

引文格式:

王程, 朱明星, 汪鑫, 等. 基于脑电波时频分析方法的认知决策任务研究 [J]. 集成技术, 2020, 9(4): 11-24.

Wang C, Zhu MX, Wang X, et al. Time-frequency analysis of electroencephalogram signals in a cognitive decision-making task [J]. Journal of Integration Technology, 2020, 9(4): 11-24.

## 基于脑电波时频分析方法的认知决策任务研究

王 程<sup>1,2</sup> 朱明星<sup>1,2</sup> 汪 鑫<sup>1,2</sup> 杨子健<sup>1</sup> 王小晨<sup>1,2</sup> 陈世雄<sup>1</sup> 李光林<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

<sup>2</sup>(中国科学院大学深圳先进技术学院 深圳 518055)

**摘 要** 选择和决策涉及一系列复杂的认知过程, 而脑电图 (Electroencephalogram, EEG) 信号的时频分析方法可以帮助理解不同认知任务中的大脑活动。为对脑认知功能评价标准的设定提供客观量化理论参考, 该研究针对正常人在做出一系列完整认知任务时的脑电波活动进行量化分析, 作为后续认知障碍研究的前期基础。通过设计了一项与“剪刀、石头、布”游戏相关的决策认知任务, 使电脑的 3 种选择按一定的概率 (石头 66%、剪刀 33%、布 1%) 随机出现, 其中认知决策包含稳妥型、风险型和错误型, 每轮决策任务分为 3 个阶段 (计划阶段、确认阶段和反馈阶段)。在整个任务期间, 使用 NeuroscanQuikCap 脑电测量系统同时记录 64 个 EEG 信号通道数据, 通过提取不同受试者脑电频段 ( $\delta$ 、 $\theta$ 、 $\alpha$  和  $\beta$ ) 的平均频谱功率和相位同步值, 研究了不同任务阶段下 4 种频段脑电波的变化特征。研究发现, 在计划阶段, 实验对象想要获胜或不想输的判断决策活动与顶叶区  $\alpha$  波和前额  $\theta$  波的增强活动效应相关, 其脑电波出现的先后顺序反映受试者将做出不同类型的决策计划; 在确认阶段,  $\alpha$  波的频谱功率抑制效应和  $\delta$  波的相位同步增强活动表明受试者在确认选择后会提高注意力; 在反馈阶段,  $\theta$  波、 $\beta$  波功率谱增强效应和  $\alpha$  波功率谱降低效应与不同的反馈结果有关, 其中在受试者发觉输掉游戏的反馈中, 该效应最为明显。结果表明, EEG 信号的时频特征分析方法可以有效观察大脑对不同认知任务的响应活动。该研究不仅有望为探讨一项完整认知任务的动态过程提供可视化工具, 还有助于客观认知评估标准技术的进一步发展。

**关键词** 时频分析; 脑电图信号; 认知任务

**中图分类号** R 318 **文献标志码** A **doi**: 10.12146/j.issn.2095-3135.20200509001

收稿日期: 2020-05-09 修回日期: 2020-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61771462); 广州市科技计划项目 (201803010093); 深圳市基础研究项目 (JCYJ20180507182241622)

作者简介: 王程, 硕士研究生, 研究方向为轻度认知障碍与脑认知功能评估; 朱明星, 博士研究生, 工程师, 研究方向为吞咽功能评估与吞咽障碍治疗; 汪鑫, 硕士研究生, 研究方向为听力检测、生物医学信号处理; 杨子健, 助理工程师, 研究方向为生物医学电子; 王小晨, 硕士研究生, 研究方向为发音功能评估与构音障碍康复; 陈世雄 (通讯作者), 博士, 研究员, 研究方向为听力检测和听觉功能的康复, E-mail: sx.chen@siat.ac.cn; 李光林, 博士, 研究员, 研究方向为神经康复工程、生物医学信号处理、生物医学仪器等。

# Time-Frequency Analysis of Electroencephalogram Signals in a Cognitive Decision-Making Task

WANG Cheng<sup>1,2</sup> ZHU Mingxing<sup>1,2</sup> WANG Xin<sup>1,2</sup> YANG Zijian<sup>1</sup>

WANG Xiaochen<sup>1,2</sup> CHEN Shixiong<sup>1</sup> LI Guanglin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>( Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China )

<sup>2</sup>( Shenzhen College of Advanced Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China )

**Abstract** Selection and decision-making involve a series of complex cognitive processes, and time-frequency analysis of electroencephalogram (EEG) signals can help understand brain activity in different cognitive tasks. In this study, a decision-making cognitive task related to the rock-paper-scissors game was designed. By setting the selection probability of the computer (rock 66%, scissors 33%, paper 1%), the subjects are able to make safe or risky decisions. The complete and complex decision task was divided into three stages (planning stage, confirmation stage and feedback stage). During the entire experiment, the NeuroscanQuikCap EEG measurement system recorded data with 64 EEG signal channels in real time. By extracting the characteristics of the change of the average spectral power and the phase synchronization value of each EEG frequency band ( $\delta$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$ , and  $\beta$ ), a comparative analysis of the EEG waves at different task stages was realized. The results show that in the planning stage, the subject's decision-making activities that want to win or do not want to lose are related to the enhanced activity effects of the parietal lobe  $\alpha$  wave and the forehead  $\theta$  wave. The order in which the brain waves appear may indicate that the subjects will make different types of decision plans. In the confirmation stage, the  $\alpha$  wave spectrum power suppression effect and the  $\delta$  wave phase synchronization enhancement activity show that the subject will increase attention after confirming the choice. In the feedback stage, the  $\theta$  and  $\beta$  wave power spectrum increase effect and the  $\alpha$  wave power spectrum decrease effect are related to different feed back results. And the effects are most obvious in the feedback that the subject finds the game lost. This preliminary study shows that, combined with a complete cognitive task, time-frequency analysis of EEG signals may be an important tool for visualizing brain activity in response to different cognitive functions. It also contributes to the further development for objective cognitive assessment solutions.

**Keywords** time-frequency analysis; electroencephalogram signals; cognitive tasks

## 1 引 言

一项完整的决策过程涉及复杂的认知变化：首先，人们需要感知信息，获取并记住信息；然后，对信息进行计算、归纳；最后，做出选择。即使每一次获取的信息都是相同的，不同的人也会做出不同的决策，同一个人在经历不同的认知判断后也会做出稳妥型或风险型的选择。而根据

不同的反馈结果，人脑神经活动也会发生相应的变化<sup>[1]</sup>。将这种复杂的认知过程进行分解，观察不同阶段脑神经活动的变化特征是对不同频段的脑电波活动与人类认知过程中特定认知功能相关性的探索，同时也有助于可视化脑认知的研究。认知障碍患者在执行认知决策任务时会受到不同程度或不同方面的影响，对正常健康人的这种认知神经活动进行时频分析，可为客观评估轻度认

