

模拟航天器睡眠舱色彩环境对乘员情绪的影响研究

姚文豪, 姚湘, 许活鹏, 周家慷, 江奥

(湘潭大学, 湖南 湘潭 411105)

摘要: **目的** 研究不同情绪刺激下睡眠舱色彩环境对乘员情绪的影响规律。**方法** 对 30 名受试者(男 15 人、女 15 人)分别进行了中性、负性 2 种 VR 情绪影片的情绪诱发,之后在 VR 环境中进行模拟睡眠舱色彩环境体验,完成主观情绪评价,同时采集受试者在色彩环境中体验时的 20 通道脑电信号;对主观情绪评价进行方差分析,并对脑电信号进行预处理,分析 α 、 β 频带的脑电信号能量。**结果** 主观情绪评价显示,在色彩环境舒适度上,不同色彩环境(冷色、暖色、无彩色)呈现显著性差异($P=0.000<0.05$);在情绪缓解度上,不同色彩环境(冷色、暖色、无彩色)呈现显著性差异($P=0.000<0.05$)。脑电信号显示,冷色环境下额叶区和顶叶区的 α 波左右脑叶平均功率比值最低,而暖色环境最高;冷色环境下颞叶区的 β 波左右脑叶平均功率比值最低,而暖色环境最高。**结论** 在狭小、密闭的模拟航天器睡眠舱环境下,色彩环境对于受试者的情绪调节作用在生理状态和心理感受上都能得到显现,并且其主观感受和客观生理数据分析结果在一定程度上能够达到拟合。其中蓝色环境、绿色环境、白色环境主客观值表征的情绪状态最好,更能有效改善和形成良好的情绪状态。最后经模拟航天器睡眠舱色彩设计实践,验证了航天器睡眠舱色彩设计优化策略的可行性及可靠性。

关键词: 色彩环境;情绪缓解;脑电信号;主观情绪评价;模拟航天器睡眠舱;航天员

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)14-0060-13

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.14.006

Effect of Color Environment in Simulated Spacecraft Sleeping Capsule on Crew Emotion

YAO Wen-hao, YAO Xiang, XU Huo-peng, ZHOU Jia-kang, JIANG Ao

(Xiangtan University, Hunan Xiangtan 411105, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of color environment in sleeping capsule on crew emotion under different emotional stimuli. 30 subjects (15 men and 15 women) were respectively induced by neutral and negative VR emotional films, and then experienced the color environment of the simulated sleeping capsule by VR technology to complete the subjective emotional evaluation. 20 channel EEG signals of subjects experiencing the color environment were collected. Variance analysis was carried out on subjective emotion evaluation, and EEG signals were preprocessed to analyze the EEG signal energy of α and β frequency bands. Subjective emotional evaluation showed that: in terms of color environment comfort, different color environments (cold color, warm color, colorless) showed significant differences ($p=0.000<0.05$); and in terms of emotional relief, different color environments (cold color, warm color, colorless) showed significant differences ($p=0.000<0.05$). EEG signal displayed: The average power ratio of left and right lobe of inferior frontal lobe and parietal lobe under α wave was the lowest in cold color environment, and the highest in warm color environment. The average power ratio of left lobe and right lobe in inferior frontal lobe under β wave was the lowest in cold color environment and the highest in warm color environment. In the narrow and closed simulated spacecraft sleeping capsule environment, the emotional regulation of the color environment on the subjects can be reflected in their physio-

收稿日期: 2023-02-16

基金项目: 国家社会科学基金艺术学一般项目(20BG115);湖南省教育厅优秀青年项目(21B0110)

作者简介: 姚文豪(1998—),男,硕士生。

通信作者: 姚湘(1982—),男,博士。

logical state and psychological feelings, and their subjective feelings and objective physiological data analysis results can be fitted to a certain extent. Among them, the subjective and objective values of blue environment, green environment and white environment are the best, which can effectively improve and form a good emotional state. Finally, the feasibility and reliability of the optimization strategy for the color design of the spacecraft sleeping capsule are verified through the simulation of the color design practice of the spacecraft sleeping capsule.

KEY WORDS: color environment; emotional relief; EEG signal; subjective emotional evaluation; simulated spacecraft sleeping capsule; astronaut

睡眠是人类不可缺少的一种生理活动,与人体健康有着密切关系,良好的睡眠对于保持身心健康、认知和工作表现至关重要。然而,相关研究表明睡眠一直是载人航天任务中普遍存在的问题^[1-2]。在多次载人航天实践的基础上,中国越来越重视宇航员的在轨睡眠问题,并将其视为中长期航天中保持人类作业能力的关键因素之一^[3]。NASA 等航天组织针对未来长期的载人航天飞行,提出了睡眠舱的研究计划,指出要从提高航天器的适居性方面展开研究,同时需要开展基础生理以及航天特因环境对睡眠影响机制的研究,包括提高在轨睡眠环境的舒适度以及提供积极的情绪和心理支持等策略^[4-5]。色彩设计是空间适居性设计的重要内容,而且是情绪调节和心理干预的重要因素。因此,以色彩设计为载体,情绪为中介,系统性地开展睡眠舱色彩设计研究是载人航天器人机界面设计的重要课题。

1 色彩与情绪

情绪 (Emotion) 来源于拉丁文中的 “movere” 一词,与动机 (motivation) 同源^[6]。应用心理学百科全书对情绪的定义是:情绪是发生在应对特定的物理和社会应激时,一种短暂的、有生物学基础的认知、主观体验、生理改变和社会交际的形式^[7]。研究证明,睡前的情绪活动会影响当晚的睡眠质量,具体表现为不同睡眠阶段以及睡眠微结构会发生细微改变^[8]。情绪与睡眠质量关系的研究主要集中于负面情绪的影响,研究表明睡眠质量与负面情绪呈显著负相关,即随着负面情绪的增加,睡眠质量趋于下降;在积极情绪对睡眠质量影响研究中发现,积极情绪对睡眠质量也有直接的影响,积极的心理状态能够显著地促进睡眠质量的提升^[9]。情绪与睡眠质量的影响是双向的:情绪能够显著影响睡眠质量,睡眠质量又反作用于情绪^[10]。因此,发挥情绪的调节作用,对形成良好睡眠具有重要意义。

色彩是作为感知世界的自然属性出现的,它几乎会出现在日常生活中所能看见的任何物体上,是生活中必不可少的环境元素之一。环境色彩会对人一机一环境系统的运作效率以及人员的身心健康产生影响,因此也是人因工程研究的关键要素。

研究表明色彩会对人类的心理功能、生理状态和

行为表现等产生影响,如在工作环境中,暖色会使人心理上出现兴奋、积极的情绪,冷色会使人心理上出现冷静、压抑等情绪^[11]。环境色彩对人的影响主要与色彩的含义有关,在漫长的时间长河中,人类对色彩产生了各种联想和感受,如情绪感、空间感、冷暖感、重量感、软硬感等^[12]。绿色可以唤起最积极的情绪反应,并与放松、平静和幸福相关,红色环境被认为是刺激和分散注意力的,与抑郁相关^[13]。蓝色和绿色环境下的感知体验与幸福感相关,并对低刺激参与者具有减压作用^[14],蓝色环境还会使人产生昏昏欲睡的效果^[15]。另一项研究则指出了不同色相会影响人的心率,如在红色和黄色环境条件下会增加心率,蓝色环境下会增加参与者的放松和平静感^[16]。在视觉复杂的红色或彩色房间工作会使大脑进入更兴奋的状态,导致心率减慢和超负荷^[17]。综上,工作环境中的色彩对人的情绪既会产生积极的影响,也会产生消极的影响^[18-20],在不同环境中合理地使用色彩可以使人员获得积极的情绪状态,对视觉工作能力产生积极影响,并增加舒适度^[21-24]。

