

· 生物电子学 ·

心理意识真实性的事件相关同步研究

赵敏^{1,2*}, 赵春临²

(1. 电子科技大学生命科学与技术学院 成都 610054; 2. 武警工程大学信息工程系 西安 710086)

【摘要】为揭示“说谎”与“说真话”时脑电信号的差异, 该文对测谎实验中自发脑电信号的事件相关同步(ERS)进行了深入研究。分别对脑电的delta、theta节律的事件相关同步进行了详细分析, 发现delta和theta节律的ERS可以反映说谎相关的心理状态, 其中delta节律的ERS与P300高度相关, 而theta节律的ERS效应与经典的P300效应尽管在时间上有一定的重叠, 但具有不同的头皮分布特性。通过对比Fz、Cz和Pz 3个电极的主效应, 发现theta同步的最大主效应位于前额中线的Fz电极, 而P300的最大主效应在枕区中线的Pz电极。这说明theta节律的ERS与P300成分可能从不同角度反映了说谎心理的认知加工过程。

关键词 脑电信号; 事件相关同步; 测谎; 心理意识真实性

中图分类号 R318.04; R395.9 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2019.03.025

The Study of Event Related Synchronization Based on EEG during Mentality Facticity

ZHAO Min^{1,2*} and ZHAO Chun-lin²

(1. School of Life Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Department of Information Engineering, Army Police Engineering University Xi'an 710086)

Abstract In order to reveal the electroencephalogram (EEG) differences between truth and lying, the event related synchronization (ERS) is deeply studied for spontaneous EEG during the lying detection experiment. The ERS corresponding to delta and theta rhythm of EEG is analyzed in detail. The results indicate that ERS corresponding to delta and theta rhythm can reflect the deception-related psychological states. The delta synchronization is strongly related with P300. The theta synchronization effect overlaps with the ERPs effect, but ERPs and the synchronization effects have different scalp distribution character. The results show that the theta synchronization effect is strongest in Fz electrode and the ERPs effect is maximal on Pz electrode. This evidence implies that ERS corresponding to theta rhythm and P300 might reflect the deception-related cognitive psychological process from different aspects.

Key words EEG; event related synchronization(ERS); lie detection; mentality facticity

事件相关电位在测谎研究中得到了广泛的关注并取得了较好的成果^[1-4], 但某些与说谎相关的自发脑电的变化一度被忽略。一个内在或外在的刺激事件不仅会产生事件相关电位(event-related potential, ERP), 同时也会引起自发脑电的变化, 表现为事件相关同步ERS或去同步(event-related desynchronization, ERD)现象^[5]。已有研究显示EEG特定频率成分的ERS现象与大脑的记忆、注意、决策等认知功能相关^[6-8], 而说谎是一个涉及知觉、记忆、情感、冲突心理、决策和反应等复杂的心理过程^[2,9-11]。因此, 本文主要对测谎实验中的EEG信号在delta、theta频

带的ERS/ERD现象进行探索性研究, 以期从EEG信号的特定频率成分中获得一些可以反映说谎心理加工过程的指标, 更多地揭示“说谎”与“说真话”时脑电信号的差异。

1 实验及数据采集

实验测试以经典的犯罪知识测试(guilty knowledge test, GKT)范式^[2-3]。从校园网上召集到32名学生自愿者, 将他们随机分为有罪组和对照组。

实验任务: 将分别装有同一张扑克牌的5个信封放入实验室抽屉。受试者被要求完成一项指定任务:

收稿日期: 2018-05-14; 修回日期: 2018-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(30870654)

作者简介: 赵敏(1978-), 女, 博士, 主要从事生物医学信号处理及模式识别方面的研究。Email: zhaoclzm@163.com

即受试者进入实验室, 从一个指定的抽屉里拿走信封; 对于有罪组, 受试者被要求打开信封知晓扑克牌详细信息; 对于对照组, 受试者被要求不能打开信封, 因此对扑克牌信息不知情。

