

# 内部注意在维度层面对视觉工作记忆的影响

周子芳<sup>1</sup>, 刘昕旻<sup>1</sup>, 郭利静<sup>1</sup>, 何广浩<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11月22日; 录用日期: 2021年12月13日; 发布日期: 2021年12月24日

## 摘要

视觉工作记忆是一个容量有限的记忆系统, 因此内部注意对其储存内容进行选择、控制和维持, 具有至关重要的作用。回溯线索是研究内部注意对视觉工作记忆影响的重要工具, 回溯线索可以根据提示内容不同分为基于客体线索的回溯线索和基于维度的回溯线索, 两者之间存在显著差异。近几年出现的回溯维度线索成为研究的热点之一。目前虽已有文章总结了基于客体的回溯线索的研究内容, 但基于维度的回溯线索研究的内容和进展并没有得到梳理和总结。本文通过梳理相关文献发现相对与基于客体维度回溯线索, 基于维度回溯线索更具有全局性、脆弱性等特性; 回溯维度线索的效果受到具体的视觉维度、记忆数量、个体差异等因素的影响; 以及产生回溯维度效应的内在机制可能以防止记忆随时间衰退、以非目标物体为代价等原因; 最后对未来研究提出方向和建议。

## 关键词

视觉工作记忆, 内部注意, 基于维度回溯线索

# The Effect of Internal Attention on Visual Working Memory at the Dimensional Level

Zifang Zhou<sup>1</sup>, Xinyang Liu<sup>1</sup>, Lijing Guo<sup>1</sup>, Guanghao He<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: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Dec. 13<sup>th</sup>, 2021; published: Dec. 24<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Visual working memory is a memory system with limited capacity, thus internal attention plays a

\*通讯作者。

文章引用: 周子芳, 刘昕旻, 郭利静, 何广浩, 叶超雄(2021). 内部注意在维度层面对视觉工作记忆的影响. *心理学进展*, 11(12), 2821-2829. DOI: 10.12677/ap.2021.1112320

crucial role in selecting, controlling, and maintaining its stored content. Retro-cues are an important tool to study the influence of internal attention on visual working memory. Retro-cues are an important paradigm for studying the influence of internal attention on visual working memory. Depending on the different content of the cue, it can be divided into object-based retro-cue and dimension-based retro-cue and there are significant differences between them. The emergence of dimension-based retro-cue in recent years has become one of the hot topics of research. There are articles summarizing the research contents of object-based retro-cue, but the contents and progress of research on dimension-based retro-cue have not been sorted out and summarized. In this paper, we find that compared with object-based retro-cue, dimension-based retro-cue is more global, fragile; the effect of dimension-based retro-cue is influenced by visual dimensions, the number of memory sequences, individual differences and other factors; and the intrinsic mechanism of retro-cue benefits may be based on the reasons of preventing memory from time-based decay or taking non-target objects as the cost. Finally, we make suggestions for future directions and research.

## Keywords

Visual Working Memory, Internal Attention, Dimension-Based Retro-Cue

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

在短时间内保留我们阅读时看到的视觉信息(单词、汉字等)对我们理解文章整体内容至关重要,在行驶过程中短时间内记住道路标志(减速、下坡等)对我们安全驾驶也至关重要。视觉工作记忆在这些过程中担负着重要责任。视觉工作记忆(Visual Working Memory, VWM)指的是当视觉刺激消失后,仍然可以在较短时间内对视觉表征进行储存和操纵,从而保持视觉连贯性的记忆系统(Luck & Vogel, 1997; Vogel & Machizawa, 2004; Baddeley, 2012)。视觉工作记忆是人类认知系统中的重要组成部分,但其容量有限,只能储存视觉信息中很少的一部分(Zhang & Luck, 2008),因此注意对其的选择和控制起到了举足轻重的作用。对内部心理表征进行选择、控制和维持的注意被称为内部注意(Chun et al., 2011, Oberauer & Hein, 2012),内部注意发生在视觉刺激呈现之后,即视觉工作记忆的保持阶段。例如当我们驾车行驶在高速公路上,路边的树、天边的云都会进入到我们记忆当中,但注意的集中指向可以让我们更多的提取前后方的车、旁边的路标等重要信息的回忆。内部注意对已编码的视觉工作记忆信息进行优先排序或选择,从而提高记忆系统的工作效率。因此,研究内部注意对视觉工作记忆的影响不仅有助于理解视觉工作记忆的内部结构和内部注意的工作机制,而且对提高记忆表现、提高大脑资源利用率等有着重要意义(Griffin & Nobre, 2003; Myers et al., 2017b; Dube et al., 2019)。当前的研究主要采用回溯线索范式研究内部注意对视觉工作记忆的影响,回溯线索可以根据提示内容不同分为基于客体的回溯线索和基于维度的回溯线索,两者之间存在显著差异。已有文章总结了基于客体的回溯线索的研究内容(Souza & Oberauer, 2016; 付凯等, 2020),但基于维度的回溯线索研究的内容和进展并没有得到梳理和总结。本文将两种线索之间的异同进行了比较,并从特性、影响因素、内在机制等方面对基于维度的回溯线索进行介绍,最后对未来研究方向提出展望。

