

综 述

磁共振弥散张量成像技术在临床中的应用价值*

陈嘉豪 尤晓光*

海南医学院第一附属医院放射科
(海南 海口 570100)

【摘要】磁共振弥散张量成像技术(diffusion tensor imaging DTI)是一项近年发展的磁共振成像技术,其利用水分子移动方向成像,具备无创性显示纤维束的能力,在临床中的应用已经越来越广泛。本文综述DTI在临床中应用并予以总结与展望。

【关键词】磁共振成像; 弥散张量成像;
弥散张量白质束成像; 部分各向异性指数;
平均弥散率

【中图分类号】R445

【文献标识码】A

【基金项目】国家自然科学基金

(地区科学基金项目 81760310)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.08.055

The Clinical Application Value of Magnetic Resonance Diffusion Tensor Imaging Technology*

CHEN Jia-hao, YOU Xiao-guang*

Radiology Department of the First Affiliated Hospital of Hainan Medical University, Haikou
570100, Hainan Province, China

ABSTRACT

Diffusion tensor imaging (DTI) is a recently developed magnetic resonance imaging technique that utilizes water molecule movement direction imaging and has the ability to non-invasive display fiber bundles. Its clinical application has become increasingly widespread. This article reviews the clinical application of DTI and provides a summary and outlook.

Keywords: Magnetic Resonance Imaging; Diffusion Tensor Imaging; Diffusion Tensor White Matter Bundle Imaging; Partial Anisotropy Index; Mean Diffusivity

磁共振弥散张量成像技术(diffusion tensor imaging DTI)是由磁共振弥散加权成像(diffusion weighted imaging DWI)发展而来的一种磁共振功能成像技术。其在DWI利用水分子弥散成像的基础上,进一步利用水分子的移动方向而制图成像。现今DTI技术广泛应用于中枢系统疾病诊治,随着对于DTI技术的不断研究与开发,在其他系统的应用也会越来越受到关注,本文就DTI技术在临床中的应用予以综述。

1 DTI技术

1.1 DTI的成像基础 分子的无序不规则运动即为弥散,也称为布朗运动。弥散分为两种方式,各向同性与各向异性。在完全均匀的物质中,水分子向各个方向的运动是相同的,即为各向同性,而在不均质的物质中,水分子向各个方向的运动是不相同的,即为各向异性。在人体组织中,不同的结构会对水分子的移动产生影响,DTI技术即是以这种水分子移动方向与速度的差异为基础,施加最少6个方向的弥散梯度来采集三维信息,进而通过分析相关参数制图成像^[1-2]。

1.2 DTI的相关参数 (1)各向异性指数(fractional anisotropy FA):指弥散张量中各向异性部分所占总弥散张量之比。FA的大小为0~1之间,0表示各个方向完全相同,1表示弥散方向差异的极限值。(2)平均扩散系数(average diffusion coefficient, DCavg或mean diffusivity, MD):为三个本征值的均数,代表各方向弥散大小的平均值,反映弥散水平的整体情况,与方向无关。(3)轴向扩散系数(axial diffusivity AD)和径向扩散系数(radial diffusivity, RD):分别表示平行和垂直于轴突的弥散值。(4)相对各向异性指数(relative fractional anisotropy, rFA):两侧大脑同时测得FA值,并用一侧/对侧,得出的结果即为相对各向异性指数。(5)椭圆球:是对弥散进行描述的模型,其半径表示特定部位水分子弥散的方向,大小表示水分子弥散的速度。(6)容积比各向异性(volume ratio anisotropy, VRA):各向异性椭圆球的容积与各向同性圆球体容积的比值^[1-5]。

其中部分各向异性(FA)是DTI分析中最常用的参数,所以DTI最常利用FA值大小来制图,称为FA图,是将FA值作为图像的信号强度而制成。当FA值越大,图像信号越强,弥散的方向性就越强。依次类推,也可利用平均扩散系数(MD)、相对各向异性(rFA)等相关参数进行制图成像。

近年来,纤维束成像已经成为DTI临床应用的热点之一。弥散张量纤维束成像(diffusion tensor tractography DTT)是由DTI图像通过软件重建而形成的可结合MR其他序列(T₁、T₂、DWI等)图像的纤维束示踪图,可以直观的观察纤维束形态,数目及走向,是唯一一种显示纤维束走行及形态的无创检查^[6]。

