

DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20240145

· 论 著 ·

脑力疲劳影响注意保持功能的脑电及皮质溯源研究

芦 婷^{1,2}, 张朝月², 赵文轩^{2,3}, 陈品红², 王路斌^{2*}

1. 河北大学教育学院, 保定 071002

2. 军事科学院军事医学研究院, 北京 100850

3. 首都医科大学第八临床医学院, 北京 100038

[摘要] **目的** 通过脑电信号特征和皮质溯源分析的方法探索脑力疲劳对注意保持功能的影响。**方法** 招募 25 名健康男性作为被试, 采用关联性负变 (CNV) 听觉范式, 以 CNV 不同加工阶段的平均波幅为分析指标, 评价脑力疲劳前后脑电特征的变化, 进一步使用标准化低分辨率电磁断层扫描 (sLORETA) 方法计算脑力疲劳后 CNV 皮质电流密度三维分布的变化。**结果** 被试 CNV 信号的反应时间在脑力疲劳后无变化 ($P>0.05$), 但脱漏率增高 ($P<0.05$)。脑力疲劳后, 被试中央区 and 中央顶区电极的 CNV 早成分 (预备信号刺激后 500~1 000 ms) 波幅降低, 前额区、额中央区、中央区 and 中央顶区电极的 CNV 晚成分 (预备信号刺激后 2 550~3 050 ms) 波幅降低 (均 $P<0.05$)。sLORETA 溯源定位结果显示, 在 CNV 晚成分时间窗内, 脑力疲劳后左侧后岛叶皮质的活动减少 ($P<0.05$)。**结论** 作为感觉运动信息整合的关键脑区, 后岛叶激活减少可能是脑力疲劳后 CNV 波幅下降和注意保持功能受损的潜在神经机制。

[关键词] 脑力疲劳; 注意保持; 关联性负变; 溯源分析**[引用本文]** 芦婷, 张朝月, 赵文轩, 等. 脑力疲劳影响注意保持功能的脑电及皮质溯源研究 [J]. 海军军医大学学报, 2025, 46(3): 352-359. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20240145.**Effects of mental fatigue on attention maintenance function: an electroencephalogram and cortical source analysis study**LU Ting^{1,2}, ZHANG Chaoyue², ZHAO Wenxuan^{2,3}, CHEN Pinhong², WANG Lubin^{2*}

1. Education College of Hebei University, Baoding 071002, Hebei, China

2. Academy of Military Medical Sciences, Academy of Military Sciences, Beijing 100850, China

3. The Eighth Clinical Medical College of Capital Medical University, Beijing 100038, China

[Abstract] **Objective** To explore the effects of mental fatigue on attention maintenance function by electroencephalogram (EEG) signal characteristics and cortical source analysis. **Methods** A total of 25 healthy males were recruited as subjects and contingent negative variation (CNV) auditory paradigm was used to assess the differences in EEG characteristics before and after mental fatigue, with the average amplitude of CNV at different processing stages as the analysis indices. Then, the 3-dimensional distribution of cortical current density changes of CNV after mental fatigue were calculated by standardized low-resolution electromagnetic tomography analysis (sLORETA). **Results** The reaction time of the CNV signal remained unchanged following mental fatigue ($P>0.05$), while the lapse rate exhibited a significant increase ($P<0.05$). Besides, mental fatigue was related to a notable decrease in the amplitude of CNV early components (500-1 000 ms after warning stimulus) at the central and central parietal electrodes, and a significant reduction in the amplitude of CNV late components (2 550-3 050 ms after warning stimulus) at the prefrontal, frontal, central, and central parietal electrodes (all $P<0.05$). The results of sLORETA source analysis showed that the brain activity in the left posterior insular cortex decreased after mental fatigue during the late component of CNV ($P<0.05$). **Conclusion** The decreased activation of the posterior insula, which plays a crucial role in sensorimotor information integration, could potentially serve as a neural mechanism for the reduction of CNV amplitude and the impairment of attention maintenance function following mental fatigue.

[收稿日期] 2024-02-29

[接受日期] 2024-09-25

[基金项目] 国防基础科研计划 (JCKY2019548B001). Supported by National Defense Basic Scientific Research Program of China (JCKY2019548B001).

