

DOI: 10.7652/xjtuxb201904021

情绪面孔识别状态下抑郁症患者 大脑微状态的差异性研究

吴敏^{1,2}, 王化宁³, 张羿阳^{1,2}, 王中恒³, 滕超淋^{1,2}, 徐进^{1,2}

(1. 西安交通大学生物医学信息工程教育部重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学
生命科学与技术学院, 710049, 西安; 3. 空军军医大学西京医院精神科, 710032, 西安)

摘要: 为探寻抑郁症患者情绪障碍的产生机制, 设计了基于情绪面孔识别的大脑微状态的研究方法, 该方法通过提取情绪面孔识别状态下产生的事件相关电位(ERP)信号, 对 ERP 信号的微状态进行分析, 研究情绪加工过程中重度抑郁症患者(MDD)与正常组(NC)之间的差异性。研究发现: 在情绪面孔识别状态下, MDD组和NC组大脑微状态在类型、数量、持续时间、组合排序等方面均存在显著不同; 在正性情绪面孔刺激下, MDD组微状态1、4的持续时间占比显著小于正常组; 负性情绪面孔刺激下, MDD组微状态1的持续时间占比显著小于正常组, 而微状态2、5的持续时间占比则显著大于正常组。该研究为抑郁症的发病机理研究和临床早期诊断研究提供了方法和依据。

关键词: 抑郁症; 情绪面孔; 事件相关电位; 微状态分析

中图分类号: R318.04 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)04-0143-07

A Difference Study of Brain Microstates for Depression Using Recognition of Emotional Faces

WU Min^{1,2}, WANG Huaning³, ZHANG Yiyang^{1,2}, WANG Zhongheng³,
TENG Chaolin^{1,2}, XU Jin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Biomedical Information Engineering of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Life Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. Department of Psychiatry, Xijing Hospital, Air Force Medical University, Xi'an 710032, China)

Abstract: A task based on recognition of emotional face states is designed to explore the mechanism of emotional disorder of depression. Event-related potentials (ERP) are extracted from electroencephalogram (EEG) signals and recorded in the task. Microstate analysis is used to find differences between patients with major depression disorder (MDD) and normal controls (NC) during emotion processing. Results show that there are significant differences in type, duration and order of microstates between the MDD group and the NC group. Moreover, stimulations show that the durations of MDD microstates 1 and 4 are significantly shorter than that of NC group in positive emotional face states; while the duration of MDD microstate 1 is shorter than that of the NC group and the durations of MDD microstates 2 and 5 are longer than that of the NC group in negative emotional face states. This study may provide an objective method for the clinical diagnosis and mechanism investigation of depression.

Keywords: depression; emotional face; event related potential; microstate analysis

收稿日期: 2018-10-15。 作者简介: 吴敏(1995—), 女, 硕士生; 徐进(通信作者), 女, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB1300303); 国家自然科学基金资助项目(31271061)。

网络出版时间: 2019-01-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190121.1106.012.html>

抑郁症是指长时间沉浸在心情低落之中的一种具有心境障碍的精神类疾病,具有高发病率、高致残率及高死亡率的特点^[1-2]。2014 年,《Nature》上发布的流行病学数据显示,全球重度抑郁症患者数量不少于 3 亿,我国的抑郁症患病率为 3.02%^[3]。迄今为止,抑郁症的发病机制不清,情绪障碍是其典型症状之一^[4]。目前抑郁症的临床诊断主要依赖于医生的主观经验、病人及家属的主诉和抑郁量表的测试,这些都使得抑郁症的临床诊断主观性过强,缺少客观诊断指标,因此抑郁症的产生机制及客观的早期诊断方法研究已成为当务之急。

当今,常见的脑功能成像技术有脑电图(EEG)、事件相关电位(ERP)、脑磁图(MEG)、功能磁共振成像(fMRI)、近红外光谱技术(NIRS)、正电子发射断层成像(PET)等。ERP 是指在施加刺激或撤消刺激或当某种心理因素出现时,在脑区所产生的电位变化^[5],不仅具有高时间分辨率、无创性、费用低廉等优点^[6],而且与大脑认知加工活动密切相关^[7],已被广泛应用于脑认知功能研究。

