



情绪影响工作记忆的神经振荡机制： 基于竞争与干扰的双路径模型*

唐玉婷^{1,2)} 李勇辉^{3,4)} 申寻兵^{1,2)**} 董昕文^{3)**}

(¹⁾ 江西中医药大学人文学院, 南昌 330004; (²⁾ 江西中医药大学, 江西省中医药管理局中医心理与脑科学重点实验室, 南昌 330004;

(³⁾ 中国科学院心理研究所认知科学与心理健康全国重点实验室, 北京 100101; (⁴⁾ 中国科学院大学心理学系, 北京 100049)

摘要 工作记忆是高级认知功能的核心, 依赖神经振荡 (如 θ 、 α 、 β 、 γ) 实现信息的短暂存储与操作。调控神经振荡以提升工作记忆表现的干预研究常因个体差异和效果不稳定受限, 情绪状态可能是关键调节变量。本文基于情绪与工作记忆共享的神经振荡基础, 系统梳理相关研究, 提出两种机制解释情绪对工作记忆的影响。认知效率假说认为, 高负荷时情绪与工作记忆竞争神经振荡资源致功率达上限, 低负荷下适度情绪刺激反可协同提升工作记忆表现。干扰假说提出, 负性情绪直接改变振荡特性 (如降低 α 功率/同步性、干扰 β/γ 相位协调), 扰乱工作记忆所需神经节律。本文整合现有证据, 构建情绪-认知交互的神经振荡理论框架, 强调未来研究需深入探究情绪状态、认知负荷、情绪唤醒度及调节策略对工作记忆及其神经调控效果的影响, 以优化个性化认知干预策略。

关键词 情绪, 工作记忆, 神经振荡, 资源竞争, 节律干扰

中图分类号 B842, B845

DOI: 10.3724/j.pibb.2025.0347

CSTR: 32369.14.pibb.20250347

工作记忆涉及信息的短暂存储、动态更新与灵活操作, 是推理、理解和决策等高级认知功能的基础^[1]。然而, 这个看似纯粹的认知系统并非独立运作, 其表现常常受到情绪状态的显著调节。例如, 压力或焦虑可损害精确回忆信息的能力, 而带有威胁或奖赏意义的视觉信息也可能被优先处理或更难忽略。这种情绪对工作记忆的普遍影响引出了一个核心的神经科学问题, 即情绪如何与工作记忆的加工过程发生交互, 并影响决策与行为表现。

情绪作为一种复杂的心理状态, 其核心构成维度主要包括唤醒度与效价。情绪维度理论指出, 效价和唤醒度是情绪体验的两个基本维度, 能够有效预测情绪状态^[2], 其强度可被视作效价与唤醒度两向量的矢量叠加^[3]。在基本情绪理论中, Ekman^[4]提出6种基本情绪 (高兴、愤怒、恐惧、惊奇、厌恶、悲伤) 可作为观察面部行为的情感类别判断依据, 梁飞等^[5]进一步精简模型, 将其归纳为喜悦、悲伤与恐惧 (或愤怒)。研究表明, 不

同基本情绪具有相异的神经结构基础, 并各自对应独特的神经回路^[6], 情绪刺激不仅会引起不同频段功率的波动^[7], 还会改变脑区间的神经同步性^[8]。

近年来, 神经振荡的节律性神经活动逐渐成为解析工作记忆神经机制的重要窗口, 其作用通过相位同步、跨频率耦合和功率波动等多种动态机制实现^[9-10]。由于情绪与工作记忆在神经振荡层面存在高度重叠, 二者均涉及 θ 、 α 等振荡的动态调节, 因此无论是弥散性的情绪还是急性应激, 都可能系统性地重塑工作记忆的神经振荡基础。重性抑郁患者情绪系统的持续异常首先使全脑 α 功率整体下

* 科技创新2030-“脑科学与类脑研究”重大项目 (2021ZD0202104), 教育部人文社会科学研究项目 (24YJA190013) 和大学生创新创业项目 (202510412267) 资助。

** 通讯联系人。

申寻兵 Tel: 0791-87119577, E-mail: 20060923@jxutcm.edu.cn

董昕文 Tel: 010-64850437, E-mail: dongxw@psych.ac.cn

收稿日期: 2025-07-22, 接受日期: 2025-12-31

降, 双侧枕叶 α 相对功率与个体的工作记忆容量保持显著正相关^[11], 这种全脑 α 功率下降直接削弱了枕叶维持视觉表征的能力, 从而对工作记忆容量产生负性影响。与此相反, 急性压力诱发后额叶各频段的功率谱密度均显著升高^[7], 从而扰乱空间工作记忆所需要的神经振荡, 影响记忆表现。

神经振荡为理解情绪如何干扰工作记忆提供了一个有价值的神经生理学视角, 从神经振荡的视角整合情绪与工作记忆的研究具有多重优势。首先, 目前关于情绪或工作记忆的神经振荡机制的研究, 大多是相互独立进行的, 限制了对二者交互作用机制的系统理解。整合视角有助于揭示情绪影响工作记忆表现的底层神经生理机制, 探讨情绪与认知过程如何竞争或共享相同频段的神经振荡资源, 以及这种相互作用如何导致干扰或协同效应, 从而影响认知表现的稳定性与可塑性。其次, 这种视角也有助于解释为何基于神经振荡的认知增强技术(如神经调控)效果常因个体状态差异而不同。情绪作为

影响个体状态的关键因素之一, 可能通过调节神经振荡的功率或相位同步性, 改变神经调控的效果。情绪影响工作记忆的神经振荡部分研究如表1所示。

本综述旨在系统梳理情绪影响工作记忆的神经振荡机制, 并提出一个双路径理论框架, 探讨情绪可能通过两种主要途径影响工作记忆: 一是通过与工作记忆竞争共享的神经振荡资源, 影响认知效率(认知效率假说); 二是通过直接干扰工作记忆所需的关键神经节律活动, 破坏信息处理过程(干扰假说)。认知效率假说聚焦“振荡资源竞争”, 强调情绪与任务对同一振荡(如 θ 、 α) 神经资源的叠加消耗, 导致调节能力饱和(如 θ 功率达生理上限), 进而降低信息加工效率; 干扰假说立足“节律动态冲突”, 认为情绪通过改变振荡特性(如 α 抑制失谐、 β/γ 相位异步)与任务相关神经振荡冲突。这一探索不仅有助于深化对情绪-认知交互机制的理解, 也为工作记忆神经调控方法提供了新思路。

Table1 Summary of research on the neural oscillations of emotions affecting working memory

表1 情绪影响工作记忆的神经振荡研究汇总

作者	被试	类型	情绪材料/ 筛选量表	研究范式	行为结果	神经振荡相关结果	假说支持
Wei等 ^[12]	健康 成年人	言语	考试焦虑 量表	Sternberg任务	工作记忆受负荷显著影响, 高负荷的RT高于中负荷, 中等的慢于低负荷; 低负荷的准确率显著高于中负荷, 但考试焦虑对其无显著作用	中等负荷下, 高考试焦虑个体的PO8和PO7区域的 θ 功率显著低于低考试焦虑的个体; 低考试焦虑个体的 θ 功率随认知负荷升高而增强, 到高负荷后趋于平稳; 高考试焦虑个体无法根据任务需求调节 θ 振荡功率	低焦虑个体支持干扰假说, 高焦虑个体支持认知效率假说
Marshall等 ^[13]	老年人	言语	压力感知 量表	n-back/ Sternberg任务	在Sternberg任务中, 压力分数较高时, 参与者的准确性显著下降; 在n-back任务中, 压力也与准确性降低相关, 高压力水平下, 老年组的准确性显著低于年轻组	在高压力个体中, 年轻人相对于老年人, 在左中央和右后区表现出更显著的 α 振荡同步增强; 在2-back任务条件下, 高压力老年人的 γ 振荡同步水平低于年轻人; 同时, 高压力老年人在对照条件下的 γ 振荡同步高于任务条件	干扰假说