2 DTI在脑血管病变中的临床应用

2.1 脑梗死 近年来,DTI因其无创性及可显示白质纤维束走行的特点,被广泛应用于评估脑梗死的严重程度及预后。Berndt等^[7]通过收集165名颅脑前循环急性脑梗死患者DTI及相关临床资料,分析内囊后肢(posterior limb of internal capsule, PLIC)中的皮质脊髓束(corticospinal system, CST)完整性与临床症状的相关性,得出DTI中的FA值可表示PLIC内CST的完整性,FA值降低表明CST受损,并且CST的完整性与临床症状严重程度呈负相关,与严重程度的改善百分比呈正相关。同时也认为急性脑梗死患者再通后,CST等级改变与患者预后相关,这意味着可利用FA值来预测急性脑梗死患者再通后的预后。Koyama等的研究^[8]也认可FA值可量化CST的损伤程度并有助于预测脑梗死患者的语言与运动恢复情况。

在脑梗死患者运动功能方面,Bhasin^[9]等通过研究得出运动力指数(motricity index, MI)较差的脑梗死患者病变区FA值降低,而后期恢复良好的患者rFA值高于0.6,即可通过rFA值来初步评估患者运动功能障碍的预后。在随访的过程中,患者通过重复运动训练导致神经纤维重塑,DTI图像病灶中FA值也略微升高,所以作者认为略微升高的FA值是纤维束重塑的表现。但Kim^[10]在利用DTT观察CST结构改变来预测慢性脑梗死患者运动预后的研究中却发现早期CST结构较差(即病灶rFA值低)的患者运动改善更明显。

语言功能障碍是脑梗死患者另一常见的症状。Lee等^[11]收集68名脑梗死患者不同

【第一作者】陈嘉豪,男,住院医师,主要研究方向:中枢神经系统影像诊断。E-mail: 1183031578@qq.com

【通讯作者】尤晓光,男,主任医师,主要研究方向:分子影像学、中枢神经系统及腹部影像诊断。E-mail: you_xiaoguang@126.com

时期自发言语、理解、重复和命名能力计算失语商(aphasia quotient, AQ)与DTI影像结合,借用一个新概念---偏侧指数(laterality index, LI)来研究DTI在评估脑梗死患者语言障碍的严重程度中的意义。其中偏移指数 = (左侧 - 右侧) / (左侧 + 右侧), 数值为感兴趣区域DTI相关参数值。实验结果表明左侧轴向扩散率(AD)或纤维密度(fibre density, FD)较高时,患者语言功能预后较好; LI-FD与流利度、理解力和命名功能呈正相关, LI-AD与流利度和命名功能呈正相关。LI-FA与AQ评分无关, 但却与重复和命名功能呈正相关。早期Jang等^[12]的研究也认为AQ与FA值的变化无关, 但与纤维素密度的改变呈中度正相关, 且非优势半球的DTI数据变化不会影响语言功能障碍的恢复。

2.2 脑出血 早期的研究^[13]已经表明DTI可用于检查脑出血(intracerebral hemorrhage, ICH)引起的白质纤维束损伤, 特别是皮质脊髓束(CST)。近期有研究^[14]认为ICH血肿内FA>0.5可代表白质束的存活。而对于ICH血肿周围的水肿对白质完整性的影响, McCourt等^[15]研究发现ICH血肿周围水肿中的CST FA值低于相对应侧健侧值, 但其FA的降低随着时间的推移无明显变化, 并且与运动评分也无关, 认为水肿对白质仅仅是水渗入而不是损伤。

Puig等^[16]早期回顾性的分析认为将临床评分与皮质脊髓束(CST)完整性的信息相结合, 可以改善对运动结果的预测, 其中利用DTI可评价皮质脊髓束的完整性。近期Puig等^[17]进一步研究得出脑出血患者运动结果的最佳预测模型是结合72小时的改良美国国立卫生研究院卒中量表(modified National Institute of Health stroke scale, mNIHSS)评分和12小时内受ICH影响的PLIC情况而获得的。通过DTT来评估PLIC神经纤维在12小时是否受ICH影像。作者的研究结果表明72小时mNIHSS评分>3和PLIC在12小时内受ICH影响的患者预测3个月后运动结果不良的敏感性和特异性预测值分别为92%和86%。

