

DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20240773

· 论 著 ·

竞赛诱发的精神疲劳对认知能力的影响及心电特征分析

李川涛¹, 陈 栈¹, 江 炜², 陈志远², 余 浩^{1*}

1. 海军军医大学(第二军医大学)海军特色医学中心, 上海 200433

2. 上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093

[摘要] **目的** 通过实验研究寻找对精神疲劳灵敏的认知能力评估范式和心电特征。**方法** 追踪收集上海理工大学10名健康大学生被试在参加为期4 d的全国大学生电子设计竞赛期间的斯坦福嗜睡量表(SSS)得分、睡眠时长、认知任务表现及心电图信号数据, 计算认知任务期间的心电时域特征、频域特征和信息域特征等10项特征指标, 分析对精神疲劳变化敏感的认知任务表现和心电特征。**结果** 反映精神疲劳的SSS得分($\chi^2=23.116$, $P<0.001$)和睡眠时长($\chi^2=19.608$, $P<0.001$)在4 d竞赛期间的差异均有统计学意义。在认知任务表现上, Stroop任务中的字词-颜色一致正确率、字词-颜色不一致正确率及视听竞争任务中的单视觉目标刺激正确率、视觉目标听觉非目标刺激正确率与SSS得分均呈负相关(均 $P<0.05$)。在心电特征指标上, Stroop任务中的心电特征庞加莱图SD2与睡眠时长呈正相关($P<0.05$), 2-back任务中的庞加莱图SD2与SSS得分呈正相关、与睡眠时长呈负相关(均 $P<0.05$)。**结论** Stroop任务和视听竞争任务的反应正确率是反映精神疲劳灵敏的认知能力指标, Stroop任务和2-back任务中的庞加莱图SD2是反映精神疲劳灵敏的心电特征指标。

[关键词] 精神疲劳; 心电特征; 认知能力; 庞加莱图

[引用本文] 李川涛, 陈栈, 江炜, 等. 竞赛诱发的精神疲劳对认知能力的影响及心电特征分析[J]. 海军军医大学学报, 2025, 46(6): 751-759. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20240773.

Impact of competition-induced mental fatigue on cognitive abilities and electrocardiographic features

LI Chuantao¹, CHEN Zhan¹, JIANG Wei², CHEN Zhiyuan², YU Hao^{1*}

1. Naval Medical Center, Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

2. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

[Abstract] **Objective** To look for cognitive assessment paradigms and electrocardiographic (ECG) characteristics sensitive to mental fatigue through an experimental study. **Methods** Data were collected from 10 healthy students of the University of Shanghai for Science and Technology who participated in the 4-day National Undergraduate Electronics Design Contest, including their Stanford sleepiness scale (SSS) scores, sleep duration, cognitive task performance, and ECG signal data. Ten ECG features, including time-domain, frequency-domain, and information-domain characteristics, were extracted during cognitive tasks. The cognitive task performance and ECG features sensitive to changes in mental fatigue were analyzed. **Results** Significant differences were observed in SSS scores ($\chi^2=23.116$, $P<0.001$) and sleep duration ($\chi^2=19.608$, $P<0.001$) across the 4 d. For cognitive task performance, word-color congruent accuracy and word-color incongruent accuracy in the Stroop task and Single-visual target stimulus accuracy and Visual target-auditory non-target stimulus accuracy in the audiovisual competition task all showed significant negative correlations with SSS scores (all $P<0.05$). Regarding ECG features, Poincaré plot SD2 during the Stroop task was positively correlated with sleep duration ($P<0.05$), while Poincaré plot SD2 during the 2-back task was positively correlated with mental fatigue assessment scores and was negatively correlated with sleep duration (both $P<0.05$). **Conclusion** The accuracy of the Stroop task and audiovisual competition task is a cognitive ability indicator sensitive to mental fatigue, while the Poincaré plot SD2 during Stroop and 2-back tasks is an ECG indicator sensitive to mental fatigue.

[Key words] mental fatigue; electrocardiographic features; cognitive ability; Poincaré plot

[收稿日期] 2024-11-14 **[接受日期]** 2025-02-18

[基金项目] 军队科研项目(24AZ1001), 国家自然科学基金青年科学基金(82101970). Supported by Military Scientific Research Project (24AZ1001) and Youth Program of National Natural Science Foundation of China (82101970).

[作者简介] 李川涛, 博士, 助理研究员. E-mail: lichuantao614@126.com

*通信作者(Corresponding author). E-mail: yuhaosh@163.com

[Citation] LI C, CHEN Z, JIANG W, et al. Impact of competition-induced mental fatigue on cognitive abilities and electrocardiographic features[J]. Acad J Naval Med Univ, 2025, 46(6): 751-759. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20240773.

