

# 小脑间歇性 $\theta$ 爆发刺激对卒中后下肢功能和平衡的疗效研究

陈镜宇, 柳希芹, 郭壮丽\*

青岛大学附属医院康复医学科, 山东 青岛

收稿日期: 2026年3月13日; 录用日期: 2026年4月6日; 发布日期: 2026年4月14日

## 摘要

目的: 探讨针对健侧小脑半球的间歇性 $\theta$ 爆发刺激(iTBS)对脑卒中后患者下肢运动功能及平衡能力的康复疗效及神经生理机制。方法: 选取24例脑卒中后下肢功能障碍患者, 采用随机、双盲、假刺激对照设计分为试验组(小脑-iTBS)和对照组(假-iTBS), 每组12例。两组均接受常规康复训练, 试验组在此基础上对健侧小脑半球实施iTBS干预, 对照组给予假刺激, 每天1次, 每周5天, 连续3周。采用Berg平衡量表(BBS)、Fugl-Meyer下肢运动功能评定量表(FMA-LE)及运动诱发电位(MEP)评定疗效。结果: 治疗3周后, 两组BBS、FMA-LE评分均较治疗前显著提高。组间比较显示, 试验组BBS及FMA-LE评分的改善程度显著优于对照组( $P < 0.05$ )。电生理方面, 试验组患侧MEP波幅的增幅显著高于对照组( $P < 0.05$ ), 但两组间MEP潜伏期无显著差异。结论: 在常规康复基础上联合健侧小脑半球iTBS, 能更有效地改善脑卒中患者的下肢运动功能与平衡能力, 其机制可能与激活小脑-丘脑-皮层通路、增强皮质脊髓兴奋性并促进运动网络重组有关。

## 关键词

脑卒中, 间歇性 $\theta$ 短阵爆发刺激, 小脑, 下肢运动功能, 平衡

# Therapeutic Effects of Cerebellar Intermittent Theta-Burst Stimulation on Lower-Limb Function and Balance after Stroke

Jingyu Chen, Xiqin Liu, Zhuangli Guo\*

Department of Rehabilitation Medicine, The Affiliated Hospital of Qingdao University, Qingdao Shandong

Received: March 13, 2026; accepted: April 6, 2026; published: April 14, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 陈镜宇, 柳希芹, 郭壮丽. 小脑间歇性 $\theta$ 爆发刺激对卒中后下肢功能和平衡的疗效研究[J]. 临床医学进展, 2026, 16(4): 3053-3060. DOI: 10.12677/acm.2026.1641564

## Abstract

**Objective:** To investigate the rehabilitative effects and neurophysiological mechanisms of intermittent Theta-Burst Stimulation (iTBS) targeting the contralesional cerebellar hemisphere on lower-limb motor function and balance in patients after stroke. **Methods:** Twenty-four post-stroke patients with lower-limb dysfunction were enrolled and randomly assigned to an experimental group (cerebellar iTBS,  $n = 12$ ) or a control group (sham iTBS,  $n = 12$ ) in a double-blind, sham-controlled design. Both groups received conventional rehabilitation training. Additionally, the experimental group underwent iTBS over the contralesional cerebellar hemisphere, while the control group received sham stimulation once daily, 5 days per week, for 3 consecutive weeks. Outcomes were assessed using the Berg Balance Scale (BBS), the Fugl-Meyer Assessment for the Lower Extremity (FMA-LE), and Motor-Evoked Potentials (MEPs). **Results:** After 3 weeks of treatment, BBS and FMA-LE scores increased significantly in both groups compared with baseline. Between-group comparisons showed that improvements in BBS and FMA-LE were significantly greater in the experimental group than in the control group ( $P < 0.05$ ). Neurophysiologically, the increase in MEP amplitude on the affected side was significantly greater in the experimental group than in the control group ( $P < 0.05$ ), whereas no significant between-group difference was observed in MEP latency. **Conclusion:** Adding iTBS over the contralesional cerebellar hemisphere to conventional rehabilitation more effectively improves lower-limb motor function and balance in patients after stroke. The underlying mechanism may involve activation of the cerebello-thalamo-cortical pathway, enhancement of corticospinal excitability, and facilitation of motor network reorganization.