[作者简介] 芦 婷, 硕士. E-mail: helloluting2023@163.com

*通信作者 (Corresponding author). Tel: 010-66930335, E-mail: wanglb@bmi.ac.cn

[Key words] mental fatigue; attention maintenance; contingent negative variation; source analysis

[Citation] LU T, ZHANG C, ZHAO W, et al. Effects of mental fatigue on attention maintenance function: an electroencephalogram and cortical source analysis study[J]. Acad J Naval Med Univ, 2025, 46(3): 352-359. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20240145.

脑力疲劳是指因长期或高强度认知活动而引发的疲惫、注意力难以集中、动机缺乏及警惕性降低状态,这种变化可导致认知能力和工作效率的显著下降^[1-3]。在军事和特殊职业领域,脑力疲劳情况十分常见,是影响工作效率并导致严重事故的主要原因之一^[4-5]。美国国家军事航空安全委员会发布的数据显示,80%的航空事故为人因失误,其中脑力疲劳导致操作失误是主要的事故原因^[6]。因此,脑力疲劳状态的精准量化评估对避免过高脑力负荷、降低人为事故风险具有重要意义。

脑力疲劳可损害多种认知机能,其中对注意的影响最为显著^[7-8]。脑力疲劳后个体警觉度下降,屏蔽无关刺激的能力减弱,脱漏率显著增加^[9-10]。资源理论认为脑力疲劳发生的原因在于认知资源的过度消耗,且消耗的认知资源未能得到及时补充^[3]。注意保持是指个体的心理活动能较长时间保持在注意选择的对象上^[11]。脑电通常被定义为脑内神经元放电产生的电活动^[12],事件相关电位(event-related potential, ERP)具有毫秒级的时间分辨率,可以直接表达大脑皮质对特定刺激进行加工的电生理反应^[13]。作为一种ERP成分,关联性负变(contingent negative variation, CNV)是指预备信号(warning stimulus, S1)与需要进行反应的命令信号(imperative stimulus, S2)之间诱发的负向偏转的慢波^[14]。CNV包括不同的加工阶段,其中早成分反映了对刺激的知觉加工,而晚成分与运动反应和信号预期相关^[15]。研究发现CNV波幅与注意保持的功能呈正相关^[16-17],在有注意功能缺陷的人群中CNV波幅降低^[18],说明CNV波幅是量化评估注意保持功能受损的敏感ERP指标。睡眠障碍相关研究发现,注意准备过程的减慢与CNV波幅下降有关^[19]。目前已有研究采用标准化低分辨率电磁断层扫描(standardized low-resolution electromagnetic tomography analysis, sLORETA)^[20]方法逆向推断脑电信息在大脑内部神经活动的电流源,定位反社会人格特质^[17]、心肺耐力^[21]等因素影响注意功能的特定脑区。

本研究通过连续认知作业任务诱发脑力疲劳,

在脑力疲劳前后进行CNV任务和脑电数据采集,探索脑力疲劳导致注意保持功能损伤的认知机制。CNV脑电指标分析包括脑力疲劳前后CNV整个时段的平均波幅以及早成分和晚成分的平均波幅。本研究进一步采用sLORETA溯源分析方法,探讨引起CNV成分变化的脑区,揭示脑力疲劳对注意保持功能影响的大脑空间定位信息。

1 资料和方法

1.1 研究对象 本研究使用G*Power 3.1.9.7软件估计所需样本量,基于使用相同脑力疲劳诱发范式的文献^[9],计算得到效应量Cohen's *d*为0.96,将显著性水平设定为0.05,统计功效设置为0.95,得出需要的被试数量为17人,最后招募了25名健康男性参与本实验。

被试年龄为23~34岁,平均年龄为(25.60±2.51)岁,其中右利手21名、左利手4名,均视力正常、矫正后视力良好,均无精神及神经类疾患史、无精神疾病用药史,均无酗酒等不良嗜好,作息规律、睡眠良好。本研究获得军事科学院军事医学研究院伦理委员会批准(AF/SC-08/02.114),所有被试在研究前均签署了知情同意书。

1.2 实验流程 本研究使用70 min连续认知作业任务诱发脑力疲劳(属于急性疲劳状态,是一个短期可逆的过程)^[10]。脑力疲劳的诱发采用字母2-back及数字奇偶判断的持续认知操作任务^[9],任务中交替呈现数字和字母,出现数字时判断数字的奇偶性,出现字母时则需要判断当前字母与前一个字母是否相同,此任务共进行约70 min。CNV任务分别在脑力疲劳诱发前后进行,每次约6 min,共有40个实验试次。实验中首先呈现1 000 Hz、80 dB的纯音S1 50 ms,提醒被试准备开始进行按键反应;3 000 ms后呈现1 000 Hz、80 dB的纯音S2 1 000 ms,此时被试需要尽快进行按键操作使纯音S2停止。不同实验试次间隔为4 000~6 000 ms。正式实验开始前受试者需要练习5个实验试次。实验流程如图1所示。