精神疲劳是由长时间的认知活动负荷引起的一种生理心理状态,表现为认知能力受损、警觉和唤醒水平下降等,会对日常工作、生活产生不利影响^[1-2]。精神疲劳包括主观感受、行为表现以及生理指标3个维度^[3],对于不同的精神疲劳维度评价的工具也不同。在主观感受上,精神疲劳可以通过主观量表进行评定,常用的量表有斯坦福嗜睡量表(Stanford sleepiness scale, SSS)、简易疲劳问卷以及多维疲劳问卷等^[4-8]。在行为表现上,个体在精神疲劳时会在认知任务上表现出反应时变长、反应准确率下降^[3,6,9]。在生理指标上,精神疲劳后个体的生理活动会发生变化,这一变化可以被反映脑活动的脑电图^[10]、功能MRI^[11]以及功能性近红外光谱技术^[12]呈现,此外反映心率变化的心电图也是一个好的生理变化指标。相较于脑成像技术,心电图具有操作方便、花费少、高信噪比等优点,基于心电图的心率变异性分析法常被用于精神疲劳评估^[13-16]。

以往对精神疲劳的研究范式中多针对精神疲劳的1个或2个维度进行研究,如利用几十分钟到几个小时的认知任务诱发精神疲劳后,分别利用主观量表或生理信号监测设备收集问卷或生理数据,并根据数据分析结果达成对疲劳的监测、分类或评价。这种研究范式的不足在于:(1)不同研究诱发疲劳的任务时长不同,这可能会影响监测结果,导致对于精神疲劳的阐释不同^[17]。(2)诱发疲劳的任务都缺乏一定的生态效度,没有在实际生活或工作情景中监测疲劳的变化^[18]。根据飞行员保障经验,飞行事故往往发生在任务后期,而累积性疲劳的危害往往更严重,因此相关检测更有应用价值。(3)短时间内的疲劳诱发所受的额外变量影响太大,如被试的情绪状态、实验当天的身体机能等都会对疲劳诱发的结果产生干扰^[19-21]。研究者们为了解决这些问题尝试设计不同的实验范式,如Hassan等^[22]设计的精神疲劳诱发方案包括AX连续性测试、n-back任务、视觉搜索任务和心理旋转任务等4个任务,且统一了任务时间、尝试了使精神疲劳诱发更加生态化和标准化;Lam等^[23]探索

精神疲劳在持续4d的青少年定向越野比赛备战期间的变化,结果发现主观感受的精神疲劳在4d内持续增加。然而,研究者们没有同时考虑到以往研究范式存在的上述问题,只回应了其中的1~2个问题。本研究尝试在生态效度较高的环境中,结合3个维度对个体连续的精神疲劳变化进行监测,寻找对精神疲劳灵敏的认知能力评估范式和心电图特征,为累积性疲劳的预警提供理论储备。

1 对象和方法

1.1 研究对象 在全国大学生电子设计竞赛中招募10名健康、无精神疾病、右利手的来自上海理工大学的大学生,年龄21~24岁,男8人、女2人。全国电子设计竞赛是教育部倡导的大学生学科竞赛之一,竞赛内容包括理论设计和实际制作,对于参赛学生的理论基础和实践创新能力有较高的要求。该竞赛赛期为4d,组织采用“半封闭、相对集中”的方式进行,参赛学生被要求在4d内完成竞赛任务^[24]。根据以往参赛学生的反馈,此竞赛任务压力大且影响睡眠时间,可能产生累积性疲劳。本研究通过采集10名学生4d内的行为表现和心电数据来探索与疲劳有关的行为和生理指标,每名学生在参与本研究前均已签署知情同意书。本研究经过海军军医大学医学研究伦理委员会审核批准(20210305)。

1.2 研究工具

1.2.1 疲劳评估工具 通过睡眠时长统计和主观评估量表SSS来评估疲劳程度。SSS采用7点计分,得分越高表示越疲劳,常被用来评估个体在某一时刻的疲劳程度。

1.2.2 认知任务 采用以下3种认知类任务来反映被试疲劳程度的变化。(1) Stroop任务:任务流程如图1A所示,任务中包含3个目标字词(红、绿、蓝)与3种颜色(红、绿、蓝)搭配,字词-颜色随机呈现一致(如字体为红色的“红”字)或不一致(如字体为绿色的“红”字)刺激,一次任务由180个试次组成,一致(字词颜色与词义相同)和不一致(字词颜色与词义不同)各90个试次。

刺激序列流程如下: 固定十字注视点呈现 1 s, 图片刺激呈现 0.4 s, 刺激呈现 1 s, 随后是 0.5 s 的黑屏, 允许反应时间为刺激开始呈现后 1.5 s 内。被试需要在刺激呈现后尽快对字词的颜色进行按键反应 (如蓝色=左手或右手拇指按空格键, 红色=左

手食指按 D 键, 绿色=右手食指按 K 键)。在正式任务开始前, 所有被试先完成练习, 确保被试熟悉任务要求和按键反应的规则。任务表现包括字词-颜色一致时的反应正确率和反应时, 以及字词-颜色不一致时的反应正确率和反应时。

