

应用弥散张量成像评价缺血性脑卒中运动功能障碍与重复经颅磁刺激治疗的相关性

她 娜^{1,2}

¹内蒙古医科大学包头临床医学院, 内蒙古 包头

²包头市中心医院神经内科, 内蒙古 包头

收稿日期: 2025年2月17日; 录用日期: 2025年3月9日; 发布日期: 2025年3月18日

摘 要

缺血性脑卒中患者留有不同程度的运动功能障碍。运动功能障碍与皮质脊髓束受损相关, 修复皮质脊髓束的完整性是治疗运动功能障碍的关键。重复经颅磁刺激(repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS)是目前广泛应用于运动功能障碍的康复治疗手段, 可修复受损皮质脊髓束的完整性。弥散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)可无创显示皮质脊髓束的形态和结构, 是研究运动损伤的主要评估工具。本文就DTI在评估rTMS治疗缺血性脑卒中运动功能障碍疗效中的应用进行综述。

关键词

缺血性脑卒中, 运动功能障碍, 重复经颅磁刺激, 弥散张量成像

Application of Diffusion Tensor Imaging in Evaluating the Correlation between Motor Dysfunction in Ischemic Stroke and Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation Therapy

Na Ta^{1,2}

¹Baotou Clinical Medical College, Inner Mongolia Medical University, Baotou Inner Mongolia

²Department of Neurology, Baotou Central Hospital, Baotou Inner Mongolia

Received: Feb. 17th, 2025; accepted: Mar. 9th, 2025; published: Mar. 18th, 2025

文章引用: 她娜. 应用弥散张量成像评价缺血性脑卒中运动功能障碍与重复经颅磁刺激治疗的相关性[J]. 临床医学进展, 2025, 15(3): 1619-1625. DOI: 10.12677/acm.2025.153784

Abstract

Patients with ischemic stroke often suffer from varying degrees of motor dysfunction. Motor dysfunction is associated with damage to the corticospinal tract, and restoring the integrity of the corticospinal tract is crucial for the treatment of motor dysfunction. Transcranial magnetic stimulation (rTMS) is currently a widely used rehabilitative treatment for motor dysfunction, which can repair the integrity of the damaged corticospinal tract. Diffusion tensor imaging (DTI) can non-invasively visualize the morphology and structure of the corticospinal tract, serving as a primary assessment tool for studying motor impairment. This article reviews the application of DTI in evaluating the efficacy of rTMS in the treatment of motor dysfunction in ischemic stroke.

Keywords

Ischemic Stroke, Motor Dysfunction, Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, Diffusion Tensor Imaging

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. 前言

缺血性脑卒中是由于脑血管严重狭窄或堵塞造成的相应区域脑组织神经元损伤，导致不同程度的语言及肢体运动功能障碍，是成年人死亡和长期残疾的主要原因。每年全球约有超过 1500 万人发生脑卒中，其中 1/3 的患者死亡，而另外 1/3 的患者将面临残疾[1]，且脑卒中的人群发病率也逐渐上升[2]。即使相似面积、相邻部位的缺血性脑卒中患者预后也存在较大差异，其原因主要是梗死病灶对皮质脊髓束(corticospinal tract, CST)的损伤不同[3]。CST 是锥体束最大的下行白质纤维束，与脑卒中患者神经功能密切相关[4] [5]，运动功能初始损伤程度和长期预后都取决于 CST 的损伤程度以及其替代运动纤维束的完整性[6]，保留或恢复 CST 完整性对缺血性脑卒中后运动功能恢复具有重要的临床意义[7]。经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)疗法是一种无创神经刺激技术，具有安全、操作便捷、无痛等优点[8]，能够平衡双侧大脑功能，达到促进脑卒中康复的目的，已越来越多地被用于治疗卒中所致的各种功能障碍[9]。

