

目标匹配干扰物在视觉工作记忆中的加工： 捕获注意与存储增益*

王焰翔 戴明夙 郭芮巧 刘 强

(四川师范大学脑与心理科学研究院, 成都 610066)

摘 要 视觉工作记忆(Visual Working Memory, VWM)的容量限制要求认知系统必须具备高效的选择机制。传统观点认为, 干扰物一旦进入 VWM 存储, 必然导致资源竞争并削弱目标记忆表现。然而, 当干扰物携带目标记忆特征(即目标匹配干扰物)时, 这一假设是否成立尚不明确。本研究采用偏侧化 VWM 过滤范式, 通过两项脑电实验考察目标匹配干扰物的加工过程及其对行为表现的影响。实验 1 发现, 干扰物偏侧呈现时, 匹配和部分匹配条件均诱发显著的 N2pc (反映注意捕获)与 CDA (反映 VWM 存储)。实验 2 通过控制呈现概率, 不支持该效应由策略性加工驱动, 验证了上述效应的稳健性: 尽管匹配干扰物占用了存储资源(诱发 CDA), 但记忆正确率并未受损, 反而显著高于不匹配条件。综合结果表明, 目标匹配干扰物在 VWM 中表现出独特的加工模式: 它们能捕获注意并占据存储资源, 但并未导致目标记忆表现下降, 而是为目标存储提供“增益”, 促进了目标的记忆表现。

关键词 注意, 视觉工作记忆, 选择机制

分类号 B842

1 前言

视觉工作记忆(Visual Working Memory, VWM)是人类高级认知加工的重要基础(Baddeley, 2003)。由于其容量极其有限(约 3~4 个组块)(Cowan, 2001; Luck & Vogel, 1997), 认知系统必须具备高效的信息选择机制, 以确保有限的加工资源免受无关信息侵占。然而, 在复杂的视觉场景中, 干扰物往往会分散对目标的注意, 导致干扰物被错误编码入 VWM, 使目标表现受损(Lavie, 2005; Schmidt et al., 2002)。

在 VWM 的经典理论模型中, 干扰物通常被视为阻碍目标加工的因素。干扰物一旦通过选择机制并进入 VWM 存储, 便会与目标表征争夺有限的认知资源, 不可避免地导致记忆表现的下降(Awh et al., 2006; Desimone & Duncan, 1995)。行为学证据表明, 在编码阶段呈现干扰物会显著降低记忆成绩, 且这种干扰效应随干扰物数量的增加而增大(McNab &

Dolan, 2014)。Vogel 等人(2005)使用对侧延迟活动(Contralateral Delay Activity, CDA)这一反映 VWM 存储负荷的 ERP 指标(Vogel & Machizawa, 2004)发现, 低容量个体在有干扰物的条件下诱发了波幅更大的 CDA, 显示其未能有效滤除干扰物, 导致干扰物被错误编码进 VWM (Vogel et al., 2005)。干扰物对目标存储资源的挤占被认为是导致个体记忆表现受损的直接原因(Fukuda & Vogel, 2009)。因此, 现有研究认为, 为了实现对目标的高效加工, 认知系统需要通过选择过滤机制抑制干扰物, 防止其挤占宝贵的认知资源(McNab & Klingberg, 2008)。

然而, 上述关于“干扰效应”的结论主要基于目标不匹配干扰物(即与目标特征完全不同的干扰项)得出。目前, 鲜有研究探讨目标匹配干扰物(即与目标记忆特征一致的干扰项)在 VWM 中的作用。尽管视觉搜索领域的研究表明, 目标匹配干扰物比不匹配干扰物具有更强的注意捕获能力(Zhong et al.,

收稿日期: 2026-01-21

* 教育部人文社会科学研究一般项目(25YJA190009)、四川省研究生教育教学改革项目(YJGXM24-B079)资助。

通信作者: 刘强, E-mail: lq780614@163.com

2024)。但视觉搜索任务侧重感知觉层面的目标寻找,这与强调内部表征维持的 VWM 在加工机制上存在本质差异(Allen et al., 2017; Lavie, 2010)。因此,不能将视觉搜索任务的结论直接推广至 VWM,目标匹配干扰物如何参与并影响 VWM 加工仍待实证检验。值得注意的是,Allen 等人(2017)的研究虽然在刺激材料中包含了目标匹配干扰物,但并未独立分析其在 VWM 任务中的作用,而是将其与不匹配干扰物合并处理。这种方式可能掩盖了目标匹配干扰物独特的加工模式,从而使其结论仍支持“干扰物导致行为受损”的传统观点(Allen et al., 2017)。

综上所述,本研究旨在探究目标匹配干扰物在 VWM 中的加工过程及其对目标加工的影响。本文采用 Feldmann-Wüstefeld 和 Vogel (2019) 开发的偏侧化 VWM 过滤范式。该范式通过独特的空间布局,能够在目标与干扰物同时呈现的条件下,独立提取出反映刺激物理凸显性的后部对侧正波(Positivity Posterior Contralateral, Ppc; 先前研究者称 EarlyPD, 认为反映主动抑制)、反映空间注意选择的 N2pc 以及 VWM 存储的 CDA 等 ERP 成分,实现对目标与干扰物认知加工过程的分离(Feldmann-Wüstefeld & Vogel, 2019)。基于此,本文开展了两项脑电实验。实验 1 通过操纵 2 项干扰物与 2 项目标的匹配数量,设置不匹配、部分匹配和匹配条件,考察目标匹配干扰物(包含部分匹配条件与匹配条件,下同)能否通过选择机制进入 VWM,及其对目标记忆表现的影响。针对实验 1 中包含目标匹配干扰物条件出现概率较高(2/3),可能诱发被试自上而下的策略性加工,实验 2 进一步操纵不匹配、匹配条件的呈现概率(高/低),以检验目标匹配干扰物在 VWM 加工中的稳健性,为揭示 VWM 中目标匹配干扰物的选择与加工机制提供进一步证据。

2 实验 1: 目标匹配干扰物对 VWM 加工的影响

2.1 被试

使用 G*Power 3.1 (Faul et al., 2009)估算本实验所需样本量,设定中等效应量 $f = 0.25$, 显著性水平 $\alpha = 0.05$, 统计效力 $1 - \beta = 0.80$, 得出所需最小样本量为 28。实验 1 招募 35 名在校大学生参与,实验结束后给予一定报酬。其中 7 名被试因脑电伪迹过多被剔除,最终纳入 28 名被试进行统计分析(女性 15 名)。所有被试均为右利手,年龄 18~26 岁($M = 20.04$, $SD = 1.93$)。所有被试视力或矫正视力正常,

无色盲色弱。本研究通过四川师范大学伦理委员会审批,实验前均获得被试知情同意。

2.2 实验材料

所有实验刺激呈现在黑色背景(RGB: 0, 0, 0)上。参考 Feldmann-Wüstefeld 和 Vogel (2019) 的实验范式,采用由不同颜色构成的几何图形作为视觉刺激。其中,目标刺激为彩色正方形(视角大小 $0.9^\circ \times 0.9^\circ$),干扰刺激为彩色圆形(直径 1°)。刺激呈现在距离屏幕中心 3.75° 视角的 4 个位置,分别位于水平中线的左、右两侧以及垂直中线的上、下两侧。实验采用偏侧化呈现设计,在每个试次中,目标刺激与干扰刺激分别呈现在不同轴线上:当目标刺激呈现在水平中线时,干扰刺激呈现在垂直中线上,反之亦然;目标与干扰物出现在水平轴或垂直轴上的概率相等。为了平衡双侧视野的感知觉输入,在彩色目标与干扰物的中心对称位置始终呈现灰色的圆形中性刺激(RGB: 128, 128, 128)。例如,当目标位于左侧时,右侧对称位置呈现灰色圆形;此时干扰物若位于上方,下方对称位置呈现灰色圆形。刺激颜色选自以下 9 种高辨识度颜色(RGB 值):红色[255, 0, 0]、绿色[0, 255, 0]、蓝色[0, 0, 255]、黄色[255, 255, 0]、洋红色[255, 0, 255]、青色[0, 255, 255]、深绿色[20, 80, 20]、紫色[50, 0, 100]以及橙色[255, 128, 0]。

2.3 实验设计与流程

实验程序采用 PsychoPy 2022.2.5 编写并运行(Peirce, 2007; Peirce et al., 2019)。刺激呈现在 24 英寸显示器上(分辨率 1920×1080 , 刷新率 60 Hz)。实验过程中记录脑电数据,令被试保持舒适坐姿,尽可能减少肌肉活动及其他生理噪声对脑电信号采集的影响。

实验采用单因素被试内设计,记忆阵列始终包含 2 个目标(彩色方形)和 2 个干扰物(彩色圆形)。根据干扰物与目标颜色的匹配数量,设置三种实验条件:不匹配条件(2 个干扰物的颜色与当前试次的 2 个目标颜色均不同),部分匹配条件(1 个干扰物的颜色与其中 1 个目标的颜色相同,另 1 个干扰物颜色与目标不同)和匹配条件(2 个干扰物的颜色分别与 2 个目标的颜色相同)。三种条件在实验中等比例混合随机呈现。实验采用偏侧化呈现,以分离目标和干扰物诱发的侧化脑电活动。具体而言,在目标偏侧试次中,彩色目标刺激呈现在左、右水平位置,干扰刺激呈现在上、下垂直位置;在干扰偏侧试次中,彩色干扰刺激呈现在左、右水平位置,目

标刺激呈现在上、下垂直位置。通过计算对侧与同侧脑电活动的差异(如 Ppc (Early PD)、N2pc、CDA 成分), 分离目标与干扰物的认知加工过程 (Feldmann-Wüstefeld & Vogel, 2019)。

