

DOI:10.3724/SP.J.1008.2015.00268

弥散张量成像参数比值对脊髓型颈椎病临床症状及预后的评估价值

王 琨^{1△}, 陈士跃^{2△}, 陈 智¹, 张 帆¹, 宋庆鑫¹, 侯藏龙¹, 唐沂星¹, 郝 强², 沈洪兴^{1*}

1. 第二军医大学长海医院脊柱外科, 上海 200433
2. 第二军医大学长海医院影像医学科, 上海 200433

[摘要] **目的** 探讨磁共振(MR)弥散张量成像(DTI)的表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)比值、各向异性分数(fractional anisotropy, FA)比值对脊髓型颈椎病(CSM)的临床症状及预后的评估价值。**方法** 对入选的50例CSM患者及36例正常对照人群进行MRI及DTI检查,选择脊髓白质前索、侧索、后索和中央灰质4个部位作为感兴趣区(ROD),CSM组测量和计算脊髓受压最重平面与C_{1/2}平面的ADC比值和FA比值,正常对照人群测量和计算C_{3/4}、C_{4/5}、C_{5/6}、C_{6/7}平面与C_{1/2}平面的ADC比值、FA比值。对比正常对照人群不同节段、不同年龄间DTI参数比值的差异;对比DTI参数(ADC、FA)和参数比值(ADC比值、FA比值)与CSM患者临床症状(JOA评分)及预后(JOA改善率)相关性的差异;CSM患者按术前JOA评分分为轻度损伤组、中度损伤组、重度损伤组,比较各组间DTI参数比值的差异;按术后JOA改善率分为优、中、差3组,比较各组间DTI参数比值的差异。**结果** 正常对照人群不同年龄组间4个部位ADC比值、FA比值间差异无统计学意义;C_{3/4}、C_{4/5}、C_{5/6}、C_{6/7}各平面间脊髓白质前索、侧索、后索ADC比值、FA比值差异均有统计学意义(P<0.05)。相关分析显示:脊髓前索、侧索、后索和中央灰质的ADC比值、FA比值与JOA评分、JOA改善率相关性优于ADC值、FA值(P<0.05或P<0.01),且FA比值优于ADC比值。与正常对照人群相比,轻度损伤组、中度损伤组、重度损伤组患者ADC比值逐渐升高,FA逐渐降低,差异有统计学意义(P<0.05);与正常对照人群相比,改善率为优、中、差3组CSM患者ADC比值逐渐升高,FA比值逐渐降低,差异有统计学意义(P<0.05)。**结论** DTI参数比值可消除年龄因素的影响,与CSM患者症状及预后有更优的相关性,可能具有较好的CSM临床症状及预后评估价值。

[关键词] 脊髓型颈椎病;弥散张量成像;表观扩散系数;各向异性分数

[中图分类号] R 681.531.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2015)03-0268-08

Value of magnetic resonance diffusion tensor imaging ratios in evaluating clinical symptoms and prognosis of cervical spondylotic myelopathy

WANG Kun^{1△}, CHEN Shi-yue^{2△}, CHEN Zhi¹, ZHANG Fan¹, SONG Qing-xin¹, HOU Cang-long¹, TANG Yi-xing¹, HAO Qiang², SHEN Hong-xing^{1*}

1. Department of Orthopedics, Changhai Hospital, Second Military Medical University, Shanghai 200433, China
2. Department of Radiology, Changhai Hospital, Second Military Medical University, Shanghai 200433, China

[Abstract] **Objective** To explore the value of the apparent diffusion coefficient (ADC) ratio and fractional anisotropy (FA) ratio of magnetic resonance (MR) diffusion tensor imaging (DTI) in evaluating the clinical symptoms, prognosis of cervical spondylotic myelopathy (CSM). **Methods** Thirty-six healthy subjects and fifty CSM patients were involved and received MRI examination. Regions of interest (ROIs) were selected in the ventral funiculus (VF), lateral funiculi (LF), dorsal funiculus (DF), and central gray matter (GM) for ADC and FA measurements. In the control group, ADC and FA ratios were calculated using the original values at the C_{3/4}, C_{4/5}, C_{5/6}, and C_{6/7} levels to divide the corresponding values at their C_{1/2} levels. In the CSM group, ADC and FA ratios were calculated using the ADC and FA values at the most compressed levels to divide the corresponding values at their C_{1/2} levels. In the control group, the variances of the two ratios were compared between different cervical levels and ages. CSM patients were divided into mild, moderate, and severe group according to the preoperative

[收稿日期] 2014-07-08 **[接受日期]** 2014-12-12

[基金项目] 第二军医大学长海医院“1255”计划基金(CH12550900)。Supported by “1255” Project of Changhai Hospital of Second Military Medical University (CH12550900).

[作者简介] 王 琨, 硕士, 住院医师。E-mail: wk52693158@126.com; 陈士跃, 主管技师。E-mail: csy19850319@sina.cn

△共同第一作者 (Co-first authors).

