

磁共振弥散张量成像对脊髓型颈椎病患者术后神经功能恢复的预测作用

李翔^{1,2}, 陆庭骥², 胡勇^{1,2}

(1 香港大学深圳医院骨科 深圳市创伤骨科新技术重点实验室 518053 广东省深圳市;

2 香港大学矫形及创伤外科学系 香港特别行政区)

【摘要】目的:探讨磁共振弥散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)在预测脊髓型颈椎病(cervical spondylotic myelopathy, CSM)患者术后神经功能恢复中的作用。方法:前瞻性分析 50 例行手术治疗的 CSM 患者的临床资料,患者年龄 43~86 岁(64.3±11.2 岁)。以 19 例年龄 50~62 岁(54.6±4.2 岁)的健康志愿者作为对照组。应用 3.0T 磁共振 DTI 成像序列,观察患者术前各神经纤维束感兴趣区(包括整个颈髓、颈髓前束、侧束及后束)中的各向异性分数(fractional anisotropy, FA)、平均弥散率(mean diffusivity, MD)、轴向弥散系数(axial diffusivity, AD)及径向弥散系数(radial diffusivity, RD),将患者按术后神经功能日本骨科协会(Japanese Orthopedic Association, JOA)评分改善率(recovery rate, RR)分为 3 组:优良疗效组(RR>0.7)、中等疗效组(RR 0.4~0.7)和一般疗效组(RR<0.4)。比较对照组和 3 个患者组之间 DTI 参数值的差异,分析 CSM 患者脊髓神经束感兴趣区中的 FA、MD、AD 和 RD 值与神经功能改善率的相关性,并比较年龄、术前 JOA 评分、发病时间、MRI T2 加权像脊髓高信号及 DTI 参数在预测 CSM 患者手术预后中的效果。结果:3 个患者组的年龄、发病时间及术前 JOA 评分均无显著性差异($P>0.05$)。除优良疗效组整个颈髓的 FA 值外,3 个患者组的 FA、MD 和 RD 值与对照组比较均存在显著性差异($P<0.01$)。3 个患者组之间仅优良疗效组的整个颈髓、脊髓侧束和后束的 FA 值与一般疗效组有显著性差异($P<0.05$)。除后束 MD 值外,CSM 患者所有脊髓神经束感兴趣区中的 FA、MD 和 RD 值均与神经功能改善率有显著相关性($P<0.05$);FA 值在所有脊髓神经束感兴趣区中与神经功能改善率呈正相关,MD 和 RD 值与神经功能改善率呈负相关($P<0.05$),后束 FA 值有最好的相关性($r^2=0.253, P<0.001$)。ROC 分析显示 FA 值的曲线下面积显著大于年龄、术前 JOA 评分、发病时间及 T2 加权像中脊髓高信号($P<0.05$)。脊髓侧束的 FA 值在预测 CSM 患者优良手术效果中最为准确。结论:CSM 患者术前 DTI 参数值,尤其是脊髓后束及侧束 FA 值,在预测患者术后神经功能恢复程度中表现出优于临床及传统影像学指标的特性,具有潜在的临床应用前景。

【关键词】脊髓型颈椎病;弥散张量成像;手术预后

doi: 10.3969/j.issn.1004-406X.2019.05.01

中图分类号:R681.5, R445.2 文献标识码:A 文章编号:1004-406X(2019)-05-0385-09

The predictive effect of diffusion tensor imaging in the postoperative neurological recovery of cervical spondylotic myelopathy/LI Xiang, Keith D.K. Luk, HU Yong//Chinese Journal of Spine and Spinal Cord, 2019, 29(5): 385-393

【Abstract】 Objectives: To investigate the usage of diffusion tensor imaging(DTI) in predicting postoperative neurologic recovery of cervical spondylotic myelopathy(CSM). **Methods:** The clinical data of fifty patients with CSM who underwent surgical treatment(43 to 86 years old, with mean age of 64.3±11.2 years old) were analyzed in this prospective study. Nineteen healthy volunteers (50 to 62 years old, with mean age of 54.6±4.2 years old) were recruited as control group. DTI parameters including fractional anisotropy(FA), mean diffusivity(MD), axial diffusivity(AD) and radial diffusivity(RD) in several regions of interest(ROIs) of cervical spinal cord (including the whole cord, ventral columns, lateral columns and dorsal columns) were derived from the images of a 3.0T magnetic resonance DTI sequence. The patients were divided into three groups according to post-

基金项目:深圳市科技研发基金(编号:JCYJ20170413162540673)

第一作者简介:男(1984-),主治医师,医学博士,研究方向:颈椎病

电话:(0755)86913333 E-mail:lix7@hku-szh.org

通讯作者:胡勇 E-mail:yhud@hku.hk

operative neurologic recovery rate(RR) based on Japanese Orthopedic Association(JOA) scores, including patients with $RR < 0.4$, patients with $0.4 < RR < 0.7$ and patients with $RR > 0.7$ respectively. The differences of DTI parameters between the control group and the three patient groups were compared. The correlations among FA, MD, AD and RD values in different regions of interest(ROI) and neurologic recovery rate were analyzed. The ability of predicting surgical outcome in CSM patients was compared among age, preoperative JOA scores, duration of symptoms, increased signal intensity on T2-weighted images and DTI parameters. **Results:** None of age, duration of symptoms and preoperative JOA scores showed significant difference among the three patient groups($P > 0.05$). Except for the FA value in the whole cord of $RR > 0.7$ group, the FA, MD and RD values in the three patient groups showed significant differences from those in the control group respectively($P < 0.01$). In the three patient groups, only the FA values in the whole cord, lateral column and dorsal column of $RR > 0.7$ group showed significant differences from those of $RR < 0.4$ group. The FA, MD and RD values in all the investigated ROIs were significantly correlated with neurologic recovery rate($P < 0.05$), except for MD value in the dorsal column. A positive correlation existed between the FA value and the recovery rate in all the investigated ROIs($P < 0.05$), while MD and RD values showed negative associations with the recovery rate($P < 0.05$), in which FA value in the dorsal column showed the strongest correlation($r^2 = 0.253$, $P < 0.001$). In the receiver operating characteristic curve(ROC) analysis, the areas under the curve(AUC) of the FA value in all the ROIs were significantly larger than those of age, preoperative JOA scores, duration of symptoms and increased signal intensity within cervical cord on the T2-weighted images. Among them, FA value of lateral column presented the best ability of predicting surgical outcome for CSM patients. **Conclusions:** Preoperative DTI parameters, especially the FA values in the dorsal and lateral columns, has superior capacity in predicting surgical outcome for patients with CSM compared to clinical and traditional MRI features. DTI may be a promising tool in the clinical practice of CSM.

