

· 综述 ·

扩散张量成像常用指标预测脑卒中功能恢复的研究进展

赵紫璇^{1,2} 郭丽^{1,2} 尹勇¹¹云南大学附属医院(云南省第二人民医院)康复医学科,昆明 650021; ²昆明医科大学研究生院(康复医学与理疗学专业),昆明 650500

通信作者:尹勇,Email: yyinpmr@126.com

【摘要】 扩散张量成像(DTI)广泛用于检测脑白质轴突、髓鞘等微观结构变化。通过分析 DTI 数据,可获得多个量化指标来评价纤维微结构特性,且这些指标与临床信息具有关联。本文旨在探讨基于 DTI 的指标在脑卒中患者功能预后中的研究,以及 DTI 存在的局限性和改进方法,从而更加准确地预测脑卒中后患者的功能预后,以为临床诊治提供参考。

【关键词】 脑卒中; DTI; 预测; 功能恢复

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(81960422); 云南省神经康复研究中心项目(2018NS0001, 2018NS0002); 昆明医科大学研究生创新基金项目(2022S358)

Funding: National Natural Science Foundation of China(81960422); Project of Neurorehabilitation Research Center of Yunnan Province(2018NS0001, 2018NS0002); Graduate Innovation Fund Project of Kunming Medical University(2022S358)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2024.01.017

卒中后患者遗留不同程度的功能障碍,预测患者的功能恢复结局对医务人员在制订康复目标、选择康复治疗方案时提供重要的参考。目前临床上大多采用临床评估量表来预测患者的功能预后,虽然量表评估方便简洁,但预测准确率不高;一些研究采用经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)^[1]、脑电图^[2]、肌电图^[3]、静息态功能磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)^[4]、近红外脑功能检测技术^[5]等作为评估预后的方法,但这些方法均无法从形态学上直接观测到脑白质传导束的结构变化。扩散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)是目前常用的可在活体上无创分析和显示脑白质轴突、髓鞘等微观结构变化的检测方法,近年来在判断卒中患者运动功能的损伤程度、预测恢复情况、评价康复疗效等领域应用广泛^[6]。

卒中后病灶远端的神经纤维也会发生继发性损伤,轴突、髓鞘等纤维微结构发生沃勒变性^[7],随着功能障碍的改善,纤维微结构也发生变化^[8]。通过分析 DTI 数据,可获得多个量化指标来评价纤维微结构特性,如各向异性分数(fractional anisotropy, FA)、平均扩散系数(mean diffusivity, MD)、轴向扩散率(axial diffusivity, AD)、径向扩散率(radial diffusivity, RD)等,且这些指标均可与临床信息产生关联。本文旨在探讨如何选择这些指标、DTI 存在的局限性、如何弥补局限性能更加准确地预测卒中后患者的功能预后,以为临床提供参考。

DTI 常用指标预测功能恢复的价值

一、FA 及相关指标

1. FA: FA 是指组织内水分子各向异性部分与总扩散张量的比率,由 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 扩散张量特征值的各向异性程度获得。它通常用于测量髓鞘的完整性、致密性和平行性,能灵敏地反映白质纤维微结构是否受损。FA 是 DTI 预测研究中最常用的

指标,数值显著降低意味着细胞的完整性受损或发生不可逆的损伤,患者的预后可能较差。Peters 等^[9]评估了 43 例慢性卒中患者运动指数同时扫描 DTI 并进行相关性和多元回归分析,发现病灶侧皮质脊髓束(corticospinal tract, CST)和红核中的 FA 与受累上肢和下肢的运动功能呈正相关。回归分析显示,病灶侧 CST-FA 是握力和手臂运动指数评分的预测因子;在预测模型中,病灶侧 CST-FA 解释了握力变化的 37.3% 和手臂运动指数变化的 31.5%。此外,还有多篇文献认为,上肢功能恢复与 CST 的完整性密切相关^[10-12]。预测下肢运动功能及步态方面,Souillard 等^[13]认为,功能性步行量表的等级与病灶侧 CST、皮质网状脊髓通路、病灶对侧 CST 和双侧小脑脚的 FA 显著相关,病灶侧皮质网状脊髓通路、小脑上脚的完整性是步行恢复的预测因子。Lee 等^[14]的研究也得出相似的结论。基于上述研究可认为,FA 可评估白质束的完整性,是作为预测运动功能恢复的一项重要预测因子;而 FA 与卒中后运动功能的恢复息息相关,可作为研究上下肢运动功能恢复机制的一个指标。

