

负性面孔的工作记忆离线态存储 不影响在线态存储*

王俊博^{1,2} 赵娜² 李子媛³ 刘强¹

(¹ 四川师范大学脑与心理科学研究院, 成都 610066)

(² 辽宁师范大学脑与认知神经科学研究中心, 大连 116029) (³ 安阳师范学院教育学院, 河南 安阳 455000)

摘要 已有研究表明, 负性面孔在工作记忆的在线态存储中具有加工优势; 同时负性面孔也可能诱发个体的负性情绪状态, 从而影响后续的工作记忆加工过程。然而, 对于负性面孔信息被储存于离线态时, 是否会影响在线态记忆加工, 尚未有研究进行探讨。本研究采用序列记忆提取任务, 结合脑电记录分析技术, 考察了离线态表征为愤怒/中性面孔时在线态记忆的行为表现和脑电响应差异。行为结果显示, 负性面孔的离线记忆表现优于中性面孔, 但两种条件下的在线记忆成绩无显著差异。脑电数据分析显示, 在在线态记忆加工过程中, 与编码阶段注意资源分配相关的晚期正电位(LPP)不受离线态情绪面孔条件的影响。此外, 维持阶段的脑电解码结果也未发现存在条件间神经活动的显著差异。这些结果表明, 离线态存储的负性面孔信息不会对在线态记忆编码和维持加工产生影响。这一发现为理解视觉工作记忆中情绪信息的加工机制提供了新的实证依据。

关键词 视觉工作记忆, 情绪面孔, 多态储存, ERP 解码, LPP

分类号 B842

1 引言

视觉工作记忆(Visual Working Memory, VWM)是一个容量有限的记忆系统, 负责对视觉信息进行短暂的维持和操作。传统理论认为工作记忆表征的维持依赖持续的神经元激活。但近几年的研究却揭示出, 工作记忆维持阶段的神经活动实际上由记忆项目和当前任务的相关性所主导(Lewis-Peacock et al., 2012; LaRocque et al., 2013): 那些与当前任务紧密相关的项目信息会被留存于注意力焦点之内, 通过持续的神经元激活进行记忆表征维持, 被称为“在线态”记忆; 与之相对, 那些与当前任务并无关联的项目信息则处于注意力焦点之外, 依靠暂时改变神经元突触间的链接权重进行记忆表征维持, 在这一过程中无法观测到神经元激活, 被称作“离线态”记忆。记忆表征能够依据任务的具体要求在这两种

存储状态之间灵活地进行转换(Chota et al., 2021; Muhle-Karbe et al., 2021; Rose, 2020)。已有研究显示, 尽管在离线态表征存储期间无法检测到神经激活现象, 但这些表征依然能被有效维持, 并在面对时间衰减和外界干扰时表现出一定程度的稳定性(Zhang et al., 2022; 李子媛 等, 2025); 此外, 在线态和离线态的存储资源彼此之间呈现出相互独立的关系, 具体表现为其中某一存储态的负荷发生变化时, 并不会对另一存储态的记忆表现产生影响(Li et al., 2021; Oberauer, 2002)。需要指出的是, 现有研究多采用简单视觉刺激(如颜色、形状等)来考察工作记忆离线态的存储机制, 这与现实情境中复杂的多模态信息处理存在显著差异。作为社会性物种, 面部情绪加工在人类社会认知中具有特殊地位。实验研究显示, 人类对面孔的感知相较于其他具有意义的信息或客体更为敏锐(Ye et al., 2018;

收稿日期: 2024-04-03

* 国家自然科学基金项目(31970989); 河南省高等教育教学改革研究与实践项目(2024SJGLX1074)。

通信作者: 刘强, E-mail: lq780614@163.com

Young & Burton, 2018)。因此, 深入探究情绪面孔信息的离线态存储加工机制具有更为重要的社会价值。

以往关于负性情绪面孔的工作记忆研究表明, 负性情绪面孔信息具有稳定的记忆加工优势。例如, Jackson 等人(2009)的经典研究发现, 相对于中性和愉悦面孔, 被试对愤怒面孔的工作记忆成绩更好。后续研究认为, 负性情绪面孔的加工优势来源于在编码和维持阶段占用了更多的注意资源, 进而提高了表征质量(Sessa et al., 2011; Lee & Cho, 2019; Schindler & Bublatzky, 2020), 且与唤醒度无关(Jackson et al., 2014; Lee & Cho, 2019)。与此同时, 这种优势可以通过负性情绪加工过程中的神经活动来解释, 研究者们发现负性情绪能够增强杏仁核和梭状回活动, 而这些脑区与威胁识别和注意调控密切相关(Li et al., 2023)。需要注意的是, 以往涉及情绪面孔记忆的工作记忆任务, 都只局限于在线态存储, 并未涉及离线态存储。当利用离线态系统存储负性情绪面孔时, 存储本身是否仍会被自动分配更多的认知加工资源, 从而与在线态表征存储发生资源竞争? 这一问题尚需要进一步通过实验验证。

此外, 已有研究发现, 在情绪面孔分类判断任务中, 面孔的情绪信息可以引发被试自身情绪状态的改变(Falkenberg et al., 2012; Schneider et al., 1994; Srivastava et al., 2003)。而个体的工作记忆加工模式在不同的情绪状态下会存在一定的差异, 例如负性的情绪状态会降低个体的工作记忆容量(Figueira et al., 2017), 并且影响工作记忆的加工过程(Lin & Liang, 2023; Long et al., 2020; Xie et al., 2023; Ye et al., 2024)。上述研究结果提示了另一种潜在的作用机制: 负性面孔信息的离线态存储可能通过诱发个体情绪状态的改变, 进而对同步进行的在线态存储产生自上而下的调节作用。因此, 在观察到负性面孔的工作记忆离线态存储对在线态存储存在显著影响的结果时, 有必要对其潜在的作用机制进行区分验证: 这种影响究竟源于认知资源的直接竞争, 还是通过情绪状态的改变进行间接调节?

研究表明, 在刺激呈现后 500 ms 的编码阶段, 顶叶以及枕叶区域会出现一个持续的正向波(Late Positive Potential, LPP), 该成分能有效反映编码阶段的注意资源分配以及对任务目标的持续性注意(Gable & Adams, 2013; Hajcak et al., 2013; Ribes-Guardiola et al., 2023; Schindler et al., 2022)。研究结果显示, 相较于中性面孔, 愤怒面孔能够诱发更

大的 LPP 波幅, 即具备注意资源分配方面的显著优势(Schindler & Bublatzky, 2020; Lin & Liang, 2023); 并且在面孔编码过程中, 若先前的材料对当前任务的注意过程产生干扰, 那么也会对 LPP 振幅产生影响(Lin & Liang, 2023)。此外, 工作记忆维持阶段的神经活动通常以对侧延迟活动(Contralateral Delay Activity, CDA)为指标, 该成分表现为偏侧化刺激在对侧顶-枕区域诱发的持续性负慢波, 其幅值与在线态存储负荷呈正相关。大量研究表明, CDA 能够反映工作记忆项目的在线维持, 当记忆项目转移至离线态存储, CDA 就会降落至基线水平(Kreither et al., 2022; Zhang et al., 2022)。基于此, CDA 可作为监测记忆项目状态转换的重要依据。

