

外周联合中枢rTMS促进脑卒中后上肢运动功能康复及研究进展

韩文秀^{1,2}, 王 博¹, 包乌兰², 朝木日力格², 王阿茹², 曹塔娜², 武树青³, 郝利霞^{4*}

¹内蒙古医科大学研究生学院, 内蒙古 呼和浩特

²呼和浩特市中医蒙医院物理检查科, 内蒙古 呼和浩特

³武树青蒙医诊所, 内蒙古 呼和浩特

⁴内蒙古医科大学附属医院康复科, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2025年8月17日; 录用日期: 2025年9月11日; 发布日期: 2025年9月22日

摘 要

重复经颅磁刺激(repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS)是一种无痛、无创的非侵袭性神经电生理技术, 近年来主要应用于脑卒中患者认知和运动功能障碍康复、精神病、脊髓损伤等疾病的治疗以及意识障碍患者的促醒治疗, 且改善脑卒中患者上肢运动功能的效果已被证实, 但目前临床上对外周联合中枢的重复经颅磁刺激研究机制进展还未有定论, 严重影响了外周联合中枢的重复经颅磁刺激技术的进一步探索、研究和推广。本文通过综述外周联合中枢的重复经颅磁刺激在脑卒中运动功能康复治疗中的研究进展, 并探索外周重复经颅磁刺激联合中枢重复经颅磁刺激促进脑卒中患者上肢运动功能的恢复的可能机制, 以期为脑卒中患者上肢运动功能障碍康复治疗和研究中提供新型的治疗策略和理论依据。

关键词

重复经颅磁刺激, 脑卒中, 上肢运动功能障碍

Peripheral Combined Central rTMS Promotes Upper Limb Motor Function Rehabilitation after Stroke and Research Progress

Wenxiu Han^{1,2}, Bo Wang¹, Wulan Bao², Murilige Chao², Aru Wang², Tana Cao², Shuqing Wu³, Lixia Hao^{4*}

¹School of Graduate Studies, Inner Mongolia Medical University, Hohhot Inner Mongolia

²Physical Examination Department, Chinese-Mongolian Hospital, Hohhot Inner Mongolia

³Wu Shuqing Mongolian Medicine Clinic, Hohhot Inner Mongolia

⁴Department of Rehabilitation, Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Hohhot Inner

*通讯作者。

文章引用: 韩文秀, 王博, 包乌兰, 朝木日力格, 王阿茹, 曹塔娜, 武树青, 郝利霞. 外周联合中枢 rTMS 促进脑卒中后上肢运动功能康复及研究进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(9): 1323-1332. DOI: 10.12677/acm.2025.1592627

Abstract

Repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) is a painless, non-invasive and non-invasive neurophysiological technique, which has been mainly used in the rehabilitation of cognitive and motor dysfunction in stroke patients, the treatment of psychiatric diseases, spinal cord injuries and other diseases, as well as the awakening of patients with disorders of consciousness in recent years. In recent years, it has been mainly applied to the treatment of cognitive and motor dysfunction in stroke patients, psychiatric disorders, spinal cord injury and other diseases, as well as to the awakening of patients with consciousness disorder, and the effect of improving the motor function of upper limbs in stroke patients has been confirmed. However, the progress of the research mechanism of the repetitive transcranial magnetic stimulation of the peripheral joint center has not yet been determined, which has seriously affected the further exploration, research and promotion of the repetitive transcranial magnetic stimulation of the peripheral joint center. In this paper, we review the research progress of peripheral and central repetitive transcranial magnetic stimulation in the rehabilitation of stroke motor function, and explore the possible mechanism of peripheral repetitive transcranial magnetic stimulation combined with central repetitive transcranial magnetic stimulation to promote the restoration of upper limb motor function in patients with stroke, with the aim of providing a new type of therapeutic strategy and theoretical basis for the rehabilitation of upper limb motor dysfunction in stroke patients and in the research.

Keywords

Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, Stroke, Upper Extremity Motor Dysfunction

Copyright © 2025 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. 脑卒中在国内流行现状及趋势

中国卒中学会发布的流行病学调查数据表明,我国现有卒中患者 1494 万人,每年新发卒中 330 万人,每年因卒中死亡 154 万人,卒中存活者中约有 80%左右留有不同程度的残疾,其中约有 75%丧失劳动能力,40%是严重残疾,生活完全不能自理,给个人健康、家庭、社会发展都带来了巨大的负担。在全球范围内,脑卒中是五大死亡原因之一。虽然大多数报道是在老年人群中,但近年来有大多数的年轻人被诊断为中风,糖尿病、高血压等患病率的增加以及物质使用障碍(SUDs)的增加可归因于年轻人卒中诊断的增加[1]。

2. 脑卒中引起国内外研究者关注原因

脑卒中是导致人类死亡和残疾的主要原因之一,严重威胁着人类生命与健康。且由于国内人口老龄化、风险因素(如高血压、糖尿病、高胆固醇血症)的高流行率和管理不足,使脑卒中的发病率与死亡率逐渐上升,我国脑卒中发病人群中年龄 < 70 岁的患者比例持续增加,且逐步呈年轻化趋势[2]。而随着现代