2. 经颅磁刺激

2.1. 概述

经颅磁刺激(TMS)是一种使用电磁感应探测大脑皮层回路并引起皮层兴奋性长期变化的非侵入性脑电刺激[10]。该装置是通过电流产生一个快速波动的磁场，放置在人体上磁场可绕过头皮或脑膜产生短暂的电场，诱导神经组织发生动作电位[11]。这种单一的刺激对神经回路的兴奋性难以起到长时间的改变。重复经颅磁刺激(repetitive transcranial magnetic stimulation, rTMS)是在 TMS 的基础上发展起来的，具有长时程、频率和时间模式可调节的优点。rTMS 通过高强度磁场作用于脑部，刺激神经组织改变细胞膜电位，造成神经元去极化，继而影响脑细胞功能，使神经得到修复。rTMS 的参数及频率的选择是治疗的关键所在，临床上使用 rTMS 促进脑卒中后运动功能恢复主要有两种方式：一种是通过低频(≤ 1 Hz)刺激，降低健侧半球兴奋性，以减少健侧半球对患侧半球的抑制作用；另一种是通过高频(≥ 5 Hz)刺激患侧半球，增

加其兴奋性,从而恢复双侧半球间的竞争抑制平衡。这两种刺激模式均已被用于治疗脑卒中后的运动功能障碍。此外,rTMS可通过调节患侧皮质脊髓束的连接来实现脑卒中后的运动恢复[12]。

2.2. rTMS 促进脑卒中运动功能的临床应用

在改善脑卒中后上肢运动功能方面,健侧半球应用低频 rTMS 比在患侧半球应用高频 rTMS 更有效[13][14],但两者对脑卒中后不同时期的上肢运动功能恢复都有积极作用[15]。针对脑卒中后运动功能障碍的 rTMS 治疗,2019 年国际临床神经生理学联盟(International Federation of Clinical Neurophysiology, IFCN)更新的指南推荐[16]:急性期和亚急性期低频刺激健侧 M1 区可有效改善手部运动功能障碍为 A 级推荐,急性期和亚急性期高频刺激患侧 M1 区为 B 级推荐,慢性期低频刺激健侧 M1 区为 C 级推荐。rTMS 对于下肢运动功能的研究也有较大的临床意义。两项荟萃分析发现,rTMS 联合其他康复治疗能有效改善脑卒中患者的步行速度、步频、Fugl-Meyer 下肢运动评分,且兴奋性或抑制性刺激均可改善不同时期脑卒中患者的步行速度[17][18]。然而,另一项荟萃分析表明,患侧高频 rTMS 对步行速度有显著影响[19],低频 rTMS 在促进下肢运动功能康复方面优于假刺激[20]。华祎辰[21]的研究表明,对于缺血性脑卒中运动功能障碍患者,低频 rTMS 治疗健侧和高频 rTMS 治疗患侧均能显著改善患者的运动功能,且低频 rTMS 治疗疗效优于高频 rTMS 治疗。

rTMS 作用机制有以下几种方式:① 调节两侧大脑半球兴奋性的平衡:rTMS 可通过调节皮质之间不平衡的半球间抑制,使两侧兴奋性重归平衡状态,调节双侧大脑半球兴奋性的平衡。有研究显示,rTMS 可通过抑制健侧半球兴奋性或提高患侧半球的兴奋性促使大脑半球间兴奋性的平衡[22]。② 增加突触可塑性:海马突触可塑性是学习记忆的基础,多项动物实验表明,rTMS 可以通过刺激认知障碍大鼠的海马区提高大鼠的突触可塑性,从而提高其学习记忆能力[23][24]。③ 调节脑内神经递质:大脑功能的完整性与多种神经递质密切相关,如 TMS 可以抑制过多产生的单胺类神经递质,降低其对神经元的毒性作用,也可以使多巴胺、5-羟色胺降低,增加乙酰胆碱、 γ -氨基丁酸等神经递质的释放[25]。

目前临床上广泛使用 NIHSS 卒中量表、FMA 运动量表、改良巴氏指数量表(MBI)来评价患者运动功能的恢复情况,但上述量表不能从机制上解释其功能改善原因。查阅文献发现,影像技术越来越多地应用于此,其中弥散张量成像技术(diffusion tensor imaging, DTI)作为一种新兴的核磁共振特殊功能序列,能清楚地显示受损 CST,通过对比 rTMS 治疗前后 CST 完整性的变化,能客观地评价运动功能恢复情况[26]。

