

注意对视觉工作记忆的静态与动态调节机制综述

王梦如

苏州大学教育学院, 江苏 苏州

收稿日期: 2025年12月16日; 录用日期: 2026年1月5日; 发布日期: 2026年1月19日

摘要

视觉工作记忆(Visual Working Memory, VWM)是个体认知系统的核心成分,其表现受到注意控制的密切调节。传统研究主要从静态的特质角度出发,认为个体的注意过滤能力决定了VWM的容量限制。然而,近年来的研究指出,注意并非稳定的资源,而是具有逐时刻波动的特性。文章首先回顾了VWM的理论模型及注意过滤机制的经典研究;随后,重点综述了基于持续性注意波动的最新研究进展。通过实时触发范式结合行为与瞳孔测量指标的研究发现,注意状态的瞬时波动与VWM存在同步共变关系:高注意状态预示着更好的记忆表现,而低注意状态则与更差的记忆表现相关。这一动态视角不仅解释了VWM表现的个体内差异,也为揭示注意与记忆共享认知资源提供了证据。未来研究可以围绕挖掘更灵敏、更可靠的追踪注意状态指标、深入揭示注意与VWM相互作用的时间进程,以及应用闭环神经调控技术改善个体的注意等方向展开。

关键词

视觉工作记忆, 注意过滤, 持续性注意, 注意波动

A Review of the Static and Dynamic Modulation of Visual Working Memory by Attention

Mengru Wang

School of Education, Soochow University, Suzhou Jiangsu

Received: December 16, 2025; accepted: January 5, 2026; published: January 19, 2026

Abstract

Visual working memory (VWM) is a core component of the human cognitive system, and its performance is tightly regulated by attentional control. Traditional research has primarily adopted a static,

trait-based perspective, proposing that individual differences in attentional filtering ability determine the capacity limits of VWM. In recent years, however, accumulating evidence suggests that attention is not a stable resource but instead fluctuates dynamically over time. The present review first summarizes classic research on theoretical models of VWM and attentional filtering mechanisms, and then focuses on recent advances that adopt a dynamic perspective by examining moment-to-moment fluctuations in sustained attention. Studies employing real-time triggering paradigms in combination with behavioral and pupillometric measures have demonstrated a synchronous co-variation between instantaneous attentional states and VWM performance: periods of heightened attention reliably predict enhanced memory performance, whereas lapses in attention are associated with poorer memory outcomes. This dynamic framework not only accounts for intra-individual variability in VWM performance but also provides converging evidence that attention and memory draw on shared cognitive resources. Future research may benefit from developing more sensitive and reliable indices for tracking attentional states, elucidating the temporal dynamics of attention-VWM interactions, and exploring the application of closed-loop neuromodulation techniques to improve attentional regulation.

Keywords

Visual Working Memory, Attentional Filtering, Sustained Attention, Attentional Fluctuation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

视觉工作记忆(Visual Working Memory, VWM)作为短时维持与操作视觉信息的核心系统,与注意密切相关。例如,在需要选择性加工或抑制干扰时,注意决定了哪些信息能够进入VWM中。传统研究多从总体关联的角度探讨注意控制与VWM容量的关系,例如注意过滤效率如何影响记忆的最大容量。然而,最新研究强调,注意并非稳定资源,而是具有逐时刻波动的特性(Esterman & Rothlein, 2019)。这种波动可能对VWM的编码与维持产生即时影响。近年来,一类采用实时触发技术的研究为注意与VWM的同步共变提供了证据,使其从静态的总体关系延伸至动态的时间维度(deBettencourt et al., 2019; Keene et al., 2022)。本文旨在系统梳理注意与VWM关系的研究进展,重点关注持续性注意的动态波动如何影响VWM表现,为理解注意与工作记忆系统的动态耦合机制提供新的思路。

2. VWM的界定与理论

2.1. VWM的界定

工作记忆(Working Memory, WM)是个体在短时间内维持并操纵记忆信息的能力,在便于后续认知加工的同时也避免新输入的感知信息的干扰(Baddeley, 2012)。工作记忆系统包括四个主要成分:情景缓冲器、语音环路、视觉空间模板和中央执行系统(Baddeley, 2000)。VWM是工作记忆的一个重要组成部分,用于储存和操纵视觉形象,使我们在短时间内记住身边的各种视觉信息,如颜色、形状和方向等。

2.2. VWM的理论

VWM容量是指个体在短时间内能够保持的视觉信息量,其与个体的流体智力及整体认知表现存在显著的正相关(Alloway & Alloway, 2010)。然而,关于VWM容量限制的本质,研究者提出了不同的看法。

