

# 任务提示的脑认知加工过程中 神经振荡机制研究

王 宇<sup>1,2</sup>, 陈 晨<sup>1</sup>, 张家琦<sup>1</sup>, 彭丝雨<sup>1</sup>, 高军峰<sup>1,2</sup>

(1. 中南民族大学生物医学工程学院认知科学国家民委重点实验室, 湖北武汉 430074;  
2. 电子科技大学生命科学与技术学院, 四川成都 610054)

**摘 要:** 任务切换实验是评估人类认知灵活性的有效范式, 其中提示语切换实验(Task Cuing)能够有效地测量任务切换的认知过程. 为了深入研究任务切换的认知过程, 本文设计了提示语(cue)和之后刺激(Target)比例为1:8的提示语切换实验, 采集了50名在校大学生的脑电. 结合事件相关电位和事件相关谱扰动、序间相位相干、事件相关相位互相关等时频分析的方法研究了任务切换认知过程中的神经振荡机制. 实验结果显示, 在P200时间段里, 腹侧前额叶与后顶叶之间神经振荡存在相位同步现象, 并且后顶叶电极神经振荡的相角滞后于前额叶电极, 这表明P200对应的检索过程是由前额叶驱动后顶叶的一种自上而下的控制过程. 在P300的时间段里, 对theta波段频谱分布的研究结果显示了切换任务中大脑的激活强度显著大于重复任务中大脑的激活强度, 而且, 两种任务中该频段的能量均主要分布在右侧后顶叶, 它揭示了任务集配置和更新与theta波段神经振荡之间的密切关系. 本文以上发现为揭示大脑认知灵活性的神经振荡机制提供了一种新的途径, 有助于我们深入了解任务切换的认知加工过程.

**关键词:** 任务切换; 提示语; 认知灵活性; 时频分析; 神经振荡

**中图分类号:** TP391.4; TP181; R338 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2020)05-0960-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.05.017

## The Research of Neural Oscillation Mechanism During the Brain Cognitive Processing of Task Switching

WANG Yu<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>1</sup>, ZHANG Jia-qi<sup>1</sup>, PENG Si-yu<sup>1</sup>, GAO Jun-feng<sup>1,2</sup>

(1. School of Biomedical Engineering, South-Central University for Nationalities, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. School of Life Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract:** Task switch is an efficient experiment to evaluate human's cognitive flexibility in which task cuing can effectively measure the cognitive process of task switching. In order to deeply study the cognitive process, we design the task cuing where the ratio of cue and target is 1:8. The neural oscillation of task switching was studied by combining event related potentials (ERP) and time-frequency analysis including event-related spectral perturbation(ERSP), inter-trial phase coherence(ITPC), event-related phase cross coherence(ERPCOH) in this paper. For P200, the experiment result shows that the neural oscillation has phase synchronization between prefrontal cortex and posterior partial cortex and the phase angle of posterior partial cortex lags behind prefrontal cortex, indicating that the brain completed task rule retrieval and P200 reflects a top-down process driven by prefrontal cortex. For P300, the research results of theta band oscillation distribution show that the brain activation in the cue switch was significantly greater than in the cue repeat. Meanwhile, the power of theta band oscillation was mainly distributed in the posterior partial cortex, which shows that theta band oscillation is related with the reconfiguration and update of task set. The above findings provide a new way to reveal the neural oscillation mechanism of brain cognitive flexibility, which helps us to understand the cognitive process of task switching.

**Key words:** task switch; cue; cognitive flexibility; time-frequency analysis and neural oscillation

收稿日期: 2019-03-22; 修回日期: 2019-11-08; 责任编辑: 孙瑶

基金项目: 国家自然科学基金(No. 81271659, No. 61773408); 中央高校基础科研业务专项(No. CZZ19004, No. CZY19040); 中国博士后科学基金(No. 2014M552346)

## 1 引言

人类在复杂的环境中会面对一些突发情况或者生存环境的改变,这就要求人类大脑的认知行为做出相应的调整以适应新的环境,这种认知行为的调整通常称为认知灵活性<sup>[1]</sup>. 任务切换实验(Task-Switch, TS)是评价认知灵活性的经典实验范式. 其中提示语任务切换(Task cuing, TC)实验被应用的最为广泛<sup>[2-4]</sup>.

