

· 综述与专论 ·

弥散张量成像联合运动诱发电位评估脑梗死偏瘫患者运动功能预后价值的研究进展



扫描二维码
查看原文

孟江涛^{1,2}, 杨思宇^{1,2}, 孙蕾^{2,3}, 雷瑞宁^{1,2}, 赵晓霞^{2,4*}

【摘要】 肢体瘫痪是脑梗死常见的后遗症,给患者带来躯体障碍的同时还带来沉重的心理负担。近年来对于脑梗死患者运动功能预后的研究日益增多,越来越多的医学评估工具被大家熟知,磁共振弥散张量成像(DTI)及经颅磁刺激运动诱发电位(TMS-MEP)可以从微观上探查患者白质纤维束结构的变化,将DTI和TMS-MEP联合即神经解剖及电生理学和神经影像学的联合,能更加精准地反映运动神经元损害程度,得到比临床功能指标更加客观的运动功能评估。本文基于DTI及经颅磁刺激(TMS)在皮质脊髓束中的作用对脑梗死后患者运动功能恢复的预测评估做一综述,概括DTI及TMS常用测量参数在偏瘫患者运动功能恢复评估中的价值,得出了DTI及TMS-MEP可以发现更为细微的神经及组织变化,是无创探索复杂脑组织结构的有力工具,通过DTI和TMS的联合,利用不同的分析方法有效探索白质纤维束的损伤模式,将有助于为患者制订相应的神经功能康复方案,最大限度地改善患者的远期预后。

【关键词】 脑梗死;弥散张量成像;经颅磁刺激;运动功能预后;神经康复;综述

【中图分类号】 R 743.33 **【文献标识码】** A DOI: 10.12114/j.issn.1007-9572.2023.0152

【引用本文】 孟江涛,杨思宇,孙蕾,等.弥散张量成像联合运动诱发电位评估脑梗死偏瘫患者运动功能预后价值的研究进展[J].中国全科医学,2023,26(32):4098-4102. DOI: 10.12114/j.issn.1007-9572.2023.0152. [www.chinagp.net]

MENG J T, YANG S Y, SUN L, et al. Advances in the prognostic value of diffusion tensor imaging with motor evoked potential for motor function in cerebral infarction patients with hemiplegia [J]. Chinese General Practice, 2023, 26 (32) : 4098-4102.

Advances in the Prognostic Value of Diffusion Tensor Imaging with Motor Evoked Potential for Motor Function in Cerebral Infarction Patients with Hemiplegia MENG Jiangtao^{1,2}, YANG Siyu^{1,2}, SUN Lei^{2,3}, LEI Ruining^{1,2}, ZHAO Xiaoxia^{2,4*}

1.The Fifth Clinical Medical College of Shanxi Medical University, Taiyuan 030000, China

2.Shanxi Inheritance Studio of Renowned Senior TCM Physician ZHAO Furun, Taiyuan 030000, China

3.Shanxi University of Chinese Medicine, Taiyuan 030000, China

4.Department of Neurology, Shanxi Provincial People's Hospital, Taiyuan 030000, China

*Corresponding author: ZHAO Xiaoxia, Associate chief physician; E-mail: wsplbb@163.com

【Abstract】 Limb paralysis is a common sequela of cerebral infarction, which leads to both physical disorders and heavy psychological burden. Recent years have witnessed growing studies on the prognosis of motor function in patients with cerebral infarction, and increasing well-known relevant medical evaluation tools, such as diffusion tensor imaging (DTI) and motor evoked potential induced by transcranial magnetic stimulation (TMS-MEP), which can microscopically assess the structural changes in white matter fiber bundles, and the combined use of them, that is, the combination of neuroanatomy, electrophysiology and neuroimaging, can more accurately assess the level of motor neuron impairment, thereby obtaining a motor function assessment surpassing the assessment based on clinical function indicators in terms of objectivity. We reviewed the prognostic value of DTI and TMS for motor function recovery via detecting and quantifying corticospinal tract degeneration in patients after cerebral infarction, and summarized the prognostic values of commonly used relevant measurement parameters for motor function recovery in hemiplegic patients. We concluded that DTI and TMS-MEP are powerful tools for noninvasively

