

tACS 刺激时机对工作记忆调控效果的影响¹²³

郭芮巧¹⁺ 李雯瑞²⁺ 郭雪³ 赵娜⁴ 雷鸣⁵ 刘强¹

(¹ 四川师范大学脑与心理科学研究院, 成都 610066)

(² 比利时列日大学认知心理与神经科学研究中心, 比利时 4000)

(³ 乔治-奥古斯特大学哥廷根大学医学中心, 哥廷根 37075)

(⁴ 辽宁师范大学脑与认知神经科学研究中心, 大连 116029)(⁵ 西南交通大学心理研究与咨询中心, 成都 611756)

郭芮巧和李雯瑞为共同一作

摘要 尽管经颅交流电刺激 (transcranial Alternating Current Stimulation, tACS) 可通过调节认知资源提升工作记忆 (working memory, WM) 表现, 但其效果在现有研究中并不一致。本研究发现, tACS 刺激施加于任务的时机是决定 WM 调控效果的关键调节变量。通过两项严格设计的实验, 我们揭示 tACS 对 WM 调控效果受刺激与任务的时序影响: 在实验 1 中, 相比于假刺激, 练习前施加 theta 频段 tACS (4Hz, 右顶叶) 显著提升记忆数量且保持精度不变; 而于练习后施加刺激, 个体对任务的数量-精度权衡策略已形成, 在心理惯性的影响下该策略得以延续, 即与假刺激相比, tACS 刺激选择性提高记忆精度而不改变数量。实验 2 进一步发现, 刺激时序对权衡策略的影响不会迁移到新任务中, 即被试在第一个任务中形成的策略在新任务中会被打破: 面对新场景, 个体会根据任务特点与自身资源总量形成新的策略, 表明认知资源的灵活再分配。因此, 我们得出结论: tACS 刺激对 WM 的调控效果取决于刺激施加的时间, 若在练习前施加, 则主要影响记忆数量; 若在练习后施加, 则主要影响记忆精度; 但已形成的调控效果不会迁移到新任务中。

关键词 tACS, 工作记忆, 精度-数量权衡, 4Hz theta, 心理惯性

分类号 B842

引言

视觉工作记忆 (visual working memory, VWM) 是认知功能的核心组成部分, 负责对视觉信息进行短暂的保持、操作与存储。研究表明, 高视觉工作记忆容量个体相较于低容量者, 在问题解决

¹ 收稿日期: 2025-03-18

² 基金: 四川省科技软科项目 (四川省社科基金委托项目) (SCJJ25RKX105)。教育部高校思想政治工作队伍培训研修中心 (西南交通大学) 2023 年度开放课题 (SWJTUUKF23-15)。

³ 通讯作者: lq780614@163.com

(Zhang et al., 2019)、语言理解(Ding, 2023)和抑制无关信息(Vogel et al., 2005)等方面展现出更为出色的能力。然而,个体间的视觉工作记忆容量存在显著差异,低视觉工作记忆容量可能限制个体的认知表现。因此,研究者致力于探索无创提升视觉工作记忆容量的有效方法,以改善个体的认知功能。

近年来,theta 频率的经颅交流电刺激(transcranial Alternating Current Stimulation, tACS)被证实能够通过调节顶叶区域的神经振荡同步性,显著改善个体的工作记忆表现(Biel et al., 2022)。这一发现对于工作记忆能力衰退的群体,如老年人,具有重要的应用价值(Pupíková et al., 2024)。其作用机制主要通过 theta-gamma 跨频耦合(Jensen & Lisman, 1998, 2005)实现:一个 gamma 周期对应一个记忆项目,多个 gamma 子周期嵌套在一个 theta 周期内。随着记忆项目的增加,theta 波的频率会降低(Axmacher et al., 2010)。tACS 刺激传递特定频率的微弱电流同步大脑震荡,从而影响认知表现(Antal et al., 2008; Nitsche et al., 2008; Riecke et al., 2015)。因此,低频 tACS(如 4Hz)可通过降低个体大脑 theta 频率、增加 theta 周期长度,从而容纳更多 gamma 周期,提升工作记忆容量。值得注意的是,theta-gamma 耦合主要参与工作记忆的编码阶段,而信息维持阶段则依赖 alpha(8~12Hz)和 beta(13~30Hz)振荡。研究表明, alpha 振荡通过抑制无关脑区活动保护工作记忆表征(Jensen & Mazaheri, 2010), beta 则对记忆内容进行更新与维持(Spitzer & Blankenburg, 2011)。这种功能分离提示: theta-tACS 的调控效果可能具有阶段特异性——仅在试次编码阶段通过调节 theta-gamma 耦合提升信息输入效率,而对维持阶段的影响有限。因此,本研究聚焦于 theta-tACS 对工作记忆容量的影响,旨在探讨其在编码阶段的特异性作用。

尽管 tACS 在提升工作记忆表现方面的潜力已得到一定认可,但不同研究所得结果仍存在差异:例如 Zhang 等人发现, theta 频率的 tACS 能有效提升视空间工作记忆的表现(Zhang et al., 2022),而 Kleinert 和 Müller(2017)并没有发现 theta 频率的 tACS 对视空间工作记忆表现有提升作用。这种矛盾提示 tACS 的调节效果可能受多重因素影响。Nissim 等(2023)的元分析指出,任务难度(Biel et al., 2022)和相位(Tseng, 2018)是显著的调节变量。但一些研究发现,其他变量也会影响 tACS 刺激的效果。例如,在高负荷下,相比于假刺激和高频率的 7Hz tACS, 4Hz tACS 能显著提高个体的工作记忆容量(Bender et al., 2019),这说明刺激的频率会影响刺激效果。其次,靶区定位(Jones, 2019)也是一个影响因素。在右前额叶-顶叶施加 4.5Hz 的 tACS 对物体 WM 有选择性改善,而在双前额叶的 tACS 对 WM 无显著影响(Jones, 2019),说明顶叶在工作记忆中发挥着重要作用(Jaušovec et al., 2014)。另外,刺激时机也可能是一个重要的潜在因素。在任务前施加刺激的研究普遍发现,同相刺激对工作记忆存在显著的提升效果(Biel et al., 2022; Jones, 2019)。如 Jaušovec 的研究表明,在任务前对顶叶

施加 15 分钟的 tACS 刺激能显著提升工作记忆任务表现(Jaušovec et al., 2014)。然而，任务后施加刺激的研究结果则呈现出不同的趋势。被试在施加刺激前已开始执行任务，结果表明，对工作记忆任务表现均无显著影响(Kleinert & Müller, 2017)。

我们推测，这种差异可能与心理惯性（psychological inertia）有关。心理惯性指个体在重复情境中形成的自动化行为倾向(Hagggar et al., 2019)。它能够维持行为的连贯性，帮助个体预测未来行为(Ouellette & Wood, 1998)；但当心理惯性与理性决策相冲突时，可能导致个体忽略最优选择，增加决策错误(Alós-Ferrer et al., 2016; Samuelson & Zeckhauser, 1988)。这与 Baddeley 的多成分模型的中央执行系统的功能变化相呼应：在任务初期，中央执行系统需要高度参与资源分配和策略选择，而在任务自动化后，其参与度降低(Ericsson & Kintsch, 1995; Sweller et al., 1998)，即熟练的任务可以通过从属系统（如语音回路或视觉空间模板）自动化处理，从而减轻中央执行系统的负担(Baddeley, 2012; Shiffrin & Schneider, 1977)。这种自动化的神经基础可能是额-顶叶区域激活降低。如在工作记忆训练领域发现，初期学习需要额-顶叶区域的高度激活以维持有意识控制；而在训练后，任务逐渐自动化，额-顶区域的执行控制需求降低，激活减少(Liu & Zhou, 2013)。那么在任务初期，theta-tACS 可能通过相位重置打破原有神经振荡模式，延长 theta 周期以容纳更多 gamma 活动，帮助建立最优记忆策略；而在任务练习后，额-顶区域激活降低，记忆策略自动化（比如固定记忆 3 个项目），theta 振荡趋于稳定。此时给予刺激，则不再调整 theta 周期来适应任务，而是通过 theta-gamma 相位-振幅耦合（PAC）优化 gamma 神经元的同步性与激活强度(Lega et al., 2016)，从而提升了记忆表征的精度。