在载人航天任务中,航天员的睡眠时间和睡眠质量会受到微重力、隔离、单调重复、高度警惕性 workload 等因素的综合影响,在这种特殊环境因素的影响下,航天员极易容易产生焦虑、抑郁、恐惧等各种负面情绪^[25-27]。针对航天员在轨睡眠问题,吴斌等^[4-5]人提出了 7 种太空飞行中睡眠障碍的对策,包括改善睡眠环境、设计合理的在轨“工作-休息”时间表、药理学干预、光处理、心理支持、乘员选拔和培训、中医药等措施。而目前国内外研究对于载人航天空间情绪适居性理论构建,以及如何实现或调节情绪以满足情绪适居性要求等方面鲜有涉猎。本研究从色彩设计角度出发,旨在通过模拟航天情绪刺激源,研究载人航天器睡眠舱不同色彩环境对乘员形成良好情绪的作用差异,构建一种较为客观的情绪适居性色彩评估方法,从而提高睡眠舱适居性,为乘员提供积极的心理对抗措施,并为睡眠舱等狭小、隔离密闭环境提供色彩设计参考。

2 研究程序与方法

在实验情境中研究情绪,可以主要概括为 3 个方面:情绪诱发,情绪测量以及情绪分析。色彩与情绪

的实验方法可以认为是情绪的测量方法,目前常用的情绪测量方式主要包含主观体验,生理测量以及行为测量3个层面^[28-29]。本研究选用主观体验(主观问卷)和生理测量(脑电信号)相结合的方式进情绪的分析。此外,情绪诱发也是情绪实验的重要内容,实验采用VR场景的形式进行中性情绪和负性情绪的诱发^[30]。

2.1 情绪诱发实验

招募 30 名在校大学生,其中男生 15 人,女生 15 人,年龄为 20~25 岁,均为右利手,视力正常,无精神病史。所有受试者在进行实验之前均已签署实验知情同意书。参考 Gross 评定情绪影片片段的原则筛选实验材料,共收集中性及负性情绪刺激片段各 9 段^[31],视频平均长度为 60 s~90 s^[32]。

在正式开始实验前,向受试者解释实验过程,随后为其戴上 VR 头盔,之后为受试者平复情绪(静息 3 min)。实验共分为 2 组,每组 9 个试次,分别为:中性情绪刺激片段 9 个;负性情绪刺激片段 9 个。为防止不同情绪之间的干扰,中性刺激和负性刺激试次分别单独依次进行,组内情绪刺激片段依次随机出现。受试者观看情绪刺激片段后,对该试次的情绪刺激进行效价(Valence)和唤醒度(Arousal)的行为学评分,评分等级均为 1~7,实验流程见图 1。

方差分析(Analysis of Variance,简称 ANOVA)是一种常用的统计方法,用于比较两个或多个样本均值之间的差异是否显著。其中, F 统计量是方差分析

的核心指标之一。它是组间方差与组内方差的比值。 F 值越大,表示组间方差相对于组内方差的差异越明显,即不同组之间的均值差异较大。 P 值是用于检验统计假设的概率指标。在方差分析中,如果 P 值小于事先设定的显著性水平(通常为 0.05),则认为观察到的差异在统计学上是显著的,即认为组间均值存在显著差异。将实验数据进行分类整理,对电影种类进行方差分析,发现不同电影种类对效价($F=1511.309$, $P=0.000<0.05$)、唤醒度($F=157.204$, $P=0.000<0.05$)均具有显著性差异。

对中性情绪电影片段以及负性电影片段分别进行方差分析,发现中性电影对效价无显著性差异($F=0.890$, $P=0.535>0.05$),负性电影对效价无显著性差异($F=1.746$, $P=0.079>0.05$)。中性电影对缓解度无显著性差异($F=1.885$, $P=0.054>0.05$),负性电影对缓解度无显著性差异($F=0.900$, $P=0.526>0.05$)。中性电影的效价评分为($M=4.49$, $SD=0.66$),唤醒度评分为($M=5.27$, $SD=0.92$),负性电影的效价评分为($M=2.13$, $SD=0.82$),唤醒度评分为($M=6.10$, $SD=0.80$),其中, M 代表平均值, SD 代表标准差,数据评分结果见表 1。

综上分析,不同情绪电影种类存在显著性差异,同类型电影不同片段之间无显著性差异,即选取的影片片段能够较好地激活受试者情绪,使受试者情绪状态处于中性情绪/负性情绪中,可作为实验的情绪诱发材料进行试验。

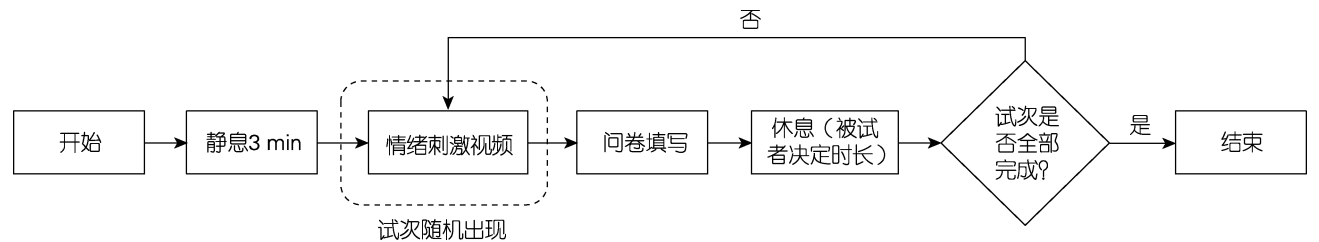


图 1 情绪诱发实验流程
Fig.1 Flow of emotional induction experiment

表 1 两种情绪材料的效价和唤醒度的评分结果
Tab.1 Scoring results of valence and arousal of two emotional materials

中性情绪影片					负性情绪影片				
编号	效价		唤醒度		编号	效价		唤醒度	
	M	SD	M	SD		M	SD	M	SD
1	4.90	1.24	4.70	1.12	1	2.67	1.18	6.03	1.19
2	5.17	0.95	4.90	1.27	2	2.2	1.30	6.37	0.85
3	5.40	1.04	5.00	1.29	3	2.4	1.10	5.40	1.48
4	5.10	0.76	5.13	1.17	4	2.63	1.00	5.23	1.25
5	4.93	1.17	5.00	1.29	5	2.97	1.16	5.47	1.28
6	5.00	0.98	4.47	1.63	6	2.3	1.34	6.03	0.85
7	4.90	1.03	4.33	1.37	7	2.57	0.97	5.73	1.14
8	4.80	0.89	4.30	1.39	8	2.13	1.14	6.23	1.07
9	5.20	1.06	5.17	0.99	9	2.27	1.31	6.10	0.99

2.2 正式实验

2.2.1 志愿者

招募 35 名在校大学生，男性 18 名，女性 17 名，年龄为 20~25 岁，所有受试者均为右利手，无心脑血管疾病及精神病史，视力和色觉都正常，并进行了包括倾斜试验在内的身体检查。在研究之前的一个星期，受试者避免过度饮酒、咖啡因、处方药和吸烟。大约一半的参与者在早上（08：00—12：00）完成了测试，其余的受试者在晚上（18：00—22：00）完成了测试。在正式实验前向受试者介绍实验过程及注意事项，所有志愿者均签署了实验知情同意书。

2.2.2 色彩样本

色彩样本来源于网络调研，通过网络爬虫进行色彩图片爬取。考虑睡眠舱空间密闭、隔离等特点，色彩图片从各国际空间站睡眠舱、极地科考站睡眠舱、飞机高铁睡眠舱以及 9 大房屋租赁网站（卧室色彩）等相似环境进行检索爬取。经过筛选处理，最终得到 500 张色彩意向图片^[24]。参考 PAMLER 和 SCHLOSS^[33]选取颜色样本的方法，将收集到的 500 张色彩意向图片按照最大色相比比例进行分类，分别为：红色（R）、橙色（O）、黄色（Y）、绿色（G）、青色（C）、蓝色（B）、紫色（P）以及灰色（GR）。

K-means 算法是基于距离的聚类算法，是一种在给定的数据点集合中找到“K”个簇的优化算法，其特点在于同一聚类的簇内的对象相似度较高，不同聚

类的簇内的对象相似度较低。因此研究使用 K-means 算法对图像像素点进行聚类，以得到色彩图片的主体颜色， L 代表明度， a 代表红绿分量， b 代表黄蓝分量，Hue 代表色相色。颜色提取流程见图 2。

