

脑卒中后抑郁患者脑电信号长时程相关性分析*

王春方¹, 孙长城¹, 明东², 杜金刚¹

(1. 天津市人民医院康复医学科 天津市康复医学研究所 天津 300121;

2. 天津大学精仪学院生物医学工程系 天津 300072)

摘要:为调查单侧半球损伤的脑卒中后抑郁患者脑电宽频振荡的长时程相关特性,利用去趋势波动分析这一可量化反映脑电信号长时程相关性的方法,研究了18例脑卒中后抑郁患者(8例左半球受损,10例右半球受损),22例脑卒中后无抑郁患者(12例左半球受损,10例右半球受损)宽频带(0.6~46 Hz)脑电信号在0.2~3 s时间尺度下的长时程相关特性。研究发现,虽然左半球受损抑郁患者较右半球受损患者抑郁情况更为严重,但是仅有右半球受损抑郁患者脑电信号长时程相关性在抑郁相关的脑区有显著性减弱,这暗示了不同半球受损卒中患者PSD发生的机制不同,PSD与卒中中受损部位间存在着复杂的关系。

关键词:脑卒中后抑郁;受损半球;脑电;长时程相关性;去趋势波动分析

中图分类号: TH79 R318.04 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Long-range temporal correlation analysis of EEG oscillation in poststroke depression patients

Wang Chunfang¹, Sun Changcheng¹, Ming Dong², Du Jingang¹

(1. Rehabilitation Medical Department, Tianjin Union Medical Center, Rehabilitation Medical Research Center of Tianjin, Tianjin 300121, China; 2. Department of Biomedical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to investigate the long-range temporal correlations (LRTC) of broadband EEG oscillation in poststroke depression (PSD) patients with unilateral hemispheric injury, Broadband EEG (0.6~46 Hz) of 18 poststroke depression patients (8 left hemispheric lesion and 10 right hemispheric lesion) and 22 poststroke non-depression patients (12 left hemispheric lesion and 10 right hemispheric lesion) in the time range of 0.2~3 s. The results show that, although the depressive symptoms is more severe in depressed patients of left lesion than right lesion, significantly decreased LRTC in depressive related brain regions only found in PSD patients with right hemispheric lesion. The results that the pathophysiology of PSD in different hemispheric damage different and support the notion that the association between poststroke depression and lesion location is complex.

Keywords: poststroke depression (PSD); hemispheric lesion; electroencephalogram (EEG); long-range temporal correlation (LRTC); detrended fluctuation analysis (DFA)

1 引言

人类大脑是自然界中最为复杂的系统之一,通常表现出丰富的时空动力学特征,不同频率的脑电(Electroencephalogram, EEG)信号反映这些特征的变化。已有研究证实不同频率和幅值的神经振荡存在着长时程

相关性(long-range temporal correlations, LRTC),有利于大脑皮层神经网络的信息传递。以往研究已经证实多种大脑病理和心理疾病,例如阿尔兹海默症、精神分裂症,儿童多动症等脑电振荡表现出异常的长时程相关性^[1-5],并且长时程相关性在其中一些疾病中具有潜在的诊断价值。

抑郁症患者同样被证实了此方面的异常。Linkenkaer-Hansen K等人^[6]发现与正常人相比,抑郁症

患者脑电 θ 频率在 5 ~ 100 s 的时间尺度上表现出减弱的长时程相关性,且左侧颞-中央区域的瞬态相关性幅值与抑郁严重程度显著相关;Lee J. S. 等人^[7]发现抑郁患者在 0.6 ~ 46 Hz 的宽频振荡中在 1 s 的尺度上较正常人更有更加持久的长时程相关性,且几乎所有脑区的脑电振荡长时程相关性均与抑郁严重程度线性相关。另外,针对负面情绪的研究发现,人在负面情绪爆发时,脑电信号 θ 和宽频振荡下量化长时程相关性的标度指数值与消极情绪的严重程度具有显著的相关性,暗示了抑郁发生前神经振荡已经发生了异常改变^[8,9],说明脑电信号的长时程相关性具有预测抑郁发生的重要价值。