* 通信作者 (Corresponding author). Tel: 021-31161697, E-mail: shenhxgk@126.com

Japanese Orthopaedic Association (JOA) scoring system, and were divided into well, moderate, and poor group according to the postoperative JOA recovery rates. Correlations between DTI parameters, DTI ratios of the VF, LF, DF, and GM of the CSM patients and the JOA scores, JOA recovery rates were assessed among different clinical symptom subgroups and prognosis subgroups. **Results** In control group, DTI ratios (ADC ratios and FA ratios) in VF, LF, DF, and GM were significantly different between C_{3/4}, C_{4/5}, C_{5/6}, and C_{6/7} levels ($P < 0.05$), but not found between different age subgroups. Correlations between DTI ratios of the VF, LF, DF, and GM and JOA scores, JOA recovery rates were significantly superior than the correlations between DTI parameters and JOA scores, JOA recovery rates ($P < 0.05$ or $P < 0.01$), with the FA ratio being superior to the ADC ratio. Compared with normal control group, the ADC ratios increased gradually in order and FA ratios decreased gradually in the mild, moderate, and severe injury subgroups ($P < 0.05$). Compared with normal control group, the ADC ratios increased gradually in order and FA ratios decreased gradually in the well, moderate, and poor recovery subgroups ($P < 0.05$). **Conclusion** DTI ratios might eliminate the influence of age in evaluating the clinical symptoms and prognosis of CSM. Therefore DTI ratios, compared with DTI parameters, may better evaluate the clinical symptoms, prognosis of CSM.

[Key words] cervical spondylotic myelopathy; diffusion tensor imaging; apparent diffusion coefficient; fractional anisotropy

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2015, 36(3): 268-275]

脊髓型颈椎病 (cervical spondylotic myelopathy, CSM) 是一种颈椎退变性疾病, 由颈椎及相邻软组织退变导致颈髓慢性受压所引起^[1-2]。MRI 检查是诊断 CSM 的常规手段, 可显示椎管是否狭窄、脊髓受压的程度和信号的改变。脊髓 T₁ 加权像低信号预示着损伤严重、临床预后较差, 但是这种情况出现较少且缺乏敏感性^[1]; 脊髓 T₂ 加权像上高信号改变较常出现, 反映了脊髓非特异性水肿、炎症反应、缺血等急性改变和脊髓长期受压出现的软化、坏死及胶质增生等多种病理状态^[2], 但 T₂ 高信号与临床表现及手术预后的相关性目前仍存在较大争议^[3]。

弥散张量成像 (diffusion tensor imaging, DTI) 是在弥散加权成像 (diffusion weighted imaging, DWI) 的基础上发展而来的一种新技术, 主要用于反映活体组织细微结构和功能的改变, 评价参数包括表观弥散系数 (apparent diffusion coefficient, ADC) 和各向异性分数 (fractional anisotropy, FA), 并且可利用纤维束示踪成像 (diffusion tensor tractography, DTT) 技术显示白质纤维束的三维形态改变, 是目前唯一可无创显示活体神经纤维束的方法。研究发现, DTI 较常规 MRI 对 CSM 的诊断和预后预测价值更高^[4-5], 但尚无公认的测量方法, 目前的研究均选择脊髓横截面的全部或大部分作为感兴趣区域 (region of interest, ROI) 进行参数测量, 得到的参数值是白质和灰质的混合值。研究^[5]显示, 脊髓中白质纤维束各向异性较高, 而灰质各向异性较低, 并有研究^[6]发现 DTI 参数和年龄间呈明显相关性, 且不同颈脊髓平面的参数之间也存

在一定差异。因此直接将 CSM 不同年龄、不同节段之间的 DTI 参数进行对比分析显然并不合适。

本研究采用病变节段的 DTI 参数与自身 C_{1/2} 平面 DTI 参数的比值进行对比分析, 以期能消除年龄和病变节段不同所造成的偏倚, 为临床应用研究提供帮助。

1 资料和方法

1.1 一般资料 纳入 2012 年 3 月至 2013 年 3 月我科收治的脊髓型颈椎病患者 62 例, 排除有颈腰椎外伤、神经系统疾病及手术史的患者, 入院术前接受 MRI 检查和 DTI 检查。招募 40 例健康志愿者作为正常对照组, 排除有颈腰椎外伤、脊柱手术或其他神经系统病史者, 接受常规 MRI 和 DTI 检查, 常规 MRI 如显示脊髓有受压则予以排除。患者及志愿者在行 MRI 检查前均签署知情同意书。本研究通过第二军医大学长海医院医学伦理委员会审查并批准。

所有患者均由同一高年资主任医师进行手术, 神经功能评估采取 JOA 评分, 术后随访并计算改善率: (术后 JOA - 术前 JOA) / (17 - 术前 JOA) × 100%。术前 JOA 评分按 ≤ 8 分为重度损伤, 9~12 分为中度损伤, 13~16 分为轻度损伤分成 3 组, 术后改善率按 0~34%、35%~67%、68%~100% 分成差、中、优 3 组。

