

T₁-mapping 评估慢性肾病肾功能损伤的价值

索朗尼玛, 冒炜, 曾蒙苏, 周建军, 丁玉芹, 曹波红, 丁小强, 傅彩霞

【摘要】 目的:探讨磁共振 T₁-mapping 成像评估慢性肾脏病(CKD)肾功能损伤的应用价值。**方法:**招募 60 例 CKD 患者和 20 例健康志愿者(对照组)。检测 CKD 患者的血清肌酐值并计算估算肾小球滤过率(eGFR)。将 CKD 患者分为两组,轻度肾损伤组[eGFR $\geq$ 60 mL/(min $\cdot$ 1.73m²)]31 例和中重度肾损伤组[eGFR<60 mL/(min $\cdot$ 1.73 m²)] 29 例。所有受试者行双肾 T₁-mapping 检查,测量肾皮质和肾髓质的 T₁ 值。采用配对样本 *t* 检验分析各组中肾皮质与肾髓质 T₁ 值的差异,3 组之间肾皮质和肾髓质 T₁ 值的比较采用单因素方差分析,CKD 组肾皮质和肾髓质 T₁ 值与 eGFR 之间的相关性评估采用 Spearman 相关性分析,采用 ROC 曲线评估肾皮质和髓质 T₁ 值评估肾功能损伤程度的诊断效能。**结果:**对照组、轻度肾损伤组及中重度肾损伤组中肾髓质的 T₁ 值均明显高于肾皮质 T₁ 值(*P* 均<0.05)。三组之间肾皮质和肾髓质 T₁ 值的差异均有统计学意义(*P*<0.01)。CKD 患者 eGFR 与肾皮质 T₁ 值呈高度负相关(*r*=-0.773, *P*<0.01),与肾髓质 T₁ 值呈中度负相关(*r*=-0.689, *P*<0.01)。鉴别对照组与轻度肾损伤时,肾髓质 T₁ 值的 ROC 曲线下面积大于肾皮质 T₁ 值(0.866 vs. 0.821);肾髓质 T₁ 值的截断值为 1505.2 ms 时,敏感度和特异度分别为 83.9% 和 80.0%。鉴别中重度与轻度肾损伤时,肾皮质 T₁ 值的 ROC 曲线下面积大于肾髓质 T₁ 值(0.874 vs. 0.820);当肾皮质 T₁ 值的截断值为 1457.3 ms 时,敏感度和特异度分别为 82.8% 和 83.9%。**结论:**T₁-mapping 技术对于评估 CKD 肾功能损伤具有一定的价值。

【关键词】 慢性肾脏病;肾功能;磁共振成像;T₁-mapping

【中图分类号】 R445.2;R692.5 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2023)08-1039-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2023.08.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The value of T₁-mapping to evaluate renal function injury in chronic kidney disease SUO LANG Nima, MAO Wei, ZENG Mengsu, et al. Department of Radiology, the People's Hospital of Tibet Autonomous Region, Tibet 850000, China

【Abstract】 Objective: To investigate the application value of T₁-mapping in evaluating the renal function injury of chronic kidney disease (CKD). **Methods:** Twenty healthy volunteers and sixty CKD patients were recruited. The estimated glomerular filtration rate (eGFR) was calculated on the basis of serum creatinine in CKD patients, CKD patients were divided into two groups according to their eGFR: mild renal injury group [31 cases, eGFR $\geq$ 60 mL/(min $\cdot$ 1.73m²)] and moderate to severe renal injury group [29 cases, eGFR<60 mL/(min $\cdot$ 1.73m²)] All subjects underwent T₁-mapping scan, and the renal cortical and medullary T₁-values were measured. The differences of T₁-values between the renal cortex and medulla in each group were analyzed by paired-samples *t*-test, respectively. The differences of the renal cortical and medullary T₁-values among the three groups were compared using the one-way analysis of variance (ANOVA). Correlations between renal cortical and medullary T₁-values and eGFR in CKD patients were assessed by Spearman correlation analysis. The diagnostic efficacy of renal cortical and medullary T₁-values in differentiating the degree of renal function injury was assessed by ROC curves. **Results:** The T₁-values of renal medullary were significantly higher than those

