

正常肾脏在不同场强下体素不相干运动 MRI 研究

李标达, 刘欣, 陈小燕, 鲁可, 伍筱梅, 李新春, 蒙秋华

【摘要】 目的:探讨不同场强条件对健康成人肾脏体素不相干运动(IVIM)DWI 定量参数值的影响。**方法:**30 例健康志愿者在 24h 内分别在 1.5T 和 3.0T MR 扫描仪上进行扫描序列和参数完全相同的 IVIM-DWI 扫描,比较不同场强下肾实质的灌注参数(D、D* 和 f)值的差异。**结果:**3.0T 场强条件下左、右侧肾实质的 D 值均大于 1.5T、D* 值均小于 1.5T,差异均有统计学意义($P < 0.05$);两种场强条件下 f 值的差异无统计学意义($P > 0.05$)。在相同场强条件下,1.5T 时左肾实质的 D 值大于右肾($P < 0.05$);而 3.0T 时双肾实质 D 值的差异无统计学意义($P > 0.05$);1.5T 时不同性别组间双肾的 D、D* 和 f 值的差异均无统计学意义($P > 0.05$),而 3.0T 时男性组双肾的 f 值大于女性组($P < 0.05$)。**结论:**肾脏 IVIM-DWI 定量参数值的测量受到场强变化的影响,其可靠性和可行性需建立在相同场强及扫描参数统一的基础上。

【关键词】 肾脏; 磁共振成像; 扩散加权成像; 体素内不相干运动; 场强; 性别

【中图分类号】 R445.2; R692 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2018)12-1272-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2018.12.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A comparative study of IVIM-DWI on normal kidney in healthy adults between 1.5T and 3.0T MR scanner LI Biao-da, LIU Xin, CHEN Xiao-yan, et al. Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Guangzhou Medical University, Guangzhou 510120, China

【Abstract】 Objective: To compare the D, D* and f values of healthy kidneys in different field strengths and investigate whether an IVIM-DWI conclusion was applicable to different field strengths. **Methods:** 30 healthy volunteers underwent kidney IVIM-DWI twice using the same scan sequences and parameters at 1.5T and 3.0T MR scanners within 24 hours. The differences of D, D*, and f values were compared. **Results:** The D values of the left and right renal parenchyma at the 3.0T MR scanner were significantly greater than those at the 1.5T MR scanner ($P < 0.05$), D* values were less than those at 1.5T MR scanner ($P < 0.05$), while The f values had no significant difference between them ($P > 0.05$). Under 1.5T field strength, D value of left renal parenchyma was higher than that of right kidney with statistically significant difference, while the D value of left and right renal parenchyma has no difference at 3.0T MR scanner. The D, D* and f values in male and female groups were not significantly different ($P > 0.05$) at 1.5T MR scanner, while f value in male group was higher than that in female group at 3.0T MR scanner ($P < 0.05$). **Conclusion:** The quantitative parameter values of kidney IVIM-DWI were affected by different field strengths. Their reliability and feasibility should be based on the same field strength and scan parameters.

【Key words】 Kidney; Magnetic resonance imaging; Intravoxel incoherent motion; Diffusion-weighted imaging; Field strength; Gender

传统的磁共振扩散加权成像(diffusion weighted

imaging, DWI)采用单指数模型在两个 b 值的基础上计算 ADC 值来反映组织中水分子的扩散能力^[1]。其不足之处是没有考虑微循环灌注以及水分子扩散方向等因素的作用^[2-3]。1986 年 Le Bihan 等^[4]提出体素内不相干运动(intravoxel incoherent motion, IVIM)扩散加权成像这一概念,获得的定量指标可反映实质器官组织的真实扩散以及微循环灌注状态,对微循环病

作者单位:510120 广州,广州医科大学附属第一医院放射科(李标达、伍筱梅、李新春、蒙秋华),内分泌科(陈小燕、鲁可);510800 广州,中山大学附属第一医院胸外科(刘欣)

作者简介:李标达(1988-),男,广东揭阳人,硕士,住院医师,主要从事胸腹部 CT 和 MR 影像诊断工作。

通讯作者:蒙秋华, E-mail: mengqiuhua@163.com

基金项目:广东省科技计划项目(2014A020212353);广东省科技计划项目(2016A020215169);广州医科大学附属第一医院临床应用与转化项目(201512-gyfyy)