续表1							
作者	被试	类型	情绪材料/ 筛选量表	研究范式	行为结果	神经振荡相关结果	假说支持
Gärtner等 ^[14]	健康成年男性	言语	电影片段	n-back任务	负荷和情绪条件存在交互效应, 压力状态下3-back条件的表现下降, 在3-back条件下, 压力相关的 θ 功率下降与压力相关的表现下降呈中度相关	0-back条件下 θ 功率低于2-back条件, 3-back条件下 θ 功率低于2-back条件。情绪状态调控晚期成分, 在晚期时间窗口内, 情绪诱导的均是 θ 功率下降, 但仅2-back和3-back条件下压力显著降低 θ 功率	在中低负荷阶段(0-back~2-back)支持干扰假说, 而在高负荷阶段(3-back)转向支持认知效率假说
Ahn等 ^[15]	惊恐障碍患者和健康人	听觉	汉密尔顿抑郁量表(HAMD)、状态特质焦虑量表(STAI)和感知压力量表(PSS)	心算任务	惊恐障碍患者任务表现分数明显低于健康人群, θ 功率与任务评分呈正相关。HAMA分数与相对 θ 功率呈独立负相关与HAMD评分呈独立正相关	与健康人群相比, 惊恐障碍患者除FC1、C1、CP1、CP2和Cz外所有电极的静息状态相对 θ 功率更大; 记忆任务相关的额叶中线 θ 功率在PD患者中显著降低。在静息状态下, 惊恐障碍患者表现出额叶和枕叶 θ - γ 耦合显著降低。在工作记忆任务期间, 惊恐障碍患者的 θ - γ 耦合显著低于健康组, 差异存在于额叶、颞叶、中央区、顶叶及枕叶区域	干扰假说
Shi等 ^[16]	健康成年人	言语	考试焦虑量表	改编的reading span任务	高考试焦虑和低考试焦虑参与者的情绪工作记忆容量上存在显著差异, 高考试焦虑组在测试情境下的记忆表现更差	高考试焦虑个体测试情境下工作记忆任务中表现较差, 其额叶中线 θ 功率也显著低于低焦虑个体; 而在中性任务中, 两组之间的 θ 功率差异不明显	干扰假说
Louis等 ^[17]	健康成年人	言语	Penn State Worry量表	n-back任务	当雌激素水平较低时, 状态性担忧的升高与任务准确率下降之间的负面关联最强	在2-back任务中, 前额叶 θ - γ 耦合随担忧评分的升高而降低, 仅见于高基线忧虑者, 低基线忧虑者则呈相反趋势	低基线者支持了认知效率假说, 高基线者支持干扰假说
Cohen等 ^[18]	健康成年人	言语	心境状态量表(poms)	n-back任务	接触莫扎特奏鸣曲K.448显著改善了工作记忆的表现, 同时也在一定程度上改善了特定的情绪状态	实验组聆听音乐后, 紧张和抑郁程度降低, 工作记忆表现改善。在静息、编码及保持阶段, 实验组左前额叶的 β 功率均显著低于对照组; 而在工作记忆编码阶段, 实验组额叶 α 功率显著高于对照组	β 振荡支持认知效率假说; α 振荡支持干扰假说
Figueira等 ^[19]	健康成年人	视觉	国际情感图片系统(IAPS)	变化探测任务	高认知负荷条件下, 参与者的反应速度显著变慢、反应错误率增加	负性情绪显著削弱了工作记忆编码阶段前额叶-枕叶 α 振荡的相位同步性	干扰假说

续表1

作者	被试	类型	情绪材料/ 筛选量表	研究范式	行为结果	神经振荡相关结果	假说支持
Zhang等 ^[20]	健康 成年人	视觉	情绪视频	变化探测任务	在记忆负荷大小为4时，负面情绪的WM容量显著高于积极情绪和中性情绪，但积极情绪和中性情绪之间没有显著差异	在所有情绪条件下，随着记忆负荷的增加，后部区域的 α 和 β 振荡的ERD在0.6~0.8 s附近显著增强。在中高负荷条件下，3种情绪条件下的 α 和下 β ERD反应存在显著差异，其中最弱的是维持阶段后脑区域的负面情绪	干扰假说
Tang等 ^[21]	健康人与 重度抑郁 患者 (MDD)	数字	HAMD 量表 和 汉密 尔 顿 焦 虑 量 表 (HAMA)	n-back	在MDD组中，与对照组(C6、T8、CP1、CP4、P2、P3和P4电极)相比，电极的平均 θ 振荡功率与2-back任务的准确性之间存在显著的正相关关系	MDD患者的额叶中线 θ 振荡功率低于健康组的趋势；健康对照组在执行高负荷工作记忆任务(2-back)时，表现出额叶 θ 功率增强及顶枕叶 α 功率降低，而MDD组则缺乏根据任务需求调节功率的能力	干扰假说
Li等 ^[22]	健康 成年人	视觉	国际情感 图片系统 (IAPS)	n-back	工作记忆负载对行为表现存在显著影响，情绪的主效应不显著，交互效应不显著；在负性情绪任务中，焦虑评分越高的个体，其在不同负荷下的反应时差异越小	高负荷诱发显著的 α 振荡功率下降；抑郁特异性得分越高，在检索阶段的 α 振荡功率值越低；焦虑特异性得分越高，在编码阶段的 θ 波段功率值越高	认知效率假说

RT: 反应时 (reaction time); WM: 工作记忆 (working memory); PD: 惊恐障碍 (panic disorder); MDD: 重度抑郁障碍 (major depressive disorder); ERD: 事件相关去同步化 (event-related desynchronization); PO7/PO8: 国际10–20系统中位于顶-枕区的脑电电极位置 (electrode sites at the parieto-occipital region according to the international 10–20 system)。

1 认知效率假说：神经振荡资源竞争模型

在工作记忆任务中，大脑会通过动态调节多频段神经振荡，来灵活应对不同程度的认知负荷。近年来的研究发现，情绪与工作记忆在相同频段会诱发相似的神经振荡变化，造成对共享资源的需求叠加，可能导致系统接近其生理极限或调节能力饱和，从而降低信息处理的效率和灵活性。这种资源竞争可能表现为特定频段振荡功率达到上限、调节范围变窄或网络协调能力下降。此外，资源共享机制在某些特定条件下也可能产生促进作用（图1）。例如，在低认知负荷下，某种情绪状态可引发的适度神经激活或注意力增强，如果与任务所需的振荡模式协同，能暂时提升表现^[20]。然而，更常见的情况是，在中高负荷或负性情绪背景下，资源竞争更容易导致认知效率下降。

1.1 α 振荡的资源分流：抑制需求的竞争

情绪加工与工作记忆负荷的增加均引发 α 功率下降。 α 振荡功率的降低标志着皮层兴奋性的提升^[23]，是注意力分配与信息抑制的关键机制。额-顶网络通过自上而下的 α 抑制，降低任务无关区域的 α 功率，从而提高其兴奋性，促进视觉加工，同时维持对干扰信息的高 α 抑制，以防止信息过载并维持加工效率^[24]。在工作记忆任务中， α 功率会随负荷动态调节。高负荷条件下，右枕叶 α 功率显著下降^[12]，表明系统通过强化视觉选择性，集中有限注意资源于关键刺激，减少无关输入。情绪刺激则通过自下而上的途径影响这一调节机制。杏仁核对显著性或威胁性刺激的快速反应会诱发 α 抑制，从而自动捕获注意力，使情绪性信息获得优先加工^[25]。研究表明，消极情绪比中性或积极情绪更易引发广泛的 α 功率下降，主要分布于顶叶、枕