测试方法: 实验刺激以BMP格式图片形式出现, 探测刺激为信封里装的扑克牌, 另外5张扑克牌作为无关刺激, 并指定其中1张为靶刺激, 测试序列随机出现。任务要求受试者对探测刺激和无关刺激通过按键的方式作否定回答, 对靶刺激作肯定回答。在整个刺激序列中探测刺激和靶刺激各出现24次(16.7%), 无关刺激112次(66.7%), 共160次刺激随机出现, 刺激呈现的时间为1 s, 刺激之间间隔3 s。受试者按照实验要求, 对随机出现的刺激问题判断后以尽快按下鼠标“左键”或“右键”的形式分别回答“是”或“不是”。

EEG数据采集用标准10-20导联头皮电极系统32导电极帽, 放大器的通带频带为0.3~70 Hz, 采用频率1 000 Hz, 各导联阻抗均小于5 k Ω 。采集的数据经去除眼电伪迹。取刺激出现前500 ms到后1 500 ms的数据作为分析数据, 平均各类刺激的分段数据得到对应各类刺激的ERP数据。15个受试者每人进行两组实验, 共30组样本数据供后续分析。

2 事件相关同步/去同步与事件相关电位

ERS/ERD反应了控制自发EEG的特定频率成分的主神经元和中间神经元的局部交互作用的活动变化^[5]。当外部的刺激事件发生时, 自发脑电的事件相关现象通常以特定频率成分的能量增加或减少的形式出现, 前者称之为事件相关同步, 后者被称为事件相关去同步。因此, 对于自发脑电信号的ERS/ERD的研究必须在特定的频率范围内, 同时具有一定时段的基线数据作为参考。

2.1 ERD/ERS的时程量化方法

ERD/ERS的一个基本特征是自发EEG的特定频带能量相对于参考时间段相同频带能量的百分比。文献[5]给出了ERD/ERS的精确定义, 并最早提出了一种经典的能量法来量化ERD/ERS的时程。后来相关学者在之前的经典能量量化方法的基础上, 区分了脑电活动的相位锁定成分和非相位锁定成分并考虑了相位锁定的ERP对量化ERS/ERD时程的影响, 提出了一种改进的量化ERS/ERD时程的能量方法, 称作Intertrial variance方法^[12-13]。作为本文研究的基础, 本文简单介绍该方法量化ERS/ERD的基本过程。

用 $X(i, j)$ 代表 N 次实验中第 i 次实验的第 j 个时刻的脑电信号样本值, 则量化ERS/ERD的步骤如下。

1) 对脑电信号进行特定频带滤波, 得到滤波后各次实验的脑电时间序列 $X_f(i, j)$, 本文采用小波包分解和重构方法对EEG信号进行滤波, 主要提取delta(0.5~4 Hz)和theta(4~8 Hz)频带信号;

2) 计算每次实验的滤波后脑电信号各采样点的幅值平方, 得到脑电能量序列 $X_f(i, j)^2$;

3) 计算 N 次实验所有脑电能量序列的叠加平均, 得到特定频段内脑电能量的时程变化, 各个时刻点 j 的平均脑电能量为:

$$\bar{X}_f(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_f(i, j)^2 \quad (1)$$

4) 计算各次实验中的脑电能量序列与所有实验的脑电能量平均值之差的平方, 得到各次实验的能量方差:

$$A(j) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \{X_f(i, j) - \bar{X}_f(j)\}^2 \quad (2)$$

5) 选择刺激信息出现前大脑放松状态的一段时间内的平均特定频带脑电能量作为参考, 记做 R , 则第 j 点的ERS可计算为:

$$\text{ERS}(j) = \frac{A(j) - R}{R} \times 100\% \quad (3)$$

式中, R 为参考时间段的特定频带脑电的平均能量;

6) 对ERS(j)序列在时间上进行平滑处理, 本文对计算得到的ERD数据在125 ms的时窗内求平均值, 然后以25 ms时移在下一个时窗内求平均值, 最后得到平滑后的ERD/ERS的时程。