作者单位: 850000 西藏拉萨, 西藏自治区人民医院放射科(索朗尼玛); 200032 上海, 复旦大学附属中山医院放射科、上海市影像医学研究所、复旦大学上海医学院影像学系(冒炜、曾蒙苏、周建军、丁玉芹、曹波红), 中山医院肾内科(丁小强); 518057 广东, 西门子(深圳)磁共振有限公司(傅彩霞)

作者简介: 索朗尼玛(1990—), 男, 西藏那曲人, 住院医师, 主要从事影像诊断工作。

通讯作者: 冒炜, E-mail: sudargmw@126.com

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”启明星项目扬帆专项(22YF1443700); 国家自然科学基金面上项目(82171897); 上海市临床重点专科项目(shslczdzk03202); 上海申康医院发展中心“促进市级医院临床技能与临床创新能力三年行动计划”(SHDC2020CR1029B)

of renal cortical in the three groups (all $P < 0.05$). The T_1 -values of renal cortex and medulla were significantly different among three groups (both $P < 0.01$). In CKD patients, a significantly high negative correlation was found between renal cortical T_1 -value and eGFR ($r = -0.773, P < 0.01$), and there was a significantly moderate negative correlation between renal medullary T_1 -value and eGFR ($r = -0.689, P < 0.01$). The results of the ROC curves analysis for distinguishing the healthy control group from mild renal injury group revealed that the area under ROC curve of renal medullary T_1 -value was larger than that of renal cortex (0.866 vs. 0.821), and when the cut-off of renal medullary T_1 -value was 1505.2ms, the sensitivity and specificity for diagnosing mild renal injury were 83.9% and 80.0%, respectively. The results of the ROC curves analysis for distinguishing the moderate to severe renal injury group from mild renal injury group revealed that the area under ROC curve of renal cortical T_1 -value was larger than that of renal medulla (0.874 vs. 0.820), and when the cut-off of renal cortical T_1 -value was 1457.3ms, the sensitivity and specificity for diagnosing moderate to severe renal injury were 82.8% and 83.9%, respectively. **Conclusion:** MR T_1 -mapping technique has certain value in evaluating renal function injury in CKD.

[Key words] Chronic kidney disease; Renal function; Magnetic resonance imaging; T_1 -mapping

慢性肾脏病(chronic kidney disease, CKD)是全球性的公共健康问题,其定义为肾脏功能或结构异常持续 3 个月以上^[1]。每年全球 CKD 的患病率估计为 13.4%,而需要接受肾脏替代治疗的终末期肾病(end-stage renal disease, ESRD)患者大约在 490~708 万之间^[2]。早期 CKD 的临床治疗相对容易、花费较低,而晚期 CKD 的临床治疗方案复杂、花费高昂。因此,CKD 的早期诊断及肾功能损伤的精准评估对于延缓 CKD 进展为 ESRD 具有重要意义。目前临床评估 CKD 患者肾功能的方法主要是通过检测血清肌酐值来计算估算肾小球滤过率(estimated glomerular filtration rate, eGFR)。但是,eGFR 评估的是双侧肾脏的整体功能,对于左、右单侧肾脏功能的评估价值有限,并且其受年龄、性别和体重等个体因素的影响。我们认为,如果能够准确评估左、右单侧肾脏的功能,再与 eGFR 相结合,对于 CKD 治疗效果的评价及长期随访具有重要意义。 T_1 -mapping 是定量测量组织 T_1 值的无创性 MRI 技术,目前已广泛应用于评估心肌纤维化、肝功能和肝纤维化^[3-6]。既往的研究已证实健康成年人肾脏 T_1 -mapping 成像的可行性^[7],而此技术在评估 CKD 方面的应用尚处于探索阶段。因此,本研究中,笔者通过对比分析 CKD 患者和健康志愿者的 T_1 -mapping 检查结果,旨在探讨这项技术在评估 CKD 患者肾功能损伤中的价值。

材料与方法

1. 研究对象

本研究经本院伦理委员会批准,所有受试者在 MRI 检查前签署了知情同意书。

健康对照组:前瞻性招募 20 例健康志愿者,包括

男 9 例和女 11 例,年龄 24~56 岁,平均(41±10)岁。纳入标准:①近期无肾毒性药物服用史;②临床实验室检查肾功能指标未发现异常;③无肾脏疾病史;④无高血压、糖尿病等影响肾功能的疾病史。

