

无创神经调控技术在健康成年人认知改善中的应用进展

董一^{1,2}, 周子健^{1,2}, 吕少博^{1,2*}, 王长明^{1,2}

¹华北理工大学心理与精神卫生学院, 河北 唐山

²河北省心理健康与脑科学重点实验室, 河北 唐山

收稿日期: 2026年2月26日; 录用日期: 2026年4月20日; 发布日期: 2026年4月30日

摘要

无创神经调控已经成为认知神经科学研究和脑功能强化的核心工具。本文旨在系统梳理近年来NIBS在改善健康成年人认知功能方面的研究进展。全文从三个核心维度展开: 首先, 深入剖析不同调控器械的起效机制; 其次, 探讨不同刺激方式对神经可塑性效应的调制作用; 最后, 系统总结NIBS在不同认知领域中的应用成果。为认知增强领域的实验设计提供了全面的理论框架。

关键词

无创神经调控, 经颅磁刺激, 经颅电刺激, 经颅光生物调节

Application Progress of Non-Invasive Brain Stimulation in Cognitive Enhancement for Healthy Adults

Yi Dong^{1,2}, Zijian Zhou^{1,2}, Shaobo Lyu^{1,2*}, Changming Wang^{1,2}

¹School of Psychology and Mental Health, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

²Hebei Key Laboratory of Mental Health and Brain Science, Tangshan Hebei

Received: February 26, 2026; accepted: April 20, 2026; published: April 30, 2026

Abstract

Non-invasive brain stimulation (NIBS) has emerged as a core tool in cognitive neuroscience research

*通讯作者。

文章引用: 董一, 周子健, 吕少博, 王长明(2026). 无创神经调控技术在健康成年人认知改善中的应用进展. *心理学进展* 16(4), 561-569. DOI: 10.12677/ap.2026.164230

and brain function enhancement. This paper aims to systematically review the recent research progress of NIBS in improving the cognitive functions of healthy adults. The review unfolds across three core dimensions: first, an in-depth analysis of the mechanisms of action of different neuromodulation devices; second, an exploration of the modulating effects of various stimulation modalities on neuroplasticity; and finally, a systematic summary of the application outcomes of NIBS across different cognitive domains. This provides a comprehensive theoretical framework for experimental design in the field of cognitive enhancement.

Keywords

Non-Invasive Brain Stimulation (NIBS), Transcranial Magnetic Stimulation (TMS), Transcranial Alternating Current Stimulation (tACS), Transcranial Photobiomodulation (tPBM)

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

提升健康人群的高级认知能力一直是认知神经科学领域的核心目标之一。近年来,无创神经调控(Non-invasive Brain Stimulation, NIBS)技术凭借其安全性、无创性及在调节神经可塑性方面的独特优势,其应用范围已从传统的临床神经精神疾病康复,迅速拓展至健康成年人的认知增强领域(Luber & Lisanby, 2014)。早期的 NIBS 研究主要依赖于经颅直流电刺激(tDCS)和经颅磁刺激(TMS),通过极化浅层皮层神经元的静息膜电位或诱导长时程增强(LTP)样效应,来考察单一脑区(如背外侧前额叶)对特定认知行为的因果性贡献。然而,人类复杂的认知功能并非由孤立的脑区主导,而是高度依赖于大尺度脑网络(Large-scale brain networks)内部及网络间的动态信息交互与相位同步(Polanía et al., 2018)。随着高分辨率多模态神经影像学(如 fMRI 和 EEG)的发展,以及新型调控手段的涌现,当前认知调控的研究范式正在发生深刻转变(Chen et al., 2024)。一方面,干预策略正从静态的“开环”刺激转向结合即时认知状态与内源性脑电节律的“闭环”或“状态依赖性”同步调控;另一方面,以经颅干涉刺激(TI)、以及声光调控为代表的新兴技术,成功突破了传统电磁刺激的穿透深度瓶颈,使得无创、精准干预海马体、丘脑等深部认知枢纽成为现实。

尽管现有研究展示了 NIBS 在认知强化方面的巨大潜力,但由于调控器械的物理属性、刺激参数的组合策略以及所涉及认知维度的不同,其底层神经生物学机制呈现出高度的复杂性。基于此,本文旨在系统梳理近年来 NIBS 在健康成年人认知功能改善中的应用进展。文章将围绕“不同调控器械的物理与靶向机制”、“刺激方式与策略的演进”以及“多维度认知领域的应用突破”三大主线展开,旨在为未来的精准化、网络化、多模态融合认知干预研究提供全面的理论框架。

