

空间位置比非空间特征更难从工作记忆中移除*

任国防¹ 丁晓伟² 张颖超² 王盛元²

(¹安阳师范学院教育学院, 河南 安阳 455000) (²中山大学心理学系, 广州 510006)

摘要 从工作记忆中移除无关信息有助于高效利用其有限资源。关于工作记忆移除信息的研究均聚焦于非空间特征的移除, 而空间特征(如位置信息)在认知理论的特殊性存在争议。因此在工作记忆移除信息的视角下考察空间特征是否特殊具有理论必要性。为回答上述问题, 本文直接对比工作记忆中空间特征与非空间特征的移除, 并提出两个假设: 空间特征相比非空间特征更难移除(位置特异假设)或二者移除难度相当(位置非特异假设)。实验中被试需记忆一个多特征客体(包含空间和非空间信息), 保持阶段根据线索提示移除任务无关特征, 仅保留任务相关特征, 检测阶段操纵任务无关信息的变化。核心逻辑在于若任务无关特征从工作记忆中有效移除, 则其在检测任务中发生变化不会影响任务相关特征的记忆绩效; 反之记忆绩效则会受影响。两实验结果一致显示, 相比非空间特征, 空间特征作为任务无关特征变化时对记忆绩效干扰更大。这表明, 空间位置比非空间特征更难从工作记忆中移除, 支持位置特异假设。

关键词 工作记忆, 空间位置, 工作记忆移除

分类号 B842

1 引言

工作记忆是一个容量有限的认知系统, 仅能同时维持少量信息(Baddeley, 2012; Luck & Vogel, 1997; Ma et al., 2014; Oberauer et al., 2016)。为适应不断变化的环境并高效利用表征信息完成任务, 个体必须对信息进行选择性处理, 这种选择性包括两种机制: 选择性注意和选择性维持(Kong & Fougne, 2022)。选择性注意充当输入的闸门, 决定何种信息被编码进工作记忆, 有效过滤无关信息(Johnston & Dark, 1986; Luck & Hillyard, 1994; Posner & Petersen, 1990; Wolfe & Horowitz, 2004); 选择性维持指对工作记忆中已存信息的动态管理, 包括对任务相关信息的保留和对无关信息的移除。移除作为选择性维持的一项核心功能, 负责将与当前任务无关的内容从工作记忆中删除(Kim et al., 2020; Park et al., 2017; Sasin & Fougne, 2020; Williams et al., 2013), 有效的移除能释放宝贵的认知资源, 并促进对新信

息的编码(Kim et al., 2020; Williams et al., 2013), 从而提升后续任务表现。当前工作记忆移除研究均聚焦于揭示以客体为基本单元的整存整取机制, 即移除操作以整个客体为单位, 移除时所有与客体关联的特征(如颜色、形状、位置)均被清除(Kim et al., 2020; Sasin & Fougne, 2020; Williams et al., 2013)。这种“全或无”的移除方式将客体视为不可分割的存储单元, 暗示客体各类特征在移除过程中地位均等, 这与强调空间位置特殊性的认知理论相悖。从而引出一个关键问题: 在工作记忆的移除过程中, 空间特征是否扮演着特殊角色?

对“全或无”移除模式的理论挑战, 主要来自于指出空间位置享有特殊地位的认知理论。例如, 空间绑定理论(Spatial binding account)认为, 空间位置在在工作记忆非空间特征间的绑定中起着重要作用(Schneegans & Bays, 2017; Kovacs & Harris, 2019; Treisman & Zhang, 2006)。有研究者发现, 客

收稿日期: 2025-07-02

* 河南省高等教育教学改革研究与实践项目(2024SJGLX1074, 2021SJGLX098)、国家自然科学基金项目(32271103)资助。

通信作者: 王盛元, E-mail: wangshy56@mail2.sysu.edu.cn; 张颖超, E-mail: zhangych87@mail2.sysu.edu.cn

体的每个非空间特征(与空间位置相对立,指一切非空间位置特征,如颜色、形状以及朝向等)均各自绑定到它们的空间位置,非空间特征通过它们的共同位置才能完成信息绑定(Bays, 2014; Fournie et al., 2013; Schneegans et al., 2022; Schneegans & Bays, 2017)。与空间绑定理论异曲同工的客体文件理论(Object file theory)认为,空间位置为客体创建一个临时索引,而颜色、形状等所有非空间特征都被绑定在这个索引上,最终整合成客体文件(Hollingworth & Rasmussen, 2010; Kahneman et al., 1992)。空间位置除了作为特征整合的手脚架,还有理论进一步指出,空间位置的编码过程本身具有强制性。例如布尔地图理论(Boolean map theory)强调了空间位置的重要性,该理论认为视觉注意和工作记忆的基本操作单位是布尔地图,它将单一的特征标签(如红色)与一组空间位置进行绑定。被试可以自主选择是否加工颜色或形状等非空间特征,而空间位置的编码具有强制性,被试无法选择是否加工位置信息。空间位置就像一张无法关闭的地图,其它所有非空间特征均必须在这张地图上进行标注,才能被感知和记忆(Huang, 2010; Huang, 2020)。

空间位置与非空间特征在多个认知过程中表现出不同的认知特性。Kong 和 Fournie (2022)发现空间位置的可访问性在知觉和工作记忆中存在差异:与非空间特征相比,空间位置在感知选择中更容易获取,但在工作记忆保持阶段却难以被访问。此外,Li 和 Saiki (2015)发现空间位置和非空间特征(颜色)充当回溯线索时被试的表现存在差异:空间回溯线索比非空间线索更有效地提升了工作记忆内部选择的表现;而在感知选择中,前溯空间线索引发的记忆表现却低于前溯非空间线索。上述发现凸显了空间位置在认知加工过程中的复杂性。

综上,虽然前人理论论证了空间位置在工作记忆中的特殊地位:它既是信息组织的核心框架,又具有强制编码的特点。但是,也有实证研究支持了其复杂性:空间位置的作用方式会依据认知阶段的不同发生变化。因此当它作为一个被主动删除的单元时,是否仍表现出其特殊性尚未可知。本研究通过直接对比空间位置信息和非空间信息的移除过程,来考察空间位置在工作记忆动态加工中的认知特点。为回答上述问题,本研究提出两个对立假设:位置特异假设和位置非特异假设。

1.1 位置特异假设

位置特异假设认为,从工作记忆中移除空间位

置比移除非空间(位置)特征更为困难。该假设的提出基于位置在工作记忆编码和维持阶段的特殊地位。

首先,空间位置自动编码理论认为,即使空间位置与当前任务无关,也能被自动编码到工作记忆中(Chen & Wyble, 2015; Chun & Jiang, 1998; Foster et al., 2017; Treisman & Zhang, 2006)。例如,Chen 和 Wyble (2015)在一项实验的意外测试中发现,被试能准确回忆出作为任务无关特征的位置信息,表明空间位置信息被无意识地编码进工作记忆。来自神经的证据进一步支持了这一观点,研究显示与任务无关的空间位置信息可以从神经活动中成功解码(Foster et al., 2017; Lara & Wallis, 2014)。

其次,空间绑定理论同样为位置的特殊性提供了支持性的证据。该理论认为,空间位置介导了工作记忆中非空间特征之间的绑定(Kovacs & Harris, 2019; Treisman & Zhang, 2006)。一系列实证研究为此提供了直接证据,例如,Treisman 和 Zhang (2006)发现,即使空间位置与任务无关,但若其发生变化会损害任务相关特征的记忆绩效。更直接的证据表明,非空间特征与位置的绑定关系极为牢固:从错误模式来看,当一个客体的特征被交换到另一个客体上(即发生位置交换错误),这种绑定关系的打破,会导致被试倾向于错误地认为特征本身是新特征(Bays, 2014; Fournie et al., 2013; Schneegans et al., 2022);从信息提取来看:当使用客体非空间特征(如朝向)作为线索提示时,被试提取同一客体另一非空间特征(如颜色)必须借助客体的位置信息。即非空间特征只能通过其绑定的位置信息进行检索,而用空间位置作为线索则可以轻易地提取客体对应的任何特征(Schneegans & Bays, 2017)。

上述理论支持了空间位置在工作记忆编码和维持中的特殊地位。然而,另一些研究对空间位置在工作记忆表征中的特殊地位提出了挑战,从而引出位置非特异假设。

1.2 位置非特异假设

位置非特异假设则认为,空间位置的移除难度与其它非空间特征相似。这一假设来源于近期实证研究对空间位置特殊地位的挑战,主要体现在对空间自动编码和空间绑定理论这两大核心观点的反驳。