综上, 本研究将采用序列记忆提取范式并结合脑电技术, 探究离线态中负性面孔信息是否会影响在线态面孔信息的编码和维持。实验中通过控制双记忆阵列(M1/M2)顺序呈现并逆序探测实现存储态分离(Li et al., 2024; Zhang et al., 2022); 同时, 采用脑电事件相关电位(Event-related potentials, ERPs)技术, 选取和分析 LPP 和 CDA 脑电指标, 并结合多变量模式分析(Multivariate Pattern Analysis, MVPA)对脑电信号进行神经解码。在刺激调控上, 仅操纵 M1 的面孔情绪(愤怒/中性), 并且控制 M1 中的项目偏侧化呈现以诱发特异性 CDA 成分; 而 M2 始终为中性面孔, 并以中线呈现的方式消除空间干扰。我们假设, 在 M1 呈现后将观察到明显的 CDA 成分, 但是该成分将在 M2 呈现后消失, 意味着 M1 的存储完全转移到离线状态。如果离线态存储的负性面孔影响在线态面孔的储存, 那么在 M2 编码过程中所观察到的注意资源分配相关的 LPP 成分的幅度, 应该在负性面孔条件下显著大于中性面孔条件; 同时, 在 M1 和 M2 的加工阶段, 也能观察到基于情绪条件的有效解码。另外, 由于解码曲线无法体现由条件操纵引发的具体神经活动的变化进程, 即在不同条件下的神经活动差异是由于愤怒面孔的情绪状态导致的, 还是由于资源分配的差异引发的。因此引入时间泛化分析作为补充: 如果神经活动差异来自于愤怒面孔引发的负性情绪状态, 那么解码模型在整个任务中应该具备较强的泛化能力, 即 M1 和 M2 维持阶段的分类模型可以相互解码; 如果神经活动差异来自于情绪面孔的资源分配差异, 那么解码模型应随着时间动态变化, 在较远的时间上不具备泛化能力, 即 M1 维持阶段的解码模型无法对 M2 维持阶段的脑电数据进行解码。

2 方法

2.1 被试

来自辽宁师范大学的 22 名大学生参加本实验(平均年龄 21 ± 2.01 岁, 13 名女性)。所有被试视力正常或矫正视力正常。我们基于 Cohen (2013) 定义的高效度量 0.80, 采用 G*Power 3.19 软件计算 Cohen's $d = 0.80$ 、 $\alpha = 0.05$ 、 $N = 22$ 时, $1 - \beta \approx 0.95$ 。本研究遵循赫尔辛基宣言, 并获得了辽宁师范大学伦理委员会的批准。

2.2 仪器

被试在一个昏暗安静的房间内进行实验, 坐在距离屏幕 60 cm 的位置。屏幕分辨率为 1920×1080 , 刷新率为 60 Hz。实验计算机使用 Windows 7 系统, 实验程序由 Matlab R2017a 和 PsychToolBox 3.0 编写。

2.3 刺激

实验材料来自于中国情绪图片(Chinese Affective Picture System, CAPS), 先前的研究表明, 男性面孔比女性面孔更有助于被试的识别(Becker et al., 2007; Ye et al., 2018)。与此同时, 相比于其他消极面孔, 愤怒面孔能更有效地引起被试对材料的注意和识别(Fox et al., 2000)。因此本实验只采用男性的中性情绪和愤怒情绪面孔图片作为材料。在愤怒条件下, 从 8 张愤怒面孔中随机选择 2 张作为 M1 的记忆项目; 在中性条件下, 从 8 张中性面孔中选择 2 张作为 M1 的记忆项目。为避免与 M1 的中性面孔重复, M2 中的 2 张记忆项目来自另外的 16 张中性面孔。图片数量设置保证每张面孔作为记忆项目出现的概率相同。除此之外, 在实验材料之外随机选取 8 张中性面孔图片, 每张图片分割成 5×5 的碎片, 将 $8 \times 5 \times 5$ 个碎片随机组合成 8 张新图片, 将其作为记忆阶段和探测阶段的占位符。刺激呈现在灰色的屏幕上, 大小为 $2.6^\circ \times 3^\circ$, M1 与十字注视点的水平距离为 2.9° , 垂直距离为 1.6° ; M2 与十字注视点的垂直距离为 1.6° 。

2.4 实验程序

本研究使用了序列记忆提取任务, 实验程序如图 1 所示。先前研究发现面孔的记忆容量为 2

(Jackson & Raymond, 2004)。为了充分占用工作记忆资源, 两个记忆阵列都包含 2 张记忆面孔。具体流程如下, 每个试次开始前先呈现 800 ms 的十字注视点, 然后进入记忆阶段。在 M1 中, 被试需要记住呈现在屏幕左侧或右侧的情绪面孔图片, 这两张图片是愤怒面孔(愤怒条件)或中性面孔(中性条件), 另一侧为占位符。在 M2 中, 两张中性面孔图片呈现在注视点上方或下方。为确保被试对每张面孔图片巩固完全, 每个记忆阵列呈现时间为 1 s, 维持时间也为 1 s (Jackson et al., 2009; Mallett et al., 2020)。在探测阶段, 被试需要判断阵列 1 中红色方框内的面孔与 M2 对应位置的面孔是否一致, 如果一致, 则按“F”键; 否则按“J”键。然后判断探测阵列 2 中红色方框内的面孔与 M1 对应位置的面孔是否一致, 作相同的按键反应。探测阵列 1 和 2 中面孔变化和不变的试次各占比 50%。在变化试次中, 选择情绪相同但身份不同的面孔图片作为探测刺激; 在不变试次中, 选择原图片作为探测刺激, 这样设定使被试对面孔的情绪信息和身份信息进行整体记忆。实验分 4 个组块进行, 每个组块包含 64 个试次, 愤怒条件和中性条件在每个组块中随机出现, 各占总试次的 50%。

2.5 EEG 记录和分析

整个实验过程使用了 32 通道电极帽(根据国际 10/20 系统: FP1/2, F7/8, F3/4, Fz, FC5/6, FC1/2, C3/4, Cz, M1/M2, CP5/6, P7/8, P3/4, PO7/8, PO3/4, Pz, O1/2, POz, VEOG, HEOG)来记录被试的脑电活动。垂直眼电(VEOG)在左眼下方 1 cm 处, 水平眼电(HEOG)在右眼角外侧 1 cm 处。每个电极电阻降至 $5 \text{ k}\Omega$ 以下。以 CPz 为在线参考, 采样率为 500 Hz。

实验数据以双侧乳突(M1 和 M2)的平均值作离线参考, 进行了 0.01 Hz 至 30 Hz 的带通滤波, 斜率为 12 dB/octave, 并从记忆阵列呈现前 800 ms 到维持期 2 结束(4000 ms)进行分段。使用独立成分分析(Independent Component Analysis, ICA)来去除水平和垂直眼动, 并移除了电压超过 $\pm 100 \mu\text{V}$ 的试次。愤怒条件保留试次数均值为 113.89 ± 13.07 , 中性

