

## 《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：持续性视觉注意对视觉工作记忆项目优先加工的影响

作者：连浩敏 张倩 谷雪敏 李寿欣

### 第一轮

#### 审稿人 1 意见：

该论文围绕视觉注意是否对视觉工作记忆的优先加工项目存在影响这一问题，通过线索提示概率操控项目加工的优先性（高 70%，低 10%，相等 25%），通过在工作记忆任务中是否插入注意损耗任务，形成一个 3（优先性）\*2（是否有注意任务）的被试内实验设计，来考察不同优先性项目的识别正确率是否受到注意任务的影响，以解答上述问题。与此同时，实验一到实验三，分别操控了注意任务的不同方面（注意任务次数，注意任务的间隔时间），均发现了优先项和非优先项的成绩受到注意任务的分离式影响，即非优先项均会被注意任务影响而优先项均不受注意任务影响。实验 4 通过改变工作记忆资源（即将优先项由 1 个变为 2 个，优先项的提示概率由 70% 变为了 40%），则发现了优先项的成绩受到注意任务的影响。由此得出结论：工作记忆资源调节视觉注意对 VWM 项目优先加工影响的机制。并且进一步通过 ERP 和 EROS 技术，探索其内在的神经加工机制。

研究问题具有一定的创新型，实验设计较为合理，多个实验结果稳定重复，结果较为可靠，工作量较大，较为扎实。

**意见 1：**通篇出现 248 次“优先”的概念，这个优先的操控实际是通过概率高低进行操控的。摘要中的优先，摘要中并没有很明确。是否要写清楚？

**回应：**感谢审稿专家的意见！确如审稿专家所说，在我们的研究中对优先的操控是通过概率高低进行的，我们对摘要中的优先进行了明确，对摘要相关部分的修改如下。

*“采用行为实验、事件相关电位和事件相关光信号联合采集技术，通过操纵视觉工作记忆(VWM)项目的检测概率变化 VWM 项目加工的优先性，探讨持续性视觉注意对 VWM 项目优先加工的影响是否受到工作记忆资源的调节，以及 VWM 项目优先加工的神经基础。”*

（见文中第 1 页，摘要，第 1-3 行）

**意见 2：**作者前言中提到了优先项目的操控有两种：概率操控和奖赏操控。作者在本研究中为什么要使用概率而不使用奖赏？使用概率有什么独特之处？作者总结了一句两者之间的机制的差异，是作者自己的总结还是参考他人的文献？奖赏在本文中并没有具体操控，是否可以考虑减少一些篇幅，然后重点阐述概率的优势和特点。

**回应：**感谢您的建议！在以往研究中主要是通过概率和奖赏操控优先项目，与奖赏引导的 VWM 项目优先加工相比，概率引导的 VWM 项目优先加工的优先效应稳定性更强(Jeanerret et al., 2023)，并且奖赏引导的 VWM 优先项目表征脆弱，易受无关视觉刺激干扰(Allen & Ueno, 2018; Hitch et al., 2018)，而概率引导的 VWM 优先项目表征稳固，不易受无关视觉刺激的干扰(Schneider et al., 2017)。这可能是因为，在奖赏引导的 VWM 项目优先加工中，优

先项目依赖执行控制系统保存在注意焦点(Hu et al., 2016), 而视觉注意选择的外部视觉刺激与优先项目争夺注意焦点, 导致优先项目表征不稳固(Hitch et al., 2018); 而在概率引导的 VWM 项目优先加工中, 个体可以通过概率线索排除无关刺激释放工作记忆资源, 用于保护优先项目表征不受干扰(Schneider et al., 2017), 且概率引导的 VWM 项目优先加工更自动化, 不依赖于执行控制(Atkinson et al., 2018), 但视觉注意在 VWM 项目优先加工中的作用是什么? 尚不清楚。因此, 我们选择对概率引导的 VWM 项目优先加工机制进行探讨。