在 Python 中导入需要的相关库(Pillow, Matplotlib, Numpy, Collections, Scikit-learn, Pandas, Webcolors, Math, Json, Argparse)，构造 K-means 聚类器进行聚类，对于每幅图像设定 5 个颜色簇，并将其作为该幅图像的调色板，图像颜色量化结果见图 3。

低饱和、高明度的色彩会使人感到更加放松、舒适。基于此原则，在各色相中选取最低饱和度且最高明度的色彩，共计得到 8 种色彩样本。此外，目前建筑空间大多采用纯白色。由于色彩图片及提取原因，纯白色样本未被提取，故增加一种纯白色样本，共计得到 9 种色彩样本，见表 2。

2.2.3 VR 模拟环境搭建

这项研究以中国空间站核心舱睡眠区环境为原型，选取在轨航天器单独舱段作为睡眠区，并参考相关国际空间站环境构造及配置要求进行空间创意方案构建。

睡眠区被划分为 7 个空间，其中 6 个空间为面积等大的睡眠舱，面积大约为 3 m³，可供 6 人同时使用。每个舱室配备 1 个舷窗，受空间结构因素影响并结合乘员居住环境面积因素，舱室内部空间呈梯形。中间部分为走廊，是乘员公共活动空间。最终创意方案睡眠舱环境构建，见图 4。



图 2 色彩聚类流程
Fig.2 Color clustering process

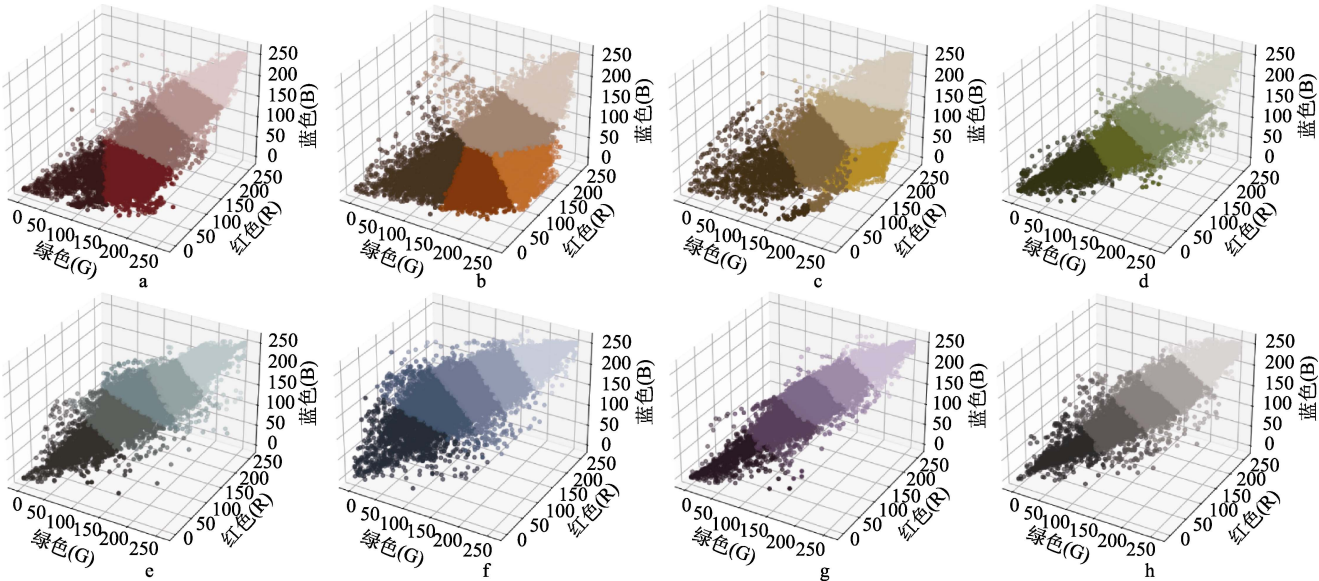


图 3 K-means 聚类色彩可视化
Fig.3 K-means clustering color visualization

表 2 环境色彩样本
Tab.2 Environmental color samples

N	Hue	Sample	R	G	B	L	a	b
1	Red		235	221	220	89	5	2
2	Orange		233	223	213	89	2	6
3	Yellow		222	216	201	87	0	8
4	Green		22	225	215	89	-3	4
5	Cyan		220	236	231	92	-6	1
6	Blue		214	221	231	88	-1	-6
7	Purple		219	207	227	85	7	-8
8	Gray		213	213	213	85	0	0
9	White		255	255	255	100	0	0

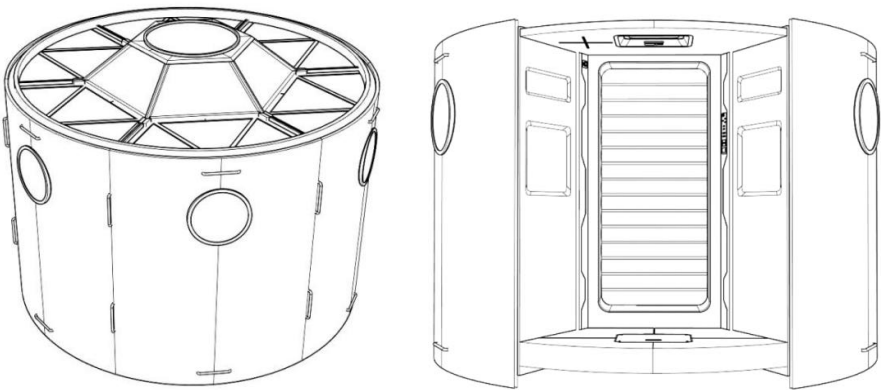


图 4 睡眠舱空间环境构建
Fig.4 Construction of space environment of sleeping capsule

依据上述选定的颜色样本，利用 3D 渲染软件进行场景附色渲染，构建 VR 模拟睡眠舱环境，最终效果见图 5。

2.2.4 实验流程

实验在某大学虚拟仿真实验室完成，实验室具备电磁屏蔽条件，环境安静封闭，温度适宜。脑电信号采集设备使用 QUICK-20 干电极多导联 EEG 系统，

该设备采用国际标准的 10~20 布局，共 23 个电极位置（20 通道+参考线+2 个接地线）。公共参考点位于 A1，通过耳夹电极获取。

在正式实验开始之前，向受试者解释实验过程及相关注意事项，随后为尽可能模拟在轨航天环境中航天员的状态，要求受试者进行-6°头低位卧床实验^[27]，约 30 min，在此期间受试者需要平静情绪。头低位卧



图 5 睡眠舱色彩环境
Fig.5 Color environment of sleeping capsule

床活动结束后，为受试者戴上脑电设备、VR 头盔，随后实验正式开始。实验过程需要受试者在实验过程中保持相对安静和静止，为保证 VR 体验沉浸感，实验在黑暗环境中进行，见图 6。

正式实验分为 2 组（中性组和负性组），每组 9 个试次，为防止不同情绪间的干扰，正性和负性试次单独进行。在每个试次中，受试者先观看 VR 情绪诱发片段（预实验中影片片段，60 s~90 s），随后进入 VR 模拟睡眠舱色彩环境体验（30 s），体验后进行主观问卷评价^[34]。主观评价结束后，试次之间会让受试者休息并平复情绪，受试者休息好后继续进行下一试次的实验，直到实验结束。实验的程序在 Unity 游戏引擎内编写，实验流程见图 7。

2.2.5 数据采集与处理

本实验共有 35 位受试者参与，其中 5 位受试者在实验过程中部分实验数据未完整采集，因此最终得到 30 份受试者的主观问卷评价和脑电数据，其中男性受试者和女性受试者各 15 位。

受试者在实验过程中难免会受到来自环境或自身生理活动的干扰，导致脑电数据出现各种伪迹，因此需要对采集的脑电信号进行预处理，包括降采样、去除带通滤波和空间滤波以及其他生理信号伪声等。同时为定量分析受试者的脑电数据，还需将时域特征转化为频域特征，并导出不同频段下的脑电波功率值，脑电信号数据在 Brain Vision Analyzer 2.2 软件中进行处理与分析。受试者的主观问卷评价在 IBM

