

# 《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：右侧背外侧前额叶在视觉工作记忆中的因果性作用

作者：王思思 库逸轩

## 第一轮

### 审稿人 1 意见：

该论文结合经颅直流电刺激和脑电记录，考察了对右侧背外侧前额叶皮层进行电刺激激活后，视觉工作记忆容量的变化，并分析了这一变化与注意及工作记忆相关脑电成分的关系。这是一个很新颖的研究，对通过电刺激对工作记忆领域的一些基础问题进行了因果性的考证，具有重要的研究意义。文章作者在实验设计及操作上都比较规范，结果很清楚。我的意见主要集中在被试分组上，希望作者可以在这方面有更完整的说明。意见如下：

**意见 1：**该论文对被试的分组方法比较特别，是根据被试在控制条件下负荷 6 和负荷 4 任务中工作记忆容量的差值 (K6-K4) 中位数作为分组标准。为何不用更常见的平均 K 值中位数作为分组标准？建议作者将平均 K 值中位数作为分组标准做一次分析，不管结果如何，都会提供一些新的信息。当然，这里作者提出了记忆容量增长潜力的概念，不过这个概念在前言中并没有提及，可能是事后分析引出的，建议作者对这个概念做一定的讨论，尤其是已有文献中是否将其作为一个重要的个体差异指标。

**回应：**非常感谢您的建议。

根据您的建议，我们用平均 K 值的中位数对 38 名有效被试进行分组，分别对高工作记忆容量组和低工作记忆容量组的 K 值和  $d'$  进行 2 (刺激类型：虚假刺激，正性电刺激右侧 DLPFC)  $\times$  2 (记忆负荷：负荷 4，负荷 6)  $\times$  2 (组别：高容量组，低容量组) 重复测量方差分析结果发现：对于记忆容量 K，记忆负荷的主效应显著 ( $F(2, 38) = 21.60, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.38$ )，记忆负荷和组别的交互作用显著 ( $F(2, 38) = 6.45, p = 0.02, \eta_p^2 = 0.15$ )。刺激类型的主效应，刺激类型和组别二者的交互作用，记忆负荷、刺激类型和组别三者的交互作用均不显著 ( $ps > 0.1$ )。对于辨别力指标  $d'$ ：记忆负荷的主效应显著 ( $F(2, 38) = 194.53, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.84$ )。记忆负荷、刺激类型和组别三者的交互作用边缘显著 ( $F(2, 38) = 3.28, p = 0.078, \eta_p^2 = 0.084$ )，其它效应均不显著。更进一步分别对两组  $d'$  进行 2 (刺激类型：虚假刺激，正性电刺激右侧 DLPFC)  $\times$  2 (记忆负荷：负荷 4，负荷 6) 的重复测量方差分析，发现电刺激对低容量组的  $d'$  没有显著影响。高容量组  $d'$  的记忆负荷和刺激类型交互作用显著 ( $F(1, 19) = 5.33, p = 0.033, \eta_p^2 = 0.23$ )，事后检验发现正性电刺激右侧 DLPFC 显著提升了高容量组被试在负荷 4 时的  $d'$ ， $t(19) = 2.33, p < 0.05, \text{Cohen's } d = 0.44$ 。这些结果表明，个体本身工作记忆容量大小确实也会影响他们接受电刺激之后的获益程度，虽然使用这种分组方法发现了不同刺激类型对  $d'$  的影响，但是并没有对记忆容量 K 产生影响。

前人研究中 Tseng 等人 (2012) 根据被试的工作记忆容量将被试分为高低表现组，所有被试的 K 值变化范围是 1.2-5.6，而在本研究中被试的平均 K 值的变化范围较小 (1.5-3.9 个项目)，这可能导致高低容量组的划分并不能完全区分两组的特征。我们发现不同的被试从负荷 4 到负荷 6 的行为表现变化存在较大差异，负荷 6 的 K 值减去负荷 4 的 K 值差值范围是 -1.25 到 2.03，表明被试的工作记忆容量从中等难度任务 (负荷 4) 到较高难度任务 (负荷 6) 的增长潜力存在较大差异，并且这种潜力差异和被试的平均 K 值存在显著正相关  $r =$

0.65,  $p < 0.001$ , 这种潜力的差异很有可能造成电刺激感受性的差异, 从而影响电刺激的效果, 因此本研究中, 我们采用了增长潜力大小分组的方法, 并且发现了不同组别受 tDCS 的影响存在差异。我们也按照您的建议将这一点在文章的方法部分加以说明。

**意见 2:** 讨论中提出“正性电刺激右侧 DLPFC 显著提升了高潜力组被试工作记忆提取和比较过程中的信息保持成分-SPCN, 而对这一过程的早期注意成分 N2pc 没有影响。这一结果从神经生理学角度证明右侧 DLPFC 可能更多的在视觉工作记忆的晚期提取和比较的过程中的信息维持发挥作用。”这个关于 DLPFC 在注意加工不同阶段作用的结论有些牵强, N2pc 是阴性结果, 不足以作为没有影响的支持证据, 毕竟 DLPFC 在注意网络中的作用比较复杂, 难以用一个实验来说清楚。

**回应:** 谢谢您的意见。如您所述, DLPFC 在注意网络中的作用比较复杂, 本研究发现电刺激 DLPFC 对 N2pc 波幅的影响是阴性结果, 并不足以证明 DLPFC 对视觉工作记忆提取阶段的早期注意没有影响。为了表述精确, 将讨论中的相关内容改为“从神经生理学角度证明在视觉工作记忆的提取阶段, 相比于早期注意, 右侧 DLPFC 可能在晚期比较过程的信息维持中发挥更显著的作用。”