1.2 MRI、DTI 成像与分析

1.2.1 扫描过程 GE HDxt Twinspeed 3.0 T 双梯度超导 MR 仪, 梯度场强为 40 mT/m, 切换率为 150 mT · m⁻¹ · ms⁻¹, 采用 NV-full 8 通道线圈。常规行矢状位及横轴位 T₁ WI 和 T₂ WI 扫描。矢状

位 flair-T₁ WI 序列,重复时间(repetition time, TR)/回波时间(echo time, TE) 3 200 ms /116.8 ms,层厚 3.0 mm,层间距 1.0 mm,视野(field of view, FOV) 24 mm×24 mm,矩阵 320×224, NEX 2。矢状位 FRFSE-T₂ WI 序列,TR/TE 2 698 ms/25.8 ms,层厚 3.0 mm,层间距 1.0 mm,FOV 240 mm×240 mm,矩阵 320×224, NEX 2。横轴位 FRFSE-T₂ WI 序列,TR/TE 3 200 ms/121 ms,层厚 4.0 mm,层间距 0.5 mm,带宽 41.7 kHz,FOV 180 mm×180 mm,矩阵 288×224, NEX 4。DTI 检查与常规横轴位扫描定位相同,采用单次激发自旋回波平面回波成像(echo planner imaging, EPI)序列,扩散加权系数 b 值为 1 000 s/mm²,扩散敏感梯度方向取 15,重复次数为 2,TR/TE 8 000 ms/87.6 ms,层厚 4.0 mm,层间距 0 mm,带宽 250 kHz,FOV 240 mm×240 mm,矩阵 130×128, NEX 2。DTI 扫描时间共 5 min。

1.2.2 图像处理及 ROI 选择 采用 GE Functool 9.4 软件对 DTI 数据进行后处理,用 Correct 程序对原始数据进行校正,以减少图像变形伪影。由 2 名影像科医师对 DTI 图像进行参数测量,对照组测量 C_{1/2}、C_{3/4}、C_{4/5}、C_{5/6}、C_{6/7} 共 5 个平面(图 1A),CSM 组测量 C_{1/2} 和受压程度最重的平面(图 1B),在 b0 图像上手工选择 ROI 测量 ADC 和 FA 值。白质的前索、侧索和后索以及中央灰质左右各划取 1 个 ROI 测量相应的 ADC 和 FA 值,每个层面的左右两个对称 ROI 取平均值^[7]。选择白质纤维 ROI 时尽量靠近脊髓内侧以避免周围脑脊液的影响。

两名影像科医师在每个部位各测量 2 次取平均值,得到的 2 个值再次取平均值作为最终参数值进行统计分析,ADC 值偏差超过 10⁻³ mm²/s,FA 值偏差超过 0.5,则由两名医师共同测量确定最后参数值。正常对照组计算 C_{3/4}、C_{4/5}、C_{5/6}、C_{6/7} 平面脊髓白质(white matter, WM)的前索(ventral funiculus, VF)、侧索(lateral funiculi, LF)、后索(dorsal funiculus, DF)及中央灰质(gray matter, GM)的 ADC 和 FA 值分别与自身 C_{1/2} 平面相应位置参数值的比值;CSM 组计算脊髓受压最大平面与 C_{1/2} 平面白质 VF、LF、DF 及 GM 的 ADC 比值、FA 比值(图 2)。

1.3 统计学处理 采用 SPSS 18.0 统计软件,正常对照组采用单因素方差分析比较不同平面、不同年龄分组间 ADC 比值、FA 比值的差异;正常对照组

脊髓白质前索、侧索、后索和中央灰质 4 个部位所有测量平面的 ADC、FA 比值作为整体,采用单因素方差分析比较不同部位间有无差异。线性相关分析比较 CSM 患者脊髓白质前索、侧索、后索和中央灰质 4 个部位 DTI 参数和 DTI 参数比值分别与 JOA 评分、JOA 改善率之间的相关性。JOA 分组、JOA 改善率分组和正常对照组间白质轴索、中央灰质的 ADC 比值、FA 比值采用单因素方差分析,并采用 Student-Newman-Keuls (SNK) 进行两两之间的组间比较。检验水准(α)为 0.05。

