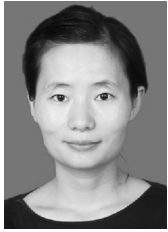


中青年正常颈髓 3.0T MRI 扩散张量成像的定量研究

周小倩, 王琳, 马戈, 郭帅, 杨全新, 陈欣

(西安交通大学第二附属医院影像科, 陕西 西安 710004)



摘要:目的 探讨中青年正常颈髓 MRI DTI 定量参数的特点。方法 根据纳入标准, 选取 20 例中青年颈椎正常的志愿者行颈椎 3.0T MRI 常规序列及 DTI 扫描, 测量并比较不同椎间盘层面颈髓的 ADC 值、FA 值、容积比各向异性 (VRA) 值、各向同性 (Iso) 值和指数衰减 (EA) 值。结果 在所有的参数彩色编码图中, FA 图和 EA 图显示颈髓最准确和清晰。不同椎间盘层面 ADC 值、FA 值、VRA 值、Iso 值和 EA 值有统计学差异 (所有 $P < 0.05$)。进一步多重比较显示, 自 C2/C3 椎间盘层面开始向足侧, ADC 值逐渐增高、EA 值逐渐降低, C6/C7 节段与其他节段均有显著性差异, 其他相邻节段间无显著性差异; FA 值和 VRA 值逐渐降低, 相邻节段间无显著性差异; Iso 值趋势不明显。结论 中青年正常颈髓 FA 值、ADC 值、VRA 值和 EA 值分布具有一定的规律性, 可客观、定量地反映颈髓的组织学特点, 建议在今后的研究中, 将 FA 和 EA 彩色编码图用于颈髓 DTI 定量测量的参考图像, 并进一步探讨包括 EA 值和 VRA 值在内的多种参数对于颈髓疾病的诊断价值。

关键词: 颈髓; 磁共振成像; 扩散张量成像

DOI: 10.3969/j.issn.1002-1671.2019.01.001

中图分类号: R322.81; R445.2 文献标志码: A 文章编号: 1002-1671(2019)01-0001-05

Quantitative analysis of 3.0T MRI diffusion tensor imaging in normal cervical spinal cord of young and middle-aged volunteers

ZHOU Xiaoqian, WANG Lin, MA Ge, GUO Shuai, YANG Quanxin, CHEN Xin

(Department of Radiology, the Second Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710004, China)

Abstract: Objective To explore the characteristics of quantitative parameters by studying MRI DTI of normal cervical spinal cord in young and middle-aged volunteers. **Methods** According to the inclusive criteria, 20 young and middle-aged volunteers with normal cervical spinal cord underwent routine 3.0T MRI and DTI scan of the cervical spine. The ADC value, FA value, volume ratio anisotropy (VRA) value, isotropy (Iso) value and exponential attenuation (EA) value of the cervical spinal cord in the different segments were calculated and compared. **Results** Of all the parameters' color coded maps, FA map and EA map showed the cervical spinal cord most accurately and clearly. The ADC, FA, VRA, Iso and EA values were significantly different among different segments (all $P < 0.05$). The multiple comparisons showed that the ADC values gradually increased while the EA values gradually decreased from the C2/C3 intervertebral disc level to the C6/C7 level. There were significant differences between the C6/C7 level and other levels, but there were no significant differences between the adjacent levels. The FA and VRA values gradually decreased from the C2/C3 intervertebral disc level to the C6/C7 level with no significant differences between the adjacent levels. The Iso value did not have the same trend as above. **Conclusion** The distribution of FA, ADC, VRA and EA values has a certain regularity in normal cervical spinal cord of young and middle-aged volunteers. DTI can objectively and quantitatively reflect the histological characteristics of the cervical spinal cord. It is suggested that FA and EA color coded maps should be used as reference images for quantitative measurement of cervical spinal cord DTI in future studies, and the diagnostic values of various parameters including EA and VRA values for cervical spinal cord diseases should be further explored.