虽然现今如今的微创手术可以减少对神经纤维束的继发性损伤, 但仍需进一步的寻求提高手术后存活率及改善预后的方法^[18]。Ning Du等^[19]研究认为微创术前进行DTI检查, 观察术区纤维素情况, 设计精准的手术方式, 可以减少术中神经纤维束的损伤, 术前行DTI检查患者的预后较标准术式好。

3 DTI在脑肿瘤中的临床应用

DTI在脑肿瘤中的应用广泛, 包括鉴别诊断、术前病灶评估、术中导航及术后预后评估等多个方面^[20]。

3.1 病变区域的确定 Masjoodi等^[21]收集12例脑肿瘤伴水肿患者的DTI图像, 分析得出DTI参数中的FA、AD、RD均可区分正常脑组织及水肿, 但只有FA能区分肿瘤与水肿。水肿及肿瘤区域较正常脑组织FA值减少。水肿较正常脑组织AD和RD升高, 且RD更明显, 大约是健康脑组织的两倍。

3.2 鉴别诊断 Holly等研究^[22]发现胶质瘤的瘤周区域比转移瘤瘤周区域有着更高的FA和更低的MD, 但肿瘤区域内的病灶并没有明显的指标上的差异。瘤周FA临界值(0.22)的AUC为0.7, 准确度为67.8%, 敏感性为54.3%, 特异性为84.8%。瘤周MD临界值($1.2 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{second}$)的AUC为0.72, 准确度为72.8%, 敏感性为68.8%, 特异性为76.1%。为了进一步区分两者, 作者利用DTT发现相对于转移瘤而言, 胶质瘤病灶中显示更多的白质束。肿瘤内白质计数临界值(5942)的AUC为0.81, 准确度为80.2%, 敏感性为88.6%, 特异性为73.9%。所以可以利用肿瘤和肿瘤周围区域的DTI参数及白质束计数来加以区分两者。

Abdel等研究^[23]表明, 原发性中枢神经系统淋巴瘤(PCNSL)的MD显著低于胶质母细胞瘤, MD的临界值($0.935 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{second}$)用于区分PCNSL和胶质母细胞瘤的AUC为0.73, 准确度为66.7%, 敏感性为75%, 特异性为55.6%。PCNSL的FA显著高于胶质母细胞瘤, FA的临界值(0.185)显示AUC为0.944, 准确度为85.7%, 敏感性为83.3%, 特异性为88.9%。

Duc研究^[24]表明髓母细胞瘤的FA值显著高于脑干胶质瘤, MD值显著低于脑干胶质瘤。MD的临界值($0.97 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{second}$)被确定为鉴别诊断髓母细胞瘤和脑干胶质瘤的最有效因素, 其敏感性为96%, 特异性为100%, AUC为99.5%。

3.3 手术导航 Xiao等^[25]回顾性的分析了54例脑干胶质瘤患者DTI影像及手术情况, 发现脑干胶质瘤对CST的影响最常见的是变形, 其次是位移及浸润中断。在54例患者手术选择中, 综合DTI/DTT检查后, 有18例(33.3%)改变了手术方法, 主要原因是通过DTI/DTT发现了肿瘤推移白质束, 使其正好位于预选手术通道

中。而Dubey等^[26]收集34例脑肿瘤(胶质瘤和转移瘤)术前DTI图像与术中情况对比, 得出DTI可显示白质束与脑肿瘤的关系, 白质束的受累是手术结果的一个强有力的预测因素, 当白质束完好无损时, 实现全切除的可能性更高, 相反, 在DTI显示白质束有浸润情况下, 全切除的预期概率大大降低。Khan等^[27]通过收集128例幕上脑肿瘤患者DTI及手术情况, 发现有60名患者(47%)因为DTI改变了手术方式并且纤维移位的患者可切除性较高, 而纤维中断/浸润的患者可切除性较低, 认为术前DTI是规划安全手术通道的重要影像检查方法。

3.4 预后 Rosenstock等^[28]认为受肿瘤影响的CST内测得较低的FA值与术后运动功能恶化存在显著关系。Vedantam等^[29]收集20名接受后颅窝肿瘤切除术的儿科患者术前、术后及随访的DTI数据, 得出与术前DTI相比, 术后DTI左侧小脑上脚(superior cerebellar peduncle, SCP)的FA显著降低(术前FA值 vs 术后FA值 0.53 ± 0.1 vs 0.44 ± 0.07), 随访时左侧SCP FA持续减少, 出现的共济失调可能性更大。