基金项目: 山西省重点研发计划 (201703D321017-3)

1.030000 山西省太原市,山西医科大学第五临床医学院 2.030000 山西省太原市,山西省赵福润名老中医传承工作室 3.030000 山西省太原市,山西中医药大学 4.030000 山西省太原市,山西省人民医院神经内科

*通信作者: 赵晓霞,副主任医师; E-mail: wsplbb@163.com

本文数字出版日期: 2023-04-20

assessing complex structures of brain tissues, which can detect more subtle neural and tissue changes, and the combined use of them can effectively explore the damage pattern of white matter fiber bundles using different analysis methods, contributing to the development of neurological rehabilitation programs and maximum improvement of the long-term prognosis for patients.

【Key words】 Brain infarction; Diffusion tensor imaging; Transcranial magnetic stimulation; Prognosis of motor function; Neurological rehabilitation; Review

我国脑血管疾病负担日趋严重, 2020年中国卒中患病率为2.6%, 较2019年卒中患病率增长0.6%, 远高于全球卒中患病率估计值(2019年为1.2%), 并且每10万人中就有343人死亡, 逐渐成为第一大死亡原因^[1], 且发病年龄日益年轻化, 神经功能缺损也越来越引起人们的重视, 而肢体功能障碍是其最常见的后遗症^[2]。

运动功能的恢复通常发生在脑梗死后3个月内, 且上肢恢复较下肢相对受限。有研究表明上肢运动功能恢复可能不限于脑梗死后前3~6个月, 这一关键的恢复时间窗可被延长至脑梗死后18个月^[3]。精准预测脑梗死患者预后, 有效时间窗内进行康复治疗恢复患肢功能尤为重要, 目前对于神经功能缺损及康复评估仍然是不全面的, 缺乏特异性手段^[4], 故探索影像学及神经电生理工具用于运动功能预后的评估有一定临床价值。

皮质脊髓束(CST)是运动传导的主要通路, 其纤维的完整性会影响运动结局, 沃勒变性是卒中后CST受损的表现, 包括轴突和髓鞘的顺行性病变。发病早期主要表现为远端轴突肿胀、破裂、塌陷和髓鞘松弛, 随后可见髓鞘肿胀、增厚、弯曲和分解^[5]。CST的沃勒变性和功能障碍密切相关, 在卒中后早期常规的影像学方法并不会显示这种细微的表现, 而磁共振弥散张量成像(DTI)及经颅磁刺激运动诱发电位(TMS-MEP)是早期检测卒中后CST沃勒变性的敏感工具, 发觉脑梗死后神经及组织更为细微的变化, 得到客观反映运动神经通路损伤的评估指标。

本文文献检索策略: 系统检索中国知网、万方数据知识服务平台、PubMed、Web of Science等数据库, 检索策略采用主题词与自由词相结合的方式。中文检索词包括: 脑梗死、脑卒中、弥散张量成像、经颅磁刺激、运动诱发电位、运动功能、预后等检索词及其组合。英文检索词包括: cerebral infarction, stroke, diffusion tensor imaging, transcranial magnetic stimulation, motor evoked potentials, motor function, prognosis等检索词及其组合。纳入标准: 符合DTI、经颅磁刺激(TMS)在脑梗死预后评估中的临床及综述文献。排除标准: 非全文文献、重复发表文献。

1 DTI概述

1.1 DTI基本原理和方法 DTI是在弥散加权成像(DWI)的基础上发展起来的, 是一种新型的核磁成像及后处理技术, 能够无创检测白质纤维结构的医学成像

工具。DWI与DTI的成像均是基于水分子在不同结构的扩散方向及速度差异。从三维角度立体、直观地显示活体脑白质纤维束的走行变化, 从而实现对人的神经纤维精细成像。DTI显示了传统核磁不能反映的白质内纤维束细微结构早期受损情况, 以及缺血区纤维受损状态、白质纤维束因损伤而导致的推压、移位和破坏^[6-7]。通过DTI对白质纤维束的追踪观察, 不仅可以揭示神经组织的形态与结构, 也增加了白质纤维束相关的颅内病变的诊断潜力。

