

文章编号: 1671-6612 (2025) 01-010-09

封闭空间光环境 对人员感知、情绪和认知表现的影响

胡 祯¹ 张亚芹² 卢芳琪¹ 李永财¹

(1. 重庆大学 重庆 400044;

2. 重庆大学建筑规划设计研究总院有限公司 重庆 400030)

【摘要】 地下空间的发展规模呈现上升趋势, 其受限的空间和自然光的缺失是否会对人员的感知、情绪、认知造成偏差, 值得关注。为研究封闭空间的不同光环境对人员感知、情绪和认知表现的影响, 拟定了 9 种不同的光环境工况, 招募了 37 名在校大学生受试者, 使用问卷和测试的方法进行了研究。研究表明, 在封闭空间工作 3 小时不会对健康成年人的主观光环境感知和认知表现造成明显不利的偏差, 但会使人员出现轻微的不良心理反馈, 主要发生在进入封闭空间的前 2 小时内。照度是影响感知评价和认知表现的主要因素, 人对照度的感知能力存在边际效应, 且倾向于认为高色温光源更亮。将照度从 100Lx 提升到 500Lx, 对明亮感、满意度、困倦感和认知表现有明显的改善作用, 进一步提高照度时作用较小。提高色温对满意度、困倦感和认知表现有改善作用, 但在高照度时, 4400K 色温对比 5700K 色温有优势。光环境满意度评价与情绪变化有相关关系, 高色温能显著提高积极情绪, 高照度有利于减少消极情绪。在健康成年人进入封闭空间工作的前若干小时内, 对于环境的评价更值得关注的是积极情绪变化。

【关键词】 封闭空间; 光环境; 感知; 情绪; 认知表现

中图分类号 TU833 文献标志码 A

Influence of Lighting Factors on Human Perception, Emotion, and Cognitive Performance in Simulated Underground Environment

Hu Zhen¹ Zhang Yaqin² Lu Fangqi¹ Li Yongcai¹

(1.Chongqing University, Chongqing, 400044;

2.General Research Institute of Architecture & Planning Design Co., Ltd, Chongqing University, Chongqing, 400030)

【Abstract】 The development of underground space is on the rise, and it is worth paying attention to whether the limited space and the lack of natural light will cause deviations to people's perception, emotion and cognition. To study the effects of lighting factors on people's perception, emotional and cognitive performance in simulated underground space, 9 different lighting conditions were formulated, and 37 college students were recruited to complete the questionnaire and tests. The results indicate that there was no significant deviation in the perception and cognitive performance within 3 hours, but there was slightly poor psychological feedback which mainly occurred within the first 2 hours of entering an underground space. Illuminance is the main factor affecting perception and cognitive performance. There is a marginal effect on the perception of the illuminance and people tend to think that

作者简介: 胡 祯 (2000.07-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 1186989214@qq.com

通讯作者: 李永财 (1982.02-), 男, 博士, 副教授, E-mail: yongcai85@163.com

收稿日期: 2024-07-09

high color temperature light sources are brighter. Increasing the illuminance from 100Lx to 500Lx has significant improvement on sense of brightness, satisfaction, sleepiness and cognitive performance, but the effect is less when the illuminance was further increased. Increasing the color temperature improves satisfaction, sleepiness, and cognitive performance, but at a high illuminance level, the 4400K color temperature light sources have an advantage over the 5700K. There is a correlation between environmental satisfaction and emotional changes. High color temperature light sources can improve positive emotions and increasing illuminance helps to reduce negative emotions. During the first few hours of entering an enclosed space, positive emotion changes are more worthy of attention in the evaluation of the environment

【Keywords】 Enclosed space; Lighting environment; Perception; Emotion; Cognitive performance

0 引言

地下空间开发与市场需求关联愈发紧密,除人防功能以外的其他地下功能开发多样化、综合化、市场化趋势明显。《2023 中国城市地下空间发展蓝皮书》指出,截至 2022 年底,中国城市地下空间累计建筑面积 29.62 亿平方米,人均地下空间 3.80 平方米,总面积和人均面积均呈现上升趋势。地下空间,特别是地下封闭空间,由于缺少自然环境,长时间暴露情况下人员的感知评价会下降。因此,如何提高地下空间人员的舒适性和效率,值得科研人员和社会的关注。