但目前尚未有研究对刺激时机这一变量直接进行验证，且现有研究多依赖传统指标（如 n-back 任务），难以揭示资源分配机制。而 Zhang 和 Luck（2008）提出的回忆报告范式将工作记忆容量分为精度和数量两个独立指标：数量指短时间内个体能够记住的项目数，精度则指个体所记忆项目的准确性。相比于传统指标，数量与精度的动态权衡(Barton et al., 2009; Bays & Husain, 2008)更能反映资源分配策略(Ye et al., 2019)。例如，在 Guo 等（2021）的研究中，他们采用该范式要求被试先完成练习任务，再施加 tACS 刺激，最后进行正式实验。结果表明，高低容量被试在 4Hz 条件下记忆精度得到提升，但记忆数量保持不变。这一结果符合上述关于任务后施加刺激的推论，但该研究并未探讨“先刺激后任务”的情况。因此，本研究将首次系统考察刺激时机如何通过心理惯性调节 tACS 对工作记忆的影响。我们假设，在任务开始前施加刺激，可以降低个体的 theta 频率，让被试在任务初期即可编码更多的项目，形成“最优记忆数量”的策略；而在任务后施加刺激，由于原有策略已

自动化，theta-tACS 刺激则不再变更 theta 周期，而是调控 gamma 振幅来提升已有策略的执行效率，即表现为精度提升。

具体而言，本研究通过操纵 4Hz 的 tACS 刺激施加于任务的不同阶段，来讨论练习阶段的权衡策略是否会产生心理惯性，并进一步验证其在不同任务中的迁移性。实验一中，被试随机分配到先刺激组（刺激-练习-正式）和后刺激组（练习-刺激-正式）。在先刺激组中，被试在任务初始阶段就被施加 tACS 刺激，降低个体大脑的 theta 频率，那么在真刺激条件下，相比于假刺激，其记忆精度不变，记忆数量提升（假设 1a）。相反，在后刺激组中对练习阶段形成的权衡策略运用已具有惯性，其结果应与 Guo 等（2021）研究一致，记忆数量不变，记忆精度提升（假设 1b）。在实验二中，我们进一步验证实验一的结果并探讨 theta-tACS 是否能促使个体在新任务中形成新的资源分配策略。被试将依次完成两个不同的任务（颜色和方向任务，两者顺序随机），每位被试均在完成第一个任务的练习阶段之后接受 tACS 刺激。我们推测，当个体面对全新任务时，theta-tACS 通过相位重置机制，能够打破原有任务的认知惯性，使其根据新任务的特点重新配置资源。那么，对于第一个任务来说，我们预期其应与实验一的后刺激组一致（假设 2a）；而在第二个全新的任务中，被试可能会重新根据任务特点形成新的权衡策略，我们预期其结果与实验一的先刺激组相同（假设 2b）。

1 实验 1：tACS 刺激时机对工作记忆权衡策略的影响

实验一将通过操控 tACS 刺激作用的时间，让两组被试在练习阶段开始时，处于不同的记忆资源状态，从而考察 tACS 刺激时机是否会影响该刺激对 WM 的调控效果。在先刺激组条件下，被试在练习阶段之前就接受了 tACS 刺激，那么他们在任务开始之前就拥有更多的记忆资源；而后刺激组则在练习阶段结束后才接受刺激，也就是说，他们在练习阶段结束后正式实验开始之前，记忆资源才得到提升。

1.1 实验方法

1.1.1 实验设计

实验是 2 刺激时间（先刺激 vs 后刺激） $\times$ 2 刺激类型（真刺激 vs 假刺激） $\times$ 2 视野半场（左，右）的混合设计，其中刺激时间是被试间变量，刺激类型是被试内变量。

1.1.2 被试

选取中等水平的效应量 $f=0.25$ (Wolinski et al., 2018)， α 水平为 0.05，统计检验力为 0.95，先验分析得到总体的样本量至少为 36 个。36 名来自四川师范大学的本科生或研究生自愿参与了本实验，年龄范围在 18~25 岁之间，平均年龄 18.97 ± 1.40 岁，其中男性被试 12 名。将被试随机分入两组，一组为先刺激组，一组为后刺激组。所有被试视力或矫正视力正常，无色觉障碍，且无精神系统疾病。所有被试均为自愿参加实验，实验开始前签署知情同意书，并在实验结束后获得相应的报酬。本实验通过四川师范大学伦理委员会（审查表编号：2024LS06）的认定。

1.1.3 实验材料

实验程序通过 Matlab 编制而成，刺激材料呈现在 23.8 寸显示屏上（分辨率为 1920×1080 ，刷新率为 60Hz）。屏幕背景为灰色，屏幕背景亮度为 150° 。在刺激界面，注视点左右分别呈现四个记忆项目，每个记忆项目均是带有颜色的正方形色块（视角： $0.8^\circ \times 0.8^\circ$ ），色块颜色从一个均匀分布的 360° 颜色色环上随机选择。色块之间的颜色差值至少为 30° ，且色块与色块中心之间的距离不小于 2° 。回忆界面呈现一个彩色色环，色环的外径长为 8.2° ，色环内径长 6° ，色块中心的半径为 4.5° 。被试在灯光柔和且稳定舒适的房间完成实验任务，距离计算机屏幕约为 60cm。

1.1.4 实验流程

采用 Guo 等人（2021）的实验程序，实验流程图如图 1 所示。任务开始首先呈现 1000 毫秒的注视点，接着会呈现 200 毫秒一个指向左或右的箭头，以指示被试记住即将呈现的记忆阵列中的左边或者右边。接着显示 300 毫秒的记忆阵列，左右各呈现 4 个色块。随后是 900 毫秒的保留间隔期，在此期间注视点仍保持在屏幕中央。最后屏幕上会出现一个色环，箭头指向一侧的色块位置上会出

现四个占位符，其中需回忆色块的占位符被加粗，要求被试用鼠标在色环上选择目标颜色，持续时间 3000 毫秒。每个试次中，色环都会随机旋转角度。每个试次的方块颜色和位置由计算机程序随机分配给出。实验分组流程图如图 2 所示，正式实验包含 300 个试次。

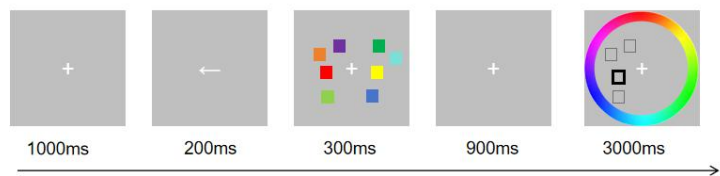


图 1 实验流程图。刺激呈现时左右两边各四个色块，色块之间颜色各不相同，左右两边的颜色也不重复。

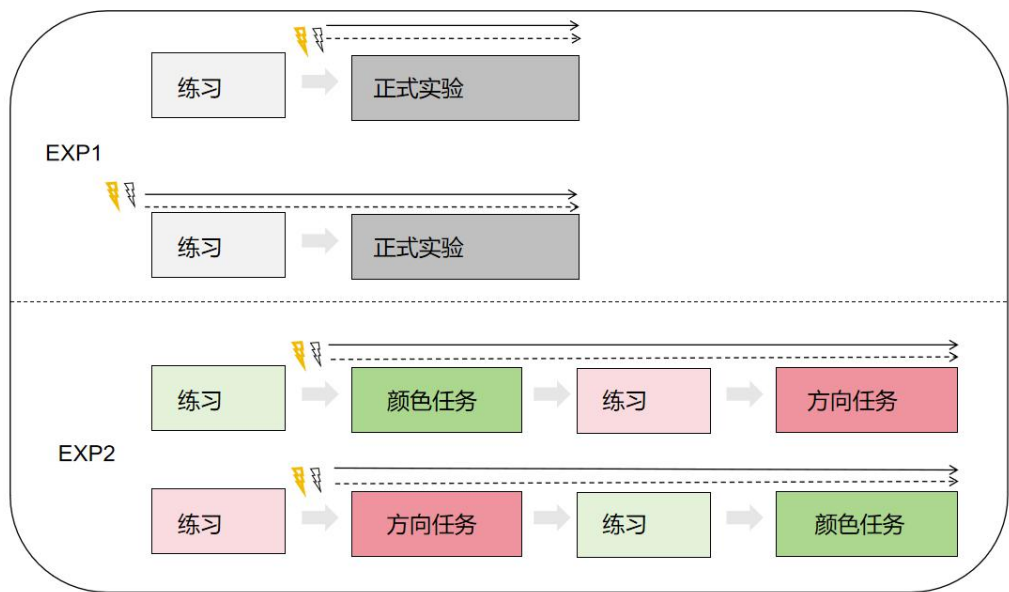


图 2 实验一和实验二中 tACS 刺激与任务先后顺序的流程图。实验一中一半被试参加先刺激组，一半被试参加后刺激组。每组被试都要完成真假刺激条件，时间间隔一周。实验二中一半被试先参加颜色任务，一半被试先参加方向任务，每个被试都要完成真假刺激条件，且时间间隔一周。黄色的闪电表示真刺激，黑色的闪电表示假刺激。实线长箭头表示真刺激的作用时间段，虚线长箭头表示假刺激的作用时间段。

