

脊髓型颈椎病患者颈脊髓磁共振扩散张量成像的特点及临床意义

孔超¹, 陈学明¹, 关骅², 于振山¹, 崔利宾¹, 王彦辉¹, 许崧杰¹, 袁鑫¹

(1 首都医科大学附属北京潞河医院骨科 101199 北京市通州区;

2 中国康复研究中心北京博爱医院脊柱外科 100068 北京市)

【摘要】目的:观察脊髓型颈椎病(cervical spondylotic myelopathy, CSM)患者磁共振扩散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)的特点,探讨 DTI 在评价颈脊髓慢性损伤的价值。**方法:**纳入 2011 年 2 月~2015 年 2 月间收治的 20 例 CSM 患者(CSM 组),并选择年龄匹配的 42 例健康志愿者作为对照组,均行颈椎磁共振 DTI,测量 CSM 组病变节段以及对照组 C2/3~C6/7 节段颈脊髓的表观弥散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)、各向异性分数(fractional anisotropy, FA)。比较对照组不同节段颈脊髓的 ADC 值和 FA 值,将 CSM 组和对对照组颈脊髓的 ADC 值和 FA 值分别进行比较,并对 CSM 患者颈脊髓 ADC、FA 评分和颈椎改良 JOA(mJOA)评分分别进行相关性分析。**结果:**对照组颈脊髓的 ADC 值自 C2/3~C6/7 节段呈上升趋势,而 FA 值呈下降趋势,C2/3 节段颈脊髓的 ADC 值较 C5/6 和 C6/7 节段明显低,而 FA 值明显高(ADC: $F=3.546$, $P=0.008$; FA: $F=13.82$, $P<0.001$)。CSM 组颈脊髓的 FA 值与对照组比较显著性减小($P<0.001$),而 ADC 值则显著性增加($P<0.001$)。CSM 组颈脊髓的 ADC 值与 mJOA 评分无显著相关性($r=-0.287$, $P=0.220$),而颈脊髓的 FA 值与 mJOA 评分存在显著性正相关($r=0.359$, $P=0.005$)。**结论:**CSM 患者颈脊髓 DTI 与正常人群存在差异,其 ADC 值较正常人群升高,而 FA 值则明显降低;mJOA 评分与 FA 值呈正相关。

【关键词】脊髓型颈椎病;颈脊髓;磁共振成像;扩散张量成像

doi:10.3969/j.issn.1004-406X.2016.11.04

中图分类号:R445.2, R681.5 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2016)-11-0977-07

Characteristics and clinical significance of magnetic resonance diffusion tensor imaging of cervical spinal cord in patients with cervical spondylotic myelopathy/KONG Chao, CHEN Xueming, GUAN Hua, et al//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2016, 26(11): 977-983

【Abstract】Objectives: To observe the characteristics of magnetic resonance diffusion tensor imaging(DTI) of the cervical spinal cord in patients with cervical spondylotic myelopathy (CSM), and to discuss the value of DTI for the chronic spinal cord injury. **Methods:** From February 2011 to February 2015, 20 patients with cervical spondylotic myelopathy were accepted and 42 age-matched healthy volunteers were included as a control group. Apparent diffusion coefficient(ADC) and fractional anisotropy(FA) values of the cervical spinal cord from C2/3 to C6/7 in the control group and in the CSM group were measured respectively. ADC and FA values of different segments in volunteers were compared. ADC and FA values of the cervical spinal cord in the two groups were compared respectively. ADC and FA values of the cervical spinal cord were made correlations with mJOA scores in CSM patients respectively. **Results:** ADC value showed an ascending trend from C2/3 to C6/7, while FA value showed a descending trend. ADC and FA values of C2/3 were significantly different from those of C5/6 and C6/7 respectively(ADC: $F=3.546$, $P=0.008$; FA: $F=13.82$, $P<0.001$). ADC value of the cervical spinal cord in the CSM group showed significant increase while FA value showed significant decrease compared with that of the control group respectively($P<0.001$). ADC value of the cervical spinal cord showed no linear correlation with mJOA score($r=-0.287$, $P=0.220$), while FA value showed a significant linear correlation with mJOA score($r=0.359$, $P=0.005$). **Conclusions:** ADC value of the cervical spinal

第一作者简介:男(1989-),住院医师,硕士研究生,研究方向:脊柱外科

电话:(010)69543901 E-mail:kong988500@163.com

通讯作者:陈学明 E-mail:xuemingchen@sina.com

cord in CSM patients shows a significant increase compared with that in healthy volunteers, while FA value shows a significant decrease. FA value shows a significant linear correlation with mJOA score.