大量研究表明 TC 会涉及到刺激编码、记忆检索和任务集的配置等认知加工过程,并且不同的认知过程分布在不同的时间段里,与特定的 ERP 成分紧密相关. 对提示语任务(cue)脑电(EEG, Electroencephalography)的研究发现:P200 成分反映了记忆检索与刺激编码的认知加工过程;P300 成分反映了任务集的配置过程,在提示语切换任务(Cue Switch, CS)和提示语重复任务(Cue Repeat, CR)中的配置过程基本相似,并且切换任务中的 P300 的激活强度大于重复任务中的 P300 激活强度<sup>[5,6]</sup>.

大脑神经振荡的研究发现不同频段的神经振荡与不同的认知加工过程紧密相关,其中 theta 波段的神经振荡与任务切换、目标更新、信息编码和记忆检索等认知加工过程紧密相关. 并且 theta 波段的强度随着任务难度和控制需求的增加而增加<sup>[7]</sup>. alpha 波段的神经振荡与工作记忆和注意过程紧密相关, alpha 波段神经振荡的强度随着记忆存储和记忆检索强度的增加而增加<sup>[8]</sup>. 同时,前人研究发现额顶网络在提示语任务中发挥重要作用,并且额顶网络的相位同步反映了额叶和顶叶之间的通信,其中额顶网络分为腹侧通路和背侧通路,背侧通路是由上顶叶(Superior Parietal Lobule, SPL)和额叶眼动区(Frontal Eye Fields, FEF)组成,腹侧通路是由颞顶交界(Temporoparietal Junction, TPJ)和腹侧前额叶(Ventral Prefrontal Cortex)组成<sup>[9]</sup>. 对工作记忆的研究发现从额叶到顶叶的信息传递是由 theta 波段的同步震荡实现的<sup>[10-12]</sup>,从顶叶到额叶的信息传递是由 alpha 波段的同步震荡实现. 在提示语任务的研究中也发现了显著的额顶网络相位同步现象,有研究发现额顶网络的相位同步与自上而下的控制、任务集的维持和抑制控制紧密相关<sup>[9,13]</sup>.

文献显示,目前对提示语任务的研究仅仅关注于单一脑区的神经振荡和整个刺激过程中的相位同步,没有对提示语任务中不同时间段里特定认知过程的神经振荡进行深入研究,也没有对具体的额顶通路进行细致的研究. 所以本研究结合事件相关电位(Event Related Potentials, ERP)和时频分析(Time-Frequency Analysis, TFA)的方法,对提示语任务中 P200 对应的记忆检索过程和 P300 对应的任务集配置过程进行了深入分

析,探究了记忆检索过程和任务集配置过程中大脑神经振荡的机制. 以更全面、深入地揭示大脑在切换任务时的认知加工过程.

## 2 方法

### 2.1 实验设计与数据采集

实验设计如图 1 所示.

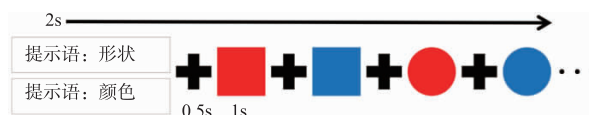


图1 实验设计

本实验中受试者为 50 名(其中男性 25 人,  $24.5 \pm 2.3$  岁)身体健康的在校大学生(右利手,无精神疾病). 实验要求受试者根据提示语给出的任务规则,对之后出现的刺激图片快速、准确地做出反应. 当提示语为“颜色”时,出现红色图片点击鼠标左键,出现蓝色图片点击鼠标右键. 当提示语为“形状”时,出现方形图片点击鼠标左键,出现圆形图片点击鼠标右键. 一个提示语之后会有八张刺激图片出现,共用时 14s. 一次实验出现 40 个提示语和 320 个刺激图片. 一名受试者做四次实验,一次实验大约需要 9min. 本刺激的实验程序通过 E-prime 2.0 编辑并运行.

实验使用 Brain product 系统和标准 64 导联的脑电帽对被试的脑电信号进行采集. 其中采样率为 500Hz,各电极阻抗小于  $5k\Omega$ .