1.1.5 经颅交流电刺激

本实验采用西班牙 Neuroelectrics 公司生产的 Starstim8 型设备进行经颅交流电刺激（tACS）。在电极放置前，首先使用酒精棉擦拭相应头皮位置以降低阻抗。随后，将两个经盐水浸湿的 5×5cm 海绵电极分别置于头皮：刺激电极位于右顶叶皮层（P4 区），参考电极则置于右侧眉弓上方。电极放置完成后，为每名被试确定个体化电流阈值。初始设置最大刺激强度为 1500μA（峰峰值）。在

第一阶段，首先施加 $1500\mu\text{A}$ 刺激，观察是否引发光幻视或其他不适感。若无此类感觉，则采用该强度；若出现不适，则从 $1000\mu\text{A}$ 开始，以 $50\mu\text{A}$ 为步长递增或 $100\mu\text{A}$ 为步长递减，直至找到不引起光幻视或异常感觉的最高刺激强度。第二阶段依据第一阶段所确定的阈值相应调整电流。刺激频率分为两种：4Hz 真刺激和假刺激。在 4Hz 真刺激条件下，采用个体阈值进行刺激；假刺激则仅包含短暂刺激期，以模拟真刺激可能产生的初始感觉。所有被试的平均刺激强度为 $1261.18 \pm 196.38\mu\text{A}$ 。假刺激阶段在淡入、刺激与淡出期间频率均设为 4Hz，被试仅在淡出结束后执行任务。所有刺激过程中，阻抗均维持在 $10\text{k}\Omega$ 以下。两组被试分别接受一次真刺激与一次假刺激，假刺激作为基线对照，顺序在被试间平衡。电极放置完毕后，向被试说明实验任务，要求其使用鼠标进行反应。先刺激组在接受 10 分钟刺激后进行练习（含反馈），随后进入正式实验，期间持续接受剩余时间的刺激直至实验结束。后刺激组则先进行简短练习，随后开始接受刺激并完成实验。两组被试的 tACS 总刺激时间均为 20 分钟。若刺激结束时实验未完成，则继续执行任务至结束。同一被试两次实验间隔一周，且尽量安排于相同时段进行。实验采用单盲设计，被试不知晓各阶段所接受的刺激类型。

1.2 数据分析

回忆报告任务中每个试次的偏差值是通过将目标值减去报告值的绝对值来计算，再对其进行模型拟合。具体操作为：在 Matlab 的 MemToolbox 工具箱 (Suchow et al., 2013) 中选取了 StandardMixtureModel、SwapModel 和 VariablePrecisionModel 这三个模型对差值数据进行两两比较，贝叶斯信息准则(BIC)显示，SwapModel 与 VariablePrecisionModel 相比较时 (ΔBIC 为负值支持前一个模型，正值支持后一个模型)，真刺激下的平均 ΔBIC 为 1.41，假刺激下的 ΔBIC 为 1.59，共有 25 个被试支持 VariablePrecisionModel，说明 VariablePrecisionModel 优于 SwapModel。随后将 StandardMixtureModel 与 VariablePrecisionModel 进行比较时表明，真刺激下的平均 ΔBIC 为 -2.07，假刺激下的 ΔBIC 为 -1.59，共有 25 个被试更支持 StandardMixtureModel。接着对差值数据用 StandardMixtureModel 进行拟合分析，以得到 m 、 sd 和 g 值 (Zhang & Luck, 2008)。该模型中存在两个成分，一个是有效记忆成分：假如记忆项目进入了被试的记忆表征，那么这会导致偏差值为一个具有平均值 m 和标准差 sd 的冯·米塞斯分布。编码在记忆中的值与实际项目值之差为误差值分布的宽度，与精度的含义相反，因此将 sd 值作为记忆精度的指标，即 sd 越小精度越高。第二个成分是猜测率 g ：假如刺激没有被记住，被试在做反应时将进行随机猜测，则差异值为均匀分布。参数

g 表示回忆项出现在记忆中的概率即猜测率，可表示被记住的概率， g 值越小记忆容量越大，因此 g 作为记忆数量的指标，在使用回忆报告范式的研究中，大多都使用该模型将误差值进行数据拟合 (Guo et al., 2021; Long et al., 2020; Wang et al., 2019; Ye et al., 2017)。

1.3 实验结果

将个体的刺激电流分别与不同条件下的 g 值和 sd 值做皮尔逊相关。结果表明，先刺激组中的刺激电流强度与真刺激下的 sd 值 ($r(17) = -0.375, p = 0.138$) 和 g 值 ($r(17) = 0.146, p = 0.575$) 都不相关，与假刺激下的 sd 值 ($r(17) = -0.14, p = 0.592$) 和 g 值 ($r(17) = 0.058, p = 0.824$) 也不相关。后刺激组中的刺激电流强度与真刺激下的 sd 值 ($r(17) = -0.268, p = 0.283$) 和 g 值 ($r(17) = -0.301, p = 0.224$) 都不相关，与假刺激下的 sd 值 ($r(17) = 0.113, p = 0.655$) 和 g 值 ($r(17) = -0.111, p = 0.661$) 也不相关。这说明每个被试接收的电刺激差异并不会影响实验结果。

1.3.1 先刺激组

采用刺激条件 (4Hz 和假刺激) $\times$ 视野半场 (左视野与右视野) 的 2×2 重复测量方差分析对先刺激组的猜测率 g 值进行统计分析。结果显示：刺激条件主效应显著 (如图 3)， $F(1,17) = 5.59, p = 0.030, \eta p^2 = 0.25$ ，4Hz 刺激条件下的猜测率 (0.39 ± 0.020) 低于假刺激条件下的猜测率 (0.42 ± 0.02)， $t(17) = -2.37, p = 0.030$, Cohen's $d = 0.56$ 。表明在先刺激组，4Hz tACS 相比于假刺激能够提高被试的工作记忆数量。视野半场主效应不显著， $F(1,17) = 1.00, p = 0.331, \eta p^2 = 0.06$ ；视野半场和刺激条件交互效应不显著， $F(1,17) = 0.75, p = 0.400, \eta p^2 = 0.04$ 。

采用刺激条件 (4Hz 和假刺激) $\times$ 视野半场 (左视野与右视野) 的 2×2 重复测量方差分析对先刺激组的 sd 值进行统计分析。结果显示：刺激条件主效应不显著， $F(1,17) = 3.66, p = 0.073, \eta p^2 = 0.18$ ；视野半场主效应不显著， $F(1,17) = 0.08, p = 0.248, \eta p^2 = 0.08$ ；视野半场和刺激条件交互效应不显著， $F = 1.56, p = 0.229, \eta p^2 = 0.08$ 。表明采用先刺激后练习的方式不会对被试的工作记忆精度有明显的改善。