早期的插槽模型认为, VWM 由固定数量(通常为 3~4 个)的离散存储单元组成(Cowan, 2001; Luck & Vogel, 1997)。在该框架下, 项目是以“全或无”的方式进行存储的: 如果项目数量未超过容量上限, 则物体被完整存储; 一旦超出, 未获得插槽的物体则完全无法被记忆, 导致随机猜测行为。相对地, 连续资源理论提出 VWM 依赖于一个有限的、可连续分配的认知资源池(Bays & Husain, 2008; Wilken & Ma, 2004)。根据该理论, 资源可以灵活地在所有记忆项目间分配。随着记忆负荷增加, 分配给每个项目的资源量减少, 导致记忆表征的信噪比降低, 从而使回忆精度逐渐下降。

由于插槽模型与资源模型在解释不同类型的实验现象时均存在局限, 研究者分别沿着不同理论路径对原有模型进行了修正。首先, 针对插槽模型难以解释“为何少量项目时记忆更精准”的问题, Zhang 和 Luck (2008)提出了“离散表征模型”。该模型修正了传统观点, 认为当记忆项目少于插槽数量时, 多个插槽可以联合存储同一个项目, 通过平均化多重表征来提升记忆精度。这一修正虽然保留了离散的项目上限, 但引入了资源分配的灵活性特征。其次, 针对资源模型在解释“为何高负荷下会出现类似猜测的反应”时的困难, van den Berg 等人(2012; 2014)提出了可变精度模型。该模型挑战了传统资源理论中“资源在项目间平均分配”的假设, 认为记忆精度不仅随项目数量的增加而下降, 而且在不同试次和不同项目间存在随机波动。根据该模型, 所谓的“猜测”并非由于插槽用尽, 而是因为在某些试次中, 分配给该项目的精度极低, 导致反应分布呈现出长尾特征。进一步的模型比较研究显示, 可变精度模型往往比单纯的插槽模型或等量资源模型能更准确地拟合延迟任务中的记忆误差分布(Fougnie et al., 2012; van den Berg et al., 2012; van den Berg, 2014)。

此外, 当前的研究方法已不仅局限于计算容量 K 值, 而是更多地采用连续报告范式, 通过分析反应误差的分布形状来检验模型。例如, 离散表征模型预测误差分布由高斯分布(记忆)和均匀分布(猜测)混合而成(Zhang & Luck, 2008); 而可变精度模型则预测误差分布是由无数个宽度不一的正态分布混合而成的(Fougnie et al., 2012; van den Berg et al., 2012)。值得注意的是, 除了精度限制外, 空间绑定错误(即记忆特征与位置的错误匹配)也被证实是导致回忆偏差的关键因素。这类错误在以往研究中被认为是随机猜测导致的, 但实际上是独立于精度的重要误差来源(van den Berg et al., 2014)。综上所述, 当前的 VWM 理论探讨已超越了简单的“插槽”与“资源”之争, 转向关注表征精度的变异性、特征绑定的可靠性以及神经资源的概率性计算机制。

3. 静态视角: 注意过滤对视觉工作记忆容量的限制

3.1. 个体容量差异的来源

Vogel 等人(2005)使用变化觉察范式, 在项目的保持期间发现了 CDA, 且 CDA 的振幅随着记忆项目数量的增大而增大, 当达到 3 到 4 个限制时, CDA 振幅趋于平稳。该研究证实了 VWM 的容量限制, 并且容量在个体间存在差异, 差异范围从 1.5 到 5 个项目。主流的观点认为 VWM 容量的个体差异有以下两个方面的来源: 第一, VWM 一次可输入的最大信息量或者可用于存储信息的“插槽”数量之间存在个体差异(Awh et al., 2007; Barton et al., 2009)。第二, 过滤效能假说认为注意控制感觉信息进入 VWM 系统, 当任务无关信息占用了 VWM 存储容量时, 任务相关信息的存储容量减少。因此, 低容量的个体相比高容量个体存在过滤无关信息的困难(Cowan & Morey, 2006; Shipstead et al., 2014; Unsworth et al., 2014)。

3.2. 注意过滤效率与神经电生理指标

Gaspar 等人(2016)根据变化觉察范式测得的 VWM 容量对被试进行高、低容量分组, 然后要求被试执行视觉搜索任务, 结果发现目标诱发的 N2pc 成分在两组之间无显著差异, 而干扰物诱发的 Pd 成分则与个体的 VWM 容量呈显著正相关, 这一结果揭示了低容量个体与高容量个体在目标的选择方面无差异,

