

# 重复经颅磁刺激治疗抑郁症的研究进展

刘媛媛, 乐发国\*

重庆医科大学附属璧山医院睡眠心理中心, 重庆

收稿日期: 2026年4月19日; 录用日期: 2026年5月12日; 发布日期: 2026年5月21日

## 摘要

抑郁症(MDD)是最常见的精神障碍性疾病, 重复经颅磁刺激(rTMS)作为一种非侵入性神经调控技术, 具有无创、安全性高等优势。本文综述rTMS治疗MDD的研究进展, 重点探讨其作用机制、不同刺激模式的临床疗效及安全性。未来需进一步探索个性化治疗方案及新型刺激参数, 以提高MDD病人治疗反应和缓解率。

## 关键词

重复经颅磁刺激, 抑郁症, 安全性

# Research Progress of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation in the Treatment of Major Depressive Disorder

Yuanyuan Liu, Faguo Yue\*

Sleep Psychology Center, Bishan Hospital Affiliated to Chongqing Medical University, Chongqing

Received: April 19, 2026; accepted: May 12, 2026; published: May 21, 2026

## Abstract

Major depressive disorder (MDD) is the most common psychiatric disorder. Repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS), as a non-invasive neuromodulation technique, offers advantages such as being non-invasive and highly safe. This article reviews the research progress of rTMS in the treatment of MDD, with a focus on its mechanisms of action, clinical efficacy of different stimulation paradigms, and safety profiles. Future research should further explore personalized treatment protocols and novel stimulation parameters to improve treatment response and remission rates in MDD patients.

\*通讯作者。

## Keywords

### Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, Depression, Safety

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

抑郁症(Major Depressive Disorder, MDD)是一种以显著而持久的情绪或者心境低落为主要临床表现的情感性障碍疾病, 同时还伴有焦虑、认知功能损害、意志活动减退甚至自杀等临床表现, 是全球疾病和致残的主要原因之一。据世界卫生组织统计, 全球约有 3.5 亿患者, 每年因抑郁导致的经济损失高达 1 万亿美元[1]。在中国, MDD 的疾病负担同样严峻, 全国流行病学调查显示, 成人 12 个月患病率为 3.4%, 终身患病率为 6.8% [2]。此外, MDD 与心血管疾病、糖尿病等慢性病共病率高, 进一步加剧了社会医疗负担[3]。

然而, 在 MDD 患者中, 至少 30%的个体对抗抑郁药物治疗的反应不佳[4], 因此, 开发安全有效的非药物治疗手段, 将成为改善 MDD 症状的关键突破口。重复经颅磁刺激(Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, rTMS)是一种非侵入性神经调控技术, 其通过调节前额叶皮层兴奋性改善症状, 以其无创、副作用小、操作简单的特点而易接受。本文主要阐述 rTMS 治疗 MDD 的研究进展, 为今后的研究和临床提供一些依据。

## 2. rTMS 的发展概况

1980 年, Merton 和 Morton 使用经颅电刺激(Transcranial Electrical Stimulation, TES)成功地通过头皮对清醒人类的运动皮层进行了电刺激[5]。随后经颅磁刺激(Transcranial Magnetic Stimulation, TMS)逐渐被应用于动物试验和人体临床试验, 如评估皮质脊髓兴奋性、治疗抑郁、神经类疾病、疼痛等。最初的经颅磁刺激为单脉冲 TMS, 通过单次磁脉冲刺激大脑皮层, 激活或抑制神经元活动。随着研究的深入, rTMS 被证实能够通过特定频率(高频或低频)的重复刺激, 诱导大脑神经活动产生可塑性变化, 且这种变化能持续至刺激结束后。进一步发展出的  $\theta$  短阵快速脉冲重复经颅磁刺激(Theta Burst Stimulation, TBS), 能在短时间内能提供高频率脉冲, 它以丛状刺激特点, 更接近神经活动的生理状态, 能够显著缩短治疗时间, 体现出了更强的治疗效果, 在抑郁症干预中显示了较好的临床疗效[6]。