光对人体的作用分为视觉效应和非视觉效应。Berson 等^[1]发现视网膜上存在着第三类感光细胞,能够调节生物节律、瞳孔的大小、褪黑素的分泌。Lan L 等^[2]认为室内环境对人员生理和心理的影响可归结为人员的情感、认知能力和执行功能的变化。现有研究多关注地上办公环境,Fang^[3]和 Lu^[4]等研究了照度、温度和色温对人员主观评价、生理参数及工作绩效的影响,推荐了舒适性参数。针对地下空间环境与人员感知评价的研究较少,目前开展的研究主要涉及地铁^[5]和地下商场^[6]等。Hu 等^[7]研究了地下空间短期和长期停留者的光热环境舒适度。Wu^[8]和 Dong^[9]等利用舱室模拟地下空间研究了色温和温度耦合对环境感知评价的影响。然而以上研究存在两个不足:(1)没有关注地下空间人员的情绪变化,空间与人的交互性体现不足。地下空间的封闭性、隔绝性特点容易导致人的情绪出现变化,从而影响人对环境的感知评价和认知功能。研究表明如潜艇^[10]、密闭坑道^[11]和煤矿救生舱^[12]等特殊受限空间,由于受空间、时间,以及热湿、声光环境等因素影响,人员易产生压抑、烦躁等消极心理^[13],人员主观感知和认知也与常规环境

有差异。Ko 等^[14]的研究表明:相对于无窗建筑,有窗建筑中自然光的引入可使得人员的积极情绪、记忆力和专注能力提升。环境光的照度、色温和波长是影响情绪的重要物理因素,一些研究发现在短时光照暴露中,高照度或高色温能够提高积极情绪,另一些研究却发现高照度或高色温会恶化情绪^[15]。(2)实验工况变化频繁,数据缺少稳定性和可靠性。许多实验在数小时内改变了若干次光环境参数,每次仅有数十分钟的时间让人员适应新的光环境,难以保证人员不会受到上一个工况的影响。实际的地下空间工作环境较为稳定,人员往往需要长时间停留,空间和环境对人体的作用需要时间来体现。因此,在关于地下空间的研究中时间是不可忽略的因素,多次测量也减小了偶然误差,增强了数据的稳定性和可靠性。因此,本研究旨在通过封闭空间的现场测试和问卷调查,分析空间、时间、光环境对人员感知评价、情绪和认知表现的持续性影响,以期对地下封闭空间光环境设计及评价提供基础数据支撑。

1 实验

1.1 实验条件

测试地点位于属于夏热冬暖和第五类光气候区的重庆市,测试时间是 2024 年春季 4 月份,气候凉爽。现场测试在一个 3.4m×5.3m×3m 的普通办公室内进行,房间中央摆放着 2.4m×1.2m×0.75m 的办公桌,可同时坐下 6 人,用挡板隔开。为了模拟地下封闭空间,使用全遮光窗帘实现房间无自然采光。室内温湿度由独立的空调设备调节。照明光源是一个尺寸为 3.7m×1.8m 的嵌入式 LED 平板灯,可通过 App 独立调节色温和亮度。

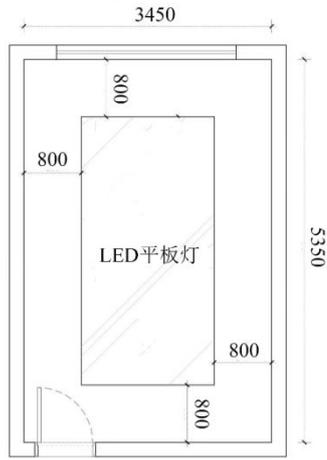


图1 房间和灯具平面图 (单位: mm)

Fig.1 Room and lighting arrangement



图2 现场实验图

Fig.2 Field experiment

利用光谱照度计,参考 GB/T 5700-2008《照明测量方法》中所规定的中心布点法,桌面照度均匀度约 0.97,照明光源显色指数 $Ra=92$,不存在明显眩光,满足 GB 50034-2013《建筑照明设计标准》的相关规定。

1.2 实验人员

实验招募的受试者均为在读研究生,年龄约 22~25 岁,包括 20 名男性和 17 名女性。选择实验对象时主要有以下依据:(1)体质指数 BMI 应在 $18.5\text{--}23.9\text{kg/m}^2$ (根据 2022 版《中国居民膳食指南》推荐)。(2)(矫正)视力正常,无色盲、色弱。(3)近一周内身体无明显不适症状。所有受试者被要求在正式实验开始前一周内提前在自己的电脑上安装测试软件 E-prime2.0,并运行测试程序,熟悉测试流程和内容,每次正式实验前 8 小时不得过度熬夜、饮酒、喝咖啡、喝茶、吸烟、做