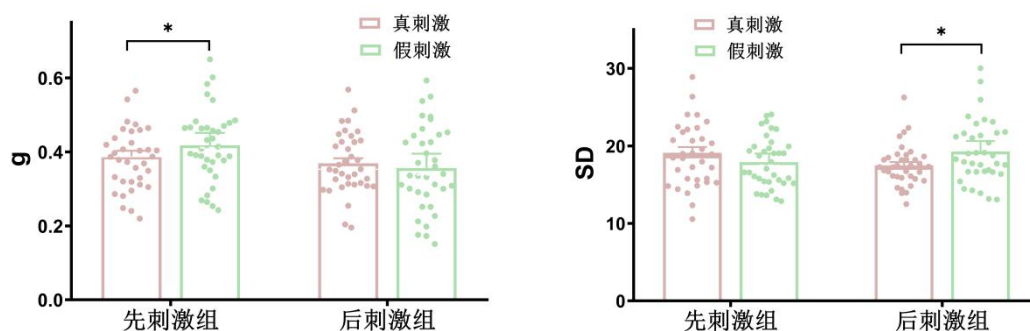


图3 左图为先刺激组和后刺激组的猜测率 g 结果（合并了左右视野的数据）。右图为先刺激组和后刺激组的精度 sd 结果。注：更大的 g 值意味着较低的工作记忆数量，更高的 sd 值意味着较差的工作记忆精度。在 g 和 sd 结果中，无论先刺激还是后刺激组，左边的 bar 都是真刺激条件，右边的 bar 都是假刺激条件。

1.3.2 后刺激组

采用刺激条件（4Hz 和假刺激） $\times$ 视野半场（左视野与右视野）的 2×2 重复测量方差分析对后刺激组的猜测率 g 值进行统计分析，结果如图3所示。结果显示：刺激条件主效应不显著， $F(1,17) = 0.62, p = 0.440, \eta^2 = 0.04$ ；视野半场主效应不显著， $F(1,17) = 0.34, p = 0.564, \eta^2 = 0.02$ ；视野半场和刺激条件交互效应不显著， $F(1,17) = 0.02, p = 0.881, \eta^2 = 0.001$ 。

采用刺激条件（4Hz 和假刺激） $\times$ 视野半场（左视野与右视野）的 2×2 重复测量方差分析对后刺激组的 sd 值进行统计分析。结果显示：刺激条件主效应显著， $F(1,17) = 7.13, p = 0.016, \eta^2 = 0.30$ ；4Hz 刺激条件下的 sd 值（ 17.48 ± 0.47 ）小于假刺激条件下的 sd 值（ 19.27 ± 0.69 ）， $t(17) = -2.67, p = 0.016$, Cohen's $d = 0.63$ 。表明在后刺激组，4Hz tACS 刺激相比于假刺激能够提高被试的工作记忆精度水平。视野半场主效应不显著， $F(1,17) = 0.05, p = 0.835, \eta^2 = 0.003$ ；视野半场和刺激条件交互效应不显著， $F(1,17) = 0.57, p = 0.461, \eta^2 = 0.03$ 。

实验一采用回忆报告范式，将被试分成两组并接受不同顺序的刺激与任务来探究个体的工作记忆表现的变化。实验结果发现，在先刺激条件下，与假刺激组相比，真刺激组记忆的精度不变，记忆的数量提升（支持假设 1a），说明 tACS 刺激有降低个体大脑内部的 θ 频率，增加记忆数量。而在后刺激条件下，与假刺激组相比，真刺激组记忆的数量不变，记忆的精度提升（支持假设 1b），说明此时的 tACS 刺激不降低个体的 θ 频率，而是提升 γ 振幅，增强项目的记忆精度。综上所述，实验一的结果证明，刺激与任务的先后顺序会影响 tACS 的效果。

虽然实验一证明了 tACS 与任务顺序对 WM 调控效果的影响，但是这种影响是否会延续到另外

不同的任务中还尚不可知，因此，在实验二中，每个被试将完成两项不同的任务。另外，在实验一中未发现左右视野这一变量的效应，在实验二中将去掉这一变量。

2 实验 2：tACS 刺激对权衡策略的影响不会迁移到新任务

实验 2 将在实验 1 的基础上，再次验证刺激与任务顺序对 tACS 的调控效果是否会泛化到其他任务中。具体来说，被试将依次完成两个任务的练习和正式实验，在第一个任务的练习阶段施加刺激，那么对于第一个任务来说就等同于实验一的后刺激条件；对于第二个任务来说则与实验一的先刺激条件相同。我们也预计第一任务和第二任务的结果分别与实验一的后刺激和先刺激条件一致。

2.1 实验方法

2.1.1 实验设计

由于实验一表明视野半场对结果没有影响，因此本实验删除这个变量。本实验采用 2 顺序（颜色-朝向 vs 朝向-颜色） $\times$ 2 刺激类型（真 vs 假）的混合设计。其中顺序是被试间变量，刺激类型是被试内变量。

2.1.2 被试

采用 G-power 软件对本实验所需样本量进行事前分析，选取 Cohen（1988）中等水平的效应量 $d = 0.5$ ， $\alpha = 0.05$ ，统计检验力为 0.8，得到结果为每组样本量至少为 28 个。正式实验共 2 组，参与者为 56 名在校大学生（男性 12 名，年龄范围为 17~28 岁，平均年龄为 20.96 岁， $SD = 2.89$ ），所有被试没有明显智力偏差、无色盲色弱、视力或矫正视力正常且无精神病史或心理障碍，并且在此之前均没有接触过回忆报告范式的实验。被试被随机分配到两个顺序组，每个顺序组各有 6 名男生。实验开始前每位被试详细阅读《实验知情同意书》并签字同意，在实验全部结束后依据其认真程度获得相应报酬。本实验通过四川师范大学伦理委员会（审查表编号：2024LS06）认定。

2.1.3 实验材料及流程

实验程序通过 MatLab 中的工具箱 PsychoToolbox 编写而成，刺激材料在 23.8 英寸、1920×1080 分辨率、60Hz 刷新率、背景为灰色且亮度为 150° 的显示屏上呈现。被试坐在一个舒适、凉爽的实验室内，与屏幕之间的距离约为 60 厘米。实验分为两个阶段且间隔一周以上，并尽量保证被试两次实验都在同一时间段内完成实验。每个阶段都包含颜色回忆报告的练习和正式任务，以及朝向回忆报告的练习和正式任务。练习任务都是 40 个试次，在每个试次后都报告偏差值且练习阶段结束后提供相应反馈。正式任务都是 200 试次，无偏差值反馈，分为 5 个 block，每个 block 有 40 个 trial。

2.1.4 实验程序

实验程序是分别完成颜色和朝向任务的练习和正式实验，两个任务的顺序随机，一半被试先完成颜色任务，一半被试先完成朝向任务。颜色回忆报告任务（如图 4）：实验开始时呈现一个 1000 毫秒注视点，接着呈现一个 300 毫秒的记忆阵列，左右两侧各有两个彩色正方形（视角为 $0.8^\circ \times 0.8^\circ$ ）。正方形中心点的距离不小于 2.5° ，从一个均匀分布的 360° 色环中随机选择颜色差异值大于 30° 的四种颜色。随后是 900 毫秒的间隔期。最后，出现一个回忆界面，由一个外径为 16° 、内径为 12° 、中心活动半径为 4.5° 的色环组成。每个试次中，色环都会随机旋转角度。占位符的位置与先前记忆阵列呈现位置相对应，其中需回忆色块的占位符被加粗，要求被试用鼠标在色环上选择目标颜色。在回忆阶段没有时间限制，直到被试作出反应。