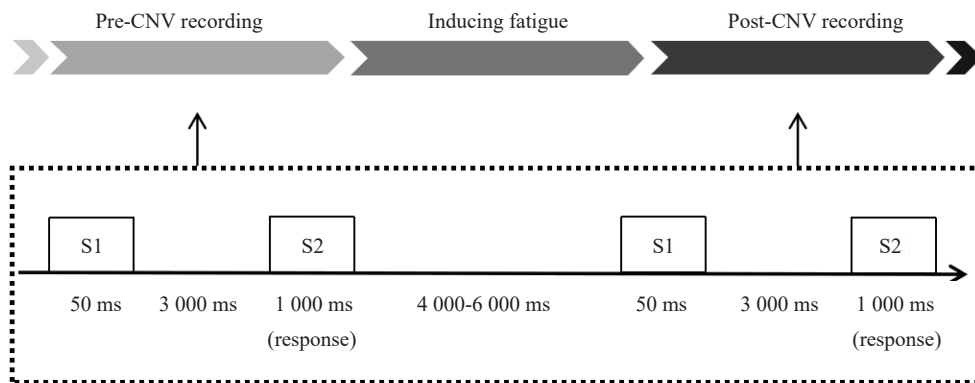


图1 脑力疲劳诱发前后 CNV 任务示意图

Fig 1 Schematic of CNV task during pre- and post-mental fatigue states

CNV: Contingent negative variation; S1: Warning stimulus; S2: Imperative stimulus.

1.3 脑电信号采集与分析 实验按照国际 10-20 系统的电极位置记录脑电信号。脑电数据采集使用美国 Neuroscan 公司生产的 64 导脑电记录分析系统,接地电极为 AFz,参考电极为左侧乳突,眼电采用 Fp1、Fp2 电极记录。带通滤波为 0.01~100 Hz,采样率为 1 000 Hz,头皮阻抗小于 10 k Ω 。

在线记录的数据保存后使用 MATLAB R2016b 软件的 EEGLAB v14.1.2 工具进行离线处理。对每个数据进行预处理,步骤包括电极定位、设置双侧乳突电极为重新参考电极、剔除坏段和眼电伪迹、进行 0.05~30 Hz 的带通滤波、剔除波幅超出 $\pm 100 \mu\text{V}$ 的极端值伪迹。分析时程为 S1 刺激呈现前 1 000 ms 和 S1 刺激呈现后 6 000 ms,基线校正为 S1 刺激前 1 000 ms。全脑地形图对比 0、1 000、2 000、3 000、4 000 ms 5 个时间点。选取前额区 Fz、额中央区 FCz、中央区 Cz 和中央顶区 CPz 电极为感兴趣电极,分析指标为 CNV 不同加工阶段的平均波幅,其中平均波幅分析时程为 S1 刺激后 500~3 050 ms,早成分分析时程为 S1 刺激后 500~1 000 ms,晚成分为 2 550~3 050 ms。

1.4 sLORETA 源定位分析 皮质溯源分析基于头皮记录的电位分布,使用 sLORETA (<https://www.uzh.ch/keyinst/loreta.htm>) 方法计算脑力疲劳前后 CNV 早成分 (500~1 000 ms 时段) 和晚成分 (2 550~3 050 ms 时段) 2 个时间窗皮质电流密度的 3D 分布。在 sLORETA 分析中,脑内体积划分为 6 239 个体素 (空间分辨率 5 mm),在真实头部模型中计算每个体素的标准化电流密度。为了更加准确地识别可能存在的差异,采用基于统计非

参数映射的内置体素随机化测试 (5 000 个排列) 校正多重比较。在蒙特利尔神经研究所 (Montreal Neurological Institute, MNI) 脑空间定位和布罗德曼区域标记差异有统计学意义 (校正 $P < 0.05$) 的体素。

1.5 统计学处理 应用 SPSS 25.0 软件进行统计学分析。首先对数据进行 Shapiro-Wilk 检验,若数据符合正态分布,以 $\bar{x} \pm s$ 形式表示,采用配对 t 检验进行分析;若数据不符合正态分布,则以中位数 (下四分位数,上四分位数) 表示,采用 Wilcoxon 符号秩检验进行分析。检验水准 (α) 为 0.05。

