

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2024.02.003

基于脑电特征的船员抑制功能变化研究

袁履凡¹, 谢长勇²

(1. 上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093;

2. 海军军医大学基础医学院, 上海 200433)

【摘要】目的 探讨长期处于密闭环境下对船员抑制功能的影响及其神经电生理机制。**方法** 采集受试者完成情绪 Stroop 色词测验时的行为学数据和脑电数据。从心理和生理的角度比较航行时间长组船员和航行时间短组船员在受到正性、中性、负性情绪诱发后的 Stroop 效应量和准确率, 以及脑电信号功率谱密度。**结果和结论** 在行为指标上, 刺激类型主效应显著 ($F_{(1,42)} = 3.331, p=0.041$), 中性刺激下两组的准确率高于正性、负性刺激; 在脑电指标上, 两组之间在 delta、beta 频段呈现出正性、中性和负性情绪诱发下的功率值显著差异; 在正性、负性与中性情绪刺激的诱发下, delta、theta 和 beta 频段呈现出功率值显著差异。长期在密闭环境下工作和生活的船员尚未出现显著的行为学抑制功能衰退, 但脑电功率出现了区域性的改变, 差异主要集中在航行时间长的船员中 (77.7%)。**文章的创新之处** 将情绪 Stroop 范式与功率谱密度相结合来探究长期处于密闭环境下船员的抑制功能变化。

【关键词】 情绪 Stroop; 功率谱密度; 抑制功能**【中图分类号】** R318**【文献标志码】** A

文章编号: 1674-1242 (2024) 02-0123-08

Study on Cognitive Function Changes of Ocean Crew based on EEG Characteristics

YUAN Lvfan¹, XIE Changyong²

(1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Basic Medicine, Naval Medical University, Shanghai 200433, China)

【Abstract】Objective Explore the effect of long-term closed environment on crew's inhibitory function and its neurophysiological mechanism. **Methods** Behavioral data and EEG data were collected when the subjects completed the emotional Stroop color word test. From the psychological and physiological point of view, this paper compares the Stroop effect and accuracy and the power spectrum density of EEG signals after positive, neutral and negative emotions were induced in the crew of long sailing time group and short sailing time group. **Results and Conclusion** In behavioral indicators, the main effect of stimulus type is significant ($F_{(1,42)} = 3.331, p=0.041$), and the accuracy of the two groups under neutral stimulus is higher than that under positive and negative stimulus. In terms of EEG indexes, there are significant differences in power values induced by positive, neutral and negative emotions between the two groups in delta and beta bands. Under positive, negative and neutral emotional stimulus, there are significant differences in power

收稿日期: 2023-11-14。

基金项目: 军委科技委基金项目 (21AHY02)。

作者简介: 袁履凡 (1999—), 女, 江苏省东台市人, 硕士研究生, 从事电生理研究。

通信作者: 谢长勇, 男, 教授, 博士生导师, 电话 (Tel.): 021-81815011, 邮箱 (E-mail): Xiechangyong@smmu.edu.cn。

values in delta, theta and beta bands. The crew who has been working and living in a closed environment for a long time have not experienced a significant decline in behavioral inhibition, but the brain electric power has changed regionally, and the difference is mainly concentrated in the crew who have been sailing for a long time (77.7%). **The innovation of the article** Emotional Stroop paradigm and power spectral density are combined to explore the changes of crew's inhibitory function in long-term closed environment.

【Key words】 Emotional Stroop; Power Spectral Density; Cognitive Function

0 引言

船员在浩瀚的海洋上航行,大部分船体隐藏在水面之下,船员长期工作和生活在孤立封闭的环境中。在这种环境中,任务的完成高度依赖船员抑制功能的完整性。不同船员对这种特殊环境的适应能力、心理和生理承受力都是不同的^[1]。