## Keywords

Stroke, Intermittent Theta-Burst Stimulation (iTBS), Cerebellum, Lower Limb Motor Function, Balance

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

脑卒中是全球范围内导致成年人死亡与长期残疾的主要原因之一[1]。卒中后患者常常会遗留不同程度的运动功能障碍，而下肢运动功能障碍是其最常见的并发症之一，这些障碍具体表现为肌力减弱、姿势控制受限以及步态异常等问题，导致很多患者难以独立完成站立、转身和行走等最基本的活动。长期来看，这不仅严重限制了患者的日常生活活动和社会参与能力，还会增加再住院率和护理负担，显著降低患者的生活质量[2] [3]。

目前临床广泛采用的常规康复治疗往往仅依靠对于外周肢体的反复训练，虽然在一定程度上能够促进运动功能的恢复，但对于部分患者而言，其效果往往并不理想。已有研究提示，即使接受了规范的康复治疗，仍有约 50%~60% 的患者在卒中后遗留持续性的运动功能受限[4]。因此，在传统康复训练的基础上，如何更有效地激活并促进中枢神经可塑性，逐渐成为卒中后下肢功能康复领域关注的核心议题与研究热点[5] [6]。

重复经颅磁刺激(repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, rTMS)作为一种无创的神经调控技术，可以通过调节大脑皮层兴奋性来促进中枢神经可塑性，已成为改善脑卒中后肢体功能障碍的重要补充手段，

并在临床康复中取得了显著成效[2]。近年来发展出的间歇性 $\theta$ 爆发刺激(intermittent Theta-Burst Stimulation, iTBS)则是一种特殊的 rTMS 模式,它以接近生理 $\theta$ 频率的节律成串输出[7],在相对较低的刺激强度和较短的治疗时间内,即可诱导类似长时程增强(Long-Term Potentiation, LTP)形式的突触可塑性[8][9]。

有功能性磁共振成像研究提示,对侧小脑的活动水平与卒中后患者的步态恢复呈正相关[10]。2019年, Koch 等人在“JAMA Neurology”发表的研究首次证实,针对健侧小脑半球的 iTBS 能显著改善卒中患者的步态和平衡功能,且这种改善与皮层网络连接的重塑密切相关[11]。然而,与上肢运动功能康复方面已有的大量证据相比,目前关于 iTBS 促进卒中后下肢运动功能恢复的研究仍然相对有限[12],且现有结论存在一定分歧[13][14]。

基于上述背景,本研究拟采用随机对照试验(RCT)设计,探究小脑间歇性 $\theta$ 爆发刺激(Cerebellar iTBS)对脑卒中患者下肢运动功能及平衡能力的康复疗效。本研究以 Berg 平衡量表(Berg Balance Scale, BBS)、Fugl-Meyer 下肢运动功能评定量表(Fugl-Meyer Assessment scale for Lower Extremity, FMA-LE)及运动诱发电位(Motor Evoked Potential, MEP)作为主要评价指标,比较小脑 iTBS 与假刺激(Sham iTBS)之间的疗效差异,以期为 iTBS 在脑卒中后下肢功能康复中的临床应用提供更扎实的理论依据和更可行的优化思路。

## 2. 资料和方法

### 2.1. 研究对象及分组

本研究经青岛大学附属医院伦理委员会批准(伦理号为 QYFYWZLL42037),选取 2024 年 10 月至 2025 年 10 月于青岛大学附属医院康复医学科住院接受治疗的卒中后下肢功能障碍患者 24 例。

纳入标准:① 诊断依据中华医学会神经病学分会脑血管病学组修订的《中国各类主要脑血管病诊断要点 2019》[15]中的相关标准,并经 CT 和/或 MRI 证实为首次出现的单侧大脑半球缺血性/出血性脑卒中;② 病程在 2 周~6 个月之间;③ 年龄在 40~75 岁之间;④ 能够遵循简单的口头指令;⑤ 签署知情同意书。

排除标准:① 存在 TMS 禁忌证,如有颅内植入物、心脏起搏器、植入药泵、妊娠者;② 卒中发病前已存在平衡功能或下肢功能障碍者;③ 合并严重本体感觉、前庭或视力障碍者;④ 伴有可能导致病情进展的严重疾病,如严重颈椎病、严重颈椎管狭窄或颈内动脉完全闭塞者;⑤ 存在严重认知功能障碍,不能有效沟通或不能理解并执行简单指令者。

### 2.2. 实验设计

本试验通过随机、双盲的方法分为实验组和对照组,纳入符合标准的卒中后下肢功能障碍患者共 24 例,采用随机数字表法将受试者分为小脑-iTBS 组和假-iTBS 组,每组 12 例。两组患者均在常规康复治疗基础上接受相应的经颅磁刺激干预。两组均每日治疗 1 次,每周 5 次(周一至周五),连续治疗 3 周。