1987 年,Lehmann 等人提出了微状态的概念,它利用多导信号的电场分布来代表电活动的全局状态^[8]。近年来,微状态分析开始用于 EEG、ERP 信号的研究,此方法不受参考电极选取的影响,能够提供可靠地分析结果,是一种简单有效的大脑功能状态分析方法。相比基于少数、单个电极导联信号提取 ERP 特征成分的传统分析方法,ERP 微状态分析不仅可以反映出 ERP 信号中所蕴含的认知加工信息,还包含了头皮电压分布的空间信息。此外,经过聚类算法,该方法对眼电,肌电等伪迹不敏感。因此,该分析方法相对于传统 ERP 分析具有更重要的价值。

本文利用微状态分析方法对重度抑郁症(MDD)患者组及正常对照(NC)组在情绪面孔识别状态下的 ERP 信号进行微状态对比分析,探寻抑郁症患者所特有的功能差异,为抑郁症患者情绪障碍产生机制研究提供方法及依据。

1 信号采集与预处理

1.1 被试者信息

本研究依据筛选标准组建正常组(NC)和重度抑郁症组(MDD),正常组被试者从西安交通大学健康在校大学生中招募,MDD 患者是从空军军医大学西京医院精神科筛选出的住院患者。NC 组被试者 15 名,其中男性 10 名、女性 5 名,年龄为(21.1±

1.1)(均值±标准差)岁。MDD 组被试者 11 名,其中男性 6 名、女性 5 名,年龄为(29.0±4.0)岁。MDD 患者符合《美国精神障碍诊断与统计学手册(第 5 版)》(DSM-V)的抑郁症诊断标准,汉密顿抑郁量表 17 项(HAMD-17)总分大于等于 24 分。NC 和 MDD 组被试者的简易智力量表 MMSE 测试均正常,所有被试者均签署了知情同意书。

1.2 实验设计

鉴于抑郁症患者的脑功能障碍以情绪障碍为主,本研究设计了基于情绪面孔识别的任务,刺激图片均来自视觉中国网站人脸图片库。该任务范式中的刺激序列由两类刺激组成:正性(如微笑)或负性(如悲伤)情绪面孔充当靶刺激,不带有任何情绪色彩的中性面孔充当非靶刺激;正性面孔、负性面孔各 60 次,出现概率均为 25%,中性面孔 120 次,出现概率 50%,刺激的总数为 240 次。如图 1 所示,各类刺激图片随机地出现在显示器屏幕中心,刺激呈现时间为 1.5 s,刺激间隔为 1.2~1.5 s 随机。实验中要求被试者判断刺激图片的情绪面孔类型,若刺激图片是正性的情绪面孔则按下红色键,若刺激图片是负性的情绪面孔则按下绿色键;否则,不做任何反应。要求被试者在尽可能准确的前提下快速做出反应。

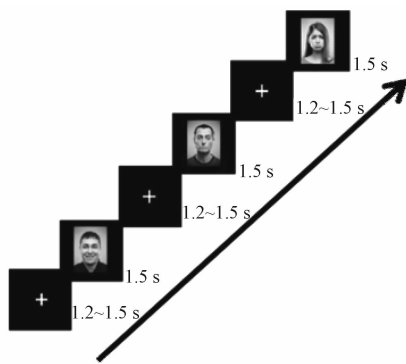


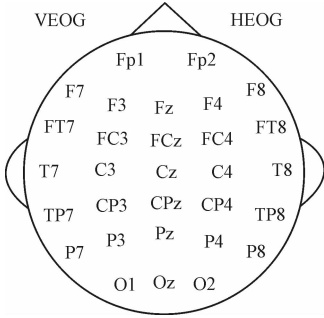
图 1 情绪面孔识别实验范式

因为情绪障碍是抑郁患者的主要临床体征,为探索抑郁症患者与正常人在处理情绪面孔图片时的大脑活动差异,本文后续只针对被试者在执行正性和负性情绪面孔识别过程中的脑活动开展研究。

1.3 数据采集及预处理

EEG 信号采集使用美国 Neuroscan 公司的 ERP 采集分析系统,选用 32 导联电极帽如图 2 所示,电极分布位置严格参照国际 10-20 标准。采用单耳参考,采样率为 1 000 Hz,采集频带为 0.05~400 Hz。在信号采集过程中,被试者坐在明亮、安