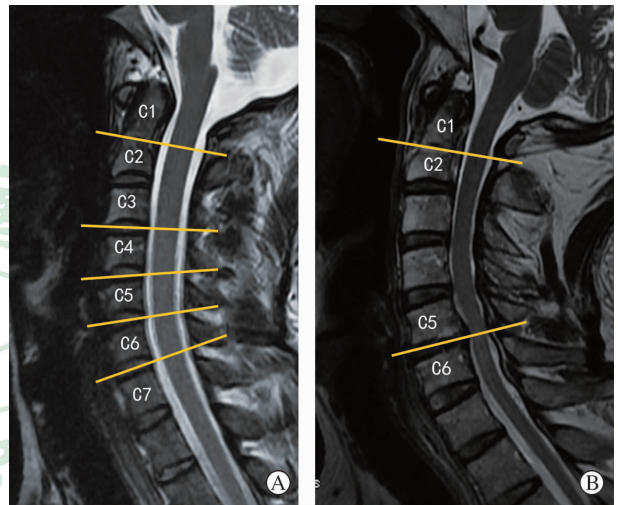


图 1 颈椎 MRI T₂ 加权矢状位图像

Fig 1 Sagittal MRI T₂ WI of cervical vertebra

A: In control group, ADC, FA ratios of the WM (VF, LF, and DF) to central GM were measured and calculated at the C_{3/4}, C_{4/5}, C_{5/6}, and C_{6/7} levels compared with C_{1/2} level, respectively; B: In CSM group, ADC, FA ratios of the WM (VF, LF, and DF) to central GM were measured and calculated at the most compressed levels (C_{5/6}) and the corresponding C_{1/2} levels. WM: White matter, GM: Gray matter, VF: Ventral funiculus, LF: Lateral funiculi, DF: Dorsal funiculus

2 结果

2.1 患者基本人口学资料及分组 排除颈腰椎外伤或手术史患者 6 例,排除神经系统疾病史患者 6 例,CSM 组最后共纳入 50 例,男 25 例、女 25 例,年龄 42~69 岁,平均年龄(57.2±3.2)岁。发病时间最短为 3 个月,最长为 25 个月,平均(9.7±1.4)个月。JOA 分组轻度组 14 例(男 5/女 9)、中度组 23 例(男 14/女 9)、重度组 13 例(男 6/女 7)。所有患者术后随访时间均在 1 年以上,JOA 改善率优 18 例

(男 9/女 9)、中 23 例(男 11/女 12)、差 9 例(男 5/女 4)。排除 MRI 提示脊髓压迫者 4 例,正常对照组共

纳入 36 例患者,男 22 例、女 14 例,年龄 20~77 岁,平均(51.3±2.7)岁。

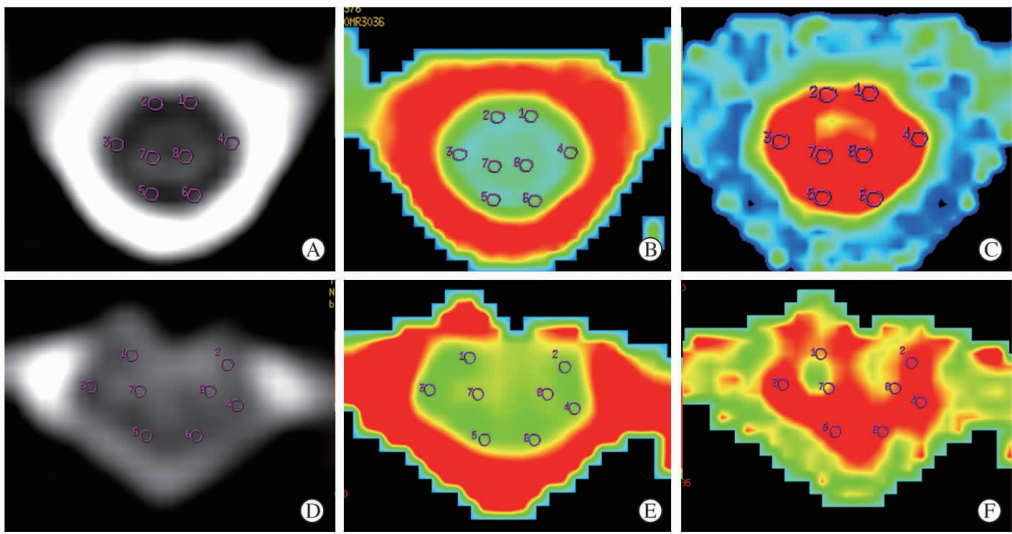


图 2 CSM 患者颈髓横截面 ROI 选择及数据分析

Fig 2 Measurement of the ROI selection of patient with CSM

A, B, and C were b0, ADC and FA figures at the C_{1/2} level of the patient shown in Fig 1B; D, E, and F were b0, ADC and FA figures at the C_{5/6} level of the patient shown in Fig 1B. Two ROIs were selected symmetrically in the WM (VF, LF, and DF) and central GM for ADC and FA measurements, and then the means of the two ROIs were used for further analysis. 1-8: No. of different ROIs. WM: White matter, GM: Gray matter