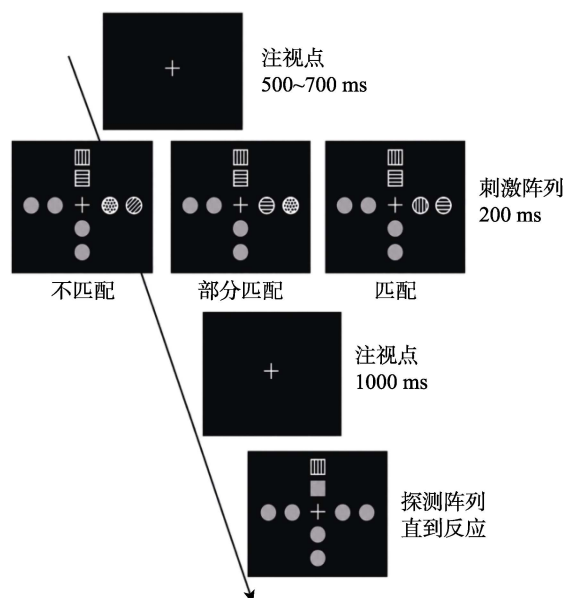


图 1 实验 1 流程图(图示为干扰物位于偏侧视野的三种条件; 刺激中的不同条纹表示刺激的不同颜色, 无条纹为灰色, 条纹一致表示颜色相同)

单次试验流程如图 1 所示。试次开始时, 屏幕中心呈现注视点“+”(时长随机 500~700 ms)。随后呈现记忆阵列(200 ms), 要求被试在保持注视中心的同时, 记忆目标的颜色并忽略干扰物。记忆阵列消失后进入保持期(1000 ms)。保持期结束后呈现探测阵列, 其中一个目标位置出现探测色块, 两个目标位置被探测的概率相等。要求被试在保证准确的前提下尽快判断该位置颜色是否发生变化。颜色变化与不变试次随机等概率出现; 在变化试次中, 探测色从预设颜色集合中随机选取, 且不与当前试次记忆阵列中任何彩色刺激的颜色相同。若颜色未变, 按“F”键(左手食指); 若改变, 按“J”键(右手食指)。按键后自动进入下一试次。正式实验前, 被试需完成 16 次带正误反馈的练习试次。只有当被试明确理解指导语, 且练习正确率达到 70%及以上时, 方可进入正式实验; 否则需重新练习。正式实验共包含 1152 个试次, 分为 12 个组块, 每个组块间被试可短暂休息。

2.4 数据分析

所有数据采用 JASP 0.19.3.0 进行统计分析, 统

计显著性水平设定为 $p < 0.05$, 事后检验均采用 Bonferroni 法校正 p 值。本文中, 统计检验结果标注*表示 $p < 0.05$, **表示 $p < 0.01$, ***表示 $p < 0.001$ 。报告了均值差的 95% CI。

行为结果计算被试在每个条件下的平均正确率。反应时数据的分析仅保留正式实验中反应正确的试次。剔除反应时小于 200 ms 或大于 3000 ms 的试次, 并进一步剔除超出各条件平均数正负 3 个标准差的试次。统计检验采用单因素重复测量方差分析。脑电数据使用 ANT Neuro 脑电系统采集。根据扩展的国际 10-20 系统排布, 使用 64 导联电极帽记录头皮电位。接地电极放置于 AFz, 在线参考电极放置于 FCz。在左眼外眦 1 cm 处放置电极, 用于记录水平眼电(HEOG)。所有电极阻抗均控制在 5 k Ω 以下, 采样率为 500 Hz。脑电数据处理基于 MATLAB, 使用 EEGLAB 与 ERPLAB 工具箱进行离线处理(Delorme & Makeig, 2004; Lopez-Calderon & Luck, 2014)。数据处理流程如下: (1)除水平眼电(HEOG)通道外, 所有数据重参考至双侧乳突 M1 和 M2 的代数平均值; 随后进行 0.1~30 Hz 的带通滤波。(2)以记忆阵列呈现时刻为零点, 截取-200 至 1200 ms 的 EEG 数据片段, 以刺激呈现前 200 ms 作为基线进行校正。(3)使用 ERPLAB 的 Peak-to-Peak Threshold 程序标记所有通道振幅超过 100 μ V 的片段, Step-Like Artifacts 程序识别 HEOG 通道振幅超过 32 μ V 的片段, 这些片段和反应错误的试次不纳入 ERP 分析。(4)任一条件有效试次不足 150 的被试数据被排除, 最终纳入分析的 28 名被试, 其平均有效率 90.4% ($SD = 11.16\%$)。 (5)ERP 分析选取顶枕叶区域的 3 对电极(PO3/PO4、PO5/PO6、PO7/PO8)。通过计算刺激呈现对侧 ERP 减同侧 ERP 提取差异波(例如, 目标在左视野呈现时, 右半球电极对侧), 将多对电极数据进行平均后, 分别提取不同 ERP 成分在对应时间窗的平均波幅(高峰等, 2012), 进行单因素重复测量方差分析。

对于有明显波峰的 Ppc 与 N2pc 成分, 采用 Jackknife-based 法来计算 50%最大波幅潜伏期(Kiesel et al., 2008)。根据 Ulrich 和 Miller (2001)提出的公式, 将 t 值除以 $(N - 1)$ 进行校正, 并计算显著性水平(Ulrich & Miller, 2001)。本文潜伏期检验结果显示, 各条件间均无显著差异。CDA 作为持续性的对侧负慢波, 其时间窗通常结合既有研究与当前波形特征进行确定。本研究的核心目标是分析干扰物在 VWM 任务中的加工过程, 因此 CDA 窗口

的设定主要参考干扰偏侧条件下的波形。Feldmann-Wüstefeld和Vogel (2019)的研究中,干扰物诱发的CDAp出现时间比目标的潜伏期晚了约40~80 ms (Feldmann-Wüstefeld & Vogel, 2019)。在本文的两项实验中,干扰偏侧时,其诱发的CDA也明显晚于目标(刺激呈现后约600 ms出现持续的负波)。因此,本文将干扰物诱发显著负波的时间窗(600~900 ms)确定为统计分析窗口。同时,为了在同一加工时程下比较目标与干扰物的存储情况,目标偏侧诱发的CDA选取相同的时间窗口进行统计分析。

2.5 实验 1 结果

2.5.1 行为结果

反应时结果显示:不匹配条件($M = 670.82$ ms, $SD = 149.64$ ms),部分匹配条件($M = 668.67$ ms, $SD = 158.06$ ms),匹配条件($M = 670.34$ ms, $SD = 149.06$ ms)。单因素重复测量方差分析发现,条件间反应时没有显著差异, $F(2, 54) = 0.16, p = 0.849$ 。

采用单因素重复测量方差分析检验三种条件下的正确率差异。结果显示,条件主效应显著, $F(2, 54) = 4.33, p = 0.018, \eta_p^2 = 0.14$ 。配对 t 检验显示,不匹配条件($M = 0.86, SD = 0.07$)正确率显著低于部分匹配条件($M = 0.89, SD = 0.05$), $t(27) = -2.441, p = 0.021$, Cohen's $d = -0.46$, 95% CI $[-0.06, -0.01]$; 不匹配条件与匹配条件($M = 0.87, SD = 0.06$)无显著差异, $t(27) = -1.70, p = 0.100$; 部分匹配条件与匹配条件亦无显著差异, $t(27) = 1.70, p = 0.100$ 。

在部分匹配条件下,探测存在两种潜在的条件:

“探测匹配项”与“探测不匹配项”,分别对应探测部分匹配条件下,与匹配干扰项颜色匹配/不匹配的目标项。配对 t 检验显示,探测匹配项($M = 0.91, SD = 0.06$)的正确率显著高于探测不匹配项($M = 0.87, SD = 0.06$; $t(27) = 3.00, p = 0.006$, Cohen's $d = 0.57$, 95% CI $[0.01, 0.07]$);进一步比较显示,当探测匹配项时,部分匹配条件的正确率显著高于不匹配条件($t(27) = 3.63, p = 0.001$, Cohen's $d = 0.69$, 95% CI $[0.02, 0.08]$)与匹配条件($t(27) = 2.31, p = 0.029$, Cohen's $d = 0.44$, 95% CI $[0.004, 0.07]$)。相反,当探测不匹配项时,部分匹配条件与不匹配条件、匹配条件正确率均无显著差异($ps > 0.05$)。

2.5.2 脑电结果

(1) 目标偏侧呈现诱发的 ERP 成分分析

Ppc (137~177 ms): 单样本 t 检验显示,不匹配条件($M = 0.52 \mu V, SD = 0.54 \mu V, t(27) = 5.13, p < 0.001$, Cohen's $d = 0.97$),部分匹配条件($M = 0.39 \mu V, SD = 0.69 \mu V, t(27) = 2.96, p = 0.006$, Cohen's $d = 0.56$),匹配条件($M = 0.51 \mu V, SD = 0.66 \mu V, t(27) = 4.08, p < 0.001$, Cohen's $d = 0.77$)均诱发显著的Ppc。重复测量方差分析显示,条件主效应不显著, $F(2, 54) = 0.98, p = 0.383$ 。(原始波形见图2,差异波见图3,统计结果见图4)。

N2pc (260~308 ms): 单样本 t 检验显示,部分匹配条件($M = -0.37 \mu V, SD = 0.85 \mu V, t(27) = -2.33, p = 0.028$, Cohen's $d = -0.44$)和匹配条件($M = -0.34 \mu V, SD = 0.84 \mu V, t(27) = -2.17, p = 0.039$, Cohen's $d = -0.41$)诱发显著的N2pc;不匹配条件