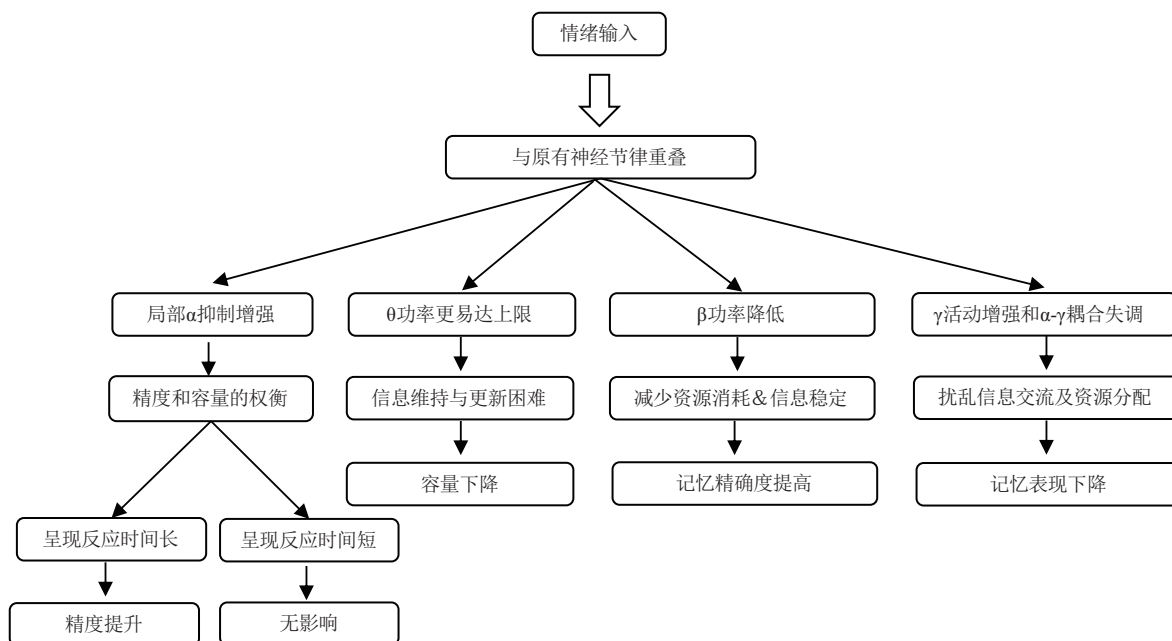


Fig. 1 The cognitive efficiency hypothesis

图1 认知效率假说

叶^[26-27]及额叶区域^[28]。

负性情绪可能通过增强局部抑制提高工作记忆精度^[29],也可能因跨区域协同受损而降低整体执行效率。在资源有限的情况下,大脑会通过增强任务特异性 α 抑制,将加工资源优先分配给最具任务价值的信息,从而提升记忆的精度。研究发现,当刺激呈现时间短时,负性情绪与中性情绪在记忆数量与精度上的差异不显著,但在呈现时间长时,负性情绪条件下的视觉工作记忆精度显著高于中性条件,而数量显著减少^[30]。这一结果说明,更长的刺激呈现时间为大脑建立并维持更强的 α 抑制状态提供了必要条件,这种持续的抑制性增强了对任务相关信息的表征能力,在资源有限的情况下,通过削弱对次要项目的神经资源分配,提升了工作记忆的编码精度。

1.2 θ 与 β 振荡过载: 控制与维持资源的竞争

情绪诱发的 θ 与 β 功率上升与任务负荷增加的模式重叠,可能导致过载,在高负荷下 θ/β 饱和限制调节,而低负荷下协同支持信息维持。 θ 振荡在工作记忆的认知负荷调控中发挥着核心功能^[31],随着任务负荷增加,个体前额叶皮层的 θ 功率显著增强^[32],当任务需求超出个体认知容量时,额叶和顶叶区域的 θ 功率趋于饱和^[33]。与中性刺激相比,情绪刺激同样能够引发顶叶 θ 振荡的显著增

强^[34],这种增强在加工的早期阶段更为突出^[35]。当情绪刺激与工作记忆任务同时出现时, θ 振荡作为两者共同依赖的神经机制,会承受双重调控压力而更易饱和。情绪刺激在早期阶段迅速消耗 θ 资源,而工作记忆任务则持续需要 θ 活动以支持信息维持与监控,两者叠加引发资源分配冲突。焦虑特质较高的个体对情绪刺激反应更强,其前额叶在编码阶段的 θ 功率显著上升^[22],导致 θ 资源提前耗尽。当后续认知需求增加时, θ 调控迅速触顶,前额叶的动态调节受限,表现为工作记忆容量与维持时间下降,使个体在高负荷下更快达到认知极限。有研究发现,高焦虑个体的 θ 活动并不随任务负荷变化而调整^[12],这可能源于他们一开始就因焦虑引发的负性情绪状态而处于认知资源极限。以上结果的差异可能源于实验基线难度的不一致。在基线难度较低的设计中,高焦虑个体保有 θ 资源余地,初期情绪刺激可诱发显著的 θ 功率上升,随后认知负荷叠加才导致资源耗竭与饱和;而在基线难度较高的范式下,焦虑相关的负性情绪已提前占用大量 θ 资源,使个体从实验起始即接近调控上限, θ 活动因缺乏弹性空间而不随负荷变化。这种基线差异直接决定了 θ 振荡是呈现动态耗竭还是初始饱和模式,提示未来研究需统一基线负荷水平以提高结果可比性。

情绪状态引发的 β 振荡活动与工作记忆维持依赖的 β 振荡调节在频率上趋于一致,进而产生协同或竞争效应。 β 振荡的强度与记忆负荷^[36]、准确性及记忆容量密切相关^[37]。在编码阶段,背外侧前额叶皮层和顶叶 β 振荡降低,以此促进信息编码与注意力调控^[38];在维持阶段,这种降低持续存在,支持信息稳定存储;而在提取检索阶段初期,左背外侧前额叶等区域 β 振荡迅速降低^[39]。高唤醒情绪同样伴随 β 振荡功率的下降^[40],这提示情绪可能通过调节 β 振荡来影响工作记忆的神经效率。研究表明,聆听音乐可通过缓解紧张与焦虑,降低左侧前额叶的 β 振荡功率,进而提升个体在工作记忆任务中的行为表现^[18]。该证据直接表明,焦虑感及紧张感缓解对 β 振荡调节,能够使大脑活动模式更接近工作记忆维持阶段的低 β 状态,减少不必要的神经资源消耗,提升信息保持的稳定性与提取的精准性。

1.3 γ 振荡耦合失衡:情绪干扰下的信息整合障碍

情绪所诱发的 γ 振荡与 α - γ 耦合变化,在模式上与工作记忆的需求发生重叠,这种资源冲突影响了信息处理的神经基础,导致其交流与稳定性受损。研究发现,顶叶 γ 活动会随记忆负荷增加而增强^[41],额顶叶间通过 γ 振荡实现信息传递^[42], α - γ 耦合的增强则反映了大脑抑制外界干扰、维持加工稳定性的能力^[43]。在愤怒、恐惧或厌恶等负性情绪状态下,大脑额叶与颞叶区域会出现显著的 γ 振荡增强^[44];当个体处于急性社会压力情境时,额叶和顶叶的 γ 基线功率亦同步升高^[45],抑郁症患者枕叶区域也出现 γ 基线功率增强^[46]。此外,主动调节负性情绪涉及跨频段耦合机制,即内侧前额叶、枕叶及颞顶叶网络中 α 相位与 γ 振幅之间的协同调节^[47]。

神经振荡模式高度相似从两方面影响工作记忆的信息交流和稳定性:一方面,情绪引发的局部 γ 过度激活可能扰乱原有的额顶 γ 同步,从而削弱了关键脑区之间的信息整合能力;另一方面,大脑为抑制情绪相关干扰而增加的调节负荷,可能改变 α 振荡的节律,从而影响其对 γ 振幅的精细控制,导致 α - γ 耦合结构性失衡。虽然 α - γ 耦合的增强通常有助于信息处理的稳定性,但在情绪干扰背景下,这种耦合可能转向对情绪刺激的优先编码,加剧注意资源对非任务相关信息的分配,削弱对目标信息的稳定维持,导致工作记忆中的信息交流效率下降、加工过程不稳定。低基线的忧虑者在2-back前

