

论 著

磁共振扩散张量成像量化参数在创伤性脑白质损伤中的联合应用

朱艳清¹ 张 静^{2,*} 王明泉¹
童林军³ 叶德宝¹ 陈庆丰¹1.上海市上海永慈康复医院放射科
(上海 201100)2.上海交通大学医学院附属瑞金医院
放射科 (上海 200025)3.上海交通大学医学院附属仁济医院
核医学科 (上海 200127)

【摘要】目的 多个量化参数联合应用评价磁共振扩散张量成像(DTI)在创伤性脑白质损伤(TWMI)中的作用。方法 收集20例经临床明确的TWMI患者使用联影uMR770 3T磁共振行常规MRI与DTI检查,另选取20例正常人作为对照组。选取5个感兴趣区,分别为胼胝体膝部及压部、伤侧内囊前肢及后肢、伤侧上纵束,经工作站后处理获取表观弥散系数图(ADC图)、各向异性指数图(FA图)和3D纤维束成像图(DTT)。对两组数据进行统计学分析。结果 TWMI组在胼胝体膝部(GCC)与压部(SCC)、内囊前肢(AIC)与后肢(PIC)部位ADC值相对于对照组均升高,差异有统计学意义($P<0.05$),在半卵圆中心(SC)部位 $P>0.05$,无显著性差异。两组各部位的FA值经独立样本t检验表明,全部5个感兴趣区FA值相对于对照组均降低,差异具有统计学意义($P<0.05$)。DTT成像显示受伤区白质比正常部分明显分离、稀疏或缺损。结论 综合运用DTI技术可有力协助评价TWMI患者严重性以及预后如何。

【关键词】扩散张量成像; 创伤性脑白质损伤

【中图分类号】R651.1+5

【文献标识码】A

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2023.09.013

Clinical Application of Magnetic Resonance Diffusion Tensor Imaging in Traumatic White Matter Injury

ZHU Yan-qing¹, ZHANG Jing^{2,*}, WANG Ming-quan¹, TONG Lin-jun³, YE De-bao¹, CHEN Qing-feng¹.

1.Radiology Department of Shanghai Yongci Rehabilitation Hospital, Shanghai 201100, China

2.Department of Radiology, Ruijin Hospital Affiliated to Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200025, China

3.Department of Nuclear Medicine, Renji Hospital Affiliated to Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200127, China

ABSTRACT

Objective To evaluate the value of magnetic resonance diffusion tensor imaging (DTI) in traumatic white matter injury (TWMI). **Methods** Twenty patients with clinically diagnosed TWMI after traumatic brain trauma were examined by the uMR770 3T magnetic resonance scanner, and twenty normal persons as the control part. Five interested regions were selected, the genu of corpus callosum(GCC) and the splenium(SCC), the Anterior limb and posterior limb of internal capsule of the injured side(AIC、PIC), and the center of a semiovale (SC), the partial anisotropy index (FA)、apparent diffusion coefficient (ADC)、3D diffusion tensor tractography (3D-DTT) were obtained by post-processing of the workstation. Statistical analysis of both sets of data. **Results** lower ADC values were seen in the TWMI group in GCC、SCC、AIC、PIC relative to the control group, and the difference was statistically significant ($P<0.05$), no significant difference in the upper longitudinal tract (SLB) site ($P>0.05$). The FA values of each site in the two groups were analyzed by the independent sample t-test, and the FA values of all five ROI decreased relative to the control group, and the difference was statistically significant ($P<0.05$). DTT shows that the white matter in the injured area is partially sparse, isolated, or absent than the normal area. **Conclusion** DTI technology can be used as a powerful tool to assess the severity and prognosis of patients with TWMI.