2 结果

2.1 CNV 行为学分析结果 本研究中,CNV 行为学分析指标包括平均反应时和脱漏率,其中平均反应时为所有 S2 刺激反应时间的平均值,脱漏率为反应时大于 400 ms 试次的占比。结果显示,脑力疲劳前后平均反应时差异无统计学意义 [$(245.02 \pm 21.40) \text{ ms}$ vs $(249.82 \pm 26.66) \text{ ms}$; $t = -1.147$, $P = 0.263$];而脑力疲劳后的脱漏率高于疲劳前 [$2.50\% (0.00\%, 7.08\%)$ vs $2.22\% (0.00\%, 2.50\%)$; $Z = -2.077$, $P = 0.038$]。

2.2 CNV 全脑地形图分析结果 图 2 为脑力疲劳前后 CNV 不同时间点的全脑地形图。结果显示,脑力疲劳后,额中央区、中央区 and 中央顶区中线附近电极的 CNV 波幅在 1 000、2 000、3 000 和 4 000 ms 4 个时间点降低,因此选取 Fz、FCz、Cz 和 CPz 4 个电极进行 ERP 分析。

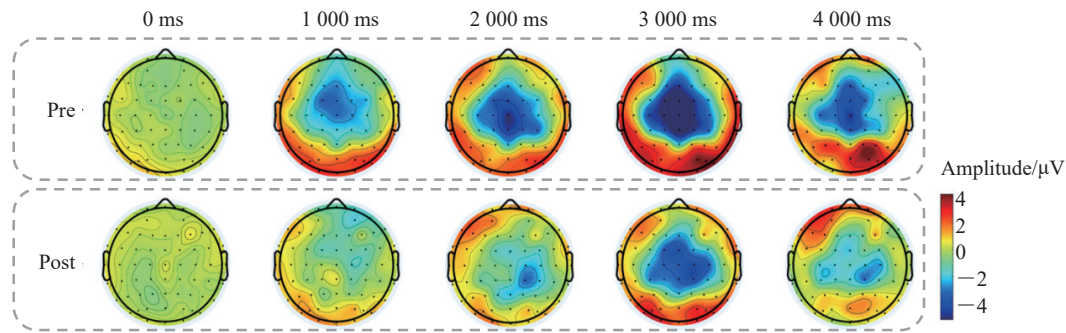


图 2 脑力疲劳前后 CNV 不同时间点全脑地形图

Fig 2 Whole-brain topographic maps of CNV at different time points for pre- and post-mental fatigue