通过上述6个步骤, 可得到某一种大脑认知状态下的脑电信号能量的百分比变化, 从而量化了ERD/ERS的时程。很明显, ERD对应于负的百分比值, ERS对应于正的百分比值, 为了描述方便, 在后续研究中统一用ERS表示。

本文选择测谎实验中刺激出现前1 000 ms的自发脑电作为参考时间段数据, 并应用小波包分解重构方法对自发脑电进行相应频带的滤波, 对刺激出现后的0~1 000 ms的脑电数据计算其ERS/ERD的时程变化。

2.2 小波包分解重构提取各频段EEG信号方法

本文应用小波包分解重构方法对EEG信号的delta(0.5~4 Hz)和theta(4~8 Hz)节律进行滤波, 选择Daubechies系列的db4作为小波基函数对截取的脑电信号数据段进行小波包分解。实验中采集的脑电信号的频率范围为0.01~70 Hz, 经小波去噪后脑电

信号在0.5~30 Hz频率范围。可以对delta(0.5~4 Hz)和theta(4~8 Hz)频带的脑电信号进行滤波。对于采样率为1 000 Hz, 且经过小波去噪预处理的脑电信号, 采样8级小波包分解和重构可获得delta(0.5~4 Hz)和theta(4~8 Hz)节律成分。并根据文献[13]提出的Intertrial variance方法分别对两个节律的ERS时程进行量化。

3 结果与分析

按照上述方法, 对模拟犯罪测试实验中两组受试者的说谎相关脑电应用小波包分解和重构方法提取了delta(0.5~4 Hz)、theta(4~8 Hz)频带信号, 然后采用经典能量法量化其ERD/ERS时程, 其中选择刺激出现前-1 000~0 ms作为参考时间段, 对刺激出现后的0~1 000 ms的脑电数据计算其ERS/ERD

的时程变化。主要对大脑中线脑区即Fz、Cz和Pz电极位置在delta(0.5~4 Hz)和theta(4~8 Hz)频段内的相关脑电作为深入分析。

3.1 Delta频带的ERS

图1给出了模拟犯罪测试中两组受试者分别在Fz、Cz和Pz电极位置的总平均delta节律的事件相关同步的时程变化。从图中可以观察到, 在刺激出现后的200~800 ms的时间段内, 有罪组受试者的探测刺激和靶刺激比无关刺激诱发的ERS明显大; 而对对照组受试者表现出无关刺激比探测刺激诱发的ERS稍大一点, 只是靶刺激对应的ERS出现了明显的增大。从delta节律的ERS在3个电极的分布来看, Pz电极的ERS值相对较大, 而Fz电极的值相对较小, 这一分布特点与P300成分相同。这主要是因为delta节律属于低频慢波成分, 与P300成分的产生高度相关。