SPSS 17.0 软件进行统计分析，分别对舒适度、缓解度进行多因素方差分析，其中组内因素为情绪状态（中性情绪/负性情绪），色彩环境（红/橙/黄/绿/青/蓝/紫/灰/白），性别（男/女）。

2.2.6 分析方法

行为学评价指标包括睡眠舱色彩环境对情绪的缓解度以及舱室色彩环境的舒适度。情绪缓解度是指作业人员在应激状态下，色彩环境对作业人员的情绪缓解程度，用以形容情绪改善水平^[35-36]。色彩舒适度是指色彩环境所诱导产生的视觉舒适的主观状态，并且可以通过视觉感受转化为一定程度的心理感受，用来描述对当前色彩环境满意的心理状态^[37-38]。研究量表采用 7 级李克特量表。对于舒适度，“1”代表非常不舒适，不舒适程度渐渐减轻，“4”代表中性，舒适程度渐渐增加，“7”代表非常舒适；对于缓解度，“1”代表非常不缓解，不缓解程度渐渐减轻，“4”代表中性，缓解程度渐渐增加，“7”代表非常缓解（中性情绪下代表积极情绪的增加）。

不同频率的脑电波代表了不同情绪的表征，许多神经心理学研究报告都指出了脑电图信号和情感之间的关联性^[39]。人类的大脑皮层被分为额叶、颞叶、顶叶和枕叶等部分，每个部分负责接收不同的信息。前额皮质被认为是情绪的中枢，前额皮层参与意识、情绪和动机的活动；颞叶部分则负责情感、语言、听觉以及记忆的处理。

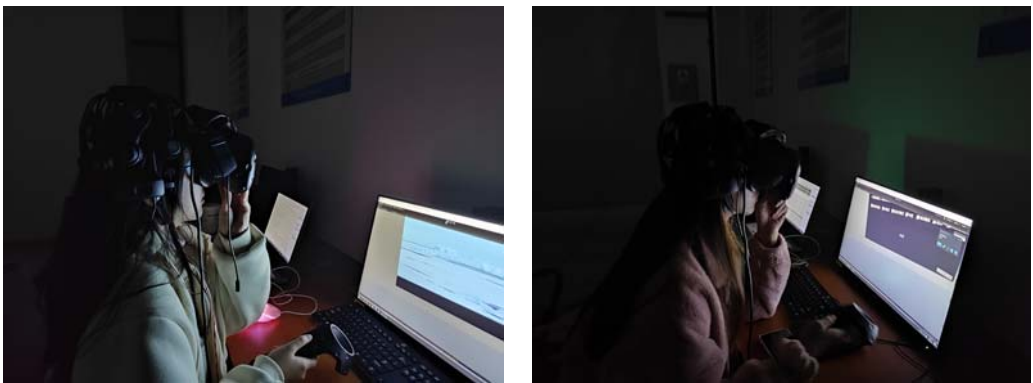


图 6 实验环境
Fig.6 Experimental environment

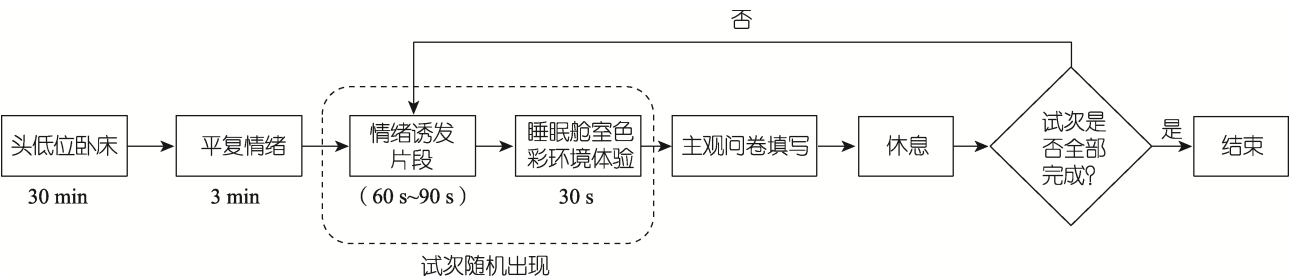


图 7 实验流程
Fig.7 Experimental process

研究指出 α 频带的变化在两个大脑半球造成的差异性表现常常与情感的产生有关,如右额叶的相对变化常表现为恐惧、厌恶等负面情绪或刺激的产生;而左额叶的相对变化与中性或者积极情绪的产生相关^[40]。 β 波的变化也与效价有关,它与情绪的唤醒度更为密切。研究发现不同唤醒度刺激下各脑区的 β 波能量发生了变化,在较高的唤醒程度时大脑的颞叶 β 波能量明显增加^[41]。因此,在探讨不同愉悦度与脑电信号的相关性时,可以将额叶区、顶叶区的 α 波波波形视为主要的观察目标;在探讨不同唤醒度与脑电信号的相关性时,可以将颞叶区的 β 波形视为主要的观察目标。

在情绪研究方面,通常用左、右大脑半球波形能量的差异性来表现不同的情感,从而提出了一个备受关注的大脑半球效价假设。这个假设表明,正性的、趋近的情绪在前额的左侧起作用,而负性的、与退缩有关的情绪在右侧的前额进行处理^[42-44]。由于脑的活动与波的能量成反比关系,波的能量越低,脑部的活动就越活跃,所以在积极情绪时,左额波的能量会下降,而消极情绪时右额波的能量会下降。因此通过分析额叶、顶叶 α 波的左右脑电平均功率值比值来对愉悦度做分析,通过分析颞叶区 β 波的左右脑电平均功率值比值来对唤醒度做分析^[39]。

3 结果

3.1 主观问卷评价结果

3.1.1 舒适度分析

对色彩环境、性别、情绪状态 3 个自变量进行多因素方差分析。在舒适度方面,不同的色彩环境 ($F=15.398$, $P=0.000<0.05$) 有显著性差异,其余自变量及各项之间的交互作用均无显著性差异 ($P>0.05$)。

对色彩环境变量进行事后比较,发现橙色环境相对于其他色彩环境均具有显著性差异,且舒适度得分最低 ($M=3.350$, $SD=0.144$);蓝色环境相对于绿色和白色环境无显著性差异,相对于其他色彩环境均表现出显著性差异,且舒适度得分最高 ($M=5.317$, $SD=0.144$)。各色彩环境对舒适度的均值影响,见图 8。

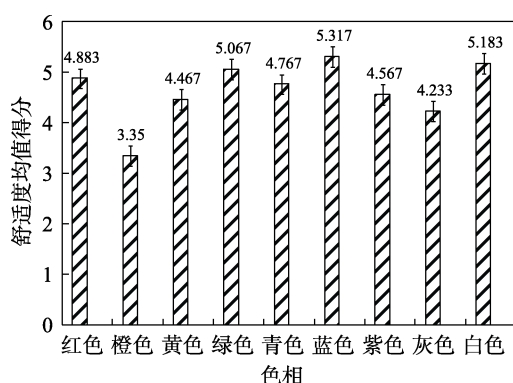


图 8 不同色彩环境下舒适度得分

Fig.8 Comfort scores in different color environments

将色彩环境按照暖色 (红色、橙色、黄色)、冷色 (绿色、青色、蓝色、紫色)、无彩色 (灰色、白色) 分类整理,对色彩环境进行方差分析,发现色彩环境 ($F=16.210$, $P=0.000<0.05$) 呈显著性差异。对色彩环境进行事后比较,发现暖色环境 ($M=4.313$, $SD=0.077$) 对冷色环境 ($M=4.929$, $SD=0.077$) 及无彩色环境 ($M=4.708$, $SD=0.109$) 呈显著性差异,且舒适度评分低于冷色环境和无彩色环境,冷色环境与无彩色环境之间无显著差异。3 种色彩环境得分,见图 9。