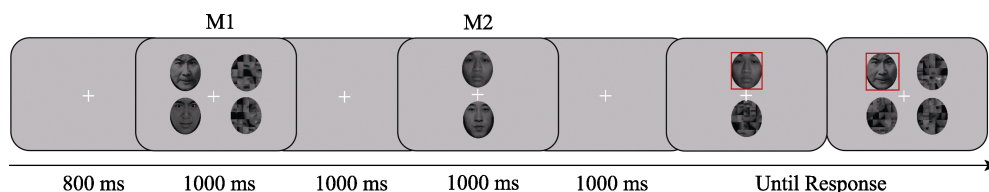


图 1 实验流程图

条件保留试次均值为 113.63 ± 13.51 。最后, 以刺激呈现前 400 ms 的数据均值作为基线对数据进行基线校正。

CDA 分析时间窗为维持期 1 (1000 ~ 2000 ms) 和维持期 2 (3000 ~ 4000 ms)。P7/8, P3/4, PO7/8 和 PO3/4 这 4 对电极用于 CDA 成分分析(Ankaoua & Luria, 2023; Balaban & Luria, 2015; Wang et al., 2019)。通过刺激呈现位置(左或右)的同侧平均电压减去对侧平均电压来获得差异波。LPP 成分的时间窗分别为 M1 和 M2 的编码阶段(M1: 500 ~ 1000 ms, M2: 2500 ~ 3000 ms), 中线上的 Fz, Cz, Pz 和 POz 作为分析电极(贾世伟, 2022)。解码分析选用除参考电极和眼电以外的全部活动电极, 共 28 个通道。

2.6 ERP 解码

本研究利用 ERPLAB (10.02)工具箱, 基于 ERP 波形对 M1 阵列的情绪条件进行解码。时间窗被设置为 M1 阵列呈现前 400 ms 至其呈现后 4000 ms, 并将时间采样率降至 100 Hz。将所有试次按 M1 的情绪条件分为 2 类, 并为每位被试生成一个 4 维数据矩阵, 其维度包括 M1 情绪条件(2)、时间点(440)、EEG 通道(28)和试次。由于预处理过程排除了数量不确定的试验, 因此每个条件的试次数量可能会有所不同。

以一位被试为例, 在此介绍单个时间点的解码过程。假设某位参与者在 2 种情绪条件下的剩余试次数量分别为 112 和 103, 其中最小的试次数是 103 次。则在单个时间点下, 每个条件分别随机抽取 96 个试次(8 的倍数)。接着, 这 96 个试次被随机平均分配到 8 个组, 对每个组分别计算每个 EEG 通道的 ERP 振幅平均值。对于每种情绪条件, 我们轮流取其中 1 组的 ERP 平均值作为测试数据, 其余 7 组的平均值作为训练数据, 以进行 8 折交叉验证。每次训练中, 根据 ECOC 方法(error-correcting output codes, Thomas & Ghulum, 1994), 首先用 7 组 $\times$ 2 种情绪的数据, 为 2 种情绪训练一个 SVM 分类器(即一个 28 维的超平面), 然后将 2 组测试数据输入分类器, 并获得一个最佳决策(其中一个被分类为愤怒条件, 另一个被分类为中性条件)作为解码结果。8 组轮流作为训练数据和测试数据之后, 2 个情绪条件共得到 16 个解码结果。以上过程被迭代了 30 次, 每次迭代中所有试次都被重新随机抽取并随机分组, 最后总共得到 480 个解码结果。这 480 个解码

结果和每次测试数据的真实情绪条件分别进行比对, 其正确率即为此被试在该时间点上的解码精度值。

我们对每位被试在所有时间点上完成了上述解码分析, 得到一组 22×440 的解码精度数据。

2.7 解码结果的统计分析

首先, 对每个时间点, 通过单样本 t 检验, 将所有被试的真实解码精度值和随机水平(1/2)进行差异分析, 得到每个时间点上的 t 值和 p 值。接着找到解码精度显著大于随机水平的连续时间集群(至少连续 3 个时间点的 p 值小于 0.05), 然后计算每个集群的 t 质量(即每个时间集群内的 t 值之和)。

接着, 为了确定这些时间集群的解码精度是否真的高于偶然预期, 我们使用基于聚类的置换检验, 构建了集群 t 质量的空分布, 其方法与之前的解码研究类似(Bae & Luck, 2019)。我们从 osf.io/2h6w9 下载了脚本。在置换检验的每次迭代中, 为了保留时间上的一贯性, 我们为每次测试的所有时间点选择了相同的随机标签(“愤怒”或“中性”)替换真实条件。然后用实际解码过程得到的解码结果和随机标签进行比对, 相同记为正确, 不同记为错误, 并取正确率作为虚拟解码精度。同样, 每个时间点的虚拟解码精度通过单样本 t 检验与偶然水平(1/2)进行比较, 然后找到虚拟解码精度显著高于偶然性的连续时间集群, 并计算群级 t 质量。在每次迭代中, 如果存在多个显著的集群, 则记录其中最大的 t 质量; 如果没有显著的集群, 则本次迭代的 t 质量记录为零。置换检验共迭代重复 1000 次, 以形成 1000 个无效的集群 t 质量, 作为置换检验的空分布。

空分布建立完成之后, 用实际解码得到的几个显著集群 t 质量分别与空分布中的 t 质量作比较, 如果一个时间集群的 t 质量大于无效分布中 95% 的值, 则认为该时间段的解码精度显著高于随机水平。

2.8 时间泛化分析

最后, 由于解码曲线存在一定局限性, 无法体现由条件操纵引发的具体神经活动的变化进程, 本研究对解码结果进行了时间泛化分析作为补充。在时间泛化分析中, 为了减少运算难度, 将采样率降至 50 Hz, 其他步骤与解码过程基本相同。不同的是, 我们用每个时间点单独训练分类器, 然后用其他全部时间点的数据作为测试数据, 计算该模型对其他时间点的解码精度, 以得到分类模型在时间维度上的泛化能力。

3 结果

3.1 行为结果

本研究分析了 M1 和 M2 的记忆正确率和辨别力 d' , 结果如图 2 所示。在 M1 中, 愤怒条件的正确率为 0.67 ($SE = 0.017$), 辨别力 $d' = 0.95$ ($SE = 0.11$); 中性条件的正确率为 0.60 ($SE = 0.015$), 辨别力 $d' = 0.54$ ($SE = 0.08$)。对于 M2, 愤怒条件的正确率为 0.76 ($SE = 0.014$), 辨别力 $d' = 1.49$ ($SE = 0.08$); 中性条件的正确率为 0.76 ($SE = 0.012$), 辨别力 $d' = 1.52$ ($SE = 0.08$)。

