

# 弥散张量成像相关参数及参数组合对脊髓型颈椎病 脊髓压迫症的诊断价值研究

李建军 徐科超 张振显 王 忻

**摘要** **目的** 评估弥散张量成像技术对存在脊髓压迫但常规 MRI 检查无异常的脊髓型颈椎病 (CSM) 患者脊髓压迫症的诊断价值。**方法** 按照排除纳入标准,从笔者医院就诊行 MRI 常规检查及弥散张量成像检查的患者中筛选出符合条件的研究对象。统计 DTI 相关参数平均扩散系数 (MD)、纵向扩散系数 (LD)、径向扩散系数 (RD) 和各向异性分数 (FA),评估患者的脊髓压迫等级以及最狭窄平面。计算 DTI 相关参数以及参数组合  $MD \cap FA$ 、 $LD \cap FA$  和  $RD \cap FA$  诊断 CSM 的敏感度、特异性及阳性预测值 PPV、阴性预测值 NPV 等,对比分析各项指标诊断效能。**结果** 共有 64 例患者纳入研究,平均年龄  $53.6 \pm 12.8$  岁,其中 14 例诊断为脊髓型颈椎病。FA 值与中央管狭窄的程度呈负相关 ( $r = -0.545, P = 0.000$ )。RD 与中央管狭窄程度呈正相关 ( $r = 0.399, P = 0.000$ ), CSM 与非 CSM 研究对象 FA 分别为  $0.36 \pm 0.08$ 、 $0.46 \pm 0.06$ , 差异有统计学意义 ( $P = 0.001$ )。对于 CSM 患者 (存在脊髓压迫,但是无  $T_2WI$  信号变化) 各项 DTI 参数以及参数组合的敏感度均为 100%, 多重比较结果提示 DTI 参数及其参数组合的特异性组间比较, 差异有统计学意义 ( $P = 0.000$ ), 其中  $LD \cap FA$  敏感度为 100%, 特异性为 68.9%, 诊断效能高于单个指标。**结论** FA 值与椎管狭窄的程度呈负相关, 而 RD 与椎管狭窄的程度呈正相关, FA 联合 MD、RD 或 LD 对于诊断 CSM 患者脊髓压迫症的诊断价值高于上述指标单独使用。

**关键词** 精确度 弥散张量成像 脊髓型颈椎病 MRI

中图分类号 R445 文献标识码 A DOI 10.11969/j.issn.1673-548X.2016.10.035

**Accuracy of Diffusion Tensor Imaging for Diagnosing Cervical Spondylotic Myelopathy in Patients Showing Spinal Cord Compression.** Li Jianjun, Xu Kechao, Zhang Zhenxian, et al. Department of CT/MRI, Yan'an People's Hospital of Shaanxi Province, Shaanxi 716000, China

**Abstract** **Objective** To assess the performance of diffusion tensor imaging (DTI) for the diagnosis of cervical spondylotic myelopathy (CSM) in patients with deformed spinal cord but otherwise unremarkable conventional magnetic resonance imaging (MRI) findings. **Methods** A total of 33 patients who underwent MRI of the cervical spine including DTI using two-dimensional single-shot interleaved multi-section inner volume diffusion-weighted echo-planar imaging and whose spinal cords were deformed but showed no signal changes on conventional MRI were the subjects of this study. Mean diffusivity (MD), longitudinal diffusivity (LD), radial diffusivity (RD), and fractional anisotropy (FA) were measured at the most stenotic level. The calculated performance of MD, FA,  $MD \cap FA$ ,  $LD \cap FA$ , and  $RD \cap FA$  in diagnosing CSM were compared with each other based on the estimated cut-off values of MD, LD, RD, and FA from receiver operating characteristic curve analysis with the clinical diagnosis of CSM from medical records as the reference standard. **Results** 64 patients were included in the study, and the average age was  $53.6 \pm 12.8$  years. 14 people were diagnosed with CSM. FA value was negatively related to the degree of central canal stenosis ( $r = 0.545, P = 0.000$ ). RD was positively associated with the degree of central canal stenosis ( $r = 0.399, P = 0.000$ ). FA in CSM was  $0.36 \pm 0.08$  while non-CSM was  $0.46 \pm 0.06$ , which had statistically significant differences ( $P = 0.000$ ). The sensitivity of DTI parameters was 100% for patients with CSM who had spinal cord compression but no  $T_2WI$  signal changes. The multiple comparison results suggested there were differences among the specificity of DTI parameters ( $P = 0.000$ ), the sensitivity of  $LD \cap FA$  was 100% while the specificity was 68.9%. The diagnostic efficiency of combined indicators was higher than single index. **Conclusion** FA value was negatively related to the degree of central canal stenosis. RD was positively associated with the degree of central canal stenosis. Fractional anisotropy combined with MD, RD, or LD is expected to be more useful than FA and MD for diagnosing CSM in patients who show deformed spinal cords without signal changes on MRI.

