

非侵入性神经调控技术在脑功能性疾病中的应用进展与展望

林雨 杨学军

【摘要】 非侵入性神经调控技术取得显著进展,成为研究和治疗多种神经精神疾病的重要方法。随着技术的不断发展,经颅磁刺激和经颅直流电刺激广泛应用于临床实践,尤其在抑郁症、焦虑症和慢性疼痛等脑功能性疾病的治疗中展现出良好效果,但仍面临一系列挑战,包括个体反应差异大、治疗效果维持时间短,以及刺激参数需进一步优化等。本文综述主要的非侵入性神经调控技术及其在脑功能性疾病中的应用进展以及未来发展方向,旨在为进一步探究其在脑功能性疾病和神经功能等方面的扩展应用提供参考。

【关键词】 经颅磁刺激; 电刺激疗法; 脑疾病; 综述

The current application and future prospects of non - invasive neuromodulation techniques in brain functional diseases

LIN Yu¹, YANG Xue-jun²

¹Department of Neurosurgery, Tianjin Medical University General Hospital, Tianjin 300052, China

²Department of Neurosurgery, Beijing Tsinghua Changgung Hospital, School of Clinical Medicine, Tsinghua Medicine, Tsinghua University, Beijing 102218, China

Corresponding author: YANG Xue-jun (Email: ydenny@126.com)

【Abstract】 Non-invasive neuromodulation techniques have achieved remarkable advancements in the field of neuroscience in recent years, emerging as a crucial tool for researching and treating numerous neuropsychiatric disorders. The primary methods of non-invasive neuromodulation techniques, including transcranial magnetic stimulation (TMS) and transcranial direct current stimulation (tDCS), have increasingly been incorporated into clinical practice and demonstrated impressive outcomes in depression, anxiety, and chronic pain. However, the application of non-invasive neuromodulation techniques still encounter several challenges, such as significant individual response variations, limited duration of therapeutic effects, and issues with standardizing stimulation parameters. This paper provides a comprehensive review of the primary non-invasive neuromodulation techniques and their current applications in brain functional diseases, analyzes the efficacy evaluation and future development direction to provide reference for further exploring their expanded applications in brain functional diseases and neural functions.

【Key words】 Transcranial magnetic stimulation; Electric stimulation therapy; Brain diseases; Review

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China for Young Scientists (No. 82303926).

Conflicts of interest: none declared

非侵入性神经调控技术不依赖外科手术,利用电流、磁场、声波、激光等直接或间接调节神经活

动,其应用背景不仅包括对健康个体的功能调控,还包括对各类神经精神疾病的治疗,如抑郁症、焦虑症、帕金森病、阿尔茨海默病等^[1-2]。近年来,随着神经科学的迅速发展以及神经调控技术的不断成熟和深入研究,非侵入性神经调控技术已成为探索脑功能、治疗神经精神疾病、促进神经康复的重要手段,并展现出显著疗效,例如,经颅磁刺激(TMS)成为难治性抑郁症的一线治疗方法之一,经颅直流

doi:10.3969/j.issn.1672-6731.2025.02.009

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(项目编号:82303926)

作者单位:300052 天津医科大学总医院神经外科(林雨); 102218 清华大学附属北京清华长庚医院神经外科(杨学军)

通讯作者:杨学军,Email:ydenny@126.com

电刺激(tDCS)在改善记忆、认知和运动功能方面展示出广阔应用前景^[3-4];此外,非侵入性神经调控技术还可以作为药物治疗的补充或替代方案,尤其为药物反应欠佳患者提供新的治疗选择^[5]。本文综述主要的非侵入性神经调控技术的应用进展并展望其发展方向,以为进一步探究其在脑功能性疾病和神经功能等方面的扩展应用提供参考。