首先,一系列研究直接反驳了位置特异假设中空间位置自动编码的观点。例如,Tam 和 Wyble (2023)的研究发现,被试编码空间位置会消耗工作记忆资源,并损害对颜色等其它特征的记忆表现。这表明空间位置并非自动加工,而是与其它特征竞

争有限的工作记忆资源。同样, Woodman (2021)的研究也发现, 空间位置与非空间特征一样, 在编码时由于时间限制的压力, 可被视觉工作记忆过滤。这些证据表明, 空间位置不会自动编码, 在工作记忆中并不享有特殊地位, 在一定条件下可以被丢弃。

其次, 另有一些研究质疑了空间位置在特征绑定中的必要性。他们认为, 非空间特征间的绑定可以不依赖于空间位置独立存在(Kovacs & Harris, 2019; Treisman & Zhang, 2006)。Woodman 等人(2012)的研究发现, 即便客体的空间位置在任务中发生变化(如打乱和位移), 也并未影响其它特征的记忆绩效, 表明特征绑定关系并非依赖于空间位置。对此, 客体文件理论(Object file theory)提供了一种解释: 虽然位置索引在最初整合特征创建客体文件时起作用。但客体文件一旦形成, 位置就不再是维护特征绑定所必需的因素, 仅作为一个索引而不含任何信息(Hollingworth & Rasmussen, 2010; Kahneman et al., 1992)。此时, 特征(如颜色和形状)被牢固地整合在客体文件内部, 即使客体空间位置不断变化, 客体文件也可以稳定维持客体的身份, 这种绑定关系在一定程度上独立于当前的位置信息(Kahneman et al., 1992; Treisman & Zhang, 2006)。Logie 等人(2011)则提出了更为激进的观点, 认为空间位置与非空间特征(如颜色和形状)在工作记忆绑定中具有同等地位, 否定了其独特的中心枢纽作用。Al Hadrhrami 等人(2025)的研究进一步支持, 特征绑定的核心是客体本身, 而非其所在的位置。客体内部的颜色和形状(非空间特征)之间的绑定对

客体空间运动具有极高的鲁棒性, 这意味着视觉特征的整合并不必然需要空间位置作为锚点。

上述研究认为空间位置并非一个不可或缺、享有特权的特殊特征, 而更像一个与其它特征平等竞争认知资源的普通特征。因此, 它也应能像其它特征一样被彻底从工作记忆中移除。

1.3 当前研究

为验证上述假设, 本研究借鉴了 Park 等人(2017)从多特征客体中移除单个特征的操纵, 并采用回溯线索(retro-cue; Souza et al., 2016)来传达指令。该操作可确保客体的各特征维度在编码阶段获得同等程度加工。

实验中, 被试需记忆一个包含多个特征(位置、颜色、形状等)的单一客体。记忆项目消失后, 屏幕呈现回溯线索提示仅保留任务相关特征(如颜色), 同时移除所有未被提示的任务无关特征(如位置)。最后检测阶段被试仅需对任务相关特征做出判断, 如是否出现过(见图 1)。

本研究设计核心在于检测阶段对任务无关特征的操纵, 由此引发的现象, 在学界被称为“无关维度变化干扰效应”(Gao et al., 2011; Gao et al., 2009; Gao et al., 2016; Shen et al., 2013; Yin, Gao, et al., 2012; Yin, Zhou, et al., 2012)。该效应的逻辑为若任务无关特征已从工作记忆中有效移除, 其变化将不会影响被试在任务相关维度上的记忆绩效; 若任务无关特征未从工作记忆中有效移除, 那么它的变化会作为干扰因素影响被试在任务相关维度上的记忆绩效(Chen et al., 2024)。

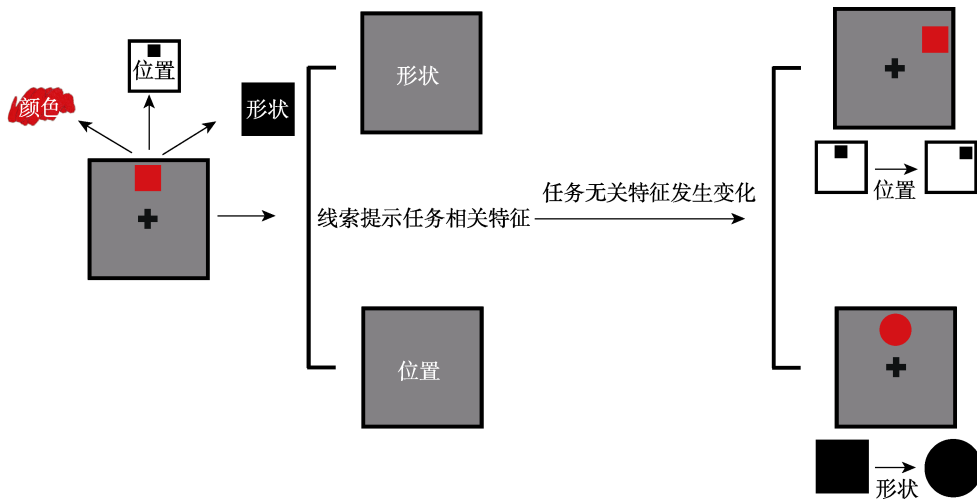


图 1 实验范式。被试首先编码一个多特征客体, 然后根据回溯线索(如形状)的提示, 保留任务相关特征, 并主动移除无关特征(如位置、颜色), 在探测阶段, 被试需要判断相关特征是否改变, 同时忽略无关特征的变化(如图中“位置”特征, 任务无关特征在本示例中均未发生改变)。本研究通过测量无关特征变化所造成的干扰, 来间接评估其移除效果。彩图见电子版, 下同。

基于上述逻辑,本研究将空间位置特征与非空间特征(颜色或形状)进行直接对比,并检验两种对立假设:根据位置特异假设:空间位置信息在工作记忆中具有特殊地位,则空间位置的移除将比非空间特征更具挑战性,可以预期当空间位置作为任务无关特征发生变化时,应比非空间特征变化时引发更强的干扰效应;相反,根据位置非特异假设:空间位置与其它特征并无本质区别,两类特征在工作记忆中移除难度类似,那么两者作为任务无关特征发生变化时,所引发的干扰效应应相当(研究设计及逻辑见图2,示例为实验1)。

2 实验 1: 任务无关特征移除任务(双特征客体)

本实验通过比较空间位置与非空间特征在工作记忆中的移除难度,来检验上述两个对立假设。以“任务无关维度变化所引发的干扰效应大小”作为衡量该特征是否被有效移除的指标。若空间位置已从工作记忆中有效移除,其发生变化时不会干扰被试在任务相关维度上的记忆表现,则支持“位置非特异假设”;反之,若空间位置因其特殊性而未有效移除,在探测阶段发生变化则会作为干扰因素降低被试的记忆绩效。

2.1 方法

2.1.1 被试

本实验使用 PANGEA 程序(Westfall, 2015)进行检验力分析,以确定所需样本量。每种条件有 54 个试次,使用 Cohen's $d = 0.45$ 作为效应量(来自 Richard 等人 2003 年的元分析),在样本量为 15 的条件下,被试内 2×2 交互作用的检验力达到 0.8。为了获得更大的检验力,本实验招募 26 名大学生被试(平均年龄为 21.04 岁, $SD = 1.99$ 岁,范围为 18~24 岁,包含 19 名女性)。所有被试视力正常或矫正至正常。实验 1 和实验 2 均经过中山大学心理学系保护人类被试伦理审查委员会审议通过(2025-0701-0410)。所有被试在实验前均签署了知情同意书。

2.1.2 刺激与设备

实验中每名被试端坐在距离 27 英寸屏幕(2560×1440 像素, 125 Hz)约 60 cm 处。刺激和实验程序通过 MATLAB 的 PsychToolbox 生成与实现(Brainard, 1997; Kleiner et al., 2007)。

所有刺激均显示在灰色背景(RGB: 130, 130, 130)上,黑色十字($0.67^\circ \times 0.67^\circ$)作为注视点。实验刺激为形状、颜色和位置各异的多边形,每个维度均

有 6 种可能性。可能出现的形状包括:等腰梯形、正方形、正三角形、菱形、圆形和正六边形;可能出现的颜色包括:红色(RGB: 255, 0, 0)、黄色(RGB: 255, 255, 0)、绿色(RGB: 0, 255, 0)、青色(RGB: 0, 255, 255)、蓝色(RGB: 0, 0, 255)和品红色(RGB: 255, 0, 255);可能出现的位置均位于以注视点为中心的不可见圆上(圆半径 5.34°),从注视点正上方开始,每个位置间隔 60° 。实验中使用三种文本提示(“形状”、“位置”和“颜色”; $2.67^\circ \times 1.34^\circ$)来提示需要记住的特征,同时主动移除未提示的其它特征。