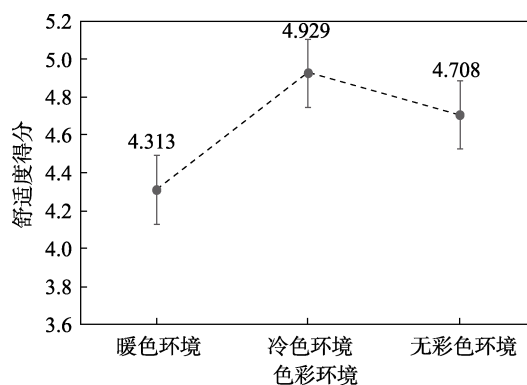


图 9 不同环境类别下舒适度得分

Fig.9 Comfort scores under different environmental categories

通过分析可知,不同色彩环境下受试人员的舒适度有显著性差异,冷色和无彩色环境在舒适度评分上优于暖色环境,其中蓝色环境、白色环境以及绿色环境评分均达到 5 分以上,舒适性较好。不同性别以及不同情绪状态对舒适度评分无影响。

3.1.2 缓解度分析

在缓解度评分上,不同的色彩环境 ($F=15.925$, $P=0.000<0.05$) 有显著性差异;不同的情绪状态 ($F=5.756$, $P=0.017<0.05$) 有显著性差异;不同的性别 ($F=5.125$, $P=0.024<0.05$) 有显著性差异。自变量之间的交互作用无显著性差异 ($P>0.05$)。

在缓解度评分上,对不同的情绪状态进行事后比较,中性情绪较负性情绪均值差值为 ($MD=-0.237$, $SD=0.099$);对不同的性别进行事后比较,男生较女生均值差值为 ($MD=-0.223$, $SD=0.099$)。其中,MD 代表平均差。对色彩环境进行事后比较分析,发现橙色环境相对于其他色彩环境均具有显著性差异,蓝色环境相对于绿色和白色环境无显著性差异,相对于其他色彩环境均表现出显著性差异,且舒适度得分最高 ($M=5.367$, $SD=0.156$)。各色彩环境对缓解度的均值影响,见图 10。

将色彩环境按照暖色 (红色、橙色、黄色)、冷色 (绿色、青色、蓝色、紫色)、无彩色 (灰色、白色) 分类整理,对色彩环境进行方差分析,发现色彩环境 ($F=19.442$, $P=0.000<0.05$) 呈显著性差异。对色彩环

境进行事后比较,发现暖色环境 ($M=4.150$, $SD=0.083$) 对冷色环境 ($M=4.879$, $SD=0.083$) 及无彩色环境 ($M=4.617$, $SD=0.118$) 呈显著性差异,且缓解度评分低于冷色环境和无彩色环境,冷色环境与无彩色环境之间无显著差异。3 种色彩环境得分,见图 11。

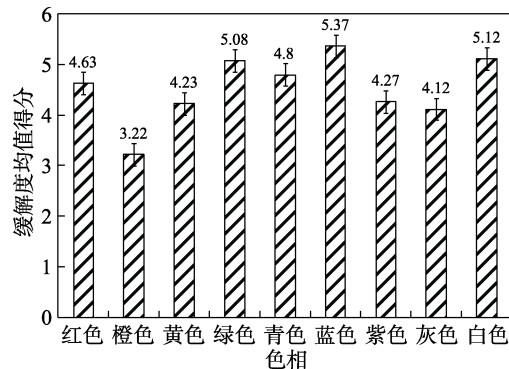


图 10 不同色彩环境下缓解度得分

Fig.10 Mitigation scores in different color environments

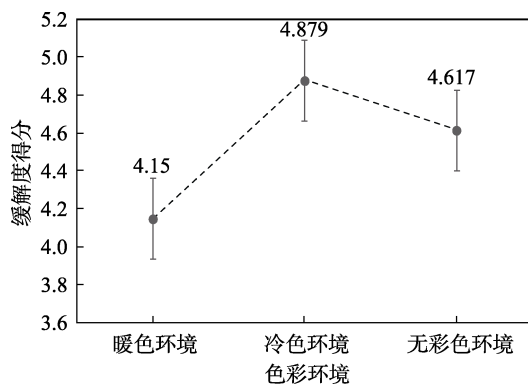


图 11 不同环境类别下缓解度得分

Fig.11 Mitigation scores under different environmental categories

通过分析可知,不同色彩环境、不同情绪状态、不同性别间受试人员的缓解度均有显著性差异,冷色和无彩色环境在缓解度评分上优于暖色环境,其中蓝色环境、白色环境以及绿色环境缓解度评分均达到 5 分以上,缓解度较好。

3.2 脑电数据结果

3.2.1 α 波平均功率值对比

在中性情绪下,男性以及女性的额叶区冷色环境功率比值最小 ($M=0.65$, $SD=0.108$),无彩色环境次之 ($M=0.66$, $SD=0.083$),暖色环境 ($M=0.72$, $SD=0.11$) 最高;男性以及女性的顶叶区无彩色环境 ($M=0.72$, $SD=0.055$) 功率比值最小,冷色环境 ($M=0.81$, $SD=0.14$) 次之,暖色环境 ($M=0.88$, $SD=0.09$) 最大。

在蓝色环境下,男性及女性的额叶及顶叶区脑电功率比值最低,愉悦性最好,白色环境次之。中性情绪下不同色彩环境左右脑区 α 波相对脑电功率比值,见图 12。

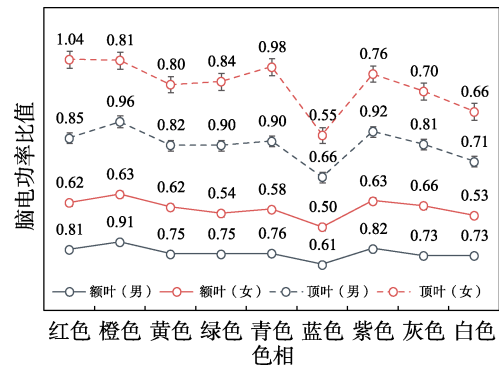


图 12 中性情绪下不同色彩环境 α 波相对脑电功率比值

Fig.12 α wave-EEG power ratio of neutral emotions in different color environments

在负性情绪下,男性以及女性的额叶区冷色环境 ($M=0.78$, $SD=0.09$) 功率比值最小,无彩色环境次之 ($M=0.69$, $SD=0.06$),暖色环境 ($M=0.77$, $SD=0.04$) 最高;男性以及女性的顶叶区冷色环境 ($M=0.86$, $SD=0.094$) 功率比值最小,无彩色环境 ($M=0.99$, $SD=0.10$) 次之,暖色环境 ($M=1.08$, $SD=0.142$) 最大。

在蓝色环境下,男性及女性的额叶及顶叶脑电功率比值最低,愉悦性最好,白色、绿色环境次之。负性情绪下不同色彩环境左右脑区 α 波相对脑电功率比值,见图 13。

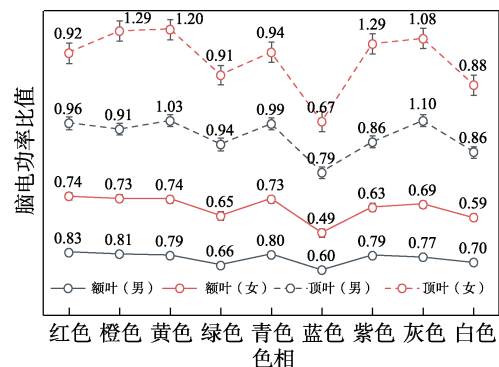


图 13 负性情绪下不同色彩环境 α 波相对脑电功率比值

Fig.13 α wave-EEG power ratio of negative emotions in different color environments

3.2.2 β 波平均功率值对比

在中性情绪下,男性以及女性的额叶区冷色环境 ($M=0.73$, $SD=0.139$) 功率比值最小,无彩色环境 ($M=0.77$, $SD=0.114$) 次之,暖色环境 ($M=0.85$, $SD=0.12$) 最高。

