儿科影像学。 IVIM-DWI 评价先天性肾脏和尿路畸形患儿分肾功能的可行性

田芷瑶,邵剑波

目的:探讨扩散加权成像(DWI)体素内不相干运动(IVIM)模型评价先天性肾脏和尿路畸 【摘要】 形(CAKUT)患儿分肾功能的可行性。方法:回顾性分析 34 例行99m Tc-DTPA 肾动态显像和肾脏 DWI 检查的 CAKUT 患儿(74 个肾脏)的资料。根据肾动态显像测定的分肾肾小球滤过率(GFR)将所有肾 脏分为肾功能正常组(1组,34个肾脏)、轻度受损组(2组,25个肾脏)和中重度受损组(3组,15个肾脏) 三组。DWI 图像利用 IVIM 模型进行拟合,获得每个肾脏皮质的纯扩散系数 D、假扩散系数 D* 和灌注 分数f值。采用单因素方差分析比较三组间肾脏皮质D、D*和f值的差异,存在统计学差异再使用 Bonferroni 法进行组间两两比较。 D,D^* 和f值与分肾 GFR 之间的相关性采用相关性分析。结果:1组 的 D、D* 和 f 值分别为(1.64±0.82)×10⁻³mm²/s、(2.38±0.96)×10⁻³mm²/s 和(33.71±7.11)%, 2 组 的 D、D* 和 f 值分别为(1.23±0.53)×10⁻³ mm²/s、(1.66±1.43)×10⁻³ mm²/s 和(30.48±8.26)%,3 组 的 D、D*和 f 值分别为(1.23±0.3)×10⁻³mm²/s、(0.75±0.36)×10⁻³mm²/s和(17.1±5.4)%。三组 间的 D、D*和 f 值均随着分肾 GFR 的下降而降低,且差异均具有统计学意义(P 值均<0.05)。Bonferroni 法组间两两比较结果显示,在1组与2组、1组与3组、2组与3组两两比较中,D值均无统计学差 P(P=0.064, 0.137, P>0.999); D*值在3组间两两比较均具有统计学差异(P=0.036, P<0.001, P=0.064, 0.137, P>0.999); D* 值在3组间两两比较均具有统计学差异<math>(P=0.036, P<0.001, P=0.014, P0.034);f 值在1组与3组、2组与3组组间差异均具有统计学意义(P均<0.001)。分肾 GFR 与D值 (r=0.350, P=0.002)、D^{*}值(r=0.687, P<0.001)及f值(r=0.706, P<0.001)之间均存在正相关。结 论:IVIM-DWI 可评估 CAKUT 患儿的分肾功能,D*和f在早期准确评价 CAKUT 患儿分肾功能中具 有一定的潜能。

【关键词】 扩散加权成像:体素内不相干运动;儿童;肾小球滤过率;泌尿生殖系统畸形 【中图分类号】R726.921; R726.93; R445.2 【文献标识码】A 【文章编号】1000-0313(2020)02-0228-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2020.02.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



[Abstract] Objective: The aim was to investigate the feasibility of intravoxel incoherent motion (IVIM) model of diffusion weighted imaging (DWI) on evaluating single kidney renal function in children with congenital abnormalities of the kidney and urinary tract (CAKUT).Methods: 34 children patients with CAKUT (74 kidneys) who underwent 99m TC-DTPA renal dynamic scintigraphy and renal DWI were retrospective analyzed. According to isotope renographic single-nephron glomerular fltration rate (SNGFR), the patients were divided into three groups: normal renal function group (Group 1,34 cases), mild reduction group (Group 2,25 cases), and moderate-to-severe reduction group (Group 3, 15 cases).DWI images were analyzed by IVIM model to obtain true diffusion coefficient (D), pseudo diffusion coefficient (D*), and perfusion fraction (f) of each renal cortex. Between different groups were compared statistically by using one-way analysis of variance (ANOVA). And bonferroni test was used for further group difference comparisons. The correlative relationship between these parameters and SNGFR was examined by correlation test.**Results**: The D,D^{*} ,and f values of the Group 1 were $(1.64\pm0.82)\times10^{-3}\,\mathrm{mm^2/s}$, $(2.38\pm0.96)\times10^{-3}\,\mathrm{mm^2/s}$ and $(33.71\pm7.11)\%$, respectively. The D, D*