知障碍提供参考<sup>[2-4]</sup>。

由于脑电图(Electroencephalogram, EEG)具有实时性、易用性、无创性和低成本等特点, 其在一些脑神经研究中被用来分析脑电波活动与认知过程的关系<sup>[5-6]</sup>。有研究使用功能磁共振成像(Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)方法来观察大脑不同部位的区域活动, 其中通过该工具可以得到高空间分辨率的脑电数据<sup>[7]</sup>。但是 fMRI 方法的实验室设置与日常生活有很大不同, 其实验环境可能会影响认知实验结果<sup>[8]</sup>。通过脑电波的时频分解方法, 可以将采集的脑电信号分解成不同频段脑电波活动( $\delta$ 、 $\theta$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  波段), 而已有一些研究发现不同频段脑电活动与特定的认知功能相关。例如, Cavanagh 等<sup>[9]</sup>对一些预设的认知任务(冲突、惩罚、新颖和错误等刺激)进行比较观察, 发现额叶皮质上的  $\theta$  波活动似乎可以反映用于实现认知控制需求的通用计算过程, 并在不同的大脑区域进行这种控制。Klimesch 等<sup>[10-11]</sup>认为, 脑电波有节奏的幅度变化反映了神经元群体激发活动。其中  $\alpha$  波振荡与注意力的选择和抑制功能密切相关, 反映了信息处理中自上而下的抑制性控制过程。Jensen 等<sup>[12]</sup>使用高密度脑电图和脑磁图记录技术来研究  $\gamma$  波段同步化在工作记忆、选择注意等认知范式中的作用。其结果发现, 振荡的  $\gamma$  波活动在神经元交流和突触可塑性中具有重要作用, 参与了注意力与记忆等复杂认知功能的局部和分布式皮质网络中的神经元加工过程。Güntekin 等<sup>[13]</sup>对 32 位帕金森病患者和 16 名健康对照组进行听觉 Oddball 刺激试验, 发现患者组的  $\delta$  波活动强度比对照组的低,  $\delta$  波振荡反应减少可能是认知障碍的一般电生理指标。Zavala 等<sup>[14]</sup>通过记录受试者参与涉及冲突的感觉运动选择任务的  $\theta$ 、 $\beta$  波脑电活动, 发现  $\theta$ 、 $\beta$  波振荡活动会影响前额叶皮层激活丘脑下核, 从而在冲突发生期间抑制冲动。基于以上研究, 本实验将用 4 个波段( $\delta$ 、 $\theta$ 、 $\alpha$  和  $\beta$ )的

EEG 数据来分析认知决策任务的整个过程。

在早期的决策模型研究中, Bechara 等<sup>[15]</sup>认为决策是一个过程, 受生物调节过程中表达情绪、感觉的标志物信号影响。当情绪信号与任务结合在一起时, 它对正确决策是有益的, 并且确定性或不确定性下决策执行涉及到不同的神经回路。Tversky 与 Damasio<sup>[16]</sup>提出的前景理论(Prospect Theory)表明, 人们在面对风险规避时更倾向于确定的结果, 对失去物资或金钱的可能性比获得相同物资或金钱的可能性更为敏感。Huang 等<sup>[17]</sup>在一项与检索化学概念有关的决策任务中采集了 66 名大学生的脑电图数据, 发现在刺激发生前的前扣带回皮层脑区有  $\theta$  波增强活动。该活动与决策过程中的长期记忆检索信息相关, 而刺激发生后的低频段  $\beta$ (13~18 Hz)增强效应可起到将编码刺激映射到指导决策反应过程的作用。Iznak 等<sup>[18]</sup>基于威斯康星卡片分类测试的一项研究分析了抑郁症患者的脑电图频谱参数, 发现决策功能的损害与  $\theta$ 、 $\alpha$  波频谱功率值较低有关。此外, Nunez 等<sup>[19]</sup>的一项研究通过设计漂移扩散决策模型和量化脑电图注意力测量值来探讨注意力对视觉决策的影响。也有一些研究通过设计零和博弈游戏<sup>[20]</sup>、最后通牒博弈游戏<sup>[21]</sup>、猜硬币游戏<sup>[22]</sup>、猜拳游戏<sup>[23-24]</sup>等来探讨决策认知过程中的脑电活动。从以上研究可知, 决策任务中不同频段的脑电图活动与对应的认知功能间具有一定的相关性, 但仍需进一步分析这些活动。

目前对博弈决策任务与脑认知功能联系的研究仍较少, 对决策认知过程中不同频段脑电活动分析也还不够全面。本实验以完整可靠且不受实验环境影响的任务设计为前提, 根据将经典博弈游戏与严谨的认知任务模块相结合的思路, 设计了一种与“剪刀、石头、布”相关的决策任务, 并将这一认知任务划分为 3 个认知阶段: 决策计划阶段、确认等待阶段、结果反馈阶段。一些研究<sup>[25-27]</sup>表明, 不同频段的脑电波活动与注意力、

认知控制等认知功能相关。本研究以此为基础,首先使用 EEG 技术和时频分析方法将脑电波分为 4 个频段  $\delta$  (delta, 1~3 Hz)、 $\theta$  (theta, 4~7 Hz)、 $\alpha$  (alpha, 8~13 Hz) 和  $\beta$  (beta, 15~20 Hz)。然后,提取每个频段的事件相关频谱功率和相位同步特征值。最后,通过特征数据和描绘的频谱变化图,客观量化分析时间序列上 4 个频段的脑电活动与 3 个认知阶段相应认知功能间的相关性。

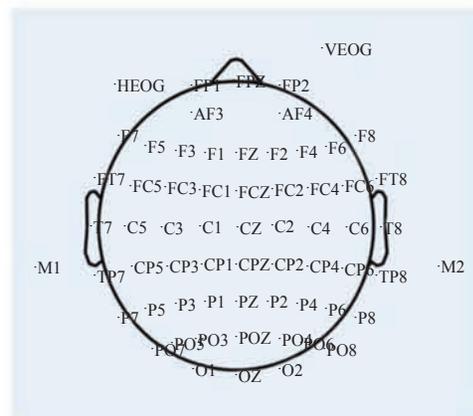
## 2 实验方法

### 2.1 脑电信号采集方法

本研究共招募了 5 名健康受试者。其中 4 名男生, 1 名女生; 年龄在 23~27 岁, 平均年龄为 25 岁。所有受试者都是右撇子, 视力正常, 无认知障碍。整个实验过程符合中国科学院深圳先进技术研究院人体伦理道德规范 (SIAT-IRB-170815-H0178)。实验开始前, 受试者均阅读知情同意书并签字, 且允许出于科学目的公开发布他们的照片和数据。为确保测试过程相对安静, 受试者的认知思考不被影响, 在实验开始前关闭实验室灯光, 对操作电脑的房间进行隔离, 并将与该实验无关的设备全部关闭。同时, 为了防止肌电等信号的干扰, 受试者在进行实验前被要求静息一段时间, 且实验时尽量避免做出大幅度的肢体动作。

本实验使用美国 CompumedicsNeuroscan 公司的脑电测量系统以及 64 通道的 Quik-Cap 脑电帽来采集高密度脑电信号数据。在给受试者佩戴脑电帽装置时, 根据国际 10~20 系统脑电电极定位方法来固定头皮电极, 以平均乳突为参考电极, 并采集水平眼电、垂直眼电数据。如图 1(a) 所示, 对应于 10~20 系统的矢状线由前到后依次为 Fpz、Fz、Cz、Pz 和 Oz 电极, 其代表的脑区分别为前额 (Frontal Pole)、额叶 (Frontal)、中