2.2 正常对照人群不同节段、年龄间 DTI 参数比值的比较

FA 比值差异均有统计学意义(表 2)。

2.2.1 年龄与 DTI 参数比值 正常对照人群不同年龄组间前索、侧索、后索和中央灰质 4 个部位的 ADC、FA 比值间差异无统计学意义(表 1)。

2.3 DTI 参数及参数比值与 CSM 患者临床症状及预后的相关性比较 线性相关分析结果(表 3)显示:脊髓前索、侧索、后索和中央灰质的 ADC 比值、FA 比值与 JOA 评分、JOA 改善率相关性优于 ADC 值、FA 值($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),且 FA 比值的相关性优于 ADC 比值。

2.2.2 脊髓节段与 DTI 参数比值 C_{3/4}、C_{4/5}、C_{5/6}、C_{6/7} 各个平面间脊髓白质前索、侧索、后索的 ADC、

表 1 正常对照人群不同年龄间 ADC 比值、FA 比值的比较

Tab 1 Comparison of ADC ratio and FA ratio among different age groups in the control group

	20-30 year (n=5)	31-40 year (n=6)	41-50 year (n=5)	51-60 year (n=7)	61-70 year (n=7)	>70 year (n=6)
ADC						
VF	0.978±0.059	1.007±0.067	0.965±0.060	0.958±0.038	0.969±0.041	0.974±0.054
LF	0.993±0.091	0.989±0.075	0.981±0.094	0.952±0.102	0.953±0.076	0.967±0.091
DF	0.966±0.022	0.989±0.029	0.965±0.016	0.975±0.018	0.961±0.018	0.958±0.018
GM	0.986±0.025	0.942±0.043	0.958±0.040	0.957±0.023	0.979±0.038	0.955±0.032
FA						
VF	1.012±0.083	0.995±0.089	0.990±0.045	0.994±0.065	1.001±0.050	1.041±0.096
LF	1.004±0.035	1.001±0.047	1.000±0.060	0.954±0.043	0.972±0.033	0.984±0.056
DF	0.930±0.040	0.956±0.037	0.932±0.045	0.991±0.038	1.001±0.029	0.983±0.024
GM	1.001±0.042	1.021±0.054	1.016±0.032	0.993±0.045	1.031±0.032	1.010±0.043

No significant differences of ADC ratio and FA ratio of the VF, LF, DF or GM are found among different ages in the control group

表 2 正常对照人群不同节段间 ADC 比值、FA 比值的比较

Tab 2 Comparison of ADC ratio and FA ratio among different levels in the control group

$n=36, \bar{x} \pm s$

	$C_{3/4}/C_{1/2}$	$C_{4/5}/C_{1/2}$	$C_{5/6}/C_{1/2}$	$C_{6/7}/C_{1/2}$
ADC				
VF	0.998±0.055	0.986±0.050	0.968±0.056	0.946±0.044*△
LF	1.019±0.092	0.969±0.083*	0.952±0.074*	0.918±0.077*△▲
DF	0.945±0.023	0.962±0.026	0.975±0.023*	0.974±0.016
GM	0.968±0.050	0.958±0.033	0.953±0.030	0.971±0.028
FA				
VF	1.017±0.082	1.014±0.077	1.008±0.075*△	0.991±0.069*△▲
LF	0.987±0.046	1.006±0.052	0.993±0.058	0.973±0.052△▲
DF	0.994±0.035	0.980±0.032	0.958±0.061*	0.949±0.034*△
GM	1.011±0.049	1.019±0.044	1.015±0.041	1.008±0.041

* $P<0.05$ vs $C_{3/4}/C_{1/2}$; △ $P<0.05$ vs $C_{4/5}/C_{1/2}$; ▲ $P<0.05$ vs $C_{5/6}/C_{1/2}$

表 3 CSM 患者 DTI 参数/参数比值与 JOA 评分及 JOA 改善率的相关系数对比

Tab 3 Correlation coefficients between ADC, FA and ADC, FA ratios, and JOA scores and JOA recovery rates

	JOA score				JOA recovery rate			
	ADC	ADC ratio	FA	FA ratio	ADC	ADC ratio	FA	FA ratio
VF	-0.760	-0.820**	0.784	0.830**	-0.276	-0.354**	0.319	0.435**
LF	-0.716	-0.748**	0.750	0.819**	-0.217	-0.281*	0.302	0.353*
DF	-0.625	-0.673**	0.705	0.731**	-0.324	-0.368**	0.334	0.410**
GM	-0.734	-0.823**	0.740	0.840**	-0.228	-0.324*	0.282	0.348*

* $P<0.05$, ** $P<0.01$ vs ADC or FA

2.4 不同临床症状及预后 CSM 患者 DTI 参数比值的比较

2.4.1 不同临床症状与 DTI 参数比值 结果(表 4)表明:与正常对照人群相比,轻度损伤组患者白质前索 ADC 比值升高,白质前索、中央灰质 FA 比值降低($P<$

0.05);与正常对照人群及轻度损伤组相比,中度损伤组白质前索、侧索和中央灰质 ADC 比值升高,FA 比值降低($P<0.05$);与其余 3 组相比,重度损伤组白质各轴索(前索、侧索、后索)和中央灰质的 ADC 比值均升高、FA 比值均降低,差异有统计学意义($P<0.05$)。