已有研究表明,生活在密闭和孤立的环境中会影响人的情绪和认知^[2],人在隔离期间会出现精神损伤,包括情绪和认知能力的恶化。任召祺等^[3]研究发现密闭驻训会对官兵产生较强的应激刺激。在应激条件下,个体的注意力转换、记忆提取等抑制功能出现衰退现象。通过对比新兵和老兵发现,新兵应激具有反应早、峰值高、持续时间长和恢复相对缓慢的特点。Jan等^[4]调查了30天短期隔离对人的情绪、认知和大脑活动的影响,发现顶叶皮层的活动随着时间的推移而减少,这可能代表了神经对外界刺激的适应力下降,说明长时间处于密闭的特殊环境下对船员的认知功能造成了影响,因此在选拔船员的过程中需要选择认知与情绪状态良好且稳定的个体。将脑电信号分析应用于特殊作业人员的认知状态分析,相较于心理量表等方式更具有客观性。同时,神经电生理信号相较于其他生理信号,有时能够更加准确地表达受试者的心理意图和情绪倾向。Chloe等^[5]研究了44名受试者在模拟潜艇控制室环境中进行目标运动分析(Target Motion Analysis, TMA)时的脑电功率谱密度,研究发现个体化 α 峰频(Individual Alpha Frequency, IAF)更高的人能更快地适应新环境,是预测认知功能的生物标志物。

抑制功能是指通过调节人的注意力、行为、思想和情绪等克服内外部干扰,从而有效地完成预期

目标的功能。抑制功能属于大脑的高级认知功能,是脑老化过程中较早出现衰退现象的认知成分之一,可以作为脑老化的早期敏感指标^[6]。当个体在实现特定目标的过程中,遇到干扰信息、无关刺激或自身优势反应的影响时,抑制功能负责抑制此类干扰信息,因此抑制功能也叫抑制控制能力。具有良好抑制控制能力的个体,当其面对多变的环境时可以做出灵活的反应或行为,因此抑制功能在个体的发展中具有举足轻重的作用。关于长期处于密闭环境下的船员人群是否存在抑制功能变化问题,亟需研究人员的关注^[7]。

情绪 Stroop 色词测验(Emotional Stroop Color and Word Test, ESCWT)是基于经典的 Stroop 效应探讨情绪信息处理的实验范式,该任务被认为是考察个体对情绪刺激的干扰抑制功能的经典实验范式,其用情绪图片进行刺激,观察受试者在看到图片后色词测验的准确性和反应速度^[8]。研究发现,当图片具有强烈的情感内容(尤其是负性内容)时,参与者的反应时间往往会受到干扰,因为他们难以忽略图片中的情感内容^[9]。通过这种范式,研究者可以探索不同情感状态对个体认知过程的影响,以及某些特定群体是否对情感刺激更加敏感。脑电波(Electroencephalogram, EEG)是人体大脑神经活动最直接且客观的体现,可以及时反映情绪变化^[10]。EEG的高时间分辨率使其非常适合探测 ESCWT 期间的情绪处理,因为 EEG 允许在任务执行过程中精确地量化神经活动的幅度和持续时间^[11]。

本研究从抑制控制着手,运用 EEG 技术,在 ESCWT 范式下观察并探讨长期处于密闭环境下对船员抑制功能的影响及其神经电生理机制。

1 实验方法及材料

1.1 实验对象

本次实验招募了44名男性船员，平均年龄为 (26.61 ± 2.07) 岁，航行时间中位数为5年，其中航行时间 > 5 年的有21人，航行时间 ≤ 5 年的有23人。在实验之前，所有受试者都经过了预先筛选，以确保他们没有任何精神疾病史，也没有长期服用药物。要求每位受试者在实验前一天避免饮用咖啡、茶、饮料等刺激性饮品。受试者均填写了研究知情同意书。

1.2 实验程序 and 任务

Stroop实验程序如图1所示。情绪诱发使用IAPS图片库完成^[12]，正性、中性和负性刺激各60次，以随机顺序呈现。色词测验由3个中文汉字（“红”“黄”“绿”）和3种颜色（红色、绿色和蓝色）两两搭配组成两种刺激条件（色词一致和色词不一致）。字词一致和字词不一致各90次，以随机顺序呈现，一致和不一致刺激出现的频率均为50%，共180个试次。正式实验前设置练习环节，让受试者充分练习直到完全理解。刺激序列如下：注视点“+”呈现1000ms，情绪诱发呈现500ms，刺激呈现1000ms，允许反应时间为刺激开始呈现后1.5s内。要求受试者在保证正确的前提下尽快对颜色进行判别，用双手食指和拇指按键，判别红色则用左手按键盘上的“D”键，判别绿色则用右手按键盘上的“K”键，判别蓝色则按键盘上的空格键。实验完成后给予受试者一定的酬劳。