一、主要的非侵入性神经调控技术

1. 经颅磁刺激 经颅磁刺激是一种通过电磁感应原理产生磁场以刺激大脑皮质的技术,作用原理是通过改变大脑皮质兴奋性,调节神经网络活动^[6]。经颅磁刺激通过电磁线圈产生快速变化的磁场,在颅内产生感应电流,再通过神经导航技术精准影响特定脑区的神经元活动。自 2008 年首次获得美国食品与药品管理局(FDA)批准用于治疗成人难治性抑郁症^[7]以来,其适应证逐步扩展至强迫症、尼古丁依赖等,2018 年 8 月,美国食品与药品管理局经人道主义器械豁免(HDE)途径批准以色列 BrainsWay 公司的深部经颅磁刺激(dTMS)设备用于治疗难治性强迫症,适用于药物或心理治疗反应欠佳的成年患者^[8];2020 年 12 月,同样途径批准该设备用于减少烟草渴求和戒烟^[9]。2022 年,美国斯坦福大学研发的一种加速型经颅磁刺激方案——SAINT 系统因超短治疗时间用于抑郁症的治疗,其在创伤后应激障碍(PTSD)、脑卒中康复等领域的应用潜力目前正在探索中,临床应严格遵循成人适应证及安全规范。业已有临床研究证实,经颅磁刺激对多种精神疾病如抑郁症、焦虑症和精神分裂症有效,尤其是未能从传统药物治疗中获益的患者,高频(10 Hz)刺激左侧背外侧前额皮质(DLPFC)或间歇性 θ 短阵快速脉冲刺激(iTBS)可以改善情绪,药物治疗联合高频(10 Hz)刺激背侧前扣带回(dACC)/顶下小叶或低频(1 Hz/1200 脉冲)刺激右侧背外侧前额皮质可以改善认知功能,并具有较持久的效果^[10]。经颅磁刺激在创伤后应激障碍和慢性疼痛中也表现出积极疗效,使创伤后应激障碍的缓解率达 50%~60%,使神经性疼痛强度降低 40%~50%^[11]。此外,经颅磁刺激在神经康复中也发挥重要作用,特别是可作为脑卒中后认知和运动功能恢复的辅助治疗。重复经颅磁刺激(rTMS)通过促进神经功能可塑性,促进受损脑区的功能恢复,改善认知和运动功能。随着技术的进步,经颅磁刺激的刺激模式、频率、强度和治疗时间等参数不断优化,使其在临床应用中展现

出更大潜力。未来结合个性化神经导航技术及其他治疗手段(如药物治疗和认知行为疗法),经颅磁刺激有望成为多种神经精神疾病的常规治疗方法。

2. 经颅时间干涉刺激 经颅时间干涉刺激(tTIS)是一种新型非侵入性神经调控技术,近年在神经科学领域备受关注,目前尚处于临床前研究和早期临床试验阶段,尚无获得批准的商业化设备或适应证。其作用原理是基于电场干扰,通过两组高频交替电流产生低频调制信号,影响目标脑区神经元活动。经颅时间干涉刺激通过在头皮施加干扰电流,调节脑深部神经元活动,为传统神经调控治疗提供新的思路。与其他非侵入性神经调控技术相比,经颅时间干涉刺激在空间和时间调节上具有显著优势,且对脑深部核团的刺激效果优于传统经颅交流电刺激(tACS),临床应用潜力巨大^[12],并在抑郁症、焦虑症和慢性疼痛等的治疗中展现出良好前景。研究表明,经颅时间干涉刺激可以调节脑神经可塑性,用于多种神经精神疾病的治疗,并在改善运动功能方面表现良好^[13]。一项针对帕金森病的随机对照临床试验显示,以两对电极高频叠加(2000 Hz + 2010 Hz)产生 10 Hz 差频信号,电流强度 1~2 mA/通道,单次刺激时间 15~30 min 的经颅时间干涉刺激靶向刺激右侧苍白球,可以显著改善运动症状,尤其是运动迟缓和震颤,统一帕金森病评价量表第三部分(UPDRS III)评分较基线分别降低 23.5% 和 15.3%^[14]。经颅时间干涉刺激亦被认为是一种安全的非手术干预方法,耐受性良好且不良反应较轻微^[15]。然而其实际应用中仍面临挑战,如个体电场分布的变异性可能影响疗效^[12]。未来应探寻个性化刺激方案以提高临床效果,并揭示经颅时间干涉刺激在不同神经精神疾病中的作用机制,以指导临床应用。