医学和重症监护技术的发展,脑卒中现阶段的救治率显著的提高,但患者治疗后,容易出现上肢运动功能受损的情况,严重影响了患者的生活质量。因此,对脑卒中后上肢运动功能障碍的康复引起了国内外研究者的极大关注。

3. rTMS 的概述

经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)是一种无痛安全的新型技术,可以产生强脉冲、电流流过线圈,并将其变成一个强大的脉冲磁场,通过作用于人体皮肤表面对颅骨形成刺激,之后传递至神经系统,进而影响脑部的新陈代谢,达到治疗疾病和改善症状的目的[3]。磁刺激根据作用部位不同可分为:经颅磁刺激和外周磁刺激,当线圈以重复脉冲磁刺激方式作用于头部特定区域或外周神经和肌肉时称为中枢重复经颅磁刺激或外周重复经颅磁刺激。

重复经颅磁刺激(repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS)是对 TMS 技术的进一步优化,通过脉冲磁场的有规律连续重复的刺激使同一时间段内多数的神经元细胞感受到兴奋性,从而形成积累效应作用于中枢神经系统,进而调节皮质兴奋性、发挥区域性重建的效应和长时程效应,重复经颅磁刺激是近年来发展的一种无创神经调控技术,已在治疗慢性疼痛、抑郁症、帕金森病、脑卒中等疾病方面显示出巨大的潜在价值[4]-[6]。重复经颅磁刺激具有比刺激持续时间更长的调节作用,从而调节神经可塑性。其作用原理是通过刺激线圈产生短暂、强大的脉冲磁场无衰减地穿越头皮和颅骨,在大脑皮层功能区的神经组织产生环形感应电流,从而改变皮层神经细胞的膜电位,影响脑内代谢和神经电活动及神经细胞兴奋性变化。

目前针对脑卒中患者上肢运动功能障碍的治疗有多种方法。常规治疗方法包括物理治疗,作业治疗,针灸、药物治疗等常用方法。虽然常规治疗对脑卒中患者上肢运动功能障碍的恢复有效果,但恢复时程长,且训练过程乏味,患者配合度一般。随着科学技术的发展近年来除了常规康复治疗方法以外,经颅电刺激、经颅磁刺激治疗技术逐渐应用到脑卒中后上肢功能障碍的康复过程。然而重复经颅磁刺激对脑卒中患者上肢运动功能障碍的早期恢复具有显著作用[7]。

4. 脑卒中导致上肢运动功能障碍的主要机制

4.1. 解剖结构

手部的功能依赖于大脑的运动皮层和运动通路,以及与之相关的脑干局灶和下丘脑核团。大脑运动皮层位于脑的裂回区,通过运动通路与脊髓的运动神经元连接,从而控制手部的运动和力量。

4.2. 功能区域

额叶皮质,特别是运动区的中央前回和额叶眶下回,被认为是控制手功能的主要区域。这些区域与背外侧纹状体丘脑通路(类似皮质锥体束)相连,通过脑干下行通路(比如脑桥皮质脊髓束)与脊髓的运动神经元连接。

4.3. 病理生理

脑卒中造成脑组织缺血缺氧,导致神经细胞的损伤和死亡。损伤程度取决于缺血时间、缺血区域和神经细胞类型等因素。在脑卒中后的病理过程中,大量神经细胞会发生坏死和凋亡,导致神经功能丧失。对于上肢功能障碍来说,主要是大脑运动皮层和运动通路的累及。

4.4. 功能性改变

脑卒中发生后,脑组织会出现水肿和炎症反应,导致脑内压力增高。这些改变会直接影响神经元的

正常功能。此外,损伤的神经元在康复过程中也会发生功能性改变,如突触可塑性的增强和重组等。这些改变可能导致神经元之间的信号传导异常,从而影响到上肢的正常功能。

5. rTMS 通过促进脑卒中患者上肢运动功能障碍的作用机制

重复经颅磁刺激(Repeated Transcranial Magnetic Stimulation, rTMS)是目前脑卒中后运动功能障碍研究中常用的康复治疗手段。国内外研究表明,重复经颅磁刺激对脑卒中患者上肢运动功能障碍恢复具有显著的临床疗效[8],自1992年美国率先推出了第一台重复经颅磁刺激仪器以来,被证实rTMS为重复进行成串的规律性TMS脉冲刺激[9]。既往研究表明rTMS能够调节大脑皮质兴奋性[10][11],改善皮质代谢及脑血流[12][13],通过促进神经突触影响多种神经递质的传递及基因表达水平等[14][15],促进脑卒中后上肢运动功能的恢复。rTMS还可以通过改变负责疼觉识别、调节大脑功能区活动来达到镇痛的作用[16],从而减轻脑卒中后偏瘫肩痛患者的疼痛。目前已报道的重复经颅磁刺激调控神经可塑性、改善脑卒中患者运动功能的可能机制有:

5.1. rTMS 调节皮质代谢及脑血流量

已有研究证实rTMS可能对皮质局部代谢水平及脑血流有调节作用[17],可以调整目标脑区和相互作用脑区的血流量和神经元的兴奋性,改善局部脑代谢[18]。

rTMS能够提高脑卒中患者对葡萄糖摄取,改善脑代谢水平,进而促进卒中后运动功能恢复,改善神经功能[19],钱立峰等[20]研究发现用低频1 Hz的rTMS刺激脑卒中患者M1区4周后,其颅内相应血管的血流速度均有明显增加,脑部供血得到改善,低频rTMS能够有效提高脑卒中患者的脑血流速度,对病灶区脑细胞的功能恢复具有一定的促进作用,从而进一步改善脑卒中患者上肢运动功能。

5.2. rTMS 具有神经可塑性

rTMS具有重塑神经功能、修复受损神经元的作用,能够影响局部及远隔皮层功能,调节神经递质水平,进而重建皮层区域性功能;且rTMS能够减轻神经细胞损伤程度,促进新传导通路形成,提高乙酰胆碱水平,进而改善上肢运动功能,达到康复目的[21][22]。神经可塑性是运动功能再学习的重要过程,神经可塑性表现为对突触长时程增强(long-term potentiation, LTP)和长时程抑制(long-term depression, LTD)。大多数学者认为低频(low frequency rTMS, LF-rTMS)频率为 ≤ 1 Hz,高频(high frequency rTMS, HF-rTMS)频率为 >1 Hz。高频刺激具有增强半球兴奋性的作用,产生LTP效应;低频具有抑制性效果,引发LTD。rTMS调节神经递质浓度促进神经可塑性,研究表明,低频和高频的刺激分别增加抑制性神经递质 γ -氨基丁酸和促进性神经递质谷氨酸的浓度,联合刺激可显著降低初级运动皮质(primary motor cortex, M1区)的抑制性神经递质 γ -氨基丁酸水平[23]。rTMS可在一定程度上修复脑卒中后损伤的神经功能,减轻神经功能损伤程度,改善脑卒中后上肢运动功能障碍,从而进一步提高脑卒中患者日常生活质量[24]。

5.3. rTMS 调节脑内神经营养因子的表达

脑源性神经营养因子(brain-derived neurotrophic Factor, BDNF)是人脑中含量最丰富的神经营养因子,具有显著的神经保护功能[25],脑源性神经营养因子、神经元特异性烯醇化酶等[26],高频刺激诱发BDNF的表达来增强LTP效应,低频刺激时表达的BDNF诱导LTD现象。BDNF参与运动神经元和脊髓传入纤维之间的突触发生,较高含量的BDNF有引起突触增强、调节轴突形态的作用,高频rTMS可增加BDNF和钙依赖信号通路,促进LTP效应[27]。高频rTMS可以修复损伤的神经元,并进一步诱导神经纤维再生,有利于增加皮质及其投射纤维数量,使健侧与患侧所支配的皮质区域网络兴奋性均得到

改善, 高频 rTMS 比低频 rTMS 更有效改善脑卒中患者脑循环和代谢, 且有利于上调 BDNF 表达水平, 能够控制 NSE 分泌和释放, 进而影响脑部代谢水平, 帮助患者神经功能恢复[28]。

5.4. rTMS 改善大脑兴奋性

正常大脑两侧半球的兴奋性均处于一定范围, 相互抑制且保持平衡状态。当一侧大脑半球受损时, 平衡状态遭到破坏, 即患侧半球兴奋性降低, 同时受到健侧半球的抑制作用, 进一步降低调节功能, 使支配的肢体产生功能障碍。

rTMS 可在大脑皮质层的特定区域作用, 产生的磁场可无衰减地穿透颅骨和大脑皮层, 并在大脑深部形成感应电流, 进而影响大脑内的生物电活动[29] rTMS 具有频率和时间模式可调节性的优点, 对大脑皮层的刺激效应取决于刺激参数, 高频(5~20 Hz)刺激被认为能够诱导神经突触长时程增强从而促进大脑皮层的兴奋性[8] [30], 而低频经颅磁刺激则相反, 通过诱导神经突触长时程抑制降低大脑皮层的兴奋性。其中, rTMS 对远侧脑网络的调节在神经生理学研究中得到证实, 该研究报道了对脑卒中患者的初级运动皮层经颅磁刺激诱导了 M1 区兴奋性的调节变化[25] [31] [32], 大脑半球 M1 区被认为是执行运动系统中最关键的部位, 特别适用于选择性地激活与熟练的上肢运动行为[33]。脑卒中上肢运动功能障碍的刺激靶点往往选择在大脑初级运动皮质 M1 区。低频率 rTMS 治疗会使脑卒中患者健侧半球皮质兴奋性产生一定的抑制效应, 在恢复期间通过减轻患侧的抑制作用达到对患侧半球的抑制效果, 从而改善双侧大脑的兴奋性, 加速患侧半球受损神经元及神经网络向良性改变, 帮助该区域的皮质功能修复, 进而发挥治疗效果[34]。高频率 rTMS 治疗后对受损的神经细胞具有一定的修复效果, 通过兴奋健侧半球加速其发生重组, 以健侧带动患侧, 帮助受损区皮质功能重建, 提高康复疗效[35]。