2. 各向异性分数比(ratio of fractional anisotropy, rFA): rFA = 病灶侧 FA/病灶对侧 FA, rFA 是研究中常见的预测变量。Koyama 等^[15]认为,卒中患者的 rFA 与 Brunnstrom 分期、功能独立性量表中的运动评分和住院总时间之间的相关性均具有统计学意义,因此 rFA 也可作为预测因子。Liu 等^[16]发现,卒中发病 2 周后病灶侧 FA 与卒中发病后 8 个月的功能评分相关,但同一时期的 rFA 相关性较弱。原因可能是 rFA 被定义为病灶侧 FA 与病灶对侧 FA 的比率,而病灶对侧 FA 与运动功能评分没有显著差异,这些时期病灶侧 FA 与运动结果之间的相关性通过除以病灶对侧 FA 而减弱。这种稀释效应可能会导致相同时期的 rFA 与运动结果之间的相关性较弱。此外,测量可能会受到不同 MRI 扫描仪及扫描参数的影响。这表明卒中后早期预测功能恢复方面,病灶侧 FA 可能比 rFA 具有潜在优势。

Rosso 等^[17]的研究发现,卒中后第 1 周所测得的基线 FA、rFA 高的患者 6 个月后的随访中表现出良好的功能恢复,截止值分别为 0.483、0.948。病变侧的基线 FA、rFA 和随访美国国立卫生研究院卒中量表(national institute of health stroke scale,NIHSS)以及改良 Rankin 评分显著负相关,与随访运动指数评分显著正相关。Puig 等^[18]发现,卒中患者第 30 天的 rFA 与第 2 年的运动障碍一致,是长期运动结果的唯一独立预测因子,且 $rFA < 0.982$ 预测轻度至中度缺陷的敏感性为 94.4%、特异性为 84.6%; $rFA < 0.689$ 预测重度缺陷的敏感性可达 100%、特异性为 83.3%。与其它指标相比,rFA 在预测卒中患者远期恢复情况方面具有高敏感性、高特异性的巨大优势,医务人员可根据患者的 rFA,选择以促进患侧功能恢复为主或以健侧代偿为主的治疗方法;在行非侵入性脑刺激技术(如 TMS、经颅直流电刺激)治疗时可帮助确定作用位点。

3. 各向异性分数不对称指数(fractional anisotropy asymmetry, aFA): aFA = 病灶对侧 FA - 病灶侧 FA / 病灶对侧 FA + 病灶侧 FA, aFA 也是常用预测变量。Tao 等^[12]以卒中后 3 个月的 Fugl-Meyer 上肢功能评分(upper extremity module of the Fugl-Meyer assessment, UE-FMA)为因变量,卒中 1 个月内的病变大小、CST 加权病变负荷(CST-weighted lesion load, CST-wLL)、内囊后肢的 rFA、aFA 以及 CST 的 rFA、aFA 为自变量进行多元回归分析时,发现 CST 的 aFA 是 3 个月时 UE-FMA 最显著的预测因子。Kim 等^[19]使用基线 CST 的 aFA、年龄和 UE-FMA 在内的具有交叉验证和自举的最小绝对收缩和选择算子多变量线性回归模型,解释了远端项目对数变换平均 Wolf 运动功能测试时间中 39% 的方差。此外,CST 的 aFA 解释了远端项目对数变换平均 Wolf 运动功能测试时间的方差大于最小绝对收缩和选择算子模型中的行为学、人口统计学等其它重要预测因子。魏彧等^[20]研究也认为,相较于病灶侧 CST 的 FA 和 rFA, aFA 与患者手、腕关节和上肢运动功能评分更相关,意味着 aFA 能更好地描述脑卒中患者手和上肢的运动功能损伤状况;此外, aFA 降低了因受试者个体差异所带来的影响,这可能表明 aFA 是预测患者运动功能损伤状况更可靠的指标。