Keywords: Diffusion Tensor Imaging; Traumatic White Matter Injury

随着社会的发展,创伤性脑白质损伤(trumatic white matter injury, TWMI)发病率一直呈上升趋势,也是引起人类致残和死亡的重要原因。多年来,CT检查是目前我国医院普遍使用的最常用、最有效的检查方法,但是颅脑CT对准确评价所受外伤的病情有很大局限性,而随着磁共振的普遍应用,对于在这方面的价值越来越受重视。其中磁共振扩散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)作为磁共振功能成像新兴技术,对人体组织器官的水分子的运动进行检测,显示大脑纤维束的走行及分布。通过联合应用该成像的几种参数,拟明确参数的变化与TWMI的关系。

1 资料与方法

1.1 一般资料 收集我院2020年1月至2022年4月20例TWMI患者为试验组,其中男15例,女5例,年龄20-64岁,平均年龄38岁,受伤原因有车祸伤、坠落伤、打击伤等。记录所有患者的具体损伤情况,分类管理。并选取20例健康人作为对照,入选者无脑外伤史、精神病和神经系统疾病史。所有患者及自愿者均可以安全的进行MRI检查,体内没有铁磁性物质,配合不佳或图像不清晰者均剔除试验组,以保证试验质量。

1.2 设备及扫描方法 使用联影uMR770 3T超导磁共振。主磁场梯度3T,最大磁场强度500T/m。梯度场切换率(slew rate, SR) 250mT/m/s,最大梯度容量50mT/m。所有试验组先行常规MRI检查, T₂WI主要参数: TR4679ms、TE104.4ms、THK5mm; T₁WI主要参数TR2153ms、1.2ms、THK5mm; 平扫FOV220×240。根据平扫图像确定DTT扫描层面,层面数20层,采用平面回波echo planar imaging序列,主要参数TR5865ms、TE80.2ms、THK4mm, FOV230×250。

1.3 数据结果及分析 原始数据传至工作站后进行后处理,先对产生的原始数据进行运动校正,然后经过工作站自带软件计算,经过融合后,得到各种参数图,包括表观弥散系数图(apparent diffusion coefficient, ADC图)、部分各向异性图(fractional anisotropy, FA图),然后选取两侧对称的丘脑-基底节区作种子点,获得三维纤维束的图像3D diffusion tensor tractography, 3D-DTT图)。所有研究对象选取5个点,包括:胼胝体膝部(GCC)、伤侧内囊前肢(AIC)、后肢(PIC)、胼胝体压部(SCC)、与伤侧半卵圆区(SC),以上为感兴趣区 (region of interest, ROI), ROI面积均为26.6mm²,逐一计算ROI区域FA值、ADC值,选取电脑显示的平均值。对照组选用和实验组同侧的ROI进行测量。

1.4 统计学处理 所有数据使用SPSS 22.0软件进行后处理,计量资料采用($\bar{x} \pm s$)体现。比较TWMI组和对照组FA值、ADC值之间差异有无统计学差异,采用独立样本t检验进行两个组之间的比较, $P<0.05$ 表示差别有统计学意义。

2 结 果

20例TWMI患者中,主要损伤部位有两侧胼胝体、丘脑、内囊、放射冠、半卵圆

【第一作者】朱艳清,男,副主任医师,主要研究方向:神经系统及消化系统病变诊断。E-mail: 13917541130@163.com

【通讯作者】张 静,女,主治医师,主要研究方向:腹部、神经和骨关节病变诊断。E-mail: 2qzhzhangj@163.com

区、额/颞叶、脑干等。有挫伤、挫裂伤(伴出血)、血肿、白质剪切伤等(见图1-图4)。

2.1 试验组一般情况分析 20例患者中脑损伤包括脑挫伤、挫裂伤、出血及血肿形成等，其中3例伴硬膜下血肿；2例硬膜外血肿；3例脑干损伤；8例颅骨骨折；2例蛛网膜下腔出血；1例白质剪切伤；5例患者伴部分纤维束缺失。部分患者DWI图、FA图脑白质纤维结构紊乱，边缘较模糊。

2.2 两组ADC值比较 两组各部位ADC值通过独立样本t检验表

明，TWMI组在4个ROI部位(包括GCC、AIC、PIC、SCC)ADC值相对于对照组均升高，差异具有统计学意义($P<0.05$)，在半卵圆区(SC)部位 $P>0.05$ ，无显著性差异。见表1。