2.1.3 设计与程序

为了防止被试使用言语标签来记住多边形,被试在整个试次过程中需要不断重复数字。一个数字($0.45^\circ \times 0.89^\circ$)会在每个试次开始时在屏幕中央持续呈现 500 ms。1000 ms 的空白之后呈现需要记住的多边形 150ms,接下来,回溯线索(retro-cue)出现 500 ms,提示任务相关特征,要求被试根据任务要求移除任务无关特征,仅保留任务相关特征。经过 1000 ms 的空白间隔后呈现探测刺激,被试需在 3000 ms 内尽快按键(F 或 J)判断任务相关特征是否发生变化,即探测刺激与记忆任务相关特征是否一致,同时忽略任务无关特征(F/J 键与相同/不同反应的匹配关系在被试间平衡)。任务相关和任务无关特征各有 50%的概率发生变化。经过 500 ms 的空白,屏幕上将呈现一个数字,被试需判断该数字是否与试次开始时的数字相同。数字有 50%概率发生变化。试次间间隔(ISI)随机设置在 1500 ms 至 2000 ms 之间。实验 1 的流程如图 3 所示。

实验 1 包含不同特征组合的实验条件:形状-位置和形状-颜色。采用组块设计,每个组块开始之前均会提示:被试需记住多边形的两个特征(形状-位置条件下记住形状和位置;形状-颜色条件下记住形状和颜色)。在形状-位置条件下,探测刺激的形状和位置可能发生变化,而颜色保持不变;在形状-颜色条件下,探测刺激的形状和颜色可能发生变化,而位置保持不变。两种组块的顺序在被试之间平衡。每个组块包含 216 个试次,被试共需要完成 432 个试次。在正式任务之前,被试需完成 16 个练习试次,直到练习测试的正确率超过 80%,才能进入正式任务,否则需重复练习。

2.2 结果

正式分析中,仅纳入数字变化觉察任务回答正确的试次(形状-位置条件平均正确率为 95.8%,形状-颜色条件平均正确率为 95.7%)。

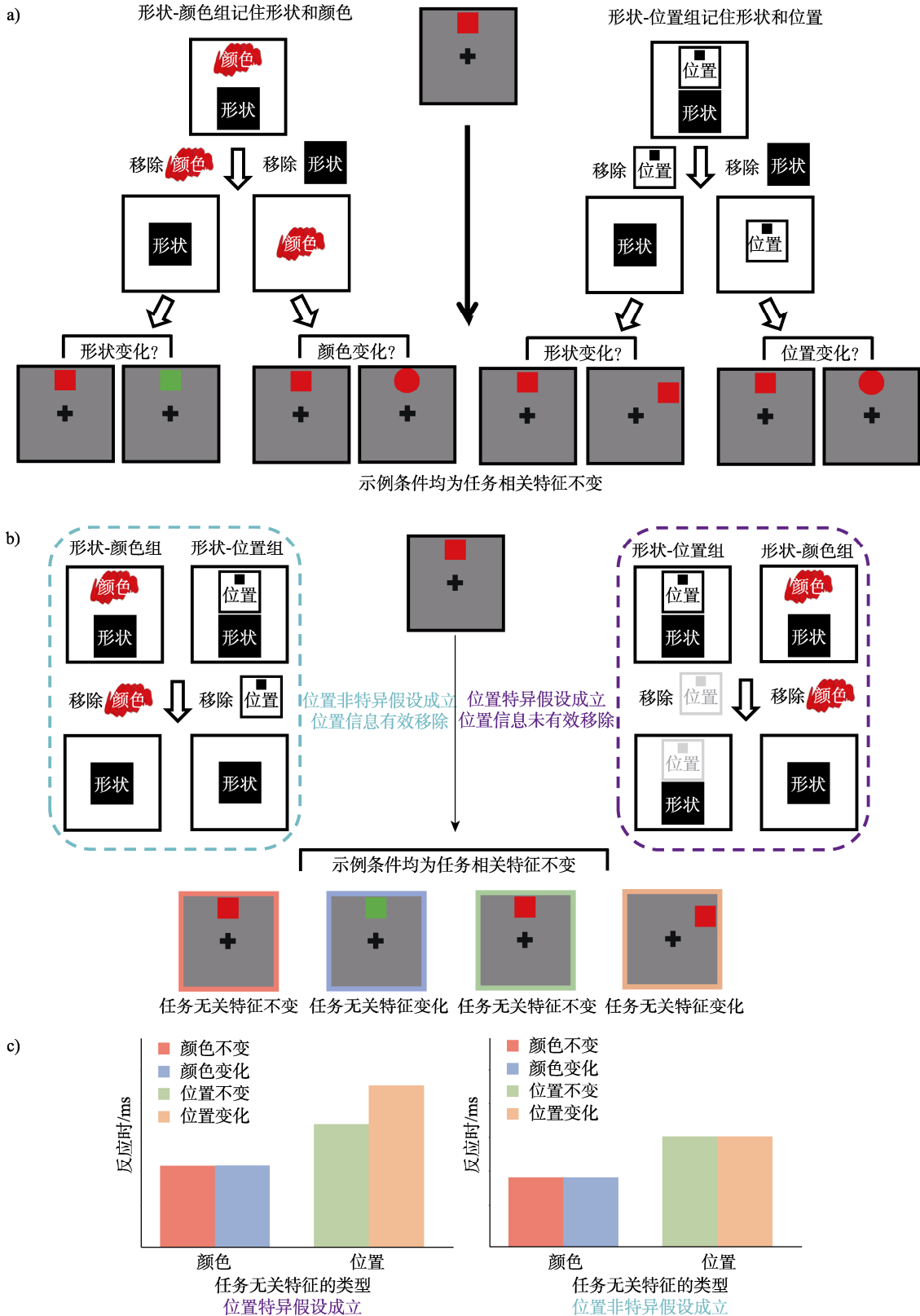


图 2 研究设计及逻辑示意图(示例为实验 1)。a)实验条件设置。实验包含两个条件：形状-颜色组(左侧)和形状-位置组(右侧)，在每个试次中，被试根据回溯线索提示，维持一个任务相关特征，并主动移除另一任务无关特征，最后对任务相关特征的变化进行判断。b)位置非特异性假设和位置特异性假设的逻辑。位置非特异性假设：位置信息已从工作记忆中有效移除，其发生变化时不会干扰被试在任务相关维度上的记忆表现；位置特异性假设：位置信息因其特殊性而难以有效移除，该特征会在工作记忆中保持活跃，其发生变化时会显著干扰被试在任务相关维度上的表现。c)对立假设的预期结果模式。

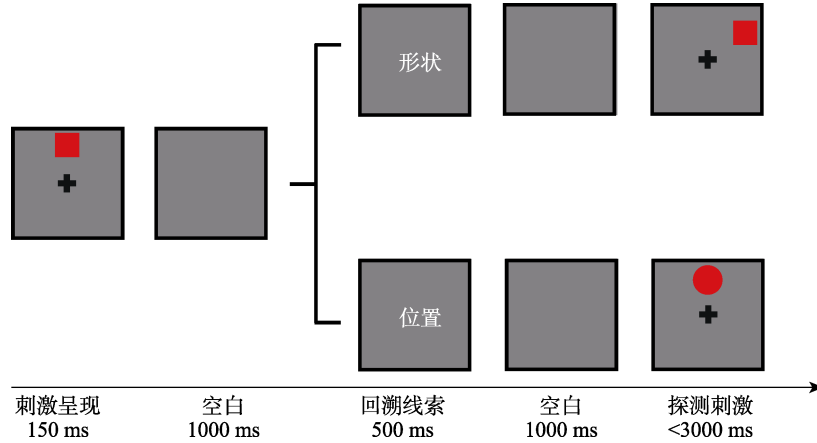


图3 实验1形状-位置条件的实验流程。在1000 ms的空白后呈现需记住的多边形150 ms, 要求被试记住多边形的形状和位置。接着回溯线索呈现500 ms提示任务相关特征, 被试继续记住任务相关特征, 并移除任务无关特征。空白间隔1000 ms后出现探测刺激, 被试要在保证正确的情况下, 尽快作出反应: 报告任务相关特征是否发生变化。任务相关特征和任务无关特征均有50%的概率发生变化。在图3的示例中, 任务无关特征发生了变化, 而与任务相关的特征保持不变。

