

• 影像技术学 •

磁共振扩散峰度成像和 T_2^* -mapping 技术定量检测腰椎间盘退变的对比研究

曾菲菲, 查云飞, 邢栋, 王娇, 陆雪松

【摘要】目的:比较磁共振扩散峰度成像(DKI)和 T_2^* -mapping 定量技术对早期腰椎间盘退变的诊断价值。**方法:**选择 80 名受检者进行常规 T_2 WI、DKI 与 T_2^* -mapping 成像, 并对腰椎间盘进行 Pfirrmann 分级, 分析椎间盘髓核(NP)、前纤维环(AAF)、后纤维环(PAF)的 DKI 测量参数-平均扩散峰度(MK)及平均扩散系数(MD)、 T_2^* 弛豫时间与 Pfirrmann 分级的关系。应用受试者工作特征曲线(ROC 曲线)比较 DKI 和 T_2^* mapping 技术鉴别 Pfirrmann I ~ II 级、II ~ III 级 AUC 值、敏感度及特异度大小。**结果:**NP 的 T_2^* 值在 V 级与 II 级、V 级与 III、V 级与 IV 级比较差异均无统计学意义($P > 0.05$)。AAF 的 MK 值在 II 级与 V 级及 III、IV、V 级间两两比较差异均无统计学意义($P > 0.05$)；AAF 的 MD 值在 V 级与 III 级、V 级与 IV 级比较差异均无统计学意义($P > 0.05$)；AAF 的 T_2^* 值在 I 至 V 级间比较差异均无统计学意义($P > 0.05$)。PAF 的 MK 值、MD 值在 IV 级与 V 级比较差异均无统计学意义($P > 0.05$)；PAF 的 T_2^* 值在 I 级与 II 级比较、V 级与 I ~ IV 级间比较差异均无统计学意义($P > 0.05$)，余分级间两两比较结果均有统计学意义($P < 0.05$)。NP、AAF、PAF 的 MK 值与 Pfirrmann 分级呈明显正相关($r = 0.921, 0.604, 0.678$; P 值均 < 0.001)；NP、AAF、PAF 的 MD 值与 Pfirrmann 分级呈负相关($r = -0.917, -0.509, -0.654$; P 值均 < 0.001)；NP 和 PAF 的 T_2^* 值与 Pfirrmann 分级呈负相关($r = -0.647, -0.305$; P 值均 < 0.001)，而 AAF 的 T_2^* 值与 Pfirrmann 分级无明显相关性($r = 0.088$; $P > 0.05$)。NP、PAF、AAF 的 MK、MD、 T_2^* 值的 ROC 下面积(AUC 值)依次减低。NP、PAF、AAF 的 MK、MD 值鉴别 Pfirrmann I 级与 II 级、II 级与 III 级椎间盘的灵敏度和特异度均 $> T_2^*$ 值。**结论:**DKI 成像定量评价人腰椎间盘退变是可行的, 对于早期腰椎间盘退变, DKI 的敏感性明显高于 T_2^* -mapping 技术。

【关键词】 椎间盘退行性变; 腰椎; 磁共振成像

【中图分类号】 R681.5; R323.4; R445.2 **【文献标识码】** A

【文章编号】 1000-0313(2018)10-1087-06

DOI: 10.13609/j.cnki.1000-0313.2018.10.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Comparative study of diffusion kurtosis imaging and T_2^* -mapping in quantitative detection of lumbar intervertebral disc degeneration ZENG Fei-fei, ZHA Yun-fei, XING Dong, et al. Department of Radiology, Renmin Hospital of Wuhan University, Wuhan 430030, China

【Abstract】 Objective: To compare diffusion kurtosis imaging (DKI) and T_2^* -mapping in quantitative detection of early lumbar intervertebral disc degeneration. **Methods:** T_2 WI, DKI and T_2^* -mapping were performed on 80 subjects. DKI related parameters-mean kurtosis (MK) and mean diffusivity (MD), T_2^* values were used to evaluate the Pfirrmann grade of nucleus pulposus (NP), anterior annulus fibrosus (AAF) and posterior annulus fibrosus (PAF) according to Pfirrmann grading system. Receiver operating characteristic (ROC) curves were used to compare the area under the receiver operating characteristic curve (AUC), sensitivity and specificity of DKI related parameters and T_2^* value among Pfirrmann grade I ~ II and II ~ III. **Results:** There were no statistical significances of MK, MD, and T_2^* values among different degenerated grades ($P < 0.001$), except NP's T_2^* value between grade