1.2 常用参数及意义 将获得的数据经计算机处理后转换成以下参数成像: 包括各向异性分数(FA)、相对各向异性(RA)、平均弥散系数(ADC)、容积比(VR)。

FA、ADC是常用的DTI标量。通过测量DTI标量, 可以从定量角度评估缺血性脑梗死患者不同阶段白质纤维束的微结构变化, 实现白质纤维束损伤对于运动功能变化的转化, 从而达到反映不同程度运动功能缺损远期预后的结果。

FA值代表组织各项异性的特征, 反映神经髓鞘的完整性、致密性和平行性, 其值降低表明细胞完整性受损和不可逆转的细胞损伤^[8], 其变化在梗死核心和缺血区域之间是不同的, 取决于缺血的严重程度和发病时间^[9]。

ADC的变化与脑梗死的时间有关, 在脑梗死的超急性期、急性期ADC值降低, 而在亚急性期开始回升, 随后出现假正常化现象, 在慢性期逐渐升高, 最后超过参考范围^[10]。这种数值变化是由于在脑梗死早期出现细胞毒性水肿, 水分子在细胞间的自由运动受限, 造成ADC值降低; 随后出现血管源性脑水肿, 水分子的自由扩散空间增加, ADC值增大甚至超出参考范围^[11], 因此结合ADC的数值变化, 可以进一步明确不同时间段脑梗死患者白质纤维束缺血坏死的程度。

1.3 DTI在脑梗死后偏瘫肢体中的应用 针对缺血性卒中患者, 白质纤维束DTI参数的早期测量已经证实可以独立预测患者的功能预后, 并且是在评估卒中后恢复的研究中的附加指标^[12]。一项对脑梗死后12h的CST行DTI评估的研究表明, CST的完整性与脑梗死90d后的运动功能密切相关, 并且在结果预测中优于梗死体积和临床评分^[13]。一项对比脑梗死后24~72h和3个月后症状缺损严重程度的研究发现, 随着时间的延长半球白质的完整性显著下降, 而远端白质纤维束较少缺失的患者

运动功能恢复更好^[14]。也有研究证实脑梗死后患侧与健侧 CST 测定的 rFA 值 (患侧 FA 值与健侧 FA 值之比) 对于评估脑梗死后 3 个月的上肢功能恢复情况有重要指导意义^[15]。此外, FA 值还与预后不良独立相关^[16]。

利用 DTI 还可以评价脑梗死组织区域和邻近区域微结构损伤的变异性程度, 有效辨别梗死核心区域和缺血半暗带, 为急性脑梗死患者溶栓治疗提供新的依据^[17]。此外, 从脑梗死急性期、亚急性期过渡到慢性期的过程中, 不同阶段测定的 ADC 值还可以反应患者病程所处阶段, 在明确不同时间段脑梗死患者白质纤维束缺血坏死程度的同时, 还可以指导功能结局的演变^[18]。通常在慢性期越高的 ADC 值, 则代表病变区域已经逐渐发生完全液化坏死, 此时恢复也更为困难^[19]。

目前 DTI 主要用于脑部病变的研究, 可以清晰显示除白质纤维束外, 还可以评估脑发育水平和脑认知功能, 揭示脑部疾病的病理变化, 指导脑肿瘤术前计划的制订, 评估手术效果及患者预后等。此外, DTI 还可以进行外周神经成像、脊髓成像、椎间盘成像、子宫成像、双肾成像等, 有一定的诊断价值。