【Key words】 Cervical spondylotic myelopathy; Diffusion tensor imaging; Prognosis

【Author's address】 1 Shenzhen Key Laboratory for Innovative Technology in Orthopaedic Trauma, The University of Hong Kong-Shenzhen Hospital, Shenzhen, 518053, China; 2 Department of Orthopaedics and Traumatology, The University of Hong Kong, Hong Kong, China

脊髓型颈椎病(cervical spondylotic myelopathy, CSM)是由于颈椎退行性病变所引起的慢性脊髓损伤,起病隐匿,重症者可造成严重的四肢神经功能损害^[1,2],如果不能及时采取治疗措施,往往造成不可逆的脊髓神经功能损伤。手术是解除脊髓压迫和恢复神经功能的最有效手段^[3]。但在临床实践中,并不是所有的CSM患者在术后都能得到满意的远期神经功能恢复^[2-4]。在术前评估中,不管是年龄、发病时间、神经功能评分,还是X线片及MRI等影像学指标,都无法很好地预测患者的手术预后^[5,6],导致CSM的手术指征仍存在争议,手术时机的选择大多依靠术者的经验^[7-10]。弥散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)是一种MRI技术,它可以获取脊髓组织的各向异性特征,反映脊髓组织的病理学损伤特性^[11]。研究者们将DTI与传统MRI比较,发现DTI可在CSM早期更有效地发现脊髓神经的损伤^[11-15],并能很好地与重症患者的神经功能损伤程度相关联^[16-23]。理论上,脊髓神经组织的病理损伤程度是反映

CSM严重程度的最佳指标,也应是反映术后神经功能恢复可能性的理想指标。本研究旨在分析术前DTI参数与患者术后神经功能恢复之间的关联,并与临床指标、传统MRI比较,探讨其在预测CSM患者手术预后中的作用。

1 资料与方法

1.1 一般资料

本研究于2011年开始招募CSM患者,最终成功招募68例CSM患者。所有患者均通过询问病史、体格检查及颈椎正侧位X线片和MRI平扫等影像学检查确定诊断。患者入选标准:诊断为CSM,临床检查具备典型的神经功能损伤特点,影像学检查提示颈脊髓受压;排除标准:急性脊髓损伤,有颈椎手术史,有幽闭恐惧症,体内有金属内植物无法进行MRI检查。排除:(1)未行手术治疗者;(2)术后出现严重并发症,如感染、神经损伤等;(3)术后随访期间患者出现失访、严重创伤者。14例患者未行手术治疗,4例患者因失访予以排

除。共纳入 50 例患者,其中男 36 例,女 14 例,年龄 43~86 岁(64.3±11.2 岁)。均于颈椎手术前行 MRI T2 加权像及 DTI 扫描。

从前期研究^[24]数据库中的 65 例健康志愿者中选取对照组,该数据库入选标准:四肢感觉运动功能正常,JOA 评分满分,Hoffman 征阴性;排除标准:有脊髓损伤及其他神经病变病史,或 MRI 检查发现颈椎椎管狭窄及明显颈椎退变。为使对照组与患者组的年龄差距减小以降低神经系统退变对 DTI 结果造成的影响,仅选取其中的 19 例年龄超过 50 岁的健康志愿者作为对照组,男 9 例,女 10 例,年龄 50~62 岁(54.6±4.2 岁)。

本研究通过医院伦理委员会审核并批准,入组前充分告知患者及健康志愿者本研究的性质及流程,同意后签署知情同意书。

1.2 临床参数及神经功能评估

采集所有患者的临床参数,包括年龄、发病时间、T2 高信号情况。由经过培训的脊柱外科医生及物理治疗师于手术前及术后至少 1 年(12~24 个月,平均 15.8 个月)进行详细的神经功能检查并进行 JOA 评分,计算神经功能改善率^[25],改善率(recovery rate,RR)=(术后 JOA 评分-术前 JOA 评分)/(17-术前 JOA 评分)。为使各组样本量相似,将患者按 RR 分为 3 组:一般疗效组($n=16$),RR<0.4;中等疗效组($n=17$),RR 0.4~0.7;优良疗效组($n=17$),RR>0.7。

1.3 MRI 扫描

所有患者术前及健康志愿者均使用 Philips Achieva 3.0T 磁共振扫描仪完成 T2 加权像及 DTI 扫描(图 1)。矢状位及轴位 T2 加权像应用快速自旋回波序列。矢状位扫描参数:视野(FOV) 250×250mm,体素大小 0.49×0.49mm²,层厚 3mm,层间空隙 0.3mm,TE/TR=120/3314ms。11 张矢状位扫描图片覆盖整个颈髓;轴位扫描中 12 张轴位扫描图片覆盖从 C2~C7 整个颈髓,每一张均位于椎体或椎间盘的中心,FOV 80×80mm,体素大小 0.63×0.63mm²,层厚 7mm,TE/TR=120/4000ms。常规扫描后,于矢状位定位,DTI 扫描参数如下:模式 SE-EPI;弥散方向 15;b 值 600s/mm²。应用频谱预饱和和反转恢复序列(spectral pre-saturation inversion recovery,SPiR)避免伪影。具体参数:FOV 80×36mm,采集矩阵 80×28,重建分辨率 0.63×0.63,层厚 7mm,EPI 因子 35,TE/TR=60ms/5