静的室内,并在实验过程中尽可能保证清醒、注意力集中。



HEOG 为水平眼电极;VEOG 为垂直眼电极;F 代表该电极位于额叶;C 代表该电极位于中央区;T 代表该电极位于颞叶;P 代表该电极位于顶叶;O 代表该电极位于枕叶
图 2 32 导联脑电帽电极分布图

利用 Curry8 软件对多通道 EEG 信号进行眼电伪迹去除和 0.05~30 Hz 带通滤波,将单耳参考转换为平均参考。针对靶刺激(正性、负性情绪面孔),选取被试者反应正确的 EEG 片段,分别从刺激呈现前 0.2 s 到刺激呈现后 1 s 对 EEG 数据进行分段,剔除信号质量差的片段后,对剩余数据片段进行叠加平均,叠加平均刺激片段数如表 1 所示。最后,进行基线校准,得到所有被试者的 ERP 信号,如图 3 所示。

表 1 叠加平均刺激片段数量

组别	片段数(均值±标准差)	
	正性	负性
NC	45.7±7.8	45.1±7.3
MDD	46.0±6.5	43.9±5.9

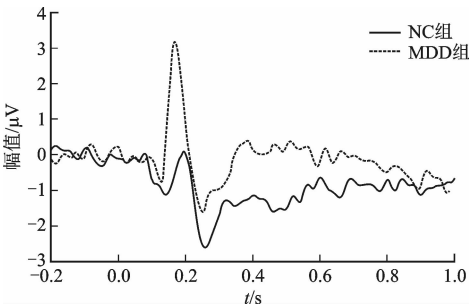


图 3 Fz 导联时两组被试者在正性刺激下的组平均 ERP 信号

2 方法介绍

2.1 微状态分析方法简介

头皮电位地形图的拓扑结构在一定时期内,保持相对稳定并不随时间改变,这种电位地形图即被

称为一个微状态^[9]。微状态分析将基于多通道电信号,获得一系列随时间变化的头皮电位地形图,每个地形图都是在当前瞬间活跃的所有源的作用效果的叠加,是一种瞬时电活动的全局度量^[10-11]。

2.2 原子化凝聚分级聚类算法

在确定最终聚类数及微状态模板时,均须用到聚类算法。本文中采用的聚类算法是一种改进的分级聚类算法,又被称作原子化凝聚分级聚类(AAHC)算法。该算法结合 ERP 数据的特点对传统的分级聚类算法进行了改进,是一种自下而上的聚类算法。相比于 K 均值聚类,AAHC 算法鲁棒性较好,持续时间较短,且全局解释方差(GEV)较高的微状态不会被遗漏^[12]。

AAHC 算法中使用全局解释方差(GEV)来描述微状态模板和原始 ERP 地形图的匹配程度^[12],计算公式如下

$$G_k = \frac{\sum_{t=1}^T (P_u(t)C_{u,S_k})^2 \delta(L_{u,t} - k)}{\sum_{t=1}^T P_u^2(t)}$$

(1)

式中: $G_k \in (0,1)$ 为第 k 种微状态的 GEV 值; S_k 表示第 k 种微状态模板地形图,也被称为微状态 k 的模板; $\delta(\cdot)$ 是单位冲激函数; $L_{u,t}$ 是 t 时刻原始 ERP 地形图对应的微状态编号; C_{u,S_k} 为 u 、 S_k 之间的相关系数; $P_u(t)$ 表示 t 时刻原始 ERP 的全局场能量(GFP),反映了多通道 ERP 的总体幅值强度^[13-14],计算公式如下

$$P_u(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n u_i^2(t)}{n}}$$

(2)

相关系数的通用符号为 $C_{u,v}$,表示两个变量 u 、 v 之间的空间相关性,表达式为

$$C_{u,v} = \frac{\sum_{i=1}^n u_i v_i}{\|u\| \|v\|}$$

(3)