剧烈的体育运动,以保证实验时的正常精神状态。

1.3 实验工况

参考 GB 50034-2013《建筑照明设计标准》对于照度和色温的分级和各种场所的标准,选取并实测了 100Lx、500Lx、1000Lx 三种照度,分别代表暖黄光、暖白光、冷白光的 3000K、4400K、5700K 三种色温,以及 60min、115min、170min 的隔绝时间,进行 $3\times 3\times 3$ 的全因子设计,如表 1 所示。为控制温湿度变量,参考 GB 50736-2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》对舒适性空调室内设计参数的规定,结合当地气候条件,使室内温度维持在 $22\text{--}26\text{ }^\circ\text{C}$,湿度 $50\text{--}70\%$ 的热舒适性工况,由温湿度自记录仪每隔 10min 自动记录。用二氧化碳检测仪实测室内二氧化碳水平维持在 $1000\text{--}1800\text{ppm}$ 。

表 1 实验工况参数

Table 1 Parameters of the tested condition

工况	照度/Lx	色温/K	隔绝时间/min
1		3000	
2	100	4400	60; 115; 170
3		5700	
4		3000	
5	500	4400	60; 115; 170
6		5700	
7		3000	
8	1000	4400	60; 115; 170
9		5700	

1.4 实验流程

实验前两天为预实验,目的是使受试者熟悉所有流程,减少因不熟悉实验流程而造成的偶然误差。每天 3 次实验,上午 9 点—12 点,下午 2 点—5 点,晚上 7 点—10 点,每次实验最多 6 人,每个工况进行 2 天实验。考虑到每人参与次数过少会有较大的个体误差,参与次数过多会产生练习效应误差,且在校学生有课程任务,因此每位受试者被要求至少参加 7 个工况实验,最多参加 9 个工况的实验。每位受试者连续参加实验需间隔至少一天,目的是保证每人每个工况最多参加一次实验和减少上一次实验对下一次实验的影响。

正式实验流程如图 3 所示。人员全部进入房间后,先进行 20 分钟暗适应,目的是使受试者平复

心情, 适应地下空间的暗环境, 降低室外曝光的影响。在暗适应结束后, 测试者打开预先设置好的一种工况。在进入房间第 60 分钟时, 进行第一次测试, 人员需填写调查问卷, 如表 2 所示, 然后完成三项认知表现测试任务, 如表 3 所示, 每次测试时长约为 15 分钟。在第 115 分钟, 第 170 分钟时重

复进行第 2 次、第 3 次测试。在非测试时间段, 受试者可以使用手机、平板、电脑进行工作和学习活动, 但禁止进行如刷短视频、看小说、玩游戏、听歌等的娱乐活动, 由研究人员全程监督, 以减少无关变量对心理活动的刺激。非必要情况禁止离开房间或在房间内随意走动。

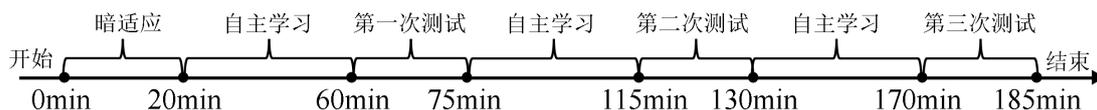


图 3 实验流程图

Fig.3 Experimental flow chart

表 2 问卷项目

Table 2 Questionnaire items

问题	反映尺度
请评估环境明亮度感觉	-3非常暗~+3非常亮
请评估环境光色彩感觉	-3非常冷~+3非常暖
请评估当前的工作或学习意愿	-3非常不愿意~+3非常愿意
请评估对当前光环境的满意度	-3非常不满意~+3非常满意
卡罗林斯卡嗜睡量表 (KSS)	-4极度警醒~+4非常困倦
10种积极情绪自我评估	0几乎没有~4极其多
10种消极情绪自我评估	

表 3 认知表现测试项目

Table 3 Items of the cognitive task tests

认知控制 和执行功能实验范式	描述
Stroop 任务	屏幕中央随机出现不同颜色、不同含义的汉字序列, 要求受试者忽略字的含义, 判断字的颜色, 用于测试受试者的注意力、抗干扰能力
N-Back 任务	屏幕中央随机出现不同的数字序列, 要求被试判断序列中的每个数字, 是否与 n 个项目前出现的刺激相匹配, 本实验 $n=2$, 用于测试受试者的短期记忆力
心算测试	随机呈现两位数的加法, 用于测试受试者的运算思维能力、反应速率

2 数据分析

通常用信度和效度来评估量表的可靠性和有效性。信度主要用于衡量样本回答结果是否可靠, 克隆巴哈 (Cronbach's) 系数是最常用的信度系数, 该系数大于 0.8 表示信度高。效度是指测量工具能够测出其所要测量的正确程度, Kaiser 给出了常用的 KMO 度量标准: 0.9 以上表示非常适合, 0.8 表示适合, 0.7 表示一般。本研究使用 SPSS24 软件计算得总体问卷克隆巴哈系数 0.808, KMO 值