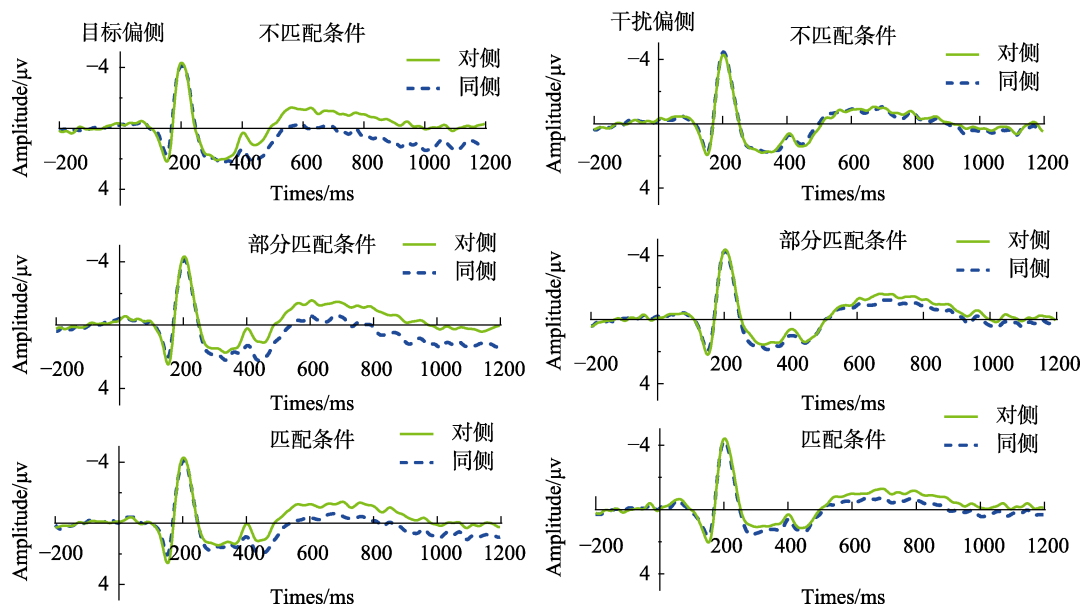


图2 实验1目标物偏侧(左)和干扰物偏侧(右)诱发原始波形图(彩图见电子版,下同)

未诱发显著 N2pc ($M = -0.17 \mu\text{V}$, $SD = 0.75 \mu\text{V}$, $t(27) = -1.23$, $p = 0.231$)。重复测量方差分析显示, 条件主效应不显著, $F(2, 54) = 2.33$, $p = 0.107$ 。

CDA (600~900 ms): 单样本 t 检验显示, 不匹配条件 ($M = -1.20 \mu\text{V}$, $SD = 0.76 \mu\text{V}$, $t(27) = -8.38$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -1.58$), 部分匹配条件 ($M = -1.10 \mu\text{V}$, $SD = 0.81 \mu\text{V}$, $t(27) = -7.19$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -1.36$), 匹配条件 ($M = -0.85 \mu\text{V}$, $SD = 0.93 \mu\text{V}$, $t(27) = -4.86$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -0.92$) 均诱发显著 CDA。重复测量方差分析显示, 条件主效应显著, $F(2, 54) = 5.06$, $p = 0.010$, $\eta_p^2 = 0.16$ 。事后检验发现, 匹配条件 CDA 振幅小于不匹配条件, $t(27) = 3.01$, $p = 0.017$, Cohen's $d = 0.41$, 95% CI [0.05, 0.64]; 其余条件间无显著差异 ($ps > 0.05$)。

(2) 干扰偏侧呈现诱发的 ERP 成分分析

Ppc (134~173 ms): 单样本 t 检验显示, 匹配条件 ($M = 0.32 \mu\text{V}$, $SD = 0.66 \mu\text{V}$, $t(27) = 2.58$, $p = 0.016$, Cohen's $d = 0.49$) 诱发显著的 Ppc 成分; 不匹

配条件 ($M = 0.14 \mu\text{V}$, $SD = 0.46 \mu\text{V}$, $t(27) = 1.65$, $p = 0.111$) 与部分匹配条件 ($M = 0.18 \mu\text{V}$, $SD = 0.70 \mu\text{V}$, $t(27) = 1.38$, $p = 0.180$) 未达到显著水平。重复测量方差分析显示, 条件主效应不显著, $F(2, 54) = 1.07$, $p = 0.351$ 。

N2pc (256~297 ms): 单样本 t 检验显示, 部分匹配条件 ($M = -0.44 \mu\text{V}$, $SD = 0.76 \mu\text{V}$, $t(27) = -3.09$, $p = 0.005$, Cohen's $d = -0.58$ 和匹配条件 ($M = -0.47 \mu\text{V}$, $SD = 0.83 \mu\text{V}$, $t(27) = -3.01$, $p = 0.006$, Cohen's $d = -0.58$ 诱发显著 N2pc; 不匹配条件未诱发显著 N2pc ($M = -0.002 \mu\text{V}$, $SD = 0.66 \mu\text{V}$, $t(27) = -0.01$, $p = 0.999$)。重复测量方差分析显示, 条件主效应显著, $F(2, 54) = 10.85$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.29$; 事后检验显示, 不匹配条件诱发的 N2pc 振幅显著低于部分匹配条件 ($t(27) = 4.07$, $p = 0.001$, Cohen's $d = 0.59$, 95% CI [0.16, 0.72]) 和匹配条件 ($t(27) = 4.22$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 0.62$, 95% CI [0.19, 0.75]), 部分匹配与匹配条件无显著差异 ($p > 0.99$)。

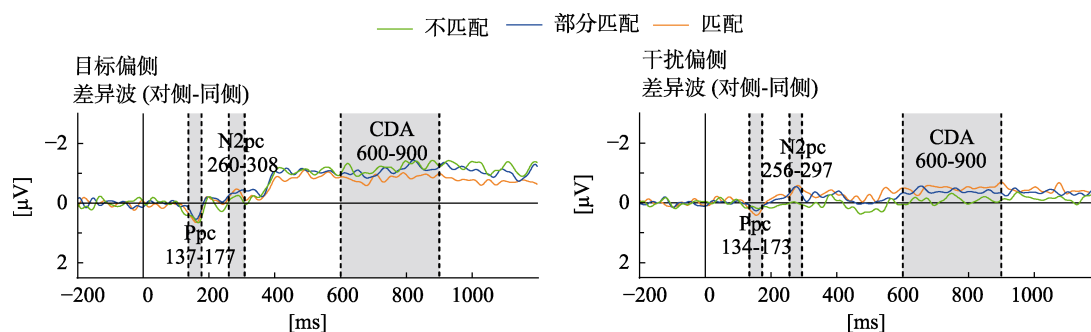


图 3 实验 1 目标偏侧和干扰偏侧诱发的差异波形图

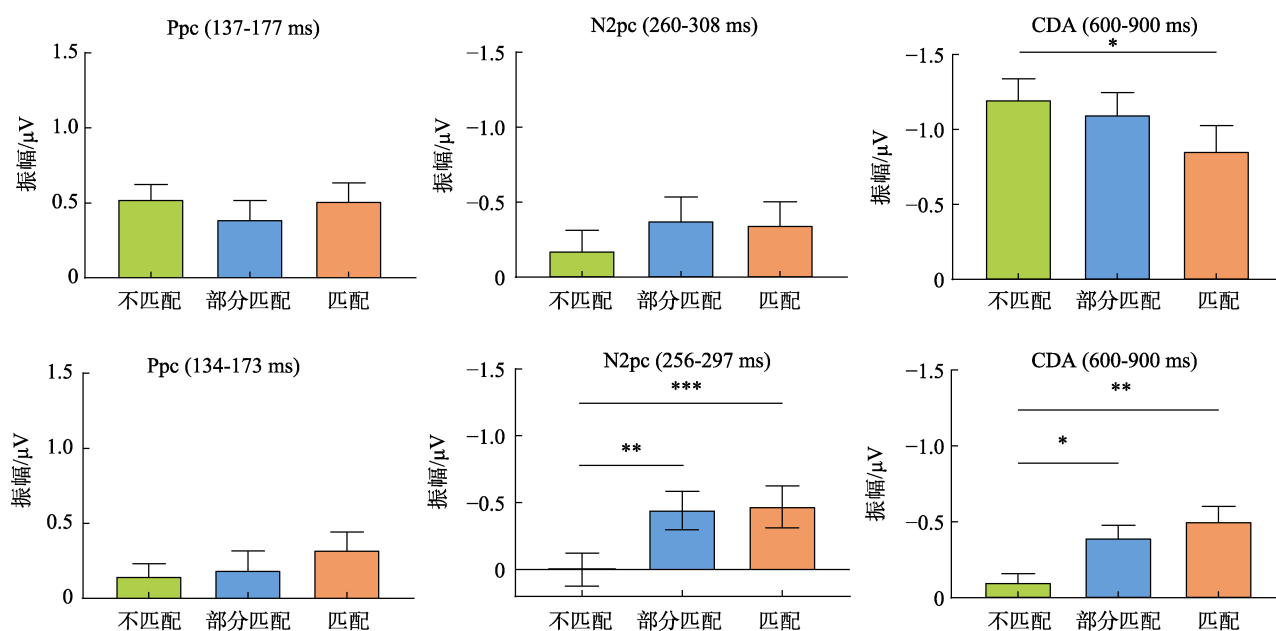


图 4 实验 1 各 ERP 成分统计检验图(上图为目标偏侧; 下图为干扰物偏侧)

CDA (600~900 ms): 单样本 t 检验显示, 不匹配条件未诱发显著 CDA ($M = -0.10 \mu\text{V}$, $SD = 0.33 \mu\text{V}$), $t(27) = -1.59$, $p = 0.125$; 部分匹配条件($M = -0.39 \mu\text{V}$, $SD = 0.46 \mu\text{V}$, $t(27) = -4.55$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -0.86$)和匹配条件($M = -0.50 \mu\text{V}$, $SD = 0.54 \mu\text{V}$, $t(27) = -4.87$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -0.92$)均诱发显著的 CDA。重复测量方差分析显示, 条件主效应显著, $F(2, 54) = 7.05$, $p = 0.002$, $\eta_p^2 = 0.21$ 。事后检验显示, 不匹配条件的 CDA 振幅显著低于部分匹配条件($t(27) = 2.89$, $p = 0.022$, Cohen's $d = 0.65$, 95% CI [0.04, 0.55])和匹配条件($t(27) = 3.32$, $p = 0.008$, Cohen's $d = 0.89$, 95% CI [0.09, 0.71]), 部分匹配和匹配条件间无显著差异, $t(27) = 1.00$, $p = 0.986$ 。