而是体现在能否有效地抑制干扰物方面。此外,还有研究采用变化觉察范式,结合行为表现以及记忆保持期间的 CDA 成分来考察低容量个体的背后机制(Lee et al., 2010; Vogel et al., 2005)。在这个范式中记忆屏的设置通常有以下三种条件:2 个目标和 2 个干扰物、2 个目标、4 个目标,被试的任务是记忆线索侧的目标,之后判断探测屏呈现的项目是否与记忆屏相同。Vogel 等人(2005)的研究发现高容量组在 2 个目标和 2 个干扰物条件下的 CDA 振幅与 2 个目标条件下的 CDA 振幅无差异,说明这些个体可有效过滤干扰项,以防止不相关项目占用 VWM 存储空间。而低容量组在 2 个目标和 2 个干扰物条件下的 CDA 振幅与 4 个目标条件下的 CDA 振幅无差异,说明这些个体无法有效抑制无关干扰信息,而是将其一并储存至 VWM 中。另一项研究探讨了帕金森患者和健康被试(即不同群体间) VWM 容量存在差异的原因,在行为和脑电数据上都发现了帕金森患者相比健康被试存储容量和过滤能力亏损的证据(Lee et al., 2010)。

4. 持续性注意的界定、测量与时间波动特性

持续性注意是指个体在面对连续、重复的刺激时,维持对刺激的专注以及有意识处理这些刺激的能力,注意波动是持续性注意的基本特征之一(Esterman & Rothlein, 2019)。连续操作任务(Continuous Performance Tasks, CPTs)是持续性注意研究的经典范式,在这类任务中,通常给被试呈现一系列刺激,要求被试对刺激流中的罕见目标进行按键反应,注意的波动通常由按键的正确率和反应时来衡量。上述任务中被试多数时间不需要进行反应,因此可能无法全面地捕捉到注意波动。持续性注意任务(Sustained Attention to Response Tasks, SARTs)则要求被试对所有的频繁刺激进行按键反应,对于罕见刺激不作反应,通过被试对于频繁刺激的反应时和反应时变异性来衡量注意波动。越快的反应时指示被试处于一种非注意的状态,此时被试更依赖于习惯化或者无意识的反应而非对于刺激的加工(Unsworth et al., 2014)。值得注意的是,在上述两种持续性注意任务中,随着时间的推移,个体的任务表现趋于下降,这种现象被称为“警觉性下降”(Mackworth, 1948)。但即便是在警觉性缓慢下降的基础上,指示注意状态的行为指标(正确率、反应时、反应时的变异性)也揭示了注意如何在较短的时间尺度上(从几秒到几十秒)动态波动(Terashima et al., 2021)。

5. 动态视角:注意波动与视觉工作记忆的同步共变

以往关于注意控制与 VWM 关系的研究主要聚焦于注意过滤能力对于 VWM 容量的调节,这对于揭示注意与工作记忆之间的总体关系具有重要意义(Oberauer, 2019)。然而,这些研究大多忽视了注意逐时刻波动的特性(Esterman & Rothlein, 2019)。需要指出的是,即便在总体水平上观察到注意与工作记忆之间存在正相关关系,这种相关性也并不意味着二者在每一时刻均保持稳定一致。注意的波动可能构成注意与工作记忆之间关系中的一个独特成分,并对个体的记忆内容产生深远的影响(Adam & deBettencourt, 2019)。

5.1. 基于反应时的注意状态对记忆的预测

deBettencourt 等人(2018)通过持续性注意任务和惊喜记忆任务(先进行视觉持续性注意任务,再进行惊喜记忆任务)对持续性注意和记忆之间的关系展开研究,结果发现持续性注意的反应时指标(刺激呈现前 3 个试次的平均反应时)能预测项目的后续记忆表现,说明了反应时作为注意状态指标预测记忆任务表现的可靠性。更重要的是,该研究建立了注意状态与记忆之间的关系,一个项目在注意状态好的时候呈现,相比注意状态不好的时候,在随后的记忆任务中更容易被辨别出。此外,deBettencourt 等人(2018)首次根据反应时的变异(高于平均值一个标准差或者低于平均值一个标准差)操纵插入图片的类别,通过采用这种实时触发设计更直接地评估注意状态和随后记忆之间的关系,为持续性注意可以控制记忆编码的说法提供了更有力的支持。但是,deBettencourt 等人(2018)研究中对记忆的探测完全独立于注意任务,那么被试对于记忆的任务表现可能会受到时间、被试情绪和状态等因素的影响,无法建立起注意和记忆表