船员的抑制功能用Stroop效应量来表示，该指标越大，表示抑制功能越差。Stroop效应量是回答正确的试次中，不一致条件的反应时间均值与一致条件的反应时间均值之差。

1.3 数据采集与预处理

采用59导联湿电极帽，脑电采集系统为博睿康科技有限公司生产的NSW364无线脑电设备，采样频率为1000Hz，实验过程中电极阻抗保持在 $10k\Omega$ 以下。使用EEGLAB Toolbox在Matlab 2022b软件中对采集的EEG数据进行降采样到256Hz，带通滤波为 $0.1 \sim 45\text{Hz}$ ，进行全脑平均重参考，通过独立成分分析去除眨眼伪迹和肌电活动等噪声，对脑电信号波幅高于 $100\mu\text{V}$ 的数据进行剔除等预处理^[13]。对数据进行epoch提取，以情绪图片刺激开始时至情绪图片刺激后1500ms为一个epoch，最终的有效片段为若干时间连续的1.5s的epoch。

1.4 特征提取

功率谱密度分析是EEG常用的手段之一，表示输入信号在一定频率范围内的功率^[14]。计算功率谱密度的方法主要有直接法、多窗口法和Welch法^[15]。对每段epoch采用Welch法估计信号的功率谱密度之后，对4个频段（delta频段 $1 \sim 3\text{Hz}$ ，theta频段 $4 \sim 7\text{Hz}$ ，alpha频段 $8 \sim 13\text{Hz}$ ，beta频段 $14 \sim 30\text{Hz}$ ）取平均值，每个通道的相对功率计算为该频段功率与总功率的比。相关研究表明，额叶和枕叶是产生情绪的主要脑区^[16]。考虑到EEG

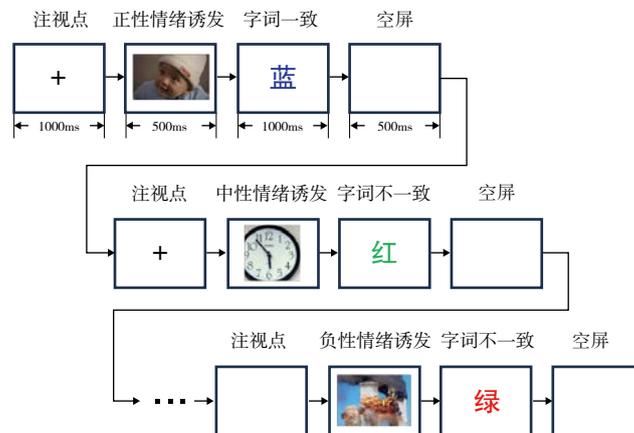


图1 Stroop实验程序

Fig. 1 Schematic diagram of Stroop experimental program

功率的脑区依赖性变化,将通道划分为额叶(FPz、FP1、FP2、AF3、AF4、AF7、AF8、Fz、F1-8)、顶叶(Pz、P3、P4、CP1-4)、枕叶(Oz、O1、O2、POz、PO3-8)和颞叶(FT7、FT8、T7、T8、TP7、TP8、CP5、CP6、P5-8)脑区,计算相对功率谱密度,以便进一步探究不同情绪诱发带来的区域特异性神经活动^[13]。在本研究中,脑地形图在Matlab 2022b软件上得到实现。

1.5 统计学处理

使用SPSS27.0软件对数据进行统计分析。服从正态分布的计量资料以 $(\bar{x} \pm s)$ 进行统计描述。行为学数据及EEG功率的比较采用两因素重复测

量方差分析、独立样本 t 检验和配对 t 检验,其中行为学数据比较为航行时间组别2水平(航行时间长组/航行时间短组) \times 刺激条件3水平(正性/中性/负性)。 $p < 0.05$ 表示差异具有统计学意义,使用双侧显著性检验。

2 实验结果

2.1 行为学数据

本研究共纳入受试者44名,航行时间长组平均年龄 (27.14 ± 1.98) 岁,航行时间短组平均年龄 (26.13 ± 2.07) 岁。两组受试者年龄差异无统计学意义($p > 0.05$),具有可比性。航行时间长组和航行时间短组的Stroop效应量及准确率如图2所示。航