2.6 实验 1 讨论

实验 1 采用能够分离目标与干扰物神经活动的偏侧化 VWM 过滤范式, 旨在探究目标匹配干扰物在 VWM 中的加工机制及其对记忆表现的影响。结果表明, 相比不匹配干扰物, 目标匹配干扰物诱发了更强的注意选择相关活动和保持期持续负波; 然而, 与传统资源竞争观点的预测不同, 目标匹配干扰物并未导致行为表现下降。相反, 在部分匹配条件下, 被试的记忆成绩显著高于不匹配条件。

首先, ERP 结果揭示目标匹配干扰物捕获注意并进入 VWM。在干扰物偏侧呈现时, 早期时间窗 ERP 表现为正向活动 Ppc (被视作反映刺激凸显性的 ERP 成分) (Fortier-Gauthier et al., 2012), 提示该阶段完成早期知觉登记。随后不匹配干扰物并未诱发 N2pc 或 CDA, 显示其未得到进一步的注意分配与认知加工。目标匹配干扰物(无论部分匹配还是匹配条件)完成早期知觉登记后, 随即诱发显著的 N2pc 成分。N2pc 通常标志着注意的空间选择与捕获(Luck & Hillyard, 1994a, 1994b)。这一结果表明, 尽管匹配干扰物形状并不符合任务要求, 由于携带目标的记忆特征(颜色), 其作为潜在目标捕获注意。

更关键的是, 目标匹配干扰物诱发了显著的 CDA。相比之下, 不匹配干扰物未诱发可靠的 CDA。由于 CDA 通常与 VWM 的持续维持加工相关, 这一结果提示, 目标匹配干扰物在被注意选择之后, 进一步进入与 VWM 保持相关的加工阶段。换言之, 不匹配干扰物在早期知觉登记后未被进一步加工, 而目标匹配干扰物由于携带目标定义特征, 获得注意选择, 并进一步进入表征维持阶段。与此同时, 在目标偏侧条件下, 匹配条件诱发的 CDA

显著低于不匹配条件。这一结果说明, 当干扰物与目标共享颜色特征时, 目标相关的维持活动发生了改变。这种“此消彼长”的现象暗示目标匹配干扰物的存储挤占了用于加工目标的认知资源。根据现有的 VWM 插槽模型或灵活资源模型(Bays & Husain, 2008; Fukuda et al., 2010; Luck & Vogel, 1997; Vogel et al., 2005), 这种资源的挤占应导致正确率降低。

然而, 行为结果并未支持传统观点的预测。匹配条件与不匹配条件正确率无显著差异, 且在数值上略高于不匹配条件(0.87 vs. 0.86)。更重要的是, 部分匹配条件的正确率显著高于不匹配条件。这说明, 目标匹配干扰物虽然获得了注意选择和持续加工, 但并未像传统无关干扰物那样削弱目标记忆表现。部分匹配条件的进一步分析为这一解释提供了更直接的线索。在该条件下, 只有一个目标的颜色与干扰物颜色相同, 因此可以区分探测匹配项和探测不匹配项。结果显示, 探测匹配项的正确率显著高于探测不匹配项; 当探测匹配项时, 部分匹配条件的正确率显著高于不匹配条件和匹配条件; 而当探测不匹配项时, 部分匹配条件与其他条件之间无显著差异。该结果表明, 部分匹配条件下的行为优势主要来源于与干扰物共享颜色的目标项, 而不是对所有目标的整体性提升。

这一发现提示, 目标—干扰物颜色匹配可能为特定目标项提供加工增益。具体而言, 匹配干扰物可能通过匹配目标颜色特征, 增强该颜色在编码阶段的表征强度, 或在保持/提取阶段为目标判断提供额外的特征线索。因此, 当探测项是与干扰物匹配颜色的目标时, 被试表现出更高的正确率。需要指出的是, 该结果并不能直接证明匹配干扰物“促进”了目标存储, 但它说明匹配干扰物进入加工系统后, 并不必然产生资源竞争式的损害, 而可能与目标表征发生功能上更复杂的交互。

综上所述, 实验 1 证实, 目标匹配干扰物相比不匹配干扰物具有加工优势。VWM 过滤任务中, 不匹配干扰物未诱发可靠的 N2pc 和 CDA, 显示其未获注意选择与记忆编码等相关加工; 而匹配干扰物诱发显著 N2pc 和 CDA, 显示其因携带目标相关颜色特征而获得进一步加工。与传统干扰物损害目标记忆的观点不同, 实验 1 发现目标匹配干扰物进入 VWM 并未导致目标成绩下降, 反而在部分匹配条件下对与其共享颜色特征的目标项表现出潜在的促进作用。尽管如此, 实验 1 仍存在潜在混淆因

素。由于包含匹配特征的试次(匹配+部分匹配条件)占总试次的 2/3, 被试可能形成一种策略性加工倾向, 即预期干扰物颜色具有任务相关性, 从而优先关注颜色匹配项而非目标。为了排除这种策略性因素的潜在影响, 并直接比较匹配与不匹配干扰物的加工差异, 实验 2 移除了部分匹配条件。在此基础上, 通过操纵两者的呈现概率, 以检验实验 1 中观察到的匹配干扰物加工优势能否在概率预期受到控制的情况下稳定出现。

3 实验 2: 目标匹配干扰物呈现概率对 VWM 加工的影响

3.1 被试

依据 G*Power 3.1, 设定中等效应量 $f = 0.25$, $\alpha = 0.05$, $1 - \beta = 0.80$, 计算得出所需最小样本量为 24。实验 2 招募 28 名大学生志愿者。实验分两个阶段进行, 单次正式实验时长约 50 分钟, 两次实验间隔不少于 48 小时。实验结束后给予被试一定报酬。统计分析时, 剔除 4 名被试的数据(脑电信号伪迹过多或未能参加第二次实验), 最终 24 名被试(女性 14 人)被纳入。被试均为右利手, 年龄 18~26 岁($M = 20.25$, $SD = 1.92$), 视力或矫正视力正常, 无色盲或色弱。本实验已通过四川师范大学伦理委员会审批, 获得被试知情同意。

3.2 实验设计与程序

实验 2 沿用实验 1 的实验材料。移除实验 1 的“部分匹配”条件, 采用 2 (干扰物类型: 匹配/不匹配) $\times$ 2 (呈现概率: 高/低)的被试内设计。实验分两次进行, 被试每次完成一组条件组合(“不匹配-高概率”与“匹配-低概率条件”; “不匹配-低概率”与“匹配-高概率条件”)。实验顺序在被试间平衡。每组包含 960 个试次, 其中高概率条件 672 个试次(70%), 低概率条件 288 个试次(30%), 条件在组内随机混合呈现。

3.3 数据分析

计算被试在各实验条件下的反应时与正确率, ERP 成分计算在划定时间窗内的平均振幅, 采用两因素重复测量方差分析进行统计检验。在 ERP 数据预处理中, 剔除行为反应错误及伪迹过大的试次。任一条件有效试次不足 150 的被试数据被排除, 最终纳入分析的 24 名被试, 平均有效率 86.0% ($SD = 10.74\%$)。在实验 2 中, 由于目标偏侧诱发的 N2pc 成分未呈现清晰的独立波峰, 不适用半峰值潜伏期测量。对于持续性或缺乏清晰峰值的成分, 平均波

幅通常比峰值或半峰值潜伏期更稳健; 时间窗可基于既有研究和总平均波形确定(Luck, 2014)。因此, 实验 2 目标偏侧诱发的 N2pc 采用 250~320 ms 作为平均波幅的分析窗口, 干扰偏侧则采用 240~320 ms 作为分析时间窗。其余统计分析流程与实验 1 保持一致。

3.4 实验 2 结果

3.4.1 行为结果

反应时结果显示, 不匹配-高概率条件($M = 664.13$ ms, $SD = 165.04$ ms), 匹配-高概率条件($M = 672.89$ ms, $SD = 157.62$ ms), 匹配-低概率条件($M = 660.90$ ms, $SD = 167.08$ ms), 不匹配-低概率条件($M = 677.24$ ms, $SD = 155.28$ ms)。两因素重复测量方差分析发现, 干扰物类型主效应、概率主效应及干扰物类型与概率的交互作用均不显著, $ps > 0.05$ 。

各条件下的正确率描述统计结果显示, 不匹配-高概率条件($M = 0.88$, $SD = 0.08$), 匹配-高概率条件($M = 0.91$, $SD = 0.06$), 匹配-低概率条件($M = 0.92$, $SD = 0.07$), 不匹配-低概率条件($M = 0.88$, $SD = 0.08$)。重复测量方差分析发现, 干扰物类型主效应显著, $F(1, 23) = 15.16$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.40$ 。进一步比较发现, 不匹配条件正确率($M = 0.88$, $SD = 0.08$)显著低于匹配条件($M = 0.91$, $SD = 0.06$), $t(23) = -3.89$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -0.47$, 95% CI $[-0.05, -0.02]$ 。概率主效应及交互作用均不显著, $ps > 0.05$ 。