为了控制家族错误率(Family-Wise Error Rate, FWER), 我们对所有比较的 p 值进行了 Bonferroni 校正, 将显著性水平 0.05 除以比较次数 4, 校正后显著性水平 $\alpha = 0.0125$ 。配对 t 检验结果显示, 愤怒条件下 M1 回忆正确率显著高于中性条件, $t(21) = 4.49$, $p < 0.001$, Bonferroni 校正, 95% CI [0.037, 0.10], Cohen's $d = 0.97$, 愤怒条件下辨别力 d' 也显著高于中性条件, $t(21) = 4.04$, $p = 0.001$, Bonferroni 校正, 95% CI [0.20, 0.62], Cohen's $d = 0.86$ 。但是, M2 的正确率($t(21) = -0.32$, $p = 0.752$, Bonferroni 校正, 95% CI [-0.24, 0.16], Cohen's $d = 0.0088$)和辨别力 d' ($t(21) = 0.551$, $p = 0.588$, Bonferroni 校正, 95% CI [-0.17, 0.10], Cohen's $d = 0.117$)在条件之间无显著差异。这些结果表明, 离线态情绪性面孔的效价

变化只影响该存储态的记忆表现, 而不影响在线态面孔信息的行为表现。

3.2 CDA

CDA 波形如图 3 所示。对维持期 1 的 CDA 成分进行 2 (条件: 愤怒 vs. 中性) $\times$ 2 (偏侧化: 对侧 vs. 同侧) 重复测量方差分析。结果显示, 偏侧化主效应显著, $F(1, 21) = 51.371$, $p < 0.001$, 95% CI [-1.67, -0.92], $\eta_p^2 = 0.710$, 这表明在 M1 之后的维持期间出现显著的 CDA, 意味着 M1 记忆项目进入工作记忆系统并被有效维持。条件主效应不显著, $F(1, 21) = 0.274$, $p = 0.606$; 偏侧化和条件之间的交互作用也不显著, $F(1, 21) = 0.161$, $p = 0.693$ 。在维持期 2 期间, 相同的重复测量方差分析结果显示, 偏侧化($F(1, 21) = 0.458$, $p = 0.506$)和条件($F(1, 21) = 0.407$, $p = 0.530$)的主效应均不显著, 两个因素之间交互作用也不显著($F(1, 21) = 0.726$, $p = 0.404$); 愤怒条件($t(21) = -0.16$, $p = 0.877$, 95% CI [-0.51, 0.44])和中性条件($t(21) = -1.02$, $p = 0.319$, 95% CI [-0.70, 0.24])的 CDA 活动与基线均无显著差异。以上结果表明 CDA 在维持期 2 期间回到基线水平。

3.3 LPP

LPP 波形如图 4 所示。在 M1 编码阶段(500 ~ 1000 ms), 对电极(Fz, Cz, Pz 和 POz)和情绪(愤怒 vs. 中性)进行了两因素重复测量方差分析, 结果显