额叶 θ - γ 耦合随担忧评分的升高而降低,且担忧评分升高与任务准确率下降之间存在负相关^[17],进一步说明情绪诱发的振荡模式与工作记忆所需节律的相似性,在负性情绪条件下可能引发神经资源竞争,导致认知加工效能下降。

2 干扰假说:情绪对神经节律的直接干扰

干扰假说认为,情绪(尤其是负性情绪)通过改变特定振荡的神经振荡活动,直接干扰工作记忆任务所需的神经节律协调性,导致任务表现下降。其核心逻辑是:情绪与任务需求在神经振荡的功率、相位或同步性上发生冲突,破坏神经振荡网络的动态平衡(图2)。

2.1 α 与 θ 功率减弱:干扰屏蔽与认知控制的受损

负性情绪通常会降低 α 振荡的功率与同步性,这一变化与工作记忆维持阶段所需的 α 增强模式相反,削弱了干扰屏蔽能力。在工作记忆维持阶段, α 振荡的增强对于抑制无关信息、维持信息稳定性至关重要。当干扰强度上升或预期干扰物增多时,顶枕叶 α 振幅显著升高^[48],尤其在维持阶段晚期,较高的 α 振幅与抑制干扰的效果密切相关^[49]。然而,负性情绪显著扰乱 α 振荡活动。例如,观看负性情绪图片会降低顶叶与枕叶的 α 功率^[50],额叶 α 的基线功率在压力下同样出现下降^[45],共同削弱了自上而下的注意控制与抑制调节。这些改变使工作记忆在维持阶段对干扰更为敏感,导致信息加工受损。情绪不仅通过局部 α 抑制的增强消耗资源,还可能破坏额叶对视觉皮层的调控通路,降低编码效率。相较中性情绪,负性情绪显著削弱了工作记忆编码阶段前额叶-枕叶间的相位同步性^[19],进一步损害视觉信息的稳定保持。 α 相位同步的增强被视为细胞组装体协同再激活以维持工作记忆表征的神经标志^[48]。在工作记忆的保持阶段, α 振荡在双侧视觉皮层、顶叶和前额叶间的同步性逐渐增强^[51],高负荷条件下额叶-枕叶 α 同步性进一步提升^[19],反映了前额叶对视觉区域的自上而下抑制作用与资源优化分配。然而,负性情绪通过削弱 α 功率、局部抑制功能及跨脑区同步性,扰乱了信息加工的协调性与稳定性,最终导致任务表现下降。特别是高唤醒情绪会降低中央前回与上顶叶区域的 α 同步性^[40],削弱脑区间的信息整合;负性情绪还显著削弱前额叶-枕叶间的 α 同步性^[19],进一步损害工作记忆表现。

负性情绪诱发的 θ 振荡功率下降与工作记忆任

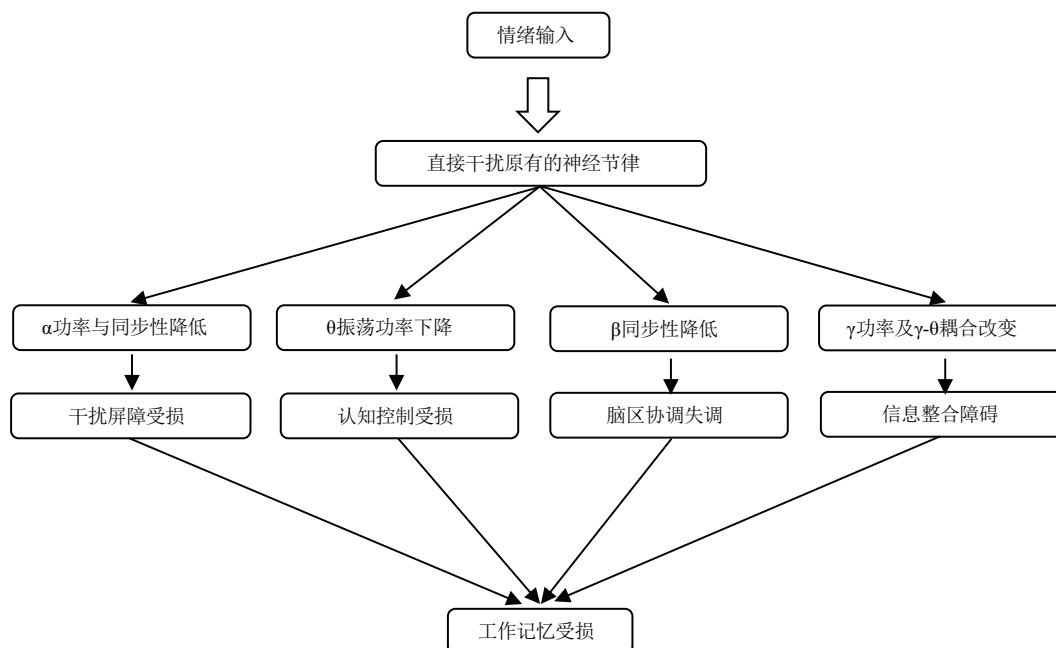


Fig. 2 The interference hypothesis

图2 干扰假说

务所需的 θ 增强模式相反,从而干扰信息的维持、操作与多项目整合,导致记忆容量和精度下降。在工作记忆任务中,海马 θ 振荡功率的增强通常与任务表现的提升密切相关^[9]。然而,情绪性视频(尤其是高唤醒的负性刺激)会引起 θ 功率下降^[52],削弱脑区间同步性,影响信息维持与更新。 θ 节律被视为认知控制的“闸门”,在多项信息的组织与整合中起关键作用。负性情绪通过扰乱这一闸门机制,使 θ 功率出现波动或下降,进而降低记忆系统的容量与精度。Shi等^[16]的研究进一步印证了这一点:高考试焦虑个体在测试情境下的工作记忆表现显著较差,其额叶中线 θ 活动低于低焦虑个体,而在中性情境下,两组的 θ 活动差异并不显著。

2.2 β 与 γ 节律相位失调:脑区间协调的执行障碍

负性或高唤醒情绪会显著干扰工作记忆任务中的 β 振荡功率与同步性,导致脑区间协调受损、信息稳定性下降,进而削弱任务表现。在工作记忆过程中, β 振荡的功率与相位同步性对信息维持、更新及运动准备至关重要。随着记忆负荷增加,前额叶与顶叶的 β 功率通常下降^[36],以维持较高的皮层兴奋性,支持记忆项目的有效维护和操纵^[53]。研究进一步表明, β 同步性是维持信息稳定性的关键机制:在灵长类动物的延迟匹配任务中,正确试

次的左上颞区 β 同步性显著高于错误试次^[54];前额叶、顶叶与视觉皮层之间的 β 同步性被认为有助于信息在脑区间的高效传递与整合^[55]。然而,负性或高唤醒情绪可能对工作记忆的精细的神经振荡调节产生干扰。一方面,情绪可能诱发额叶、中央区及顶叶区域的 β 功率增强^[55-56],高唤醒刺激亦会导致额叶 β 功率升高^[57]。这种增强可能反映了情绪状态下相关神经环路(例如杏仁核-前额叶通路)的过度激活,进而可能干扰工作记忆所需的抑制机制,使信息维持过程变得不稳定。另一方面,高唤醒情绪还可能降低关键脑区间的 β 同步性,例如中央前回与上顶叶之间的同步性下降^[40],削弱前额叶与顶叶在信息编码与维持中的协同作用。同步性下降不仅会降低信息加工的稳定性的,还可能在复杂任务中导致反应延迟与错误率上升。此外,情绪加工过程中边缘系统的过度激活,会与前额叶在资源上形成竞争,进一步限制执行功能的发挥,对工作记忆表现产生不利影响。