【Key words】 Cervical spondylotic myelopathy; Cervical spinal cord; Magnetic resonance imaging; Diffusion tensor imaging

【Author's address】 Department of Orthopedics, Beijing Luhe Hospital, Capital Medical University, Beijing 100020, China

脊髓型颈椎病(cervical spondylotic myelopathy, CSM)约占各型颈椎病的 10%~15%, 主要发病原因为慢性持续性压迫造成脊髓慢性受压和缺血, 引起脊髓功能性和器质性的损害^[1-4]。目前 MRI 是诊断 CSM 最为常用的影像学检查手段^[5-6], 但 MRI 主要通过脊髓受压程度及 T2WI 是否有高信号来粗略评估脊髓的受损情况, 不能反映脊髓微观结构的改变, 也无法做到定量评价, 而且对一些脊髓受压、信号无明显异常改变的患者也无法准确评估其脊髓受损情况。磁共振扩散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)是 20 世纪 90 年代初问世的一项技术, 由磁共振扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)进一步发展而来, 它利用组织中水分子扩散运动存在各向异性的原理, 探测组织微观结构。早期的动物研究证实, DTI 可以敏感地反映脊髓中水分子扩散各向异性的改变, 从而有可能提供活体脊髓的细微病理生理结构变化的信息^[7]。近年来, 不少研究已经为 DTI 早期、定量诊断 CSM 提供了有力证据, 但 DTI 参数值与 CSM 患者的严重程度是否一致仍存在较大争议^[8-10]。本研究选取 20 例临床诊断为 CSM 且 MRI 上颈脊髓有明显压迫的患者作为观察对象, 同时招募 42 例健康成人作为对照, 观察 CSM 患者颈脊髓 DTI 参数值的变化情况, 探讨其与颈脊髓神经功能(改良 JOA 评分)的相关性。

1 资料与方法

1.1 研究对象

观察组纳入标准: 2011 年 2 月~2015 年 2 月在我院脊柱外科就诊, 参考 1992 年全国颈椎病专题研讨会制定的颈椎病诊断标准^[11]诊断为 CSM, 且 MRI 上颈脊髓存在明显高信号, 既往均无神经系统或者影响神经系统疾病的患者, 其中男 12 例, 女 8 例, 年龄 34~69 岁(53.4 ± 13.2 岁); 病程 3~74 个月。病变节段: C4/5 2 例, C5/6 6 例, C6/7 2 例, C3/4 和 C4/5 两节段 2 例, C4/5 和 C5/6 两节段 2 例, C5/6 和 C6/7 两节段 4 例, C3/4、C4/5 和

C5/6 三节段 2 例。选择健康志愿者作为对照组, 入选标准为: (1) 临床上无明确神经系统症状及阳性体征; (2) 既往均无神经系统或影响神经系统的疾病; (3) 行颈椎 MRI 检查, 有矢状位 T1WI FLAIR (fluid attenuated inversion recovery)、FRFSE-XL (fast recovery fast spin echo-accelerated) T2WI 和横断位 FRFSE-XL T2WI、DTI, 由未参加本研究的两位高年资影像诊断医师观察并做出判断, 将两位医师均认为无异常的受检者作为颈脊髓中未发现异常信号。共纳入 42 例志愿者, 其中男 22 例, 女 20 例, 年龄 24~69 岁(51.2 ± 9.7 岁)。健康志愿者与患者的年龄相匹配。所有志愿者均签署知情同意书。

1.2 常规 MRI 及 DTI 扫描

常规 MRI 扫描及 DTI 扫描均采用 GE 公司 Signa Excite 超导型 1.5T 磁共振机扫描, 应用 8 通道脊柱线圈。首先使用 FR-FSE 序列完成 T2WI 矢状面和横断面扫描, FSE 序列完成 T1WI 矢状位扫描。颈脊髓 DTI 扫描参数如下: (1) 矢状面 T2WI: TR 3000ms, TE 99ms, 矩阵 320×224 , NEX=2; (2) 矢状面 T1WI: TR 410ms, TE 9.9ms, 矩阵 320×192 , NEX=3; (3) 横断面 T2WI: TR 3500ms, TE 117ms, 层厚 4mm, 层间距 0.5mm, 矩阵 288×192 , NEX=3。DTI 扫描与常规扫描定位相同, 采取单次激发自旋回波平面回波成像(single-shot spin echo echo-planar image, SS-SE-EPI)技术, 弥散敏感梯度取 15 个不同方向, TR 6000ms, TE 85ms, 层厚 6mm, 层间距 0mm, FOV $240\text{mm} \times 240\text{mm}$, 采集矩阵为 128×128 ; 共扫 21 层。弥散加权系数(b)分别取 0 和 500s/mm^2 , 扫描结束后每一层面共获取 16 幅图像, 第 1 幅为 $b=0$ 时的图像, 其余 15 幅为 $b=500\text{s/mm}^2$ 时不同梯度方向的图像。