Key words: cervical spinal cord; magnetic resonance imaging; diffusion tensor imaging

作者简介: 周小倩 (1984-), 女, 陕西西安人, 本科, 技师。研究方向: CT 和 MR 成像技术。

通信作者: 陈欣, E-mail: chen_x129@163.com

基金项目: 陕西省科技计划项目 (2016SF-193)。

脊髓型颈椎病 (cervical spondylotic myelopathy, CSM) 是一种严重影响生活质量的常见病, 随着生活、学习和工作方式的改变, 发病年龄呈现年轻化趋势。早期、直观、准确评估颈髓损伤及其程度对于 CSM 的

治疗及预后有着重要的意义。近年来研究发现, MRI DTI 及其定量参数能够在 T_2 WI 出现高信号前检测到颈髓的信号变化^[1-3], 可以在一定程度上反映脊髓压迫后不同的组织病理学状态^[4-5], 与人体运动功能相关性强^[6-7]。但是, DTI 定量参数诊断 CSM 通常建立在与正常人颈髓数据对比的基础上, 且扫描采用的机器厂家不同、型号不同、场强不同、扫描参数不同等可能会对定量参数的测量产生影响。本研究采用 GE 3.0T MRI 探讨中青年正常颈髓不同节段 DTI 各定量参数的特点。

1 资料与方法

1.1 一般资料 自 2017 年 1 月至 2017 年 6 月, 招募正常志愿者作为研究对象, 入选标准为: (1) 临床上无明确的神经系统症状及阳性体征; (2) 既往无神经系统或影响神经系统的疾病; (3) 颈椎常规 MRI 及 DTI 图像质量好, 脊髓显示清晰无变形; (4) 颈椎常规 MRI 及 DTI 检查均未发现异常。所有 MRI 扫描图像分别由 2 名研究生独立观察并做出评价, 如有分歧, 再由 1 位高年资影像诊断医师进行最终评价。所有志愿者均了解本研究的目的和内容, 并签署知情同意书。最终纳入符合标准的正常志愿者 20 例, 其中男 6 例, 女 14 例, 年龄 23~39 岁, 平均 (27.0 ± 4.82) 岁。

1.2 检查方法 使用 GE Signa HDxt 3.0T MR 扫描仪和 8 通道头颈联合线圈, 除常规矢状位 T_1 WI、 T_2 WI 及轴位 T_2 WI 序列外, 采用单次激发平面回波成像 (single-shot echo planar image, SS-EPI) 序列进行脊髓轴位 DTI, 扫描方案参照 GE 中华磁共振应用学院提供的 3.0T MR 规范化扫描方案。各节段脊髓扫描层面和范围采用与常规矢状位和轴位扫描相同的定位。扫描中使用自动匀场和频率选择脂肪抑制技术。扫描参数如下: TR 7 000 ms, TE 77.2 ms, 矩阵 96×96 , 重建矩阵 256×256 , 层厚 5 mm, 层间距 0 mm, FOV $31 \text{ cm} \times 31 \text{ cm}$, b 值分别取 0、500 s/mm^2 , 扩散敏感梯度方向数 14 个, NEX 4。

1.3 图像处理和分析 所采集的 MRI 数据传输到 GE Advantage Workstation 4.5 工作站上应用 FuncTool 软件进行后处理。首先对 DTI 原始数据进行校正, 纠正扩散图像的变形; 设定阈值, 上限最高, 下限 50~100; 然后经计算机处理自动获得每一层面的 $b=0 \text{ s/mm}^2$ DWI 图、ADC 图、FA 图、容积比各向异性 (volume ratio anisotropy, VRA) 图、各向同性 (isotropy, Iso) 图和指数衰减 (exponential attenuation, EA) 图。以矢状位 T_2 WI 为参考定位像, 选择 C2/C3、C3/C4、C4/C5、C5/C6、

C6/C7 椎间盘对应的脊髓层面进行分析, 结合常规横断面 T_2 WI、 $b=0 \text{ s/mm}^2$ DWI 图分别在各参数彩色编码图上设置椭圆形 ROI, ROI 范围包括整个颈髓横断面, 并避免周围脑脊液的部分容积效应, 分别记录 ADC 值、FA 值、VRA 值、Iso 值和 EA 值, 每个数据分别测量 3 次取平均值。