作者单位:430060 武汉,武汉大学人民医院放射科(曾菲菲、查云飞、邢栋、王娇);430060 武汉,医学信息分析及肿瘤诊疗湖北省重点实验室(查云飞、陆雪松);430060 武汉,中南民族大学生物医学工程学院(陆雪松)

作者简介:曾菲菲(1990—),女,湖北十堰人,硕士研究生,主要从事血管及肌肉骨骼影像学研究。

通讯作者:查云飞,E-mail:zhayunfei999@126.com

基金项目:医学信息分析及肿瘤诊疗湖北省重点实验室开放课题基金项目(PJS140011511)

V 和 II, V 和 III, V 和 IV; AAF's MK value among III, IV, V; AAF's MD value between grade V and III, V and IV; AAF's T_2^* value among grade I to V; PAF's MK and MD values between grade IV and V; PAF's T_2^* value between grade I and II as well as grade V and grade I to IV ($P > 0.05$). Pfirrmann grades were positively correlated with MK values ($r = 0.921, 0.604, 0.678$, all $P < 0.001$) and negatively correlated with MD values ($r = -0.917, -0.509, -0.654$, all $P < 0.001$) in NP, AAF and PAF. The Spearman's correlation coefficient between Pfirrmann grades and T_2^* values of NP, AAF and PAF were -0.647 ($P < 0.001$), 0.088 ($P > 0.05$) and -0.305 ($P < 0.001$). The AUC values of MK, MD and T_2^* values decreased in sequence. The sensitivity and specificity of MK and MD values in NP, AAF and PAF were superior to T_2^* values in distinguishing Pfirrmann grade I ~ II and grade II ~ III degeneration. **Conclusion:** DKI has the feasibility to evaluate lumbar intervertebral disc degeneration, and DKI is more sensitive than T_2^* -mapping in quantitative detection of early lumbar intervertebral disc degeneration.

【Key words】 Intervertebral disc degeneration; Lumbar vertebrae; Magnetic resonance imaging

椎间盘是由髓核、纤维环以及软骨终板构成的一种纤维软骨组织。细胞老化、营养障碍、生物力学改变等诸多因素的共同作用下会引起椎间盘蛋白多糖降解、胶原蛋白及水含量减少,从而形成椎间盘退变^[1-3]。腰椎间盘水分子扩散能力的变化被认为是椎间盘早期退变的标志^[4]。

常规 MR 图像可显示椎间盘的信号强度和形态学改变,但不能客观量化椎间盘退变程度。 T_2^* -mapping 作为定量评价软骨生物化学成分改变的新兴技术,可在形态学改变之前早期检测软骨内基质大分子的变化,目前应用于各项关节软骨病变及椎间盘退变的定量研究^[5-7]。扩散加权成像(diffusion weighted imaging,DWI)和扩散张量成像(Diffusion tensor imaging,DTI)已广泛地用于腰椎间盘退变研究^[8-10],但对椎间盘超微结构的反映则有限。而且,作为高斯分布模型的 DWI 和 DTI 成像反映椎间盘退变时水分子真实扩散情况有一定局限性^[11]。非高斯分布扩散峰度成像(diffusion kurtosis imaging,DKI)可敏感的反映组织内水分子的扩散能力和组织微结构的复杂程度^[12],但对于人腰椎间盘退变的 DKI 研究报道较少。本研究采用 DKI 和 T_2^* -mapping 技术评价腰椎间盘退变程度,探讨 DKI 定量评价人腰椎间盘退变的可行性,并比较这两种技术对早期椎间盘退变的诊断价值。

材料与方法

1. 临床资料

临床因腰腿痛拟诊腰椎间盘病变的受检者 80 例,男 30 例,女 50 例,年龄 22~66 岁,平均(36.5±14.5)岁,男性平均年龄(37.7±14.4)岁,女性平均年龄(35.7±14.5)岁。纳入标准:受检者对本研究知情同意;能够配合完成 MRI 检查;无幽闭恐惧症、心脏起搏器等。剔除标准:长期体力劳动史、急慢性外伤史、截