表 4 不同临床症状患者 DTI 参数比值的对比

Tab 4 Comparison of ADC ratio and FA ratio in the clinical symptom subgroups and control group

$\bar{x} \pm s$

Group	VF	LF	DF	GM
Control ($n=36$)				
ADC ratio	0.975±0.055	1.012±0.076	0.987±0.091	0.990±0.053
FA ratio	0.969±0.023	0.970±0.045	0.963±0.037	1.003±0.043
Mild ($n=14$)				
ADC ratio	1.071±0.038*	0.992±0.075	1.001±0.040	1.022±0.058
FA ratio	0.827±0.018*	0.991±0.016	0.975±0.017	0.838±0.020*
Moderate ($n=23$)				
ADC ratio	1.137±0.051*△	1.105±0.046*△	1.020±0.042	1.168±0.052*△
FA ratio	0.759±0.022*△	0.881±0.040*△	0.966±0.020	0.765±0.026*△
Severe ($n=13$)				
ADC ratio	1.161±0.120*△▲	1.220±0.083*△▲	1.190±0.095*△▲	1.335±0.118*△▲
FA ratio	0.684±0.049*△▲	0.757±0.078*△▲	0.832±0.067*△▲	0.669±0.060*△▲

* $P<0.05$ vs control group; △ $P<0.05$ vs mild group; ▲ $P<0.05$ vs moderate group

2.4.2 不同临床预后与 DTI 参数比值 结果(表5)表明:改善率优、中、差3组 CSM 患者白质前索、侧索、后索及中央灰质 ADC 比值与对照组相应部位间的 ADC 比值差异均有统计学意义($P<0.05$);改善率为中组脊髓4个部位的 ADC 比值与优组比较差异无统计意义,而差组4个部位的 ADC 比值与轻组、中组比较差异均有统计学意义($P<0.05$)。改

善率优组 CSM 患者仅白质前索和中央灰质 FA 比值与正常对照相比差异有统计学意义($P<0.05$),改善率中组患者白质前索、侧索和中央灰质的 FA 比值与正常对照组比较差异有统计学意义($P<0.05$),改善率差组白质各轴索和中央灰质的 FA 比值与其余3组差异均有统计学意义($P<0.05$)。

表5 不同临床预后 CSM 患者 DTI 参数比值的比较

Tab 5 Comparison of ADC ratio and FA ratio of the prognosis subgroups and control group

Group	VF	LF	DF	GM
Control ($n=36$)				
ADC ratio	0.975±0.055	1.012±0.076	0.987±0.091	0.990±0.053
FA ratio	0.969±0.023	0.970±0.045	0.963±0.037	1.003±0.043
Well ($n=18$)				
ADC ratio	1.169±0.072*	1.100±0.093*	1.017±0.035*	1.139±0.095*
FA ratio	0.782±0.036*	0.910±0.065	0.972±0.020	0.781±0.036*
Moderate ($n=23$)				
ADC ratio	1.183±0.109*	1.107±0.106*	1.046±0.081*	1.152±0.121*
FA ratio	0.770±0.053*	0.890±0.093*	0.941±0.066	0.774±0.065*
Poor ($n=9$)				
ADC ratio	1.236±0.172*△▲	1.134±0.122*△▲	1.079±0.121*△▲	1.186±0.173*△▲
FA ratio	0.742±0.075*△▲	0.869±0.117*△▲	0.914±0.080*△▲	0.746±0.089*△▲

* $P<0.05$ vs control group; △ $P<0.05$ vs well group; ▲ $P<0.05$ vs moderate group

3 讨论

2003年, Demir 等^[8]首次提出 DTI 对 CSM 的诊断比常规 MRI 更敏感, DTI 成像较 MRI 能更早发现脊髓微观病理改变,但限于当时的成像技术,并未能提出相应的 DTI 量化参数标准。近年来,随着磁共振硬件的更新和 DTI 成像参数的完善, DTI 在 CSM 中的研究取得了较大进展,主要集中在两方面:(1)通过 DTI 参数进行量化评估,(2)通过 DTT 重建脊髓纤维束进行病情评估和预后预测。

CSM 患者 DTI 量化评估的相关研究^[4,9-12]表明:DTI 参数与 CSM 临床症状和预后均相关, DTI 可在 CSM 早期、常规 MR 无异常信号之前对脊髓病变进行量化评估,敏感性和特异性较高。但对于 DTI 参数测量目前尚无统一标准,目前的研究均选择脊髓横截面的全部或大部分作为 ROI 进行参数测量,得到的参数是白质和灰质的混合值。随着

