

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：视觉工作记忆离线态表征具有稳固性优势

作者：李子媛，任国防，袁子昕，喻青青，伍越，刘强

第一轮

审稿人 1 意见：

作者基于工作记忆多状态存储模型，探究在相同认知加工下，不同存储态的记忆表征(在线态 vs. 离线态)是否具有同等的稳固性能。通过两个行为实验，在记忆维持期间呈现干扰刺激或者调控维持时长，结果证明离线态表征相对于在线态表征具有稳固性优势。该研究系统地探究不同存储态的表征性质，具有一定的理论价值和意义，但是仍然存在一些问题需进一步改善。

意见 1：为探究相同认知加工对不同存储态记忆表征的影响，作者采用序列呈现范式，认为阵列 2 呈现之后，两个阵列分别表示在线态记忆和离线态记忆，以此为基础，调控干扰物呈现和维持时间，进而探究不同存储态记忆表征如何被影响，研究结论成立的前得是两个记忆阵列的存储态分离，然而，在这种记忆任务下，仅从行为层面作者为什么推定序列呈现的记忆阵列进入不同的状态存储。

回应：感谢审稿专家。首先，以往研究者采用该序列记忆任务范式的同时结合 EEG 技术记录被试进行认知任务时的脑电信号，并分析对存储项目数量较为敏感的 CDA 成分。结果发现，当两个阵列之间有足够的延迟间隔时，在阵列 2 呈现之后的延迟间隔期间，CDA 波幅只追踪阵列 2 的项目数量，而不是两个记忆阵列项目数量的叠加 (Li et al., 2020; Zhang et al., 2022)。由于阵列 1 最终会被探测，那么阵列 1 神经活动的消失则意味着其以离线态模式进行存储。其次，从行为成绩上来看，阵列 1 (离线态) 的记忆成绩与阵列 2 (在线态) 的记忆成绩有显著差异。这说明两个记忆阵列以不同存储模式进行信息维持。最后，根据工作记忆状态理论模型，阵列 2 出现后，当前主要任务是在线加工阵列 2 和随后对阵列 2 的记忆探测，在此期间，阵列 1 为“当前任务无关项”，这一特性也使阵列 1 进入离线态进行短暂维持。

综上，在当前采用的序列呈现记忆任务范式中，可认为记忆项目进入不同存储态进行信息维持。

Li, Z., Zhang, J., Liang, T., Ye, C., & Liu, Q. (2020). Interval between two sequential arrays determines their storage state in visual working memory. *Science Reports*, 10(1), 7706. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64825-4>

Zhang, J., Ye, C., Sun, H.-J., Zhou, J., Liang, T., Li, Y., & Liu, Q. (2022). The passive state: A protective mechanism for information in working memory tasks. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 48(9), 1235-1248. <https://doi.org/10.1037/xlm0001092>

意见 2: 从行为成绩层面来看, 对于处于随机水平的记忆成绩很难被其他无关因素干扰, 因此成绩上不会显示出明显的下降。而对于当前的离线态成绩, 其显著低于在线态成绩。那么离线态成绩不受干扰是否由于地板效应? 所有被试成绩是否均显著高于随机水平(0.5)?

回应: 感谢审稿专家。由于状态切换伴随有记忆损耗, 因此维持与在线态相同负荷的离线态记忆成绩要低于在线态成绩。从行为结果上看, 离线态成绩不仅显著高于随机水平, 且都高于 60%。在当前的记忆表现水平上, 仍然存在成绩受损的空间。此外, 根据被试的试后反馈信息可知, 两个记忆阵列在主观上都能够被成功编码进入工作记忆系统。因此, 如果离线态表征稳固性弱, 将会表现出显著的记忆成绩下降。

意见 3: 作者使用序列呈现任务呈现记忆刺激, 对于阵列 2 来说, 其可能会受到前面呈现的阵列 1 的干扰影响, 即前摄干扰(PI)。这种情况下, 阵列 2 的记忆下降可能会受到前摄干扰的混淆, 而并非纯粹来自无干扰和时间衰减。

回应: 感谢审稿专家。工作记忆系统为记忆项目提供一个短暂维持和在线态操作的空间。与长时记忆不同, 工作记忆表征的一个显著特征是其能够有效抵制前摄干扰。从这方面来看, 短时记忆任务下的阵列 2 成绩下降并非来自前摄干扰的影响, 这就排除了阵列 1 影响阵列 2 在线维持的可能性。此外, 根据工作记忆多状态存储的资源分离理论, 两个存储态的记忆资源相互独立, 互不影响 (Li et al., 2021)。因此, 阵列 2 记忆成绩发生变化的原因可归结于当前所调控的变量。

Li, Z., Liang, T., & Liu, Q. (2021). The storage resources of the active and passive states are independent in visual working memory. *Cognition*, 217, 104911.