3.4.2 脑电结果

(1) 目标偏侧呈现诱发的 ERP 成分分析

Ppc (146~178 ms): 单样本 t 检验显示, 不匹配-高概率条件($M = 0.36$ μV , $SD = 0.53$ μV , $t(23) = 3.31$, $p = 0.003$, Cohen's $d = 0.68$), 匹配-高概率条件($M = 0.48$ μV , $SD = 0.55$ μV , $t(23) = 4.28$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 0.87$), 不匹配-低概率条件($M = 0.32$ μV , $SD = 0.57$ μV , $t(23) = 2.75$, $p = 0.011$, Cohen's $d = 0.56$)均诱发显著的 Ppc; 匹配-低概率条件($M = 0.29$ μV , $SD = 0.74$ μV , $t(23) = 1.92$, $p = 0.067$, Cohen's $d = 0.39$)诱发边缘显著的 Ppc。重复测量方差分析显示, 概率主效应不显著, $F(1, 23) = 2.33$, $p = 0.141$; 干扰物类型主效应不显著, $F(1, 23) = 0.39$, $p = 0.541$; 交互作用不显著, $F(1, 23) = 0.94$, $p = 0.343$ 。(原始波形见图 5, 差异波见图 6, 统计结果见图 7)。

N2pc (250~320 ms): 单样本 t 检验显示, 不匹配-高概率条件($M = -0.31$ μV , $SD = 0.72$ μV , $t(23) = -2.08$, $p = 0.048$, Cohen's $d = -0.43$), 匹配-高概率条件($M = -0.31$ μV , $SD = 0.69$ μV , $t(23) = -2.18$, $p =$

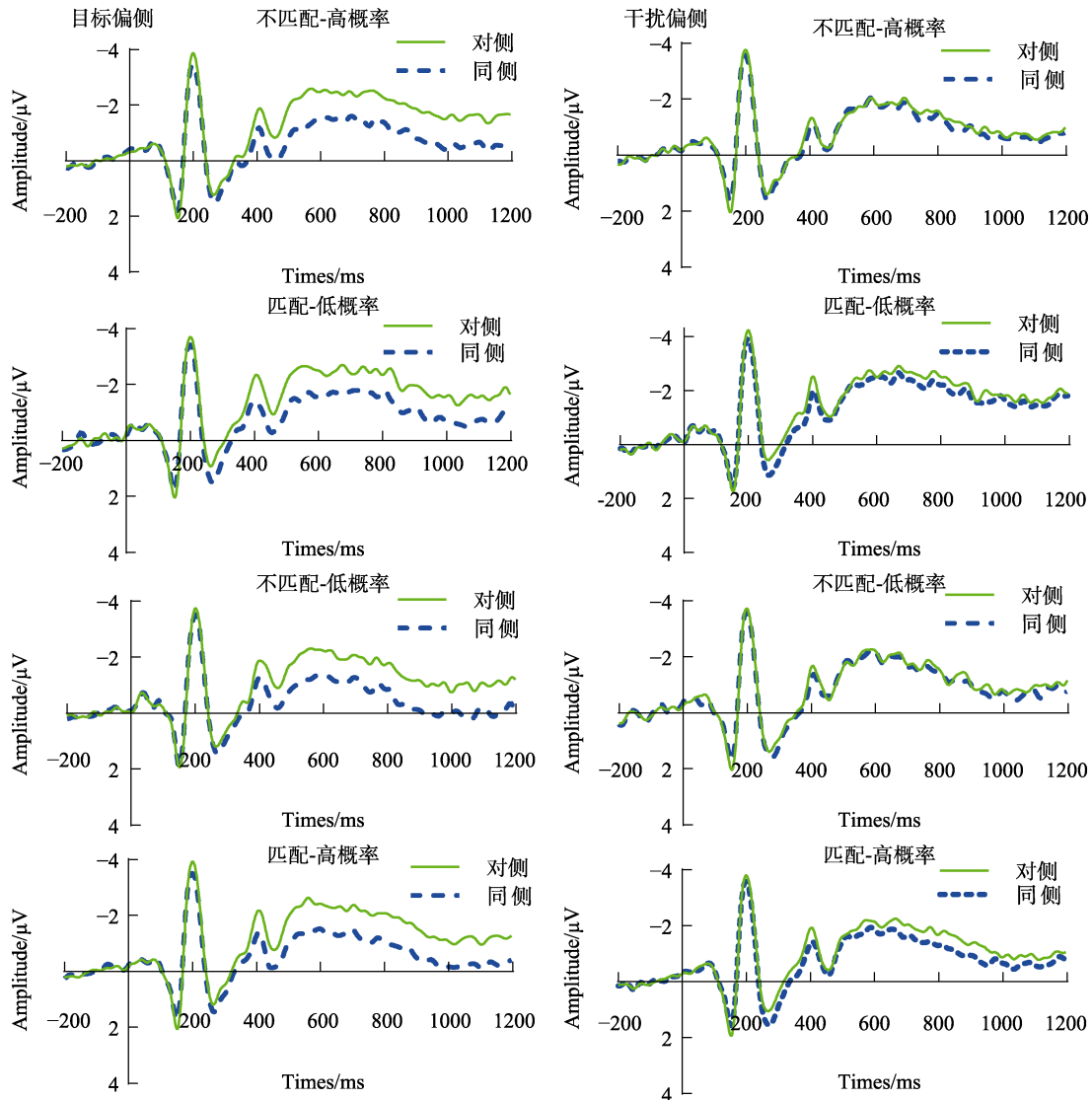


图 5 实验 2 目标物偏侧(左)和干扰物偏侧(右)诱发的原始波形图

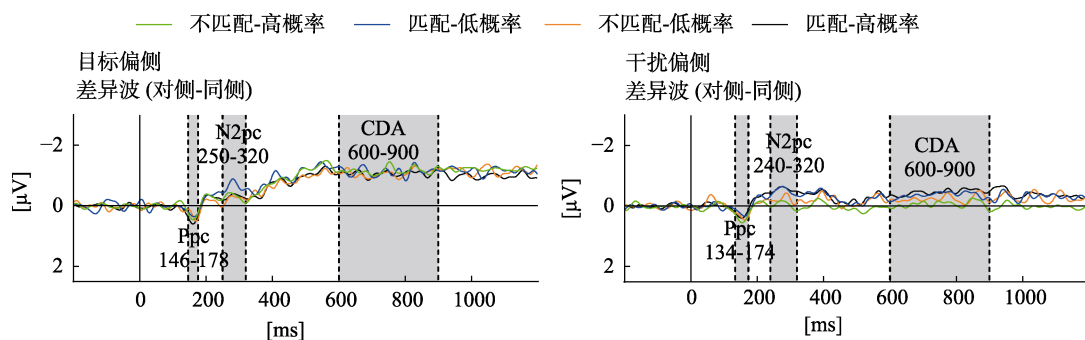


图 6 实验 2 目标物偏侧和干扰物偏侧诱发的差异波形图

0.040, Cohen's $d = -0.44$), 匹配-低概率条件($M = -0.65 \mu V$, $SD = 0.75 \mu V$, $t(23) = -4.24$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -0.87$)均诱发显著的 N2pc。不匹配-低概率条件($M = -0.24 \mu V$, $SD = 0.79 \mu V$, $t(23) = -1.47$, $p = 0.160$)诱发的 N2pc 不显著。重复测量方差分析显示, 概率主效应不显著($F(1, 23) = 3.03$, $p =$

0.095), 干扰物类型主效应显著($F(1, 23) = 6.09$, $p = 0.021$, $\eta_p^2 = 0.21$); 交互作用显著, $F(1, 23) = 4.64$, $p = 0.042$, $\eta_p^2 = 0.17$; 简单效应分析发现, 匹配-低概率条件相比匹配-高概率条件诱发振幅更大的 N2pc, $\Delta M = -0.34 \mu V$, $t(23) = -2.98$, $p = 0.007$, 95% CI $[-0.57, -0.10]$ 。

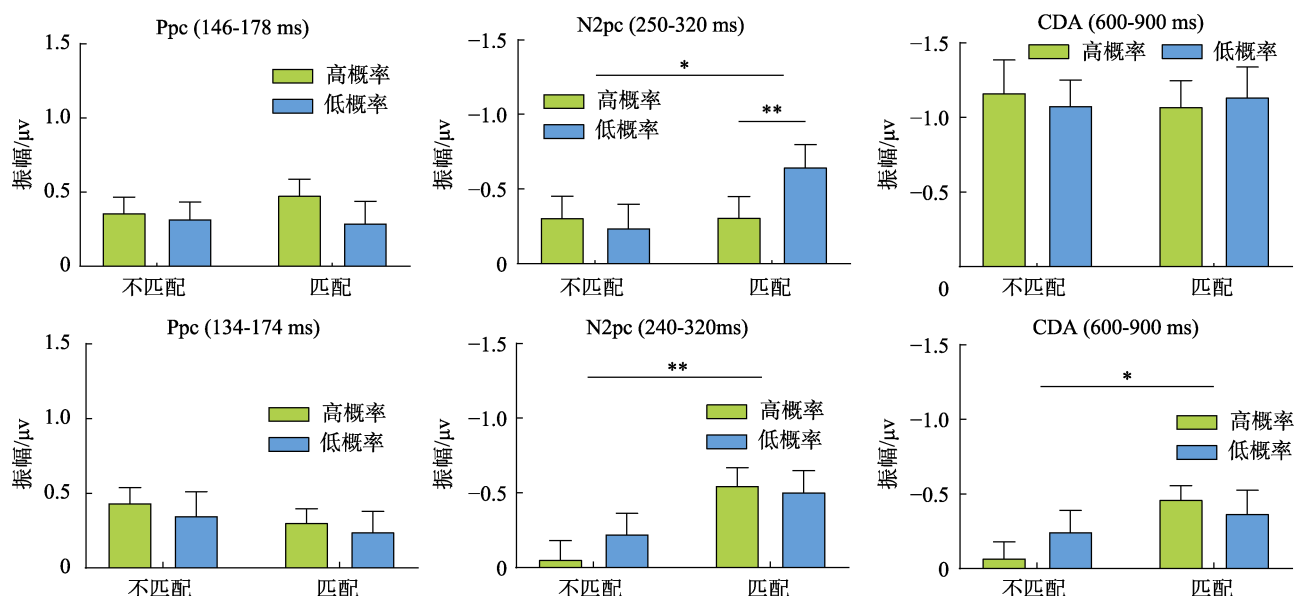


图 7 实验 2 各 ERP 成分统计检验图(上图为目标偏侧; 下图为干扰物偏侧)