首先, 针对任务相关特征, 在两个实验条件(形状-位置条件和形状-颜色条件)下分别进行配对 t 检验, 比较不同回溯线索条件下任务相关特征的正确率和反应时。为了避免任务无关特征的干扰, 仅筛选任务无关特征未发生变化的试次进行分析。

接下来, 为直接对比空间位置特征与非空间特征在工作记忆中的移除难度, 关注形状作为任务相关特征, 而位置或颜色作为任务无关特征的试次。在这些试次中, 进行了2(任务无关特征类型: 位置 vs. 颜色) \times 2(任务无关特征状态: 变 vs. 不变)的重复测量方差分析(ANOVA), 分别分析正确率和反应时。该分析目的: 相较于非空间特征, 被移除的空间位置在变化觉察任务中造成的干扰程度。

2.2.1 正确率

任务相关特征分析(见图4)。在形状-位置条件下, 位置报告的正确率为96.59% ($SD = 4.06\%$), 形状报告的正确率为94.18% ($SD = 7.45\%$)。在形状-颜色条件下, 颜色报告的正确率为97.75% ($SD = 2.91\%$), 形状报告的正确率为94.50% ($SD = 5.76\%$)。

配对 t 检验表明, 在形状-位置条件下, 位置报告的正确率高于形状报告($t(25) = -2.18, p = 0.039, \text{Cohen's } d = 0.43, 95\% \text{ CI} = [-0.05, -0.00]$)。在形状-颜色条件下, 颜色报告的正确率高于形状报告($t(25) = -3.03, p = 0.006, \text{Cohen's } d = 0.59, 95\% \text{ CI} = [-0.05, -0.01]$)。

任务无关特征分析(见图5a)。当位置为任务无关特征时, 位置变化试次的正确率为93.92% ($SD = 5.25\%$), 位置不变试次的正确率为94.18% ($SD =$

7.45%)。当颜色为任务无关特征时, 颜色变化试次的正确率为94.69% ($SD = 5.19\%$), 颜色不变试次的正确率为94.50% ($SD = 5.76\%$)。

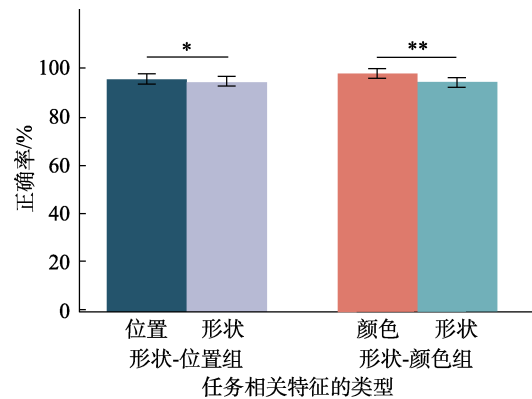


图4 实验1任务相关特征的正确率结果
注: 柱状图表示组均值, 误差线表示被试内95%置信区间。* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ 。

重复测量方差分析(ANOVA)结果显示, 任务无关特征类型($F(1, 25) = 0.34, p = 0.564$)和任务无关特征状态($F(1, 25) = 0.00, p = 0.961$)均无显著主效应, 二者的交互作用亦不显著, $F(1, 25) = 0.06, p = 0.815$ 。

2.2.2 反应时

仅报告正确的试次才被纳入反应时分析。

任务相关特征分析。在形状-位置条件下, 位置报告的反应时为700 ms ($SD = 194$ ms), 形状报告的反应时为735 ms ($SD = 195$ ms)。在形状-颜色条件下, 颜色报告的反应时为626 ms ($SD = 163$ ms), 形状报告的反应时为690 ms ($SD = 172$ ms)。

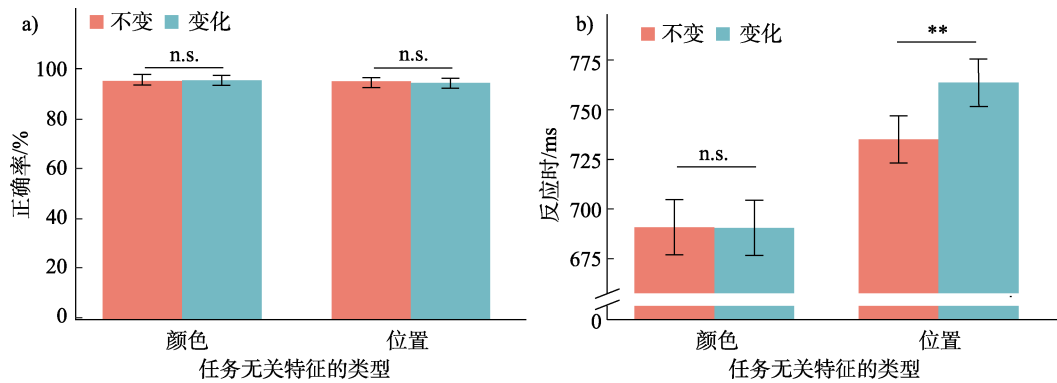


图5 a)实验1任务无关特征的正确率结果;b)实验1的反应时结果
注:柱状图表示组均值,误差线表示被试内95%置信区间。** $p < 0.01$, n.s. $p > 0.05$ 。

配对 t 检验结果表明,在形状-位置条件下,位置报告的反应时比形状报告更短($t(25) = 3.42, p = 0.002$, Cohen's $d = 0.67$, 95% CI = [14 ms, 55 ms])。在形状-颜色条件下,颜色报告的反应时比形状报告更短($t(25) = 5.27, p < 0.001$, Cohen's $d = 1.23$, 95% CI = [39 ms, 89 ms])。

任务无关特征分析。当位置为任务无关特征时,位置变化试次的反应时为 764 ms ($SD = 213$ ms),位置不变试次的反应时为 735 ms ($SD = 195$ ms)。当颜色为任务无关特征时,颜色变化试次的反应时为 691 ms ($SD = 172$ ms),颜色不变试次的反应时为 691 ms ($SD = 180$ ms)。

重复测量方差分析(ANOVA)结果显示,任务无关特征类型具有显著主效应, $F(1, 25) = 7.50, p = 0.011, \eta_p^2 = 0.23$, 即颜色的变化觉察反应时间比位置更短。但任务无关特征状态的主效应不显著, $F(1, 25) = 2.54, p = 0.124$ 。重要的是,交互作用显著, $F(1, 25) = 5.21, p = 0.031, \eta_p^2 = 0.17$, 表明任务无关空间位置信息的变化导致更强的干扰效应,而颜色的变化没有类似的干扰效应。

进一步的简单效应分析表明:相比于任务无关位置未变的试次,任务无关位置变化导致反应时显著增加, $F(1, 25) = 8.13, p = 0.009, \eta_p^2 = 0.25$;任务无关颜色的变化则未导致反应时增加, $F(1, 25) = 0.00, p = 0.979$ 。如图 5b 所示。这一发现表明,与任务无关的空间位置的变化确实会损害任务相关的记忆绩效,而与任务无关的颜色的变化则不会导致任务相关记忆绩效下降。

2.3 讨论

上述结果支持了“位置特异假设”,表明空间位置确实比非空间特征更难从工作记忆中移除。具体来说,当任务无关的空间位置发生变化时,它会显

著干扰形状的变化觉察任务,并导致更长的反应时间。这一干扰效应表明,尽管被试被要求移除任务无关的空间位置,但他们无法完全移除该信息。相比之下,任务无关的非空间特征(颜色)则能够被有效且完全地从客体表征中移除,因为颜色变化不会对变化觉察任务产生显著干扰(反应时未增加)。

3 实验 2: 任务无关特征移除任务(三特征客体)

实验 1 的结果表明,与任务无关的空间位置比非空间特征(颜色)更难从工作记忆中移除,这支持了“位置特异假设”。然而,由于任务无关的空间位置和非空间特征(颜色)分别来自形状-位置条件和形状-颜色条件,因此,所观测到的差异可能源于这两个任务不同。例如,这两个任务可能因需要记住的特征类型不同,而在任务难度上存在差异导致出现实验 1 结果。为排除该假设,实验 2 将需要记忆的特征维度设置为三个,并要求被试完成对其中两个特征维度的移除,所有被试执行相同任务,以排除任务间差异的影响。此外,为进行不同非空间位置与空间位置特征间差异的概念重复,实验 2 将形状替换为缺口朝向特征。

3.1 方法

3.1.1 被试

该实验使用 PANGEA 程序(Westfall, 2015)进行检验力分析。每种实验条件有 36 个试次,故使用 Cohen's $d = 0.45$ 作为效应量(来自 Richard 等人 2003 年的元分析)。结果表明,重复测量方差分析(ANOVA)在样本量为 28 时的检验力可达到 0.8。本实验招募了 29 名大学生被试(平均年龄为 19.97 岁, $SD = 1.72$ 岁,范围为 18~24 岁,包含 19 名女性)。所有被试视力正常或矫正至正常。所有被试在实验