CNV: Contingent negative variation

2.3 CNV 脑电 ERP 结果 Fz、FCz、Cz 和 CPz 4 个电极在脑力疲劳前后的 CNV 波形图见图 3。对 4 个电极脑力疲劳前后 CNV 的平均波幅统计结果显

示, 与脑力疲劳前比较, Fz、FCz、Cz 和 CPz 这 4 个电极的 CNV 平均波幅下降 (均 $P<0.05$), 见表 1。

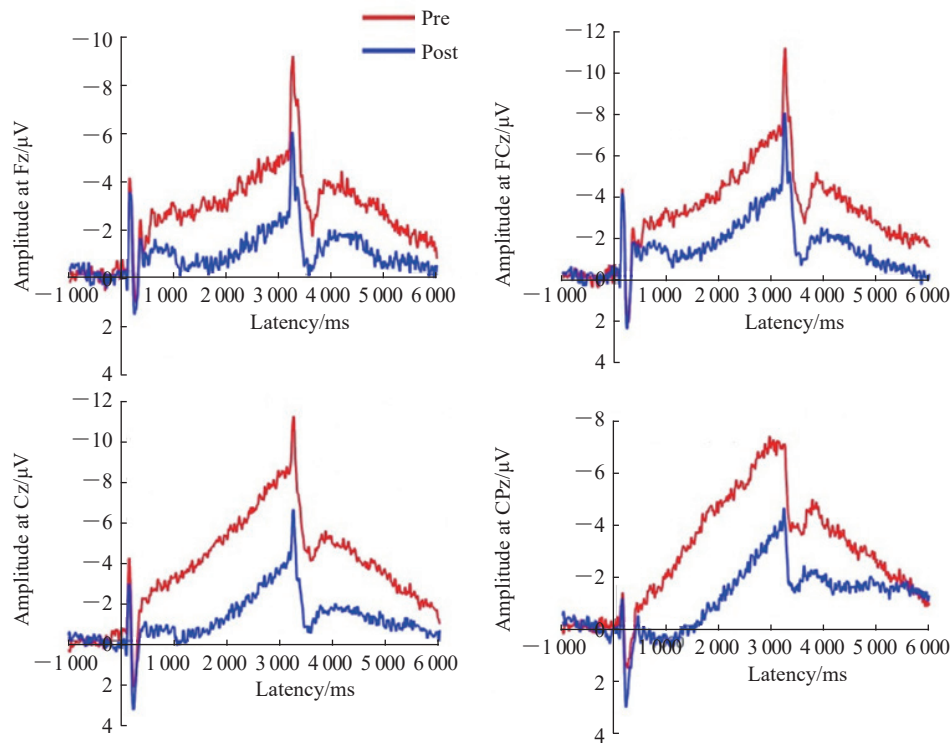


图 3 脑力疲劳前后 Fz、FCz、Cz 和 CPz 电极的 CNV 波形图

Fig 3 CNV waveforms at Fz, FCz, Cz, and CPz electrodes for pre- and post-mental fatigue

CNV: Contingent negative variation.

表 1 脑力疲劳前后 CNV 平均波幅

Tab 1 Average CNV amplitude for pre- and post-mental fatigue

Electrode	Average CNV amplitude/ μV		Z value	P value
	Pre	Post		
Fz	-1.96 (-5.08, 0.24)	-0.66 (-2.69, 1.49)	-2.03	0.042
FCz	-2.83 (-6.37, -0.33)	-0.94 (-4.08, 0.64)	-2.54	0.011
Cz	-3.95 (-6.71, -0.44)	-1.25 (-3.32, 0.46)	-2.60	0.009
CPz	-3.31 (-6.04, -0.91)	-0.54 (-2.92, 0.71)	-3.40	0.001

CNV: Contingent negative variation; $M(Q_L, Q_U)$: Median (lower quartile, upper quartile).

对脑力疲劳前后 CNV 早成分 (500~1 000 ms 时段) 平均波幅的统计结果 (图 4) 显示, 脑力疲劳前后 Fz 电极和 FCz 电极上的 CNV 早成分波幅差异无统计学意义 ($Z=-1.655$, $P=0.098$; $t=$

-1.490 , $P=0.149$); 脑力疲劳后 Cz 电极和 CPz 电极上的 CNV 早成分波幅均小于疲劳前 ($Z=-2.274$, $P=0.023$; $t=-2.542$, $P=0.018$)。

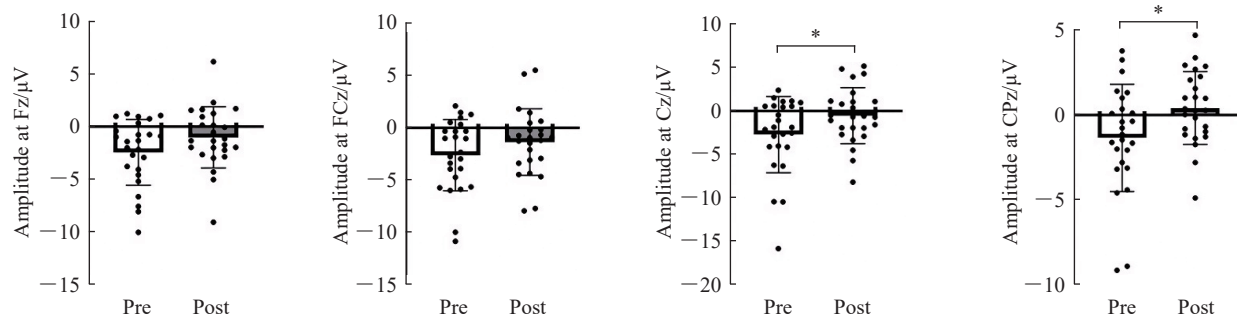


图 4 脑力疲劳前后 Fz、FCz、Cz、CPz 电极上的 CNV 早成分平均波幅

Fig 4 Average amplitude of CNV early component at Fz, FCz, Cz, and CPz electrodes for pre- and post-mental fatigue

* $P<0.05$. $n=25$. CNV: Contingent negative variation.