CDA (600~900 ms): 单样本 t 检验显示, 不匹配-高概率条件($M = -1.16 \mu\text{V}$, $SD = 1.09 \mu\text{V}$, $t(23) = -5.24$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -1.07$), 匹配-高概率条件($M = -1.07 \mu\text{V}$, $SD = 0.86 \mu\text{V}$, $t(23) = -6.09$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -1.24$), 不匹配-低概率条件($M = -1.08 \mu\text{V}$, $SD = 0.84 \mu\text{V}$, $t(23) = -6.26$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -1.28$), 匹配-低概率条件($M = -1.14 \mu\text{V}$, $SD = 0.99 \mu\text{V}$, $t(23) = -5.61$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -1.15$)均诱发显著的 CDA。重复测量方差分析显示, 概率主效应不显著, $F(1, 23) = 0.01$, $p = 0.927$; 干扰物类型主效应不显著, $F(1, 23) = 0.03$, $p = 0.863$; 交互作用不显著, $F(1, 23) = 0.25$, $p = 0.622$ 。

(2) 干扰偏侧呈现诱发的 ERP 成分分析

Ppc (134~174 ms): 单样本 t 检验显示, 不匹配-高概率条件($M = 0.43 \mu\text{V}$, $SD = 0.51 \mu\text{V}$, $t(23) = 4.16$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 0.85$), 匹配-高概率条件($M = 0.30 \mu\text{V}$, $SD = 0.46 \mu\text{V}$, $t(23) = 3.19$, $p = 0.004$, Cohen's $d = 0.65$), 不匹配-低概率条件($M = 0.35 \mu\text{V}$, $SD = 0.80 \mu\text{V}$, $t(23) = 2.12$, $p = 0.045$, Cohen's $d = 0.43$)均诱发显著的 Ppc; 匹配-低概率条件($M = 0.24 \mu\text{V}$, $SD = 0.69 \mu\text{V}$, $t(23) = 1.70$, $p = 0.102$)诱发的 Ppc 不显著。重复测量方差分析显示, 概率主效应不显著, $F(1, 23) = 0.45$, $p = 0.519$; 干扰物类型主效应不显著, $F(1, 23) = 2.25$, $p = 0.150$; 交互作用不显著, $F(1, 23) = 0.02$, $p = 0.898$ 。

N2pc (240~320 ms): 单样本 t 检验显示, 不匹配-高概率条件($M = -0.05 \mu\text{V}$, $SD = 0.63 \mu\text{V}$, $t(23) = -0.39$, $p = 0.697$)与不匹配-低概率条件($M = -0.22 \mu\text{V}$, $SD =$

$0.68 \mu\text{V}$, $t(23) = -1.59$, $p = 0.126$)未诱发显著的 N2pc; 匹配-高概率条件($M = -0.55 \mu\text{V}$, $SD = 0.60 \mu\text{V}$, $t(23) = -4.51$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -0.92$)和匹配-低概率条件($M = -0.51 \mu\text{V}$, $SD = 0.71 \mu\text{V}$, $t(23) = -3.51$, $p = 0.002$, Cohen's $d = -0.72$)诱发显著的 N2pc。重复测量方差分析显示, 概率主效应不显著, $F(1, 23) = 0.34$, $p = 0.564$; 干扰物类型主效应显著, $F(1, 23) = 13.21$, $p = 0.001$, $\eta_p^2 = 0.37$, 匹配条件振幅显著高于不匹配条件, $\Delta M = -0.39 \mu\text{V}$, $t(23) = -3.64$, $p = 0.001$, Cohen's $d = -0.59$, 95% CI $[-0.61, -0.17]$; 概率与条件交互作用不显著, $F(1, 23) = 1.23$, $p = 0.279$ 。

CDA (600~900 ms): 单样本 t 检验显示, 匹配-低概率条件($M = -0.37 \mu\text{V}$, $SD = 0.71 \mu\text{V}$, $t(23) = -2.35$, $p = 0.028$, Cohen's $d = -0.48$)和匹配-高概率条件($M = -0.46 \mu\text{V}$, $SD = 0.47 \mu\text{V}$, $t(23) = -4.85$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -0.99$)诱发显著的 CDA; 不匹配-高概率条件($M = -0.07 \mu\text{V}$, $SD = 0.54 \mu\text{V}$, $t(23) = -0.64$, $p = 0.531$)和不匹配-低概率条件($M = -0.25 \mu\text{V}$, $SD = 0.71 \mu\text{V}$, $t(23) = -1.70$, $p = 0.102$)未诱发显著的 CDA。重复测量方差分析显示, 条件主效应显著, $F(1, 23) = 6.14$, $p = 0.021$, $\eta_p^2 = 0.21$, 匹配条件振幅高于不匹配条件, $\Delta M = -0.26 \mu\text{V}$, $t(23) = -2.48$, $p = 0.021$, Cohen's $d = -0.41$, 95% CI $[-0.47, -0.04]$; 概率主效应不显著, $F(1, 23) = 0.08$, $p = 0.770$; 概率与条件交互作用不显著, $F(1, 23) = 2.73$, $p = 0.112$ 。

3.5 实验 2 讨论

实验 2 通过操纵干扰物类型的呈现概率(高/低),

考察实验 1 中观察到的目标匹配干扰物带来的目标增益效应, 是否源于被试因概率预期而产生的策略性加工偏向。结果验证了目标匹配干扰物加工优势的稳健性, 尽管概率预期调节了目标的注意分配(N2pc), 但并未改变目标匹配干扰物捕获注意(N2pc)并进入 VWM 存储(CDA)的结果, 也进一步验证其带来的行为促进效应。

首先, 行为结果显示出稳定的“目标匹配干扰物加工优势”。无论匹配条件出现的概率高低(70%/30%), 其正确率均显著高于不匹配条件, 且未发现概率与干扰物类型的交互作用。这一发现降低了“策略性加工”解释的可能性。如果依赖加工策略, 那么在低概率条件下(被试预期干扰物大概率不匹配), 被试应更倾向于抑制干扰物, 使匹配干扰物带来的增益减弱或消失。结果显示, 即使在较低呈现概率下, 目标匹配干扰物仍能够利用其携带的匹配特征来提供目标增益。这表明, 目标与干扰物的特征一致性带来的行为增益并非完全依赖自上而下的策略准备(Awh et al., 2012)。

其次, ERP 结果揭示预期对注意与存储阶段的不同影响。一方面, 干扰物加工诱发的 ERP 未受呈现概率显著调节。实验 2 复现了实验 1 的加工模式, 匹配干扰物首先诱发了反映刺激凸显性的 Ppc 成分, 紧接着诱发显著的 N2pc 和 CDA。这验证了目标匹配干扰物能够捕获注意并被编码进入 VWM 是稳定的认知现象。另一方面, 目标的注意选择受到概率的调节。在目标偏侧时诱发的 N2pc 振幅在概率与条件存在显著的交互作用, 即匹配-低概率条件的目标诱发了比匹配-高概率条件下振幅更大的 N2pc。然而, 这种早期注意层面的波动并未影响后期的存储阶段(CDA)与最终的行为表现。CDA 和行为结果发现, 无论概率如何, 干扰偏侧时目标匹配条件均诱发稳定的 CDA, 且匹配条件行为正确率显著高于不匹配条件。这种“早期敏感、晚期稳定”的模式进一步表明, 目标匹配干扰物带来的增益至少延续到 VWM 维持相关加工阶段, 并最终体现在行为表现上; 但当前结果尚不能完全区分编码阶段与提取阶段的贡献。

最后, 实验 2 中匹配条件下行为成绩显著高于不匹配条件, 而实验 1 中并未观察到匹配条件和不匹配条件间的显著差异。应注意到, 实验 1 中工作记忆负荷接近容量上限时(2 项目标+2 项匹配干扰物), 目标匹配干扰物带来的“表征增益”可能与“资源损耗”相互抵消(Fukuda et al., 2010)。实验 1 目标

偏侧时, 匹配条件在反映目标存储的 CDA 相比不匹配条件显著降低, 显示目标存储资源被挤占。这通常预示行为表现下降, 然而由于目标匹配干扰物进入 VWM 后对目标表征的增益, 最终表现为行为成绩既未受损, 也未显著提升。此外, 在实验 2 中, 移除了“部分匹配”这一中间条件, 降低了任务情景的不确定性, 使被试更为稳健的维持目标表征(目标偏侧时匹配条件与不匹配条件 CDA 无显著差异), 最终在行为结果中观察到匹配干扰物带来的“表征增益”。

综上所述, 实验 2 控制干扰物类型的呈现概率, 结果不支持表征增益主要由概率预期或策略性偏向驱动, 验证目标匹配干扰物能捕获注意并进入 VWM, 作为目标记忆的增益因素, 稳定地促进 VWM 表现。这些结果揭示了 VWM 选择机制的灵活性: 当环境中的非目标信息包含任务相关特征时, VWM 能够从“排除无关信息”转换为“利用相关特征”提升记忆表现。

4 总讨论

本研究通过两项实验, 探究目标匹配干扰物在视觉工作记忆中的加工时程及其对目标记忆表现的影响。结果表明, 尽管目标匹配干扰物属性为非目标信息, 但由于其携带目标记忆特征, 其能够捕获注意并编码进入 VWM 存储。关键在于, 这种非目标信息的侵入并未如传统“资源竞争模型”预测损害 VWM 表现。相反, 目标匹配干扰物为目标提供“增益”, 促进了目标的再认成绩。