前均签署了知情同意书。

3.1.2 刺激

记忆刺激由多边形改为缺口圆, 其缺口角度为 30° 。该刺激除空间位置外还包含两个非空间特征: 颜色和缺口朝向。每个特征均有 6 种可能的值: 颜色和位置的可能值与实验 1 相同; 缺口朝向的 6 种可能值从注视点正上方开始, 以 60° 间隔排列。

3.1.3 设计与程序

实验 2 的程序与实验 1 类似, 但存在以下不同之处: 在编码阶段被试需记住刺激的两个特征(颜色、位置、缺口朝向), 任务相关特征由回溯线索(retro-cue)提示, 三种特征被提示的概率相等, 被试需主动移除未被提示的两个特征(任务无关特征)。在变化觉察任务中, 任务相关特征的变化概率为 50%, 任务无关特征在 50% 的试次保持不变; 另外 50% 的试次中, 一个任务无关特征发生变化(两个任务无关特征各有 25% 的概率发生变化)。在正式任务之前, 被试需先完成 16 个练习试次, 直到练习测试的正确率超过 80%, 才能进入正式实验。正式实验中, 每名被试需完成 432 个试次。实验 2 的流程如图 6 所示。

3.2 结果

正式分析中, 仅纳入数字变化觉察任务回答正确的试次(平均正确率为 96.3%)。

首先, 关注任务相关特征, 并使用重复测量方

差分析(ANOVA)比较不同回溯线索条件下任务相关特征的正确率和反应时。为了避免任务无关特征的干扰, 仅筛选任务无关特征未发生变化的试次进行分析。

随后, 关注以朝向或颜色为任务相关特征, 而位置和另一个非空间特征(颜色或朝向)为任务无关特征的试次。如果任务无关空间位置的变化会干扰任务表现(而与任务无关的非空间特征不会), 则可进一步验证“位置特异假设”; 如果任务无关空间位置与任务无关的非空间特征的变化都不会干扰任务表现, 则支持“位置非特异假设”。我们分别对任务相关特征为颜色或朝向的试次, 进行单因素重复测量方差分析(ANOVA), 来比较任务无关特征的三种状态(不变 vs. 位置变化 vs. 非空间特征变化(颜色/朝向))。未满足球形假设的统计检验则使用 Greenhouse-Geisser 校正。

3.2.1 正确率

任务相关特征分析(见图 7)。位置报告的正确率为 96.29% ($SD = 4.75\%$), 颜色报告的正确率为 97.67% ($SD = 2.51\%$), 朝向报告的正确率为 96.76% ($SD = 3.85\%$)。重复测量方差分析(ANOVA)表明, 不同特征的正确率之间无显著差异, $F(2, 56) = 1.54, p = 0.222$ 。

任务无关特征分析。当朝向为任务相关特征时(见图 8a), 与任务无关特征不变试次的正确率为

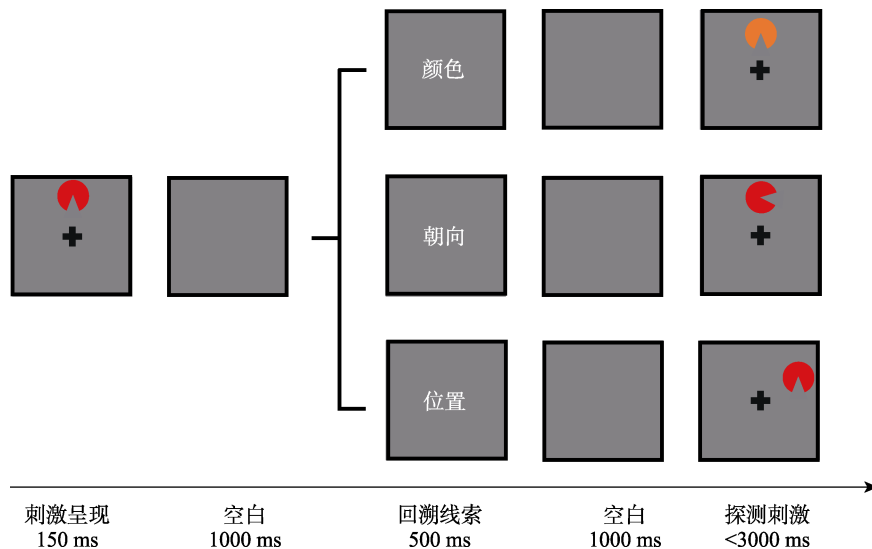


图 6 实验 2 的实验流程。实验 2 的实验流程与实验 1 相同, 但有以下差异: 刺激变成了有缺口的圆圈, 与任务相关的特征是颜色、朝向和位置。回溯线索仍然指示与任务相关的特征, 被试需移除其它两个任务无关特征。任务相关特征的变化概率为 50%, 任务无关特征在 50% 的试次保持不变; 另外 50% 的试次中, 一个任务无关特征发生变化(两个任务无关特征各有 25% 的概率发生变化)。在图 6 的示例中, 与任务无关的特征保持不变, 而与任务相关的特征发生了变化。

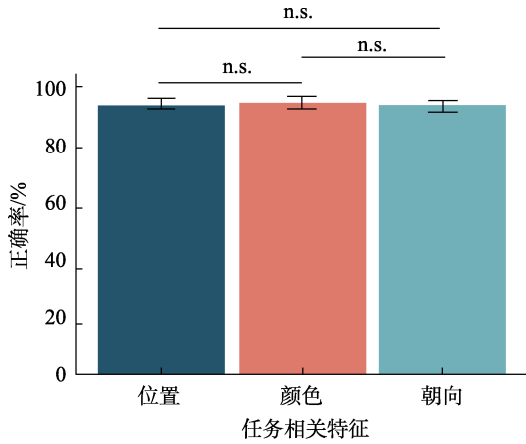


图 7 实验 2 任务相关特征的正确率结果
注：柱状图表示组均值，误差线表示被试内 95%置信区间。n.s. $p > 0.05$ 。

96.76% ($SD = 3.85%$); 与任务无关的位置变化试次的正确率为 96.07% ($SD = 5.42%$); 与任务无关的颜色变化试次的正确率为 97.24% ($SD = 4.52%$)。重复测量方差分析(ANOVA)结果显示, 不同任务无关特征状态下的正确率无显著差异, $F(2, 56) = 1.08, p = 0.347$ 。

当颜色为任务相关特征时(见图 8b), 与任务无关特征不变试次的正确率为 97.67% ($SD = 2.51%$); 与任务无关的位置变化试次的正确率为 96.28% ($SD = 3.82%$); 与任务无关朝向变化试次的正确率为 96.13% ($SD = 3.66%$)。重复测量方差分析(ANOVA)显示, 不同任务无关特征状态下的正确率无显著差异, $F(1.4, 40.35) = 2.55, p = 0.106$ 。

3.2.2 反应时

仅报告正确的试次才被纳入反应时分析。

任务相关特征分析。位置报告、颜色报告和朝向报告的反应时分别为 722 ms ($SD = 190$ ms)、676 ms ($SD = 165$ ms)和 764 ms ($SD = 162$ ms)。重复测量方差分析(ANOVA)表明, 不同特征报告的反应时存在显著差异, $F(2, 56) = 39.97, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.59$ 。事后检验结果表明, 位置报告的反应时显著短于朝向报告($p = 0.002, \text{Cohen's } d = 0.731, 95\% \text{ CI} = [20 \text{ ms}, 64 \text{ ms}]$)、长于颜色报告($p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.814, 95\% \text{ CI} = [-10 \text{ ms}, 67 \text{ ms}]$), 颜色报告的反应时显著短于朝向报告($p < 0.001, \text{Cohen's } d = 2.003, 95\% \text{ CI} = [71 \text{ ms}, 105 \text{ ms}]$)。