式中: u_i 表示 u 的 i 维分量,对于某一时刻的原始 ERP 地形图即为第 i 导 ERP 信号的幅值; $\|u\|$ 表示 u 的模。

AAHC 算法的流程如图 4 所示。

2.3 最终聚类数的确定

本文中使用 Krzanowski-Lai(KL)准则来确定最终聚类数。离差 W 通过反映各聚类组内部元素之间的离散程度来评价聚类的效果^[15],计算公式如下

$$W_q = \sum_{k=1}^q \frac{1}{2m_k} \sum_{u,v} \|u - v\|^2$$

(4)

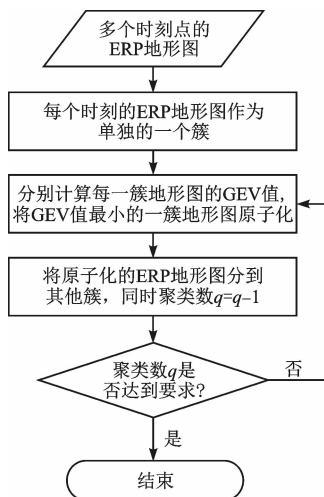


图4 AAHC算法流程图

式中: q 表示最终选定的聚类数; W_q 表示聚 q 类时的离差值; m_k 是第 k 组内包含的ERP地形图向量的个数。当GEV值越接近1, W 越接近0时聚类效果越佳。

KL值反映了 $q-W$ 曲线的相对曲率,计算公式如下

$$K_q = \frac{d_{q-1} - d_q}{W_{q-1}(q-1)^{2/n}} \quad (5)$$

$$d_q = W_q q^{2/n} - W_{q+1}(q+1)^{2/n} \quad (6)$$

式中: q 表示聚类数; n 表示需要聚类的ERP通道数。

依据AAHC算法的性质, q 的选取均是采用 $q-W$ 和 $q-K_q$ 关系图结合考虑的方法。在确定最终聚类数时,首先要确定聚类数范围,其次计算离差 W 并得到 $q-W$ 和 $q-K_q$ 关系图。取 $q-K_q$ 关系图中的最大峰值点所对应的 q 为最优聚类数,且应遵循聚类数尽量小的原则,同时为达较好聚类效果, W 也应尽量小。此外,AAHC算法会导致在聚类数由1增加为2时 W 急剧下降,所以不建议将2选为最优聚类数^[12]。因此, q 的选取还需满足 W 变化不显著这个要求。

在本文中将聚类数选为1~15,在正、负情绪图片两种靶刺激下,分别对NC组和MDD组的组平均ERP地形图采用AAHC算法进行聚类,同时通过 $q-W$ 曲线和 $q-K_q$ 曲线确定最终聚类数,并得到微状态的模板,再将这些模板和每个被试者的原始ERP数据进行匹配,以确定不同时刻的微状态。

2.4 微状态持续时间百分比

在本文中,使用微状态持续时间百分比作为各类微状态的量化特征值。微状态持续时间百分比(r_i)又称为持续时间占比,是指各微状态的持续时

间占总时间的百分比,计算公式^[16]如下

$$r_i = \frac{\sum t_i}{T} \quad (7)$$

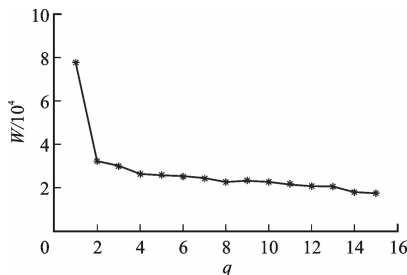
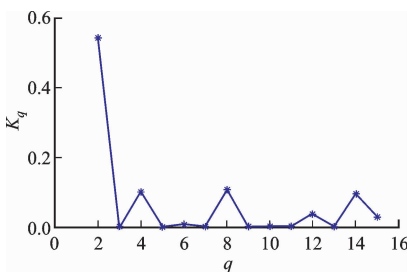
式中: i 表示不同的微状态; t 表示每个微状态的持续时间; T 表示ERP信号的时间总长度。