2.3 两组FA值比较 同样通过独立样本t检验两组各部位FA值表明，TWMI组在5个ROI部位(包括GCC、AIC、PIC、SCC、SC)FA值相对于对照组均降低，差异具有统计学意义($P<0.05$)。见表2。

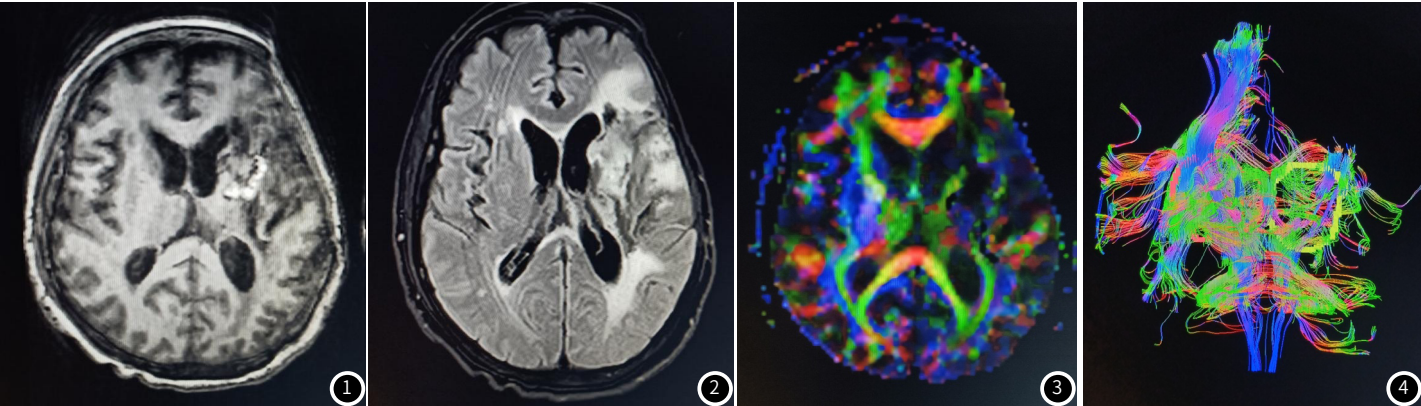


图1-图4 同一患者，女，63岁。图1-图2 T₁WI、T₂W FLAIR示：左侧额颞叶、基底节区脑挫裂伤，伴出血灶；图3-图4 二维彩色FA图、三维纤维束成像图示：左侧额颞叶、左侧基底节区纤维束较右侧缺损、稀疏。

表1 试验组和对照组各部位ADC值比较

组别	GCC	SCC	AIC	PIC	SC*
试验组	0.933±0.218	1.000±0.363	0.852±0.207	0.845±0.062	0.935±0.074
对照组	0.792±0.081	0.774±0.106	0.755±0.099	0.709±0.097	0.791±0.024
t值	2.802	2.864	2.342	2.403	2.046
P值	0.011	0.010	0.030	0.027	0.055

注：*半卵圆区试验组与对照组P值略大于0.05。

表2 试验组和对照组各部位FA值比较

组别	GCC	SCC	AIC	PIC	SC
试验组	0.616±0.211	0.617±0.206	0.431±0.141	0.509±0.168	0.386±0.128
对照组	0.715±0.059	0.746±0.087	0.513±0.144	0.650±0.093	0.444±0.100
t值	2.220	2.450	3.213	4.146	2.562
P值	0.039	0.024	0.005	0.001	0.019

3 讨论

随着磁共振成像技术的不断发展，各种功能成像极大促进了中枢神经系统病变的诊断，以往的常规检查对于神经纤维束来说是无法观察到的，但是DTI技术可以完整的观察活体组织中纤维束的情况，显示其走行是否完整、扭曲或缺损，对于各种病理状态下纤维束的异常可以很好显示，实现对中枢神经纤维精细成像，其中对于TWMI患者来说，DTI可以定量、直观显示纤维束的受损情况。