CKD 组:前瞻性纳入 2021 年 3 月—2022 年 2 月在本医院就诊的 CKD 患者。纳入标准:①符合 CKD 的诊断标准^[8];②超声检查未发现肾脏有明显萎缩;③能配合完成 MRI 检查,无相关禁忌证。排除标准:①存在影响肾脏 T_1 -mapping 图像分析的疾病,如肾肿瘤、多囊肾等;②磁共振图像质量较差,无法进行后续的图像分析。最终,本研究共招募了 60 例 CKD 患者,包括 37 例男性和 23 例女性,年龄 26~76 岁,平均(48±11)岁。在 MRI 检查前所有患者进行血清肌酐(SCr)的检测,然后采用简化的肾脏病膳食改良公式来计算 eGFR^[9]:

$$(\text{男性})\text{eGFR} = 186 \times \text{SCr}^{-1.154} \times \text{年龄}^{-0.203} \quad (1)$$

$$(\text{女性})\text{eGFR} = 186 \times \text{SCr}^{-1.154} \times \text{年龄}^{-0.203} \times 0.742 \quad (2)$$

根据肾脏病患者生存质量指导(kidney disease outcomes quality initiative, K-DOQI)中对 CKD 的分期标准^[10],将 CKD 患者分成两组:轻度肾损伤组($\text{eGFR} \geq 60 \text{ mL/min/1.73 m}^2$)31 例,包括 1 期 16 例、2 期 15 例;中重度肾损伤组($\text{eGFR} < 60 \text{ mL/min/1.73 m}^2$)29 例,包括 3 期 17 例、4 期 9 例、5 期 3 例。

2. MRI 检查方法

使用 Siemens Magnetom Prisma 3.0T 磁共振扫描仪、18 通道相控阵体部线圈和 32 通道集成脊柱线圈。在 T_1 -mapping 检查前要求每例受试者禁水、禁食至少 6 h,对其进行呼吸训练,检查过程中取仰卧位。 T_1 -mapping 采用冠状面 Look-Locker 反转恢复序列屏气扫描,扫描中心线定于肾门水平,主要扫描参数:

TE 1.32 ms, TR 3.00 ms, 体素大小 2.0 mm × 2.0 mm × 8.0 mm, 视野 380 mm × 308 mm, 层厚 5.0 mm, 层间距 1.0 mm, 矩阵 192 × 153, 加速因子 2, 层数 3, 扫描时间 17.0 s。扫描结束后系统自动后处理并生成 T₁-mapping 伪彩图。

3. 图像分析和评估

由 2 位泌尿生殖亚专业方向的放射科医师采用盲法在肾脏 T₁-mapping 冠状面图像上进行分析和数据测量,评估 2 位医师测量结果的一致性,后续的统计学分析中采用两者测量结果的平均值。本研究中,我们仅测量了右肾的数据,这是为了保证数据测量的准确性和稳定性,因为心脏大血管搏动和呼吸运动对左侧肾脏的影响更显著^[11]。在靠近肾门平面的冠状面 T₁-mapping 图像上,避开肾盂、肾盏及肾周组织,分别于肾脏上、中、下极区域内的肾皮质和肾髓质内各勾画 1 个 ROI,共 6 个 ROI(皮质和髓质各 3 个),每个 ROI 的面积为 15~18 像素,肾皮质和肾髓质均取 3 个 ROI 测量值的平均值作为最终结果,用于进一步的统计学分析。

4. 统计学分析

使用 MedCalc 15.8 和 SPSS 22.0 软件进行统计学分析。测量数据以均值 ± 标准差来表示。采用组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)来评估 2 位医师测量的肾实质 T₁ 值的一致性,ICC ≥ 0.75 为一致性好,0.40 ≤ ICC < 0.75 为一致性中等,ICC < 0.40 为一致性差。采用配对样本 *t* 检验比较每组中肾皮质与肾髓质之间 T₁ 值的差异。肾皮质和肾髓质 T₁ 值在 3 组之间的比较均采用单因素方差分析,进一步组间两两比较采用 LSD 法。采用 Spearman 相关性分析评估 CKD 患者肾皮、髓质 T₁ 值与 eGFR 之间的相关性,|*r*| < 0.3 为低度相关,0.3 ≤ |*r*| < 0.7 为中度相关,0.7 ≤ |*r*| < 1.0 为高度相关。采用 ROC 曲线分析评估肾皮质和肾髓质 T₁ 值鉴别 CKD 肾功能损伤程度的效能。以 *P* < 0.05 为差异有统计学意义。