变的临床早期诊断和治疗有一定意义^[4]。肾脏是血流灌注极为丰富的腹部实质性器官,很多疾病如糖尿病肾病或肾小球肾炎等在疾病早期即可能导致肾脏的微循环发生病变,最终可导致肾功能不全,严重危害人类健康。IVIM-DWI 能否在这类疾病的早期检测出微循环病变,无创性地动态监测肾功能的受损情况,为临床诊治提供依据,近几年来已成为研究的热点。

目前,国内外研究中对肾脏进行 IVIM-DWI 检查时均仅限于单一场强条件下。但是,不同的研究中采用的磁共振设备及场强不完全相同,得出的量化结论是否能通用,同一患者在相同序列参数、不同场强下获得的肾脏 IVIM-DWI 参数是否有差异,这直接影响到是否能建立统一可行的量化标准,目前尚未有相关研究报道。笔者采用不同场强(1.5T 和 3.0T)磁共振仪分别对同一组志愿者进行肾脏 IVIM-DWI 扫描,对获得的定量参数进行对比分析,旨在为肾脏疾病 IVIM-DWI 的相关研究提供依据。

材料与方 法

1. 病例资料

招募 30 例健康成人志愿者行 IVIM-DWI 检查。其中,男 13 例,女 17 例,年龄 20~54 岁,平均(28.8±9.01)岁。所有志愿者了解实验内容并签署知情同意书。纳入标准:无肾病、糖尿病和高血压病史,血清肌酐和尿素氮浓度在正常范围内,经超声和 MRI 等影像学检查证实无肾脏器质性病变。

2. IVIM-DWI 扫描方法

所有志愿者检查前禁食超过 3h,嘱其在扫描过程中呼吸频率和幅度尽量保持均匀和平稳。使用分别使用 Philips Intera 1.5T 和 Achieva 3.0T 磁共振机对所有受试者进行常规 T₂WI 和 IVIM-DWI 扫描检查,两种场强条件下相同的序列的扫描参数保持一致。IVIM-DWI 扫描采用并行采集技术(parallel acquisition techniques, PAT)单次激发 EPI 序列,取 10 个 b 值(0、10、30、50、80、100、200、400、600、800 和 1000 s/mm²),同时在 X、Y、Z 轴三个方向上施加敏感梯度脉冲,扫描参数:TR 4000 ms, TE 39.3~68.1 ms,激励次数 4,矩阵 128×128,视野 38 cm×38 cm,层厚 5.0 mm,间隔 1.0 mm, PAT 2,扫描范围覆盖双肾。

实验实施过程中所有受试者的 MRI 扫描由一位操作者完成,尽可能避免个体差异等因素的干扰,与此同时,每位受试者在两台 MR 机上进行扫描的时间间隔不超过 24 h,尽量保持身体状态一致。

3. 图像分析和数据测量

将 DWI 图像在 Philips 工作站采用 IVIM 后处理软件进行分析,分别重建出灌注参数 D、D* 和 f 的伪

彩图(图 1)。D 为纯扩散系数(diffusion coefficient, ADC),代表真实水分子扩散;D* 值为假性扩散系数(diffusion coefficient from the perfusion compartment, ADC_p),是一种与微循环灌注相关的扩散系数;f 值为灌注分数(perfusion fraction, FP),代表微循环灌注如血液及肾小管内液体的流动在信号衰减中所占的比重。

由于在各参数的伪彩图上肾皮质与肾髓质的对比度不够高,本研究中在整个肾实质区域内选取 ROI 来进行参数值的测量。由 2 位位高年资影像医师分别进行数据测量,选取 3 个层面的图像(肾上极、下极及肾门水平),在肾上下极和中部的肾实质内及在肾门水平的肾脏的前、中、后部分别勾画圆形 ROI,共 6 组 ROI,所有 ROI 的形状和大小完全一致。同一受试者不同场强下的各参数图像的测量层面和 ROI 的位置尽可能一致。参考 T₂WI,勾画 ROI 时尽可能避开肾窦组织和伪影,左、右肾各测量 6 次,分别取平均值,测量出相应的 D、D* 和 f 值。