尽管已有研究证实了抑郁症患者脑电振荡的长时程相关特性发生了异常改变,但是针对脑卒中所引起的抑郁患者神经振荡,相关研究还未开展。脑卒中后抑郁(poststroke depression, PSD)是脑卒中后,以情绪低落、兴趣减退为主要病征的精神疾病,为脑卒中后发病率最高的精神类并发症,严重影响了脑卒中患者的康复进程和康复结果。目前其发病机制尚未明确,通常认为心理学、生物学、行为学、社会学等多种因素导致了 PSD 的发生,其中心理学和生物学因素是最主要的^[10-11]。受损部位假设被认为是关于 PSD 发生的主要生物学因素之一。一些研究认为左半球受损的患者患抑郁的概率更高^[12],但是有研究发现不同受损位置的患者在抑郁的发生率上并没有显著差异^[13-14],目前 PSD 与受损半球间的关系还未明确。

本文采用去趋势波动分析(detrended fluctuation analysis, DFA),通过研究不同人群(脑卒中后抑郁、脑卒中后不抑郁)脑电信号的长时程相关性,探究脑卒中后抑郁患者的神经振荡异常改变以及与梗塞半球之间的关系。DFA 以幂率形式量化时间序列的波动情况,侧重分析去局部趋势后时间序列的变化与时间尺度间的关系,可用于检测非平稳时间序列中自相关特性,是一种量化和探讨复杂系统标度无关性的非线性动力学方法,目前已在癫痫、睡眠等不同脑功能状态下的动力学特性的研究中应用。去趋势波动分析的优势在于可以系统地滤去各阶的趋势成分,能够检测含有噪声且叠加有多项式趋势信号的长时程暂态相关性,且其对由缓慢变化的外部趋势所致的伪相关并不敏感。因此很适合研究脑电信号的振荡特性^[14]。

2 材料与方法

2.1 受试者

本研究招募了 18 例 PSD 受试者,其中 8 例左半球受损,10 例右半球受损;22 例脑卒中后不抑郁(poststroke non-depression, PSND)受试者,其中 12 例左半球受损,10

例右半球受损。受试者为天津市人民医院康复医学科的病人,且对此实验知情同意。受试者均为右利手,且在实验前 1 周内未服用安定类等影响中枢神经的药物。受试者入选标准如下:1)第 1 次发病,符合 2005 年《中国脑血管病防治指南》的诊断标准,经 CT 或 MRI 确诊为单侧半球缺血性脑卒中患者;2)意识清醒,无认知障碍,可以完成抑郁问卷调查;3)患者病情平稳,病程小于 12 个月。排除标准如下:1)具有焦虑症、精神分裂症或其他精神类疾病或病史;2)具有癫痫、脑外伤或器质性脑损伤病史;3)有电休克疗法(electroconvulsive therapy, ECT)治疗史。PSD 患者符合 CCMD-III 抑郁症诊断标准且 Hamilton 抑郁量表(24 项版本)评分(Hamilton depression rating scales, HDRS)均大于等于 15 分。

2.2 数据采集

本研究采集受试者静息状态下 EEG 数据。检查室为远离电磁干扰的弱光环境,要求受试者在保持清醒的状态下闭目安坐接收 7 ~ 8 min EEG 采集。使用 NicoletOne 32 通道数字视频脑电图仪,电极按照国际标准导联 10-20 电极系统位置安放;电极阻抗小于 10 k Ω ,以 Cz 作为参考电极,记录 16 导联头皮 EEG 信号(Fp1、Fp2、F3、F4、C3、C4、P3、P4、O1、O2、F7、F8、T3、T4、T5、T6)及双侧耳垂处电信号;信号采样率为 250 Hz, A/D 转换精度为 12 bit,滤波范围为 0.1 ~ 70 Hz。

2.3 数据分析

为确保所得数据无干扰,首先对采集的 EEG 数据进行预处理:1)对原始 EEG 数据进行变参考,将 Cz 参考变为双耳 A1A2 参考;2)行 0.6 ~ 46 Hz 带通滤波,去除高频干扰;3)使用独立成分分析(independent component analysis, ICA)方法去除眼电、心电等干扰信号^[15-16];4)手动剔除数据中依然明显的伪迹,最终得到 120 s 连续 EEG 数据。将 120 s EEG 数据分割为每 10 s 一段,共 12 段,分别用以下算法做 LRTC 分析,共可得 12 个表征 LRTC 特性的参数,本文取其均值作为被试 EEG 信号的 LRTC 特性参数。

对预处理后每一导联的 EEG 数据利用 DFA 方法进行 LRTC 分析。假设时间序列 $x(i)$, $i = \{1, 2, \dots, N\}$ 代表某一导联的 EEG 信号, DFA 计算方法如下^[7,14,17]:

利用式(1)构建去掉均值后的和序列 $y(m)$, 其中 $\langle x \rangle$ 是时间序列均值。其次,将整合后的序列 $y(m)$ 分割为不重叠的长度为 t 的片段, t 代表不同的时间尺度。时间尺度 t 通常选取 $40 \leq t \leq N/4$ ^[14], 本研究选择 50 ~ 750, 采样间隔为 25, 对应 0.2 ~ 3 s 的时间尺度, 采样间隔 0.1 s。对时间尺度 t , 利用最小二乘法得到线性拟合序列 $y_t(m)$ 。利用式(2)得到去趋势后时间序列的波动均方根 $F(t)$ 。对不同的时间尺度重复以上步骤, 得到不

同尺度上时间序列的波动均方根值。最后,在双对数坐标中画出 t 和 $F(t)$,若时间序列 $x(i)$ 具有自相似性即标度无关特性(标度行为), t 和 $F(t)$ 的曲线会呈现一个线性区域(标度区),线性斜率称为标度指数 α 。 α 可以定量时间序列的 LRTC 特性。白噪声、 $1/f$ 噪声、 $1/f^2$ 噪声的 α 值分别为 $0.5/1, 1.5$ 。 $0 < \alpha < 0.5$ 表示时间序列具有长时程时域反相关特性,即若前一刻值较大,则后一刻值有可能较小,反之亦然。 $0.5 < \alpha < 1$ 表示时间序列具有 LRTC 特性,即若前一刻值较大,则后一刻值有可能较大,反之亦然,且 α 值越大,信号的自相关性越强^[14,17]。图1所示为2名受试者(分属 PSD 和 PSND 两类人群)FP1 导联 t 和 $F(t)$ 在双对数坐标中的线性关系,两名受试者 FP1 导联标度指数分别为 0.760 (PSD 患者)、 0.863 (PSND 患者)。

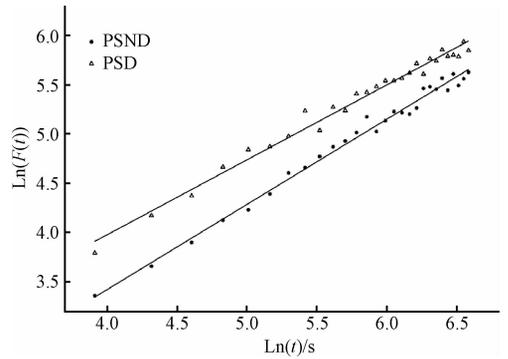


图1 利用去趋势波动分析算法所得双对数曲线示例

Fig. 1 An example of double logarithmic curve using detrended fluctuation analysis

$$y(m) = \sum_{i=1}^m [x(i) - \langle x \rangle] \quad 1 \leq m \leq N \quad (1)$$

$$F(t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N [y(m) - y_t(m)]^2} \quad (2)$$

本研究采用 IBM SPSS19.0 对不同人群的基本信息及量化 LRTC 特性的标度指数值 α 进行了统计学分析。使用单因素方差分析(one-way ANOVA)对不同人群的年龄、性别、HDRS 评分、病程等进行差异性检验。利用双因素方差分析(two-way ANOVA)对表征 LRTC 的标度指数 α 值与脑卒中后抑郁及卒中半球间的关系进行检验;利用皮尔森相关性对标度指数 α 与表征抑郁严重程度的 HDRS 评分进行线性相关性分析。

3 实验结果

3.1 受试者基本信息

PSD、PSND 患者的基本信息如表 1 所示。ANOVA 分析表明,不同人群年龄、性别无显著性差异($p > 0.05$), PSD 与 PSND 患者病程和卒中半球无显著性差异;PSD 患者抑郁分值显著性高于 PSND ($p < 0.001$)。不同受损半球 PSD 和 PSND 患者在年龄、性别和病程方面均无显著性差异。但是左侧半球受损的 PSD 患者抑郁分值要显著性($p < 0.05$)高于右侧受损 PSD 患者,提示左侧半球受损患者抑郁情绪更为严重。

