

· 临床研究 ·

doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2024.06.004

弥散张量成像技术联合白质纤维束成像技术在脊髓型颈椎病中的诊断价值研究*

谢思民,樊淋,胡亦劼,唐可,权正学[△]

(重庆医科大学附属第一医院骨科,重庆 400016)

[摘要] **目的** 探讨弥散张量成像(DTI)技术联合白质纤维束成像(DTT)技术各项参数对脊髓型颈椎病(CSM)患者的诊断价值。**方法** 前瞻性选取 20 例接受手术的 CSM 患者(CSM 组)和 20 名健康志愿者(对照组)为研究对象。研究对象接受颈椎常规磁共振成像(MRI)检查及 DTI 扫描,对图像进行后处理得到 DTI 和 DTT 参数值,主要指标包括分数各向异性(FA)、平均弥散系数(DC-avg)及白质纤维束密度(DTT-density)值,并记录每位 CSM 患者的日本骨科协会(JOA)评分及脊髓受压程度,同时根据 JOA 评分对 CSM 患者进行分级,以脊髓受压程度与 JOA 评分分为影像学典型表现组及影像学非典型表现组。比较 CSM 组患者与对照组健康志愿者 DTI、DTT 参数的差异,通过 Pearson 及 Spearman 相关性分析影像学典型表现组及非典型表现组 CSM 患者 DTI、DTT 参数与 JOA 评分间的相关性。**结果** CSM 组患者(除 C_{1/2} 的 FA、DTT-density 值及 C₇/T₁ 的 DC-avg、DTT-density 值外)FA 及 DTT-density 值较对照组健康志愿者明显降低,DC-avg 较对照组健康志愿者明显升高,差异有统计学意义($P < 0.05$);CSM 组患者(除 C_{3/4}、C_{6/7} 的 DTT-density 值外)受压迫节段的 FA、DC-avg、DTT-density 值与对照组比较差异有统计学意义($P < 0.05$)。影像学典型表现组脊髓受压程度与患者 JOA 评分相关($P < 0.05$),而影像学非典型表现组脊髓受压程度与 JOA 评分不具有相关性($P > 0.05$)。影像学典型表现组患者及非典型表现组患者的 FA、DC-avg、DTT-density 值与患者 JOA 评分相关($P < 0.05$)。**结论** 在 CSM 患者的术前诊断中,FA、DC-avg、DTT-density 值与患者的 JOA 评分密切相关,可有效判断患者的实际神经损伤。

[关键词] 脊髓型颈椎病;磁共振成像;弥散张量成像;白质纤维束成像;诊断效果

[中图法分类号] R581.5

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-8348(2024)06-0819-06

Diagnostic value of diffusion tensor imaging combined with diffusion tensor tractography in cervical spondylotic myelopathy*

XIE Simin, FAN Lin, HU Yijie, TANG Ke, QUAN Zhengxue[△]

(Department of Orthopedics, the First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400016, China)

[Abstract] **Objective** To investigate the diagnostic value of diffusion tensor imaging (DTI) combined with diffusion tensor tractography (DTT) in patients with cervical spondylotic myelopathy (CSM). **Methods** A prospective study was conducted on 20 CSM patients (the CSM group) who underwent surgery and 20 healthy volunteers (the control group). The subjects underwent routine MRI examination and DTI scan of the cervical spine, then the images were post-processed, and the corresponding parameter values of DTI and DTT were recorded, including fraction anisotropy (FA), average diffusion coefficient (DC-avg) and diffusion tensor tractography density (DTT-density). The score of the Japanese Orthopaedic Association (JOA) and the degree of spinal cord compression of all CSM patients were recorded, and the CSM patients were graded according to the JOA score. According to the degree of compression degree of spinal cord and JOA score, they were divided into the imaging typical performance group and atypical performance group. The DTI and DTT parameters between the patients of the CSM group and the healthy volunteers of the normal control group were compared, and the correlation between DTI and DTT parameters and JOA score of CSM patients in the imaging typical and atypical performance groups was analyzed by Pearson and Spearman correlation analysis. **Results** The values of FA and DTT-density (except for the values of FA and DTT-density in C_{1/2} and DC-avg and DTT-density in C₇/T₁) in the CSM group were significantly lower than those in the control group, and the