意见 4: 将阵列 1 从在线态卸载到离线态可能会导致阵列 2 巩固加工的推迟, 如果是这样, 相比于阵列 1, 阵列 2 更容易受其他无关因素的影响, 比如干扰物, 时间衰减。

回应: 感谢审稿专家。根据以往研究结果, 记忆项目存储态切换需要一定的时间, 否则会导致状态转换失败或与后续的项目加工发生叠加。基于以往关于状态转换所需时间 (大约为 1000 毫秒) (Wolff et al., 2017; LaRocque et al., 2013), 当前设定阵列 1 的呈现时间和延迟间隔的总时长为 1500 毫秒。在该时间范围内, 阵列 1 能够顺利完成状态转换。此外, 工作记忆巩固加工机制的研究表明, 单个颜色的巩固时长大约为 50 毫秒, 同时颜色刺激能够并行巩固 (Hao et al., 2018, Vogel et al., 2006)。在当前的实验设计中, 阵列 2 的呈现时间为 500 毫秒, 并且在干扰物或者探测刺激出现之前有至少 1000 毫秒的延迟间隔, 这足以阵列 2 项目充分完成巩固加工。因此, 在当前实验设定中, 阵列 2 受后续干扰因素的影响并非来自于巩固加工过程的不完善。

Wolff, M. J., Jochim, J., Akyürek, E. G., & Stokes, M. G. (2017). Dynamic hidden states underlying working-memory-guided behaviour. *Nature neuroscience*, 20(6), 864–871. <https://doi.org/10.1038/nn.4546>.

LaRocque, J. J., Lewis-Peacock, J. A., Drysdale, A. T., Oberauer, K., & Postle, B. R. (2013). Decoding attended information in short-term memory: an EEG study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25(1), 127–142. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00305

Hao, R., Becker, M. W., Ye, C., Liu, Q., & Liu, T. (2018). The bandwidth of VWM consolidation varies with the stimulus feature: Evidence from event-related potentials. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 44(5), 767-777. <https://doi.org/10.1037/xhp0000488>.

Vogel, E. K., Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2006). The time course of consolidation in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32(6), 1436-1451. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.32.6.1436>

意见 5: 在当前研究设计中, 阵列 1 被认为进入离线态进行存储。而结果显示阵列 1 记忆成绩显著低于阵列 2(短时在线记忆)的行为成绩, 阵列 1 是否从工作记忆中移除而进入长时记忆系统中。

回应: 感谢审稿专家。在工作记忆多状态存储模式下, 记忆项目的状态转换伴随着记忆损耗 (Zhang et al., 2022), 表现为离线态记忆成绩显著低于在线态成绩。关于以离线态模式进行存储的阵列 1 是否进入长时记忆这一问题, 当前尚未定论。但是, 有研究者认为离线态存储能够由长时情景记忆系统所解释 (Beukers et al., 2021)。此外, 本课题组在相关方面的一项研究结果表明, 离线态存储依赖情景记忆系统。据此, 可认为离线态是一种依靠长时情景记忆系统的一种短暂存储模式。未来研究可结合多种技术手段深化对离线态存储的认识。

Beukers, A. O., Buschman, T. J., Cohen, J. D., & Norman, K. A. (2021). Is Activity Silent Working Memory Simply Episodic Memory? In *Trends in Cognitive Sciences*, 25 (4), 284-293. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2021.01.003>