DTI 图像质量的改善,目前的 DTI 成像可以清晰分辨出灰质和白质的解剖形态。不断有研究^[5-6]发现正常人颈脊髓白质与灰质 ADC、FA 值存在差异,并且 DTI 参数在不同脊髓平面、不同年龄间也有差异。因此,患者年龄和病变节段不同等因素均会对分析结果产生影响,严重制约了该项技术的推广应用。

本研究采用 CSM 受压平面与自身 $C_{1/2}$ 平面的 DTI 参数比值进行对比分析,以消除年龄、病变节段所造成的偏倚。本研究正常对照组选择了不同年龄段健康志愿者,以分析不同年龄间 ADC、FA 比值的差异。CSM 最常发生于活动度较大的颈椎中下段(C_{4-7}),而活动度相对较小的上段颈椎(C_{1-3})极少发生病变^[4]。因此,本研究选择对志愿者 $C_{3/4}$ 、 $C_{4/5}$ 、 $C_{5/6}$ 、 $C_{6/7}$ 等4个平面 DTI 参数比值进行分析。研究结果发现:正常对照组不同年龄分组间前索、侧索、后索和中央灰质4个部位的 ADC 比值、FA 比值间

差异无统计学意义。正常对照人群不同节段(C_{3/4}、C_{4/5}、C_{5/6}、C_{6/7})间脊髓白质前索、侧索、后索 ADC 比值、FA 比值间差异均有统计学意义($P < 0.05$)。进一步的线性分析结果显示:脊髓前索、侧索、后索和中央灰质 ADC 比值、FA 比值与 JOA 评分相关性优于 ADC 值、FA 值本身;脊髓 4 个部位 ADC 比值、FA 比值与 JOA 改善率相关性也优于 ADC 值、FA 值本身。结果提示,DTI 参数比值能够部分消除年龄及病变节段所造成的测量偏倚,诊断价值优于 DTI 参数本身。

JOA 评分不同分组间 DTI 参数比值分析结果显示:轻度损伤组仅白质前索的 ADC 比值与正常对照组差异有统计学意义,白质前索、中央灰质 FA 比值与正常对照组差异有统计学意义($P < 0.05$)。我们推测,在压迫较轻或病程较短时压迫仅来自脊髓前方,表现为 ADC 比值增高和 FA 比值降低,与之前报道^[9-12]相符。中度损伤组白质前索、侧索和中央灰质 ADC 比值和 FA 比值与正常对照组、轻度损伤组相比差异有统计学意义($P < 0.05$)。重度损伤组白质各轴索和中央灰质 ADC 比值、FA 比值与其余 3 组比较差异均有统计学意义($P < 0.05$)。既往文献^[13-14]报道,在脊髓重度受压时,即使致压物是来自前方,由于后方黄韧带的肥厚和颈椎活动时剪切力的作用,也可造成白质后索的损伤。1953 年 Taylor^[15]首先报道了脊髓前方髓核、骨赘和后方黄韧带从前、后方同时压迫脊髓的现象,并称之为“钳夹效应”。关于“钳夹型”脊髓型颈椎病后方致压物的产生,目前的观点认为其主要来源于静态压迫和动态压迫的共同作用。静态压迫一般认为是继发于椎间盘退变,椎间隙狭窄后所致黄韧带松弛皱褶,甚至增生肥厚;另外,随着年龄的增长,黄韧带本身的退变也可以导致其出现原发性增生肥厚。动态压迫主要来源于节段不稳,相互运动,造成脊髓卡压^[16]。

DTI 参数对 CSM 手术预后的预测价值也有文献^[10-11]报道。Jones 等^[10]对 DTI 与神经功能及预后间关系的研究发现,FA 值与神经功能状态明显相关,在 FA、T₂WI 高信号、椎管狭窄三者中,FA 值对预测患者神经功能改善情况的精确性最高,而 ADC 与神经功能及预后无明显相关性。Kerkovský 等^[11]认为,与脊髓 T₂WI 高信号和脊髓横断面积减少相比,FA、ADC 值对 CSM 手术预后的敏感性和特异

性更高。本研究结果显示 JOA 改善率优、中、差 3 组的白质前索、侧索、后索、中央灰质的 ADC 比值与正常对照组相比差异有统计学意义,组间比较差异也有统计学意义。有观点^[15-16]认为当后索受损时,脊髓损伤已经非常严重,手术耐受性差,预后不佳。本研究结果也发现,JOA 严重组和 JOA 改善率最差的组中,后索 ADC、FA 比值与正常对照组相比差异有统计学意义($P < 0.05$),ADC 比值增大,而 FA 比值降低。因此,当后索 ADC 和 FA 比值出现异常时,可作为患者病情较重、预后较差的有效预测指标。

