

# 视觉工作记忆中数量和精度的权衡关系是否受个体自发控制

何广浩<sup>1</sup>, 刘昕旻<sup>1</sup>, 郭利静<sup>1</sup>, 周子芳<sup>1</sup>, 叶超雄<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>四川师范大学脑与心理科学研究院, 四川 成都

<sup>2</sup>于韦斯屈莱大学心理学系, 芬兰 于韦斯屈莱

收稿日期: 2021年9月21日; 录用日期: 2021年10月12日; 发布日期: 2021年10月22日

## 摘要

视觉工作记忆中记忆表征的数量和精度之间存在着负相关, 这种负相关关系被视为数量和精度之间的权衡。但这一权衡过程是完全由刺激驱动, 还是个体可以根据任务需求自发进行控制尚不清楚, 由此引发了关于记忆资源分配机制的一场争论。本文系统地梳理了数量和精度的权衡关系是否受个体自发控制相关研究的发展历程, 指出了影响个体能否自发进行控制受到记忆项目呈现时间及个体视觉工作记忆容量的影响, 最后就未来研究仍需解决的问题提出进一步的建议。

## 关键词

视觉工作记忆, 数量, 精度, 自发控制

# Whether the Trade-Off between Quantity and Quality in Visual Working Memory Is under Individual Voluntarily Control?

Guanghao He<sup>1</sup>, Xinyang Liu<sup>1</sup>, Lijing Guo<sup>1</sup>, Zifang Zhou<sup>1</sup>, Chaoxiong Ye<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Brain and Psychological Sciences, Sichuan Normal University, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>Department of Psychology, University of Jyväskylä, Jyväskylä Finland

Received: Sep. 21<sup>st</sup>, 2021; accepted: Oct. 12<sup>th</sup>, 2021; published: Oct. 22<sup>nd</sup>, 2021

## Abstract

There is a negative correlation between the quality and quantity of memory representations in

\*通讯作者。

文章引用: 何广浩, 刘昕旻, 郭利静, 周子芳, 叶超雄(2021). 视觉工作记忆中数量和精度的权衡关系是否受个体自发控制. *心理学进展*, 11(10), 2323-2331. DOI: 10.12677/ap.2021.1110264

visual working memory, and this negative correlation is seen as a trade-off between quantity and quality. However, it is unclear whether this trade-off is entirely stimulus-driven or can be controlled voluntarily by individuals according to task demands, which has led to a debate on the mechanism of memory resource allocation. This paper systematically reviews the development of research on whether the trade-off between quantity and quality is subject to individual voluntary control, and point out this voluntary control is influenced by the exposure duration and working memory capacity, and some suggestions for future research are proposed.

## Keywords

Visual Working Memory, Quantity, Quality, Voluntary Control

Copyright © 2021 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

坐在地铁上窗外一闪而过的广告，虽然时间很短暂，但我们能够记住它的大概内容，这是因为我们看到的视觉信息暂时保存在了我们的视觉工作记忆(Visual Working Memory, VWM)中。视觉工作记忆是一个可以暂时储存和维持视觉信息的记忆系统，它允许个体储存来自外界的视觉输入信息，并提供储存空间作为信息缓冲平台，是人类认知系统的重要组成部分(Baddeley, 2012; Baddeley et al., 1999; Bays & Husain, 2008; Maniglia & Souza, 2020; Schurgin, 2018; Vogel, Woodman, & Luck, 2001)。通常认为视觉工作记忆的容量是有限的，估计个体视觉工作记忆的容量上限为 3~4 个，由记忆数量和记忆精度共同决定(Cowan, 2001; Luck & Vogel, 1997; Ma, Husain, & Bays, 2014; Vogel & Machizawa, 2004)。视觉工作记忆的精度指的是个体视觉工作记忆中的表征相对于原始记忆刺激的保真程度(Fukuda et al., 2010; Gorgoraptis et al., 2011)。数量和精度之间负相关的关系称之为数量和精度之间的权衡关系，早期的研究表明两者存在着一种负相关的关系，表现为随着记忆精度(记忆项目复杂性)的增加，个体能够记住的数量减少；相反记忆数量上升，记忆表征的精度就会下降(Alvarez & Cavanagh, 2004; Eng, Chen, & Jiang, 2005)，但是这种关系能否根据任务需求被个体自发控制进行改变还尚不清楚，如在记忆数量上升的时候个体能否自发通过降低数量提高记忆精度，或在记忆精度增加的时候牺牲精度从而记住更多的项目。

