

综 述

弥散张量成像在周围神经病变中的研究进展*

张宇娜¹ 李华兵^{2,*}

1.山西医科大学(山西太原 030001)

2.晋城市第二人民医院磁共振室

(山西 晋城 048000)

【摘要】周围神经是一个由运动神经和感觉神经组成的复杂网络,周围神经病变(PN)是指由多因素造成的外周神经损伤而导致其相应支配区域感觉和运动功能障碍。磁共振成像(MRI)因其较高的组织分辨率、无辐射、无创性及可重复性等优势,在临床实践中应用广泛。弥散张量成像(DTI)是一种特殊的磁共振检查技术,目前在中枢神经系统成像中已经得到广泛应用,但在周围神经应用方面仍处于研究和验证阶段。因此,本文旨在综述近几年DTI技术在周围神经病变中的研究进展,以期从影像学的角度为周围神经病变的临床诊断提供依据。

【关键词】弥散张量成像;周围神经病变;磁共振成像

【中图分类号】R445.2

【文献标识码】A

【基金项目】瓦斯爆炸事件致创伤后应激障碍的多模态功能磁共振成像研究
(2014011041-7)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.06.058

Advances in Diffusion Tensor Imaging for Peripheral Neuropathy*

ZHANG Yu-na¹, LI Hua-bing^{2,*}

1.Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, Shanxi Province, China

2.Magnetic Resonance Unit, The Second People's Hospital of Jincheng, Jincheng 048000, Shanxi Province, China

ABSTRACT

Peripheral nerve is a complex network composed of motor and sensory nerves, and peripheral neuropathy (PN) refers to multifactorial damage to peripheral nerves leading to sensory and motor dysfunction in their corresponding innervated areas. Magnetic resonance imaging (MRI) is widely used in clinical practice due to its advantages of high tissue resolution, no radiation, non-invasivity and reproducibility. Diffusion tensor imaging (DTI) is a special magnetic resonance examination technique that has been widely used in central nervous system imaging, but is still in the research and validation stage for peripheral nerve applications. Therefore, the aim of this paper is to summarize the research progress of DTI technique in peripheral neuropathy in recent years, with a view to providing a basis for the clinical diagnosis of peripheral neuropathy from the perspective of imaging.

Keywords: Diffusion Tensor Imaging; Peripheral Neuropathy; Magnetic Resonance Imaging

弥散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)是在弥散加权成像(diffusion-weighted imaging, DWI)基础上发展起来的一种神经成像技术,不仅可以定量分析水在组织内的微观扩散特性,而且扩散张量示踪成像(diffusion tensor tractography, DTT)还可以通过分析神经纤维的FA值,获取周围神经纤维束的走行与连接特性,补充了从解剖学非神经特异性序列获得的信息^[1-2]。

1 DTI的成像基础及常用参数

人体组织中水分子的随机热运动(布朗运动)由于受到组织细胞结构的影响,在各个方向弥散程度不同,这种差异是DTI成像的基础。DTI使用较DWI更先进的数学建模来估计扩散率的大小(即特征值)及其主要方向(即特征向量),对水分子进行定量分析^[3]。在DTI信号模型中,水分子的扩散情况由一个正定对称的 3×3 扩散张量矩阵表示,该模型反映了扩散沿x、y和z轴的三维特性和各向异性^[4]。通过对至少6个非共线方向依次施加扩散敏感梯度场,然后对拟合的张量矩阵进行特征分解,可以得到DTI成像技术的常用参数。

各向异性分数(fractional anisotropy, FA)和表观弥散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)是两个最常用的DTI参数。FA值反映了水分子扩散的方向依赖性和周围神经的各向异性,其数值介于0~1之间,主要受髓鞘的完整程度、神经纤维密度和纤维束直径的影响,反映神经纤维的连续性和损伤程度。周围神经因其固有的髓鞘、神经内膜、神经束膜和神经外膜等屏障,促进水主要沿神经长轴运动,同时限制自由水沿着神经短轴扩散,使神经具有高度的各向异性,因此周围神经DTI成像成为可能。ADC值反映了水分子在生物组织中不同方向的平均扩散速度和距离,并提供细胞毒性水肿、血源性水肿以及细胞结构完整性的微观结构信息^[5-6]。