### 2.2 数据预处理

数据预处理主要通过 EEGLAB 软件完成,首先以双侧乳突平均电位为参考电位,并进行(1~50Hz)带通滤波. 然后运用 EEGLAB 中 ICA 算法和 Adjust (EEGLAB 插件)去除眼电成分<sup>[14]</sup>. 预处理过程中去除了 8 组眼电干扰严重的实验数据,保留了 192 组合格的实验数据. 然后,把去噪后的数据分割为 1.4s 的 epoch(提示语刺激前 400ms 至刺激后 1000ms),并进行基线校正(使用刺激前 400ms 的脑电)<sup>[15,16]</sup>.

### 2.3 数据分析

首先,使用 EEGLAB 把 CS 和 CR 中 epoch 叠加平均,得到提示语任务诱发的 ERP<sup>[2]</sup>. 从 CS 和 CR 诱发的 ERP 波形中提取了 P200 成分(150~190ms)和 P300 成分(310~410ms)<sup>[7]</sup>. 并计算 CS 和 CR 中各自的 ERP 成分的幅度和潜伏期. 基于时域分析的结果,本研究使用以下时频分析方法对神经振荡特征进行研究.

#### 2.3.1 事件相关谱扰动

事件相关谱扰动<sup>[2]</sup>(Event-Related Spectral Perturbation, ERSP)是一个时间、频率的函数,它反映了特定频谱动态变化的平均值. 求解公式如下:

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

此处,  $F_k(t,f)$  是第  $k$  个刺激段 (trial) 在时间  $t$  和频率  $f$  处的频谱.  $F_k(t,f)$  可以是短时傅里叶变 (Short-Time Fourier Transform, STFT) 和小波变换 (Wavelet Transform, WT).  $n$  是刺激段的总数. 对于每个刺激段中每个频率的 ERSP, 本文运用减去刺激前数据 (Baseline Division, DIV) 的方式和对 ERSP 进行基线校正.

### 2.3.2 刺激段相位相干

序间相位相干<sup>[2]</sup> (Inter-Trial Phase Coherence, ITPC) 是一个时间、频率的函数, 测量特定时间和频率处刺激段之间神经振荡的同步特性. ITPC 的结果为一复数, 其模长表示各刺激段在时间  $t$  和频率  $f$  处神经振荡的同步性, 其角度表示刺激段在时间  $t$  和频率  $f$  处神经振荡的相角. 计算公式如下:

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

此处,  $F_k(t,f)$  是第  $k$  个刺激段 (trial) 在时间  $t$  和频率  $f$  处的频谱.  $F_k(t,f)$  可以是短时傅里叶变换 (STFT) 和小波变换 (WT).  $n$  是刺激段的总数. 对于每个刺激段中每个频率的 ITPC, 本文运用减去刺激前数据 (Baseline Division, DIV) 的方式和对 ITPC 进行基线校正.

### 2.3.3 事件相关相位互相干

事件相关相位互相干<sup>[2]</sup> (Event-Related Phase Cross Coherence, ERPCOH) 是一个时间、频率的函数, 测量特定时间段和频率段里两个通道神经振荡的同步特性. 事件相位互相干的取值范围在 0~1 之间 (0 表示神经振荡不同步, 1 表示神经振荡完全同步). 计算式如下:

$$\text{ERPCOH}^{a,b}(f,t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{|F_k^a(f,t) \times F_k^b(f,t)^*|}{|F_k^a(f,t) \times F_k^b(f,t)|} \quad (3)$$

此处  $a, b$  分别表示两个通道的信号.  $F_k^b(f,t)^*$  是  $F_k^b(f,t)$  的共轭复数.  $F_k(f,t)$  是第  $k$  个刺激段 (trial) 在时间  $t$  和频率  $f$  处的频谱.  $F_k(f,t)$  可以是短时傅里叶变换 (STFT) 和小波变换 (WT).  $n$  是刺激段的总数.

为了获得较好的时域和频域精度, 本研究采用了周期数为 2~6 (步长为 0.16, 与所求频率一一对应) 的 Morlet 小波变换求取了 4~30Hz (步长为 1Hz) 的频谱.