视觉工作记忆中有限的容量也暗示着视觉工作记忆中可供分配的记忆资源也是有限的，但视觉工作记忆同时也是一个灵活的认知系统，它能根据任务需求及时调整保留在视觉工作记忆中的记忆表征，因此才能保证认知系统的高效运行(Emrich et al., 2017; Lorenc et al., 2018)，视觉工作记忆中数量和精度的关系实则是记忆资源分配的结果(Suchow et al., 2014)，因此探讨个体能否自发地控制数量和精度的关系对于理解视觉工作记忆的灵活性及其资源分配机制是至关重要的。本文将系统地梳理视觉工作记忆中数量和精度权衡关系是否受个体自发控制研究的发展历程，接着探讨影响个体自发控制数量和精度权衡关系的可能因素，最后就未来研究仍需解决的问题提出进一步的研究建议。

## 2. 研究发展历程

记忆资源分配的结果决定了数量和精度的关系，关于个体进行记忆资源分配的方式则出现了两种不同的观点，一种观点认为，记忆资源的分配没有灵活性，每个记忆项目能获得多少记忆资源取决于总的

记忆数量,随着记忆数量的增加,每个项目可用的记忆资源越来越少,记忆精度也就越来越差,因此持这种观点的研究者认为数量和精度的权衡关系不受个体自发控制,而是由刺激数量本身驱动(Barton, Ester, & Awh, 2009),与之相反的观点认为个体可以自发灵活地分配记忆资源(Edin et al., 2009; McCants et al., 2019; Yoo et al., 2018),个体既可以将大部分记忆资源集中在几个项目上提高记忆精度也可以将记忆资源分配给尽可能多的项目提高记忆数量,这种观点对应了数量和精度的权衡关系是受个体自发控制的。因此视觉工作记忆中有关数量和质量的的关系是否受个体自发控制引发了一场关于记忆资源分配灵活性的讨论。

## 2.1. 个体无法自发改变数量和精度的关系

研究数量和精度的权衡关系是否受个体自发控制通常使用的方法是将实验划分为高精度和低精度两个不同的任务需求条件,在需求高精度的组中要求被试记得尽可能准确才能正确完成任务,低精度需求组中被试则要记得尽可能多才能正确完成任务。假如个体能够根据任务需求自发控制数量和精度的权衡关系,那么在高精度条件下个体的记忆精度应该大于低精度条件但记忆数量小于低精度条件,假如数量和精度的权衡关系不受个体自发控制,那么会发现高低精度条件下的记忆表现没有差异。Zhang 和 Luck (2008)使用一个回忆报告任务独立测量了视觉工作记忆中的数量和精度,得到了两个独立的参数指标,一个是代表记忆数量的猜测率( $P_g$ ),猜测率越小表示被试记住的项目越多,另一个指标是代表记忆精度的标准差(standard deviation, SD),标准差越小代表记忆越精确。随后 Zhang 和 Luck (2011)试图通过多种方式激励被试以较低的精度储存更多项目来诱导被试自发控制视觉工作记忆中的数量和精度的权衡关系,然而最终高低精度组之间记忆数量和精度的比较并没有发现差异,说明了即使已经拥有了足够的动机,个体还是不能自发去控制数量和精度的关系。但我们注意到这种结果模式可能是由于实验中呈现 4 种颜色已经达到了大多数个体的视觉工作记忆上限,所以就算个体有足够的动机,但也无法突破这种生理限制。