3. 经颅直流电刺激 经颅直流电刺激是一种在头皮施加微弱直流电,调节神经活动的技术,其作用原理是通过改变神经元膜电位,增强或抑制神经元兴奋性,主要优点是操作简单、成本较低,且不良反应相对轻微。经颅直流电刺激广泛用于认知训练、情绪调节和运动康复等领域,尤其在提高学习和记忆能力方面,被认为是一种有效手段^[16];亦可用于抑郁症、认知功能障碍、帕金森病及脑卒中后康复等的治疗,通过调节神经元电活动,改善认知功能、情绪和运动功能,与治疗前相比,经 10 次经颅直流电刺激治疗后,抑郁症状缓解率约为 40%,阿

尔茨海默病患者记忆测验评分增加 20%、反应时间缩短 15%，帕金森病患者步速增快 12%、运动评分增加 4.3 分^[17]。然而，经颅直流电刺激尚未获得美国食品与药品管理局批准用于任何适应证的临床治疗，部分设备（如家用认知增强设备）已通过第Ⅱ类器械豁免作为低风险产品上市，但用于慢性疼痛的治疗尚处于临床研究阶段。

4. 经颅交流电刺激 与经颅直流电刺激不同，经颅交流电刺激通过在头皮施加低强度交流电，调节神经活动，其作用原理是通过特定频率电流调节大脑皮质神经元同步化，目前尚未获得美国食品与药品管理局批准用于临床治疗。该项技术的核心在于通过改变神经元放电模式和群体同步性，调节脑电活动如 α 波（8 ~ 12 Hz）、 β 波（13 ~ 30 Hz）、 θ 波（4 ~ 7 Hz）和 γ 波（31 ~ 100 Hz）等频段，不同频率的经颅交流电刺激影响不同脑区的神经元活动，进而调节认知、情绪和行为。 α 波在认知加工过程中至关重要，其活动增强与注意力集中、记忆力增强和情绪稳定密切相关^[18]。经颅交流电刺激靶向枕叶或顶叶皮质施加低频刺激（8 ~ 12 Hz、1 ~ 2 mA），可增强 α 波活动，进而改善焦虑、缓解压力，促进放松。 γ 波与高级认知功能如感知处理、工作记忆、决策和注意力等密切相关^[19]。经颅交流电刺激靶向前额叶或顶叶（40 Hz、1 ~ 2 mA，单次刺激 20 ~ 40 min），增强 γ 波活动，进而一定程度上改善认知功能，尤其是学习、记忆和决策等认知域^[20]。近年研究显示，经颅交流电刺激不仅可以通过改变脑电活动模式优化神经功能，还可以促进不同脑区之间的协调和功能连接^[21]。

5. 经颅随机噪声刺激 经颅随机噪声刺激（tRNS）是一种通过施加随机电流噪声调节神经活动的技术，其作用原理是通过增强神经元兴奋性，提高感知能力，在视觉和听觉任务中具有显著疗效，还可在复杂认知任务中提高学习记忆能力。但目前尚未获得美国食品与药品管理局批准用于临床治疗，亦未进入商业化医疗设备审批阶段，主要集中于认知功能改善、神经康复及精神疾病（如抑郁症伴慢性疼痛）治疗的探索性试验。研究显示，经颅随机噪声刺激通过改变神经元活动的随机性，促进大脑在任务执行过程中的适应性^[22]。不同于传统经颅直流电刺激和经颅交流电刺激依赖固定频率电流，经颅随机噪声刺激通过随机电流噪声增强神经元膜电位波动而促进突触可塑性，以及同时