根据审稿专家的意见, 我们在正文中适当减少了奖赏引导的 VWM 优先加工的篇幅, 并着重阐述概率引导的 VWM 项目优先加工的优势和特点, 具体修改如下。

“通过提高 VWM 中部分项目的奖赏值或检测概率, 可以提高相关项目的优先性, 并促进优先项目的加工(Ester & Pytel, 2023; Griffin & Nobre, 2003; Schmidt et al., 2002; Zhang & Lewis-Peacock, 2022; 2023)。一方面, 研究者通过操纵 VWM 项目检测的奖赏值, 变化项目的优先性, 奖赏值高的项目优先性高, 优先项目的 VWM 成绩得到提高(Allen & Ueno, 2018; Atkinson et al., 2018; 2022; Hitch et al., 2018; Hu et al., 2014; Sandry & Ricker, 2020)。另一方面, 研究者通过操纵 VWM 项目的检测概率, 变化项目的优先性, 检测概率高的项目优先性高, 优先项目的 VWM 成绩得到提高(Atkinson et al., 2018; Griffin & Nobre, 2003; Fu et al., 2022; Li et al., 2023; Macedo-Pascual et al., 2023; Wang et al., 2023; Zhang & Luck, 2008)。Griffin 与 Nobre(2003)通过在记忆项目呈现前或者呈现后插入提示项目检测概率的空间线索, 探讨概率引导的工作记忆项目优先加工是否对知觉信息和内部表征均有促进作用。线索指向项目被检测的概率为 80%, 3 个非指向项目被检测的概率为 20%。在编码前呈现的线索为前线索, 在编码后呈现的线索为回溯线索。结果发现, 在前线索和回溯线索条件下的结果一致, 即与非线索指向项目相比, 线索指向项目的记忆正确率提高、反应时降低。这表明概率引导的工作记忆项目优先加工对知觉信息和内部表征均发挥促进作用。研究者应用多种实验范式, 如变化觉察范式(Griffin & Nobre, 2003; Fu et al., 2022)、回忆报告范式(Atkinson et al., 2018)、连续报告范式(Schneider et al., 2017), 以及采用不同记忆材料, 如朝向(Günseli et al., 2019)、面孔(Zhang & Lewis-Peacock, 2022)、颜色(Hollingworth & Maxcey-Richard, 2013)、颜色-形状的绑定(Atkinson et al., 2018)进行的研究证明, 概率引导的 VWM 项目优先加工是广泛存在的。研究者在工作记忆任务后进行了意外的长时记忆任务, 发现与奖赏引导的工作记忆优先效应相比, 概率引导的工作记忆优先效应在长时记忆中更稳固(Jeanerret et al., 2023)。进一步研究发现, 奖赏引导的 VWM 优先项目表征脆弱, 易受无关视觉刺激干扰(Allen & Ueno, 2018; Hitch et al., 2018), 而概率引导的 VWM 优先项目表征稳固, 不易受无关视觉刺激的干扰(Schneider et al., 2017)。这可能是因为, 在奖赏引导的 VWM 项目优先加工中, 优先项目依赖执行控制系统保存在注意焦点(Hu et al., 2016), 而视觉注意选择的外部视觉刺激与优先项目争夺注意焦点, 导致优先项目表征不稳固(Hitch et al., 2018; 2020); 而在概率引导的 VWM 项目优先加工中, 个体可以通过概率线索排除无关刺激释放工作记忆资源, 用于保护优先项目表征不受干扰(Schneider et al., 2017)。”

(见文中第 1 页, 正文第 2 段, 第 1-9 行; 第 2 页, 第 1 段, 第 1-16 行)

**意见 3:** 在前言中, 实验 1-3 的实验设计的逻辑关系, 没有非常明确为什么, 注意任务次数和注意任务的间隔时间的操作背后的逻辑, 需要强化下。

**回应:** 感谢审稿专家的意见! 我们在实验 1a (原实验 1) 的 VWM 保持阶段插入单次视觉注意任务消耗持续性视觉注意, 探讨优先加工 1 个项目时, 持续性视觉注意对 VWM 项目优先加工的影响, 但存在个体完成视觉注意任务后将视觉注意转移回 VWM 任务中继续复述

优先项目表征的可能，掩盖优先项目表征的受损，因此，在实验 1b（原实验 2）中插入两次视觉注意任务，排除这一可能；另外，与无视觉注意任务相比，有视觉注意任务时，被试存在对视觉注意任务的预期和动作准备，可能对 VWM 产生影响，为了排除这一可能，在实验 1c（原实验 3）中通过操纵视觉注意任务出现的早、晚，消耗不同时间的视觉注意，进一步探讨该问题。为此，我们在前言中进行了如下修改。

“本研究共包括 3 个实验：在实验 1a-1c 中，通过前线索指向 1 个高检测概率项目，并在保持阶段操纵单次视觉注意任务的呈现与否、两次视觉注意任务的呈现与否和视觉注意任务的呈现时间，探讨优先加工 1 个项目时，持续性视觉注意对 VWM 项目优先加工的影响。在实验 1a 中采用单次视觉注意任务消耗持续性视觉注意的基础上，在实验 1b 中采用两次视觉注意任务，排除个体完成视觉注意任务后将视觉注意转移回 VWM 任务中继续复述优先项目表征的可能；在实验 1c 中通过操纵视觉注意任务出现的早、晚，控制视觉注意任务预期和动作准备带来的影响，对该问题加以探讨。”

（见文中第 4 页，第 1 段，第 4-9 行）

**意见 4：**实验一-三是否可以划分为实验 1a, 1b 和 1c 更合适？均为对注意损耗任务的不同参数的操控，实验 4 为对工作记忆资源（优先项目数）的操控。

**回应：**针对您提出的关于实验 1-3 划分为实验 1a, 1b 和 1c 的建议，我们已经进行了修改，感谢您的建议！

**意见 5：**实验 5 中的脑电实验，数据分析的基线是前面 200ms，但是实验设计中前注视点只有 100-150ms 的抖动，再前一屏幕是提示屏幕了。这样造成了基线不是很稳定。后续观察到的结果是否可靠，有待商榷。

**回应：**感谢您的问题！我们的 ERP 数据分析是以记忆项呈现前 200ms 做基线，确实存在受前一屏（线索）刺激变化影响的问题，有可能造成基线不稳。为此，我们进行以下两方面分析：首先，我们分析了线索呈现 1000ms 的脑电变化情况。以线索出现作为零点，分别将提示性线索、中性线索条件进行叠加，观察线索诱发的脑电波动。分析结果如图 1、图 2 所示，可以看出，线索诱发的脑电在线索呈现 500ms 后趋于平稳，接近基线水平。因此，尽管以记忆项前 200ms 作为基线时，包含了 100ms 左右的线索刺激窗口，但这个阶段的脑电活动较为稳定，说明被试在线索呈现的初期对线索进行了充分加工，这在一定程度上减少了线索加工对基线阶段脑电的影响。