2 周围神经病变概念

周围神经病变(peripheral neuropathy, PN)是临床实践中一种常见的疾病,其在一般人群中的患病率高达7%,并且在50岁以上中老年人人群中这一比率呈现出上升趋势^[7-8]。PN的病因多种多样,包括糖尿病、神经压迫或创伤、饮酒、自身免疫性疾病、遗传性疾病和毒素暴露等^[9]。其中,糖尿病是最主要病因,约占所有病例的50%,构成了严峻的公共卫生挑战^[10]。PN的特征性表现为感觉和运动功能障碍相关的各种症状,如感觉丧失、麻木、疼痛、烧灼感和肌肉萎缩等。对于慢性或晚期PN,治疗目标更多的转向疾病进展的控制^[11],因此,及时且准确地诊断尤为关键。PN的诊断是一个全面且多维度的过程,包括全面的病史采集、体格检查、实验室检测以及电诊断检查(如肌电图或神经传导检查)、超声检查和MRI,值得注意的是这些常规影像学检查只能提供形态学信息,而对神经功能和微观结构的变化不敏感。

3 DTI在周围神经病变中的应用

3.1 卡压性周围神经损伤

3.1.1 腕管综合征 腕管综合征(carpal tunnel syndrome, CTS)是最常见的上肢压迫性神经病变,是由于正中神经在穿过腕管时受到压迫。CTS通常会影响到手部功能并引起神经性疼痛,在中年人群患病率为4%~5%,其中女性的患病率更高^[12]。CTS早期准确诊断和及时干预对防止长期并发症至关重要。

一些学者^[13-14]通过Meta分析发现,与健康对照组相比,CTS患者的FA值在豆状骨水

【第一作者】张宇娜,女,研究生在读,主要研究方向:磁共振诊断。E-mail:zhangyuna0220@163.com

【通讯作者】李华兵,男,主任医师,主要研究方向:磁共振诊断。E-mail:lihuabing3668960@163.com

平显著降低,而ADC值在豆状骨和钩骨水平升高,特别是豆状骨水平的FA值和钩骨水平的ADC值在CTS的诊断中比其他测量位置更敏感和易于获取。Bulut等人^[15]的研究还发现,FA值和ADC值与电生理学研究的严重程度分级及患者临床症状之间存在显著相关性;此外研究还确定了用于诊断和分级CTS的FA值和ADC值的阈值。以上研究表明DTI参数有助于CTS的诊断,并且具有足够的敏感性和特异性用于CTS的诊断和分级^[15-16]。

3.1.2 肘管综合征 肘管综合征(cubital tunnel syndrome, CuTS)是第二常见的上肢压迫性神经病变^[17],由尺神经在肘部水平卡压引起。慢性尺神经功能障碍可导致永久性的感觉丧失和关节挛缩。典型临床表现为第4和第5手指的麻木和刺痛,以及肘部疼痛或从肘部向手尺侧放射的疼痛^[18]。目前对CuTS的诊断还没有达成共识,有些患者检查正常,但症状明显,因此及时诊断及手术减压十分重要。Griffiths等人^[19]的研究发现,与健康成年人DTI参数相比,CuTS患者尺神经整体上FA值比对照组低6%,特别是在肘管近端差异最大,并且这种差异体现在整个尺神经长度上,而不仅仅是在压迫部位。Kim等人^[20]通过对接受尺神经沟减压(cubital tunnel decompression, CTD)手术的21名肘管综合征患者进行DTI检查,发现术前尺神经上方(肘管上方)的FA值、轴向扩散率(axial diffusivity, AD)和平均扩散率(mean diffusivity, MD)与术后临床症状改善具有较高的准确性,特别是FA值,显示出最强的预测能力,AUC为0.710,可以作为判断患者术后症状是否改善的潜在指标。这些结果表明,DTI技术能够为评估尺神经的健康状况提供一个客观的指标,对于CuTS的临床诊断和治疗管理具有潜在的应用价值。