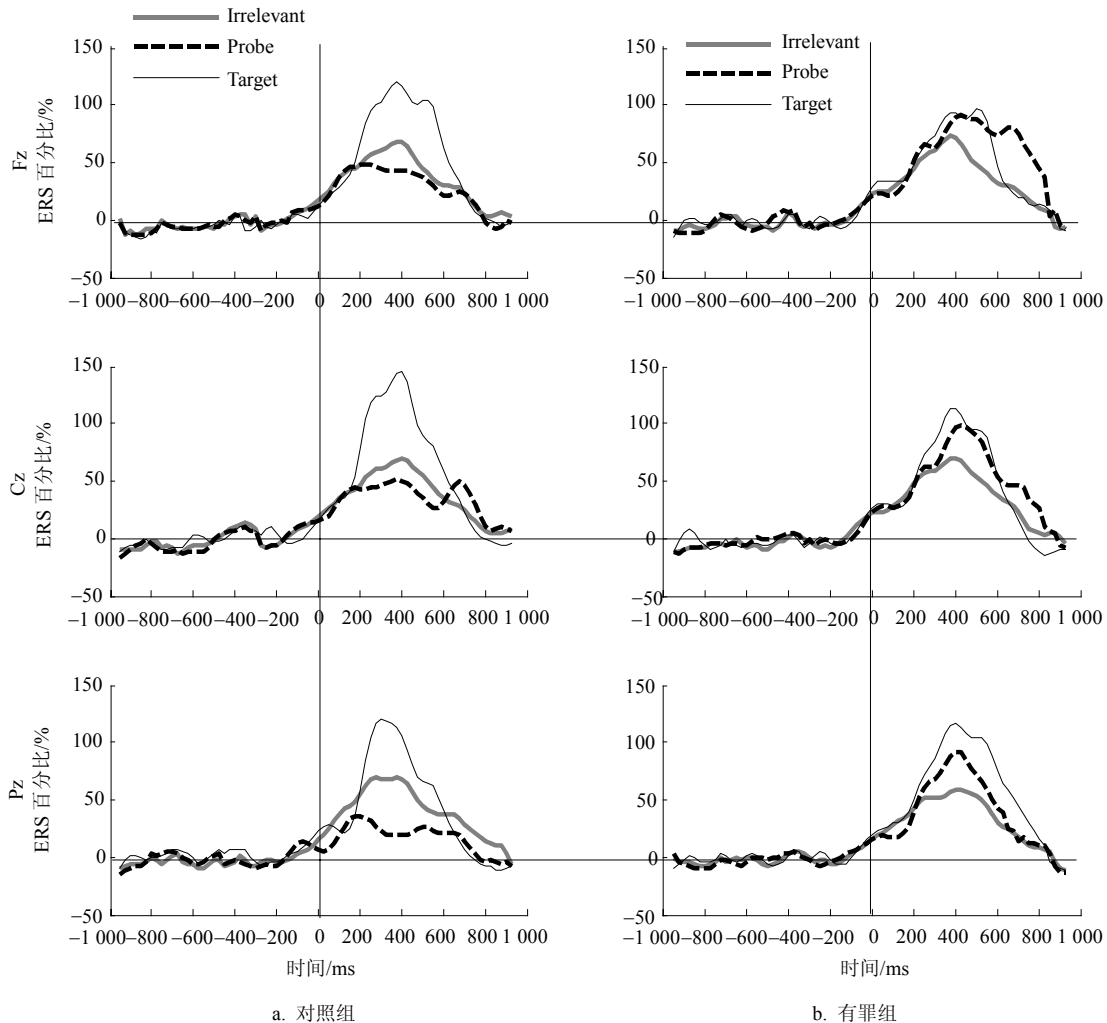


图1 两组受试者在Fz、Cz和Pz电极的Delta节律的总平均事件相关同步的时程变化

为了进一步量化不同类型刺激对应的ERS的差异并分析其统计特性, 本文对刺激出现后ERS在200~600 ms时间段的平均值作为衡量ERS的指标。

图2显示了模拟犯罪测试实验中两组受试者对应3类刺激信息在Fz、Cz和Pz电极的量化的ERS指标的均值和标准差。

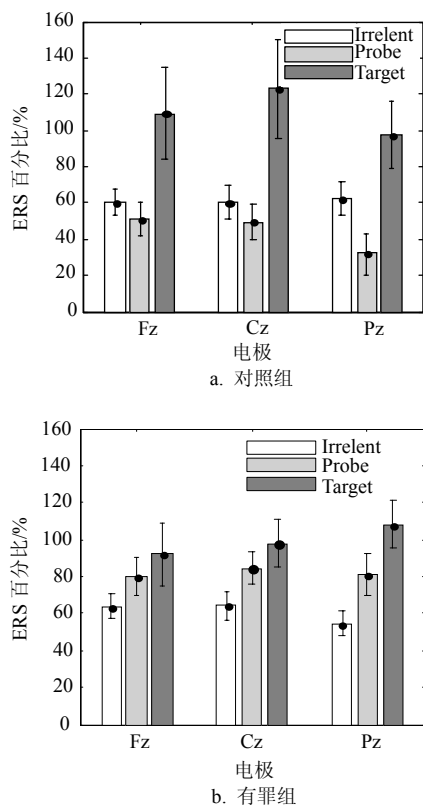


图2 实验中的两组受试者对应3类刺激量化ERS值在Fz、Cz和Pz电极的均值和标准差

对delta节律的ERS的量化指标进行重复测量的三因素(组×电极位置×刺激类型)方差分析显示,刺激类型具有显著的主效应: $F(2,60)=10.671, P<0.001$; 电极位置主效应不显著: $F(2,60)=1.199, P>0.001$; 组主效应不显著: $F(1,30)=0.648, P=0.427$ 。电极×组的交互效应不显著: $F(2,60)=0.402, P=0.671$; 刺激×组的交互效应显著: $F(2,60)=3.380, P=0.041$; 电极×刺激的交互效应不显著: $F(4,120)=0.154, P=0.961$; 刺激类型×电极×组的交互效应不显著: $F(4,120)=0.959, P=0.433$ 。这一结果说明,不同刺激诱发的delta节律的ERS的差异性在两组受试者之间具有明显的不同。因此,需要分别对两组受试者的刺激之间的统计差异性进行事后分析。