values of DC-avg were significantly higher than those in the control group, with statistical significance ($P < 0.05$). The values of FA, DC-avg and DTT-density (except for the values of $C_{3/4}$ and $C_{6/7}$ DTT-density) in the CSM group were significantly different from those in the control group ($P < 0.05$). The degree of spinal cord compression was correlated with the JOA score in the imaging typical performance group ($P < 0.05$), while the JOA score in the imaging atypical performance group was not correlated with the degree of spinal cord compression ($P > 0.05$). The values of FA, DC-avg and DTT-density were correlated with JOA scores of patients in the imaging typical and atypical performance groups ($P < 0.05$). **Conclusion** In the preoperative diagnosis of CSM patients, the values of FA, DC-avg and DTT-density are closely related to the JOA score of patients, which can effectively judge the actual nerve injury of patients.

[Key words] cervical spondylotic myelopathy; magnetic resonance imaging; diffusion tensor imaging; diffusion tensor tractography; diagnostic effect

脊髓型颈椎病(cervical spondylotic myelopathy, CSM)是导致颈脊髓功能障碍的主要原因^[1]。脊髓内特定白质纤维束的损伤通常会导致特定的神经功能缺损和症状^[2]。临床上, MRI 是 CSM 诊断和治疗策略设计的金标准。常规 MRI 可以显示压迫因素, 包括椎间盘、黄韧带、脊椎骨赘、小关节和后纵韧带骨化, 以及脊髓受压程度及脊髓实质 T2 加权高信号^[3]。但使用常规 MRI 很难评估患者的实际神经损伤, 在临床上常见到脊髓受压严重而临床症状轻或脊髓受压轻而临床症状重的患者, 这些影像症状与临床表现不符的患者在临床上逐渐增多, 因此迫切需要一些新技术来评估这类 CSM 患者的疾病严重程度^[4-5]。

弥散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)技术是近年来在扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)技术基础上发展起来的一种描述水分子扩散特性的成像技术^[6], 其基本原理为采集水分子在三维空间内各个方向上扩散运动所致的信号衰减强度, 并精确、定量描述出其空间扩散的三维轨迹^[7]。其在活体上通过分子水平评价水分子的扩散情况, 探测人脑、脊髓白质纤维束的完整性及方向性, 是一种从微观角度研究脑、脊髓等组织的结构和功能变化的无创性成像技术^[8]。近年来 DTI 技术运用于脊髓损伤及功能测定的研究越来越多^[9]。白质纤维束成像(diffusion tensor tractography, DTT)技术则是在 DTI 的基础上, 通过图像后处理, 重建出直观的脊髓白质纤维束图像, 可用于体内可视化纤维束通路^[10]。其最开始常用于大脑病变及急性脊髓损伤, 近年来临床逐渐将其运用在 CSM 中, 并测量出相应平面的白质纤维束密度(DTT-density)值^[11]。DTI 常见有许多参数值, 如表观弥散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)、分数各向异性(fractional anisotropy, FA)、平均弥散系数(average diffusion coefficient, DC-avg)、径向扩散系数(radial diffusivity, RD)和轴向扩散系数(axial diffusivity, AD)等, 本研究主要选取 DTI 中的 FA、DC-avg 和 DTT 参数 DTT-density 值, 研究其与临床症状的关系, 指导临床诊断^[12-15]。