次心跳。应用心电门控减少心跳伪影,扫描位置与 T2 加权像一致。

1.4 影像分析

扫描后,DTI 数据上传至后处理平台,原始数据经 DTI studio 软件(版本 2.4.01,2003,John Hopkins Medical Institute,John Hopkins University, and Baltimore,MD)处理得到对应的各向异性分数(fractional anisotropy,FA)、平均弥散率(mean diffusivity,MD)、轴向弥散系数(axial diffusivity,AD)及径向弥散系数(radial diffusivity, RD)图像。之后通过 Image J 软件(版本 1.47v, National Institute of Health, USA)对 DTI 脊髓图像进行分区分析(图 2),选择整个脊髓(whole cord,WC)、脊髓前束(ventral column,VC)、侧束(lateral column,LC)及后束(dorsal column,DC)作为感兴趣区,由机器自动给出上述 DTI 参数。DTI 图像的数据分析由 2 名经过培训的实验人员分别独立完成,实验人员对实验的分组及临床数据不知情,最终 DTI 参数值取两者平均值。同时,由 2 名对患者临床信息不知情的脊柱外科医生分别对实验组患者术前 T2 加权像矢状位 MRI 进行评估,颈髓出现高信号的病例被记录并用于分析,如出现不一致,最终通过讨论达成一致(图 3)。

1.5 测量值重复性分析

用组内相关系数(intra-class correlation coefficient,ICC)来评估测量者在 DTI 图像分析中的自身及测量者间的测量可重复性。随机选取 15 名健康志愿者的 DTI 数据由两名研究人员分别进行分析并比较。测量者自身测量的组内相关系数为 0.752,测量者之间的组内相关系数为 0.764。测量可重复性均为优良水平。

对 T2 脊髓高信号的判定进行了可信度分析。2 名脊柱外科医生对 14 例随机抽取的实验组患者进行 T2 加权像 MRI 的脊髓高信号评估,符合率及 Cohen's Kappa 系数分别为 91.1%和 0.82,有较好的一致性。

1.6 统计学分析

获取从 C2~C7 共 11 张轴向扫描图像的 DTI 数据,包括 FA、MD、AD 及 RD,并将其平均,得到每例受试者颈椎 WC、VC、LC 及 DC 的 DTI 参数值。应用 SPSS 15.0 统计软件(Chicago,IL, USA),采用方差分析的方法比较各组之间 FA 值、MD 值、AD 值及 RD 值,并用 Pearson 检验分

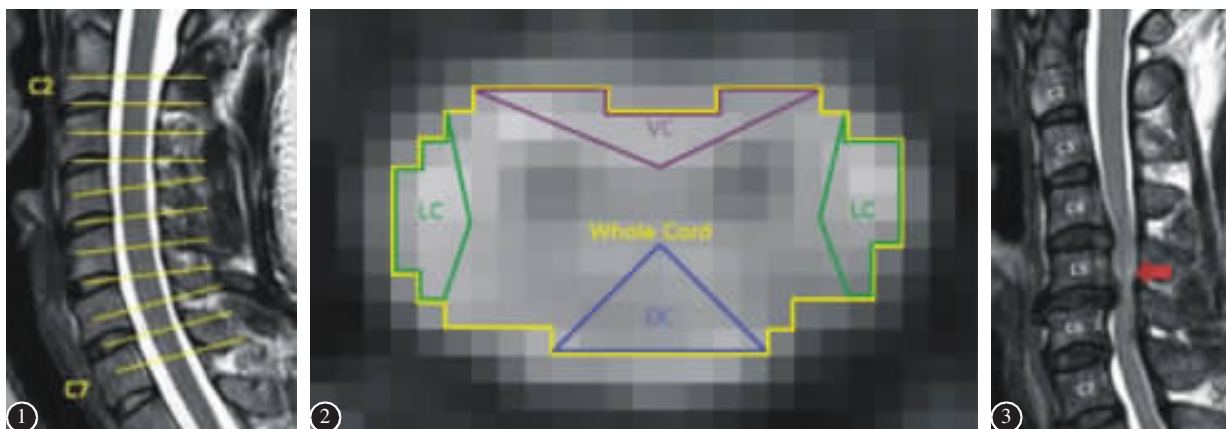


图 1 颈椎 MRI T2 加权像矢状位像上显示 DTI 轴向扫描布局 图 2 在提取的 FA 图像中确定各脊髓神经束的感兴趣区,包括全脊髓(whole cord,WC)、脊髓前束(ventral column,VC)、侧束(lateral column,LC)及后束(dorsal column,DC) 图 3 MRI T2 加权像矢状位像上 C5/6 脊髓高信号

Figure 1 Sections for the axial diffusion tensor imaging (DTI) scanned on a sagittal T2W image **Figure 2** Regions of interest covering the whole cord(WC), the ventral columns(VC), the lateral columns(LC) and the dorsal column(DC) were drawn on DTI FA map **Figure 3** Increased signal intensity(ISI) was observed on sagittal T2-weighted MRI images of patients

析术前临床及 DTI 参数与术后神经功能改善率之间的相关性。进一步用线性回归的方法分析不同神经束区域中的 DTI 参数值与术后神经功能改善率之间的关系,并用 ROC(receiver operating characteristic)曲线比较 DTI 参数、临床参数及 T2 加权像脊髓内高信号等方法在预测患者术后优良及中等神经功能改善率中的能力。所有统计学分析均以 $P < 0.05$ 为有统计学意义。