央 (Central)、顶叶 (Parietal)、枕叶 (Occipital), 而沿着冠状线两侧的则为颞叶区 (Temporal)。如图 1(b) 所示, 在给受试者佩戴脑电帽时, 需先使用酒精棉擦拭电极位置, 清除皮肤表面的油脂和角质。然后, 使用 GT-5 导电膏实现头皮电极的连接, 并通过 SynAmps 2 放大器连接到 Scan4.5 软件。为防止噪声干扰, 调试所有电极阻抗降低至 10 k $\Omega$  以下, 本实验采集脑电数据的采样率为 1 024 Hz。



(a) 64 通道脑电电极分布



(b) 实验佩戴脑电帽

图 1 64 通道高密度脑电电极分布与脑电帽佩戴

Fig. 1 Distribution of 64-channel high-density EEG electrode and the photo of EEG cap wearing

### 2.2 实验流程

本文的决策任务使用 E-prime 软件编写。在实验中, 受试者将和电脑进行剪刀石头布的游戏。实验开始前, 所有受试者都被告知这是一项

有关决策的任务, 并被要求在开始游戏前学习游戏规则。在决策任务开始时, 电脑屏幕上会有实验内容和游戏规则的介绍, 受试者虽被告知电脑有着特定的某一种选择概率, 但未直接说明概率是多少。此外, 受试者需要通过后续的 10 个测试次进行简单学习, 明确该任务只有 3 种可能的结果: 选择石头的玩家将击败选择剪刀的玩家(“石头胜剪刀”), 但输给选择布的玩家(“布胜石头”); 选择布的玩家则会输给选择剪刀的玩家(“剪刀赢布”)。其中, 若两名玩家选择相同的出牌, 则游戏为平局。本文实验中, 为了使受试者能够做出两种不同类型的决策, 将电脑选择布的概率设置得非常小(1%), 而选择石头的概率是剪刀的 2 倍。所有受试者都需要清楚记住与 3 个选择相对应的按键(“1”代表石头、“2”代表剪刀、“3”代表布)。在每一局游戏开始时, 受试者可以自主决定选择其中一种按键, 并且受试者做出选择的时间应限制在 1~5 s 以内。

如图 2 所示, 实验过程可以分为 4 个步骤。当在屏幕上出现按键提示后, 该局游戏即将开始, 实验对象可以进行按键选择。其中, 思考计划的时间太长(大于 5 s)或太短(小于 1 s)均被视为无效数据, 将被删除。本文设置, 删除数据占总数据的 5% 左右时为有效数据。如果需要删除的数据过多, 那么将视本轮实验为失败, 需要重新进行实验。按键选择后, 受试者选择的图片将在屏幕左侧显示 2 s, 如实验对象选择布并按下

数字 3 按键, 他将看到布的图片。随后, 电脑将根据预先设定的概率(石头 66%、剪刀 33%、布 1%)进行选择, 且结果立即出现在屏幕右侧 2 s。最终, 该轮游戏的结果将显示 2 s, 所有的输赢记录都直接显示在屏幕的下方。每位实验对象将进行 150 轮游戏, 其中每 50 轮游戏后休息 1 min, 每一轮游戏之间的间隔为 400~600 ms, 总实验时间约为 30 min。

在本文决策任务中, 受试者将通过学习电脑的出牌规则(石头 66%、剪刀 33%、布 1%)进行选择, 3 种不同的按键选择对应 3 种不同类型的决策计划。选择石头基本上不会输掉游戏(可能性 1%), 但是平局的可能性(66%)比获胜的可能性(33%)高得多, 故这是一个稳妥安全的决策方案。由于电脑基本不会出布, 所以选择剪刀是一个错误的决策。选择布的获胜概率(66%)高于选石头的获胜概率(33%), 但该选择也有输的可能性(33%), 因此这是风险型的决策方案。在实验过程中, 要求受试者认真进行决策思考, 防止出现随意选择的情况。如果实验条件不理想, 那么需重新进行实验, 以确保实验数据的可靠性。

### 2.3 数据处理

由于采集到的原始脑电信号不够干净, 混杂着肌电、运动伪迹、工频等各种噪声, 本研究在分析脑电特征前使用 EEGLAB 对信号进行预处理<sup>[28]</sup>。首先, 使用了汉明窗 sinc-FIR 滤波器(Hamming Windowed sinc FIR Filter)对每位实

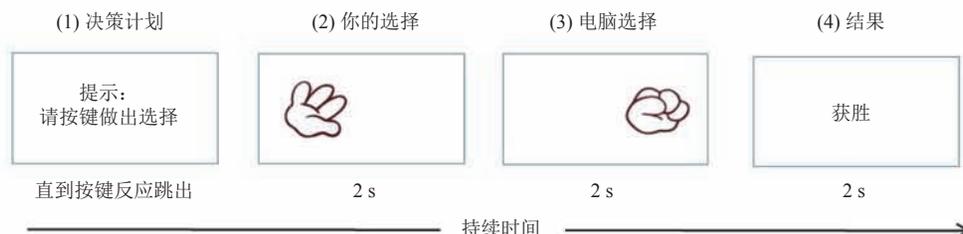


图 2 认知决策任务流程图

Fig. 2 Cognitive decision task flow chart

验对象的数据进行带通过滤(0.05~30 Hz)<sup>[29]</sup>。接着使用 2.1 版的 Clean Raw-data 和 ASR(The Artifact Subspace Reconstruction) 工具箱进一步处理滤波后的数据。然后, 设置电极信号平坦不变的时间参数为小于或等于 5 s, 最大可接受高频噪声偏差为 4, 最小附近电极相关性为 0.8, 以及超过设定脑电信号波幅边界的最大比例为 25% 等<sup>[30]</sup>。通过以上处理可以删除扁平信号通道, 去除低频漂移及短时异常数据段。最后, 使用独立成分分析方法(Independent Component Analyze) 将信号分为脑电信号、通道噪音、运动伪迹、眼电信号等不同成分, 进而删掉除了脑电成分之外的所有噪声。

根据任务的不同阶段, 使用 E-prime 软件对实验数据进行打标, 主要对图片刺激出现的时刻以及实验对象进行按键的时刻进行标记, 以此分为两个时间段的任务数据。其中, 实验对象按下选择按键的前 4 s 至按键后 2 s 为第 1 个时间段, 屏幕上出现计算机的选择图片刺激前 2 s 至刺激出现后的 4 s 作为第 2 个时间段。通过以上 2 个时间段的分割处理, 整个决策任务

被分为决策计划、确认与等待、输赢反馈三个阶段。为了在 3 种类型的决策计划(稳妥型、错误型、风险型)和 3 种结果(获胜、失败、平局)中比较不同的脑电活动, 本研究使用与小波变换相关的时频分解方法。在采集的两段时间数据中, 设置时间窗口为 500 ms, 小波变换分解周期为 3, 窗口频率因子为 0.5, 最终得到 4 个频带的脑电波  $\delta$ (1~3 Hz)、 $\theta$ (4~7 Hz)、 $\alpha$ (8~13 Hz) 和  $\beta$ (15~20 Hz)。图 3 为对其中一位受试者的 50 个试次数据进行处理的结果, 此结果为可供分析的信号数据。