4.1 目标匹配干扰物: 捕获注意并进入 VWM 的动态时程

以往针对不匹配干扰物的研究普遍认为, 高 VWM 容量个体更优的 VWM 表现源于对干扰物的高效抑制(Gaspelin et al., 2017; Vogel et al., 2005)。然而, 本研究的 ERP 证据揭示目标匹配干扰物促进目标记忆的动态过程。ERP 结果显示, 早期时间窗可观察到正向活动 Ppc, 该成分主要反映物理显著性的早期知觉登记, 但其并未受干扰物类型调节。本研究的匹配效应主要体现在后续的注意选择与记忆维持阶段。目标匹配干扰物诱发显著的 N2pc, 显示其成功捕获空间注意; 最终, 其诱发稳定的 CDA, 反映其进入 VWM 存储加工阶段。与此前研究中观察到的干扰物加工过程不同(Feldmann-Wüstefeld & Vogel, 2019; Liesefeld et al., 2017; Liu et al., 2024), 本研究在干扰物偏侧呈现时观察到稳

定的 CDA 成分, 提供了目标匹配干扰物能稳定进入 VWM 存储阶段的电生理证据。

4.2 行为结果与神经活动的分离: 资源竞争与目标增益的权衡

根据经典的资源竞争假说, 干扰物诱发 CDA 意味着其占用有限的存储资源, 应导致目标记忆成绩的下降(Bays & Husain, 2008; Ma et al., 2014)。然而, 本研究的行为结果与神经指标出现分离。虽然目标匹配干扰物获得存储阶段的加工(表现为实验 1 中目标 CDA 振幅在匹配条件下的降低), 但进入存储阶段的目标匹配干扰物并非无意义的“干扰信息”。在维持阶段, 它们可能提升记忆表征的稳定性(Lin & Luck, 2009); 在决策阶段, 它们为目标再认提供额外的表征线索。在实验 1 中, 这种表征线索带来的增益补偿了因资源竞争导致的目标成绩损耗, 使得匹配条件的正确率不仅未下降, 反而与不匹配条件无显著差异, 甚至在部分匹配条件时成绩显著提升。在实验 2 中, 脑电结果显示目标存储加工未受明显影响(目标诱发的 CDA 振幅在条件间无显著差异)。此时, 匹配干扰物未与目标加工产生明显竞争, “目标增益”效应得到了更为稳健的显现, 行为结果表现为匹配条件正确率显著高于不匹配条件。

4.3 视觉工作记忆选择机制的灵活性: 抑制 vs. 利用

本研究完善了 VWM 选择机制中匹配干扰物加工的理论解释。传统观点认为, 显著的非目标信息需要被抑制在 VWM 之外, 否则将损害目标记忆成绩(Vogel et al., 2005)。然而, 本文发现选择机制并非僵化地抑制所有无关信息, 而是显示出动态适应性和灵活性。面对完全无关的干扰物(不匹配的非目标信息), 认知系统将其排除在进一步注意选择和存储加工之外; 而对于携带任务相关特征的干扰物(匹配的非目标信息), 认知系统则采用“选择与利用”策略, 允许其进入 VWM, 以利用其包含的目标信息辅助任务完成。这种灵活性或许解释了为何高 VWM 容量个体在一些情景中反而更易被目标匹配干扰物捕获(Zhong et al., 2024)。这也许并非认知控制功能的“漏洞”, 而是高 VWM 个体具有更加灵活的选择机制, 能够根据任务需求从环境中提取潜在的目标线索以提升任务表现。

4.4 自下而上与自上而下的权衡: 呈现概率对注意的调控

N2pc 被认为是反映空间注意转移与指向的

ERP 指标, 既能表征由任务目标驱动的自上而下注意投入, 也能反映由刺激驱动的自下而上注意捕获(Theeuwes, 2010)。实验 2 结果显示, 在目标偏侧时, 低概率-匹配条件诱发了比高概率-匹配条件振幅显著更大的 N2pc。这揭示了被试面临呈现更低概率匹配干扰物时, 会策略性地向目标投入更多自上而下的注意资源, 以强化对目标的加工。然而, 干扰偏侧诱发的 ERP 模式显示, 这种为保护目标加工而增加的自上而下注意投入, 并未削弱干扰物对注意的捕获。匹配干扰物仍然诱发了显著的 N2pc, 且振幅未受呈现概率的显著调节。这一发现支持了两种机制共同影响注意选择: 自上而下机制调节目标注意分配, 自下而上机制驱动干扰物捕获注意。

4.5 ERP 成分的解读: Ppc (Early PD)、PD、CDAp 与 CDA

Feldmann-Wüstefeld 和 Vogel (2019)将 ERP 结果中早期的对侧正波解释为针对干扰物的主动抑制(Early PD)。然而, 这一解释难以诠释“目标偏侧”时同样出现的早期正波(Feldmann-Wüstefeld & Vogel, 2019)。因此, 本文将该成分界定为 Ppc。Ppc 反映了初级视觉皮层对物理显著刺激自下而上的早期感知过程, 并且不依赖刺激的任务相关性(Chen et al., 2023; Fortier-Gauthier et al., 2012; Jannati et al., 2013)。本文中, 无论目标还是干扰物位于偏侧, 早期时间窗均表现出正向活动, 多数条件诱发显著或边缘显著的 Ppc。这一结果更符合该成分反映知觉系统对物理显著性的响应, 而非对干扰物的主动抑制。

此外, 本研究中未观察到反映干扰物抑制的 ERP 成分 PD。可能由以下机制共同作用: 其一, 干扰负荷较低: 在 Feldmann-Wüstefeld 和 Vogel (2019)的研究中, 当干扰物负荷较低(仅 2 个)时, PD 成分并不总是可靠。其实验 1 中未发现显著的 PD ($M = 0.11 \mu V, p = 0.183$), 在实验 2 中观察到显著的 PD ($M = 0.22 \mu V, p = 0.019$) (Feldmann-Wüstefeld & Vogel, 2019); 其二, 任务相关的特征选择: 根据 Gaspelin 和 Luck (2018)的观点, 颜色与形状均不匹配的干扰物易被认知系统忽略, 从而无需调用更多主动抑制资源(Gaspelin & Luck, 2018); 其三, 加工优先级的变化(Chen et al., 2023): 匹配干扰物因共享目标特征获得了更高的处理优先级, 改变了刺激的加工顺序, 使得不匹配干扰物在竞争中处于更低优先级, 进而未触发干扰抑制机制。

同时, 与以往发现干扰物会引发持续皮层抑制

(CDAp)的研究不同,本研究在任何条件下均未观察到显著的 CDAp。相反,匹配干扰物诱发了与目标相似的负性成分(CDA),提示其进入与 VWM 维持相关的加工过程。而不匹配干扰物由于加工优先级较低,其可能在进入 VWM 编码前就已自然消退,因此其既未触发干扰抑制成分(PD),也未引起晚期的持续性抑制(CDAp)。

最后,本文所分析的 CDA 成分,在一些研究中称为后部对侧持续负波 (SPCN, Sustained Posterior Contralateral Negativity) (Jolicoeur et al., 2008; Jolicoeur et al., 2006; Luria et al., 2016)。一些研究将 SPCN 视作持续空间注意分配的电生理指标 (Gibb et al., 2016; Holmes et al., 2014)。基于此,本研究从持续注意角度出发,也存在潜在解释:匹配干扰物因携带目标颜色特征,在早期获得知觉加工和空间注意选择,表现为 Ppc 与 N2pc; 随后,其表征受到维持性注意分配,表现为持续后部对侧负波;由于匹配干扰物与目标共享关键特征,这种持续注意分配并非单纯竞争目标资源,而是通过特征的共同激活,对目标表征提供增益。

综上,当前实验支持匹配干扰物能够促进目标加工,但在解离工作记忆维持与内部持续注意上存在局限,未来研究可采用更为精巧的实验设计,以进一步澄清匹配干扰物促进目标加工的认知过程。亦可操纵特征相似度的连续变化,探索干扰物从为目标提供“增益”转向“损耗”的边界。

5 结论

本研究证实,目标匹配干扰物在视觉工作记忆中展现出独特的加工模式:它们能稳定地捕获注意并被编码进入 VWM。更重要的是,这种非目标信息进入 VWM 并未损害目标成绩,反而为目标提供“增益”,促进了目标的行为表现。这一发现完善了传统的 VWM 选择模型,提示 VWM 系统具有高度的灵活性:高效的选择不仅是将无关信息“拒之门外”,还包含对潜在目标信息的“兼容并蓄”。