2 结果

50 例入组患者中 45 例为颈椎间盘突出(90%),5 例为黄韧带骨化(2%)或后纵韧带骨化(8%)。患者从发病至手术平均时间为 14 个月(1~84 个月)。17 例患者接受前路手术(34%),33 例患者接受后路手术(66%)。

患者组与对照组年龄存在显著性差异(患者组: 64.3 ± 11.2 岁,对照组: 54.6 ± 4.2 岁, $P < 0.05$),两组间性别无显著性差异($P > 0.05$)。3 个患者组的一般资料见表 1,三组间年龄、性别、发病时间、术前 JOA 评分、T2 脊髓高信号比例及随访时间均无统计学差异($P > 0.05$)。

各组脊髓神经束感兴趣区中的所有 DTI 参数值见表 2。除优良疗效组 WC 的 FA 值外,3 个患者组的 FA、MD 和 RD 值与对照组比较均存在显著性差异($P < 0.01$)。3 个患者组两两比较,仅优

良疗效组 WC、LC 和 DC 的 FA 值与一般疗效组有显著性差异($P < 0.05$),其余均无显著性差异($P > 0.05$)。

进一步分析发现,年龄、发病时间及术前 JOA 评分均与术后神经功能改善率无显著相关性(年龄, $P = 0.616$;发病时间, $P = 0.401$;术前 JOA 评分, $P = 0.594$)。除后束 MD 值外,CSM 患者所有脊髓神经束感兴趣区中的 FA、MD 和 RD 值均与神经功能改善率有显著相关性(Fa 值:WC, $P < 0.001$;

表 1 3 个患者组临床参数及 T2 脊髓高信号占比

Table 1 Clinical parameters and proportion of increased signal intensity on T2-weighted MRI of CSM patients

	一般疗效组 Fair group (n=16)	中等疗效组 Moderate group (n=17)	优良疗效组 Good group (n=17)
年龄(岁) Age	60.7±10.2	67.2±11.1	64.8±11.8
性别(男/女) Gender(M/F)	10/6	14/3	12/5
发病时间(月) Duration of symptoms	18.8±20.2	11.4±9.2	12.4±10.5
术前 JOA 评分 Preoperative JOA scores	10.5±2.3	10.4±2.6	10.2±3.0
T2 脊髓高信号比例 Increased signal intensity	75%	64.7%	41.2%
随访时间(月) Follow-up time(m)	15.9±3.9	15.1±4.3	16.4±5.8

VC, $P=0.001$; LC, $P<0.001$; DC, $P<0.001$ 。MD 值: WC, $P=0.039$; VC, $P=0.01$; LC, $P=0.016$; DC, $P=0.076$; RD 值: WC, $P=0.007$; VC, $P=0.003$; LC, $P=0.004$; DC, $P=0.008$), 而所有感兴趣区中的 AD 值与神经功能改善率均无显著相关性 ($P>0.05$)。

应用线性回归分析, FA 值在所有脊髓神经束感兴趣区中与神经功能改善率呈显著性正相关 (图 4)。除后束 MD 值外 ($P=0.078$), 所有脊髓神经束感兴趣区中的 MD 和 RD 值与神经功能改善率呈显著性负相关 (图 5、6)。

应用 ROC 曲线比较患者年龄、T2 加权像脊髓高信号、术前 JOA 评分、发病时间及各脊髓神经束感兴趣区中 FA 值在预测优良及中等神经功能改善率中的作用, WC、VC、LC 及 DC 中 FA 值的曲线下面积显著大于年龄、术前 JOA 评分、发病时间及 T2 加权像中脊髓高信号等临床参数 (图 7、表 3), 脊髓侧束的 FA 值在预测 CSM 患者手术效果中有最佳效能。

3 讨论

CSM 的病程复杂, 具有长期性、间歇性和隐匿性等特点, 病程变化难于预测^[26-30]。大部分脊柱

外科医生认为对于严重的 CSM, 外科干预是解除脊髓压迫及恢复神经功能的最有效手段^[3]。理论上, 颈椎减压手术的目的是扩大狭窄的椎管, 释放受压的脊髓以解除静态压迫。脊髓慢性压迫的解除可增加脊髓神经组织的血液供应, 改善脊髓缺血缺氧状态, 促进神经组织的修复和神经功能的恢复。但是在临床实践中, 并不是所有的 CSM 患者在术后都能得到满意的神经功能康复结果。这也意味着, 脊髓神经组织也许在术前即出现了不可逆的损伤。而目前仍缺少评估脊髓不可逆损伤的临床指标及手段, 导致手术时机的选择大多依靠医生的经验^[7-10]。众多学者在寻找预测 CSM 手术预后的临床指标中投入了大量精力, 但到目前为止, 不管是年龄、发病时间、术前神经功能状况等临床因素, 还是 X 线片及传统 MRI 等影像学指标都无法准确预测患者术后的神经功能恢复^[5,6]。

在以往报道中, DTI 参数尤其是 FA 值与 CSM 患者神经功能损伤程度有显著相关性^[16,17]。本研究进一步探究了术后不同神经功能恢复程度的 CSM 患者之间术前 DTI 参数值的区别。虽然在患者组的两两比较中并未发现 DTI 参数值均具有显著性差异, 但优良疗效组的患者更倾向于表

表 2 对照组与不同疗效脊髓型颈椎病患者组不同脊髓区域感兴趣区的 FA、MD、AD 及 RD 值

Table 2 The FA, MD, AD and RD values of the different regions of interest in the control group and patient groups with different recovery rate