## 2.4 统计分析

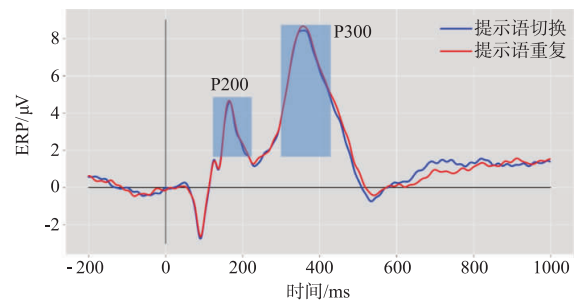
对 P200 成分神经振荡的观察发现, 前额叶电极 (AF8, AF7) 和后顶叶电极 (PO7, PO8) 的分布最强. 因此, 本研究选择这 4 个电极对 P200 成分时间段内的神经振荡机制做进一步研究, 运用 ANOVA (2×2) 分析了大脑左右半球和任务类型 (CS 和 CR) 对 6~9Hz 频段的相干性 (即互相干) 的影响. 同时运用 ANOVA (2×2×2) 分析了大脑前后位置、左右位置和任务类型对 6~

9Hz 频段相角分布的影响. 对 P300 成分神经振荡, 运用 wilcoxon 符号秩检验 ( $p < 0.05$ ) 分析了 CS 和 CR 中的 theta 和 alpha 波段 ERSP 脑地形图分布的差异.

## 3 结果

### 3.1 时域分析

图 2 显示了 ERP 的分析结果. 由图 2 可见, CS 及 CR 均诱发了 ERP, 统计分析表明了 CS 与 CR 中 ERP 成分的幅度及潜伏期均无显著差异.



P200出现在170ms(CS:169.4±17.8; CR:171.8±17.2)附近  
P300出现在360ms(CS:362.2±33.5; CR:362.7±32.7)附近

图2 Fz电极处CS和CR所诱发的ERP波形

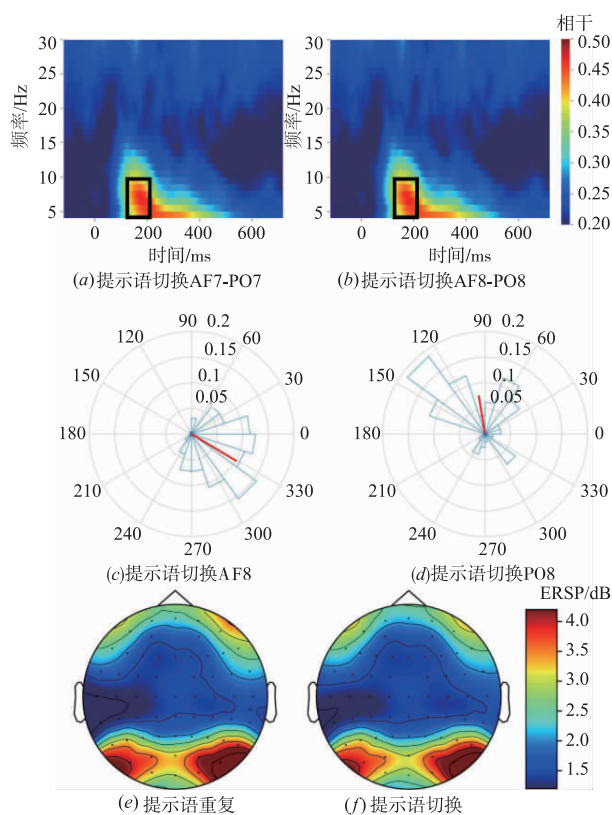
### 3.2 时频分析

图 3 显示了 P200 成分神经振荡的分析结果. 由图 3(a) 和 (b) 可以看出, 在 P200 的时段, 6~9Hz 频段的时频面上, 右半球 (见图 3(b)) 及左半球的 (见图 3(a)) 事件相关相位互相干均显著增大. ANOVA 发现, 左右半球位置主效应不显著 ( $F(1, 764) = 0.41, p = 0.5227$ ). 任务类型主效应不显著 ( $F(1, 764) = 1.23, p = 0.2679$ ). 交互效应不显著 ( $F(1, 764) = 0.04, p = 0.836$ ).