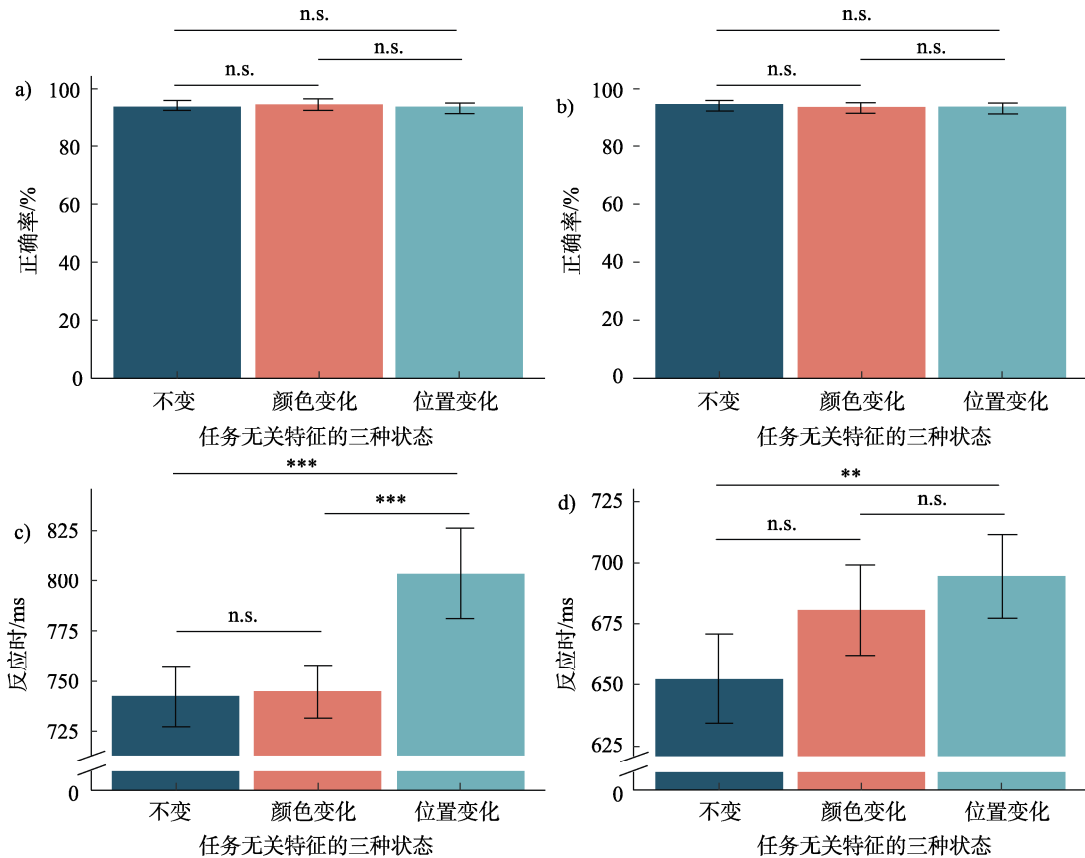


图 8 a)实验 2 任务无关特征的正确率结果, 任务相关/目标特征为朝向。b)实验 2 任务无关特征的正确率结果, 任务相关/目标特征为颜色。c)实验 2 的反应时结果, 任务相关/目标特征为朝向。d)实验 2 的反应时结果, 任务相关/目标特征为颜色。柱状图表示组均值, 误差线表示被试内 95%置信区间。*** $p < 0.001, ** p < 0.01, \text{n.s. } p > 0.05$ 。

任务无关特征分析。当朝向为任务相关特征时,任务无关特征不变试次、任务无关位置变化试次和任务无关颜色变化试次的反应时分别为 742 ms ($SD = 152$ ms)、804 ms ($SD = 188$ ms)和 745 ms ($SD = 156$ ms)。重复测量方差分析(ANOVA)结果显示,不同任务无关特征状态下的反应时存在显著差异, $F(1.37, 38.48) = 116.60, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.37$ 。计划性事后检验的结果表明,任务无关位置变化导致反应时显著增加,相比于任务无关特征未发生变化($p = 0.001, \text{Cohen's } d = 0.794, 95\% \text{ CI} = [25 \text{ ms}, 98 \text{ ms}]$)和任务无关颜色特征变化($p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.811, 95\% \text{ CI} = [25 \text{ ms}, 93 \text{ ms}]$),而任务无关特征未发生变化和任务无关颜色特征变化的反应时无显著差异($p = 0.999, \text{Cohen's } d = 0.064, 95\% \text{ CI} = [-20 \text{ ms}, 15 \text{ ms}]$),如图 8c 所示。

当颜色为任务相关特征时,任务无关特征不变试次、任务无关位置变化试次和任务无关朝向变化试次的反应时分别为 653 ms ($SD = 147$ ms)、694 ms ($SD = 179$ ms)和 681 ms ($SD = 181$ ms)。不同任务无关特征状态下的反应时存在显著差异, $F(2, 56) = 6.05, p = 0.004, \eta_p^2 = 0.18$ 。具体而言,与任务无关特征不变试次相比,任务无关位置的变化导致反应时更长($p = 0.006, \text{Cohen's } d = 0.637, 95\% \text{ CI} = [11 \text{ ms}, 73 \text{ ms}]$),而任务无关朝向的变化不影响反应时($p = 0.125, \text{Cohen's } d = 0.405, 95\% \text{ CI} = [-5 \text{ ms}, 62 \text{ ms}]$)。任务无关的朝向变化试次和任务无关的位置变化试次的反应时差异不显著($p = 0.812, \text{Cohen's } d = 0.221, 95\% \text{ CI} = [-17 \text{ ms}, 45 \text{ ms}]$),如图 8d 所示。

3.3 讨论

实验 1 可能存在任务难度不同导致实验条件间存在对比不均衡的风险。为确定实验 1 结果支持的位置特异假设的可靠性,在实验 2 中让所有被试执行同一个任务,以排除任务间差异的影响。

实验 2 有效排除了实验 1 中可能存在的因任务难度差异导致的混淆,并发现了与实验 1 一致的结论,进一步支持了“位置特异假设”。任务无关的空间位置变化确实会导致显著的记忆绩效损害,而任务无关的非空间特征(颜色和朝向)变化则不会。具体而言,当任务无关的空间位置发生变化时,被试在变化觉察任务中的反应时间显著增加,这表明被试在完成空间位置未有效移除,使得被试仍受到任务无关空间位置的干扰;相比之下,任务无关的颜色或朝向的变化未引起类似的干扰,表明它们能够被更彻底地从工作记忆中移除,而不会对任

务相关特征的记忆绩效产生影响。

尽管 Huang (2020)关于工作记忆表征单位的研究发现,个体可以对朝向以模拟(mimic)的方式进行类似空间位置的表征,为朝向和空间位置的表征带来一定的相似性(Huang, 2020; Huang & Pashler, 2007)。但二者仍然存在本质上的差异,朝向的模拟表征策略存在容量限制,只能进行有限的模仿,与空间位置这一布尔地图的基石框架本质不同。本研究的基线为任务无关特征不变条件的反应时,更关注与基线相比,不同条件下干扰效应的“有无”,即是否被彻底移除。如图 8d 所示,任务无关朝向变化条件下的反应时与不变条件无显著差异,而任务无关位置变化条件下的反应时则显著长于不变条件。这一结果支持了空间位置相较于朝向的特殊性,空间位置的移除比非空间特征(颜色、朝向)更有挑战性。

4 总讨论

尽管大量前人研究表明空间位置在工作记忆中的特殊性,但当它被主动移除时是否仍表现出这种特殊性并不清楚。为回答该问题,本研究提出两种对立假设:位置特异假设认为,移除空间位置比移除非空间特征更为困难;位置非特异假设则认为,空间位置的移除难度与其它非空间特征相当。

研究的核心逻辑为若任务无关特征被移除,那么操纵其在后续任务中变化,不会对任务相关特征的记忆绩效产生影响;若任务无关特征无法被有效移除,则会产生影响。本研究的两个实验获得了一致性结果,均支持“位置特异假设”:与非空间特征相比,空间位置更难从工作记忆中移除。这种移除的不对称性表明位置信息在工作记忆动态加工中的特殊性。

4.1 移除的特殊性 vs. 绑定的普遍性:与 Logie 等人(2011)理论比较

本研究的核心发现(空间位置难以从工作记忆中移除)与 Logie 等人(2011)的经典理论构成了值得探讨的对比。Logie 等人(2011)认为,空间位置的特殊性主要体现在感觉记忆向工作记忆转化的早期阶段,一旦工作记忆表征得以巩固,位置将与其它非空间特征遵循相同的认知原则。本研究的发现则表明,即使在后期的移除阶段,空间位置仍然表现出了特殊性。我们认为这种看似矛盾的发现,源于核心研究问题与实验设计上的根本差异。

首先,核心研究问题不同:本研究聚焦于对已形成的完整客体进行主动移除过程,探讨如何主动

拆解表征;而 Logie 等人(2011)的研究则探讨信息进入工作记忆时的特征绑定与被动维持的原则,探讨表征如何建立和维持,二者所处的认知阶段和加工性质不同。

其次,研究范式不同:本研究采用回溯线索(retro-cue)范式,确保被试平等编码全部特征后,再根据指令执行移除操作。相比之下, Logie 等人(2011)的研究采用前溯线索(pre-cue),即在编码前告知被试任务无关特征。在这种情况下,被试很可能在编码阶段已经完成对无关信息的过滤,因此并未体现真正意义上的主动移除过程。

值得注意的是,尽管研究问题和范式不同, Logie 等人(2011)的部分数据从侧面支持了本研究发现。他们研究发现,由任务无关的位置变化所引发的干扰效应,其持续时间(约 1500 ms)远长于非空间特征(约 500 ms)。这种干扰更难消退的现象,暗示了移除或抑制空间位置信息比非空间特征需要更长的时间。

此外,本研究观察到的空间位置特殊性的确来源于工作记忆移除阶段,而非来自于编码阶段。具体而言,若位置信息在工作记忆移除阶段的顽固性来源于其编码阶段的优势,其编码的表现应该高于其它非空间特征。然而,实验 2 中任务相关特征的反应时数据显示,空间位置记忆任务的反应速度介于颜色(反应最快)和朝向(反应最慢)之间,该结果有力地驳斥了“编码优势”这一备择假设,说明空间位置的特殊性的确来源于工作记忆移除阶段。

4.2 为何空间位置在工作记忆中如此“顽固”?