rTMS 是利用快速时变磁场刺激大脑活动的基本过程。这种磁场通常是由连接线圈的刺激器产生, 线圈被放置在大脑的特定区域, 并以该区域作为刺激靶点, 通过高压电流的迅速开关产生瞬时磁场, 透过颅骨进入大脑, 磁场在大脑中诱导电场, 调节神经电活动和突触可塑性。食品与药品监管委员会(FDA)于 2008 年批准将 rTMS 用于治疗 TRD (Treatment Resistant Depression, TRD) [7]。目前有多种 rTMS 标准化参数选择方案, 刺激强度通常以静息运动阈值(Rest Motor Threshold, RMT)为基准(80%~120%)。常规高频(10 Hz)刺激左 DLPFC (Dorsolateral Prefrontal Cortex, DLPFC)可增强皮层兴奋性; 而低频(1 Hz)刺激右 DLPFC 则具有增加运动皮质的兴奋性的作用。TBS 作为新型模式, 以  $\theta$  频率(5 Hz)每 200 ms 一次重复刺激发出, 分为间歇性(Intermittent Theta-Burst Stimulation, iTBS)和连续性(Continuous Theta-Burst Stimulation, cTBS)两种。其中 cTBS 是 40 s 的不间断 TBS 序列, 共 600 个脉冲; iTBS 是每 10 s 重复一次 2 s 的 TBS, 也是 600 个脉冲。刺激参数可根据实际情况灵活调整。

### 3. rTMS 治疗 MDD 的可能机制

#### 3.1. rTMS 可以调控脑网络连接

MDD 的核心病理特征之一是涉及多个大规模脑网络的功能障碍[8]。rTMS 治疗 MDD 的重要机制被认为是通过调节异常的脑网络功能和结构连接性,特别是纠正额叶-皮层下边缘环路以及与情绪、认知处理相关的关键网络(如默认网络 DMN、显著性网络 SN、中央执行网络 CEN)的失调活动[9]。Godfrey 等人[10]于 2022 年对 24 名 MDD 患者及 2 名双相障碍患者开展了为期四周的 rTMS 治疗研究,并在治疗前后分别采集静息态 fMRI 数据。结果发现,rTMS 的治疗效果与额叶内 SN 连通性的降低密切相关,提示 SN 功能连接的动态变化可能是 rTMS 发挥抗抑郁效应的重要神经机制。这一发现并非孤立存在——Batail 等人与 Harel 等人的研究同样表明,rTMS 治疗后 SN 相关连接发生了方向性改变,且连接变化的幅度与患者症状缓解程度显著对应[11][12]。上述研究表明 rTMS 可能通过调节 SN 功能连接模式来实现治疗效果,SN 连接的治疗后变化可反映神经调控机制,而基线连接特征亦具有预测临床疗效的潜力,提示 SN 具有机制性与预测性的双重生物标志物价值——但这一结论仍需更高质量的研究加以验证。CEN 在 rTMS 治疗 MDD 中也起着作用。一项使用结构磁共振成像和 fMRI 的研究发现,无反应者与反应者和健康对照组相比,CEN 结构协变网络的完整性降低[13]。这表明网络的完整性可以预测 MDD 患者的 rTMS 治疗结果。Struckmann 等人[14]研究发现间歇 iTBS 治疗后,患者表现出额叶-岛叶连接性降低,这与健康人群中 iTBS 调控效应的报告一致[15],同时伴随 fNIRS 检测到的氧合血红蛋白水平升高,且后者与 SN 和 CEN 的参与密切相关。这些 fNIRS 发现与既往关于 rTMS 可逆转抑郁症患者前额叶低灌注状态的研究结果相吻合[16],共同为 rTMS 通过调控脑网络(特别是 SN)的神经活动和血流动力学改善抑郁症状的机制提供了实证依据。

#### 3.2. rTMS 可以促进神经可塑性

基础研究证实,rTMS 能够诱导突触可塑性,包括长时程增强(Long-Term Potentiation, LTP)和长时程抑制(Long-Term Depression, LTD) [17],并激活海马区的 BDNF/VEGF-NMDAR 通路等过程[18]。临床研究发现,MDD 患者的海马体积减小、BDNF、NMDA 受体表达下调,这些改变与情感和认知功能障碍密切相关[19],而 rTMS 治疗可上调 MDD 患者的 BDNF 水平,增强神经元可塑性,并有助于改善认知功能[20]。然而,关于血清 BDNF 水平能否可靠反映 rTMS 诱导的神经可塑性变化,目前存在争议。Ginelli [21] 等的研究发现 rTMS 治疗 MDD 前后血清 BDNF 水平没有显著变化,研究者推测,可能是 rTMS 减少患者的压力和炎症减少血小板活化,间接降低血清 BDNF 水平,而不是神经可塑性的真实下降。因此,BDNF 能否作为评估 MDD 神经可塑性变化的可靠生物标志物,目前尚存争议,亟待更深入的研究予以阐明。

