

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：工作记忆负荷对反馈加工过程的影响：来自脑电研究的证据

作者：贾世伟，齐丛丛，陈乐乐，任衍具

第一轮

感谢两位审稿专家的宝贵意见和建议！经过反思和讨论，我们去除了电极点因变量，对数据进行了重新分析。参考了更多的文献，根据审稿专家的意见对文章进行了全面地修改。正文中修改的地方用蓝色标出。下面是逐条给出的修改说明。

审稿人 1 意见：

本研究讨论了一个兼具理论意义和应用价值的问题：工作记忆负荷如何影响反馈加工过程（从而影响反馈学习）。研究采用脑电技术结合双任务范式。发现了 FRN 与反馈后 Theta 震荡在工作记忆效应上的分离，并据此探讨了认知资源变化对反馈加工过程的影响机制。主要存在以下几点疑问：

意见 1：被试量为 23 人（相对来说样本比较小），请补充确定被试量的依据。

回应：感谢审稿专家的建议。诚如专家所言，本研究最终有效被试量为 23 人，样本比较小，需要对样本量的问题做出说明。在之前的稿件中，我们只是按要求在自检报告中做出说明，而正文中没有。多谢专家提醒，我们已经把样本量计算依据添加到正文中。请见正文“2.1 被试”部分的脚注 1，内容如下：

*使用 G*Power 3.1 推算样本量。其中，最大效应值设置为 $f = 0.4$ ， $\alpha = 0.05$ ，重复测量间相关系数为 $r = 0.5$ 。本研究为 2*3 被试内设计，故组数为 1，因素水平为 6。最终推算出样本量为 15 人。本研究获得有效被试数 23 人，满足样本量要求。*

意见 2：任务中提示被试“探索规律，尽可能是收益最大化”，但是实际结果是随机分配的，这个用意何在呢？请具体说明。

回应：多谢专家的建议。使用伪随机设计的目的是控制正、负反馈的概率，使正、负反馈比率差异不显著，都接近 50%。原因是 RewP（reward positivity；在这次修改中，已将 FRN 改为 RewP，具体原因在前言第二段中有介绍）、P3 和 LPP 成分对概率敏感，伪随机设计的目的是排除概率干扰。而实验中告知被试有某种规律，并鼓励探索规律，目的是保证被

试完成任务的动机水平。以上设置是参考了前人研究（Yeung & Sanfey, 2004; Hajcak et al., 2006; Langeslag & van Strien, 2013; Huang & Yu, 2018; Shahnazian et al., 2018）。伪随机设计的简单赌博任务是一种传统任务。我们已经添加了说明，具体请见“2.2 实验设计与程序”部分最后一段，内容如下：

..... 由于反馈比率会影响反馈相关脑电成分，为保证正、负反馈概率差异不显著，也就是都接近 50%，参考前人研究（Yeung & Sanfey, 2004; Hajcak et al., 2006; Langeslag & van Strien, 2013; Huang & Yu, 2018; Shahnazian et al., 2018）实验采用伪随机设计。也就是说正反馈与负反馈均伪随机出现，与被试选择的卡片无关。但是为了保证被试的任务动机，实验中告知被试待选卡片间存在某种规律，并鼓励被试探索规律，尽可能使赌博任务中的收益最大化。实验结束后告知被试实验任务是伪随机设计以及实验目的。

参考文献

- Hajcak, G., Moser, J. S., Holroyd, C. B., & Simons, R. F. (2006). The feedback-related negativity reflects the binary evaluation of good versus bad outcomes. *Biological psychology*, 71(2), 148-154.
- Huang, C., & Yu, R. (2018). Making mistakes in public: Being observed magnifies physiological responses to errors. *Neuropsychologia*, 119, 214-222.
- Langeslag, S. J. E., & van Strien, J. W. (2013). Up-regulation of emotional responses to reward-predicting stimuli: An ERP study. *Biological Psychology*, 94(1), 228-233.
- Shahnazian, D., Shulver, K., & Holroyd, C. B. (2018). Electrophysiological responses of medial prefrontal cortex to feedback at different levels of hierarchy. *NeuroImage*, 183, 121-131.
- Yeung, N., & Sanfey, A. G. (2004). Independent coding of reward magnitude and valence in the human brain. *Journal of Neuroscience*, 24(28), 6258-6264.

意见 3：“脑电记录与处理”部分，请补充 FRN、P2 及 delta 和 theta 成分的选点依据。

回应：感谢专家的建议。在成分量化中，电极点和时间窗选择的依据有两个，一个是本研究总平均图的空间和时间分布，另一个是前人文献中的主流做法。

具体来说，RewP（FRN）取值电极点为 Fz、FCz 和 Cz。原因是前人研究发现，RewP 在头皮中前部活动最大，而且 Fz、FCz 和 Cz 也是 RewP 最常用的取值点（见综述 Sambrook & Goslin, 2015; Glazer et al., 2018）。另外，本研究正文图 2 的地形图也显示，RewP 主要分布于头皮中前部。P3 的取值点是 Pz 和 POz。原因是研究发现 P3 活动主要位于头皮中后部

(Glazer et al., 2018; Yang et al., 2018), 而且如正文图 3 显示, 本研究的地形图也显示 P3 主要分布于头皮中后部。LPP 成分的取值点是 Cz、CPz、Pz 和 POz。研究发现其主要分布于头皮中后部 (Broyd et al., 2012; Donaldson et al., 2016)。如正文图 4 地形图显示, 本研究也发现 LPP 主要分布于头皮中后部。对于震荡成分, delta 成分选取 Cz 和 CPz 点, theta 成分选取 Fz 和 FCz 点, 同样是参考文献主流分析方法 (Bernat et al., 2011; Cohen et al., 2007)。

这次修改中已经在“2.3 脑电记录与处理”部分的第三、四段添加了相应内容, 具体如下:

..... 通过脑电结果的人工识别以及参考前人文献确定各成分的取值电极点和时间窗口。对于 RewP, 分别从 Fz、FCz 和 Cz 三点, 取反馈刺激后 210–290 ms 的平均波幅 (Glazer et al., 2018; Proudfit, 2015; Sambrook & Goslin, 2015), 然后求三个值的平均数作为 RewP 的波幅。对于 P3, 分别从 Pz 和 POz 两点, 取 310–400 ms 时间窗口内的平均波幅 (Glazer et al., 2018; Yang et al., 2018), 然后求两个值的平均数作为 P3 的波幅。对于 LPP, 分别从 Cz、CPz、Pz 和 POz 四点, 取 500–750 ms 时间窗口内平均波幅 (Broyd et al., 2012; Donaldson et al., 2016), 然后求四个值的平均数作为 LPP 的波幅。

... ..基于结果图并参考前人研究 (Bernat et al., 2011; Cohen et al., 2007), delta 成分分析时间窗口为反馈刺激后 220–430 ms, 从 Cz 和 CPz 点取值并求平均数, theta 成分分析时间窗口为反馈刺激后 250–400 ms, 从 Fz 和 FCz 点取值并求平均数。

需要单独说明的是, 由于 RewP 是正向成分, 而且有的条件波峰不清晰, 因而 RewP 改为采用平均波幅的方法取值, 而不再用峰-峰值的方法取值, 因而这次修改中不存在 P2 取值的问题。

参考文献

- Bernat, E. M., Nelson, L. D., Steele, V. R., Gehring, W. J., & Patrick, C.J. (2011). Externalizing psychopathology and gain-loss feedback in a simulated gambling task: dissociable components of brain response revealed by time-frequency analysis. *Journal of Abnormal Psychology*, 120:352–64.
- Broyd, S. J., Richards, H. J., Helps, S. K., Chronaki, G., Bamford, S., & Sonuga-Barke, E. J. S. (2012). An electrophysiological monetary incentive delay (e-MID) task: A way to decompose the different components of neural response to positive and negative monetary reinforcement. *Journal of Neuroscience Methods*, 209(1), 40–49.
- Cohen, M. X., Elger, C. E., Ranganath, C. (2007). Reward expectation modulates feedback-related negativity and

EEG spectra. *NeuroImage*, 35:968–78.