2. 主要的无创神经调控技术

2.1. 电刺激

经颅电刺激主要包括经颅直流电刺激(tDCS)、交流电刺激(tACS),它们通过不同的电生理机制深刻重塑大脑网络以提升认知功能。tDCS 通过微弱恒定电流(1~2 mA)调节皮层兴奋性,其中阳极诱导静息膜电位去极化以增加放电概率,阴极则引起超极化(Nitsche & Paulus, 2000)。这种极化效应不仅局限于浅层,更能引发全脑大尺度网络(如默认模式网络 DMN 或额顶网络 FPN)的广泛重组(Keeser et al., 2011);例如, fMRI-DCM 分析证实 tDCS 可系统性重塑左侧额颞语言网络的有效连接以促进动词学习(Fiori et al., 2018),

研究亦发现靶向左侧背外侧前额叶(IDLPFC)的刺激能在全脑泛化出显著的血氧依赖(BOLD)信号重组(Nakashima et al., 2021)。相比之下, tACS 不同于持续的电位极化, 它利用特定频率(如 Theta 4~8 Hz, Gamma > 30 Hz)的振荡电流, 直接与大体内源性神经振荡产生“夹带效应”(Elyamany et al., 2021)。这使得 tACS 在调控高度依赖相位同步的认知过程中展现出独特优势, 例如采用“Theta 包络 Gamma”模式刺激前额叶, 成功放大了局部交叉频率耦合以显著提升空间工作记忆表现(Alekseichuk et al., 2016); 而在探索跨区域深部网络同步时, 对楔前叶施加包含 Gamma 特征的双重电磁刺激, 通过强化特定频段皮层节律有效增强了楔前叶与深部海马体网络的连结效率, 最终在健康人群中实现了长达数天的长时记忆显著提升(Borghi et al., 2025)。

2.2. 经颅磁刺激(TMS)

TMS 基于电磁感应原理在皮层诱发电流, 以毫米级的高空间分辨率直接触发神经元动作电位。其衍生模式中, 高频重复经颅磁刺激(rTMS, >5 Hz)与间歇性 Theta 阵发刺激(iTBS)能高效诱发长时程增强(LTP)样突触可塑性, 在重塑额顶网络及提升执行控制能力方面获得大量实证支持。在调控效率上, iTBS 可通过模拟内源性节律耦合高效诱导可塑性, 研究发现仅对左侧背外侧前额叶(IDLPFC)施加 3 分钟 iTBS, 即可显著增强额叶任务相关 Theta 频段同步性, 并在后续 40 分钟内持续提升工作记忆表现(Nikolin et al., 2018)。在干预策略上, 网络节点的即时活跃度深刻调制刺激后效, 研究证实, 将 10 Hz rTMS 与在线认知任务同步结合的“状态依赖性”干预, 较静息态刺激诱发了更显著且持久的离线工作记忆增效(Bakulin et al., 2020)。

2.3. 颞干涉刺激(TI)

传统的 tES 和 TMS 均难以在不激活浅层皮层的情况下调控深部脑区。颞干涉刺激(TI)技术通过在头皮输入两组高频交流电, 利用其在深部组织相交产生“包络干涉”的原理, 在目标靶区形成低频调控电场, 极大地拓宽了认知增强的解剖学边界(Grossman et al., 2017)。在深部核团调控方面, 有研究首次证实 TI 可精准靶向海马体(Violante et al., 2023)。研究通过设置 5 Hz 的频差(Theta 节律)进行在线刺激, 同步 fMRI 数据显示干预电场成功聚焦于海马体且避开了浅层皮层, 行为学结果证实受试者的面孔-名字联想记忆编码准确率显著提升。在网络层级调控方面, 利用多靶点 TI 刺激聚焦健康受试者的右侧额顶网络(rFPN), 发现 TI 不仅提升了高负荷 N-back 任务表现, 更通过增强网络内部有效功能连接优化了高认知负荷下的信息处理效率(Zheng et al., 2025)。此外, TI 在安全性与科研严谨性上具有独特优势。研究指出, 由于载波频率(>1000 Hz)超过了皮肤痛觉感受器的响应极限, TI 极少引起刺痛或光幻觉等副反应(Zhu et al., 2022)。这不仅允许更高强度的能量深部传输, 也确保了双盲实验中极高的盲法可靠性, 使认知增强结论更具科学严谨性。