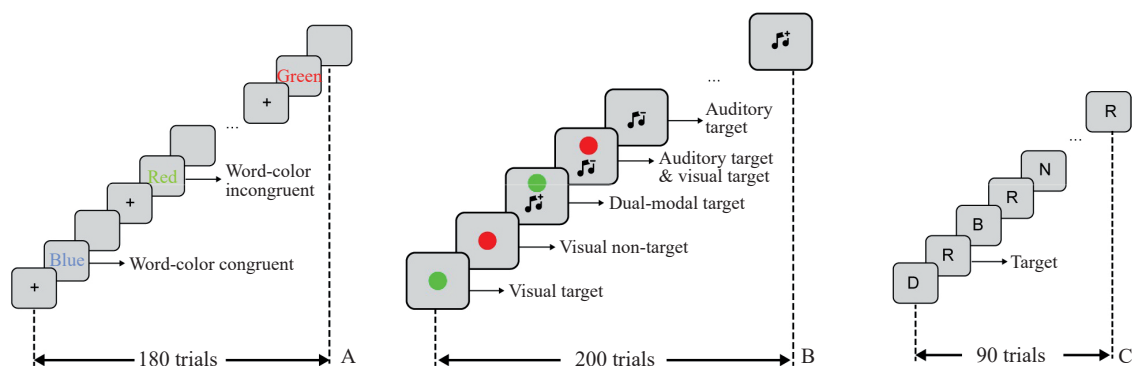


图 1 3 种认知任务操作流程

Fig 1 Operational procedures of 3 cognitive tasks

A: Procedure of the Stroop task; B: Procedure of the audiovisual task; C: Procedure of the 2-back task.

(2) 视听竞争任务: 任务流程如图 1B 所示, 任务中包含视觉和听觉 2 类刺激, 视觉刺激包括红色圆圈和绿色圆圈 (绿色圆圈为目标刺激), 听觉刺激包括 1 kHz 和 2 kHz 的音频 (2 kHz 音频为目标刺激), 一次任务由 200 个试次组成, 其中目标刺激占 50%。视觉刺激和听觉刺激以单个或一定的组合形式呈现, 当其中任意一种刺激类型为目标刺激时, 该刺激 (组合) 为目标刺激, 被试需要按键反应。任务表现包括不同目标刺激 (如单视觉目标刺激、单听觉目标刺激等) 时的反应正确率和反应时。

(3) 2-back 任务: 任务流程如图 1C 所示, 任务以字母作为刺激, 要求被试将刚出现过的刺激与前面的第 2 个刺激相比较, 判断是否一致。一次任务由 90 个试次组成, 被试需判断当前呈现的刺激是否与前面的第 2 个刺激一致并按键反应。任务表现包括反应正确率和反应时。

1.2.3 心电采集设备 采用海军特色医学中心研制的 Wisdom ECG 心电设备, 频带范围为 0~2 000 Hz, 电极采用 3M 医疗心电贴, 采集过程中通过处理人体皮肤表面使阻抗降至 20 k Ω 以下。

1.3 数据采集流程 本研究的数据采集在上海理工大学一间空置教室完成, 该教室的窗帘被关闭、日光灯开启, 只保留数据采集设备、计算机及桌椅等必要设备, 以减少额外因素的影响。数据采集时

间分别为比赛的第 2 天上午 (D1)、比赛的第 3 天上午 (D2)、比赛的第 4 天上午 (D3) 以及比赛结束后第 2 天上午 (D4)。数据采集流程: 被试先完成 SSS 并且报告睡眠时长, 然后佩戴心电采集设备, 完成 3 个认知任务, 为避免顺序效应不同被试完成的认知任务顺序不同。每次数据采集结果包括 SSS 得分、睡眠时长、3 个认知任务的测试结果以及进行认知任务时的心电图。

1.4 数据预处理 每名被试采集任务期间心电图共计 20 min, 为减少伪迹干扰、提升数据质量, 选取每次采集到的数据中的 3 min 心电图, 再根据不同任务的开始和终止时间对心电图进行划分, 最终得到 4 次认知任务期间的心电图 (包括 Stroop 任务、2-back 任务、视听竞争任务期间心电图)。用 Matlab 软件使用 Pan-Tompkins 算法对心电数据进行预处理, 主要包括实现 R 波的增强和 R 波综合决策两部分。

1.5 心电特征提取 参考 Delliaux 等^[25] 的研究, 将提取到的心电图信息分为时域特征、频域特征以及信息域特征, 其中时域特征反映心电图的周期变异程度, 频域特征反映心电图的周期性振荡程度, 信息域特征则捕获所研究心电时间序列的非线性属性。

1.5.1 时域特征 心率是最基本的心电特征, 通过测量连续心跳的时间间隔来计算。

连续差值的均方根 (root mean square of the successive differences, RMSSD) 是一个重要的心率变异性指标,通过连续正常心跳 (R-R 间期) 之间的时间差反映心跳时间间隔的变异程度,常被用来评估副交感神经的调节功能和活性。

$$\text{RMSSD} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2}$$

其中, n 为 R-R 间期的总数, Δt_i^2 表示第 i 个相邻 R-R 间期的差值平方。

1.5.2 频域特征 低频即 0.04~0.15 Hz 反映了交感神经系统的活动;高频即 0.15~0.4 Hz 反映了副交感神经系统的活动;低频/高频比值反映了高低频成分的相对力量。

1.5.3 信息域特征 样本熵 (sample entropy) 是一个衡量时间序列数据复杂性的统计量,用来评估心脏节律的不规则性和动态变化。

$$\text{SampEn}(m, r, N) = -\ln \frac{\sum_i^{N-m} A_i^m(r)}{\sum_i^{N-m} B_i^m(r)}$$