Donaldson, K. R., Ait Oumeziane, B., Hodie, S., & Foti, D. (2016). The temporal dynamics of reversal learning: P3 amplitude predicts valence-specific behavioral adjustment. *Physiology & Behavior*, 161, 24-32.

Glazer, J. E., Kelley, N. J., Pornpattananankul, N., Mittal, V. A., & Nusslock, R. (2018). Beyond the FRN: Broadening the time-course of EEG and ERP components implicated in reward processing. *International Journal of Psychophysiology*, 132, 184-202.

Proudfit, G. H. (2015). The reward positivity: From basic research on reward to a biomarker for depression. *Psychophysiology*, 52(4), 449–459.

Sambrook, T. D., & Goslin, J. (2015). A neural reward prediction error revealed by a meta-analysis of ERPs using great grand averages. *Psychological bulletin*, 141(1), 213.

Webb, C. A., Auerbach, R. P., Bondy, E., Stanton, C. H., Foti, D., & Pizzagalli, D. A. (2017). Abnormal neural responses to feedback in depressed adolescents. *Journal of Abnormal Psychology*, 126(1), 19-31.

Yang, Q., Zhao, D., Wu, Y., Tang, P., Gu, R., & Luo, Y.-j. (2018). Differentiating the influence of incidental anger and fear on risk decision-making. *Physiology & Behavior*, 184, 179-188.

意见 4: 图 2 中 FRN 的波形图颜色比较不易分辨，建议调整为更容易分辨的颜色；图 3、图 4 可以合为一幅图，并请补充 P3 的地形图。

回应: 感谢审稿专家的建议。

(1) 图 2 中颜色的确区分不好，尤其原图中是“差异波 低 WM 负荷”与“负反馈 低 WM 负荷”条件都是红色。我们已经对图 2 进行修改：用黑、红、蓝分别表示基线、低 WM 负荷、高 WM 负荷，用实线、点线、断线分别代表负反馈、正反馈、差异波。具体请见下图，以及正文图 2:

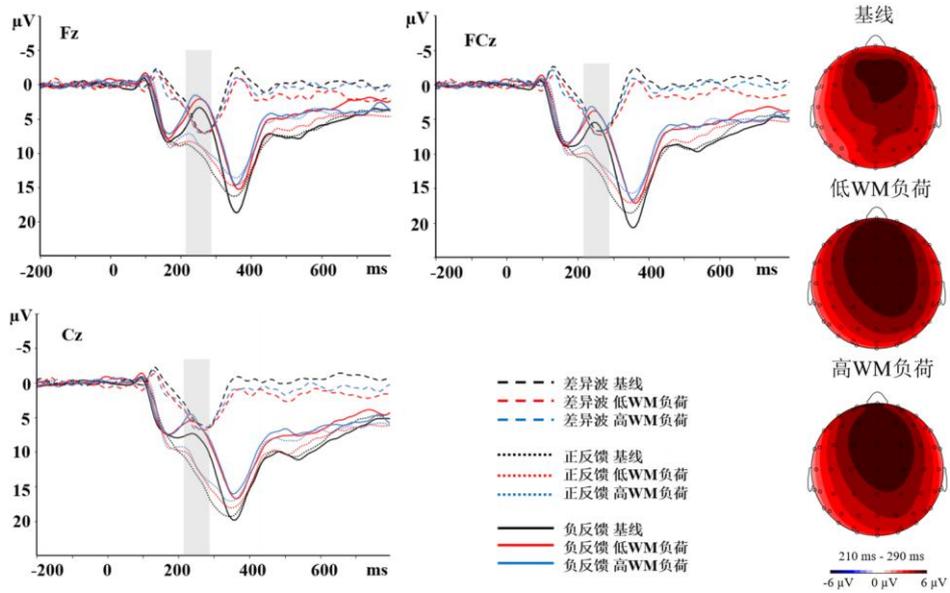


图1（正文中的图2）Fz, FCz 和 Cz 点的 RewP 原始波和差异波波形图, RewP 差异波（210 - 290ms）地形图

(2) 我们已将原来的图 3、图 4 合并为了一幅图，而且添加了 P3 地形图，形成新的图 3，如下图所示：

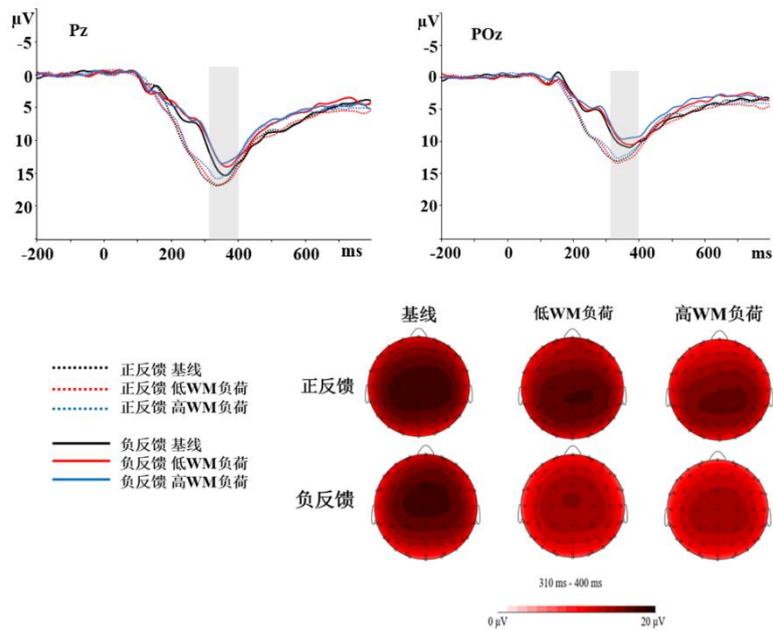


图2（正文中的图3）Pz 和 POz 点的 P3 波形图, P3（310 ~ 400 ms）在各个条件的地形图

意见 5：是否可以考虑将所选电极点波幅平均后直接做 2*3 方差分析？这样结果会更加清晰和突出。

回应：多谢专家的建议。电极点的确不是本研究关注的变量，我们接受专家的这个建议，将同一个脑电指标的不同电极点的数据合并，然后做 3（WM load 条件：基线、低、高） \times 2（反馈效价：奖赏、无奖赏）两因素重复测量方差分析。