表1 受试者基本信息

Table 1 Basic information of participants

变量	PSND	PSD	F	df	p		
例数	22	18					
性别(F/M)	8/14	7/11	0.026	1/39	0.874		
年龄($M \pm SD$)	60.3 ± 9.0	60.3 ± 7.5	0.000	1/39	0.988		
HDRS($M \pm SD$)	6.14 ± 3.43	21.10 ± 8.24	77.641	1/39	0.000**		
受损半球(L/R)	11/11	8/10	0.117	1/39	0.734		
卒中后时间($M \pm SD$)/月	4.5 ± 4.1	5.1 ± 5.2	0.147	1/39	0.704		
	L	R	L	R			
性别(F/M)	5/7	4/6	4/4	3/7	0.240	3/39	0.868
年龄($M \pm SD$)	61.1 ± 10.5	$59.6 \pm 9.07.6$	62.4 ± 9.4	58.6 ± 5.6	0.354	3/39	0.787
HDRS($M \pm SD$)	5.5 ± 1.6	7.1 ± 4.7	26.7 ± 9.2	19.7 ± 5.3	32.389	3/39	0.000**
卒中后时间($M \pm SD$)/月	4.6 ± 1.4	2.8 ± 2.7	3.5 ± 3.8	6.4 ± 6.0	1.84	3/39	0.157

注: M 为均值; SD 为标准差; HDRS 为汉密尔顿抑郁量表评分; L 为左半球受损; R 为右半球受损

3.2 长时程相关性与脑卒中后抑郁及卒中半球间的关系

图2所示为不同受损半球 PSD 患者和 PSND 患者标度指数值脑区分布情况,可以看到右半球受损的 PSD 患者标度指数值有明显下降。利用双因素方差分析探究抑郁和受损半球两个因素对 EEG 宽频振荡长时程相关性的影响。表2结果显示,PSD 患者标度指数值在左半球大部分区域(FP1、C3、P3、O1、F7、T5)及右半球侧额(F8)

和后颞(T6)区域显著性小于 PSND 患者($p < 0.05$),提示脑卒中患者抑郁情绪对以上脑区的宽频神经振荡长时程相关性有显著影响;左半球受损和右半球受损两类人群标度指数值在右半球顶叶(P4)和枕叶(O2)区域具有显著性差异($p < 0.05$),提示受损半球对以上脑区的长时程相关性有显著性影响;交互效应结果显示,抑郁和受损半球两个因素在右半球侧额(F8)、颞叶(T4)和后颞

(T6)区域的标度指数数值具有交互效应,图3所示为3个导联处不同受损半球 PSD 和 PSND 患者标度指数情况。

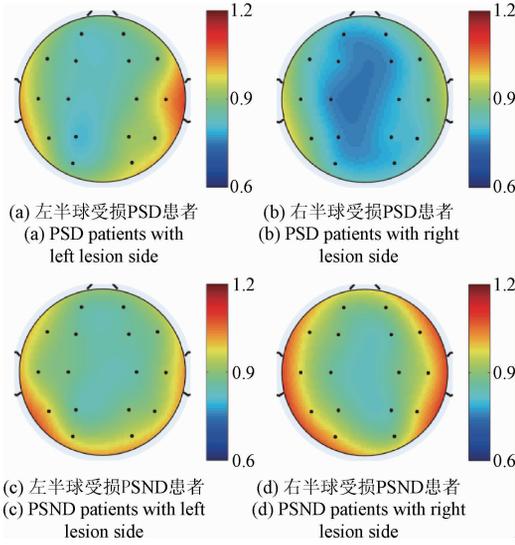


图2 不同受损半球脑卒中后抑郁和不抑郁患者标度指数数值脑区分布情况

Fig.2 The brain area distribution of scaling exponents in poststroke depression and non-depression patients with different hemispheric lesion

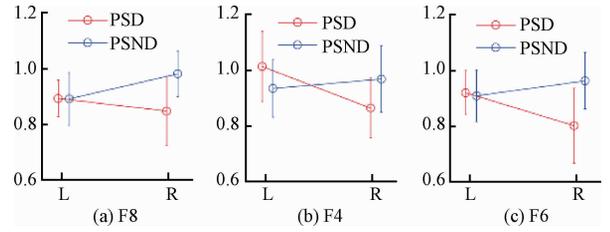


图3 具有显著交互效应导联不同受损半球 PSD 和 PSND 患者标度指数数值 (L:左半球受损,R:右半球受损)

Fig.3 The scaling exponents of PSD and PSND patients in electrodes which have significantly interaction effects (L:left lesion side. R :right lesion side)

3.3 长时程相关性与脑卒中后抑郁严重程度相关性

利用皮尔森相关性分别分析了左半球受损抑郁患者和右半球受损抑郁患者抑郁严重程度与标度指数值的线性相关性。结果显示,不管左半球还是右半球受损,抑郁严重程度与标度指数值均无显著相关性($p > 0.05$)。但是对于右半球受损脑卒中患者,其 HDRS 值与额叶 (FP1、FP2、F4、F7、F8)、颞叶 (T3、T4) 和中央区 (C3、C4) 的标度指数值呈显著负相关,提示右半球损伤患者的抑郁相关情绪与长时程相关性有关。