情绪会直接改变 γ 振荡功率及 θ - γ 耦合模式,这种变化与工作记忆任务所需的增强方向相反,从而引发神经活动失衡与信息整合障碍。通常情况下,顶叶 γ 活动会随着记忆负荷的增加而增强^[41],而 θ - γ 耦合不仅能有效预测个体的工作记忆容量差异^[58-59],还参与信息的编码与存储,其强度也会

随负荷上升而增强^[60]。然而,情绪状态可以直接影响 γ 振荡功率以及 θ 振荡的耦合。例如,低唤醒的积极情绪(如愉悦)会导致 γ 功率下降^[61],主要分布于额叶与颞叶区域^[62],而携带愤怒表情的面孔刺激则会诱发顶叶、颞顶联合区及前运动辅助皮层的 γ 瞬时增强^[63],这种突发性增强可能破坏 γ 与其他频段的相位耦合,而 θ - γ 耦合正是信息整合与序列化的关键机制^[64]。实证研究进一步证实了这一干扰效应:在2-back任务中,高压老年组在对照条件下的 γ 同步性高于任务条件,且其任务准确率显著低于年轻组^[13];在工作记忆任务中,惊恐障碍患者的 θ - γ 耦合显著弱于健康组,同时表现得分也明显更低^[15]。这些结果表明,情绪诱发的 γ 活动失衡与跨频耦合受损,会破坏工作记忆表征的精确性与稳定性,导致信息整合受阻及记忆内容混淆。

3 双路径的整合

认知效率假说与干扰假说作为情绪影响工作记忆的双路径模型,并非彼此对立的解释框架,而是反映了情绪-认知交互中一种动态互补的调控机制。大脑会依据当前任务负荷、情绪强度及个体状态,灵活选择干扰或效率路径以维持整体功能稳定,其核心机制在于大脑神经振荡资源的有限性与适应性分配。

在负荷维度上,这种动态关系表现为从干扰路径到效率路径的渐进转化。当任务负荷较低或中等时,干扰假说占主导。此时神经资源相对充裕,情绪诱发的 θ 功率下降会直接对抗任务所需的 θ 增强模式,形成节律性干扰,破坏信息维持与整合。然而,当负荷上升至高水平(如3-back任务)时,系统接近容量极限, θ 振荡活动趋于饱和,难以再随负荷变化而动态调节^[14]。此时大脑转向认知效率路径:情绪与任务加工被迫共享有限资源,节律性冲突逐渐让位于资源竞争,表现出由干扰向效率的机制性过渡。

在个体差异维度上,焦虑与忧虑的不同神经功能特征以及个体的容量进一步影响双路径的相对权重。低焦虑个体在情绪激活时,仍保有前额叶-边缘系统间的调节余地,因此情绪效应多表现为短暂的节律干扰;而高焦虑个体因基线唤醒水平较高、资源长期占用,前额叶调节能力受限,情绪与任务加工均使得 θ 功率增加,支持认知效率路径。相应地,忧虑对神经振荡的影响并非线性,而呈“倒U

型”变化趋势:当个体处于较低忧虑水平时,轻度的忧虑能提升认知警觉性,促使 θ - γ 耦合增强,从而有助于任务信息的整合与保持;但当忧虑水平过高时,个体的大脑资源被持续占用,前额叶调控能力下降,导致 θ - γ 耦合减弱与加工效率下降^[17],表现为干扰效应。工作记忆容量较低的个体,其基础神经资源有限,在面对情绪刺激时往往需要显著增强大脑的协调活动以对抗干扰,因此更容易触及振荡功率的生理上限^[65]。高记忆容量的个体由于拥有更强的额顶网络连接与更高效的 α 振荡抑制,可在情绪情境下维持相对稳定的 θ - γ 耦合强度与 α 抑制水平,无需显著增加资源消耗即可实现对分心信息的过滤^[66]。

综上,认知效率假说与干扰假说共同构成情绪-工作记忆交互的双路径框架。两者并非相互排斥,而是在不同任务需求与个体状态下交替主导,共同揭示了情绪在有限神经资源约束下对认知加工的灵活调控机制。这一框架不仅解释了实验结果的情境特异性,也为理解日常认知表现中的情绪波动提供了神经生理学基础。

4 总结及展望

本文系统回顾了情绪对工作记忆影响的神经振荡机制。工作记忆的有效执行依赖于 δ 、 θ 、 α 、 β 、 γ 等多个频段神经振荡及其跨频耦合的复杂、动态协调。情绪状态同样伴随着这些神经振荡模式的显著改变。为了解释情绪如何干扰工作记忆,本文提出了一个双路径理论框架:认知效率假说和干扰假说。认知效率假说认为,情绪和工作记忆任务都需要相似的神经振荡,当这两类任务同时进行,它们会竞争共同的神经振荡资源,从而导致任务表现受到影响。干扰假说则指出,情绪引发的神经振荡变化模式与任务所需模式相反,直接干扰任务表现。

当前研究主要聚焦于负性情绪效价对工作记忆的影响,而对情绪唤醒度以及正性情绪的探讨相对较少。鉴于情绪效价与唤醒度在影响工作记忆时可能存在复杂的交互效应,未来的研究需要更系统地考察这两个维度的共同作用。另外,在高认知负荷情境下,个体的认知资源趋于饱和,使得工作记忆系统更容易受到情绪信息的干扰,或因情绪刺激竞争有限的认知资源而导致表现下降。未来研究可从以下两方面拓展:一是系统分析不同认知负荷水平对工作记忆加工机制的影响;二是深入探究不同效

价情绪唤醒度在认知任务中的作用, 结合脑电 (electroencephalography, EEG) 或功能磁共振成像 (functional magnetic resonance imaging, fMRI) 等神经成像技术, 考察唤醒度对 θ 、 α 等关键神经振荡频段的调节效应, 从而更明确地揭示情绪影响工作记忆的神经基础。不同的情绪调节策略, 如认知重评与分心, 对工作记忆的影响机制仍有待阐明。已有研究表明, 这两种策略与工作记忆存在交互^[67-68], 但它们如何差异化地调制 α 、 θ 等关键神经振荡频段, 并通过这些神经活动的变化进一步影响工作记忆的执行表现, 尚需系统性探究。认知重评通过改变对情绪刺激的理解可能减少其干扰强度或竞争优势, 而分心则通过重定向注意力资源可能降低情绪刺激与认知任务的竞争。未来可通过实验设计, 结合神经成像技术, 深入探讨这些情绪调节策略的神经振荡机制及其对认知任务的潜在影响。

现有研究范式, 如情绪相关 n-back (emotion-back task/emotional n-back task) 任务, 通常要求被试记忆包含情绪成分的刺激 (如情绪面孔或词汇), 以此考察情绪内容对工作记忆的即时影响^[27, 69]。此类研究主要揭示了情绪信息作为记忆内容时对工作记忆的直接干扰或资源竞争。然而, 对于情绪状态 (而非情绪性刺激本身) 如何作为一种背景因素影响工作记忆认知机制的探讨仍显不足。例如, 持续的背景情绪 (如悲伤的背景音乐或环境中的争吵声) 可能通过持续干扰或改变资源分配的基线状态, 影响对中性信息的工作记忆加工。因此, 未来研究应优化实验范式, 更加聚焦于整体情绪状态的作用, 并结合多模态神经成像技术, 深入揭示情绪对工作记忆的动态影响机制, 为构建情绪与工作记忆交互作用的综合理论模型提供实证支持。

神经调控技术, 如经颅交流电刺激 (transcranial alternating current stimulation, tACS) 和时间干涉刺激 (temporal interference stimulation, TI), 在改善工作记忆方面已展现出应用潜力^[70-72]。研究表明, 相较于统一固定频率的调控, 基于个体脑电振荡特征的个性化调控方案更为高效, 这凸显了神经调控效果与个体神经振荡基线特征的紧密关联^[71, 73]。鉴于情绪能够显著改变大脑的神经振荡模式 (如调节其功率和同步性), 情绪状态本身可能成为影响神经调控效果的一个关键变量, 例如, 负性情绪引起的异常振荡模式可能干扰神经调控的预期效果, 或使得工作记忆相关脑区在与情绪相关