所得到的结果几乎和之前三因素方差分析的结果一致，只有一处不同：合并之前 LPP 的 WM load \times 效价交互作用显著， $F(1, 22) = 3.36$, $p = 0.045$, $\eta_p^2 = 0.13$ ；而合并电极点之后，LPP 的 WM load \times 效价交互作用边缘显著， $F(1, 22) = 2.58$, $p = 0.088$, $\eta_p^2 = 0.11$ 。由于效应量达到中等，我们进一步做简单效应检验，得到结果与合并之前一致。

正文中已经改为新的方差分析结果，具体请见文中的“3.2 ERP 结果”和“3.3 时频分析结果”两部分。

意见 6：本研究的结果对于反馈学习可能有很重要的意义，虽然本身并不涉及“学习”过程（因为结果是随机的，没有规律的）。但是建议在讨论中深入这方面可能存在的意义和对未来研究的提示。

回应：感谢审稿专家的宝贵建议。这一条建议给我们很大的启发。我们之前讨论中引用了等级强化学习-前扣带回理论（hierarchical reinforcement learning theory of anterior cingulate cortex function, HRL – ACC theory; Holroyd & Yeung, 2011; Holroyd & Umemoto, 2016），已经涉及到反馈学习过程，但是并没有把本研究放到反馈学习背景下讨论。在这次修改中，我们已经把本文的写作放到反馈学习，尤其是 HRL – ACC 理论框架下。

首先，前言的第四段详细介绍了 HRL – ACC 理论，前言第五段在 HRL – ACC 理论框架下提出本研究的研究问题。其次，讨论的第三段至第七段，结合 HRL – ACC 理论与反应-结果预期理论（predicted response-outcome model, PRO; Alexander & Brown, 2010; 2011），讨论了反馈学习过程中的反馈效价评估、预期违背以及行为控制过程，以及 RewP, FRN 和 theta 震荡在反馈学习中反映的意义。最后，如专家建议，在讨论的最后一段提出未来研究提示，内容如下：

..... 然而，本研究用的是简单赌博任务，没有学习意义。下一步应该采用有学习意义的任务，考查 HRL – ACC 理论中的反馈评估过程与认知控制过程，以及 WM load 在其中起到的作用

这是本次修改中做的最主要的修改，希望写作有所改善。再次感谢专家建议的启发。

参考文献

Alexander, W. H., & Brown, J. W. (2010). Computational models of performance monitoring and cognitive control. *Topics in Cognitive Science*, 2(4), 658-677.

Alexander, W. H., & Brown, J. W. (2011). Medial prefrontal cortex as an action-outcome predictor. *Nature Neuroscience*, 14(10), 1338-1344.

Holroyd, C.B., Yeung, N. (2011). An integrative theory of anterior cingulate cortex function: option selection in hierarchical reinforcement learning. In: Mars, R.B., Sallet, J., Rushworth, M.F.S., Yeung, N. (Eds.), *Neural Basis of Motivational and Cognitive Control*. MIT Press, Cambridge, MA, pp. 333-349,

Holroyd, C. B., & Umemoto, A. (2016). The research domain criteria framework: The case for anterior cingulate cortex. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 71, 418-443.

.....

审稿人 2 意见：

工作记忆负荷对反馈加工过程的影响：来自脑电研究的证据 此研究结合工作记忆任务和简单赌博任务，在双任务中探究工作记忆负荷对反馈加工的影响。文章结果支持 FRN 与 theta 震荡功能分离的观点，认为 FRN 主要反映的是反馈效价信息的加工，而 theta 震荡则反映了 ACC 的认知控制功能。该研究实验设计新颖，研究视角也具有较高创新性，分析方法熟练充分。但仍存在较多问题，尤其是实验结果比较多也比较混乱，需要重点强调主要的结果。实验结果似乎也没有很清晰有力的证据支持作者的论点，即 FRN 与 theta 震荡功能分离。 以下是具体的意见：

前言：

意见 1：作者在文中多次提到 FRN 与 theta 震荡关系紧密相关，如第 5 页第二段“对 FRN 相关频域成分进行分离，结果发现 theta 震荡……认为 FRN 包含了对负反馈敏感的 theta 活动和对正反馈敏感的 delta 活动。”以及文中多次出现的“与 FRN 相关的 theta”语句，根据这些描述，FRN 与 theta 震荡应该是紧密相关的，但作者又主张二者功能是分离的，让读者非常困惑。既然作者认为 FRN 包含了对负反馈敏感的 theta 活动，那它们怎么又分离了呢？

回应：感谢审稿专家的问题。

(1) 专家所提及的语句的确是我们写作有误，容易引起误解。我们做了修改。

对于专家提到的语句：“对 FRN 相关频域成分进行分离，结果发现 theta 震荡……认为 FRN 包含了对负反馈敏感的 theta 活动和对正反馈敏感的 delta 活动。”，以及“与 FRN 相关的 theta”，这样的观点来自 Foti 等(2015)的研究。该研究认为 delta 和 theta 分别是对正反馈和负反馈敏感的震荡，两者独立贡献于 FRN，而 FRN 可能是两者的复合体(composite)。Foti 等(2015)的观点是本文引用的重要观点之一。除了 Foti 等(2015)的观点之外，我们还重点引用了等级强化学习-前扣带回理论 (hierarchical reinforcement learning theory of anterior cingulate cortex function, HRL – ACC theory; Holroyd & Yeung, 2011; Holroyd & Umemoto, 2016)以及Proudfit (2015)的观点。不同理论和研究对 FRN、RewP (reward positivity) 成分以及 delta 和 theta 震荡的观点截然不同，这也是本研究提出的研究问题之一。详见修改稿前言第五段。事实上，本研究倾向于支持 HRL – ACC 理论和 Proudfit (2015)的观点，而不赞同 Foti 等(2015)的观点。

在之前版本中有“与 FRN 相关的 theta”、“对 FRN 相关频域……”这样的语句，一种情况是我们本想表达“反馈加工相关的 theta”、“反馈加工相关频域”，然而写作有误。对于这种情况，我们在修改稿中做了修正。另一种情况是想引用 Foti 等(2015)的观点。对于这种情况，在修改稿中明确说明“Foti 等(2015)认为……”、“Foti 等(2015)研究发现……”。希望以上修改可以把我们自己的观点和引用别人的观点区分清楚。

(2) 用 RewP 替代 FRN。

专家提及“作者在文中多次提到 FRN 与 theta 震荡关系紧密相关”，“但作者又主张二者功能是分离的”。这两者放到一起的确让人困惑。事实上对 FRN 的研究已经非常充分，1997 年到 2008 年期间，认为 FRN 是负反馈加工（如损失）引起的；而 2008 年之后研究者逐渐转向认为 FRN 反映的是正反馈（如奖赏）加工，是奖赏敏感性指标，因而改名为 RewP (reward positivity; 见综述 Proudfit, 2015; Sambrook, & Goslin, 2015)。虽然由于惯性原因 FRN 还是被广泛使用的名字，但是 RewP 更接近这个成分的本质。而 theta 反映的是负反馈加工（Foti 等 2015 年研究的观点）或者认知控制（HRL – ACC 理论的观点）。因而 RewP 与 theta 不应该“紧密相关”。为了避免误会，也更接近目前的共识，在修改稿中改用 RewP 替代 FRN。