#### 3.3. rTMS 可以调控炎症因子

神经炎症是 MDD 的重要病理特征,表现为外周循环及中枢神经系统的微炎症状态,其升高的促炎因子水平与抑郁症状严重程度及自杀风险显著相关[22][23]。rTMS 的抗抑郁效应涉及其神经免疫调节作用。临床研究观察到 rTMS 可下调青少年 MDD 患者的促炎因子(如 IL-1 $\beta$ , IL-6)并上调抗炎因子(如 TGF- $\beta$ 1) [24]。在中枢层面,小胶质细胞作为关键的脑内免疫调节细胞,其异常激活是抑郁症神经炎症的核心环节。抑郁状态下小胶质细胞被激活,释放 IL-6 等促炎因子[25][26]。基础研究发现,rTMS 可有效抑制小胶质细胞的过度激活,降低促炎因子表达,并促进其向抗炎表型转化,从而显著减轻神经炎症反应,这些改变最终有助于改善抑郁样行为[27]。综上,rTMS 通过抑制小胶质细胞活化、调节炎症因子平衡,是其缓解 MDD 症状的关键神经免疫学机制之一,小胶质细胞成为 rTMS 发挥抗炎及神经保护作用的重要潜在靶点。

## 4. rTMS 的临床疗效

### 4.1. 传统 rTMS

高频(10 Hz) rTMS 刺激左侧 DLPFC 是抑郁症的标准治疗方案。FDA 批准用于成年抑郁障碍患者的具体参数为: 采用 8 字线圈或 H1 线圈, 刺激左侧 DLPFC, 频率 10 Hz, 每疗程脉冲数 3000 次(8 字线圈)或 1980 次(H1 线圈), 每次治疗 37.5 分钟, 每周 5 次, 20~30 次为一个疗程。多项随机对照试验(RCTs)已证实该方案的疗效, 研究显示, 相较于假刺激组, 接受该方案治疗的患者 HAMD-17 评分显著降低, 有效率和缓解率分别达 49% 与 32% [7]。一项多中心研究随访表明其长期疗效, 治疗后 12 周的复发风险低于常规药物治疗[28]。在标准方案基础上, 刺激策略的优化成为研究热点。一项纳入 81 项随机对照试验、共 4233 例患者的网络荟萃分析显示, 双侧 rTMS (左侧 DLPFC 高频 + 右侧 DLPFC 低频)在应答率和缓解率上均显著优于假刺激(应答率: OR = 3.96, 95% CI [2.37, 6.60]; 缓解率: OR = 4.22, 95% CI [1.96, 9.05]), 且在所有 rTMS 方案中综合排名第二, 提示双侧刺激策略在 MDD 急性期治疗中具有较强的临床证据支持[29]。针对特定临床亚群, rTMS 参数选择也体现出差异性。例如, 在青少年抑郁障碍中, rTMS 典型刺激频率为 1~20 Hz, 运动阈值(MT)的强度通常介于 80%~120%, 脉冲数在 400~3000 个[30]。对于抑郁症伴睡眠障碍患者, 低频(1 Hz) rTMS 刺激在有效改善抑郁症状的同时, 还能缓解睡眠障碍、提高睡眠质量, 且未增加安全性风险[31]。在双相抑郁患者中, 低频右侧 DLPFC 刺激则显示出与高频左侧刺激相当的疗效[32], 提示针对不同疾病特征人群需调整刺激参数。与此同时, 个体化靶点定位技术展现出显著潜力。多项研究表明, 基于功能磁共振成像(fMRI)引导的个体化靶点定位能显著提升 rTMS 治疗的准确性和临床疗效[33] [34]。

### 4.2. TBS 模式

#### 4.2.1. 单侧 TBS 治疗 MDD

与标准 10 Hz rTMS 程序的 30 min 或更长时间相比, 单次 cTBS 和 iTBS 分别需要 40 s 和 3 min。iTBS 相较于 cTBS 在 MDD 治疗中展现出更显著的应用前景。机制研究表明, iTBS 诱导的皮层兴奋性增强效应显著强于 cTBS 产生的抑制作用, 且其效应变异性更大[35]。临床研究进一步支持这一差异, 多项试验显示 cTBS 在改善抑郁症状方面与假刺激组无显著差异[36], 甚至可能伴随执行功能下降的风险[37]。因此, 研究焦点逐渐集中于 iTBS 的疗效探索。