现之间更加可靠的联系。

5.2. 实时触发范式下的注意与工作记忆耦合机制

后续研究采用视觉持续性注意任务和视觉全部报告法的混合任务对持续性注意与工作记忆容量间的关系进行直接考察(deBettencourt et al., 2019)。在混合任务中, 被试需要判断视觉屏上呈现的是圆形(出现概率为 90%)还是方块(出现概率为 10%), 同时进行不同的按键反应, 并记忆这些项目的颜色。在任务过程中随机出现记忆探测屏, 被试需要回忆报告刚刚记住的最新颜色。研究结果发现, 在快工作记忆探针条件下, 被试的工作记忆任务表现差于慢工作记忆探针条件, 这说明较快的反应时指示较低的注意状态, 从而预测较差的工作记忆任务表现。该研究发现随着时间的推移, 注意和工作记忆容量在个体间和个体内都是共同波动的。此外, 虽然瞳孔大小(唤醒指标)可以追踪注意状态, 但研究发现仅有基于反应时的注意状态能预测 VWM 容量, 而瞳孔大小不能。这说明视觉注意与 VWM 容量的共变关系具有特异性, 并非仅仅源于一般唤醒水平的波动, 而是反映了一种共享的、与更高水平认知加工有关的认知资源(Keene et al., 2022)。

6. 总结与展望

本文系统综述了持续性注意与 VWM 之间的关系, 重点聚焦于注意动态波动对 VWM 的即时影响。经典研究揭示了 VWM 的容量限制及其与注意过滤能力的密切联系, 而最新的实时触发范式进一步强调: 注意的瞬时状态影响 VWM 表现。当注意处于高水平时, 个体能够储存更多的视觉信息; 而在低注意状态下, 即使外部刺激完全相同, 个体的工作记忆表现却更差。在此基础上, 后续研究进一步排除了注意与记忆同步波动仅源于一般唤醒水平变化的解释, 揭示了注意与 VWM 共享认知资源。尽管现有研究已有重要进展, 但仍存在若干局限。首先, 虽然反应时成功地区分了注意好和坏的瞬间, 但是反应时可能并不是一个完美的注意状态测量指标, 容易受到动作准备、决策等非注意因素的影响, 未来研究可以纳入注意波动的神经特征(例如, 多元分类或者眼动追踪)进一步表征注意与工作记忆之间的关系。此外, 虽然当前研究发现注意与 VWM 存在协同共变的关系, 但是尚不清楚这种共变关系发生于 VWM 的哪个阶段(例如, 记忆编码、延迟、提取), 之后可以进一步探究注意波动与 VWM 相互作用的时间进程。最后, 在应用层面上, 未来可以结合闭环神经调控或者闭环神经反馈技术对个体的注意状态进行实时干预, 以保障核心认知任务的高质量完成。

参考文献

- Adam, K. C. S., & deBettencourt, M. T. (2019). Fluctuations of Attention and Working Memory. *Journal of Cognition*, 2, Article No. 33. <https://doi.org/10.5334/joc.70>
- Alloway, T. P., & Alloway, R. G. (2010). Investigating the Predictive Roles of Working Memory and IQ in Academic Attainment. *Journal of Experimental Child Psychology*, 106, 20-29. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.11.003>
- Awh, E., Barton, B., & Vogel, E. K. (2007). Visual Working Memory Represents a Fixed Number of Items Regardless of Complexity. *Psychological Science*, 18, 622-628. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.01949.x>
- Baddeley, A. (2000). The Episodic Buffer: A New Component of Working Memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 417-423. [https://doi.org/10.1016/s1364-6613\(00\)01538-2](https://doi.org/10.1016/s1364-6613(00)01538-2)
- Baddeley, A. (2012). Working Memory: Theories, Models, and Controversies. *Annual Review of Psychology*, 63, 1-29. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120710-100422>
- Barton, B., Ester, E. F., & Awh, E. (2009). Discrete Resource Allocation in Visual Working Memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35, 1359-1367. <https://doi.org/10.1037/a0015792>
- Bays, P. M., & Husain, M. (2008). Dynamic Shifts of Limited Working Memory Resources in Human Vision. *Science*, 321, 851-854. <https://doi.org/10.1126/science.1158023>
- Cowan, N. (2001). The Magical Number 4 in Short-Term Memory: A Reconsideration of Mental Storage Capacity. *Behavioral*