4. 统计学方法

使用 SPSS 16.0 统计分析软件,对所有参数的测量值先进行正态分布及方差齐性检验,如符合正态分布且方差齐性,相应的参数值采用均值±标准差的形式表示,组间比较采用配对或两独立样本 t 检验;若参数值不符合正态分布则采用 Wilcoxon 秩和检验。以 P<0.05 为差异有统计学意义。

结 果

图像质量的评估:无论是 1.5T 或 3.0T MR 机,在自由呼吸条件下采集的双肾 IVIM-DWI 图像,图像质量均较好,拟合度高,尤其是在双肾中部,而肾上极和下极有不同程度的呼吸运动伪影。经后处理软件重建的定量参数图中,D 和 f 的伪彩图质量良好,皮髓质显示较清晰,而 D* 图上皮髓质分界不清,甚至部分层面上肾脏的轮廓较模糊。总体来说,3.0T MR 获得的 IVIM-DWI 图像的信噪比和分辨率比 1.5T MR 更高。

不同场强条件下 IVIM-DWI 获得的双肾定量参数值及统计分析结果见表 1。磁共振 IVIM-DWI 定量参数中,3.0T 条件下双肾实质的 D 值均大于 1.5T 条件下,双肾实质的 D* 值均小于 1.5T 条件下,组间差异均具有统计学意义(P<0.05);3.0T 条件下双肾实质的 f 值均大于 1.5T 条件下,但组间差异无统计学意义(P>0.05)。

相同场强条件下双侧肾脏 IVIM-DWI 定量参数值的比较见表 2。IVIM-DWI 定量参数中,1.5T 场强下左侧肾实质的 D 值大于右侧肾实质,两者间的差异具有统计学意义(P<0.05);而 3.0T 场强下双侧肾实

表1 不同场强条件下双肾实质 IVIM-DWI 定量参数值的比较

参数	左肾				右肾			
	1.5T	3.0T	t 值	P 值	1.5T	3.0T	t 值	P 值
D($10^{-3}\text{mm}^2/\text{s}$)	1.60±0.14	1.68±0.17	-2.464	0.02	1.53±0.12	1.72±0.13	-6.118	0.01
D* ($10^{-3}\text{mm}^2/\text{s}$)	56.17±14.10	44.66±26.32	2.297	0.03	62.70±19.10	45.76±23.84	3.495	0.01
f(%)	20.86±4.27	21.77±6.25	-0.806	0.43	21.81±4.83	21.33±4.84	0.396	0.70

表2 相同场强条件下左、右侧肾实质各项定量参数值的比较

参数	1.5T				3.0T			
	左肾	右肾	t 值	P 值	左肾	右肾	t 值	P 值
D($10^{-3}\text{mm}^2/\text{s}$)	1.60±0.14	1.53±0.12	2.392	0.02	1.68±0.17	1.72±0.13	-1.274	0.10
D* ($10^{-3}\text{mm}^2/\text{s}$)	56.17±14.10	62.70±19.10	-1.687	0.10	44.66±26.32	45.76±23.84	-0.325	0.75
f(%)	20.86±4.27	21.81±4.83	-0.925	0.36	21.77±6.25	21.33±4.84	0.486	0.63

表3 1.5T 场强条件下男性组与女性组间双肾各项定量参数值的比较

参数	左肾				右肾			
	男性	女性	t 值	P 值	男性	女性	t 值	P 值
D($10^{-3}\text{mm}^2/\text{s}$)	1.57±0.14	1.62±0.13	-1.002	0.33	1.52±0.14	1.45±0.10	-0.402	0.69
D* ($10^{-3}\text{mm}^2/\text{s}$)	61.01±15.81	52.47±11.80	1.696	0.10	61.48±18.52	63.61±20.04	-0.299	0.77
f(%)	19.97±2.49	22.03±5.77	1.202	0.25	22.99±5.03	20.90±4.61	1.183	0.25