and f values of the Group 2 were $(1.23\pm0.53)\times10^{-3}$ mm²/s, $(1.66\pm1.43)\times10^{-3}$ mm²/s and $(30.48\pm8.26)\%$, respectively. The D, D^{*} and f values of the Group 3 were $(1.23\pm0.3)\times10^{-3}$ mm²/s, $(0.75\pm0.36)\times10^{-3}$ mm²/s and $(17.1\pm5.4)\%$, respectively. The D, D^{*}, and f values decreased with the decrease of SNGFR, and the differences were statistically significant (*P* values were all <0.05). The Bonferroni test showed that comparisons between Group 1 and 2, Group 1 and 3, and Group 2 and 3. In the D, there was no significant difference among the three groups (*P* values were 0.064, 0.137 and >0.999, respectively). In the D^{*}, there were statistically significant differences between specific group pairs (*P* values were 0.036, <0.001 and 0.034, respectively). About f value, there was significant difference between Group 1 and 3, Group 2 and 3 (*P* values all <0.001). There were positive correlations between SNGFR and D (r=0.350, P=0.002), D^{*} (r=0.687, P<0.001), and f (r=0.706, P<0.001), respectively. **Conclusion**: IVIM-DWI model can be applied in evaluating renal function in children with CAKUT. The D^{*} and f was promising to accurately evaluate single kidney renal function of children with CAKUT early.

[Key word] Diffusion weighted imaging; Intravoxel incoherent motion; Child; Glomerular fltration rate; Urogenital abnormalities

扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)是唯一能检测活体组织内水分子布朗运动的无 创性方法^[1]。肾脏血供丰富,肾小管及毛细血管网的 放射状排列为 DWI 检查提供了结构基础^[2]。肾脏内 水分子基于体素的随机运动是各向异性的^[3]。体素内 不相干运动(intravoxel incoherent motion, IVIM)模 型作为 DWI 图像的后处理方法之一,可量化水分子扩 散和微循环灌注,在评价两侧肾功能和受损情况中展 现出极大的应用前景,但目前研究多限于动物实验^[4-7] 和成人^[8-14],其评价儿童分肾功能的可行性暂不明确。 鉴于此,本研究拟探讨肾脏皮质 IVIM-DWI 模型各参 数在先天性肾脏和尿路畸形(congenital abnormalities of the kidney and urinary tract, CAKUT)患儿分肾功 能评估中的应用价值。

材料与方法

1. 一般资料

回顾性分析华中科技大学同济医学院附属武汉儿 童医院 2017 年 12 月 - 2018 年 12 月期间确诊为 CAKUT,且行^{99m}Tc-DTPA 肾动态显像和 IVIM-DWI 检查的 34 例患儿(74 个肾脏,含 6 例单侧重复肾患 儿)的相关资料。34 例患儿中,男 23 例,女 11 例,年 龄 0.1~9.1 岁,平均年龄 2.5 岁,中位年龄 1.2 岁;肾 盂输尿管连接处梗阻 9 例、重复肾和/或重复输尿管 6 例、膀胱输尿管反流 8 例、巨输尿管 3 例、肾发育不良 2 例、肾发育不良合并膀胱输尿管反流 2 例、肾发育不良 2 例、肾发育不良合并膀胱输尿管反流 2 例、肾发育不良 4 周~18 岁;②行^{99m}Tc-DTPA 肾动态显像和 IVIM-DWI 检查;③确诊为 CAKUT。排除标准:②合并其 他影响肾功能的疾病,如肾脏肿瘤、肾结石、肾结核和 肾动脉狭窄等肾源性疾病,心血管疾病,内分泌代谢疾 病或存在另一种器官严重受损等;③存在 MRI 检查相 关禁忌症;④ MRI 图像伪影干扰严重,图像质量差。 所有受检者进行 MRI 检查前均已告知家属检查目的 及检查前所需准备工作,并取得家属同意并签字。两 项检查间隔时间为 1~3 天。

2. 检查方法

检查前准备:两项检查前4h均禁食、水,MRI检 查前应静息半小时以上,避免进食和剧烈运动对肾脏 血流灌注产生影响。对于年幼或依从性较差的患儿, 采取10%水合氯醛镇静(0.3~0.5 mL/kg);对于依从 性较好的患儿,嘱其尽量制动并匀速呼吸,以减少图像 运动伪影,提高图像质量。