1 资料与方法

1.1 一般资料

于 2022 年 9 月至 2023 年 9 月从本院健康志愿者中选取 20 名受试者(对照组), 对他们进行 MRI 及 DTI 检查, 纳入标准: 18~59 岁的健康成年人。排除标准: (1) 有脊髓肿瘤、脊髓外伤、颈椎手术史等; (2) 有幽闭恐惧症或其他无法配合检查的情况。其中男 14 例, 女 6 例, 平均年龄(49.7±5.2)岁。同期于本院就诊的 CSM 患者中, 选取 20 例 CSM 患者纳入 CSM 组, 所有患者均接受体格检查及 X 射线、CT、MRI 及 DTI 扫描。纳入标准: (1) 经临床、影像学诊断的 CSM 患者; (2) 临床、影像学资料完善者; (3) 无明确手术禁忌证。排除标准: (1) 有颈椎外伤、脊髓肿瘤、颈椎手术病史; (2) 颈椎严重畸形; (3) 有幽闭恐惧症及其他无法配合检查的情况。其中男 11 例, 女 9 例, 脊髓受压节段 $C_{2/3}$ 1 例、 $C_{3/4}$ 5 例、 $C_{4/5}$ 5 例、 $C_{5/6}$ 5 例、 $C_{6/7}$ 4 例, 平均年龄(58.33±4.6), 病程 1 个月到 6 年, 平均 2.4 年, 日本骨科协会(Japanese Orthopaedic Association, JOA)评分(12.0±2.9)分。发病后, 所有受试者均出现颈肩部疼痛或不适、四肢麻木、步态不稳、行走乏力和胸腹束带感中的一个或多个症状。对患者的体格检查显示, 患者脊髓受压主要在下颈脊髓, 四肢出现不同程度的不完全麻痹。此外, 四肢有明显的传感器和活动障碍, 并观察到反射亢进, 病理性肌腱反射阳性。采用 JOA 评分对 CSM 患者的颈脊髓功能进行评分^[16]。所有 CSM 患者根据脊髓受压的位置和节段, 以及不同的病理因素, 选择不同的入路(前入路 16 例、后入路 4 例)接受手术治疗。本研究得到了本院伦理委员会的批准(批准号 2023111), 并获得志愿者和患者的书面知情同意。

1.2 方法

1.2.1 DTI 扫描

常规 MRI 扫描所有研究对象 $C_1 \sim T_1$ 节段, T_1 、 T_2 、 T_2 压脂像及 T_2 横断面, DTI 选择 30 个方向扫描 $C_1 \sim T_1$ 横断面, 总扫描时间约 15 min^[17]。所有 MRI 常规序列扫描和 DTI 扫描均在 GE Discovery Silent MR 3.0T 核磁共振机(美国通用电气公司)上进行。受试者取仰卧位, 戴耳塞, 平静呼吸以避免吞咽, 颈椎处于中立位。