意见 6: 其中一个关键词为“稳固优先性”, 但是从题目和全篇文章来看, “稳固性优势”更为频繁出现, 且更能体现当前研究结论, 建议更换。

回应: 感谢审稿专家认真审阅。同意审稿人这一观点, 已做出相应修改。

意见 7: 圆形干扰物刺激颜色是否和记忆刺激颜色来自同一个颜色集, 请在实验流程部分详细描述。

回应: 感谢审稿专家。为避免干扰物颜色与任意一阵列的记忆颜色发生重叠, 圆形干扰刺激的颜色选择来自于不同于记忆刺激的颜色集。已在相关部分增加详细描述。

意见 8: 结果图主要显示两个不同条件下记忆成绩的变化, 建议使用线形趋势图或增加散点来展示每个被试在两种条件下的趋势走向和分布, 更直观地展示实验结果。

回应: 感谢审稿专家。我们同意您的建议, 已修改结果图片, 增加每个被试数据散点, 更直观地展示不同条件下的结果分布。

意见 9: 在 2.1.2 刺激和设备部分,“干扰刺激为圆形色块($0.28^\circ \times 0.28^\circ$), 等距分布”, 0.28° 是否为圆的直径, 如果是, 请修正表达方法。

回应: 感谢审稿专家。在关于干扰刺激描述部分, 0.28° 是圆形干扰物的直径, 已在文中完善相关表述。

意见 10: 效应量计算部分, α 的值为 0.05, 而不是 0.5, 请修正。

回应: 感谢审稿人认真审阅。已在文中修正。

.....

审稿人 2 意见:

由于本研究实验设计和实验记录手段局限性, 当前实验设计很难直接回答作者提出的研究问题。

一般性评价:

工作记忆究竟是通过持续性的在线神经激活进行短暂保持, 还是通过静默神经活动进行保持, 仍然是当前工作记忆研究中的热点问题, 本研究的作者尝试通过比较在线态与离线态工作记忆表征的稳定性, 探讨不同神经活动状态下工作记忆的稳定性。研究具有一定的新颖性和理论价值, 特别是在调节干扰刺激和延迟时间的过程中, 发现离线记忆的稳定性优于在线记忆。然而, 实验设计及记录手段的局限性使得当前研究结果是否能够直接支持这一结论存疑。具体意见如下:

意见 1: 在线态与离线态的界定: 正如作者在前言部分所述, 工作记忆的在线态与离线态的区分取决于当前信息是否被注意(attention focus)以及保持阶段神经活动是否高于基线水平。然而, 本研究仅通过行为数据, 无法直接观测记忆阵列 2 呈现后, 记忆阵列 1 相关的神经活动是否回到了基线水平, 进而处于离线态。尽管研究者尝试优先测试记忆阵列 2, 但由于测法阶段同时测试了记忆阵列 2 和阵列 1, 被试可能在延迟期间交替激活了两个阵列以确保更好的完成任务(见 Huang et al., 2018, eLife)。在这种情况下, 本研究是否还能够将阵列 2 定义为在线态, 将阵列 1 定义为离线态, 值得进一步探讨。

回应: 感谢审稿专家。首先从认知加工经济性原则的角度来看, 在我们采用的任务中, 阵列 2 出现后, 被试当前的任务变为完成阵列 2 的探测, 这时阵列 1 的记忆表征与当前任务暂时无关, 其被存储在离线态是最为经济的模式。如果阵列 1 的表征在阵列 2 维持期间, 与其交替激活, 只能是额外增加在线认知负荷。且我们之前的研究已经证明, 状态转换本身会导致记忆表征的信息损失, 因此, 切换本身也不利于更好的完成阵列 2 的探测。其次, 以往基于序列呈现序列探测的脑电研究已经证实, 在阵列 2 呈现后, 敏感于存储项目数量的 CDA 波幅只与阵列 2 的项目数量相关 (Zhang et al., 2022 的实验 3)。这一结果说明, 阵列 2 出现之后两个阵列并未交替激活, 为两个阵列存储态的真正分离提供依据。此外, 在 LaRocque 等人 (2017) 研究中, 在序列呈现两个运动朝向后的延迟期间呈现线索告知被试哪个项目将被

探测。在此期间只有与当前任务相关项目（也就是即将被探测的项目）能够从其神经激活中被成功解码，而当前无关但最终可能被探测的项目无法被解码出来。因此，在序列呈现范式中，当被试明确记忆项目的探测信息时，记忆项目的存储神经态以相对稳定的形式进行表征，而不是交替激活。