Murray 等人(2012)采用变化检测任务通过改变被试对需要记忆项目数量的期望和完成任务所需要的精度要求来研究被试能否根据任务需求自发控制数量和精度之间的权衡关系,相较于回忆报告任务的结果可以将记忆数量和精度的指标分离,变化检测任务并没有能直接衡量记忆表征精度的指标(Rensink, 2002),所以此类任务划分高低精度组是通过改变探测刺激和记忆刺激之间的变化幅度来实现的。他们的实验分别控制了被试对记忆项目数量的期望及对精度的期望,但最终的结果没有任何证据表明个体能够根据任务需求策略性地调节记忆项目数量和精度之间的权衡关系,这一结果与视觉工作记忆编码期间可以对记忆项目的优先级进行重新排序的灵活性形成了鲜明的对比,该研究结果更偏向记忆项目的数量和精度之间的权衡主要是由记忆项目的物理特征决定的。但采用变化检测任务的实验存在一个问题,它涉及除储存和维持之外的许多其他阶段,例如搜索或比较,这些额外的处理阶段可能会导致行为结果受到污染,从而对实验结果造成影响(Keshvari, van den Berg, & Ma, 2013)。

一种可以很好解决行为结果会受到污染的方法是在记忆任务的维持阶段测量事件相关电位(Event-related Potential, ERP),而其中与视觉工作记忆研究最为相关的是一种被称为对侧延迟活动(Contralateral Delay Activity, CDA)的负波(Luria et al., 2016),CDA 的振幅往往对储存的视觉信息的数量高度敏感(Gambarota & Sessa, 2019),通常被嵌入到变化检测任务中使用,以尽可能排除行为结果受到污染的情况,保证实验数据的客观性(Feldmann-Wüstefeld, 2021)。Ye 等人(2014)使用了该指标对数量和精度的权衡关系进行研究,在高精度要求的条件下,探测颜色改变成与记忆颜色高度相似的颜色,在低精度条件下颜色的改变是高度可辨别的。被试需要指出全部探测颜色相较于全部记忆颜色是否发生变化。同样的,He 等人(2015)采用了相同的实验技术和控制高低精度的方法进一步对这个问题进行了研究。两项研

究最终结果都显示精度的要求并没有对 CDA 振幅造成影响,表明精度要求的提高没有对视觉工作记忆资源的分配造成显著影响。采用变化检测任务的研究只能发现精度的随机变化,但对于精度是否可以在项目之间随意改变仍然是未知的,因此这些研究只能够表明了精度要求不影响个体可以储存项目的数量,然而还存在另一种可能性是在高精度条件下,记忆阵列中的一些项目可能以高精度储存而其他项目可能以低精度储存,这种可能性需要在进一步的研究中进行检验。

研究者最近发现数量和精度权衡关系的改变可能是其余记忆过程参与的结果或统计方法的差异造成的。*Bocincova 等人(2016)*将回忆报告任务和提示线索相结合,同时使用了混合模型和贝叶斯分析法对数据进行处理,发现混合模型观察到的个体可以自发权衡很可能是分析方法差异造成的,而不是个体自发对视觉工作记忆存储的真正影响。*Ramaty & Luria (2018)*控制了实验中的语音编码和项目呈现时间,其结果发现高低精度之间也、没有产生显著差异,认为以往研究观察到的权衡更倾向于用语音编码和视觉工作记忆向长时记忆转移的过程得以实现。

## 2.2. 个体能够自发控制数量和精度的权衡关系

*Gao 等人(2011)*通过控制探测箭头和记忆箭头变化幅度的大小划分高低精度组,实验发现了低精度条件下,四个箭头的 CDA 振幅高于两个箭头,而在高精度条件下,两者并无显著差异。表明了个体可以主动根据任务的需求提高视觉工作记忆表征的精度。该研究与 *Murray 等人(2012)*的研究都是使用了方向刺激而且通过控制方向旋转的角度划分高低精度条件,但两者结果不一致的原因可能是控制探测刺激和记忆刺激之间的变化幅度的差别,*Murray 等人(2012)*实验中方向的变化幅度相对较小,高低精度条件的可辨性相差不大,*Gao et al. (2011)*的实验中两种条件之间变化的差异更大,可辨别性也更高。