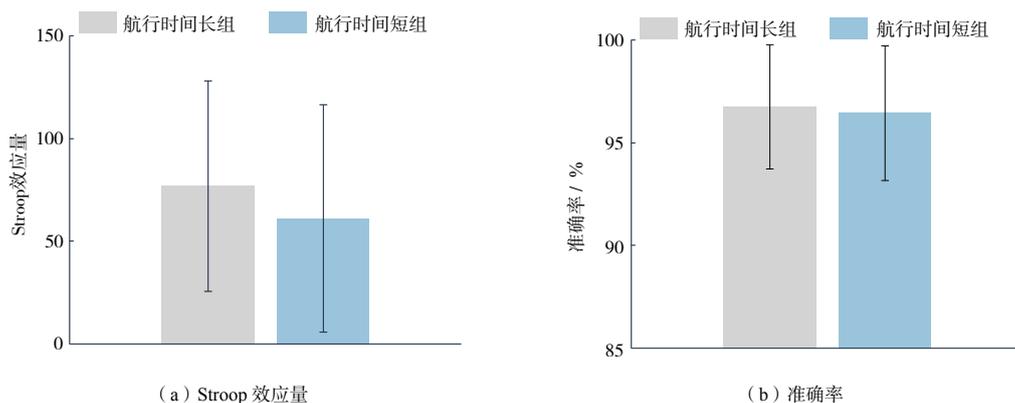


图2 航行时间长组和航行时间短组的Stroop效应量及准确率
Fig.2 Stroop effect and accuracy of long and short sailing time group

行时间长组船员的Stroop效应量为 (76.78 ± 51.26) ,准确率为 $(96.77 \pm 3.04)\%$;航行时间短组船员的Stroop效应量为 (61.25 ± 55.24) ,准确率为 $(96.47 \pm 3.29)\%$,如表1所示。

利用行为学数据(Stroop效应量、准确率),进行双因素(组别和刺激条件)的重复测量方差分析,分析组别和刺激条件对行为学表现的影响,结果如表2所示。Stroop效应量分析结果显示,组别($F_{(1,42)} = 1.325, p = 0.256$)、刺激类型($F_{(1,42)} = 0.714, p = 0.493$)与交互作用($F_{(1,42)} = 1.056, p = 0.352$)无统计学意义。准确率分析结果显示,刺激类型主效应显著($F_{(1,42)} = 3.331, p = 0.041$),刺激类型会对准确率产生影响,中性刺激下的准确率高于正性和负性刺激下的准确率,组别($F_{(1,42)} = 0.159,$

$p = 0.692$)与交互作用($F_{(1,42)} = 1.243, p = 0.294$)无统计学意义。

2.2 脑电数据

delta频段相对功率谱密度地形图如图3(a)所示,与航行时间短组相比,航行时间长组呈现出额叶功率降低的趋势。采用独立样本 t 检验,发现航行时间长组与航行时间短组的EEG delta频段活动在正性($t = -2.6837, p = 0.0104$)、中性($t = -2.2296, p = 0.0312$)和负性($t = -2.2470, p = 0.0300$)情绪的诱发下存在显著的统计学差异;采用配对 t 检验,发现航行时间长组($t = -2.4501, p = 0.0236$)的EEG delta频段活动在正性和负性情绪诱发之间存在显著的统计学差异。

theta频段相对功率谱密度地形图如图4(a)

表1 航行时间长组与航行时间短组的情绪 Stroop 行为数据比较 ($\bar{x} \pm s$)

Tab.1 Comparison of emotional Stroop behavior data between long and short sailing time groups ($\bar{x} \pm s$)

	情绪	Stroop 效应量	准确率
航行时间长组	正性	71.29 ± 45.89	96.11 ± 3.04
	中性	78.24 ± 52.04	97.94 ± 1.82
	负性	80.79 ± 57.28	96.27 ± 3.72
航行时间短组	正性	66.32 ± 63.53	96.59 ± 3.20
	中性	50.6 ± 44.44	96.81 ± 2.79
	负性	66.82 ± 56.96	96.01 ± 3.88