其中, m 表示嵌入维度,即计算相似性的时间窗口大小; r 表示相似度阈值; N 表示时间序列的长度; $A^m(r)$ 表示长度为 $m+1$ 的子序列中距离小于阈值 r 的匹配概率; $B^m(r)$ 表示长度为 m 的子序列中距离小于阈值 r 的匹配概率。

Rényi 熵 (Rényi entropy) 是一个在心电信号分析的非线性统计量,有助于揭示心电活动的动态特性,用于区分不同的心电状态。

$$H_\alpha(X) = \frac{1}{1-\alpha} \log \sum_{i=1}^n p_i^\alpha$$

其中, X 是一个离散随机变量,具有 n 个可能的取值; p_i 表示第 i 个取值的概率; α 是 Rényi 熵的阶数, $0 < \alpha < 1$ 。

庞加莱图 (Poincaré plot) 是一种用于可视化和量化心率变异性的方法,通过将每 1 个正常心跳 (R-R 间期) 与下一个心跳的持续时间进行对比,生成散点图,揭示心率的短期和长期变化特征。散点图的分布近似为椭圆,椭圆的短半轴和长半轴分别为庞加莱图 SD1 和庞加莱图 SD2,计算公式分别为

$$\text{SD1} = \sqrt{\frac{1}{2(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} (RR_{i+1} - RR_i)^2}$$

$$\text{SD2} = \sqrt{\frac{2}{N-1} \sum_{i=1}^N (RR_i - \overline{RR})^2 - \frac{1}{2(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} (RR_{i+1} - RR_i)^2}$$

其中, RR_i 表示第 i 个 R-R 间期, N 为 R-R 间期的总数, $\overline{RR}$ 为 R-R 间期的均值。SD1/SD2 可以提供

有关心率变异性的额外信息。

1.6 统计学处理 采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析。用 Shapiro-Wilk 检验对数据进行正态性检验,对不符合正态分布的计量资料以 $M(Q_1, Q_3)$ 表示,组间比较采用 Friedman 检验,事后两两比较采用对于 Bonferroni 校正的 Wilcoxon 秩检验,检验水准 (α) 为 0.05。

2 结果

2.1 疲劳评估差异检验 对被试在比赛 3 d 中 (D1、D2、D3) 以及比赛后 1 d (D4) 的 SSS 得分和睡眠时长分别进行差异检验。结果显示,随着比赛的进行被试的疲劳程度加深,在比赛后的第 2 天 (D4) 得到恢复, D1、D2、D3、D4 被试的 SSS 得分分别为 4.250 (3.380, 4.625)、4.000 (3.380, 5.000)、5.750 (5.000, 6.500)、2.500 (2.000, 2.630) 分, 4 d 间的差异有统计学意义 ($\chi^2=23.116, P<0.001$), 事后比较结果显示 D3 时 SSS 得分高于 D4, 差异有统计学意义 ($Z=2.700, P<0.001$)。被试的睡眠时长呈现相反的趋势,即随着比赛的进行被试睡眠时长越来越短,在比赛后第 2 天 (D4) 睡眠时长增加, D1、D2、D3、D4 的睡眠时长分别为 405.000 (371.250, 435.000)、420.000 (360.000, 480.000)、127.500 (0.000, 337.500)、525.000 (480.000, 600.000) min, 差异有统计学意义 ($\chi^2=19.608, P<0.001$), 且 D3 睡眠时长和 D4 时的差异有统计学意义 ($Z=-2.500, P<0.001$)。

2.2 认知任务表现及心电特征与疲劳评估的相关性检验 结果如表 1~3 所示。Stroop 任务中的字词-颜色一致正确率、字词-颜色不一致正确率与 SSS 得分均呈负相关 (均 $P<0.05$), 心电特征庞加莱图 SD2 与睡眠时长呈正相关 ($P<0.05$); 视听竞争任务中的单视觉目标刺激正确率、视觉目标听觉非目标刺激正确率与 SSS 得分均呈负相关 (均 $P<0.05$); 2-back 任务中的心电特征庞加莱图 SD2 与 SSS 得分呈正相关、与睡眠时长呈负相关 (均 $P<0.05$), 庞加莱图 SD1/SD2 与睡眠时长呈正相关 ($P<0.05$)。

2.3 相关性显著指标差异检验 结果如表 4 所示, 7 个相关性显著指标的趋势在 D3 时都发生明显变化, 说明被试在这天的行为表现或心电特征区

别于另外 3 d。2-back 任务中的庞加莱图 SD2 呈现出先上升后下降的趋势, 2-back 任务中的庞加莱图 SD1/SD2、视听竞争任务中的视觉目标听觉非目标刺激正确率呈现出先下降后上升的趋势。2-back 任务中的心电特征庞加莱图 SD2 ($\chi^2=8.760$, $P=0.033$) 和庞加莱图 SD1/SD2 ($\chi^2=9.000$, $P=0.029$) 在 D1、D2、D3、D4 时的差异均有统计学意义; 事后

比较结果显示, D1 时庞加莱图 SD1/SD2 大于 D3 时, 差异有统计学意义 ($Z=1.850$, $P<0.01$)。在行为表现上, 视听竞争任务中的视觉目标听觉非目标刺激正确率在 D1、D2、D3、D4 时差异有统计学意义 ($\chi^2=13.478$, $P=0.004$); 事后比较结果显示, D2 时的正确率高于 D3 时, 差异有统计学意义 ($Z=1.550$, $P<0.05$)。