带有序列信息的两个项目是否在延迟期间进行交替激活，这可能与记忆任务类型有关。在 Huang 等人（2018）的研究中，所有记忆项目同时呈现，然后通过线索赋予项目顺序信息。经过一段延迟间隔，两个项目以同等的可能性被探测。在这种情况下，两个项目在延迟期间虽然有顺序差异，但是表征重要性相同，那么被试可能会交替激活这两个项目来更好地完成任务。

LaRocque, J. J., Riggall, A. C., Emrich, S. M., & Postle, B. R. (2017). Within-category decoding of information in different attentional states in short-term memory. *Cerebral Cortex*, 27(10), 4881-4890. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhw283>

Zhang, J., Ye, C., Sun, H.-J., Zhou, J., Liang, T., Li, Y., & Liu, Q. (2022). The passive state: A protective mechanism for information in working memory tasks. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 48(9), 1235-1248. <https://doi.org/10.1037/xlm0001092>

意见 2: 干扰刺激的时间效应: 在实验一的结果中，作者观测到干扰刺激对阵列 2 的影响更大，并据此认为阵列 2 的稳定性不如阵列 1。然而，阵列 2 与干扰刺激之间的时间间隔较短，而阵列 1 与干扰刺激之间的时间间隔较长，因此阵列 1 更不易受到干扰，而阵列 2 更易受到干扰的结果，可能部分来源于后摄干扰(reactive interference)的时间效应。此外，由于阵列 1 已经经历了阵列 2 的干扰，这可能导致后续实验中的干扰刺激对阵列 1 的影响不明显。作者需进一步阐明这些因素对结果的潜在影响。

回应: 感谢审稿专家。基于当前实验设定和行为结果，可知两个阵列进入不同的存储态进行信息维持。Zhang et al., (2022) 的实验已经证明，在阵列 2 呈现之前，对阵列 1 的记忆维持诱发持续的记忆相关脑电成分—CDA，这表明在阵列 2 出现之前，阵列 1 的信息一直维持在在线态。只有在阵列 2 呈现时，阵列 1 的表征才被转换到离线态。因此，阵列 1 的离线态表征和阵列 2 的在线态表征出现的时间应该是近似同步的。从这个角度来讲，能够排除后摄干扰的时间效应。已在文中增添相关内容（2.3 结果讨论），并用蓝色标出。

意见 3: 实验设计建议:

与第二点相关，研究者可以采用 retrocue 范式，选择性激活阵列 1 或阵列 2，使其处于在线态，并辅以神经指标，来对比在线态与离线态的记忆稳定性。这一设计能够更好地控制混淆因素，提升实验结论的可信度。

回应: 感谢审稿专家。retrocue 范式是一个能够有效调控记忆项目存储态的实验范式，一定程度上规避某些缺陷。但是，针对当前研究问题，retrocue 范式似乎并不可取。具体来说，如果采用 retrocue 来分离记忆表征存储态，那么线索出现之前所有项目同时呈现。由于个体

工作记忆有容量限制，为保证所有记忆项目被成功编码，项目数量应该限制在 4 左右。如果记忆负荷为 4，线索呈现后的在线态和离线态分别为 2。在这种负荷设定下，不同存储态的记忆成绩会出现天花板效应，因此很难观察到记忆成绩的变化。如果项目数量大于 4，那么记忆项目的表征质量差，出现地板效应；或者部分项目未被编码进工作记忆系统，使随后进入不同存储态的记忆表征不对等。鉴于 retrocue 范式可能存在的以上缺点，目前我们采用的序列呈现范式似乎可以更好地阐明所研究的问题。未来我们将结合脑电技术来对工作记忆多状态存储展开深入研究，进一步明晰其存储机制。

意见 4: 时间间隔效应:在实验二中，作者对比了不同延迟时间对阵列 1 和阵列 2 的影响，结果显示延迟时间对阵列 2 的影响更大。然而，与实验一类似，阵列 1 从学习到测试的时间间隔较长，而阵列 2 的间隔较短，根据记忆遗忘曲线，记忆在早期阶段的遗忘速率更快，因此时间间隔(1s/3s)可能对阵列 2 的影响重大。这一时间效应同样需要进一步厘清。采用 retrocue 范式可能有助于解决这一潜在的混淆因素。