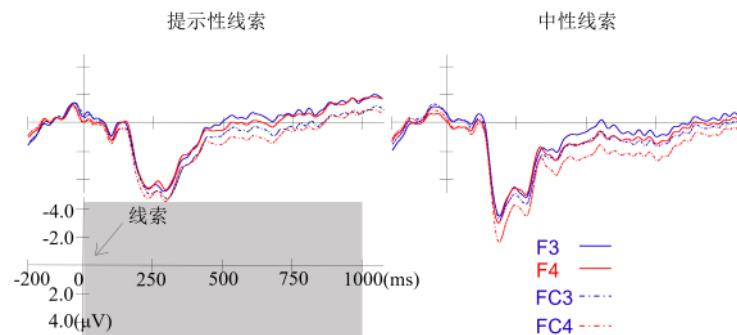


图 1 实验 3 中以线索做零点，提示性线索和中性线索条件下 F3、F4、FC3、FC4 电极点波形图(注：灰色区域表示线索呈现时间窗口 0-1000ms)

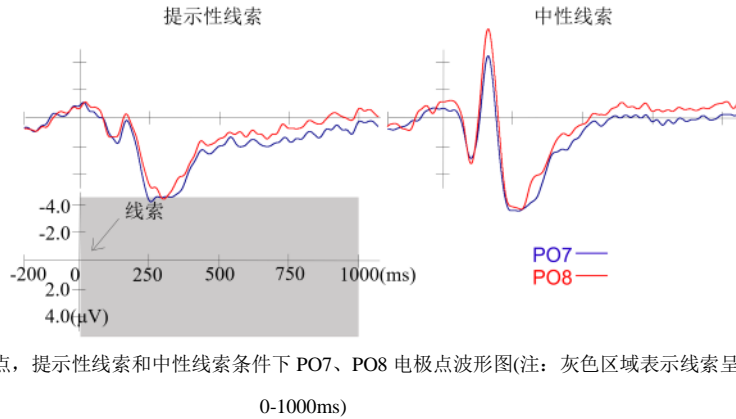


图2 实验3中以线索做零点，提示性线索和中性线索条件下PO7、PO8电极点波形图(注：灰色区域表示线索呈现时间窗口0-1000ms)

其次，为了进一步确认缩短基线长度是否影响ERP成分，我们以记忆项呈现前100ms作为基线对脑电数据进行重新分析，结果如图3、图4所示。对不同线索条件的LPC、NSW分别进行配对样本 $t$ 检验发现，提示性线索条件的LPC( $3.75 \pm 0.95 \mu\text{V}$ )大于中性线索条件( $2.79 \pm 0.76 \mu\text{V}$ )， $t(16) = 2.28$ ， $p = 0.037$ ，Cohen's  $d = 0.61$ ，95% CI = [0.07, 1.85]；提示性线索条件的NSW( $-1.28 \pm 0.61 \mu\text{V}$ )大于中性线索条件( $-0.09 \pm 0.66 \mu\text{V}$ )， $t(16) = -5.27$ ， $p < 0.001$ ，Cohen's  $d = 1.31$ ，95% CI = [-1.67, -0.71]。这与正文中以记忆项呈现前200ms为基线的结果一致。

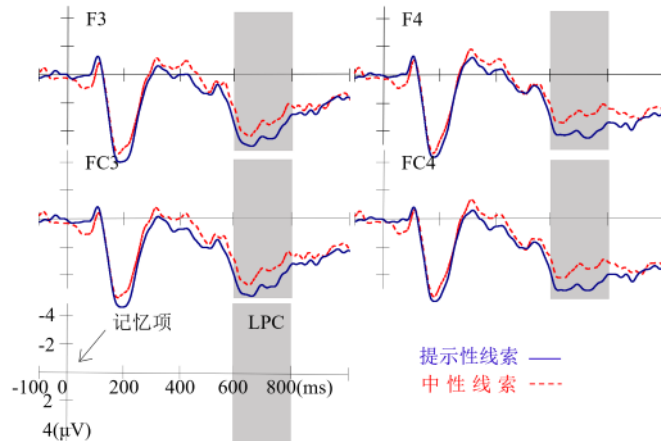


图3 实验3中100ms基线时提示性线索和中性线索条件下所诱发的LPC(注：提示性线索条件包括高和低两种检测概率条件，灰色区域表示记忆项呈现后分析LPC的时间窗口600-800ms)

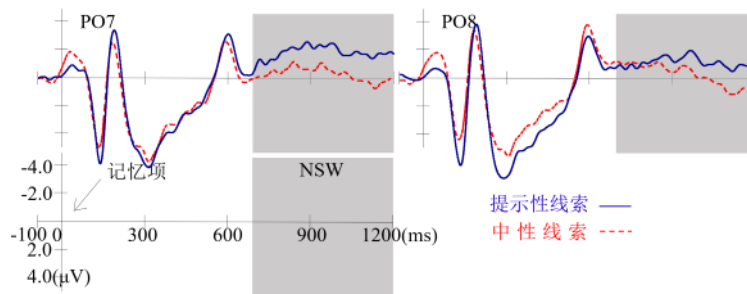


图4 实验3中100ms基线时提示性线索和中性线索所诱发的NSW(注：提示性线索条件包括高和低两种检测概率条件，灰色区域表示记忆项呈现后分析NSW的时间窗口800-1200ms)

由于我们需要分析时程较长的慢波成分LPC和NSW，因此，在文中仍然选择以记忆项呈现前200ms为基线分析的结果。

**意见6:** 本论文的主要论点是工作记忆资源影响注意任务对工作记忆的优先项影响，前面的三个实验均发现当优先项为1个时，注意任务不会对其产生影响，但对非优先项会产生影响。

实验 4 增加了优先项项目，降低了优先项的工作记忆资源，发现了注意任务对优先项存在影响。后续实验 5 难道不应该是进一步延续实验 4，采用多个优先项的任务来继续做吗？为什么是采用 1 个优先项的任务，并且也没有了注意损耗任务了来做进一步神经机制的探索呢？跟前面整个的实验逻辑有一些脱钩。前面四个实验自成一体一个主题，实验 5 有点牵强整合进去的意思。实验 5 中的提示项条件将优先项和非优先项合并为提示条件，然后探讨的优先项加工的神经机制。跟本文主题的视觉注意对视觉工作记忆项目优先加工的影响好像没关系了。