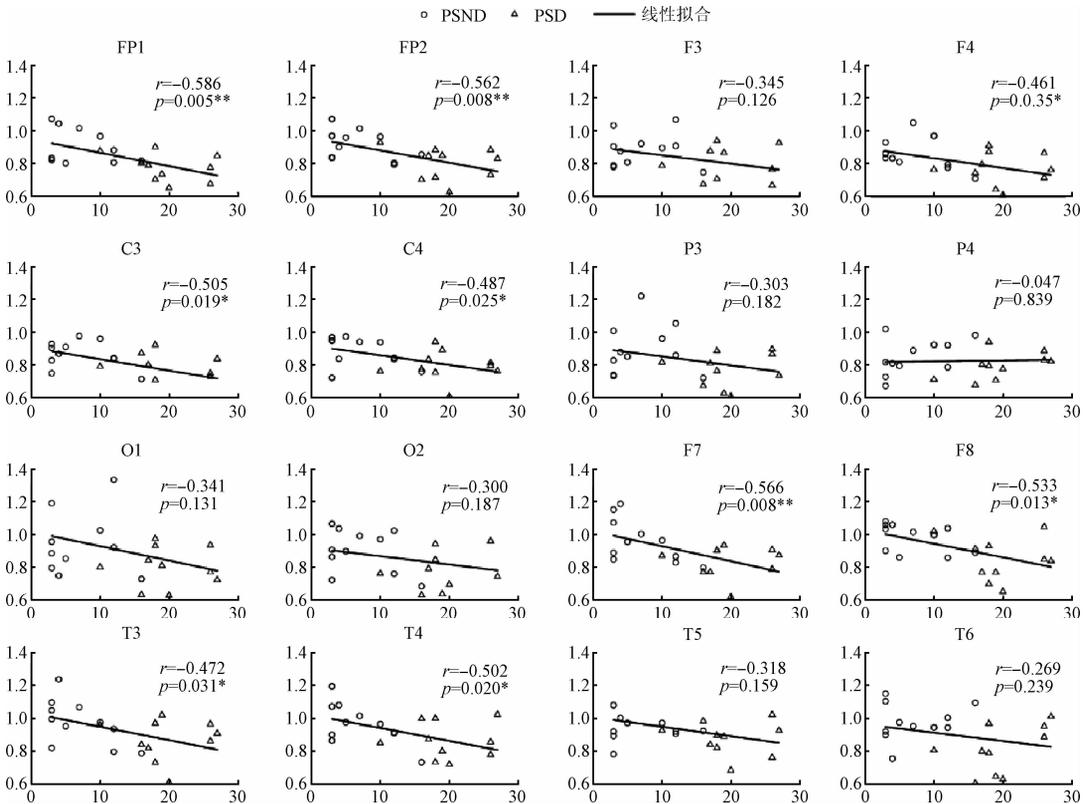


图4 右半球受损患者16导联 EEG 信号标度指数值与汉密尔顿抑郁量表的相关性

Fig.4 Correlations between the scaling exponents in 16 channels and Hamilton rating scales of strokepatients with right lesion side

表2 双因素方差分析主体间效应检验结果
Table 2 Main effect results of Two-way ANOVA for 16 electrodes