“但作者又主张二者功能是分离的”。本研究的确认为 RewP 与 theta 所反映的功能是不同的。在修改稿的讨论部分的第二至第五段对此做了分析。我们之前的稿件中提出“FRN 与 theta 震荡功能分离”的结论，是针对 Foti 等（2015）认为“FRN 可能是 theta 和 delta 的复合体”这个观点提出的。而目前版本认为本文更重要的意义是支持了 HRL – ACC 理论，

即认为：RewP 反映了反馈效价评估功能，theta 震荡反映了认知控制功能，并且 WM load 选择性影响了 ACC 的认知控制功能而不是反馈效价评估功能。因而修改稿中放弃了“FRN 与 theta 震荡功能分离”的说法，重点讨论了 HRL-ACC 理论。

感谢专家指出这个重要的问题，启发了我们的修改。

参考文献

- Foti, D., Weinberg, A., Bernat, E. M., & Proudfit, G. H. (2015). Anterior cingulate activity to monetary loss and basal ganglia activity to monetary gain uniquely contribute to the feedback negativity. *Clinical Neurophysiology*, *126*(7), 1338-1347.
- Holroyd, C.B., Yeung, N. (2011). An integrative theory of anterior cingulate cortex function: option selection in hierarchical reinforcement learning. In: Mars, R.B., Sallet, J., Rushworth, M.F.S., Yeung, N. (Eds.), *Neural Basis of Motivational and Cognitive Control*. MIT Press, Cambridge, MA, pp. 333-349.
- Holroyd, C. B., & Umemoto, A. (2016). The research domain criteria framework: The case for anterior cingulate cortex. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *71*, 418-443.
- Proudfit, G. H. (2015). The reward positivity: From basic research on reward to a biomarker for depression. *Psychophysiology*, *52*(4), 449-459.
- Sambrook, T. D., & Goslin, J. (2015). A neural reward prediction error revealed by a meta-analysis of ERPs using great grand averages. *Psychological bulletin*, *141*(1), 213.

意见 2：第 6 页第 1 段，这一段开始详细讲述了 HRL-ACC 理论，主要论述了中脑、ACC 与 FRN 的产生关系，而最后突然得出结论“FRN 是 RPE 信号的脑电指标，而 theta 震荡则是 ACC 发出控制信号时的脑电活动”。是怎么得出这样的结论的？描述比较混乱，让人困惑。

回应：感谢专家的问题。

“RewP (FRN) 是 RPE 信号的脑电指标，而 theta 震荡 (frontal midline theta, FMT) 则是 ACC 发出控制信号时的脑电活动”这个结论不是我们得出来的，是 HRL-ACC 理论的重要组成部分，详见参考文献 (Holroyd & Umemoto, 2016) 第 423 页，以及图 3 (下图)。

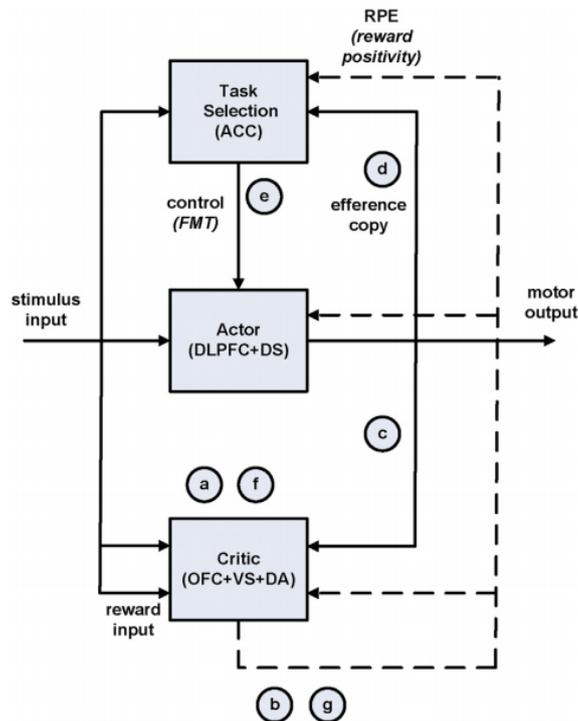


图3（此图是 Holroyd & Umemoto, 2016, 文中的 Fig. 2），ACC 在执行目标导向任务中的作用。其中 RPE（reward positivity）表示中脑多巴胺系统评估反馈效价，向 ACC 输送评估信号的通路；Control（FMT）代表 ACC 向行为执行脑区发送认知控制信号的通路。

原稿中我们描述的比较混乱，描述了很多“中脑、ACC 与 FRN 的产生关系”，其实与本研究关系不大，修改稿中我们删除了这些内容。而“FRN 是 RPE 信号的脑电指标，而 theta 震荡则是 ACC 发出控制信号时的脑电活动”是本文需要的内容，因而在修改中重点引用。具体请见前言的第四段后半部分。

意见 3: 第 6 页第 2 段关于 P3 和 LPP 成分的描述，放在这里感觉比较突兀，前后都不连贯。突然介绍了两种成分，与上下文都没有明显的逻辑关系。

回应: 感谢专家的提醒。

从反馈加工的时间进程上，FRN 之后是 P3 和 LPP，而且在众多的研究中，从时间进程完整的角度都研究了 FRN、P3 和 LPP 这三个成分（Glazer et al., 2018）。

原稿中本想介绍完了 FRN 以及时程上接近的震荡成分，然后介绍 P3 和 LPP，随后再提出研究问题。但是原稿写作中段落的关系不清楚，增加了阅读难度。

在修改稿中，我们首先介绍了 FRN 以及时程上接近的 theta 和 delta 震荡成分（前言第二、三段），分析了相关理论（前言第四段），随后有针对性的提出研究问题（前言第五段）。

在这之后，转向介绍 P3 与 LPP（前言第六段），并提出相应研究问题（前言第七段）。尤其是在第六段开头，用了承接的句子，如下：

除了 RewP 以及 theta 和 delta 震荡之外，P3 和 LPP (late positive potential) 也是反馈加工诱发的重要脑电成分。……

希望修改后段落之间的关系更清楚一些。

参考文献

Glazer, J. E., Kelley, N. J., Pornpattananangkul, N., Mittal, V. A., & Nusslock, R. (2018). Beyond the FRN: Broadening the time-course of EEG and ERP components implicated in reward processing. *International Journal of Psychophysiology*, 132, 184-202.

意见 4：第 7 页第 1 段中“Foti 等认为 theta 震荡与 FRN 紧密相关，两者都反映了对反馈效价的加工，而 HRL-ACC 理论认为 theta 震荡反映的不是反馈效价加工，而是 ACC 输出端的认知控制功能。”为何一个理论认为 theta 震荡反映了反馈效价，而另一个理论认为没有？根据作者自己的结果，也发现负反馈后 theta 震荡更强，这似乎也说明 theta 震荡对反馈效价敏感，那与作者一开始的假设不是有矛盾吗？另外还有一个建议，文献中是否真的这么肯定的指出“HRL-ACC 理论认为 theta 震荡反映的不是反馈效价加工，而是 ACC 输出端的认知控制功能”？作者在下一些结论或者提出观点时，语气委婉一点，这一要求也适用于整篇文章。

回应：多谢专家的问题。

(1) 依据 Foti (2015) 的研究，delta 和 theta 震荡分别反映正反馈加工和负反馈加工，而 FRN 是 delta 和 theta 震荡的复合体，对正反馈和负反馈都敏感。因而，依据 Foti (2015) 的观点，FRN 和 theta 都是反映对结果效价评估的指标。而 HRL-ACC 理论提出 theta 震荡是 ACC 发出的对背外侧前额叶实施认知控制的信号(Holroyd & Umemoto, 2016, page 423)。以上两个理论是本文引用的重要文献，两者在观点上存在分歧，这也是本研究的研究问题之一。