3. 弥散张量成像(DTI)

3.1. DTI 的原理及常用参数

DTI 是在 DWI 的基础上发展起来的磁共振特殊功能序列,其通过测量脑组织中水分子的弥散运动差异,可以显示出卒中后受损的皮质脊髓束[27][28],是目前唯一可在活体上无创追踪大脑神经纤维束的技术[29],已经成为观察皮质脊髓束完整性的重要手段。DTI 利用水分子在人体内呈各向异性运动的特点,通过在 6 个以上的非线性方向上施加梯度磁场,定量检测出每个体素内水分子向各个方向的运动情况[30][31]。DTI 技术常用的定量参数包括表观弥散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)、表观扩散张量、平均扩散系数(mean diffusion coefficient, MD)、各向异性分数(fractional anisotropy, FA)值、轴向扩散系数(axial diffusion coefficient, AD)和径向扩散系数(radial diffusion coefficient, RD) [32]。其中,FA 值是研究最多的参数之一,它对纤维的微观结构完整性高度敏感,用于评估神经纤维束的完整性和方向性。FA 值范围介于 0 到 1 之间。趋于 0 时,表明纤维束被破坏,细胞膜、髓鞘及轴索的方向一致性被破坏。相反,趋于 1 时,代表具有很强的弥散各向异性,这意味着纤维束的细胞膜、髓鞘及轴索具有良好的完整性[33][34]。

rFA 值是患侧与健侧 FA 值的比值, rFA 的值越低, 提示神经纤维束损伤的程度越高。表观弥散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)是一个描述水分子的扩散量的参数, 能够体现水分子的扩散能力。

3.2. DTI 在 rTMS 治疗脑卒中运动功能疗效评估中的应用

CST 是大脑皮质发出的神经纤维束, 介导运动产生的主要通路[35]。如果皮质脊髓束受损, 就可能出现运动障碍, 如肢体无力、动作笨拙、肌张力异常等情况, 严重时甚至可能导致偏瘫。因此, 保留或恢复 CST 完整性是脑卒中后运动功能恢复的关键所在[7]。有研究表明, rTMS 可能通过改善大脑神经的可塑性、调节大脑的兴奋性、改变脑内相关物理或化学物质的水平从而改善运动功能[36]-[40]。在 rTMS 治疗过程中, DTI 可用于追踪脑部结构和功能的变化。通过比较治疗前后的 DTI 图像, 可以观察到神经纤维束的微观结构是否得到改善, 从而评估 rTMS 的治疗效果。因此, DTI 在脑卒中患者的康复过程中, 特别是在评估运动功能恢复方面, 显示出显著的优势[41]。因 FA 值对纤维的微观结构完整性高度敏感, 在 DTI 的几个参数中通常采用 FA 值和 rFA 值来评估 CST 的受损程度[42]。FA 值越大, 神经纤维束的完整性越高, FA 值越小, 神经纤维束的完整性越低。