本次实验提取 4 个频带( $\delta$ 、 $\theta$ 、 $\alpha$  和  $\beta$ ) 脑电信号的两个特征值进行比较分析, 分别是事件相关频谱扰动(Event-Related Spectral Perturbation, ERSP) 和相位同步值(Phase Synchronization)。ERSP 是功率谱的事件相关位移值, 表示与基线平均功率谱的差值。这些频谱变化通常涉及一个以上的频率或频带, 与只量化一个频段功率谱的事件相关异步值相比, 全谱 ERSP 分析可提供更多关于脑动力学的信息<sup>[31]</sup>。ERSP 的计算如公式(1)所示:

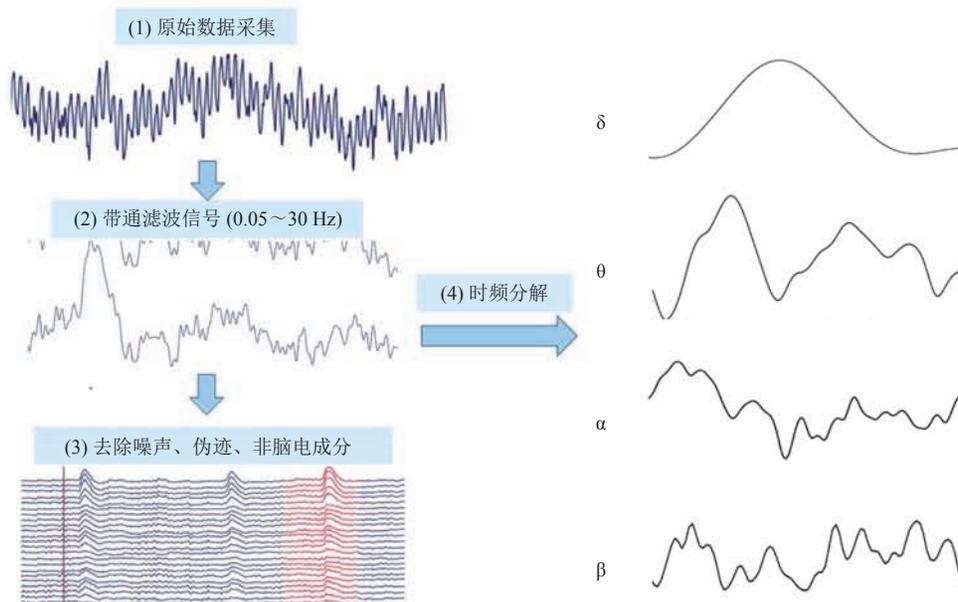


图 3 脑电信号处理过程

Fig. 3 EEG signal processing

$$Es = \log \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\frac{1}{k} \sum (P_{i-k} - P_{i\_base})}{P_{i\_base}} \quad (1)$$

其中,  $P$  为功率谱值;  $Es$  为平均 ERSP 变化值。首先, 以每个事件之前的 EEG 波幅变化来计算基线功率谱  $P_{i\_base}$ , 将信号划分为简短的、重叠的  $k$  个数据窗口, 并计算功率谱的移动平均值。然后, 通过除以它们各自的平均基线功率谱, 对各个响应时期的功率谱变换进行归一化。最后, 将这些归一化响应进行求和取平均值, 并以对数值表示平均 ERSP。

相位同步值由试验间相干性 (Inter-Trial Coherence, ITC) 表示。ITC 为根据单个试验 EEG 信号计算出来, 反映 EEG 时域上的频谱同步变化, 能够解释潜在发生的锁相程度。ITC 取值范围为 0~1, 其中 0 表示 EEG 数据与时间锁定事件之间没有同步; 接近 1 表示在给定的事件潜伏期下, 不同试验之间有着接近完美的 EEG 相位同步性。ITC 计算公式如下:

$$ITPC(f, t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{F_k(f, t)}{|F_k(f, t)|} \quad (2)$$

其中, ITPC (Inter-Trial Phase Coherence) 为试验间相位相关性, 是 ITC 的一种表示方法。  $F_k(f, t)$  是频率为  $f$  的波段在第  $k$  次试验中的频谱估计。在复数二维笛卡尔坐标系中, 将给定的频率和时间下的频谱估计作为复数向量, 构建二维相位空间。每个向量的范数和相位角由频谱估计的幅度和相位表示, 然后将每个试验活动向量的长度归一化为 1。最后通过计算其复数平均值得到 ITPC 值。

在本研究中, 使用单因素方差分析方法对 ERSP 和 ITC 两个特征值进行统计分析, 探讨 4 个频段脑电波与 3 个阶段任务对应的认知功能的联系。

### 3 实验结果

在本研究中, 将实验结果分为 3 个阶段: 实

验对象按键前的 4 s 为决策计划阶段; 按键选择后的 2 s 为确认和等待阶段; 最后一个 2 s 为输赢结果阶段。

#### 3.1 决策计划阶段的 $\theta$ 波活动和 $\alpha$ 波活动

在决策计划阶段, 通过数据处理获得了时间窗为 500 ms 的 4 种类型脑电波平均功率谱变化的 EEG 地形分布图。其中,  $\delta$  和  $\beta$  波没有显著的增强或抑制活动, 而  $\theta$  波在额叶区域具有持续的功率增强效应,  $\alpha$  波在顶叶区域具有类似的功率增强效应。三种类型选择下的结果如图 4 所示。

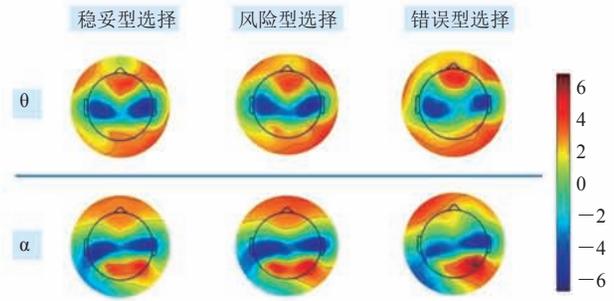


图 4 决策计划阶段  $\theta$  和  $\alpha$  脑电地形图分布

Fig. 4 Distribution of  $\theta$  and  $\alpha$  EEG topographic maps in the decision planning stage

为了进一步研究 3 种选择下  $\theta$  波效应和  $\alpha$  波效应之间的差异, 从 ERSP 地形分布图中提取出 Fz 电极的  $\theta$  波数据和 Pz 电极的  $\alpha$  波数据, 绘制实验对象按键选择前 200~1 500 ms 的平均功率变化曲线, 结果如图 5 所示。图 5(a) 显示, 风险型选择的平均  $\theta$  波功率从 -1 000~-800 ms 持续增加, 而稳妥型选择的这种效应发生在 -800~-600 ms, 错误型选择的  $\theta$  波增强效应比其他两种选择更加明显。图 5(b) 显示, 稳妥型决策计划的  $\alpha$  波增强效应发生在风险型决策计划之前。通过对比观察发现, 这两种效应的功率增强程度是相似的, 当实验对象决定做出风险选择并渴望获胜时, 其  $\theta$  波增强效应发生在  $\alpha$  波增强效应之前; 而当实验对象不想失败并做出稳妥型选择时, 这种效应发生的顺序则相反。