分别提取两组被试者各微状态的持续时间占比,利用SPSS 22.0软件进行统计分析和组间比较。

3 实验结果

3.1 正性情绪面孔识别状态下ERP微状态的对比

对于正性情绪图片诱发的ERP信号,做出 $q-W$ 曲线和 $q-K_q$ 曲线如图5所示。

(a) 聚类数 q 与离差 W 的关系(b) 聚类数 q 与KL值 K_q 的关系图5 正性图片诱发ERP聚类效果与聚类数 q 的关系图

由图5可见: $q=4, 8$ 时为 $q-K_q$ 曲线最大峰值点;在 $q-W$ 曲线中, q 由4增加到8区间对聚类效果 W 的影响很小,遵循 q 尽量小的原则,故最终确定 $q=4$ 为最优聚类数。因此,在正性图片刺激下,微状态数目选择为4种,分别记为微状态1、微状态2、微状态3、微状态4。

在此基础上对在正性图片刺激下NC组和MDD组的组平均ERP地形图进行聚类,聚类结果如图6所示。

由图6可见,正性面孔刺激时,NC组的微状态切换较为规律,以第1、3、4类微状态为主,而MDD组的微状态切换更加频繁,且以额区能量高为特征的第2、3类微状态为主。

3.2 负性情绪面孔识别状态下ERP微状态的对比

对于负性图片诱发的ERP信号,做出 $q-W$ 曲

线和 q - K_q 曲线如图 7 所示。

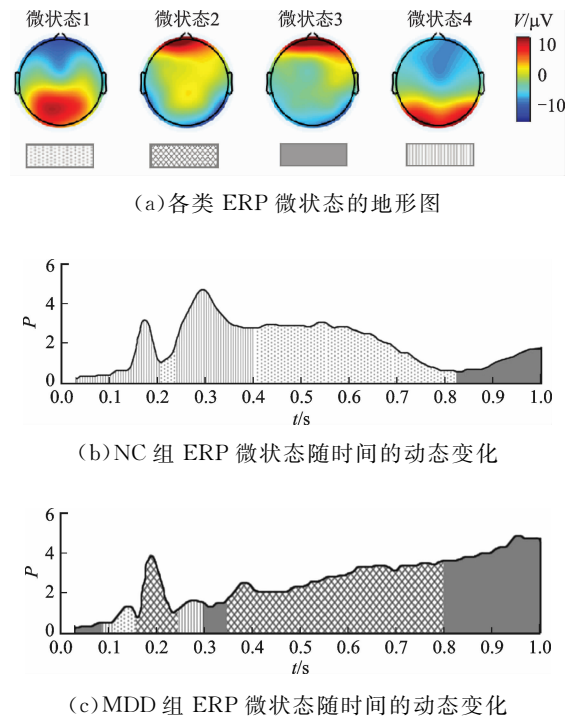


图 6 正性图片刺激下 ERP 微状态类型及其动态变化示意图

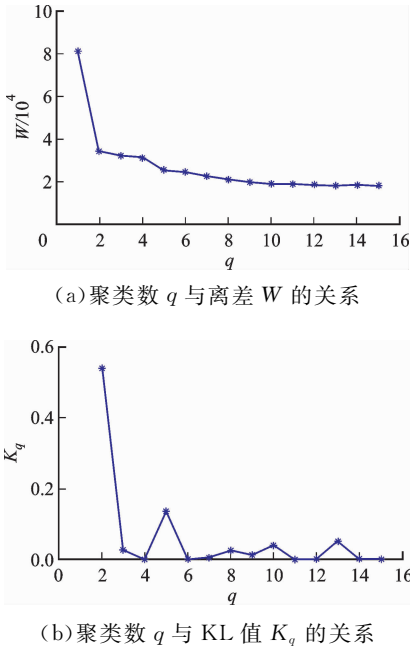


图 7 负性图片诱发 ERP 聚类效果与聚类数 q 的关系

由图 7 可见, $q=5$ 为 q - K_q 曲线最大峰值点。因此,在负性图片刺激下,微状态数选择为 5 种,分别记为微状态 1、微状态 2、微状态 3、微状态 4、微状态 5。在此基础上对在负性图片刺激下 NC 组和 MDD 组的组平均 ERP 地形图进行聚类,聚类结果如图 8 所示。