0.858, 具有较好的可靠性和有效性。

2.1 照度、色温、隔绝时间对主观感觉评价的影响

使用 SPSS24 进行单因素方差分析, 结果如表 4 所示。照度对明亮感、工作意愿、光环境满意度、困倦感有显著影响, 色温对明亮感、色彩感、光环境满意度、困倦感有显著性影响。隔绝时间对主观感觉评价的影响没有统计学意义, 表明该封闭空间在 3 小时内没有使人员的主观感觉出现明显差异, 也可能与人员对问卷的填写存在惯性作用有关。

表 4 主观感觉评价的单因素方差分析

Table 4 One-way ANOVA for the subjective perception votes

主观感觉评价	照度			色温			曝光时间		
	自由度	F	P	自由度	F	P	自由度	F	P
明亮感觉	860	235.667	0.000	860	3.783	0.023	860	0.800	0.450
色彩感觉	860	1.362	0.257	860	278.824	0.000	860	0.170	0.843
工作意愿感觉	860	53.354	0.000	860	2.696	0.068	860	0.271	0.762
光环境满意度	860	93.060	0.000	860	6.806	0.001	860	0.005	0.995
困倦感觉	860	26.976	0.000	860	9.428	0.000	860	0.720	0.487

为进一步研究交互效应，以照度、色温为自变量，以明亮感、光环境满意度、困倦感为因变量，进行双因素方差分析，结果如表5所示。照度对明亮感存在主效应，色温不存在主效应，但照度和色

温存在交互效应。照度和色温对光环境满意度存在主效应和交互效应。照度和色温对困倦感有主效应，不存在交互效应。

表 5 主观感觉评价的双因素方差分析

Table 5 Two-way ANOVA for the subjective perception votes

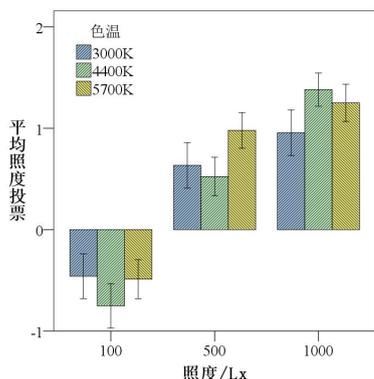
主观感觉	参数	自由度	H*	F	P
明亮感觉	照度	2	297.85	---	0.000
	色温	2	5.766		0.056
	照度：色温	4	63.124		0.000
光环境满意度	照度	2	153.560	---	0.000
	色温	2	10.512		0.005
	照度：色温	4	72.077		0.000
困倦感	照度	2	---	26.976	0.000
	色温	2	---	9.428	0.000
	照度：色温	4	---	1.368	0.487

注：*表示不满足方差齐性条件时的Scheirer Ray Hare检验

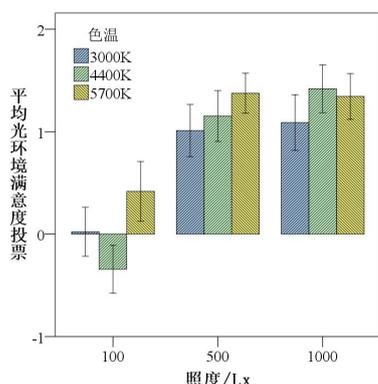
主观感觉评价投票随照度、色温的变化趋势如图4所示。方差分析和图4表明，相比于色温，照度是影响主观感觉评价的主要因素。明亮感投票随照度的增加而提高，但增长率随照度的增加而减少。500Lx的平均照度投票对比100Lx增长了1.29，而1000Lx对比500Lx仅增长了0.50，增量降幅61%，表明人眼对照度的感知存在边际效应。色温对明亮感知存在次要影响，受试者倾向于认为高温光源更亮。5700K的平均照度投票对比3000K和4400K提高了约0.25。党睿等^[16]认为色温对清晰度有着轻微的影响，为了得到较好的清晰度应避免采用太低的色温。Berman^[17]的理论认为色温升高与瞳孔变小有关，因此视力增强，基本感知性能在色温较高时最高。色彩感投票与色温呈线性关系趋势。4400K的平均色彩感投票对比3000K降低了1.00，