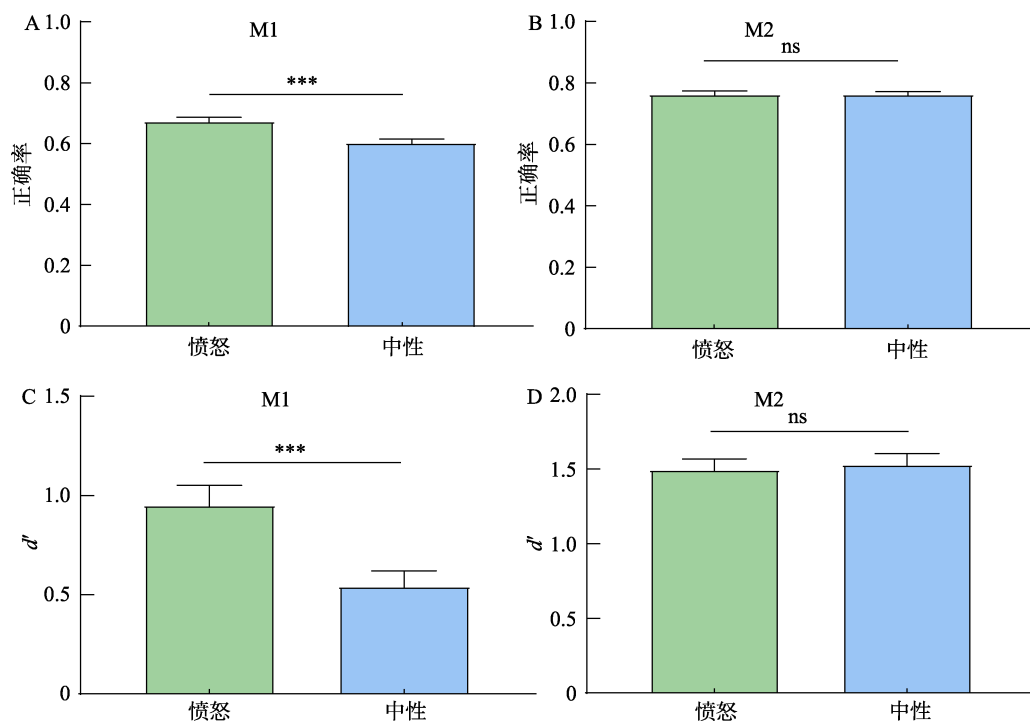


图 2 行为结果图

注: ***表示 $p < 0.001$, ns 代表 $p \geq 0.05$

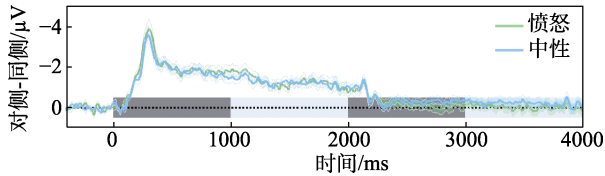


图 3 CDA 结果图

注：其中深灰色部分为刺激呈现阶段，浅灰色部分为维持期。彩图见电子版，下同

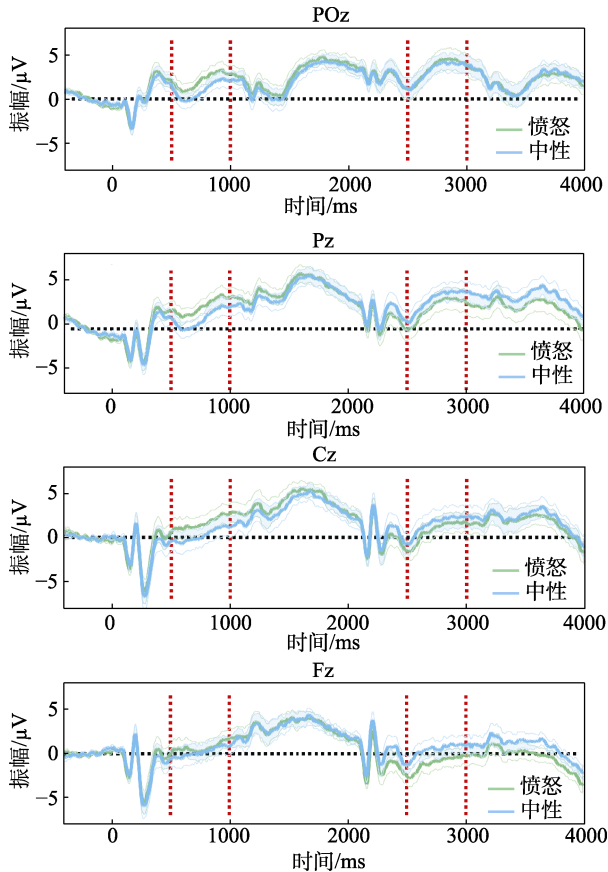


图 4 两个条件下对应电极点的 LPP 成分

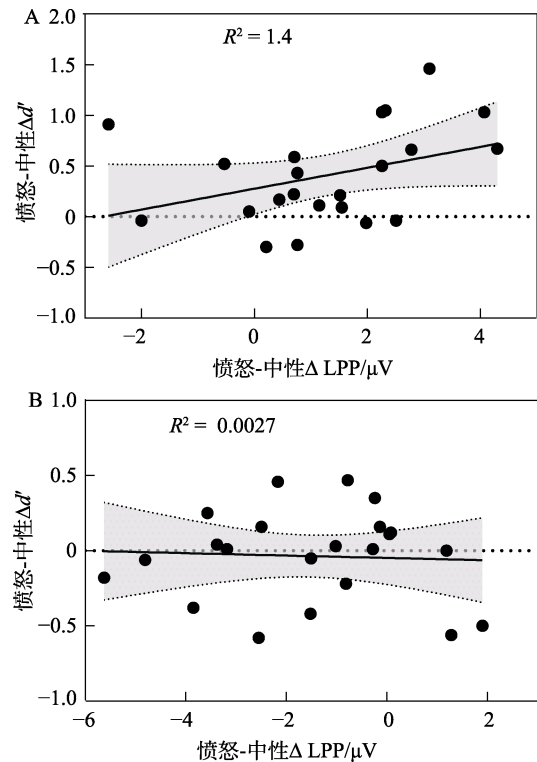
注：红色虚线部分为 LPP 在 M1 和 M2 刺激呈现期间分析时间窗

示情绪主效应显著, $F(1, 21) = 9.47, p = 0.006, \eta_p^2 = 0.310$; 电极和情绪交互作用显著, $F(1, 21) = 3.45, p = 0.037, \eta_p^2 = 0.353$ 。进一步简单效应分析发现, POz 电极的 LPP 成分在情绪条件间差异显著, $t(21) = 3.63, p = 0.002, 95\% \text{ CI } [0.47, 1.72], \text{Cohen's } d = 0.77$; Pz 电极的 LPP 成分在情绪条件间差异显著, $t(21) = 3.80, p = 0.001, 95\% \text{ CI } [0.62, 2.13], \text{Cohen's } d = 0.80$; Cz 电极的 LPP 成分情绪条件间差异显著, $t(21) = 2.436, p = 0.024, 95\% \text{ CI } [0.20, 2.55], \text{Cohen's } d = 0.51$; 而额叶电极点 Fz 的 LPP 成分在条件之间差异不显著, $t(21) = 1.31, p = 0.205, 95\% \text{ CI } [-3.1, 1.34]$ 。总之, 愤怒面孔在 M1 编码阶段诱发了顶-枕区域更强的 LPP 成分。

在 M2 编码阶段(2500 ~ 3000 ms), 对电极(Fz, Cz, Pz, POz)和情绪(愤怒 vs. 中性)进行了两因素重复测量方差分析, 结果显示电极主效应显著, $F(1, 21) = 4.55, p = 0.015, \eta_p^2 = 0.418$ 。电极和情绪交互作用显著, $F(1, 21) = 4.87, p = 0.011, \eta_p^2 = 0.435$ 。进一步简单效应分析发现, 愤怒条件下额叶 Fz 的 LPP 振幅显著低于中性条件, $t(21) = -3.56, p = 0.002, 95\% \text{ CI } [-2.41, -0.63], \text{Cohen's } d = 0.67$; 同时愤怒条件下 Fz 的 LPP 振幅显著低于 Cz ($p = 0.047$), Pz ($p = 0.009$)和 POz ($p = 0.006$)。而其他电极点在条件之间差异均不显著, 因此, 在 M2 编码阶段, 中性条件 Fz 诱发的 LPP 成分显著高于愤怒条件。

3.4 行为和脑电结果的相关分析

为探究脑电结果与行为表现之间的关系, 即由愤怒面孔引起的 LPP 波幅增强是否与行为表现上对 M1 辨别力的提高呈正相关。据此, 本研究计算了 M1 编码阶段顶-枕区域(Cz, Pz 和 POz)的 LPP 幅值在两个条件下的平均差值, 并与 M1 辨别力的差值进行了单尾相关性检验(见图 5), 结果显示, M1 中顶-枕 LPP 振幅差值与其辨别力 d' 差值成正相关

图 5 两条件 LPP 和辨别力 d' 差值 (愤怒 - 中性) 线性相关关系图

注：图 5A 为 M1 编码阶段额叶 LPP 差值与比辨别力差值的相关图；图 5B 为 M2 编码阶段额叶 LPP 差值与比辨别力差值的相关图

($r = 0.369$, $p = 0.045$, 95% CI $[-0.017, 0.22]$), 说明愤怒面孔离线态工作记忆成绩优势与编码阶段的注意资源分配有关。而 M2 编码阶段额叶 Fz 电极 LPP 振幅差值与 M2 辨别力 d' 差值无显著相关性($r = -0.048$, $p = 0.416$), 即 M2 工作记忆成绩并不受额叶 LPP 成分的影响。

3.5 解码结果与时间泛化分析

解码分析发现, 在 M1 呈现后 330~1710 ms 以及 1760~3250 ms 两个时间段, 对 M1 情绪信息的解码准确率高于随机水平, 如图 6 所示。由于刺激呈现后 3000 ms 是 M2 的在线维持阶段, 该结果表明, 在 M2 维持阶段离线情绪面孔不能被有效解码。另外, 时间泛化分析并没有发现相应时间点的解码模型对其余测试时间点具备解码泛化能力。这说明, 在 ERP 解码中, 两个显著时间段可能反映了不同的脑活动。

4 讨论

本研究采用序列记忆任务范式, 首次探讨了工作记忆离线态存储的负性情绪面孔对在线态信息加工的影响机制。行为学数据显示, 离线态存储的愤怒面孔情绪特征对在线态面孔记忆准确率无显著影响, 这一发现与多态表征资源独立性假说高度吻合。事件相关电位分析揭示了该现象的神经机制: 在 M2 编码阶段, 顶-枕区晚期正电位波幅未发现显著差异, 表明离线态负性表征未引发在线态编码阶段的注意资源竞争; 解码结果显示, M2 维持阶段并未有效解码离线态存储的面孔情绪特征, 进一步证实两种表征状态的神经资源独立性。不同于既往研究通过认知负载操纵探讨资源分配机制, 本研究通过系统操纵离线态表征的情绪特征, 首次将工作记忆多态表征的资源独立性机制从简单视觉特征拓展至复杂社会性刺激加工领域。该发现对理解人类社会信息加工机制具有重要启示: 当处理序列