4 阿尔兹海默病

近期关于DTI在阿尔兹海默病(AD)中的应用, 主要是集中于病变显示与鉴别诊断。Raj等^[30]通过分析27例AzD患者全脑DTI相关参数与25例健康个体比较, 发现AzD患者病灶区域较对侧FA值降低, 平均扩散率(MD)、轴向扩散率(AD)和径向扩散率(RD)增加, AzD患者在广泛的白质(white matter, WM)区域(包括放射冠、胼胝体、内外囊)和主要WM束(包括上纵束、下额枕束、矢状层和钩束)的扩散性增加。而在灰质中右侧海马MD值大于1.2659在区分AzD患者和对照组方面的敏感性为95.2%, 特异性为84%。作者认为可利用DTI来显示AzD患者脑内异常。Palesi等^[31]研究发现AD主要影响胼胝体压部, 而血管性痴呆VD主要影响胼胝体膝部, 并且VD表现出更多与丘脑相关的白质束损伤, 所以当临床表现不确定时, 可以借助DTI观察相应区域来进行鉴别。

5 多发性硬化

Pokryszko-Dragan等^[32]收集50例多发性硬化症(multiple sclerosis, MS)患者与27例健康对照者的DTI与相关临床评分, 发现与对照组相比, MS患者中胼胝体和丘脑内的FA显著降低、MD增加, 且胼胝体和丘脑内的DTI指数与数字符号模式试验(symbol digit modalities test, SDMT)评分显著相关, 而丘脑和小脑中脚内的DTI指数与手动灵活性测量显著相关; 认为DTI测量值的变化可表明MS患者组织完整性的细微变化。Huang等^[33]认为显著降低的FA和增加的MD意味着MS已进入临床过程中的晚期, 病程中DTI指标的变化可以为MS疾病发展提供一些线索。Bernitsas等^[34]通过分析43名MS患者疲劳严重程度量表(fatigue severity scale, FSS)与DTI图像得出右颞叶皮层(right temporal cortex RTC)的RD与所有患者的FSS评分呈显著负相关, RTC的FA与FSS评分呈显著正相关, 并且右侧颞叶皮质分数各向异性是检查变量中疲劳状态的最佳相关性参数。后续Yarraguntla等的研究^[35]也认同RTC-FA可用于评估MS疲劳严重程度的变化。

6 DTI在脊髓病变中的临床应用

DTI可利用FA值、AD值及纤维成像技术等描述纤维束的完整性, 所以可普遍应用于脊髓损伤、肿瘤、畸形等, 但近期研究多集中于对脊髓损伤的临床应用探索^[36]。Shanmuganathan等^[37]研究发现DTI参数AD、RD和MD对于预测脊髓损伤患者一年内的运动评分很重要, 并认为AD是神经和功能结果的最佳预测指标, AD的减少与轴突的损伤相关。而Zhu等^[38]研究发现脊髓损伤部位的平均FA值显著低于健康对照者, 且平均FA值与患者术前和最终的亚洲(ASIA)运动评分呈正相关; DTT也可显示损伤神经纤维束的情况, 并给予临床手术建议, 对于纤维束完全断裂的患者, 早期手术可能没有必要。

对于脊髓肿瘤, 早期既有病例报道^[39]称DTT可显示脊髓肿瘤是否浸润脊髓并破坏轴突束, 并且也可显示肿瘤对白质纤维束的保留和纤维束的外周移位。Benjamin等^[40]选取了2例脊髓髓内肿瘤患者, 结合患者术前DTI影像及术中情况, 认为DTI在髓内肿瘤切除术避免重要传导束损伤有重要价值——其中1例患者DTI显示脊髓束均被推离肿瘤, 无浸润, 术中临床实现了全切除; 另1例DTI显示一部分脊髓束穿过了肿瘤, 提示有浸润, 术中临床实

现了在不损害横贯束的情况下最大限度的减瘤。近期McLachlin等^[41]对比了DTT与健康解剖中的解剖MRI的空间对应性,得出了DTT与解剖白质束有着良好的空间对应性,进一步证实了DTT在脊髓肿瘤可应用性。