## 2. 内部注意对视觉工作记忆影响的研究范式

自 Griffin, Nobre (2003)和 Landman, Spekreijse, Lamme (2003)两个团队同时使用回溯线索(retro cue)开始,回溯线索已成为研究内部注意对视觉工作记忆影响的重要工具。回溯线索常常被嵌入变化检测范式或回忆报告范式中使用,参与者首先需要记住最初的记忆序列以备后续测试,在记忆序列和测试序列之间会呈现一个回溯线索,提示参与者哪一个物体会在测试序列中呈现。研究人员发现,相比于中性线索,有效的回溯线索增强了记忆表现,这种现象说明内部注意的控制有助于提高视觉工作记忆的表现(Delvenne & Holt, 2012; Gunseli et al., 2015; Riddle et al., 2020)。

### 2.1. 基于客体的回溯线索

前人研究主要通过三种类型的回溯线索来探究内部注意对视觉工作记忆的影响,分别是外源空间线索(Matsukura & Vecera, 2015)、内源空间线索(Myers et al., 2017a)和特征线索(Gilchrist et al., 2016; Poch et al., 2017)。外源空间线索在被提示的目标物体位置上呈现;而内源空间线索在中央呈现,通过指向待测物体位置作为提示;特征线索呈现一个具体的目标物体特征值,例如红色、圆形等作为提示。通过使用这三种线索,被试可以将内部注意引导到视觉工作记忆的具体客体上,从而控制注意资源的分配。因为这三种线索都指向具体的客体,因此可以统一称为基于客体的回溯线索(object-based retro-cue) (Ye et al., 2016)。在付凯等(2020)的文章中已总结了关于基于客体的回溯线索的相关研究。

### 2.2. 基于维度的回溯线索

同外部注意一样,内部注意不仅仅可以指向具体客体,还可以指向特定的特征维度,即基于维度的注意,它与指向具体客体的注意是两种完全不同的注意类型(Zickerick et al., 2021)。基于特征维度的注意是指注意对物体内相关特征维度,如颜色、方向等的控制和维持。基于特征维度的注意独立于空间位置和具体客体,与基于客体的注意相比具有全局性。近年来,有研究使用基于维度的回溯线索,将基于特征维度的注意引入到对视觉工作记忆的研究中,探究其对视觉工作记忆的影响(Ye et al., 2016; Park et al., 2017; Maniglia & Souza, 2020)。

基于维度的回溯线索(dimension-based retro-cue),是指呈现一个视觉的维度作为线索(Ye et al., 2016),这个视觉维度是记忆项目之间共有的,比如形状、颜色等。虽然基于维度的回溯线索和基于客体的回溯线索中的特征线索同样是呈现特征,同样需要自上而下的注意的参与,但是两者之间有明显的差别:在提示范围上,基于维度的回溯线索提示范围更大,是所有对象共有的维度之一,例如“颜色”,参与者不能通过基于维度回溯线索定位到具体的目标客体(Ye et al., 2016);而基于客体的回溯线索中的特征线索是一个具体的特征值,例如“红色”,参与者可以通过线索定位到具体的目标客体(Robison & Unsworth, 2017)。在记忆信息量上,参与者可以根据特征线索提示舍弃不包含该特征的项目,记忆的数量和记忆的信息总量都发生了变化;而在基于维度的回溯线索的条件下,参与者仍然需要记住所有项目,同时可以舍弃所有项目中未被提示的维度,即记忆的信息总量减少了,但记忆的数量不变(Li & Saiki, 2015; Heuer & Schubö, 2016)。