表4 3.0T 场强条件下男性组与女性组间双肾各项定量参数值的比较

参数	左肾				右肾			
	男性	女性	t 值	P 值	男性	女性	t 值	P 值
D($10^{-3}\text{mm}^2/\text{s}$)	1.63±0.17	1.73±0.16	-1.599	0.12	1.68±0.11	1.75±0.14	-1.437	0.16
D* ($10^{-3}\text{mm}^2/\text{s}$)	40.99±21.45	47.48±29.85	-0.439	0.66	42.78±25.55	48.04±22.97	-0.592	0.56
f(%)	24.69±5.83	19.53±5.75	2.419	0.02	23.89±3.63	19.37±4.80	-2.830	0.01

质间 D 值的差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。无论是 1.5T 或 3.0T 场强下, 双侧肾实质的 D* 值或 f 值的差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。

相同场强条件下不同性别间双肾 IVIM-DWI 定量参数的比较见表 3~4。在 3.0T 场强下, 无论是左肾还是右肾的 f 值, 在男性组与女性组之间的差异均具有统计学意义 ($P < 0.05$), 并且均为男性组的 f 值大于女性组。而 1.5T 场强下, 男性组与女性组之间双肾 f 值的差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。而 D 值和 D* 值, 无论在 3.0T 或者 1.5T 场强条件下, 均未发现有性别上的差异 ($P > 0.05$)。

讨论

1. 1.5T 和 3.0T 磁共振的图像与效能

目前, 临床上广泛使用的是 1.5T 和 3.0T 高场强磁共振仪。场强的提高, 可增加图像的信噪比和空间分辨率, 有效提高图像质量; 随着多通道射频线圈以及并行采集技术的广泛应用, 扫描时间缩短, 图像上运动伪影减少, 工作效率得到有效增加。高场强下有更明显的化学位移, 更明显的磁敏感效应, 对病变检出更敏感。总的来说, 3.0T 与 1.5T 磁共振仪相比, 不仅提高了图像质量更利于小病灶的检出, 而且随着化学位移效应的提高, 能更敏感地检测到疾病早期组织细胞化学成分的变化^[6-7]。

本组研究结果显示, 在其它扫描参数相同、自由呼吸状态下进行双肾 IVIM-DWI 扫描, 1.5T 和 3.0T 场强条件下均可获得拟合度较高的图像。而且, 3.0T 场强下对运动位移更为敏感^[7-8], 获得的 DWI 图像质量

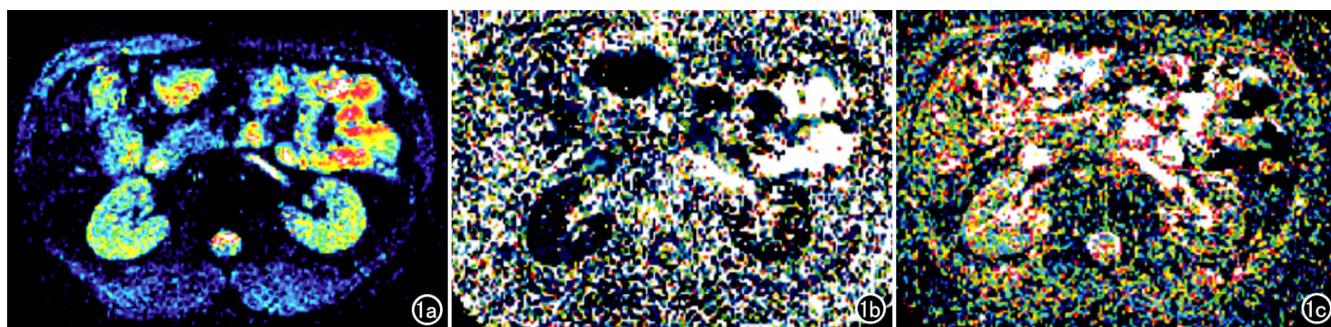


图1 一例受试者的 3.0T MR IVIM-DWI 扫描数据经后处理软件重建的定量参数伪彩图。a) D 图; b) D* 图; c) f 图。

并不比 1.5T 的好。无论是 3.0T 还是 1.5T MR 机, IVIM-DWI 图像上双肾上极或下极水平的部分层面上存在伪影,可能是由于上极紧邻肺底或下极毗邻肠管(受肠内容物的影响),组织差异造成的磁敏感伪影^[9],同时也不能排除是呼吸运动或毗邻肠管的蠕动所致。如扫描时采用呼吸门控、检查前进行充分的肠道准备,可能有助于此伪影的改善,但扫描时间成倍增加,肠道准备可能增加患者的不适感,限制了其临床应用。