对脑力疲劳前后 CNV 晚成分 (2 550~3 050 ms 时段) 平均波幅的统计结果 (图 5) 显示, 脑力疲劳后, Fz 电极 ($Z=-2.166$, $P=0.030$)、FCz 电极

($Z=-2.597$, $P=0.009$)、Cz 电极 ($Z=-2.408$, $P=0.016$) 和 CPz 电极 ($Z=-2.597$, $P=0.009$) 上的 CNV 晚成分波幅均小于疲劳前。

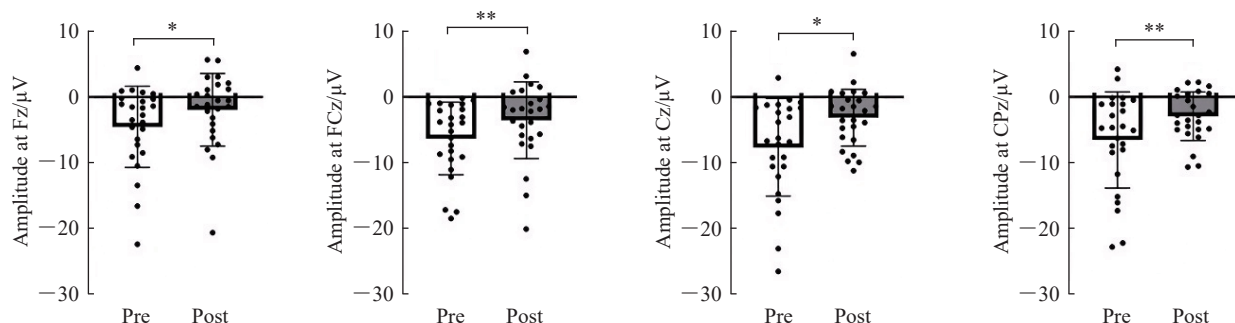


图 5 脑力疲劳前后 Fz、FCz、Cz、CPz 电极上的 CNV 晚成分平均波幅

Fig 5 Average amplitude of CNV late component at Fz, FCz, Cz, and CPz electrodes for pre- and post-mental fatigue

* $P<0.05$, ** $P<0.01$. $n=25$. CNV: Contingent negative variation.

2.4 sLORETA 源定位分析结果 对 500~1 000 ms 时段的 CNV 早成分和 2 550~3 050 ms 时段的晚成分进行溯源分析, 结果显示, 脑力疲劳前后早成分时间窗内没有发现大脑皮质活动有显著差异的区域。而在 CNV 晚成分阶段, 左侧后岛叶在脑力疲劳后的活动小于疲劳前 ($t=1.744$, $P=0.022$)。存在差异的大脑区域位于布罗德曼 13 区, MNI 坐标为 (mm) $x=-40$, $y=-30$, $z=20$ 。脑力疲劳前后 CNV 晚成分电流密度差异图见图 6。

3 讨论

脑力疲劳状态损害了注意保持等认知功能,

导致在作业任务中人为失误的风险增加, 因此精准评估脑力疲劳的状态具有重要意义。本研究通过 CNV 不同加工阶段脑电波幅分析和皮质 sLORETA 溯源定位的方法探索了脑力疲劳对注意保持功能的影响。结果发现, CNV 早成分 (500~1 000 ms 时段) 和晚成分 (2 550~3 050 ms 时段) 在脑力疲劳后的波幅均显著降低, 说明脑力疲劳使个体的知觉加工速度减慢, 运动反应和信号预期降低, 进而损害了注意的保持功能。进一步的 sLORETA 溯源分析发现, 脑力疲劳导致 CNV 晚成分时间段内左侧后岛叶活动显著降低, 为理解脑力疲劳的神经生理机制提供了潜在的皮质定位信息。

时间分辨率,但空间分辨率较低,使用sLORETA溯源分析对皮质定位可能会存在偏差,后续研究可以结合功能磁共振成像技术,为脑力疲劳影响注意功能提供高时空分辨率的神经活动信息。

本研究利用CNV听觉范式考察了连续作业脑力疲劳对注意保持功能的影响。脑电信号特征分析表明脑力疲劳后个体注意保持功能的受损与早期和晚期CNV成分波幅显著降低有关。CNV成分溯源分析进一步发现,脑力疲劳导致左侧后岛叶皮质的活动减少,影响了大脑对感觉运动信息的整合加工,可能是疲劳后注意保持功能下降的潜在神经机制。