瘫、肥胖、脊柱手术或放疗史、严重的脊柱侧弯和脊柱后凸畸形、肿瘤、结核。本研究由武汉大学人民医院伦理委员会批准。

2. 检查设备及方法

采用 3.0T 超导 MR (Discovery 750 Plus, GE Healthcare) 全脊柱相控阵线圈进行检查。对所有受检者均于晚 18:00~22:00 行仰卧位检查,采集腰椎矢状面 T_2 WI、DKI 及 T_2^* -mapping 图像。① 矢状面 T_2 WI 采用 FRFSE 序列,扫描参数: TR 2500 ms, TE 120 ms, 层厚 4.0 mm, 层间距 0.5 mm, 视野 300 mm×300 mm, 扫描矩阵 352×320。② DKI 采用单次激发自旋回波平面成像(SE-EPI)序列,扫描参数: TR 2000 ms, TE 71.7 ms, 层厚 4.0 mm, 层间距 0.5 mm, 视野 300 mm×150 mm, 扫描矩阵 128×128, b 值(0、1000、2000) s/mm², 30 个扩散磁敏感方向。③ T_2^* -mapping 序列扫描参数: TR 73.3 ms, TE(1.6、3.9、6.2、8.5、10.8、13.1、15.4、17.7) ms, 层厚 4.0 mm, 层间距 0.5 mm, 视野 300 mm×300 mm, 扫描矩阵 256×256。

3. 图像处理

腰椎间盘矢状面 T_2 WI 参照 Pfirrmann 分级系统进行退变程度分级^[13],以上图像分析由两位具有 10 年以上临床 MRI 诊断经验丰富的副主任医师完成。

腰椎间盘 DKI 及 T_2^* -mapping 原始图像,分别采用 AW4.6 后处理工作站(GE Healthcare) Function tool 软件包中的 DKI、R2 star 软件进行分析处理。在腰椎 DKI 和 T_2^* -mapping 正中矢状面图像上,将每个腰椎间盘均分为 5 等份测量(ROI 范围约 30~60 mm²),依次为前纤维环(anterior annulus fibrosus, AAF)-ROI 1、髓核(nucleus pulposus, NP)-ROI 2~4、后纤维环(posterior annulus fibrosus, PAF)-ROI 5, 避开上下椎体的软骨终板及脑脊液,每个感兴趣区测

量 3 次,然后计算取平均值。在相应的伪彩图上,记录椎间盘髓核、前纤维环、后纤维环的平均扩散峰度 (mean kurtosis, MK)、平均扩散系数 (mean diffusivity, MD)、 T_2^* 值(图 1)。

4. 统计分析

采用 SPSS 22.0 进行统计学分析,椎间盘退变 Pfirrmann 分级组间 NP、AAF、PAF 定量参数 (MK、MD、 T_2^* 值) 均行单因素方差分析,然后采用 Dunnett's T3 检验进行多重比较;NP、AAF、PAF 定量参数 (MK、MD、 T_2^* 值) 与 Pfirrmann 分级行 Spearman 等级相关性检验;分别构建 NP、AAF、PAF 的 MK、MD、 T_2^* 值在 Pfirrmann 分级 I ~ II 级、II ~ III 级的受试者工作特征曲线 (receiver operation characteristic curves, ROC),计算曲线下面积 (area under curve, AUC)、敏感度、特异度,比较不同部位不同技术的诊断效能 (AUC 值)、敏感度、特异度大小;所有统计结果以 $P < 0.05$ 认为差异有统计学意义。

结 果

共纳入 400 个腰椎间盘进行研究,分布于 L₁~S₁ 椎间盘层面,其中 II 级 (41.25%) 椎间盘数量最多,V 级 (1.00%) 椎间盘数量最少。不同椎间盘 Pfirrmann 分级, NP、AAF、PAF 的平均 MK、MD、 T_2^* 值如表 1。两两比较结果显示 NP 的 T_2^* 值在 V 级与 II 级、V 级与 III、V 级与 IV 级比较差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。AAF 的 MK 值在 II 级与 V 级及 III、IV、V 级间两两比较差异均无统计学意义 ($P > 0.05$);AAF 的 MD 值在 V 级与 III 级、V 级与 IV 级比较差异均无统计学意义 ($P > 0.05$);AAF 的 T_2^* 值在 I ~ V 级间比较差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。PAF 的 MK 值、MD 值在 IV 级与 V 级比较差异无统计学意义 ($P > 0.05$);PAF 的 T_2^* 值在 I 级与 II 级比较、V 级与 I ~ IV 级间比较差异均无统计学意义 ($P > 0.05$),余分级间两两比较结果均有统计学意义 ($P < 0.05$)。