6. 外周重复经颅磁刺激促进脑卒中患者运动功能障碍作用机制

外周重复经颅磁刺激(repetitive peripheral magnetic stimulation, rPMS): 是磁刺激线圈以重复脉冲磁刺激作用于外周神经和肌肉, 属于一种远隔神经肌肉刺激技术, rPMS 作为一种康复治疗手段, 其非侵入性、无痛的实施方式, 使得在应用的安全性方面具有较好的保障。现今正运用于临床疾病治疗, 具有双向的神经激活作用, 其疗效也在临床研究中得到了证实[36]。

6.1. rPMS 改善上肢运动功能的影响

关于 rPMS 所产生的生理效应及其作用机制的研究已有多个报道, 总体来讲主要集中在刺激所诱导的皮质、脊髓和外周神经以及局部组织等三个层面的变化。Struppler 等[37]应用 H2O15-PET (positron emission tomography)测量卒中患者在接受 rPMS 干预前后局部脑血流量(regional cerebral blood flow)的变化, 发现偏瘫侧前臂的 rPMS 能明显增加运动任务中卒中侧大脑顶叶后上部、运动前区的激活程度, 同时伴随着偏瘫侧上肢运动学指标的改善和痉挛程度的降低。rPMS 对脑卒中患者上肢和手痉挛以及运动功能有即刻影响作用[38], Struppler 等[37]通过 PET 观察到, 患者 rPMS 后执行运动任务时, 与干预前相比较, 初级感觉运动皮质激活程度与 rPMS 前相同, 同时对侧顶叶皮质和扣带回相邻部分辅助运动区显著激活, 双侧新纹状体和小脑激活明显减少。rPMS 导致肌张力降低, 可能通过对中枢神经系统本体感受性输入的诱导而产生, rPMS 在生理上与主动运动产生的输入相似, 进而激活神经网络的重组[39]。这也与贾杰教授提出的“中枢-外周-中枢”闭环康复理念相符[40]。

6.2. rPMS 对脊髓和周围神经的影响

rPMS 没有明显的高频低频的区别, 目前常用研究多为 10 Hz、15 Hz、25 Hz。rPMS 通过诱导本体感

觉的输入,对神经疾病引起的肢体运动功能障碍及大脑皮层具有积极的调节作用[41]。低于 25 Hz 的 rPMS 可重塑大脑皮质和周围神经,而对脊髓无影响[41], Zschorlich [42]等研究发现,高达 75 Hz 的 rPMS 可能降低脊髓的兴奋性[43], 10 Hz、15 Hz、25 Hz 的 rPMS 用于缓解痉挛[44][45]、提高肢体感觉运动功能[46][47]、促进周围神经损伤的修复[48],并且使损伤周围神经的感觉传导趋于正常化。低频 rPMS 能够缓解周围神经损伤引起的疼痛。有研究显示[49], 20 min 针对手部的 rPMS 刺激后,刺激侧手部皮肤温度显著高于未接受磁刺激治疗侧手部皮温。这表明 rPMS 刺激使局部血流量增加。原因可能是由于磁刺激使局部血流中产生微电流,从而影响血液中的离子含量及流动性,并最终影响植物神经系统和周围循环的结果。

7. rTMS 和 rPMS 分组分析

在进行 rTMS 治疗中刺激患侧大脑半球 M1 区[50]。在进行 rPMS 治疗时刺激部位为患侧上肢 Erb 氏点(臂丛神经最表浅处),低频 rPMS 对大脑皮质有积极的调节和促进运动功能障碍修复,进一步降低痉挛有助于进行康复锻炼及患侧上肢运动功能恢复,高频 rTMS 能够提高大脑神经兴奋性还能增加局部血流量、调控神经递质释放、修复损伤的神经元等,低频 rTMS 降低大脑皮层的兴奋性,改善脑部血供及代谢、上调 BDNF 表达水平等不显著,高频 rPMS 只有降低脊髓的兴奋性作用。见表 1。

Table 1. Comparison of different study parameters and results of rTMS and rPMS

表 1. rTMS 和 rPMS 不同研究参数及结果对比

刺激组		rTMS		rPMS	
高低 频组		低频组(<5 Hz)	高频组(≥5 Hz)	低频组(<25 Hz)	高频组(>75 Hz)
结果		降低大脑皮层的兴奋性,改善 脑部血供及代谢、上调 BDNF 表达水平等不显著。	促进大脑皮层的兴奋性、有效 改善脑部血供及代谢、有利于 上调 BDNF 表达水平。	促进周围神经修复、对肢体 运动功能障碍及大脑皮层具 有积极的调节作用。	降低脊髓的兴奋 性。