关于 FA、rFA 值和运动功能评分的相关性, 凌晴等人[43]分析了康复评定量表与各个脑区的 FA、rFA 值的相关性, 发现放射冠区 DTI 的参数与运动功能的相关性最为显著、最有价值。王旭等人[44]分析了 20 例缺血性卒中的患者, 发现梗死侧大脑脚的 rFA 值与 NIHSS 评分呈负相关, 提示病灶近端神经纤维变性程度与运动功能预后存在关联。刘建华等人[42]研究了大脑多个部位与脑卒中患者运动功能的相关性, 发现脑内 FA、rFA 值与运动功能相关, 以内囊后肢最为显著。这些研究结果的差异可能和患者病灶部位的不同、皮质脊髓束的逆行性华勒变性[45]等因素有关。Song 等人[46]发现, FA 值与脑卒中患者上肢运动功能显著相关, 且肯定了 DTI 对上肢运动功能运动恢复的预测价值。在 Wen 等人[47]的研究中也发现, 急性卒中患者的皮质脊髓束中的 FA 值与运动功能改善程度呈正相关。对于脑卒中急性期的患者, Guo 等人[48]使用 10 Hz 的 rTMS 刺激急性脑卒中患者患侧初级运动皮质, 结果显示高频 rTMS 能提高急性期患者的 Fugl-Meyer (Fugl-Meyer assessment, FMA)评分, 改善患肢的运动功能。rTMS 显著增加了卒中患者健侧和患侧的内囊后肢(posterior limb of internal capsule, PLIC)和双侧放射冠区(corona radiata, CR)的 FA 值, 且与 FMA 评分的增高呈正相关。PLIC 常作为 CST 完整性分析的区域[41]。与其他脑区相比, PLIC 与运动功能的关系更为密切。此外, PLIC 的损伤程度与运动功能的下降相关, 而 PLIC 局部 FA 变化可以预测运动功能障碍的变化[49]。FMA 评分的增加代表运动能力的改善, 因此, 两者呈正相关可能表明 FA 值越大, 患者运动恢复越好。对于慢性脑卒中患者, 最近一项针对脑卒中患者运动功能障碍的 rTMS 治疗的研究文献表明, 经低频 rTMS 作用后的大脑胼胝体 FA 值与运动改善呈线性正相关, 表明低频 rTMS 可以增加胼胝体运动纤维的 FA 值, 并且研究发现, 由 DTI 得出的胼胝体微观结构完整性可能对指导 rTMS 的应用有一定价值[50]。此外, 研究者还发现, 经 rTMS 刺激后的大脑半球的皮质内抑制减少, 还可能有助于揭示 rTMS 治疗脑卒中重症患者的核心可塑性机制。结合关于急性脑卒中患者的 rTMS 研究发现, 运动相关皮层 FA 值升高, 可以推断 rTMS 对脑卒中患者微观结构可塑性的神经调节和治疗作用。对于脑卒中恢复期的患者, Zhao 等人[51]将 30 个卒中偏瘫恢复期病人分为 2 组, 实验组给予常规康复、头针治疗联合低频 rTMS 治疗, 对照组只给予常规康复及头针治疗, 并观察患侧内囊后肢前部 CST 的 FA 及临床疗效。结果显示, 联合 rTMS 的治疗组比只给予常规康复和头针的对照组的提高更显著。