表 1 不同退变等级腰椎间盘 MK、MD、 T_2^* 值

Pfirrmann 分级	n	MK			MD($\mu\text{m}^2/\text{ms}$)			T_2^* (ms)		
		NP	AAF	PAF	NP	AAF	PAF	NP	AAF	PAF
I	126	0.68±0.04	1.34±0.17	1.20±0.20	2.21±0.10	1.15±0.16	1.42±0.25	74.23±17.18	23.43±6.13	21.66±3.59
II	165	0.78±0.04	1.47±0.18	1.36±0.20	1.94±0.10	1.08±0.15	1.23±0.20	60.42±18.59	23.01±6.91	21.47±4.30
III	76	1.00±0.14	1.64±0.20	1.61±0.21	1.56±0.18	0.97±0.13	1.02±0.19	45.03±10.59	24.25±6.02	19.75±3.61
IV	29	1.45±0.18	1.79±0.25	1.97±0.35	1.08±0.13	0.86±0.15	0.73±0.15	33.20±7.61	25.48±6.11	17.13±1.80
V	4	1.98±0.14	2.21±0.27	2.35±0.21	0.79±0.08	0.68±0.13	0.56±0.16	27.73±14.13	23.58±3.34	18.06±3.87

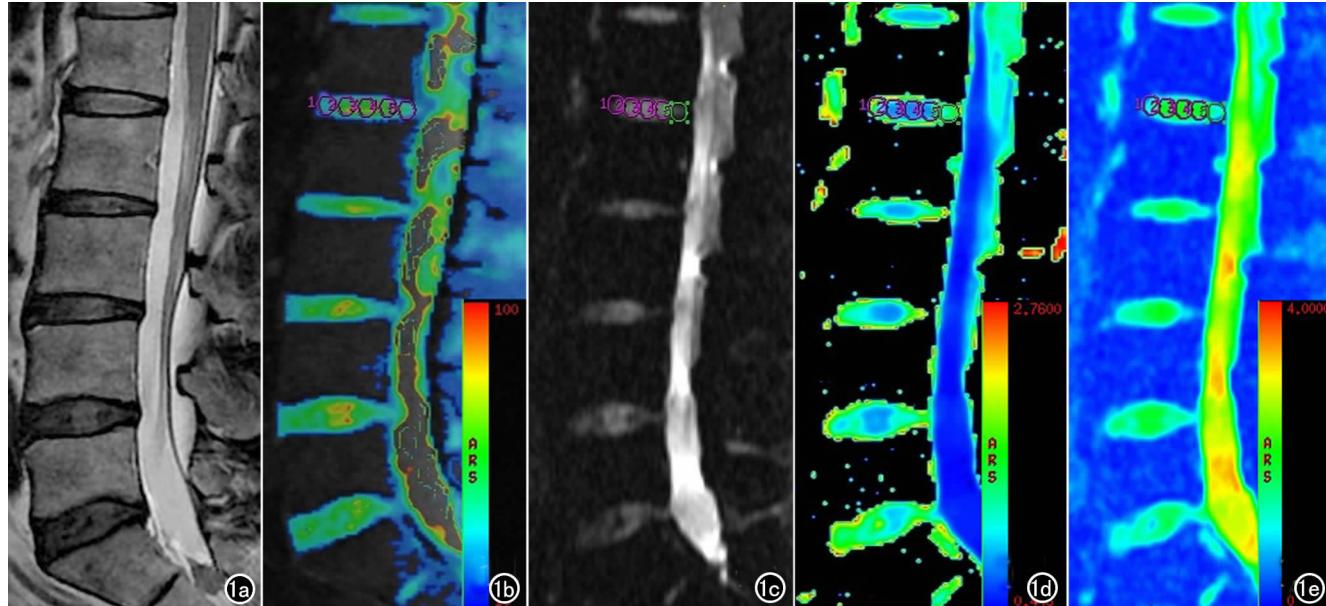


图 1 男,40岁。a) 常规 T_2 WI 图像, L₁/L₂ 椎间盘为 Pfirrmann II 级,L₂/L₃、L₃/L₄、L₄/L₅、L₅/S₁ 椎间盘为 Pfirrmann III 级;b) T_2^* 伪彩图,随着髓核 T_2 WI 信号降低,髓核颜色由高值橘黄色逐渐向低值蓝色变化,纤维环颜色变化显示不明显;c) DKI 图 ($b=0\text{s}/\text{mm}^2$) ;d) MK 伪彩图,随着髓核 T_2 WI 信号降低,髓核颜色逐渐向高值橘黄色变化,纤维环随着退变程度加重,颜色逐渐由淡黄色向高值橘红色变化;e) MD 伪彩图,随着髓核 T_2 WI 信号降低,髓核颜色逐渐向低值淡蓝色变化,纤维环变化显示不明显。MK 及 MD 伪彩图不仅可直观显示髓核范围,而且可清晰显示纤维环张入髓核状态。