^{99m}Tc-DTPA 肾动态显像:通过周围静脉"弹丸" 式注射^{99m}Tc-DTPA,随后进行肾脏动态影像采集。 计算机自带软件自动显示出肾时间-放射性曲线(肾 图),并根据身高、体重等基本信息对数据进行校正,随 后利用机器自带 Gate's 法,计算出总肾肾小球滤过率 (glomerular fltration rate,GFR)和分肾 GFR。参考 文献^[15]的方法,根据分肾 GFR 将所有肾脏分为3组: 肾功能正常组(1组,GFR ≥40 mL/min,34 个肾脏), 肾功 能 轻 度 受 损 组 (2组,20 mL/min \leq GFR < 40 mL/min,25 个肾脏),肾功能中重度受损组(3组, GFR < 20 mL/min,15 个肾脏)。

MR 检查:采用美国 GE Discovery MR 750 3.0T 扫描仪,8 通道心脏相控线圈采集信号。既往研究表 明自由呼吸采集是高效的,并可保证图像的高质 量^[16],故本研究未采用呼吸门控技术。研究对象均取 仰卧位,常规泌尿系统平扫后行肾脏多 b 值 DWI 扫 描。平扫采用横轴面快速自旋回波(FSE)T₁WI、脂肪 抑制 T_2 WI、冠状面单次激发快速自旋回波(SSFSE) T_2 WI 和磁共振泌尿系水成像(MR urography, MRU)。DWI 扫描采用横轴面单次激发回波平面成 像(single shot echo planner imaging, SS-EPI)序列。 b 值取 0、40、80、100、200、400、800 和 2000 s/mm²。 其他参数:TR 3000 ms, TE 71.4 ms, 矩阵 128×128, 层厚 4 mm, 层间距 1 mm, 激励次数为 2, 扫描范围包 括双侧肾的最长径。

3. 图像处理及分析

在 GE ADW 4.6 后处理工作站,应用 Functool 工 具包中的 MADC 软件对多 b 值 DWI 图像进行后处 理。低 b 值时,肾脏中部受灌注的影响较两极小,适于 评价 GFR^[17],为尽可能避免胃肠道气体伪影和不同 层面导致的参数差异,本研究只在肾脏中心层面勾画 ROI。以 b=0 s/mm² 图像为定位像,在避开肾实质 边缘区伪影及皮髓质交界区的前提下,靠近肾脏外侧 缘人工勾画肾皮质区 ROI,ROI 尽可能包裹全部肾皮 质,同时将肾集合系统、肾血管及肾窦内脂肪排除在 外,每侧肾脏分别取 4~6 个 ROI 区,ROI 的位置及大 小(7~11 mm²)应尽可能一致(图 1),测得纯扩散系数 D、假扩散系数 D*和灌注分数 f 值,并计算其平均值。

4. 统计学方法

采用 SPSS 22.0 软件进行统计学分析。测量数据

以平均值土标准差表示。对 D、D*和f值进行正态性 分布及方差齐性检验。采用单因素方差分析(ANO-VA)比较不同组别间各参数的统计学差异,有统计学 差异再使用 Bonferroni 法进行组间两两比较。数据符 合正态性分布,D、D*和f值与分肾 GFR 的相关性进 行双变量 Pearson 相关性分析;不符合正态性分布,则 采用双变量 Spearman 相关性分析。P < 0.05认为差 异具有统计学意义。

结 果

3 组患儿共纳入 74 个肾脏信息,所有 DWI 图像 均满足影像诊断标准。将 DWI 图像利用双指数模型 生成伪彩图(图 2、3)。3 组患儿的分肾 GFR、肾皮质 D、D*和f值如表1所示,各分肾功能分组情况如表2 所示。

正态性分布检验结果显示 D 值不满足正态性分 布(P < 0.05),而 D*和f 值满足正态性分布(P > 0.05);经方差齐性检验,D 值不满足方差齐性(P < 0.05),而 D*和f 值满足(P = 0.154,P = 0.186)。 ANOVA结果显示,3组间的 D、D*和f 值均随着分肾 GFR 的下降而降低,且差异均具有统计学意义(表3)。 Bonferroni 法组间两两比较结果显示,D 值在1组与2 组、1组与3组、2组与3组两两比较中均无统计学差