**回应：**感谢您对这一问题的关注！我们设计实验 1 和实验 2（原实验 1-4）的目的是从持续性视觉注意需求的角度探讨 VWM 项目优先加工的机制，设计优先项为 2 个的实验 2（原实验 4），主要目的是为了与优先项为 1 个时的实验 1（原实验 1-3）进行对比，以探讨持续性视觉注意对 VWM 项目优先加工的影响是否受工作记忆资源调节。在实验 3（原实验 5）中，我们对 VWM 项目优先加工的神经基础进行了探讨。这样的设计主要基于以下两方面的考虑。

一是从研究问题的角度看，在实验 1（原实验 1-3）中，我们探讨优先项目获得的工作记忆资源充足时，持续性视觉注意对 VWM 项目优先加工的影响；在实验 2（原实验 4）中，探讨优先项目获得工作记忆资源不足时，持续性视觉注意对 VWM 项目优先加工的影响。接下来在实验 3 中（原实验 5），我们直接采用反映执行控制资源投入的晚期正成分(late positive complex, LPC; 车晓玮 等, 2020, 2021)和反映工作记忆资源投入的负慢波(negative slow wave, NSW; Schneider et al., 2017)作为分析指标，并分析不同脑区的皮层活动，探讨 VWM 项目优先加工的脑机制，从而揭示与无 VWM 项目优先加工相比，VWM 项目优先加工在不同脑区是如何投入与分配工作记忆资源的。

二是从研究设计方面看，在实验 3（原实验 5）中采用具有较高时间和空间分辨率的事件相关电位和事件相关光信号联合采集技术，考虑到试次叠加和时长限制问题，我们采用了单因素两水平（线索类型：提示性线索、中性线索）被试内实验设计，提示性线索指向 1 个优先项目，且未加入注意损耗任务。通过这样的设计，我们得到，与优先加工多个项目相比，优先加工 1 个项目时的脑电成分更纯净，涉及的活动脑区更精确的结果，这有助于揭示 VWM 项目优先加工的神经机制。

同时，我们认为审稿专家提出的探讨多个项目优先加工的机制以及注意损耗影响 VWM 项目优先加工的神经基础，是一个有重要意义的问题，值得在今后研究中进一步探讨。

#### 参考文献

- Allen, R. J., & Ueno, T. (2018). Multiple high-reward items can be prioritized in working memory but with greater vulnerability to interference. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 80(7), 1731–1743.
- Atkinson, A. L., Berry, E. D., Waterman, A. H., Baddeley, A. D., Hitch, G. J., & Allen, R. J. (2018). Are there multiple ways to direct attention in working memory? *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1424, 115–126.
- Atkinson, A. L., Oberauer, K., Allen, R. J., & Souza, A. S. (2022). Why does the probe value effect emerge in working memory? Examining the biased attentional refreshing account. *Psychonomic Bulletin & Review*, 29(3), 891-900.
- Che, X., Wang, K., Shangguan, M., & Li, S. (2020). The Representation of attention template in visual working memory: An EROS study. *Studies of Psychology and Behavior*, 18(3): 297-303.
- [车晓玮, 王凯旋, 上官梦麒, 李寿欣. (2020). 视觉工作记忆中注意模板的表征——来自 EROS 的证据. *心理与行为研究*, 18(3). 297-303.]