7 DTI在肌肉病变中的临床应用

已有研究证实^[42-43]DTI可通过生成整个肌肉的主要扩散方向曲线来重建人体骨骼肌的三维结构,并且^[44]可利用受解剖约束的新算法来进行三维测量。但实际能应用于临床的研究还相对较少。Klupp等^[45]研究认为DTI可预测肌肉力量,并且优于肌肉质子密度脂肪分数(proton density fat fraction, PDFF)和组织横截面积(cross-sectional area, CSA),其中MD、RD与肌肉力量具有较强的正相关性。

在肌肉创伤方面, Giraudo等^[46]的研究表明急性撕裂后的肌肉较健康对侧MD及AD升高, FA值降低,认为DTI可以对肌肉损伤进行强有力的评估。而Biglands等^[47]的研究认为肌肉中的DTI参数可以检测肌肉撕裂后因愈合而引起的变化。随着肌肉愈合, MD降低, FA增加。

8 小 结

DTI因其利用水分子成像及非侵入性显示纤维束的特点,有着广泛的临床应用前景,现今DTI应用于颅脑病变的检查已经越来越常规。虽然DTI在脊髓、肌肉等其他系统中的临床应用还相对较少,但随着DTI技术本身的不断发展,相信后续DTI不仅能在颅脑病变诊治中提供更多的影像帮助,也会在其他系统病变中得到进一步应用。

参考文献

- [1]Lope-Piedrafita S. Diffusion Tensor Imaging (DTI) [J]. *Methods Mol Biol*, 2018, 1718: 103-116.
- [2]Ranzenberger L R, Snyder T. Diffusion Tensor Imaging [M]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2022.
- [3]Duy Hung N, Minh Duc N, Van Anh N T, et al. Diagnostic performance of diffusion tensor imaging for pre-operative glioma grading [J]. *Clin Ter*, 2021, 172 (4): 315-321.
- [4]Martinez-Heras E, Grussu F, Prados F, et al. Diffusion-Weighted Imaging: Recent Advances and Applications [J]. *Semin Ultrasound CT MR*, 2021, 42 (5): 490-506.
- [5]Shabani S, Kaushal M, Budde M D, et al. Diffusion tensor imaging in cervical spondylotic myelopathy: a review [J]. *J Neurosurg Spine*, 2020: 1-8.
- [6]Christidi F, Karavasili E, Samiotis K, et al. Fiber tracking: A qualitative and quantitative comparison between four different software tools on the reconstruction of major white matter tracts [J]. *Eur J Radiol Open*, 2016, 3: 153-61.
- [7]Berndt M T, Pürner D, Maegerlein C, et al. Basal Ganglia versus Peripheral Infarcts: Predictive Value of Early Fiber Alterations [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2021, 42 (2): 264-270.
- [8]Koyama T, Domen K. Diffusion Tensor Fractional Anisotropy in the Superior Longitudinal Fasciculus Correlates with Functional Independence Measure Cognition Scores in Patients with Cerebral Infarction [J]. *J Stroke Cerebrovasc Dis*, 2017, 26 (8): 1704-1711.
- [9]Bhasin A, Srivastava P, Kumaran S S. Correlation of DTI-Derived Measures to Therapy-Mediated Recovery after Stroke: Preliminary Findings [J]. *Neurol India*, 2021, 69 (5): 1210-1216.
- [10]Kim B, Schweighofer N, Halder J P, et al. Corticospinal Tract Microstructure Predicts Distal Arm Motor Improvements in Chronic Stroke [J]. *J Neurol Phys Ther*, 2021, 45 (4): 273-281.
- [11]Lee S, Na Y, Tae W S, et al. Clinical and neuroimaging factors associated with aphasia severity in stroke patients: diffusion tensor imaging study [J]. *Sci Rep*, 2020, 10 (1): 12874.
- [12]Jang S H, Cho I T, Lim J W. Recovery of aphasia and change of injured arcuate fasciculus in the dominant hemisphere in stroke patients [J]. *NeuroRehabilitation*, 2017, 41 (4): 759-764.
- [13]Chaudhary N, Pandey A S, Gemmette J J, et al. Diffusion tensor imaging in hemorrhagic stroke [J]. *Exp Neurol*, 2015, 272: 88-96.
- [14]Novakovic N, Linzey J R, Chenevert T L, et al. White Matter Survival within and around the Hematoma: Quantification by MRI in Patients with Intracerebral Hemorrhage [J]. *Biomolecules*, 2021, 11 (6).
- [15]McCourt R, Misaghi E, Tu W, et al. Peri-hematoma corticospinal tract integrity in intracerebral hemorrhage patients: A diffusion-tensor imaging study [J]. *J Neurol Sci*, 2021, 421: 117317.
- [16]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.
- [17]Puig J, Blasco G, Terceño M, et al. Predicting Motor Outcome in Acute Intracerebral Hemorrhage [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2019, 40 (5): 769-775.
- [18]Hanley D F, Thompson R E, Rosenblum M, et al. Efficacy and safety of minimally invasive surgery with thrombolysis in intracerebral haemorrhage evacuation (MISTIE III): a randomised, controlled, open-label, blinded endpoint phase 3 trial [J]. *Lancet*, 2019, 393 (10175): 1021-1032.
- [19]Du N, Wang X, Zhang X, et al. A new surgical method of treatment spontaneous intracranial hemorrhage [J]. *Transl Neurosci*, 2021, 12 (1): 145-153.
- [20]Costabile J D, Alaswad E, D'souza S, et al. Current Applications of