### 2.3. 两种线索的比较

在 Hajonides 等(2020)的研究中,将基于维度回溯线索和基于客体回溯线索嵌入回忆报告范式中使用,要求参与者记住左右两个光栅的颜色和方向,并根据后续线索提示有选择的记忆,其中基于客体的线索提示内容为“R”(右)或“L”(左),基于维度的线索提示“O”(方向)或“C”(颜色),测试阶段则要求参与者在屏幕中出现的色环或白环上选出记忆中光栅的颜色或方向。实验结果发现两种线索均提高了记忆

表现,即降低了回忆的偏差值,加快了反应时间,而且相关分析显示两种线索情况下的记忆表现存在很高的相关性。进一步的脑电研究分析也发现,两种线索之间的神经机制也类似,都引起了的后侧 $\alpha$ 波的衰减和同样的潜伏期。因此,可以认为基于客体和基于维度的注意可能共享了一部分重叠的注意机制。

从注意分配方式上来看,基于维度的回溯线索具有全局性,即注意并不集中在具体客体,而是分布于所有记忆项目间的,现有研究发现这种全局性主要表现在颜色维度上。在 Niklaus 等(2017)的研究中,参与者被要求在记忆阶段同时记住三个箭头的颜色和方向,并根据回溯线索提示加强记忆,在接下来出现测试色轮中用鼠标进反应,完成测试。在对回溯线索的控制中,研究者设置了一个线索和两个线索的情况:在只有一个提示线索出现是,参与者需要记住三个箭头的颜色和方向,并根据回溯线索的提示记住提示物体对应维度的信息,其中“A”表示方向,“C”表示颜色,“X”表示中性线索。在两个线索的情况下,被试在第一个线索出现后,间隔一定时间出现第二个回溯线索,测试阶段测量第二次线索提示项目的记忆表现。两个线索可能提示同样的信息,比如都提示“颜色”,也可能提示不同的信息,比如先提示“方向”,后提示颜色。实验结果发现前后线索一致时,记忆表现更好,特别是在“颜色”维度上,前后一致和不一致之间存在显著差异。因此研究者认为,至少在颜色维度上,注意力分配以一种全局的方式进行,即自动保存了未被注意物体的颜色表征。

在 Ye et al. (2021)的实验中,分别采用基于维度的回溯线索和基于客体的回溯线索探究不同注意类型对工作记忆表现的影响,结果发现无论是测量客体的颜色还是方向,参与者从基于维度的回溯线索中获得收益比从基于客体的回溯线索中获得收益更加困难。Maniglia 和 Souza (2020)在实验中也同时采用了基于客体和基于维度的回溯线索,结果发现只有基于客体的回溯线索产生了收益,而使用基于维度的回溯线索的记忆表现和在中性线索下的记忆表现无明显差异。因此,可以认为利用基于维度的回溯线索比利用基于客体的回溯线索更加困难。但是,目前研究都是通过回忆报告范式测量参与者的记忆表现,参与者在测量是必须定位于具体的客体再回忆,没有直接对参与者记忆维度的测量,测量方式是否影响实验结果还需进一步研究证明。

### 3. 基于维度回溯线索

基于维度的回溯线索研究是近几年出现的热点问题(Ye et al., 2016; Niklaus et al., 2017; Park et al., 2017; Sasin & Fougne, 2020),笔者对已发表的研究进行整理汇总,结果见附录附表 1 所示。下文将根据实验结果,总结出回溯线索的影响因素、内在机制等内容。