FA 及其衍生指标 rFA、aFA 都是常用的预测变量,FA 在亚急性期、慢性期预测运动功能时是可靠的预测因子;rFA 是预测远期恢复情况是否良好的重要指标, aFA 在预测上肢功能恢复方面能克服个体差异,可能是更可靠的指标。

二、MD

MD 是 λ_1 、 λ_2 及 λ_3 的均值,代表平均扩散的大小。与 FA 相反,MD 越高,反映白质束的完整性越低。有文献表明,MD 也可预测卒中患者的功能预后^[21-23],但在信度测试中 MD 的重测信度不如 FA^[24]。多位学者^[9, 24]研究认为,MD 对沃勒变性的敏感性相比于 FA 明显降低,所以 MD 可能不是预测运动功能的可靠因子;但在预测感觉功能恢复时,相比于 DTI 的其他常用指标,MD 的变异系数最低。Borstad 等^[25]的回归分析显示,卒中患者患侧手部主动感觉测试评分中,约 90% 的方差由额顶网络中的 MD 所解释,且丘脑白质的 MD 也与触觉表现相关。这说明感觉的恢复与额顶叶白质完整性相关,MD 可预测慢性卒中患者触觉表现。

另外,在研究治疗反应方面,Boespflug 等^[26]的一项对慢性卒中患者受累侧上肢进行功能电刺激治疗研究发现,经 8 周治

疗后,双侧小脑中脚和内囊后肢的 MD 降低,而 FA 无变化。作者认为,MD 变化而 FA 无变化的原因是二者的计算方式不同;而 MD 仅表示扩散的大小,与扩散的方向无关,而 FA 与扩散的方向有关。因此,治疗期间 MD 的变化可能表明宏观结构上患者的病情在减轻,而不是如轴突再生长等微观结构在改变。

虽然 MD 在预测运动功能的恢复方面不如 FA 可靠,但在预测感觉功能恢复方面优于其它指标;也可作为研究卒中康复治疗反应的影像生物标记物。

三、AD

AD 表示平行于纤维轴索方向上的水分子扩散率,可能是轴突损伤的标志^[27]。有研究^[28]认为,卒中急性期内单个时间点的 CST-FA 与运动结果呈弱至中度相关,预测长期运动功能的价值有限。Groisser 等^[27]研究发现,卒中患者急性期 CST-AD 的缺失与亚急性期和慢性期患手力量和灵巧度的相关性最强,且在调整了急性期运动损伤或病变体积后仍显著。作者认为出现这个现象的原因是在卒中发病后 3~7 d,患者的 CST-AD 均下降,而 FA 指标包含了 RD 的大小,CST-RD 的变化方向是可变的,因此 CST-FA 在急性期时可能是评价 CST 损伤的不稳定指标。Moulton 等^[29]研究亦认为,卒中后 24 h 放射冠处的 AD 是量化卒中损伤以预测预后最合适的扩散指标,因为 AD 可以准确地反映卒中后 24 h 的急性轴突损伤,而 FA 在最初损伤后几天不稳定^[30]。进一步的研究中还发现,弓状束 AD 比是卒中后 3 个月失语严重程度独立预测因子;而包含弓状束 AD 比的预测模型与没有 DTI 的模型相比,该变量导致临床相关解释方差增加 12.9%。当作为模型预测 3 个月的功能结果时,用 AD 图建立的支持向量机分类机器学习产生了所有 DTI 成像指标中最佳的精确度。AD 不对称图不仅在所有 DTI 指标中获得了最高的分类准确率,而且也比常用的二元病变分割法高出 6.1%,从而使错误预测率从 1/4 降低了到 1/6^[31]。

根据上述研究可认为,急性期 CST-AD 是早期测量 CST 损伤的良好替代标志物。弓状束 AD 与失语症的严重程度相关,DTI 检查捕捉到的失语症结果的额外变异性表明 DTI 可以在卒中后第 1 天就为临床医生提供相关信息,以便对卒中患者做出准确预测,改善超急性期预后的管理策略;而 AD 也是一个比二元病变分割更适合用来预测长期预后的影像指标。