源	III型平方和	df	F	Sig.	源	III型平方和	df	F	Sig.
FP1 抑郁	0.06	1	4.4	0.043	FP2 抑郁	0.031	1	6.3	0.079
抑郁*受损半球	0.001	1	0.06	0.811	抑郁*受损半球	0	1	3.3	0.82
受损半球	0.02	1	1.5	0.232	受损半球	0.028	1	0.052	0.095
F3 抑郁	0.046	1	3.8	0.06	F4 抑郁	0.023	1	2	0.165
抑郁*受损半球	0.004	1	0.4	0.557	抑郁*受损半球	0.019	1	1.6	0.212
受损半球	0.012	1	1	0.318	受损半球	0.016	1	1.4	0.245
C3 抑郁	0.058	1	5.3	0.027	C4 抑郁	0.006	1	0.6	0.447
抑郁*受损半球	0.021	1	2	0.169	抑郁*受损半球	0.01	1	0.9	0.344
受损半球	0.01	1	0.9	0.343	受损半球	0.041	1	3.9	0.055
P3 抑郁	0.078	1	5.8	0.021	P4 抑郁	0.002	1	0.2	0.671
抑郁*受损半球	0	1	0.03	0.871	抑郁*受损半球	0.065	1	5.8	0.022
受损半球	0.014	1	1.1	0.311	受损半球	0.016	1	1.4	0.248
O1 抑郁	0.202	1	8.4	0.006	O2 抑郁	0.035	1	1.4	0.248
抑郁*受损半球	0	1	0	0.979	抑郁*受损半球	0.104	1	4.1	0.049
受损半球	0.016	1	0.7	0.416	受损半球	0.021	1	0.8	0.37
F7 抑郁	0.067	1	5	0.031	F8 抑郁	0.042	1	4.2	0.047
抑郁*受损半球	0.002	1	0.1	0.709	抑郁*受损半球	0.005	1	0.5	0.493
受损半球	0.019	1	1.3	0.248	受损半球	0.044	1	4.5	0.041
T3 抑郁	0.026	1	1.9	0.172	T4 抑郁	0.002	1	0.1	0.741
抑郁*受损半球	0	1	0	0.949	抑郁*受损半球	0.032	1	2.3	0.14
受损半球	0.029	1	2.2	0.148	受损半球	0.079	1	5.7	0.022
T5 抑郁	0.077	1	4.9	0.033	T6 抑郁	0.059	1	4.5	0.04
抑郁*受损半球	0.003	1	0.2	0.641	抑郁*受损半球	0.011	1	0.8	0.367
受损半球	0.003	1	0.2	0.655	受损半球	0.078	1	6	0.02

4 讨 论

本文利用 DFA 方法对单侧半球损伤的脑卒中后抑郁患者脑电信号宽频振荡进行了 LRTC 分析。结果显示,对于脑卒中患者,抑郁因素会导致左半球大部分脑区及右半球额颞交界区域宽频脑电振荡长时程相关性的减弱,而受损半球对脑电振荡的影响主要集中在右半球顶枕区域。受损半球与抑郁的发生具有交互作用,右半球受损的脑卒中患者颞叶及额颞交界区域长时程相关性的减弱更为显著,此外,右半球受损患者抑郁情绪的严重程度与长时程相关性的减弱线性相关。

α 是 DFA 分析中研究大脑长时程相关性这一动力学特性的重要指标,可以有效量化大脑自发振荡的潜在动力学过程。抑郁患者尤其是右半球受损抑郁患者在左

半球及右半球额颞交界区域 EEG 振荡存在减弱的长时程相关性,其中右半球额颞交界区域更为严重,说明右侧半球梗死这一脑部器质性病变所导致的抑郁容易造成 EEG 信号自相似性的减弱,信号更加紊乱无序,尤其是对与情绪相关的右半球额颞交界区域。

有关抑郁患者宽频 EEG 信号长时程相关性异常的文献有限。Bachmann M 等人^[18]发现女性抑郁患者 0.3~70 Hz EEG 信号在 0.1~1.1 s 的时间尺度上表现出减弱的长时程相关性,与本研究的发现一致。但是, Lee J 等人^[7]发现普通抑郁症患者 0.6~46 Hz EEG 信号在 0.1~0.6 s 的时间尺度上表现出升高的长时程相关性,且标度指数值与抑郁严重程度正相关;Bornas X 等人^[9]发现正常人在与抑郁相关的负性情绪发生时,其严重程度与 1~40 Hz EEG 信号在 0.1~0.6 s 的时间尺度上的标度指数值同样正相关,这与本研究的结果不同。

研究结果的差异性可能与选取的时间尺度,振荡频率以及年龄、性别、抑郁亚型等因素有关。脑卒中尤其是右半球卒中后抑郁患者在长时程相关性上的异常体现与女性抑郁患者的表现一致,这可能是因为女性抑郁与卒中后抑郁均以情绪低落,兴趣丧失为主要特征;卒中后抑郁与非卒中引起的普通重性抑郁(major depressive disorder, MDD)的不同表现说明脑卒中这一器质性病变所引起的抑郁症有其特异性的 EEG 振荡异常表现。

另外,本文发现右半球受损抑郁患者长时程相关性的减弱更为显著,且抑郁情绪的严重程度与长时程相关性的减弱显著相关。有研究表明,右半球与负面悲观情绪、非结构性思维的处理有关,右半球尤其是右侧额叶损伤经常会导致情感淡漠,右半球受损可能会通过扰乱正常的情绪处理机制而影响抑郁情绪的表达^[19-21]。长时程相关性体现了神经元振荡在时间维度上的动力学特性,右半球受损抑郁患者 EEG 信号所体现出的减弱的长时程相关性体现了不同神经元振荡之间的联系更为松散。