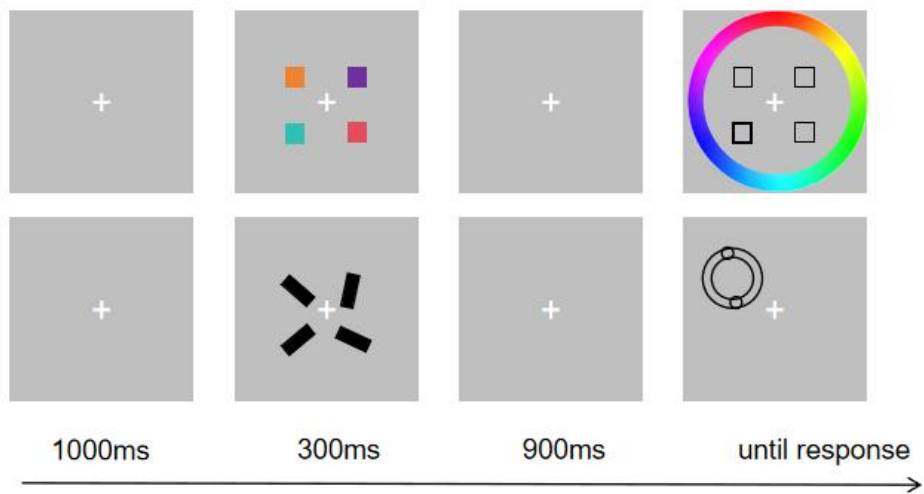


图 4 颜色和朝向回忆报告任务流程图。颜色任务中，在四个位置上有四种各不相同的颜色

朝向回忆报告任务（如图 4）：实验开始首先呈现 1000 毫秒的注视点，然后呈现 300 毫秒的记忆阵列。所有试次的记忆阵列均以距离注视点 2.5° 的视角左右两侧分别呈现两个黑色长方形线条，每个记忆项目都是颜色为黑色（RGB: 0, 0, 0）的实心长方形线条（视角： $2.2^\circ \times 0.5^\circ$ ），黑色线条亮度为 1cd/m²。这些记忆项目的朝向从 10° 到 170° 随机选择，任意两个记忆项目间的朝向值至少大于 10° 。随后是 900 毫秒的间隔期，在这期间注视点仍然保持在屏幕中央。最后是回忆界面，一个双环圆随机出现在先前呈现的记忆项目位置上，双环圆的外径长为 3.5° ，双环圆的内径长为 2.2° ，双环圆间隙中有两个以对角线呈现并且可随鼠标移动的空心圆（视角： $1.3^\circ \times 1.3^\circ$ ）。双环圆每次出现都经过随机角度的旋转。被试需调整双环圆朝向与相同位置的线条朝向保持一致。被试可移动鼠标来转动空心小圆球，拟合成确定的朝向后点击鼠标右键即可记录反应，没有时间限制。单个 trial 的线条朝向由计算机程序随机分配给出。

2.1.5 经颅交流电刺激

电极放置同实验一。真刺激条件下，将电流频率设置在 4Hz，并从最大刺激强度 1500 μ A 峰值幅度开始进行刺激。如果被试在 1500 μ A 刺激的测试下发生了光幻视或产生其他刺痛的感觉，则以 50 μ A 的增量减少，直到没有产生光幻视或其他不适感觉。如果在 1500 μ A 刺激下没有发生光幻视或其他刺痛的感觉，则使用此级别的刺激。假刺激条件下，电极的放置位置与真刺激条件下相同，但电流刺激仅在开始与结尾时各持续 30s，以使被试感受到和持续电刺激相同的轻微刺痛感，并使其难以区分接受的是哪种电刺激。所有被试所受电刺激的平均电流为 $1341.07 \pm 200.49 \mu\text{A}$ 。打开刺激设备前，向被试呈现任务指导语并为其讲解实验任务。被试明白实验任务后首先完成练习任务，被试在练习阶段结束后能看到关于自己行为表现的反馈结果。之后再次确认被试明白实验任务后再打开电刺激设备让被试接受电刺激并完成接下来的任务。经颅交流电刺激的总工作时间为 37 分钟。实验采用单盲设计，被试接受真刺激和虚假刺激的顺序已在被试间进行平衡，两次实验间隔一周以上。

2.1.6 数据分析

实验二的数据分析同实验一。贝叶斯信息准则(BIC)显示, SwapModel 与 VariablePrecisionModel 相比较时,真刺激下的平均 Δ BIC 为-0.71,假刺激下的 Δ BIC 为-1.38,共有 31 个被试更支持 SwapModel。随后将 StandardMixtureModel 与 SwapModel 进行比较,真刺激下的平均 Δ BIC 为-2.08,假刺激下的

ΔBIC 为-0.68, 共有 42 个被试更支持 StandardMixtureModel, 本实验采用该模型进行拟合。在本实验中, 在整个数据集中, 各条件下系统误差的分布均在预设的合理范围之内, 因此在统计分析中未将其作为显著混杂因素进一步建模。根据 StandardMixtureModel 拟合得到的指标, 对不同刺激条件 (4Hz 和假刺激) 下的 g 值与 sd 值进行配对样本 t 检验。

2.2 实验结果

我们将两个顺序条件下的结果合并, 无论被试先完成颜色还是朝向任务, 都将先完成的任务统称为第一任务, 后完成的任务称为第二任务。将个体的刺激电流分别与不同条件下的 g 值和 sd 值做皮尔逊相关。结果表明, 在第一任务中刺激电流强度与真刺激下的 g 值 ($r(55) = -0.17, p = 0.191$) 和 sd 值 ($r(55) = -0.01, p = 0.929$) 都不相关, 与假刺激下的 g 值 ($r(55) = -0.15, p = 0.263$) 和 sd 值 ($r(55) = 0.10, p = 0.436$) 也不相关。在第二任务中刺激电流强度与真刺激下的 g 值 ($r(55) = 0.26, p = 0.053$) 和 sd 值 ($r(55) = 0.06, p = 0.664$) 都不相关, 与假刺激下的 g 值 ($r(55) = 0.23, p = 0.083$) 和 sd 值 ($r(55) = 0.03, p = 0.811$) 也不相关。这说明每个被试接收的电刺激差异并不会影响实验结果。

对于第一任务的 sd 值进行配对样本 t 检验 (如图 5 所示), 结果显示 4Hz 的 tACS 与假刺激在 0.05 显著性水平下呈现差异, $t(55) = -2.50, p = 0.015$, Cohen's $d = -0.33$ 。进一步比较其均值发现, 4Hz 频率的 tACS 条件下的 sd 值 (20.66 ± 4.91) 小于假刺激条件下的 sd 值 (22.03 ± 4.87), 更高的 sd 值意味着更差的工作记忆精度, 这说明 4Hz 的 tACS 显著提高了第一任务的精度。对第一任务的猜测率 g 值进行配对样本 t 检验, 结果显示, 刺激条件与实验任务间无显著性差异, $t(55) = -0.39, p = 0.697$, Cohen's $d = -0.05$, 说明 4Hz 的 tACS 未能影响颜色回忆报告任务的项目数量。

对于第二任务的 sd 值进行配对样本 t 检验, 结果显示, 刺激条件与实验任务间无显著性差异, $t(55) = 1.62, p = 0.111$, Cohen's $d = 0.22$, 说明 4Hz 的 tACS 不影响朝向回忆报告任务的项目精度。对于第二任务的猜测率进行配对样本 t 检验, 结果显示 4Hz 的 tACS 与假刺激在 0.05 显著性水平下呈现差异, $t(55) = -3.16, p = 0.003$, Cohen's $d = -0.42$ 。进一步比较其均值发现, 真刺激条件下的猜测率 g 值 (0.15 ± 0.11) 小于假刺激条件 (0.19 ± 0.13), 更低的猜测率意味着更多的工作记忆数量, 说明 4Hz 的 tACS 显著提高了朝向回忆报告任务的项目数量。

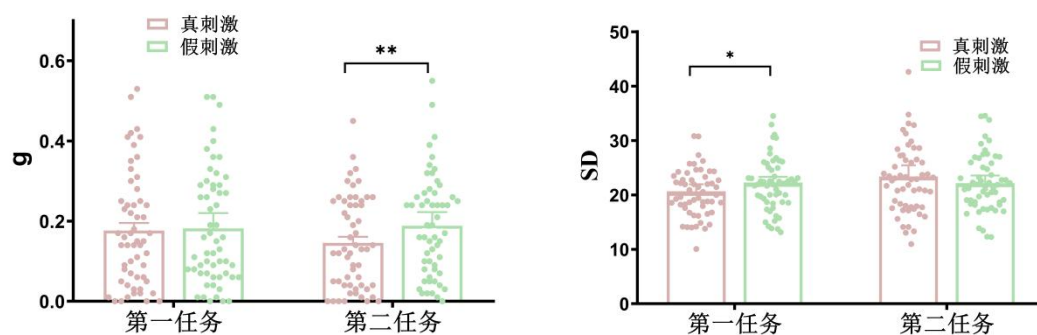


图5 实验2中两个任务的猜测率 g (左) 与精度 sd (右) 结果。第一任务表示被试完成的第一个任务, 第二任务表示被试完成的第二个任务。注: 第一任务和第二任务图中, 无论 g 还是 sd , 左边的 bar 都是真刺激条件, 右边的 bar 都是假刺激条件