呈现的社会性信息时, 多态表征的并行存储特性可保障认知系统在维持原有情绪信息表征的同时, 对新输入的社会线索进行高效编码, 这种特性可能构成社会性动物适应复杂人际交互的神经基础。

本研究发现负性面孔在工作记忆的离线态储存中仍表现出记忆优势, 与前人对在线态加工的研究一致(Jackson et al., 2014; Jackson & Raymond, 2004; Jackson et al., 2009)。ERP 分析表明, 愤怒面孔在 M1 编码阶段引发了顶-枕区域更强的 LPP 活动, 并且与工作记忆成绩的提高密切相关。这一结果支持了负性面孔在编码阶段获得更多注意资源的观点。具体而言, 愤怒面孔在加工过程中会引发更强的趋近动机(Carver & Harmon-Jones, 2009), 这种动机性注意可能使其在注意资源分配上占据优势(Ferreira de Sá et al., 2019; Jackson et al., 2014)。杏仁核的双重功能为此提供神经解释——研究表明, 杏仁核不仅参与情绪加工, 还在注意控制和工作记忆编码阶段发挥关键作用(Li et al., 2023; Most et al., 2006; Richter-Levin & Akirav, 2000)。在 M1 维持期间, 虽然没有发现 CDA 成分在条件之间产生差异, 但 ERP 解码结果表明, 不同情绪条件之间的神经活动出现了显著差异。时间泛化分析则表明这种差异具有阶段特异性, 解码模型不具备在较远时间上的泛化能力, 而是随着时间推移不断变化。这意味负性面孔的加工优势并非通过引发消极的情绪状态实现, 而是源于编码和维持阶段互相独立的神经活动。Sessa 等人(2011)的研究认为负性面孔在维持阶段可能具有更高的加工优势, 但是 CDA 指标并不能有效地反映出来。一方面, CDA 成分只能有效反映出维持在视觉皮层中的表征的数量信息, 而无法反映出表征的质量等其他信息。相对于中性面孔, 负性面孔在编码阶段的注意资源分配优势, 会导致其在维持阶段的表征质量更高。另一方面, 与简单色块不同, 面孔刺激更为复杂, 而维持

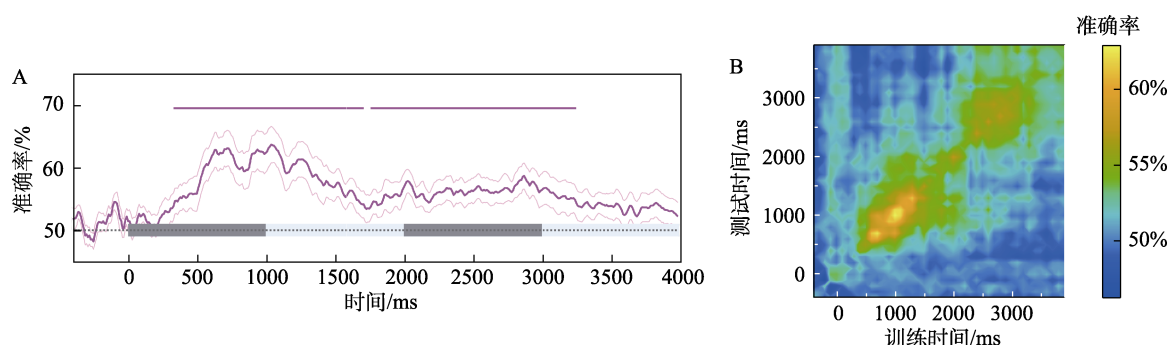


图 6 ERP 解码图及时间泛化分析图

注: 图 A 为 ERP 解码图; 图 B 为时间泛化分析图

期间可能有更广泛的脑区参与该过程。而通过本研究的解码结果,似乎能够确认相较于中性面孔,负性面孔在维持阶段确实存在不同的神经活动,这在一定程度上支持了 Sessa 等人(2011)对于负性面孔维持阶段加工优势的猜想。综上所述,实验结果支持了负性面孔在工作记忆编码和维持阶段的加工优势,并将其从单一状态表征扩展到工作记忆的离线态储存中。

值得注意的是,本研究在 M2 编码阶段观察到额叶 LPP 成分在实验条件间存在显著差异。M2 时间窗口内涉及两个并行的加工过程:(1)对当前 M2 记忆阵列的在线编码;(2)对 M1 记忆内容的离线态储存。由于 M2 仅使用中性面孔作为记忆材料,且行为表现和枕-顶 LPP 成分未受情绪信息影响,上述差异可能源于离线态储存过程中非情绪性因素的神经调控,而与 M2 编码进程无关。同时,时间泛化分析进一步支持这一推论:M1 与 M2 编码阶段的解码模型缺乏跨阶段泛化能力,表明两者的神经表征模式具有显著异质性,因而解码结果也反映了不同情绪面孔在离线态储存过程中的神经活动差异。前人研究表明,额叶 LPP 与自上而下的认知控制密切相关(Ferrari et al., 2008; Moratti et al., 2011),而本研究发现的额叶 LPP 条件间差异可能源于以下两种机制:(1)愤怒条件下额叶 LPP 的降低可能源于情绪调节效应。先前研究显示,情绪的调节是一个自发过程,并且这一过程有利于后续记忆加工(Flores Jr & Berenbaum, 2017; Lin & Liang, 2023; Mauss et al., 2007)。具体而言,额叶皮层通过抑制负性情绪反应以优化记忆表现(Li et al., 2022),这种调节过程可能导致 LPP 振幅的降低。因此本研究推测,情绪调节过程避免了愤怒面孔诱发的情绪状态对 M2 记忆过程的影响,而对负性情绪的调节导致了额叶 LPP 成分的下降。(2)在中性条件下,额叶 LPP 振幅显著升高。这可能源于中性刺激的特征局限性:相较于愤怒面孔丰富的情绪线索,中性面孔的特征信息更少(如缺乏显著情绪特征),导致其离线态储存需要更强的认知控制资源(Li et al., 2024)。具体而言:一方面,离线态储存要求对冗余神经活动进行抑制以维持表征稳定性(Li et al., 2024),而中性条件下 M1 与 M2 均为中性面孔,可能需通过更强的额叶抑制机制抵消记忆干扰;另一方面,根据活动-静默态理论(Kuo et al., 2016),离线态转换涉及内部注意(维持 M1)与外部注意(编码 M2)的动态平衡,而中性面孔的低特征显著性,可

能迫使额叶皮层分配更多资源介入内部注意过程,以稳定维持储存于离线态的中性面孔表征(Kuo et al., 2016; 梁腾飞, 2023)。值得注意的是,额叶 LPP 的调节效应未延伸至 M2 行为表现,揭示额叶皮层的认知控制机制可能独立于传统注意资源分配过程。这一发现支持情绪面孔多态储存的复杂性:相较于简单刺激,其加工可能涉及更广泛的分布式脑网络(如额叶-顶叶-杏仁核环路)。未来研究可通过动态脑网络分析或双任务范式,进一步解析额叶皮层在情绪工作记忆多态表征中的特异性作用。