		对照组 (n=19) Control group	患者组 Patients		
			一般疗效组 (n=16) Fair group	中等疗效组 (n=17) Moderate group	优良疗效组 (n=17) Good group
FA 值 FA value	WC	0.669±0.042	0.553±0.088 ^①	0.603±0.070 ^①	0.617±0.052 ^②
	VC	0.673±0.075	0.517±0.105 ^①	0.566±0.066 ^①	0.589±0.060 ^①
	LC	0.753±0.063	0.572±0.094 ^①	0.628±0.082 ^①	0.646±0.051 ^{①②}
	DC	0.761±0.066	0.597±0.109 ^①	0.658±0.076 ^①	0.668±0.073 ^{①②}
MD 值 (×10 ⁻³) MD value	WC	1.061±0.164	1.493±0.432 ^①	1.365±0.285 ^①	1.402±0.273 ^①
	VC	0.020±0.158	1.681±0.497 ^①	1.467±0.358 ^①	1.487±0.314 ^①
	LC	1.061±0.219	1.569±0.490 ^①	1.403±0.315 ^①	1.408±0.281 ^①
	DC	1.066±0.259	1.445±0.427 ^①	1.348±0.243 ^①	1.404±0.277 ^①
AD 值 (×10 ⁻³) AD value	WC	1.989±0.211	2.432±0.510 ^①	2.353±0.369 ^①	2.452±0.345 ^①
	VC	1.905±0.231	2.613±0.554 ^①	2.399±0.456 ^①	2.500±0.402 ^①
	LC	2.153±0.246	2.569±0.568	2.448±0.358 ^①	2.507±0.365 ^①
	DC	2.188±0.302	2.462±0.482	2.467±0.372 ^②	2.583±0.309 ^①
RD 值 (×10 ⁻³) RD value	WC	0.597±0.152	1.024±0.414 ^①	0.871±0.273 ^①	0.877±0.246 ^①
	VC	0.579±0.148	1.216±0.496 ^①	1.001±0.326 ^①	0.981±0.281 ^①
	LC	0.517±0.219	1.070±0.468 ^①	0.881±0.318 ^①	0.859±0.248 ^①
	DC	0.507±0.252	0.937±0.423 ^①	0.789±0.231 ^①	0.815±0.277 ^①

注: ①与对照组比较 $P<0.05$; ②与一般疗效组比较 $P<0.05$

Note: ①Compared with control group, $P<0.05$; ②Compared with fair group, $P<0.05$

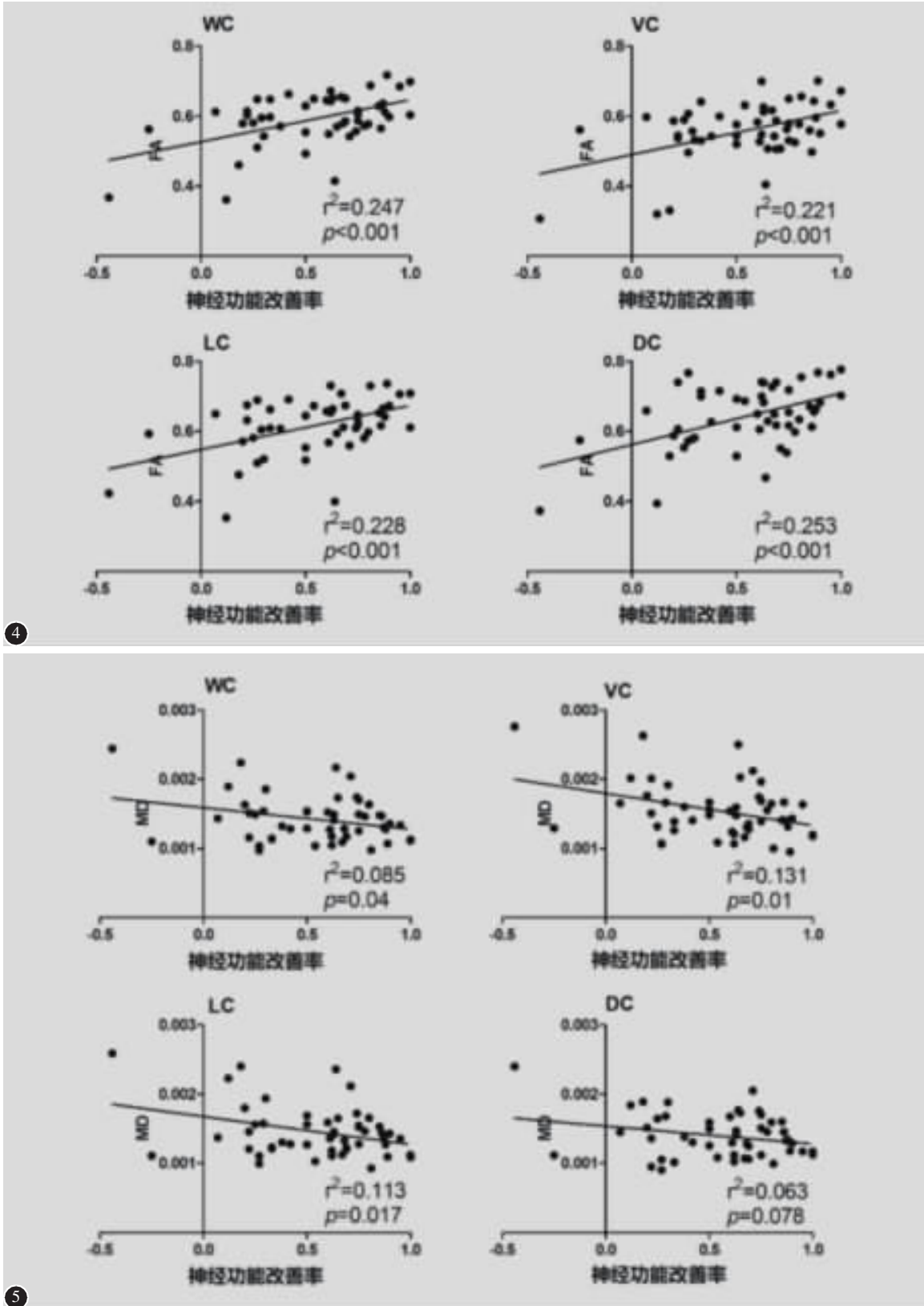


图 4 脊髓型颈椎病患者在 WC、VC、LC 和 DC 中的 FA 值与神经功能改善率之间的线性回归分析 图 5 脊髓型颈椎病患者在 WC、VC、LC 和 DC 中的 MD 值与神经功能改善率之间的线性回归分析