表2 行为学结果的统计比较

Tab.2 Statistical comparison of behavioral results

效应	双因素的重复测量方差分析		
	组别主效应 $F_{(1,42)} (p)$	刺激类型主效应 $F_{(1,42)} (p)$	交互效应 $F_{(1,42)} (p)$
Stroop 效应量	1.325 (0.256)	0.714 (0.493)	1.056 (0.352)
准确率	0.159 (0.692)	3.331 (0.041)	1.243 (0.294)

所示，与航行时间短组相比，航行时间长组呈现出枕叶功率降低的趋势。采用独立样本 t 检验，发现航行时间长组与航行时间短组的 EEG theta 频段活

动在正性、中性和负性情绪的诱发下均不存在统计学差异。采用配对 t 检验，发现航行时间长组的 EEG theta 频段活动在正性 ($t = 2.0897, p = 0.0496$)、

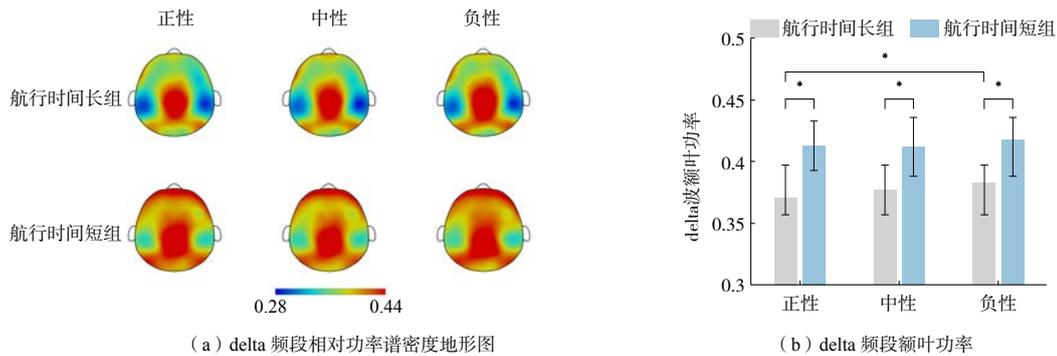


图3 delta 频段功率分析结果

Fig.3 Delta band power analysis results

注：* 表示 $p < 0.05$ ，** 表示 $p < 0.01$ ，*** 表示 $p < 0.001$ ，误差条形图表示平均值 ± 标准差。

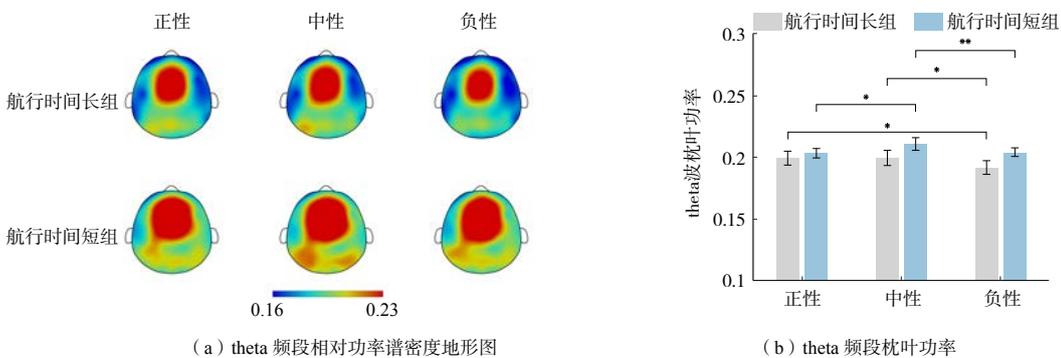


图4 theta 频段功率分析结果

Fig.4 Theta band power analysis results

注：* 表示 $p < 0.05$ ，** 表示 $p < 0.01$ ，*** 表示 $p < 0.001$ ，误差条形图表示平均值 ± 标准差。

中性 ($t = -2.7126, p = 0.0127$) 和负性情绪的诱发下存在显著的统计学差异, 而航行时间短组的 EEG theta 频段活动在正性 ($t = 2.5672, p = 0.0184$)、负性 ($t = 3.0277, p = 0.0062$) 和中性情绪的诱发下存在显著的统计学差异。