结 果

本研究中所有受试者均获得了高质量的 T₁-mapping 图像,肾皮质和肾髓质结构显示清晰,分界清楚(图 1)。

1. 两位医师测量值的一致性分析

两位医师测量的肾皮质和肾髓质 T₁ 值的 ICC 值

分别为 0.971(95%CI:0.956~0.981)和 0.985(95%CI:0.977~0.991),一致性均非常好。

2. 三组受试者肾实质 T₁ 值的比较

健康对照组、轻度肾损伤组和中重度肾损伤组肾皮质和肾髓质 T₁ 值的测量结果见表 1。三组中肾髓质的 T₁ 值均大于肾皮质,差异均有统计学意义(*P* < 0.05)。

表 1 三组受试者间肾皮质和髓质 T₁ 值的比较

组别	T ₁ 值/ms		<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
	皮质	髓质		
健康对照组	1270.7 ± 68.8	1478.0 ± 68.3	-22.94	<0.01
轻度 CKD 组	1376.8 ± 105.4	1613.7 ± 104.0	-17.82	<0.01
中重度 CKD 组	1658.1 ± 215.6	1781.1 ± 164.0	-8.09	<0.01

三组之间肾皮质和肾髓质 T₁ 值的差异均具有统计学意义(*F* = 46.09, *P* < 0.01; *F* = 37.06, *P* < 0.01)。进一步进行组间两两比较,轻度组与对照组之间、中重度组与对照组之间、以及中重度组与轻度组之间,肾皮质和肾髓质 T₁ 值的差异均有统计学意义(*P* < 0.05)。

3. CKD 患者肾实质 T₁ 值与 eGFR 的相关性

CKD 患者 eGFR 与肾皮质 T₁ 值呈高度负相关(*r* = -0.773, *P* < 0.01),eGFR 与肾髓质 T₁ 值呈中度负相关(*r* = -0.689, *P* < 0.01)。

4. 肾实质 T₁ 值鉴别肾功能损伤程度的效能

肾实质 T₁ 值对肾功能损伤程度的诊断效能指标详见表 2。鉴别正常肾功能(健康对照组)与轻度肾损伤:肾髓质 T₁ 值的 ROC 曲线下面积大于肾皮质 T₁ 值(0.866 vs. 0.821)。鉴别中重度与轻度肾损伤组时,肾皮质 T₁ 值的 ROC 曲线下面积大于肾髓质 T₁ 值(0.874 vs. 0.820)。

讨 论

组织中氢质子受到激发跃迁至高能级状态后,关

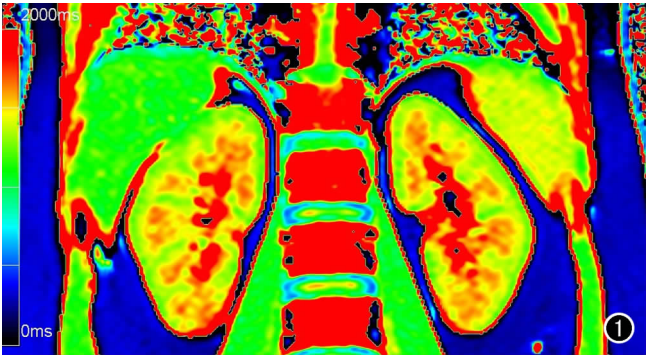


图 1 T₁-mapping 伪彩图,肾脏的皮、髓质显示清晰,分界清楚。

表 2 肾实质 T₁ 值对肾功能损伤程度的诊断效能

MRI 参数	轻度肾损伤组(n=31)与健康对照组(n=20)				轻度肾损伤组(n=31)与中重度肾损伤组(n=29)			
	AUC	截断值	敏感度	特异度	AUC	截断值	敏感度	特异度
肾皮质 T ₁ 值	0.821	1285.7ms	87.1%	75.0%	0.874	1457.3ms	82.8%	83.9%
肾髓质 T ₁ 值	0.866	1505.2ms	83.9%	80.0%	0.820	1641.4ms	86.2%	67.7%