Figure 4 Linear regressions of FA values in WC, VC, LC and DC with neurologic recovery rate in CSM patients

Figure 5 Linear regressions of MD values in WC, VC, LC and DC with neurologic recovery rate in CSM patients

现为高 FA 值及低 MD 和 RD 值的 DTI 参数特点。同时,与对照组相比,所有患者组的 FA 值显著较低,而 MD 和 RD 值显著较高,与以往的研究报道相一致^[31,32]。

本研究还发现 FA、MD 和 RD 值与术后患者神经功能恢复程度有显著的关联。其中,FA 值相比 MD 及 RD 值具有更好的相关性。以往的研究报道显示,在所有 DTI 参数值中 FA 值与 CSM 患

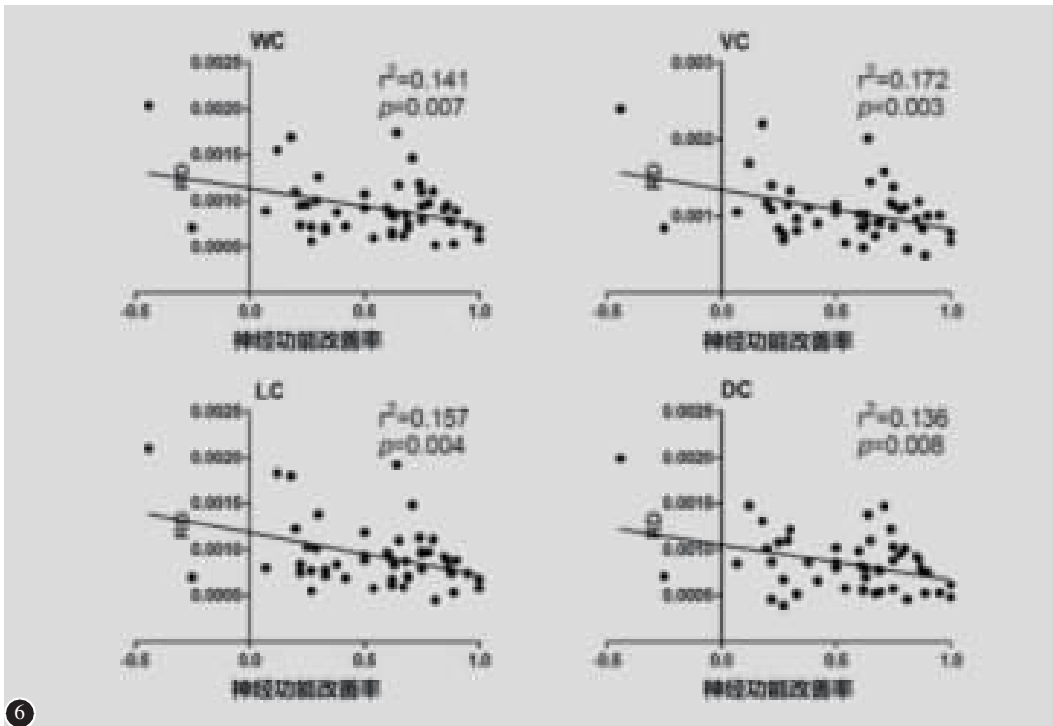


图 6 脊髓型颈椎病患者在 WC、VC、LC 和 DC 中的 RD 值与神经功能改善率之间的线性回归分析

Figure 6 Linear regressions of RD values in WC, VC, LC and DC with neurologic recovery rate in CSM patients

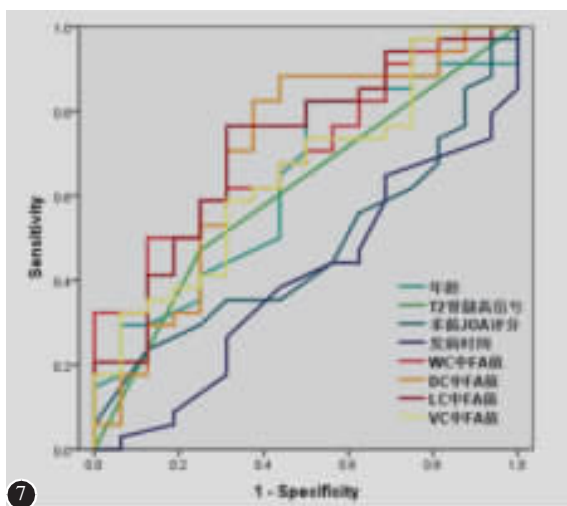


图 7 应用不同临床及 DTI 参数预测脊髓型颈椎病患者神经功能改善率准确性的 ROC 曲线

Figure 7 Receiver operating characteristic curves that using different clinical and DTI parameters to test the prognostic accuracy of neurologic recovery rate of CSM patients

表 3 应用不同临床及 DTI 参数预测脊髓型颈椎病患者神经功能改善率的 ROC 分析

Table 3 ROC analyses of different clinical and DTI parameters in predicting neurologic recovery rate of CSM patients