(2) 诚如专家指出的，“本研究也发现负反馈后 theta 震荡更强，这似乎也说明 theta 震荡对反馈效价敏感”，为何本研究的结论却是 theta 震荡是认知控制的信号？

在修改稿中，我们对此重点修改，在讨论的第四段至第六段分析了原因。内容如下：

本研究发现 *delta* 和 *theta* 震荡分别对正反馈和负反馈敏感，直观上看该结果支持 Foti 等 (2015) 的观点，*delta* 和 *theta* 震荡分别是个体加工正反馈和负反馈的脑电指标。并且本研究中只在 *theta* 结果中出现了 WM load 与效价的交互作用，WM load 越高，正、反馈诱发的 *theta* 活动差异量越小。这可以推测在对正、负反馈的评估过程中，随着 WM load 增加，负反馈的加工遭到损害，而对正反馈的加工不受影响。但是这种解释无法说明的一个事实，为什么本研究中 WM load 对 RewP 没有影响。RewP 是衡量个体加工反馈效价能力的有效指标 (Foti et al., 2011; Baker & Holroyd, 2011; Proudfit, 2015; Sambrook & Goslin, 2015)，如果 WM load 增加时负反馈的加工受到损害，RewP 对正、负反馈的区分能力会降低，在 RewP 的方差分析中会出现 WM load 与效价的交互作用。本研究没发现此交互作用，不支持 *theta* 震荡反映负反馈加工的观点。

目前文献中关于 RewP 的研究也不支持 Foti 等 (2015) 的观点。如前言第二段所述，反馈加工的 ERP 研究一个基本结论是 RewP 反映了奖赏加工，是奖赏敏感性指标 (Foti et al., 2011; Baker & Holroyd, 2011; Proudfit, 2015)，而并没有发现对负反馈敏感的 ERP 指标，似乎人脑没有加工负性结果。Oliveira 等人 (2007) 认为人们有乐观倾向，反应后倾向于预期获得正性结果。反馈呈现时，进行的是奖赏预期与反馈是否匹配的加工，而不是奖赏或损失的加工，因此研究中没有发现对负反馈敏感的 ERP 成分。人脑没有加工负反馈，这样的结论也佐证 *theta* 不应该是负反馈加工相关的成分。而 *Delta* 震荡对正反馈敏感，这一点目前观点比较一致。

如果 *Theta* 震荡不是对负反馈加工的信号，其反映心理功能是什么呢？这可以从 RewP (或者说是 FRN) 的预期违背相关理论中得到启发。早期，RewP 被认为是负向成分 FRN (Miltner et al., 1997; Gehring & Willoughby, 2002; Hajcak et al., 2006)，除了强化学习理论 (Holroyd & Coles, 2002)，还有预期违背相关理论对此成分做出解释。如反应-结果预期理论 (predicted response-outcome model, PRO; Alexander & Brown, 2010; 2011) 认为人们利用反馈逐渐习得反应与结果 (反馈) 的关系，反应之后会形成对结果的预期，当结果与预期违背时，就会诱发 FRN。预期违背假设 (expectation violation hypothesis; Oliveira et al., 2007) 观点与此类似。依据预期违背相关理论，负反馈诱发的认知活动不是负反馈加工本身，而是预期违背加工。该理论突出负反馈的意义，认为正反馈之后不需要控制，负反馈之后大脑会分配注意、实施控制改善行为 (Alexander & Brown, 2010; 2011)。虽然目前已经认为 FRN (RewP) 只对正反馈敏感，预期违背相关理论不能再以 FRN 作为验证的指标，但对负反馈敏感的 *theta* 震荡恰巧可以作为替代。也就是说 *theta* 震荡反映的是预期违背之后大脑

实施的注意分配、认知控制功能，这一方面可以解决预期违背相关理论的检验指标的问题，另一方面也支持 HRL-ACC 理论关于 θ 震荡的假设 (Holroyd & Umemoto, 2016)。

综上所述，虽然 θ 对负反馈敏感，但目前已有的研究和理论表明其反映的应该是预期违背和随后的认知控制功能。在之前稿件中似乎存在自相矛盾，可能是我们分析的不充分。希望这次修改有所改善。再次感谢专家的问题。

意见 5: 第 8 页第 2 段“对 FRN 相关的 θ 成分和 δ 成分进行分离”这句话中提到的对 FRN 相关的，是否需要改为对反馈相关的？既然作者想要证明 FRN 与 θ 成分的分离机制，文章中却多次提到“与 FRN 相关的 θ 成分”，难免让人困惑。

回应: 感谢审稿专家的建议。“与 FRN 相关的 θ 成分”这样的表达的确有误。我们已经修改为了“... .. Foti 等 (2015) 使用时频分析 (time-frequency analysis) 对反馈加工诱发脑电成分进行分离... ..”。我们对这个问题的回复与对前言部分问题 1 的回复中的第 1 条类似，专家也可以参考该回复部分。

方法:

意见 1: 工作记忆任务的负荷水平高低是通过方格中随机出现一个还是三个黑色小方块控制的，低负荷条件下是一个小方块，而高负荷条件下是三个小方块，这些小方块会随机出现在方格中的任意位置。问题在于：低负荷条件还好，因为只有一个，高负荷下有三个小方块，这三个小方块是如图中集中在方格的 3 个位置上，还是分散在各个方格中？集中分布时的记忆难度与分散分布的记忆难度一样吗？这个如何控制？即如何保证高记忆负荷条件下水平一致？

回应: 感谢审稿专家的问题。

我们借鉴了 Han 等人(2017)的研究，在高负荷条件下三个小方块集中一起，而不是完全随机分布。之前的稿件中漏掉了该信息，修改稿中在“2.2 实验设计与程序”第二段添加了该信息，内容如下：

..... 高 WM load 条件下三个小方块随机分布在方格中，但随机前提是三个小方块靠在一起。.....

因而只有集中分布而没有分散分布，通过这样的控制尽量保证条件内的记忆负荷一致。

意见 2：正负反馈的比例是多少？应该在文中说明。作者提到反馈都是伪随机的，而非告诉被试的存在某种规律，那么被试是否发现反馈其实是伪随机的？有没有在实验后询问被试？如果被试发现了其实是没有规律的，那是否会影响实验的有效性？

回应：感谢审稿专家的问题。

(1) 正负反馈的比例是 1:1。使用伪随机设计的目的是使正、负反馈的比率差异不显著，最终都接近 50%。原因是 RewP、P3 和 LPP 成分对概率敏感，伪随机设计的目的是排除概率干扰。已经在文中补充了该内容，具体请见“2.2 实验设计与程序”部分最后一段：

..... 由于反馈比率会影响反馈相关脑电成分，为保证正、负反馈概率差异不显著，也就是都接近 50%，参考前人研究 (Yeung & Sanfey, 2004; Hajcak et al., 2006; Langeslag & van Strien, 2013; Huang & Yu, 2018; Shahnazian et al., 2018) 实验采用伪随机设计。也就是说正反馈与负反馈均伪随机出现，与被试选择的卡片无关。但是为了保证被试的任务动机，实验中告知被试待选卡片间存在某种规律，并鼓励被试探索规律，尽可能使赌博任务中的收益最大化。实验结束后告知被试实验任务是伪随机设计以及实验目的。