#### 3.1. 影响因素

基于维度回溯线索的类型是影响线索产生收益的重要因素,常见的视觉类型包括颜色、方向、大小、形状等。现有的研究中,只有利用方向和颜色这两种类型的线索的研究, Niklaus 等(2017)实验中发现方向线索的收益好于颜色线索,而在 Ye et al. (2021)实验中发现颜色线索略好于方向线索,但两者之间差异并不显著。这可能和两个研究中使用到的材料类型有关系, Niklaus 等(2017)使用带颜色的箭头作为记忆材料,而 Ye et al. (2021)使用了带颜色的条形作为记忆材料,两者的区别在于,箭头的方向有 $360^\circ$ 变化,而条形只有 $180^\circ$ 变化。因此如果要比较这两个不同的维度类型之间的差异,需要统一使用具有相似变化的记忆材料。在基于客体的线索的研究中,使用特征线索发现,线索带来的收益在颜色、方向、形状之间都能产生稳健的收益(Armicane & Souza, 2021)。而基于维度的回溯线索现今还没有关于形状、大小等维度的比较,需要进一步探究。

在已有研究中发现记忆项目的数量也是影响维度回溯线索收益的影响因素,视觉工作记忆容量有限,平均为 3~4 个(Vogel et al., 2001)。当记忆数量在记忆容量内时(1~3 个),回溯维度线索能显著提高视觉工



作记忆的表现,但是当记忆数量超过容量时,维度回溯线索就不能提高视觉工作记忆的表现了。在 Maniglia 和 Souza (2020)的实验中,记忆项目为 6 个不同的彩色三角形,无论是使用前线索还是基于维度的回溯线索,结果都没有发现显著的线索收益。分析其原因,这可能涉及到基于维度回溯线索产生收益的内在机制问题,如果基于维度的回溯线索只能提高了记忆中特定特征的项目的精度,而对容量的提升没有作用,那在超过平均容量的记忆项目后呈现的回溯线索将无法提高工作记忆的表现。这也和研究不同工作记忆容量的被试对基于维度回溯线索利用效率的结果一致。在 Ye et al. (2021)研究中,根据记忆容量测试结果将参与者划分为高容量和低容量,研究其对基于维度回溯线索的使用效率,结果发现高容量参与者与低容量参与者相比,并不能更有效的利用基于维度的回溯线索,提高记忆表现。

### 3.2. 内在机制

由于基于维度回溯线索的研究还比较少,所以在探究基于维度回溯线索的内在机制前,先总结梳理已有的回溯线索内在机制假设,然后介绍回溯维度线索实验中已验证的假设。自回溯线索范式出现以来,不同的研究者操纵范式中的不同因素,通过多角度分析探究内部注意对视觉工作记忆影响的内在机制,提出并证明了以下几种假设:① 防止时间导致的记忆衰退假设,由于记忆的内容会随着时间的流逝而衰退,而回溯线索的呈现可以保护目标物体不随时间而衰退(Matsukura et al., 2007; Pertzov et al., 2013)。② 注意强化优先假设,注意的广度有限,回溯线索可以将注意资源更多的集中在目标物体上,强化目标物体并让目标物体具有优先性(Rerko & Oberauer, 2012; Souza et al., 2014)。③ 效益代价假设,即目标物体的强化是以非目标物体为代价的,回溯线索提示的目标物体得到更好的记忆,而其他物体记忆效果变差,甚至遗忘(Gunseli et al., 2015; Moorselaar et al., 2015; Kuo et al., 2012)。④ 防止视觉干扰假设,无论是变化检测范式还是回忆报告范式,在检测阶段出现的刺激都可能对记忆内容造成干扰,而回溯线索的呈现能够保护目标物体减少甚至免受这种干扰的影响(Souza et al., 2016; Makovski & Pertzov, 2015)。⑤ 认知阶段分离假设,在保持阶段参与者需要同时进行内部注意资源再分配(将注意指向需要报告的目标表征)以及匹配决策反应两种认知加工。在回溯线索提示条件下,参与者能够利用回溯线索提前完成内部注意资源的再分配,避免了当探测阵列出现时认知加工竞争对记忆表征的损害(叶超雄等, 2020)。以上假设之间并不是相互矛盾的,因此证明了一个假设的实验并不能排除另一种假设(Souza & Oberauer, 2016)。以上假设多是采用基于客体的回溯线索的实验进行检验的,使用基于维度回溯线索探究其提高视觉工作记忆表现的内在机制的研究结果较少,总结如下:

Ye et al. (2016)年的实验中通过改变回溯线索和探测刺激之间的间隔时间来验证基于维度的回溯线索收益是否符合防止时间导致的记忆衰退的假设。实验结果表明 1300 ms 和 50 ms 的间隔对视觉工作记忆表现的影响并不显著,因此不能证明回溯维度线索保护了记忆免受时间衰退影响的假设。但是在 Park 等(2017)文章中,他们发现回溯维度线索可以防止记忆随时间的衰退,与 Ye et al. (2016)不同,他们采用的间隔时间为 1 s 和 2 s,因此可以推断回溯线索在较长的延迟时间中可以防止时间影响,但是在较短时间中这种保护作用不能得到展现。

与防止时间导致的记忆衰退假设在实验验证中出现了矛盾不同,效益代价假设在多个实验中得到了证明。Niklaus 等(2017)通过改变线索的有效性,即设置有效线索和无效线索来探究目标物体和非目标物体的记忆表现,结果发现相比与目标维度的物体记忆效果好于中性线索下的物体记忆好于非目标维度的物体记忆,表明目标物体记忆的提高是以非目标物体为代价的。Park 等(2017)也通过控制线索有效性的方法得出了一致的结论。

虽然现有的研究表明,基于维度的回溯线索和基于客体回溯线索产生的收益是显著相关的,而且两者之间作用机制也部分重叠,但是两种线索的作用方式是不同的,基于客体的回溯线索相较于基于维度

的回溯线索更难产生收益。因此对于基于维度的回溯线索的其他内在机制研究有很重要的意义，这可能进一步揭示两者之间的差别。

#### 4. 小结与展望

本文介绍了研究内部注意对视觉工作记忆影响的新研究领域，即基于特征维度的注意对视觉工作记忆的影响。系统梳理了近年来发表的文章，发现基于维度回溯线索和基于客体维度回溯线索存在许多异同点，而且发现基于维度回溯线索存在全局性、脆弱性等特性，具体的视觉维度、记忆数量、个体差异等因素都会影响回溯线索的效果，而且发现产生回溯线索效应的内在机制可能有防止记忆随时间衰退、以非目标物体为代价等原因。研究基于特征的内部注意对视觉工作记忆的影响，不仅有助于理解视觉工作记忆的储存方式，而且能进一步研究内部注意的工作机制。但目前运用基于维度的回溯线索的研究还较少(Fougnie et al., 2010; Bays et al., 2011; Fougnie & Alvarez, 2011)，存在许多问题需要进一步探究，针对该领域未来研究发展的方向，笔者提出了以下建议：

首先，当前有研究发现基于客体的回溯线索中的特征线索效应的稳健性与回溯线索概率、空间背景、样本容量等因素相关(Arnica & Souza, 2021)，但基于维度的回溯线索效应的稳健性是否会受到这些因素的影响还未可知。同时，关于基于维度回溯线索的研究，目前使用的范式都是回忆报告范式，尚且没有研究用到变化检测范式，使用范式的不同是否会影响基于维度的内部注意对视觉工作记忆的影响也是一个值得探究的问题。

其次，回溯线索产生收益的假设中，已有的基于回溯线索实验探究了防止时间导致的记忆衰退假设和效益代价假设，其他假设还缺少研究验证。因此可以通过在回溯线索后添加视觉掩蔽，验证防止视觉干扰假设是否适用于基于维度的回溯线索。或是在线索和探测之间设置不同时长的延迟，验证认知阶段分离假设。进一步探究基于维度回溯线索效应的产生机制，来充分基于客体的对象选择以及基于维度选择之间的异同。

最后，基于客体线索的内在脑机制(Riddle et al., 2020)已经存在一些相关研究，研究结果发现其主要脑区在枕叶视觉皮层(Serences, 2016)、后顶叶、前额叶(Kaufman et al., 2014)和皮质纹状体区域(Chatham et al., 2014)。但还没有关于基于维度回溯线索的相关研究，因此可以进一步采用脑电、fMRI 等手段，探究基于维度回溯线索的内在脑机制，加深对与内部注意如何影响视觉工作记忆的内在机制的了解。