	曲线下面积 Area under the curve	P 值 P value	95%置信区间 95%CI	
			下限 Minimum	上限 Maximum
年龄 Age	0.631	0.140	0.467	0.794
T2 脊髓高信号 Increased signal intensity	0.610	0.212	0.445	0.775
术前 JOA 评分 Preoperative JOA scores	0.472	0.755	0.307	0.637
发病时间 Duration of symptoms	0.399	0.253	0.234	0.564
WC 中 FA 值 FA of whole cord	0.704	0.021	0.557	0.851
DC 中 FA 值 FA of dorsal column	0.697	0.026	0.528	0.866
LC 中 FA 值 FA of lateral column	0.722	0.012	0.570	0.875
VC 中 FA 值 FA of ventral column	0.654	0.081	0.494	0.814

者神经功能损伤程度具有最好的相关性^[18,19]。本研究的结果也证明了这一点。

Zheng 等^[33]应用术前颈髓 MD、AD 及 RD 值与 CSM 患者术后神经功能恢复率相关联,发现这些 DTI 参数值能够有效预测患者手术的预后,并给出预测优良手术预后的 DTI 参数阈值,但研究中并未纳入 FA 值作为参数指标。在本研究中,术前 FA 值较 MD、AD 及 RD 值在预测术后神经功能恢复中表现出更好的效能,与之前的多数文献报告一致^[34-36]。

此外,不同于以往的相关研究报道^[37],本研究还使用神经束感兴趣区的方法来分析不同脊髓神经束的神经损伤程度。研究结果表明,脊髓后束和侧束相较其他脊髓神经束,其 FA 值与手术预后具有最好的相关性。脊髓后束主要由感觉神经纤维组成,负责传导包括触觉、震动觉及本体感觉等神经信号,而脊髓侧束由感觉与运动神经纤维共同构成。本体感觉在维持人体正确姿势及保持稳定而平衡的站立方面有重要作用^[38]。重症 CSM 患者多有步态不稳等表现,并可致严重行走功能障碍甚至残疾^[9,39],而行走功能受损可能与本体感觉功能损伤而导致的平衡能力下降有关。DTI 参数值既然能够反映脊髓的病理损伤程度^[11],我们有理由认为脊髓后束及侧束的损伤程度可能是决定患者术后神经功能恢复程度的最重要因素之一。同时,CSM 患者的感觉功能障碍,包括精细触觉、本体感觉及步态失稳在其总体神经功能障碍中可能扮演更加重要的角色,应当在患者术前评估中予以关注。

本研究表明,DTI 参数在 CSM 患者及健康志愿者之间有显著性差异。CSM 患者术前脊髓 DTI 参数值(如 FA、MD 及 RD)与术后康复程度具有显著关联。其中,脊髓后束及侧束的 FA 值在预测患者手术预后中优于传统临床及影像学指标,具有潜在的临床应用前景。但本项研究存在一定的局限性。首先,尽管本研究根据年龄将健康志愿者进行了筛选,但实验组的平均年龄仍大于对照组,且存在统计学差异,可能对实验结果造成影响。其次,患者组样本量较小,目前仍无法确定准确的 DTI 参数阈值来判断颈髓组织出现不可逆损伤的危险程度。未来需要进一步建立大样本量的健康人群 DTI 参数数据库,以方便进行对比评价。同时,扩大患者组样本量,对脊髓后束及侧束的 DTI

参数值特征进一步分析,以找到决定患者不良预后的参数阈值。

4 参考文献

1. Ichihara K, Taguchi T, Sakuramoto I, et al. Mechanism of the spinal cord injury and the cervical spondylotic myelopathy: new approach based on the mechanical features of the spinal cord white and gray matter[J]. *J Neurosurg*, 2003, 99(3 Suppl): 278-285.
2. McCormick W, Steinmetz M, Benzel E. Cervical spondylotic myelopathy: make the difficult diagnosis, then refer for surgery[J]. *Cleve Clin J Med*, 2003, 70(10): 899-904.
3. Tracy JA, Bartleson J. Cervical spondylotic myelopathy [J]. *Neurologist*, 2010, 16(3): 176-187.
4. Matz P, Anderson P, Holly L, et al. The natural history of cervical spondylotic myelopathy[J]. *J Neurosurg Spine*, 2009, 11(2): 104-115.
5. Alafifi T, Kern R, Fehlings M. Clinical and MRI predictors of outcome after surgical intervention for cervical spondylotic myelopathy[J]. *J Neuroimaging*, 2007, 17(4): 315-337.
6. Mummaneni P, Kaiser M, Matz P, et al. Preoperative patient selection with magnetic resonance imaging, computed tomography, and electroencephalography: does the test predict outcome after cervical surgery[J]. *J Neurosurg Spine*, 2009, 11(2): 119-129.
7. Cheung W, Arvinte D, Wong Y, et al. Neurological recovery after surgical decompression in patients with cervical spondylotic myelopathy: a prospective study[J]. *Int Orthop*, 2008, 32(2): 273-278.
8. Mummaneni PV, Kaiser MG, Matz PG, et al. Cervical surgical techniques for the treatment of cervical spondylotic myelopathy[J]. *J Neurosurg Spine*, 2009, 11(2): 130-141.
9. Law MD Jr, Bernhardt M, White AA 3rd. Cervical spondylotic myelopathy: a review of surgical indications and decision making[J]. *Yale J Biol Med*, 1993, 66(3): 165-177.
10. Yonenobu K. Cervical radiculopathy and myelopathy: when and what can surgery contribute to treatment[J]. *Eur Spine J*, 2000, 9(1): 1-7.
11. Demir A, Ries M, Moonen C, et al. Diffusion-weighted MR imaging with apparent diffusion coefficient and apparent diffusion tensor maps in cervical spondylotic myelopathy[J]. *Radiology*, 2003, 229(1): 37-43.
12. Werring D, Clark C, Barker G, et al. Diffusion tensor imaging of lesions and normal-appearing white matter in multiple sclerosis[J]. *Neurology*, 1999, 52(8): 1626-1658.
13. Lee J, Park K, Kim J, et al. Diffusion tensor imaging in idiopathic acute transverse myelitis[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2008, 191(2): W52-57.
14. Van Hecke W, Nagels G, Emonds G, et al. A diffusion tensor imaging group study of the spinal cord in multiple scler