受损部位理论作为 PSD 发生的病理学假设之一,一直备受争论,不同的研究得到的结果不尽相同,甚至相反。有研究报道左半球受损的脑卒中患者患抑郁的概率会增加,但是另有报告右半球受损的脑卒中患者抑郁症患病率更高或者抑郁的发生与受损部位无关^[22-24]。本研究左半球受损 PSD 患者较右半球受损患者抑郁情况更为严重,但是仅有右半球受损 PSD 患者 EEG 长时程相关性在抑郁相关脑区有显著性减弱,提示不同半球受损脑卒中患者 PSD 发生的机制不同,PSD 与脑卒中受损部位间存在着复杂的关系,这与以往研究结果相一致^[25]。

5 结 论

本研究发现抑郁情绪与受损半球对 EEG 宽频振荡的长时程相关性具有交互效应,仅右半球受损抑郁患者长时程相关性存在长时程相关性显著减弱现象,尤其是与抑郁相关的额颞脑区。结果说明右半球受损患者抑郁的发生与神经振荡异常密切相关,而左半球受损患者则不然。本文为卒中后抑郁提供了新的研究思路,暗示了不同半球受损脑卒中患者抑郁发生的机制不同,值得进行深入研究。当然本文也存在局限性。本研究样本量偏少,随着样本量的扩大,研究得到的长时程振荡的异常脑区以及标度指数与抑郁量表分值的相关性将更为精确。另外,本文仅就 EEG 宽频振荡进行了探讨,因为 EEG 信号是多个频带振荡的时空叠加,未来的研究将对 θ 、 α 、 β 等窄带频率在不同受损脑区和抑郁情况下长时程相关性做进一步研究。

参考文献

- [1] TERESA M, SIMON-SHLOMO P, JONES B F, et al. Altered temporal correlations in parietal alpha and prefrontal theta oscillations in early-stage Alzheimer disease [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(5):1614-1619.
- [2] 郭湛超,覃玉荣,赵隆. 视觉通路下闪光刺激对 SSVEP 影响的仿真研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(4):653-659.
GUO ZH CH, TAN Y R, ZHAO L. Simulation research on the influence of flash stimulation under visual pathway on SSVEP [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(4):653-659.
- [3] 李学华,蒲文栋,余华,等. 儿童多动症脑电生物反馈治疗系统 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2008, 22(增刊2):339-341.
LI X H, PU W D, YU H, et al. Development of EEG biofeedback system for attention deficit hyperactivity disorder [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2008, 22(s2):339-341.
- [4] NIKULIN V V, JÖNSSON E G, BRISMAR T. Attenuation of long-range temporal correlations in the amplitude dynamics of alpha and beta neuronal oscillations in patients with schizophrenia [J]. *Neuroimage*, 2012, 61(1):162-169.
- [5] SMIT D J, DE GEUS E J, VAN DE NIEUWENHUIJZEN M E, et al. Scale-free modulation of resting-state neuronal oscillations reflects prolonged brain maturation in humans [J]. *The Journal of Neuroscience*, 2011, 31(37):13128-13136.
- [6] LINKENKAER-HANSEN K, MONTO S, RYTSÄLÄ H, et al. Breakdown of long-range temporal correlations in theta oscillations in patients with major depressive disorder [J]. *The Journal of Neuroscience*, 2005, 25(44):10131-10137.
- [7] LEE J S, YANG B H, LEE J H, et al. Detrended fluctuation analysis of resting EEG in depressed outpatients and healthy controls [J]. *Clinical Neurophysiology*, 2007, 118(11):2489-2496.
- [8] BORNAS X, FIOL-VENY A, BALLE M, et al. Long range temporal correlations in EEG oscillations of subclinically depressed individuals: Their association with brooding and suppression [J]. *Cognitive Neurodynamics*, 2015, 9(1):53-62.
- [9] BORNAS X, NOGUERA M, BALLE M, et al. Long-range temporal correlations in resting EEG: Its associations with depression-related emotion regulation strategies [J]. *Journal of Psychophysiology*, 2013, 27(2):60-66.