注: rPMS: 外周重复经颅磁刺激; rTMS: 重复经颅磁刺激。

在进行 rTMS 治疗中刺激患侧大脑半球 M1 区[50]。在进行 rPMS 治疗时刺激部位为患侧上肢 Erb 氏点(臂丛神经最表浅处),低频 rPMS 对大脑皮质有积极的调节和促进运动功能障碍修复,进一步降低痉挛有助于进行康复锻炼及患侧上肢运动功能恢复,高频 rTMS 能够提高大脑神经兴奋性还能增加局部血流量、调控神经递质释放、修复损伤的神经元等,低频 rTMS 降低大脑皮层的兴奋性,改善脑部血供及代谢、上调 BDNF 表达水平等不显著,高频 rPMS 只有降低脊髓的兴奋性作用。

rPMS 常与中枢重复经颅磁刺激联合使用,形成了外周联合中枢重复经颅磁刺激[51]。在外周联合中枢重复经颅磁刺激治疗时,选择低频 rPMS 和高频 rTMS 联合使用不仅能够提高中枢神经兴奋性还能增加局部血流量、调控神经递质释放、修复损伤的神经元、而且对大脑皮质有积极的调节和促进运动功能障碍修复、降低痉挛等,还有研究表明高频 rTMS 重建运动网络连通性相比低频 rTMS 显著增加[52]。

8. 外周联合中枢重复经颅磁刺激方案

目前未有明确报道关于使用外周联合中枢 rTMS 治疗方案以及时序性,大部分研究使用中枢 rTMS 促进脑卒中后患侧上肢运动功能时选择高频 rTMS、刺激部位为患侧大脑半球 M1 区、刺激时间 1.5 s,刺激间歇 5 s,刺激强度 80% RMT,总时长 17.15 min,1 次/d,5 次/周,共 2 周。低频 rPMS 治疗, rPMS 刺激部位:患侧上肢 Erb 点,刺激参数:中枢刺激同中枢组,外周刺激刺激强度为 150% RMT [10],1 次

/d, 5 次/周, 共 2 周[53]。

9. 总结

目前外周与中枢的磁联合刺激均未报道类似常规磁刺激特殊的不良反应,故 rPMS 及其联合 rTMS 应用在安全性上与常规磁刺激并无显著不同[54]。rPMS 直接激活运动环路以及外周神经肌肉,弥补中枢磁刺激的不足,此外可以有效激活自下而上通过本体感觉和浅感觉激活大脑皮层,促进目标性运动学习,继而有效激活运动皮层,低频 rPMS 联合高频 rTMS 可以改善患者运动功能及活动能力,缩短 MEP 潜伏期和中枢运动传导时间(central motor conduction time, CMCT)且对脑卒中后运动功能障碍的疗效更佳[55]-[60]。外周联合中枢重复经颅磁刺激是通过激活外周感觉运动传导(rPMS),和运动传导(rTMS),从而达到一个闭环治疗效应。

外周联合中枢磁刺激对经典的 rTMS 技术实现了取长补短。此外,对脑卒中患者具有较好的耐受性和配合性,为脑卒中患者运动功能障碍康复治疗中提供了极大潜能。

总之,许多研究表明,经颅磁刺激技术具有提高意识和认知运动功能的治疗潜力,它可能通过促进神经重塑及提高脑网络的活动水平及脑血流变化等加速脑卒中后上肢运动功能障碍的恢复。