两组患者均接受相同方案的常规康复训练,主要包括:下肢主动和被动活动、坐位和站立平衡训练、重心转移训练、步行训练、躯干肌肉力量及控制训练、上下台阶训练以及日常生活活动能力训练等[16]。在此基础上,实验组在每次常规康复训练前,采用武汉依瑞德医疗设备新技术有限公司生产的 YRD-CYY-1 型经颅磁刺激仪,配置“8”字形线圈,实施间歇性 $\theta$ 爆发刺激(intermittent Theta-Burst Stimulation, iTBS)[11]。首先根据运动诱发电位测定静息运动阈值(Resting Motor Threshold, RMT),RMT 定义为在同一刺激点连续 10 次刺激中至少 5 次可诱发  $> 50 \mu\text{V}$  峰-峰值幅度的运动诱发电位(Motor Evoked Potential, MEP)的最低刺激强度[17]。治疗时, iTBS 刺激强度设定为 RMT 的 80%[13]。

实验组的刺激靶点定位于健侧小脑半球外侧:以枕骨隆突下缘向下 1 cm,再向外侧平移 3 cm 处作为线圈中心,与头皮相切放置,线圈手柄指向顶部[18]。iTBS 由以 5 Hz 频率重复的 3 个 50 Hz 脉冲组成,每隔 2 s 刺激后休息 8 s,在 200 秒内总共产生 600 个脉冲[7],治疗频率 1 次/天,5 天/周,连续治疗

3周;对照组在相同的体位和定位条件下,将线圈垂直于颅骨或使用假线圈进行刺激,刺激时间、节律和程序设置与实验组完全一致,患者可听到类似的“咔哒”声但不产生有效磁场输出,从而实现盲法控制。

### 2.3. 评估指标

两组患者均在治疗前及连续3周治疗结束后,由一名对分组情况不知情的康复医师进行各项指标的评估。主要观察指标包括Berg平衡量表(BBS)、Fugl-Meyer评定量表下肢部分(FMA-LE)以及运动诱发电位(MEP)波幅和潜伏期,用以分别反映平衡功能、下肢运动功能及皮质脊髓兴奋性变化。

(1) Berg平衡量表(Berg Balance Scale, BBS): BBS共包含14个项目,每个项目按0~4分,5个等级评分,总分56分。评分越高,代表患者静态与动态平衡能力越好[19]。

(2) Fugl-Meyer下肢运动功能评定量表(Fugl-Meyer Assessment scale for Lower Extremity, FMA-LE): FMA-LE使用3分等级量表,总分34分,主要评估髋、膝、踝各关节的反射活动、协同运动及分离运动能力。得分越高,说明下肢运动功能越好[20]。

(3) 运动诱发电位(MEP)波幅及潜伏期: MEP波幅用于反映运动皮层及皮质脊髓束的兴奋性[21],潜伏期主要反映皮质脊髓束的传导时间和完整性[22]。在测量MEP时,记录信号易受到皮下组织厚度、邻近肌肉收缩及电极交叉干扰等多种因素影响,因此应尽量选用位置表浅、解剖界限清楚且相对独立的肌肉作为靶肌,以提高波形的稳定性和可重复性[21]。在既往研究中,拇短展肌和第一骨间背肌常常被选择作为测试的靶肌肉[23];此外,多篇TMS研究表明拇短展肌MEP的测试-重测信度良好,可可靠反映皮质脊髓通路的兴奋性变化[21][24]。基于上述原因,本研究选择偏瘫侧拇短展肌作为MEP记录肌。受试者取坐位,放松上肢,在拇短展肌肌腹贴记录电极,在肌腱贴参考电极,于前臂掌侧远端贴接地电极。刺激线圈置于患侧大脑半球初级运动皮层(M1)对应拇短展肌的热点处,与头皮相切放置,线圈手柄与头中矢状线约成45°角,给予阈上强度单次磁刺激,在对侧拇短展肌记录MEP波形。每名受试者记录至少5个波形清晰、重复性良好的MEP,取其波幅和潜伏期的平均值作为该时间点的最终测量值。