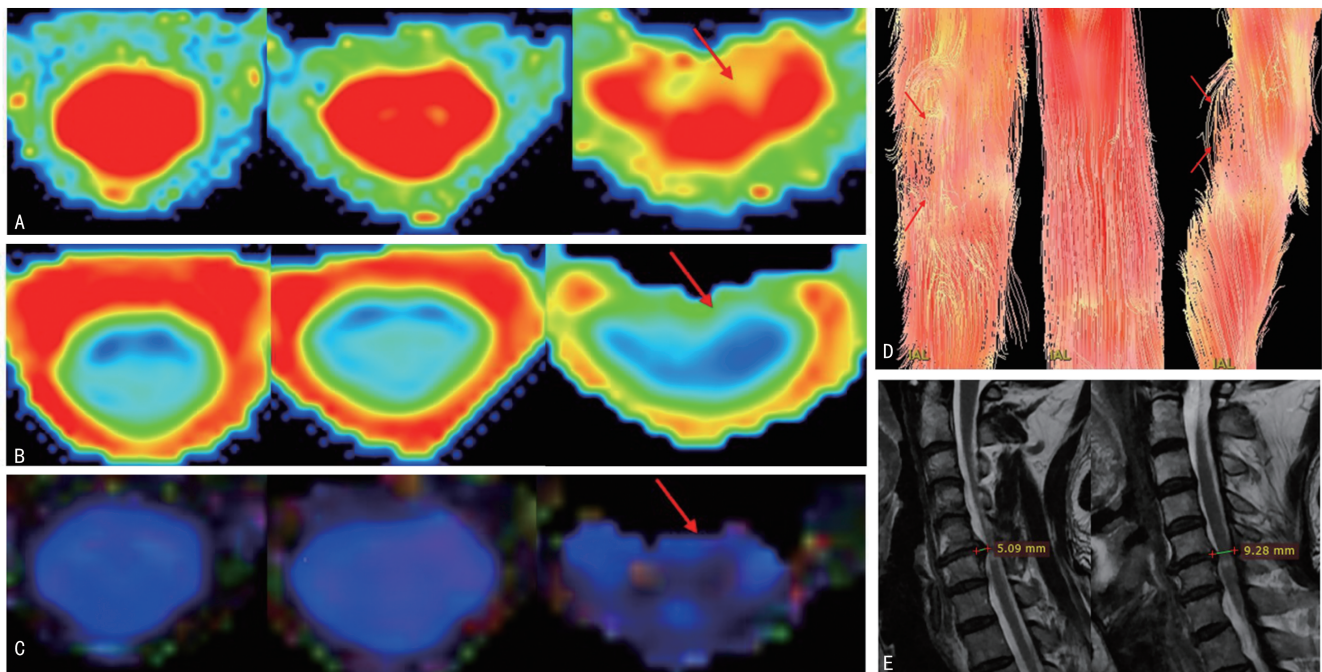
1.2.2 图像后处理

将所有图像传送到 Advantage 工作站 Volume Share 5 (GE Medical Systems), 并使用 GE Functool 9.4.05 软件对 DTI 图像进行后处理^[12]。使用正确的程序对扫描图像进行校正, 然后获得相应颈脊髓横断面的 DTI 图像, 包括 FA 色图、DC-avg 色图、DTT 色图, 并根据周围的白质纤维束进行追踪重建获得 DTT-density 值。研究对象根据脊髓对应的感兴趣区域 (region of interest, ROI), 包括 C_{1/2}、C_{2/3}、C_{3/4}、C_{4/5}、C_{5/6}、C_{6/7}、C_{7/T₁}, 除 C_{1/2} 选择枢椎椎体后缘中点对应脊髓层面, 其余各 ROI 均在与颈脊髓对应的椎间盘水平, 在尽量排除脑脊液的情况下将 ROI 放在脊髓上, 从而获得相应参数值 (图 1A~D), 以 T₂WI 序列为参照, 在 FA、DC-avg、DTT 色图相应横断面进行勾选, 并记录所有 ROI 的 DTI、DTT 参数值^[18]。同时在 T₂ 横断面测量脊髓受压程度, 即椎体后缘至椎间盘压迫最远点距离与椎体后缘至椎管后缘距离之比 (图 1E)。

前行 MRI、DTT 检查, 完善相应病历数据; 健康志愿者则于签署知情同意后书后进行 MRI 和 DTI 检查。为了减少主观误差, 所有参数的测量由两名脊柱外科医生完成, 最终结果为两者的平均值^[19]。

1.3 收集指标

包括患者术前进行 DTI 扫描后的 FA、DC-avg 及 DTT-density 值, MRI 评估脊髓受压程度, 以及 JOA 评分。本研究将 CSM 患者根据 JOA 评分分为 3 个等级: 14~<17 分为 I 级 (轻度功能损伤); 10~<14 分为 II 级 (中度功能受损); <10 分为 III 级 (重度功能受损)。将脊髓受压程度分为 3 级: 受压比率 <30% 为 I 级 (轻度受压), 30%~<60% 为 II 级 (中度受压), ≥60% 为 III 级 (重度受压)。CSM 患者常规 MRI 检查中颈脊髓受压程度与患者 JOA 评分不一致的纳入影像学非典型表现组, 而脊髓受压程度与患者 JOA 评分一致则纳入影像学典型表现组。



患者男, 65 岁, C_{5/6} 节段脊髓受压。A: FA 色图, 红色代表正常脊髓, 红色箭头所指处为压迫部位脊髓; B: DC-avg 色图, 蓝色代表正常脊髓, 红色箭头所指处为压迫部位脊髓; C: DTT 色图, 深蓝色代表正常脊髓, 红色箭头所指处为压迫部位脊髓; D: 重建后白质纤维束图像, 红色箭头所指处为受压迫后断裂的白质纤维束; E: 脊髓受压最明显处与椎管最宽处测量值。