1.4 统计学分析 所有参数均以平均数士标准差表示。对不同椎间盘节段脊髓参数值进行比较时, 首先进行正态性检验及方差齐性检验, 对均满足条件的参数采用单因素方差分析进行总体均数的比较, 以及 LSD 检验进行多重比较; 对满足正态分布但方差不齐的参数采用 Games-Howell 检验进行多重比较; 对不满足正态分布的参数, 采用非参数检验进行比较。所有数据分析采用 SPSS 19.0 软件进行, 双侧 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

20 例正常人颈椎的常规 MRI T_1 WI、 T_2 WI 及 DTI 各参数图像均显示良好。常规 MRI 图像显示颈髓、椎体形态及信号正常, 各椎间盘无明确突出及膨出, 硬膜囊无受压 (图 1~8)。ADC、FA、VRA、Iso 及 EA 彩色编码图分别见图 4~7。通过与常规 T_2 WI 轴位图像比对, 颈髓在 ADC 图呈淡蓝至绿色区域, 边界不清; FA 图呈红色区域, 边界清晰; VRA 图呈红黄至绿色区域, 边界不清; Iso 图位于红色区域内, 无明确分界; EA 图呈蓝色区域, 边界清晰。放置 ROI 进行参数测量时, 以 FA 图和 EA 图作为参考图像比较准确。

20 例共 100 个颈髓节段, 不同椎间盘节段的颈髓 ADC 值、FA 值和 EA 值满足正态性分布并具备方差齐性, 多重比较采用单因素方差分析 LSD 检验; VRA 值和 Iso 值满足正态分布但方差不齐, 多重比较采用 Games-Howell 检验。各椎间盘节段的颈髓 ADC 值、FA 值、VRA 值、Iso 值和 EA 值比较, 差异均有统计学意义 (表 1)。此外, C3/C4 层面颈髓 ADC 值和 Iso 值最低, FA 值、VRA 值和 EA 值最高; 从 C3/C4~C6/C7 层面, 颈髓 ADC 值逐渐增高而 FA 值、VRA 值、EA 值逐渐降低; Iso 值在 C5/C6 层面最高, 在 C6/C7 层面略降低。

进一步两两多重比较见表 2。对反映水分子扩散速度的参数 ADC 值和 EA 值来说, C6/C7 层面与其他层面比较均有显著性差异, C5/C6 与 C3/C4 层面比较有显著性差异, 其他层面两两比较无显著性差异。对反映水分子扩散各向异性的参数 FA 值和 VRA 值来说, C2/C3 与 C3/C4、C4/C5 层面 FA 值比较无显著性