通过单因素方差分析, 对脑电活动增强效

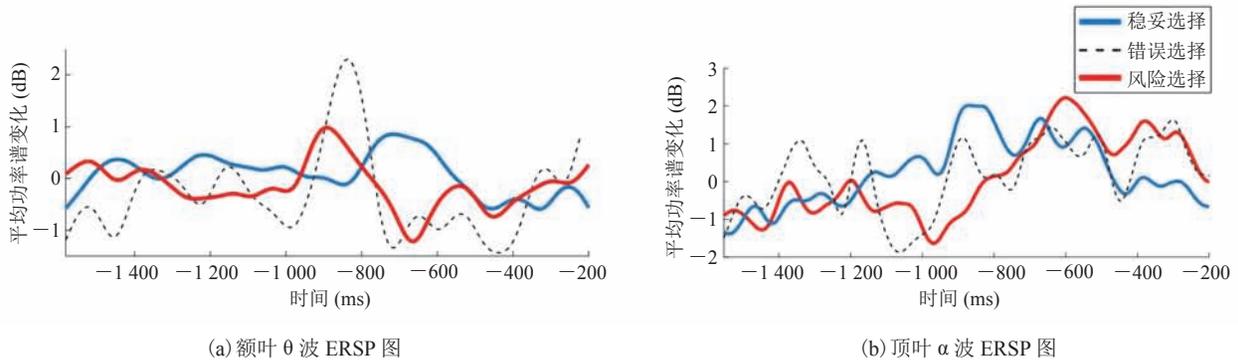


图5 决策计划阶段额叶 $\theta$ 波和顶叶 $\alpha$ 波ERSP曲线图

Fig. 5 ERSP of frontal  $\theta$  and parietal  $\alpha$  in the decision planning stage

应与三种类型选择之间的相关性及其显著程度进行分析,结果如表1所示。可以发现3种选择的 $\theta$ 波增强效应具有极显著的相关性( $F_{2,147}=16.31$ ,  $P<0.001$ ), 稳妥型选择和风险型选择之间的 $\alpha$ 波增强效应也具有显著差异( $F_{1,148}=4.03$ ,  $P=0.045$ )。三种选择间也存在明显的相互作用(稳妥型:  $F_{1,148}=6.16$ ,  $P=0.014$ ; 错误型:  $F_{1,148}=27.93$ ,  $P<0.001$ ; 风险型:  $F_{1,148}=8.05$ ,  $P=0.005$ )。

表1 三种类型选择间的 $\theta$ 波与 $\alpha$ 波效应的相关性分析结果

Table 1 Results for  $\theta$  wave effect and  $\alpha$  wave effect  
ANNOVA analysis of three choices

组别	频段相关性	
	$\theta$	$\alpha$
稳妥型 vs 风险型	44.25***	4.03*
风险型 vs 错误型	0.54	0.93
稳妥型 vs 错误型	13.69***	3.90
三种类型选择	16.31***	2.12

注: \*表示  $P<0.05$ ; \*\*\*表示  $P<0.001$

### 3.2 确认与等待阶段的时频分析结果

在确认与等待阶段,实验对象将受到自己选择的图片刺激,进行确认并等待电脑进行选择,是一个与注意力相关的认知过程。

从图6(a)可以看出,3种选择类型均有持续的 $\alpha$ 波抑制效应,而在稳妥型选择和风险型选择中,这种频谱功率降低的效应更为明显。在稳妥型选择和错误型选择中,还可以观察到频谱功率增加的 $\theta$ 波增强效应,且前者的这种效应更为

明显。其中 $\alpha$ 波抑制效应一般发生在 $\theta$ 波增强效应之后, $\theta$ 波增强效应在实验对象观察到自己选择的图片出现在屏幕上时就立刻出现,时间段为0~500 ms,而 $\alpha$ 波抑制效应一直持续到此阶段结束。对于相位同步性特征,从图6(b)可以看出,在做出稳妥型选择后, $\delta$ 波段和 $\alpha$ 波段的锁相程度显著增加,风险型选择在 $\delta$ 波段也有类似的相位同步增强活动。值得一提的是,虽然错误型选择的 $\delta$ 波段锁相持续时间较长,但程度并不明显,且其他波段也没有明显的相位同步变化。

对图6的频谱变化数据进行单因素方差分析(如表2所示),其中将3种类型的选择分为4组,每一组之间都对3个频段脑电活动上的ERSP和ITC变化进行显著性分析。从表2可以看出,3种选择的频谱数据相关性都很显著,而稳妥型选择与风险型选择的 $\delta$ 波活动在锁相程度和平均功率变化上比较类似,其 $\alpha$ 波频谱功率抑制效应无明显差异。

### 3.3 输赢结果反馈阶段的时频活动

在输赢结果反馈阶段,通过观察4个频段的脑电活动来分析输赢结果对实验对象的反馈情况, $\delta$ 波和 $\beta$ 波的脑中央区活动如图7所示。从图7(a)可看出, $\beta$ 波的平均功率谱在3种结果中均有增强活动,其中在实验对象发觉自己这一轮游戏失败后,其 $\beta$ 波功率在500~2 000 ms有

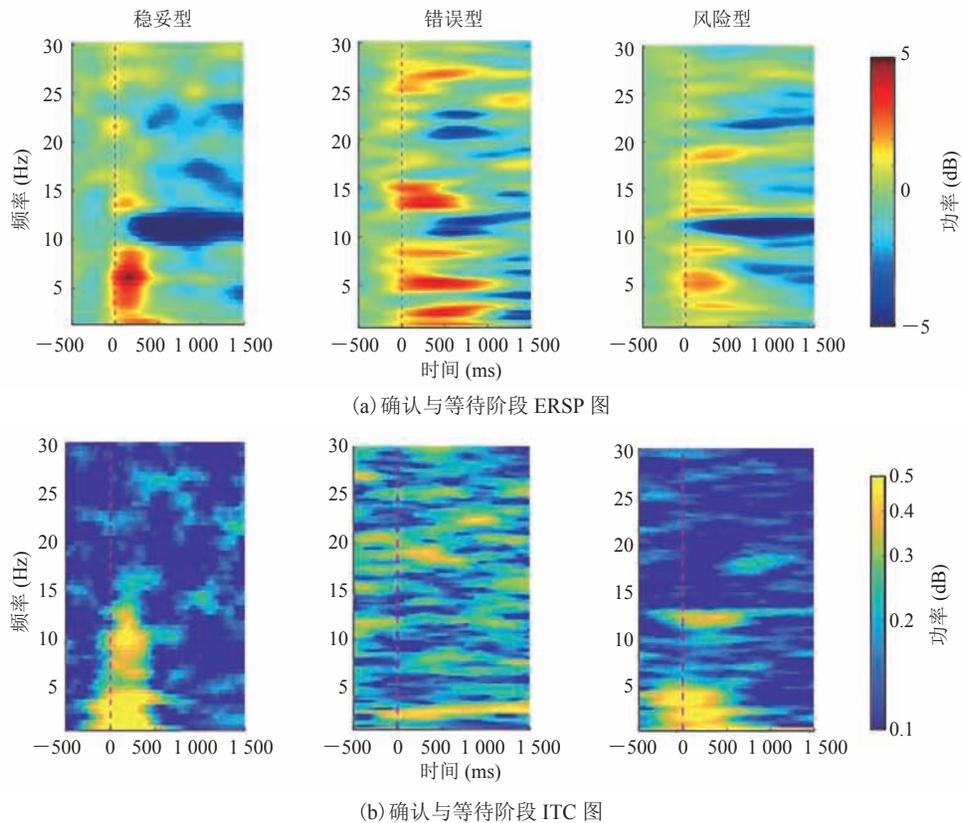


图 6 确认与等待阶段 ERSP 和 ITC 频谱图

Fig. 6 ERSP and ITC spectrograms in the confirmation and waiting stage

表 2 不同类型选择之间的频谱变化方差分析  $P$  值表Table 2  $P$ -value of spectrum change under different choices