**意见 3:** 图中的 errorbar 是标准差还是标准误?

**回应:** 图中的 errorbar 是均值的标准误。谢谢您的提示, 已加入图注解。

**意见 4:** 摘要中一个错误: 高记忆增长潜力组 (低潜力组)。

**回应:** 谢谢您的指正, 已在文中进行修改。

.....  
**审稿人 2 意见:**

视觉工作记忆是当前研究的热点问题之一, 具有重要的研究意义。总体说来, 该研究总体上设计严谨, 数据分析合理, 结论基本可靠。文章有如下问题需要进一步澄清:

**意见 1:** 文献综述并没有全面介绍已有的 tDCS 研究, 包括 Li et al., 2017, Neuroimage, Hsu et al., 2014, 等。也没有深入分析相对于已有研究, 以及本研究所要考察的核心问题。

**回应:** 非常感谢您的提醒指正, 我们加入了 Li 等人 2017 年最新的研究结果。由于本研究主要关注 tDCS 对前额叶的影响, 因此前言综述中的研究都是围绕 tDCS 对左侧或右侧 DLPFC 展开的, Hsu et al., 2014 的研究探究的是电刺激后顶叶对工作记忆的影响, 因此未在前言中加以讨论。按照您的建议, 我们在文中对已有研究进行了更加深入地分析, 并明确了本研究要考察的核心问题。详见文章的引言部分。

**意见 2:** 文章使用了 Sham 作为控制条件, 但更好的控制是采用一个对照脑区 (比如枕叶) 组, 施加和 DLFFC 同样的 tDCS 刺激。

**回应:** 在本研究中, 我们选用了一些前人研究(Wu, et al., 2014)相似的设置, 只采用了 Sham 作为控制条件。如您所述, 更好的控制确实是除 DLPFC 和 Sham 之外, 再增加一个对照脑区组, 施加与 DLPFC 同样的刺激。但是我们目前两种刺激条件采用的是被试内设计, 召回所有被试增加对照脑区刺激比较困难, 可以考虑在未来研究中加入。而且在本研究中, 通过比较电刺激右侧 DLPFC 和 Sham 两种情况下的行为表现和电生理活动, 我们确实也发现了右侧 DLPFC 在视觉空间工作记忆中作用的进一步证据。

**意见 3:** 高低工作记忆潜力的划分不是特别清楚,为什么 K4 到 K6 增加越多,潜力就越大。潜力和工作记忆容量什么关系? 以前研究发现工作记忆容量低的可能 tDCS 的效果更好,本研究的结果和以前的结果有何异同,如何解释?

**回应:** 关于高低工作记忆潜力的划分: 本研究设置了负荷 4 和负荷 6 两种任务,由于人类视觉工作记忆容量大约为 3-5 个,对有些被试来说,负荷 4 任务已经接近他们的记忆限制,负荷 6 任务则超出了他们的能力范围,过多的记忆项目反而会干扰他们的记忆,因此从负荷 4 到负荷 6,记忆容量不会提升甚至会降低。而对另一些个体来说,负荷 4 还没有到达他们的记忆限制,到负荷 6 时其记忆的项目数量会继续增加。虽然前人研究中关于这种记忆增长潜力的分组方式的描述较少,但本研究中这种从负荷 4 到负荷 6 记忆容量提升的潜力大小与被试本身的平均记忆容量  $K$  (虚假刺激情况下负荷 4 和负荷 6  $K$  值的均值) 也有相关,  $r = 0.65$ ,  $p < 0.001$ 。被试接受 tDCS 之后的增益量很有可能受到这种潜力的调节,因此我们根据被试在负荷 4 到负荷 6 任务情况下记忆容量的增加量大小 ( $K6-K4$ ) 的中位数将所有被试分为两组: 增加量大的高记忆增长潜力组 (以下简称高潜力组) 和增加量小甚至为负的低记忆增长潜力组 (以下简称低潜力组) 以探究工作记忆增长潜力对 tDCS 刺激右侧 DLPFC 作用的影响。

同前人研究结果相一致,本研究发现正性经颅直流电刺激的刺激效果与个体本身的特质存在交互作用。Tseng 等人 (2012) 的研究使用正性经颅直流电刺激右侧后顶叶皮层 (PPC) 发现本身工作记忆容量较低的个体相对于工作记忆容量较高的个体更易获得电刺激的提升作用。Berryhill 等人 (2012) 分别电刺激左侧和右侧 DLPFC 发现受教育程度较高的老年人相比于受教育程度较低的老年人更易获得电刺激提升效果。Meiron 等人 (2013) 的研究结果表明女性更容易从电刺激右侧 DLPFC 中受益,而男性更易从电刺激左侧 DLPFC 中受益。因此,从电刺激中受益的程度与很多因素有关。虽然 Tseng 等人的研究发现工作记忆容量较低的个体更易从电刺激中获益,但是我们的研究却发现工作记忆容量增长潜力较高的个体从 tDCS 中获得了更多提升。其原因可能在于,尽管我们采用了相似的任务 (Vogel & Machizawa, 2004),但是我们电刺激的脑区并不相同, Tseng 等人刺激的是右侧 PPC (Posterior Parietal Cortex), 该脑区更多的在工作记忆的信息维持阶段发挥作用,主要负责视觉空间注意和记忆维持。而本研究刺激的脑区是右侧 DLPFC, 则更多的发挥执行控制的作用,主要负责目标维持和干扰抑制。这两个脑区兴奋性的变化可能对视觉工作记忆的表现造成不同的影响。而且最新的研究发现电刺激的效果并不受到个体的工作记忆容量大小的影响 (Li, et al., 2017), 这提示电刺激的效果并不受单一因素的影响。一项关于 tDCS 对运动和认知表现调控的元分析研究表明, tDCS 对行为表现的影响效果确实很难预测 (Jacobson, Koslowsky, & Lavidor, 2012)。同 Berryhill 等人 (2012) 的研究结果发现受教育程度高的群体电刺激获益大相类似, 本研究发现 tDCS 刺激右侧 DLPFC 提升了高潜力组的表现。