(2) 在指导语中告知被试存在某种规律，并鼓励探索规律，目的是保证被试的任务动机。这也是借鉴前人的研究 (Huang et al., 2018, Langeslag et al., 2013, Shahnazian et al., 2018, Yeung et al., 2004)。实验中没有被试发现反馈其实是伪随机的。我们在实验后对被试询问，没有被试明确发现任务没有规律。

参考文献

- Hajcak, G., Moser, J. S., Holroyd, C. B., & Simons, R. F. (2006). The feedback-related negativity reflects the binary evaluation of good versus bad outcomes. *Biological psychology*, 71(2), 148-154.
- Huang, C., & Yu, R. (2018). Making mistakes in public: Being observed magnifies physiological responses to errors. *Neuropsychologia*, 119, 214-222.
- Langeslag, S. J. E., & van Strien, J. W. (2013). Up-regulation of emotional responses to reward-predicting stimuli: An ERP study. *Biological Psychology*, 94(1), 228-233.
- Shahnazian, D., Shulver, K., & Holroyd, C. B. (2018). Electrophysiological responses of medial prefrontal cortex to feedback at different levels of hierarchy. *NeuroImage*, 183, 121-131.
- Yeung, N., & Sanfey, A. G. (2004). Independent coding of reward magnitude and valence in the human brain. *Journal of Neuroscience*, 24(28), 6258-6264.

意见 3:时频分析时开始取的时间段为“反馈呈现前 1000 ms 和反馈呈现后 1500 ms 时间段”, 这里有一个问题。因为根据实验流程, 在反馈前是 600-1000 的随机时间的空屏, 那么当空屏时间为 600ms 时, 取的反馈前 1000ms 就会包含更前一屏的 400ms, 更前一屏为按键反应, 这样的话就会掺杂混乱的心理与行为过程进来。作者后面也提到以反馈刺激前-500 ms 至-300 ms 时间段 EEG 作为基线进行校正, 以及重新截取反馈刺激 200 ms 和反馈刺激 800 ms 时间段为分析窗口, 虽然之后的分析里避免了这个问题, 但一开始的分段还是不妥。

回应: 感谢审稿专家的问题。

的确如专家所言, 截取反馈刺激之前 1000 ms 至反馈后 1500 ms 进行的时间窗口, 在有些情况下会把被试的反应包括进来。对于这个问题我们重新查阅了资料, 发现从技术上说是允许的。

第一步数据处理的滤波过程会形成边缘效应 (edge effects; Bernat et al., 2005), 边缘效应本身是一个噪音。延长时间窗口的目的是留出足够时窗, 保证去掉边缘效应之后依然有足够的基线时间 (Bernat et al., 2005)。如果边缘效应所在时间点与之前行为反应在时间上重叠, 理论上两者都是噪音, 处理方式都是去除这一段时间, 只要保证最终基线是无噪音的, 就是可以的。

我们参考了 Bernat et al., (2008; 2011)的研究, 该研究初次分段的时窗是反馈刺激之前 1000 ms 到反馈刺激之后 2000 ms。而在他们的研究中, 反应选择与反馈之间的间隔只有 100 ms, 反应必然包含在这个分段时窗之中。情况与我们的类似。

在前期数据处理过程中, 我们也尝试了较短的初次分段时间, 例如反馈之前截取 600 ms, 最终结果与目前的结果一致。最终我们参考了文献 (Bernat et al., 2008; 2011) 的做法, 目的是让边缘效应尽量远离信号时窗。

参考文献

- Bernat, E. M., Williams, W. J., & Gehring, W. J. (2005) Decomposing ERP time–frequency energy using PCA. *Clin Neurophysiol*; 116:1314–34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clinph.2005.01.019>
- Bernat, E. M., Nelson, L. D., Holroyd, C. B., Gehring W. J., & Patrick, C. J. (2008). Separating cognitive processes with principal components analysis of EEG time–frequency distributions. *Proc SPIE*; 7074:1–10.
- Bernat, E. M., Nelson, L. D., Steele, V. R., Gehring, W. J., & Patrick CJ. (2011) Externalizing psychopathology and gain–loss feedback in a simulated gambling task: dissociable components of brain response revealed by time–frequency analysis. *J Abnorm Psychol*; 120:352–64. <http://dx.doi.org/10.1037/a0022124>.

意见 4: 第 11 页第 3 段“为了检验 θ 震荡与 FRN 的关系, 参考 FRN 差异波的分析方法, 负反馈后的 θ 成分减去正反馈后的 θ 成分。”这句话中“为了检验 θ 震荡与 FRN 的关系”非常令人困惑, 通过正负反馈后的 θ 成分差异波就能做到对二者关系进行检验? 这种说法太奇怪了。

回应: 感谢审稿专家的问题, 此处的确不对。

首先, 同样使用差异波分析, 不能检验两个成分的关系, 只能是用同样的方法对比两个指标的结果。

其次, 在反馈加工相关电生理机制的研究中, 进行正、负反馈之间差异波分析的是检验其它因素与效价的交互作用, 考查其它因素如何调节效价评估的好办法 (Holroyd & Krigolson, 2007)。例如本研究中差异波分析可以进一步检验 WM load 水平与效价的交互作用, 也就是简单效应分析。

在本研究中, RewP (FRN) 分析中没有 WM load 水平与效价的交互作用, 因此没必要进一步做差异波分析。而 θ 震荡有 WM load 水平与效价的交互作用, 有必要做进一步的差异波分析。在修改稿中, 我们去除了 RewP (FRN) 的差异波分析, 重点报告了 θ 震荡的差异波分析。在“2.4 数据统计与分析”部分已做出说明, 正文如下:

对 θ 、 δ 成分进 3 (WM load 条件: 基线、低、高) \times 2 (反馈效价: 奖赏、无奖赏) 两因素重复测量方差分析。另外, 由于 θ 的方差分析结果发现 WM load 条件和反馈效价存在交互作用, 为了进一步分析不同 WM load 条件下的效价效应, 将负反馈后的 θ 活动减去正反馈后的 θ 活动得到 θ 在正、负反馈间的差值, 对该差值进行单因素 (WM load 条件: 基线、低、高) 重复测量方差分析。

参考文献

Holroyd, C. B., & Krigolson, O. E. . (2007). Reward prediction error signals associated with a modified time estimation task. *Psychophysiology*, 44(6), 913-917. 10.1111/j.1469-8986.2007.00561.x

结果:

意见 1: 文章中各成分、各频段的分析都选取了多个电极点, 但结果图都只是某一个电极点的, 为何这样处理也没有在文中进行任何说明。建议作者说明一下, 或者将其他点的结果图放到补充材料中。

回应：感谢审稿专家的建议。我们修正了这个做法，修改稿中把所有参与数据处理的电极点都放到了图中，请参见正文的图 2 至图 6。

意见 2：FRN 原始波的电极点主效应显著，这一结果如何解释呢？分析电极点的效应的意义是什么？讨论中也没有进行解释，包括其他成分和时频分析也是，分析了电极点，却似乎没有任何意义？