alpha 频段相对功率谱密度地形图如图 5 (a) 所示, 与航行时间短组相比, 航行时间长组有顶叶功率升高的趋势。采用独立样本 t 检验和配对样本 t 检验, 发现在正性、中性和负性情绪的诱发下两组 EEG theta 频段活动不存在统计学差异。

beta 频段相对功率谱密度地形图如图 6 (a) 所示, 与航行时间短组相比, 航行时间长组呈现出额叶、颞叶功率同步升高的趋势。在额叶区域, 采用独立样本 t 检验, 发现航行时间长组与航行时间短组的 EEG beta 频段活动在正性 ($t = 2.9927, p = 0.0046$)、中性 ($t = 2.7700, p = 0.0083$) 和负性 ($t = 3.0211, p = 0.0043$) 情绪的诱发下存在显著的统

计学差异。采用配对 t 检验, 发现航行时间长组的 EEG beta 频段活动在正性 ($t = 2.0997, p = 0.0486$)、负性 ($t = -2.1709, p = 0.0422$) 和中性情绪的诱发下存在显著的统计学差异。在颞叶区域, 采用独立样本 t 检验, 发现航行时间长组与航行时间短组的 EEG beta 频段活动在正性 ($t = 2.6524, p = 0.0112$)、中性 ($t = 2.7666, p = 0.0084$) 和负性 ($t = 2.8206, p = 0.0073$) 情绪的诱发下存在显著的统计学差异。采用配对 t 检验, 发现航行时间长组的 EEG beta 频段活动在正性 ($t = 2.4490, p = 0.0237$)、负性 ($t = -3.0697, p = 0.0060$) 和中性情绪的诱发下存在显著的统计学差异。

3 讨论

本研究旨在用 ESCWT 和 PSD 方法探讨新、老船员的抑制功能差异, 探索长期处于密闭环境下对人的抑制功能的影响。研究结果显示, 新、老船员有不同的抑制功能差异特征。在 Stroop 任务中, 相

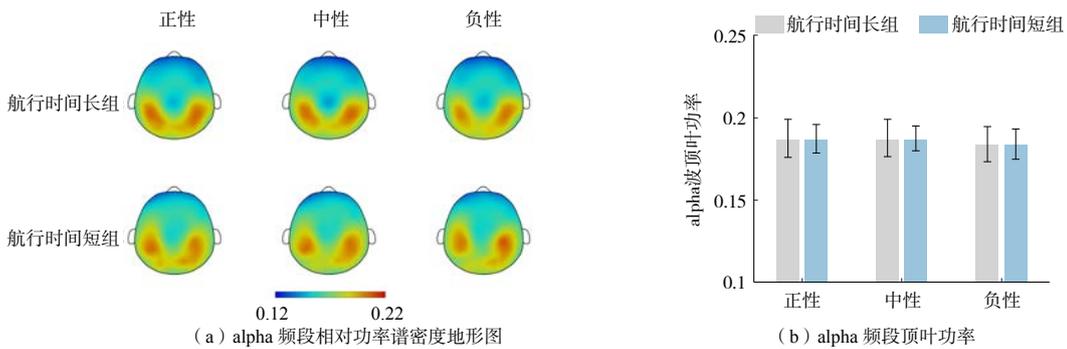


图 5 alpha 频段功率分析结果

Fig.5 Alpha band power analysis results

注: * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$, *** 表示 $p < 0.001$, 误差条形图表示平均值 \pm 标准差。

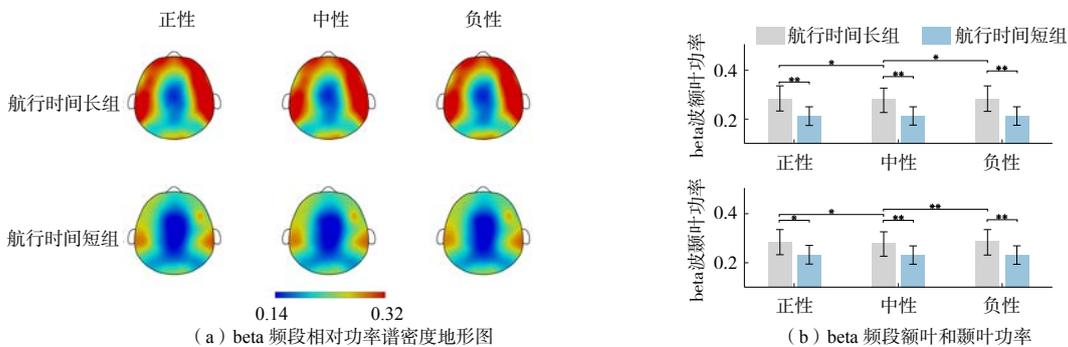


图 6 beta 频段功率分析结果

Fig.6 Beta band power analysis results

注: * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$, *** 表示 $p < 0.001$, 误差条形图表示平均值 \pm 标准差。