以往的研究并没有发现记忆负荷如何影响个体能否自发控制数量和精度之间关系,即使用不同的记忆负荷探究个体能否自发控制数量和精度之间的权衡关系。*Machizawa 等人(2012)*分别在高记忆负荷和低记忆负荷的条件下同时使用了行为测量和脑电测量对这一问题进行了研究,发现了只有当记忆项目的数量较低时,个体可以自发地控制保留视觉信息的精度,记忆负荷限制了在视觉工作记忆中保留项目的数量和精度能否被个体自发改变。

上述研究支持了个体能够根据任务需求自发控制数量和精度的关系,但主要的证据都来自于记忆项目较少的情况下,后续研究则进一步拓展了这些发现的适用范围,即使在记忆项目较多的时候,个体依旧能够自发控制数量和精度之间的权衡关系。*Fougnie 等人(2016)*的一项颜色回忆报告任务的研究提供了重要证据,实验中的记忆项目为 5 项,结果发现在低精度任务中拥有更低的猜测率( $P_g$ )和更高的标准差(SD),意味着在低精度任务中被试储存了更多不那么精准的表征。该结果支持当视觉工作记忆的记忆负荷超出普遍认为的视觉工作记忆上限时,编码和维护部分仍然是可以被个体自发控制的,个体可以主动牺牲精度储存更多的记忆项目。

## 3. 神经机制

最近一项对高低精度条件下大脑激活模式的研究中,在低精度实验中发现左侧外侧枕叶区域的结构与个体保持不同数量的视觉工作记忆项目的能力呈正相关,在左半球外侧枕叶复合体(lateral occipital complex, LOC)中灰质(gray matter, GM)体积较大的个体,与该区域灰质面积较小的个体相比,更容易在视觉工作记忆中保持大量项目。高精度任务中发现个体右顶叶(parietal region)的灰质体积与以高精度保留项目的能力呈正相关,同时两种任务中也发现了一些相同脑区的激活模式,在全脑分析中发现前额叶中部皮层面积在低精度和高精度任务中都与个体的表现呈正相关,这一区域的激活可能与注意资源分配情况密切相关(*Machizawa, Driver, & Watanabe, 2020*)。

## 4. 个体能否自发控制数量和精度权衡关系的影响因素

关于视觉工作记忆中数量和精度的权衡关系是否能被个体自发控制, 目前的研究充斥着大量相互矛盾的结果, 但通过对这些研究的系统梳理和分析, 发现可能存在以下因素影响个体能否自发控制数量和精度的权衡关系。

### 4.1. 刺激呈现时间

Ye 等人(2017)对视觉工作记忆资源的分配提出一个两阶段模型, 能对这些矛盾的结果进行很好的解释。两阶段模型认为在对记忆刺激的加工中, 视觉工作记忆的资源分配存在着两个不同的阶段。第一个阶段, 个体只能进行自下而上的加工, 将记忆资源分配给尽量多的目标以创造一个低精度的表征。但当时间足够使个体完成这个阶段, 那么分配可以进入到第二阶段, 这时个体可以根据任务需求重新分配视觉工作记忆资源, 通过将更多的资源分配在一个刺激上, 使得该刺激以高精度保留在视觉工作记忆上。两阶段模型认为个体能够根据任务需求自发控制数量和精度的关系, 且只能发生在记忆资源分配的第二阶段。因此, 对于一个给定的集合大小, 在无其他干扰物的情况下, 个体需要一定的时间来调整记忆资源分配方式从而自发去控制视觉工作记忆任务中的记忆项目的数量和精度的关系。