在修改稿中, 我们加入了这些更深入的讨论。

**意见 4:** ERP 结果部分, 关于 SPCN 成分, 本研究和前人研究在提取阶段的结果不一致: 没有发现记忆负载的主效应, 即使分高潜力组和低潜力组也没有。如果作者同意前人的观点: SPCN 成分和信息保持相关, 记忆负载越高, 波幅越负, 那么作者需要对当前不一致的结果进行进一步解释。

**回应:** 感谢您指出的问题。前人研究表明, SPCN (有的论文也称 Contralateral delay activity, CDA) 的波幅在延迟过程中的信息维持阶段会随着记忆负荷的增加而提升 (Robitaille et al., 2010; Vogel & Machizawa, 2004), 但一般是在工作记忆容量之下的情形, 当记忆数量超过容量限制后, 波幅维持不变。上述研究中, 在负荷 4 和负荷 6 两种情形中, SPCN 的波幅也没有显著差异 (Robitaille et al., 2010; Vogel & Machizawa, 2004), 这点和我们的研究结果相同 (见

修改稿新加入的图 4)。有趣的是, 尽管在延迟过程中无论是高潜力组还是低潜力组均未表现出 SPCN 的负荷效应、刺激效应或两者交互, 但在记忆的提取过程中, 高潜力组被试在负荷 4 的 SPCN 受到前额电刺激时会有显著提升, 说明右侧 DLPFC 在记忆提取过程中的信息维持具有重要作用。我们在修改稿中也加入了这一解释。

**意见 5:** 文章未报告刺激呈现的视角大小。

**回应:** 感谢您的提醒, 已在文中进行说明。

**意见 6:** 该研究采用前人实验范式(如 Vogel & Machizawa, 2004), 建议明确说明。

**回应:** 感谢您的提醒, 已在文中进行说明。

**意见 7:** “所有箭头指左或指右的试次分别将其同侧和对侧 (分别指记忆目标一侧和非目标一侧) 的电极叠加平均”, 建议表述更简洁些。是“不区分箭头朝向, 将所有与记忆目标同侧和目标对侧的电极分别叠加平均”之意?

**回应:** 非常感谢您的指正, 这句话的意思应该是“不区分箭头朝向, 将所有记忆目标对侧和目标同侧的电极波幅的差值叠加平均”, 是作者的表述疏漏, 已在文中进行修改。

**意见 8:** EEG 信号截取了探测序列出现前 100 ms 到出现后 600 ms, 被试的按键反应是否已经在 600 ms 之前发生? 如有的试次已经发生按键, 作者对该试次的处理是?

**回应:** 被试的按键反应可能在探测序列出现之后的 600ms 内发生, 在 600ms 内发生按键的试次占有所有正确试次的 40%, 由于我们在分析 ERP 时主要采用对侧电极波幅减同侧电极波幅的算法, 可以借此把按键产生的运动电位减掉, 因此, ERP 数据处理过程中把所有正确试次的-100ms 到 600ms 时间段的数据都加入了事件相关电位的分析, 没有对按键反应的试次进行去除。

**意见 9:** ERP 结果部分, 图 4 中 180ms – 200 ms 时间窗内的正波看起来很强 (特别是低潜力组的虚假负荷 6 条件下), 请予以介绍和解释。

**回应:** 感谢您的问题。虽然看起来较强, 我们对所有被试、高潜力组被试和低潜力组被试在 180-200ms 之间的正波波幅进行了 2 刺激类型 $\times$ 2 记忆负荷的重复测量方差分析表明, 三组被试的所有效应均不显著 ( $ps > 0.1$ )。这一成分并不是本研究所要关注的主要成分, 相关文献对这一成分的讨论也较少。

**意见 10:** 该研究的一大亮点在于发现提取阶段, N2pc 和 SPCN 两个成分的分离, 建议增强讨论。

**回应:** 感谢您的建议。前人的研究虽然在一定程度上证明了右侧 DLPFC 在视觉空间工作记忆中的作用(Wu, 2014; Giglia et al., 2014), 但缺乏对其具体神经机制的探究, 本研究利用脑电区分不同的加工阶段, 并通过电刺激右侧 DLPFC 探讨其在视觉工作记忆加工中的作用。我们也在修改稿中对这两个成分的分离增加了讨论。

**参考文献:**

- Berryhill, M. E., & Jones, K. T. (2012). tDCS selectively improves working memory in older adults with more education. *Neuroscience letters*, 521(2), 148-151.
- Fregni, F., Boggio, P. S., Nitsche, M., Berman, F., Antal, A., Feredoes, E., et al. (2005). Anodal transcranial direct current stimulation of prefrontal cortex enhances working memory. *Experimental brain research*, 166(1),