- Che, X., Xu, H., Wang, K., Zhang, Q., & Li, S. (2021). Precision requirement of working memory representations influences attentional guidance. *Acta Psychologica Sinica*, *53*(7), 694-713.
- [车晓玮, 徐慧云, 王凯旋, 张倩, & 李寿欣. (2021). 工作记忆表征精度加工需求对注意引导的影响. *心理学报*, *53*(7), 694-713.]
- Ester, E. F., & Pytel, P. (2023). Changes in behavioral priority influence the accessibility of working memory content. *NeuroImage*, *272*, 120055.
- Fu, X., Ye, C., Hu, Z., Li, Z., Liang, T., & Liu, Q. (2022). The impact of retro-cue validity on working memory representation: Evidence from electroencephalograms. *Biological Psychology*, *170*, 108320.
- Griffin, I. C., & Nobre, A. C. (2003). Orienting attention to locations in internal representations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *15*(8), 1176-1194.
- Günseli, E., Fahrenfort, J. J., van Moorselaar, D., Daoultzis, K. C., Meeter, M., & Olivers, C. N. (2019). EEG dynamics reveal a dissociation between storage and selective attention within working memory. *Scientific Reports*, *9*(1), 13499.
- Hitch, G. J., Hu, Y., Allen, R. J., & Baddeley, A. D. (2018). Competition for the focus of attention in visual working memory: perceptual recency versus executive control. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1424*(1), 64-75.
- Hitch, G. J., Allen, R. J., & Baddeley, A. D. (2020). Attention and binding in visual working memory: two forms of attention and two kinds of buffer storage. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *82*(1), 280-293.
- Hollingworth, A., & Maxcey-Richard, A. M. (2013). Selective maintenance in visual working memory does not require sustained visual attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *39*(4), 1047-1058.
- Hu, Y., Hitch, G. J., Baddeley, A. D., Zhang, M., & Allen, R. J. (2014). Executive and perceptual attention play different roles in visual working memory: Evidence from suffix and strategy effects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *40*(4), 1665-1678.
- Hu, Y., Allen, R. J., Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (2016). Executive control of stimulus-driven and goal-directed attention in visual working memory. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *78*(7), 2164-2175.
- Jeanneret, S., Bartsch, L. M., & Vergauwe, E. (2023). To be or not to be relevant: Comparing short-and long-term consequences across working memory prioritization procedures. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *85*(5), 1486-1498.
- Li, D., Hu, Y., Qi, M., Zhao, C., Jensen, O., Huang, J., & Song, Y. (2023). Prioritizing flexible working memory representations through retrospective attentional strengthening. *NeuroImage*, *269*, 119902.
- Macedo-Pascual, J., Capilla, A., Campo, P., Hinojosa, J. A., & Poch, C. (2023). Selection within working memory impairs perceptual detection. *Psychonomic Bulletin & Review*, *30*(4), 1442-1451.
- Sandry, J., & Ricker, T. J. (2020). Prioritization within visual working memory reflects a flexible focus of attention. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *82*, 2985-3004.
- Schmidt, B. K., Vogel, E. K., Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2002). Voluntary and automatic attentional control of visual working memory. *Perception & Psychophysics*, *64*(5), 754-763.
- Schneider, D., Barth, A., Getzmann, S., & Wascher, E. (2017). On the neural mechanisms underlying the protective function of retroactive cuing against perceptual interference: Evidence by event-related potentials of the EEG. *Biological Psychology*, *124*, 47-56.
- Wang, M., Liu, H., Chen, Y., Yang, P., & Fu, S. (2023). Different prioritization states of working memory representations affect visual searches: Evidence from an event-related potential study. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, *193*, 112246.
- Zhang, Z., & Lewis-Peacock, J. A. (2022). Prioritization sharpens working memories but does not protect them

from distraction. *Journal of Experimental Psychology: General*, 152(4).

Zhang, Z., & Lewis-Peacock, J. A. (2023). Bend but don't break: Prioritization protects working memory from displacement but leaves it vulnerable to distortion from distraction. *Cognition*, 239, 105574.

Zhang, W., & Luck, S. J. (2008). Discrete fixed-resolution representations in visual working memory. *Nature*, 453(7192), 233-235.

.....

## 审稿人 2 意见:

**意见 1:** 本文拟从工作记忆资源的角度去考察视觉注意对工作记忆项目优先加工的影响, 尽管实验设计严谨, 但在关键概念、问题提出和结果解释等方面存在重大缺陷。例如在前言部分的第三段中, 作者指出一部分文献支持 VWM 项目优先加工需要视觉注意, 而另一部分文献不支持。这里存在的问题是作者忽视了不同文献中关于“视觉注意”这个概念的理解是不同的。在前面一部分文献中, “视觉注意”主要指的是线索提示引起的注意转移, 它其实是 VWM 项目优先加工得以实现的原因; 而后一部分文献里的“视觉注意”主要指的是持续性视觉注意, 这和前面线索提示引起的注意转移是不同的。由于两类文献采用的视觉注意概念不同, 那么它们的结果是不能直接比较的, 更不能直接对立起来。从本文的实验内容来看, 其实本文研究的是持续性视觉注意对 VWM 项目优先加工的影响, 作者需要在题目和正文中明确概念。

**回应:** 感谢审稿专家建设性意见! 确实在我们论文的前一部分文献中, “视觉注意”主要指的是线索提示引起的注意转移, 而后一部分文献中的“视觉注意”主要指的是持续性视觉注意, 在这两类文献中的“视觉注意”是不同的, 前者导致了线索提示的注意优先效应; 而后者指的是在 VWM 保持阶段需要持续性视觉注意的投入。我们的研究主要探讨的是持续性视觉注意对 VWM 项目优先加工的影响。为此, 我们对论文题目和正文中进行了多处修改, 具体修改如下。

题目: “持续性视觉注意对视觉工作记忆项目优先加工的影响”

引言: “造成上述研究不一致的原因可能是: 一是要求被试记忆的优先项目和非优先项目的数量不同。在支持 VWM 项目优先加工需要视觉注意的研究中, 通常要求被试同时记忆 1 个优先项目和多个非优先项目或记忆 2 个优先项目, 而在支持 VWM 项目优先加工不需要视觉注意的研究中, 通常只要求被试记忆 1 个优先项目。与记忆 1 个优先项目和多个非优先项目或记忆 2 个优先项目相比, 只记忆 1 个优先项目时, 优先项目会获得更多的工作记忆资源。工作记忆资源的主要功能是存储和加工数量有限的工作记忆信息, 获得工作记忆资源越多, 项目的表征质量越好(Emrich et al., 2017; Ma et al., 2014)。因此, 在 VWM 项目优先加工过程中可能存在视觉注意资源和工作记忆资源的权衡, 当优先项目获得的工作记忆资源充足时, 优先项目的保持不需要持续性视觉注意, 而当优先项目获得的工作记忆资源不足时, 优先项目的保持则需要持续性视觉注意。二是 VWM 加工中视觉注意资源的分配不同。在支持 VWM 项目优先加工需要视觉注意的研究中, 通常使用线索引导视觉注意资源的分配, 使得优先项目获得更多注意资源, 而非优先项目获得的注意资源减少, 因此, VWM 优先效应可能与视觉注意资源的变化有关; 而在支持 VWM 项目优先加工不需要视觉注意的研究中, 通常采用次任务消耗持续性视觉注意, 使得整个 VWM 加工中的视觉注意资源减少, 因此, VWM 优先效应可能是视觉注意资源减少与工作记忆资源的变化两者共同造成的。综上, 持续性视觉注意对 VWM 项目优先加工的影响是否受工作记忆资源调节? 尚需进一步探讨。”