1.3 图像处理及测量指标

全部数据存储在 GE 公司提供的 SUN 图形工作站内。采用 Functool 软件进行后处理, 处理后的每一个层面分别获得 ADC 图和 FA 图 (图 1、

2)。以 MRI T2WI 矢状面作为参考,对照组选择在 C2/3~C6/7 各节段对应颈脊髓组织放置感兴趣区 (regions of interest, ROI) 测量各向异性分数 (FA) 值和表观扩散系数 (ADC) 值,每个节段均选择 5 个 ROI 放置在白质区域,尽量避开灰质、中央管及脑脊液,并取平均值为最终所测值;CSM 组 ROI 放置于 T2WI 高信号最显著层面进行测量,在高信号区随机选择 5 个 ROI 进行测量,取平均值,对所有受检者的颈脊髓分别行颈脊髓纤维束示踪成像 (FT)。ADC 值及 FA 值由 Functool 软件测量并显示结果。由两位专科医师对 CSM 患者进行颈椎改良 JOA 评分 (modified Japanese Orthopedic Association scale, mJOA),取两位医师的平均值作为每位患者的 mJOA 评分。

1.4 统计学分析

应用 SPSS 18.0 软件进行统计学分析,采用 Kolmogorov-Smirnov 检验来验证连续定量数据的正态性。两组年龄的比较采用随机样本 t 检验,

ADC 值及 FA 采用均数 $\pm$ 标准差表示,对照组颈脊髓不同节段的 ADC 值和 FA 值比较采用单因素方差分析,两两比较采用 LSD- t 检验;两组的颈脊髓 ADC 值和 FA 值的比较采用随机样本 t 检验进行统计学分析, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。采用 Pearson 检验对 CSM 组的 mJOA 评分与颈脊髓的 ADC 值、FA 值分别进行相关性分析。

2 结果

对照组颈脊髓不同椎间盘层面的 ADC 值和 FA 值见表 1,颈脊髓 ADC 值自 C2/3~C6/7 节段呈上升趋势,而 FA 值呈下降趋势 (ADC: $F=3.546$, $P=0.008$; FA: $F=13.82$, $P<0.001$); C2/3 节段颈脊髓的 ADC 值较 C5/6 和 C6/7 节段明显低,而 FA 值明显高 ($P<0.05$); 其他各节段之间的 ADC 值和 FA 值无统计学差异 ($P>0.05$)。