- Giglia, G., Brighina, F., Rizzo, S., Puma, A., Indovino, S., Maccora, S., et al. (2014). Anodal transcranial direct current stimulation of the right dorsolateral prefrontal cortex enhances memory-guided responses in a visuospatial working memory task. *Functional neurology*, 29(3), 189.
- Jacobson, L., Koslowsky, M., & Lavidor, M. (2012). tDCS polarity effects in motor and cognitive domains: a meta-analytical review. *Experimental brain research*, 216(1), 1-10.
- Li, S., Cai, Y., Liu, J., Li, D., Feng, Z., Chen, C., & Xue, G. (2017). Dissociated roles of the parietal and frontal cortices in the scope and control of attention during visual working memory. *NeuroImage*, 149, 210-219.
- Meiron, O., & Lavidor, M. (2013). Unilateral prefrontal direct current stimulation effects are modulated by working memory load and gender. *Brain stimulation*, 6(3), 440-447.
- Robitaille, N., Marois, R., Todd, J., Grimault, S., Cheyne, D., & Jolicœur, P. (2010). Distinguishing between lateralized and nonlateralized brain activity associated with visual short-term memory: fMRI, MEG, and EEG evidence from the same observers. *NeuroImage*, 53(4), 1334-1345.
- Tseng, P., Hsu, T. Y., Chang, C. F., Tzeng, O. J., Hung, D. L., Muggleton, N. G., ... & Juan, C. H. (2012). Unleashing potential: transcranial direct current stimulation over the right posterior parietal cortex improves change detection in low-performing individuals. *Journal of Neuroscience*, 32(31), 10554-10561.
- Vogel, E. K., & Machizawa, M. G. (2004). Neural activity predicts individual differences in visual working memory capacity. *Nature*, 428(6984), 748-51.
- Wu, Y. J., Tseng, P., Chang, C. F., Pai, M. C., Hsu, K. S., Lin, C. C., & Juan, C. H. (2014). Modulating the interference effect on spatial working memory by applying transcranial direct current stimulation over the right dorsolateral prefrontal cortex. *Brain and cognition*, 91, 87-94.
- .....

### 审稿人 3 意见：

本文通过 tDCS 技术和 ERP 技术，尝试探讨右侧 DLPFC 在视觉工作记忆加工过程中的作用。研究发现正性电刺激右侧 DLPFC 相对于虚假电刺激显著提升高潜力组被试在低记忆负荷下的记忆容量及其对应的提取阶段的脑电指标 SPCN 成分。整体来看，研究逻辑清晰、结果可靠。但有以下问题：

**意见 1：**视觉工作记忆的加工过程可以进一步细化成编码、保持、提取等基本过程。本研究的实验设计以及 ERP 技术的高时间分辨率的特点，可以有机会对这些基本过程进行深入分析。建议作者进一步分析由示例序列诱发的 ERP，以更好地探究工作记忆编码和保持阶段是否受记忆负荷和 tDCS 的影响。