脑区的资源竞争中处于不利地位。因此, 未来研究应深入探讨情绪状态对工作记忆神经调控效应的影响机制。基于此, 发展整合情绪状态评估与个体神经振荡特征的个性化神经调控策略, 旨在减轻负性情绪对工作记忆的损害, 或模拟特定情绪状态对工作记忆的潜在增益效应, 有望更有效地应用于认知功能的临床干预与提升。

参 考 文 献

- [1] Manrique H M, Read D W, Walker M J. On some statistical and cerebral aspects of the limits of working memory capacity in anthropoid Primates, with particular reference to *Pan* and *Homo*, and their significance for human evolution. *Neurosci Biobehav Rev*, 2024, **158**: 105543
- [2] Jackson J C, Watts J, Henry T R, *et al*. Emotion semantics show both cultural variation and universal structure. *Science*, 2019, **366**(6472): 1517-1522
- [3] 邹迪, 李红, 王福顺. 唤醒定义探析及其认知神经生理基础. *心理科学进展*, 2022, **30**(9): 2020-2033
Zou D, Li H, Wang F S. *Adv Psychol Sci*, 2022, **30**(9): 2020-2033
- [4] Ekman P. What emotion categories or dimensions can observers judge from facial behavior//Ekman P. *Emotions in the Human Face*. Cambridge: Cambridge University Press, 1982: 39-55
- [5] 梁飞, 江瑶, 肖婷炜, 等. 基本情绪的神经基础: 来自 fMRI 与机器视觉技术研究的证据. *心理科学进展*, 2022, **30**(8): 1832-1843
Liang F, Jiang Y, Xiao T W, *et al*. *Adv Psychol Sci*, 2022, **30**(8): 1832-1843
- [6] Gu S, Wang F, Cao C, *et al*. An integrative way for studying neural basis of basic emotions with fMRI. *Front Neurosci*, 2019, **13**: 628
- [7] Torbaghan M E, Moghimi A, Kobrafi H R, *et al*. Effect of stress on spatial working memory and EEG signal dynamics in the follicular and luteal phases of the menstrual cycle in young single girls. *Brain Behav*, 2023, **13**(9): e3166
- [8] Zhang Y, Yan G, Chang W, *et al*. EEG-based multi-frequency band functional connectivity analysis and the application of spatio-temporal features in emotion recognition. *Biomed Signal Process Control*, 2023, **79**: 104157
- [9] Su M, Hu K, Liu W, *et al*. Theta oscillations support prefrontal-hippocampal interactions in sequential working memory. *Neurosci Bull*, 2024, **40**(2): 147-156
- [10] Abubaker M, Al Qasem W, Pilátová K, *et al*. Theta-gamma-coupling as predictor of working memory performance in young and elderly healthy people. *Mol Brain*, 2024, **17**(1): 74
- [11] Xie X M, Sha S, Cai H, *et al*. Resting-state alpha activity in the frontal and occipital lobes and assessment of cognitive impairment in depression patients. *Psychol Res Behav Manag*, 2024, **17**: 2995-3003
- [12] Wei H, Sun J, Long F. Test anxiety shapes theta band activity linked to elevated working memory load during the encoding

- phase. *Biol Psychol*, 2025, **198**: 109047
- [13] Marshall A C, Cooper N R, Segrave R, *et al.* The effects of long-term stress exposure on aging cognition: a behavioral and EEG investigation. *Neurobiol Aging*, 2015, **36**(6): 2136-2144
- [14] Gärtner M, Rohde-Liebenau L, Grimm S, *et al.* Working memory-related frontal theta activity is decreased under acute stress. *Psychoneuroendocrinology*, 2014, **43**: 105-113
- [15] Ahn J S, Hong H J, Lee J H, *et al.* Theta power reduction and theta-gamma coupling desynchronization are associated with working memory interference and anxiety symptoms in panic disorder: a retrospective study. *BMC Psychiatry*, 2024, **24**(1): 875
- [16] Shi Z, Gao X, Zhou R. Frontal theta activity during working memory in test anxiety. *Neuroreport*, 2015, **26**(4): 228-232
- [17] Louis C C. *Worry and Working Memory Function: Investigating Interactive Effects of Worry, Basal Dopamine, and Estradiol on Theta-Gamma Coupling in a Female Sample*[D]. East Lansing City: Michigan State University, 2024
- [18] Cohen S, Tsur E E, Meiron O. Passively listening to Mozart's sonata K. 448 enhances verbal working memory performance: a quantitative EEG study. *Curr Psychol*, 2025, **44**(10): 9342-9357
- [19] Figueira J S B, de Paula Antunes David I, Lobo I, *et al.* Effects of load and emotional state on EEG alpha-band power and inter-site synchrony during a visual working memory task. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 2020, **20**(5): 1122-1132
- [20] Zhang Y, Liu B, Gao X. Investigation of the interaction between emotion and working memory load using spatiotemporal pattern similarity analysis. *J Neural Eng*, 2021, **18**(6): 066011
- [21] Tang H, Wang X, Lu Q, *et al.* Major depressive disorder is characterized by differential theta and alpha patterns during working memory updating. *BMC Psychiatry*, 2025, **25**(1): 923
- [22] Li L, Sun M, Qi M, *et al.* Neural correlates of emotional working memory predict depression and anxiety. *Front Neurosci*, 2025, **19**: 1574901
- [23] Lange J, Oostenveld R, Fries P. Reduced occipital alpha power indexes enhanced excitability rather than improved visual perception. *J Neurosci*, 2013, **33**(7): 3212-3220
- [24] Wianda E, Ross B. The roles of alpha oscillation in working memory retention. *Brain Behav*, 2019, **9**(4): e01263
- [25] Arana L, Melcón M, Kessel D, *et al.* Suppression of alpha-band power underlies exogenous attention to emotional distractors. *Psychophysiology*, 2022, **59**(9): e14051
- [26] Aftanas L I, Varlamov A A, Pavlov S V, *et al.* Affective picture processing: event-related synchronization within individually defined human theta band is modulated by valence dimension. *Neurosci Lett*, 2001, **303**(2): 115-118
- [27] Grissmann S, Faller J, Scharinger C, *et al.* Electroencephalography based analysis of working memory load and affective valence in an N-back task with emotional stimuli. *Front Hum Neurosci*, 2017, **11**: 616
- [28] Poole B D, Gable P A. Affective motivational direction drives asymmetric frontal hemisphere activation. *Exp Brain Res*, 2014, **232**(7): 2121-2130
- [29] Xie W, Ye C, Zhang W. Negative emotion reduces visual working memory recall variability: a meta-analytical review. *Emotion*, 2023, **23**(3): 859-871
- [30] Long F, Ye C, Li Z, *et al.* Negative emotional state modulates visual working memory in the late consolidation phase. *Cogn Emot*, 2020, **34**(8): 1646-1663
- [31] Pavlov Y G, Kotchoubey B. Oscillatory brain activity and maintenance of verbal and visual working memory: a systematic review. *Psychophysiology*, 2022, **59**(5): e13735
- [32] Pergher V, Wittevrongel B, Tournoy J, *et al.* Mental workload of young and older adults gauged with ERPs and spectral power during N-Back task performance. *Biol Psychol*, 2019, **146**: 107726
- [33] Moran R J, Campo P, Maestu F, *et al.* Peak frequency in the theta and alpha bands correlates with human working memory capacity. *Front Hum Neurosci*, 2010, **4**: 200
- [34] Gao C, Uchitomi H, Miyake Y. Influence of multimodal emotional stimulations on brain activity: an electroencephalographic study. *Sensors (Basel)*, 2023, **23**(10): 4801
- [35] Sulpizio S, Grecucci A, Job R. Tune in to the right frequency: theta changes when distancing from emotions elicited by unpleasant images and words. *Eur J Neurosci*, 2021, **53**(3): 916-928
- [36] Wang Y, Feng Y, Pan Q, *et al.* Fronto-parietal activity changes associated with changes in working memory load: evidence from simultaneous electroencephalography and functional near-infrared spectroscopy analysis. *Eur J Neurosci*, 2024, **60**(6): 5413-5427
- [37] Liang W K, Tseng P, Yeh J R, *et al.* Frontoparietal beta amplitude modulation and its interareal cross-frequency coupling in visual working memory. *Neuroscience*, 2021, **460**: 69-87
- [38] Proskovec A L, Wiesman A I, Heinrichs-Graham E, *et al.* Beta oscillatory dynamics in the prefrontal and superior temporal cortices predict spatial working memory performance. *Sci Rep*, 2018, **8**(1): 8488
- [39] Heinrichs-Graham E, Wilson T W. Spatiotemporal oscillatory dynamics during the encoding and maintenance phases of a visual working memory task. *Cortex*, 2015, **69**: 121-130
- [40] Kim H, Seo P, Choi J W, *et al.* Emotional arousal due to video stimuli reduces local and inter-regional synchronization of oscillatory cortical activities in alpha- and beta-bands. *PLoS One*, 2021, **16**(7): e0255032
- [41] Jokisch D, Jensen O. Modulation of gamma and alpha activity during a working memory task engaging the dorsal or ventral stream. *J Neurosci*, 2007, **27**(12): 3244-3251
- [42] Tseng P, Chang Y T, Chang C F, *et al.* The critical role of phase difference in gamma oscillation within the temporoparietal network for binding visual working memory. *Sci Rep*, 2016, **6**: 32138
- [43] Bonnefond M, Jensen O. The role of gamma and alpha oscillations for blocking out distraction. *Commun Integr Biol*, 2013, **6**(1): e22702
- [44] Choong W Y, Khairunizam W, Mustafa W A, *et al.* Correlation analysis of emotional EEG in alpha, beta and gamma frequency