4. 结论

综上所述, 脑卒中运动功能障碍患者在 rTMS 治疗后 DTI 相关指标有不同程度的改善。DTI 能直观地反映 rTMS 对卒中后运动功能障碍的疗效, 且不仅有助于精准病损程度, 制定个体化治疗方案, 还能

深入揭示 rTMS 治疗的神经机制。但目前 rTMS 结合 DTI 的研究数量较少, 因此医师在临床工作中应进一步开展多中心、大样本的研究, 为运动功能障碍患者的康复提供新的策略和方法。

参考文献

- [1] Pin-Barre, C. and Laurin, J. (2015) Physical Exercise as a Diagnostic, Rehabilitation, and Preventive Tool: Influence on Neuroplasticity and Motor Recovery after Stroke. *Neural Plasticity*, **2015**, Article ID: 608581. <https://doi.org/10.1155/2015/608581>
- [2] 王文志. 中国脑卒中流行状况与防控策略建议[J]. 广西医科大学报, 2024, 41(10): 1360-1364.
- [3] 数据“说”脑卒中[J]. 实用心脑血管病杂志, 2024, 32(4): 5.
- [4] Fu, J., Zeng, M., Shen, F., Cui, Y., Zhu, M., Gu, X., *et al.* (2017) Effects of Action Observation Therapy on Upper Extremity Function, Daily Activities and Motion Evoked Potential in Cerebral Infarction Patients. *Medicine*, **96**, e8080. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000008080>
- [5] Tani, M., Ono, Y., Matsubara, M., Ohmatsu, S., Yukawa, Y., Kohno, M., *et al.* (2018) Action Observation Facilitates Motor Cortical Activity in Patients with Stroke and Hemiplegia. *Neuroscience Research*, **133**, 7-14. <https://doi.org/10.1016/j.neures.2017.10.002>
- [6] 月潇. 脑卒中后皮质脊髓束损伤与运动功能的相关性及磁共振弥散张量成像的价值分析[J]. 当代医学, 2019, 25(29): 96-98.
- [7] Zhu, L.L., Lindenberg, R., Alexander, M.P. and Schlaug, G. (2010) Lesion Load of the Corticospinal Tract Predicts Motor Impairment in Chronic Stroke. *Stroke*, **41**, 910-915. <https://doi.org/10.1161/strokeaha.109.577023>
- [8] 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, 15(13): 195-198.
- [9] Wang, Q., Zhang, D., Zhao, Y., Hai, H. and Ma, Y. (2020) Effects of High-Frequency Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation over the Contralesional Motor Cortex on Motor Recovery in Severe Hemiplegic Stroke: A Randomized Clinical Trial. *Brain Stimulation*, **13**, 979-986. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2020.03.020>
- [10] 吴毅. 重复经颅磁刺激在脑卒中康复中的临床应用与作用机制的研究进展[J]. 中国康复医学杂志, 2023, 38(2): 147-150.
- [11] Huerta, P.T. and Volpe, B.T. (2009) Transcranial Magnetic Stimulation, Synaptic Plasticity and Network Oscillations. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **6**, Article No. 7. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-6-7>
- [12] 靳雨. 应用 DTI 评估 rTMS 治疗缺血性脑卒中运动功能障碍的疗效[D]: [硕士学位论文]. 泸州: 西南医科大学, 2016.
- [13] Hsu, W., Cheng, C., Liao, K., Lee, I. and Lin, Y. (2012) Effects of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation on Motor Functions in Patients with Stroke: A Meta-Analysis. *Stroke*, **43**, 1849-1857. <https://doi.org/10.1161/strokeaha.111.649756>
- [14] Zhang, L., Xing, G., Fan, Y., Guo, Z., Chen, H. and Mu, Q. (2017) Short- and Long-Term Effects of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation on Upper Limb Motor Function after Stroke: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Clinical Rehabilitation*, **31**, 1137-1153. <https://doi.org/10.1177/0269215517692386>
- [15] Kang, N., Summers, J.J. and Cauraugh, J.H. (2016) Non-Invasive Brain Stimulation Improves Paretic Limb Force Production: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Brain Stimulation*, **9**, 662-670. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.05.005>
- [16] Lefaucheur, J.P., Aleman, A., Baeken, C., *et al.* (2020) Evidence-Based Guidelines on the Therapeutic Use of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation (rTMS): An Update (2014-2018). *Clinical Neurophysiology*, **131**, 474 -528.
- [17] Tung, Y., Lai, C., Liao, C., Huang, S., Liou, T. and Chen, H. (2019) Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation of Lower Limb Motor Function in Patients with Stroke: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Clinical Rehabilitation*, **33**, 1102-1112. <https://doi.org/10.1177/0269215519835889>
- [18] Vaz, P.G., Salazar, A.P.D.S., Stein, C., Marchese, R.R., Lukrafka, J.L., Plentz, R.D.M., *et al.* (2019) Noninvasive Brain Stimulation Combined with Other Therapies Improves Gait Speed after Stroke: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Topics in Stroke Rehabilitation*, **26**, 201-213. <https://doi.org/10.1080/10749357.2019.1565696>
- [19] Li, Y., Fan, J., Yang, J., He, C. and Li, S. (2018) Effects of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation on Walking and Balance Function after Stroke: A Systematic Review and Meta-Analysis. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, **97**, 773-781. <https://doi.org/10.1097/phm.0000000000000948>
- [20] Gao, Q., Xie, Y., Chen, Y., Tan, H., Guo, Q. and Lau, B. (2021) Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation for Lower Extremity Motor Function in Patients with Stroke: A Systematic Review and Network Meta-Analysis. *Neural Regeneration Research*, **16**, 1168-1176. <https://doi.org/10.4103/1673-5374.300341>
- [21] 华祎辰. 不同频率重复经颅磁刺激治疗缺血性脑卒中患者运动功能障碍的疗效观察[D]: [硕士学位论文]. 承德:

- 承德医学院, 2020.
- [22] Corti, M., Patten, C. and Triggs, W. (2012) Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation of Motor Cortex after Stroke: A Focused Review. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, **91**, 254-270. <https://doi.org/10.1097/phm.0b013e318228bf0c>
- [23] Ahmed, Z. and Wieraszko, A. (2006) Modulation of Learning and Hippocampal, Neuronal Plasticity by Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation (rTMS). *Bioelectromagnetics*, **27**, 288-294. <https://doi.org/10.1002/bem.20211>
- [24] 周宁, 吴洪阳, 黄本荣, 等. 重复经颅磁刺激对脑缺血大鼠海马突触素表达及学习记忆的影响[J]. 神经损伤与功能重建, 2015, 10(1): 5-7.
- [25] 徐建兰, 徐晓雪, 蔡青, 等. 连续多次 γ -氨基丁酸和多巴胺特征重复超低频经颅磁刺激对大鼠脑内神经递质功率的影响[J]. 中国康复医学杂志, 2010, 25(2): 127-130.
- [26] Chen, Y.J., Nabavizadeh, S.A., Vossough, A., Kumar, S., Loevner, L.A. and Mohan, S. (2016) Wallerian Degeneration Beyond the Corticospinal Tracts: Conventional and Advanced MRI Findings. *Journal of Neuroimaging*, **27**, 272-280. <https://doi.org/10.1111/jon.12404>
- [27] Ranzenberger, L.R., Das, J. and Snyder, T. (2023) Diffusion Tensor Imaging. StatPearls.
- [28] Lope-Piedrafita, S. (2018) Diffusion Tensor Imaging (DTI). In: García Martín, M. and López Larrubia, P., Eds., *Preclinical MRI*, Springer, 103-116. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7531-0_7
- [29] Meoded, A. and Huisman, T.A.G.M. (2019) Diffusion Tensor Imaging of Brain Malformations: Exploring the Internal Architecture. *Neuroimaging Clinics of North America*, **29**, 423-434. <https://doi.org/10.1016/j.nic.2019.03.004>
- [30] 林宝全, 石胜良, 秦超, 等. 局灶性脑梗死后豆状核继发性损害的磁共振弥散张量研究[J]. 广西医科大学学报, 2017, 34(5): 702-705.
- [31] 王敬, 陈立英, 梁容仙, 等. 康复治疗对急性脑梗死患者神经功能恢复的磁共振扩散张量成像研究[J]. 山西医药杂志, 2016, 45(13): 1564-1567.
- [32] 孙功能, 朱虎, 邱伟, 等. 磁共振弥散张量成像定量参数在胶质瘤分级诊断中的应用研究[J]. 医学影像学杂志, 2019, 29(4): 528-531.
- [33] Tac, W., Ham, B., Pyun, S., Kang, S. and Kim, B. (2018) Current Clinical Applications of Diffusion-Tensor Imaging in Neurological Disorders. *Journal of Clinical Neurology*, **14**, 129-140. <https://doi.org/10.3988/jcn.2018.14.2.129>
- [34] 何光武, 张贵祥, 何江波, 等. 正常成人不同年龄段大脑白质纤维各向异性差异研究[J]. 医学影像学杂志, 2007, 17(5): 433-436.
- [35] 王瑜元, 白玉龙. 皮质脊髓束与脑卒中患者运动功能预后的相关研究进展[J]. 中国康复理论与实践, 2018, 24(11): 1280-1283.
- [36] Cui, J., Kim, C., Kim, Y., Sohn, M.K. and Jee, S. (2020) Effects of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation (RTMs) Combined with Aerobic Exercise on the Recovery of Motor Function in Ischemic Stroke Rat Model. *Brain Sciences*, **10**, Article 186. <https://doi.org/10.3390/brainsci10030186>
- [37] Yoon, K.J., Lee, Y. and Han, T.R. (2011) Mechanism of Functional Recovery after Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation (RTMs) in the Subacute Cerebral Ischemic Rat Model: Neural Plasticity or Anti-Apoptosis? *Experimental Brain Research*, **214**, 549-556. <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2853-2>
- [38] 孙玮, 赵晨光, 牟翔, 等. 低频重复经颅磁刺激治疗脑卒中患者上肢痉挛的临床研究[J]. 中国康复, 2017, 32(2): 102-105.
- [39] Wang, H., Crupi, D., Liu, J., Stucky, A., Cruciata, G., Di Rocco, A., et al. (2011) Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation Enhances BDNF-TrkB Signaling in Both Brain and Lymphocyte. *Journal of Neuroscience*, **31**, 11044-11054. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.2125-11.2011>
- [40] 朱萍, 钟燕彪, 徐曙天, 等. 不同范式重复性经颅磁刺激的作用机制及改善脑卒中后运动功能的研究进展[J]. 中国康复, 2019, 34(11): 605-609.
- [41] 陈丹凤, 燕铁斌, 黎冠东, 等. 磁共振弥散张量成像参数与脑卒中早期患者下肢运动功能恢复的相关性研究[J]. 中国康复医学杂志, 2018, 33(7): 812-816.
- [42] 刘建华, 魏清川, 胡秀茹, 等. 弥散张量成像各向异性分数与缺血性脑卒中患者上肢运动功能的相关性[J]. 中国康复理论与实践, 2020, 26(7): 749-752.
- [43] 凌晴, 林丽萍, 胡世红, 等. 磁共振弥散张量成像在脑卒中后皮质脊髓束损伤与运动功能的相关性研究[J]. 中国康复医学杂志, 2016, 31(2): 140-144.
- [44] 王旭, 刘斌, 杨明, 等. 扩散张量成像与急性脑干缺血性卒中患者运动功能预后的相关性[J]. 中国医学影像学杂志, 2015, 23(4): 255-259.