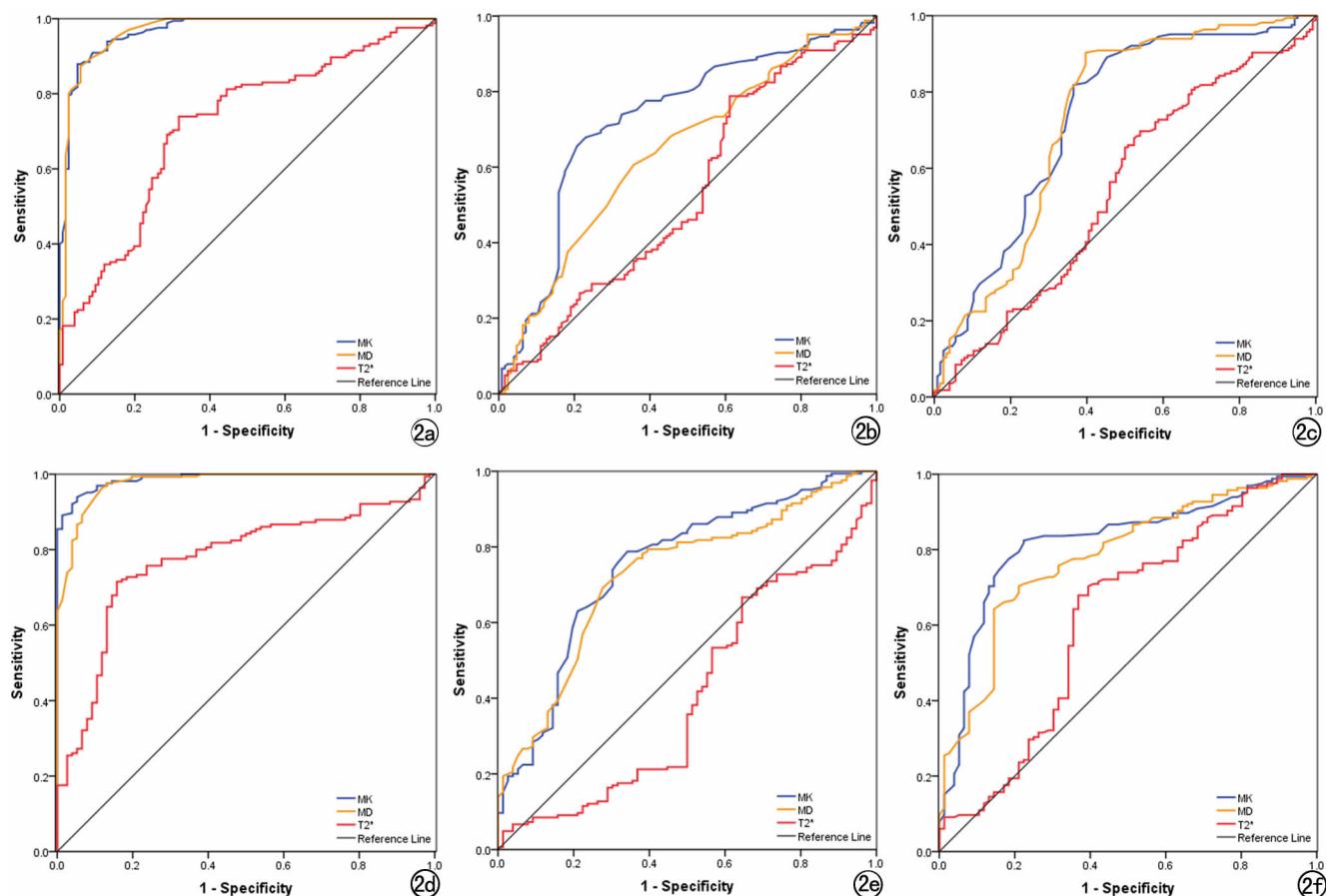


图 2 a~c) 定量参数(MK、MD、T₂* 值)鉴别椎间盘 Pfirrmann I 级与 II 级 NP、AAF、PAF 的 ROC 曲线; d~f) 定量参数(MK、MD、T₂* 值)鉴别椎间盘 Pfirrmann II 级与 III 级 NP、AAF、PAF 的 ROC 曲线。