**回应：**非常感谢您的建议，我们以示例序列开始的时间为零点，对示例序列诱发的 ERP 成分提取分析，结果如图 1 所示。

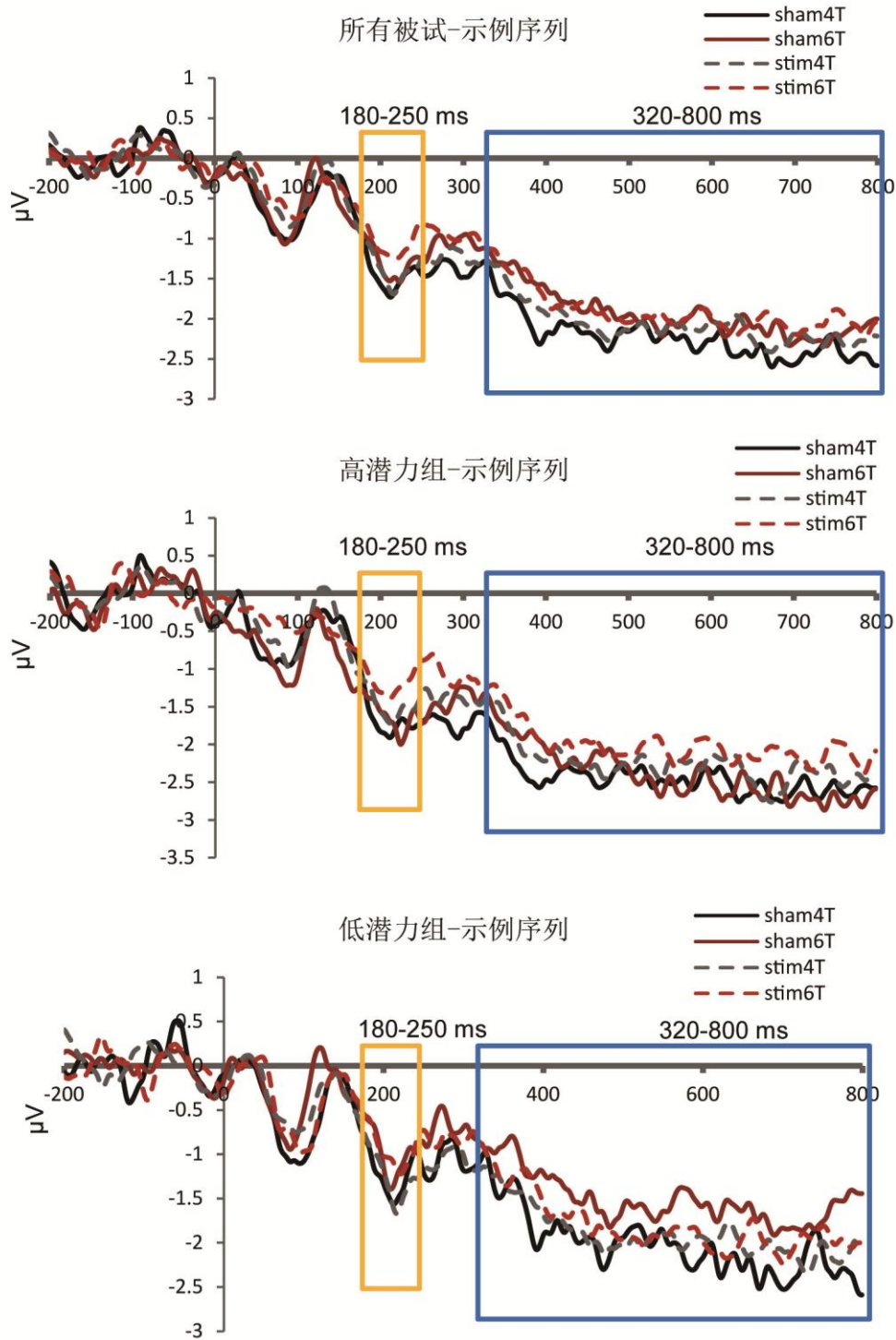


图 1. 示例序列对应的 ERP 成分，上中下图分别为所有被试（37 人）、高潜力组被试和低潜力组被试在四种情况下的 ERP 波形。图中橙色框和蓝色框分别围住的是 N2pc 和 SPCN 成分。所有 ERP 都是 CP5/CP6, P7/P8, O1/O2 三对电极对侧减同侧电极波幅差值的平均波幅。

对所有被试、高潜力组被试和低潜力组被试的 N2pc 波幅和 SPCN（文献中有称 contralateral delay activity, CDA）波幅进行 2 刺激类型×2 记忆负荷的重复测量方差分析表明，三组被试的 N2pc 和 SPCN 波幅的各类效应均不显著（ $p_s > 0.05$ ）。记忆负荷主效应不显著与

前人研究相符 (Robitaille et al., 2010; Vogel & Machizawa, 2004), 超过记忆容量 (4) 之后的顶叶对侧-同侧差异波的波幅维持不变。刺激的主效应和刺激×负荷交互效应不显著可能受记忆负荷的天花板效应的影响; 另一种可能性为, 相对于工作记忆的编码和保持阶段来说, 右侧 DLPFC 在提取阶段的作用更加显著, 因为本研究观察电刺激右侧 DLPFC 会对高组被试负荷 4 时提取过程的 SPCN 产生影响。

图 1 和相关的结果加入修改稿, 成为新的图 4。

**意见 2:** 对 N2pc 和 SPCN 这两个 ERP 成分的描述可进一步详细, 同时建议将这些描述呈现在引言部分。N2pc 反映的是注意的加工过程, 似乎跟本研究的目的无关, 为什么作者要讨论 N2pc 这一成分? 作者对 SPCN 成分反映的心理功能的表述需前后一致, SPCN 反映的是视觉工作记忆的保持过程还是提取过程?

**回应:** 感谢您的建议, 已经将 N2pc 和 SPCN 的成分介绍加入引言部分: “N2pc(Luck & Hillyard, 1994) 是视觉目标对侧视野的电极波幅与目标同侧视野电极波幅的差值波……SPCN (Sustained posterior contralateral negativity) (Jolicoeur, Sessa, Dell’Acqua, & Robitaille, 2006) 同 N2pc 一样, 也是一个出现在目标呈现对侧更负的偏侧化事件相关电位成分。……通过这两个电生理指标, 探究 DLPFC 在视觉工作记忆提取阶段究竟是通过影响注意过程还是信息维持过程来影响工作记忆表现的。”

您对原文中 SPCN 反映的是视觉工作记忆的保持过程还是提取过程表示疑惑, 对此我们深感抱歉, 并增加了对延时保持过程脑电的分析, 加入了新的图 4, 和新的图 5 一起能更好地说明 SPCN 在视觉工作记忆的延迟保持过程 (修改稿图 4) 和提取过程 (修改稿图 5) 中的差异。前人研究表明, SPCN 反映的是视觉工作记忆的信息维持, 但是这种信息维持可能发生在工作记忆的延迟保持阶段 (Vogel & Machizawa, 2004), 也可能发生在提取阶段 (Tseng et al., 2012)。本研究发现延迟过程中的 SPCN 并没有负荷或刺激的效应, 而提取过程的 SPCN 在特定情况下则受到刺激的影响。因此右侧 DLPFC 更多地参与提取过程中的信息保持。而提取过程中 N2pc 没有发现显著结果, 说明相比于早期注意, 右侧 DLPFC 可能在晚期比较过程的信息维持中发挥更显著的作用。

**意见 3:** 由于本文仅研究了右侧 DLPFC 且任务为视空间任务, 建议将题目更为具体化, 例如: “右侧背外侧前额叶在视空间工作记忆中的因果性作用”。

**回应:** 非常感谢您的建议, 我们的研究结果确实包括右侧背外侧前额叶在视觉工作记忆中的作用, 我们在题目中加入了“右侧”的限定。但是在与我们研究范式类似的过往研究中, 多使用了“视觉工作记忆”这一更广泛兴趣的概念 (Vogel & Machizawa, 2004; Tseng et al., 2012), 因此我们保留这一名词, 综合起来将题目改为“右侧背外侧前额叶在视觉工作记忆中的因果性作用”。