图 1 肾脏 IVIM-DWI 模型各参数 ROI 选取。a) D 值伪彩图; b) D*值伪彩图; c) f 值伪彩图。
 图 2 患儿,男,7个月 14 天,左侧膀胱输尿管反流Ⅲ级,左侧肾功能轻度受损,右侧肾功能正常。a) 定位像; b) D 值 伪彩图; c) D*值伪彩图; d) f 值伪彩图。
 图 3 患儿,男,6岁,右侧肾发育不良,双侧膀胱输尿管反流 Ⅱ
 级,左侧肾功能正常,右侧肾功能中重度受损。a) 定位像; b) D 值伪彩图; c) D* 值伪彩图; d) f 值伪彩图。

表1 3组的分肾 GFR 和肾脏皮质 D、D*、f值

组别	个数	分肾 GFR (mL/min)	$\underset{(\times 10^{-3}\mathrm{mm}^2/\mathrm{s})}{\mathrm{D}}$	${ m D}^{*}$ (×10 ⁻³ mm ² /s)	f (%)
正常组(1组)	34	48.62 ± 6.22	1.64 ± 0.82	2.38 ± 0.96	33.71 ± 7.11
轻度受损组(2组)	25	31.33 ± 6.3	1.23 ± 0.53	1.66 ± 1.43	30.48 ± 8.26
中重度受损组(3组)	15	10.49 ± 5.67	1.23 ± 0.3	0.75 ± 0.36	17.1 ± 5.4

表 2 34 例 CAKUT 患儿的基本信息及分肾功能分组情况

序号	性别	年龄 (岁)	诊断	左侧组别 (上组/下组)	右侧组别 (上组/下组)
1	男	0.2	巨输尿管(右侧)	1	1
2	男	0.6	巨输尿管(右侧)	2	1
3	男	0.3	巨输尿管(左侧)	2	1
4	女	1.1	膀胱输尿管反流(双侧Ⅳ级)	1	2
5	女	1.3	膀胱输尿管反流(右侧Ⅲ级)	1	2
6	男	3.7	膀胱输尿管反流(右侧Ⅴ级,左侧Ⅲ级)	1	2
7	男	1	膀胱输尿管反流(左侧Ⅰ级,右侧Ⅳ级)	1	2
8	男	0.7	膀胱输尿管反流(左侧Ⅲ级)	2	1
9	男	2.2	膀胱输尿管反流(左侧Ⅲ级)	3	1
10	女	3.3	膀胱输尿管反流(左侧Ⅴ级)	3	3
11	女	9.1	膀胱输尿管反流(左侧V级)	3	3
12	女	5.8	肾发育不良(右侧)	1	3
13	男	6	肾发育不良(右侧),膀胱输尿管反流(双侧Ⅱ级)	1	3
14	男	2	肾发育不良(左侧),膀胱输尿管反流(左侧Ⅲ级)	3	1
15	女	4.3	肾囊性发育不良(双侧)	1	1
16	男	1	肾旋转不良(双侧)	2	2
17	男	3.4	不明原因肾盂积水(双侧)	1	2
18	男	0.4	不明原因肾盂积水(右侧)	1	2
19	男	0.2	不明原因肾盂积水(左侧)	2	1
20	男	0.5	肾盂输尿管连接处梗阻(右侧)	1	2
21	男	0.1	肾盂输尿管连接处梗阻(左侧)	2	1
22	男	0.2	肾盂输尿管连接处梗阻(左侧)	2	2
23	男	0.3	肾盂输尿管连接处梗阻(左侧)	2	2
24	男	1	肾盂输尿管连接处梗阻(左侧)	1	1
25	男	3.1	肾盂输尿管连接处梗阻(左侧)	2	1
26	男	5.3	肾盂输尿管连接处梗阻(左侧)	1	1
27	女	5.6	肾盂输尿管连接处梗阻(左侧)	1	1
28	男	7.3	肾盂输尿管连接处梗阻(左侧)	3	1
29	男	1	重复肾(右侧)	1	3/3
30	女	4	重复肾(左侧)	2/2	2
31	男	0.2	重复肾重复输尿管(右侧)	1	3/3
32	女	0.6	重复肾重复输尿管(右侧)	1	3/1
33	女	0.8	重复肾重复输尿管(右侧)	2	2/2
34	女	3	重复肾重复输尿管(右侧)	1	3/1