以上研究结果证明了我们的研究假设。实验结果表明, 于第一任务而言, 与假刺激相比, 在真刺激条件下, 被试先完成练习任务再接受电刺激, 会使其视觉工作记忆精度显著提高, 记忆数量不变。这一结果与实验一的后刺激组结果相同, 再次证明了练习阶段后再施加电刺激只会增加记忆精度, 而不影响记忆数量 (支持假设 2a)。但在第二任务中, 由于任务情境发生转变, 神经系统需动态调整 θ 周期长度以匹配新项目的编码需求, 个体也重新形成新的记忆策略, 即在记忆精度不变的前提下, 记忆数量显著提高, 这一结果与实验一的先刺激组结果相同 (支持假设 2b)。

3 总讨论

本研究旨在考察电刺激施加于实验任务的时机对 WM 调控效果的影响以及调控效果在新任务中是否变化。当在新任务练习之前便施加 tACS 刺激时, 其会降低 θ 频率, 增加 γ 数量, 这使得被试在确保记忆精度的基础上, 增加记忆数量 (实验一的先刺激组和实验二的第二任务)。然而, 在练习后施加刺激则表现出不同的结果: 个体在经过短暂练习后, 便会形成稳定的记忆策略。即便此时给予低频的 tACS 刺激, 不会改变记忆数量, 但能提升记忆精度 (实验一的后刺激组和实验二的第一任务)。

在长时记忆研究中也发现与本研究类似的结果, 即刺激时机会影响 tACS 刺激的效果。若先刺激再完成任务则会提升词对的记忆效果, 但若在完成任务时 (文中未阐述是否是练习后) 再施加刺激则没有任何效果 (Paßmann et al., 2024)。从神经调控的角度来看, 在任务前施加刺激, 4Hz 的 tACS 刺激会降低个体大脑的 θ 频率, 进而增加周期长度, 容纳更多的 γ 周期数量, 增加记忆项

目。但是若在任务后给予刺激，个体 θ 频率趋于稳定，此时的 tACS 刺激则不增加 θ 周长，而是增强 γ 振幅，提升 θ - γ 的相位-振幅耦合(Lega et al., 2016)，进而提高回忆精度。这与先前的研究结果相符(Ruhnau et al., 2016)，Ruhnau 发现 tACS 在 α 频率下能特异性调节视觉皮层活动，但其效果依赖于大脑状态（睁眼更敏感）。在睁眼状态下，视觉皮层 α 振荡较弱，此时 tACS 更容易“驱动”或“重置”神经活动，产生显著的相位锁定。而在闭眼状态下， α 振荡自发增强（“ α 阻断”现象），大脑可能已处于稳定的振荡模式，对外部 tACS 的干扰更具抵抗力。而当任务情景变化时，第一任务中（如颜色）对项目进行表征的 γ 波不再适用于新任务（如方向），在第二任务中的 γ 周期或者振幅可能会发生变化，神经系统需动态调整 θ 周期长度以匹配新项目的编码需求。因此，当任务情景改变时，个体会重新评估自己的资源总量再结合任务特征形成全新的资源权衡策略。

从心理惯性的角度来解释，在多次重复练习过程中，情景表征与该情景下的行为表征之间会建立起紧密的关联，一旦情景表征被激活，与之相关的行为表征也会随之被激活，从而引发自动化的决策或行为(Danner et al., 2008)。因此，在经过多次练习之后，进入正式实验其情景设置与练习阶段相同，被试会自动带入练习阶段使用的资源权衡策略。从结果看，无论是否施加 tACS 刺激，其记忆数量也难以因此发生改变。然而，在被试完成第二任务时，并不会沿用第一任务中的记忆策略。这是因为在稳定的环境中才有利于重复行为，而在不稳定的情景中的行为不易被重复(Ouellette & Wood, 1998)。本研究中实验二的第二任务的任务情境发生了改变，则会根据新的任务要求重新分配自身所拥有的记忆资源，此时会构建并形成新的记忆策略。实验二的结果揭示了个体具备一定的认知灵活性，他们对记忆策略的运用并非一成不变，而是会随着任务情景的改变而相应地进行调整。这表明被试能够根据不同的任务背景，重新评估自身资源状态，灵活地优化其记忆策略，以达到最佳的认知表现。

本研究主要使用两个因变量，其效应量大小在 0.334 至 0.629 范围内，根据对效应量大小的划分(Sawilowsky, 2009)处于中等范围左右，说明实验操纵具有较好的效果。一项综述表明，精神分裂症患者在记忆任务中的表现显著低于健康对照组，整体效应量为 0.452(Lee & Park, 2005)，与本研究的参数效应量处于相似范围。对于因变量 g 值而言，其代表猜测率（guess rate），反映被试在任务中随机猜测的概率。该值的增加可能表明记忆表征的丢失或记忆负荷过高。而 sd 值则代表记忆表征的精度（标准差），其增加可能反映神经噪声增加或绑定能力受损(Schneegans & Bays, 2017)。这些参数的变化不仅在理论上具有重要意义，在临床上也可能具有潜在的应用价值。例如， sd 值和

g 值的变化可以作为评估神经系统退行性疾病或认知老化影响的指标。临床研究表明, 神经系统退行性疾病会影响 sd 值。帕金森患者的工作记忆精度显著低于健康对照组, 只有经过约 3 个月的多巴胺能药物治疗后, 帕金森患者的工作记忆精度显著提高, 达到与健康水平相当(Zokaei et al., 2015)。另外, 认知老化会同时影响 sd 值和 g 值。研究表明, 相比于年轻人, 老年人在 VWM 任务中表现出更高的猜测率和更低的精度(Peich et al., 2013), 这主要归因于老年人的神经活动扩散性和抑制机制减弱, 导致记忆表征不稳定, 容易丢失目标信息 (g 值增加); 同时又导致记忆表征不够精确, 回忆时的变异性增加 (sd 值增加)。未来的研究可以进一步探索这些指标作为诊断工具或干预效果评估指标的潜力。

此外, 经颅交流电刺激 (tACS) 的应用前景广阔, 它可以改善认知功能如注意力、记忆、感知等, 还可以应用于心理健康领域来调节情绪减轻抑郁和焦虑症状, 甚至还可运用于神经疾病和精神疾病等方面的治疗(Tavakoli & Yun, 2017)。已有研究表明, 经颅交流电刺激 (tACS) 作为一种非侵入性的脑刺激技术, 在多种疾病中具有潜在应用价值(Antal & Paulus, 2013; Elyamany et al., 2021; zhang & li, 2022), 包括神经退行性疾病 (阿尔兹海默病、帕金森病), 精神疾病 (精神分裂症、抑郁症、失眠症) 以及其他慢性疼痛等等。精神分裂症患者通常表现出认知功能障碍, 这些认知功能的损害严重影响患者的日常生活质量和功能恢复。一项研究让这些症患者在接受 theta 频段的 tACS 刺激的同时完成 n-back 任务 (一种用于评估工作记忆的任务)。结果发现, 在治疗结束后, 患者的工作记忆、任务处理速度和注意力都得到了显著改善, 并且其效果持续 50 天(Sreeraj et al., 2019)。本研究的发现对于经颅交流电刺激 (tACS) 应用具有深远的意义。任务与 tACS 刺激开始的先后顺序对电刺激的调控效果起着关键作用, 那么在利用刺激作为治疗手段时, 应注意对患者施加的时机, 否则本应观察到的治疗效果, 因施加刺激时机不当而未出现。

尽管本研究成功地验证了我们的实验假设, 但仍存在一些局限性需要指出。首先, 两个实验在方法上有些许不同。实验一的刺激强度调整是从 $1500\mu\text{A}$ 开始, 若产生不适则从 $1000\mu\text{A}$ 开始调整, 而实验二则是以 $50\mu\text{A}$ 增量逐步减弱, 这可能导致两个实验之间的细微差异。同时, 实验一采用了 Guo 等人 (2021) 的实验设计, 在刺激呈现之前先出现前溯线索, 而实验二中则没有前溯线索, 实验一的任务难度会比实验二更大。另外, 本研究也未进一步验证个体化的刺激强度是否诱发了等效电场。未来的研究应采用如 SimNIBS 或 ROAST 等建模工具进行个体头模仿真, 以更精准控制刺激强度与分布, 从而提高神经调控的可比性与解释力。其次, 两个实验在练习阶段均为被试提供了偏差值反馈, 这使得被试能够有效地监控自己资源分配策略的有效性。然而, 在正式实验阶段, 我们