本研究发现的空间位置在工作记忆移除过程中的顽固性,看似会干扰工作记忆表征的高效更新。然而,我们认为这种移除上的困难,源自于空间位置在工作记忆表征中具有核心地位,因而受到保护。

具体来说,引言中提及的诸多理论均支持空间位置在工作记忆中扮演特殊角色。客体文件理论(Object file theory)提出,客体的不同特征通过空间位置作为索引存储在一个客体文件中,因而空间位置信息是访问客体文件的必要线索(Green & Quilty-Dunn, 2021; Kahneman et al., 1992)。如果客体的空间信息被破坏,则其中的其它特征也将无法被访问。空间绑定理论(Spatial binding account)认为,空间位置是所有非空间特征的中心枢纽,所有非空间特征均直接绑定于空间位置上。基于该理论,空间信息的丢失将导致其它绑定特征的解体(Kovacs

& Harris, 2019; Treisman & Zhang, 2006)。此外,还有研究者发现,相较于以非空间特征作为线索,以空间位置作为线索来访问工作记忆中的项目更慢。这一发现同样支持了空间位置在工作记忆中具有特殊地位,对其访问需要更深层次的加工(Kong & Fournie, 2022)。任务无关位置的自动编码现象也为此提供了佐证(Chen & Wyble, 2015; Chun & Jiang, 1998; Foster et al., 2017; Treisman & Zhang, 2006),即使空间位置与任务无关,也会被自动编码进入工作记忆。

上述理论框架和实证证据均支持空间位置在工作记忆表征中具有根基作用(Groen et al., 2022)。因此,对空间位置的保护对于维持整个工作记忆表征至关重要,空间位置在工作记忆中的顽固性可能来源于对空间位置的过度保护。

4.3 移除过程中的特征不对称性:空间 vs. 非空间特征

已有大量证据表明,空间位置在工作记忆编码与维持阶段具有特殊地位(Chen & Wyble, 2015; Foster et al., 2017; Kovacs & Harris, 2019; Treisman & Zhang, 2006)。本研究将上述规律扩展至工作记忆移除阶段,更加确认了空间位置在工作记忆中的特殊性。

工作记忆容量极其有限,因而移除任务无关信息对工作记忆的更新和高效利用信息至关重要。然而,以往关于工作记忆信息移除的研究聚焦于对整个客体的移除(Kim et al., 2020; Williams et al., 2013),缺乏对不同特征维度的区分。本研究发现了工作记忆基于特征的移除存在不对称性。

具体来说,与空间位置表现出的难以移除不同,非空间特征(如颜色和形状)从工作记忆中移除相对容易。本研究的两个实验中,非空间特征作为任务无关特征被要求移除后,其在探测阶段的变化并未对当前记忆任务造成显著的干扰,从而支持了非空间特征移除的有效性。这一发现与前人研究吻合,研究者发现在视觉搜索任务中,被指示忽略的非空间特征在后续的搜索过程中不会自动捕获注意(Chen et al., 2024; Sasin & Fournie, 2020)。这些研究指向一个结论:非空间特征与空间位置不同,空间位置难以被移除出工作记忆,而非空间特征可以相对容易地被移除。

空间与非空间特征在移除过程中的不对称性,提示一种可能的工作记忆机制:非空间特征可作为被灵活调用和替换的内容信息,而空间位置则扮演

着更为基础的、定义客体存在框架的结构角色。更进一步,在表征更新过程中,工作记忆可能倾向于优先保护作为表征地基的空间框架,同时允许附着其上的非空间内容被灵活地修改或清除。

5 结论

本研究通过回溯线索范式直接对比了工作记忆中空间位置与非空间特征的移除。非空间特征作为任务无关特征发生变化时,对当前任务反应时不会产生影响,说明该特征已从工作记忆中有效移除。而空间位置作为任务无关特征发生变化时,完成当前任务的反应时延长,说明空间位置未有效移除。该研究发现,与非空间特征相比,空间位置更难从工作记忆中移除。

参 考 文 献

- Al Hadhrami, S. S., Bartsch, L. M., & Oberauer, K. (2025). A multinomial model-based analysis of bindings in working memory. *Psychological Review*, *132*(4), 828–856. <https://doi.org/10.1037/rev0000540>
- 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. (2014). Noise in neural populations accounts for errors in working memory. *Journal of Neuroscience*, *34*(10), 3632–3645. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3204-13.2014>
- Brainard, D. H. (1997). The psychophysics toolbox. *Spatial Vision*, *10*(4), 433–436. <https://doi.org/10.1163/156856897X00357>
- Chen, H., & Wyble, B. (2015). The location but not the attributes of visual cues are automatically encoded into working memory. *Vision Research*, *107*, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2014.11.010>
- Chen, W., Ye, S., Ding, X., Shen, M., & Gao, Z. (2024). Selectively maintaining an object's feature in visual working memory: A comparison between highly discriminable and fine-grained features. *Memory & Cognition*, *53*, 853–868. <https://doi.org/10.3758/s13421-024-01612-w>
- Chun, M. M., & Jiang, Y. (1998). Contextual cueing: Implicit learning and memory of visual context guides spatial attention. *Cognitive Psychology*, *36*(1), 28–71. <https://doi.org/10.1006/cogp.1998.0681>
- Foster, J. J., Bsales, E. M., Jaffe, R. J., & Awh, E. (2017). Alpha-band activity reveals spontaneous representations of spatial position in visual working memory. *Current Biology*, *27*(20), 3216–3223. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.09.031>
- Fougnie, D., Cormiea, S. M., & Alvarez, G. A. (2013). Object-based benefits without object based representations. *Journal of Experimental Psychology: General*, *142*(3), 621–626. <https://doi.org/10.1037/a0030300>
- Gao, T., Gao, Z., Li, J., Sun, Z., & Shen, M. (2011). The perceptual root of object-based storage: An interactive model of perception and visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *37*(6), 1803–1823. <https://doi.org/10.1037/a0025637>
- Gao, Z., Li, J., Liang, J., Chen, H., Yin, J., & Shen, M. (2009). Storing fine detailed information in visual working memory—Evidence from event-related potentials. *Journal of Vision*, *9*(7), 17. <https://doi.org/10.1167/9.7.17>
- Gao, Z., Yu, S., Zhu, C., Shui, R., Weng, X., Li, P., & Shen, M. (2016). Object-based encoding in visual working memory: Evidence from memory-driven attentional capture. *Scientific Reports*, *6*(1), 22822. <https://doi.org/10.1038/srep22822>
- Green, E. J., & Quilty-Dunn, J. (2021). What is an object file? *The British Journal for the Philosophy of Science*, *73*(3), 665–699. <https://doi.org/10.1093/bjps/axx055>
- Groen, I. L., Dekker, T. M., Knapen, T., & Silson, E. H. (2022). Visuospatial coding as ubiquitous scaffolding for human cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, *26*(1), 81–96. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2021.10.011>
- Hollingworth, A., & Rasmussen, I. P. (2010). Binding objects to locations: The relationship between object files and visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *36*(3), 543–564. <https://doi.org/10.1037/a0017836>
- Huang, L. (2010). What is the unit of visual attention? Object for selection, but Boolean map for access. *Journal of Experimental Psychology: General*, *139*(1), 162–179. <https://doi.org/10.1037/a0018034>
- Huang, L. (2020). Unit of visual working memory: A Boolean map provides a better account than an object does. *Journal of Experimental Psychology: General*, *149*(1), 1–30. <https://doi.org/10.1037/xge0000616>
- Huang, L., & Pashler, H. (2007). A Boolean map theory of visual attention. *Psychological Review*, *114*(3), 599–631. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.114.3.599>
- Johnston, W. A., & Dark, V. J. (1986). Selective attention. *Annual Review of Psychology*, *37*(1), 43–75. <https://doi.org/10.1146/annurev.ps.37.020186.000355>
- Kahneman, D., Treisman, A., & Gibbs, B. J. (1992). The reviewing of object files: Object-specific integration of information. *Cognitive Psychology*, *24*(2), 175–219. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(92\)90007-O](https://doi.org/10.1016/0010-0285(92)90007-O)
- Kim, H., Smolker, H. R., Smith, L. L., Banich, M. T., & Lewis-Peacock, J. A. (2020). Changes to information in working memory depend on distinct removal operations. *Nature Communications*, *11*(1), 6239. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20085-4>
- Kleiner, M., Brainard, D., & Pelli, D., Ingling, A., Murray, R., & Broussard, C. (2007). What's new in Psychtoolbox-3? *Perception*, *36*, 1–16.
- Kong, G., & Fougne, D. (2022). How selection in the mind is different from attention to the world. *Journal of Experimental Psychology: General*, *151*(3), 542–554. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/xge0001098>
- Kovacs, O., & Harris, I. M. (2019). The role of location in visual feature binding. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *81*(5), 1551–1563. <https://doi.org/10.3758/s13414-018-01638-8>
- 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>
- Logie, R. H., Brockmole, J. R., & Jaswal, S. (2011). Feature binding in visual short-term memory is unaffected by task-irrelevant changes of location, shape, and color. *Memory & Cognition*, *39*, 24–36. <https://doi.org/10.3758/s13421-010-0001-z>
- Lara, A. H., & Wallis, J. D. (2014). Executive control processes underlying multi-item working memory. *Nature Neuroscience*, *17*(6), 876–883. <https://doi.org/10.1038/nn.3702>