**意见 4:** 作者在引言中提到“前人通过经颅直流电刺激探究前额叶在工作记忆中的作用的研究中, 比较一致地发现正性电刺激左侧 DLPFC 可以显著提升言语工作记忆表现 (Fregni et al., 2005; Andrews et al., 2011; Ohn et al., 2008), 证明了左侧 DLPFC 在言语工作记忆中存在加工优势, 而对于右侧 DLPFC 在视觉空间工作记忆中的功能优势则缺乏有力的证据。”

上述表述不太正确, 因为后面提到的文献 Wu et al. (2014), Giglia et al. (2014) 都用 tDCS 研究了右侧 DLPFC 对视觉空间工作记忆的作用。作者应该关注的是记忆负荷对这一因果作用的调节作用。

**回应:** 感谢您的指正, 我们已经在文中进行修改, 将“而对于右侧 DLPFC 在视觉空间工作记忆中的功能优势则缺乏有力的证据”去掉, 改成了缺乏 DLPFC 对于记忆负荷的调节作用

研究。

**意见 5:** 被试信息部分。需提供被试的平均年龄和标准差。

**回应:** 感谢您的建议,已在文中加入被试的平均年龄和标准差。

**意见 6:** 被试信息部分。如何获得被试“身体健康无神经系统疾病,没有脑部损伤史”等信息?是否经过医学检查?

**回应:** 这些信息是通过实验开始前,主试询问被试是否身体健康无神经系统疾病,有没有脑部损伤史,体内是否有金属植入,被试通过口头报告获得的。

**意见 7:** 实验范式部分。对实验设计的描述不够清晰。需提供小方块刺激的实验控制细节,比如方块的大小、离注视点的距离、可能的颜色,两个方块之间的距离是否有限制,两个方块之间是否会重叠等等。

**回应:** 感谢您的提醒,已在文中加入这些细节的描述。

**意见 8:** 实验范式部分。对实验设计的描述不够清晰。“在注视点两侧出现与示例序列相同的色块”这句话中的“相同”是指什么相同?

**回应:** 这句话的“相同”是指色块的位置和数量相同,已在文中进行修正。

**意见 9:** 实验范式部分。对实验设计的描述不够清晰。小方块颜色每次变化的数量需要写明。

**回应:** 感谢您的指正,如果是色块发生变化的试次,每次只有一个小方块的颜色会发生变化,其他色块的颜色不变。已在文中进行说明。

**意见 10:** 经颅直流电刺激部分。虚假刺激情形下的电流刺激持续时间 30s,是在佩戴电极片的 15 分钟内的哪段时间施加的?需在文中进行说明。

**回应:** 非常感谢您的指正,虚假刺激情形下的电流刺激是在佩戴电极片的前 30 秒施加,已在文中进行说明。

**意见 11:** 经颅直流电刺激部分。前文提到电流刺激持续 30s,为什么后文却称“虚假刺激情况下并没有真正的电流”?

**回应:** 非常感谢您的指正,已将这句话修改为“虚假刺激情况下的电流持续时间非常短暂”。

**意见 12:** 脑电记录参数部分。需要写明事件相关电位的基线。

**回应:** 感谢您的指正,已在文中加入事件相关电位的基线时间描述。

**意见 13:** 脑电记录参数部分。运动伪迹去除时所分析的电极是哪些?

**回应:** 运动伪迹去除时所分析的电极共 26 个(除前额两个眼动干扰较大的 Fp1, Fp2, 两个眼电记录电极: HEOG, VEOG, 以及两个离线参考电极: TP9, TP10 之外的电极): C3, C4, CP1, CP2, CP5, CP6, Cz, F3, F4, F7, F8, FC1, FC2, FC6, Fz, P3, P4, T7, T8, FC5, O1, O2, Oz, P7, P8, Pz。

**意见 14:** 脑电记录参数部分。在进行叠加平均获得 ERP 数据的时候,作者没有先将反应错误的试次剔除。这一做法得到的 N2pc 和 SPCN,可能无法完全反映出被试对箭头指向一侧



屏幕上刺激的加工过程。因为在反应错误的试次中，被试可能没有对示例刺激进行编码并保持在工作记忆中，也可能没有注意箭头指向的一侧屏幕。建议作者先将反应错误的试次剔除，再进行叠加平均。

回应：感谢您的提醒，在数据处理过程中，我们是先去掉错误试次，文中的事件相关电位是所有正确试次处理后的叠加平均结果，这一点已经在文中进行补充说明。

意见 15：脑电记录参数部分。SPCN 的全称是 Sustained Posterior Contralateral Negativity，没有“顶叶”这一词语。

回应：感谢您的指正，已在文中进行修改。

意见 16：脑电记录参数部分。作者将 SPCN 的时间窗取为探测序列开始后的 350-600ms，该时间窗对于本研究是否合适？从图 4 的结果看，在多种条件下，ERP 的波幅在 500-600ms 内是正值，因此采用 350-600ms 的时间窗有可能会低估了 SPCN 的波幅。

回应：感谢您的建议，根据您的建议，我们分别将 SPCN 的时间窗设为 350-500ms 和 350-600ms，并对所有被试的平均波幅进行 2 刺激类型 $\times$ 2 记忆负荷 $\times$ 2 组别的重复测量方差分析，两种时间窗下波幅刺激类型的主效应显著，其对应  $p$  值和效应量值分别为  $p_{(500)} = 0.011$ ,  $\eta_p^2 = 0.17$ ;  $p_{(600)} = 0.012$ ,  $\eta_p^2 = 0.17$ ，其他效应均不显著。可见这两种时间窗的差异较小。