- and *Brain Sciences*, 24, 87-114. <https://doi.org/10.1017/s0140525x01003922>
- Cowan, N., & Morey, C. C. (2006). Visual Working Memory Depends on Attentional Filtering. *Trends in Cognitive Sciences*, 10, 139-141. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.02.001>
- deBettencourt, M. T., Keene, P. A., Awh, E., & Vogel, E. K. (2019). Real-Time Triggering Reveals Concurrent Lapses of Attention and Working Memory. *Nature Human Behaviour*, 3, 808-816. <https://doi.org/10.1038/s41562-019-0606-6>
- deBettencourt, M. T., Norman, K. A., & Turk-Browne, N. B. (2018). Forgetting from Lapses of Sustained Attention. *Psychonomic Bulletin & Review*, 25, 605-611. <https://doi.org/10.3758/s13423-017-1309-5>
- Esterman, M., & Rothlein, D. (2019). Models of Sustained Attention. *Current Opinion in Psychology*, 29, 174-180. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2019.03.005>
- Fougnie, D., Suchow, J. W., & Alvarez, G. A. (2012). Variability in the Quality of Visual Working Memory. *Nature Communications*, 3, Article No. 1229. <https://doi.org/10.1038/ncomms2237>
- Gaspar, J. M., Christie, G. J., Prime, D. J., Jolicoeur, P., & McDonald, J. J. (2016). Inability to Suppress Salient Distractors Predicts Low Visual Working Memory Capacity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113, 3693-3698. <https://doi.org/10.1073/pnas.1523471113>
- Keene, P. A., deBettencourt, M. T., Awh, E., & Vogel, E. K. (2022). Pupillometry Signatures of Sustained Attention and Working Memory. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 84, 2472-2482. <https://doi.org/10.3758/s13414-022-02557-5>
- Lee, E. Y., Cowan, N., Vogel, E. K., Rolan, T., Valle-Inclan, F., & Hackley, S. A. (2010). Visual Working Memory Deficits in Patients with Parkinson's Disease Are Due to Both Reduced Storage Capacity and Impaired Ability to Filter Out Irrelevant Information. *Brain*, 133, 2677-2689. <https://doi.org/10.1093/brain/awq197>
- Luck, S. J., & Vogel, E. K. (1997). The Capacity of Visual Working Memory for Features and Conjunctions. *Nature*, 390, 279-281. <https://doi.org/10.1038/36846>
- Mackworth, N. H. (1948). The Breakdown of Vigilance during Prolonged Visual Search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1, 6-21. <https://doi.org/10.1080/17470214808416738>
- Oberauer, K. (2019). Working Memory and Attention—A Conceptual Analysis and Review. *Journal of Cognition*, 2, Article No. 36. <https://doi.org/10.5334/joc.58>
- Shipstead, Z., Lindsey, D. R. B., Marshall, R. L., & Engle, R. W. (2014). The Mechanisms of Working Memory Capacity: Primary Memory, Secondary Memory, and Attention Control. *Journal of Memory and Language*, 72, 116-141. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2014.01.004>
- Terashima, H., Kihara, K., Kawahara, J. I., & Kondo, H. M. (2021). Common Principles Underlie the Fluctuation of Auditory and Visual Sustained Attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 74, 705-715. <https://doi.org/10.1177/1747021820972255>
- Unsworth, N., Fukuda, K., Awh, E., & Vogel, E. K. (2014). Working Memory and Fluid Intelligence: Capacity, Attention Control, and Secondary Memory Retrieval. *Cognitive Psychology*, 71, 1-26. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2014.01.003>
- van den Berg, R., Awh, E., & Ma, W. J. (2014). Factorial Comparison of Working Memory Models. *Psychological Review*, 121, 124-149. <https://doi.org/10.1037/a0035234>
- van den Berg, R., Shin, H., Chou, W., George, R., & Ma, W. J. (2012). Variability in Encoding Precision Accounts for Visual Short-Term Memory Limitations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109, 8780-8785. <https://doi.org/10.1073/pnas.1117465109>
- Vogel, E. K., McCollough, A. W., & Machizawa, M. G. (2005). Neural Measures Reveal Individual Differences in Controlling Access to Working Memory. *Nature*, 438, 500-503. <https://doi.org/10.1038/nature04171>
- Wilken, P., & Ma, W. J. (2004). A Detection Theory Account of Change Detection. *Journal of Vision*, 4, 1120-1135. <https://doi.org/10.1167/4.12.11>
- Zhang, W., & Luck, S. J. (2008). Discrete Fixed-Resolution Representations in Visual Working Memory. *Nature*, 453, 233-235. <https://doi.org/10.1038/nature06860>