2. 关于感兴趣区的选择

在既往肾脏 DWI 相关研究中,对 ROI 的选取方法较为一致,均采用在肾上极、下极和肾门水平多点测量取平均值,本文旨在为 IVIM-DWI 的临床应用提供实践依据,故测量方法保持与其他学者一致。本组研究中经飞利浦公司提供的 IVIM 转换软件处理后的 IVIM 图像上肾脏的皮髓质分界不清,勾画 ROI 时难以准确判断皮髓质结构(图 1)。笔者分析原因:因 b 值越高图像信噪比越低,图像越容易变形或失真^[10]。而在本研究中行 IVIM-DWI 扫描时共选取了 11 个 b 值,其中高 b 值的构成比例较大。这一不足有可能影响对定量参数值的测量,尤其是当肾脏体积相对较小或合并有肾萎缩、肾积水或肾实质变薄等情况时。故笔者分别在双肾上极、下极和肾门水平于肾实质内勾画圆形 ROI,尽可能避开肾盏结构及伪影^[11],来测量 D、D* 和 f 值。

3. 1.5T 与 3.0T IVIM 参数的比较

随着场强的提高,图像分辨率和信噪比也相应提高,然而 IVIM-DWI 的研究结论是否随之受到影响呢,各大医院磁共振机的场强不同,相同扫描参数行 IVIM-DWI 时在不同场强磁共振扫描仪间的结论是否一致或具有同步性,这些问题尚未明确。本组研究结果显示,双肾 IVIM-DWI 获得的定量参数中,在 3.0T 场强条件下左肾和右肾实质的 D 值均高于 1.5T ($P < 0.05$)。Cui 等^[12]在研究肝脏不同场强条件下 IVIM-DWI 参数的稳定性中,发现 D 值的可重复性较高,场强的差异对 D 值的影响不大,与本文的结果间存在差异。笔者分析可能有以下几个原因:(1)IVIM 理论计算公式为 $S_b/S_0 = (1-f)e^{-bD} + f \times e^{-bD^*}$,其中 S_b 代表取某个 b 值 ($b \neq 0$) 时的信号强度, S_0 代表 $b = 0s/mm^2$ 时的信号强度, D 值和 D* 值受梯度磁场的影响。从 IVIM 的理论公式可知, D 值与 D* 值受场强的影响,故 3.0T MR 获得的 D 值和 D* 值与 1.5T MR 存在差异。(2)IVIM-DWI 检查中, b 值的选取也至关重要。b 值即扩散敏感梯度因子 (gradient factor), 其计算公式为:

$$b = \gamma^2 G^2 \delta^2 (\Delta - \delta/3) \quad (1)$$

γ 、 δ 、G 和 Δ 分别代表所施加的梯度磁场的磁旋

比、持续时间、磁场强度及间隔时间,可见 b 值也受磁场强度的影响。(3)由于肾脏及肝脏的解剖功能上的差异所致。肾脏主要功能是通过体内大量液体及代谢物的重吸收及排泄,维持体内水、电解质及酸碱平衡,因此肾脏组织内存在广泛而活跃的水分子扩散运动,而肝脏作为人体解毒和产热的实质器官,相对肾脏而言,肝脏内部水分子扩散运动甚小。3.0T 高场强磁共振仪的梯度磁场的强度及切换率也比 1.5T 高,对水分子扩散运动的检测越敏感^[13],所以,3.0T MRI 获得的 D 值较 1.5T MRI 的 D 值高;此外, b 值越高对水分子扩散运动越敏感,更接近真实水分子的扩散运动,本研究中 IVIM-DWI 扫描中选择的 b 值以高 b 值为主,而 Cui 等^[12]的研究中选择了 16 个 b 值,但仅有 4 个 b 值 $\geq 200s/mm^2$, b 值的选择也是重要原因之一。(4) 3.0T MR 获得的左、右肾实质的 D* 值均低于 1.5T MR ($P < 0.05$)。3.0T MR 对于水分子扩散运动更为敏感,然而在反映灌注功能的 D* 值上却是 3.0T MR 较 1.5T MR 低。多篇文献报道皮质与髓质间各项 IVIM 定量参数的差异有统计学意义^[14-15]。ROI 选取区域内皮、髓质所占比例对测量 D* 值有一定影响,也可能是因为 D* 值稳定性低的原因^[16]。笔者认为,高场强 MRI 对肾脏水分子扩散运动以及微循环灌注更为敏感,随着场强的增高,肾脏排泄与重吸收过程对 D* 反映灌注功能的干扰降低,从而导致 3.0T MR 获得的 D* 值较 1.5T 小。而 1.5T 及 3.0T MR 的场强差异对 f 值的测量并没有显著影响 ($P > 0.05$)。