**Key words** Accuracy; Diffusion Tensor Imaging; CSM; MRI

脊髓型颈椎病(CSM)是中老年人群最为常见的脊髓病变,通过临床症状初步诊断为脊髓型颈椎病后,通常行MRI检查确认诊断。后者诊断脊髓型颈椎病的敏感度及特异性均较高<sup>[1]</sup>。但是在临床工作中笔者发现常规MRI有一定的误诊率和漏诊率,虽然大部分CSM患者MRI检查结果为T<sub>2</sub>WI上高信号,但是仍然存在部分患者具有临床症状但并无上述MRI表现<sup>[2]</sup>。影像学表现异常的患者可能症状较轻,对MRI检查结果判定会受到椎管狭窄程度与临床症状不符的影响<sup>[3,4]</sup>。因此,需要研究应用更有可靠有效的MRI检查手段辅助诊断。

近年来,弥散张量成像(DTI)技术被用于脊髓型颈椎病的诊断,用于CSM的相关指标有平均扩散系数(MD)、纵向扩散系数(LD)、径向扩散系数(RD)和各向异性分数(FA)。文献报道提示,脊髓受压主要表现为MD值增加和FA值减少<sup>[5]</sup>。LD和RD的平均值可以分别反映轴突和髓鞘的破坏程度。另有研究表明FA值的减少是诊断CSM的敏感指标<sup>[6]</sup>。通过文献复习,笔者发现部分患者在常规MRI无异常改变但存在脊髓异常,关于DTI相关参数以及参数组合在这些患者中表现尚未见报道。笔者推断弥散张量成像(DTI)技术可以辅助这一类患者的确诊,因此笔者通过病例回顾对存在脊髓受压但常规MRI未发现的患者,评估弥散张量成像(DTI)技术及相关指标的诊断价值,具体内容如下。

### 资料与方法

1. 研究对象:本实验为回顾性研究,按照HIPAA标准执行,相关实验方案已通过笔者医院临床伦理委员会认证,所有研究对象系笔者医院门诊及住院患者。从2013年2月~2015年9月,共有76例用传统颈椎MRI和弥散张量成像检查的患者被招募为研究对象。所有患者均签署知情同意书。(1)排除标准:①具有颈椎手术病史( $n=6$ );②脊髓型颈椎病相关病历记录及患者资料不全( $n=3$ );③观察两个或两个以上的脊髓平面,患者最狭窄平面的程度低于下文所述的标准值( $n=3$ )。(2)脊髓型颈椎病(CSM)诊断标准:①出现颈脊髓损害的临床表现,症状包括步态障碍、下肢无力或大小便障碍等,体征包括Hoffman征和Babinski征阳性等;②影像学显示颈椎退行性改变、颈椎管狭窄,并证实存在与临床表现相符合的颈脊髓压迫;③除外进行性肌萎缩性脊髓侧索硬化症、脊髓肿瘤、脊髓损伤、继发性粘连性蛛网膜炎、多发性末梢神经炎等。