- Diffusion Tensor Imaging and Tractography in Intracranial Tumor Resection [J]. *Front Oncol*, 2019, 9: 426.
- [21]Masjoodi S, Hashemi H, Oghabian M A, et al. Differentiation of Edematous, Tumoral and Normal Areas of Brain Using Diffusion Tensor and Neurite Orientation Dispersion and Density Imaging [J]. *J Biomed Phys Eng*, 2018, 8 (3): 251-260.
- [22]Holly K S, Fitz-Gerald J S, Barker B J, et al. Differentiation of High-Grade Glioma and Intracranial Metastasis Using Volumetric Diffusion Tensor Imaging Tractography [J]. *World Neurosurg*, 2018, 120: e131-e141.
- [23]Abdel Razek A K, El-Serougy L, Abdelsalam M, et al. Differentiation of Primary Central Nervous System Lymphoma From Glioblastoma: Quantitative Analysis Using Arterial Spin Labeling and Diffusion Tensor Imaging [J]. *World Neurosurg*, 2019, 123: e303-e309.
- [24]Duc N M. The role of diffusion tensor imaging metrics in the discrimination between cerebellar medulloblastoma and brainstem glioma [J]. *Pediatr Blood Cancer*, 2020, 67 (9): e28468.
- [25]Xiao X, Kong L, Pan C, et al. The role of diffusion tensor imaging and tractography in the surgical management of brainstem gliomas [J]. *Neurosurg Focus*, 2021, 50 (1): E10.
- [26]Dubey A, Kataria R, Sinha V D. Role of Diffusion Tensor Imaging in Brain Tumor Surgery [J]. *Asian J Neurosurg*, 2018, 13 (2): 302-306.
- [27]Khan K A, Jain S K, Sinha V D, et al. Preoperative Diffusion Tensor Imaging: A Landmark Modality for Predicting the Outcome and Characterization of Supratentorial Intra-Axial Brain Tumors [J]. *World Neurosurg*, 2019, 124: e540-e551.
- [28]Rosenstock T, Giampiccolo D, Schneider H, et al. Specific DTI seeding and diffusivity-analysis improve the quality and prognostic value of TMS-based deterministic DTI of the pyramidal tract [J]. *Neuroimage Clin*, 2017, 16: 276-285.
- [29]Vedantam A, Stormes K M, Gadgil N, et al. Association between postoperative DTI metrics and neurological deficits after posterior fossa tumor resection in children [J]. *J Neurosurg Pediatr*, 2019, 24 (4): 364-370.
- [30]Raj S, Vyas S, Modi M, et al. Comparative Evaluation of Diffusion Kurtosis Imaging and Diffusion Tensor Imaging in Detecting Cerebral Microstructural Changes in Alzheimer Disease [J]. *Acad Radiol*, 2022, 29 Suppl 3: S63-s70.
- [31]Palesi F, De Rinaldis A, Vitali P, et al. Specific Patterns of White Matter Alterations Help Distinguishing Alzheimer's and Vascular Dementia [J]. *Front Neurosci*, 2018, 12: 274.
- [32]Pokryszko-Dragan A, Banaszek A, Nowakowska-Kotas M, et al. Diffusion tensor imaging findings in the multiple sclerosis patients and their relationships to various aspects of disability [J]. *J Neurol Sci*, 2018, 391: 127-133.
- [33]Huang J, Liu Y, Zhao T, et al. White matter microstructural alterations in clinically isolated syndrome and multiple sclerosis [J]. *J Clin Neurosci*, 2018, 53: 27-33.
- [34]Bernitsas E, Yarraguntla K, Bao F, et al. Structural and Neuronal Integrity Measures of Fatigue Severity in Multiple Sclerosis [J]. *Brain Sci*, 2017, 7 (8): 102.