四、RD

RD 表示水分子垂直于轴突方向上的扩散情况,是两个较小特征值 λ_2 和 λ_3 的平均值,被认为是髓鞘损伤的指标。Sagnier 等^[21]研究认为,正常白质的 MD 对改良 Rankin 评分有直接影响,AD 和 RD 在内的模型也显示出类似的结果。无论右半球脑卒中患者的卒中病变体积、灰质体积、年龄、性别和教育水平如何变化,在广泛的白质区域,高改良 Rankin 评分与低 FA、高 MD、AD 和 RD 相关。Etherton 等^[23]的研究也表明 MD、AD 和 RD 与随访改良 Rankin 评分相关。

上述研究表明,相比于 DTI 其它参数,RD 并未展示出独特优势。Groisser 等^[27]认为卒中急性期,RD 是一个不稳定的指标;而卒中急性期由于细胞水肿,细胞结构的破坏,然后随着髓鞘的降解,RD 在这段时间内先下降后上升^[32];RD 在扩散上的这种转变发生在卒中发病后的数天内,限制了其表示缺血程度的能力,进而限制了其预测能力。另有研究认为,RD 可能是检测早期白质脱髓鞘最敏感的生物标志物,可作为早期诊断非痴

呆型肌萎缩侧索硬化的影像学生物标志物^[31]。

DTI 在预测方面的局限性

一、不易获得性

1. 与皮质脊髓束加权病变负荷相比: 常规结构 MRI 通常使用 CST-wLL 以量化卒中后 CST 损伤, 并使用病变位置和病变体积作为预测因素。CST-wLL 和 DTI 衍生指标在预测上肢运动恢复的功能方面的比较研究发现, 亚急性期的受试者工作特征曲线下面积与 aFA 相似, 表明 CST-wLL 显示出与 DTI 衍生指标相当的预测准确性。作为预测因子, CST-wLL 不需要专门的研究设备或成像技术, 就可为临床决策提供信息, 也有助于临床试验的分层, 可能比 DTI 更容易推广。

2. 与经颅磁刺激相比: TMS 作为神经电生理方法可以反映神经传导束的功能状态, 在评估及治疗中运用广泛。DTI 作为形态学研究方法, 与 TMS 结合, 从结构变化和功能状态两方面进行评估, 能提高预测的准确性。预测恢复潜力算法 (predict recovery potential algorithm, PREP) 是结合行为学评估、TMS、DTI 作为生物标记物来预测卒中后上肢恢复情况的模型。Stinear 等^[33-34]的随访研究中证实了该算法的准确性为 80%。在此基础上衍生出 PREP2, 考虑到并非所有临床环境都可以获得 TMS 及 DTI 的定量生物标记物, 利用上肢损伤的行为学评估、年龄、是否存在上肢运动诱发电位以及卒中病变负荷或 NIHSS 评分评估的卒中严重程度, 也有 75% 的准确性^[35]。目前 PREP2 已实施到临床实践中, 进一步验证其可行性^[36]。该算法评估循序渐进, 从简单的行为学评估开始, 根据需要使用生物标记物来解决预测的不确定性, 节约了医疗资源, 提高了预测效率。

二、成像局限性

1. 与扩散加权成像相比: 近年来, 高阶扩散加权成像模型的发展可估计体素中特定的白质纤维数量, 基于 Fixel 的分析是一种量化体素内白质纤维特性的新框架, 已显示出能改善传统 DTI 测量 (如 FA) 对白质纤维结构复杂的脑区改变不敏感的缺点^[37]; 与传统 DTI 结合可以更好地探索卒中后继发性神经退行性变与临床恢复的关系。