水分子的弥散是用弥散系数(diffusion coefficient, DC)这个参数来表示的，因在人体组织中，弥散系数受组织内的多因素影响，故通常用表观弥散系数(apparent DC, ADC)来表示。对于人体组织来说，ADC值与细胞的数量和体积的大小有关。细胞数量减少或体积缩小会造成ADC值升高。应用到白质纤维束中的话，髓鞘结构以及纤维束出现病变时会造成ADC值的异常。当完整性被破坏时，水分子弥散自由度增加，ADC值将相应增高。本研究结果显示，实验组损伤脑白质有4个感兴趣区(GCC、SCC、AIC、PIC)的ADC值均明显高于对照组($P<0.05$)。SC部位 $P>0.05$ ，无显著性差异，分析可能与本组损伤部位有关，本组患者损伤部位在脑干、基底节区居多，位于额顶部的SC区差异略减低(P 略大于0.05)。

在人体各个部位组织结构不同，水分子的弥散是受显著影响的，具有各向异性。特别是对于纤维束这样的结构来说，只有在纤维束走行方向上水分子弥散是相对自由的，对于其它方向明显受限制，具有较高的各向异性。为从数学上描述水分子的空间弥散程度，又引入了张量的概念，二者结合起来分析，最常用的参数即部分各向异性指数(FA)，表示弥散的各向异性部分在弥散张量总值中所占比值，反应了各向异性成分在整体弥散程度中的比例，数值在0~1之间。脑白质中FA值与纤维束的完整性呈正相关。本研究结果显示，脑外伤患者5个感兴趣区(GCC、SCC、AIC、PIC、SC)的FA值均明显减低，即表明髓鞘的完整性、纤维的致密性及平行性受到破坏。DTI检查，能反映其脑组织损伤情况，其中FA值、ADC值在评估脑损伤程度中具有重要价值。对某些轻度颅脑外伤或者轻度神经症患者存在脑白质完整性的损害，患者脑器质

性的损害是产生某些临床症状的基础，通过研究测量FA值和ADC值等参数可以明确患者的大脑组织结构的损害程度，客观评价伤情^[1-2]。Sung Ho Jang等^[3]指出，DTI在常规脑部CT或MRI结果为阴性的头部创伤后的患者中检测外伤性轴索损伤具有独特的优势，本组病例伴弥漫性轴索损伤较少，无法进行统计学分析，故以后在弥漫性轴索损伤患者中的参数的异常变化值得进一步研究。

研究表明，DTI成像不仅对常规磁共振发现异常的外伤患者有用，还对检测常规磁共振检查阴性的轻度损伤的患者有帮助。廖昆等^[4]研究了40例脑外伤患者，证实FA值可以反映脑外伤患者的异常情况，一方面结构损伤的患者FA值明显降低，另一方面部分常规MRI检查未见结构异常的轻症患者，FA值也发现异常改变，表明通过DTI检查有助于对神经纤维束微小结构受损进行早期发现，有助于TAI的早期诊断，及早进行临床干预，防止病情进展。叶宏达等^[5]研究了DTI在一组急性期轻度脑外伤患者中的应用，认为通过测量急性期轻度外伤患者的FA值及ADC值，有助于发现神经纤维束等微观结构是否有异常，对后续的治疗提供客观的证据支持。陈水斌等^[6]研究了一组脑外伤患者，使用DTI技术用于脑外伤的检查，明显好于常规影像检查手段，对于白质是否出现损伤以及损伤程度，特别是常规手段不能发现的患者，通过测量FA值可以比较敏感地发现，防止漏诊，更准确的评价患者的情况，指导预后。

DTI不仅能够检测到TWMI的存在，还可以观察病变随着时间推移的变化。Ana Luiza Zaninotto等^[7]对一组患者脑损伤后2、6和12个月分别进行评估，和对照组比较，实验组胼胝体膝部、体部及压部的FA值均减低，且随时间的推移，FA值进行性减低。Brenda Bartnik-Olson等^[8]研究了脑外伤后儿童患者在损伤后早期和12个月时白质损伤的演变，在两个时间点进行DTI检查，发现与对照组及受伤伊始的检查相比，到12个月时，实验组不仅观察到FA值普遍下降、ADC值增加，且DTI指标异常的ROI的总数也在增加。DTI不仅可以量化、客观评价不同级别脑损伤程度和分

(下转第64页)