3.1.3 腰椎间盘突出症 腰椎间盘突出症(lumbar disc herniation, LDH)通常由椎间盘退变或外力作用导致髓核从破裂的纤维环中突出,对相应神经根产生压迫和刺激。其典型临床表现是从腰部辐射到膝盖以下的坐骨神经疼痛,伴有患侧腿或足部感觉异常和肌肉无力。随着年轻人工作方式的转变,近年来LDH的发病率持续上升^[21]。MRI是临床评估LDH的首选检查手段,具有较高准确度和可靠性。常规MRI可以确定椎间盘突出是否压迫神经根,但很难评估神经根受压的严重程度及其内在结构。

在LDH患者中,有关ADC值的研究存在争议,早期有研究报道受压侧ADC值降低,甚至较对侧没有明显变化趋势。但近年来的研究表明,与健侧神经根相比,受压侧神经根的FA值显著降低,ADC值则显著升高,受压神经根纤维束表现出局部压迫、稀疏甚至移位^[22-24]。为了进一步评估FA值和ADC值的诊断价值,Liang、Edipoglu等^[25-26]对DTI检查是否可以作为评估受压神经根严重程度的潜在定量诊断工具进行Meta分析,结果显示DTI参数变化(FA值降低、ADC值升高)对区分正常与受压神经根具有重要诊断意义。临床工作中常会遇到影像学表现与症状、体征不符的情况,特别是当多发性腰椎间盘突出引起多发性神经根病变,DTI检查尤为重要。李晖等^[27]的研究发现,根据FA值和ADC值的变化,可确定责任神经根。由此看来,DTI是传统MRI的有效补充,能够有效诊断腰骶神经受压,为临床准确诊断和治疗提供影像学依据。

针对接受椎间孔镜微创手术治疗的LDH患者,研究发现,术后三个月内患侧FA值显著提高,ADC值与Oswestry残疾指数(oswestry disability index, ODI)显著降低,DTI参数变化与ODI评分变化之间存在强正相关^[28]。术后纤维束成像(fiber tractography, FT)显示出受压神经根的路径变得更加清晰和连续,表明手术成功解除了压迫^[29]。Wu等^[30]人的研究通过对LDH患者术前DTI参数进行分析,发现与手术结果不利组相比,手术结果有利组的患者呈现出更高的术前患侧FA值和ADC值,并且FA值对手术结果预测性能尤为突出(AUC为0.900)。以上表明,DTI技术能够量化评估LDH患者手术前后神经根的微观结构变化。术前患侧FA值越高,患者手术结果越可能积极。

3.2 代谢性周围神经损伤 糖尿病周围神经病变(diabetic peripheral neuropathy, DPN)是糖尿病的一种常见且复杂的并发症,它极大地增加了糖尿病患者足部残疾的风险,对患者生活质量造成严重影响,由于其症状通常直到晚期才被诊断出来,并且

具有不可逆性,DPN的早期诊断对于治疗和预防至关重要。据统计,成人糖尿病患者DPN发病率高达51%,具体取决于年龄、糖尿病病程、血糖控制情况以及糖尿病分型^[31]。

Vaeggemose等人^[32]首次将DTI技术应用于1型糖尿病周围神经病变,发现患者的近端和远端坐骨神经较健康对照组FA值显著降低,ADC值升高,并且DTI技术显示出高可重复性和可靠性,证明DTI是检测1型糖尿病患者的DPN敏感且可靠的方法。为进一步评估DTI对2型糖尿病周围神经病变的诊断准确性以及与电生理学指标之间的相关性,Wang等人^[5]通过分别对2型糖尿病周围神经病变患者、无周围神经病变2型糖尿病患者及健康对照组进行研究,发现3组胫神经(tibial nerve, TN)和腓总神经(common peroneal nerve, CPN)的FA值逐渐增加,ADC值逐渐降低;并且TN和CPN的FA值与神经运动传导速度(motor conduction velocity, MCV)和运动振幅(motor amplitude, MA)呈显著正相关,而ADC值与神经的MCV和MA呈负相关,表明DTI参数对于DPN病人的胫神经和腓总神经病变具有良好的诊断作用,而且DTI多参数定量分析有助于鉴别DPN轴突损伤和脱髓鞘病变,对判别DPN、NDPN病人与正常个体神经系统变化展现出巨大潜力。