并未提供相应的反馈，导致被试只能依据练习阶段所形成的记忆策略来分配资源。而在实验二的第二个任务的练习阶段，被试能够根据练习阶段的反馈调整自身的策略，形成新的任务图式。因此，本实验可能引入了“反馈”这一额外变量，未来研究应对此变量加以严格控制，以更准确地验证本研究的结论。最后，在实验一的后刺激条件和实验二的第一任务阶段，被试坚持使用练习时形成的记忆策略，这可能是由于被试未能意识到 tACS 刺激能够提升记忆资源。如果我们在指导语阶段明确提示被试资源增加，他们是否会在正式阶段对任务图式进行修改并重新分配资源呢？这一问题有待未来更多研究进行深入探讨和验证。

4 结论

实验结果发现，在任务练习开始之前施加 tACS 刺激会增加 WM 的记忆数量，在练习之后给予 tACS 刺激则会增加记忆精度，但这种调控效果并不固定，遇到新任务时个体会重新构建记忆策略，使得提升的资源被最大化利用。

参考文献

- Alós-Ferrer, C., Hügelschäfer, S., & Li, J. (2016). Inertia and Decision Making. *Frontiers in Psychology*, 7, 169.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00169>
- Antal, A., Boros, K., Poreisz, C., Chaieb, L., Terney, D., & Paulus, W. (2008). Comparatively weak after-effects of transcranial alternating current stimulation (tACS) on cortical excitability in humans. *Brain Stimulation*, 1(2), 97–105.
<https://doi.org/10.1016/j.brs.2007.10.001>
- Antal, A., & Paulus, W. (2013). Transcranial alternating current stimulation (tACS). *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 317. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00317>
- Axmacher, N., Henseler, M. M., Jensen, O., Weinreich, I., Elger, C. E., & Fell, J. (2010). Cross-frequency coupling supports multi-item working memory in the human hippocampus. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(7), 3228–3233. <https://doi.org/10.1073/pnas.0911531107>
- Baddeley, A. (2012). Working Memory: Theories, Models, and Controversies. *Annual Review of Psychology*, 63(1), 1–29.
<https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120710-100422>
- Barton, B., Ester, E. F., & Awh, E. (2009). Discrete resource allocation in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35(5), 1359–1367. <https://doi.org/10.1037/a0015792>
- Bays, P. M., & Husain, M. (2008). Dynamic Shifts of Limited Working Memory Resources in Human Vision. *Science*, 321(5890), 851–854. <https://doi.org/10.1126/science.1158023>
- Bender, M., Romei, V., & Sauseng, P. (2019). Slow Theta tACS of the Right Parietal Cortex Enhances Contralateral Visual Working Memory Capacity. *Brain Topography*, 32(3), 477–481. <https://doi.org/10.1007/s10548-019-00702-2>
- Biel, A. L., Sterner, E., Röhl, L., & Sauseng, P. (2022). Modulating verbal working memory with fronto - parietal transcranial electric stimulation at theta frequency: Does it work? *European Journal of Neuroscience*, 55(2), 405–425.
<https://doi.org/10.1111/ejn.15563>
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Danner, U. N., Aarts, H., & Vries, N. K. (2008). Habit vs. intention in the prediction of future behaviour: The role of frequency, context stability and mental accessibility of past behaviour. *British Journal of Social Psychology*, 47(2), 245–265. <https://doi.org/10.1348/014466607X230876>

Ding, J. (2023). Modulation of working memory capacity on predictive processing during language comprehension.

Language, Cognition and Neuroscience, 38(8), 1133–1152.

Elyamany, O., Leicht, G., Herrmann, C. S., & Mulert, C. (2021). Transcranial alternating current stimulation (tACS): From basic mechanisms towards first applications in psychiatry. *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, 271(1), 135–156. <https://doi.org/10.1007/s00406-020-01209-9>

Ericsson, K. A., & Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological Review*, 102(2), 211–245. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.102.2.211>

Guo, X., Li, Z., Zhang, L., & Liu, Q. (2021). Modulation of Visual Working Memory Performance via Different Theta Frequency Stimulations. *Brain Sciences*, 11(10), 1358. <https://doi.org/10.3390/brainsci11101358>

Haggar, P., Whitmarsh, L., & Skippon, S. M. (2019). Habit discontinuity and student travel mode choice. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 64, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.04.022>

Jaušovec, N., Jaušovec, K., & Pahor, A. (2014). The influence of theta transcranial alternating current stimulation (tACS) on working memory storage and processing functions. *Acta Psychologica*, 146, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2013.11.011>

Jensen, O., & Lisman, J. E. (1998). An Oscillatory Short-Term Memory Buffer Model Can Account for Data on the Sternberg Task. *The Journal of Neuroscience*, 18(24), 10688–10699. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.18-24-10688.1998>

Jensen, O., & Lisman, J. E. (2005). Hippocampal sequence-encoding driven by a cortical multi-item working memory buffer. *Trends in Neurosciences*, 28(2), 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2004.12.001>

Jensen, O., & Mazaheri, A. (2010). Shaping Functional Architecture by Oscillatory Alpha Activity: Gating by Inhibition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4, 186. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00186>

Jones, K. T. (2019). Replacing tDCS with theta tACS provides selective, but not general WM benefits. *Brain Research*, 1720, 146324.

Kleinert, M.-L., & Müller, V. (2017). Frequency-Unspecific Effects of θ -tACS Related to a Visuospatial Working Memory Task. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 367.

Lee, J., & Park, S. (2005). Working Memory Impairments in Schizophrenia: A Meta-Analysis. *Journal of Abnormal Psychology*, 114(4), 599–611. <https://doi.org/10.1037/0021-843X.114.4.599>

Lega, B., Burke, J., Jacobs, J., & Kahana, M. J. (2016). Slow-Theta-to-Gamma Phase–Amplitude Coupling in Human Hippocampus Supports the Formation of New Episodic Memories. *Cerebral Cortex*, 26(1), 268–278.

<https://doi.org/10.1093/cercor/bhu232>

- Liu C.-L., & Zhou R.-L. (2013). Effects of Working Memory Training on Cognition and Brain Plasticity. *Advances in Psychological Science*, 20(7), 1003–1011. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1042.2012.01003>
- 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. <https://doi.org/10.1080/02699931.2020.1795626>
- Nissim, N. R., McAfee, D. C., Edwards, S., Prato, A., Lin, J. X., Lu, Z., Coslett, H. B., & Hamilton, R. H. (2023). Efficacy of Transcranial Alternating Current Stimulation in the Enhancement of Working Memory Performance in Healthy Adults: A Systematic Meta-Analysis. *Neuromodulation: Technology at the Neural Interface*, 26(4), 728–737. <https://doi.org/10.1016/j.neurom.2022.12.014>
- Nitsche, M. A., Cohen, L. G., Wassermann, E. M., Priori, A., Lang, N., Antal, A., Paulus, W., Hummel, F., Boggio, P. S., Fregni, F., & Pascual-Leone, A. (2008). Transcranial direct current stimulation: State of the art 2008. *Brain Stimulation*, 1(3), 206–223. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2008.06.004>
- Ouellette, J. A., & Wood, W. (1998). Habit and Intention in Everyday Life: The Multiple Processes by Which Past Behavior Predicts Future Behavior. *Psychological Bulletin*, 124(1), 54–74.
- Paßmann, S., Baselgia, S., Kasten, F. H., Herrmann, C. S., & Rasch, B. (2024). Differential online and offline effects of theta-tACS on memory encoding and retrieval. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 24(5), 894–911. <https://doi.org/10.3758/s13415-024-01204-w>
- Peich, M.-C., Husain, M., & Bays, P. M. (2013). Age-related decline of precision and binding in visual working memory. *Psychology and Aging*, 28(3), 729–743. <https://doi.org/10.1037/a0033236>
- Pupíková, M., Maceira-Elvira, P., Harquel, S., Šimko, P., Popa, T., Gajdoš, M., Lamoš, M., Nench, U., Mitterová, K., Šimo, A., Hummel, F. C., & Rektorová, I. (2024). Physiology-inspired bifocal fronto-parietal tACS for working memory enhancement. *Heliyon*, 10(18), e37427. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37427>
- Riecke, L., Formisano, E., Herrmann, C. S., & Sack, A. T. (2015). 4-Hz Transcranial Alternating Current Stimulation Phase Modulates Hearing. *Brain Stimulation*, 8(4), 777–783. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2015.04.004>
- Ruhnau, P., Neuling, T., Fuscá, M., Herrmann, C. S., Demarchi, G., & Weisz, N. (2016). Eyes wide shut: Transcranial alternating current stimulation drives alpha rhythm in a state dependent manner. *Scientific Reports*, 6(1), 27138. <https://doi.org/10.1038/srep27138>
- Samuelson, W., & Zeckhauser, R. (1988). Status quo bias in decision making. *Journal of Risk and Uncertainty*, 1(1), 7–59.