2 TMS 概述

2.1 TMS 基本原理 TMS 是一种无创、无痛的神经电生理学检查, 基于法拉第电磁感应原理, 脉冲磁场信号通过头皮和颅骨无衰减地施加到大脑皮质, 然后在作用区域的组织中产生感应电流刺激该区域的神经元兴奋, 产生相应的神经电生理活动^[20]。

2.2 常用参数及意义 运动诱发电位 (MEP) 振幅和潜伏期、中枢运动传导时间 (CMCT) 等神经生理学指标是 TMS 常用指标, 其有助于深入了解卒中后皮质脊髓兴奋性状态^[21]。TMS-MEP 就是通过在大脑皮质运动细胞、脊髓神经根及周围神经给予 TMS, 在其支配的相应肌肉上记录产生的动作电位, 从而反映中枢运动传导通路的功能^[22]。MEP 幅度提供了从运动皮质至目标肌肉的多突触神经通路兴奋性变化的度量^[23]。MEP 潜伏期是指从开始给予人体肌肉适宜的刺激到出现运动反应时所需要的时间, 包括皮质兴奋、CST 传导, 脊髓前角兴奋及脊髓前角传导所需要的时间, MEP 潜伏期延长, 说明锥体束存在损伤。CMCT 是指 TMS 作用于大脑运动皮质区域产生的诱发电位延迟 CST 到达脊髓神经根所需要的时间^[24]。CMCT 延长表明 CST 的传导减慢, 提示 CST 的损伤, 如轴突受损或脱髓鞘改变。

2.3 TMS 在脑梗死后偏瘫肢体中的应用 TMS 能够定量表示 CST 在刺激过程中的兴奋性, 通过评估运动诱发电位确定 CST 神经生理学的完整性^[25]。在中枢神经系统脑或脊髓损伤病变中, MEP 的表现是由脊髓破坏的程度决定的, 白质纤维脱髓鞘改变越重, 前角运动细胞受损数目越多, 则 MEP 的潜伏期和波幅越容易受

影响^[26-27]。此外卒中后早期 TMS-MEP 的存在与否, 可以为皮质运动传导系统功能的完整性提供有效的信息^[28]。就严重受损的脑梗死患者功能预后而言, MEP 状态对于区分运动恢复良好和运动恢复不良的患者有重要意义。一项以大脑中动脉供血区梗死引起的运动功能障碍为主的研究中发现, 上肢较下肢运动缺损更为严重, 恢复更为困难, 然而对于上肢存在 TMS 运动诱发反应的患者, 通过早期识别, 并且经过 3 年强化康复计划, 仍然可以为脑梗死后患者带来有意义的收益^[29]。下肢亦是如此, 通过早期行 TMS, 确定 CST 的保存情况有助于预测受影响下肢的最终运动恢复和步态功能^[30]。通过动作电位高低长短异常, 评估中枢运动传导通路受损程度, 可以反映患者运动功能预后恢复。

CST 构成了主要的运动输出通路, 其完整性与运动功能状态相关, 其受损的程度会制约运动表现和恢复, TMS 通过检测神经通路的完整性, 进而预测患者预后, 因此其完整性是卒中患者运动功能潜能的预测因子^[31]。同样地, 通过检测 CST 结构的完整性, 判断脑梗死后因运动功能长期缺失导致患者恢复期出现功能的失用现象, 其诊断也变得相对简单, CST 是人脑中与运动功能联系最为密切相关的神经纤维束, 脑梗死后失用的患者仍保留 CST, 可通过 TMS 刺激神经元, 测量 MEP 幅度来估计 CST 纤维的数量, 从而判断是否存在运动功能缺损^[32]。精准地判定患者运动功能状态有助于康复计划的个体化, 有助于识别具有显著康复潜力的脑梗死患者, 使这些患者从强化康复中获益。