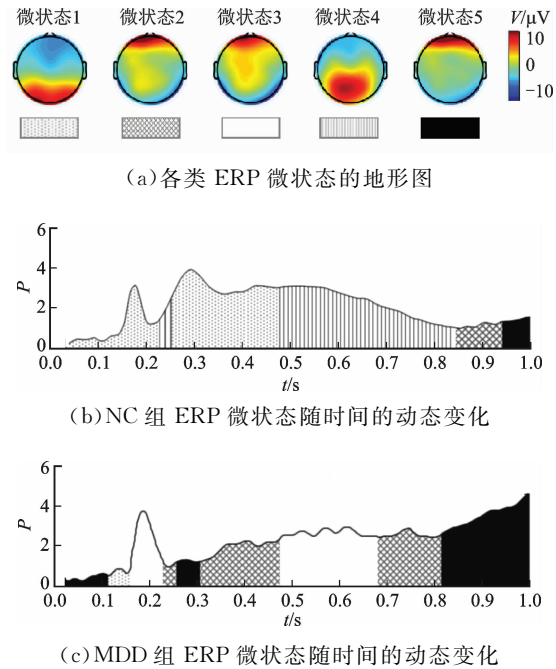


图 8 负性图片刺激下 ERP 微状态类型及其动态变化示意图

由图 8 可见:在负性面孔刺激时,NC 组的微状态切换也较为规律,而 MDD 组的微状态变化仍较频繁;NC 组微状态集中在微状态 1、4,而 MDD 组额叶信号能量高的微状态 2、3 所占时间较长。

3.3 微状态持续时间百分比对比

首先,由图 6 可得,正性面孔刺激时,MDD 组的微状态包括 4 种类型,相比于 NC 组,微状态 2 是 MDD 组独有的。利用两组得到的不同的微状态模板匹配各组每位被试者的 ERP 信号,并针对微状态 1、3、4,分别计算每位被试者的 3 种微状态的持续时间占比。

当数据满足正态分布时,利用独立样本 t 检验比较组间差异,当不满足正态分布时,则采用秩和检验。统计结果如图 9 所示,可以看出两组间微状态 1 和 4 的持续时间占比差异具有统计学意义,MDD 组的持续时间占比显著小于 NC 组。

其次,由图 8 所示,负性面孔刺激时,NC 组诱

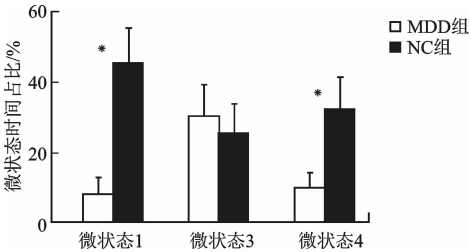


图 9 正性面孔识别状态下 ERP 微状态持续时间占比的均值和标准差 (* 表示 $p<0.05$)

发的 ERP 微状态为 1、2、4、5,而 MDD 组也诱发出 4 种 ERP 微状态,但缺少微状态 4,出现了正常组没有的微状态 3。分别计算两组中每位被试者的微状态持续时间占比并进行统计检验,结果如图 10 所示。由图 10 可见,两组间微状态 1、2、5 的持续时间占比差异均具有统计学意义,相比于 NC 组,MDD 组微状态 1 的持续时间占比显著减小,而微状态 2、5 的持续时间占比显著增大。

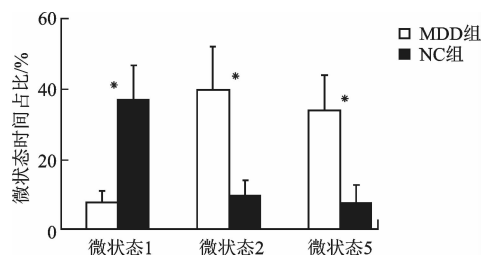


图 10 负性面孔识别状态下 ERP 微状态持续时间占比的均值和标准差 (* 表示 $p < 0.05$)

4 结 论

本文利用 ERP 微状态方法分析了 MDD 组与 NC 组在执行情绪面孔识别任务过程中的脑活动差异,是 ERP 微状态方法在抑郁症研究中的首次应用。研究发现,在正性、负性情绪面孔刺激下,MDD 组和 NC 组 ERP 微状态类型、状态数、持续时间、状态的组合排序等均存在不同。提取微状态持续时间占比为特征参数,统计显示,正性刺激下微状态 1、4 和负性刺激下微状态 1、2、5 的持续时间占比在两组人群之间均存在显著差异。