图 1 典型病例 DTI 及 MRI 扫描所获各参数图像

1.4 统计学处理

采用 SPSS27.00 软件分析数据, 计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 组间比较采用独立样本 *t* 检验, Spearman 相关性分析研究 CSM 患者脊髓受压程度与 JOA 评分的关系 (根据分类将不同分级视为相应等级资料), 采用 Pearson 相关分析确定 CSM 患者术前 JOA 评分与 DTI 参数间的关系。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

除 C_{1/2} 的 FA、DTT-density 值及 C_{7/T₁} 的 DC-avg、DTT-density 值, CSM 组患者与对照组健康志愿

者其他节段 FA、DC-avg、DTT-density 值比较差异有统计学意义 ($P < 0.05$), 见表 1。接下来作者将 CSM 患者存在脊髓压迫的节段与对照组健康志愿者进行比较, 由于无患者在 C_{1/2} 及 C_{7/T₁} 有脊髓受压, 及 C_{2/3} 也只有 1 例患者脊髓受压, 因此本研究就 CSM 组及对照组的 C₃~C₇ 节段进行比较, 发现除 C_{3/4}、C_{6/7} DTT-density 值外, CSM 组存在脊髓压迫的节段 FA、DC-avg、DTT-density 值与对照组健康志愿者比较差异有统计学意义 ($P < 0.05$), 见表 2。将影像学典型表现组与影像学非典型表现组患者的脊髓受压程度与患者 JOA 评分进行分类后的数据行 Spearman

相关性分析,发现影像学典型表现组脊髓受压程度与患者 JOA 评分相关($r = -0.27, P < 0.05$),而影像学非典型表现组 JOA 评分与脊髓受压程度不具有相关性($r = 0.342, P > 0.05$)。进一步 Pearson 相关性分析发现影像学典型表现组患者及影像学非典型表现组患者的 FA、DC-avg、DTT-density 值与患者 JOA 评分均相

关,其中影像学典型表现组中 FA、DC-avg、DTT-density 值与患者 JOA 评分相关系数 r 分别为 0.827、-0.879、0.789, P 值分别为 <0.001 、 <0.001 、0.001,影像学非典型表现组中 FA、DC-avg、DTT-density 值与患者 JOA 评分相关系数 r 分别为 0.847、-0.829、0.775, P 值分别为 0.016、0.021、0.041。

表 1 CSM 组与对照组所有节段 FA、DC-avg 及 DTT-density 值比较($\bar{x} \pm s$)

项目	CSM 组($n=20$)	对照组($n=20$)	t	P
FA 值				
$C_{1/2}$	0.698±0.812	0.723±0.303	-1.635	0.110
$C_{2/3}$	0.657±0.125	0.754±0.445	-3.265	0.003
$C_{3/4}$	0.587±0.112	0.731±0.494	-5.264	<0.001
$C_{4/5}$	0.602±0.888	0.689±0.609	-3.607	<0.001
$C_{5/6}$	0.532±0.101	0.678±0.114	-4.240	<0.001
$C_{6/7}$	0.522±0.083	0.701±0.663	-8.204	<0.001
C_7/T_1	0.618±0.842	0.638±0.845	-4.036	<0.001
DC-avg 值($\times 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{s}$)				
$C_{1/2}$	8.773±3.324	7.933±1.001	1.082	0.286
$C_{2/3}$	9.227±2.190	7.908±1.289	2.322	0.026
$C_{3/4}$	11.289±3.714	8.496±0.947	3.259	0.002
$C_{4/5}$	12.944±5.482	8.889±1.300	3.219	0.004
$C_{5/6}$	15.785±7.368	10.145±1.770	3.328	0.003
$C_{6/7}$	14.168±5.816	9.773±2.006	3.195	0.004
C_7/T_1	12.114±3.884	10.572±2.174	1.550	0.129
DTT-density 值				
$C_{1/2}$	878.800±178.906	987.850±97.425	2.394	0.022
$C_{2/3}$	850.150±198.389	1 000.050±134.810	2.795	0.008
$C_{3/4}$	777.300±221.689	975.850±208.350	2.919	0.006
$C_{4/5}$	786.110±197.799	949.150±150.583	2.936	0.006
$C_{5/6}$	736.300±152.381	923.600±134.557	4.119	<0.001
$C_{6/7}$	759.900±173.172	885.950±188.984	2.119	0.034
C_7/T_1	663.950±186.466	683.950±126.194	0.406	0.687