表 1 Stroop 任务表现及任务期间心电特征与疲劳评估的相关性检验

Tab 1 Correlation analysis between Stroop task performance, electrocardiographic characteristics during the task, and fatigue assessment			<i>r</i>
Index	SSS score	Sleep duration	
Word-color congruent accuracy	−0.320*	0.187	
Word-color incongruent accuracy	−0.342*	0.285	
Word-color congruent response time	0.175	−0.041	
Word-color incongruent response time	0.280	−0.027	
Heart rate	−0.026	−0.260	
Root mean square of the successive differences	0.014	0.090	
Low frequency	−0.259	−0.015	
High frequency	0.076	−0.162	
Low frequency/high frequency	−0.236	0.113	
Sample entropy	−0.082	−0.064	
Rényi entropy	−0.094	0.205	
Poincaré plot SD1	0.014	0.090	
Poincaré plot SD2	−0.006	0.380*	
Poincaré plot SD1/SD2	0.077	−0.179	

* $P<0.05$. SSS: Stanford sleepiness scale.

表 2 视听竞争任务表现及任务期间心电特征与疲劳评估的相关性检验

Tab 2 Correlation analysis between audiovisual task performance, electrocardiographic characteristics during the task, and fatigue assessment			<i>r</i>
Index	SSS score	Sleep duration	
Single-visual target stimulus accuracy	−0.383*	0.197	
Single-auditory target stimulus accuracy	−0.177	0.001	
Dual-modal visual-auditory target stimulus accuracy	−0.273	0.263	
Visual target-auditory non-target stimulus accuracy	−0.376*	0.152	
Visual non-target-auditory target stimulus accuracy	−0.276	0.148	
Single-visual target stimulus response time	−0.066	0.035	
Single-auditory target stimulus response time	−0.042	0.024	
Dual-modal visual-auditory target stimulus response time	0.047	0.000	
Visual target-auditory non-target stimulus response time	−0.166	0.152	
Visual non-target-auditory target stimulus response time	0.137	0.090	
Heart rate	−0.310	0.072	
Root mean square of the successive differences	0.108	−0.013	
Low frequency	0.198	−0.149	
High frequency	−0.125	−0.015	
Low frequency/high frequency	0.100	−0.032	
Sample entropy	0.213	−0.197	
Rényi entropy	0.053	−0.034	
Poincaré plot SD1	0.109	−0.013	
Poincaré plot SD2	0.258	−0.052	
Poincaré plot SD1/SD2	−0.118	0.031	

* $P<0.05$. SSS: Stanford sleepiness scale.

表 3 2-back 任务表现及任务期间心电特征与疲劳评估的相关性检验

Tab 3 Correlation analysis between 2-back task performance, electrocardiographic characteristics during the task, and fatigue assessment

Index	<i>r</i>	
	SSS score	Sleep duration
Accuracy	−0.232	0.164
Response time	0.141	0.138
Heart rate	−0.283	−0.056
Root mean square of the successive differences	0.016	0.030
Low frequency	−0.053	−0.159
High frequency	−0.240	0.240
Low frequency/high frequency	0.173	−0.248
Sample entropy	0.043	0.094
Rényi entropy	0.055	0.130
Poincaré plot SD1	0.016	0.031
Poincaré plot SD2	0.339*	−0.357*
Poincaré plot SD1/SD2	−0.259	0.342*

**P*<0.05. SSS: Stanford sleepiness scale.

表 4 相关显著指标差异检验

Tab 4 Difference test of significantly correlated indicators

Index	Time point	Observation value, $M(Q_1, Q_3)$	χ^2 value	<i>P</i> value
Word-color congruent accuracy in stroop task	D1	0.961 (0.947, 1.000)	4.958	0.175
	D2	0.972 (0.956, 0.989)		
	D3	0.928 (0.831, 0.981)		
	D4	0.983 (0.952, 0.992)		
Word-color incongruent accuracy in stroop task	D1	0.956 (0.925, 0.969)	5.170	0.160
	D2	0.956 (0.939, 0.981)		
	D3	0.872 (0.817, 0.969)		
	D4	0.967 (0.908, 0.978)		
Poincaré plot SD2 in stroop task	D1	77.309 (70.972, 93.552)	0.840	0.840
	D2	70.414 (60.818, 90.799)		
	D3	87.433 (59.692, 110.466)		
	D4	68.283 (55.358, 80.370)		
Poincaré plot SD2 in 2-back task	D1	54.900 (43.854, 62.508)	8.760	0.033
	D2	85.685 (65.862, 114.520)		
	D3	98.485 (59.018, 135.395)		
	D4	52.214 (38.071, 80.653)		
Poincaré plot SD1/SD2 in 2-back task	D1	0.354 (0.304, 0.537)	9.000	0.029
	D2	0.286 (0.221, 0.468)		
	D3	0.226 (0.183, 0.299)		
	D4	0.306 (0.215, 0.630)		
Single-visual target stimulus accuracy in audiovisual task	D1	0.975 (0.888, 1.000)	7.654	0.054
	D2	1.000 (0.900, 1.000)		
	D3	0.825 (0.638, 0.963)		
	D4	0.975 (0.900, 1.000)		
Visual target-auditory non-target stimulus response time in audiovisual task	D1	1.000 (0.938, 1.000)	13.478	0.004
	D2	1.000 (1.000, 1.000)		
	D3	0.850 (0.738, 1.000)		
	D4	0.950 (0.900, 1.000)		

D1: The morning of day 2 in the competition; D2: The morning of day 3 in the competition; D3: The morning of day 4 in the competition; D4: The morning of day 2 after the competition.