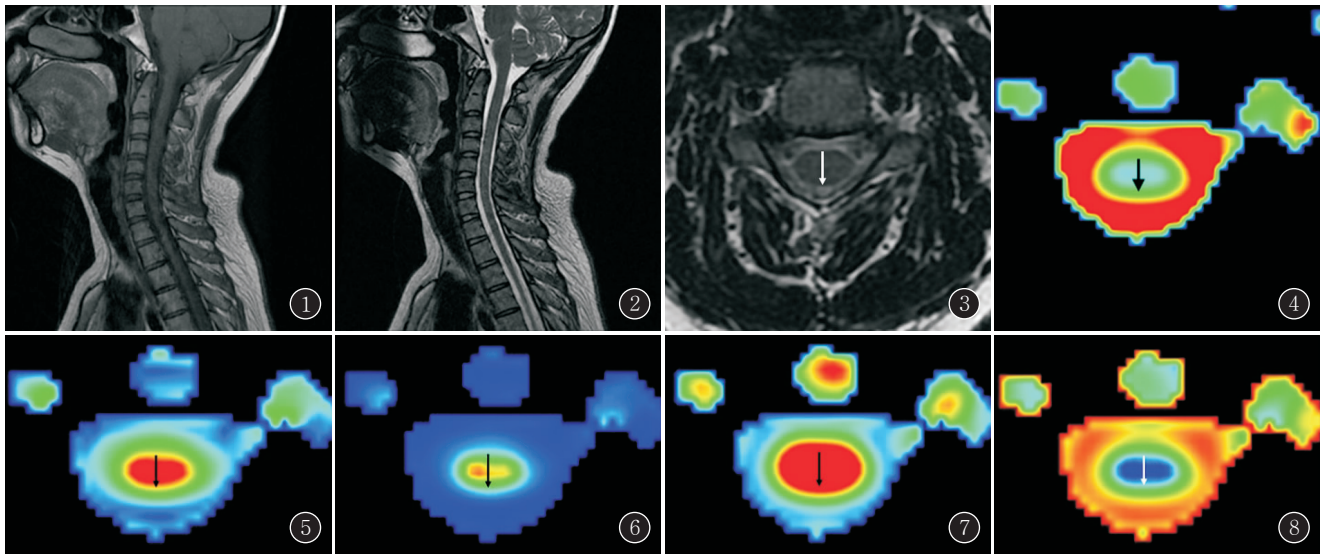


图 1~8 女, 24 岁, 临床无神经系统症状。图 1, 2. 分别为矢状位 T_1 WI 和 T_2 WI, 未见明显椎间盘膨出或突出; 图 3~8. 分别为 C3/C4 椎间盘层面 T_2 WI 图、ADC、FA、VRA、Iso 及 EA 彩色编码图, 各图中箭头表示以 T_2 WI 为标准的脊髓中线前后径

表 1 不同椎间盘层面颈髓 ADC 值、FA 值、VRA 值、Iso 值和 EA 值比较

节段	ADC 值($\times 10^{-3}$ mm ² /s)	FA 值	VRA 值	Iso 值	EA 值
C2/C3	1.32 \pm 0.072	0.60 \pm 0.040	0.39 \pm 0.053	314.06 \pm 29.65	0.52 \pm 0.019
C3/C4	1.28 \pm 0.036	0.61 \pm 0.056	0.39 \pm 0.081	302.70 \pm 24.09	0.53 \pm 0.013
C4/C5	1.32 \pm 0.059	0.57 \pm 0.044	0.35 \pm 0.078	324.95 \pm 30.38	0.52 \pm 0.015
C5/C6	1.33 \pm 0.087	0.51 \pm 0.037	0.28 \pm 0.068	357.73 \pm 33.82	0.52 \pm 0.020
C6/C7	1.42 \pm 0.050	0.50 \pm 0.064	0.26 \pm 0.040	356.64 \pm 54.78	0.50 \pm 0.017
F	12.732	26.948	17.495	9.561	12.488
P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

差异, C5/C6 与 C6/C7 层面 FA 值比较无显著性差异; C2/C3、C3/C4、C4/C5 层面 VRA 值两两比较均无显著性差异, C4/C5 与 C5/C6、C5/C6 与 C6/C7 层面 VRA 值比较无显著性差异, 其余层面两两比较有显著性差异。对反映各方向 DWI 强度平均值的参数 Iso 值来说, C2/C3、C3/C4、C4/C5 层面两两比较均无显著性差异, C6/C7 与 C4/C5、C5/C6 层面比较无显著性差异, 其余层面两两比较有显著性差异。

3 讨论

DTI 是在 DWI 技术上发展起来的一项新技术, 它利用扩散敏感梯度从多个方面对组织内水分子的扩散特性进行量化, 从而反映活体中组织结构的完整性和连通性, 目前被认为对脊髓损伤的早期诊断具有重要的价值。GE 3.0T MRI DTI 分析软件可以提供包括 ADC 值、FA 值、VRA 值、Iso 值和 EA 值在内的 5 个定量参数, 既往国内外研究未见关于正常脊髓及脊髓病变的 VRA 值、Iso 值和 EA 值的研究报道。因此, 本研究对中青年正常颈髓 DTI 的全部定量参数进行研