3 DTI 及 TMS 联合在脑梗死偏瘫肢体中的应用

DTI 可以识别白质纤维束的区域, 实现解剖学的映射, 通过精准地跟踪、观察白质纤维束的完整性而进行神经组织病变相关的脑功能疾病研究^[33]。在脑梗死患者中进行白质弥散张量成像参数的早期测量, 观察患者 FA 值、ADC 值在脑梗死后不同阶段的演变规律, 建立和患者运动功能缺损恢复的联系性, 可以起到独立预测患侧功能预后的作用。DTI 反映白质纤维束牵拉、移位、缺损程度, 对于内部纤维结构细微病变的评估较为局限, 而 TMS 可以从电生理学角度评估其通路的完整性, 精准地反映运动传导通路功能, 做到从微观结构上反映 CST 内部的病理生理改变。目前 TMS 多被用来研究皮质下脑梗死后运动康复相关的脑解剖结构与电生理功能之间的相关性, 相对于临床功能指标, 其是一种能更客观、全面反映神经纤维的受损程度, 更准确评估运动功能的半球支配情况的技术^[34]。通过对皮质刺激下 MEP 波的波幅、潜伏期及 CMCT 的研究, 能反映白质纤维束内部的通路功能, 探索脑梗死后与患者运动功能恢复相关的电信号传导的兴奋性及神经的可塑性。

KUMAR 等^[35]通过对脑梗死后 7 d 内有明显的上

肢运动缺陷的患者进行 TMS 运动诱发电位和 DTI 检查, 评估 CST 的完整性预测上肢运动功能恢复的准确性, 研究认为 DTI 参数的 FA 值可以提示 CST 的完整性, FA 值降低表示神经束完整性中断, 并与运动缺陷相关; TMS 中显示 MEP 反应且 CST 完整性保留较好的患者, 比没有这些特征的患者有更好的上肢运动恢复机会, 证实了这两种检测方法在预后评估中的重要性。OKAMOTO 等^[36]研究也探讨了 DTI 及 TMS 的神经电生理学参数在卒中患者康复中的重要性。此外, MEP 应答反应差的患者, 其神经功能预后结局演变结果并不一定就无法逆转, 有研究发现重度-中度脑梗死运动障碍且 TMS 无 MEP 应答的个体, 通过神经调节及运动康复训练的相结合, 部分患者仍然可以实现具有临床意义的改善, 尽管 MEP 应答组比无应答组有更好的康复效果^[37]。这种原因可能是由于 CST 损伤, 皮质脊髓之间突触活动的兴奋性下降, TMS 脉冲激活皮质脊髓投射的部分纤维, 在脊髓运动神经元中产生的兴奋性突触后电位远离它们的阈值, 将不产生电位活动, 因此将不记录 MEP。因此对于这类的 TMS 结果, 预后判断的特异度就需要其他手段来提高, 而 DTI 刚好可以满足这种需要。国内有较少研究也与上述结果相似, 杨雅馨等^[38]采用 DTI 及 TMS 两种手段, 对脑梗死后肢体功能障碍客观指标的相关性分析发现, MEP 波形缺失及 DTI 标量可以用于重度肢体功能障碍的评估指标, 但由于早期 CST 通路的中断, 会限制 MEP 唤起, 导致 MEP 波形缺失作为重度功能障碍指标的灵敏度高, 而特异度较低, 但联合 DTI 标量协同检测后, 其检验效能明显提高。但是, 尽管 CST 完整性保留, 患者也可以存在肢体功能障碍的可能, 一个有意思的发现是, TANG 等^[39]发现在肢体轻瘫的中央前回梗死性病变未累及 CST 通路的原始区域时, 虽然 CST 保留完好, 但 TMS 却表现出神经电生理学指标的变化。LI 等^[40]研究也表现类似的结果, 经治疗后病灶侧 DTI 测定较前未见明显改善, 但 MEP 振幅、潜伏期明显改善。这可能是因为 CST 结构的完整性并不等同于 CST 传导功能的完整性, 因此尽管 CST 的完整性是良好运动恢复的必要前提, 但是也不能忽略神经电生理改变在皮质病变患者中的重要性。