随后我们又对高潜力组被试两种时间窗情况下的平均波幅进行 2 刺激类型 $\times$ 2 记忆负荷的重复测量方差分析，结果发现两种情况下刺激类型的主效应显著，其对应  $p$  值和效应量值分别为  $p_{(500)} = 0.03$ ,  $\eta_p^2 = 0.25$ ;  $p_{(600)} = 0.011$ ,  $\eta_p^2 = 0.33$ ，其他效应均不显著。这两种时间窗的差异仍然较小。

对低潜力组被试两种时间窗情况下的平均波幅分析发现，所有效应仍不显著。

由于选取不同的时间窗对研究结果的影响较小，因此修改稿中仍呈现 350-600ms 的时间窗结果。

意见 17：脑电记录参数部分。顶枕位置还包括其他电极，为什么只选择 CP5/6, P7/8, O1/O2 这三对电极？

回应：N2pc 和 SPCN 一般文献中最明显的位置都是在 PO7/PO8 电极附近，但是由于我们采用的 32 导电极帽中不包括这两个电极，因此选取这两个电极周围的电极 CP5/6, P7/8, O1/O2，并对它们的电压值进行分析。

意见 18：数据测量与分析部分。需要描述 N2pc 和 SPCN 这两种成分的波幅测量方法。

回应：感谢您的提醒，已在文的前言部分加以说明。

意见 19：数据测量与分析部分。需要写明是否分析了 N2pc 和 SPCN 的潜伏期。

回应：本研究并没有分析 N2pc 和 SPCN 的潜伏期，已在文中加以说明。

意见 20：数据测量与分析部分。应指明“行为学数据和脑电数据”具体是什么。

回应：行为学数据指的是在电刺激之后完成的视觉工作记忆任务的表现，包括被试的记忆容量  $K$  值和辨别力指标  $d'$  值。脑电数据指的是被试完成任务时刻的事件相关电位结果，包括 N2pc 成分和 SPCN 成分。已在文中进行说明。

意见 21：结果部分。大量重复“对.....进行 2（刺激类型：正性电刺激右侧 DLPFC，虚假刺激） $\times$ 2（记忆负荷：负荷 4，负荷 6）重复测量方差分析”这句话，建议省略这句话，因为

2.5 已经写明对数据采用 2（刺激类型：正性电刺激右侧 DLPFC，虚假刺激） $\times$ 2（记忆负荷：负荷 4，负荷 6）两因素重复测量方差分析。

回应：感谢您的指正，已在文中多处进行精简修改。

意见 22：结果部分。类似地，建议省略“对多重比较的调整均采用 Bonferroni 校正”等校正方法的描述，因为 2.5 已经对此说明。

回应：感谢您的指正，已在文中进行精简修改。

意见 23：结果部分。效应不显著时，不必要给出效应量  $\eta_p^2$  的值。

回应：感谢您的指正，已在文中进行删除。

意见 24：结果部分。对于不显著的效应，建议一并描述，不必赘述。

回应：感谢您的指正，已在文中将不显著的效应一并描述。

意见 25：结果部分。作者需仔细核对统计结果。比如“高潜力组的  $K_6$ - $K_4$  差值显著高于低潜力组， $t(19) = -6.73$ .....”、“.....显著提升了高潜力组被试的记忆容量  $K$  导致， $t(19) = -2.13$ .....”这两句话中，前文称“显著高于”、“显著提升”，但  $t$  值却为负数。

回应：感谢您的指正，经对统计结果进行核对，文中的  $t$  值分别表示的是低潜力组相对于高潜力组以及虚假刺激相对于正性电刺激 DLPFC，这里是作者表述不严谨，按照文中描述，这两处的  $t$  值均为正数，已在文中进行修改。

意见 26：结果部分。3.2 ERP 结果部分，在“接下来分别对两组.....重复测量方差分析”前，是否先进行了 2（刺激类型：正性电刺激右侧 DLPFC，虚假刺激） $\times$ 2（记忆负荷：负荷 4，负荷 6） $\times$ 2（组别：高潜力组，低潜力组）重复测量方差分析？三重交互作用是否显著？

回应：在分别对两组进行重复测量方差分析前，对所有被试的 N2pc 波幅和 SPCN 波幅进行了 2（刺激类型：正性电刺激右侧 DLPFC，虚假刺激） $\times$ 2（记忆负荷：负荷 4，负荷 6） $\times$ 2（组别：高潜力组，低潜力组）重复测量方差分析，结果发现 N2pc 波幅的各类效应均不显著；SPCN 波幅的刺激类型主效应显著， $F(1, 37) = 7.01$ ， $p < 0.05$ ， $\eta_p^2 = 0.167$ ，其他效应均不显著。因此我们直接对数据进行后续的配对样本  $t$  检验，探究不同刺激情况下 SPCN 波幅的差异。这一结果已加入修改稿中进行说明。

意见 27：结果部分。3.2 ERP 结果中的 SPCN 部分，交互作用不显著，为何进行事后分析？

回应：感谢您的指正，这里 SPCN 部分的交互作用不显著，不应该使用事后分析。因为刺激类型的主效应显著，因此本研究使用了配对样本  $t$  检验对不同刺激情况下的 SPCN 波幅进行后续分析，结果发现电刺激右侧 DLPFC 只是显著提升了在负荷 4 情况下 SPCN 的幅值。这一结果已在修改稿中进行修改。