在负性情绪图片刺激状态下,MDD 组存在额叶高能量的微状态 3,而 NC 组不存在该微状态,且在 MDD 组发现以额叶信号能量高为特征的微状态 2 和微状态 5 的持续时间占比显著高于 NC 组,反映出 MDD 患者在负性情绪图片刺激状态下,大脑在额叶激活要显著高于 NC 组。已有的抑郁症功能磁共振研究发现,抑郁症患者在负性情绪面孔的加工中,前额叶脑区活动增强^[17-18]。Douglas 等人的研究认为,抑郁症患者更难区分自身情绪与外界情绪刺激,因此在情绪加工过程中,需要调动前额叶脑区更多的激活^[19]。本文的研究结果从另一角度很好地证实了这一点。此外,本研究发现在正性情绪图片刺激状态下,MDD 组以枕叶信号能量高为特征的微状态 1 和微状态 4 的持续时间占比显著低于 NC 组,反映出抑郁患者对于正性情绪图片在视觉加工过程中的投入不足,存在明显的排斥现象。

微状态方法在其他精神类疾病的研究中也已获得了一些研究进展。Soni 等人发现精神分裂症患者的脑电微状态 5 持续时间变短,这可能与左侧顶叶及颞叶的过度激活有关^[20];Kochi 等人的研究发现精神分裂症患者 ERP 微状态在左颞叶存在异常^[21];Kiran 等发现癫痫患者微状态 C 的持续时间占比、频次均大于正常人^[22]。

因此,利用 ERP 微状态分析能够很好地反映出抑郁症患者相对于正常人在情绪加工过程中脑活动的差异性,为抑郁症的发病机理研究和早期临床诊断研究提供了方法和依据。

参考文献:

- [1] WHITFORD H A, DEGENHARD L, REHM J, et al. Global burden of disease attributable to mental and substance use disorders: findings from the Global Burden of Disease Study 2010 [J]. *Lancet*, 2013, 382 (9904): 1575-1586.
- [2] MCKENNA M T, MICHAUD C M, MURRAY C J, et al. Assessing the burden of disease in the United States using disability-adjusted life years [J]. *American Journal of Preventive Medicine*, 2005, 28(5): 415-423.
- [3] SMITH K. Mental health: a world of depression [J]. *Nature*, 2014, 515(7526): 180-181.
- [4] 王睿, 黄树明. 抑郁症发病机制研究进展 [J]. *医学研究生学报*, 2014(12): 1332-1336.
WANG Rui, HUANG Shuming. Progress in the pathogenesis of depression [J]. *Journal of Medical Postgraduate*, 2014(12): 1332-1336.
- [5] 赵向东. 事件相关电位 [J]. *现代电生理学杂志*, 2007, 14(4): 228-232.
ZHAO Xiangdong. Event-related potentials [J]. *Journal of Modern Electrophysiology*, 2007, 14(4): 228-232.
- [6] LUCK S J. An introduction to the event-related potential technique [M]. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2014: 125-129.
- [7] 罗跃嘉, 黄宇霞, 李新影, 等. 情绪对认知加工的影响: 事件相关脑电位系列研究 [J]. *心理科学进展*, 2006, 14(4): 505-510.
LUO Yuejia, HUANG Yuxia, LI Xinying, et al. The influence of emotion on cognitive processing: a series of event-related brain potentials [J]. *Advances in Psychological Science*, 2006, 14(4): 505-510.
- [8] LEHMANN D, OZAKI H, PAL I. EEG alpha map series: brain micro-states by space-oriented adaptive