2.4. 听觉刺激

声音神经调控主要通过听觉稳态响应(ASSR)诱导全脑特定频段的神经节律同步。在健康成年人中, 基于感觉刺激的 Gamma 频段夹带(GENUS)展现出巨大的认知增强潜力。研究证实, 使用 40 Hz 调幅听觉刺激能在全脑范围内诱发显著的 Gamma 共振。在电生理层面, 通过高分辨率 EEG 证实, 40 Hz 双耳声学刺激能迅速激发额顶区与刺激锁相的 Gamma 功率增强, 且这种网络同步具有显著的离线延续效应, 提升了受试者在词汇工作记忆任务中的准确率与容量(Jirakittayakorn & Wongsawat, 2017)。在跨模态调节方面, 利用“注意瞬脱”(AB)范式发现, 40 Hz 听觉干预能有效缓解注意瞬脱现象, 表明其诱导的 Gamma 振荡优化了执行控制资源并加快了视觉信息的处理速度(Ross & Lopez, 2020)。研究发现, 在执行 2-back 或 3-back 任务时, 背景同步播放的 40 Hz 调幅音频能一致性缩短反应时间, 且不引发“速度-准确率权

衡”效应(Wang et al., 2022)。结合 fMRI 的交叉验证表明, 这种增效机制源于 40 Hz 刺激增强了额顶网络(FPN)与内侧颞叶海马系统之间的有效功能连结, 使大脑能以更低的代谢代价完成高负荷计算。

2.5. 近红外光调控(tPBM)

经颅光生物调节(tPBM)通常利用 810 nm 或 1064 nm 近红外光(NIR)穿透颅骨, 其核心机制在于光子被线粒体呼吸链中的细胞色素 c 氧化酶(CCO)吸收, 通过上调 ATP 合成及改善局部脑血流, 实现“代谢驱动”的神经干预。与传统的电磁刺激不同, tPBM 过程完全无感, 且兼具神经保护与抗疲劳效应(Tian et al., 2016)。在注意力与警觉性维护方面, 经典实证研究发现, 对健康受试者右侧前额叶(rPFC)施加 1064 nm 激光刺激, 能显著缩短其在精神运动警觉性任务(PVT)中的反应时间, 并大幅减少高负荷测试中的“注意力走神”次数, 证实了其通过代谢支持延缓认知疲劳的作用(Barrett & Gonzalez-Lima, 2013)。在认知灵活性方面, tPBM 表现出显著的任务特异性, 双分离实验证实, 靶向 rPFC 的干预仅能加速依赖执行控制网络的“基于规则”学习, 而对纹状体驱动的学习过程无效, 体现了其对前额叶高级功能的精准强化(Blanco et al., 2017)。此外, 多模态影像学实证进一步确立了其作为“脑能量补给”技术的地位。通过结合 fNIRS 技术发现, tPBM 照射不仅能显著提升健康成年人前额叶的氧化细胞色素 c 氧化酶(Δ CCO)浓度, 还能诱发持久的氧合血红蛋白(HbO)水平上升(Wang et al., 2016)。这种实时的代谢指标跃升, 为行为学层面的执行控制能力提升提供了坚实的生理学因果证据。

3. 实施闭环的神经调控

长期以来, 传统的无创神经调控(NIBS)多采用开环模式, 即研究者依据标准化的预设参数向目标脑区施加干预。这种模式将大脑视为一个被动的信号接收器, 忽略了大脑皮层兴奋性和内源性神经活动的瞬息万变。这种静态干预往往导致认知增强效应的组内与个体间差异巨大, 且结果的可重复性较低。为了突破这一技术瓶颈, 研究者开始进行了转变, 即结合即时认知状态与实施刺激, 视线“闭环”同步调控。

3.1. 认知状态依赖性调控

现代神经可塑性理论认为, 外源性刺激引发的效应并非一成不变, 而是高度依赖于目标神经网络在接受刺激时的即时活动状态(即“状态依赖性”)。在认知增效的实证研究中, 研究发现, 当受试者积极执行某项认知任务时, 相关的特定神经网络会被预先激活。此时靶向施加刺激, 能够更精准地与活跃状态的突触产生协同共振, 使得有限的电磁能量优先沿着正在处理认知信息的特定神经通路传导(Silvanto et al., 2008)。