Ye 等人(2017)对两阶段模型进行了验证, 在以往研究的基础上系统控制刺激的呈现时间/刺激数量之间的临界值。结果发现在刺激数量多呈现时间短的情况下, 高低精度之间的数量和精度并未产生差异。然而, 当刺激数量较少(两个记忆刺激呈现 200 ms)或呈现时间较长(四个记忆刺激呈现 500 ms)的情况下, 高精度组比低精度组有更低的记忆数量和更高的记忆精度, 表明了个体在高精度条件下自发牺牲了一部分记忆数量换取了更高的记忆精度, 与两阶段模型预测的记忆资源分配方式一致。

表 1 总结了 9 篇有关数量和精度权衡关系已发表文章中的刺激及其主要结果。其中 22 个实验中有 20 个实验, 当每个刺激的呈现时间等于或超过 100 毫秒/项目时, 发现了个体可以在数量和精度之间进行自发权衡, 两阶段模型可以解释这种影响权衡的临界值。

**Table 1.** A summary of the studies

**表 1.** 实验总结

研究	实验	被试数目	任务类型	刺激类型	刺激数目	呈现时间	呈现时间/刺激数目(毫秒/项)	是否能自愿权衡	两阶段模型能否解释
Zhang and Luck (2011)	实验 1a	13	回忆报告任务	颜色	4	200 ms	50 ms/项	否	是
	实验 1b	13	回忆报告任务	颜色	4	200 ms	50 ms/项	否	是
	实验 2	14	回忆报告任务	颜色	4	200 ms	50 ms/项	否	是
	实验 3	10	回忆报告任务	颜色	4	200 ms	50 ms/项	否	是
	实验 4	10	回忆报告任务	颜色	6	200 ms	33.3 ms/项	否	是
Gao et al. (2011)		19	变化检测任务(CDA)	方向	2, 4	500 ms	125,250 ms/项	是	是
Murray et al. (2012)	实验 1	12	变化检测任务	方向	4	200 ms	50 ms/项	否	是
	实验 2	20	变化检测任务	方向	4	200 ms	50 ms/项	否	是
	实验 3	20	变化检测任务	方向	4	200 ms	50 ms/项	否	是
	实验 4	20	变化检测任务	方向	4	200 ms	50 ms/项	否	是

## Continued

Machizawa et al. (2012)	实验 1	20	变化检测任务	方向	2 4	200 ms 200 ms	100 ms/项 50 ms/项	是 否	是 是
	实验 2	20	变化检测任务 (CDA)	方向	2 4	200 ms 200 ms	100 ms/项 50 ms/项	是 否	是 是
Ye et al. (2014)		14	变化检测任务 (CDA)	颜色	2, 3, 4	100 ms	25~50 ms/项	否	是
He et al. (2015)	实验 1	12	变化检测任务 (CDA)	颜色	2, 4	200 ms	50~100 ms/项	否	是
	实验 2	21	变化检测任务 (CDA)	颜色	2, 4	200 ms	50~100 ms/项	否	是
Fougnie et al. (2016)	实验 1	18	回忆报告任务	颜色	5	1200 ms	240 ms/项	是	是
	补充实验	18	回忆报告任务	颜色	5	200 ms	40 ms/项	是	否
	实验 2	18	回忆报告任务	颜色	5	1200 ms	240 ms/项	是	是
Bocincova et al. (2016)		60	回忆报告任务	颜色	2, 4	150 ms	37.5~75 ms/项	否	是
Ramaty and Luria (2018)	实验 1	20	回忆报告任务	颜色	5	1200 ms	240 ms/项	是	是
	实验 2	20	回忆报告任务	颜色	5	300 ms	60 ms/项	否	是
	实验 3	20	回忆报告任务	颜色	5	1200 ms	240 ms/项	否	否