### 2.4. 统计分析

采用SPSS 29.0版统计软件进行统计学分析,计量资料均符合正态分布,以均数±标准差( $\bar{x} \pm s$ )表示,采用 $t$ 检验;计数资料以率(%)表示,采用卡方检验,等级资料采用秩和检验。所有检验均为双侧检验,以 $P < 0.05$ 时认为差异具有统计学意义。

## 3. 结果

本研究共纳入24例卒中后下肢功能障碍患者,两组均完成3周干预及结局评估,全部纳入最终统计分析。两组患者的例数、平均年龄、性别、平均病程、病变侧别和病变性质等一般资料组间比较,差异均无统计学意义( $p > 0.05$ ),详见表1。

**Table 1.** Comparison of general data between the two groups

**表 1.** 两组患者一般资料比较

组别	年龄(岁)	性别[例(%)]		病程(月)	病变侧别[例(%)]		病变性质[例(%)]	
		男	女		左	右	缺血	出血
试验组(n=12)	57.00 ± 9.51	10 (83.3)	2 (16.7)	2.42 ± 1.54	8 (66.7)	4 (33.3)	9 (75.0)	3 (25.0)
对照组(n=12)	62.25 ± 9.93	8 (66.7)	4 (33.3)	2.28 ± 1.69	7 (58.3)	5 (41.7)	11 (91.7)	1 (8.3)
<i>P</i>	0.199	0.640		0.832	1.000		0.590	

治疗前, 两组患者的各项指标组间比较, 差异均无统计学意义( $p > 0.05$ ), 两组数据具有可比性。治疗后, 两组患者的各项指标较治疗前均显著改善, 差异有统计学意义( $p < 0.05$ ), 且治疗后, 除 MEP 潜伏期外, 试验组其余指标均优于对照组, 差异均有统计学意义( $p < 0.05$ ), 详见表 2、表 3。

**Table 2.** Comparison of scale scores before and after treatment between the two groups [score, ( $\bar{x} \pm s$ )]

**表 2.** 两组患者治疗前后量表评分比较[分, ( $\bar{x} \pm s$ )]

组别	BBS 评分	FMA-LE 评分	P 值
试验组(n = 12)			
治疗前	34.08 ± 7.51	19.25 ± 5.43	0.495
治疗后	44.42 ± 6.57 <sup>a</sup>	25.50 ± 3.34 <sup>a</sup>	0.005
对照组(n = 12)			
治疗前	32.00 ± 7.19	19.17 ± 3.79	0.966
治疗后	35.92 ± 6.87 <sup>a</sup>	22.33 ± 3.31 <sup>a</sup>	0.029

注: 与; 治疗前比较,  $P^a < 0.05$ 。

**Table 3.** Comparison of electrophysiological data before and after treatment between the two groups ( $\bar{x} \pm s$ )

**表 3.** 两组患者治疗前后电生理数据比较( $\bar{x} \pm s$ )

组别	MEP 波幅	MEP 潜伏期	P 值
试验组(n = 12)			
治疗前	114.03 ± 29.83	29.23 ± 4.02	0.941
治疗后	154.17 ± 31.91 <sup>a</sup>	25.14 ± 2.76 <sup>a</sup>	0.047
对照组(n = 12)			
治疗前	115.00 ± 33.17	26.19 ± 3.77	0.069
治疗后	126.13 ± 33.39 <sup>a</sup>	24.84 ± 2.21 <sup>a</sup>	0.770

注: 与治疗前比较,  $P^a < 0.05$ 。

## 4. 讨论

脑卒中后, 患者的中枢运动网络常出现结构与功能连接受损, 皮质脊髓通路的完整性下降[25] [26], 进而引发神经肌肉控制失衡与协调障碍, 最终表现为不同程度的肢体运动功能受限, 显著削弱患者的日常活动能力与社会参与水平[27]。因此, 如何采用有效的康复策略促进肢体运动能力恢复, 进而改善总体生活质量, 成为了卒中康复的核心目标之一。近年来, 间歇性  $\theta$  爆发刺激(Theta Burst Stimulation, TBS)作为一种新型 rTMS 形式也受到了广泛关注。一些研究表明, 与传统的高频 rTMS 相比, iTBS 可在更短刺激时间内和较低刺激强度下诱导强且相对持久的皮质兴奋性改变[28]。