3.2. 基于脑电节律的闭环神经调控

人类的各种高级认知过程由特定频段(如 Theta、Alpha)的大脑节律驱动。闭环系统通过高时间分辨率的脑电图(EEG), 实时读取并分析受试者的脑电振荡信号。在闭环模式下, 刺激系统通过算法实时提取特定频段的相位(Phase)或功率(Power)特征, 并在内源性节律达到最适宜的瞬间触发干预。例如, 初级视觉皮层或运动皮层的兴奋性随 Alpha 节律周期性波动。研究表明, 在 Alpha 振荡的波谷精准触发单脉冲 TMS 或特定相位的 tACS, 能够最大化地诱导“夹带效应”。并重塑网络连接强度(Thut et al., 2011; Zrenner et al., 2018)。这种闭环干预不仅大幅降低了干预的脱靶率和无用功, 还能实现对特定认知通路的“因人而异、因时而制”的精准强化。

4. 认知领域的调控进展

NIBS 在健康成年人中的应用几乎涵盖了高级认知的所有维度。以下针对几个关键认知类型的调控机

制进行深度阐述。

4.1. 工作记忆

工作记忆是大脑在线处理信息的核心，其调控靶点主要聚焦于双侧背外侧前额叶(DLPFC)及额顶网络(FPN)。研究证实，利用阳极 tDCS 或高频 rTMS/iTBS 刺激左侧 DLPFC，能显著提升 N-back 等执行控制任务的反应速度与准确率。在电生理机制层面，双盲研究发现，对左侧 DLPFC 施加阳极 tDCS 不仅改善了 2-back 任务表现，还显著增强了额叶任务相关的 Theta 频段(4~8 Hz)振荡功率(Zachle et al., 2011)。为最大化磁刺激诱导的长时程增强(LTP)样效应，有研究提出了“状态依赖性(State-dependency)”干预策略(Bakulin et al., 2020)。实证结果显示，将 10 Hz rTMS 靶向左侧 DLPFC 并与在线(Online)任务同步结合，诱发了比静息态刺激更持久且显著的离线表现提升。这表明在网络节点处于活跃计算状态时施加电磁脉冲，能最有效地强化执行控制网络的突触连接。针对传统手段难以触及深层枢纽的局限，利用新兴的颞干涉刺激(TI)实现了范式突破(Zheng et al., 2025)。

4.2. 情景记忆

情景记忆对个体的前瞻性决策与情绪调节至关重要(Schacter et al., 2012)。该功能依托于由海马体、楔前叶及内侧前额叶构成的核心神经网络。针对深部记忆枢纽的无创干预，在 *Science* 上发表的经典实验证实通过高频 rTMS 刺激与海马体强连接的左侧外侧顶叶皮层，可自上而下地驱动整个“海马-皮层网络”的静息态功能连接增强，并提升联想记忆表现(Wang et al., 2014)。在情景模拟维度，EFT 高度依赖内侧前额叶及左侧角回(AG)等核心节点。系列实证研究表明，利用抑制性 NIBS 干预(如 cTBS)扰乱左侧角回等节点，会导致受试者生成未来情景时的“内部情景细节”显著减少(Thakral et al., 2017; Thakral et al., 2020)。相对应地，若采用情景特异性诱导(ESI)等干预策略，则能特异性地增加受试者的内部情景细节(如生动的感官、时空感知)，而对外部语义细节无显著影响(Madore et al., 2016)。

4.3. 语言与语义加工

大量研究证实，对左侧额下回、左侧颞中回及角回等区域施加 tDCS 可以加速健康个体的动词学习速度，并在语义判断任务(Semantic Judgment Task)中显著降低对有意义刺激的反应时间。功能磁共振(fMRI)表明，这种改善源于语义网络内部信息流有效连接的优化。发表在 *NeuroImage* 上的实证研究揭示了 tDCS 促进新词学习的网络机制(Fiori et al., 2018)。研究团队让健康受试者在接受靶向左侧前额叶的阳极 tDCS 刺激的同时，进行一项新的动词学习任务。与假刺激组相比，真实刺激组显著提高了动词命名的准确率，且这种学习优势具有特异性。利用 fMRI 的动态因果建模分析发现，tDCS 的促学效应并非仅仅源于额下回(IFG)局部活动的增加，更关键的是，它显著增强了左侧额下回与左侧颞下回之间双向的有效连接强度。这证明了无创电刺激通过强化“额-颞语言通路”的信息交互，提升了大脑对新语义信息的编码效率。针对语义加工的速度与自动化处理，有研究开展了一项精细设计的双盲交叉对照实验(Joyal & Fecteau, 2016)。他们将阳极 tDCS 电极置于健康受试者的左侧顶颞交界区(CP5, 覆盖角回及 Wernicke 区附近，要求受试者完成语义判断任务(判断呈现的词汇是否具有语义关联)。tDCS 极具选择性地缩短了受试者对“有意义词汇”的反应时间(RT)，而对无意义假词的处理速度无影响。这表明 tDCS 能够精准易化语义网络中已存表征的提取过程，且这种效应通过调节顶颞联合区这一语义整合枢纽的兴奋性来实现。