4. 相同场强 MR IVIM-DWI 参数的比较

对相同场强下左肾与右肾的各项 IVIM-DWI 定量参数值进行比较,结果显示仅 1.5T 场强下左肾实质的 D 值 $[(1.60 \pm 0.14) \times 10^{-3} mm^2/s]$ 要大于右肾实质的 D 值 $[(1.53 \pm 0.12) \times 10^{-3} mm^2/s]$, 差异具有统计学意义 ($P < 0.05$)。丁玉芹等^[11]的研究中亦显示左、右肾的 D 值有差异,但是为右肾实质的 D 值较左肾高,与本文结果不符。丁玉芹等的研究中 ROI 是选取同层面左、右肾的整个肾实质,而本研究中 ROI 的选取方法与其有一定差异,我们采用分别在肾上、下极及肾门水平选取 3 个层面,在肾上下极层面各选取一个 ROI,在肾门层面上在肾实质内勾画 4 个 ROI 进行测量并取其平均值。但也有可能是因本研究中样本量较少所致,尚需扩大样本量进一步验证。然而 3.0T MR 获得的左、右肾的 D 值并不存在明显差异。丁玉芹等的研究中采用的是 1.5T MR 机,笔者认为造成上述结果的原因是场强不同,健康成人的左、右肾功能理应没有显著差异,是否随着场强的提高,IVIM 参数测量值更为稳定,有待进一步探讨验证。本研究中 1.5T MR 获得的 D* 和 f 值以及 3.0T MR 获得的 D

值、 D^* 值和 f 值在左、右肾之间的差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。

本组研究中, 3.0T MR 获得的 f 值, 无论在左肾还是右肾, 均为男性大于女性 ($P < 0.05$)。这一结果与丁玉芹等^[11]的报道相仿。Wittsack 等^[17]认为 f 值与肾动脉血流速度呈明显正相关, 正常男性在平静状态下新陈代谢明显高于女性, 肾动脉血流量也显著高于女性。但本组实验中, 1.5T MR 获得的 f 值在男性和女性组间的差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。笔者分析可能是因为本组中男性和女性志愿者年龄较轻且身体健康, 身体状态差异不大, 1.5T IVIM-DWI 获得的 f 值的敏感度尚不足以反映两者间的差异, 而随着场强的增高, 3.0T MR 获得的 f 值能更准确的反映出两性之间的差异。

IVIM-DWI 作为一种无需外源对比剂而能提供扩散、灌注等分肾功能信息的无创性成像技术, 在临床实践中可以在疾病的早期从分子水平对病变组织进行定量分析和诊断, 具有较好的应用前景。但是其获得的定量参数值的是否适用不同扫描条件仍是个很大的挑战, 本研究中发现扫描参数相同的条件下 1.5T 和 3.0T MR 获得的肾实质 D 和 D^* 值间的差异有统计学意义, 而 f 值的差异无统计学意义、稳定性较高; 1.5T MR IVIM-DWI 获得的左、右肾的 D 、 D^* 和 f 值的差异与 3.0T MR 下的结果不具有同步性, 提示 IVIM-DWI 定量参数受到场强等因素的影响, 场强不同时研究的量化结论可能不能相互通用, 其可靠性和可行性需建立在相同场强及扫描参数统一的基础上。本研究也存在不足之处, 主要是样本量不够大, 尚需扩大样本量进行更深入的研究。

参考文献:

[1] Roth Y, Ocherashvilli A, Daniels D, et al. Quantification of water compartmentation in cell suspensions by diffusion-weighted and T_2 -weighted MRI[J]. Magn Reson Imaging, 2008, 26(1): 88-102.