本研究不足主要有以下几方面:(1)脊髓本身体积小,图像分辨率较低,测量面积小,容易出现误差。因此,如何进一步改善图像质量,是临床医师和放射专家共同面临的难题,这也是 DTI 技术能否用于临床的关键。(2)正常对照组样本较小,每个年龄组中仅数例样本,对于颈髓整体的 DTI 参数比值分布特征有待进一步大样本分析。(3)C_{3/4}、C_{4/5}、C_{5/6}、C_{6/7} 4 个平面间 DTI 比值有差异,所以我们将 4 个平面的 DTI 参数比值作为整体进行对照,研究结果会产生或多或少的偏倚。另外,导致 DTI 参数值改变的病理因素众多,ADC 比值和 FA 比值能否精确反映脊髓损伤的真实情况有待进一步研究。(4)影响 CSM 预后的因素众多,年龄、发病时间、术前神经功能、病变节段、手术方式等均可能影响疾病预后,本研究仅分析了 DTI 参数、DTI 比值与预后的相关性,仍有待进一步深入研究。

4 利益冲突

所有作者声明本文不涉及任何利益冲突。

[参考文献]

- [1] Chen C J, Lyu R K, Lee S T, Wong Y C, Wang L J. Intramedullary high signal intensity on T₂-weighted MR images in cervical spondylotic myelopathy: prediction of prognosis with type of intensity[J]. *Radiology*, 2001, 221:789-794.
- [2] Takahashi M, Yamashita Y, Sakamoto Y, Kojima R. Chronic cervical cord compression: clinical significance of increased signal intensity on MR images[J]. *Radiology*, 1989, 173:219-224.
- [3] Yukawa Y, Kato F, Yoshihara H, Yanase M, Ito K. MR T₂ image classification in cervical compression my-

- elopathy; predictor of surgical outcomes [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2007, 32: 1675-1678.
- [4] Kara B, Celik A, Karadereler S, Ulusoy L, Ganiyusu-foglu K, Onat L, et al. The role of DTI in early detection of cervical spondylotic myelopathy; a preliminary study with 3-T MRI [J]. *Neuroradiology*, 2011, 53: 609-616.
- [5] Rossi C, Boss A, Steidle G, Martirosian P, Klose U, Capuani S, et al. Water diffusion anisotropy in white and gray matter of the human spinal cord [J]. *Magn Reson Imaging*, 2008, 27: 476-482.
- [6] Vedantam A, Jirjis M B, Schmit B D, Wang M C, Ulmer J L, Kurpad S N. Characterization and limitations of diffusion tensor imaging metrics in the cervical spinal cord in neurologically intact subjects [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2013, 38: 861-867.
- [7] Yoo W K, Kim T H, Hai D M, Sundaram S, Yang Y M, Park M S, et al. Correlation of magnetic resonance diffusion tensor imaging and clinical findings of cervical myelopathy [J]. *Spine J*, 2013, 13: 867-876.
- [8] Demir A, Ries M, Moonen C T, Vital J M, Dehais J, Arne P, et al. Diffusion-weighted MR imaging with apparent diffusion coefficient and apparent diffusion tensor maps in cervical spondylotic myelopathy [J]. *Radiology*, 2003, 229: 37-43.
- [9] Xiangshui M, Xiangjun C, Xiaoming Z, Qingshi Z, Yi C, Chuanqiang Q, et al. 3 T magnetic resonance diffusion tensor imaging and fibre tracking in cervical myelopathy [J]. *Clin Radiol*, 2010, 65: 465-473.
- [10] Jones J G, Cen S Y, Lebel R M, Hsieh P C, Law M. Diffusion tensor imaging correlates with the clinical assessment of disease severity in cervical spondylotic myelopathy and predicts outcome following surgery [J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2013, 34: 471-478.
- [11] Kerkovský M, Bednarík J, Dušek L, Sprláková-Puková A, Urbánek I, Mechl M, et al. Magnetic resonance diffusion tensor imaging in patients with cervical spondylotic spinal cord compression; correlations between clinical and electrophysiological findings [J]. *Spine*, 2012, 37: 48-56.
- [12] Song T, Chen W J, Yang B, Zhao H P, Huang J W, Cai M J, et al. Diffusion tensor imaging in the cervical spinal cord [J]. *Eur Spine J*, 2011, 20: 422-428.
- [13] Shimomura T, Sumi M, Nishida K, Maeno K, Tadokoro K, Miyamoto H, et al. Prognostic factors for deterioration of patients with cervical spondylotic myelopathy after nonsurgical treatment [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2007, 32: 2474-2479.
- [14] Guo J J, Luk K D, Karppinen J, Yang H, Cheung K M. Prevalence, distribution, and morphology of ossification of the ligamentum flavum: a population study of one thousand seven hundred thirty-six magnetic resonance imaging scans [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2010, 35: 51-56.
- [15] Taylor A R. Mechanism and treatment of spinal-cord disorders associated with cervical spondylosis [J]. *Lancet*, 1953, 1: 717-720.
- [16] Baptiste D C, Fehlings M G. Pathophysiology of cervical myelopathy [J]. *Spine J*, 2006, 6 (6 Suppl): 190S-197S.

[本文编辑] 贾泽军