- rosis patients with and without T2 spinal cord lesions [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2009, 30(1): 25–34.
15. Hesselstine SM, Law M, Babb J, et al. Diffusion tensor imaging in multiple sclerosis: assessment of regional differences in the axial plane within normal-appearing cervical spinal cord[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2006, 27(6): 1189–1193.
16. 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): 426–459.
17. Uda T, Takami T, Tsuyuguchi N, et al. Assessment of cervical spondylotic myelopathy using diffusion tensor magnetic resonance imaging parameter at 3.0 tesla[J]. *Spine*, 2013, 38(5): 407–414.
18. Jones J, Cen S, Lebel R, et al. Diffusion tensor imaging correlates with the clinical assessment of disease severity in cervical spondylotic myelopathy and predicts outcome following surgery[J]. *Am J Neuroradiol*, 2013, 34(2): 471–478.
19. 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(11): 1940–1945.
20. Rajasekaran S, Yerramshetty JS, Chittode VS, et al. The assessment of neuronal status in normal and cervical spondylotic myelopathy using diffusion tensor imaging [J]. *Spine*, 2014, 39(15): 1183–1189.
21. 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.
22. Ellingson BM, Salamon N, Woodworth DC, et al. Correlation between degree of subvoxel spinal cord compression measured with super-resolution tract density imaging and neurological impairment in cervical spondylotic myelopathy [J]. *J Neurosurg: Spine*, 2015, 22(6): 631–638.
23. 孔超, 陈学明, 关骅, 等. 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 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2016, 26(11): 977–983.
24. Chan TY, Li X, Mak KC, et al. Normal values of cervical spinal cord diffusion tensor in young and middle-aged healthy Chinese[J]. *Eur Spine J*, 2015, 24(12): 2991–2998.
25. Hirabayashi K, Miyakawa J, Satomi K, et al. Operative results and postoperative progression of ossification among patients with ossification of cervical posterior longitudinal ligament[J]. *Spine*, 1981, 6(4): 354–364.
26. Epstein JA, Carras R, Hyman RA, et al. Cervical myelopathy caused by developmental stenosis of the spinal canal [J]. *J Neurosurg*, 1979, 51(3): 362–367.
27. Taylor AR. The mechanism of injury to the spinal cord in the neck without damage to vertebral column [J]. *J Bone Joint Surg Br*, 1951, 33(4): 543–547.
28. Shimomura Y, Hukuda S, Mizuno S. Experimental study of ischemic damage to the cervical spinal cord[J]. *J Neurosurg*, 1968, 28(6): 565–581.
29. Mair WG, Druckman R. The pathology of spinal cord lesions and their relation to the clinical features in protrusion of cervical intervertebral discs: a report of four cases[J]. *Brain*, 1953, 76(1): 70–91.
30. Tetreault LA, Dettori JR, Wilson JR, et al. Systematic review of magnetic resonance imaging characteristics that affect treatment decision making and predict clinical outcome in patients with cervical spondylotic myelopathy[J]. *Spine(Phila Pa 1976)*, 2013, 38(22 Suppl 1): S89–110.
31. Mamata H, Jolesz FA, Maier SE. Apparent diffusion coefficient and fractional anisotropy in spinal cord: age and cervical spondylosis-related changes [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2005, 22(1): 38–43.
32. Cui JL, Li X, Chan TY, et al. Quantitative assessment of column-specific degeneration in cervical spondylotic myelopathy based on diffusion tensor tractography [J]. *Eur Spine J*, 2015, 24(1): 41–47.
33. Zheng W, Chen H, Wang N, et al. Application of diffusion tensor imaging cutoff value to evaluate the severity and postoperative neurologic recovery of cervical spondylotic myelopathy[J]. *World Neurosurg*, 2018, 118: e849–e855.
34. Wen CY, Cui JL, Liu HS, et al. Is diffusion anisotropy a biomarker for disease severity and surgical prognosis of cervical spondylotic myelopathy[J]. *Radiology*, 2014, 270(1): 197–204.
35. 申沧海, 徐宝山, 杨强, 等. MRI T2 加权像与扩散张量成像量化指标对脊髓型颈椎术后脊髓功能恢复的预测价值 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2017, 39(7): 492–497.
36. Jiang W, Han X, Guo H, et al. Usefulness of conventional magnetic resonance imaging, diffusion tensor imaging and neurite orientation dispersion and density imaging in evaluating postoperative function in patients with cervical spondylotic myelopathy[J]. *J Orthop Translat*, 2018, 15: 59–69.
37. Maki S, Koda M, Kitamura M, et al. Diffusion tensor imaging can predict surgical outcomes of patients with cervical compression myelopathy[J]. *Eur Spine J*, 2017, 26(9): 2459–2466.
38. Proske U, Gandevia SC. The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force[J]. *Physiol Rev*, 2012, 92(4): 1651–1697.
39. Baron EM, Young WF. Cervical spondylotic myelopathy: a brief review of its pathophysiology, clinical course, and diagnosis[J]. *Neurosurgery*, 2007, 60(1 Suppl 1): S35–41.

(收稿日期:2018-12-17 末次修回日期:2019-04-14)

(英文编审 唐翔宇/贾丹彤)

(本文编辑 卢庆霞)