4 小结与展望

脑梗死患者白质纤维束损伤是患者神经功能受累的关键因素, 也是影响患者功能恢复的主要原因, DTI 及 TMS-MEP 可以发现更为细微的神经及组织变化, 是无创探索复杂脑组织结构的有力工具, 通过 DTI 和 TMS 的联合, 利用不同的分析方法有效探索白质纤维束的损伤模式, 将有助于为患者制订相应的神经功能康复方案, 最大限度地改善远期预后。此外, DTI 及 TMS 当前研究的主要热点依旧是探查中枢神经系统的纤维通路, 通过

对相关数据的定量分析, 使得可视化的脑损伤以及与临床治疗相关的各种神经束潜藏病变成成为可能。

作者贡献: 孟江涛负责文献资料的收集、整理、文章整体构思、论文撰写; 杨思宇、孙蕾、雷瑞宁负责文献资料整理; 赵晓霞提出研究思路、负责论文修订、文章质量控制, 对文章负责。

本文无利益冲突。

参考文献

- [1] TU W J, ZHAO Z, YIN P, et al. Estimated burden of stroke in China in 2020 [J]. JAMA Netw Open, 2023, 6 (3): e231455. DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2023.1455.
- [2] LIU Y Y, CHEN L, ZENG J S, et al. Proliferation of bilateral nerve fibers following thalamic infarction contributes to neurological function recovery: a diffusion tensor imaging (DTI) study [J]. Med Sci Monit, 2018, 24: 1464-1472. DOI: 10.12659/msm.909071.
- [3] LANGHORNE P, BERNHARDT J, KWAKKEL G. Stroke rehabilitation [J]. Lancet, 2011, 377: 1693-1702. DOI: 10.1016/S0140-6736(11)60325-5.
- [4] 刘杨, 赵波洋, 李主镜, 等. 基底节区缺血性脑卒中针刺联合药物治疗的 DTI 评价 [J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2020, 18 (8): 7-9. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5131.2020.08.003.
- [5] DARWISH H S, ELSHAFFEY R, KAMEL H. Prediction of motor recovery after stroke by assessment of corticospinal tract wallerian degeneration using diffusion tensor imaging [J]. Indian J Radiol Imaging, 2021, 31 (1): 131-137. DOI: 10.1055/s-0041-1729671.
- [6] 曾皎, 陈红群, 刘芳. 弥散张量成像评估急性脑梗死康复治疗前后运动功能变化与预后的相关性 [J]. 中风与神经疾病杂志, 2016, 33 (4): 334-337.
- [7] RANZENBERGER L, SNYDER T. Diffusion tensor imaging [M]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2019.
- [8] BHAGAT Y A, HUSSAIN M S, STOBBE R W, et al. Elevations of diffusion anisotropy are associated with hyper-acute stroke: a serial imaging study [J]. Magn Reson Imaging, 2008, 26 (5): 683-693. DOI: 10.1016/j.mri.2008.01.015.
- [9] NAEL K, TROUARD T P, LAFLEUR S R, et al. White matter ischemic changes in hyperacute ischemic stroke: voxel-based analysis using diffusion tensor imaging and MR perfusion [J]. Stroke, 2015, 46 (2): 413-418. DOI: 10.1161/STROKEAHA.114.007000.
- [10] PUIG J, PEDRAZA S, BLASCO G, et al. Acute damage to the posterior limb of the internal capsule on diffusion tensor tractography as an early imaging predictor of motor outcome after stroke [J]. AJNR Am J Neuroradiol, 2011, 32 (5): 857-863. DOI: 10.3174/ajnr.A2400.
- [11] HEISS W D. Contribution of neuro-imaging for prediction of functional recovery after ischemic stroke [J]. Cerebrovasc Dis, 2017, 44 (5/6): 266-276. DOI: 10.1159/000479594.
- [12] SAGNIER S, CATHELINE G, DILHARREGUY B, et al. Normal-appearing white matter integrity is a predictor of outcome after ischemic stroke [J]. Stroke, 2020, 51 (2): 449-456.
- [13] SHEN Y X, LI M, WEI R P, et al. Effect of acupuncture therapy for postponing Wallerian degeneration of cerebral infarction as shown