闭射频脉冲,宏观纵向磁化矢量会逐渐恢复至激发前的平衡状态,这个过程称为 T_1 弛豫(纵向弛豫),在此过程中,自旋系统的能量会转移到周围晶格^[12],它的定量参数就是 T_1 弛豫时间。 T_1 弛豫时间是组织的一个特征物理量, T_1 -mapping 技术可以测量组织的 T_1 值,组织的 T_1 值受多种生物因素影响,如组织的水含量、水结合状态和大分子浓度等^[12]。CKD 中肾脏的病理学改变主要是间质纤维化、肾小管萎缩和肾小球硬化等,这些病理学改变不但会使得肾组织的微观结构发生变化,而且会影响肾脏的含水量,从而使肾脏 T_1 值发生相应的变化。早期的研究表明, T_1 -mapping 技术不仅可以评估小鼠急性肾损伤的严重程度,还可以通过评估慢性肾纤维化的严重程度来预测转归,证实了 T_1 -mapping 技术评估慢性肾脏病的可行性^[13]。此外, T_1 -mapping 技术可以用于评估移植肾的肾功能、新型冠状病毒肺炎患者肾功能损伤、糖尿病肾病患者肾病理损害、慢性乙型肝炎患者早期亚临床肾实质病变以及慢性肾小球肾炎患者的肾脏纤维化^[14-18]。 T_1 -mapping 技术在评估 CKD 肾功能损伤方面的相关报道较少。本研究结果显示 T_1 -mapping 对 CKD 的肾功能损伤有一定的评估价值。

1. 肾脏皮质和髓质 T_1 值的差异

本研究中对照组、轻度肾损伤组和中重度肾损伤组受试者肾脏髓质 T_1 值均明显大于肾皮质 T_1 值,差异有统计学意义($P < 0.05$),这与之前的研究结果类似^[7,19]。分析其原因可能为肾皮质和髓质的含水量和组织学结构不同,肾脏髓质主要由集合管和肾小管构成,肾皮质主要由部分肾小管和肾小球构成,并且肾脏髓质的含水量大于肾皮质。

2. CKD 患者肾皮质和髓质 T_1 值的变化

Hueper 等^[13]通过研究发现,缺血诱导的急性肾损伤小鼠肾实质的 T_1 值会随着肾损伤程度的加深而不断升高。陈丽华等^[19]采用 T_1 -mapping 评估肾移植术后移植肾功能时发现,移植肾功能受损组肾皮质和肾脏髓质 T_1 值较对照组均升高。与既往的研究结果相似,本研究中肾实质 T_1 值在 3 组之间的比较结果显示中重度肾损伤组、轻度肾损伤组的肾皮质和肾脏髓质的 T_1 值明显高于健康对照组,差异均有统计学意义($P < 0.05$)。我们认为出现这种结果的原因可能为 CKD 患者的肾脏所发生的病理变化,如肾间质内炎性细胞浸润、水肿等,使得细胞间质内和细胞内含水量增加^[20],从而使得肾组织 T_1 值升高。不仅如此,肾间质纤维化或许也是导致肾组织 T_1 值增加的原因之一。de Miguel 等^[21]采用 T_1 -mapping 技术评估抗肾小球基底膜病后发现,肾实质 T_1 值与肾纤维化之间存在相关性($P < 0.05$)。除此之外,本研究结果还显示,