表 2 CSM 组受压迫节段与对照组相应节段 FA、DC-avg 及 DTT-density 值比较

项目	CSM 组		对照组		t	P
	n	$\bar{x} \pm s$	n	$\bar{x} \pm s$		
FA 值						
$C_{3/4}$	5	0.462±0.034	20	0.573±0.449	-9.754	<0.001
$C_{4/5}$	5	0.523±0.663	20	0.689±0.861	-5.354	<0.001
$C_{5/6}$	5	0.475±0.693	20	0.677±0.114	-3.755	<0.001
$C_{6/7}$	4	0.517±0.125	20	0.701±0.066	-4.346	<0.001
DC-avg 值($\times 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{s}$)						
$C_{3/4}$	5	15.232±4.387	20	8.496±0.947	3.413	0.026
$C_{4/5}$	5	12.382±8.889	20	8.889±1.300	5.262	<0.001
$C_{5/6}$	5	18.788±11.091	20	10.145±1.770	1.748	0.002
$C_{6/7}$	4	16.762±4.157	20	9.773±2.006	5.284	<0.001

续表 2 CSM 组受压迫节段与对照组相应节段 FA、DC-avg 及 DTT-density 值比较

项目	CSM 组		对照组		<i>t</i>	<i>P</i>
	<i>n</i>	$\bar{x} \pm s$	<i>n</i>	$\bar{x} \pm s$		
DTT-density 值						
C _{3/4}	5	773.300±185.285	20	975.850±208.350	-1.978	0.050
C _{4/5}	5	690.800±120.483	20	949.150±150.583	-3.578	0.002
C _{5/6}	5	721.200±152.381	20	923.600±134.557	-2.784	0.011
C _{6/7}	4	748.511±93.870	20	885.950±188.984	-1.402	0.175

3 讨 论

DTI 在大脑病变及急性脊髓损伤中的研究较多,而近些年才逐渐运用于慢性脊髓损伤如 CSM 及椎管狭窄患者^[20]。先前关于 CSM 的研究报道,大部分是通过将 CSM 患者术前的 DTI 参数值如 FA、ADC、AD、RD 等与健康对照组比较有哪些差异,其仅仅表明了 DTI 可以用于诊断 CSM,而未与临床实际联系起来,部分研究则是通过白质纤维束的形态进行分类,然后与普通 MRI 中 T2W1 高信号改变进行比较,表明白质纤维束形态受损与患者脊髓 T2 像高信号相关^[21]。虽然其进一步研究了白质纤维束在 DTI 中的诊断价值,表明 DTI 较普通 MRI 具有一定的优势,但是仍不能解释为何临床上有一部分患者脊髓受压严重而症状不典型,无法说明 DTI 参数是否与患者的真实神经损伤间的相关性。

本研究显示,在 CSM 患者的普通 MRI 中,其虽然可以显示出患者的脊髓压迫程度及相应压迫因素,但是该压迫是否造成明确的神经损伤是无法判断的,因此本研究对 CSM 患者进行了 DTI 扫描分析来补充诊断。DTI 参数值中 FA 及 DC-avg 由于受其自身特性所致,压迫因素造成脊髓的神经纤维病变后,其数值将较无压迫的脊髓神经产生较大变化,这有利于对 CSM 进行诊断^[22]。其缺点是较易受周围退行性改变组织及脑脊液影响,所以在进行图像处理时需尽量避免开脑脊液,以免产生数据错误;而通过 DTT 技术重建测量的 DTT-density 值,可以提示患者在压迫状态下的神经纤维数量,不易受椎间盘等压迫因素影响,受到脑脊液的干扰也较少,在一定程度上反映患者的真实神经损伤。