因 CSM 组患者病变节段不涉及 C2/3 节段,对照组 C3/4~C6/7 节段无显著性差异,将对照组

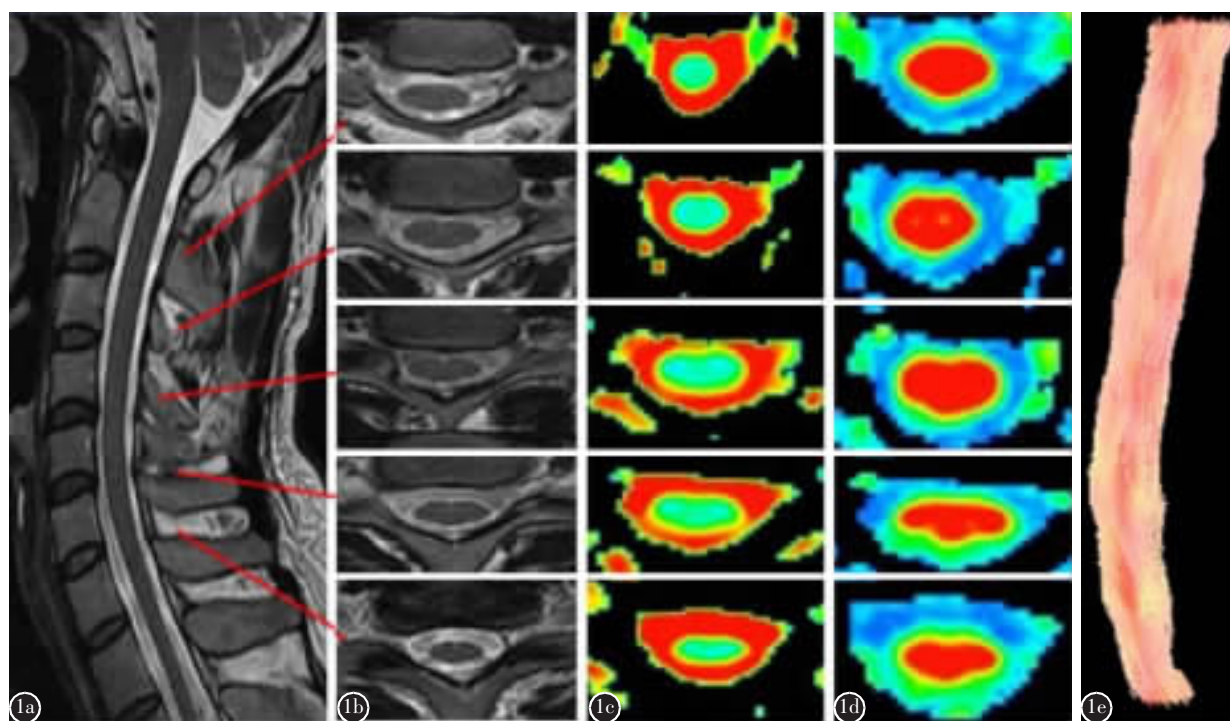


图 1 对照组正常人 a、b 颈脊髓 MR T2WI 矢状位及横断位可见各节段颈椎间盘信号良好,颈脊髓无受压; c、d ADC 图和 FA 图可见颈脊髓各节段信号呈均匀浅绿色,边缘光滑 e 神经纤维束成像图可见颈脊髓饱满,各水平无明显狭窄

Figure 1 A healthy volunteer a, b sagittal and axial images showed normal signal intensity of the disc and no compression of the cervical spinal cord c, d ADC and FA maps showed uniform distribution of color in the spinal cord and round rim e Fiber tractography showed no stenosis of the cord (FA, fractional anisotropy; ADC, apparent diffusion coefficient)

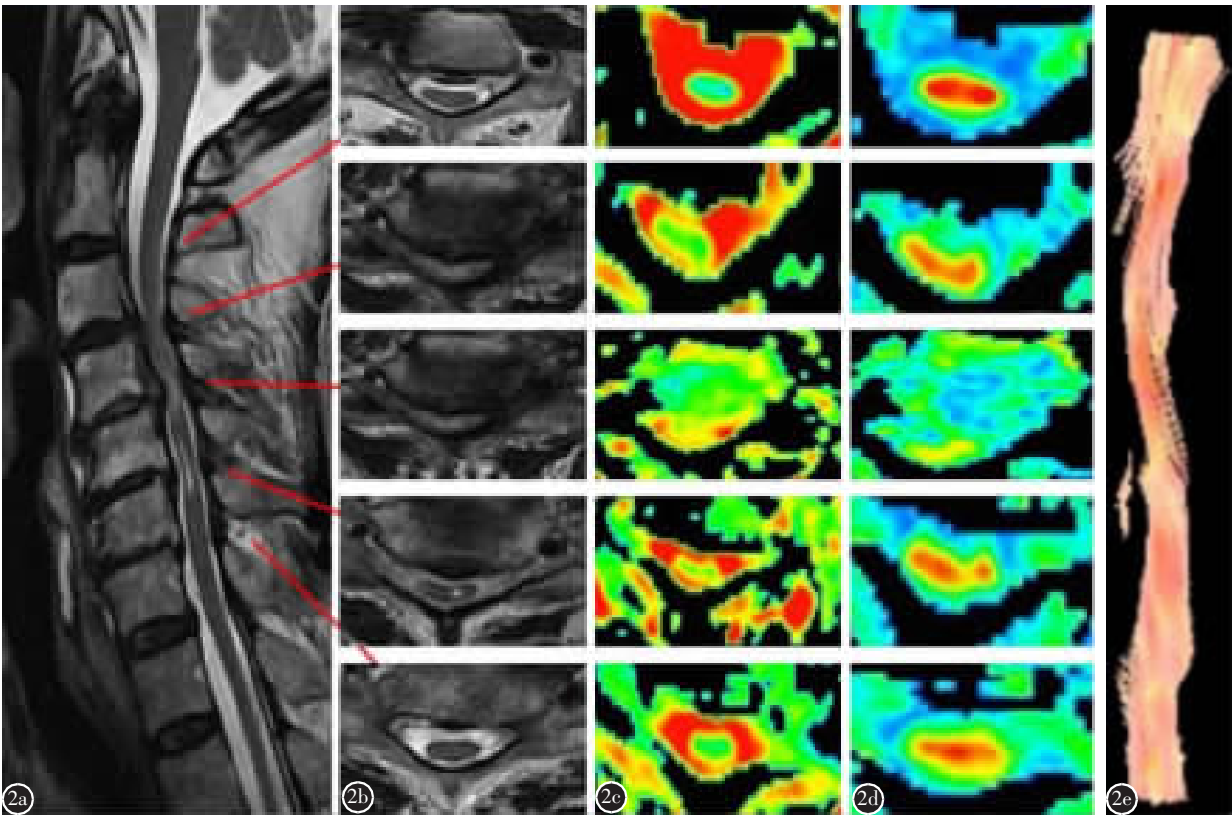


图 2 患者男,48 岁,脊髓型颈椎病 a、b 颈脊髓 MR T2WI 矢状位和横断位可见 C3/4、C4/5 及 C5/6 节段颈脊髓明显受压,相应水平可见脊髓高信号 c、d ADC 和 FA 图可见 C3/4、C4/5 及 C5/6 节段脊髓面积变小,且可见明显斑片状高信号 e 神经纤维束成像图可见 C4/5 及 C5/6 节段脊髓明显变窄