iTBS 不仅具有可靠的抗抑郁效果, 在治疗效率上亦具备显著优势。一项非劣效性试验证实其疗效与传统 10 Hz rTMS 相当, 但单次治疗时间缩短达 75% [8]。在特定人群中, iTBS 的综合获益尤为突出。针对青少年自杀倾向抑郁症的研究发现, 在 DLPFC 的 iTBS 治疗两周后, 贝克自杀意念量表中文版(BSI-CV)评分较基线显著下降 42%, 且基线抑郁程度越重者获益越显著[38]。在老年抑郁患者中, 以左侧 DLPFC 为靶点的 iTBS 治疗较右侧 1 Hz rTMS 在改善抑郁症状、降低自杀意念强度及自杀风险以及提升认知功能等方面均表现出更优的疗效, 且两者不良反应发生率无统计学差异, 安全性相当[39]。这提示 iTBS 对于常伴认知损害的老年抑郁患者具有兼顾核心症状与认知功能的多维度治疗优势。针对复杂抑郁亚型, iTBS 亦显示出潜力。随机对照试验表明, 个性化靶向左 DLPFC 的加速 iTBS 方案对难治性双相抑郁患者有效, 显著改善蒙哥马利-艾斯伯格抑郁评定量表(MADRS)评分, 缓解率高达 50%, 显著优于假刺激组[40], 一项纳入 7 项随机对照试验的 Meta 分析显示, iTBS 的总体有效率与传统 rTMS 无统计学差异, 且两者不良反应(如头痛)发生率相似[41]。这些发现共同支持 iTBS 作为 MDD (包括部分复杂亚型), 一种高效且耐受性良好的治疗选择。

除每日应用一次 iTBS 外, 临床治疗中还在一天内应用两次或多次 iTBS 治疗 MDD, 以减少完成治

疗所需的天数, 这种刺激模式被称为 aiTBS (Accelerated Intermittent Theta-Burst Stimulation, aiTBS)。一项 Meta 分析发现, 与假刺激组相比, aiTBS 对 MDD 患者具有显著的抗抑郁作用, 耐受性良好。除能快速达到抗抑郁效果外, 也有研究表明 aiTBS 有望在减少 MDD 患者自杀倾向方面快速发挥作用[42]。值得关注的是, aiTBS 的应用人群已逐步延伸至青少年群体。一项针对 74 名非难治性青少年 MDD 患者的随机对照试验表明, 以左侧背外侧前额叶皮层为靶点、每日 5 次、连续 10 天的 aiTBS 方案安全性良好, 并在治疗结束后显著优于假刺激组, 1 个月随访时疗效仍得以维持, 同时有效改善了焦虑症状及患者自评抑郁水平; 然而, 3 个月随访时两组间差异消失, 提示疗效存在一定的时间局限性, 可能需要结合维持治疗策略以巩固疗效[43]。然而, 现有研究中 aiTBS 的样本规模普遍不足, 参数设置差异较大, 且在青少年等特殊人群中的长期疗效尚不明确, 仍需通过更大规模、参数标准化的随机对照试验, 进一步明确该疗法的最优治疗方案及长期临床获益。

#### 4.2.2. 双侧联合 TBS 治疗 MDD

鉴于 TBS 在抑郁症临床治疗中已经显现的潜力, 采用 cTBS 及 iTBS 联合刺激双侧大脑半球是否会有更优的效果是个值得探索的方向。2025 年 Wada 等人通过对比 BL-TBS 和 BL-rTMS 在成年 TRD 患者中的疗效, 未能证实 BL-TBS 在成年 TRD 患者疗效上非劣于 BL-rTMS, 但在次要结局有非劣效表现[44]。一项针对老年难治性抑郁试验发现, 双侧 TBS 的 MADRS 减分幅度与标准双侧 rTMS 非劣效[45], 提示未来可研究不同年龄组最有效的 rTMS 方案。Tavares 等的双盲试验治疗后 HAMD-17 评分较基线下降 9.1 分, 且疗效持续至 8 周随访, 进一步验证了该模式对混合型抑郁的普适性[46]。综上, 现有证据提示, 双侧联合 TBS 刺激模式在提升疗效、缩短治疗时间及维持长期效果方面展现重要前景, 是优化 MDD 治疗方案的潜在有力手段。