- bands. *J Phys Conf Ser*, 2021, **1997**(1): 012029
- [45] Lin C T, King J T, Fan J W, *et al.* The influence of acute stress on brain dynamics during task switching activities. *IEEE Access*, 2017, **6**: 3249-3255
- [46] Zeng Y, Lao J, Wu Z, *et al.* Altered resting-state brain oscillation and the associated cognitive impairments in late-life depression with different depressive severity: an EEG power spectrum and functional connectivity study. *J Affect Disord*, 2024, **348**: 124-134
- [47] Popov T, Steffen A, Weisz N, *et al.* Cross-frequency dynamics of neuromagnetic oscillatory activity: two mechanisms of emotion regulation. *Psychophysiology*, 2012, **49**(12): 1545-1557
- [48] Bonnefond M, Jensen O. Alpha oscillations serve to protect working memory maintenance against anticipated distracters. *Curr Biol*, 2012, **22**(20): 1969-1974
- [49] Peylo C, Hilla Y, Sauseng P. Cause or consequence? Alpha oscillations in visuospatial attention. *Trends Neurosci*, 2021, **44**(9): 705-713
- [50] Roxburgh A D, White D J, Grillon C, *et al.* A neural oscillatory signature of sustained anxiety. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 2023, **23**(6): 1534-1544
- [51] Sattelberger J, Haque H, Juvonen J J, *et al.* Local and interareal alpha and low-beta band oscillation dynamics underlie the bilateral field advantage in visual working memory. *Cereb Cortex*, 2024, **34**(11): bhac448
- [52] Koelstra S, Muhl C, Soleymani M, *et al.* DEAP: a database for emotion analysis; using physiological signals. *IEEE Trans Affect Comput*, 2012, **3**(1): 18-31
- [53] Rodriguez-Larios J, Haegens S. Genuine beta bursts in human working memory: controlling for the influence of lower-frequency rhythms. *bioRxiv*, 2023: 2023.05.26.542448
- [54] Tallon-Baudry C, Mandon S, Freiwald W A, *et al.* Oscillatory synchrony in the monkey temporal lobe correlates with performance in a visual short-term memory task. *Cereb Cortex*, 2004, **14**(7): 713-720
- [55] Palva J M, Monto S, Kulashekhar S, *et al.* Neuronal synchrony reveals working memory networks and predicts individual memory capacity. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, **107**(16): 7580-7585
- [56] Yan B, Wang Y, Yang Y, *et al.* EEG evidence of acute stress enhancing inhibition control by increasing attention. *Brain Sci*, 2024, **14**(10): 1013
- [57] Mesa-Gresa P, Gil-Gómez J A, Lozano-Quilis J A, *et al.* Electrophysiological correlates of the emotional response on brain activity in adolescents. *Biomed Signal Process Control*, 2024, **89**: 105754
- [58] Papaioannou O, Clark K, Ogbuagu N N, *et al.* Theta-gamma phase-amplitude coupling in psychosis and healthy controls: predicting working memory capacity across different tasks. *NeuroImage Clin*, 2025, **48**: 103839
- [59] Guo M, Wang T, Zhang T, *et al.* Effects of high-frequency transcranial magnetic stimulation on theta-gamma oscillations and coupling in the prefrontal cortex of rats during working memory task. *Med Biol Eng Comput*, 2023, **61**(12): 3209-3223
- [60] Leszczyński M, Fell J, Axmacher N. Rhythmic working memory activation in the human hippocampus. *Cell Rep*, 2015, **13**(6): 1272-1282
- [61] Jung J, Bayle D, Jerbi K, *et al.* Intracerebral γ modulations reveal interaction between emotional processing and action outcome evaluation in the human orbitofrontal cortex. *Int J Psychophysiol*, 2011, **79**(1): 64-72
- [62] Eijlers E, Smidts A, Boksem M A S. Implicit measurement of emotional experience and its dynamics. *PLoS One*, 2019, **14**(2): e0211496
- [63] Petro N M, Livermore C L, Springer S D, *et al.* Oscillatory brain dynamics underlying affective face processing. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2025, **20**(1): nsaf047
- [64] Lisman J E, Jensen O. The theta-gamma neural code. *Neuron*, 2013, **77**(6): 1002-1016
- [65] Zhang Y, Zhang G, Liu B. Investigation of the influence of emotions on working memory capacity using ERP and ERSP. *Neuroscience*, 2017, **357**: 338-348
- [66] Ye C, Xu Q, Liu Q, *et al.* The impact of visual working memory capacity on the filtering efficiency of emotional face distractors. *Biol Psychol*, 2018, **138**: 63-72
- [67] Horner S B, Lulla R, Wu H, *et al.* Brain activity associated with emotion regulation predicts individual differences in working memory ability. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 2025, **25**(2): 329-343
- [68] Adamczyk A K, Wyczesany M, van Peer J M. High working memory load impairs reappraisal but facilitates distraction - an event-related potential investigation. *Biol Psychol*, 2022, **171**: 108327
- [69] Kim G W, Park J I, Yang J C. Brain morphological changes and functional neuroanatomy related to cognitive and emotional distractors during working memory maintenance in post-traumatic stress disorder. *Brain Res Bull*, 2024, **211**: 110946
- [70] Al Qasem W, Abubaker M, Pilátová K, *et al.* Improving working memory by electrical stimulation and cross-frequency coupling. *Mol Brain*, 2024, **17**(1): 72
- [71] Aktürk T, de Graaf T A, Güntekin B, *et al.* Enhancing memory capacity by experimentally slowing theta frequency oscillations using combined EEG-tACS. *Sci Rep*, 2022, **12**(1): 14199
- [72] Zheng S, Zhang Y, Huang K, *et al.* Temporal interference stimulation boosts working memory performance in the frontoparietal network. *Hum Brain Mapp*, 2025, **46**(3): e70160
- [73] Zhang D W, Moraidis A, Klingberg T. Individually tuned theta HD-tACS improves spatial performance. *Brain Stimul*, 2022, **15**(6): 1439-1447