[2] Kataoka M, Kido A, Yamamoto A, et al. Diffusion tensor imaging of kidneys with respiratory triggering: optimization of parameters to demonstrate anisotropic structures on fraction anisotropy maps [J]. J Magn Reson Imaging, 2009, 29(3): 736-744.

[3] 米瑞, 夏军, 胡若凡, 等. 健康成人肾脏磁共振体素内不相干运动及扩散张量成像的参数分析[J]. 影像诊断与介入放射学, 2017, 26(2): 146-151.

[4] Le Bihan D, Breton E, Lallemand D, et al. MR imaging of intra-

voxel incoherent motions; application to diffusion and perfusion in neurologic disorders[J]. Radiology, 1986, 161(2): 401-407.

- [5] Zhang JL, Sigmund EE, Chandarana H, et al. Variability of renal apparent diffusion coefficients: limitations of the monoexponential model for diffusion quantification [J]. Radiology, 2010, 254(3): 783-792.
- [6] 刘林栋, 毛存南, 吴书铭, 等. 3.0T 磁共振仪的日常使用[J]. 中国医疗设备, 2013, 28(12): 132-135.
- [7] 倪萍, 陈自谦, 张鲁闽, 等. 3T 磁共振的特点及其质量控制策略 [J]. 中国医疗设备, 2009, 24(12): 121-124.
- [8] Saremi F, Jalili M, Sefidbakht S, et al. Diffusion-weighted imaging of the abdomen at 3T: image quality comparison with 1.5T magnet using 3 different imaging sequences [J]. J Comput Assist Tomogr, 2011, 35(3): 317-325.
- [9] 钟志伟, 陈娇香, 邹乔, 等. 肠道准备对改善兔肾 IVIM 的磁共振扩散加权成像图像磁敏感伪影的研究 [J]. 实用医学影像杂志, 2016, 17(6): 461-463.
- [10] 邹伟, 罗城, 龚良庚. 基于体素内不相干运动的扩散加权成像在肾脏疾病中的应用进展 [J]. 中华放射学杂志, 2016, 50(3): 235-237.
- [11] 丁玉芹, 缪熙音, 李轲晨, 等. 成人正常肾脏体素内不相干运动扩散加权成像 [J]. 实用放射学杂志, 2016, 32(4): 558-561.
- [12] Cui Y, Dyvorne H, Besa C, et al. IVIM Diffusion-weighted Imaging of the Liver at 3.0T: comparison with 1.5T [J/OL]. Eur J Radiol Open, 2015, 2: e123-e128. DOI: 10.1016/j.ejro.2015.08.001
- [13] 马晓晖, 张伟, 刘栋, 等. 1.5T 与 3.0T MRI 弥散加权成像对腰椎间盘突出退变诊断价值的比较 [J]. 河北医药, 2015, 37(7): 981-984.
- [14] Bane O, Wagner M, Zhang JL, et al. Assessment of renal function using intravoxel incoherent motion diffusion-weighted imaging and dynamic contrast-enhanced MRI [J]. J Magn Reson Imaging, 2016, 44(2): 317-326.
- [15] 曲丽洁, 周建军, 丁玉芹, 等. 磁共振体素内不相干运动成像和扩散峰度成像在正常肾脏成像中的初步研究 [J]. 放射学实践, 2016, 30(10): 908-913.
- [16] Sigmund EE, Vivier PH, Sui D, et al. Intravoxel incoherent motion and diffusion-tensor imaging in renal tissue under hydration and furosemide flow challenges [J]. Radiology, 2012, 263(3): 758-769.
- [17] Wittsack HJ, Lanzman RS, Quentin M, et al. Temporally resolved electrocardiogram-triggered diffusion-weighted imaging of the human kidney: correlation between intravoxel incoherent motion parameters and renal blood flow at different time points of the cardiac cycle [J]. Invest Radiol, 2012, 47(4): 226-230.

(收稿日期: 2018-04-16 修回日期: 2018-08-06)