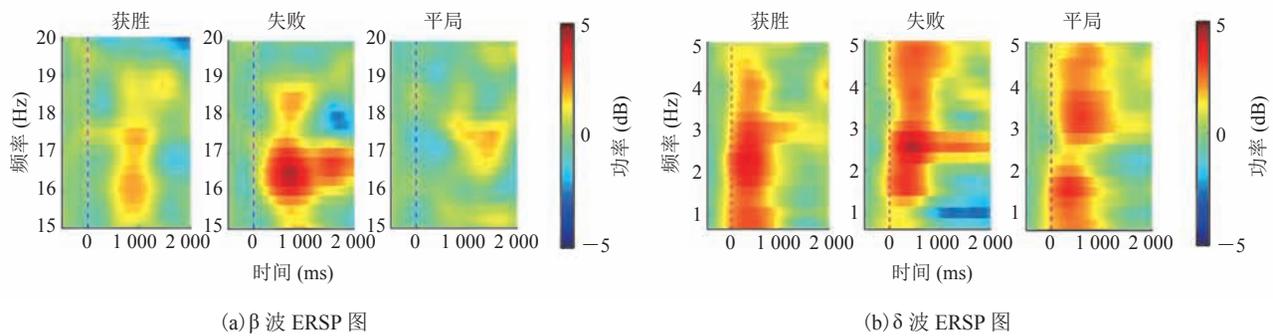
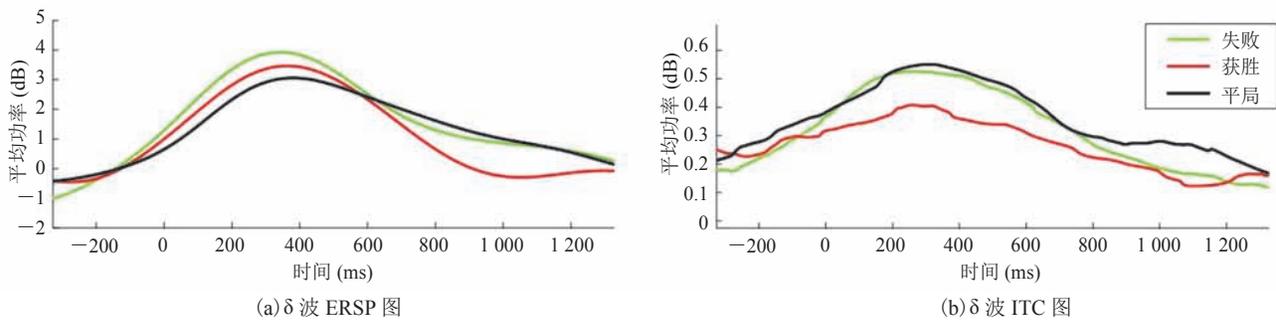
组别	$P$ 值					
	ERSP- $\delta$	ERSP- $\theta$	ERSP- $\alpha$	ITC- $\delta$	ITC- $\theta$	ITC- $\alpha$
稳妥型 vs 风险型	0.0826	8.6e-14	0.8921	0.2335	2.6e-04	7.1e-13
风险型 vs 错误型	7.0e-52	0.0683	8.2e-34	6.6e-13	7.7e-38	1.7e-52
稳妥型 vs 错误型	1.8e-16	0.0004	1.2e-06	1.9e-04	2.0e-09	6.4e-06
三种选择	3.0e-26	4.5e-05	1.7e-09	3.8e-05	2.2e-12	3.0e-14

着明显的持续增强效应 ( $F_{2,84}=3.25, P=0.043$ )。从图 7(b) 可看出, 3 个结果中的  $\delta$  波平均功率在 0~1 000 ms 持续增强。该结果表明本实验对象受到结果图片刺激后, 其大脑  $\beta$  波功率具有不同程度的增强变化。

图 8 为 3 种游戏结果中  $\delta$  波的 ERSP 曲线和 ITC 曲线图。在 3 种结果图片刺激后, 实验对象的脑中央区  $\delta$  波的平均功率谱和相位相关性均

有 0~800 ms 的增强变化, 但 3 种结果反馈之间的变化差异并不明显, 未达到  $\beta$  波活动的差异性 ( $F_{2,84}=0.78, P=0.461$ )。

为了进一步观察获胜、失败、平局 3 种不同反馈结果对实验对象各频段脑电波活动产生的影响, 分别对  $\alpha$  波和  $\theta$  波制作 ERSP 曲线以及 ITC 曲线图(图 9~10)。通过比较全脑额叶区、顶叶区、中央区、枕叶区以及颞叶区的这两个频段

图7 输赢反馈阶段 $\beta$ 波和 $\delta$ 波的ERSP图Fig. 7 ERSP of  $\beta$  and  $\delta$  in the feedback stage图8 输赢反馈阶段 $\delta$ 波的ERSP和ITC曲线图Fig. 8 ERSP and ITC of  $\delta$  in the feedback stage