## 4.2. 个体视觉工作记忆容量差异

此外,个体视觉工作记忆能力的差异也会影响到这种记忆资源的分配(Vellage et al., 2019),许多研究已经表明了个体视觉工作记忆能力与注意力控制之间的关系,目前公认的一点是低视觉工作记忆能力者很难对视觉工作记忆中巩固和维持的内容进行注意力控制(Gaspar et al., 2016)。Ye 等人(2019)将被试分为高低容量组重新对个体能否自发控制数量和精度之间的权衡关系进行研究。实验结果首先验证了两阶段模型的预测,即无论视觉工作记忆容量如何,在呈现时间/集合大小的比率小于临界值时,个体都不能自发控制数量和精度之间进行权衡关系。但令人惊讶的是,即使在呈现时间/集合大小大于临界值的情况下,也不是所有个体都能够成功进行数量和精度之间的自发权衡,在呈现时间/集合大小临界值较高的情况下,高容量的个体可以根据任务的精度要求自发调整数量和精度之间的权衡关系,而低容量个体则无法自发控制数量和精度之间的这种权衡关系。当大多数个体在给定的集合大小下拥有足够的时间来进行数量和精度的权衡时,个体的视觉工作记忆能力与自发控制数量和精度权衡关系的能力之间呈现正相关的关系。

## 5. 未来展望

尽管当前对于个体能否自发参与视觉工作记忆中数量和精度的权衡已经形成了一些认识,但由于其矛盾的结果和尚未达成统一的结论,所以目前对数量和精度权衡关系的研究尚处于一个上升的阶段,因此依然存在一些需进一步研究的问题。

首先,数量和精度的权衡关系包含了两种形式,已有的研究集中于个体可以牺牲记忆项目的数量来提高精度,但对于个体能否通过牺牲精度来增加记忆项目的数量的研究还很少。想要进一步探寻个体是否能够通过牺牲精度来增加记忆项目的数量,未来的研究可以使被试记忆超过平均工作记忆容量上限的项目。

另外,目前的大部分研究都是使用的 Zhang 和 Luck (2008)提出的两成分混合模型将精度指标和数量指标分离,但也有研究质疑这些指标的有效性(Ma, 2018)。有的研究者在权衡的研究中提出了一个新的指标来量化个体的权衡能力(Ye et al., 2019)。基于猜测率( $P_g$ )和标准差(SD)的基础上,提出了一个一般自发权衡指标(general trade-off index, GT),其计算方式为:

$$GT = \frac{SD(\text{low}) - SD(\text{high})}{SD(\text{low})} + \frac{P(\text{low}) - P(\text{high})}{P(\text{low})}$$

其中 P (low)和 P (high)代表高低精度条件下记忆数量的指标(计算方式:  $P = 1 - P_g$ ), SD (low)和 SD (high)代表高低精度条件下的精度指标,该方程式可以使精度指标和数量指标的被试间方差最小化,表明高精度条件下指标相对于低精度条件下指标的变化程度,是一个同时包含了精度和数量指标的综合度量。但其并不能同时兼顾数量和精度的变化,未来的研究可基于此进一步改善这种新指标,也可采用类似方法进一步探究个体自发权衡数量和精度之间关系的能力和注意过滤能力之间的关系。