参 考 文 献

- Allen, R., Baddeley, A., & Hitch, G. (2017). Executive and perceptual distraction in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 43(9), 1677–1693.
- Awh, E., Belopolsky, A. V., & Theeuwes, J. (2012). Top-down versus bottom-up attentional control: A failed theoretical dichotomy. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(8), 437–443.
- Awh, E., Vogel, E. K., & Oh, S.-H. (2006). Interactions between attention and working memory. *Neuroscience*, 139(1), 201–208.
- Baddeley, A. (2003). Working memory: Looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience*, 4(10), 829–839.
- Bays, P. M., & Husain, M. (2008). Dynamic shifts of limited working memory resources in human vision. *Science*, 321(5890), 851–854.
- Chen, X., Xu, B., Chen, Y., Zeng, X., Zhang, Y., & Fu, S. (2023). Saliency affects attentional capture and suppression of abrupt-onset and color singleton distractors: Evidence from event-related potential studies. *Psychophysiology*, 60(8), e14290.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1), 87–114.
- Delorme, A., & Makeig, S. (2004). EEGLAB: An open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, 134(1), 9–21.
- Desimone, R., & Duncan, J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual Review of Neuroscience*, 18(1), 193–222.
- Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., & Lang, A.-G. (2009). Statistical power analyses using G* Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, 41(4), 1149–1160.
- Feldmann-Wüstefeld, T., & Vogel, E. K. (2019). Neural evidence for the contribution of active suppression during working memory filtering. *Cerebral Cortex*, 29(2), 529–543.
- Fortier-Gauthier, U., Moffat, N., Dell'Acqua, R., McDonald, J. J., & Jolicoeur, P. (2012). Contralateral cortical organisation of information in visual short-term memory: Evidence from lateralized brain activity during retrieval. *Neuropsychologia*, 50(8), 1748–1758.
- Fukuda, K., Awh, E., & Vogel, E. K. (2010). Discrete capacity limits in visual working memory. *Current Opinion in Neurobiology*, 20(2), 177–182.
- Fukuda, K., & Vogel, E. K. (2009). Human variation in overriding attentional capture. *Journal of Neuroscience*, 29(27), 8726–8733.
- Gao, Z. F., Yu, W. J., Xu, X. T., Yin, J., Shui, R. D., & Shen, M. W. (2012). Contralateral delay activity: An ERP index measuring information stored in visual working memory. *Chinese Science Bulletin*, 57(30), 2806–2814.
- [高在峰, 郁雯珺, 徐晓甜, 尹军, 水仁德, 沈模卫. (2012). 对侧延迟活动: 视觉工作记忆信息存储的 ERP 指标. *科学通报*, 57(30), 2806–2814.]
- Gaspelin, N., Leonard, C. J., & Luck, S. J. (2017). Suppression of overt attentional capture by salient-but-irrelevant color singletons. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 79(1), 45–62.
- Gaspelin, N., & Luck, S. J. (2018). The role of inhibition in avoiding distraction by salient stimuli. *Trends in Cognitive Sciences*, 22(1), 79–92.
- Gibb, B. E., Pollak, S. D., Hajcak, G., & Owens, M. (2016). Attentional biases in children of depressed mothers: An event-related potential (ERP) study. *Journal of Abnormal Psychology*, 125(8), 1166–1178.
- Holmes, A., Mogg, K., de Fockert, J., Nielsen, M. K., & Bradley, B. P. (2014). Electrophysiological evidence for greater attention to threat when cognitive control resources are depleted. *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience*, 14(2), 827–835.
- Jannati, A., Gaspar, J., & McDonald, J. (2013). Tracking target and distractor processing in fixed-feature visual search: Evidence from human electrophysiology. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and*

- Performance*, 39(6), 1713–1730.
- Jolicoeur, P., Brisson, B., & Robitaille, N. (2008). Dissociation of the N2pc and sustained posterior contralateral negativity in a choice response task. *Brain Research*, 1215, 160–172.
- Jolicoeur, P., Sessa, P., Dell'Acqua, R., & Robitaille, N. (2006). On the control of visual spatial attention: Evidence from human electrophysiology. *Psychological Research*, 70(6), 414–424.
- Kiesel, A., Miller, J., Jolicoeur, P., & Brisson, B. (2008). Measurement of ERP latency differences: A comparison of single - participant and jackknife - based scoring methods. *Psychophysiology*, 45(2), 250–274.
- Lavie, N. (2005). Distracted and confused?: Selective attention under load. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(2), 75–82.
- Lavie, N. (2010). Attention, distraction, and cognitive control under load. *Current Directions in Psychological Science*, 19(3), 143–148.
- Liesefeld, H. R., Liesefeld, A. M., Töllner, T., & Müller, H. J. (2017). Attentional capture in visual search: Capture and post-capture dynamics revealed by EEG. *NeuroImage*, 156, 166–173.
- Lin, P.-H., & Luck, S. J. (2009). The influence of similarity on visual working memory representations. *Visual Cognition*, 17(3), 356–372.
- Liu, Q., Yin, X., Guo, L., & Ye, C. (2024). Influence of presentation duration on filtering of irrelevant stimuli in visual working memory. *BMC Psychology*, 12(1), 469.
- Lopez-Calderon, J., & Luck, S. J. (2014). ERPLAB: An open-source toolbox for the analysis of event-related potentials. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 213.
- Luck, S. J. (2014). *An introduction to the event-related potential technique*. MIT Press.
- Luck, S. J., & Hillyard, S. A. (1994a). Electrophysiological correlates of feature analysis during visual search. *Psychophysiology*, 31(3), 291–308.
- Luck, S. J., & Hillyard, S. A. (1994b). Spatial filtering during visual search: Evidence from human electrophysiology. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20(5), 1000–1004.
- Luck, S. J., & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 390(6657), 279–281.
- Luria, R., Balaban, H., Awh, E., & Vogel, E. K. (2016). The contralateral delay activity as a neural measure of visual working memory. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 62, 100–108.
- Ma, W. J., Husain, M., & Bays, P. M. (2014). Changing concepts of working memory. *Nature Neuroscience*, 17(3), 347–356.
- McNab, F., & Dolan, R. J. (2014). Dissociating distractor-filtering at encoding and during maintenance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 40(3), 960–967.
- McNab, F., & Klingberg, T. (2008). Prefrontal cortex and basal ganglia control access to working memory. *Nature Neuroscience*, 11(1), 103–107.
- Peirce, J. (2007). PsychoPy - Psychophysics software in Python. *Journal of Neuroscience Methods*, 162(1-2), 8–13.
- Peirce, J., Gray, J. R., Simpson, S., MacAskill, M., Höchenberger, R., Sogo, H., ... Lindeløv, J. K. (2019). PsychoPy2: Experiments in behavior made easy. *Behavior Research Methods*, 51(1), 195–203.
- Schmidt, B. K., Vogel, E. K., Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2002). Voluntary and automatic attentional control of visual working memory. *Perception & Psychophysics*, 64(5), 754–763.
- Theeuwes, J. (2010). Top-down and bottom-up control of visual selection. *Acta Psychologica*, 135(2), 77–99.
- Ulrich, R., & Miller, J. (2001). Using the jackknife-based scoring method for measuring LRP onset effects in factorial designs. *Psychophysiology*, 38(5), 816–827.
- Vogel, E. K., & Machizawa, M. G. (2004). Neural activity predicts individual differences in visual working memory capacity. *Nature*, 428(6984), 748–751.
- Vogel, E. K., McCollough, A. W., & Machizawa, M. G. (2005). Neural measures reveal individual differences in controlling access to working memory. *Nature*, 438(7067), 500–503.
- Zhong, C., Qu, Z., Yang, N., Sun, M., Wang, Y., & Ding, Y. (2024). Susceptibility to attentional capture by target-matching distractors predicts high visual working memory capacity. *Psychological Science*, 35(11), 1203–1216.

Processing of target-matching distractors in visual working memory: Attentional capture and storage gain

WANG Yanxiang, DAI Mingsu, GUO Ruiqiao, LIU Qiang

(Institute of Brain and Psychological Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China)

Abstract

Visual working memory (VWM) has a strictly limited capacity, necessitating efficient selection mechanisms to prevent irrelevant information from consuming cognitive resources available for targets. Traditional theoretical models propose that once distractors bypass the attentional filter and enter storage, they are assumed to compete with target representations and consequently impair memory performance. However, it remains unclear whether this assumption also applies when distractors share defining features with targets, that is, when they are target-matching distractors. Unlike feature-mismatching distractors, target-matching distractors may engage distinct processing mechanisms due to their feature similarity to the targets. This study investigated the processing of target-matching distractors and their behavioral consequences, testing the hypothesis that they

may not be completely filtered out and may interact with target storage in a manner that differs from the traditional resource-competition account.

To isolate the cognitive processing of targets and distractors, we employed a lateralized VWM filtering paradigm across two experiments. Experiment 1 included 28 participants (mean age = 20.04 years), who performed a change-detection task involving memory arrays composed of two target squares and two distractor circles. The experimental conditions manipulated the number of distractors that shared colors with the targets: mismatch (zero), partial match (one), and full match (two). Electroencephalographic (EEG) activity was recorded to examine event-related potentials (ERPs), including the N2pc, an index of attentional selection; the positivity posterior contralateral (Ppc), and contralateral delay activity (CDA), an index of storage-related maintenance. Experiment 2 included 24 participants and adopted a 2 (distractor type: match vs. mismatch) $\times$ 2 (presentation probability: high vs. low) within-subjects design. By manipulating the probability of matching trials, this experiment tested whether the effects observed in Experiment 1 reflected strategic processing biases.

In Experiment 1, accuracy was significantly higher in the partial-match condition than in the mismatch condition ($p = 0.021$). Electrophysiologically, both partial-match and full-match distractors elicited significant N2pc and CDA components, suggesting that they captured attention and engaged storage-related maintenance processes. In contrast, mismatch distractors did not elicit reliable N2pc or CDA components, and early Ppc activity was not consistently modulated by feature matching. Experiment 2 replicated this pattern, demonstrating the robustness of these effects. Accuracy was significantly higher in the match condition ($M = 0.91$) than in the mismatch condition ($M = 0.88$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 0.47$), regardless of presentation probability. ERP analyses further showed that presentation probability modulated early allocation of attention to targets, as reflected by target-elicited N2pc amplitude, but did not alter the storage-related pattern; target-matching distractors consistently elicited reliable N2pc and CDA components, whereas mismatch distractors did not. Together, these findings suggest that target-matching distractors entered storage-related processing but facilitated, rather than impaired, target memory performance.

This study demonstrates that target-matching distractors are processed in a distinctive manner in VWM. Specifically, these distractors are not rigidly suppressed; instead, they are flexibly accommodated by the selection system when they share task-relevant features with targets. Crucially, the inclusion of such task-irrelevant but feature-relevant information in storage-related processing does not necessarily impair performance. Rather, feature overlap between targets and distractors may facilitate target memory. These findings refine traditional accounts of distractor suppression by suggesting that VWM filtering is not purely exclusionary, but is sensitive to the potential relevance of incoming information.

Keywords attention, visual working memory, selection mechanisms