4.4. 社会认知

传统的认知干预多聚焦于工作记忆。然而，现实生活中的认知往往是高度社会化和充满不确定性的

认知过程。无创神经调控在揭示和干预决策偏好及社会互动行为中发挥了因果验证的关键作用。个体的决策行为高度依赖于前额叶-纹状体奖赏网络的动态平衡。研究发现,对健康受试者的双侧 DLPFC 施加 tDCS (如右阳极/左阴极),可以显著改变其在爱荷华赌博任务(IGT)或气球收集风险任务(BART)中的风险规避倾向。增强右侧 DLPFC 的兴奋性通常会导致个体在面对潜在损失时采取更保守、更有远见的决策策略(Fecteau et al., 2007)。在需要权衡“即时小奖励”与“延迟大奖励”的跨期决策(Intertemporal Choice)中,使用 rTMS 抑制腹内侧前额叶(vmPFC)或增强左侧 DLPFC,能有效降低个体的延迟折扣率,增强对长期目标的控制力(Figner et al., 2010)。右侧 TPJ 是负责视角转换和共情的核心区域。研究表明,在健康成年人中,使用 tDCS 阳极刺激 rTPJ,能够显著提升受试者在“读心任务”(如通过眼睛推测情绪)中的准确率,并增强对他人的认知共情能力。经典研究表明,使用 tDCS 改变外侧前额叶皮层的兴奋性,可以直接调控健康参与者在经济博弈(如最后通牒博弈)中对社会公平规范的遵从度(Ruff et al., 2013)。这证明了高级道德和群体行为可以通过调节特定的神经回路来施加因果影响。

5. 当前的局限性与挑战

尽管无创神经调控在健康成年人的认知改善领域展现出巨大潜力,但目前该领域仍面临诸多亟待解决的科学与伦理挑战。客观审视这些局限性,是推动该技术从实验室走向现实应用的必经之路。

5.1. 结果的可重复性危机

NIBS 领域广泛存在“可重复性危机”(Reproducibility Crisis)。许多早期研究报告的显著认知增强效应,在后续的大样本或严格控制的重复实验中往往难以重现,或仅呈现出极小的效应量(López-Alonso et al., 2018)。研究指出,在健康的受试群体中,针对单一认知域的开环电刺激干预常常会产生无效结果(Null Results) (Guerra et al., 2020)。这种现象部分归因于出版偏倚(Publication Bias),即阳性结果更容易被优先发表,而大量无效或负面结果被忽略。此外,刺激参数设定(如电流强度、刺激时长、电极放置位置)缺乏统一的金标准,也极大降低了跨研究间结果的可比性与可靠性(Guerra et al., 2020)。

5.2. 个体响应的异质性

大量实证研究表明,个体对 NIBS 的响应存在极大的异质性(Inter-individual variability)。在接受完全相同的刺激方案后,并非所有受试者都会表现出预期的皮层兴奋性增加或认知提升。聚类分析显示,在经典的 NIBS 干预中,往往只有不到一半的健康受试者(约 39%~45%)表现出预期的突触可塑性反应(López-Alonso et al., 2014)。这种“非响应者”现象受多种因素严格调制,包括个体的基线神经可塑性、皮层厚度与颅骨解剖结构的物理差异,以及刺激发生时的实时大脑功能状态(Guerra et al., 2020)。同时,对于健康人群而言,由于存在“天花板效应”(Ceiling effects),其基线认知能力较强或特定脑网络连接已处于较优状态,往往更难从外源性电磁刺激中获得显著的额外增益(López-Alonso et al., 2018)。

5.3. 安慰剂效应与盲法控制

在健康人的认知增强研究中,有效的假刺激(Sham Stimulation)控制是确保结论严谨性的基石。然而,传统的盲法设计往往存在漏洞。高强度的电磁刺激容易引起头皮刺痛、肌肉抽动或光幻觉等外周感知副反应,这使得部分受试者能够准确猜出自己属于真实刺激组还是假刺激组(Guerra et al., 2020)。这种盲法破缺会导致强烈的安慰剂效应(Placebo Effect),受试者因预期心理而在行为表现上产生主观改善,从而夸大了 NIBS 的真实认知增效作用。因此,开发更具隐蔽性的主动假刺激(Active Sham)协议以有效排除安慰剂干扰,是未来实验设计的核心挑战。

5.4. 伦理挑战与“神经兴奋剂”