(见文中第 3 页, 第 1 段, 第 1-16 行)

**意见 2:** 从问题提出方面来说, 作者提出工作记忆资源的概念来解释相关研究结果也有待商榷, 因为完全可以用注意资源来代替工作记忆资源来加以解释, 这也与文献中强调注意在工作记忆项目优先加工中的作用更一致。

**回应:** 感谢审稿专家对这一问题的关注! 我们使用注意资源和工作记忆资源概念, 并用这两个概念来解释相关研究结果, 基于以下两方面的考虑。

一方面, 在工作记忆中, 工作记忆资源的主要功能是存储和加工数量有限的信息, 获得工作记忆资源越多, 项目的表征质量越好(Emrich et al., 2017; Ma et al., 2014)。众多研究表明, 注意与工作记忆是可分离的(Fougnie et al., 2008; Fu et al., 2022; Gao et al., 2022; Günseli et al., 2019; Hollingworth & Maxcey-Richard, 2013; Rerko et al., 2014; Tas & Luck, 2016)。比如, Günseli 等人(2019)通过操纵回溯线索有效性, 改变非线索提示项目的存储动机, 探讨注意选择和工作记忆存储是否独立。结果发现, 在 80%有效的线索条件下, 线索提示项目获得注意, 非线索提示项目的存储丢失; 在 50%有效的线索条件下, 线索提示项目被注意, 非线索提示项目也存储在工作记忆中, 随后, 在保持阶段后期, 即使注意重新分配到非线索提示项目位置, 非线索提示项目的存储仍丢失。这表明, 工作记忆中的存储和注意是不同的加工机制, 根据表征的相对重要性可以表现出不同的行为。Fu 等人(2022)采用 80%和 20%有效的回溯线索, 探讨回溯线索有效性是否会影响非线索指向项目的 VWM 表征。结果发现, 高、低有效性的回溯线索均可以诱发注意选择, 但只有高有效性的回溯线索诱发了反映工作记忆存储的大脑对侧延迟活动(contralateral delay activity, CDA)。这表明, 在 VWM 中, 非线索提示项目表征的保持受到线索有效性预期的影响。当概率线索有效性高时, 个体将注意定向到线索指向项目上, 并为其分配工作记忆资源, 同时移除非指向项目以降低记忆负载; 当概率线索的有效性低时, 个体仍可以将注意定向到指向项目上, 但把工作记忆资源均等的分配给指向项目和非指向项目, 并将所有项目存储在 VWM 中。

另一方面, 在有关工作记忆的理论模型中, 注意属于工作记忆的子系统。比如, 在嵌套加工模型中, 工作记忆包括注意焦点和长时记忆激活部分(Cowan, 1999); 在同心圆模型中, 工作记忆包括注意焦点、直接通达区和长时记忆激活部分(Oberauer, 2002); 在 VWM 多成分模型中, 选择外部视觉刺激的知觉选择注意起到特征过滤器的作用, 作用于 VWM 内部信息的注意加工过程被称为注意刷新过程, 由中央执行系统控制(Hitch et al., 2020)。获得注意定向或者注意选择的项目存储在注意焦点, 未获得注意选择的项目存储在注意焦点之外, 如直接通达区或者视觉空间模板。在我们的研究中, VWM 项目优先加工过程中既有优先项目, 也有非优先项目, 可用的资源包括注意焦点内的资源和注意焦点之外的资源, 对注意焦点之外项目的加工可能主要是工作记忆资源在发挥作用。

综上, 我们在研究中倾向于将注意资源与工作记忆资源分开。

**意见 3:** 从实验结果部分可以看出, 作者对数据的分析和已往关于持续性视觉注意对 VWM 项目优先加工的影响的文献是不同的, 作者重点分析了被优先选择的项目记忆是否受持续性注意的影响, 非优先选择的项目记忆是否受到持续性注意的影响等等, 而已往文献重点分析了 VWM 项目优先加工效应量是否受到了持续性注意的影响 (Hollingworth et al, 2013)。到底哪种分析更合适, 可以从研究的问题中可以找到答案, 由于本文是研究持续性注意对工作记忆项目优先加工的影响, 因此后一种分析更合适, 也就是说本文的分析重点不恰当。

**回应:** 感谢审稿专家对这一问题关注! 在 Hollingworth 和 Maxcey-Richard(2013)的研究中, 通过 100%有效的回溯线索提示检测项目, 并采用视觉搜索任务消耗持续性视觉注意, 探讨 VWM 项目的选择性保持是否需要持续性视觉注意。实验设计是 2 (任务类型: 双任务, 仅



记忆任务) × 2 (线索: 有效, 中性)两因素被试内实验设计。对 VWM 的正确率进行分析发现, 任务类型主效应显著, 即双任务条件下的 VWM 正确率低于仅记忆任务条件; 线索类型主效应显著, 即有效线索条件下的 VWM 正确率高于中性线索条件; 两因素交互作用不显著。研究表明, VWM 项目的选择性维持不需要持续性视觉注意。作者虽然列出了双任务和仅工作记忆任务条件下的线索效应量, 因不存在交互作用, 未进行简单效应分析, 即未比较线索有效和中性条件下, 消耗视觉注意和未消耗视觉注意条件下的 VWM 成绩。