2. 与扩散峰度成像相比: 扩散峰度成像 (diffusional kurtosis imaging, DKI) 也是临床上运用的扩散 MRI 方法, 其通过描述正常白质轴突内外的微观结构特征, 可以从 DKI 数据集获得白质束完整性指标^[38]。与 DKI 相比, DTI 的局限在于数据分析将脑组织内的水扩散动力学近似为高斯过程, 而实际情况下, 水分子在大脑内的扩散运动是非高斯分布。因此, DTI 不能完全描述脑中水的扩散。DKI 将 DTI 模型扩展到包括非高斯扩散效应, 相比之下 DKI 能为探测微观结构变化提供更准确更敏感的生物标志物^[39]。由于 DTI 中 FA 是根据三维扩散理论基于通量计算得出的, 在评估存在多个白质纤维束交叉的复杂组织环境中 FA 值会错误地保持不变或增加^[40]。而 DKI 衍生的峰度分数各向异性及广义分数各向异性在计算中可以获得更详细的多角度扩散信息, 因此在检测纤维交叉区白质结构的变化方面可能提供了比 FA 更多的信息, 可能在预测中更有利^[41]。研究脑卒中患者扩散 MRI 方法的除 DTI、DKI 之外, 球谐函数方法、局部扩散均匀性、神经突定向扩散和密度成像等这些超越 DTI 方法对卒中后白质结构变化更敏感, 预测运动功能方面优于 DTI 指标^[42-43], 但仍需要更多更大规模的研究来证实这些方

法对卒中恢复的预测能力。

3. 与功能 MRI 相比: DTI 直观地提供白质纤维束的走行和完整性, 但对大脑的功能状态却无法显示。而功能 MRI 可以提供静息态或执行运动任务时皮质激活及脑区间功能连接的信息; 将二者结合应用在人类大脑结构和功能的探测上具有很好的互补。Liu 等^[44]将静息态功能 MRI 与 DTI 结合发现急性期受累初级运动皮质纤维的 FA 与长期运动恢复的相关性最为显著, 可作为预测卒中后运动预后的影像学生物标志物。将结构像与功能像结合作为预测模型能提高预测的准确性, 并能研究功能恢复的机制。

总结与展望

基于 DTI 的测量指标作为监测卒中后大脑可塑性变化的神经生物标志物与功能障碍改善的关系, 在不同领域各有优势。①FA 及其衍生指标在亚急性期预测运动功能恢复, 判断损伤严重程度与其它参数相比更优; ②MD 用于预测感觉功能恢复, 监测治疗反应; ③AD 在急性期能预测失语严重程度; ④RD 虽在预测卒中后功能恢复方面未展示出独特优势, 但检测早期白质脱髓鞘的影像学标志物。深入了解和研究各项指标为预测功能预后、制订个性化康复治疗计划、研究康复治疗的机制、开发新的康复治疗技术提供依据。虽然 DTI 技术存在一些局限性, 但相关指标在不同的扫描仪上具有很高的重复性, 能支持多中心 DTI 研究。

目前利用 DTI 测量病变侧 CST 完整性的方法被广泛使用, 但具体研究方法差异很大, 尚未制订金标准。未来的研究应进行大样本、多中心、高质量的随机对照试验, 并选择信度、效度较高的后处理方法, 验证哪些 DTI 指标是最佳预测因子, 并与临床行为学评估、功能 MRI、TMS、近红外脑功能检测技术等多种技术结合作为预测模型将会更有意义。

参考文献

- [1] Rosso C, Lamy J. Does resting motor threshold predict motor hand recovery after stroke[J]. Front Neurol, 2018, 9: 1020. DOI: 10.3389/fneur.2018.01020.
- [2] Pirovano I, Mastropietro A, Antonacci Y, et al. Resting state eeg directed functional connectivity unveils changes in motor network organization in subacute stroke patients after rehabilitation[J]. Front Physiol, 2022, 13: 862207. DOI: 10.3389/fphys.2022.862207.
- [3] Jayaram G, Stagg CJ, Esser P, et al. Relationships between functional and structural corticospinal tract integrity and walking post stroke[J]. Clin Neurophysiol, 2012, 123(12): 2422-2428. DOI: 10.1016/j.clinph.2012.04.026.
- [4] Carter AR, Patel KR, Astafiev SV, et al. Upstream dysfunction of somatomotor functional connectivity after corticospinal damage in stroke[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2012, 26(1): 7-19. DOI: 10.1177/1545968311411054.
- [5] Li R, Li S, Roh J, et al. Multimodal neuroimaging using concurrent EEG/fNIRS for poststroke recovery assessment: an exploratory study[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2020, 34(12): 1099-1110. DOI: 10.1177/1545968320969937.
- [6] Puig J, Blasco G, Schlaug G, et al. Diffusion tensor imaging as a prognostic biomarker for motor recovery and rehabilitation after stroke[J].