2. 磁共振成像相关参数:由1.5T磁共振扫描仪(美国GE公司)完成检查。常规磁共振成像应用常规磁共振脉冲序列包括矢状面的T<sub>2</sub>、矢状面T<sub>1</sub>和轴向T<sub>2</sub>加权快速旋转回波序列(FSE)。弥散张量成像应用矢状面二维单多发交叉内体积弥散回波平面成像序列(2D ss-IMIV-DWEPI)。2D ss-IMIV-DWEPI序列可以获得高分辨率的交叉多层DTI,减少磁化失真,通过视野的限制改善图像质量<sup>[7]</sup>。检查过程中嘱患者平静呼吸,避免头颈部运动和吞咽动作,扫描层面与常规定位相同。2D ss-IMIV-DWEPI成像参数:TR=3200ms、TE=74ms、成像矩阵=128×40、体素=1.5mm×1.5mm×2.0mm、截面厚度=2mm、b值=0,500s/mm<sup>2</sup>、回波长度=20、接收机带宽=1562Hz/pixel、交叉部分的数量=10。弥散加权在12个非共性方向梯度应用。DTI的总扫描时间是5min 36s。

3. 图像和数据分析:(1)椎管狭窄程度分级标准:椎管狭窄程度是基于由Kang等<sup>[8]</sup>提出标准评估。0级正常;1级蛛网膜下腔的侵蚀超过50%,没有脊髓畸形的迹象;2级脊髓椎管狭窄畸形但没有脊髓信号改变;3级脊髓高信号影,呈压缩状态(图1)。脊髓型颈椎病的磁共振成像表现通常表现为狭窄程度3级。记录每个患者脊髓压迫最狭窄的平面以及狭窄分级。(2)数据分析:采用Interactive Data Language ver. 8.3(美国CO公司)编写的定制数据处理软件处理DTI参数相关数据。依据3个特征值( $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ )和特征向量计算上述4个系数,定义方程如下:LD= $\lambda_1$ ;RD=( $\lambda_2 + \lambda_3$ )/2;MD=( $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$ )/3;FA= $\sqrt{3}[(\lambda_1 - MD) + (\lambda_2 - MD) + (\lambda_3 - MD)]/\sqrt{(2(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2))}$ 。FA值从0(完全各向同性)到1(完全各向异性)表明结构各向异性的程度。(3)图像分析:弥散成像获得灰度FA图像以及特征向量红绿蓝图像。参照T<sub>2</sub>WI图像提供的解剖层次,在灰度FA图像上确定最狭窄平面,在该平面手动圈出兴趣区域(ROI区域),注意避开脊髓以外的其他组织(脑脊液等),实际得到的ROI区域平均面积S为29.71±0.67mm<sup>2</sup>,测量特征值,再利用数据分析步骤提到的公式计算MD值、LD值、RD值和FA值(图2)。

4. 统计学方法:所有定量资料以均值±标准差( $\bar{x} \pm s$ )的形式表示。利用斯皮尔曼等级相关系数分析评估DTI参数与狭窄程度之间的相关性。利用校正t检验比较脊髓病(CSM)患者和没有脊髓型颈椎