在蓝色及绿色环境下,男性及女性的额叶及顶叶区脑电功率比值最低,唤醒度最好,白色环境次之。中性情绪下不同色彩环境左右脑区 β 波相对脑电功率比值,见图 14。

在负性情绪下,男性以及女性的额叶区冷色环境 ($M=0.78$, $SD=0.179$) 功率比值最小,无彩色环境

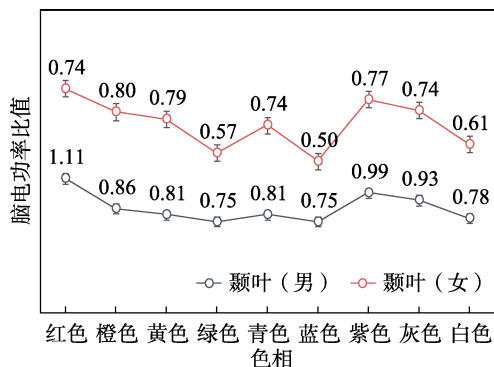


图 14 中性情绪下不同色彩环境 β 波相对脑电功率比值

Fig.14 β wave-EEG power ratio of neutral emotions in different color environments

($M=0.80$, $SD=0.20$) 次之, 暖色环境 ($M=0.90$, $SD=0.143$) 最高。

在蓝色环境下, 男性及女性的额叶及颞叶区脑电功率比值最低, 唤醒度最好, 白色、绿色环境次之。负性情绪下不同色彩环境左右脑区 β 波相对脑电功率比值, 见图 15。

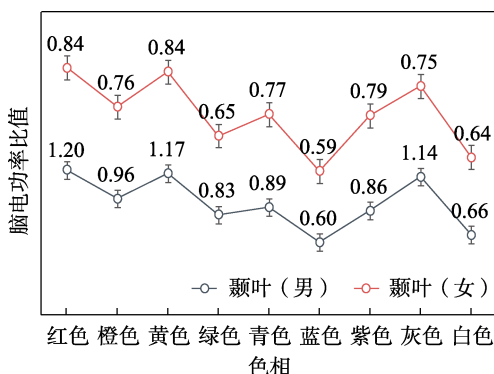


图 15 负性情绪下不同色彩环境 β 波相对脑电功率比值

Fig.15 β wave-EEG power ratio of negative emotions in different color environments

3.2.3 讨论

通过对受试者的行为学指标和脑电信号分析可知, 主观情绪评价和客观脑电信号分析结果在一定程度上能够达到拟合: 受试者脑电信号表征的愉悦度和唤醒度越高, 其在睡眠舱室色彩环境中感受到的情绪缓解度和视觉舒适度越高, 即色彩环境对于受试者的情绪调节在生理状态和心理感受上都具有一定作用。

在中性情绪状态下, 冷色环境和无彩色环境在主客观表征值上整体优于暖色环境, 其中蓝色、白色、绿色环境相较于其他色彩环境, 主客观值表征的情绪状态更好, 更能有效保持或形成良好的情绪状态; 在负性情绪状态下, 冷色环境和无彩色环境在主客观表征值上整体优于暖色环境, 其中蓝色、白色、绿色环境相较于其他色彩环境, 主客观值表征的情绪状态更

好, 更能有效改善其负性情绪状态。

暖色系色彩往往会给人前进、膨胀的感受, 冷色系色彩则给人后退、收缩的感受, 例如在狭小的舱室空间中涂上浅蓝色会显得空间更为宽敞^[45]。有多项研究表明色彩中的蓝、绿色能够使人感到舒适、放松、冷静和凉爽, 能够在一定程度上缓解焦虑水平^[46-50], 而橙色、黄色则会刺激情绪, 使人兴奋^[51]。在另一项空间站卫生区情绪适居性的色彩设计研究中, 暖白色被认为是生理信号反应最优的色彩数据^[52]。

上述研究结论与本文的实验结果是相似的, 因此, 在狭小、密闭的睡眠舱环境下, 蓝色、绿色、白色的色彩环境适居性较好, 能够缓解乘员的负性情绪或形成一个良好的情绪状态, 可作为航天器睡眠舱环境色彩进行设计与搭配。

4 设计实践

4.1 载人航天器睡眠舱色彩设计优化策略

载人航天器睡眠舱色彩设计的优化策略是在航天任务需求下, 通过实验模拟航天环境情绪刺激源, 从生理信号和主观感受 2 个方面综合分析得出适合航天器睡眠舱的色彩环境, 并将其作为载人航天器睡眠舱色彩设计的依据。舱室类色彩设计方法一般从一般性原则开展, 通过分析自身特点, 为睡眠舱色彩设计提供指导意见。研究将实验得到的理论色彩与航天器睡眠舱色彩设计原则有机结合, 从而保证设计的有效性与可靠性。载人航天器睡眠舱色彩设计优化策略, 见图 16。

本次设计实践案例以载人航天器睡眠舱色彩设计为例, 将文中实验结果应用于睡眠舱设计中, 案例选取冷色环境中的蓝色环境以及无彩色环境中的白色环境对色彩设计优化策略进行验证。

4.2 载人航天器睡眠空间方案设备布局

在进行载人航天器睡眠舱色彩设计时, 由于设备空间布局的不同, 其呈现的视觉效果也会有所差异, 因此需要考虑环境配置要素。因此, 为保障乘员健康生活, 有效休息, 载人航天器睡眠舱应具备以下基本功能: 满足基本的照明需求; 应设睡眠休息区, 保证寝具设施完善; 应设收纳区, 能够对衣物、私人物品以及电子娱乐设备进行存储和收纳; 在睡眠时能够接收紧急通知, 并且具备通信功能; 具备为电子娱乐设备提供能源和相关信息的保障功能^[53]。

在进行空间布局方案构建时, 应考虑色彩设计布局形式。由于载人航天器睡眠舱面积较小, 空间狭窄, 因此在进行空间布局设计时, 应尽可能使空间划分为整体, 从而使色彩更加连贯, 营造大空间感觉。同时由于睡眠舱整体功能以睡眠、休息为主, 因此应避免过多装饰性元素的设计, 减少环境色彩对乘员不必要的情绪影响。最终空间方案布局, 见图 17。

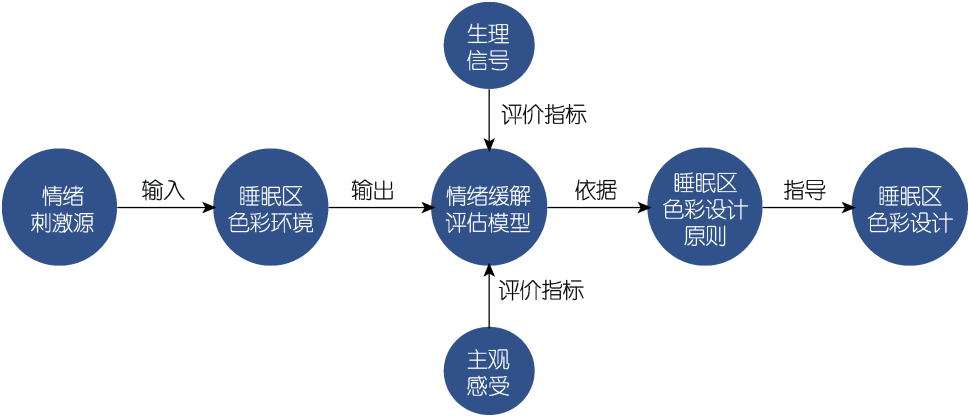


图 16 载人航天器睡眠舱色彩设计优化策略
Fig.16 Optimization strategy for color design of manned spacecraft sleeping capsule

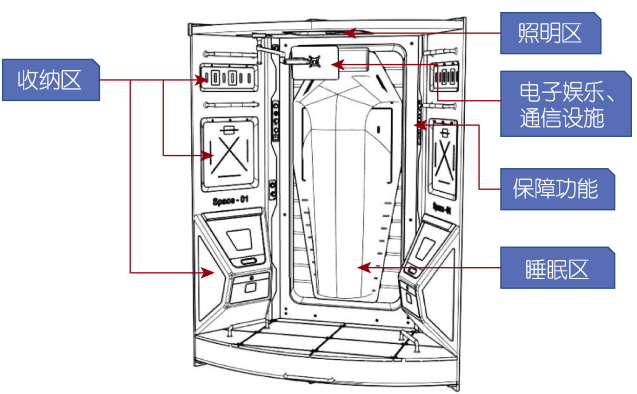


图 17 载人航天器睡眠舱空间方案设备布局
Fig.17 Equipment layout of space scheme of manned spacecraft sleeping capsule