5700K的平均色彩感投票对比4400K降低了0.95，表明受试者能准确辨别出3000K、4400K、5700K的光源。与明亮感知相似，光环境满意度和工作意愿随照度的增加而提高，但增长率随照度的增加而减少，Hangzi Wu^[18]的研究也证实了这种变化趋势。500Lx的平均光环境满意度对比100Lx增长了1.18，而1000Lx对比500Lx仅增长了0.11，增量降幅99%，这可能与入眼对照度的感知存在边际效应有关。色温对光环境满意度存在次要影响，提高色温有利于提高主观满意度，5700K平均光环境满意度对比4400K和3000K提高了约0.35，这可能与高温减小了困倦感有关。困倦感有随照度和色温的增大而减小的趋势。500Lx的平均困倦感对比100Lx减小了0.46，1000Lx对比500Lx减小了0.09，减少量降幅80%；色温对困倦感存在次要影响，4400K的平均困

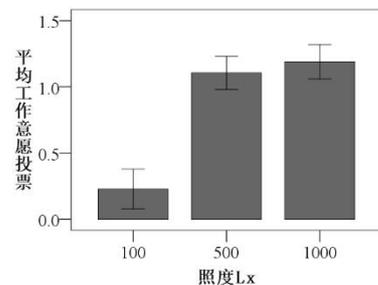
倦感对比3000K减小了0.20, 5700 K对比4400K减小了0.12, 减少量降幅40%。5700K色温下, 1000Lx对比500Lx的困倦感出现了轻微上升, 表明长时间过高的照度和色温刺激可能会使人感到困倦。



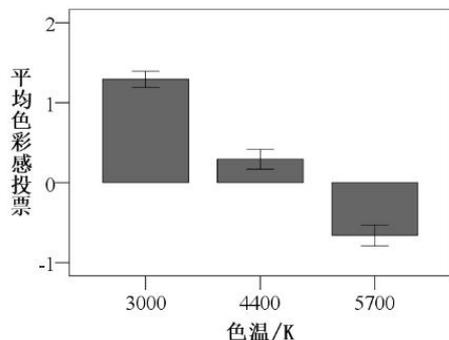
(a) 照度、色温对平均明亮感投票的影响



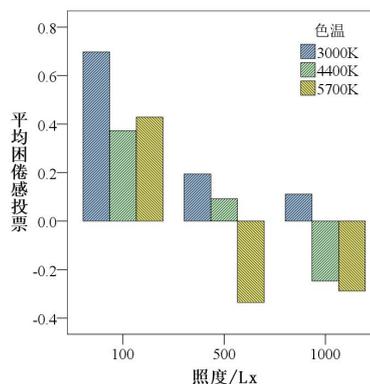
(b) 照度、色温对平均光环境满意度的影响



(c) 照度对平均工作意愿投票的影响



(d) 色温对平均色彩感投票的影响



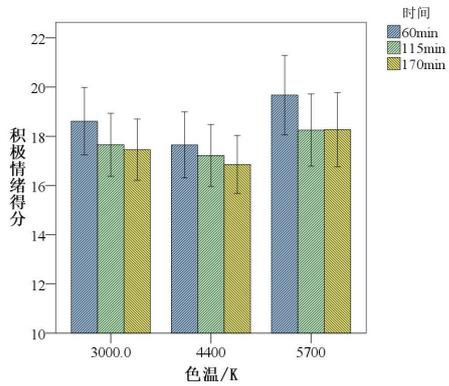
(e) 照度、色温对平均困倦感投票的影响

图4 照度、色温对主观感觉评价投票的影响

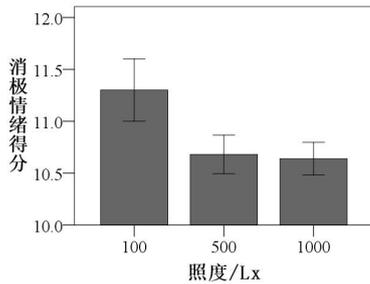
Fig.4 The influence of illuminance and color temperature on subjective perception votes

2.2 照度、色温、隔绝时间对情绪的影响

对积极和消极情绪量表 (PANAS) 进行方差分析。如图 5 所示, 结果表明, 积极情绪对色温和隔绝时间较为敏感, 消极情绪对照度较为敏感。短时间的光照射是否会调节健康成年人的情绪感知, 这在很大程度上仍然是未知的^[19]。本实验观察到冷白光最有利于提高积极情绪, 5700K 平均积极情绪得分对比 3000K 和 4400K 分别提高了 4.2%、8.3%, 这可能是由于高色温刺激提高了唤醒水平, 使受试者感到更兴奋。本实验无法解释 4400K 积极情绪对比 3000K 出现下降的原因, 推测情绪受色温的影响是复杂的, 不仅仅与唤醒水平有关, 低色温也存在某种对情绪有利的因素。隔绝时间对积极情绪存在影响, 115min 的平均积极情绪得分对比 60min 下降了 5.2%, 170min 对比 115min 下降了 0.7%, 表明该封闭空间在 3 小时内使人员的情绪出现了轻微恶化, 这种变化主要发生在前 2 小时内, 在 2 小时后情绪更加稳定, 体现了人员对封闭空间的心理适应过程。在低照度下提高照度有利于降低消极情绪, 这与 Ru 等^[20]的研究结论相似。500Lx 的消极情绪得分对比 100Lx 下降了 5.5%, 而 1000Lx 对比 500Lx 几乎没有变化。这可能是由于低照度时视觉敏锐力变弱, 视觉范围缩小, 对环境的感知偏弱, 容易产生压抑、烦躁、挫败等消极心理, 但照度在超过 500Lx 后上述因素得到了明显改善, 因此对消极情绪没有明显影响。