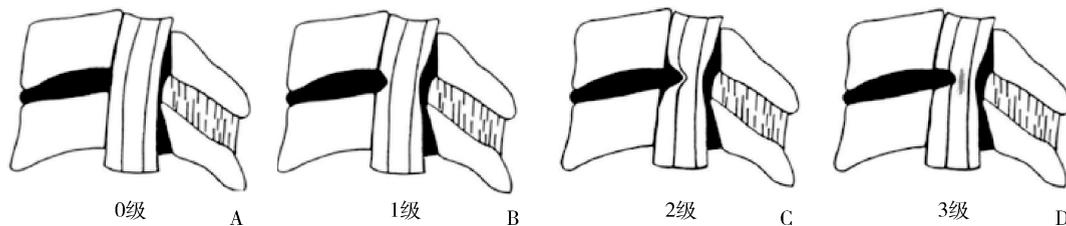


图1 椎管狭窄程度分级示意图

A. 0级椎管狭窄示意; B. 1级椎管狭窄示意; C. 2级椎管狭窄示意; D. 3级椎管狭窄示意

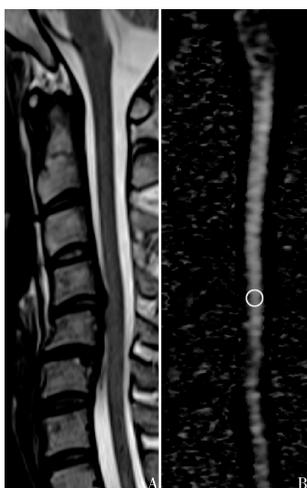


图2 用于DTI参数测量的重组图像

A. 患者T<sub>2</sub>WI图像,用于评估脊髓形态,提供脊髓以及周围毗邻组织的解剖关系; B. 灰度FA图像,图中圆圈为ROI区域,用于测算DTI各项参数

病患者之间DTI参数值差异。通过统计MD、FA以及MD∩FA、LD∩FA、RD∩FA等联合指标的敏感度、特异性、阳性预测值(PPV)及阴性预测值(NPV),以评估DTI参数对有脊髓压迫但无T<sub>2</sub>WI信号改变的患者亚组的诊断效能。使用多重比较和两两比较分别评估上述指标的诊断价值的总体差异和指标间差异,以P<0.05为差异有统计学意义。

结 果

1. 患者基线资料以及脊髓狭窄平面分布情况:共有64例患者纳入研究,其中有36例男性和28例女性,患者年龄25~80岁,平均年龄53.6±12.8岁。根据其症状和身体检查,64例患者中有14例诊断为脊髓型颈椎病。最狭窄的水平(矢状面T<sub>2</sub>WI)分布如下在C<sub>3-4</sub> 7例,C<sub>4-5</sub> 21例,C<sub>5-6</sub> 24例,C<sub>6-7</sub> 在12例。

2. 基于常规MRI评分标准,中央管狭窄的程度评级结果如下:0级:4例(1例男性和3例女性,患者平均年龄40.0±15.1岁);1级:16例(8例男性和8

例女性,患者平均年龄为49.8±11.5岁);2级:33例(16例男性和17例女性,患者平均年龄为56.5±13.5岁);3级:11例(11例男性,患者平均年龄为55.4±7.5岁)。

3. DTI参数和狭窄的程度之间的相关性评估:FA值与中央管狭窄程度呈负相关(r=-0.545,P=0.000)。RD与中央管狭窄程度呈正相关(r=0.399,P=0.000)。然而,MD(r=0.156,P=0.217)和LD(r=-0.149,P=0.238)与中央管狭窄程度没有显著相关性。

4. CSM患者与非CSM患者的DTI各项参数值对比:CSM患者与非CSM患者的平均FA值如表1所示差异有统计学意义(P=0.000)。CSM患者MD、LD和RD平均值分别为(1.16±0.27)×10<sup>-3</sup>mm<sup>2</sup>/s、(1.68±0.26)×10<sup>-3</sup>mm<sup>2</sup>/s和(0.90±0.30)×10<sup>-3</sup>mm<sup>2</sup>/s。没有CSM的患者平均MD、LD和RD值分别为(1.09±0.12)×10<sup>-3</sup>mm<sup>2</sup>/s、(1.76±0.19)×10<sup>-3</sup>mm<sup>2</sup>/s、和(0.74±0.12)×10<sup>-3</sup>mm<sup>2</sup>/s。两组患者MD、LD、RD之间差异无统计学意义(P>0.05)。

表1 CSM患者与非CSM患者的DTI参数值对比

DTI参数	CSM患者	非CSM患者	P
FA	0.36±0.08	0.46±0.06	0.000
MD(×10 <sup>-3</sup> mm <sup>2</sup> /s)	1.16±0.27	1.09±0.12	0.318
LD(×10 <sup>-3</sup> mm <sup>2</sup> /s)	1.68±0.26	1.76±0.19	0.227
RD(×10 <sup>-3</sup> mm <sup>2</sup> /s)	0.90±0.30	0.74±0.12	0.082