较于在色词一致条件下,受试者在色词不一致条件下进行颜色判断时反应时间更长,错误率更高,这种现象称为 Stroop 效应。情绪相关刺激影响颜色命名的现象称为情绪 Stroop 效应,它反映了刺激中的情绪信息对非情绪信息的影响^[17]。本研究的行为学结果显示,两组受试者之间的 Stroop 效应量差异无统计学意义,长期处于密闭环境下并未对受试者的抑制功能造成很大的影响。准确率的刺激类型主效应显著 ($F_{(1,42)}=3.331, p=0.041$),中性刺激下的准确率高于正性和负性刺激。一方面原因可能是样本量太少,另一方面原因可能是选择的群体易受情绪影响。在脑电数据中,两组受试者之间的相对功率谱密度差异主要体现在额叶和枕叶上,这与前人的研究一致,额叶和枕叶是产生情绪的主要脑区^[16]。delta 频段实际上在人的注意力等方面发挥着重要作用^[18]; theta 频段与记忆和情绪调节有关^[19]; alpha 频段功率的降低反映了大脑活动的增加;与更高的情绪调节能力有关^[20]; beta 频段与注意力不集中相关^[21]。

本研究探索了长期工作和生活在密闭环境下的船员的抑制功能变化情况,Stroop 效应量结果显示尚未出现显著的抑制功能变化,但准确率的结果显示受试者易受情绪刺激影响。两组受试者在正性、中性和负性情绪诱发下的差异在 delta 频段额叶、beta 频段额叶和颞叶具有一致性。随着时间的推移,受试者的 delta 频段相对功率谱密度降低、beta 频段相对功率谱密度升高,这提示长期在密闭环境下工作和生活的船员的脑电功率出现了区域性的改变,集中在 delta 频段额叶、beta 频段额叶和颞叶。在 delta、theta 和 beta 3 个频段中,航行时间长组在正性、中性和负性情绪的诱发下功率差异显著,而航行时间短组只在 theta 频段出现正性、负性和中性情绪诱发下的功率显著差异,由于差异主要集中在航行时间长组(77.7%),这提示长期在密闭环境下工作和生活的船员更难忽略图片中的情感内容,更易受到情绪刺激干扰,且 beta 和 theta 频段更能捕捉到这种差异。

在现有的远洋船员选拔体系中,并没有明确的指标来筛选哪类人适合远洋航行,适应在与外界失

联的狭小船体内作业。本研究的结果提示了相较于其他指标,神经电生理信号有时能够更加准确地表达受试者的情绪倾向。重视远洋船员因环境恶劣、空间密闭狭小而产生的困扰情绪并及早开展心理辅导或采取其他措施,如运动等,或可更好地保障航行安全。因本研究是横断面研究,后续在开展相关研究时将关注船员自身前后的行为学和脑电变化,增加样本量,以期获得更具说服力的实证依据。脑电与行为学两方面的观察可能有潜在联系,但本研究未对此进行讨论,此问题仍需进一步研究。