#### 基金项目

本研究由国家自然科学基金(31700948)资助。

#### 参考文献

- 付凯, 王天昊, 梁腾飞, 付雪莹, 刘强(2020). 视觉工作记忆中的内部注意选择: 效果, 特性及机制. *心理科学*, 43(6), 1333-1340.
- 叶超雄, 胡中华, 梁腾飞, 张加峰, 许茜如, 刘强(2020). 视觉工作记忆回溯线索效应的产生机制: 认知阶段分离. *心理学报*, 52(4), 15.
- Arnica, A., & Souza, A. S. (2021). Assessing the Robustness of Feature-Based Selection in Visual Working Memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 47, 731-758. <https://doi.org/10.1037/xhp0000911>
- 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>
- Bays, P. M., Wu, E. Y., & Husain, M. (2011). Storage and Binding of Object Features in Visual Working Memory. *Neuropsychologia*, 49, 1622-1631. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.12.023>
- Chatham, C. H., Frank, M. J., & Badre, D. (2014). Corticostriatal Output Gating during Selection from Working Memory. *Neuron*, 81, 930-942. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2014.01.002>

- Chun, M. M., Golomb, J. D., & Turk-Browne, N. B. (2011). A Taxonomy of External and Internal Attention. *Annual Review of Psychology*, 62, 73-101. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.093008.100427>
- Delvenne, J.-F., & Holt, J. L. (2012). Splitting Attention across the Two Visual Fields in Visual Short-Term Memory. *Cognition*, 122, 258-263. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2011.10.015>
- Dube, B., Lumsden, A., & Al-Aidroos, N. (2019). Probabilistic Retro-Cues Do Not Determine State in Visual Working Memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 26, 641-646. <https://doi.org/10.3758/s13423-018-1533-7>
- Fougnie, D., & Alvarez, G. A. (2011). Object Features Fail Independently in Visual Working Memory: Evidence for a Probabilistic Feature-Store Model. *Journal of Vision*, 11, 3. <https://doi.org/10.1167/11.12.3>
- Fougnie, D., Asplund, C. L., & Marois, R. (2010). What Are the Units of Storage in Visual Working Memory. *Journal of Vision*, 10, 27. <https://doi.org/10.1167/10.12.27>
- Gilchrist, A. L., Duarte, A., & Verhaeghen, P. (2016). Retrospective Cues Based on Object Features Improve Visual Working Memory Performance in Older Adults. *Aging Neuropsychology and Cognition*, 23, 184-195. <https://doi.org/10.1080/13825585.2015.1069253>
- Griffin, I. C., & Nobre, A. C. (2003). Orienting Attention to Locations in Internal Representations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15, 1176-1194. <https://doi.org/10.1162/089892903322598139>
- Gunseli, E., Moorselaar, D. van, Meeter, M., & Olivers, C. N. L. (2015). The Reliability of Retro-Cues Determines the Fate of Noncued Visual Working Memory Representations. *Psychonomic Bulletin & Review*, 22, 1334-1341. <https://doi.org/10.3758/s13423-014-0796-x>
- Hajonides, J. E., Ede, F. van, Stokes, M. G., & Nobre, A. C. (2020). Comparing the Prioritisation of Items and Feature-Dimensions in Visual Working Memory. *Journal of Vision*, 20, 25. <https://doi.org/10.1167/jov.20.8.25>
- Heuer, A., & Schubö, A. (2016). Feature-Based and Spatial Attentional Selection in Visual Working Memory. *Memory & Cognition*, 44, 621-632. <https://doi.org/10.3758/s13421-015-0584-5>
- Kaufman, M. T., Churchland, M. M., Ryu, S. I., & Shenoy, K. V. (2014). Cortical Activity in the Null Space: Permitting Preparation without Movement. *Nature Neuroscience*, 17, 440-448. <https://doi.org/10.1038/nn.3643>
- Kuo, B.-C., Stokes, M. G., & Nobre, A. C. (2012). Attention Modulates Maintenance of Representations in Visual Short-Term Memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24, 51-60. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_00087](https://doi.org/10.1162/jocn_a_00087)
- Landman, R., Spekreijse, H., & Lamme, V. A. F. (2003). Large Capacity Storage of Integrated Objects before Change Blindness. *Vision Research*, 43, 149-164. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(02\)00402-9](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(02)00402-9)
- Li, Q., & Saiki, J. (2015). Different Effects of Color-Based and Location-Based Selection on Visual Working Memory. *Attention Perception & Psychophysics*, 77, 450-463. <https://doi.org/10.3758/s13414-014-0775-3>
- 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>
- Makovski, T., & Pertzov, Y. (2015). Attention and Memory Protection: Interactions between Retrospective Attention Cueing and Interference. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 68, 1735-1743. <https://doi.org/10.1080/17470218.2015.1049623>
- 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>
- Matsukura, M., & Vecera, S. P. (2015). Selection of Multiple Cued Items Is Possible during Visual Short-Term Memory Maintenance. *Attention Perception & Psychophysics*, 77, 1625-1646. <https://doi.org/10.3758/s13414-015-0836-2>
- Matsukura, M., Luck, S. J., & Vecera, S. P. (2007). Attention Effects during Visual Short-Term Memory Maintenance: Protection or Prioritization? *Attention Perception & Psychophysics*, 69, 1422-1434. <https://doi.org/10.3758/BF03192957>
- Moorselaar, D. van, Olivers, C. N. L., Theeuwes, J., Lamme, V. A. F., & Sligte, I. G. (2015). Forgotten But Not Gone: Retro-Cue Costs and Benefits in a Double-Cueing Paradigm Suggest Multiple States in Visual Short-Term Memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 41, 1755-1763. <https://doi.org/10.1037/xlm0000124>
- Myers, N. E., Chekroud, S. R., Stokes, M. G., & Nobre, A. C. (2017a). Benefits of Flexible Prioritization in Working Memory Can Arise without Costs. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 44, 398-411. <https://doi.org/10.1037/xhp0000449>
- Myers, N. E., Stokes, M. G., & Nobre, A. C. (2017b). Prioritizing Information during Working Memory: Beyond Sustained Internal Attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 21, 449-461. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2017.03.010>
- Niklaus, M., Nobre, A. C., & Ede, F. (2017). Feature-Based Attentional Weighting and Spreading in Visual Working Memory. *Scientific Reports*, 7, Article No. 42384. <https://doi.org/10.1038/srep42384>
- Oberauer, K., & Hein, L. (2012). Attention to Information in Working Memory. *Current Directions in Psychological Science*, 21, 164-169. <https://doi.org/10.1177/0963721412444727>