究, 探讨各个参数图对颈髓显示的情况, 参数分布的特点及正常参考值。

3.1 DTI 各参数的意义 在均质介质中, 水分子在各个方向上的扩散程度一致, 具有各向同性, 可用球形体表示。在非均质介质中, 水分子的运动受组织细胞结构的影响, 在各个方向上扩散程度不同, 具有方向依赖性, 称为各向异性, 可用椭球体表示。ADC 指 MRI 体素内各个方向水分子扩散速度的平均值, 其值越大说明组织内水分子扩散能力越强。FA 指具有各向异性的组织成分在整个组织成分中的比值, 在排列较疏松的组织中(如脑脊液、灰质), 水分子扩散的速度在各个方向上类似, 趋于各向同性, FA 值较小; 在结构一致、排列方向相同的白质纤维束中, 受疏水性细胞膜和髓鞘的影响, 水分子扩散的速度在各个方向上差别较大, 在与神经纤维走行一致的方向上运动最快, 而在与神经纤维垂直的方向上运动最慢, 趋于各向异性, FA 值较大。VR 原指椭球的体积与半径为平均扩散率的球体体积之比, 水分子扩散越趋向于各向同性 VR 越接近 1, 反之则接近 0。VRA 现多用 1-VR 表示, 以便和

表 2 不同椎间盘层面 ADC 值、FA 值、VRA 值、Iso 值及 EA 值多重比较结果

节段	节段	ADC 值 显著性	FA 值 显著性	VRA 值 显著性	Iso 值 显著性	EA 值 显著性
C2/C3	C3/C4	0.060	0.267	0.994	0.675	0.032
	C4/C5	0.784	0.107	0.345	0.781	0.570
	C5/C6	0.672	0.000	0.000	0.001	0.302
	C6/C7	0.000	0.000	0.000	0.035	0.000
C3/C4	C2/C3	0.060	0.267	0.994	0.675	0.032
	C4/C5	0.107	0.007	0.315	0.098	0.111
	C5/C6	0.022	0.000	0.000	0.000	0.002
	C6/C7	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000
C4/C5	C2/C3	0.784	0.107	0.345	0.781	0.570
	C3/C4	0.107	0.007	0.315	0.098	0.111
	C5/C6	0.486	0.000	0.073	0.021	0.111
	C6/C7	0.000	0.000	0.001	0.186	0.000
C5/C6	C2/C3	0.672	0.000	0.000	0.001	0.302
	C3/C4	0.022	0.000	0.000	0.000	0.002
	C4/C5	0.486	0.000	0.073	0.021	0.111
	C6/C7	0.000	0.407	0.536	1.000	0.001
C6/C7	C2/C3	0.000	0.000	0.000	0.035	0.000
	C3/C4	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000
	C4/C5	0.000	0.000	0.001	0.186	0.000
	C5/C6	0.000	0.407	0.536	1.000	0.001

FA 相一致。研究表明,FA 对较低各向异性敏感, VRA 对较高各向异性敏感^[8]。Iso 指 MRI 体素内各个方向 DWI 强度的平均值。EA 是指数化 ADC 值,EA 图不受 T₂ 穿透效应的影响,同时还具有信号对比度高,病变部位的边界显示清晰,病变表现与在 DWI 图像上一致,符合临床观察习惯等特点,是 GE 后处理软件独有的参数。

3.2 各参数图显示颈髓的准确性 由于脊髓横截面积小,周围有脑脊液、脂肪及骨组织等复杂结构,DTI 容易产生容积效应及磁敏感伪影^[9],在 DTI 参数图上准确划定脊髓的范围是定量测量的关键环节之一。脊髓主要由中央蝴蝶样的灰质区和周围的白质区组成,将脊髓整体作为 ROI 进行测量时,如果 ROI 范围过小,灰质占比较大,将导致反映水分子扩散速度的参数值偏大,反映各向异性的参数值偏小,反映各向同性的参数值偏大;如果 ROI 范围过大,包含周围脑脊液,对参数的测量也会产生相似的影响。本研究首先将各个参数图与常规轴位 T₂ WI 图像进行对比,发现各参数彩色编码图上,椎管内的信号均呈多种颜色的同心圆状,其中仅有 FA 图和 EA 图显示脊髓分别为红色区域和蓝色区域,大小与常规轴位 T₂ WI 相同,且与周围脑脊液信号分界清晰。笔者认为放置 ROI 进行参数

测量时,以 FA 图和 EA 图作为参考图像比较准确。文献报道颈髓 FA 值和 ADC 值的结果差异较大^[6-7],笔者认为除了受研究样本数量、DTI 扫描方法和参数设置的影响外,可能与 ROI 所取范围的准确性也有关系。