- Neuroradiology, 2017, 59 (4) : 343-351. DOI: 10.1007/s00234-017-1816-0.
- [7] Cao X, Wang Z, Chen X, et al. White matter degeneration in remote brain areas of stroke patients with motor impairment due to basal ganglia lesions [J]. Hum Brain Mapp, 2021, 42 (14) : 4750-4761. DOI: 10.1002/hbm.25583.
 - [8] van Meer MPA, Otte WM, van der Marel K, et al. Extent of bilateral neuronal network reorganization and functional recovery in relation to stroke severity [J]. J Neurosci, 2012, 32 (13) : 4495-4507. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.3662-11.2012.
 - [9] Peters DM, Fridriksson J, Richardson JD, et al. Upper and lower limb motor function correlates with ipsilesional corticospinal tract and red nucleus structural integrity in chronic stroke: a cross-sectional, roi-based MRI study [J]. Behav Neurol, 2021, 2021 : 3010555. DOI: 10.1155/2021/3010555.
 - [10] 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.jstrokecerebrovasdis.2021.105889.
 - [11] Jang SH, Choi EB. Relation between the corticospinal tract state and activities of daily living in patients with intracerebral hemorrhage [J]. Stroke, 2022, 53 (2) : 544-551. DOI: 10.1161/STROKEAHA.121.034939.
 - [12] Tao J, Li Z, Liu Y, et al. Performance comparison of different neuroimaging methods for predicting upper limb motor outcomes in patients after stroke [J]. Neural Plast, 2022, 2022 : 4203698. DOI: 10.1155/2022/4203698.
 - [13] Soulard J, Huber C, Baillieux S, et al. Motor tract integrity predicts walking recovery [J]. Neurology, 2020, 94 (6) : e583-e593. DOI: 10.1212/WNL.00000000000008755.
 - [14] Lee H, Kim D. Brain connectivity affecting gait function after unilateral supratentorial stroke [J]. Brain Sci, 2021, 11 (7) : 870. DOI: 10.3390/brainsci11070870.
 - [15] Koyama T, Koumo M, Uchiyama Y, et al. Utility of fractional anisotropy in cerebral peduncle for stroke outcome prediction: comparison of hemorrhagic and ischemic strokes [J]. J Stroke Cerebrovasc Dis, 2018, 27 (4) : 878-885. DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2017.10.022.
 - [16] Liu X, Tian W, Qiu X, et al. Correlation analysis of quantitative diffusion parameters in ipsilateral cerebral peduncle during wallerian degeneration with motor function outcome after cerebral ischemic stroke [J]. J Neuroimaging, 2012, 22 (3) : 255-260. DOI: 10.1111/j.1552-6569.2011.00617.x.
 - [17] Rosso C, Lamy J. Prediction of motor recovery after stroke: being pragmatic or innovative [J]. Curr Opin Neurol, 2020, 33 (4) : 482-487. DOI: 10.1097/WCO.0000000000000843.
 - [18] Puig J, Blasco G, Daunis-I-Estadella J, et al. Decreased corticospinal tract fractional anisotropy predicts long-term motor outcome after stroke [J]. Stroke, 2013, 44 (7) : 2016-2018. DOI: 10.1161/STROKEAHA.111.000382.
 - [19] Kim B, Schweighofer N, Haldar JP, et al. Corticospinal tract microstructure predicts distal arm motor improvements in chronic stroke [J]. J Neurol Phys Ther, 2021, 45 (4) : 273-281. DOI: 10.1097/NPT.0000000000000363.
 - [20] 魏戡, 余秋蓉, 尹大志, 等. 基于健康人皮质脊髓束模板分析脑卒中皮质脊髓束损伤 [J]. 磁共振成像, 2021, 12 (7) : 39-44. DOI: 10.12015/issn.1674-8034.2021.07.008.