3 讨论

神经血管压迫学说是目前三叉神经痛病因的共识,常见的责任血管包括小脑上动脉、小脑前下动脉、小脑后下动脉、基底动脉及岩静脉,其中最常见的责任血管是小脑上动脉^[10]。目前随着对三叉神经痛发病原因的深刻认识,MVD已经成为治疗三叉神经痛的最佳治疗手段,其针对病因制定的治疗原则可有效缓解患者的疼痛感,而对责任血管精确定位可为手术方案的制定提供可靠依据,可提高手术的有效率^[11-13]。

本试验结果显示,以手术结果为依据,3D-TOF-MRA单独检查对小脑上动脉、小脑前下动脉血管阳性检出率与3D-FIESTA单独检查血管阳性检出率结果相近,表明3D-TOF-MRA、3D-FIESTA在诊断血管压迫性三叉神经痛中具有一定的诊断价值。有研究表明^[14-15],3D-FIESTA的序列特点未呈现速度快,信噪较高,对比度和分辨率高,血管与脑脊液的差异明显,因此可提高责任血管的检出率,同时明确血管压迫分型情况,精准指导手术。相关研究表明^[16-17],3D-TOF-MRA序列符合流入增强效应,可清晰显示微小血管,发现其对神经的压迫情况及血管走形,但对软组织分辨力不高。因此,3D-TOF-MRA、3D-FIESTA可用于诊断此类患者的责任血管,但单独使用各有不足。

本试验结果显示,以手术结果为依据,联合检查对小脑后下动脉、基底动脉、岩静脉血管阳性检出率与3D-TOF-MRA、3D-FIESTA单独检查血管阳性检出率结果相近,联合检查对小脑上动脉、小脑前下动脉血管阳性检出率高于3D-TOF-MRA、3D-FIESTA单独检查血管阳性检出率,表明在诊断血管压迫性三叉神经痛中3D-TOF-MRA联合3D-FIESTA诊断比3D-TOF-MRA、3D-FIESTA单独诊断具有较高的诊断价值。相关研究表明^[18],3D-FIESTA可增强液体与组织的对比度,有助于清晰辨别脑部根进入区(rootentryzone, REZ)内的细小神经、血管形态、走行,可准确的判断血管来源,但若三叉神经与小血管重叠容易漏诊。3D-TOF-MRA序列在小血管上可显示高信号,而若扫描对象是CSF则表现为低信号,因此可了解血管情况,但若责任血管小则可导致漏诊^[19-20]。另有研究表明^[21],将3D-TOF-MRA、3D-FIESTA联合检查,二者均采用的是三维容积扫描技术,小脑上动脉、小脑前下动脉血管均属于较大的责任血管且血流速度快,均显示为高信号,因此联合检查对其分辨率较高,可提高阳性检出率。因此,3D-TOF-MRA联合3D-FIESTA诊断比3D-TOF-MRA、3D-FIESTA单独诊断具有较高的诊断价值。

综上所述,3D-TOF-MRA联合3D-FIESTA可明确血管压迫性三叉神经痛的责任血管,较单独检查准确性高,3D-TOF-MRA、3D-FIESTA二者联合相互弥补对方的不足之处,提高对于受累神经及周围小血管的显示能力,为临床诊疗提供良好的影像学依据,有利于MVD手术方案的确定。

（上接第38页）

布特点, 而且可根据白质损伤程度评估患者康复期认知功能所处客观情况。测量DTI参数可探究髓鞘、轴索的损伤程度, 进而确定TBI认知障碍的责任脑区, 为临床早期干预提供客观依据^[9]。

DTI对脑白质纤维束的显示是一个巨大的进步,但是也有固有的缺陷,除了具有常规MRI检查的所有缺点,也具有更多的限制,包括对设备功能的要求,操作者人为因素的差异。因此有人在总结前人经验的基础上,将血氧水平依赖脑功能成像(BOLD)联合运用静息态DTI评估脑解剖与脑功能的关系,通过BOLD对脑皮质功能区的代谢变化进行定位,再通过DTI显示纤维束,从而将神经功能与神经解剖结合在一起,为临床提供量化可见的病变证据,指导轻度脑外伤的诊治和预后^[10]。