The Neural Oscillatory Mechanisms of Emotion Affecting Working Memory: a Dual-path Model Based on Competition and Interference*

TANG Yu-Ting^{1,2)}, LI Yong-Hui^{3,4)}, SHEN Xun-Bing^{1,2)**}, DONG Xin-Wen^{3)**}

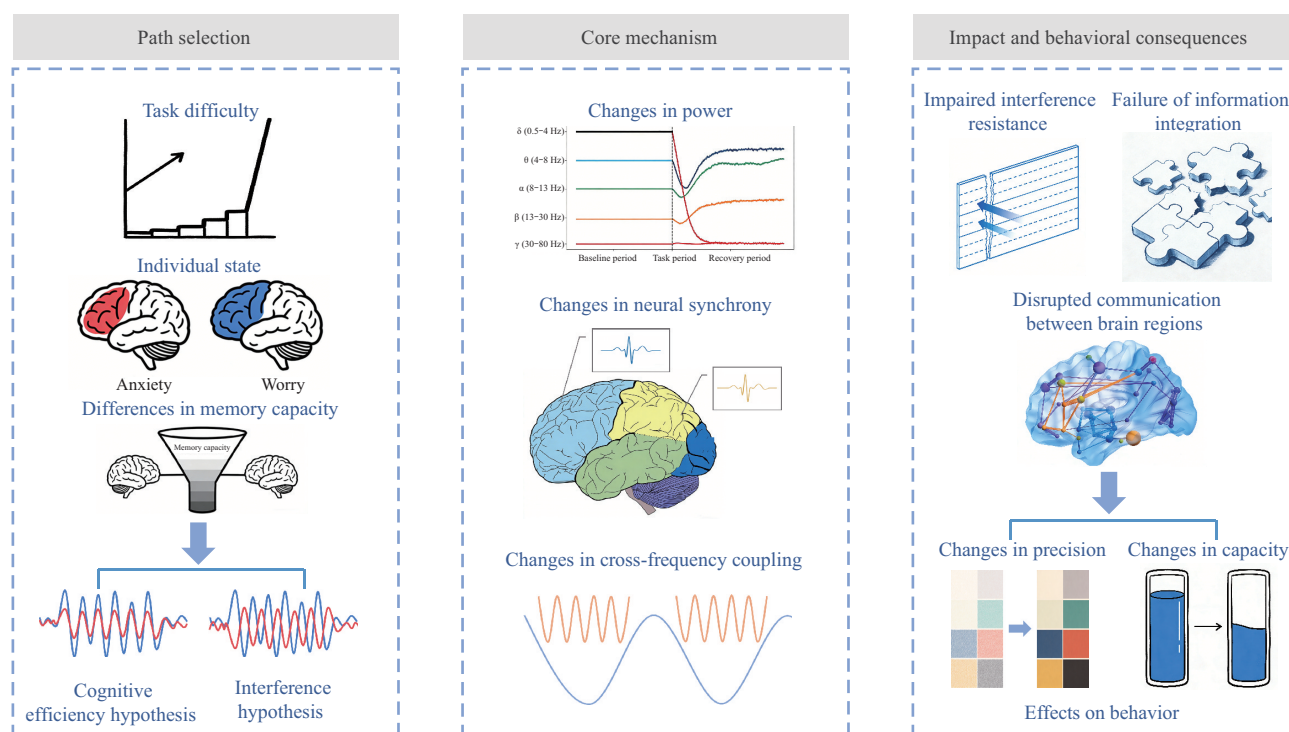
⁽¹⁾College of Humanities, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004, China;

⁽²⁾Provincial Administration of Traditional Chinese Medicine Key Research Laboratory of Chinese Medicine Psychology and Brain Science, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004, China;

⁽³⁾State Key Laboratory of Cognitive Science and Mental Health, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

⁽⁴⁾Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Graphical abstract



Abstract Working memory (WM) serves as the core of advanced cognitive functions, enabling the temporary storage and manipulation of information, which is crucial for reasoning, comprehension, and decision-making. However, its performance is influenced by emotional states; for instance, stress or anxiety may impair accurate

* This work was supported by grants from Science and Technology Innovation 2030-“Brain Science and Brain like Research” Major Project (2021ZD0202104), Humanities and Social Sciences Research Project, Ministry of Education (24YJA190013), and Innovation and Entrepreneurship Project for College Students (202510412267).

** Corresponding author.

SHEN Xun-Bing. Tel: 86-791-87119577, E-mail: 20060923@jxutcm.edu.cn

DONG Xin-Wen. Tel: 86-10-64850437, E-mail: dongxw@psych.ac.cn

Received: July 22, 2025 Accepted: December 31, 2025

recall or prioritize the processing of threatening stimuli. This review integrates research on the neural oscillatory mechanisms by which emotions affect WM, emphasizing shared patterns in the θ , α , β , and γ frequency bands. Emotions activate distinct neural circuits and alter oscillatory characteristics through arousal and valence, overlapping with the neural activities required for WM processes. This article aims to elucidate these mechanisms and propose a dual-pathway theoretical framework for emotional influences on WM. The cognitive efficiency hypothesis posits that emotions and WM compete for shared oscillatory resources. Both emotional processing and high WM load enhance cortical excitability by reducing α power to optimize attention allocation. Negative emotions, under sufficient presentation time, prioritize resource allocation to improve WM precision through enhanced sustained α suppression, albeit at the cost of reducing the number of remembered items. The patterns of θ power increases induced by emotions and task load overlap, potentially leading to θ/β saturation under high load, which limits cognitive regulation, while under low load, they synergistically support information maintenance. Emotional states and the β oscillations relied upon for WM maintenance converge in frequency, prone to synergy or competition. High arousal induced by emotions, as well as anxiety alleviation through music, can reduce prefrontal β oscillation power, bringing the brain closer to the low- β state required for WM maintenance, thereby enhancing memory performance and neural efficiency. Similar γ oscillations and α - γ coupling patterns induced by emotions and WM compete for neural resources, interfering with inter-brain region information integration and weakening the regulation of γ amplitude by α rhythms, thus impairing information exchange efficiency and processing stability. The interference hypothesis suggests that emotions directly disrupt the rhythms required for WM. Negative emotions typically reduce the power and synchrony of α oscillations, a change opposite to the α enhancement mode needed during the WM maintenance phase, thereby weakening interference shielding capabilities. The decrease in θ oscillation power induced by negative emotions contrasts with the θ enhancement required for WM tasks, thereby interfering with information maintenance, manipulation, and multi-item integration, leading to declines in memory capacity and precision. Negative or high-arousal emotions significantly disrupt β oscillation power and synchrony in WM tasks, resulting in impaired inter-brain coordination, reduced information stability, and consequently weakened task performance. Emotions directly alter γ oscillation power and θ - γ coupling patterns, with these changes opposing the enhancement direction required for WM tasks, thereby causing neural activity imbalances and information integration obstacles. The cognitive efficiency hypothesis and the interference hypothesis, as a dual-pathway model for emotional influences on WM, are not opposing explanatory frameworks but rather reflect a dynamic and complementary regulatory mechanism in emotion-cognition interactions. The brain flexibly selects interference or efficiency pathways based on current task load, emotional intensity, and individual states to maintain overall functional stability, with its core mechanism lying in the limited and adaptive allocation of brain neural oscillatory resources. Future research should delve into the impacts of emotional states, cognitive load, emotional arousal, and regulatory strategies on WM and its neural modulatory effects, to optimize personalized cognitive intervention strategies.

Key words emotion, working memory, neural oscillation, resource competition, rhythmic interference

DOI: 10.3724/j.pibb.2025.0347

CSTR: 32369.14.pibb.20250347