【参 考 文 献】

- [1] MIKICIN M. The increase or decrease in the speed and accuracy of tasks is a measure of mental work performance in the aspect of mental fatigue[J]. *J Phys Educ Sport*, 2022, 22(6): 1564-1570. DOI: 10.7752/jpes.2022.06197.
- [2] 阮亦,顾伟,凌昌全.脑力疲劳测评方法的研究进展[J]. *第二军医大学学报*, 2019, 40(1): 79-85. DOI: 10.16781/j.0258-879x.2019.01.0079.
RUAN Y, GU W, LING C Q. Assessment methods of mental fatigue: an update[J]. *Acad J Sec Mil Med Univ*, 2019, 40(1): 79-85. DOI: 10.16781/j.0258-879x.2019.01.0079.
- [3] BORGHINI G, ASTOLFI L, VECCHIATO G, et al. Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness[J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2014, 44: 58-75. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2012.10.003.
- [4] 韩明秀,王盛,王煜文,等.基于EEG的飞行员脑力疲劳评估研究进展[J]. *载人航天*, 2021, 27(5): 639-645. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5825.2021.05.015.
- [5] 阮琳,高俊峰,杨叶菲,等.主观评定法用于军事作业所致脑力疲劳的研究进展[J]. *人民军医*, 2020, 63(2): 112-114.
- [6] National Commission on Military Aviation Safety. Report of National Commission on Military Aviation Safety on aviation mishaps from 2013 to 2020[R/OL]. (2020-12-03)[2024-2-28]. <https://news.usni.org>.
- [7] KATO Y, ENDO H, KIZUKA T. Mental fatigue and impaired response processes: event-related brain potentials in a Go/NoGo task[J]. *Int J Psychophysiol*, 2009, 72(2): 204-211. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2008.12.008.
- [8] FAN X, ZHOU Q, XIE F, et al. Mental fatigue and impaired attention: an event-related potential study[J]. *J Med Imaging Hlth Inform*, 2017, 7(2): 378-387. DOI: 10.1166/jmihi.2017.2062.
- [9] 张朝月,邓浩伟,谢方,等.连续作业疲劳影响反应抑制功能的脑电时频分析[J]. *军事医学*, 2023, 47(8): 609-614. DOI: 10.7644/j.issn.1674-9960.2023.08.009.
- [10] ISHII A, TANAKA M, WATANABE Y. Neural mechanisms of mental fatigue[J]. *Rev Neurosci*, 2014, 25(4): 469-479. DOI: 10.1515/revneuro-2014-0028.
- [11] 彭聃龄.普通心理学[M].2版.北京:北京师范大学出版社,2001:68-69.
- [12] AVITAN L, TEICHER M, ABELES M. EEG generator—a model of potentials in a volume conductor[J]. *J Neurophysiol*, 2009, 102(5): 3046-3059. DOI: 10.1152/jn.91143.2008.
- [13] 田银,徐鹏,等.脑电与认知神经科学[M].北京:科学出版社,2020:64-65.
- [14] WALTER W G, COOPER R, ALDRIDGE V J, et al. Contingent negative variation: an electric sign of sensori-motor association and expectancy in the human brain[J]. *Nature*, 1964, 203: 380-384. DOI: 10.1038/203380a0.
- [15] LORIST M M. Impact of top-down control during mental fatigue[J]. *Brain Res*, 2008, 1232: 113-123. DOI: 10.1016/j.brainres.2008.07.053.
- [16] 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.
- [17] PRONINA M V, STARCHENKO M G, BOYTSOVA Y A, et al. Event-related potentials in cued Go/NoGo task are possible neuromarkers of monotony[J]. *J Evol Biochem Physiol*, 2023, 59(6): 2367-2380. DOI: 10.1134/S0022093023060376.
- [18] GUAN M, MA L, ZHU Y, et al. Impaired sustained attention in groups at high risk for antisocial personality disorder: a contingent negative variation and standardized low-resolution tomographic analysis study[J]. *Front Hum Neurosci*, 2022, 16: 925322. DOI: 10.3389/fnhum.2022.925322.
- [19] LING J, LIN X, LI X, et al. Altered brain activity related to inhibitory processing in youth with insomnia[J]. *J Sleep Res*, 2021, 30(6): e13398. DOI: 10.1111/jsr.13398.
- [20] DATTOLA S, MORABITO F C, MAMMONE N, et al. Findings about LORETA applied to high-density EEG—a review[J]. *Electronics*, 2020, 9(4): 660. DOI: 10.3390/electronics9040660.
- [21] MUCCIO F D, RUGGERI P, BRANDNER C, et al. Electrocardiac correlates of the association between cardiorespiratory fitness and sustained attention in young adults[J]. *Neuropsychologia*, 2022, 172: 108271. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2022.108271.
- [22] POSNER M I, ROTHBART M K. Research on attention