 - [21] 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. DOI: 10.1161/STROKEAHA.119.026886.
 - [22] Astrakas LG, Li S, Elbach S, et al. The severity of sensorimotor tracts degeneration may predict motor performance in chronic stroke patients, while brain structural network dysfunction may not [J]. Front Neurol, 2022, 13 : 813763. DOI: 10.3389/fneur.2022.813763.
 - [23] Etherton MR, Wu O, Cougo P, et al. Structural integrity of normal appearing white matter and sex-specific outcomes after acute ischemic stroke [J]. Stroke, 2017, 48 (12) : 3387-3389. DOI: 10.1161/STROKEAHA.117.019258.
 - [24] Lewis AF, Myers M, Heiser J, et al. Test-retest reliability and minimal detectable change of corticospinal tract integrity in chronic stroke [J]. Hum Brain Mapp, 2020, 41 (9) : 2514-2526. DOI: 10.1002/hbm.24961.
 - [25] Borstad AL, Choi S, Schmalbrock P, et al. Frontoparietal white matter integrity predicts haptic performance in chronic stroke [J]. Neuroimage Clin, 2015, 10 : 129-139. DOI: 10.1016/j.nicl.2015.11.007.
 - [26] Boespflug EL, Storrs JM, Allendorfer JB, et al. Mean diffusivity as a potential diffusion tensor biomarker of motor rehabilitation after electrical stimulation incorporating task specific exercise in stroke: a pilot study [J]. Brain Imaging Behav, 2014, 8 (3) : 359-369. DOI: 10.1007/s11682-011-9144-1.
 - [27] Groisser BN, Copen WA, Singhal AB, et al. Corticospinal tract diffusion abnormalities early after stroke predict motor outcome [J]. Neurorehabil Neural Repair, 2014, 28 (8) : 751-760. DOI: 10.1177/1545968314521896.
 - [28] Doughty C, Wang J, Feng W, et al. Detection and predictive value of fractional anisotropy changes of the corticospinal tract in the acute phase of a stroke [J]. Stroke, 2016, 47 (6) : 1520-1526. DOI: 10.1161/STROKEAHA.115.012088.
 - [29] Moulton E, Amor-Sahli M, Perlberg V, et al. Axial diffusivity of the corona radiata at 24 hours post-stroke: a new biomarker for motor and global outcome [J]. PLoS One, 2015, 10 (11) : e142910. DOI: 10.1371/journal.pone.0142910.
 - [30] Moulton E, Magno S, Valabregue R, et al. Acute diffusivity biomarkers for prediction of motor and language outcome in mild-to-severe stroke patients [J]. Stroke, 2019, 50 (8) : 2050-2056. DOI: 10.1161/STROKEAHA.119.024946.
 - [31] Bao Y, Yang L, Chen Y, et al. Radial diffusivity as an imaging biomarker for early diagnosis of non-demented amyotrophic lateral sclerosis [J]. Eur Radiol, 2018, 28 (12) : 4940-4948. DOI: 10.1007/s00330-018-5506-z.
 - [32] Liang D, Bhatta S, Gerzanich V, et al. Cytotoxic edema: mechanisms of pathological cell swelling [J]. Neurosurg Focus, 2007, 22 (5) : E2. DOI: 10.3171/foc.2007.22.5.3.
 - [33] Stinear CM, Barber PA, Petoe M, et al. The prep algorithm predicts potential for upper limb recovery after stroke [J]. Brain, 2012, 135 (8) : 2527-2535. DOI: 10.1093/brain/aww146.
 - [34] Stinear CM, Byblow WD, Ackerley SJ, et al. Predicting recovery potential for individual stroke patients increases rehabilitation efficiency [J]. Stroke, 2017, 48 (4) : 1011-1019. DOI: 10.1161/STROKEAHA.116.