-
- [45] 索峰, 于台飞, 李莉, 等. FA 值在脑梗死及其继发 Wallerian 变性中的临床意义[J]. 医学影像学杂志, 2013, 23(10): 1521-1524.
- [46] Song, J., Nair, V.A., Young, B.M., *et al.* (2022) DTI Measures Track and Predict Motor Function Outcomes in Stroke Rehabilitation Utilizing BCI Technology. *Frontiers in Human Neuroscience*, **9**, Article 195.
- [47] Wen, H., Alshikho, M.J., Wang, Y., Luo, X., Zafonte, R., Herbert, M.R., *et al.* (2016) Correlation of Fractional Anisotropy with Motor Recovery in Patients with Stroke after Postacute Rehabilitation. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **97**, 1487-1495. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2016.04.010>
- [48] Guo, Z., Jin, Y., Peng, H., Xing, G., Liao, X., Wang, Y., *et al.* (2016) Ipsilesional High Frequency Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation Add-On Therapy Improved Diffusion Parameters of Stroke Patients with Motor Dysfunction: A Preliminary DTI Study. *Neural Plasticity*, **2016**, Article ID: 6238575. <https://doi.org/10.1155/2016/6238575>
- [49] Lindenberg, R., Zhu, L.L., Rüber, T. and Schlaug, G. (2011) Predicting Functional Motor Potential in Chronic Stroke Patients Using Diffusion Tensor Imaging. *Human Brain Mapping*, **33**, 1040-1051. <https://doi.org/10.1002/hbm.21266>
- [50] Demirtas-Tatlidede, A., Alonso-Alonso, M., Shetty, R.P., Ronen, I., Pascual-Leone, A. and Fregni, F. (2015) Long-Term Effects of Contralesional Rtms in Severe Stroke: Safety, Cortical Excitability, and Relationship with Transcallosal Motor Fibers. *NeuroRehabilitation*, **36**, 51-59. <https://doi.org/10.3233/nre-141191>
- [51] Zhao, N., Zhang, J., Qiu, M., Wang, C., Xiang, Y., Wang, H., *et al.* (2018) Scalp Acupuncture plus Low-Frequency rTMS Promotes Repair of Brain White Matter Tracts in Stroke Patients: A DTI Study. *Journal of Integrative Neuroscience*, **17**, 125-139. <https://doi.org/10.3233/jin-170043>