在我们的研究中, 通过变化 VWM 项目的检测概率操纵记忆项目的优先性和优先项目的数量, 并在保持阶段插入任务消耗视觉注意, 探讨持续性视觉注意对 VWM 项目优先加工的影响是否受工作记忆资源调节。行为实验设计采用的是 3 (检测概率: 高、低、相等) × 2 (视觉注意任务: 有、无)两因素被试内实验设计。与 Hollingworth 和 Maxcey-Richard 的研究不同的是, 我们的研究发现, 存在检测概率和视觉注意任务的交互作用, 即在实验 1a 与 1b (原实验 1 与 2) 中, 高检测概率条件下, 无视觉注意任务条件和有视觉注意任务条件下的 VWM 正确率不存在差异, 而在低和相等检测概率条件下, 无视觉注意任务条件的 VWM 正确率高于有视觉注意任务条件; 在实验 1c (原实验 3) 中, 高检测概率条件下, 早、晚视觉注意任务条件下的 VWM 正确率不存在差异, 而低和相等检测概率条件下, 早视觉注意任务条件下的 VWM 正确率高于晚视觉注意任务条件。这说明, 当优先加工 1 个 VWM 项目时, 优先项目的 VWM 表征保持不需要持续性视觉注意, 而非优先项目的 VWM 表征保持需要持续性视觉注意。在实验 2 中 (原实验 4) 中, 我们发现, 检测概率和视觉注意任务之间不存在交互作用, 进一步分析视觉注意任务对不同检测概率项目 VWM 保持的影响, 结果显示, 高、低和相等检测概率条件下, 无视觉注意任务条件的 VWM 正确率均高于有视觉注意任务条件。这说明, 当优先加工 2 个 VWM 项目时, 优先项目和非优先项目的 VWM 表征保持均需要持续性视觉注意。综合行为实验 1-2 (原实验 1-4) 可知, 持续性视觉注意在 VWM 项目优先加工中的作用受到工作记忆资源的调节, 当优先项目获得的工作记忆资源充足时, 非优先项目的表征保持需要持续性视觉注意投入, 而优先项目的表征保持不需要; 当优先项目获得的工作记忆资源不足时, 优先项目和非优先项目的表征保持均需要持续性视觉注意投入。因此, 我们选择从持续性视觉注意是否影响不同优先性项目 VWM 表征保持的角度进行分析, 可以清晰的观察到优先项目获得的工作记忆资源量不同时, 持续性视觉注意在 VWM 项目优先加工中的不同作用。

**意见 4:** 本文结果其实表明 VWM 项目优先加工受到了持续性注意的影响, 和 Hollingworth et al, 2013 结果是不同的, 可能的原因是所采用的持续性注意任务是不同的, 这是本文的创新, 希望作者对这种创新结果的产生机制进行深入探讨, 提出一个更合理的问题, 对文章内容进行修改完善。

**回应:** 感谢审稿专家建议! 的确, 正如审稿专家所说, 我们的研究结果与 Hollingworth 和 Maxcey-Richard(2013)不同, 主要原因是所采用的消耗持续性注意的任务不同。后者采用消耗持续性注意的任务是视觉搜索任务, 即在 VWM 保持阶段, 被试需要在 8 个带有缺口的方框中搜索唯一带有水平方向缺口的目标方框, 并根据目标方框的缺口方向(左、右)做出选择反应。在这一任务中, 被试不仅需要消耗视觉注意进行目标搜索, 还需要消耗执行控制资源做出选择反应。因此, 在 Hollingworth 和 Maxcey-Richard 的研究中, 优先项目和非优先项目均受损的原因有可能源于持续性视觉注意和执行控制资源的共同作用。在 VWM 保持阶段插入视觉搜索任务, 不仅使基于视觉注意的表征复述加工被打断, 而且也可能使基于执行控制的注意刷新被打断, 导致优先项目和非优先项目的 VWM 表征保持均受到损害。而在我们的研究中, 通过要求被试在 VWM 保持阶段注意中央注视点变化, 当注视点亮度发

生变化时进行按键。在 25%的试次中注视点发生变化，需要被试进行按键反应，为了避免按键反应带来的影响，只对剩余 75%无按键反应试次的结果进行分析。这一次任务主要消耗了持续性视觉注意，而不消耗执行控制资源。在 VWM 保持阶段，尽管基于视觉注意的表征复述加工被打断，但优先项目的表征通过注意刷新得以保持，因此，只有非优先项目的表征受到损害，而优先项目的表征未受到损害。并且，当我们在实验 2（原实验 4）中增加优先项目数量，单个优先项目获得的工作记忆资源减少，优先项目的表征也受到损害，所得结果与 Hollingworth 和 Maxcey-Richard 一致。