- Luck, S. J., & Hillyard, S. A. (1994). Spatial filtering during visual search: evidence from human electrophysiology. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20(5), 1000–1014. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.20.5.1000>
- Luck, S. J., & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 390(6657), 279–281. <https://doi.org/10.1038/36846>
- Ma, W. J., Husain, M., & Bays, P. M. (2014). Changing concepts of working memory. *Nature Neuroscience*, 17(3), 347–356. <https://doi.org/10.1038/nn.3655>
- Oberauer, K., Farrell, S., Jarrold, C., & Lewandowsky, S. (2016). What limits working memory capacity? *Psychological Bulletin*, 142(7), 758–799. <https://doi.org/10.1037/bul0000046>
- 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(12), 1773–1785. <https://doi.org/10.1177/0956797617719949>
- Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13(1), 25–42. <https://doi.org/10.1146/annurev.ne.13.030190.000325>
- Richard, F. D., Bond, C. F., Jr., & Stokes-Zoota, J. J. (2003). One hundred years of social psychology: Quantitative synthesis of 2,500 articles. *Review of General Psychology*, 7(4), 331–363. <https://doi.org/10.1037/1089-2680.7.4.331>
- Sasin, E., & Fougny, D. (2020). Memory-driven capture occurs for individual features of an object. *Scientific Reports*, 10(1), 19499. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76431-5>
- Schneegans, S., & Bays, P. M. (2017). Neural architecture for feature binding in visual working memory. *The Journal of Neuroscience*, 37(14), 3913–3925. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3493-16.2017>
- Schneegans, S., McMaster, J., & Bays, P. M. (2022). Role of time in binding features in visual working memory. *Psychological Review*, 130(1), 137–154. <https://doi.org/10.1037/rev0000331>
- Shen, M., Tang, N., Wu, F., Shui, R., & Gao, Z. (2013). Robust object-based encoding in visual working memory. *Journal of Vision*, 13(2), 1–11. <https://doi.org/10.1167/13.2.1>
- Souza, A. S., Rerko, 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(6), 890–910. <https://doi.org/10.1037/xhp0000192>
- Tam, J., & Wyble, B. (2023). Location has a privilege, but it is limited: Evidence from probing task-irrelevant location. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 49(7), 1051–1067. <https://doi.org/10.1037/xlm0001147>
- Treisman, A., & Zhang, W. (2006). Location and binding in visual working memory. *Memory & Cognition*, 34(8), 1704–1719. <https://doi.org/10.3758/BF03195932>
- Westfall, J. (2015). *PANGAEA: Power analysis for general ANOVA designs*. Unpublished manuscript. Available at <http://jakewestfall.org/publications/pangea.pdf>
- Williams, M., Hong, S. W., Kang, M. S., Carlisle, N. B., & Woodman, G. F. (2013). The benefit of forgetting. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20, 348–355. <https://doi.org/10.3758/s13423-012-0354-3>
- Wolfe, J. M., & Horowitz, T. S. (2004). What attributes guide the deployment of visual attention and how do they do it? *Nature Reviews Neuroscience*, 5(6), 495–501. <https://doi.org/10.1038/nrn1411>
- Woodman, G. F. (2021). Spatial location is filtered out of visual working memory representations when task irrelevant, just like other features. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 83(4), 1391–1396. <https://doi.org/10.3758/s13414-021-02263-8>
- Woodman, G. F., Vogel, E. K., & Luck, S. J. (2012). Flexibility in visual working memory: Accurate change detection in the face of irrelevant variations in position. *Visual Cognition*, 20(1), 1–28. <https://doi.org/10.1080/13506285.2011.630694>
- Yin, J., Gao, Z., Jin, X., Ding, X., Liang, J., & Shen, M. (2012). The neural mechanisms of percept-memory comparison in visual working memory. *Biological Psychology*, 90(1), 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2012.02.023>
- Yin, J., Zhou, J., Xu, H., Liang, J., Gao, Z., & Shen, M. (2012). Does high memory load kick task irrelevant information out of visual working memory? *Psychonomic Bulletin & Review*, 19(2), 218–224. <https://doi.org/10.3758/s13423-011-0201-y>

Spatial location is harder to remove from working memory than non-spatial features

REN Guofang¹, DING Xiaowei², ZHANG Yingchao², WANG Shengyuan²

⁽¹⁾ School of Education, Anyang Normal University, Anyang 455000, China

⁽²⁾ Department of Psychology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China

Abstract

Working memory (WM) is a limited-capacity system, its functioning relies heavily on the ability to remove no-longer-relevant information. While previous research has primarily focused on the removal of entire objects, it remains unclear whether all features within an object share a common fate during removal. In particular, given the privileged status of spatial location across various cognitive processes, it is an open question whether location information is treated differently during removal. To answer this question, we directly compared the removal of spatial and non-spatial features from WM. We proposed two competing hypotheses: The location-specific hypothesis assumed that spatial location was more difficult to remove from WM than non-spatial features, due to its central role in object representation. In contrast, the location-non-specific

hypothesis assumed that spatial and non-spatial features share similar removal difficulties.

To test these hypotheses, we conducted two experiments with 55 participants ($N = 26$ in Experiment 1; $N = 29$ in Experiment 2). We employed a newly developed paradigm combining retro-cue with a change-detection task. On each trial, participants memorized a single object defined by multiple features (e.g., color and location). After a 500-ms delay, a retro-cue indicated the task-relevant feature, and participants were explicitly instructed to remove the uncued feature from WM. Following a 1000-ms delay, a probe appeared, and participants judged whether the cued feature had changed. Crucially, the uncued (task-irrelevant) feature changed in 50% of the trials, allowing us to quantify residual interference from information that should have been removed.

The critical measure was the interference effect, defined as the difference in reaction time (RTs) between trials with and without a change in the task-irrelevant feature. If removal is successful, changes in the task-irrelevant feature should produce little or no interference. In Experiment 1, we observed greater interference when spatial location was the task-irrelevant feature compared to when a non-spatial feature was irrelevant. This finding supports the location-specific hypothesis. However, because different feature types were tested under separate task conditions, it remained possible that the observed difference reflected task-related confounds (e.g., differing task difficulty). To address this concern, we conducted experiment 2, which tested spatial and non-spatial features within a unified task structure, eliminating between-condition differences. The results replicated those of Experiment 1: changes to task-irrelevant locations produced reliable interference, whereas changes to task-irrelevant non-spatial features did not.

Across both experiments, we found consistent evidence that spatial location is more difficult to remove from WM than non-spatial features. This finding supports location-specific hypothesis. Taken together, our study supported the privileged status of spatial location in WM removal.

Keywords working memory, spatial location, working memory removal