### 5. 安全性分析

rTMS 在 MDD 治疗中展现出良好的总体安全性和耐受性特征。其不良反应主要表现为轻度至中度的头痛、恶心及头晕, 程度可控, 常在治疗过程中逐渐减轻, 对患者的记忆及其他认知功能未产生显著负面影响[47]。一项纳入 10 项随机对照试验的系统综述与荟萃分析显示, 在中国 MDD 患者中, rTMS 与假刺激组在头晕、恶心及头痛等不良事件发生率上均无显著差异, 所有纳入研究中亦未报告严重不良事件[48]。癫痫发作作为最受关注的风险, 其发生率低于 0.1%, 且主要见于高强度刺激或合并使用降低癫痫阈值药物等特定风险因素的患者[49]。上述安全性特征在多个特殊人群中同样得到验证。针对老年及青少年 MDD 患者的研究显示, rTMS 治疗未导致显著认知功能损害或长期不良事件; 头痛及局部疼痛等常见不良反应的发生率与成年患者群体相似, 且在这些研究中均未观察到癫痫发作事件[50]。在青少年双相抑郁的随机对照研究中, aiTBS 全程仅出现 1 例一过性头痛, 无严重不良事件[51]。综合来看, rTMS 在不同临床人群中均表现出一致的安全性特征, 为其广泛临床应用提供了有力支撑。

### 6. 不足与展望

rTMS 凭借其无创性、高安全性及操作便捷性等优势, 已成为 MDD 治疗领域的重要物理干预手段, 但其抗抑郁神经机制尚未完全解析。现有研究多聚焦于常规 rTMS 范式, 对 TBS 等新型刺激模式的系统探索仍显不足。有关研究的样本量普遍偏小, 观察疗程偏短, 随机双盲对照研究的数量不足, 且治疗技术参数不尽相同, 因此, 亟需扩大样本量, 开展不同刺激参数的长时程随机双盲研究, 以进一步验证 TBS 对抑郁症的确切疗效与临床价值。此外, 抑郁症神经生物学机制的显著异质性为疗效预测带来挑战, 未来的研究应聚焦于深入揭示 rTMS 的作用机制, 并基于患者特征优化治疗参数, 以提供更个性化、更高效的治疗方案。具体而言, 应结合多模态脑成像技术, 深入阐明 rTMS 调控情绪环路的机制通路, 建立

基于生物标志物的个体化刺激参数预测模型, 从而优化不同临床亚型的治疗策略, 推动 rTMS 向精准化、个体化治疗转型, 最终提高 MDD 患者的治疗反应率与临床缓解率。