对于有罪组,刺激之间在Fz电极具有显著差异($F(2,30)=4.394, P=0.021$),两两比较显示,无关刺激和探测刺激没有显著性差异,靶刺激和无关、探测都有显著性差异;刺激之间在Cz电极也具有显著性差异($F(2,30)=17.947, P<0.001$),两两比较显示,无关刺激和探测刺激差异显著,无关刺激和靶刺激之间差异显著,探测刺激和靶刺激之间差异不显著;刺激之间在Pz电极具有显著性差异($F(2,30)=23.094, P<0.001$),两两比较显示,无关刺激和探测刺激差异显著,无关

刺激和靶刺激之间差异显著,探测刺激和靶刺激差异不显著;对于无辜组,刺激之间也具有显著性差异,其中,Fz电极: $F(2,30)=5.006, P=0.013$; Cz电极: $F(2,30)=6.528, P=0.004$; Pz电极: $F(2,30)=7.560, P=0.002$ 。但是配对比较显示,3个电极都是靶刺激和其他刺激之间差异显著($P<0.05$),而无关刺激和探测刺激之间差异不显著。上述统计学分析结果说明delta节律的ERS在刺激之间具有明显差异,特别是在有罪组探测刺激和无关刺激之间具有可区分性,且最大主效应发生在Pz电极。

3.2 Theta频带ERS

图3给出了模拟犯罪测试中两组受试者分别在Fz、Cz和Pz电极位置的总平均theta事件相关同步的时程变化。从图中可以看到,在刺激出现后的200~500 ms的时间段内,有罪组受试者的探测刺激和靶刺激比无关刺激诱发的ERS明显大;而无辜组受试者的ERS在无关刺激和探测刺激之间并没有明显差别,只是靶刺激对应的ERS出现了明显的增大。值得一提的是,比较3个电极的ERS时程变化特性可以发现,theta频带的ERS在Fz和Cz电极出现了较大值,而在Pz电极出现了较小值,这是与delta节律特性明显不同的特点。