注:"1"代表肾功能正常组,"2"代表肾功能轻度受损组,"3"代表肾功能中重度受损组。

异(P=0.064,P=0.137,P>0.999); D^* 值在 3 组间 两两比较均具有统计学差异(P=0.036,P<0.001, P=0.034);f 值在 1 组与 3 组、2 组与 3 组组间差异均 具有统计学意义(P 均<0.001),在 1 组与 2 组间差异 无统计学意义(P=0.284)。双变量 Spearman 相关性 分析结果显示,GFR 与 D、D*和 f 值均呈线性相关 (表 4)。

表 3 组的 D、D*、f 值 ANOVA 比较

	D	D*	f
F 值	3.577	12.517	27.940
P 值	0.033	<0.001	<0.001

表4 D、D*、f 值与分肾 GFR 的相关性

	分肾 GFR		
	r	P 值	
D	0.350	0.002	
D^*	0.687	<0.001	
f	0.706	<0.001	

讨 论

儿童慢性肾脏病(chronic kidney disease,CKD) 是指肾功能不可逆性下降的一类肾脏疾病,最常见原 因是 CAKUT^[18]。CAKUT 发病率上升是导致儿童 终末期肾脏病(end stage renal disease,ESRD)患病率 上升的主要原因,事实上,全世界 40%~50%的儿童 ESRD 都可归因于 CAKUT^[19]。CAKUT 是指含有泌 尿系统解剖学异常的一系列疾病,可发生于单侧泌尿 系,也可累及双侧,而双侧肾功能受损程度并不对等, 故分别评估双侧肾功能对临床决策至关重要。

本组纳入的 34 例 CAKUT 患儿,年龄范围及中 位年龄均偏小,推测可能与产前诊断技术的提高,以及 对健康问题随访的重视导致检查年龄提前有关。患儿 肾功能损害程度与病种、年龄有一定关系:肾发育不 良、重复肾脏的上组小肾以及Ⅲ级以上膀胱输尿管反 流肾功能损害最大;且患儿年龄越大,患侧肾功能丢失 越多,并开始出现对侧肾脏功能失代偿。

DWI-IVIM 模型评价两侧肾功能受损情况具有很 好的应用前景。在该模型中,高b值(≥200 s/mm²) 主要反映水分子的扩散,而低b值(<200 s/mm²)主 要反映组织微灌注;同时,D*值受b值影响较大,若b 值过低会导致 D*值偏小,过高则灌注信息占主导地 位,不能很好地反映肾功能信息^[20]。鉴于此,合适的b 值和个数至关重要。目前多采用6~12个b值来参与 最终拟合,已有研究提出"2个关键b值"的概念,即采 用1个非零的低b值与1个高b值来区分灌注与自由 扩散,这样既能明显缩短采集时间,也能提高病变鉴别 的敏感性^[21]。本研究中,b值取0、40、80、100、200、 400、800和2000 s/mm² 8个b值,在兼顾扩散和灌注 信息的同时,使低b值个数能较好地拟合肾功能信息。

本研究结果显示,D*值在肾功能正常组、轻度受 损组和中重度受损组组间两两比较中均具有统计学差 异,f值能区分轻度受损组和中重度受损组、肾功能正 常组和中重度受损组之间的差异,而D值在组间两两 比较中的差异均无统计学意义,推测可能与b值大小、 个数和数据测量误差有关,因为水分子的扩散主要通 过D值体现,而组织微灌注主要由D*和f值反映^[15], 本研究中b值的设置更关注于组织灌注信息。李琼 等^[22]的研究发现,不同肾功能CKD患者的肾皮质 D* (髓质 D*值均存在显著性差异;正常对照组的皮质 D*值、髓质 D*值均显著大于CKD轻度损害组和中 重度损害组。本组研究结果与之类似,D*值是最敏感 的指标,遗憾的是李琼等^[22]的研究未标明具体的b值 设置。

本研究的 Spearman 相关性分析结果显示,GFR 与 D、D*和f值均存在正相关,其中f值的相关性最显 著(r=0.706),而 D值的相关性最小(r=0.350)。该 结果与 Mao 等^[8]的发现略有不同,他们的结果显示估 算 GFR(eGFR)与 D值(r=0.466)、f值(r=0.713)和 D*值(r=0.2335)均存在正相关性,但 D值、D*值的 相关性均不大,且 D*值的相关性最小,笔者推测可能 与所使用的 b值和病理类型相关。Mao 等^[8]主要研 究 CKD 中的肾纤维化,后者与水分子扩散运动的相