3 讨 论

本研究考察了在多天的高生态效度场景中个体的精神疲劳累积性变化, 这种变化同时反映在主观量表结果、认知任务表现和心电特征指标上, 目的在于找到可靠反映疲劳程度变化的指标。主观量表和睡眠时长统计结果发现, 随着比赛的进行被试的疲劳程度不断增加且在比赛结束后疲劳程度显著降低。

认知任务表现与 SSS 得分和睡眠时长的相关分析结果发现, Stroop 任务中的字词-颜色一致正确率、字词-颜色不一致正确率及视听竞争任务中的单视觉目标刺激正确率、视觉目标听觉非目标刺激正确率与 SSS 得分均呈负相关。这一相关性结果可能与本研究中诱发疲劳的任务是真实场景中的电子设计任务有关, 在这样的设计比赛中被试需要长时间保持清醒、观察产品, 同时又要要有敏锐的视觉信息捕捉能力, 及时搜索出产品的问题并修改。在一项双重同步视觉任务(持续视觉注意与随机视觉注意)的情况下, 精神疲劳会导致被试的反应时间延长和对随机信号的判断准确率降低^[26]。当个体疲劳时, 他们的大脑对视觉信息的处理速度减慢, 表现为更慢的反应速度和较高的错误率^[27]。这说明精神疲劳后个体的视觉持续注意和视觉搜索能力下降。

Stroop 任务指标在 D1、D2、D3、D4 间的差异无统计学意义, 原因可能是任务难度较低, 4 d 内被试的正确率基本上都 >0.9 , 甚至接近 1, 说明任务难度上存在“天花板效应”, 即面对简单的认知任务, 即便个体已经精神疲劳仍可以保持一定的正确率。个体在疲劳时会表现出认知反应力下降, 但可以通过个体的努力或增加奖励来缓解, 这被称为“疲劳的补偿控制模型”^[19,28-30]。本研究中, 被试的动机比较强, 即便因疲劳影响认知能力, 但还是可以通过补偿控制来弥补这种认知受损。通过描述统计能发现 D1~D3、D3~D4 的正确率变化趋势有一致性, 即 D3 时被试的任务正确率最低, 到 D4 时正确率又回升, 这种趋势与精神疲劳程度的变化一致。

庞加莱图可能是一个有效反映比赛期间被试精神疲劳变化的指标, 任务期间的心电特征指标与 SSS 得分和睡眠时长的相关性分析结果发现, 在

Stroop 任务与 2-back 任务期间的庞加莱图特征值都与 SSS 得分或睡眠时长相关。庞加莱图 SD2 随着比赛的进行而增大, 又在比赛结束后下降, 而庞加莱图 SD1/SD2 则呈现出相反的趋势, 且 D1 时的庞加莱图 SD1/SD2 大于 D3 时, 这一结果与课题组之前对静息态心电特征的分析结果^[31]一致。庞加莱图与自主神经系统活动密切相关, 而自主神经系统活动很容易受到精神疲劳的影响, Zeng 等^[32]对驾驶疲劳的研究发现, 与清醒状态相比, 疲劳状态下庞加莱图指标显著增加。然而 D3 与 D4 时的庞加莱图 SD2 差异无统计学意义, 这可能是因为 D4 时被试虽然睡眠时长较长、主观疲劳感受较低, 而生理指标的变化相较于睡眠时长和主观感受存在一定的滞后性, D4 是比赛后第 2 天, 被试并没有得到完全的恢复, 出现了“未恢复陷阱”^[33]。有研究发现, 与深度疲劳之后的恢复期相比, 前 2 d 的疲劳程度最高、清醒最低, 与深度疲劳状态下差异无统计学意义^[34-35]。课题组之前的研究也发现, 比赛结束后第 7 天时被试的主观疲劳程度、睡眠时长及心电庞加莱图指标与比赛中相比, 差异均有统计学意义^[31]。以上结果证明, 本研究中设计比赛所诱发的精神疲劳是多天累积的结果, 需要更长的时间才能恢复到基线水平。研究发现, 对于普通工作人员来说, 2 d 的周末休息就能从疲劳中恢复, 而对于长时间轮班工作的员工如机组人员、石油钻井工人来说, 则需要 3 d 甚至更长的恢复时间^[36]。研究从疲劳恢复到基线水平所需要的时长对于长期经受疲劳困扰的人群十分重要, 他们在没有得到充足的恢复的情况下可能会影响工作效率甚至生命安全, 未来的研究需要针对具体人群设计实验, 以探讨从疲劳中恢复的准确时间间隔。