回应: 感谢审稿专家。关于 retrocue 范式缺陷，请看意见 3 回复。另外，关于当前考察在线态 vs. 离线态记忆表征的稳固性特征，记忆表征所处认知加工过程的时间量级是几秒钟，而记忆遗忘曲线涉及的时间跨度是分钟或天，因此，当前 1 秒 vs. 3 秒的延迟间隔不适应这一遗忘规律。此外，Zhang et al., (2022) 的实验已经证明，在阵列 2 呈现之前，对阵列 1 的记忆维持诱发持续的记忆相关脑电成分 CDA，这表明在阵列 2 出现之前，阵列 1 的信息一直维持在在线态。只有在阵列 2 呈现时，阵列 1 的表征才被转换到离线态。因此，阵列 1 的离线表征和阵列 2 的在线表征出现的时间应该是近似同步的。从这个角度来讲，也可以排除审稿专家所提出的混淆因素。

第二轮

审稿人 1 意见: 作者很好地回答了本人提出的问题，本轮没有意见。建议发表。

审稿人 2 意见:

感谢作者详尽的回复，并提供了前期发表的相关研究成果。经过仔细研读，我接受作者关于实验设计的解释，即在阵列 2 出现后，阵列 1 进入了离线状态的观点。然而，在此基础上，我仍对该研究的主要结论存有疑问:阵列 1 经过从在线到离线的切换已经引发了记忆的部分损耗，导致离线状态下的记忆表现相对较差。在这种情况下，已经衰减的记忆是否对后续的时间衰减和干扰刺激更不敏感?如何排除在线态与离线态记忆成绩本身上的差异对随时间衰退和对干扰敏感性的影响?

回应: 感谢审稿专家提出宝贵问题。在当前研究中，当两个记忆阵列都包含 4 个记忆项目时，

状态切换造成的损耗导致阵列 1(即离线态记忆)记忆表现相对较差, 由此可能使阵列 2 的成绩对无关干扰和时间衰减不敏感。据此, 为增加当前结论的可靠性, 我们在原有实验 1 和 2 的基础上分别增加两个实验, 分别作为实验 1b 和实验 2b。在这两个新增实验中, 阵列 1 的记忆负荷降低至 2 个项目来提高其记忆表现, 而阵列 2 仍然包含 4 个项目。这样使得离线态与在线态成绩水平相当。结果发现, 当两个存储态的记忆表现无显著差异时, 仍然观察到阵列 1 的离线态表征在抵制无关干扰和时间衰减方面具有稳固性优势。

第三轮

审稿人 2 意见: 作者新补充的实验已经很好地回答了我的疑问, 建议发表

编委意见: 根据两位外审专家的意见, 建议发表

主编意见:

稿件存在以下问题:

1、实验 1a 和 1b 呈现方式显得很混乱, 包括过程、结果等。如果作为两个独立实验, 就将所有内容分开写, 包括方法、结果合讨论等。如果将两个放在一起, 那么, 就所有部分合在一起。实验 2a 和 2b 呈现方式也存在同样问题。

回应: 感谢编辑。针对这一问题, 我们将实验 1a/1b 作为实验 1 的两部分呈现, 实验 2a/2b 作为实验 2 的两部分呈现。如下:

2 实验 1 : 无关干扰对不同存储态记忆表征的影响

2.1 实验 1a

...

2.2 实验 1b

....

3 实验 2: 时间衰减对不同存储态记忆表征的影响

3.1 实验 2a

...

3.2 实验 2b

....

2、实验 1a 中, 将描述统计结果放在“2.2 数据分析”中, 而将统计分析结果放在“2.3 结果讨论”中。“数据分析”与“结果讨论”是什么关系? 另外, 在 2×2 方差分析中, 两个主效应都显著, 却只用“ $F_s > 17.903, ps < 0.001, \eta^2 s > 0.382$ ”方式描述, 也不太规范, 应该分开报告具体值。其他实验也存在同样问题。

回应：感谢编辑，已修正以上问题。我们将分析方法和分析结果数值放在“数据分析和结果”中。所有实验的方差分析结果分别报告了具体值。

3、建议将总讨论加上小标题，以方便读者阅读。

4、文字表述即标点符号存在不规范。

回应：感谢编辑。在总讨论部分针对段落要点加上相应小标题。文章中的文字表述和标点符号已修正规范。