- [10] PEDROSO V S P, DE SOUZA L C, BRUNONI A R, et al. Post stroke depression: Clinics, etiopathogenesis and therapeutics[J]. *Revista De Psiquiatria Clinica*, 2015, 42(1): 18-24.
- [11] AYIS S A, AYERBE L, CRICHTON S L, et al. The natural history of depression and trajectories of symptoms long term after stroke: the prospective south london stroke register [J]. *Journal of Affective Disorders*, 2016, 194(4): 65-71.
- [12] ROBINSON R G. The clinical neuropsychiatry of stroke[M]. New York: Cambridge University Press, 2006.
- [13] BERG A, PALOMÄKI H, LEHTIHALMES M, et al. Poststroke depression: an 18-month follow-up [J]. *Stroke*, 2003, 34(1):138-143.
- [14] LEISTEDT S, DUMONT M, LANQUART J P, et al. Characterization of the sleep EEG in acutely depressed men using detrended fluctuation analysis [J]. *Clinical Neurophysiology*, 2007, 118(4):940-950.
- [15] 杨帮华, 章云元, 何亮飞, 等. 脑机接口中基于 ICA-RLS 的 EOG 伪迹自动去除 [J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(3):668-674.
- YANG B H, ZHANG Y Y, HE L F, et al. , Removal of EOG artifacts from EEG signals in BCI based on ICA-RLS [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(3):668-674.
- [16] 纪俐, 王宏, 张驰, 等. 驾驶员脑电特征与手臂操纵驾驶行为研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(9): 2050-2056.
- JI L, WANG H, ZHANG CH, et al. , Research on driver EEG characteristic and arm steering behavior [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(9): 2050-2056.
- [17] PENG C K, HAVLIN S, STANLEY H E, et al. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series [J]. *Chaos*, 1995, 5(1): 82- 87.
- [18] BACHMANN M, SUHHOVA A, LASS J, et al. Detrended fluctuation analysis of EEG in depression[C]. XIII Mediterranean Conference on Medical and Biological, 2013:694-697.
- [19] HECHT D. Depression and the hyperactive right-hemisphere[J]. *Neuroscience Research*, 2010, 68(2): 6877-6887.
- [20] SPALLETTA G, SERRA L, FADDA L, et al. Unawareness of motor impairment and emotions in right hemispheric stroke: A preliminary investigation [J]. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 2007, 22(12): 1241-1246.
- [21] BOWERS D , BLONDER L X , FEINBERG T , et al .

Differential impact of right and left hemisphere lesions on facial emotion and object imagery [J]. *Brain*, 1991, 114(6):2593-2609.

- [22] PEDROSO V S P, SOUZA L C, BRUNONI A R, et al. Post stroke depression: Clinics, etiopathogenesis and therapeutics[J]. *Revista De Psiquiatria Clinica*, 2015, 42(1): 18-24.
- [23] ROBINSON R G. Poststroke depression: Prevalence, diagnosis, treatment, and disease progression [J]. *Biological Psychiatry*, 2003, 54(3):376-387.
- [24] CARSON A J, MACHALE S, ALLEN K, et al. Depression after stroke and lesion location: A systematic review[J]. *Lancet*, 2000, 356(9224): 122-126.
- [25] BHOGAL S K, TEASELL R, FOLEY N, et al. Lesion location and poststroke depression: systematic review of the methodological limitations in the literature [J]. *Stroke*, 2000, 35(3):794-802.

作者简介



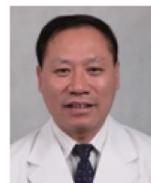
王春方, 2014 年于天津大学获得硕士学位, 现为天津市人民医院实习研究员, 主要研究方向为生物电信号处理和神经康复。
E-mail: chfwang@tju.edu.cn

Wang Chunfang received her B. Sc. degree in 2011 from Hebei University of Science & Technology received her M. Sc. degree in 2014 from Tianjin University. Now she is an intern researcher in Tianjin Union Medical Centre. Her main research interests include biological signal processing and neuro-rehabilitation.



明东, 2004 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学生物医学工程专业教授, 主要研究方向为神经工程与康复、生物医学信息处理等。
E-mail: richardming@tju.edu.cn

Ming Dong received his Ph. D. degree in 2004 from Tianjin University. Now he is a Professor in Tianjin University. His major research interests include neural engineering and rehabilitation, biomedical information processing.



杜金刚(通讯作者), 1983 年于第四军医大学获得学士学位, 现为天津市人民医院主任医师, 主要研究方向为生物电信号处理、神经康复和运动康复等。
E-mail: rmyy126du@sina.com

Du Jingang (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1983 from The Fourth Military Medical University. Now he is a in Tianjin Union Medical Centre. H main research interests include biological signal processing, neuro-rehabilitation and sports rehabilitation.