- networks as a model for the integration of psychological science[J]. *Annu Rev Psychol*, 2007, 58: 1-23. DOI: 10.1146/annurev.psych.58.110405.085516.
- [23] POSNER M I, FAN J. Attention as an organ system[M]// *Topics in integrative neuroscience*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008: 31-61. DOI: 10.1017/cbo9780511541681.005.
- [24] RAZ A, BUHLE J. Typologies of attentional networks[J]. *Nat Rev Neurosci*, 2006, 7(5): 367-379. DOI: 10.1038/nrn1903.
- [25] BRUNIA C H. Neural aspects of anticipatory behavior[J]. *Acta Psychol*, 1999, 101(2/3): 213-242. DOI: 10.1016/s0001-6918(99)00006-2.
- [26] AHMAD J, ELLIS C, LEECH R, et al. From mechanisms to markers: novel noninvasive EEG proxy markers of the neural excitation and inhibition system in humans[J]. *Transl Psychiatry*, 2022, 12(1): 467. DOI: 10.1038/s41398-022-02218-z.
- [27] SEELEY W W, MENON V, SCHATZBERG A F, et al. Dissociable intrinsic connectivity networks for salience processing and executive control[J]. *J Neurosci*, 2007, 27(9): 2349-2356. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.5587-06.2007.
- [28] QI J, LI B Z, ZHANG Y, et al. Altered insula-prefrontal functional connectivity correlates to decreased vigilant attention after total sleep deprivation[J]. *Sleep Med*, 2021, 84: 187-194. DOI: 10.1016/j.sleep.2021.05.037.
- [29] CHANG L J, YARKONI T, KHAW M W, et al. Decoding the role of the insula in human cognition: functional parcellation and large-scale reverse inference[J]. *Cereb Cortex*, 2013, 23(3): 739-749. DOI: 10.1093/cercor/bhs065.
- [30] BAMIOU D E, MUSIEK F E, LUXON L M. The insula (Island of Reil) and its role in auditory processing. Literature review[J]. *Brain Res Brain Res Rev*, 2003, 42(2): 143-154. DOI: 10.1016/s0165-0173(03)00172-3.
- [31] CAUDA F, D'AGATA F, SACCO K, et al. Functional connectivity of the insula in the resting brain[J]. *Neuroimage*, 2011, 55(1): 8-23. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2010.11.049.
- [32] UDDIN L Q. Salience processing and insular cortical function and dysfunction[J]. *Nat Rev Neurosci*, 2015, 16(1): 55-61. DOI: 10.1038/nrn3857.
- [33] NAQVI N H, BECHARA A. The insula and drug addiction: an interoceptive view of pleasure, urges, and decision-making[J]. *Brain Struct Funct*, 2010, 214(5/6): 435-450. DOI: 10.1007/s00429-010-0268-7.
- [34] SRIDHARAN D, LEVITIN D J, MENON V. A critical role for the right fronto-insular cortex in switching between central-executive and default-mode networks[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105(34): 12569-12574. DOI: 10.1073/pnas.0800005105.
- [35] LIANG X, ZOU Q, HE Y, et al. Topologically reorganized connectivity architecture of default-mode, executive-control, and salience networks across working memory task loads[J]. *Cereb Cortex*, 2016, 26(4): 1501-1511. DOI: 10.1093/cercor/bhu316.
- [36] MENON V, UDDIN L Q. Saliency, switching, attention and control: a network model of insula function[J]. *Brain Struct Funct*, 2010, 214(5/6): 655-667. DOI: 10.1007/s00429-010-0262-0.
- [37] ZHONG S Y, GUO J H, ZHOU X N, et al. Effects of brief mindfulness meditation training on attention and dispositional mindfulness in young adult males[J]. *Acta Psychol*, 2024, 246: 104277. DOI: 10.1016/j.actpsy.2024.104277.
- [38] KOWALSKI K L, ANITA D C. Force control and motor unit firing behavior following mental fatigue in young female and male adults[J]. *Front Integr Neurosci*, 2020, 14: 15. DOI: 10.3389/fnint.2020.00015.
- [39] JAYDARI FARD S, LAVENDER A P. A comparison of task-based mental fatigue between healthy males and females[J]. *Fatigue Biomed Health Behav*, 2019, 7(1): 1-11. DOI: 10.1080/21641846.2019.1562582.

[本文编辑] 商素芳