4.3 载人航天器睡眠舱色彩设计方案

载人航天器睡眠舱色彩方案主要为乘员提供积极的情绪支持以及舒适的睡眠环境，从而保证乘员的生理和心理健康。将实验取得的理论色彩应用于睡眠舱环境中，并结合睡眠舱色彩设计原则进行深入和优

化。睡眠舱色彩设计应保证色彩协调，协调的色彩不会刺激人的视觉感官，可以让乘员在视觉和思维活动上感到舒适、惬意。睡眠舱较为狭小，色彩应发挥其面积或体积的视觉调整作用，使用统一性色彩，扩大视觉空间。此外，在确定整体环境色调之后，应在统一的色彩空间中寻找变化，丰富色彩层次，如增加一些暖色、对比色、重色的使用。最终色彩方案，见图 18。

4.4 设计评价

在进行色彩设计评价时，采用专家评价法，邀请 5 名航天色彩和人因工程领域的专家以及 5 名相关专业研究人员对设计方案进行评估。评价过程以 VR 模拟睡眠舱色彩环境的体验展开，之后进行问卷调查，问卷等级为 7 分制，问卷评价指标为色彩环境的情绪适居性以及舒适性。采用模糊综合评价法对方案进行量化，并由专家赋予权重集 A：情绪适居性（0.6）；舒适性（0.4），最终结果见表 7。

根据模糊综合评价法的结果来看，2 种色彩方案的综合得分都接近 6 分，评价结果较优，验证了色彩设计优化策略的可靠性与可行性。



图 18 载人航天器睡眠舱色彩方案
Fig.18 Color scheme of manned spacecraft sleeping capsule

表 3 色彩方案评价结果
Tab.3 Evaluation results of color scheme

色彩方案	情绪适居性	舒适性	综合得分
蓝色环境	M=6.00, SD=0.63	M=5.60, SD=0.48	5.840
白色环境	M=5.80, SD=0.75	M=6.00, SD=0.52	5.880

5 结语

睡眠问题正逐渐成为航空航天医学一个新的研究前沿,针对未来长期的载人航天飞行任务,保证乘员良好的睡眠和休息对于顺利完成飞行任务具有重要意义。本文通过实验分析了载人航天器虚拟睡眠舱色彩环境对乘员的情绪影响,得出了适合航天特因环境的睡眠舱环境色彩,并提出了一种载人航天器睡眠舱色彩设计的优化策略,最后经设计实践对载人航天器睡眠舱色彩设计优化策略进行了验证。研究为促进航天员适应太空环境,提高环境舒适性以及处理情绪相关问题提供了策略支持,对狭小、隔离密闭等相似环境的色彩设计也具有一定参考价值。

由于受客观条件限制,研究仍有一些不足之处,如:实验过程中所模拟的载人航天器睡眠舱环境距真实环境还有一定差距;实验人员的身体素质与心理特征相较于航天员之间存在一定差异;受实验时长和色彩样本限制,研究只分析了中性情绪和负性情绪下的乘员情绪影响变化,缺少阳性情绪下的影响研究。因此,在后续研究中将把这些因素考虑在内,优化和完善课题研究。

参考文献:

[1] PANDI-PERUMAL S R, GONFALONE A A. Sleep in Space as a New Medical Frontier: The Challenge of Preserving Normal Sleep in the Abnormal Environment of Space Missions[J]. Sleep Science, 2016, 9(1): 1-4.

[2] EVANS-FLYNN E, GREGORY K, ARSINTESCU L, et al. Risk of Performance Decrements and Adverse Health Outcomes Resulting from Sleep Loss, Circadian Desynchronization and Work Overload.[R] Houston: Johnson Space Center, 2015.

[3] 陈善广,王春慧,陈晓萍,等.长期空间飞行中人的作业能力变化特性研究[J].航天医学与医学工程, 2015, 28(1): 1-10.

CHEN Shan-guang, WANG Chun-hui, CHEN Xiao-ping, et al. Study on Changes of Human Performance Capabilities in Long-duration Spaceflight[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2015, 28(1): 1-10.

[4] WU B, WANG Y, WU X, et al. On-orbit Sleep Problems of Astronauts and Countermeasures[J]. Military Medical Research, 2018, 5(1): 17.

[5] 景晓路,刘学勇,秦海波,等.载人航天睡眠问题及其干预措施[J].空军医学杂志, 2014(1): 57-60.

JING Xiao-lu, LIU Xue-yong, Qin Hai-bo, et al. Sleep Problems and Intervention Measures in Manned Space Flight[J]. Journal of Air Force Medicine, 2014, 30(1): 57-60.

[6] DAVIS M, LANG P J. Emotion[M]. Handbook of Psychology (Biological Psychology), Hoboken: Wiley, 2003: 405-439.

[7] SPIELBERGER C D. Encyclopedia of Applied Psychology[M]. Boston: Elsevier Academic Press, 2004: 713-722.

[8] TALAMINI L M, BRINGMANN L F, DE BOER M, et al. Sleeping Worries Away or Worrying Away Sleep? Physiological Evidence on Sleep-emotion Interactions[J]. PLoS One, 2013, 8(5): 126-132.

[9] 马杰.服刑人员睡眠质量与负性情绪、睡眠信念及正念的相关性[D]. 济南: 山东大学, 2019.

MA Jie. Analysis of Sleep Quality and Its Association with Positive and Negative Affect, Sleep Beliefs and Mindfulness in Prisoners[D]. Jinan: Shandong University, 2019.

[10] 刘肖依.探索老化过程中睡眠和认知、情绪的关系[D]. 重庆: 西南大学, 2018.

LIU Xiao-yi. A Study on the Relationship Between Cognition, Emotion and Sleep in Older Adults[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.

[11] SAVAVIBOOL N, GATERSLEBEN B, MOORAPUN C. The Effects of Colour in Work Environment: A Systematic Review[J]. Environment Behaviour Proceedings Journal, 2016, 10(4): 262-270.

[12] 王子莹,巴剑波,王川.工作环境色彩对人体心理、生理和作业绩效的影响[J].人类工效学, 2021, 27(3): 76-82.

WANG Zi-ying, BA Jian-Bo, WANG Chuan. Influence of Working Environment Color on Human Psychology, Physiology and Job Performance[J]. Ergonomics, 2021, 27(3): 76-82.

[13] KAYA N, EPPS H H. Relationship between Color and Emotion: A Study of College Students[J]. College Student Journal, 2004, 38(3): 396.

[14] LENGEN C. The Effects of Colours, Shapes and Boundaries of Landscapes on Perception, Emotion and Mentalising Processes Promoting Health and Well-being[J]. Health & Place, 2015, 35: 166-177.

[15] KÜLLER R, MIKELLIDES B, JANSSENS J. Color, Arousal, and Performance—A Comparison of Three Experiments[J]. Color Research & Application, 2009, 34(2), 141-152.