影响多个频段（ α 波、 β 波、 γ 波）神经振荡而调节各脑区之间功能连接，因此可能带来更复杂的神经调控效应。

6. 经颅聚焦超声刺激 经颅聚焦超声刺激（tFUS）作为一种新兴的非侵入性神经调控技术，近年在神经科学领域引起广泛关注，并于 2016 年获得美国食品与药品管理局批准用于药物难治性特发性震颤的丘脑消融术（以色列 Insightec 公司的 Exablate Neuro 系统）^[23]，但针对帕金森病、强迫症等适应证尚处于临床试验阶段。经颅聚焦超声刺激利用聚焦超声波的特性，可在不损伤周围脑组织的情况下精确作用于脑深部核团，这一特性使其在神经系统疾病的治疗中展现出巨大潜力，尤其是抑郁症、慢性疼痛和脑卒中后康复^[24]。相关研究显示，低强度的经颅聚焦超声刺激[空间峰值时间平均声强（ISPTA）0.50 ~ 30 mW/cm²、250 kHz ~ 1 MHz、占空比 10% ~ 50%、单次刺激 10 s ~ 5 min、穿透深度 5 ~ 8 cm]可有效调节神经元活动，进而改善神经功能^[25]。动物实验显示，低强度的经颅聚焦超声刺激可以促进缺血性卒中模型大鼠运动功能恢复，缩小脑梗死体积^[26]；还可以提高缺血性卒中模型小鼠神经元存活率，保护血脑屏障的完整性^[27]。此外，经颅聚焦超声刺激通过调节情绪相关脑区活动，有望成为治疗抑郁症的新方法。一项系统综述指出，经颅聚焦超声刺激在多种动物模型中可以有效改善抑郁症状，并在临床试验中展示出良好的安全性和耐受性^[28]。尽管经颅聚焦超声刺激研究尚处于初期阶段，但作为一种非侵入性且具有高空间分辨率的神经调控技术，其在神经调控领域的应用前景广阔，未来研究应进一步探索其作用机制、最佳刺激参数及其在临床治疗中的有效性和安全性。

7. 经颅激光刺激 经颅激光刺激（TLS）亦是一种新兴的非侵入性神经调控技术，近年受到越来越多的关注。其作用原理是通过低强度激光刺激，促进神经细胞代谢、改善脑血流，增强神经可塑性^[29]。研究显示，激光刺激通过影响神经元电生理学特性和神经递质释放，改善颅脑创伤患者神经功能^[30]；此外，经颅激光刺激还可以增强神经可塑性，对神经损伤后康复至关重要^[31]，上述研究为经颅激光刺激的临床应用提供重要理论基础。然而，目前尚未获得美国食品与药品管理局批准用于临床治疗，多处于早期研究阶段。随着对脑功能和神经系统疾病发病机制的深入理解，经颅激光刺激在多种神经

精神疾病的治疗中展现出良好疗效和应用前景,如颅脑创伤、抑郁症、焦虑症等^[32]。研究显示,前额叶激光刺激(波长 810 nm、功率 10~20 mW/cm²)联合药物治疗可以显著改善抑郁症状,且不良反应较轻微^[33]。经颅激光刺激在促进神经再生和功能恢复方面也展示出较大潜力^[34-36],给神经损伤患者的康复治疗带来新的希望。由此可见,经颅激光刺激作为前沿的神经调控技术之一,具有广阔的应用前景,尚待更多高质量的循证医学证据验证其有效性和安全性。

二、非侵入性神经调控技术的临床应用与挑战

1. 治疗精神疾病 非侵入性神经调控技术在抑郁症、焦虑症、精神分裂症等精神疾病的治疗中取得积极成果,但不同个体对刺激的反应差异较大,治疗效果的个体差异仍是目前研究的重要挑战,如何优化刺激参数、提高个性化治疗水平,是未来研究的关键方向^[37]。

2. 改善运动和认知功能 在神经系统变性疾病如帕金森病和阿尔茨海默病的治疗中,非侵入性神经调控技术展现出积极效果。经颅直流电刺激和经颅磁刺激可以通过促进神经可塑性和增强各脑区功能连接,改善帕金森病患者运动功能、认知功能和情绪^[11]。非侵入性神经调控技术在运动功能恢复中也展现出广泛的应用潜力,特别是脑卒中后康复^[38]。经颅直流电刺激和经颅磁刺激通过调节大脑运动区兴奋性,显著改善腰背部慢性疼痛患者运动功能,提高生活质量^[17]。同样,经颅直流电刺激在认知功能障碍和阿尔茨海默病的干预中也显示出良好疗效^[37]。然而,如何延长疗效并避免较大的个体差异,仍是未来研究的重要课题。

3. 辅助神经外科治疗 近年来,非侵入性神经调控技术在神经外科的应用研究逐渐增多,涵盖术前评估、术中神经保护、术后功能恢复等多方面,不仅优化神经外科治疗过程,而且辅助术后康复,尤其在脑肿瘤、癫痫、脑卒中的治疗中发挥重要作用。(1)术前功能区定位:对于涉及脑肿瘤、癫痫的神经外科手术,术前功能区定位至关重要。传统影像学技术(如 fMRI、PET)可提供静息态或任务态脑功能信息,但需时间、检查设备和患者配合。非侵入性神经调控技术特别是经颅磁刺激则为其提供一种实时、非侵入性功能定位方法。经颅磁刺激可以精准定位大脑皮质运动、语言等重要功能区,有助于术者了解病变与重要功能区的关系,对避免