(a) 色温、时间对平均积极情绪得分的影响



(b) 照度对平均消极情绪得分的影响

图5 照度、色温、隔绝时间对情绪的影响

Fig.5 The influence of illuminance, color temperature and isolation time on mood

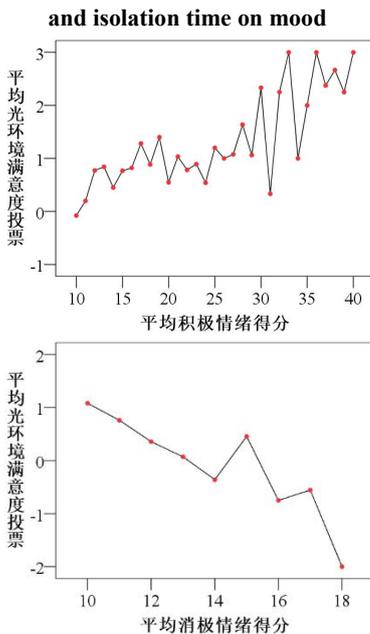


图6 情绪对光环境满意度的影响

Fig.6 The correlation between mood and satisfaction of the lighting environment

图6表明情绪对光环境满意度评价有影响,积极情绪与光环境满意度呈现正相关性,消极呈现负相关性。因此,虽然隔绝时间并未直接表现出对满意度评

价的明显影响,但从时间—情绪—满意度的关联性来看,在封闭空间隔绝3小时后,人员对光环境的实际感知评价可能下降了。这可能是人员对光源第一印象的惯性作用造成的,相比之下情绪变化更加迅速。

值得注意的是,积极情绪得分平均值 17.97,方差 44.815,消极情绪得分 10.87,方差 3.668,前者的方差远大于后者,蕴含了更多信息量,这表明:

- (1) 本实验对象均是身心健康的大学生,实验条件不足以使其产生明显的消极情绪变化。
- (2) 在将心理情绪评价引入光环境评价体系时,更应该关注的是积极情绪的变化。

2.3 照度、色温、隔绝时间对认知表现的影响

本次实验采集的数据主要包含准确率 ACC 和反应时间 RT,用于定量评估每项认知任务的测试结果,精度越高,反应时间越短,受试者的任务表现越好。因此本研究采用学习表现 LP 来定量描述人员的工作效率,LP 越大,工作表现越好,计算公式如式(1)所示。

$$LP = ACC \times \frac{1}{RT} \tag{1}$$

三项认知任务的测试结果如图7所示。方差分析表明照度、色温、隔绝时间对受试者的专注力、短期记忆力和运算思维能力产生了统计学上的显著影响。500Lx 工况时三项任务的工作效率分别比 100Lx 工况提升了约 8%、11%、14%,1000Lx 平均工作效率对比 500Lx 工况几乎没有提升。高照度下认知表现更好的原因可能是高照度增强了视觉分辨力,使受试者更容易准确地识别外界物体。色温的影响趋势与照度相似,但影响幅度小于照度,高色温下三项任务的工作效率分别比低色温提升了 4%、7%、4%。高色温下认知表现更好的原因可能是高色温光对褪黑素的抑制作用更明显,提高了人员的唤醒水平和警觉性。Cajochen 等^[21]发现当 460nm 单色光照射 2h 时,对褪黑素、心率和体温节律有显著抑制作用。1000Lx 照度时,人员在 5700K 色温下三项认知任务上的表现均稍劣于 4400K,三项任务的平均工作效率分别下降了 3%、3%、5%,与满意度投票的结果相似,这可能是由于环境光过于刺眼引起的视觉不舒适和高色温引起的亢奋紧张造成的。在 3 小时的隔绝中观测到认知表现略微有上升,三项任务的平均工作效率分别上升了 3%、5%、3%。在所有人员都对测试任务