本研究发现 CSM 患者与健康志愿者的 FA、DC-avg 及 DTT-density 值具有明显差异,这表明若患者存在脊髓压迫,则 DTI 参数值可存在明显的变化,它可以很好地帮助医生进行 CSM 的诊断。但若仅限于此,DTI 相对于普通 MRI 的诊断优势并不明显,需要进一步研究 DTI 参数值与实际损伤之间的关系,故作者将患者的 FA、DC-avg 及 DTT-density 值与患者的 JOA 评分进行相关性分析,发现上述参数值与 JOA 评分不论在影像学典型表现组还是影像学非典型表现组都具有相关性,这展现了 DTI 技术在诊断 CSM 患者较普通 MRI 的优越性,DTI 可以解释部分患者影像学表现与临床症状不一致的原因,值得临床上推

广应用。

本研究中也显示出了一些不足之处,由于 FA 及 DC-avg 是通过水分子的弥散运动来进行定量分析,因此所有影响水分子弥散的行为都有可能影响 FA 及 DC-avg 的真实性,导致测出来的数值与实际有偏差,这在 C₅~C₇ 节段表现最为严重^[23]。因为 C₅~C₇ 前方为咽喉部位,患者在十几分钟的扫描过程中无可避免会有吞咽等动作,因此该节段 DTI 参数值受影响较大,在数据中也可看出这两个节段的数据与 JOA 评分的相关性较其他节段偏弱^[24]。另外由于脊髓被脑脊液包围,脑脊液在任何方向上的弥漫性都很高,如果脊髓表面有 ROI 突出,DTI 值的准确性将会降低,尤其是 DC-avg 受脑脊液影响很大,这也导致了部分患者 DC-avg 测量时极高,这需要操作者手动缩小相应范围^[25]。另外 DTT-density 值测量时需要在白质纤维束重建的界面中选取 ROI 时稍大一点,这样可以尽可能将周围白质纤维束包含进来,避免部分节段因为挤压等原因导致的分布不均而出现 DTT-density 值极度减低,使得研究结论出现较大的偏差。本研究的样本量较少,特别是非典型影像学表现组 CSM 患者数较少,因此研究结果可能存在一定偏倚,有待更多数据支持,使研究结果得到进一步证实。

DTI 可以用来明确 CSM 的诊断,是评估 CSM 疾病严重程度的有用诊断工具,一定程度上其可以对普通 MRI 作补充诊断,尤其是对临床表现与 MRI 脊髓受压程度不一致的患者。另外,FA、DC-avg、DTT-density 值与患者的 JOA 评分密切相关,可有效判断患者的实际神经损伤。

参考文献

- [1] 曾广吾. 脊髓型颈椎病的治疗进展研究[J]. 中国现代医生, 2021, 59(14): 189-192.
- [2] NOURI A, TETREAULT L, SINGH A, et al. Degenerative cervical myelopathy: epidemiology, genetics, and pathogenesis[J]. Spine, 2015, 40(12): E675-693.
- [3] OKITA G, OHBA T, TAKAMURA T, et al. Application of neurite orientation dispersion and density imaging or diffusion tensor imaging to quantify the severity of cervical spondylotic myelopathy and