3.3 周围神经源性肿瘤 周围神经肿瘤(peripheral nerve tumors, PNTs)是一组起源于外周神经系统的肿瘤,见于全身各个部位。良性肿瘤主要有施万细胞瘤、神经纤维瘤,它们通常生长缓慢,边界清晰,预后通常良好;恶性肿瘤有恶性周围神经鞘瘤,生长迅速,可能侵犯周围结构,具有高度的侵袭性和转移性,临床表现为疼痛、感觉异常和运动功能障碍,治疗复杂,预后相对较差^[33]。肿瘤与神经束的关系决定了肿瘤对神经功能的影响及手术切除的复杂性。肿瘤可能起源于神经束内部或外部,影响神经结构,导致功能障碍。高分辨率超声和MRI是观察肿瘤的尺寸、密度、位置以及其与邻近神经关系的常用方法。然而,这两种技术在精确描绘肿瘤与相关神经纤维的关系方面存在一定的局限性,无法充分敏感地映射出肿瘤与周围神经纤维的复杂相关性。因此,对于PNTs的评估,需要更精细的成像技术来提高诊断的准确性和治疗的针对性。

Cage等人^[34]通过对周围神经肿瘤患者进行术前DTI及DTT成像,发现DTI显示的神经纤维位置与术中电生理刺激确定的解剖位置具有显著的相关性,DTI在识别肿瘤相关神经纤维方面的敏感性为95.7%。此外,Bruno、Mazal等人的研究^[35-36]进一步揭示了FA值和ADC值在评估肿瘤的侵袭性方面的潜力,恶性肿瘤通常表现为FA值降低和ADC值升高,这可能提示了神经鞘的损伤、髓鞘的丢失或轴突的退化。并且恶性肿瘤显示出更明显的纤维束的中断和破坏。综上所述,DTI能够帮助外科医生术前详尽规划,精确描绘肿瘤与周围神经结构的关系,从而避免损伤重要的神经纤维束,减少术后并发症的风险^[36]。结合临床症状、电生理学评估及手术结果,DTI的影像学特征能够协助医生更准确地评估肿瘤的侵袭性,为制定手术方案和治疗策略提供关键信息。

4 DTI技术的局限性和挑战

DTI在评估外周神经病变方面展现出巨大潜力,但它在技术实现上仍面临一些局限性和挑战。

(1)小尺寸和分辨率限制:与大脑白质的纤维相比,周围神经直径小,而且DTI的空间分辨率有限,这使得对这些细小结构进行成像和准确识别变得困难。

(2)成像对比度和信噪比:外周神经与周围组织(如肌肉、骨骼和血管)的对比度不足,导致神经结构显示不够清晰。成像过程中的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)通常较低,特别是在使用单次激发自旋回波扩散加权回波平面成像(DW-EPI)序列时,这会导致图像质量下降。

(3)患者舒适度:DTI成像通常需要较长的采集时间,这可能导致患者不适和自主运动,从而产生伪影。

(4)临床应用的限制:DTI在周围神经系统中仍处于验证阶段,需要更多同质性高、大样本、前瞻性的队列研究来验证其临床应用的有效性。

5 展 望

DTI技术在周围神经系统中的应用是一个充满挑战但前景广阔的领域。外周神经的DTI预期将通过技术创新和改进,如优化成像序列、提高信噪比、减少图像畸变、增强脂肪信号抑制等得到更广泛的临床应用。DTI技术与人工智能(artificial intelligence, AI)的结合预示着个性化医疗和精准诊断的新时代。深度学习算法能够处理和分析DTI数据,自动识别和分割外周神经,提高对神经病变的诊断准确性。随着计算能力的提升和算法的改进,预期将实现更快速的图像处理,减少扫描时间,并提高患者体验。在临床研究方面,更多的证据将验证DTI在神经病变诊断、治疗规划和预后评估中的价值。