平衡障碍是导致卒中后患者跌倒风险升高的主要原因[29]。平衡功能的改善可以缩短患者的住院时间, 减少医疗资源的使用量, 并减轻家庭的经济负担[18]。本研究结果显示, 经过 3 周的小脑-iTBS 干预, 试验组的 BBS 评分显著高于对照组, 表明小脑-iTBS 可显著促进卒中后患者平衡功能的恢复, 这与 Koch 等人[11]的研究结果相一致。Zhu 等人[30]的研究也进一步支持了这个观点, 指出小脑 iTBS 可以促进和加速卒中后偏瘫患者的功能恢复, 特别是平衡功能和步态。同时, Koch 等人[11]通过脑电图等分析发现, 经过连续 3 周的小脑 iTBS 治疗后, 病灶侧后顶叶皮层(PPC)的皮层反应增强, 并伴随 PPC 的  $\theta$  频段振荡

增加,且上述神经生理变化与平衡及步态指标的改善存在相关性。该结果提示,小脑 iTBS 可能通过小脑 - 丘脑 - 皮层通路调节与步态和姿势控制相关的顶 - 额网络活动,进而促进与康复训练相关的神经可塑性的增强。这种改变可表现为类似长时程增强(Long-Term Potentiation, LTP)样效应,最终有助于平衡功能与步态稳定性的恢复。

本研究同样发现,试验组在治疗后的 FMA-LE 评分显著优于对照组,提示经过 3 周的小脑 iTBS 干预后,下肢运动功能可获得更明确的改善。这一结果与 Liao 等人[31]的随机对照试验结果一致,该研究发现小脑 iTBS 在改善下肢运动功能方面优于假刺激组,且在部分评估指标上甚至优于 M1-iTBS。此外,Zhu 等人[30]的研究也证实,连续两周实施小脑 iTBS 可显著提高脑卒中患者的 FMA-LE 评分。

然而,既往部分研究[18][30][32]显示,尽管小脑 iTBS 组的 FMA-LE 评分随时间有所提升,但与假刺激组相比,差异并未达到统计学显著水平。上述结果的不一致可能与样本量、卒中病程阶段及刺激参数设置等因素有关。Su 等人[13]在一项系统评价与 Meta 分析中指出,iTBS 对卒中后功能的促进作用可能与卒中分期相关。亚急性期患者在多项功能结局上的获益更为明显,而慢性期患者的改善则相对不足。本研究纳入患者的平均病程约 2.4 个月,正处于神经可塑性相对活跃的亚急性期,可能因此更容易从小脑 iTBS 干预中获益,这或许是本研究能够观察到 FMA-LE 评分显著提高的重要原因之一。

为进一步从神经生理层面理解临床疗效,本研究采用经颅磁刺激诱发的 MEP 波幅及潜伏期作为反映患侧皮质脊髓束功能状态及运动皮层兴奋性的客观指标[21][22]。结果显示,试验组患侧 MEP 波幅较治疗前显著增加,且增幅显著高于对照组。这与 Behrangrad 等人[33]的系统评价结论一致,即小脑非侵入性脑刺激能够有效调节皮质脊髓兴奋性。Tan 等人[34]在健康受试者中的研究也发现,小脑 iTBS 能诱导大脑皮层兴奋性的即时改变。

从潜在机制来看,脑卒中后下肢运动障碍往往伴随多关节协同受损,而小脑恰好在运动学习、多关节协调及误差修正中发挥关键作用[35]。小脑输出可通过齿状核 - 丘脑 - 皮层通路对大脑皮层活动施加调控[36],因此,对小脑施加 iTBS 可能通过激活并调节小脑相关环路对大脑皮层输出的影响,从而增强运动皮层的兴奋性并诱导可塑性改变[34][35],进而促进运动网络的功能性重组与临床运动功能恢复[36][37]。该推测与本研究观察到患侧 MEP 波幅增加并伴随 FMA-LE 评分提升的结果在方向上相一致,为患者临床功能的改善提供了神经生理学支持。

而对于 MEP 潜伏期,本研究未发现两组间存在显著差异。这可能提示,治疗时间为 3 周的短期 iTBS 干预主要通过长时程增强(LTP)样机制调节突触传递效率,从而表现为 MEP 的波幅增加,但并未在短期内显著改变神经纤维髓鞘结构或传导速度。该结果与大多数 rTMS 相关研究的结果相符,即神经调控的早期效应更多集中于突触层面的可塑性变化[35]。Liao 等人[31]的研究也指出,尽管临床功能可出现显著改善,但在静息运动阈值等皮质兴奋性指标上并不能稳定观察到显著的组间差异,这可能反映某些神经生理变化与功能恢复之间存在一定的非线性关系。