5 结论

本研究揭示了视觉工作记忆多态储存过程中,资源独立性并不受情绪信息的影响。同时,储存于离线态中的负性面孔依旧具有工作记忆表现上的优势。另外,不同的情绪信息可能影响离线态储存时的执行控制过程,这意味着在工作记忆情绪面孔离线态储存过程中涉及更广泛的脑区协作。本研究结果为理解情绪面孔如何影响工作记忆的多态存储提供了新的视角。

参 考 文 献

- Ankaoua, M., & Luria, R. (2023). One turn at a time: Behavioral and ERP evidence for two types of rotations in the classical mental rotation task. *Psychophysiology*, 60(4), e14213.
- Bae, G. Y., & Luck, S. J. (2019). Decoding motion direction using the topography of sustained ERPs and alpha oscillations. *NeuroImage*, 184, 242–255.
- Balaban, H., & Luria, R. (2015). The number of objects determines visual working memory capacity allocation for complex items. *NeuroImage*, 119, 54–62.
- Becker, D. V., Kenrick, D. T., Neuberg, S. L., Blackwell, K. C., & Smith, D. M. (2007). The confounded nature of angry men and happy women. *Journal of Personality and Social Psychology*, 92(2), 179–190.
- Carver, C. S., & Harmon-Jones, E. (2009). Anger is an approach-related affect: Evidence and implications. *Psychological Bulletin*, 135(2), 183–204.
- Chota, S., & Van der Stigchel, S. (2021). Dynamic and flexible transformation and reallocation of visual working memory representations. *Visual Cognition*, 29(7), 409–415.
- Cohen, J. (2013). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Routledge.
- Ferrari, V., Codispoti, M., Cardinale, R., & Bradley, M. M. (2008). Directed and motivated attention during processing of natural scenes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(10), 1753–1761.
- Ferreira de Sá, D. S., Michael, T., Wilhelm, F. H., & Peyk, P. (2019). Learning to see the threat: Temporal dynamics of ERPs of motivated attention in fear conditioning. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 14(2), 189–203.
- Falkenberg, I., Kohn, N., Schoepker, R., & Habel, U. (2012). Mood induction in depressive patients: A comparative multidimensional approach. *PloS One*, 7(1), e30016.

- Figueira, J. S., Oliveira, L., Pereira, M. G., Pacheco, L. B., Lobo, I., Motta-Ribeiro, G. C., & David, I. A. (2017). An unpleasant emotional state reduces working memory capacity: Electrophysiological evidence. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 12(6), 984–992.
- Flores Jr, L. E., & Berenbaum, H. (2017). The social regulation of emotion and updating negative contents of working memory. *Emotion*, 17(4), 577.
- Fox, E., Lester, V., Russo, R., Bowles, R., Pichler, A., & Dutton, K. (2000). Facial expressions of emotion: Are angry faces detected more efficiently? *Cognition & Emotion*, 14(1), 61–92.
- Gable, P. A., & Adams, D. L. (2013). Non affective motivation modulates the sustained LPP (1,000–2,000 ms). *Psychophysiology*, 50(12), 1251–1254.
- Hajcak, G., MacNamara, A., Foti, D., Ferri, J., & Keil, A. (2013). The dynamic allocation of attention to emotion: Simultaneous and independent evidence from the late positive potential and steady state visual evoked potentials. *Biological Psychology*, 92(3), 447–455.
- Jackson, M. C., Linden, D. E., & Raymond, J. E. (2014). Angry expressions strengthen the encoding and maintenance of face identity representations in visual working memory. *Cognition & Emotion*, 28(2), 278–297.
- Jackson, M. C., & Raymond, J. E. (2004). Visual working memory for faces. *Journal of Vision*, 4(8), 394.
- Jackson, M. C., Wu, C.-Y., Linden, D. E. J., & Raymond, J. E. (2009). Enhanced visual short-term memory for angry faces. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35(2), 363–374.
- JIA, S., QI, C., CHEN, L., & REN, Y. (2022). The effect of working memory load on feedback processing: Evidence from an event-related potentials (ERP) study. *Acta Psychologica Sinica*, 54(3), 248–258.
- [贾世伟, 齐丛丛, 陈乐乐, 任衍昆. (2022). 工作记忆负荷对反馈加工过程的影响: 来自脑电研究的证据. *心理学报*, 54(3), 248–258.]
- Kreitherr, J., Papaioannou, O., & Luck, S. J. (2022). Active working memory and simple cognitive operations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 34(2), 313–331.
- Kuo, B.-C., Nobre, A. C., Scerif, G., & Astle, D. E. (2016). Top-down activation of spatiotopic sensory codes in perceptual and working memory search. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 28(7), 996–1009.
- LaRocque, J. J., Lewis-Peacock, J. A., Drysdale, A. T., Oberauer, K., & Postle, B. R. (2013). Decoding attended information in short-term memory: An EEG study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25(1), 127–142.
- Lee, H. J., & Cho, Y. S. (2019). Memory facilitation for emotional faces: Visual working memory trade-offs resulting from attentional preference for emotional facial expressions. *Memory & Cognition*, 47(6), 1231–1243.
- Lewis-Peacock, J. A., Drysdale, A. T., Oberauer, K., & Postle, B. R. (2012). Neural evidence for a distinction between short-term memory and the focus of attention. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24(1), 61–79.
- Li, J., Cao, D., Yu, S., Xiao, X., Imbach, L., Stieglitz, L., Sarnthein, J., & Jiang, T. (2023). Functional specialization and interaction in the amygdala-hippocampus circuit during working memory processing. *Nature Communications*, 14(1), 2921.
- Li, S., Xie, H., Zheng, Z., Chen, W., Xu, F., Hu, X., & Zhang, D. (2022). The causal role of the bilateral ventrolateral prefrontal cortices on emotion regulation of social feedback. *Human Brain Mapping*, 43(9), 2898–2910.
- Li, Z., Guo, W., Zhao, N., & Liu, Q. (2024). The suppression mechanisms of passive memory in visual working memory: The evidence from electroencephalography. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 37(2), 334–344.
- Li, Z., Liang, T., & Liu, Q. (2021). The storage resources of the active and passive states are independent in visual working memory. *Cognition*, 217, 104911.
- Li, Z., Ren, G., Yuan, Z., Yu, Q., Wu, Y., & Liu, Q. (2025). Offline memory representations have robustness superiority in visual working memory. *Acta Psychologica Sinica*, 57(5), 739–748.
- [李子媛, 任国防, 袁子昕, 喻青青, 伍越, 刘强. (2025). 视觉工作记忆离线态表征具有稳固性优势. *心理学报*, 57(5), 739–748.]
- Liang, T. (2023). *Research on the processing mechanism of dual representation states in visual working memory* [Unpublished doctoral dissertation]. Liaoning Normal University, China.
- [梁腾飞. (2023). 视觉工作记忆双重表征态的加工机制研究 (博士学位论文). 辽宁师范大学.]
- Lin, H., & Liang, J. (2023). The priming effects of emotional vocal expressions on face encoding and recognition: An ERP study. *International Journal of Psychophysiology*, 183, 32–40.
- Long, F., Ye, C., Li, Z., Tian, Y., & Liu, Q. (2020). Negative emotional state modulates visual working memory in the late consolidation phase. *Cognition and Emotion*, 34(8), 1646–1663.
- Mallett, R., Mummaneni, A., & Lewis-Peacock, J. A. (2020). Distraction biases working memory for faces. *Psychonomic Bulletin & Review*, 27(2), 350–356.
- Maus, I. B., Bunge, S. A., & Gross, J. J. (2007). Automatic emotion regulation. *Social and Personality Psychology Compass*, 1(1), 146–167.
- Moratti, S., Saugar, C., & Strange, B. A. (2011). Prefrontal-occipitoparietal coupling underlies late latency human neuronal responses to emotion. *The Journal of Neuroscience*, 31(47), 17278–17286.
- Most, S. B., Chun, M. M., Johnson, M. R., & Kiehl, K. A. (2006). Attentional modulation of the amygdala varies with personality. *NeuroImage*, 31(2), 934–944.
- Muhle-Karbe, P. S., Myers, N. E., & Stokes, M. G. (2021). A hierarchy of functional states in working memory. *The Journal of Neuroscience*, 41(20), 4461–4475.
- Oberauer, K. (2002). Access to information in working memory: Exploring the focus of attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 28(3), 411.
- Ribes-Guardiola, P., Ventura-Bort, C., Poy, R., Segarra, P., Branchadell, V., & Moltó, J. (2023). Attention-affect interactions and triarchic psychopathy: New electrophysiological insights from the late positive potential. *Psychophysiology*, 60(4), e14222.
- Richter-Levin, G., & Akirav, I. (2000). Amygdala-hippocampus dynamic interaction in relation to memory. *Molecular Neurobiology*, 22(1-3), 11–20.
- Rose, N. S. (2020). The dynamic-processing model of working memory. *Current Directions in Psychological Science*, 29(4), 378–387.
- Schindler, S., Bruchmann, M., & Straube, T. (2022). Feature-based attention interacts with emotional picture content during mid-latency and late ERP processing stages. *Biological Psychology*, 170, 108310.
- Schindler, S., & Bublatzky, F. (2020). Attention and emotion: An integrative review of emotional face processing as a function of attention. *Cortex*, 130, 362–386.
- Schneider, F., Gur, R. C., Gur, R. E., & Muenz, L. R. (1994). Standardized mood induction with happy and sad facial expressions. *Psychiatry Research*, 51(1), 19–31.
- Sessa, P., Luria, R., Gotler, A., Jolicœur, P., & Dell'acqua, R. (2011). Interhemispheric ERP asymmetries over inferior parietal cortex reveal differential visual working memory maintenance for fearful versus neutral facial identities. *Psychophysiology*, 48(2), 187–197.
- Srivastava, S., Sharma, H. O., & Mandal, M. K. (2003). Mood