术中损伤关键脑区、提高手术安全性具有重要意义。Mattioli 等^[6]发现,经颅磁刺激通过刺激大脑皮质特定区域并检测肌肉反应(诱发肌电图),定位运动皮质界限,辅助术者避免术中切除重要运动区,保护运动功能。(2)术后功能恢复:非侵入性神经调控技术特别是经颅磁刺激和经颅直流电刺激,已广泛应用于术后运动、语言、认知功能恢复。对于术后出现运动障碍的患者,经颅磁刺激和经颅直流电刺激可以增强运动皮质的神经可塑性,有助于运动功能恢复;重复经颅磁刺激可以显著改善脑卒中患者运动功能,促进运动皮质重组,加速运动功能恢复^[10];经颅直流电刺激通过改善脑卒中患者运动皮质兴奋性,使步态、手臂运动和日常生活活动能力显著改善^[39]。对于术后出现语言和认知功能障碍的患者,经颅磁刺激和经颅直流电刺激也表现出良好疗效,经颅磁刺激通过刺激语言中枢(如 Broca 区和 Wernicke 区)改善语言功能,尤其是脑肿瘤或癫痫灶切除后;经颅直流电刺激通过增强或抑制相关脑区神经元活动,改善语言表达能力、记忆力和注意力^[40]。(3)术后疼痛管理:许多患者在神经外科手术后遗留慢性疼痛,尤其是神经性疼痛(如三叉神经痛、术后神经损伤引起的疼痛)。非侵入性神经调控技术在术后疼痛管理中展现出显著疗效,经颅直流电刺激通过调节疼痛调控网络,减轻疼痛症状,提高术后生活质量^[17];经颅磁刺激通过刺激疼痛抑制区域(如前额皮质)调节疼痛感知,减轻术后疼痛和不适感^[41]。(4)癫痫的术后治疗:非侵入性神经调控技术在癫痫的外科治疗中同样具有潜在应用价值。术后癫痫发作的预防和脑功能重塑一直是神经外科的挑战之一。经颅直流电刺激和经颅磁刺激通过增强大脑皮质可塑性和调节神经网络同步性,降低致痫灶的过度兴奋,减少术后癫痫发作频率和强度^[11]。

三、展望

首先,个性化非侵入性神经调控治疗过程中,人工智能(AI)技术将发挥关键作用。人工智能通过分析神经生理学数据如脑电图和 fMRI,优化刺激参数。研究表明,人工智能驱动算法可以实时监测神经活动并调整刺激频率和强度,从而提高疗效,减少并发症^[37]。其次,脑机接口(BCI)技术与非侵入性神经调控技术相结合,将为神经康复领域开辟新的前景。脑机接口可以直接解码脑电信号,将其转化为控制外部设备的命令,尤其在运动功能和

日常生活活动能力恢复中具有重要应用潜力。通过脑机接口技术与非侵入性神经调控技术的结合,患者可以在康复过程中获得更为精准的反馈,增强神经可塑性。再次,未来研究应关注多模态干预策略的开发,不仅包括非侵入性神经调控技术,还应结合认知训练、物理治疗和心理支持等多种治疗方法,综合运用这些方法可以增强康复治疗效果。最后,随着技术的进步,伦理学和安全性问题也应引起重视。针对非侵入性神经调控技术的临床应用,须制定严格的伦理规范和安全指南,确保患者的知情权和自主权。综上所述,未来非侵入性神经调控技术的研究和应用将朝着个性化、多模态、智能化方向发展,给各类脑功能性疾病的治疗带来新的机遇和挑战。