- by diffusion tensor imaging [J]. *J Altern Complement Med*, 2012, 18 (12): 1154–1160. DOI: 10.1089/acm.2011.0493.
- [14] PINTER D, GATTRINGER T, FANDLER-HÖFLER S, et al. Early progressive changes in white matter integrity are associated with stroke recovery [J]. *Transl Stroke Res*, 2020, 11 (6): 1264–1272. DOI: 10.1007/s12975-020-00797-x.
- [15] TAE W S, HAM B J, PYUN S B, et al. Current clinical applications of diffusion-tensor imaging in neurological disorders [J]. *J Clin Neurol*, 2018, 14 (2): 129–140. DOI: 10.3988/jcn.2018.14.2.129.
- [16] ROSSI M E, JASON E, MARCHESOTTI S, et al. Diffusion tensor imaging correlates with lesion volume in cerebral hemisphere infarctions [J]. *BMC Med Imaging*, 2010, 10: 21.
- [17] NG F, VENKATRAMAN V, PARSONS M, et al. Gradient of tissue injury after stroke: rethinking the infarct versus noninfarcted dichotomy [J]. *Cerebrovasc Dis*, 2020, 49 (1): 32–38. DOI: 10.1159/000505847.
- [18] CHRISTIDI F, TSIPTSIOS D, FOTIADOU A, et al. Diffusion tensor imaging as a prognostic tool for recovery in acute and hyperacute stroke [J]. *Neurol Int*, 2022, 14 (4): 841–874. DOI: 10.3390/neurolint14040069.
- [19] 李广民, 姚剑, 钟佳利, 等. 磁共振弥散加权成像联合灌注加权成像技术在诊断不同时期老年脑梗死的临床价值 [J]. *中华老年心脑血管病杂志*, 2018, 20 (6): 572–575.
- [20] KARATZETZOU S, TSIPTSIOS D, TERZOUDI A, et al. Transcranial magnetic stimulation implementation on stroke prognosis [J]. *Neurol Sci*, 2022, 43 (2): 873–888. DOI: 10.1007/s10072-021-05791-1.
- [21] SMITH M C, STINEAR C M. Transcranial magnetic stimulation (TMS) in stroke: ready for clinical practice? [J]. *J Clin Neurosci*, 2016, 31: 10–14. DOI: 10.1016/j.jocn.2016.01.034.
- [22] 张鹏. 经颅磁刺激技术的研究进展 [J]. *医疗装备*, 2019, 32 (6): 198–199.
- [23] 周云飞, 郝帅, 宋启民. 经颅电刺激运动诱发电位对急性坐骨神经损伤兔模型的评估价值 [J]. *中华诊断学电子杂志*, 2019, 7 (1): 48–53.
- [24] ZOLKEFLEY M K I, FIRWANA Y M S, HATTA H Z M, et al. An overview of fractional anisotropy as a reliable quantitative measurement for the corticospinal tract (CST) integrity in correlation with a Fugl-Meyer assessment in stroke rehabilitation [J]. *J Phys Ther Sci*, 2021, 33 (1): 75–83. DOI: 10.1589/jpts.33.75.
- [25] SONG J, YOUNG B M, NIGOGOSYAN Z, et al. Characterizing relationships of DTI, fMRI, and motor recovery in stroke rehabilitation utilizing brain-computer interface technology [J]. *Front Neuroeng*, 2014, 7: 31. DOI: 10.3389/fneng.2014.00031.
- [26] LI P P, CHEN C Y, HUANG B Z, et al. Altered excitability of motor neuron pathways after stroke: more than upper motor neuron impairments [J]. *Stroke Vasc Neurol*, 2022, 7 (6): 518–526. DOI: 10.1136/svn-2022-001568.
- [27] KARATZETZOU S, TSIPTSIOS D, TERZOUDI A, et al. Transcranial magnetic stimulation implementation on stroke prognosis [J]. *Neurol Sci*, 2022, 43 (2): 873–888. DOI: 10.1007/s10072-021-05791-1.
- [28] 唐智生, 杨少华, 徐晓兰, 等. 经颅磁刺激运动诱发电位评价神经根型颈椎病射频治疗疗效的临床研究 [J]. *按摩与康复医学*, 2019, 10 (20): 27–28.