本研究仍存在一定局限性:首先,本研究为单中心、小样本试验,这可能限制了研究结果的普遍性,且未进行长期随访,无法评估小脑 iTBS 治疗的长期疗效;其次,本研究所采用的 MEP 记录靶肌肉为上肢代表肌肉,这在解释下肢功能与电生理结果之间的对应关系时仍存在一定的局限性,后续研究可考虑选取如胫前肌等下肢肌群作为 MEP 记录靶肌,以更直接地评估下肢皮质脊髓通路的功能状态;最后,本研究仅使用了 MEP 作为神经生理指标,缺乏如功能磁共振成像(fMRI)、弥散张量成像(DTI)等多模态影像学证据来直接观测小脑 - 皮层功能连接的动态变化。

## 5. 结论

综上所述,针对小脑半球的间歇性  $\theta$  短阵爆发刺激(iTBS)能有效改善卒中后下肢功能障碍患者的平

衡能力和下肢运动功能，其机制可能与通过小脑 - 丘脑 - 皮层通路增强皮质脊髓兴奋性有关。作为一种安全、高效的神经调控手段，小脑 iTBS 有望成为脑卒中后下肢功能康复的优化治疗方案。在未来的研究中，需要通过进一步扩大样本量并延长随访时间，结合多模态影像学等方法，以进一步明确小脑-iTBS 的最佳刺激参数及长期疗效。

## 参考文献

- [1] Zhu, Z., Shi, M., Yu, Q., Fei, J., Song, B., Qin, X., *et al.* (2025) Burden and Risk Factors of Stroke Worldwide and in China: An Analysis from the Global Burden of Disease Study 2021. *Chinese Medical Journal*, **138**, 2588-2595. <https://doi.org/10.1097/cm9.0000000000003778>
- [2] 李亚杰, 邢政, 褚晓蕾, 等. 重复经颅磁刺激在脑卒中后下肢康复中的应用[J]. 医学新知, 2025, 34(11): 1293-1301.
- [3] 潘雅娟, 杜媛媛, 刘娟, 等. 脑卒中肢体运动障碍患者肌力和运动情况对生活自理能力的影响[J]. 医学信息, 2025, 38(14): 62-66.
- [4] Pendharkar, R.R. (2024) Motor Imagery Technique for Motor Recovery of Hand among Sub-Acute Stroke Patient: A Randomized Controlled Trial. *International Journal of Science and Research Archive*, **13**, 947-950. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.13.2.1287>
- [5] Cabral, D.F., Fried, P., Koch, S., Rice, J., Rundek, T., Pascual-Leone, A., *et al.* (2022) Efficacy of Mechanisms of Neuroplasticity after a Stroke. *Restorative Neurology and Neuroscience*, **40**, 73-84. <https://doi.org/10.3233/rnm-211227>
- [6] Ahmed, M. and Abercrombie, J. (2023) Means of Effectiveness of Treatments Inducing Neuroplasticity for Rehabilitation after Stroke. *Journal of Student Research*, **12**, 1-7. <https://doi.org/10.47611/jsrshs.v12i1.4122>
- [7] Huang, Y., Edwards, M.J., Rounis, E., Bhatia, K.P. and Rothwell, J.C. (2005) Theta Burst Stimulation of the Human Motor Cortex. *Neuron*, **45**, 201-206. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.12.033>
- [8] Suppa, A., Huang, Y.Z., Funke, K., Ridding, M.C., Cheeran, B., Di Lazzaro, V., *et al.* (2016) Ten Years of Theta Burst Stimulation in Humans: Established Knowledge, Unknowns and Prospects. *Brain Stimulation*, **9**, 323-335. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.01.006>
- [9] Huang, Y., Chen, R., Rothwell, J.C. and Wen, H. (2007) The After-Effect of Human Theta Burst Stimulation Is NMDA Receptor Dependent. *Clinical Neurophysiology*, **118**, 1028-1032. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.01.021>