随着 NIBS 技术逐渐走向商业化, 针对健康人群的“神经增强”引发了深刻的神经伦理争议(Park, 2017)。在竞技体育、电子竞技以及高风险职业选拔中, 使用 tDCS 等设备提升注意力、反应速度或运动学习能力的现象, 被称为“神经兴奋剂”(Neuro-Doping)或“脑兴奋剂”。这不仅打破了竞争的公平性原则, 还可能导致“强制性增强”的社会隐性压力——即个体为了不被淘汰而被迫使用调控设备(Park, 2017)。此外, 目前尚缺乏对长期、频繁使用家用 NIBS 设备(如 DIY-tDCS)的纵向安全性追踪。在缺乏专业医疗监督的情况下, 长期跨频段干预大脑节律是否会引起不可逆的代偿性认知损耗或神经网络病理性重塑, 仍是悬而未决的安全隐患。

6. 结论与展望

综述表明, 无创神经调控(NIBS)在改善健康成年人认知能力方面的研究, 已逐渐成熟。尽管当前实证数据已初步验证了其增效作用, 但为实现从“实验室研究”向“个体化精准干预”的跨越, 未来的研究应在以下三个方面寻求突破:

首先, 传统的定位方法(如 10-20 系统)忽略了脑回解剖结构的显著个体差异。未来研究将深度集成高精度头模技术, 通过个体化 MRI 三维重建, 利用计算神经科学手段精确模拟电场/磁场在脑组织中的空间分布。确保能量能够精准聚焦于功能性靶点, 最大限度地降低个体间效应量的变异性。其次, 未来的闭环干预策略将不再局限于简单的节律反馈, 而是深度融合 EEGLAB 等高级数据分析平台, 提取更具功能特异性的神经生物学标志物。例如, 通过识别视觉加工中的 N170 成分或工作记忆中的 Theta-Gamma 跨频率网络耦合(CFC), 系统可以在特定的认知负荷或相位状态下瞬时触发刺激。这种基于时空特异性特征的闭环模式, 将显著提升突触可塑性的诱导效率。最后, NIBS 的最终目标是提升现实生活中的认知弹性。因此, 未来的实验设计将更多地结合虚拟现实(VR)及生态化认知任务, 考察刺激效应在复杂、多变环境下的迁移与延续。

总之, 随着计算模型、实时信号处理与新型物理载体的深度融合, 无创神经调控将为健康成年人开发出更高效、更个体化的大脑训练方案, 进一步揭示人类认知潜能的神经界限。同时, 针对健康人群的认知增强, 必须在提升“认知极限”与保障神经伦理安全之间寻求平衡。