015790.

[35] Stinear CM,Byblow WD,Ackerley SJ,et al. Prep2: a biomarker-based algorithm for predicting upper limb function after stroke[J]. Ann Clin Transl Neurol,2017,4(11):811-820. DOI:10.1002/acn3.488.

[36] Connell LA,Chesworth B,Ackerley S,et al. Implementing the prep2 algorithm to predict upper limb recovery potential after stroke in clinical practice: a qualitative study[J]. Phys Ther,2021,101(5):b40. DOI:10.1093/ptj/pzab040.

[37] Cheng B,Petersen M,Schulz R, et al. White matter degeneration revealed by fiber - specific analysis relates to recovery of hand function after stroke[J]. Hum Brain Mapp,2021,42(16):5423-5432. DOI:10.1002/hbm.25632.

[38] Spampinato MV,Chan C,Jensen JH,et al. Diffusional kurtosis imaging and motor outcome in acute ischemic stroke[J]. Am J Neuroradiol,2017,38(7):1328-1334. DOI:10.3174/ajnr.A5180.

[39] Jensen JH,Helpern JA,Tabesh A. Leading non-gaussian corrections for diffusion orientation distribution function[J]. NMR Biomed,2014,27(2):202-211. DOI:10.1002/nbm.3053.

[40] Yamada N,Ueda R,Kakuda W,et al. Diffusion tensor imaging evaluation of neural network development in patients undergoing therapeutic repetitive transcranial magnetic stimulation following stroke[J]. Neural Plast,2018,2018:1-8. DOI:10.1155/2018/3901016.

[41] Glenn GR,Helpern JA,Tabesh A,et al. Quantitative assessment of diffusional kurtosis anisotropy[J]. Nmr Biomed,2015,28(4):448-459. DOI:10.1002/nbm.3271.

[42] Gong G. Local diffusion homogeneity (LDH): an inter-voxel diffusion MRI metric for assessing inter-subject white matter variability [J]. PLoS One,2013,8(6):e66366. DOI:10.1371/journal.pone.0066366.

[43] DiBella EVR,Sharma A,Richards L,et al. Beyond diffusion tensor MRI methods for improved characterization of the brain after ischemic stroke: a review[J]. Am J Neuroradiol,2022,43(5):661-669. DOI:10.3174/ajnr.A7414.

[44] Liu J,Wang C,Cheng J,et al. Dynamic relationship between inter-hemispheric functional connectivity and corticospinal tract changing pattern after subcortical stroke[J]. Front Aging Neurosci,2022,14:870718. DOI:10.3389/fnagi.2022.870718.

(修回日期:2023-12-23)

(本文编辑:汪 玲)

《中华物理医学与康复杂志》第八届编辑委员会组成名单

总 编 辑：黄晓琳									
副 总 编 辑：窦祖林 顾 新 郭铁成 何成奇 李 玲 刘宏亮 吴 毅 燕铁斌 岳寿伟 周谋望									
编 辑 委 员：(含总编辑、副总编辑) (按姓氏拼音顺序排序)									
敖丽娟	白定群	白玉龙	毕 胜	陈 红	陈丽霞	陈青山	陈文华	窦祖林	杜 青
范建中	冯晓东	冯 珍	高晓平	顾 新	顾旭东	郭钢花	郭 琪	郭铁成	何成奇
何晓红	胡昔权	黄东锋	黄国志	黄晓琳	黄 真	贾子善	姜志梅	金 俏	李海峰
李红玲	李建华	李 丽	李 玲	李晓捷	李雪萍	梁 英	廖维靖	刘宏亮	刘 楠
刘遂心	刘忠良	卢红建	鲁雅琴	陆 敏	陆 晓	罗 军	马 超	牟 翔	倪朝民
倪国新	潘 钰	单春雷	邵 明	宋为群	孙强三	唐 强	王宝兰	王冰水	王楚怀
王 刚	王宁华	王 强	王 彤	王玉龙	吴 华	吴 霜	吴 毅	武继祥	肖 农
谢 青	谢 荣	谢欲晓	许光旭	许 涛	闫金玉	燕铁斌	杨建荣	杨卫新	叶超群
尹 勇	于慧秋	余 茜	虞乐华	袁 华	岳寿伟	恽晓平	张长杰	张 芳	张桂青
张 皓	张继荣	张锦明	张盘德	张巧俊	张志强	郑光新	周谋望	朱 宁	朱珊珊
中国香港编委：Leonard Sheung Wai LI(中国香港)									
外 籍 编 委：Akira Miyamoto (日本)									
Hao Liu(美国)			Hong Wu(美国)						
Li-Qun Zhang(美国)			Nathan R. Qi(美国)			Sheng Quan Xie(新西兰)			
Sheila Purves(加拿大)			Sheng Li(美国)			Wenchun Qu(美国)			