关性更为显著;另外,为更好反映肾纤维化,他们使用 的 8 个 b 值 分 别 为 0、25、50、80、150、300、500、 800 s/mm², b 值的设置对灌注成分和扩散成分的关 注各占一半,也会影响参数测量值。刘永久等^[23]的研 究中, b 值设置以低 b 值占比大(0、10、30、50、80、100、 150、200、600、800 s/mm²),原则上能反映出更多的灌 注信息,但他们结果显示 D 值最敏感(r=0.628), D^{*} (r=0.579)和 f 值(r=0.619)的相关性也不低,推测可 能与研究对象(CKD 患者)的肾脏出现纤维化限制水 分子的扩散有关。

CAKUT 患儿肾脏皮质 D*和f值随着 GFR 的降低而下降的原因可通过病理生理学知识来解释。肾单位数目异常会导致肾小球灌注及滤过异常,肾积水压 迫导致肾组织缺血缺氧,发生炎性反应,最终导致肾实 质损伤,使肾血流量、血容量以及毛细血管血流减少, 进而影响肾脏的扩散和灌注功能。在肾功能损害早 期,肾脏能通过神经-体液调节,使肾实质血容量保持 相对稳定,GFR 也维持在正常水平。但随着病程进 展,肾实质损伤致肾血流灌注减少,在 IVIM-DWI上 表现为 D*、f值降低;GFR 下降,导致水分子的运输功 能减低和间质纤维化,水分子扩散受到限制,在 IVIM-DWI 上则表现为 D 值降低。肾皮质在血管灌注和水 分重吸收方面占主导地位,而髓质在管状层流占优 势^[24],本研究仅测量肾皮质区的信息,亦可解释 D 值 与 GFR 相关性最低的原因。

本研究存在一定的局限性:①未设置正常人群对 照组,可能低估对肾功能的评价;②未设置呼吸门控, 可能因患儿自由呼吸频率不同导致图像质量产生细微 区别,造成信号测量误差;③采取人工勾画 ROI,无法 保证每1例肾脏的 ROI 完全置于相同位置,可能对后 处理参数产生影响;④属单中心研究,样本量偏少,且 患儿年龄多集中在学龄前期,可能影响其适用性,如果 能进一步扩大各年龄层的样本量,则能获得更加可靠 的结果。

IVIM-DWI 可评价 CAKUT 患儿的分肾功能: D*值区分患儿不同肾功能最敏感,尤其是肾功能正常 和轻度受损的鉴别,可用于早期肾功能受损的评估;f 值与分肾 GFR 相关性最为显著,可提供更为可靠的肾 功能信息。将肾皮质 D*值和 f 值结合分析,可早期发 现肾功能受损,并提高肾功能评估的准确性。对儿童 患者而言,MRI 是无引入对比剂、无辐射性的无创性 检查,它在提供肾脏功能信息的同时,也能评价肾组织 及其与周围邻近结构的关系,拥有良好的应用前景。 既往研究表明 IVIM-DWI 检查结果与 b 值的选择关 系密切,下一步笔者希望通过不断调整 b 值的个数和 范围探究出最佳扫描方案,进一步论证相关参数在评

估肾功能中的价值。

参考文献:

- [1] Mannelli L, Nougaret S, Vargas HA. Advances in diffusion-weighted imaging[J]. Radiol Clin North Am. 2015.53(3):569-581.
- [2] 王海燕.肾脏病学第3版[M].北京:人民卫生出版社,2000:1-27.
- [3] Hu G, Yang Z, Liang W, et al. Intravoxel incoherent motion and arterial spin labeling MRI analysis of reversible unilateral ureteral obstruction in rats[J]. J Magn Reson Imaging, 2018, 50(1): 288-296.
- [4] Woo S.Cho JY, Kim SY, et al. Intravoxel incoherent motion MRIderived parameters and T₂ * relaxation time for noninvasive assessment of renal fibrosis: an experimental study in a rabbit model of unilateral ureter obstruction[J]. Magn Reson Imaging, 2018, 51:104-112.
- [5] Yan YY, Hartono S, Hennedige T, et al. Intravoxel incoherent motion and diffusion tensor imaging of early renal fibrosis induced in a murine model of streptozotocin induced diabetes[J]. Magn Reson Imaging, 2017, 38; 71-76.
- [6] Cai XR, Yu J, Zhou QC, et al. Use of intravoxel incoherent motion MRI to assess renal fibrosis in a rat model of unilateral ureteral obstruction[J].J Magn Reson Imaging, 2016, 44(3):698-706.
- [7] Zhang B, Dong Y, Guo B, et al. Application of noninvasive functional imaging to monitor the progressive changes in kidney diffusion and perfusion in contrast-induced acute kidney injury rats at 3.0T[J].Abdom Radiol(NY),2018,43(3):655-662.
- [8] Mao W, Zhou J, Zeng M, et al. Chronic kidney disease: pathological and functional evaluation with intravoxel incoherent motion diffusion-weighted imaging[J]. J Magn Reson Imaging, 2018, 47 (5): 1251-1259.
- [9] Ren T, Wen CL, Chen LH, et al. Evaluation of renal allografts function early after transplantation using intravoxel incoherent motion and arterial spin labeling MRI[J]. Magn Reson Imaging, 2016,34(7):908-914.
- [10] 蒙秋华,陈娇香,邹乔,等.体素不相干运动 MR 成像预测肾积水 肾功能可复性的研究[J].放射学实践,2017,32(5):509-514.
- [11] Sulkowska K,Palczewski P,Wojcik D, et al.Intravoxel incoherent motion imaging in monitoring the function of kidney allograft [J].Acta Radiol.2019.60(7):925-932.
- [12] Yamada K, Shinmoto H, Oshio K, et al. Diffusion-weighted MR

imaging for the assessment of renal function: analysis using statistical models based on truncated gaussian and gamma distributions[J].Magn Reson Med Sci.2016.15(2):237-245.

- [13] Schneider MJ, Dietrich O, Ingrisch M, et al. Intravoxel Incoherent motion magnetic resonance imaging in partially nephrectomized Kidneys[J]. Invest Radiol, 2016, 51(5): 323-330.
- [14] 江舒,江建芹,孙昊,等.3.0T MR 正常肾脏短期重复 DWI 扫描: ADC 值及 IVIM 参数值的可重复性分析[J].放射学实践,2018, 33(8):806-810.
- [15] Li Q, Wu X, Qiu L, et al. Diffusion-weighted MRI in the assessment of split renal function: comparison of navigator-triggered prospective acquisition correction and breath-hold acquisition[J]. Am J Roentgenol, 2013, 200(1):113-119.
- [16] Choi JS, Kim MJ, Chung YE, et al. Comparison of breathhold, navigator-triggered, and free-breathing diffusion-weighted MRI for focal hepatic lesions[J].J Magn Reson Imaging.2013,38(1): 109-118.
- [17] Fukuda Y, Ohashi I, Hanafusa K, et al. Anisotropic diffusion in kidney: apparent diffusion coefficient measurements for clinical use[J].J Magn Reson Imaging, 2000, 11(2):156-160.
- [18] Kari JA, Sharief SN, El Desoky SM, et al. Etiology, ethics, and outcomes of chronic kidney disease in neonates[J].Saudi Med J, 2018,39(4):361-367.
- [19] Caruana G, Bertram JF. Congenital anomalies of the kidney and urinary tract genetics in mice and men[J]. Nephrology (Carlton),2015,20(5):309-311.
- [20] Federau C,O'Brien K,Meuli R,et al.Measuring brain perfusion with intravoxel incoherent motion (IVIM):initial clinical experience[J].J Magn Reson Imaging,2014,39(3):624-632.
- [21] 杨海静,梁宗辉.IVIM-DWI腹部应用及其进展[J].磁共振成像, 2016,7(7):546-550.
- [22] 李琼,张泉,孙浩然,等.应用扩散加权成像双指数模型评价慢性 肾脏病的初步研究[J].临床放射学杂志,2012,31(7):970-974.
- [23] 刘永久,查云飞,李军,等.肾脏 IVIM-DWI 在慢性肾脏病肾功能 评估中的应用初步研究[J].临床放射学杂志,2017,36(8):1145-1149.
- [24] Zhang JL.Functional magnetic resonance imaging of the Kidneyswith and without gadolinium-based contrast [J]. Adv Chronic Kidney Dis, 2017, 24(3):162-168.

(收稿日期:2019-03-23 修回日期:2019-06-06)