为了进一步量化不同刺激对应的ERS的差异,对刺激出现后ERS在200~500 ms时间段的平均值作为衡量ERS的指标,图4显示了模拟犯罪测试实验中两组受试者对应3类刺激信息的量化ERS指标的均值和标准差。对模拟犯罪测试实验的两种受试者在3个电极对应不同刺激的ERS指标进行重复测量的三因素(组×电极×刺激类型)方差分析。分析显示ERS量化指标,在刺激类型具有显著的主效应($F(2,60)=21.821, P<0.001$),在电极之间有显著主效应($F(2,60)=12.119, P<0.001$),组之间的交互效应不显著($F(1,30)=1.120, P=0.298$),电极×组的交互效应不显著($F(2,60)=0.696, P=0.469$),刺激×组的交互效应显著($F(2,60)=4.213, P=0.036$),电极×刺激的交互效应不显著($F(4,120)=2.531, P=0.176$),刺激类型×电极×组的交互效应不显著($F(4,120)=1.628, P=0.198$)。对3类刺激在两组受试者之间的差异的事后分析显示,刺激类型在组间存在显著差异。对于有罪组,刺激之间在Fz、Cz和Pz电极都具有显著差异,两两比较显示,无关刺激和其他刺激都具有显著性差异,探测刺激和靶刺激差异不显著,最大主效应在Fz电极;对于对照组,刺激之间在Fz、Cz和Pz电极也具有显著性差异,但是配对比较显示,显著性差异只