Figure 2 A 48-year-old man with CSM a, b High magnification axial images and MI T2-weighted images showed severe stenosis from C3 to C5, and high signal intensity T2-weighted images(T2HSI) were also observed c, d ADC and FA maps showed decrease of sectional area of the spinal cord from C3/4 to C5/6, and also patchy T2HSI e Obvious spinal cord compression at the level of C4/5 and C5/6 was observed in fiber tractography(FT)

C3/4 到 C6/7 节段的颈脊髓 ADC 和 FA 值取平均值作为对照,两组颈脊髓 ADC 和 FA 值见表 2。CSM 组的 FA 值与对照组比较显著性减小 ($P<0.001$),ADC 值与对照组比较显著性增加 ($P<$

表 1 对照组颈脊髓各椎间盘层面表观弥散系数(ADC)及各向异性分数(FA)

Table 1 ADC and FA at different levels in normal cervical spinal cord		
	表观弥散系数 ADC($\times 10^{-3}\text{mm}^2/\text{s}$)	各向异性分数 FA
C2/3	1.21 $\pm$ 0.14	0.68 $\pm$ 0.07
C3/4	1.29 $\pm$ 0.27	0.67 $\pm$ 0.06
C4/5	1.32 $\pm$ 0.34	0.65 $\pm$ 0.09
C5/6	1.39 $\pm$ 0.30 ^①	0.59 $\pm$ 0.07 ^①
C6/7	1.40 $\pm$ 0.26 ^①	0.59 $\pm$ 0.08 ^①

注:①与 C2/3 节段比较 $P<0.05$
Note: Compared with C2/3, $P<0.05$

0.001)。通过正态性检验证实 CSM 组患者颈椎 mJOA 评分、颈脊髓的 ADC 值和 FA 值均呈正态性分布,应用 Pearson 检验分别对 CSM 患者的 mJOA 评分与颈脊髓的 ADC 值、FA 值进行相关性分析,结果显示 CSM 患者颈脊髓的 ADC 值与颈椎 mJOA 评分无显著相关性 ($r=-0.287, P=0.220$),而颈脊髓的 FA 值与 mJOA 评分存在显著

表 2 CSM 患者和健康志愿者颈脊髓 ADC 值、FA 值比较
Table 2 Comparison of ADC and FA values in the cervical spinal cord between CSM patients and healthy volunteers

	CSM 组 CSM patients	对照组 Volunteers	P 值 P value
ADC($\times 10^{-3}\text{mm}^2/\text{s}$)	2.03 $\pm$ 0.51	1.35 $\pm$ 0.25	<0.001
FA	0.42 $\pm$ 0.07	0.62 $\pm$ 0.05	<0.001

性正相关($r=0.359, P=0.005$)(图 3)。

3 讨论

3.1 常规 MRI 评价脊髓慢性压迫损伤的不足

CSM 是临床较为严重的颈椎病,目前影像学主要依靠常规 MRI 显示的脊髓受压程度及 T2WI 高信号来判断脊髓的损伤程度。尽管常规 MRI 可以清晰显示脊髓的形态和信号的改变,但对于脊髓轻度变性和微结构的改变敏感性较低,难以用来评价脊髓的功能状态,而且不能定量评价脊髓微结构的改变。一方面是因为尽管脊髓致压的程度与临床表现存在一定程度的相关性,但两者并不完全相符,一些患者脊髓受压程度很重但临床症状很轻,有些患者脊髓受压程度较轻但临床症状较重^[12];另一方面, MRI T2WI 高信号诊断脊髓损伤的敏感性并不高,仅约 15%~65%,而且一般出现在病程发展到较晚期的患者,关于其形成的机制及临床意义也还存在不少争议^[13,14]。动物实验研究发现,常规 MRI 对早期的脊髓病变不能显示,对病情发展过程中的一些细微改变也不能显示^[15,16]。因此,有必要探寻一种敏感、无创且更加准确的方法来评价脊髓病变尤其是微小结构的改变是非常重要的。

3.2 DTI 的诊断价值及正常脊髓 DTI 特点

DTI 成像利用组织中水分子扩散运动存在各向异性的原理,从多个方向对其进行量化,从而反

映活体组织细微结构和功能的改变。目前常用的 DTI 量化参数 ADC 反映水分子在各个方向上的平均扩散能力,而 FA 值是扩散张量的各向异性成分与整个扩散张量的比值,是各向异性的常用指标,代表了白质纤维束对水分子扩散的限制以及髓鞘化的程度^[17-23]。