NP、AAF、PAF 的 MK 值与 Pfirrmann 分级呈明显正相关 ($P < 0.001$); NP、AAF、PAF 的 MD 值及 NP 和 PAF 的 T₂* 值与 Pfirrmann 分级呈明显负相关 ($P < 0.001$), 而 AAF 的 T₂* 值与 Pfirrmann 分级无明显相关性 ($P > 0.05$, 表 2)。

ROC 结果(表 3、图 2)显示 NP、PAF、AAF 的

MK、MD、T₂* 值诊断 Pfirrmann I ~ II 级、II ~ III 级的 AUC 值均依次减低, 表明 NP、PAF、AAF 的 MK、MD、T₂* 值对早期椎间盘退变诊断效能 MK > MD > T₂* 值。AAF 的 T₂* 值诊断 Pfirrmann II ~ III 级的 AUC 值 < 0.5 , 表明 T₂* 值对 AAF 早期退变诊断价值极低。NP、PAF、AAF 的 MK、MD 值鉴别

表 2 腰椎间盘 NP、AAF、PAF 的 MK、MD、T₂* 值 Spearman 相关分析

Spearman 相关系数	NP			AAF			PAF		
	MK	MD	T ₂ *	MK	MD	T ₂ *	MK	MD	T ₂ *
r 值	0.921	-0.917	-0.647	0.604	-0.509	0.088	0.678	-0.654	-0.305
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.079	<0.001	<0.001	<0.001

表 3 NP、AAF、PAF 的 MK、MD、T₂* 值诊断 Pfirrmann I ~ II 级、II ~ III 级的 AUC 值、敏感度、特异度

ROC 分析	NP			AAF			PAF		
	MK	MD	T ₂ *	MK	MD	T ₂ *	MK	MD	T ₂ *
Pfirrmann grade I ~ II									
AUC	0.968	0.967	0.714	0.728	0.642	0.531 [#]	0.734	0.731	0.543
敏感度(%)	87.9	87.3	73.9	67.9	60.6	78.8	81.8	90.3	69.7
特异度(%)	95.2	94.4	68.3	77.0	64.3	38.9	63.5	60.3	46.0
Pfirrmann grade II ~ III									
AUC	0.988	0.978	0.774	0.750	0.727	0.408	0.820	0.781	0.621
敏感度(%)	93.9	97.6	71.5	78.8	69.1	21.8	82.4	64.2	70.3
特异度(%)	94.7	86.8	84.2	65.8	72.4	50.0	77.6	85.5	65.5

注: [#] T₂* 值诊断 Pfirrmann I 级与 II 级椎间盘 AAF 的 AUC 值 $P > 0.05$, 余 AUC 值均 $P < 0.05$ 。

I ~ II 级、II ~ III 级椎间盘的灵敏度和特异度均 > T_2^* 值, 表明 MK、MD 值对诊断早期椎间盘退变的敏感性和特异性均优于 T_2^* 值。对于不同部位, MK、MD、 T_2^* 值对早期退变诊断效能 NP > PAF > AAF。

讨 论

本研究结果显示 NP、AAF、PAF 的 MK、MD 值可以定量评价人腰椎间盘退变; MK 值与 Pfirrmann 分级呈显著正相关; MD 值与 Pfirrmann 分级呈显著负相关, NP、PAF、AAF 的 MK、MD、 T_2^* 值对早期椎间盘退变(I ~ II 级、II ~ III 级)诊断效能依次降低。