- to assess postoperative neurologic recovery [J]. *Spine J*, 2018, 18(2): 268-275.
- [4] HE B, SHELDRIK K, DAS A, et al. Clinical and research MRI techniques for assessing spinal cord integrity in degenerative cervical myelopathy—a scoping review [J]. *Biomedicines*, 2022, 10(10): 2621.
- [5] VALOSEK J, BEDNARIK P, KERKOVSKY M, et al. Quantitative MR markers in non-myelopathic spinal cord compression: a narrative review [J]. *J Clin Med*, 2022, 11(9): 2301.
- [6] MASUTANI Y. Recent advances in parameter inference for diffusion MRI signal models [J]. *Magn Reson Med Sci*, 2022, 21(1): 132-147.
- [7] 张升华, 姜兴岳, 马德晶, 等. DTI 参数 DC₁(avg) 值在缺血性脑梗死不同临床时期的变化特点 [J]. *临床放射学杂志*, 2012, 31(7): 930-933.
- [8] 张雅清, 李红, 胡爽. 磁共振成像在脑瘫患儿中的应用进展 [J]. *巴楚医学*, 2021, 4(3): 121-124.
- [9] VARGAS M I, DELATTRE B M A, BOTO J, et al. Advanced magnetic resonance imaging (MRI) techniques of the spine and spinal cord in children and adults [J]. *Insights Imaging*, 2018, 9(4): 549-557.
- [10] AKSHITHA J R, GOPINATH G, DIVYA M, et al. The role of diffusion tensor tractography in assessment of spondylotic myelopathy [J]. *Cureus*, 2022, 14(6): e25778.
- [11] 汪园园, 赵莹, 姚黎清. 弥散成像技术及其在脊髓损伤中的临床应用 [J]. *中国康复医学杂志*, 2019, 34(5): 607-611.
- [12] 申沧海. 常规 MRI 与 DTI 量化参数对脊髓型颈椎病特征分析及其对手术预后评估价值 [D]. 天津: 天津医科大学, 2019.
- [13] MARTINEZ-HERAS E, GRUSSU F, PRAD-OS F, et al. Diffusion-weighted imaging: recent advances and applications [J]. *Semin Ultrasound CT MR*, 2021, 42(5): 490-506.
- [14] TOKTAS Z O, TANRIKULU B, KOBAN O, et al. Diffusion tensor imaging of cervical spinal cord: a quantitative diagnostic tool in cervical spondylotic myelopathy [J]. *J Craniovertebr Junction Spine*, 2016, 7(1): 26-30.
- [15] TAKAMIYA S, IWASAKI M, YOKOHAMA T, et al. The prediction of neurological prognosis for cervical spondylotic myelopathy using diffusion tensor imaging [J]. *Neurospine*, 2023, 20(1): 248-254.
- [16] 李曼, 郎宁, 袁慧书. 脊髓型颈椎病患者小视野扩散张量成像参数与临床评价的相关性 [J]. *中国医学影像技术*, 2013, 29(6): 976-980.
- [17] LEE E, LEE J W, BAE Y J, et al. Reliability of pre-operative diffusion tensor imaging parameter measurements of the cervical spine in patients with cervical spondylotic myelopathy [J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 17410.
- [18] 覃达贤, 朱刚明, 王青云, 等. 3.0 T MR 扩散张量成像在颈椎病诊断中的应用 [J]. *现代医用影像学*, 2017, 26(2): 256-258.
- [19] NISCHAL N, TRIPATHI S, SINGH J P. Quantitative evaluation of the diffusion tensor imaging matrix parameters and the subsequent correlation with the clinical assessment of disease severity in cervical spondylotic myelopathy [J]. *Asian Spine J*, 2021, 15(6): 808-816.
- [20] MURPHY S A, FURGER R, KURPAD S N, et al. Filtered diffusion-weighted MRI of the human cervical spinal cord: feasibility and application to traumatic spinal cord injury [J]. *Am J Neuroradiol*, 2021, 42(11): 2101-2106.
- [21] NUKALA M, ABRAHAM J, KHANDIGE G, et al. Efficacy of diffusion tensor imaging in identification of degenerative cervical spondylotic myelopathy [J]. *Eur J Radiol Open*, 2018, 6: 16-23.
- [22] SHABANI S, KAUSHAL M, BUDDE M D, et al. Diffusion tensor imaging in cervical spondylotic myelopathy: a review [J]. *J Neurosurg Spine*, 2020, 28: 1-8.
- [23] ZANINOVICH O A, AVILA M J, KAY M, et al. The role of diffusion tensor imaging in the diagnosis, prognosis, and assessment of recovery and treatment of spinal cord injury: a systematic review [J]. *Neurosurg Focus*, 2019, 46(3): E7.
- [24] CHENG S J, TSAI P H, LEE Y T, et al. Diffusion tensor imaging of the spinal cord [J]. *Magn Reson Imaging Clin N Am*, 2021, 29(2): 195-204.
- [25] MARTIN N T, BAROUSSE R, AMRHEIN T J, et al. Optimizing diffusion-tensor imaging acquisition for spinal cord assessment: physical basis and technical adjustments [J]. *Radiographics*, 2020, 40(2): 403-427.