总之, DTI是一种灵活的量化白质完整性的方法, 当常规成像正常时, 它提供了一种诊断临床上明显的白质损伤的方法, 一方面它可以通过测量ADC、FA值等参数的变化, 量化的反映纤维束的损伤, 另一方面可以通过DTT直观的显示纤维束的中断、分离和缺失等异常。综合运用DTI技术量化参数可作为评估TWM患者病情严重性与预后情况的有力工具。

参考文献

- [1] Cruccu G, Di Stefano G, Gruiñi A Trigeminal Neuralgia[J]. N Engl J Med, 2020, 383(8): 754-762.
- [2] Araya EI, Claudino RF, Pivoan EJ, et al. Trigeminal Neuralgia: Basic and Clinical Aspects[J]. Curr Neuroparmacol, 2020, 18(2): 109-119.
- [3] Bendtsen L, Zakrzewska JM, Heinskou TB, et al. Advances in diagnosis, classification, pathophysiology, and management of trigeminal neuralgia[J]. Lancet Neurol, 2020, 19(9): 784-796.
- [4] Yang AI, McShane BJ, Hitti FL, et al. Patterns of opioid use in patients with trigeminal neuralgia undergoing neurosurgery[J]. J Neurosurg, 2019, 131(6): 1805-1811.
- [5] May A, Hoffmann J. Facial pain beyond trigeminal neuralgia[J]. Curr Opin Neurol, 2021, 34(3): 373-377.
- [6] Ma S, Agarwalla PK, van Loveren HR, et al. Successful Microvascular Decompression For Trigeminal Neuralgia Secondary to a Persistent Trigeminal Artery[J]. Oper Neurosurg (Hagerstown), 2019, 16(1): 18-22.
- [7] Lee YJ, Moon HC, Tak S, et al. Atrophic Changes and Diffusion Abnormalities of Affected Trigeminal Nerves in Trigeminal Neuralgia Using 7-T MRI[J]. Stereotact Funct Neurosurg, 2019, 97(3): 169-175.
- [8] Zhang J, Ding S, Zhao H, et al. Evaluation of chronic carotid artery occlusion by non-contrast 3D-MERGE MR vessel wall imaging: comparison with 3D-TOF-MRA, contrast-enhanced MRA, and DSA[J]. Eur Radiol, 2020, 30(11): 5805-5814.
- [9] Di Carlo DT, Benedetto N, Marani W, et al. Microvascular decompression for trigeminal neuralgia due to vertebrobasilar artery compression: a systematic review and meta-analysis[J]. Neurosurg Rev, 2022, 45(1): 285-294.
- [10] Wang X, Wang H, Chen S, et al. The long-term clinical outcomes of microvascular decompression for treatment of trigeminal neuralgia compressed by the vertebra-basilar artery: a case series review[J]. BMC Neurol, 2019, 19(1): 217.
- [11] Song HD, Yang FJ, Liu RE. Efficacy of microvascular decompression on the vascular compression type of neurogenic hypertension: A meta-analysis[J]. Rev Neurol (Paris), 2020, 176(10): 763-769.
- [12] Yu R, Wang C, Qu C, et al. Study on the Therapeutic Effects of Trigeminal Neuralgia With Microvascular Decompression and Stereotactic Gamma Knife Surgery in the Elderly[J]. J Craniofac Surg, 2019, 30(1): 77-80.
- [13] Louges MA, Kleiber JC, Bazin A, et al. Efficacy of microsurgical vascular decompression in trigeminal neuralgia[J]. Eur Ann Otorhinolaryngol Head Neck Dis, 2020, 137(4): 285-289.
- [14] Kato H, Ootani N, Abiru K, et al. Investigating Signal Loss due to a Carotid Artery Stent in 3D-TOF-MRA[J]. Magn Reson Med Sci, 2021, 20(3): 303-311.
- [15] Ma Z, Zhang Y, Yu L, et al. Preoperative MRI characteristics and short-term postoperative outcomes of microvascular decompression in trigeminal neuralgia with no vascular compression[J]. Minerva Anestesiol, 2020, 86(3): 360-361.
- [16] Li J, Wang Y, Lian Z, et al. The Value of Three-Dimensional Brain Volume Combined with Time-of-Flight MRA in Microvascular Decompression[J]. Stereotact Funct Neurosurg, 2019, 97(2): 120-126.
- [17] Tian X, Tian B, Shi Z, et al. Assessment of Intracranial Atherosclerotic Plaques Using 3D Black-Blood MRI: Comparison With 3D Time-of-Flight MRA and DSA[J]. J Magn Reson Imaging, 2021, 53(2): 469-478.
- [18] Kabashi S, Ugurel MS, Dedushi K, et al. The Role of Magnetic Resonance Imaging (MRI) in Diagnostics of Acoustic Schwannoma[J]. Acta Inform Med, 2020, 28(4): 287-291.
- [19] Faron A, Sichteremann T, Teichert N, et al. Performance of a Deep-Learning Neural Network to Detect Intracranial Aneurysms from 3D TOF-MRA Compared to Human Readers[J]. Clin Neuroradiol, 2020, 30(3): 591-598.
- [20] Mirçik E, Hakyemez B. New technique: the use of the THRIVE sequence in the follow-up of patients who received endovascular intracranial aneurysm treatment[J]. Neuroradiology, 2021, 63(3): 399-407.
- [21] Kim DK, Verdoorn JT, Gunderson TM, et al. Comparison of non-contrast vessel wall imaging and 3-D time-of-flight MRA for atherosclerotic stenosis and plaque characterization within intracranial arteries[J]. J Neuroradiol, 2020, 47(4): 266-271.