发生在靶刺激和其他刺激之间, 无关刺激和探测刺激之间差异不显著, 且最大主效应也出现在Fz电极。这一统计学分析结果与ERS在3个电极的时程特点

观察结果相一致, 说明了与说谎组受试者在theta频带的ERS指标在探测刺激和无关刺激之间具有显著的统计学差异, 且最大主效应在Fz电极。

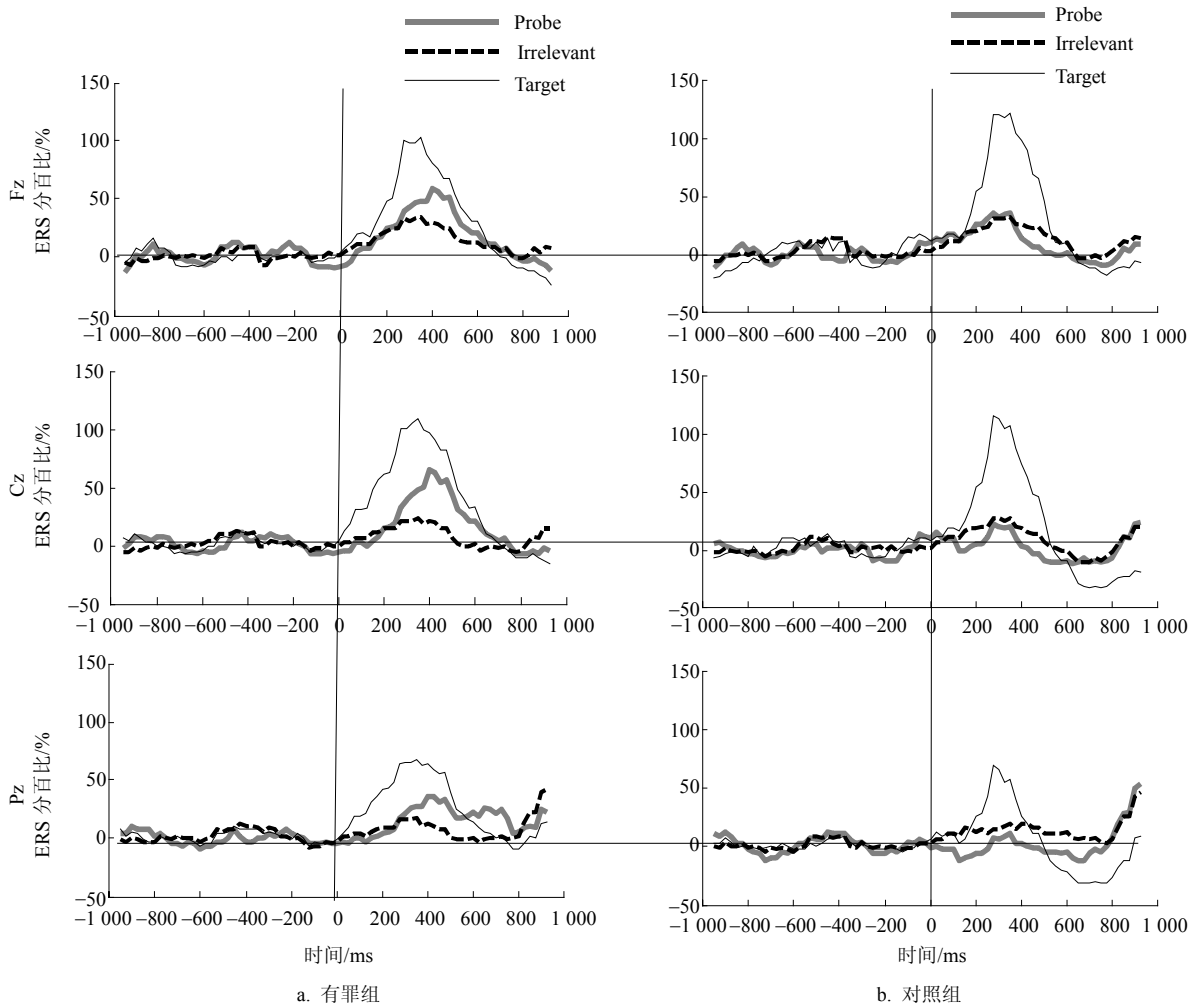


图3 两组受试者分别在Fz、Cz和Pz电极的theta节律的ERS的总平均时程变化

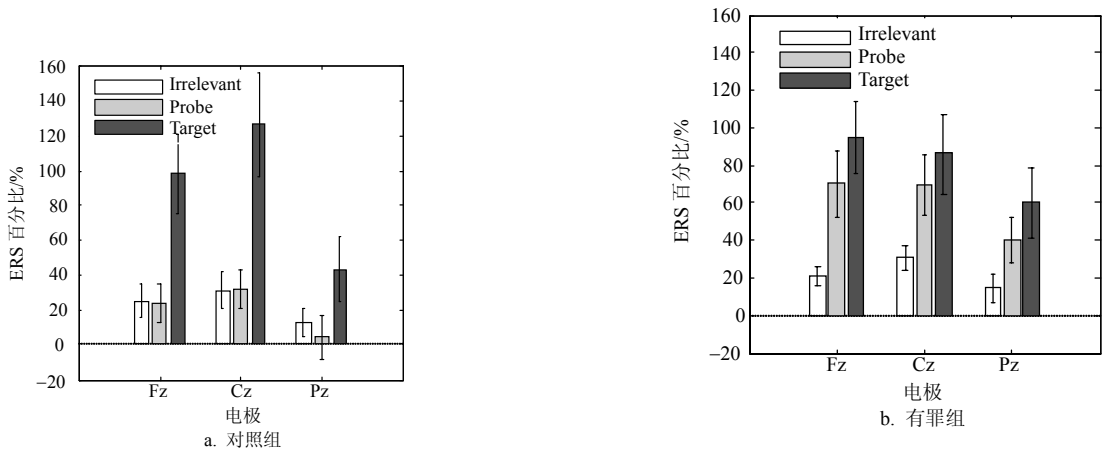


图4 两组受试者对应3类刺激的量化ERS指标在Fz、Cz和Pz电极的均值和标准误差

4 结束语

上述分析结果显示,对于有罪受试者,探测刺激相对于无关刺激在delta节律和theta节律上都出现了更大的事件相关同步;其空间分布特性显示,delta节律的ERS现象在中央区、顶区相对较大,而theta节律的ERS现象在前中区域相对较大。对于对照者受试者,无关刺激和探测刺激之间在delta和theta节律的ERS均没有统计学差异,与本研究的预期相一致,因为对于无辜受试者,探测刺激实际上就是另外一个无关刺激,没有认知上的区别,其表现的事件相关同步现象也是相一致的。总之,delta节律和theta节律的ERS现象在说谎项(探测刺激)和诚实项(无关刺激)之间表现出了明显不同的特性,其量化指标可以反映说谎相关的心理状态。