5. 亚组分析:笔者将存在脊髓压迫,但是无T<sub>2</sub>WI信号变化的患者(33例)进行亚组分析,其中4例患者确诊为脊髓型颈椎病。图3显示的是确诊为脊髓型颈椎病患者的各项MRI检查图像,MD、FA、MD∩FA、LD∩FA、RD∩FA的敏感度、特异性、PPV和NPV的数值如表2所示。多重比较结果提示DTI参数及其参数组合的特异性组间差异有统计学意义(P=0.000),敏感度(P=0.317)、PPV(P=0.328)和NPV(P=0.210)差异无统计学意义(P>0.05)。两两

比较结果提示 FA 和 MD∩FA ( $P=0.003$ )、FA 和 LD∩FA ( $P=0.000$ )、FA 和 RD∩FA ( $P=0.000$ )、MD 和 LD∩FA ( $P=0.024$ )、MD 和 RD∩FA ( $P=0.024$ )，上述指标特异性差异均有统计学意义 ( $P<0.05$ )。

讨 论

本研究主要探讨 DTI 参数对于脊髓型颈椎病患者脊髓压迫症的诊断效能。通过本实验笔者发现各向异性分数 (FA)、径向扩散系数 (RD) 与中央管狭窄程度具有相关性，CSM 与非 CSM 研究对象 FA 值差异有统计学意义 ( $P<0.05$ )，实验结果提示，对于存在脊髓压迫，但常规 MRI 检查 T<sub>2</sub>WI 无信号改变的患，DTI 参数以及参数组合指标可以提高这类患者脊髓型颈椎病的诊断效率，减少漏诊的发生。

笔者的研究结果提示 FA 值与中央管狭窄呈负相关，RD 值与中央管狭窄的程度呈正相关。笔者推测轴突髓鞘结构的压迫损伤，可能会导致水分子扩散相对增加，扩散方向垂直于脊髓长轴，因此 RD 值与中央管狭窄呈正相关。另一方面，中央管狭窄严重，脊髓压迫加重，病理表现为细胞外水肿加重，膜结构的定向损失严重，在 DTI 检查中表现为 FA 值降低<sup>[9]</sup>。动物实验研究结论支持上述推论，研究表明，

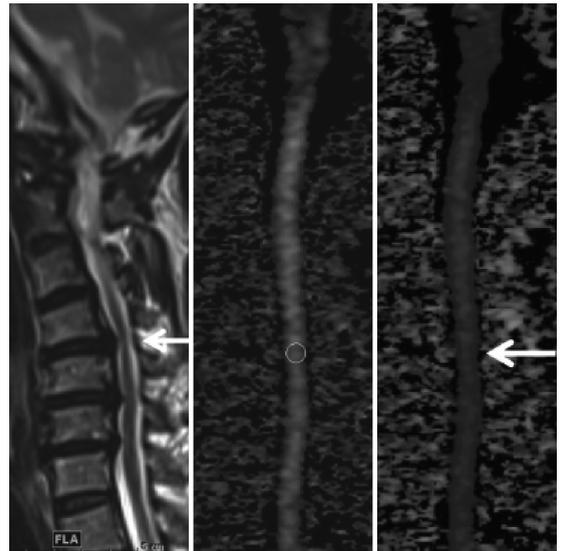


图3 常规 MRI 检查 T<sub>2</sub>WI 提示 2 级椎管狭窄，DTI 检查提示 CSM 的患者各项 MRI 图像

从左至右分别为该患者 T<sub>2</sub>WI 图像，灰度 FA 图像以及特征向量三色图像。左图提示患者在 C<sub>4-5</sub> 平面存在脊髓形态改变，但是未见明显信号变化，椎管狭窄程度诊断为 2 级，根据 FA 图测算该患者 FA 值为 0.349，MD 值为  $1.198 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$ ，LD 值为  $1.728 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$ ，RD 值为  $0.933 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$ 。上述数值符合 CSM 患者 DTI 参数表现，右图箭头指示部位颜色较深，提示最狭窄部位存在特征值改变，蓝色代表特征向量方向与身体长轴一致