有较高熟练度的前提下,这可能是因为更长时间的光照使褪黑素水平更低,提升了唤醒水平和神经反应速率,也使得情绪更加稳定,注意力更集中。这

一发现表明该封闭空间在 3 小时内没有使人员的工作效率出现明显下降。因此,照度对注意力、记忆力、逻辑运算能力的影响大于色温、隔绝时间。

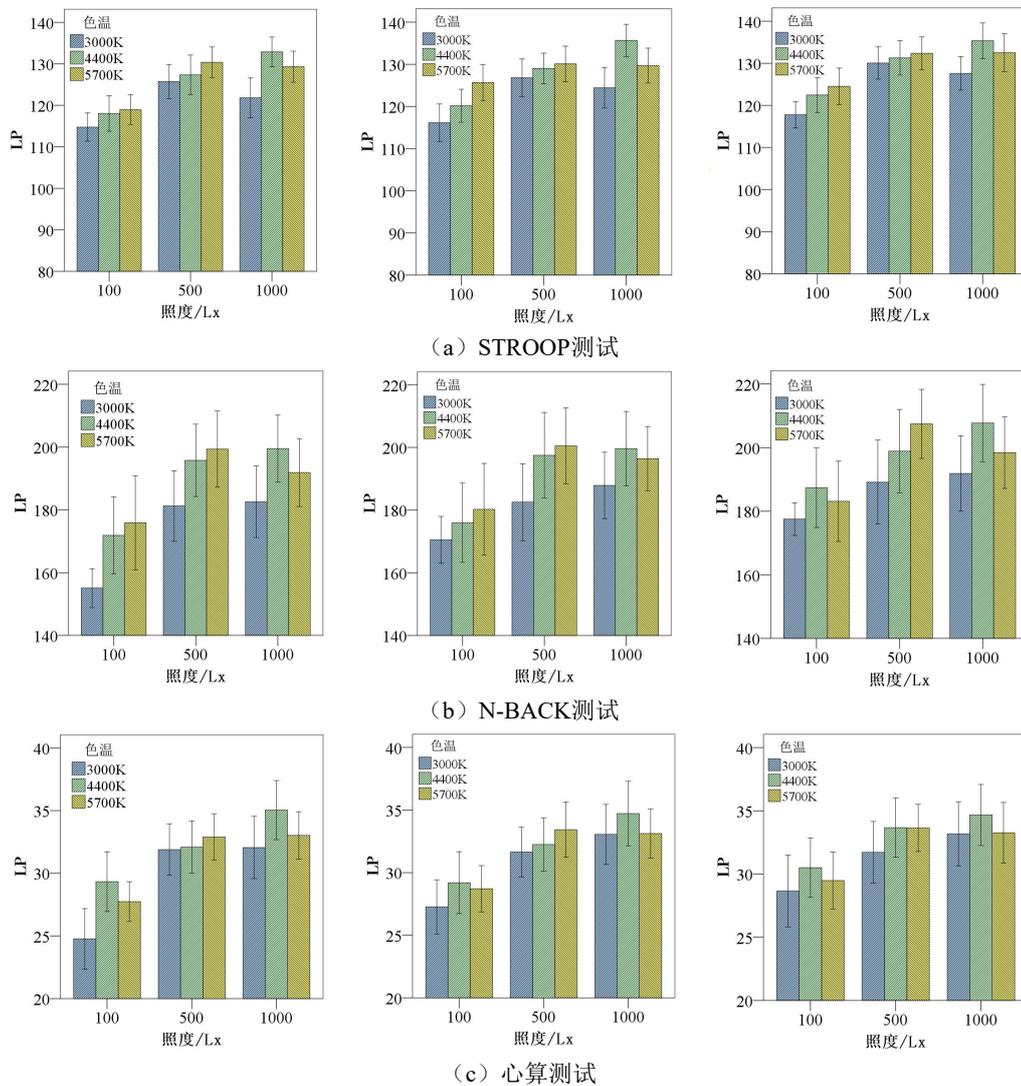


图7 认知任务测试结果(从左往右依次是第60min、115min、170min测试结果)

Fig.7 The results of cognitive task tests

3 结论

为研究封闭空间光环境对人员感知、情绪和认知表现的影响,招募了37名受试者,在封闭空间中使用任务测试和问卷调查的方法进行了研究,弥补了过往研究对于时间和心理因素关注的不足,发现如下:

(1) 从空间—环境—人的交互作用来看,本实验的封闭空间与光环境在3小时的隔绝时间内不会对健康成年人的主观光环境感知和认知表现造成明显不利的影响,但会使人员出现轻微的不良心理反馈。