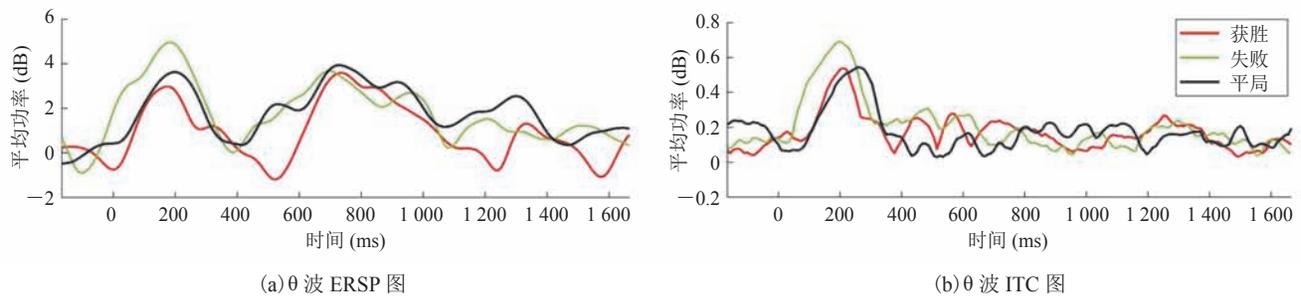
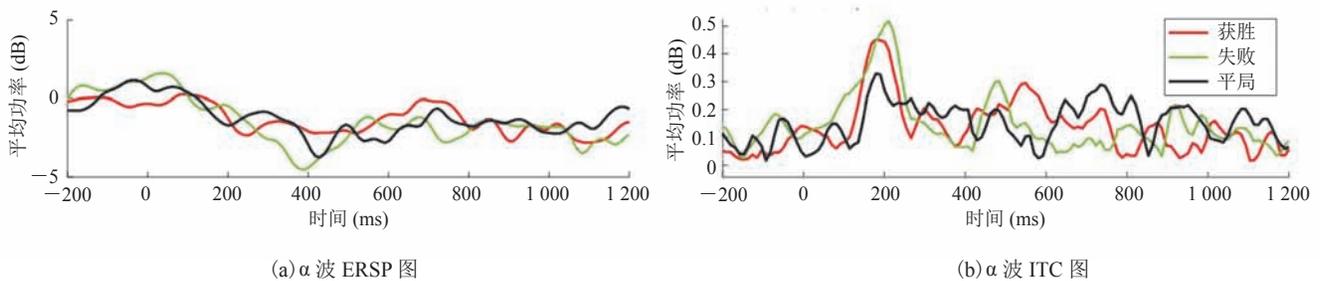
的脑电活动，发现顶叶区活动强度最高。从图9(a)可看出，有两个 $\theta$ 波功率增强活动，分别为0~500 ms时间段和500~1 000 ms时间段。在第一个 $\theta$ 波功率增强活动中，失败结果组增幅最大，其次是平局组，最后是获胜结果组( $F_{2,66}=3.43$ ,  $P=0.038$ )。在图9(b)中，失败结果组中的相位同步程度也是最大的( $F_{2,66}=2.64$ ,  $P=0.078$ )，其持续增强的时间段为0~400 ms，对应于第一个 $\theta$ 波ERSP增强活动时间段。

从图10(a)可看出， $\alpha$ 波的平均功率在0~500 ms有一个持续的降低变化。在失败结果组中， $\alpha$ 波的功率抑制效应最明显，其次是平局结果组，而 $\alpha$ 波功率下降幅度最小的是获胜结果组( $F_{2,66}=2.5$ ,  $P=0.091$ )。从图10(b)可看出， $\alpha$ 波的相位同步变化与 $\theta$ 波相似，即失败结果组的变化幅度最大( $F_{2,66}=1.21$ ,  $P=0.306$ )。但与 $\theta$ 波活动不同之处在于， $\alpha$ 波的锁相变化在时域上与平

均功率谱变化不一致。

## 4 讨论与分析

在决策计划阶段，无论实验对象做出哪种类型的选择，都会产生功率持续增强的额叶 $\theta$ 波效应和顶叶 $\alpha$ 波效应。由于该任务在实验对象按键选择之前没有显示图片刺激，他们需要通过先前的记忆来确认相应的数字选择，且需要先经过几局尝试性的游戏来学习电脑的选择规则。以上一系列认知过程是共同产生的，与出现顺序无关。结合前人对决策任务 $\alpha$ 波和 $\theta$ 波的活动分析<sup>[25-27]</sup>可知，功率较低的两个波段反映了认知控制与选择注意功能的缺陷。该阶段的额叶 $\theta$ 波效应和顶叶 $\alpha$ 波效应与实验对象的3种决策方案是相关的，其相关性在于，不同的决策方案会产生功率强度的变化，或者两种效应发生顺序的变

图 9 输赢反馈阶段  $\theta$  波的 ERSP 和 ITC 曲线图Fig. 9 ERSP and ITC of  $\theta$  in the feedback stage图 10 输赢反馈阶段  $\alpha$  波的 ERSP 和 ITC 曲线图Fig. 10 ERSP and ITC of  $\alpha$  in the feedback stage

化。当实验对象不想失败, 决定做出稳妥型选择时, 顶叶  $\alpha$  波增强效应发生在额叶  $\theta$  波增强效应之前; 当实验对象想获胜, 决定冒着 33% 的失败概率而做出风险型选择时, 额叶  $\theta$  波增强效应发生在顶叶  $\alpha$  波增强效应之前; 且两种选择中这两种活动增强的程度是相同的。Rajan 等<sup>[32]</sup>的研究表明额叶  $\theta$  波的振荡活动与额叶神经元信号索引决策的过程相关, 起到了控制注意力与决策执行间的通讯作用。也就是说, 两种效应的发生顺序很有可能反映了实验对象渴望胜负的认知过程, 也可以作为其做出风险型决策或稳妥型决策的生物标记。在实验对象的少数错误选择中,  $\alpha$  波功率增强活动无明显的变化规律, 而其  $\theta$  波的功率增强程度比另外两种选择都要高, 这可能意味着与错误刺激相关时,  $\theta$  波会有对应的功率增强变化。

在确认与等待阶段, 实验对象需要观察屏幕上出现的所选图片, 确认选择并等待计算机做出

选择。实验的这一部分主要涉及实验对象提高大脑注意力强度的认知过程。Klimesch 等<sup>[10-11]</sup>的研究表明,  $\alpha$  波的抑制活动与选择注意力相关, 同时也有研究<sup>[33]</sup>表明  $\delta$  波的增强活动会在注意力增强的时间段发生。本文出现的  $\alpha$  波的平均谱功率抑制效应和  $\delta$  波的相位同步增强活动表明, 实验对象在该阶段出现了注意力增加、警觉性提高的认知过程。此外, 当受试者做出选择并认为自己不会输时, 这些效果会更加明显。但是, 当受试者做出错误选择并感觉到自己一定会失败后, 这些认知活动就会变得不明显。

在最后的反馈阶段, 计算机做出选择后, 实验对象开始计算游戏结果, 2 s 后游戏结果图片出现在屏幕上。大部分实验数据表明, 在游戏结果图出现前, 实验对象已经计算出对局结果, 这段时间的频谱活动反映了不同的输赢结果反馈与认知过程的联系。已有研究表明, 内侧额叶不同频段的脑电波活动与决策游戏的输赢结果反馈相

关, 其中输掉的反馈中脑电活动比较明显<sup>[34-35]</sup>。因此大脑几个区域(如额叶、中央区 and 顶叶)的  $\delta$ 、 $\theta$ 、 $\alpha$  和  $\beta$  波的平均谱功率变化可能与判断的认知过程以及获胜、失败的结果反馈有关。通过比较 3 种游戏结果中的  $\beta$  波增强效应、 $\theta$  波增强效应和  $\alpha$  波抑制效应, 可以很明显地发现失败结果组的变化程度最大。因此, 当实验对象发现自己输了游戏时, 相应的平均功率谱和相位同步程度会有更多的幅度变化。而由于本次实验未设置奖赏机制, 获胜结果组的功率谱变化与平局结果组的功率变化并没有明显的差异。