近年来,DTI 用于人体脊髓的研究逐渐增多,一些研究者发现正常人 C2/3 节段水平脊髓的 FA 值较其他节段高,而 ADC 值无显著性差异,原因可能与脊髓中灰白质的比例有关^[24,25],因脊髓的灰质各向异性明显低于白质,灰质含量越高,则 FA 值越低。本研究发现,健康人群颈脊髓的 ADC 值自 C2/3 到 C6/7 节段呈上升趋势,而 FA 值呈下降趋势,C2/3 节段颈脊髓的 ADC 值较 C5/6 和 C6/7 节段明显低,而 FA 值明显高。与部分文献研究结果相一致^[26,27]。Bosma 等^[28]测量了 9 例健康成人的颈段、胸段及腰段脊髓的平均扩散率和 FA 值,发现各节段脊髓的平均扩散率无明显差异,只有腰段脊髓的 FA 值与其他部位脊髓有差异。但目前关于全脊髓的 DTI 研究仍然较少,相关数据缺乏,因此全脊髓的 DTI 参数是否类似还存在一定争议。

3.3 CSM 患者的 DTI 参数特点

传统 MRI 上 T2 像高信号无法量化脊髓受损的严重程度,而在 T2 像尚未出现高信号时,DTI 检查就可以显示出脊髓的病变并能量化脊髓受损

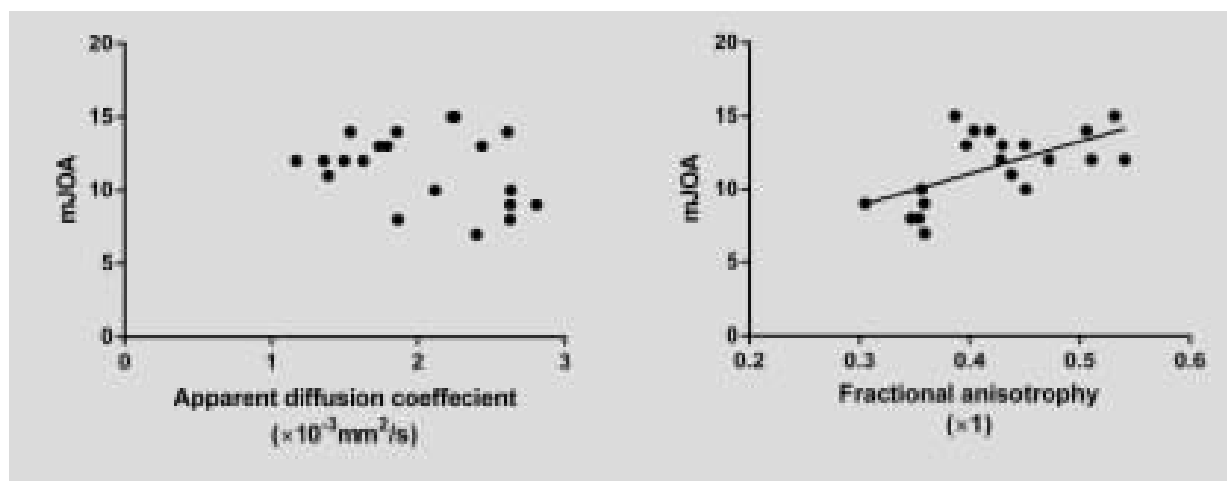


图 3 CSM 患者颈脊髓 ADC 值和 FA 值与 mJOA 评分的相关性分析[左图 ADC 值与 mJOA 评分无显著相关性($r=-0.287, P=0.220$);右图 FA 值与 mJOA 呈显著性正相关($r=0.359, P=0.005$)]

Figure 3 Scatter-plots showing the correlation between DTI parameters and mJOA scores in CSM subjects[There was no linear correlation between ADC value and mJOA score in the HSI-CSM subjects ($r=-0.287, P=0.220$), while FA values showed a linear correlation with mJOA score($r=0.359, P=0.005$)]

程度。Hori 等^[29]对 14 例有临床症状但常规 MRI 检查未见异常高信号的 CSM 患者进行 DTI 扫描,并与正常组人群进行对比,发现 CSM 患者颈脊髓的 ADC 值升高,而 FA 值则明显降低。陈细香等^[30]也发现约 90% 患者脊髓受压节段的 ADC 值较其他节段升高,约 70% 的患者脊髓受压节段 FA 值较其他节段降低。

本研究结果与上述类似,CSM 患者颈脊髓的 ADC 值明显高于对照组,FA 值明显低于对照组。由于本组患者均为 CSM 慢性压迫期,其颈脊髓高信号区水分子扩散强度及各向异性的改变可能与退变的椎间盘、韧带等慢性压迫有关,压迫导致颈脊髓的慢性缺血缺氧,细胞膜的通透性也有明显增加,部分细胞膜和髓鞘受到破坏,出现细胞外水肿和/或纤维数目的减少,细胞外间隙增大,水分子沿着神经纤维束方向的各向异性扩散程度降低,垂直于纤维束方向的扩散程度增加,即各向同性程度增加,导致 ADC 值的升高和 FA 值的降低。另外,与脑 DTI 指标变化的原因类似,颈脊髓受到慢性压迫时,椎管内的压力增大,可能出现脑脊液异常活动,导致 ADC 值升高、FA 值降低^[31]。