- induction with facial expressions of emotion in patients with generalized anxiety disorder. *Depression and Anxiety*, 18(3), 144–148.
- Thomas, G. D., & Ghulum, B. (1994). Solving multiclass learning problems via error-correcting output codes. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2(1), 263–286.
- Wang, S., Rajsic, J., & Woodman, G. F. (2019). The contralateral delay activity tracks the sequential loading of objects into visual working memory, unlike lateralized alpha oscillations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 31(11), 1689–1698.
- Xie, W., Ye, C., & Zhang, W. (2023). Negative emotion reduces visual working memory recall variability: A meta-analytical review. *Emotion*, 23(3), 859–871.
- Ye, C., Liu, R., Guo, L., Zhao, G., & Liu, Q. (2024). A negative emotional state impairs individuals' ability to filter distractors from working memory: An ERP study. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 24(3), 491–504.
- Ye, C., Xu, Q., Liu, Q., Cong, F., Saariluoma, P., Ristaniemi, T., & Astikainen, P. (2018). The impact of visual working memory capacity on the filtering efficiency of emotional face distractors. *Biological Psychology*, 138, 63–72.
- Young, A. W., & Burton, A. M. (2018). Are we face experts? *Trends in Cognitive Sciences*, 22(2), 100–110.
- Zhang, J., Ye, C., Sun, H. J., Zhou, J., Liang, T., Li, Y., & Liu, Q. (2022). The passive state: A protective mechanism for information in working memory tasks. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 48(9), 1235–1248.

The passive storage of negative facial expressions in working memory does not affect the active state storage

WANG Junbo^{1,2}, ZHAO Na², LI Ziyuan³, LIU Qiang¹

(¹ Institute of Brain and Psychological Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China)

(² Research Center of Brain and Cognitive Neuroscience, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

(³ School of Education, Anyang Normal University, Anyang 455000, China)

Abstract

Visual working memory (VWM) is a cognitive system responsible for the temporary storage and manipulation of visual information and serves as a cornerstone for high-level social cognition. State-based models propose that memory representations are hierarchically organized: items within the focus of attention are maintained in an active state, while those outside this focus are retained in a passive state. Previous research investigated the passive storage mechanisms predominantly employed simple color stimuli, demonstrating that passive memory storage operates independently from active memory processing. However, in daily-life context, facial information processing is critically important for human social interactions. It remains unclear whether variations in the emotional valence of faces retained in the passive state affect concurrent active memory processing.

To address this question, this study adopted a sequential presentation memory task involving 22 college students, who were instructed to memorize two sequentially presented arrays containing face stimuli. The first array (M1) was expected to enter the passive state during the active maintenance of the second array (M2). The emotional valence of face stimuli in M1 was either angry or neutral, whereas M2 always contained neutral faces. Behavioral performance and EEG neural activities were recorded, including late positive potential (LPP, indexing encoding attention), contralateral delay activity (CDA, reflecting active memory storage), and the whole-trial neural decoding of memory representations.

Behavioral results showed that the emotional valence modulation of M1 had no significant impact on performance related to M2. Consistently, neural indices suggested functional independence between active and passive storage states. Specifically: 1) during the encoding of M2, parieto-occipital LPP amplitudes did not differ as a function of M1's emotional valence, indicating that attentional resource allocation remained unaffected; 2) multivariate decoding of M2-related maintenance-phase activity yielded no distinguishable neural patterns between angry- and neutral-face in M1. Moreover, time-generalization analysis confirmed that passive representations lacked cross-phase generalizability.

These findings support the notion of resource independence between VWM active and passive states, indicating that emotional representations in the passive state do not influence ongoing memory processing. These results extend the domain-general characteristics of passive storage to complex socially relevant stimuli, and highlight the adaptive efficiency of VWM in processing sequentially presented facial information. Overall, the present study demonstrates that emotional information stored in the passive state does not interfere with concurrent active processing of facial stimuli.

Keywords visual working memory, emotional faces, state-based models, ERP decoding, LPP