由图 3(c) 和 (d) 可以看出在 P200 时间段里前额叶电极 (AF7, AF8) 处 6~9Hz 频段神经振荡的相角主要分布在 330 度附近, 后顶叶电极 (PO7, PO8) 处 6~9Hz 频段神经振荡的相角主要分布在 130 度附近. 电极左右位置×电极前后位置×任务类型重复测量 ANOVA 发现电极左右位置对 6~9Hz 频段神经振荡的相角无显著影响 ( $F(1, 1535) = 1.93, p = 0.1653$ ), 任务类型对 6~9Hz 频段神经振荡的相角无显著影响 ( $F(1, 1535) = 0.13, p = 0.7236$ ), 电极前后位置 (前额叶电极和后顶叶电极) 对 6~9Hz 频段神经振荡的相角有显著影响 ( $F(1, 1535) = 426.81, p = 0$ ). 大脑半球×电极前后位置的交互效应不显著 ( $F(1, 1535) = 3.78, p = 0.0522$ ), 大脑半球×任务类型的交互效应不显著 ( $F(1, 1535) = 0.01, p = 0.9306$ ), 电极前后位置×任务类型的交互效应不显著 ( $F(1, 1535) = 0.07, p = 0.7957$ ). Bonferroni t-test 发现后顶叶电极 (PO7, PO8) 上的 6~9Hz 频段神经振荡的相角显著滞后于前额叶电极 (AF7, AF8) 6~9Hz

频段神经振荡的相角。

由图 3(e)和(f)可以看出在 P200 时间段里 6~9Hz 频段神经振荡主要分布在腹侧前额叶电极和后顶叶电极。



(a)和(b)图分别表示CS中前额叶电极与后顶叶电极的互相关分布图, (c)和(d)图分别表示CS中前额叶电极(AF8)和后顶叶电极(PO8)6~9Hz 的神经振荡相角的分布图, (e)和(f)分别表示CR和CS任务中6~9Hz 神经振荡(ERSP)的分布图

图3 P200成分的神经振荡的分析结果

对 P200 时间段时频分析结果总结如下:

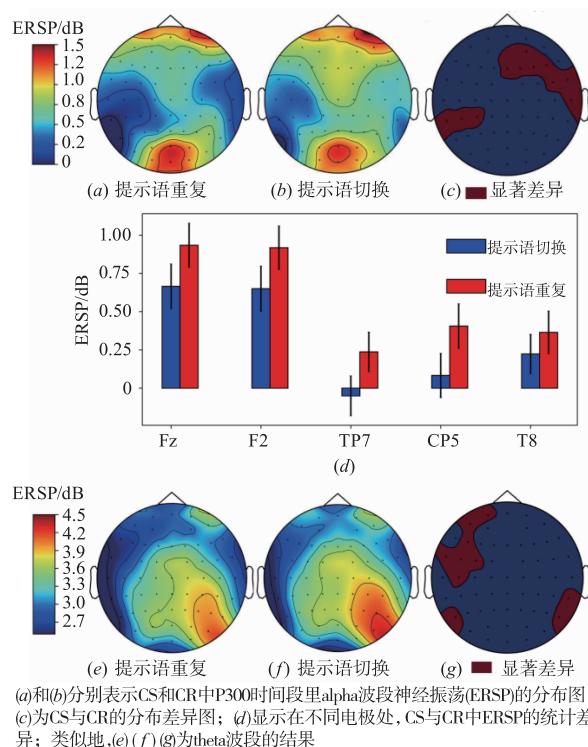
(1) 两任务中,前额叶电极与后顶叶电极处 6~9Hz 波段神经震荡出现显著相干。

(2) 两任务中,后顶叶电极处 6~9Hz 神经震荡的相位显著滞后于前额叶电极。

(3) 两任务中,6~9Hz 波段神经震荡在前额叶和后顶叶分布最强。

图 4 显示了 P300 成分神经振荡的分析结果。

由图 4(a)和(b)可以看出 alpha 波段的神经振荡(即 ERSP)在额叶和枕叶中央电极分布最强。Wilcoxon 符号秩检验发现在额中央电极(Fz, F2)、右侧颞叶电极(T8)和左侧顶叶电极(TP7, CP5)处, alpha 波段的神经振荡在 CR 和 CS 之间出现显著差异,并且 Bonferroni t-test 发现在额叶电极(Fz, F2)处 CS 中的 alpha 波段的神经振荡显著强于 CR 中的神经振荡( $p(Fz) = 0.0178$ ,  $p(F2) = 0.0196$ )、右侧颞叶电极(T8)处 CS 中的 alpha



(a)和(b)分别表示CS和CR中P300时间段里alpha波段神经振荡(ERSP)的分布图, (c)为CS与CR的分布差异图; (d)显示在不同电极处, CS与CR中ERSP的统计差异; 类似地, (e) (f) (g)为theta波段的结果