本研究结合 SSS 得分、睡眠时长、3 个认知任务和心电特征指标对 10 名大学生的精神疲劳进行监测。结果发现精神疲劳程度随着比赛的进行而累积, Stroop 任务和视听竞争任务中的反应正确率是反映精神疲劳灵敏的认知能力指标, Stroop 任务和 2-back 任务期间的庞加莱图 SD2 是反映精神疲劳灵敏的心电特征指标。本研究的不足在于被试较少, 结果的可推广性有待进一步验证; 另外对于精神疲劳的追踪时间较短, 后续研究应考虑长时间的追踪, 以探索精神疲劳的累积及恢复到基线水平所需要的时间。针对本研究遴选的实验范式和心电特

征,未来可开发成应用软件或可集成到个人智能腕表中,以实现疲劳程度的客观实时测评。

[参考文献]

- [1] HOPSTAKEN J F, VAN DER LINDEN D, BAKKER A B, et al. A multifaceted investigation of the link between mental fatigue and task disengagement[J]. *Psychophysiology*, 2015, 52(3): 305-315. DOI: 10.1111/psyp.12339.
- [2] YE C, YIN Z, ZHAO M, et al. Identification of mental fatigue levels in a language understanding task based on multi-domain EEG features and an ensemble convolutional neural network[J]. *Biomed Signal Proces*, 2022, 72: 103360. DOI: 10.1016/j.bspc.2021.103360.
- [3] VAN CUTSEM J, MARCORA S, DE PAUW K, et al. The effects of mental fatigue on physical performance: a systematic review[J]. *Sports Med*, 2017, 47(8): 1569-1588. DOI: 10.1007/s40279-016-0672-0.
- [4] 薛华,刘翠霞,李贤.斯坦福嗜睡量表对阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征初筛诊断的临床意义[J]. *现代中西医结合杂志*, 2009, 18(22): 2668-2669. DOI: 10.3969/j.issn.1008-8849.2009.22.028.
- [5] 陈彦龙,毛万丽,刘鸿优.主观疲劳量表(RPE)评估足球运动员训练负荷的实证研究[J]. *体育科研*, 2019, 40(1): 57-63. DOI: 10.12064/ssr.20190107.
- [6] BUTT Z, ROSENBLOOM S K, ABERNETHY A P, et al. Fatigue is the most important symptom for advanced cancer patients who have had chemotherapy[J]. *J Natl Compr Canc Netw*, 2008, 6(5): 448-455. DOI: 10.6004/jnccn.2008.0036.
- [7] HAGELIN C L, WENGSTRÖM Y, RUNESDOTTER S, et al. The psychometric properties of the Swedish multidimensional fatigue inventory MFI-20 in four different populations[J]. *Acta Oncol*, 2007, 46(1): 97-104. DOI: 10.1080/02841860601009430.
- [8] HODDES E, ZARCONE V, SMYTHE H, et al. Quantification of sleepiness: a new approach[J]. *Psychophysiology*, 1973, 10(4): 431-436. DOI: 10.1111/j.1469-8986.1973.tb00801.x.
- [9] MARCORA S M, STAIANO W, MANNING V. Mental fatigue impairs physical performance in humans[J]. *J Appl Physiol* (1985), 2009, 106(3): 857-864. DOI: 10.1152/jappphysiol.91324.2008.
- [10] LIU X, LI G, WANG S, et al. Toward practical driving fatigue detection using three frontal EEG channels: a proof-of-concept study[J]. *Physiol Meas*, 2021, 42(4): 044003. DOI: 10.1088/1361-6579/abf336.
- [11] TOMASINO B, DEL NEGRO I, GARBO R, et al. Multisensory mental imagery of fatigue: evidence from an fMRI study[J]. *Hum Brain Mapp*, 2022, 43(10): 3143-3152. DOI: 10.1002/hbm.25839.
- [12] VARANDAS R, LIMA R, BADIA S B I, et al. Automatic cognitive fatigue detection using wearable fNIRS and machine learning[J]. *Sensors (Basel)*, 2022, 22(11): 4010. DOI: 10.3390/s22114010.
- [13] CHEN Y, GE H, SU X, et al. Classification of exercise fatigue levels by multi-class SVM from ECG and HRV[J]. *Med Biol Eng Comput*, 2024, 62(9): 2853-2865. DOI: 10.1007/s11517-024-03116-w.
- [14] WANG L, SONG F, ZHOU T H, et al. EEG and ECG-based multi-sensor fusion computing for real-time fatigue driving recognition based on feedback mechanism[J]. *Sensors (Basel)*, 2023, 23(20): 8386. DOI: 10.3390/s23208386.
- [15] WANG H, HAN M, AVOUKA T, et al. Research on fatigue identification methods based on low-load wearable ECG monitoring devices[J]. *Rev Sci Instrum*, 2023, 94(4): 045103. DOI: 10.1063/5.0138073.
- [16] 朱刘凤,冯逸飞,刘意,等.基于HRV的精神疲劳评估的研究现状[J]. *北京生物医学工程*, 2024, 43(4): 433-438. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3208.2024.04.016.
- [17] ARBER M M, IRELAND M J, FEGER R, et al. Ego depletion in real-time: an examination of the sequential-task paradigm[J]. *Front Psychol*, 2017, 8: 1672. DOI: 10.3389/fpsyg.2017.01672.
- [18] GANTOIS P, LIMA-JÚNIOR D, FORTES L S, et al. Mental fatigue from smartphone use reduces volume-load in resistance training: a randomized, single-blinded cross-over study[J]. *Percept Mot Skills*, 2021, 128(4): 1640-1659. DOI: 10.1177/00315125211016233.
- [19] LORIST M M, BOKSEM M A S, RIDDERINKHOF K R. Impaired cognitive control and reduced cingulate activity during mental fatigue[J]. *Brain Res Cogn Brain Res*, 2005, 24(2): 199-205. DOI: 10.1016/j.cogbrainres.2005.01.018.
- [20] SMITH M R, COUTTS A J, MERLINI M, et al. Mental fatigue impairs soccer-specific physical and technical performance[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2016, 48(2): 267-276. DOI: 10.1249/MSS.0000000000000762.
- [21] TOPS M, BOKSEM M A S. Cortisol involvement in mechanisms of behavioral inhibition[J]. *Psychophysiology*, 2011, 48(5): 723-732. DOI: 10.1111/j.1469-8986.2010.01131.x.
- [22] HASSAN E K, JONES A M, BUCKINGHAM G. A novel protocol to induce mental fatigue[J]. *Behav Res Methods*, 2024, 56(4): 3995-4008. DOI: 10.3758/s13428-023-02191-5.
- [23] LAM H K N, SPROULE J, TURNER A P, et al. Changes in perceived mental fatigue, physical fatigue and mood state during a 4-day national junior orienteering competition preparation camp[J]. *Eur J Sport Sci*, 2024,