- segmentation [J]. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 1987, 67(3): 271-288.
- [9] KILUCHI M, KOENIG T, MUNESUE T, et al. EEG microstate analysis in drug-naïve patients with panic disorder [J]. *Plos One*, 2011, 6(7): e22912.
- [10] KHANNA A, PASCUALLEONE A, MICHEL C M, et al. Microstates in resting-state EEG: current status and future directions [J]. *Neurosci Biobehav Rev*, 2015, 49: 105-113.
- [11] NISHIDA K, MORISHIMA Y, YOSHIMURA M, et al. EEG microstates associated with salience and frontoparietal networks in frontotemporal dementia, schizophrenia and Alzheimer's disease [J]. *Clinical Neurophysiology*, 2013, 124(6): 1106-1114.
- [12] MURRAY M M, BRUNET D, MICHEL C M. Topographic ERP analyses: a step-by-step tutorial review [J]. *Brain Topography*, 2008, 20(4): 249-264.
- [13] GRIEDER M, KOENIG T, KINOSHITA T, et al. Discovering EEG resting state alterations of semantic dementia [J]. *Clinical Neurophysiology*, 2016, 127(5): 2175-2181.
- [14] BRITZ J, LANDIS T, MICHEL C M. Right parietal brain activity precedes perceptual alternation of bistable stimuli [J]. *Cerebral Cortex*, 2009, 19(1): 55-65.
- [15] TIBSHIRANI R, WALTHER G. Cluster validation by prediction strength [J]. *Journal of Computational & Graphical Statistics*, 2001, 14(3): 511-528.
- [16] LRHMANN D, FABER P L, GALDERISI S, et al. EEG microstate duration and syntax in acute, medication-naïve, first-episode schizophrenia: a multi-center study [J]. *Psychiatry Research*, 2005, 138(2): 141-156.
- [17] ROSENBLAU G, STERZER P, STOY M, et al. Functional neuroanatomy of emotion processing in major depressive disorder is altered after successful antidepressant therapy [J]. *Journal of Psychopharmacology*, 2012, 26(11): 1424-1433.
- [18] 王振华, 施梅. 抑郁症功能性磁共振成像和事件相关电位研究现状 [J]. *中华行为医学与脑科学杂志*, 2013, 22(10): 955-956.
- WANG Zhenhua, SHI Mei. Current status of functional magnetic resonance imaging and event-related potentials in depression [J]. *Chinese Journal of Behavioral Medicine and Brain Sciences*, 2013, 22(10): 955-956.
- [19] DOUGLAS K M, PORTER R J, JOHNSTON L. Sensitivity to posed and genuine facial expressions of emotion in severe depression [J]. *Psychiatry Research*, 2012, 196(1): 72-78.
- [20] SONI S, MUTHUKRISHNAN S P, SOOD M, et al. Hyperactivation of left inferior parietal lobule and left temporal gyri shortens resting EEG microstate in schizophrenia [J]. *Schizophrenia Research*, 2018, 201(9): 204-207.
- [21] KOCHI K, KOENIG T, STRIK W K, et al. Event-related potential P300 microstate topography during visual one-and two-dimensional tasks in chronic schizophrenics [J]. *European Archives of Psychiatry & Clinical Neuroscience*, 1996, 246(6): 288-296.
- [22] KIRAN R V, RAJAGOPALAN S S, BHARDWAJ S, et al. Machine learning detects EEG microstate alterations in patients living with temporal lobe epilepsy [J]. *Seizure*, 2018, 61(5): 8-13.

(编辑 刘杨)

(上接第142页)

- WEN Jiangtao, WANG Yutian, SUN Jiedi. The study of processing to outlier in measured data based on robust filtering [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2002, 15(4): 374-376.
- [15] 许景波, 聂家立, 王升, 等. 基于粗大误差估计的表面测量稳健滤波方法研究 [J]. *计量学报*, 2017, 38(4): 391-395.
- XU Jingbo, NIE Jiali, WANG Sheng, et al. A robust Gaussian filtering method in surface measurement based on gross error estimation [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2017, 38(4): 391-395.
- [16] 张斌. 高效稳健的自适应滤波算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010: 5-10.
- [17] 朴伟英, 袁怡宝, 孙涛, 等. 表面计量中高斯滤波器的
- 一种高精度实现方法 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2013, 11: 546-550.
- PIAO Weiyang, YUAN Yibao, SUN Tao, et al. An accurate algorithm of Gaussian filter for surface metrology [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2013, 11: 546-550.
- [18] 何萌萌. 基于 Radon 变换的直线检测技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 9-16.
- [19] 赵军. 视觉显著性直线的检测算法研究 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2015: 29-38.
- [20] 中华人民共和国工业和信息化部. JBT 5082.7—2011 内燃机 气缸套 第7部分: 平台珩磨网纹 技术规范及检测方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

(编辑 杜秀杰)