- [35]Yarraguntla K, Seraji-Bozorgzad N, Lichtman-Mikol S, et al. Multiple Sclerosis Fatigue: A Longitudinal Structural MRI and Diffusion Tensor Imaging Study [J]. *J Neuroimaging*, 2018, 28 (6): 650-655.
- [36]Rutman A M, Peterson D J, Cohen W A, et al. Diffusion Tensor Imaging of the Spinal Cord: Clinical Value, Investigational Applications, and Technical Limitations [J]. *Curr Probl Diagn Radiol*, 2018, 47 (4): 257-269.
- [37]Shanmuganathan K, Zhuo J, Chen H, et al. Diffusion Tensor Imaging Parameter Obtained during Acute Blunt Cervical Spinal Cord Injury in Predicting Long-Term Outcome [J]. *J Neurotrauma*, 2017, 34 (21): 2964-2971.
- [38]Zhu F, Liu Y, Zeng L, et al. Evaluating the Severity and Prognosis of Acute Traumatic Cervical Spinal Cord Injury: A Novel Classification Using Diffusion Tensor Imaging and Diffusion Tensor Tractography [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2021, 46 (10): 687-694.
- [39]Granata F, Racchiusa S, Mormina E, et al. Presurgical role of MRI tractography in a case of extensive cervicothoracic spinal ependymoma [J]. *Surg Neurol Int*, 2017, 8: 56.
- [40]Benjamin C G, Frempong-Boadu A, Hoch M, et al. Combined Use of Diffusion Tractography and Advanced Intraoperative Imaging for Resection of Cervical Intramedullary Spinal Cord Neoplasms: A Case Series and Technical Note [J]. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*, 2019, 17 (5): 525-530.
- [41]McLachlin S, Leung J, Sivan V, et al. Spatial correspondence of spinal cord white matter tracts using diffusion tensor imaging, fibre tractography, and atlas-based segmentation [J]. *Neuroradiology*, 2021, 63 (3): 373-380.
- [42]Damon B M, Froeling M, Buck A K, et al. Skeletal muscle diffusion tensor-MRI fiber tracking: rationale, data acquisition and analysis methods, applications and future directions [J]. *NMR Biomed*, 2017, 30 (3): 10.1002/nbm.3563.
- [43]Bolsterlee B, D'souza A, Gandevia S C, et al. How does passive lengthening change the architecture of the human medial gastrocnemius muscle? [J]. *J Appl Physiol* (1985), 2017, 122 (4): 727-738.
- [44]Bolsterlee B, D'souza A, Herbert R D. Reliability and robustness of muscle architecture measurements obtained using diffusion tensor imaging with anatomically constrained tractography [J]. *J Biomech*, 2019, 86: 71-78.
- [45]Klupp E, Cervantes B, Schlaeger S, et al. Paraspinal Muscle DTI Metrics Predict Muscle Strength [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2019, 50 (3): 816-823.
- [46]Giraudo C, Motyka S, Weber M, et al. Normalized STEAM-based diffusion tensor imaging provides a robust assessment of muscle tears in football players: preliminary results of a new approach to evaluate muscle injuries [J]. *Eur Radiol*, 2018, 28 (7): 2882-2889.
- [47]Biglands J D, Grainger A J, Robinson P, et al. MRI in acute muscle tears in athletes: can quantitative T2 and DTI predict return to play better than visual assessment [J]. *Eur Radiol*, 2020, 30 (12): 6603-6613.

(收稿日期: 2022-06-20)

(校对编辑: 姚丽娜)