图4 P300成分的神经振荡的分析结果

波段的神经振荡显著强于 CR 中的神经振荡( $p(T8) = 0.0052$ )、左侧顶叶电极(TP7, CP5)处 CS 中的 alpha 波段的神经振荡显著强于 CR 中的神经振荡( $p(TP7) = 0.0066$ ,  $p(CP5) = 0.003$ ) (见图 4(c)和(d))。

由图 4(e)和(f)可以看出 theta 波段的神经振荡在额叶和顶叶电极分布最强。Wilcoxon 符号秩检验发现右侧顶叶和左侧额叶电极处, theta 波段的神经振荡在 CR 和 CS 之间出现显著差异,且 Bonferroni t-test 发现右侧顶叶电极(P8, TP8)处 CS 中的神经振荡显著强于 CR 中的神经振荡( $p(TP8) = 0.0026$ ,  $p(P8) = 0.0078$ ) (见图 4(g))。

对 P300 时间段时频分析结果总结如下:

(1) CS 和 CR 任务中, alpha 波段神经震荡在前额叶和枕叶中央分布最强;在额中央电极、右侧颞叶电极处出现显著差异;在差异电极处, CS 任务中 alpha 波段的神经震荡显著强于 CR 任务。

(2) 两任务中, theta 波段神经震荡在后顶叶最强;在右侧后顶叶和左侧额叶电极处出现显著差异;在差异电极处, CS 任务中 theta 波段的神经震荡显著强于 CR 任务。

## 4 讨论

本研究运用时频分析的方法揭示了提示语任务中不同 ERP 成分对应认知过程的神经振荡特性,从该角度解析了 CS 和 CR 中不同认知过程的大脑加工机制。

研究首先提取了 CS 和 CR 任务下 P200 和 P300 等 ERP 成分,其潜伏期与前人研究结果基本一致<sup>[5,6]</sup>,此结果进一步验证了此实验范式的可靠性。

在对工作记忆和长期记忆的大量研究中发现,前额叶和后顶叶皮层 theta 和 alpha 波段神经振荡有显著相位同步现象,并且这种相位同步与记忆检索紧密相关<sup>[3]</sup>。结合实验,本文推测 CS 和 CR 中的 P200 反映了任务集的检索过程,这一过程是前额叶驱动后顶叶、自上而下控制实现的,并且这一检索过程主要占用腹侧额叶网络。

前人研究发现, alpha 波段的神经震荡与记忆存储和注意过程中对无关信息和无关脑区的抑制紧密相关<sup>[8]</sup>,并且 alpha 波段神经震荡的强度随着任务的难度增加而增加。结合 P300 时间段 alpha 波段神经震荡的分析结果,本文推测 CS 中配置过程的难度显著大于 CR,并且 CS 中配置过程的抑制效应强于 CR。

同时,有研究发现分布于后顶叶的 P300 反映了任务集的更新与配置,切换任务中的 P300 的激活强度大于重复任务中的 P300 激活强度<sup>[5,6]</sup>,并且后皮层区域 (Posterior Cortical Areas) 处 theta 波段的神经振荡与维持在工作记忆系统中的相关信息重新激活有关<sup>[4]</sup>。结合 P300 时间段里 theta 波段神经震荡的分析结果,本文推测右侧后顶叶皮层 theta 波段的神经振荡与相关任务集重新激活有关,并且 CS 中任务集重新激活的强度大于 CR。

## 5 结论

本研究运用时频分析的方法,从神经振荡的角度证明了:任务切换实验中 CS 和 CR 的 P200 反映了任务集的检索过程,并且这一检索过程是由前额叶皮层与后顶叶皮层在 6~9Hz 波段上的同步神经振荡调制的,通过研究前额叶电极和后顶叶电极处 6~9Hz 神经振荡相角的分布,推测 P200 对应的检索过程是一个由前额叶驱动顶叶自上而下的控制过程。同时,本研究还发现了后顶叶皮层在 theta 波段的神经振荡调制了相关任务集的重新激活,并且 CS 中相关任务集的激活强度大于 CR 中相关任务集的激活强度。这说明了任务集的切换和更新与后顶叶皮层 theta 的神经振荡有紧密关系,同时也揭示了大脑认知灵活性的神经振荡机制。