## 声明

本文所有作者均声明不存在利益冲突。

## 参考文献

- [1] Friedrich, M.J. (2017) Depression Is the Leading Cause of Disability around the World. *Journal of the American Medical Association*, **317**, 1517. <https://doi.org/10.1001/jama.2017.3826>
- [2] Lu, J., Xu, X., Huang, Y., Li, T., Ma, C., Xu, G., et al. (2021) Prevalence of Depressive Disorders and Treatment in China: A Cross-Sectional Epidemiological Study. *The Lancet Psychiatry*, **8**, 981-990. [https://doi.org/10.1016/s2215-0366\(21\)00251-0](https://doi.org/10.1016/s2215-0366(21)00251-0)
- [3] McCarron, R.M., Shapiro, B., Rawles, J. and Luo, J. (2021) Depression. *Annals of Internal Medicine*, **174**, Itc65-Itc80. <https://doi.org/10.7326/aic202105180>
- [4] McIntyre, R.S., Alsuwaidan, M., Baune, B.T., Berk, M., Demyttenaere, K., Goldberg, J.F., et al. (2023) Treatment-Resistant Depression: Definition, Prevalence, Detection, Management, and Investigational Interventions. *World Psychiatry*, **22**, 394-412. <https://doi.org/10.1002/wps.21120>
- [5] Merton, P.A. and Morton, H.B. (1980) Stimulation of the Cerebral Cortex in the Intact Human Subject. *Nature*, **285**, 227-227. <https://doi.org/10.1038/285227a0>
- [6] 杨帅, 胡红星. 重复经颅磁刺激在抑郁症治疗中的研究进展[J]. 国际精神病学杂志, 2024, 51(4): 1026-1029.
- [7] Blumberger, D.M., Vila-Rodriguez, F., Thorpe, K.E., Feffer, K., Noda, Y., Giacobbe, P., et al. (2018) Effectiveness of Theta Burst versus High-Frequency Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation in Patients with Depression (THREE-D): A Randomised Non-Inferiority Trial. *The Lancet*, **391**, 1683-1692. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(18\)30295-2](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(18)30295-2)
- [8] Chai, Y., Sheline, Y.I., Oathes, D.J., Balderston, N.L., Rao, H. and Yu, M. (2023) Functional Connectomics in Depression: Insights into Therapies. *Trends in Cognitive Sciences*, **27**, 814-832. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2023.05.006>
- [9] Sack, A.T., Paneva, J., K uthe, T., Dijkstra, E., Zwieneberg, L., Arns, M., et al. (2024) Target Engagement and Brain State Dependence of Transcranial Magnetic Stimulation: Implications for Clinical Practice. *Biological Psychiatry*, **95**, 536-544. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2023.09.011>
- [10] Godfrey, K.E.M., Muthukumaraswamy, S.D., Stinear, C.M. and Hoeh, N. (2022) Decreased Salience Network fMRI Functional Connectivity Following a Course of rTMS for Treatment-Resistant Depression. *Journal of Affective Disorders*, **300**, 235-242. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2021.12.129>
- [11] Batail, J.M., Xiao, X., Azeez, A., Tischler, C., Kratter, I.H., Bishop, J.H., et al. (2023) Network Effects of Stanford Neuromodulation Therapy (SNT) in Treatment-Resistant Major Depressive Disorder: A Randomized, Controlled Trial. *Translational Psychiatry*, **13**, Article No. 240. <https://doi.org/10.1038/s41398-023-02537-9>
- [12] Harel, M., Perini, I., K ampe, R., Alyagon, U., Shalev, H., Besser, I., et al. (2022) Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation in Alcohol Dependence: A Randomized, Double-Blind, Sham-Controlled Proof-of-Concept Trial Targeting the Medial Prefrontal and Anterior Cingulate Cortices. *Biological Psychiatry*, **91**, 1061-1069. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2021.11.020>
- [13] Ge, R., Downar, J., Blumberger, D.M., Daskalakis, Z.J., Lam, R.W. and Vila-Rodriguez, F. (2019) Structural Network Integrity of the Central Executive Network Is Associated with the Therapeutic Effect of rTMS in Treatment Resistant Depression. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, **92**, 217-225. <https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2019.01.012>
- [14] Struckmann, W., Bod en, R., Gingnell, M., F allmar, D. and Persson, J. (2022) Modulation of Dorsolateral Prefrontal Cortex Functional Connectivity after Intermittent Theta-Burst Stimulation in Depression: Combining Findings from fNIRS and fMRI. *NeuroImage: Clinical*, **34**, Article 103028. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2022.103028>
- [15] Iwabuchi, S.J., Raschke, F., Auer, D.P., Liddle, P.F., Lankappa, S.T. and Palaniyappan, L. (2017) Targeted Transcranial Theta-Burst Stimulation Alters Fronto-Insular Network and Prefrontal Gaba. *NeuroImage*, **146**, 395-403. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.09.043>
- [16] Kawabata, Y., Imazu, S., Matsumoto, K., Toyoda, K., Kawano, M., Kubo, Y., et al. (2022) rTMS Therapy Reduces Hypofrontality in Patients with Depression as Measured by fNIRS. *Frontiers in Psychiatry*, **13**, Article 814611. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2022.814611>