3.3 不同椎间盘层面颈髓 DTI 参数的特点 文献对于正常人不同层面颈髓的 FA 值和 ADC 值的对比研究结果也各不相同。部分研究显示不同层面颈髓 DTI 参数无显著性差异^[10-13];郑奎宏等^[14]研究显示颈髓 C1 层面 ADC 值显著高于其他层面,FA 值显著低于其他层面;王岩等^[15]研究表明颈髓 C3 层面 FA 值显著高于其他层面,各 ADC 值之间无显著性差异;多数国内外研究结果显示正常人 C2~C7 层面颈髓的 FA 值和 ADC 值有显著性差异,从头侧向足侧呈现 FA 值逐渐减低、ADC 值逐渐升高的趋势^[6,16-19]。

汇总本研究结果,中青年正常颈髓自 C2/C3 椎间盘层面开始,从头侧向足侧,反映组织内水分子平均扩散速度的参数 ADC 值逐渐增高、EA 值逐渐降低,C6/C7 层面与其他层面均有显著性差异,其他相邻层面间无显著性差异;反映组织内水分子扩散各向异性的参数 FA 值和 VRA 值逐渐降低,相邻层面间无显著性差异。总体上呈现出水分子扩散受限递减,各向异性递减的趋势。而 Iso 值趋势不明显。

分析颈髓 DTI 参数变化趋势的原因,可能主要与不同层面颈髓内灰白质的比例不同有关^[20]。解剖学上,颈髓内的灰白质并非均匀一致分布,除了在颈髓与延髓交界处含有较多的灰质核团外,越往足侧灰质比例越高,因此总体水分子扩散受限越少,特别是垂直脊髓走行方向的灰质本征扩散值较白质明显增高,所以 ADC 值逐渐增高、EA 值逐渐降低。同时,由于水分子在白质内各向异性程度较高,在灰质内各向异性程度较低,所以随着足侧白质比例的减低,颈髓 FA 值和 VRA 值逐渐降低。另外,可能与臂丛神经进出颈髓也有关,越往足侧越粗大的臂丛神经的进出,会导致神经纤维束方向一致性的改变,这可能也是导致 FA 值、VRA 值逐渐减低的原因。

陈士跃等^[19]分别分析了正常成人不同节段颈髓白质和灰质的 ADC 值和 FA 值,显示不同节段的颈髓灰质的扩散能力和扩散各向异性基本相同,白质的扩散能力和扩散各向异性存在差异,不同轴索(前索,侧索和后索)白质的扩散能力和扩散各向异性也存在差异。间接证明了上述颈髓 DTI 参数变化的理论基础。

综上所述,本研究认为 DTI 的 FA 值、ADC 值、VRA 值和 EA 值均能反映颈髓的组织学特点,建议在今后的研究中,将 FA 和 EA 彩色编码图用于颈髓 DTI 定量测量的参考图像,并进一步探讨 EA 值和

VRA 值对于颈髓疾病的诊断价值。

参考文献:

- [1] VEDANTAM A, RAJSHEKHAR V. Does the type of T₂-weighted hyperintensity influence surgical outcome in patients with cervical spondylotic myelopathy? a review[J]. *Eur Spine J*, 2013, 22(1): 96—106. DOI: 10.1007/s00586-012-2483-9.
- [2] FEHLINGS M G, TETREAUULT L A, WILSON J R, et al. Cervical spongylopic myelopathy: current state of the art and future directions [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2013, 38(22 Suppl 1): S1—S8. DOI: 10.1097/BRS.0b013e3182a7e9e0.
- [3] 刘涛, 温志波, 蔡汉寿, 等. DTI 技术与常规 MRI 在脊髓型颈椎病观察脊髓损伤中的对比研究[J]. *中国 CT 和 MRI 杂志*, 2014, 12(3): 103—106. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5131.2014.03.30.
- [4] LEE S, LEE Y H, CHUNG T S, et al. Accuracy of diffusion tensor imaging for diagnosing cervical spondylotic myelopathy in patients showing spinal cord compression [J]. *Korean J Radiol*, 2015, 16(6): 1303—1312. DOI: 10.3348/kjr.2015.16.6.1303.
- [5] 李晓会, 吴晓琴, 唐亚萍. MR DTI 在大鼠脊髓损伤早期的应用研究[J]. *实用放射学杂志*, 2018, 34(3): 452—455. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1671.2018.03.033.
- [6] 张韵, 陈东. 3.0T MRI DTI 在脊髓型颈椎病中的临床应用研究及与神经功能评分的相关性分析[D]. 泸州: 西南医科大学, 2017.
- [7] RINDLER R S, CHOKSHI F H, MALCOLM J G, et al. Spinal diffusion tensor imaging in evaluation of preoperative and postoperative severity of cervical spondylotic myelopathy: systematic review of literature [J]. *World Neurosurg*, 2017, 99: 150—158. DOI: 10.1016/j.wneu.2016.11.141.
- [8] BAMMER R. Basic principles of diffusion-weighted imaging [J]. *Eur J Radiol*, 2003, 45(3): 169—184. DOI: 10.1016/S0720-048X(02)00303-0.
- [9] BOSMA R, STROMAN P W. Diffusion tensor imaging in the human spinal cord: development, limitations, and clinical applications [J]. *Crit Rev Biomed Eng*, 2012, 40(1): 1—20. DOI: 10.1615/CritRevBiomedEng.v40.i1.10.
- [10] 孟祥水, 侯金文, 屈传强, 等. 探讨 3T 磁共振 DTI 成像技术及其参数在颈髓中的特点[J]. *山东大学学报(医学版)*, 2007, 45(8): 830—834. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7554.2007.08.019.
- [11] 涂灿, 汪建华, 廖海波, 等. 磁共振扩散张量成像与纤维束成像在脊髓型颈椎病中的应用研究[J]. *中国骨伤*, 2016, 29(3): 200—204.
- [12] WHEELER-KINGSHOTT C A, HICKMAN S J, PARKER G J, et al. Investigating cervical spinal cord structure using axial diffusion tensor imaging [J]. *Neuroimage*, 2002, 16(1): 93—102. DOI: 10.1006/nimg.2001.1022.
- [13] 魏梁锋, 王守森, 郑兆聪, 等. 正常颈髓磁共振扩散张量成像参数的特征[J]. *中国医学影像学杂志*, 2016, 24(2): 91—95. DOI: 10.3969/j.issn.1005-5185.2016.02.003.
- [14] 郑奎宏, 马林, 郭行高, 等. 正常人颈髓 MR 扩散张量成像的初步研究[J]. *中华放射学杂志*, 2006, 40(5): 490—493. DOI: 10.3760/j.issn:1005-1201.2006.05.009.
- [15] 王岩, 马林, 郭行高, 等. 正常人颈髓扩散张量成像的定量分析[J]. *中国医学影像学技术*, 2009, 25(8): 1371—1374. DOI: 10.3321/j.issn:1003-3289.2009.08.012.
- [16] 罗臣旭, 向述天. 健康人颈髓 DTI 的定量研究及意义[D]. 昆明: 昆明医科大学, 2016.
- [17] 倪丰, 单华, 殷信道. 正常颈髓磁共振扩散张量成像的定量分析[J]. *中国 CT 和 MRI 杂志*, 2017, 15(8): 1—5. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5131.2017.08.001.
- [18] ONU M, GERVAI P, COHEN-ADAD J, et al. Human cervical spinal cord funiculi: investigation with magnetic resonance diffusion tensor imaging [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2010, 31(4): 829—837. DOI: 10.1002/jmri.22101.
- [19] 陈士跃. 正常颈髓扩散张量成像扩散参数的影响因素和相关性研究[J]. *中国 CT 和 MRI 杂志*, 2016, 14(1): 1—4. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5131.2016.01.001.
- [20] MAMATA H, JOLESZ F A, MAIER S E. Characterization of central nervous system structures by magnetic resonance diffusion anisotropy [J]. *Neurochem Int*, 2004, 45(4): 553—560. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5131.2016.01.001.

(收稿日期: 2018—06—20; 修回日期: 2018—08—14)