表 2 DTI 相关参数以及其组合的诊断价值

参数	MD	FA	MD∩FA	LD∩FA	RD∩FA
敏感度 (%)	100 (4/4;100~100)	100 (4/4;100~100)	100 (4/4;100~100)	100 (4/4;100~100)	75 (3/4;32.6~100)
特异性 (%)	44.8 (13/29;26.7~62.9)	27.6 (8/29;11.3~43.9)	58.6 (17/29;40.7~76.5)	68.9 (20/29;52.1~85.8)	68.9 (20/29;52.1~85.8)
PPV (%)	20 (4/20;2.4~37.5)	16 (4/25;1.6~30.4)	25 (4/16;3.8~46.2)	30.8 (4/13;5.7~55.9)	25 (3/12;1~49.5)
NPV (%)	100 (13/13;100~100)	100 (8/8;100~100)	100 (17/17;100~100)	100 (20/20;100~100)	95.2 (20/21;86.1~100)

机械损伤、脊髓髓鞘撕裂、沃勒变性以及髓鞘脱失可出现 FA 值减少<sup>[10]</sup>。大鼠脑部及视神经实验证明髓鞘脱失增加 RD<sup>[11]</sup>。

笔者的研究还发现 CSM 与非 CSM 患者的 FA 值差异有统计学意义 ( $P<0.05$ )，但 MD、LD、RD 值无明显差异。考虑到研究对象年龄分布范围较大 (25~80 岁)，可以由于患者年龄差异较大对研究结果存在干扰。研究表明，MD 值存在年龄相关性，不同年龄个体 MD 差异较大。另外，当神经组织受损时，FA 的减少值与 MD 值的变化并不一致<sup>[12]</sup>。因此本实验只发现有无 CSM 的研究对象其 FA 值差异具

有统计学意义。

DTI 参数以及参数组合指标可以提高脊髓型颈椎病的诊断效率，减少漏诊的发生，这是本实验重要的实验结论。临床上部分患者存在脊髓压迫，临床症状和体征符合 CSM 表现，但是患者常规 MRI 检查结果提示 T<sub>2</sub>WI 上无明显信号改变，椎管狭窄程度也未达到 CSM 的诊断标准，本实验中这类患者的 DTI 检查均出现阳性表现，各项 DTI 参数符合 CSM 患者表现，各项参数对 CSM 的敏感度为 100%。考虑以下几个原因促成 DTI 诊断效能上升：① FA 与中央管狭窄呈负相关，RD 与中央管狭窄的程度呈正相关，FA 与

RD 对脊髓压迫和脊髓病理改变的敏感度远高于常规 MRI;②CSM 患者与非 CSM 患者的 FA 值差异有统计学意义,上述两点是 DTI 参数敏感度高的基础;③各项参数指标联合诊断结果提示,MD∩FA、LD∩FA、RD∩FA 的特异性均高于单独 MD 与 FA 的特异性,各项参数指标的联合从诊断技术上提高了 DTI 检查的特异性。因此 DTI 检查对于提高 CSM(尤其是常规 MRI 无法确诊的病例)的诊断效率具有重要意义。

回顾国内外相关研究,笔者发现尚无关于常规 MRI 检查阴性但症状阳性的亚组分析报道。有研究报道利用 DTI 参数评估以及诊断不同症状的脊髓型颈椎病,但是上述研究采用的方法不同于笔者的研究<sup>[13,14]</sup>。文献指出 FA 诊断 CSM 的敏感度和特异性分别为 72.0%~76.3% 和 75.0%~76.3%,上述研究分别在矢状轴和轴向平面评估 DTI 参数诊断效能,但未报道其他参数的诊断价值<sup>[15]</sup>。本实验中 DTI 参数具有相对更高的敏感度,但特异性低于其他研究。FA 和 MD 的特异性较低可能归因于分离出亚组用来评估诊断效能。当联合 FA、MD、LD、RD 等指标后,特异度与前述研究相当,其中 LD∩FA 具有最佳的特异性和敏感度,与近期研究一致<sup>[16]</sup>。本研究存在一定的局限性,笔者选取的 ROI 分析区域不易区分白质和灰质,使用矢状面图像定义 ROI 区域,尽量避免纳入脑脊液区域。因为很多疾病包括囊性坏死,脊髓软化和脊髓萎缩等会影响 DTI 值<sup>[17]</sup>。其次,笔者研究样本量较小可能出现偏高的敏感度,因此需要采用大样本的研究验证上述结论。