根据审稿专家的意见，在总讨论中，我们结合与 Hollingworth 和 Maxcey-Richard(2013) 视觉注意任务的不同，进行如下讨论分析。

“在实验 1 中，当优先项目获得的工作记忆资源充足时，持续性视觉注意对非优先项目的 VWM 表征保持起到支持作用，而对优先项目不产生影响，这与 Hollingworth 和 Maxcey-Richard(2013)的研究结果不一致。这可能是与我们使用不同的消耗视觉注意的任务有关。Hollingworth 和 Maxcey-Richard 采用了视觉搜索任务消耗持续性视觉注意，即在视觉搜索任务中，要求被试在 8 个带有缺口的方框中搜索唯一带有水平方向缺口的目标方框，并根据目标方框的缺口方向(左、右)做出选择反应。在完成这一任务时，被试不仅需要消耗视觉注意进行目标搜索，还需要消耗执行控制资源做出选择反应。在该研究中，优先项目和非优先项目均受损的原因有可能源于持续性视觉注意和执行控制资源共同的损耗。在 VWM 保持阶段插入视觉搜索任务，不仅使基于视觉注意的表征复述加工被打断，而且也可能使基于执行控制的注意刷新被打断，导致优先项目和非优先项目的 VWM 表征保持均受到损害。而在我们的研究中，我们通过要求被试在 VWM 保持阶段注意中央注视点变化，当注视点亮度发生变化时进行按键。在 25%的试次中注视点发生变化，并要求被试进行按键反应，只对剩余 75%无按键反应试次的结果进行分析。这一次任务主要消耗了持续性视觉注意，而不消耗执行控制资源。在 VWM 保持阶段，尽管基于视觉注意的表征复述加工被打断，但优先项目的表征通过注意刷新得以保持，因此，只有非优先项目的表征受到损害。并且，当我们在实验 2（原实验 4）中增加优先项目数量，单个优先项目获得的工作记忆资源减少，优先项目的表征也受到损害，所得结果与 Hollingworth 和 Maxcey-Richard 研究一致。”

（见文中第 21 页，第 4 段，第 1-4 行和第 22 页，第 1 段，第 1-12 行）

## 参考文献

- Awh, E., & Jonides, J. (2001). Overlapping mechanisms of attention and spatial working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(3), 119-126.
- Cowan, N. (1999). An embedded-processes model of working memory. *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*, 20(506), 1013-1019.
- Emrich, S. M., Lockhart, H. A., & Al-Aidroos, N. (2017). Attention mediates the flexible allocation of visual working memory resources. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 43(7), 1454-1465.
- Fougnie, D. (2008). The relationship between attention and working memory. *New research on short-term memory*, 1, 45.
- Fu, X., Ye, C., Hu, Z., Li, Z., Liang, T., & Liu, Q. (2022). The impact of retro-cue validity on working memory representation: Evidence from electroencephalograms. *Biological Psychology*, 170, 108320.
- Gao, Z., Li, J., Wu, J., Dai, A., Liao, H., & Shen, M. (2022). Diverting the focus of attention in working memory through a perceptual task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 48(6), 876.
- Griffin, I. C., & Nobre, A. C. (2003). Orienting attention to locations in internal representations. *Journal of*

*Cognitive Neuroscience*, 15(8), 1176–1194.

- Günseli, E., Fahrenfort, J. J., van Moorselaar, D., Daoultzis, K. C., Meeter, M., & Olivers, C. N. (2019). EEG dynamics reveal a dissociation between storage and selective attention within working memory. *Scientific Reports*, 9(1), 13499.
- Hitch, G. J., Allen, R. J., & Baddeley, A. D. (2020). Attention and binding in visual working memory: two forms of attention and two kinds of buffer storage. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 82(1), 280–293.
- Hollingworth, A., & Maxcey-Richard, A. M. (2013). Selective maintenance in visual working memory does not require sustained visual attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 39(4), 1047–1058.
- Ma, W. J., Husain, M., & Bays, P. M. (2014). Changing concepts of working memory. *Nature Neuroscience*, 17(3), 347–356.
- Oberauer, K. (2002). Access to information in working memory: Exploring the focus of attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 28(3), 411.
- Panichello, M. F., & Buschman, T. J. (2021). Shared mechanisms underlie the control of working memory and attention. *Nature*, 592(7855), 601–605.
- Rerko, L., Souza, A. S., & Oberauer, K. (2014). Retro-cue benefits in working memory without sustained focal attention. *Memory & Cognition*, 42(5), 712–728.
- Souza, A. S., Czoschke, S., & Lange, E. B. (2020). Gaze-based and attention-based rehearsal in spatial working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 46(5):980–1003.
- Tas, A. C., Luck, S. J., & Hollingworth, A. (2016). The relationship between visual attention and visual working memory encoding: A dissociation between covert and overt orienting. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 42(8), 1121–1138.
- Zhou, Y., Curtis, C. E., Sreenivasan, K. K., & Fougny, D. (2022). Common neural mechanisms control attention and working memory. *Journal of Neuroscience*, 42(37), 7110–7120.
- 

## 第二轮

**审稿人 1 意见：**作者对我上一轮审稿意见进行了比较详细认真的回复，对论文也相应进行了比较合适的修改，推荐发表。

**审稿人 2 意见：**作者基本解答了我的问题，建议发表。

**编委意见：**根据评审专家的意见，建议发表。

**主编意见：**同意发表，还有以下问题需要修改：文中存在一些文字表述不规范，如“结果发现”，“优先项目的促进效应广泛存在，但是，VWM 项目优先加工的机制是什么？尚不清楚。”、“然而，在 VWM 中同时存储优先项目和非优先项目时大脑活动机制是什么？尚不清楚。”等，还需要仔细检查、修改。

**回应：**非常感谢主编老师的认可与修改意见！根据您的建议，我们针对文中存在的文字表述不规范问题，进行了修改。一些具体的问题修改如下。

将“结果发现”修改为“结果显示”

将“优先项目的促进效应广泛存在，但是，VWM 项目优先加工的机制是什么？尚不清楚。”修改为“优先项目对 VWM 加工的促进效应广泛存在，然而，优先项目促进 VWM 加工

的机制，尚不清楚。”

将“然而，在 VWM 中同时存储优先项目和非优先项目时大脑活动机制是什么？尚不清楚。”修改为“然而，在 VWM 中同时存储优先项目和非优先项目时大脑活动的机制，尚需进一步探讨。”

其他修改见文中的蓝色字体部分。