参考文献

- [1] ISABELLA M, KURT L, MIKAELA O, *et al.* The sleep, circadian, and cognitive performance consequences of watchkeeping schedules in submariners: a scoping review[J]. *Sleep Medicine Reviews*, 2023, 72:101845.
- [2] ROMANELLA S M, SPRUGNOLI G, RUFFINI G, *et al.* Noninvasive brain stimulation & space exploration: opportunities and challenges [J]. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 2020(119): 294-319.
- [3] 任召祺, 曾丁, 武润松, 等. 密闭驻训环境下新兵应激反应变化及其对抑制功能的影响 [J]. *武警医学*, 2022, 33(8): 663-666, 671.
REN Zhaoqi, ZENG Ding, WU Jiansong, *et al.* Changes of stress response of recruits in closed training environment and its influence on cognitive function [J]. *Armed Police Medicine*, 2022, 33(8):663-666, 671.
- [4] JAN W, JAVELLE F, KLEIN T, *et al.* Neurophysiological, neuropsychological, and cognitive effects of 30 days of isolation [J]. *Experimental Brain Research*, 2019, 237(6): 1563-1573.
- [5] CHLOE A D, INA B, SOPHIE J, *et al.* Neural and cognitive correlates of performance in dynamic multi-modal settings [J]. *Neuropsychologia*, 2023,180:108483.
- [6] BÉLANGER S, BELLEVILLE S. Semantic inhibition impairment in mild cognitive impairment: a distinctive feature of upcoming cognitive decline? [J]. *Neuropsychology*, 2009, 23(5):592-606.
- [7] FRANCES G, MICHAEL L, PIETER B, *et al.* Impact of the occupational environment of a submerged submarine on cardiometabolic health of Royal Navy submariners [J]. *Occupational and Environmental Medicine*, 2020, 77(6):368-373.
- [8] STROOP J R. Studies of interference in serial verbal reactions [J]. *Journal of Experimental Psychology*, 1935(18): 643-662.
- [9] MACLEOD C M, MACDONALD P A. Interdimensional interference

- in the Stroop effect: uncovering the cognitive and neural anatomy of attention [J]. **Trends in Cognitive Sciences**, 2000, 4(10): 383-391.
- [10] BACHMANN M, PÄESKE L, KALEV K, *et al.* Methods for classifying depression in single channel EEG using linear and nonlinear signal analysis [J]. **Computer Methods and Programs in Biomedicine**, 2018(155): 11-17.
- [11] JI-WUNG H, SOYEON B, JUN-MO K, *et al.* META-EEG: Meta-learning-based class-relevant EEG representation learning for zero-calibration brain-computer interfaces[J]. **Expert Systems with Applications**, 2024, 238(PD):121986.
- [12] BRANCO D, GONÇALVES Ó F, BADIA S B I. A systematic review of international affective picture system (IAPS) around the world[J]. **Sensors (Basel)**. 2023 Apr 10;23(8):3866.
- [13] KAKKOS L, DIMITRAKOPOULOS G N, SUN Y, *et al.* EEG fingerprints of task-independent mental workload discrimination[J]. **IEEE journal of biomedical and health informatics**, 2021, 3824-3833.
- [14] NIKOL F, HANS-JOACHIM B, ELIAS J R, *et al.* From driver to supervisor: comparing cognitive load and EEG-based attentional resource allocation across automation levels[J]. **International Journal of Human - Computer Studies**, 2024, 182:103169.
- [15] 胡理, 张治国. 脑电信号处理与特征提取 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- HU Li, ZHANG Zhiguo, EEG signal processing and feature extraction [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [16] YU M C, XIAO S S, HUA M L, *et al.* EEG-based emotion recognition in an immersive virtual reality environment: From local activity to brain network features[J]. **Biomedical Signal Processing and Control**, 2022, 72(PA):103349.
- [17] STRAUB E R, SCHMIDTS C, KUNDE W, *et al.* Limitations of cognitive control on emotional distraction: congruency in the color Stroop task does not modulate the emotional Stroop effect[J]. **Cognitive Affect and Behavioral Neuroscience**, 2022, 22(1):21-41.
- [18] KNYAZEVA G G. EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes[J]. **Neuroscience and Biobehavioral Reviews**, 2012, 36(1):677-695.
- [19] HERWEG N A, SOLOMON E A, KAHANA M J. Theta oscillations in human memory[J]. **Trends Cognitive Sciences**, 2020, 24(3):208-227.
- [20] TORTELLA-FELIU M, MORILLAS-ROMERO A, BALLE M, *et al.* Spontaneous EEG activity and spontaneous emotion regulation[J]. **International Journal of Psychophysiol**, 2014, 94(3):365-372.
- [21] ROH S C, PARK E J, SHIM M, *et al.* EEG beta and low gamma power correlates with inattention in patients with major depressive disorder[J]. **Journal of Affective Disorders**, 2016(204):124-130.