利益冲突 无

参 考 文 献

- [1] Qi S, Yu J, Li L, Dong C, Ji Z, Cao L, Wei Z, Liang Z. Advances in non-invasive brain stimulation: enhancing sports performance function and insights into exercise science [J]. *Front Hum Neurosci*, 2024, 18:1477111.
- [2] Uzair M, Abualait T, Arshad M, Yoo WK, Mir A, Bunyan RF, Bashir S. Transcranial magnetic stimulation in animal models of neurodegeneration[J]. *Neural Regen Res*, 2022, 17:251-265.
- [3] Allida SM, Hsieh CF, Cox KL, Patel K, Rouncefield-Swales A, Lightbody CE, House A, Hackett ML. Pharmacological, non-invasive brain stimulation and psychological interventions, and their combination, for treating depression after stroke [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2023, 7:CD003437.
- [4] Allida S, Cox KL, Hsieh CF, Lang H, House A, Hackett ML. Pharmacological, psychological, and non-invasive brain stimulation interventions for treating depression after stroke [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2020, 1:CD003437.
- [5] Hong KS, Khan MNA, Ghafoor U. Non-invasive transcranial electrical brain stimulation guided by functional near-infrared spectroscopy for targeted neuromodulation: a review [J]. *J Neural Eng*, 2022;ID35905708.
- [6] Mattioli F, Maglianella V, D'Antonio S, Trimarco E, Caligiore D. Non-invasive brain stimulation for patients and healthy subjects: current challenges and future perspectives [J]. *J Neurol Sci*, 2024, 456:122825.
- [7] O'Reardon JP, Solvason HB, Janicak PG, Sampson S, Isenberg KE, Nahas Z, McDonald WM, Avery D, Fitzgerald PB, Loo C, Demitrack MA, George MS, Sackeim HA. Efficacy and safety of transcranial magnetic stimulation in the acute treatment of major depression: a multisite randomized controlled trial [J]. *Biol Psychiatry*, 2007, 62:1208-1216.
- [8] Carmi L, Tendler A, Bystritsky A, Hollander E, Blumberger DM, Daskalakis J, Ward H, Lapidus K, Goodman W, Casuto L, Feifel D, Barnea-Ygaël N, Roth Y, Zangen A, Zohar J. Efficacy and safety of deep transcranial magnetic stimulation for obsessive-compulsive disorder: a prospective multicenter randomized double-blind placebo-controlled trial [J]. *Am J Psychiatry*, 2019, 176:931-938.
- [9] Dinur-Klein L, Dannon P, Hadar A, Rosenberg O, Roth Y, Kotler M, Zangen A. Smoking cessation induced by deep repetitive transcranial magnetic stimulation of the prefrontal and insular cortices: a prospective, randomized controlled trial [J]. *Biol Psychiatry*, 2014, 76:742-749.
- [10] Camacho-Conde JA, Gonzalez-Bermudez MDR, Carretero-Rey M, Khan ZU. Brain stimulation: a therapeutic approach for the treatment of neurological disorders [J]. *CNS Neurosci Ther*, 2022, 28:5-18.
- [11] Pereira FES, Jagatheesaperumal SK, Benjamin SR, Filho PCDN, Duarte FT, de Albuquerque VHC. Advancements in non-invasive microwave brain stimulation: a comprehensive survey [J]. *Phys Life Rev*, 2024, 48:132-161.
- [12] von Conta J, Kasten FH, Čurčić-Blake B, Aleman A, Thielscher A, Herrmann CS. Interindividual variability of electric fields during transcranial temporal interference stimulation (tTIS) [J]. *Sci Rep*, 2021, 11:20357.
- [13] Wu CW, Lin BS, Zhang Z, Hsieh TH, Liou JC, Lo WL, Li YT, Chiu SC, Peng CW. Pilot study of using transcranial temporal interfering theta-burst stimulation for modulating motor excitability in rat [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2024, 21:147.
- [14] Yang C, Xu Y, Feng X, Wang B, Du Y, Wang K, Lü J, Huang L, Qian Z, Wang Z, Chen N, Zhou J, Zhang C, Liu Y. Transcranial temporal interference stimulation of the right globus pallidus in Parkinson's disease [J]. *Mov Disord*, 2024. [Epub ahead of print]
- [15] von Conta J, Kasten FH, Schellhorn K, Čurčić-Blake B, Aleman A, Herrmann CS. Benchmarking the effects of transcranial temporal interference stimulation (tTIS) in humans [J]. *Cortex*, 2022, 154:299-310.
- [16] Gibson BC, Mullins TS, Heinrich MD, Witkiewitz K, Yu AB, Hansberger JT, Clark VP. Transcranial direct current stimulation facilitates category learning [J]. *Brain Stimul*, 2020, 13:393-400.
- [17] Sveva V, Cruciani A, Mancuso M, Santoro F, Latorre A, Monticone M, Rocchi L. Cerebellar non-invasive brain stimulation: a frontier in chronic pain therapy [J]. *J Pers Med*, 2024, 14:675.
- [18] Klimesch W. EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis [J]. *Brain Res Brain Res Rev*, 1999, 29(2/3):169-195.
- [19] Jensen O, Mazaheri A. Shaping functional architecture by oscillatory alpha activity: gating by inhibition [J]. *Front Hum Neurosci*, 2010, 4:186.
- [20] Haegens S, Cousijn H, Wallis G, Harrison PJ, Nobre AC. Inter- and intra-individual variability in alpha peak frequency [J]. *Neuroimage*, 2014, 92:46-55.
- [21] Calder AE, Hasler G. Towards an understanding of psychedelic-induced neuroplasticity [J]. *Neuropsychopharmacology*, 2023, 48:104-112.
- [22] Ke SC, Lo YH, Tseng P. No frequency-specific effect of transcranial random noise stimulation on resting EEG [J]. *J Integr Neurosci*, 2024, 23:59.
- [23] Elias WJ, Lipsman N, Ondo WG, Ghanouni P, Kim YG, Lee W, Schwartz M, Hynynen K, Lozano AM, Shah BB, Huss D, Dallapiazza RF, Gwinn R, Witt J, Ro S, Eisenberg HM, Fishman PS, Gandhi D, Halpern CH, Chuang R, Butts-Paul K, Tierney TS, Hayes MT, Cosgrove GR, Yamaguchi T, Abe K, Taira T, Chang JW. A randomized trial of focused ultrasound thalamotomy for essential tremor [J]. *N Engl J Med*, 2016, 375:730-739.
- [24] Šošić L, Paolucci M, Flory S, Jebbawi F, Kündig TM, Johansen P. Allergen immunotherapy: progress and future outlook [J]. *Expert Rev Clin Immunol*, 2023, 19:745-769.