- Park, Y. E., Sy, J. L., Hong, S. W., & Tong, F. (2017). Reprioritization of Features of Multidimensional Objects Stored in Visual Working Memory. *Psychological Science*, 28, 1773-1785. <https://doi.org/10.1177/0956797617719949>
- Pertsov, Y., Bays, P. M., Joseph, S., & Husain, M. (2013). Rapid Forgetting Prevented by Retrospective Attention Cues. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 39, 1224-1231. <https://doi.org/10.1037/a0030947>
- Poch, C., Capilla, A., Hinojosa, J. A., & Campo, P. (2017). Selection within Working Memory Based on a Color Retro-Cue Modulates Alpha Oscillations. *Neuropsychologia*, 106, 133-137. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.09.027>
- Reerker, L., & Oberauer, K. (2013). Focused, Unfocused, and Defocused Information in Working Memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 39, 1075-1096. <https://doi.org/10.1037/a0031172>
- Riddle, J., Scimeca, J. M., Cellier, D., Dhanani, S., & D'Esposito, M. (2020). Causal Evidence for a Role of Theta and Alpha Oscillations in the Control of Working Memory. *Current Biology*, 30, 1748-1754.e4. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.02.065>
- Robison, M. K., & Unsworth, N. (2017). Variation in the Use of Cues to Guide Visual Working Memory. *Attention Perception & Psychophysics*, 79, 1652-1665. <https://doi.org/10.3758/s13414-017-1335-4>
- Sasin, E., & Fougner, D. (2020). Memory-Driven Capture Occurs for Individual Features of an Object. *Scientific Reports*, 10, Article No. 19499. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76431-5>
- Serences, J. T. (2016). Neural Mechanisms of Information Storage in Visual Short-Term Memory. *Vision Research*, 128, 53-67. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2016.09.010>
- Souza, A. S., & Oberauer, K. (2016). In search of the Focus of Attention in Working Memory: 13 Years of the Retro-Cue Effect. *Attention Perception & Psychophysics*, 78, 1839-1860. <https://doi.org/10.3758/s13414-016-1108-5>
- Souza, A. S., Reerker, L., & Oberauer, K. (2016). Getting More from Visual Working Memory: Retro-Cues Enhance Retrieval and Protect from Visual Interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 42, 890-910. <https://doi.org/10.1037/xhp0000192>
- Souza, A. S., Reerker, L., Lin, H.-Y., & Oberauer, K. (2014). Focused Attention Improves Working Memory: Implications for Flexible-Resource and Discrete-Capacity Models. *Attention Perception & Psychophysics*, 76, 2080-2102. <https://doi.org/10.3758/s13414-014-0687-2>
- 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., Ristaniemi, T., Gendron, M., & Liu, Q. (2016). Retro-Dimension-Cue Benefit in Visual Working Memory. *Scientific Reports*, 6, Article No. 35573. <https://doi.org/10.1038/srep35573>
- Ye, C., Xu, Q., Liu, X., Astikainen, P., Zhu, Y., Hu, Z., & Liu, Q. (2021). Individual Differences in Working Memory Capacity Are Unrelated to the Magnitudes of Retrocue Benefits. *Scientific Reports*, 11, Article No. 7258. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86515-5>
- Zhang, W., & Luck, S. J. (2008). Discrete Fixed-Resolution Representations in Visual Working Memory. *Nature*, 453, 233-235. <https://doi.org/10.1038/nature06860>
- Zickerick, B., Rösner, M., Sabo, M., & Schneider, D. (2021). How to Refocus Attention on Working Memory Representations Following Interruptions—Evidence from Frontal Theta and Posterior Alpha Oscillations. *European Journal of Neuroscience*. <https://doi.org/10.1111/ejn.15506>