- 24(2): 226-238. DOI: 10.1002/ejsc.12071.
- [24] 秦鹏飞, 徐密, 雷雨田, 等. 全国大学生电子设计竞赛发展预测及对人才培养的促进作用[J]. 农业工程, 2018, 8(3): 109-112. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1795.2018.03.031.
- [25] DELLIAUX S, DELAFORGE A, DEHARO J C, et al. Mental workload alters heart rate variability, lowering non-linear dynamics[J]. *Front Physiol*, 2019, 10: 565. DOI: 10.3389/fphys.2019.00565.
- [26] GUO Z, CHEN R, ZHANG K, et al. The impairing effect of mental fatigue on visual sustained attention under monotonous multi-object visual attention task in long durations: an event-related potential based study[J]. *PLoS One*, 2016, 11(9): e0163360. DOI: 10.1371/journal.pone.0163360.
- [27] FABER L G, MAURITS N M, LORIST M M. Mental fatigue affects visual selective attention[J]. *PLoS One*, 2012, 7(10): e48073. DOI: 10.1371/journal.pone.0048073.
- [28] BOKSEM M A S, MEIJMAN T F, LORIST M M. Mental fatigue, motivation and action monitoring[J]. *Biol Psychol*, 2006, 72(2): 123-132. DOI: 10.1016/j.biopsycho.2005.08.007.
- [29] MUÑOZ-DE-ESCALONA E, CAÑAS J J, NORIEGA P. Inconsistencies between mental fatigue measures under compensatory control theories[J]. *Psicológica J*, 2020, 41(2): 103-126. DOI: 10.2478/psicolj-2020-0006.
- [30] HOCKEY G R. Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload; a cognitive-energetical framework[J]. *Biol Psychol*, 1997, 45(1/2/3): 73-93. DOI: 10.1016/s0301-0511(96)05223-4.
- [31] 陆嘉文, 李川涛, 陈始圆, 等. 紧张状态下累积性疲劳的短时心电特征分析[J]. 海军军医大学学报, 2023, 44(5): 640-645. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20220380.
- LU J, LI C, CHEN S, et al. Analysis of short-term electrocardiogram characteristics of cumulative fatigue under stress[J]. *Acad J Naval Med Univ*, 2023, 44(5): 640-645. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20220380.
- [32] ZENG C, WANG W, CHEN C, et al. Poincaré plot indices of heart rate variability for monitoring driving fatigue[M/OL]//ZHANG L, MA J, LIU P, et al. CICTP 2019: Transportation in China—Connecting the World [2024-11-12]. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784482292.059>.
- [33] BALK Y A, DE JONGE J. The “underrecovery trap”: when physical fatigue impairs the physical and mental recovery process[J]. *Sport Exerc Perform Psychol*, 2021, 10(1): 88-101. DOI: 10.1037/spy0000249.
- [34] ÅKERSTEDT T, KECKLUND G, GILLBERG M, et al. Sleepiness and days of recovery[J]. *Transp Res Part F Traffic Psychol Behav*, 2000, 3(4): 251-261. DOI: 10.1016/S1369-8478(01)00009-2.
- [35] TOTTERDELL P, SPELTEN E, SMITH L, et al. Recovery from work shifts: how long does it take?[J]. *J Appl Psychol*, 1995, 80(1): 43-57. DOI: 10.1037/0021-9010.80.1.43.
- [36] MERKUS S L, HOLTE K A, HUYSMANS M A, et al. Self-reported recovery from 2-week 12-hour shift work schedules: a 14-day follow-up[J]. *Saf Health Work*, 2015, 6(3): 240-248. DOI: 10.1016/j.shaw.2015.07.003.

[本文编辑] 尹 茶