基金项目

内蒙古自治区自然科学基金项目(2020, MSO8049); 内蒙古自治区卫生健康委 2022 年度医疗卫生科技计划项目(202201254)。

参考文献

- [1] Patel, U., Tavrawala, K., Mohammad, Z., et al. (2022) Abstract 13921: Substance Use Disorders and Prevalence of Stroke Amongst the US Population. *Circulation*, **146**, A13921. https://doi.org/10.1161/circ.146.suppl_1.13921
- [2] 熊文婧, 徐杰茹, 张敏, 姚承志, 赵湘铃, 吴霞, 让蔚清. 2005-2019 年中国脑卒中发病与死亡趋势及未来十年预测[J]. 现代预防医学, 2024(1): 15-20.
- [3] Jannati, A., Oberman, L.M., Rotenberg, A. and Pascual-Leone, A. (2023) Assessing the Mechanisms of Brain Plasticity by Transcranial Magnetic Stimulation. *Neuropsychopharmacology*, **48**, 191-208. <https://doi.org/10.1038/s41386-022-01453-8>
- [4] 庞瑞丰, 唐强, 宋文婧, 吴民民, 朱路文. 重复经颅磁刺激对帕金森病患者步行能力和平衡功能影响的 Meta 分析[J]. 中国康复医学杂志, 2024, 39(4): 550-557.
- [5] 王美洁, 时亚杰, 杨鹏, 王建军, 李迎寅, 崔健, 张校明. 重复经颅磁刺激或无抽搐电休克治疗联合抗抑郁药物对重度抑郁障碍的疗效和安全性[J]. 四川精神卫生, 2024, 37(2): 108-113.
- [6] 单文文, 张红霞, 姜贵贤. 重复经颅磁刺激预防慢性偏头痛的临床疗效和安全性的 Meta 分析[J]. 医学信息, 2024, 37(9): 48-53.
- [7] 黄媛, 林瑞珠, 马良辰, 田富宝, 李泓钰, 朱宁. 双侧半球重复经颅磁刺激对脑卒中恢复期患者上肢运动功能及血清 BDNF 水平的影响[J]. 宁夏医科大学学报, 2023, 45(4): 376-381+405.
- [8] 梁雪琴, 马惠姿, 潘芳芳, 李娜, 段亚男, 张香玉. 高频重复经颅磁刺激结合肢体功能训练对缺血性脑卒中患者神经电生理的影响[J]. 中国实用神经疾病杂志, 2023, 26(4): 460-465.
- [9] 薛慧, 王宝军, 刘国荣, 等. 高频及低频重复经颅磁刺激对急性期脑梗死患者运动功能恢复的临床研究[J]. 中国康复医学杂志, 2013, 28(11): 1030-1034.
- [10] 吴涛, 李蕴琛, Martin, S., 等. 经颅重复磁刺激对人脑皮层兴奋性的影响[J]. 中华神经科杂志, 2001, 34(1): 40-42.
- [11] 靳静娜. rTMS 联合运动训练对运动功能及脑网络连接影响的研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京协和医学院, 2017.
- [12] 杨德本, 谢建平, 王晓明. 重复经颅磁刺激对正常人脑血流灌注和速度的影响[J]. 中国临床康复, 2005, 9(37): 50-51.
- [13] 王晓明, 谢建平, 黄慧, 等. 正常人重复经颅磁刺激后脑血流速度的变化[J]. 临床神经电生理学杂志, 2003, 12(4):