- [17] 左成超, 曹幻, 王芙蓉. 经颅磁刺激治疗抑郁症的研究进展[J]. 神经损伤与功能重建, 2021, 16(5): 270-273.
- [18] Choung, J.S., Kim, J.M., Ko, M., Cho, D.S. and Kim, M. (2021) Author Correction: Therapeutic Efficacy of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation in an Animal Model of Alzheimer's Disease. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 7350. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86896-7>
- [19] Castricum, J., Birkenhager, T.K., Kushner, S.A., Elgersma, Y. and Tulen, J.H.M. (2022) Cortical Inhibition and Plasticity in Major Depressive Disorder. *Frontiers in Psychiatry*, **13**, Article 777422. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2022.777422>
- [20] 刘念, 蔡敏, 唐乃龙, 等. 重复经颅磁刺激治疗抑郁症认知功能障碍的研究进展[J]. 临床精神医学杂志, 2024, 34(2): 157-160.
- [21] Ginelli, E., Sanna, L., Paribello, P., Isayeva, U., Corona, G., Zai, C.C., *et al.* (2025) Impact of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation on Clinical and Cognitive Outcomes, and Brain-Derived Neurotrophic Factor Levels in Treatment-Resistant Depression. *Frontiers in Psychiatry*, **16**, Article 1584673. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2025.1584673>
- [22] Abdulla, H., Maalouf, M. and Jelinek, H.F. (2023) Machine Learning for the Prediction of Depression Progression from Inflammation Markers. 2023 45th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), Sydney, 24-27 July 2023, 1-4. <https://doi.org/10.1109/embc40787.2023.10340436>
- [23] Purebl, G., Schnitzspahn, K. and Zsák, É. (2023) Overcoming Treatment Gaps in the Management of Depression with Non-Pharmacological Adjunctive Strategies. *Frontiers in Psychiatry*, **14**, Article 1268194. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2023.1268194>
- [24] 祝伶俐, 王梦欣. 重复经颅磁刺激对青少年抑郁症炎症和脑神经因子的影响[J]. 中国现代医生, 2024, 62(20): 44-48.
- [25] Himmerich, H., Fischer, J., Bauer, K., Kirkby, K.C., Sack, U. and Krügel, U. (2013) Stress-Induced Cytokine Changes in Rats. *European Cytokine Network*, **24**, 97-103. <https://doi.org/10.1684/ecn.2013.0338>
- [26] Chen, S., Dong, Z., Cheng, M., Zhao, Y., Wang, M., Sai, N., *et al.* (2017) Homocysteine Exaggerates Microglia Activation and Neuroinflammation through Microglia Localized STAT3 Overactivation Following Ischemic Stroke. *Journal of Neuroinflammation*, **14**, Article No. 187. <https://doi.org/10.1186/s12974-017-0963-x>
- [27] Zuo, C., Cao, H., Feng, F., Li, G., Huang, Y., Zhu, L., *et al.* (2022) Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation Exerts Anti-Inflammatory Effects via Modulating Glial Activation in Mice with Chronic Unpredictable Mild Stress-Induced Depression. *International Immunopharmacology*, **109**, Article 108788. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2022.108788>
- [28] Dalhuisen, I., van Bronswijk, S., Bors, J., Smit, F., Spijker, J., Tendolkar, I., *et al.* (2022) The Association between Sample and Treatment Characteristics and the Efficacy of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation in Depression: A Meta-Analysis and Meta-Regression of Sham-Controlled Trials. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, **141**, Article 104848. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2022.104848>
- [29] Brunoni, A.R., Chaimani, A., Moffa, A.H., *et al.* (2017) Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation for the Acute Treatment of Major Depressive Episodes: A Systematic Review with Network Meta-Analysis. *JAMA Psychiatry*, **74**, 143-152.
- [30] 张乃月, 隋晓杰, 白银霞. 重复经颅磁刺激治疗青少年抑郁障碍的研究进展[J]. 内蒙古医学杂志, 2025, 57(4): 421-424+429.
- [31] 裴碧丽, 廖爱红, 洪宝华. 重复经颅磁刺激治疗抑郁症伴睡眠障碍的效果观察[J]. 世界睡眠医学杂志, 2024, 11(10): 2358-2361.
- [32] Kazemi, R., Rostami, R., Hadipour, A.L., Zandbagleh, A., Khomami, S., Kiaee, N., *et al.* (2025) Effect of DLPFC rTMS on Anhedonia and Alpha Asymmetry in Depressed Patients. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 899. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-85057-w>
- [33] Gogulski, J., Ross, J.M., Talbot, A., Cline, C.C., Donati, F.L., Munot, S., *et al.* (2023) Personalized Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation for Depression. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, **8**, 351-360. <https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2022.10.006>
- [34] Luo, X., Hu, Y., Wang, R., Zhang, M., Zhong, X. and Zhang, B. (2021) Individualized rTMS Treatment for Depression Using an fMRI-Based Targeting Method. *Journal of Visualized Experiments*, **174**, e62687. <https://doi.org/10.3791/62687-v>
- [35] Wischniewski, M. and Schutter, D.J.L.G. (2015) Efficacy and Time Course of Theta Burst Stimulation in Healthy Humans. *Brain Stimulation*, **8**, 685-692. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2015.03.004>
- [36] Chistyakov, A.V., Kreinin, B., Marmor, S., Kaplan, B., Khatib, A., Darawsheh, N., *et al.* (2015) Preliminary Assessment of the Therapeutic Efficacy of Continuous Theta-Burst Magnetic Stimulation (cTBS) in Major Depression: A Double-Blind Sham-Controlled Study. *Journal of Affective Disorders*, **170**, 225-229. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2014.08.035>
- [37] Cheng, C., Juan, C., Chen, M., Chang, C., Lu, H.J., Su, T., *et al.* (2016) Different Forms of Prefrontal Theta Burst Stimulation for Executive Function of Medication-Resistant Depression: Evidence from a Randomized Sham-Controlled