- [29] BYBLOW W D, STINEAR C M, BARBER P A, et al. Proportional recovery after stroke depends on corticomotor integrity [J]. *Ann Neurol*, 2015, 78 (6): 848–859. DOI: 10.1002/ana.24472.
- [30] STINEAR C M, BARBER P A, SMALE P R, et al. Functional potential in chronic stroke patients depends on corticospinal tract integrity [J]. *Brain*, 2007, 130 (Pt 1): 170–180. DOI: 10.1093/brain/awl333.
- [31] CUI J X, KIM C S, KIM Y, et al. Effects of repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS) combined with aerobic exercise on the recovery of motor function in ischemic stroke rat model [J]. *Brain Sci*, 2020, 10 (3): 186. DOI: 10.3390/brainsci10030186.
- [32] CICERON C, SAPPEY-MARINIER D, RIFFO P, et al. Case report: true motor recovery of upper limb beyond 5 years post-stroke [J]. *Front Neurol*, 2022, 13: 804528. DOI: 10.3389/fneur.2022.804528.
- [33] CHANG M C, DO K H, CHUN M H. Prediction of lower limb motor outcomes based on transcranial magnetic stimulation findings in patients with an infarct of the anterior cerebral artery [J]. *Somatosens Mot Res*, 2015, 32 (4): 249–253. DOI: 10.3109/08990220.2015.1091769.
- [34] JANG S H, BYUN D H. Role of diffusion tensor tractography in diagnosis of limb-kinetic apraxia in stroke patients: a mini-narrative review [J]. *Med Sci Monit*, 2022, 28: e936417. DOI: 10.12659/msm.936417.
- [35] KUMAR P, PRASAD M, DAS A, et al. Utility of transcranial magnetic stimulation and diffusion tensor imaging for prediction of upper-limb motor recovery in acute ischemic stroke patients [J]. *Ann Indian Acad Neurol*, 2022, 25 (1): 54–59. DOI: 10.4103/aian.aian_254_21.
- [36] OKAMOTO Y, ISHII D, YAMAMOTO S, et al. Relationship between motor function, DTI, and neurophysiological parameters in patients with stroke in the recovery rehabilitation unit [J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2021, 30 (8): 105889. DOI: 10.1016/j.jstrokcerebrovasdis.2021.105889.
- [37] POWELL E S, WESTGATE P M, GOLDSTEIN L B, et al. Absence of motor-evoked potentials does not predict poor recovery in patients with severe-moderate stroke: an exploratory analysis [J]. *Arch Rehabil Res Clin Transl*, 2019, 1 (3/4): 100023. DOI: 10.1016/j.arret.2019.100023.
- [38] 杨雅馨, 李颖, 袁海峰, 等. 脑卒中后肢体运动功能障碍的生物学评估指标分析 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2019, 41 (10): 740–744. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2019.10.005.
- [39] TANG X W, YU Q R, GUO M, et al. Multi-modal fMRI and TMS follow-up study of motor cortical stroke caused by hyaluronic acid filler: a case report [J]. *Front Neurol*, 2022, 13: 903648. DOI: 10.3389/fneur.2022.903648.
- [40] LI C, WEI J Y, HUANG X Q, et al. Effects of a brain-computer interface-operated lower limb rehabilitation robot on motor function recovery in patients with stroke [J]. *J Healthc Eng*, 2021, 2021: 4710044. DOI: 10.1155/2021/4710044.

(收稿日期: 2023-03-05; 修回日期: 2023-04-10)

(本文编辑: 毛亚敏)