- 202-203.
- [14] 赵合庆, 孙永安, 戴永萍, 等. 经颅磁刺激对脑缺血大鼠皮层脑源性神经营养因子表达及梗死体积的影响[J]. 中华神经科杂志, 2005, 38(5): 330-331.
- [15] 江岩, 杨勇. 经颅磁刺激结合康复治疗对脑卒中偏瘫患者上肢运动功能及神经递质的影响[J]. 中国医学创新, 2025, 22(16): 108-112.
- [16] 于洪丽, 徐桂芝, 杨硕, 等. 磁刺激穴位镇疼诱发的脑电信号特征成分及源定位[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(9): 1639-1642.
- [17] Okabe, S., Hanajima, R., Ohnishi, T., Nishikawa, M., Imabayashi, E., Takano, H., *et al.* (2003) Functional Connectivity Revealed by Single-Photon Emission Computed Tomography (SPECT) during Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation (rTMS) of the Motor Cortex. *Clinical Neurophysiology*, **114**, 450-457. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(02\)00408-x](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(02)00408-x)
- [18] 杨泉, 陈敬君, 鲍晓, 等. 针灸结合低频重复经颅磁刺激治疗脑梗死运动性失语的临床效果[J]. 中国当代医药, 2020, 27(12): 49-52.
- [19] 鲁遥, 王鹏. 经颅磁刺激疗法在脑卒中康复治疗中的研究进展[J]. 中国卫生标准管理, 2024(13): 195-198.
- [20] 钱立锋, 金文杰, 朱鑫鑫, 等. 低频重复经颅磁刺激对脑卒中患者上肢运动功能及脑血流的影响[J]. 中国现代医生, 2022, 60(9): 88-92.
- [21] 钟立达, 刘惠宇, 鲍晓, 李芳. 小脑重复经颅磁刺激治疗脑卒中后吞咽障碍的疗效观察[J]. 中国康复, 2021, 36(2): 106-108.
- [22] 余晖, 宋哲. 重复经颅磁刺激联合认知康复训练治疗脑卒中后认知障碍的临床效果[J]. 中国医药科学, 2021, 11(4): 31-34.
- [23] 纪栋起, 武亮, 李欢欢, 靳沙沙, 范维娇. 不同频率的重复经颅磁刺激对脑卒中上肢运动功能恢复的影响[J]. 中国医药导报, 2024, 21(13): 177-180.
- [24] 高伟伟, 夏彬, 翟清华, 单秋菊. 重复经颅磁刺激对脑卒中后运动功能障碍的临床研究[J]. 医药论坛杂志, 2023, 44(16): 57-60.
- [25] Münchau, A., Bloem, B.R., Irlbacher, K., Trimble, M.R. and Rothwell, J.C. (2002) Functional Connectivity of Human Premotor and Motor Cortex Explored with Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation. *The Journal of Neuroscience*, **22**, 554-561. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.22-02-00554.2002>
- [26] Shah-Basak, P., Harvey, D.Y., Parchure, S., Faseyitan, O., Sacchetti, D., Ahmed, A., *et al.* (2020) Brain-Derived Neurotrophic Factor Polymorphism Influences Response to Single-Pulse Transcranial Magnetic Stimulation at Rest. *Neuro-modulation: Technology at the Neural Interface*, **24**, 854-862. <https://doi.org/10.1111/ner.13287>
- [27] 余安康, 张文倩, 杨初燕. 重复经颅磁刺激对脑卒中后上肢运动障碍影响的研究进展[J]. 中国康复医学杂志, 2022, 37(12): 1733-1738.
- [28] 王景峰, 秦佳维, 陈培红, 等. 不同频率重复经颅磁刺激对单侧大脑半球脑卒中后吞咽障碍患者吞咽功能、神经功能及血清 BDNF 水平的影响[J/OL]. 成都医学院学报, 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1705.r.20240307.1921.002.html>, 2024-08-14.
- [29] 吕亚希, 庞争争, 谭大洲, 周锐. 重复经颅磁刺激结合反复促通疗法对脑卒中后下肢运动功能的影响[J]. 中国康复, 2024, 39(6): 336-339.
- [30] 陈丰玲. 高频重复经颅磁刺激对脑梗死患者认知功能及神经电生理的影响[J]. 哈尔滨医药, 2022, 42(3): 105-106.
- [31] Gerschlagel, W., Siebner, H.R. and Rothwell, J.C. (2001) Decreased Corticospinal Excitability after Subthreshold 1 Hz rTMS over Lateral Premotor Cortex. *Neurology*, **57**, 449-455. <https://doi.org/10.1212/wnl.57.3.449>
- [32] Rizzo, V., Siebner, H.R., Modugno, N., Pesenti, A., Münchau, A., Gerschlagel, W., *et al.* (2004) Shaping the Excitability of Human Motor Cortex with Premotor rTMS. *The Journal of Physiology*, **554**, 483-495. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.048777>
- [33] Maier, M.A. (2002) Differences in the Corticospinal Projection from Primary Motor Cortex and Supplementary Motor Area to Macaque Upper Limb Motoneurons: An Anatomical and Electrophysiological Study. *Cerebral Cortex*, **12**, 281-296. <https://doi.org/10.1093/cercor/12.3.281>
- [34] Zou, F.J., Chen, X.X., Niu, L.C., *et al.* (2023) Effect of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation on Post-Stroke Dysphagia in Acute Stage. *Dysphagia*, **38**, 1117-1127. <https://doi.org/10.1007/s00455-022-10533-2>
- [35] Xie, Y.L., Wang, S., Yang, J., *et al.* (2022) Theta Burst Stimulation versus High-Frequency Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation for Poststroke Dysphagia: A Randomized, Double-Blind, Controlled Trial. *Medicine*, **101**, e28576. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000028576>