## 5 结 论

本研究设计了一种与决策游戏相关的认知任务, 并用时频分析方法观察 4 个频段的脑电波活动与不同阶段认知功能的联系。研究结果显示,  $\theta$  波功率增强效应和  $\alpha$  波功率增强效应的发生顺序与人们风险型决策和稳妥型决策方案的选择, 以及渴望获胜或不想失败的机制有关。当受试者确认他们的选择并等待对方做出选择时, 发生了明显的  $\alpha$  波功率抑制效应和  $\delta$  波相位同步增强效应, 这些效应与注意力提高的认知过程相关。在最终结果反馈阶段, 当受试者发现自己失败时, 其  $\theta$ 、 $\beta$  波的功率增强活动和  $\alpha$  波功率降低活动更明显。以上研究表明, 通过对不同频段脑电波活动进行时频分析可以清楚地了解相应认知过程中的大脑活动, 有助于脑认知科学的可视化研究, 为认知评估标准的设立奠定基础。

## 参 考 文 献

- [1] 刘春雷. 学习和决策任务中结果评价的认知神经机制 [D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [2] Stormoen S, Almkvist O, Eriksson M, et al. Cognitive predictors of medical decision-making capacity in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease [J]. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 2014, 29(12): 1304-1311.
- [3] De Siqueira ASS, Yokomizo JE, Jacob-Filho W, et al. Review of decision-making in game tasks in elderly participants with Alzheimer disease and mild cognitive impairment [J]. *Dementia and Geriatric Cognitive Disorders*, 2017, 43(1-2): 81-88.
- [4] Boyle PA, Yu L, Wilson RS, et al. Poor decision making is a consequence of cognitive decline among older persons without Alzheimer's disease or mild cognitive impairment [J]. *PLoS One*, 2012, 7(8): e43647.
- [5] Enriquez-Geppert S, Huster RJ, Herrmann CS. EEG-neurofeedback as a tool to modulate cognition and behavior: a review tutorial [J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2017, 11: 51.
- [6] Derambure P, Labidi J, Bourriez JL, et al. O-40 EEGmine: EEG as a prognosis tool of cognitive decline in routine clinical practice [J]. *Clinical Neurophysiology*, 2019, 130(7): e34.
- [7] Xue G, Lu ZL, Levin IP, et al. Functional dissociations of risk and reward processing in the medial prefrontal cortex [J]. *Cerebral Cortex*, 2008, 19(5): 1019-1027.
- [8] Bell MA, Cuevas K. Using EEG to study cognitive development: issues and practices [J]. *Journal of Cognition and Development*, 2012, 13(3): 281-294.
- [9] Cavanagh JF, Frank MJ. Frontal theta as a mechanism for cognitive control [J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2014, 18(8): 414-421.
- [10] Klimesch W, Sauseng P, Hanslmayr S. EEG alpha oscillations: the inhibition-timing hypothesis [J]. *Brain Research Reviews*, 2007, 53(1): 63-88.
- [11] Klimesch W. Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information [J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2012, 16(12): 606-617.

- [12] Jensen O, Kaiser J, Lachaux JP. Human gamma-frequency oscillations associated with attention and memory [J]. *Trends in Neurosciences*, 2007, 30(7): 317-324.
- [13] Güntekin B, Hanoğlu L, Güner D, et al. Cognitive impairment in parkinson's disease is reflected with gradual decrease of EEG delta responses during auditory discrimination [J]. *Frontiers in Psychology*, 2018, 9: 170.
- [14] Zavala B, Damera S, Dong JW, et al. Human subthalamic nucleus theta and beta oscillations entrain neuronal firing during sensorimotor conflict [J]. *Cerebral Cortex*, 2017, 27(1): 496-508.
- [15] Bechara A, Damasio AR. The somatic marker hypothesis: a neural theory of economic decision [J]. *Games and Economic Behavior*, 2005, 52(2): 336-372.
- [16] Tversky A, Kahneman D. Advances in prospect theory: cumulative representation of uncertainty [J]. *Journal of Risk and Uncertainty*, 1992, 5(4): 297-323.
- [17] Huang LY, She HC, Jung TP. Neural oscillation correlates chemistry decision-making [J]. *International Journal of Neural Systems*, 2017, 28(3): 1750031.
- [18] Iznak AF, Iznak EV, Medvedeva TI, et al. Features of EEG spectral parameters in depressive patients with different efficiencies of decision-making [J]. *Human Physiology*, 2018, 44(6): 627-634.
- [19] Nunez MD, Vandekerckhove J, Srinivasan R. How attention influences perceptual decision making: single-trial EEG correlates of drift-diffusion model parameters [J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 2017, 76: 117-130.
- [20] Shen JQ, Jiang LL. Loss impresses human beings more than gain in the decision-making game [Z/OL]. arXiv Preprint, arXiv: 170701375, 2017.
- [21] Horat SK, Prévot A, Richiardi J, et al. Differences in social decision-making between proposers and responders during the ultimatum game: an EEG study [J]. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 2017, 11: 13.
- [22] Flexer A, Makeig S. Independent component analysis of EEG recorded during two-person game playing [J]. *Applied Artificial Intelligence*, 2007, 21(9): 883-894.
- [23] Gallagher HL, Jack AI, Roepstorff A, et al. Imaging the intentional stance in a competitive game [J]. *Neuroimage*, 2002, 16(3): 814-821.
- [24] 薄洪健, 刘新磊, 马琳, 等. 猜拳博弈过程脑电的时频特征分析及基于优选特征的博弈决策预测 [J]. *信号处理*, 2017, 4(3): 273-279.
- [25] Bacigalupo F, Luck SJ. Lateralized suppression of alpha-band EEG activity as a mechanism of target processing [J]. *Journal of Neuroscience*, 2019, 39(5): 900-917.
- [26] Marshall TR, den Boer S, Cools R, et al. Occipital alpha and gamma oscillations support complementary mechanisms for processing stimulus value associations [J]. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2018, 30(1): 119-129.
- [27] Clarke AR, Barry RJ, Karamacoska D, et al. The EEG theta/beta ratio: a marker of arousal or cognitive processing capacity? [J]. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 2019, 44(2): 123-129.
- [28] Delorme A, Makeig S. EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis [J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2004, 134(1): 9-21.
- [29] Widmann A, Schröger E, Maess B. Digital filter

- design for electrophysiological data—a practical approach [J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2015, 250: 34-46.
- [30] Plechawska-Wojcik M, Kaczorowska M, Zapala D. The artifact subspace reconstruction (ASR) for EEG signal correction. a comparative study [C] // *Proceedings of the International Conference on Information Systems Architecture and Technology*, 2018: 125-135.
- [31] Pfurtscheller G, Aranibar A. Evaluation of event-related desynchronization (ERD) preceding and following voluntary self-paced movement [J]. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1979, 46(2): 138-146.
- [32] Rajan A, Siegel SN, Liu Y, et al. Theta oscillations index frontal decision-making and mediate reciprocal frontal–parietal interactions in willed attention [J]. *Cerebral Cortex*, 2019, 29(7): 2832-2843.
- [33] Harmony T. The functional significance of delta oscillations in cognitive processing [J]. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 2013, 7: 83.
- [34] Cohen MX, Elger CE, Fell J. Oscillatory activity and phase–amplitude coupling in the human medial frontal cortex during decision making [J]. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2008, 21(2): 390-402.
- [35] Akash MH. *Understanding scalp EEG in response to newsvendor decision-making and feedback* [D]. Texas: University of TEXAS Arlington, 2019.