0.99	1.01	1.00	1.01	1.00
注意力调转	反应时间 (s)	0.73±0.25	0.76±0.25	0.73±0.23	0.71±0.22	0.73±0.21
	准确率 (%)	0.97±0.03	0.97±0.04	0.98±0.02	0.97±0.02	0.97±0.04
	PI	1.19±0.19	1.17±0.19	1.2±0.19	1.21±0.19	1.19±0.18
	PI <sub>(i,4)</sub>	1.02	1.01	1.01	1.01	1.00
视选择反应时	反应时间 (s)	0.73±0.08	0.72±0.08	0.72±0.09	0.69±0.09	0.70±0.08
	准确率 (%)	0.78±0.17	0.8±0.22	0.82±0.16	0.8±0.21	0.83±0.17
	PI	1.03±0.16	1.05±0.18	1.07±0.16	1.08±0.21	1.09±0.17
	PI <sub>(i,5)</sub>	1.04	1.02	1.00	1.03	1.01
综合认知绩效	PI <sub>i</sub>	0.97	1.00	1.00	1.01	1.02

### 3.4 脑力负荷问卷结果

图 5 为受试者脑力负荷评价得分, 任务难度、努力程度、时间压力的评价得分在五次测试中逐渐升高, 而工作能力、工作表现的评价得分在五次测试中逐渐降低。这表明脑力负荷在五次测试中逐渐

增大。这可能是因为口腔温度和心率一直增大, 受试者的生理状态逐渐恶化。因此, 为了维持综合认知绩效, 付出更多的主观努力, 会导致脑力负荷增大。

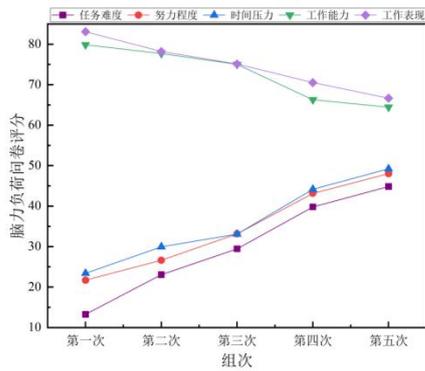


图 5 脑力负荷问卷得分

Fig.5 Mental workload questionnaire scores

#### 4 结论

本文对高温高湿低压低氧环境下认知测试项目进行了评价筛选,并在低压环境舱内利用筛选后项目进行测试,得出以下结论:

(1) 通过文献综述及筛选实验,筛选出了针对记忆力、感知觉、注意力、反应时的 5 个项目,分别为视觉保留、数字检索和斯特鲁普、注意力调转、视选择反应时。然后通过实验找到各测试项目的合适参数。

(2) 实验过程中,心率、口腔温度和血氧饱和度未超过安全限值,口腔温度未达到导致认知表现下降的临界值 38.6℃。除注意力调转测试外,4 个项目的反应时间在五次测试中均逐渐缩短,准确率在五次测试中呈现上下波动的趋势,综合认知绩效值在五次测试中逐渐增大。结果表明认知测试表现持续得到改善。

(3) 任务难度、努力程度、时间压力的评价得分在五次测试中逐渐增加,而工作能力、工作表现的评价得分在五次测试中逐渐降低。结果表明为维持认知表现提高综合认知绩效会导致脑力负荷增大。

#### 参考文献:

[1] 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.  
 [2] 彭丽.高原环境对汽车兵认知功能和作业能力的影响[D].上海:中国人民解放军海军军医大学,2018.  
 [3] 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.