- [10] Luft, A.R., Forrester, L., Macko, R.F., McCombe-Waller, S., Whitall, J., Villagra, F., *et al.* (2005) Brain Activation of Lower Extremity Movement in Chronically Impaired Stroke Survivors. *NeuroImage*, **26**, 184-194. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.01.027>
- [11] Koch, G., Bonni, S., Casula, E.P., Iosa, M., Paolucci, S., Pellicciari, M.C., *et al.* (2019) Effect of Cerebellar Stimulation on Gait and Balance Recovery in Patients with Hemiparetic Stroke. *JAMA Neurology*, **76**, 170-178. <https://doi.org/10.1001/jamaneurol.2018.3639>
- [12] Huang, G., Wang, H., Zhao, W., Qian, Y., Yao, Y., Zhang, L., *et al.* (2024) Effects of the Intermittent Theta Burst Stimulation on Gait, Balance and Lower Limbs Motor Function in Stroke: Study Protocol for a Double-Blind Randomised Controlled Trial with Multimodal Neuroimaging Assessments. *BMJ Open*, **14**, e082019. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2023-082019>
- [13] Su, X., Zheng, B., Huang, H., Chen, S., Cao, M. and Chen, J. (2025) The Effect of Intermittent Theta Burst Stimulation for Post-Stroke Lower Limb Motor Recovery: A Systematic Review and Meta-Analysis. *NeuroRehabilitation: An International, Interdisciplinary Journal*, **56**, 219-233. <https://doi.org/10.1177/10538135241304991>
- [14] Chen, H., Xiao, K., Yang, X., Yin, Z., Wu, Y., Fu, G., *et al.* (2025) Effectiveness of Intermittent Theta Burst Stimulation (iTBS) on Post-Stroke Motor Dysfunction: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Neurological Sciences*, **46**, 5695-5707. <https://doi.org/10.1007/s10072-025-08441-y>
- [15] 中华医学会神经病学分会, 中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国各类主要脑血管病诊断要点 2019 [J]. 中华神经科杂志, 2019, 52(9): 710-715.
- [16] 孔晴, 郭壮丽, 高呈飞, 等. 小脑间歇性  $\theta$  脉冲刺激对脑卒中后下肢功能障碍患者步行功能的影响[J]. 中华物理医学与康复杂志, 2024, 46(3): 226-231.
- [17] Park, J., Chang, W.H., Cho, J.W., Youn, J., Kim, Y.K., Kim, S.W., *et al.* (2016) Usefulness of Transcranial Magnetic Stimulation to Assess Motor Function in Patients with Parkinsonism. *Annals of Rehabilitation Medicine*, **40**, 81-87. <https://doi.org/10.5535/arm.2016.40.1.81>
- [18] Liao, L., Xie, Y., Chen, Y. and Gao, Q. (2020) Cerebellar Theta-Burst Stimulation Combined with Physiotherapy in Subacute and Chronic Stroke Patients: A Pilot Randomized Controlled Trial. *Neurorehabilitation and Neural Repair*,