<https://doi.org/10.1007/BF00055564>

Sawilowsky, S. S. (2009). New Effect Size Rules of Thumb. *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 8(2), 597–599.

<https://doi.org/10.22237/jmasm/1257035100>

Schneegans, S., & Bays, P. M. (2017). Neural Architecture for Feature Binding in Visual Working Memory. *The Journal of Neuroscience*, 37(14), 3913–3925. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3493-16.2017>

Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological Review*, 84(2), 127–190.

<https://doi.org/10.1037/0033-295x.84.2.127>

Spitzer, B., & Blankenburg, F. (2011). Stimulus-dependent EEG activity reflects internal updating of tactile working memory in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(20), 8444–8449.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1104189108>

Sreeraj, V. S., Shivakumar, V., Sowmya, S., Bose, A., Nawani, H., Narayanaswamy, J. C., & Venkatasubramanian, G. (2019).

Online Theta Frequency Transcranial Alternating Current Stimulation for Cognitive Remediation in Schizophrenia: A Case Report and Review of Literature. *The Journal of ECT*, 35(2), 139–143.

<https://doi.org/10.1097/ycet.0000000000000523>

Suchow, J. W., Brady, T. F., Fougine, D., & Alvarez, G. A. (2013). Modeling visual working memory with the MemToolbox.

Journal of Vision, 13(10), 9–9. <https://doi.org/10.1167/13.10.9>

Sweller, J., J. G. van Merriënboer, J., & G. W. C. Paas, F. (1998). Cognitive Architecture and Instructional Design.

Educational Psychology Review, 10(3), 251–296.

Tavakoli, A. V., & Yun, K. (2017). Transcranial Alternating Current Stimulation (tACS) Mechanisms and Protocols. *Frontiers*

in Cellular Neuroscience, 11, 214. <https://doi.org/10.3389/fncel.2017.00214>

Tseng, P. (2018). The critical role of phase difference in theta oscillation between bilateral parietal cortices for visuospatial working memory. *Scientific Reports*, 8(1), 349.

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. <https://doi.org/10.1038/nature04171>

Wang, S., Itthipuripat, S., & Ku, Y. (2019). Electrical Stimulation Over Human Posterior Parietal Cortex Selectively

Enhances the Capacity of Visual Short-Term Memory. *The Journal of Neuroscience*, 39(3), 528–536.

<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1959-18.2018>

-
- Wolinski, N., Cooper, N. R., Sauseng, P., & Romei, V. (2018). The speed of parietal theta frequency drives visuospatial working memory capacity. *PLOS Biology*, 16(3), e2005348. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2005348>
- Ye, C., Hu, Z., Li, H., Ristaniemi, T., Liu, Q., & Liu, T. (2017). A two-phase model of resource allocation in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 43(10), 1557–1566. <https://doi.org/10.1037/xlm0000376>
- Ye, C., Sun, H.-J., Xu, Q., Liang, T., Zhang, Y., & Liu, Q. (2019). Working memory capacity affects trade-off between quality and quantity only when stimulus exposure duration is sufficient: Evidence for the two-phase model. *Scientific Reports*, 9(1), 8727. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44998-3>
- zhang siyuan, & li xuebing. (2022). The application of different frequencies of transcranial alternating current stimulation in mental disorders. *Advances in Psychological Science*, 30(9), 2053. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1042.2022.02053>
- Zhang, D.-W., Moraidis, A., & Klingberg, T. (2022). Individually tuned theta HD-tACS improves spatial performance. *Brain Stimulation*, 15(6), 1439–1447. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2022.10.009>
- Zhang, W., & Luck, S. J. (2008). Discrete fixed-resolution representations in visual working memory. *Nature*, 453(7192), 233–235. <https://doi.org/10.1038/nature06860>
- Zhang, X., Wang, W., Duan, H., Zhao, Y., Kan, Y., & Hu, W. (2019). Effect of Working Memory on Insight and Analytic Problem Solving. *Journal of Psychological Science*, 42(4), 777–783.
- Zokaei, N., Burnett Heyes, S., Gorgoraptis, N., Budhdeo, S., & Husain, M. (2015). Working memory recall precision is a more sensitive index than span. *Journal of Neuropsychology*, 9(2), 319–329. <https://doi.org/10.1111/jnp.12052>

The Impact of tACS Stimulation Timing on the Modulation of Working Memory

Ruiqiao Guo¹⁺, Wenrui Li²⁺, Xue Guo³, Na Zhao⁴, LEI Ming⁵, Qiang Liu¹

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

(²*Psychology and Neuroscience of Cognition Research Unit, University of Liège, Place de Orateurs, 4000 Liège, Belgium*)

(³*Non-Invasive Brain Stimulation Lab, Department of Neurology, University Medical Center Göttingen, Göttingen, 37075 German*)

(⁴*Brain and Cognitive Neuroscience Research Center, Liaoning Normal University, 116029 Liaoning, China*)

(⁵*Psychological Research and Counseling Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China*)

Co-First Authors: Author “Ruiqiao Guo” and Author “Wenrui Li” contributed equally to this work.

ABSTRACT

Previous studies have demonstrated that tACS can expand cognitive resources, thereby improving working memory (WM) performance, while some studies failed to observe a definitive advantage of tACS in boosting WM. Regarding this ongoing debate, this study sought to explore the effect of tACS on working memory by involving the factor of psychological inertia. Psychological inertia refers to the unconscious, automatic behavior of an individual. The conflict between psychological inertia and rational decision-making could lead to a loss of optimal choice.

In Experiment 1, 36 participants completed a color recall reporting task. Active or sham tACS was applied before or after practice to manipulate the amount of memory resources at the initial stage. The results confirmed our hypothesis that participants who received active tACS after practice (post-practice) adopted similar memory strategies to those receiving sham stimulation due to a psychological inertia. They exhibited a trade-off between quantity and quality, i.e., post-practice tACS could boost memory accuracy with comparable quantity; while pre-practice stimulation improved memory quantity with comparable accuracy.

To investigate whether the regulatory effects of the first task would carry over to the second task, 56 participants completed both color and orientation recall reporting tasks in Experiment 2, where tACS stimulation was applied after the practice of the first task. The results revealed that memory accuracy was improved while the quantity was unchanged in the first task, which is consistent with the results from the group receiving post-practice tACS in Experiment 1. However, the memory quantity was enhanced and the accuracy was kept unchanged in the second task, consistent with the results of pre-practice tACS in Experiment 1. This indicates that psychological inertia can be disrupted in new situations, leading to new strategies.

The regulatory effects of tACS on WM are modulated by the timing of stimulation. That is, pre-practice tACS influences the memory quantity, and post-practice tACS affects memory accuracy. Furthermore, the regulatory effects that were established during the first task may be disrupted when encountering a new task. These findings clarify the optimal temporal window for tACS intervention, providing a precise reference for clinical cognitive rehabilitation, such as early intervention in Alzheimer's disease.

Keywords: tACS, working memory, accuracy-quantity trade-off, 4 Hz theta, psychological inertia