尽管 DTI 对于诊断 CSM 有较高的敏感性,但 DTI 参数值与 CSM 患者临床症状的严重程度是否相关仍然存在较大争议。Budzik 等^[32]发现 CSM 患者受压颈脊髓的 FA 值与临床评分有线性相关;Jones 等^[33]对 30 例 CSM 患者行 DTI 扫描,也发现 CSM 患者颈脊髓的 FA 值与 mJOA 评分存在显著相关性。本研究结果证实,DTI 可以量化颈脊髓慢性损伤时内部水分子弥散增强的程度和各向异性降低的程度,并且颈椎 mJOA 评分与 FA 值呈线性相关。但目前相关文献仍然较少,且样本数均较少,因此 DTI 参数值是否可以作为有症状的 CSM 患者的生物学标志仍然需要更多高质量的研究进一步证实。

本研究结果显示,正常人群颈脊髓的 ADC 值自 C2/3 到 C6/7 节段呈上升趋势,而 FA 值呈下降趋势,C2/3 节段颈脊髓的 ADC 值较 C5/6 和 C6/7 节段明显低,而 FA 值明显高。CSM 患者颈脊髓的 ADC 值较正常人群高,而 FA 值则明显减小,且颈椎 mJOA 评分与 FA 值呈正相关。但本研究存在以下不足:(1)采用的是 1.5T 的磁共振机,在影像清晰度上较 3.0T 的磁共振机还有一定差距,图像放大时会存在一定程度的失真,会对 DTI 参数的

测量造成影响;(2)脊髓的横截面积相对较小,尤其是颈脊髓存在明显压迫时,面积更小,虽然我们努力通过控制 ROI 面积来精确测量 DTI 参数,但受分辨率所限,仍然会存在一定误差;(3)DTI 的测量对患者及组织的运动非常敏感,颈脊髓周围存在脑脊液的波动、血管搏动,且颈椎前方气管、食管都存在运动,造成磁敏感尾影及运动尾影,影响 DTI 成像的质量及测量结果;(4)CSM 组患者病史长短不一,疾病严重程度不一,病变节段不一,会对颈脊髓的 DTI 值造成影响,在进行相关性分析时,可能存在一定程度的偏倚。

4 参考文献

- Henderson FC, Geddes JF, Vaccaro AR, et al. Stretch-associated injury in cervical spondylotic myelopathy: new concept and review[J]. Neurosurgery, 2005, 56(5): 1101-1113.
- Kim DH, Vaccaro AR, Henderson FC, et al. Molecular biology of cervical myelopathy and spinal cord injury: role of oligodendrocyte apoptosis[J]. Spine J, 2003, 3(6): 510-519.
- Yamaura I, Yone K, Nakahara S, et al. Mechanism of destructive pathologic changes in the spinal cord under chronic mechanical compression[J]. Spine, 2002, 27(1): 21-26.
- Baptiste DC, Fehlings MG. Pathophysiology of cervical myelopathy[J]. Spine J, 2006, 6(Suppl): S190-197.
- Boldin C, Raith J, Fankhauser F, et al. Predicting neurologic recovery in cervical spinal cord injury with postoperative MR imaging [J]. Spine, 2006, 31(5): 554-559.
- 李宏, 李淳德, 刘宪义, 等. 脊髓内 MRI T2WI 高信号脊髓型颈椎病的临床特点及手术效果[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2009, 19(4): 250-254.
- Ries M, Jones RA, Dousset V, et al. Diffusion tensor MRI of the spinal cord [J]. Magn Reson Med, 2000, 44(6): 884-92.
- Wang KY, Idowu O, Thompson CB, et al. Tract-specific diffusion tensor imaging in cervical spondylotic myelopathy before and after decompressive spinal surgery: preliminary results[J]. Clin Neuroradiol, 2015, [Epub ahead of print]
- Guan X, Fan G, Wu X, et al. Diffusion tensor imaging studies of cervical spondylotic myelopathy: a systemic review and meta-analysis[J]. PLoS One, 2015, 10(2): e0117707.
- Ellingson BM, Salamon N, Grinstead JW, et al. Diffusion tensor imaging predicts functional impairment in mild-to-moderate cervical spondylotic myelopathy[J]. Spine J, 2014, 14(11): 2589-2597.
- 孙宇, 李贵存. 第二届颈椎病专题座谈会纪要[J]. 解放军医学杂志, 1994, 19(2): 156-158.
- Bednarik J, Kadanka Z, Dusek L, et al. Presymptomatic spondylotic cervical myelopathy: an updated predictive model [J]. Eur Spine J, 2008, 17(3): 421-31.
- 孙晓堂, 党耕町. MRI 在脊髓型颈椎病诊断中的价值[J]. 中