(收稿日期: 2022-11-30) (校对编辑: 谢诗婷)

参考文献

- [1] 仁月勤. 磁共振扩散张量成像对轻型颅脑损伤患者评价的临床应用[J]. 中国CT和MRI杂志, 2018, 16(9): 80-82.
- [2] 朱弘子, 朱少毅. 轻度颅脑外伤、神经症患者脑白质弥散张量成像的研究[J]. 中国临床医学, 2016, 28(21): 1-3, 6.
- [3] Sung Ho Jang, Young Hyeon Kwon. A Review of Traumatic Axonal Injury following Whiplash Injury As Demonstrated by Diffusion Tensor Tractography[J]. Front Neurol, 2018, 8(9): 57.
- [4] 廖昆, 王忠安, 黎开谷, 等. DTI对弥漫性轴索损伤患者的早期诊断和预后评估[J]. 中国继续医学教育, 2020, 12(35): 126-130.
- [5] 叶宏达, 罗小平, 丁建荣, 等. MRI及DTI检查在急性期轻度脑外伤患者脑组织检查中的应用[J]. 全科医学临床与教育, 2021, 19(12): 1084-1087.
- [6] 陈水斌, 汤奕林, 欧阳林, 等. 磁共振扩散张量成像在创伤性脑损伤临床诊断和预后评估的应用价值[J]. 医学影像学杂志, 2020, 30(10): 1765-1769.
- [7] Ana Luiza Zaninotto, Daphine Centola Grassi, Dante Duarte, et al. DTI-derived parameters differ between moderate and severe traumatic brain injury and its association with psychiatric scores[J]. Neurol Sci, 2022, 43(2): 1343-1350.
- [8] Brenda Bartnik-Olson, Barbara Holshouser, Nirmalya Ghosh, et al. Evolving White Matter Injury following Pediatric Traumatic Brain Injury[J]. J Neurotrauma, 2021, 38(1): 111-121.
- [9] 陈苗苗, 李华, 张玉利, 等. 基于DTI对轻中重度脑创伤白质结构改变及其与康复预期认知功能相关性的量化评估[J]. 中国CT和MRI杂志, 2020, 18(10): 1-3, 7.
- [10] 杨国庆, 刘东柏, 高恒. BOLD和DTI成像在轻度脑外伤中的研究进展[J]. 中国微侵袭神经外科杂志, 2019, 24(6): 286-288.

(收稿日期: 2022-10-25) (校对编辑: 姚丽娜)