参考文献

- [1] Yoon D, Lutz A M. Diffusion tensor imaging of peripheral nerves: current status and new developments[J]. *Seminars in Musculoskeletal Radiology*, 2023, 27 (6): 641-648.
- [2] Tsuchiya K, Fujikawa A, Suzuki Y. Diffusion tractography of the cervical spinal cord by using parallel imaging[J]. *AJNR American Journal of Neuroradiology*, 2005, 26 (2): 398-400.
- [3] Jang H, Du J. Optimizing diffusion-weighted MRI of peripheral nerves[J]. *Radiology*, 2022, 302 (1): 162-163.
- [4] Gruetter R. Automatic, localized in vivo adjustment of all first- and second-order shim coils[J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 1993, 29 (6): 804-811.
- [5] Wang X, Luo L, Xing J, et al. Assessment of peripheral neuropathy in type 2 diabetes by diffusion tensor imaging[J]. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 2022, 12 (1): 395-405.
- [6] 陈嘉豪, 尤晓光. 磁共振弥散张量成像技术在临床中的应用价值[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2023, 21 (8): 173-175.
- [7] Barrell K, Smith A G. Peripheral neuropathy[J]. *The Medical Clinics of North America*, 2019, 103 (2): 383-397.
- [8] Chhabra A, Duarte Silva F, Mogharrabi B, et al. MRI-based neuropathy score reporting and data system (NS-RADS): multi-institutional wider-experience usability study of peripheral neuropathy conditions among 32 radiology readers[J]. *European radiology*, 2024.
- [9] Gwathmey K G, Pearson K T. Diagnosis and management of sensory polyneuropathy[J]. *BMJ (Clinical Research ed)*, 2019, 365: 11108.
- [10] Tesfaye S. Recent advances in the management of diabetic distal symmetrical polyneuropathy[J]. *Journal of Diabetes Investigation*, 2011, 2 (1): 33-42.
- [11] Wu Z, Yang X, Ruan Z, et al. Nonlinear relationship between dietary calcium and magnesium intake and peripheral neuropathy in the general population of the United States[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 10: 1217465.
- [12] 孙莎, 张婷婷, 景东华. 腕管综合征的诊断研究进展[J]. *临床荟萃*, 2019, 34 (2): 180-183.
- [13] Liu C, Li H W, Wang L, et al. Optimal parameters and location for diffusion tensor imaging in the diagnosis of carpal tunnel syndrome: a meta-analysis[J]. *Clinical Radiology*, 2018, 73 (12): 1058.e1011-e1058, e1019.
- [14] Rojoa D, Raheman F, Rassam J, et al. Meta-analysis of the normal diffusion tensor imaging values of the median nerve and how they change in carpal tunnel syndrome[J]. *Sci Rep*, 2021, 11 (1): 20935.
- [15] Bulut H T, Yildirim A, Ekmekci B, et al. The diagnostic and grading value of diffusion tensor imaging in patients with carpal tunnel syndrome[J]. *Academic Radiology*, 2014, 21 (6): 767-773.
- [16] Vo N Q, Hoang N T, Nguyen D D, et al. Quantitative parameters of diffusion tensor imaging in the evaluation of carpal tunnel syndrome[J]. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 2022, 12 (6): 3379-3390.
- [17] An T W, Evanoff B A, Boyer M I, et al. The prevalence of cubital tunnel syndrome: a cross-sectional study in a U.S. metropolitan cohort[J]. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 2017, 99 (5): 408-416.
- [18] Bradshaw D Y, Shefner J M. Ulnar neuropathy at the elbow[J]. *Neurologic Clinics*, 1999, 17 (3): 447-461, v-vi.
- [19] Griffiths T T, Flather R, Teh I, et al. Diffusion tensor imaging in cubital tunnel syndrome[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11 (1): 14982-14982.
- [20] Kim K H, Lee M H, Park S-Y, et al. Ulnar neuropathy at the elbow: associations of pre-operative DTI parameters with clinical outcomes after cubital tunnel decompression[J]. *European Radiology*, 2023, 33 (9): 6351-6358.