- 国矫形外科杂志, 2002, 9 (7): 696-698.
14. Facon D, Ozanne A, Fillard P, et al. MR diffusion tensor imaging and fiber tracking in spinal cord compression[J]. *AJNR*, 2005, 26(6): 1587-1594.
15. Demir A, Ries M, Moonen CTW, et al. Diffusion weighted MRI maging wit h apparent diffusion coefficient and apparent diffusion tensor maps in cervical spondylotic myelopathy [J]. *Radiology*, 2003, 229(1): 37-43.
16. Schwarts ED, Hackney DB. Diffusion-weighted MRI and the evaluation of spinal cord asonal integrity following injury and treatment[J]. *Exp Neurol*, 2003, 184(2): 570-589.
17. Nevo U, Hauben E, Yoles E, et al. Diffusion anisotropy MRI for quantitative assessment of recovery in injured rat spinal cord [J]. *Magn Reson Med*, 2001, 45(1): 1-9.
18. Vedantam A, Jirjis MB, Schmit BD, et al. Diffusion tensor imaging of the spinal cord insights from animal and human studies[J]. *Neurosurgery*, 2014, 74(1): 1-8.
19. Basser PJ. Inferring microstructural features and thephysiological state of tissues from diffusion-weighted images [J]. *NMR Biomed*, 1995, 8(7-8): 333-344.
20. Basser PJ, Pierpaoli C. Microstructural and physiologicalfeatures of tissues elucidated by quantitative-diffusion-tensor MRI[J]. *J Magn Reson B*, 1996, 111: 209-219.
21. Pierpaoli C, Basser PJ. Toward a quantitative assessmentof diffusion anisotropy[J]. *Magn Reson Med*, 1996, 36(6): 893-906.
22. Ellingson BM, Ulmer JL, Schmit BD. Gray and white matter delineation in the human spinal cord using diffusion tensorimaging and fuzzy logic[J]. *Acad Radiol*, 2007, 14 (7): 847-858.
23. Ennis DB, Kindlmann G. Orthogonal tensor invariants andthe analysis of diffusion tensor magnetic resonance images [J]. *Magn Reson Med*, 2006, 55(1): 136-146.
24. Ellingson BM, Salamon N, Holly LT. Advances in MR imaging for cervical spondylotic myelopathy [J]. *Eur Spine J*, 2015, 24(Suppl 2): 197-208.
25. Van Hecke W, Leemans A, Sijbers J, et al. A tracking-based diffusion tensor imaging segmentation method for the detection of diffusion-related changes of the cervical spinal cord with aging[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2008, 27 (5): 978-991.
26. Wheeler-Kingshott CA, Hickman SJ, Parker GJ, et al. Investigating cervical spinal cord structure using axial diffusion tensor imaging[J]. *Neuroimage*, 2002, 16(1): 93-102.
27. Bosma RL, Stroman PW. Characterization of DTI indices in the cervical, thoracic, and lumbar spinal cord in healthy humans[J]. *Radiol Res Pract*, 2012, 2012: 143705. Published online.
28. Bosma RL, Stroman PW. Characterization of DTI indices in the cervcal, thoracic and lumbar spinal cord in healthy humans[J]. *Radiol Res Pract*, 2012, 2012: 143705.
29. Hori M, Okubo T, Aoki S, et al. Line scan diffusion tensor MRI at low magnetic field strength: feasibility study of cervical spondylotic myelopathy in an early clinical stage [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2006, 23(12): 183-188.
30. 陈细香, 魏文洲, 郑晓华, 等. DTI 在脊髓型颈椎病中的应用价值[J]. *中国医学影像技术*, 2007, 23(2): 1860-1862.
31. Stoodley MA, Jones NR, Brown CJ. Evidence of rapid fluid flow from the subarachnoid space into the spinal cord central canal in the rat[J]. *Brain Res*, 1996, 29(2): 155-164.
32. Budzik JF, Balbi V, Le Thuc V, et al. Diffusion tensor imaging and fibre tracking in cervical spondylotic myelopathy [J]. *Eur Radiol*, 2011, 21(2): 426-433.
33. Jones DK, Knsche TR, Turner R. White matter integrity, fiber count, and other fallacies: the do's and don'ts of diffusion MRI[J]. *Neuroimage*, 2013, 73: 239-254.
- (收稿日期:2016-07-16 修回日期:2016-10-27)
(英文编审 唐翔宇/贾丹彤)
(本文编辑 卢庆霞)