Delta节律的空间分布特性显示,最大值出现在中央区和枕区位置,同样与P300幅度在空间分布具有一致性。Theta节律的ERS空间分布特性显示,theta同步效应的较大值出现在大脑的前中区域Fz;而经典的P300效应的较大值出现Pz电极位置。从上述结果中可以发现,尽管theta同步效应与P300效应在时间上和任务变化趋势上具有重叠,但是其空间分布有明显的不同。说明说谎相关的theta同步效应与P300效应可能从不同方面反映了说谎的心理状态,但并不排除其具有一定相关性。因此,theta同步效应除了与记忆相关的新/旧效应相关,可能与受试者在说谎过程中的冲突反应和抑制真实等认知工程相关^[10,14],其具体的机理还需要进一步的研究来加以解释。

参 考 文 献

- [1] MEIJER E H, VERSCHUERE B, GAMER M, et al. Deception detection with behavioral, autonomic, and neural measures: Conceptual and methodological considerations that warrant modesty[J]. *Psychophysiology*, 2016, 53(5): 593-604.
- [2] MEIJER E H, SELLE N K, ELBER L, et al. Memory detection with the concealed information test: A meta analysis of skin conductance, respiration, heart rate, and P300 data[J]. *Psychophysiology*, 2014, 51(9): 879-904.
- [3] MEIXNER J B, ROSENFELD J P. Detecting knowledge of incidentally acquired, real-world memories using a P300-based concealed-information test[J]. *Psychological Science*, 2014, 25(11): 1994-2005.
- [4] ROSENFELD J P, HU X Q, LABKOVSKY E, et al. Review of recent studies and issues regarding the P300-based complex trial protocol for detection of concealed information[J]. *International Journal of Psychophysiology*, 2013, 90(2): 118-134.
- [5] PFURTSCHELLER G, SILVA F H L. Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: Basic principles[J]. *Clinical Neurophysiology*, 1999, 110(11): 1842-1857.
- [6] SUCHOTZKI K, CROMBEZ G, SMULDERS F, et al. The cognitive mechanisms underlying deception: An event-related potential study[J]. *International Journal of Psychophysiology*, 2015, 95(3): 395-405.
- [7] KLIMESCH W, DOPPELMAYR M, SCHWAIGER J, et al. Theta oscillations and the ERP old/new effect: Independent phenomena?[J]. *Clinical Neurophysiology*, 2000, 111(5): 781-793.
- [8] BUZSAKI G, MOSER E I. Memory, navigation and theta rhythm in the hippocampal-entorhinal system[J]. *Nature Neuroscience*, 2013, 16(2): 130-138.
- [9] HU X, PORNATTANANANGKUL N, NUSSLOCK R. Executive control-and reward-related neural processes associated with the opportunity to engage involuntary dishonest moral decision making[J]. *Cognitive Affective & Behavioral Neuroscience*, 2015, 15(2): 475-491.
- [10] MATSUDA I, NITTONO H, ALLEN J J B. Detection of concealed information by P3 and frontal EEG asymmetry[J]. *Neuroscience Letters*, 2013, 537(6): 55-59.
- [11] BERGSTROM Z M, ANDERSON M C, BUDA M, et al. Intentional retrieval suppression can conceal guilty knowledge in ERP memory detection tests[J]. *Biological Psychology*, 2013, 94(1): 1-11.
- [12] KALCHER J, PFURTSCHELLER G. Discrimination between phase-locked and non-phase locked event-related EEG activity[J]. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1995, 94(5): 381-384.
- [13] KLIMESCH W, RUSSEGGER H, DOPPELMAYR M, et al. A method for the calculation of induced band power: Implications for the significance of brain oscillations[J]. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1998, 108(2): 123-130.
- [14] KAWASAKI M, KITAJO K, YAMAGUCHI Y. Fronto-parietal and fronto-temporal theta phase synchronization for visual and auditory-verbal working memory[J]. *Acta Chirurgica Hungarica*, 2014, 5(36): 200-208.

编辑 蒋晓