参考文献

- Alekseichuk, I., Turi, Z., Amador de Lara, G., Antal, A., & Paulus, W. (2016). Spatial Working Memory in Humans Depends on Theta and High Gamma Synchronization in the Prefrontal Cortex. *Current Biology*, 26, 1513-1521. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.04.035>
- Bakulin, I., Zabirowa, A., Lagoda, D., Poydasheva, A., Cherkasova, A., Pavlov, N. et al. (2020). Combining HF rTMS over the Left DLPFC with Concurrent Cognitive Activity for the Offline Modulation of Working Memory in Healthy Volunteers: A Proof-of-Concept Study. *Brain Sciences*, 10, Article No. 83. <https://doi.org/10.3390/brainsci10020083>
- Barrett, D. W., & Gonzalez-Lima, F. (2013). Transcranial Infrared Laser Stimulation Produces Beneficial Cognitive and Emotional Effects in Humans. *Neuroscience*, 230, 13-23. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2012.11.016>
- Blanco, N. J., Maddox, W. T., & Gonzalez-Lima, F. (2017). Improving Executive Function Using Transcranial Infrared Laser Stimulation. *Journal of Neuropsychology*, 11, 14-25. <https://doi.org/10.1111/jnp.12074>
- Borghgi, I., Mencarelli, L., Maiella, M., Casula, E. P., Ferraresi, M., Candeo, F., Koch, G. et al. (2025). Dual Transcranial Electromagnetic Stimulation of the Precuneus Boosts Human Long-Term Memory. *eLife*, 14, RP104220.
- Chen, R., Huang, L., Wang, R., Fei, J., Wang, H., & Wang, J. (2024). Advances in Non-Invasive Neuromodulation Techniques for Improving Cognitive Function: A Review. *Brain Sciences*, 14, Article No. 354. <https://doi.org/10.3390/brainsci14040354>
- 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, 135-156. <https://doi.org/10.1007/s00406-020-01209-9>
- Fecteau, S., Knoch, D., Fregni, F., Sultani, N., Boggio, P., & Pascual-Leone, A. (2007). Diminishing Risk-Taking Behavior by Modulating Activity in the Prefrontal Cortex: A Direct Current Stimulation Study. *The Journal of Neuroscience*, 27, 12500-12505. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.3283-07.2007>
- Figner, B., Knoch, D., Johnson, E. J., Krosch, A. R., Lisanby, S. H., Fehr, E. et al. (2010). Lateral Prefrontal Cortex and Self-Control in Intertemporal Choice. *Nature Neuroscience*, 13, 538-539. <https://doi.org/10.1038/nn.2516>
- Fiori, V., Kunz, L., Kuhnke, P., Marangolo, P., & Hartwigsen, G. (2018). Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS) Facilitates Verb Learning by Altering Effective Connectivity in the Healthy Brain. *NeuroImage*, 181, 550-559. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.07.040>
- Grossman, N., Bono, D., Dedic, N., Kodandaramaiah, S. B., Rudenko, A., Suk, H. et al. (2017). Noninvasive Deep Brain Stimulation via Temporally Interfering Electric Fields. *Cell*, 169, 1029-1041.e16. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2017.05.024>
- Guerra, A., López-Alonso, V., Cheeran, B., & Suppa, A. (2020). Variability in Non-Invasive Brain Stimulation Studies: Reasons and Results. *Neuroscience Letters*, 719, Article ID: 133330. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2017.12.058>
- Jirakittayakorn, N., & Wongsawat, Y. (2017). Brain Responses to 40-Hz Binaural Beat and Effects on Emotion and Memory. *International Journal of Psychophysiology*, 120, 96-107. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2017.07.010>
- Joyal, M., & Fecteau, S. (2016). Transcranial Direct Current Stimulation Effects on Semantic Processing in Healthy Individuals. *Brain Stimulation*, 9, 682-691. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.05.003>
- Keeser, D., Meindl, T., Bor, J., Palm, U., Pogarell, O., Mulert, C. et al. (2011). Prefrontal Transcranial Direct Current Stimulation Changes Connectivity of Resting-State Networks during fMRI. *The Journal of Neuroscience*, 31, 15284-15293. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.0542-11.2011>
- López-Alonso, V., Cheeran, B., Río-Rodríguez, D., & Fernández-del-Olmo, M. (2014). Inter-Individual Variability in Response to Non-Invasive Brain Stimulation Paradigms. *Brain Stimulation*, 7, 372-380. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2014.02.004>
- López-Alonso, V., Liew, S. L., Fernández del Olmo, M., Cheeran, B., Sandrini, M., Abe, M. et al. (2018). A Preliminary Comparison of Motor Learning across Different Non-Invasive Brain Stimulation Paradigms Shows No Consistent Modulations. *Frontiers in Neuroscience*, 12, Article No. 253. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00253>
- Luber, B., & Lisanby, S. H. (2014). Enhancement of Human Cognitive Performance Using Transcranial Magnetic Stimulation (TMS). *NeuroImage*, 85, 961-970. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.06.007>
- Madore, K. P., & Schacter, D. L. (2016). Remembering the Past and Imagining the Future: Selective Effects of an Episodic Specificity Induction on Detail Generation. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 69, 285-298. <https://doi.org/10.1080/17470218.2014.999097>
- Nakashima, S., Koeda, M., Ikeda, Y., Hama, T., Funayama, T., Akiyama, T. et al. (2021). Effects of Anodal Transcranial Direct Current Stimulation on Implicit Motor Learning and Language-Related Brain Function: An fMRI Study. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, 75, 200-207. <https://doi.org/10.1111/pcn.13208>
- Nitsche, M. A., & Paulus, W. (2000). Excitability Changes Induced in the Human Motor Cortex by Weak Transcranial Direct Current Stimulation. *The Journal of Physiology*, 527, 633-639. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2000.t01-1-00633.x>
- Park, K. (2017). Neuro-Doping: The Rise of Another Loophole to Get around Anti-Doping Policies. *Cogent Social Sciences*, 3, Article ID: 1360462. <https://doi.org/10.1080/23311886.2017.1360462>
- Polanía, R., Nitsche, M. A., & Ruff, C. C. (2018). Studying and Modifying Brain Function with Non-Invasive Brain Stimulation. *Nature Neuroscience*, 21, 174-187. <https://doi.org/10.1038/s41593-017-0054-4>
- Ross, B., & Lopez, M. D. (2020). 40-hz Binaural Beats Enhance Training to Mitigate the Attentional Blink. *Scientific Reports*, 10, Article 7002. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63980-y>
- Ruff, C. C., Ugazio, G., & Fehr, E. (2013). Changing Social Norm Compliance with Noninvasive Brain Stimulation. *Science*, 342, 482-484. <https://doi.org/10.1126/science.1241399>
- Schacter, D. L., Addis, D. R., Hassabis, D., Martin, V. C., Spreng, R. N., & Szpunar, K. K. (2012). The Future of Memory: Remembering, Imagining, and the Brain. *Neuron*, 76, 677-694. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.11.001>
- Silvanto, J., Muggleton, N., & Walsh, V. (2008). State-Dependency in Brain Stimulation Studies of Perception and Cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 12, 447-454. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.09.004>
- Thakral, P. P., Madore, K. P., & Schacter, D. L. (2017). A Role for the Left Angular Gyrus in Episodic Simulation and Memory. *The Journal of Neuroscience*, 37, 8142-8149. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.1319-17.2017>
- Thakral, P. P., Madore, K. P., Kalinowski, S. E., & Schacter, D. L. (2020). Modulation of Hippocampal Brain Networks Produces Changes in Episodic Simulation and Divergent Thinking. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117, 12729-12740. <https://doi.org/10.1073/pnas.2003535117>