- [25] Fomenko A, Neudorfer C, Dallapiazza RF, Kalia SK, Lozano AM. Low-intensity ultrasound neuromodulation: an overview of mechanisms and emerging human applications[J]. Brain Stimul, 2018, 11:1209-1217.
- [26] Guo J, He S, Yan L, Wang L, Shi X, Hu H, Li L. Therapeutic effects of low-intensity transcranial focused ultrasound stimulation on ischemic stroke in rats: an in vivo evaluation using electrical impedance tomography[J]. Neural Regen Res, 2024.[Epub ahead of print]
- [27] Deng LD, Qi L, Suo Q, Wu SJ, Mamtilahun M, Shi RB, Liu Z, Sun JF, Tang YH, Zhang ZJ, Yang GY, Wang JX. Transcranial focused ultrasound stimulation reduces vasogenic edema after middle cerebral artery occlusion in mice[J]. Neural Regen Res, 2022, 17:2058-2063.
- [28] Spivak NM, Tyler WJ, Bari AA, Kuhn TP. Ultrasound as a neurotherapeutic: a circuit- and system-based interrogation[J]. Focus (Am Psychiatr Publ), 2022, 20:32-35.
- [29] Gikaro JM, Bigambo FM, Minde VM, Swai EA. Efficacy of electrophysical agents in fibromyalgia: a systematic review and network meta-analysis[J]. Clin Rehabil, 2023, 37:1295-1310.
- [30] Popa LL, Chira D, Strilciuc S, Muresanu DF. Non-invasive systems application in traumatic brain injury rehabilitation[J]. Brain Sci, 2023, 13:1594.
- [31] Jackman VA, Bajzak K, Rains A, Swab M, Miller ME, Logan GS, Gustafson DL. Physical modalities for the treatment of localized provoked vulvodynia: a scoping review of the literature from 2010 to 2023[J]. Int J Womens Health, 2024, 16:769-781.
- [32] Shou Z, Li Z, Wang X, Chen M, Bai Y, Di H. Non-invasive brain intervention techniques used in patients with disorders of consciousness[J]. Int J Neurosci, 2021, 131:390-404.
- [33] Tan HL, Smith JG, Hoffmann J, Renton T. A systematic review of treatment for patients with burning mouth syndrome [J]. Cephalalgia, 2022, 42:128-161.
- [34] Yang L, Tucker D, Dong Y, Wu C, Lu Y, Li Y, Zhang J, Liu TC, Zhang Q. Photobiomodulation therapy promotes neurogenesis by improving post-stroke local microenvironment and stimulating neuroprogenitor cells[J]. Exp Neurol, 2018, 299 (Pt A):86-96.
- [35] Lapchak PA, Salgado KF, Chao CH, Zivin JA. Transcranial near-infrared light therapy improves motor function following embolic strokes in rabbits: an extended therapeutic window study using continuous and pulse frequency delivery modes[J]. Neuroscience, 2007, 148:907-914.
- [36] Vafaei-Nezhad S, Pour Hassan M, Noroozian M, Aliaghaei A, Shirazi Tehrani A, Abbaszadeh HA, Khoshshirat S. A review of low-level laser therapy for spinal cord injury: challenges and safety[J]. J Lasers Med Sci, 2020, 11:363-368.
- [37] Markowska A, Tarnacka B. Molecular changes in the ischemic brain as non-invasive brain stimulation targets-TMS and tDCS mechanisms, therapeutic challenges, and combination therapies [J]. Biomedicines, 2024, 12:1560.
- [38] Du J, Tian L, Liu W, Hu J, Xu G, Ma M, Fan X, Ye R, Jiang Y, Yin Q, Zhu W, Xiong Y, Yang F, Liu X. Effects of repetitive transcranial magnetic stimulation on motor recovery and motor cortex excitability in patients with stroke: a randomized controlled trial[J]. Eur J Neurol, 2016, 23:1666-1672.
- [39] Hummel F, Celnik P, Giraux P, Floel A, Wu WH, Gerloff C, Cohen LG. Effects of non-invasive cortical stimulation on skilled motor function in chronic stroke[J]. Brain, 2005, 128(Pt 3):490-499.
- [40] Einstein EH, Dadario NB, Khilji H, Silverstein JW, Sughrue ME, D'Amico RS. Correction to: transcranial magnetic stimulation for post-operative neurorehabilitation in neuro-oncology. A review of the literature and future directions[J]. J Neurooncol, 2022, 157:445.
- [41] Nizard J, Lefaucheur JP, Helbert M, de Chauvigny E, Nguyen JP. Non-invasive stimulation therapies for the treatment of refractory pain[J]. Discov Med, 2012, 14:21-31.