- 35, 23-32. <https://doi.org/10.1177/1545968320971735>
- [19] Blum, L. and Korner-Bitensky, N. (2008) Usefulness of the Berg Balance Scale in Stroke Rehabilitation: A Systematic Review. *Physical Therapy*, **88**, 559-566. <https://doi.org/10.2522/ptj.20070205>
- [20] Fugl-Meyer, A., Jääskö, L., Leyman, I., Olsson, S. and Steglind, S. (1975) The Post-Stroke Hemiplegic Patient. 1. A Method for Evaluation of Physical Performance. *Journal of Rehabilitation Medicine*, **7**, 13-31. <https://doi.org/10.2340/1650197771331>
- [21] Rossini, P.M., Burke, D., Chen, R., Cohen, L.G., Daskalakis, Z., Di Iorio, R., et al. (2015) Non-Invasive Electrical and Magnetic Stimulation of the Brain, Spinal Cord, Roots and Peripheral Nerves: Basic Principles and Procedures for Routine Clinical and Research Application. an Updated Report from an I.F.C.N. Committee. *Clinical Neurophysiology*, **126**, 1071-1107. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2015.02.001>
- [22] 王淑楠, 李思燃, 宋鹏辉, 等. 中枢运动传导时间对皮质脊髓束损伤的评价及其临床意义[J]. 中华医学杂志, 2022, 102(25): 1918-1923.
- [23] Sondergaard, R.E., Martino, D., Kiss, Z.H.T. and Condliffe, E.G. (2021) TMS Motor Mapping Methodology and Reliability: A Structured Review. *Frontiers in Neuroscience*, **15**, Article 709368. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.709368>
- [24] Corneal, S.F., Butler, A.J. and Wolf, S.L. (2005) Intra- and Intersubject Reliability of Abductor Pollicis Brevis Muscle Motor Map Characteristics with Transcranial Magnetic Stimulation. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **86**, 1670-1675. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2004.12.039>
- [25] Grefkes, C. and Fink, G.R. (2014) Connectivity-based Approaches in Stroke and Recovery of Function. *The Lancet Neurology*, **13**, 206-216. [https://doi.org/10.1016/s1474-4422\(13\)70264-3](https://doi.org/10.1016/s1474-4422(13)70264-3)
- [26] Kumar, S., Ferraro, M., Nguyen, L., Cao, N., Ung, N., Jose, J.S., et al. (2024) TMS Assessment of Corticospinal Tract Integrity after Stroke: Broadening the Concept to Inform Neurorehabilitation Prescription. *Frontiers in Human Neuroscience*, **18**, Article 1408818. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2024.1408818>
- [27] Hong, Y.N.G., Ballekere, A.N., Fregly, B.J. and Roh, J. (2021) Are Muscle Synergies Useful for Stroke Rehabilitation? *Current Opinion in Biomedical Engineering*, **19**, Article ID: 100315. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2021.100315>
- [28] Cárdenas-Morales, L., Nowak, D.A., Kammer, T., Wolf, R.C. and Schönfeldt-Lecuona, C. (2009) Mechanisms and Applications of Theta-Burst RTMs on the Human Motor Cortex. *Brain Topography*, **22**, 294-306. <https://doi.org/10.1007/s10548-009-0084-7>
- [29] Abdollahi, M., Whitton, N., Zand, R., Dombovy, M., Parnianpour, M., Khalaf, K., et al. (2022) A Systematic Review of Fall Risk Factors in Stroke Survivors: Towards Improved Assessment Platforms and Protocols. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **10**, Article 910698. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.910698>
- [30] Zhu, P., Li, Z., Lu, Q., Nie, Y., Liu, H., Kiernan, E., et al. (2024) Can Cerebellar Theta-Burst Stimulation Improve Balance Function and Gait in Stroke Patients? A Randomized Controlled Trial. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, **60**, 391-399. <https://doi.org/10.23736/s1973-9087.24.08307-2>
- [31] Liao, L., Zhu, Y., Peng, Q., Gao, Q., Liu, L., Wang, Q., et al. (2023) Intermittent Theta-Burst Stimulation for Stroke: Primary Motor Cortex versus Cerebellar Stimulation: A Randomized Sham-Controlled Trial. *Stroke*, **55**, 156-165. <https://doi.org/10.1161/strokeaha.123.044892>
- [32] Xie, Y., Wei, Q., Chen, Y., Liao, L., Li, B., Tan, H., et al. (2021) Cerebellar Theta Burst Stimulation on Walking Function in Stroke Patients: A Randomized Clinical Trial. *Frontiers in Neuroscience*, **15**, Article 688569. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.688569>
- [33] Behrangrad, S., Zoghi, M., Kidgell, D. and Jaberzadeh, S. (2019) Does Cerebellar Non-Invasive Brain Stimulation Affect Corticospinal Excitability in Healthy Individuals? A Systematic Review of Literature and Meta-analysis. *Neuroscience Letters*, **706**, 128-139. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2019.05.025>
- [34] Tan, H., Wei, Q., Chen, Y., Xie, Y., Guo, Q., He, L., et al. (2021) The Immediate Effects of Intermittent Theta Burst Stimulation of the Cerebellar Vermis on Cerebral Cortical Excitability during a Balance Task in Healthy Individuals: A Pilot Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, **15**, Article 748241. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.748241>
- [35] Fu, Y., Wang, C., Zhang, L., Ji, D., Xiang, A., Qi, J., et al. (2024) The Effectiveness of Theta Burst Stimulation for Motor Recovery after Stroke: A Systematic Review. *European Journal of Medical Research*, **29**, Article No. 568. <https://doi.org/10.1186/s40001-024-02170-2>
- [36] Casula, E.P., Pellicciari, M.C., Ponzio, V., Stampanoni Bassi, M., Veniero, D., Caltagirone, C., et al. (2016) Cerebellar Theta Burst Stimulation Modulates the Neural Activity of Interconnected Parietal and Motor Areas. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 36191. <https://doi.org/10.1038/srep36191>
- [37] Rocchi, L., Spampinato, D.A., Pezzopane, V., et al. (2022) Cerebellar Noninvasive Neuromodulation Influences the Reactivity of the Contralateral Primary Motor Cortex and Surrounding Areas: A TMS-EMG-EEG Study. *The Cerebellum*, **22**, 319-331. <https://doi.org/10.1007/s12311-022-01398-0>