## 参考文献

- [1] James A Grange, George Houghton. Task Switching and Cognitive Control[M]. New York, US: Oxford University Press, 2014.
- [2] Arnaud Delorme, Scott Makeig. 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.
- [3] Gusang Kwon, Min-Young Kim, Sanghyun Lim, Hyukchan Kwon. Frontoparietal EEG alpha-phase synchrony reflects differential attentional demands during word recall and oculomotor dual-tasks [J]. Clinical Neuroscience, 2015, 26(18): 1161-1167.
- [4] Liang-Tien Hsieh, Charan Ranganath. Frontal midline theta oscillations during working memory maintenance and episodic encoding and retrieval [J]. Neuroimage, 2014, 85: 721-729.
- [5] Patrick D Gajewski, Nicola K Ferdinand, Jutta Kray, Michael Falkenstein. Understanding sources of adult age difference in task switching: Evidence from behavioral and ERP studies [J]. Neuroscience and Biobehavioral Review, 2018, 92: 255-275.
- [6] Steinhäuser M, Maier M E, Ernst B. Neural correlates of reconfiguration failure reveal the time course of task-set reconfiguration [J]. Neuropsychologia, 2017, 106: 100-111.
- [7] Cooper P S, Wong A S W, McKewen M, et al. Frontoparietal theta oscillations during proactive control are associated with goal-updating and reduced behavioral variability [J]. Biological Psychology, 2017, 129: 253-264.
- [8] Samuel I B H, Wang C, Hu Z, et al. The frequency of alpha oscillations: Task-dependent modulation and its functional significance [J]. Neuroimage, 2018, 183: 897-906.
- [9] Cooper P S, Wong A S W, Fulham W R, et al. Theta frontoparietal connectivity associated with proactive and reactive cognitive control processes [J]. Neuroimage, 2015, 108: 354-363.
- [10] Juergen Fell, Nikolai Axmacher. The role of phase synchronization in memory processes [J]. Nature Reviews Neuroscience, 2011, 12: 105-118.
- [11] Stefanie Liebe, Gregor M Hoerer, Nikos K Logothetis. Theta coupling between V4 and prefrontal cortex predicts visual short-term memory performance [J]. Nature Reviews Neuroscience, 2012, 15(3): 456-462.
- [12] Adam Gazzaley, Anna C Nobre. Top-down modulation: bridging selective attention and working memory [J]. Trends in Cognitive Sciences, 2012, 16(2): 129-135.
- [13] López M E, Pusil S, Pereda E, et al. Dynamic low frequency EEG phase synchronization patterns during proactive control of task switching [J]. Neuroimage, 2019, 186: 70-82.
- [14] 李明爱, 郭硕达, 田晓霞, 等. 眼电伪迹自动识别与去除的新方法 [J]. 电子学报, 2016, 44(5): 1032-1039.

LI Ming-ai, GUO Shuo-da, TIAN Xiao-xia, et al. A novel automatic recognition and removal method of ocular artifacts [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(5): 1032-

1039. (in Chinese)

- [15] 陈冉,王鹏,高军峰,等. 利用相锁值算法的脑电相同步测谎研究[J]. 电子学报,2018,46(6):1289-1293.

CHEN Ran, WANG Peng, GAO Jun-feng, et al. Lie detection study based on phase locking value [J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(6): 1289-1293. (in Chinese)

- [16] 彭丝雨,周到,高军峰,等. 基于互信息的脑网络及测谎研究[J]. 电子学报,2019,47(7):1551-1556.

PENG Si-yu, ZHOU Dao, GAO Jun-feng, et al. Research on mutual information-based brain network and lie detection [J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(7): 1551-1556. (in Chinese)

#### 作者简介



王 宇 男,1991年5月出生,山西忻州人.2017年毕业于长治医学院,现为中南民族大学国家民委认知科学重点实验室研究生,研究方向为脑电信号处理与脑认知、脑疾病研究.



高军峰(通讯作者) 男,1973年10月出生,湖北武汉人.副教授,硕士生导师.2005年和2011年分别在武汉理工大学和西安交通大学获得工学硕士和工学博士学位,现为中南民族大学教师,主要从事多模态神经影像、认知神经科学及机器学习等领域的研究.

E-mail: junfengmst@163.com