- Thut, G., Veniero, D., Romei, V., Miniussi, C., Schyns, P., & Gross, J. (2011). Rhythmic TMS Causes Local Entrainment of Natural Oscillatory Signatures. *Current Biology*, *21*, 1176-1185. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.05.049>
- Tian, F., Hase, S. N., Gonzalez-Lima, F., & Liu, H. (2016). Transcranial Laser Stimulation Improves Human Cerebral Oxygenation. *Lasers in Surgery and Medicine*, *48*, 343-349. <https://doi.org/10.1002/lsm.22471>
- Violante, I. R., Alania, K., Cassarà, A. M., Neufeld, E., Acerbo, E., Carron, R. et al. (2023). Non-Invasive Temporal Interference Electrical Stimulation of the Human Hippocampus. *Nature Neuroscience*, *26*, 1994-2004. <https://doi.org/10.1038/s41593-023-01456-8>
- Wang, J. X., Rogers, L. M., Gross, E. Z., Ryals, A. J., Dokucu, M. E., Brandstatt, K. L. et al. (2014). Targeted Enhancement of Cortical-Hippocampal Brain Networks and Associative Memory. *Science*, *345*, 1054-1057. <https://doi.org/10.1126/science.1252900>
- Wang, L., Zhang, W., Li, X., & Yang, S. (2022). The Effect of 40 Hz Binaural Beats on Working Memory. *IEEE Access*, *10*, 81556-81567. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3185257>
- Wang, X., Tian, F., Reddy, D. D., Nalawade, S. S., Barrett, D. W., Gonzalez-Lima, F. et al. (2016). Up-Regulation of Cerebral Cytochrome-C-Oxidase and Hemodynamics by Transcranial Infrared Laser Stimulation: A Broadband Near-Infrared Spectroscopy Study. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, *37*, 3789-3802. <https://doi.org/10.1177/0271678x17691783>
- Zaehle, T., Sandmann, P., Thorne, J. D., Jäncke, L., & Herrmann, C. S. (2011). Transcranial Direct Current Stimulation of the Prefrontal Cortex Modulates Working Memory Performance: Combined Behavioural and Electrophysiological Evidence. *BMC Neuroscience*, *12*, Article No. 2. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-12-2>
- Zheng, S., Zhang, Y., Huang, K., Zhuang, J., Lü, J., & Liu, Y. (2025). Temporal Interference Stimulation Boosts Working Memory Performance in the Frontoparietal Network. *Human Brain Mapping*, *46*, e70160. <https://doi.org/10.1002/hbm.70160>
- Zhu, Z., Xiong, Y., Chen, Y., Jiang, Y., Qian, Z., Lu, J. et al. (2022). Temporal Interference (TI) Stimulation Boosts Functional Connectivity in Human Motor Cortex: A Comparison Study with Transcranial Direct Current Stimulation (tDCS). *Neural Plasticity*, *2022*, Article ID: 7605046. <https://doi.org/10.1155/2022/7605046>
- Zrenner, C., Desideri, D., Belardinelli, P., & Ziemann, U. (2018). Real-Time EEG-Defined Excitability States Determine Efficacy of TMS-Induced Plasticity in Human Motor Cortex. *Brain Stimulation*, *11*, 374-389. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2017.11.016>