(收稿日期:2025-02-07)

(本文编辑:吴春蕊)

· 小词典 ·

中英文对照名词词汇(四)

血红素加氧酶-1 heme oxygenase-1(HO-1)

循环神经网络 recurrent neural network(RNN)

烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸

nicotinamide adenine dinucleotide phosphate(NADPH)

Delta样蛋白3 delta-like protein 3(DLL3)

液相色谱-质谱

liquid chromatography/mass spectrometry(LC/MS)

医学路径语言模型

medical pathways language model(Med-PaLM)

异柠檬酸脱氢酶 isocitrate dehydrogenase(IDH)

应变弹性成像 strain elastography(SE)

用于生物医学文本挖掘的双向编码表示变换器

bidirectional encoder representations from transformers for biomedical text mining(BioBERT)

运动前区 premotor area(PMA)

增强超声成像 contrast enhanced ultrasound(CEUS)

增强现实 augmented reality(AR)

支持向量机 support vector machine(SVM)

知识图谱 knowledge graph(KG)

直接皮质电刺激 direct cortical stimulation(DCS)

质谱法 mass spectrometry(MS)

中央处理器 central processing unit(CPU)

肿瘤基因组学图谱计划 The Cancer Genome Atlas(TCGA)

肿瘤微环境 tumor microenvironment(TME)

肿瘤相关巨噬细胞 tumour-associated macrophages(TAMs)

主成分分析 principal component analysis(PCA)

自然语言处理 natural language processing(NLP)

自适应脑深部电刺激术

adaptive deep brain stimulation(aDBS)

总生存期 overall survival(OS)

最佳传输的特征金字塔融合网络

optimal transport functional principal feature network (OTFPF)