## 基金项目

本研究由国家自然科学基金(31700948)资助。

## 参考文献

- Alvarez, G. A., & Cavanagh, P. (2004). The Capacity of Visual Short-Term Memory Is Set Both by Visual Information Load and by Number of Objects. *Psychological Science*, 15, 106-111. <https://doi.org/10.1111/j.0963-7214.2004.01502006.x>
- 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>
- Baddeley, A., Cocchini, G., Della Sala, S., Logie, R. H., & Spinnler, H. (1999). Working Memory and Vigilance: Evidence from Normal Aging and Alzheimer's Disease. *Brain and Cognition*, 41, 87-108. <https://doi.org/10.1006/brcg.1999.1097>
- 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 (New York, N.Y.)*, 321, 851-854. <https://doi.org/10.1126/science.1158023>
- Bocincova, A., van Lamsweerde, A. E., & Johnson, J. S. (2016). Assessing the Evidence for a Cue-Induced Trade-Off between Capacity and Precision in Visual Working Memory Using Mixture Modelling and Bayesian Model Comparison. *Visual Cognition*, 24, 435-446. <https://doi.org/10.1080/13506285.2017.1301613>
- Cowan, N. (2001). The Magical Number 4 in Short-Term Memory: A Reconsideration of Mental Storage Capacity. *The Behavioral and Brain Sciences*, 24, 87-114. <https://doi.org/10.1017/S0140525X01003922>
- Edin, F., Klingberg, T., Johansson, P., McNab, F., Tegnér, J., & Compte, A. (2009). Mechanism for Top-Down Control of Working Memory Capacity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 6802-6807. <https://doi.org/10.1073/pnas.0901894106>
- 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, 1454-1465. <https://doi.org/10.1037/xhp0000398>
- Eng, H. Y., Chen, D., & Jiang, Y. (2005). Visual Working Memory for Simple and Complex Visual Stimuli. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 1127-1133. <https://doi.org/10.3758/BF03206454>
- Feldmann-Wüstefeld, T. (2021). Neural Measures of Working Memory in a Bilateral Change Detection Task. *Psychophysiology*, 58, e13683. <https://doi.org/10.1111/psyp.13683>
- Fougnie, D., Cormiea, S. M., Kanabar, A., & Alvarez, G. A. (2016). Strategic Trade-Offs between Quantity and Quality in Working Memory. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, 42, 1231-1240. <https://doi.org/10.1037/xhp0000211>
- Fukuda, K., Awh, E., & Vogel, E. K. (2010). Discrete Capacity Limits in Visual Working Memory. *Current Opinion in Neurobiology*, 20, 177-182. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2010.03.005>
- Gambarota, F., & Sessa, P. (2019). Visual Working Memory for Faces and Facial Expressions as a Useful "Tool" for Under-