回应：感谢专家的问题。本研究的确没有关注电极变量，电极点的效应对本研究的研究问题也没什么意义。因此修改稿中删除了电极点自变量，将各电极点的取值求平均值，然后对平均值做 3（WM load 条件：基线、低、高） \times 2（反馈效价：奖赏、无奖赏）两因素重复测量方差分析。

所得到的结果几乎和之前三因素方差分析的结果一致，只有一处不同：合并之前 LPP 的 WM load \times 效价交互作用显著， $F(1, 22) = 3.36$ ， $p = 0.045$ ， $\eta_p^2 = 0.13$ ；而合并电极点之后，LPP 的 WM load \times 效价交互作用边缘显著， $F(1, 22) = 2.58$ ， $p = 0.088$ ， $\eta_p^2 = 0.11$ ，由于效应量达到中等，我们进一步做简单效应检验，得到结果与合并之前一致。

正文中已经改为新的方差分析结果，具体请见文中的“3.2 ERP 结果”和“3.3 时频分析结果”两部分。

意见 3：第 12 页第一段末尾“FRN ($ps < 0.001$)。”这里的 ps 是什么意思？应该说明一下。

回应：感谢专家的问题。原文中， $ps < 0.001$ 指的是简单效应分析发现 Fz、FCz 和 Cz 点的 p 值都小于 0.001，这里 ps 是三个 p 值的意思。

意见 4：第 12 页第二段只说到 Fz 点差异波显著小于 FCz 点和 Cz 点，那 FCz 点和 Cz 点之间是否有差异呢？应该把结果报告全。

回应：感谢专家的建议。原文中 FCz 点和 Cz 点之间的差异是不显著的，我们只报告了显著的结果。修改稿中电极点变量不再分析，这部分结果也去除了。

意见 5：P3 和 LPP 成分的地形图为何没有画呢？应该也要画出来。

回应：感谢专家的建议。我们已经把 P3 和 LPP 的地形图都补充上了，请见正文的图 3（P3）和图 4（LPP）。

意见 6: 时频结果发现 Theta 的工作记忆负荷主效应显著，但进一步比较发现基线、低工作记忆负荷、高工作记忆负荷三种条件间的两两差异均不显著。这一结果如何理解呢？

回应: 感谢专家的问题。诚如专家所言，主效应显著，事后比较中应该至少有一个两两比较结果显著。刘红云的《高级心理统计》这本书的第二章 p49 第一段也指出“.....当自变量有三个或三个以上水平时，主效应显著则不能保证各组之间差异显著，而是指至少有两个组间差异是显著的。”。

本研究中 Theta 震荡结果显示 WM load 主效应显著， $F(1, 22) = 3.45$ ， $p = 0.040$ ， $\eta_p^2 = 0.14$ 。用 Bonferroni 方法做事后比较发现 theta 活动在高 WM load 条件 ($38.53 \pm 6.73 \mu V^2$) 和基线条件 ($47.86 \pm 7.57 \mu V^2$) 差异边缘显著， $p = 0.084$ 。所以原稿中没有报告这个结果。由于 Bonferroni 方法比较严格，我们又采用 LSD 方法做事后比较，发现 theta 活动在高 WM load 条件比基线条件更小， $p = 0.028$ 。在修改稿中，我们补充了以上结果。请见“3.3 时频分析结果”第一段。

意见 7: 对正、负反馈间 theta 差值的分析结果发现基线条件下 theta 差值与低工作记忆负荷条件下 theta 差值或高工作记忆负荷条件下 theta 差值间差异均不显著，说明高低工作记忆负荷与基线没有差异，对 theta 差值没有影响，这如何理解呢？虽然低工作记忆负荷下 theta 差值大于高工作记忆负荷下的 theta 差值，但它们与基线相比都没有差异，这一点比较令人困惑，似乎是没有影响的？那么与作者的结论又似乎不相符？

回应: 多谢专家的问题。诚如专家所言，theta 差异波单因素方差分析发现，WM load 主效应显著， $F(1, 22) = 4.33$ ， $p = 0.019$ ， $\eta_p^2 = 0.16$ 。三个条件的 theta 差值分别为：基线条件 ($40.37 \pm 10.04 \mu V^2$)、低工作记忆负荷条件 ($43.09 \pm 8.74 \mu V^2$)、高工作记忆负荷条件 ($29.48 \pm 9.19 \mu V^2$)。只有高、低负荷条件之间差异显著， $p = 0.032$ 。基线和高负荷之间虽然有差别，但是不显著。基线和低负荷之间差别很小。

经过思考，我们认为是基线条件设置不理想。本研究中基线条件是没有工作记忆任务的简单赌博任务。我们借鉴了 White 等人 (2017) 的理由，为了减少对基线条件的污染把基线条件单独拿出来。也就是说高、低 WM load 条件 blocks 随机呈现，而基线条件单独呈现。可能正是这样的设置导致高、低负荷条件之间的实验效应明显，而基线条件与高、低 WM load 条件差异都不显著。我们已经在文章最后一段，用研究局限说明了这个问题。在未来研究中要更好的设计 WM load 条件中的基线条件，避免这个问题。内容如下：

.....另外，本研究中基线条件的设置有不足之处。借鉴了 White 等人 (2017) 的研究，

为了减少污染把基线条件单独拿出来，也就是说高、低 WM load 条件 blocks 随机呈现，而基线条件单独呈现。可能正是这样的设置导致基线条件与高、低 WM load 条件差异不稳定。在未来研究中要更好的设计 WM load 条件中的基线条件。.....

意见 8: Delta 频段的结果图也应该要画出来，或者如果觉得不重要，也应该放到补充材料中。

回应: 感谢专家的建议，我们已经补充了 delta 频段的结果图。详见修改稿的图 6。如下图:

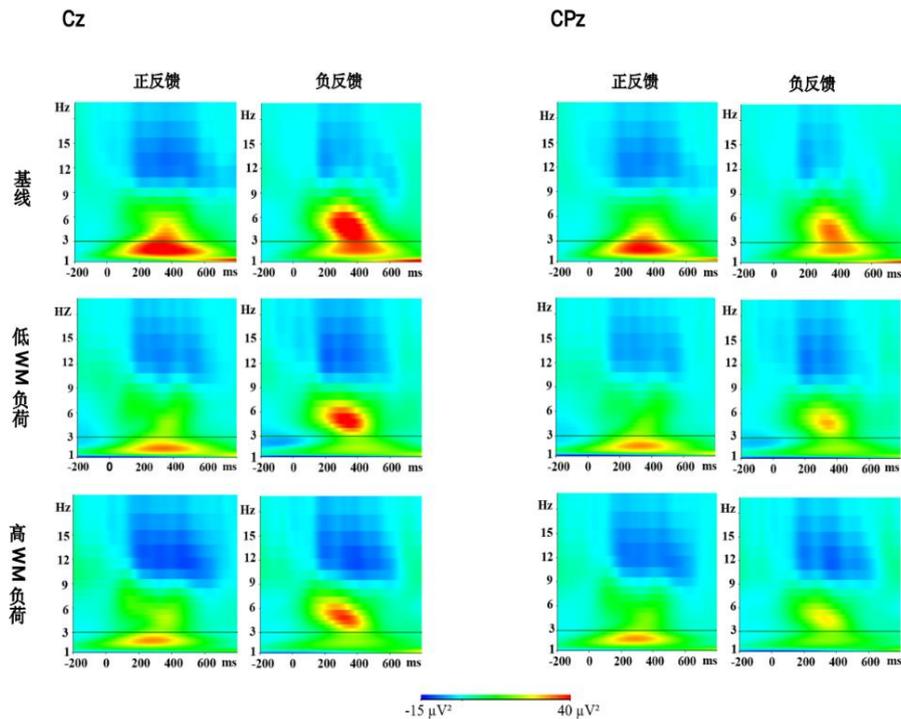


图 4 (正文中图 6) Cz 与 CPz 点上各条件下 delta 活动时频分析图

讨论:

意见 1: FRN 原始波受工作记忆负荷的影响，而 FRN 差异波却没有发现工作记忆负荷的效应，作者在讨论中解释为可能是某种代偿机制，最后结论认为 FRN 不受工作记忆负荷影响，只反映的是反馈效价的加工，整个逻辑还是比较混乱。因为 FRN 差异波没有观察到工作记忆负荷的效应，就认为是反映的反馈效价，却不顾其对 FRN 原始波的影响？这很容易让读者感觉混乱，结果不够清晰，还需要进一步梳理逻辑。

回应: 感谢专家的问题。

对于 FRN 的分析，有两个自变量，效价和工作记忆负荷水平。对应有三个结果，效价主效应、工作记忆负荷水平主效应、两者的交互作用。

效价主效应表示人脑对正、负结果的区分。在反馈加工与学习过程中，人们首先需要区分的就是结果正或负，在此基础上针对正或负结果做出不同的知觉、情感、行为反应。而工作记忆负荷水平主效应表示负荷高低不同，投入的认知资源不同，引起 FRN 总体波幅不同，也就是 FRN 原始波不同。对这两个主效应而言，显然效价的主效应更有意义。

效价和工作记忆负荷水平的交互作用，本来表示两者的互相影响，但实际上人们更关注工作记忆负荷对效价的影响。也就是说更关注工作记忆负荷如何调节人脑对正、负反馈的分辨，然后影响随后的反应，而不是反过来关注效价对工作记忆负荷加工的影响。正是由于这个原因，在反馈加工的电生理研究中经常进行正、负反馈差异波分析，直接考查其它因素对正、负反馈差异波的影响。Holroyd 和 Krigolson (2007) 提出正、负反馈差异波分析是考查某个因素与效价交互作用的简单有效方法。

因此，相比而言，效价的主效应是最基础的效应，效价和工作记忆负荷的交互作用最有意义，而工作记忆负荷的主效应最不重要。

在原稿中 FRN 的正、负反馈差异波不受工作记忆负荷影响（交互作用不显著），合理的解释是工作记忆负荷对 FRN 编码效价的能力没有影响，而不能说工作记忆负荷不影响反馈加工，因为结果显示 FRN 原始波受工作记忆负荷的影响（FRN 原始波工作记忆负荷主效应显著）。而 FRN 原始波受工作记忆负荷影响的结果可以解释为某种代偿机制：高工作记忆负荷条件下，为了评估反馈效价，投入更多资源，因而 FRN 原始波变大。但负荷高低不影响正、负反馈的差异波，也就是不影响对正、负反馈的分辨能力。对于以上内容，我们之前的表达不够清楚。

需要说明的是，修改稿中用 RewP (reward positivity) 代替了 FRN，因为 RewP 更能反映这个成分的心理功能，也就是对奖赏结果的加工（见综述 Proudfit, 2015; Sambrook & Goslin, 2015）。详细原因可以参考对“前言部分问题 1 的回复中的第 2 条”。基于 RewP 是一个正向成分，并且波峰不清晰，在对 RewP 的量化中采用了平均波幅的方法。统计结果依然发现了 RewP 的效价主效应，没有工作记忆负荷与效价的交互作用，但工作记忆负荷的主效应改变为不显著。平均波幅的结果可能比峰值的结果更稳定（Luck, 2014, page 285-291），因而我们采用了新的分析结果。详见修改稿中“3.2 ERP 结果第一段”。由于 RewP 的工作记忆负荷主效应变为不显著，讨论中不再分析这个主效应，主要讨论了 RewP 的效价主效应，请见讨论第三段。

estimation task. *Psychophysiology*, 44(6), 913-917.

Luck, S. J. (2014). *An Introduction to the Event-Related Potential Technique*. The MIT Press, 2014

意见 2: 同样地，文章中对 theta 成分的分析，发现 theta 震荡表现出了明显的效价效应，负反馈后 theta 活动功率增加；同时，工作记忆负荷变化选择性影响了反馈后 theta 震荡，较之低工作记忆负荷条件，高工作记忆负荷条件下正负反馈间 theta 震荡的差异减小。作者最后结论则认为 theta 活动与 FRN 分离了，theta 活动反映的是认知控制功能，而非反馈效价。由此得出结论：FRN 和 theta 功能分离。但根据结果，theta 活动也有明显的效价效应，那么 FRN 和 theta 是如何分离的呢？这一结论似乎并不可靠，至少根据目前的结果来看，结论不是那么清晰。整个讨论也没有很清晰的梳理这些结果。建议作者进行更清晰的分析与讨论。

回应: 感谢审稿专家的问题。

对于 theta 震荡的分析，一个是发现了效价效应，负反馈诱发更大的 theta 活动；另一个是发现了工作记忆负荷对 theta 震荡正、负差异波的调节。我们选择性的重视后者。需要解释的是，一方面为什么否认 theta 震荡是负反馈加工的指标，另一方面为什么支持 theta 是认知控制的指标。

首先，否认 theta 震荡是负反馈加工的指标的原因，在修改稿中“讨论部分”用第四段和第五段做了分析。第四段分析了本研究中 RewP 的方差分析中未发现 WM load 与效价的交互作用，不支持 theta 震荡反映负反馈加工的观点。第五段分析目前反馈加工的 ERP 研究的基本结论不支持 theta 震荡反映负反馈加工的观点。然后，对于支持 theta 是预期违背、认知控制的指标的原因，在“讨论部分”用第六段做了分析。以上内容在对“前言的问题 4 的回复”中也有介绍。

具体内容可以见修改稿“讨论部分”第四段至第六段。也可以参考对“前言的问题 4 的回复”部分。对这个问题的修改是本次修改中做的最大的改动。希望有利于这个问题的改善。最后多谢专家的有建设意义的问题，启发了我们的修改。

第二轮

审稿人 1 意见: 作者已经回复了我的疑问。没有进一步的问题和意见。

回应: 感谢审稿专家。

审稿人 2 意见：感谢作者对我意见的采纳！经过此次修改，理论背景较之前逻辑性更强了，数据分析和结果也更清晰明了，修改和增加的讨论也更为充分，之前令人困惑和混乱的论述都已经解释清楚。我目前没有更多的问题了，并认为该研究结果有力地支持了作者的观点，修改后的版本有理有据，论点清晰，是一项很有理论和应用价值的研究。

回应：感谢审稿专家的认可。

编委专家意见：同意发表。

主编意见：该论文结合脑电技术探讨了工作记忆负荷对反馈加工过程的影响。该问题具有一定的理论价值，为等级强化学习 - 前扣带回理论提供了进一步的证据支持。文章经过修改有了明显的改进，我同意该版本达到了发表标准，建议发表。