[4] 黄林晟.湿热环境暴露下人体认知表现衰减规律与评价[D].衡阳:南华大学,2022.  
 [5] Mazloumi A, Golbabaei F, Khani S M, et al. Evaluating Effects of Heat Stress on Cognitive Function among Workers in a Hot Industry [J]. Health Promotion Perspectives, 2014,4(2):240.  
 [6] Yuyan C, Meihui T, Weiwei L. High temperature impairs cognitive performance during a moderate intensity activity[J]. Building and Environment, 2020,186: 107372.  
 [7] 张景钢,杨诗涵,索诚宇.高温高湿环境对矿工生理心理影响实验研究[J].中国安全科学学报,2015,25(1):6.  
 [8] Jiménez-Pavón D, Romeo J, Cervantes-Borunda M, et al. Effects of a Running Bout in the Heat on Cognitive Performance[J]. Journal of Exercise Science Fitness, 2011,9(1):58-64.  
 [9] Memorris T, Sproule J, Turner A, et al. Acute, intermediate intensity exercise, and speed and accuracy in working memory tasks: A meta-analytical comparison of effects[J]. Physiology & Behavior, 2011,102(3-4): 421-8.  
 [10] Cyril S, Christophe H, Yann M L, et al. Cognitive Functioning and Heat Strain: Performance Responses and Protective Strategies[J]. Sports medicine (Auckland, N.Z.), 2017,47(7):1289-1302.  
 [11] Dominika D, David H, Nikki v G, et al. The effects of high altitude on choice reaction time mean and intra-individual variability: Results of the Edinburgh Altitude Research Expedition of 2008[J]. Neuropsychology, 2010,24(3):391-401.  
 [12] Andrew A, Pilmanis, Ulf I, et al. Cognition Effects of Low-Grade Hypoxia[J]. Aerospace medicine and human performance, 2016.  
 [13] Cian C, Barraud PA and Melin B, et al. Effects of fluid ingestion on cognitive function after heat stress or exercise-induced dehydration[J]. International Journal of Psychophysiology, 2001.  
 [14] Lindseth Paul D, Lindseth Glenda N, Petros Thomas V, et al. Effects of hydration on cognitive function of pilots[J]. Military medicine, 2013,178(7):792-8.  
 [15] Lan L, Lian Z, Pan L, et al. Neurobehavioral approach

- for evaluation of office workers' productivity: The effects of room temperature[J]. *Building and Environment*, 2008,44(8):1578-1588.
- [16] Ashworth, Edward TomCotter, James DavidKilding, Andrew Edward. Impact of elevated core temperature on cognition in hot environments within a military context[J]. *European journal of applied physiology*, 2021,121(4):1061-1071.
- [17] Lefferts K W, Babcock C M, Tiss J M, et al. Effect of hypoxia on cerebrovascular and cognitive function during moderate intensity exercise[J]. *Physiology Behavior*, 2016,165:108-118.
- [18] Doohan Meg A, Stewart Ian B, Coulter Tristan J, et al. Modified Stroop Task Performance When Wearing Protective Clothing in the Heat: An Evaluation of the Maximum Adaptability Model[J]. *Physiology Behavior*, 2021,113690-113690.
- [19] Cui W, Cao G, Ouyang Q, et al. Influence of dynamic environment with different airflows on human performance[J]. *Building and Environment*, 2013,62:124-132.
- [20] Simmons S E, Saxby B K, Mcglone F P, et al. The effect of passive heating and head cooling on perception, cardiovascular function and cognitive performance in the heat[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2008,104(2):271-280.
- [21] Dominika D, David H, Nikki G V, et al. The effects of high altitude on choice reaction time mean and intra-individual variability: Results of the Edinburgh Altitude Research Expedition of 2008[J]. *Neuropsychology*, 2010,24(3):391-401.
- [22] 王菁,陈炜,杨敏华,等.NES-C\_3在CS\_2接触工人神经行为测试中的应用[J]. *中华劳动卫生职业病杂志*,1999,17(6):4.
- [23] 谢英毫.高温环境下人体年龄对热生理与行为能力的影响[D].苏州:苏州大学,2021.
- [24] 覃丹.舱室复合热环境对持续脑力作业者的影响研究[D].重庆:重庆大学,2021.
- [25] 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):6.
- [26] GB/T 18048-2008,热环境人类工效学代谢率的测定[S].国家质检总局,2008.
- [27] 谢文强.巴朗山高海拔隧道施工期供氧标准及设计方法研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [28] 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.
- [29] 兰丽.室内环境对人员工作效率影响机理与评价研究[D].上海:上海交通大学,2010.
- [30] Turner D. Health Factors Involved in Working under Conditions of Heat Stress[J]. *Occupational & Environmental Medicine*, 1969,26(4):346-346.
- [31] Ergonomics-Evaluation of thermal strain by physiological measurements ( ISO 9886: 2004 ) [S]. 2004.
- [32] 张斌,刘莹.急性有氧运动对认知表现的影响[J].*心理科学进展*,2019,27(6):1058-71.