- [21] Li H, Jiang C, Mu X, et al. Comparison of MED and PELD in the treatment of adolescent lumbar disc herniation: a 5-year retrospective follow-up[J]. *World Neurosurgery*, 2018, 112: e255-e260.
- [22] Cheng H, Lan H, Bao Y, et al. Application of magnetic resonance diffusion tensor imaging in diagnosis of lumbosacral nerve root compression[J]. *Current Medical Imaging*, 2024, 20: e120623217889.
- [23] Zhang J, Zhang F, Xiao F, et al. Quantitative evaluation of the compressed L5 and S1 nerve roots in unilateral lumbar disc herniation by using diffusion tensor imaging[J]. *Clinical Neuroradiology*, 2017, 28 (4): 529-537.
- [24] 肖胜, 郭涛. 磁共振扩散张量成像在评价以及神经根病变中的作用[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2016, 14 (3): 51-54.
- [25] Edipoglu I S, Wang N, Sun D, et al. Nerve abnormalities in lumbar disc herniation: a systematic review and meta-analysis of diffusion tensor imaging[J]. *Plos One*, 2022, 17 (12): e0279499.
- [26] Liang W, Han B, Hai Y, et al. Diffusion tensor imaging with fiber tracking provides a valuable quantitative and clinical evaluation for compressed lumbosacral nerve roots: a systematic review and meta-analysis[J]. *European Spine Journal*, 2021, 30 (4): 818-828.
- [27] 李晖, 栾海, 殷庆龙, 等. 磁共振DTI技术在判断腰椎间盘突出症责任神经根中的应用价值[J]. *中国医疗设备*, 2022, 37 (11): 94-98.
- [28] Wu W, Liang J, Chen Y, et al. Microstructural changes are coincident with the improvement of clinical symptoms in surgically treated compressed nerve roots[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7 (1): 44678.
- [29] Shi Y, Zhao F, Dou W, et al. Quantitative evaluation of intraspinal lumbar disc herniation-related lumbosacral radiculopathy before and after percutaneous transforaminal endoscopic discectomy using diffusion tensor imaging[J]. *Spine*, 2021, 46 (13): E734-E742.
- [30] Wu P, Huang C, Zhao S, et al. Preoperative quantitative diffusion tensor imaging on the spinal nerve root is a predictor for the surgical outcome of lumbar disc herniation: a prospective study of 117 patients[J]. *Journal of Neurosurgical Sciences*, 2023, 67 (2).
- [31] Iqbal Z, Azmi S, Yadav R, et al. Diabetic peripheral neuropathy: epidemiology, diagnosis, and pharmacotherapy[J]. *Clinical Therapeutics*, 2018, 40 (6): 828-849.
- [32] Vaeggemose M, Pham M, Ringgaard S, et al. Diffusion tensor imaging MR neurography for the detection of polyneuropathy in type 1 diabetes[J]. *Journal of Magnetic Resonance Imaging: JMIR*, 2017, 45 (4): 1125-1134.
- [33] Belakhova S M, Rodriguez F J. Diagnostic pathology of tumors of peripheral nerve[J]. *Neurosurgery*, 2021, 88 (3): 443-456.
- [34] Cage T A, Yuh E L, Hou S W, et al. Visualization of nerve fibers and their relationship to peripheral nerve tumors by diffusion tensor imaging[J]. *Neurosurgical Focus*, 2015, 39 (3).
- [35] Bruno F, Arrigoni F, Mariani S, et al. Application of diffusion tensor imaging (DTI) and MR-tractography in the evaluation of peripheral nerve tumours: state of the art and review of the literature[J]. *Acta Bio-medica: Atenei Parmensis*, 2019, 90 (5-s): 68-76.
- [36] Mazal A T, Ashikyan O, Cheng J, et al. Diffusion-weighted imaging and diffusion tensor imaging as adjuncts to conventional MRI for the diagnosis and management of peripheral nerve sheath tumors: current perspectives and future directions[J]. *European Radiology*, 2018, 29 (8): 4123-4132.

(收稿日期: 2024-05-20)
(校对编辑: 韩敏求)