综上所述,DTI 检查中 FA 值与椎管狭窄的程度呈负相关,而 RD 与椎管狭窄的程度呈正相关。FA 值联合 MD、RD 或者 LD 对于诊断 CSM 患者脊髓压迫症的诊断价值高于上述指标单独使用,上述检查方法和指标值得临床推广应用。

#### 参考文献

- 张川, 杨汉丰. 脊髓型颈椎病的 MRI 研究进展[J]. 医学影像学杂志, 2015, 25(2): 337-340
- 黄波, 刘彪, 黄伟兰, 等. 磁共振弥散张量成像诊断轻度脊髓型颈椎病的价值[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2015, 13(3): 16-18
- Matsumoto M, Toyama Y, Ishikawa M, *et al.* Increased signal intensity of the spinal cord on magnetic resonance images in cervical compressive myelopathy. Does it predict the outcome of conservative treatment? [J]. *Spine; Phila Pa* 1976, 2000, 25: 677-682
- Bednarik J, Kadanka Z, Dusek L, *et al.* Presymptomatic spondylotic cervical myelopathy: an updated predictive model[J]. *Eur Spine J*, 2008, 17: 421-431
- Kadanka Z, Kerkovsky M, Bednarik J, *et al.* Cross-sectional transverse area and hyperintensities on magnetic resonance imaging in relation to the clinical picture in cervical spondylotic myelopathy[J]. *Spine; Phila Pa* 1976, 2007, 32: 2573-2577
- Demir A, Ries M, Moonen CT, *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
- Kim TH, Zollinger L, Shi XF, *et al.* Quantification of diffusivities of the human cervical spinal cord using a 2D single-shot interleaved multisection inner volume diffusion-weighted echo-planar imaging technique[J]. *Am J Neuroradiol*, 2010, 31: 682-687
- Kang Y, Lee JW, Koh YH, *et al.* New MRI grading system for the cervical canal stenosis[J]. *Am J Roentgenol*, 2011, 197: W134-W140
- Maus TP. Imaging of spinal stenosis: neurogenic intermittent claudication and cervical spondylotic myelopathy[J]. *Radiol Clin North Am*, 2012, 50: 651-679
- 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: 1-9
- Uda T, Takami T, Sakamoto S, *et al.* Normal variation of diffusion tensor parameters of the spinal cord in healthy subjects at 3.0-Tesla[J]. *J Craniovertebr Junction Spine*, 2011, 2: 77-81
- Thomalla G, Glauche V, Koch MA, *et al.* Diffusion tensor imaging detects early Wallerian degeneration of the pyramidal tract after ischemic stroke[J]. *Neuroimage*, 2004, 22: 1767-1774
- Kerkovsky M, Bednarik J, Dushek L, *et al.* Magnetic resonance diffusion tensor imaging in patients with cervical spondylotic spinal cord compression: correlations between clinical and electrophysiological findings[J]. *Spine; Phila Pa* 1976, 2012, 37: 48-56
- 陈峰, 余永强. 磁共振张量成像在脊髓型颈椎病中的应用进展[J]. *安徽医药*, 2015, 19(8): 1438-1441
- 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: 2589-2597
- Gao SJ, Yuan X, Jiang XY, *et al.* Correlation study of 3T-MR-DTI measurements and clinical symptoms of cervical spondylotic myelopathy[J]. *Eur J Radiol*, 2013, 82: 1940-1945
- Ducreux D, Fillard P, Facon D, *et al.* Diffusion tensor magnetic resonance imaging and fiber tracking in spinal cord lesions: current and future indications[J]. *Neuroimaging Clin N Am*, 2007, 17: 137-147

(收稿日期:2016-01-26)

(修回日期:2016-03-29)