DKI 作为非高斯分布模型的技术,不仅可以真实地反映组织内水分子扩散运动的能力,并且可敏感的反映组织微结构的复杂程度。由于 DKI 运用比 DTI 更高阶的四阶三维模式描述水分子的扩散,因此能够比 DTI 更加敏感的反映组织微结构的复杂程度^[14]。MK 是组织沿空间各方向扩散峰度的平均值, MK 值越大表明扩散受限越严重,成分结构越复杂; MD 反映水分子在组织空间内的平均扩散系数,与组织内自由水含量有关^[12]。本研究 NP 的 MK 值与 Pfirrmann 分级呈显著正相关,MD 值与 Pfirrmann 分级呈显著负相关,说明随着椎间盘退变程度的加剧,椎间盘蛋白多糖合成数量和质量下降,椎间盘内胶原纤维的排列方式由有序向无序的结构转变,从而造成 MK 值增加; 髓核储水能力受限,含水量逐渐减少,胶原纤维成分逐渐增加,椎间盘内水分子扩散受限加重,从而导致髓核 MD 值降低。因此, MK 及 MD 值可通过对椎间盘水分子扩散功能的改变提示早期椎间盘退变。Li 等^[15]通过对 SD 大鼠尾椎间盘退变模型进行 T_2 WI、DWI、DKI 扫描,发现随着椎间盘退变程度增加(I 级至 II 级),表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)减低, MK 值增加, MK 值评价椎间盘退变具有较高的敏感度,与本实验结果一致; 但其 MD 值改变无统计学意义与本实验结果不相符,可能实验对象不同,结果存在差异,尚需进一步研究。Katsura 等^[16]利用与 DKI 成像类似的非高斯分布模型 Q-space imaging 技术,发现晚上髓核中部的表观扩散系数(apparent diffusion coefficient, ADC)明显低于早上,而晚上的表观峰度系数(apparent kurtosis coefficient, AKC)明显高于早上,提示椎间盘机械压力使得髓核水分子扩散能力下降且结构复杂性增加,因此本研究志愿者均在晚上进行扫描。

DKI 技术对 Pfirrmann I ~ III 级诊断效能优于 IV 级、V 级,一方面可能与椎间盘退变程度较深时椎间盘细胞增殖、群集和死亡有关,随着纤维环裂隙和撕裂的数量和程度增加,肉芽组织和神经血管从纤维环外层

向内张入,使得髓核和纤维环分界逐渐模糊^[17]; 另一方面,IV 级以上的椎间盘含水量较正常椎间盘明显减少,扩散受限水分子数目也随之明显减少,因此,DKI 成像的检测能力略下降。另外,可能是 Pfirrmann 分级对 IV 级与 V 级椎间盘分级标准无关椎间盘信号,区别仅在椎间盘高度的改变。

最新的研究已经确立了 T_2^* 值和腰椎间盘退变程度的关系^[5, 18, 19], 随着椎间盘退变等级增加, T_2^* 弛豫时间随之降低。本研究 NP 的 T_2^* 值明显高于 AAF 和 PAF 的 T_2^* 值,且 NP 和 PAF 的 T_2^* 值与 Pfirrmann 分级呈负相关,这与 Zhang 等^[20]研究结果一致。在椎间盘早期退变中, T_2^* 值对 NP 的敏感性高于 PAF,但 Welsch 等^[5]研究认为 T_2^* -mapping 对 PAF 的变化更敏感,这与本研究的结果相矛盾,原因可能与分析对象有关,本实验仅比较了 Pfirrmann I ~ II 级、II ~ III 级椎间盘,Welsch 等的研究对象为 I ~ V 级椎间盘。

本研究 ROC 结果显示对 NP 和 AAF 早期退变的评价效果,MK 值大于 MD 值,而对 PAF 的评价效果,MK 值小于 MD 值,原因可能是 MK、MD、 T_2^* 值不仅对髓核水分变化敏感,对胶原纤维完整性也较敏感,而且对水分的变化的敏感性大于胶原纤维的完整性。另外,通过对不同方法不同部位的 AUC 值、敏感度比较,提示 DKI 成像较 T_2^* -mapping 技术对早期椎间盘退变的敏感性更高,特别是 NP 和 PAF 区域。

本研究的局限性:① AAF 在解剖上邻近腹主动脉,腹主动脉的搏动伪影对 AAF 的定量评价的准确性有一定影响;② DKI 所需要的 b 值较大,造成信噪比下降;高阶的峰度成像较扩散更容易出现点状伪影;③ 本研究结果缺乏相应的椎间盘超微病理组织对照研究,开展椎间盘退变动物模型 DKI 基础研究十分必要。

总之,DKI 技术可以用于定量评价人腰椎间盘退变,对于早期椎间盘退变,DKI 的敏感性明显高于 T_2^* -mapping 技术。

参 考 文 献:

- [1] Zhu Q, Gao X, Gu W. Temporal changes of mechanical signals and extracellular composition in human intervertebral disc during degenerative progression[J]. J Biomech, 2014, 47(15):3734-3743.
- [2] Gu W, Zhu Q, Gao X, et al. Simulation of the progression of intervertebral disc degeneration due to decreased nutritional supply [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2014, 39(24):E1411-E1417.
- [3] Zhu Q, Gao X, Levene HB, et al. Influences of nutrition supply and pathways on the degenerative patterns in human intervertebral disc[J]. SPINE, 2016, 41(7):568-576.
- [4] Cui YZ, Yang XH, Liu PF, et al. Preliminary study on diagnosis of lumbar disc degeneration with magnetic resonance T_{1p} , T_2 -map-

- ping and DWI quantitative detection technologies[J]. Eur Rev Med Pharmacol Sci, 2016, 20(16):3344-3350.
- [5] Welsch GH, Trattnig S, Paternostro-Sluga T, et al. Parametric T_2 and T_2^* -mapping techniques to visualize intervertebral disc degeneration in patients with low back pain: initial results on the clinical use of 3.0 Tesla MRI[J]. Skeletal Radiology, 2011, 40(5): 543-551.
- [6] Gullbrand SE, Ashinsky BG, Martin JT, et al. Correlations between quantitative T_2 and $T_1\rho$ MRI, mechanical properties and biochemical composition in a rabbit lumbar intervertebral disc degeneration model[J]. J Orthopaedic Research, 2016, 34(8): 1382-1388.
- [7] 沈思, 王昊, 史长征, 等. 青年人群腰椎间盘磁共振 T_2^* map 成像[J]. 中国医学影像技术, 2010, 26(11):2164-2167.
- [8] 李丽, 周治国, 王敏, 等. ADC 值评估腰椎间盘退变程度的研究[J]. 放射学实践, 2013, 28(12):1279-1282.
- [9] 黄耀渠, 赵晓梅, 伍琼慧, 等. 磁共振 T_2 弛豫时间和 ADC 评估腰椎间盘退变的对比研究[J]. 放射学实践, 2016, 31(8):773-777.
- [10] 褚相乐, 马景旭, 邱雪玲, 等. DTI 在腰椎间盘退行性改变中的应用初探[J]. 放射学实践, 2016, 31(1):81-85.
- [11] 王玉亮. 磁共振扩散峰度成像(DKI)临床研究进展[J]. 影像诊断与介入放射学, 2015, 24(4):340-345.
- [12] Jensen JH, Helpern JA, Ramani A, et al. Diffusional kurtosis imaging: the quantification of non-gaussian water diffusion by means of magnetic resonance imaging[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2005, 53(6):1432-1440.
- [13] Pfirrmann CW, Metzdorf A, Zanetti M, et al. Magnetic resonance classification of lumbar intervertebral disc degeneration[J]. Spine (Phila Pa 1976), 2001, 26(17):1873-1878.
- [14] Lazar M, Jensen JH, Xuan L, et al. Estimation of the orientation distribution function from diffusional kurtosis imaging[J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2008, 60(4):774-781.
- [15] Li L, Zhu WZ, Chen WW, et al. The study of the intervertebral disc microstructure in matured rats with diffusion kurtosis imaging[J]. Magn Reson Imaging, 2017, 42(10):1-106.
- [16] Katsura M, Suzuki Y, Hata J, et al. Non-gaussian diffusion-weighted imaging for assessing diurnal changes in intervertebral disc microstructure[J]. J Magn Reson Imaging, 2014, 40(5): 1208-1214.
- [17] Lotz JC, Haughton V, Boden SD, et al. New treatments and imaging strategies in degenerative disease of the intervertebral disks [J]. Radiology, 2012, 264(1):6-19.
- [18] Ellingson AM, Mehta H, Polly DW, et al. Disc degeneration assessed by quantitative T_2^* (T_2 Star) correlated with functional lumbar mechanics[J]. Spine, 2013, 38(24):E1533-E1540.
- [19] Detiger SE, Holewijn RM, Hoogendoorn RJ, et al. MRI T_2^* -mapping correlates with biochemistry and histology in intervertebral disc degeneration in a large animal model[J]. Eur Spine J, 2015, 24(9):1935-1943.
- [20] Zhang X, Yang L, Gao F, et al. Comparison of $T_1\rho$ and T_2^* relaxation mapping in patients with different grades of disc degeneration at 3T MR[J]. Med Sci Monit, 2015, 21(7):1934-1941.

(收稿日期:2017-10-07 修回日期:2017-12-22)