- standing Social and Affective Cognition. *Frontiers in Psychology*, 10, 2392. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02392>
- Gao, Z., Yin, J., Xu, H., Shui, R., & Shen, M. (2011). Tracking Object Number or Information Load in Visual Working Memory: Revisiting the Cognitive Implication of Contralateral Delay Activity. *Biological Psychology*, 87, 296-302. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2011.03.013>
- Gaspar, J. M., Christie, G. J., Prime, D. J., Jolicœur, 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>
- Gorgoraptis, N., Catalao, R. F., Bays, P. M., & Husain, M. (2011). Dynamic Updating of Working Memory Resources for Visual Objects. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 31, 8502-8511. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0208-11.2011>
- He, X., Zhang, W., Li, C., & Guo, C. (2015). Precision Requirements Do Not Affect the Allocation of Visual Working Memory Capacity. *Brain Research*, 1602, 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2015.01.028>
- Keshvari, S., van den Berg, R., & Ma, W. J. (2013). No Evidence for an Item Limit in Change Detection. *PLoS Computational Biology*, 9, e1002927. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1002927>
- Lorenc, E. S., Sreenivasan, K. K., Nee, D. E., Vandenbroucke, A., & D'Esposito, M. (2018). Flexible Coding of Visual Working Memory Representations during Distraction. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 38, 5267-5276. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3061-17.2018>
- 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>
- Luria, R., Balaban, H., Awh, E., & Vogel, E. K. (2016). The Contralateral Delay Activity as a Neural Measure of Visual Working Memory. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 62, 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.01.003>
- Ma, W. J. (2018). *Problematic Usage of the Zhang and Luck Mixture Model*. <https://doi.org/10.1101/268961>
- Ma, W. J., Husain, M., & Bays, P. M. (2014). Changing Concepts of Working Memory. *Nature Neuroscience*, 17, 347-356. <https://doi.org/10.1038/nn.3655>
- Machizawa, M. G., Driver, J., & Watanabe, T. (2020). Gray Matter Volume in Different Cortical Structures Dissociably Relates to Individual Differences in Capacity and Precision of Visual Working Memory. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 30, 4759-4770. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhaa046>
- Machizawa, M. G., Goh, C. C., & Driver, J. (2012). Human Visual Short-Term Memory Precision Can Be Varied at Will When the Number of Retained Items Is Low. *Psychological Science*, 23, 554-559. <https://doi.org/10.1177/0956797611431988>
- Maniglia, M. R., & Souza, A. S. (2020). Age Differences in the Efficiency of Filtering and Ignoring Distraction in Visual Working Memory. *Brain Sciences*, 10, 556. <https://doi.org/10.3390/brainsci10080556>
- McCants, C. W., Katus, T., & Eimer, M. (2019). The Capacity and Resolution of Spatial Working Memory and Its Role in the Storage of Non-Spatial Features. *Biological Psychology*, 140, 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2018.12.006>
- Murray, A. M., Nobre, A. C., Astle, D. E., & Stokes, M. G. (2012). Lacking Control over the Trade-Off between Quality and Quantity in Visual Short-Term Memory. *PLoS ONE*, 7, e41223. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0041223>
- Ramaty, A., & Luria, R. (2018). Visual Working Memory Cannot Trade Quantity for Quality. *Frontiers in Psychology*, 9, 719. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00719>
- Rensink, R. A. (2002). Change Detection. *Annual Review of Psychology*, 53, 245-277. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.53.100901.135125>
- Schurgin, M. W. (2018). Visual Memory, the Long and the Short of It: A Review of Visual Working Memory and Long-Term Memory. *Attention, Perception & Psychophysics*, 80, 1035-1056. <https://doi.org/10.3758/s13414-018-1522-y>
- Suchow, J. W., Fougner, D., Brady, T. F., & Alvarez, G. A. (2014). Terms of the Debate on the Format and Structure of Visual Memory. *Attention, Perception & Psychophysics*, 76, 2071-2079. <https://doi.org/10.3758/s13414-014-0690-7>
- Vellage, A. K., Müller, P., Schmicker, M., Hopf, J. M., & Müller, N. G. (2019). High Working Memory Capacity at the Cost of Precision? *Brain Sciences*, 9, 210. <https://doi.org/10.3390/brainsci9090210>
- Vogel, E. K., & Machizawa, M. G. (2004). Neural Activity Predicts Individual Differences in Visual Working Memory Capacity. *Nature*, 428, 748-751. <https://doi.org/10.1038/nature02447>
- Vogel, E. K., Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2001). Storage of Features, Conjunctions and Objects in Visual Working Memory. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, 27, 92-114. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.27.1.92>



- 
- Ye, C., Hu, Z., Li, H., Ristaniemi, T., Liu, Q., & Liu, T. (2017). A Two-Phase Model of Resource Allocation in Visual Working Memory. *Journal of Experimental Psychology Learning, Memory, and Cognition*, *43*, 1557-1566. <https://doi.org/10.1037/xlm0000376>
- Ye, C., Sun, H. J., Xu, Q., Liang, T., Zhang, Y., & Liu, Q. (2019). Working Memory Capacity Affects Trade-Off between Quality and Quantity Only When Stimulus Exposure Duration Is Sufficient: Evidence for the Two-Phase Model. *Scientific Reports*, *9*, Article No. 8727. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44998-3>
- Ye, C., Zhang, L., Liu, T., Li, H., & Liu, Q. (2014). Visual Working Memory Capacity for Color Is Independent of Representation Resolution. *PLoS ONE*, *9*, e91681. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091681>
- Yoo, A. H., Klyszejko, Z., Curtis, C. E., & Ma, W. J. (2018). Strategic Allocation of Working Memory Resource. *Scientific Reports*, *8*, Article No. 16162. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34282-1>
- Zhang, W., & Luck, S. J. (2008). Discrete Fixed-Resolution Representations in Visual Working Memory. *Nature*, *453*, 233-235. <https://doi.org/10.1038/nature06860>
- Zhang, W., & Luck, S. J. (2011). The Number and Quality of Representations in Working Memory. *Psychological Science*, *22*, 1434-1441. <https://doi.org/10.1177/0956797611417006>