- Study. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, **66**, 35-40.  
<https://doi.org/10.1016/j.pnpbp.2015.11.009>
- [38] Zhao, Y., He, Z., Luo, W., Yu, Y., Chen, J., Cai, X., *et al.* (2023) Effect of Intermittent Theta Burst Stimulation on Suicidal Ideation and Depressive Symptoms in Adolescent Depression with Suicide Attempt: A Randomized Sham-Controlled Study. *Journal of Affective Disorders*, **325**, 618-626. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2023.01.061>
- [39] 周雪莹, 徐德毅, 尚方杰. iTBS 与 1 Hz rTMS 对老年抑郁症患者抑郁症状及认知功能的影响[J]. 川北医学院学报, 2025, 40(6): 703-707.
- [40] Sheline, Y.I., Makhoul, W., Batzdorf, A.S., Nitchie, F.J., Lynch, K.G., Cash, R., *et al.* (2024) Accelerated Intermittent Theta-Burst Stimulation and Treatment-Refractory Bipolar Depression: A Randomized Clinical Trial. *JAMA Psychiatry*, **81**, 936-941. <https://doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2024.1787>
- [41] Kishi, T., Sakuma, K., Matsuda, Y., Kito, S. and Iwata, N. (2023) Intermittent Theta Burst Stimulation vs. High-Frequency Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation for Major Depressive Disorder: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Psychiatry Research*, **328**, Article 115452. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2023.115452>
- [42] Cai, D., Qin, Z., Lan, X., Liu, Q., Qin, X., Wang, J., *et al.* (2023) Accelerated Intermittent Theta Burst Stimulation for Major Depressive Disorder or Bipolar Depression: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Asian Journal of Psychiatry*, **85**, Article 103618. <https://doi.org/10.1016/j.ajp.2023.103618>
- [43] Liu, X., Peng, Z., Cheng, F., Li, G., Wang, B., Hu, C., *et al.* (2026) Efficacy and Safety of Accelerated Intermittent Theta Burst Stimulation for Adolescents with Major Depressive Disorder: A Randomized, Double-Blind, Sham-Controlled Study. *Biological Psychiatry*, **99**, 218-226. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2025.07.018>
- [44] Wada, M., Nakajima, S., Taniguchi, K., Honda, S., Mimura, Y., Takemura, R., *et al.* (2025) Effectiveness of Sequential Bilateral Repetitive Transcranial Stimulation versus Bilateral Theta Burst Stimulation for Patients with Treatment-Resistant Depression (BEAT-D): A Randomized Non-Inferiority Clinical Trial. *Brain Stimulation*, **18**, 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2024.12.1474>
- [45] Blumberger, D.M., Mulsant, B.H., Thorpe, K.E., McClintock, S.M., Konstantinou, G.N., Lee, H.H., *et al.* (2022) Effectiveness of Standard Sequential Bilateral Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation vs Bilateral Theta Burst Stimulation in Older Adults with Depression: The FOUR-D Randomized Noninferiority Clinical Trial. *JAMA Psychiatry*, **79**, 1065-1073. <https://doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2022.2862>
- [46] Tavares, D.F., Suen, P., Rodrigues dos Santos, C.G., Moreno, D.H., Lane Valiengo, L.D.C., Klein, I., *et al.* (2021) Treatment of Mixed Depression with Theta-Burst Stimulation (TBS): Results from a Double-Blind, Randomized, Sham-Controlled Clinical Trial. *Neuropsychopharmacology*, **46**, 2257-2265. <https://doi.org/10.1038/s41386-021-01080-9>
- [47] Hoy, K.E., Segrave, R.A., Daskalakis, Z.J. and Fitzgerald, P.B. (2012) Investigating the Relationship between Cognitive Change and Antidepressant Response Following rTMS: A Large Scale Retrospective Study. *Brain Stimulation*, **5**, 539-546. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2011.08.010>
- [48] He, X. and Gao, X. (2025) Efficacy and Safety of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation for Major Depressive Disorder in Chinese Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Medicine*, **104**, e44663.
- [49] Koutsomitos, T., Evagorou, O., Schuhmann, T., Zamar, A. and Sack, A.T. (2021) Advances in Transcranial Magnetic Stimulation (TMS) and Its Applications in Resistant Depression. *Psychiatriki*, **32**, 90-98. <https://doi.org/10.22365/jpsych.2021.054>
- [50] Shere, S.S., Mehta, U.M. and Girimaji, S.C. (2021) Theta Burst Stimulation in Adolescent Depression: An Open-Label Evaluation of Safety, Tolerability, and Efficacy. *Brain Stimulation*, **14**, 1051-1053. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2021.07.002>
- [51] Xue, Y., Wang, H., Yue, J., *et al.* (2025) Effects of Accelerated Intermittent  $\theta$  Burst Stimulation on Depressive Episodes and Cognitive Function in Adolescents with Bipolar Disorder. *BMC Psychiatry*, **26**, Article No. 65. <https://doi.org/10.1186/s12888-025-07710-6>