- [36] 刘浩, 贾延兵, 魏静, 李朵, 汪纯. 重复外周磁刺激在康复治疗中的应用及研究进展[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36(5): 631-637.
- [37] Struppler, A., Binkofski, F., Angerer, B., Bernhardt, M., Spiegel, S., Drzezga, A., *et al.* (2007) A Fronto-Parietal Network Is Mediating Improvement of Motor Function Related to Repetitive Peripheral Magnetic Stimulation: A PET-H₂O¹⁵ Study. *NeuroImage*, **36**, T174-T186. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.03.033>
- [38] 李阳, 陈树耿, 王传凯, 等. 重复外周磁刺激对脑卒中患者上肢痉挛和运动功能的即刻影响[J]. 中国康复理论与实践, 2018, 24(12): 1376-1379.
- [39] Struppler, A., Havel, P. and Müller-Barna, P. (2003) Facilitation of Skilled Finger Movements by Repetitive Peripheral Magnetic Stimulation (RPMS)—A New Approach in Central Paresis. *NeuroRehabilitation*, **18**, 69-82. <https://doi.org/10.3233/nre-2003-18108>
- [40] 贾杰. “中枢-外周-中枢”闭环康复——脑卒中后手功能康复新理念[J]. 中国康复医学杂志, 2016, 31(11): 1180-1182.
- [41] 程期琳. rTMS 联合 rPMS 对脑卒中患者上肢运动功能和皮层兴奋性的影响[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海体育学院, 2023.
- [42] 徐丹丹. 中枢联合外周磁刺激对卒中患者上肢屈肌痉挛的影响[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州大学, 2022.
- [43] Zschorlich, V.R., Hillebrecht, M., Tanjour, T., Qi, F., Behrendt, F., Kirschstein, T., *et al.* (2019) Repetitive Peripheral Magnetic Nerve Stimulation (rPMS) as Adjuvant Therapy Reduces Skeletal Muscle Reflex Activity. *Frontiers in Neurology*, **10**, Article 930. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00930>
- [44] Chen, S., Li, Y., Shu, X., Wang, C., Wang, H., Ding, L., *et al.* (2020) Electroencephalography Mu Rhythm Changes and Decreased Spasticity after Repetitive Peripheral Magnetic Stimulation in Patients Following Stroke. *Frontiers in Neurology*, **11**, Article 546599. <https://doi.org/10.3389/fneur.2020.546599>
- [45] Krewer, C., Hartl, S., Müller, F. and Koenig, E. (2014) Effects of Repetitive Peripheral Magnetic Stimulation on Upper-Limb Spasticity and Impairment in Patients with Spastic Hemiparesis: A Randomized, Double-Blind, Sham-Controlled Study. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **95**, 1039-1047. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.02.003>
- [46] Obayashi, S. and Takahashi, R. (2020) Repetitive Peripheral Magnetic Stimulation Improves Severe Upper Limb Paresis in Early Acute Phase Stroke Survivors. *Neuro Rehabilitation*, **46**, 569-575. <https://doi.org/10.3233/nre-203085>
- [47] Kinoshita, S., Ikeda, K., Hama, M., Suzuki, S. and Abo, M. (2020) Repetitive Peripheral Magnetic Stimulation Combined with Intensive Physical Therapy for Gait Disturbance after Hemorrhagic Stroke: An Open-Label Case Series. *International Journal of Rehabilitation Research*, **43**, 235-239. <https://doi.org/10.1097/mrr.0000000000000416>
- [48] Lo, Y.L., Fook-Chong, S., Huerto, A.P. and George, J.M. (2011) A Randomized, Placebo-Controlled Trial of Repetitive Spinal Magnetic Stimulation in Lumbosacral Spondylotic Pain. *Pain Medicine*, **12**, 1041-1045. <https://doi.org/10.1111/j.1526-4637.2011.01143.x>
- [49] Yambe, T., Inoue, A., Sekine, K., Shiraishi, Y., Watanabe, M., Yamaguchi, T., *et al.* (2005) Effect of the Alternative Magnetic Stimulation on Peripheral Circulation for Regenerative Medicine. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, **59**, S174-S176. [https://doi.org/10.1016/s0753-3322\(05\)80027-7](https://doi.org/10.1016/s0753-3322(05)80027-7)
- [50] Sasaki, N., Kakuda, W. and Abo, M. (2014) Bilateral High- and Low-Frequency rTMS in Acute Stroke Patients with Hemiparesis: A Comparative Study with Unilateral High-Frequency rTMS. *Brain Injury*, **28**, 1682-1686. <https://doi.org/10.3109/02699052.2014.947626>
- [51] 郑娅, 许东升. 多靶区协同增强神经环路调控: 思考与创新[J]. 四川大学学报(医学版), 2020, 51(5): 587-591+582.
- [52] 杨昌霞. 高、低频 rTMS 治疗脑卒中后运动功能障碍的疗效对比及功能网络研究[D]: [硕士学位论文]. 泸州: 西南医科大学, 2018.
- [53] 张永卿. 经颅联合外周磁刺激对脑卒中患者上肢运动功能及日常生活活动能力的影响[D]: [硕士学位论文]. 蚌埠: 蚌埠医学院, 2023.
- [54] Rossi, S., Hallett, M., Rossini, P.M. and Pascual-Leone, A. (2009) Safety, Ethical Considerations, and Application Guidelines for the Use of Transcranial Magnetic Stimulation in Clinical Practice and Research. *Clinical Neurophysiology*, **120**, 2008-2039. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.08.016>
- [55] 徐榕, 朱光跃, 王勇, 等. 外周磁刺激结合经颅磁刺激对脑卒中后上肢痉挛的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36(8): 943-948.
- [56] 俞风云, 朱玉连, 梁思捷, 等. 经颅和外周磁刺激治疗脑卒中后上肢运动功能障碍的随机对照研究[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36(5): 538-545.
- [57] 严晶晶, 袁海峰, 张妮, 等. 中枢联合外周重复磁刺激对卒中后运动功能障碍的疗效[J]. 华西医学, 2021, 36(5): 588-594.

- [58] 夏菁, 郝又国, 陈繆存, 等. 高频重复经颅磁刺激结合外周磁刺激治疗脑卒中后肌痉挛的临床研究[J]. 神经损伤与功能重建, 2022, 17(8): 478-481.
- [59] Yang, T., Li, X., Xia, P., *et al.* (2023) Effects of rTMS Combined with rPMS on Stroke Patients with Arm Paralysis after Contralateral Seventh Cervical Nerve Transfer: A Case-Series. *International Journal of Neuroscience*, **133**, 999-1007.
- [60] Cavinato, M., Iaia, V. and Piccione, F. (2012) Repeated Sessions of Sub-Threshold 20-Hz rTMS. Potential Cumulative Effects in a Brain-Injured Patient. *Clinical Neurophysiology*, **123**, 1893-1895.
<https://doi.org/10.1016/j.clinph.2012.02.066>