[16] ASEEL A, ROBERT T, KANE, et al. The Influence of

- Color on Student Emotion, Heart Rate, and Performance in Learning Environments[J]. *Color Research & Application*, 2016, 41(2): 117-126.
- [17] INADEEN A, DINESH K, NEIL M. The Psychological and Physiological Effects of Light and Colour on Space Users[J]. *Conference Proceedings: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. New York: Annual Conference*, 2005, 1(2): 1228-1231.
- [18] STONE N J, ENGLISH A J. Task Type, Posters and Workspace Color on Mood, Satisfaction and Performance[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 1998, 18(2), 175-185.
- [19] KWALLEK N, LEWIS C M. Effects of Environmental Colour on Males and Females: A Red or White or Green Office[J]. *Applied Ergonomics*, 1990, 21(4): 275-278.
- [20] KWALLEK N, WOODSON H, LEWIS C M, et al. Impact of Three Interior Color Schemes on Worker Mood and Performance Relative to Individual Environmental Sensitivity[J]. *Color Research & Application*, 1997, 22(2): 121-132.
- [21] LEBEDKOVA S M, PANTELEEVA N, STEPANOVA I V. Influence on Visual Working Capacity of Colour Decoration of the Workplace for Work with A Computer. *Light and Engineering*, 2012, 20(3), 40.
- [22] KÜLLER R, BALLAL S, LAIKE T, et al. The Impact of Light and Colour on Psychological Mood: A Cross-cultural Study of Indoor Work Environments[J]. *Ergonomics*, 2006, 49(14): 1496-1507.
- [23] JIANG A, FOING B H, SCHLACHT I L, et al. Colour Schemes to Reduce Stress Response in the Hygiene Area of a Space Station: A Delphi Study[J]. *Applied Ergonomics*, 2021, 98(1): 14-121.
- [24] JIANG A, YAO X, CAROLINE H, STEPHEN W. Young People's Colour Preference and the Arousal Level of Small Apartments[J]. *Color Research & Application*, 2021, 47(3): 77-85.
- [25] 张其吉, 白延强. 载人航天中的若干心理问题[J]. *航天医学与医学工程*, 1999, 12(2): 144-148.
ZHANG Qi-ji, BAI Yan-qiang. Psychological Issues in Manned Spaceflight[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 1999, 12(2): 144-148.
- [26] 秦海波, 白延强, 吴斌, 等. 载人航天飞行中的情绪研究进展[J]. *航天医学与医学工程*, 2012, 25(4): 302-306.
QIN Hai-bo, BAI Yan-qiang, WU Bin, et al. Progress of Study on Emotion in Manned Spaceflight[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2012, 25(4): 302-306.
- [27] 王协顺, 王亚平, 杨心玥, 等. 头低位卧床、卡路里限制和幽闭环境对个体认知控制和情绪状态的影响[J]. *航天医学与医学工程*, 2020, 33(5): 457-463.
WANG Xie-shun, WANG Ya-ping, YANG Xin-yue, et al. Effects of Head-down Bed Rest, Calorie Restriction and Claustrophobic Environment on Individuals' Cognitive Control and Emotional State[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2020, 33(5): 457-463.
- [28] LANG P J. THE MOTIVATIONAL ORGANIZATION OF EMOTION: Affect Reflex Connections[M]. Hillsdale: Erlbaum, 1994: 61-93.
- [29] 曾堃, 郝洛西. 适于健康照明研究的光与情绪实验方法探讨[J]. *照明工程学报*, 2016, 27(5): 1-8.
ZENG Kun, HAO Luo-xi. Experimental Method Exploration on Light and Mood in Health Lighting[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2016, 27(5): 1-8.
- [30] 蒋军, 陈雪飞, 陈安涛. 情绪诱发方法及其新进展[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 36(1): 209-214.
JIANG Jun, CHEN Xue-fei, CHEN An-tao. Mood Induction Procedures and the Recent Advancement[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2011, 36(1): 209-214.
- [31] 靳霄. 情绪视频材料的量化评定研究[D]. 上海: 第二军医大学, 2009: 19-23.
JIN Xiao. Quantitative Assessment of Emotional Video Material[D]. Shanghai: Second Military Medical University, 2009: 19-23.
- [32] GROSS J J, LEVENSON R W. Emotion Elicit Ation Using Films. *Cognition and Emotion*[J]. 1995, 9(1): 87-108.
- [33] PALMER S E, SCHLOSS K B. An Ecological Valence Theory of Human Color Preference[J]. *PNAS*, 2010, 107(19): 8877-8882.
- [34] 李启杰, 王宏伟, 莫言, 等. 负性情绪对典型航天任务绩效的影响[J]. *载人航天*, 2018, 24(6): 751-758.
LI Qi-jie, WANG Hong-wei, MO Yan, et al. Effects of Negative Emotional States on Performance of Typical Space Tasks[J]. *Manned Spaceflight*, 2018, 24(6): 751-758.
- [35] OZAWA S, MATSUDA G, HIRAKI K. Negative Emotion Modulates Prefrontal Cortex Activity During a Working Memory Task: A NIRS Study[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2014, 8: 46.
- [36] 秦海波, 裴倩萍, 吴斌, 等. 音乐放松缓解作业人员应激情绪的研究[J]. *航天医学与医学工程*, 2017, 30(3): 176-179.
QIN Hai-bo, PEI Qian-ping, WU Bin, et al. Effects of Music Relaxation on Personnel's Stress and Emotion[J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2017, 30(3): 176-179.
- [37] 傅婧仪. 地铁车厢色彩设计的视觉舒适性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
FU Jing-yi. Research on Visual Comfort of Color Design of Subway Carriages[D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [38] SONG Y, MAO F, LIU Q. Human Comfort in Indoor Environment: A Review on Assessment Criteria, Data Collection and Data Analysis Methods[J]. *IEEE Access*, 2019, 7(1): 74-86.
- [39] ALARCÃO, SORAIA M F, MANUEL J. Emotions

- Recognition Using EEG Signals: A Survey[J]. IEEE Transactions on Affective Computing, 2019, 10(3): 112-118.
- [40] JATUPAIBOON N, PAN-NGUM S, ISRASENA P. Emotion Classification Using Minimal EEG Channels and Frequency Bands[C]//The 2013 10th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE). New York:IEEE, 2013: 21-24.
- [41] HUANG D, GUAN C, ANG K K, et al. Asymmetric Spatial Pattern for EEG-based Emotion Detection[C]//The 2012 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). New York:IEEE, 2012: 1-7.
- [42] CHANEL G, KIERKELS J J M, SOLEYMANI M, et al. Short-term Emotion Assessment in A Recall Paradigm[J]. International Journal of Human Computer Studies, 2009, 67(8): 607-627.
- [43] BALCONI M, MAZZA G. Brain Oscillations and BIS/BAS (Behavioral Inhibition/Activation System) Effects on Processing Masked Emotional Cues. ERS/ERD and Coherence Measures of Alpha Band[J]. International Journal of Psychophysiology, 2009, 74(2): 158-165.
- [44] LIU Y, SOURINA O, NGUYEN M K. Real-time EEG-based Emotion Recognition and Its Applications[M]//Transactions on computational science XII. Berlin: Springer, 2011: 256-277.
- [45] 胡晓芳, 梁斌, 汤皓泉. 舰艇生活舱室色彩设计方法初探[J]. 中国舰船研究, 2012, 7(1): 52-56.
HU Xiao-fang, LIANG Bin, TANG Hao-quan. Method for Chromatic Design in Living Quarters of Ship[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2012, 7(1): 52-56.
- [46] CLARKE T, COSTALL A. The Emotional Connotations of Color: A Qualitative Investigation[J]. Color Research & Application, 2008, 33(5): 406-410.
- [47] AL-AYASH A, KANE R T, SMITH D, et al. The Influence of Color on Student Emotion, Heart Rate, and Performance in Learning Environments[J]. Color Research and Application, 2016, 41(2): 196-205.
- [48] WANG T, SHU S, MO L. Blue or Red? The Effects of Colour on the Emotions of Chinese People[J]. Asian Journal of Social Psychology, 2014, 17(2): 152-158.
- [49] ZIELIŃSKI P. An Arousal Effect of Colors Saturation: A Study of Self-reported Ratings and Electrodermal Responses[J]. Journal of Psychophysiology, 2016, 30(1): 9-16.
- [50] STONE N. Designing Effective Study Environments[C]. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 1997, 41(4): 1383-1383.
- [51] OU L C, LUO M R, WOODCOCK A, et al. A Study of Colour Emotion and Colour Preference. Part I: Colour Emotions for Single Colours[J]. Color Research and Application, 2004, 29(3): 232-240.
- [52] 江奥. 基于情绪适居性的空间站卫生区色彩设计研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2019.
JIANG Ao. Research on Color Design of Space Station Health Area Based on Emotional Habitability[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2019.
- [53] 胡添元, 许成鑫, 魏传锋, 等. 基于系统工程的载人航天器人机界面总体设计方法[J]. 航天器环境工程, 2017, 34(1): 76-80.
HU Tian-yuan, XU Cheng-xin, WEI Chuan-feng, et al. System Design Method of Human-Machine Interface for Manned Spacecraft Based on Systems Engineering[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2017, 34(1): 76-80.

责任编辑: 蓝英侨