理反馈。

(2) 照度是影响感知评价和认知表现的主要因素,其次是色温。人眼对照度的感知能力存在边际效应,且受到色温的影响,倾向于认为高色温光源更亮。将照度从100Lx提升到500Lx,对明亮感、满意度、困倦感和认知表现有明显的改善作用,进一步提高照度时,对上述指标的改善作用较小。提高色温对满意度、困倦感和认知表现有改善作用,但在高照度时,4400K暖白光对比5700K冷白光有轻微优势。

(3) 色温、隔绝时间是影响积极情绪的主要因素, 积极情绪与环境满意度评价存在正相关关系。高色温能显著提高积极情绪, 封闭空间3小时的隔绝使健康成年人出现了不良心理反馈, 这种变化主要发生在进入封闭空间前2小时内。照度是影响消极情绪的主要因素, 消极情绪与环境满意度存在负相关关系。将照度从100Lx提升到500Lx, 对消极情绪有明显的改善, 进一步提高照度的作用较小。在健康成年人进入封闭空间隔绝的若干小时内, 消极情绪的波动小于积极情绪, 对于环境的评价更应该关注的是积极情绪。

参考文献:

- [1] Berson D M, Dunn F A, Takao M. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock[J]. *Science*, 2002,295(5557):1070-1073.
- [2] 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.
- [3] Fang Y, Liu C, Zhao C, et al. A study of the effects of different indoor lighting environments on computer work fatigue[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022,19(11):6866.
- [4] Lu M, Hu S, Mao Z, et al. Research on work efficiency and light comfort based on EEG evaluation method[J]. *Building and Environment*, 2020,183:107122.
- [5] Pan S, Liu Y, Xie L, et al. A thermal comfort field study on subway passengers during air-conditioning season in Beijing[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020,61:102218.
- [6] Li Y, Geng S, Chen F, et al. Evaluation of thermal sensation among customers: results from field investigations in underground malls during summer in Nanjing, China[J]. *Building and Environment*, 2018, 136:28-37.
- [7] Hu X, Li N, Gu J, et al. Lighting and thermal factors on human comfort, work performance, and sick building syndrome in the underground building environment[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023,79:107878.
- [8] Wu Y, Chen X, Li H, et al. Influence of thermal and lighting factors on human perception and work performance in simulated underground environment[J]. *Science of The Total Environment*, 2022,828:154455.
- [9] Dong X, Wu Y, Tu Z, et al. Influence of ambient temperature on personnel thermal comfort and working efficiency under isolation condition of underground engineering[J]. *Energy and Buildings*, 2022,274:112438.
- [10] 曹守莲,唐彬,石沙泉.潜艇环境对艇员心理影响的研究[J].*海军工程大学学报:综合版*,2013,10(4):59-63.
- [11] 谭红卫,杨芬,杨延安.封闭坑道环境对作业人员神经行为功能的影响[J].*解放军医院管理杂志*,2011,(18):443-445.
- [12] 杨俊玲,张冲.煤矿救生舱内部舒适性试验研究[J].*中国安全科学学报*,2016,26(1):76-80.
- [13] 王睿,李晓昭,王家琛.地下空间工作人群的心理环境影响要素研究[J].2019,15(1):1-7.
- [14] Ko W H, Schiavon S, Zhang H, et al. The impact of a view from a window on thermal comfort, emotion, and cognitive performance[J]. *Building and Environment*, 2020,175:106779.
- [15] 李芸,汝涛涛,李丝雨,等.环境光照对情绪的影响及其作用机制[J].*心理科学进展*,2022,30(2):389.
- [16] 党睿.博物馆照明中照度与相关色温对视觉感知的影响[J].*照明工程学报*,2021,(3):112-115,123.
- [17] Berman S M, Jewett D L, Fein G, et al. Photopic luminance does not always predict perceived room brightness[J]. *Lighting research & technology*, 1990, 22(1):37-41.
- [18] Wu H, Wu Y, Sun X, et al. Combined effects of acoustic, thermal, and illumination on human perception and performance: A review[J]. *Building and Environment*, 2020,169:106593.
- [19] Li Y, Ru T, Chen Q, et al. Effects of illuminance and correlated color temperature of indoor light on emotion perception[J]. *Scientific reports*, 2021,11(1):14351.
- [20] Ru T, de Kort Y A W, Smolders K C H J, et al. Non-image forming effects of illuminance and correlated color temperature of office light on alertness, mood, and performance across cognitive domains[J]. *Building and Environment*, 2019,149:253-263.
- [21] Cajochen C, Munch M, Kobiacka S, et al. High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light[J]. *The journal of clinical endocrinology & metabolism*, 2005,90(3):1311-1316.