意见 28：结果部分。图 4 中，建议使用两种不同颜色的框分别包围 N2pc 和 SPCN 成分。

回应：感谢您的建议，已在文中使用两种不同颜色的框对 N2pc 和 SPCN 进行标注。

意见 29：讨论部分。本研究只考虑了右侧 DLPFC 的功能，而没有研究左侧 DLPFC 的功能，因此不能说“为大脑左右半球在工作记忆中功能的偏侧化提供了进一步的证据”。

回应：感谢您的指正，已将这句话改为“为大脑右半球在视觉空间工作记忆加工中具有加工优势提供了进一步的证据”。

**意见 30:** 讨论部分。前文没有提及本研究的实验范式在哪些方面“不同于以往电刺激研究的视觉工作记忆范式”，需要解释清楚。

**回应:** 感谢您的指正，此处表达错误，本研究所采用的视觉工作记忆范式与 Li et al. 2017 等人的研究范式相似，均为视觉工作记忆的变化检测任务，并且也都设置了不同的记忆负荷，但是不同之处在于 Li 等人是为了探究右侧 DLPFC 在干扰抑制中的作用，而我们的研究是为了探究 DLPFC 在视觉工作记忆中的负荷依赖作用。结合您的上一条建议，将“最后，我们的研究为大脑右半球.....目的是为了.....的因果关系”这段话改成了“最后，我们的研究为大脑右半球在视觉工作记忆加工中具有加工优势提供了进一步的证据。前人研究证明了右侧 DLPFC 与工作记忆的干扰抑制(Wu, 2014; Li et al. 2017)和延迟再认(Giglia et al., 2014)的因果联系。通过采用事件相关电位的分析方法，本研究为 DLPFC 在工作记忆提取过程中的重要作用提供了因果联系的证据”

**意见 31:** 讨论部分。文中提到“我们的研究发现也为提升和改善认知障碍疾病患者的工作记忆损伤提供了良好的治疗前景”，但本研究结果主要针对高潜力组被试在低负荷下的工作记忆，因此是否能够帮助具有认知障碍疾病的患者，有待商榷。

**回应:** 非常感谢您的建议！我们已将这句话改为“我们的研究发现也为找到提升个体工作记忆的表现的快速有效方式提供了良好的启示。”

**意见 32:** 语言表述需完善。

(1) 摘要部分的“高记忆增长潜力组（低潜力组）”。

**回应:** 非常感谢您的指正，已在文中进行修改，改成“高记忆增长潜力组（高潜力组）”。

(2) 2.2 中的“用眼睛余光.....”。

**回应:** 非常感谢您的指正，已在文中进行修改，改成“用余光”。

(3) 2.4 中的“放置水平眼电.....放置垂直眼电”。

**回应:** 非常感谢您的指正，已在文中进行修改，改成“放置水平眼电电极.....放置垂直眼电电极”

(4) 结果部分中，建议统一使用“交互作用”这一词语，而不使用“交互效应”。

**回应:** 非常感谢您的建议，已将文中所有“交互效应”改成“交互作用”。

(5) 讨论部分的“除此之外，我们的研究发现也为提升和改善认知障碍疾病患者的工作记忆损伤提供了良好的治疗前景”这句话中，“提升和改善认知障碍疾病患者的工作记忆损伤”有歧义。

**回应:** 感谢您的指正，已根据您前面的建议对这段话进行修改，删除了具有歧义的内容。

**意见 33:** 个别文献引用不当或不完整。

(1) 在 3.1 行为结果部分，“前人研究发现，不同特质.....性别(Berryhill & Jones, 2012)和受教育程度(Meiron & Lavidor, 2013) 的影响”这句话中文献引用不当。Berryhill 和 Jones (2012) 没有发现性别会影响电刺激的效果，相反，他们发现受教育程度会影响电刺激的效果。Meiron 和 Lavidor (2013)没有发现受教育程度的影响，而发现了性别的影响。

**回应:** 非常感谢您的指正，这里是作者在书写论文时的疏忽导致的引文位置错误，已在文中进行修改，改为“前人研究发现，不同特质.....性别(Meiron & Lavidor, 2013) 和受教育程度(Berryhill & Jones, 2012)的影响”。

(2) Wu 等人.....而对顺序回忆任务的表现没有影响(Wu et al., 2014)。

**回应:** 感谢您的指正，之前的表述存在不严谨的地方，已将这段话改为“Wu 等人发现正性

电刺激右侧 DLPFC 能够显著提升有干扰情况下的空间工作记忆顺序回忆任务的反应速度以及逆序回忆任务的记忆广度,而对无干扰情况下的顺序和逆序回忆任务的表现没有影响(Wu, 2014)。”

---

## 第二轮

**审稿人 1 意见:** 作者针对我之前的审稿意见做了比较好的回复和修改,我没有其他意见了。

**审稿人 2 意见:** 视觉工作记忆是当前研究的热点问题之一。该研究在已有的 tDCS 刺激额叶对视觉工作记忆的影响的研究基础上,进一步考察该影响是否存在工作记忆负荷的调节作用,结果提供了 DLPFC 参与视觉工作记忆的因果性证据,且发现相应的提取阶段的较晚期脑电成分 SPCN 受到电刺激的调控。总体说来,该研究研究问题明确、设计严谨、数据分析合理、结论基本可靠,此外,讨论部分也对同类研究结果的异同进行了分析和解释,具有重要的研究意义。

**审稿人 3 意见:** 建议接受。