## 附录

**Table A1.** A summary of the dimension-based retro-cue studies  
**附表 1.** 回溯维度线索研究总结

研究	实验	记忆材料	记忆数量	线索呈现方式	线索呈现时间	线索有效性	线索数量	保持时间(呈现线索前后)	测试方式	实验结果
Ye et al., 2016	一	彩色长方形	3	Color/orientation/random	400 ms	100%有效	1	500 ms/1300 ms	回忆报告	有效线索好于中性线索(偏差值小、猜测率下降) 50 ms 和 1300 ms 差异不显著 和实验二结果一致
	二		500 ms/1300 ms or 50 ms							
	三		2							
Niklaus et al., 2017	一	彩色箭头	3	Color/angle/both	300 ms	五分之一中性, 75%有效, 25%无效	1	750 ms/1500 ms	回忆报告	有效线索好于中性线索好于无效线索 左右相同线索好于不同线索, 方向好于颜色线索 前后相同线索好于前后不同线索, 颜色上显著
	二		2	A+A/A+C 等	500 ms	相同、不同、中性	2	750 ms/2000 ms		
	三		3	A、C		1个、2个(相同、不同)	2	750 ms/1500 ms/1500 ms		
Park et al., 2017	一	彩色光栅	2	A/C/中性	500 ms	80%有效, 20%无效, 中性	1	500 ms/0 s or 1 s or 3 s	回忆报告	有效线索提高记忆精度和记忆概率 回溯维度线索减少记忆随时间丢失
	二				一直呈现			2 s/4 s		
	三				250 ms			有效、中性		
Maniglia & Souza, 2020	二	彩色三角形	6	C/O (基线组)	500 ms	100%有效	1	1000 ms/1500 ms	回忆报告	基于维度回溯线索无效
Hajonides et al., 2020		彩色光栅	2	O+O/C+C/中性	100 ms	100%有效	1	700 ms + 1500 ms (存在掩蔽条件)	回忆报告	有效线索好于中性线索, 记忆偏差减小、探测响应时间加快、猜测率降低、非目标响应降低。
Sasin & Fougny, 2020	一	彩色三角形	1	Color/orientation	500 ms	100%有效	1	1000 ms/视觉搜索范式	回忆报告	有线索好于无线索, 视觉搜索时间增长 颜色线索对视觉搜索干扰更强
	二			C/O (外源呈现)						
Ye et al., 2021		彩色长方形	3	Color/orientation/random	400 ms	100%有效	1	500 ms/1300 ms	回忆报告	高容量被试好于低容量被试; 有效线索好于中性线索; 基于对象线索好于基于维度线索

注: 表中 A 表示 angle, 角度; C 表示 color, 颜色。