中重度肾损伤组的肾皮质和肾脏髓质 T_1 值均明显高于轻度肾损伤组($P < 0.05$)。Graham-Brown 等^[22]采用 T_1 -mapping 评估 IgA 肾病患者肾纤维化,结果显示 IgA 肾病患者肾皮质的 T_1 值明显大于健康志愿者,差异有统计学意义($P < 0.05$);而且在 IgA 肾病患者中,肾纤维化评分大于 0 组的肾皮质 T_1 值要高于肾纤维化评分等于 0 组,但差异无统计学意义($P > 0.05$)。此外,Wu 等^[23]利用 T_1 -mapping 评估慢性肾小球肾炎患者肾纤维化程度,研究发现,慢性肾小球肾炎患者的肾皮质 T_1 值要明显高于健康志愿者,差异有统计学意义($P < 0.05$);而且,不同分期的慢性肾小球肾炎患者之间肾皮质 T_1 值的差异有统计学意义($P < 0.05$)。上述两项研究的结果与我们的研究结果类似,但是与上述研究相比,我们的研究具有一定的优势。这是因为,上述研究中仅测量了肾皮质的 T_1 值,而本研究中同时测量了肾皮质和肾脏髓质的 T_1 值,并将两者进行了比较。所以,相比于上述的研究,我们的研究结果更加具有代表性,研究结论更加具有适用性。除此之外,Hu 等^[24]利用 T_1 -mapping 评估单侧输尿管结扎大鼠的肾纤维化程度,发现随着输尿管结扎时间的延长,肾纤维化程度加重,肾实质 T_1 值会不断升高。Schmidbauer 等^[25]采用 T_1 -mapping 评估肾移植小鼠的慢性肾排斥反应,他们发现,与正常小鼠的肾脏和不伴有慢性排斥反应的移植肾相比,伴有慢性排斥反应的移植肾的 T_1 值明显升高。这两项研究的结果与我们的研究结果相似,均表明随着肾纤维化的不断进展及肾功能的逐渐恶化,肾组织的 T_1 值会逐渐升高。

3. CKD 患者肾实质 T_1 值与 eGFR 的相关性

Peperhove 等^[26]对接受器官移植的患者进行 T_1 -mapping 检查,评估其肾功能损伤情况。他们发现,器官移植患者的肾皮质和髓质的 T_1 值均较健康志愿者升高,并且与 eGFR 之间存在负相关关系。Graham-Brown 等^[22]的研究结果亦显示,IgA 肾病患者的肾皮质 T_1 值与 eGFR 呈负相关。与上述研究相似,我们的研究结果显示 CKD 患者的 eGFR 与肾皮质 T_1 值之间呈高度负相关,eGFR 与肾脏髓质 T_1 值之间呈中度负相关。上述结果表明 T_1 -mapping 用于评估 CKD 患者的肾功能是可行的。

4. 肾实质 T_1 值对肾功能损伤程度的诊断效能

本研究结果显示,鉴别健康对照组与轻度肾损伤组时,肾脏髓质 T_1 值的 AUC 大于肾皮质;而鉴别中重度与轻度肾损伤组时,肾皮质 T_1 值的 AUC 大于肾脏髓质。Wu 等^[23]的研究中肾皮质 T_1 值鉴别慢性肾小球肾炎患者有无肾纤维化的 AUC 为 0.762,低于本研究中肾皮质和髓质 T_1 值鉴别肾功能损伤程度的 AUC (均大于 0.80)。造成差异的原因,笔者认为可能是因

为 Wu 等的研究中是将慢性肾小球肾炎患者按照肾间质纤维化的程度进行分组,而本研究中将 CKD 患者按照肾功能损伤程度进行分组。我们认为肾间质纤维化只是 CKD 病理学改变的一个方面,它并不能全面和准确地反映肾功能损伤的严重程度,所以本研究中对 CKD 的分组标准更加科学,所得的结果应该更加准确。

5. 本研究的局限性

本研究的局限性主要有以下 2 点。第一,本研究为单中心研究,样本量相对不足,未来需要扩大样本量来验证现有的研究结果和结论;第二,本研究为横断面研究,未来还需要进行纵向研究来探索 T₁-mapping 评估 CKD 预后和进展的价值。

综上所述,T₁-mapping 技术对于评估 CKD 肾功能损伤具有一定的价值,有望为临床无创性评估 CKD 的肾功能损伤提供新的影像学手段。

参考文献:

- [1] Levey AS, Coresh J. Chronic kidney disease[J]. Lancet, 2012, 379 (9811): 165-180.
- [2] Lv JC, Zhang LX. Prevalence and disease burden of chronic kidney disease[J/OL]. Adv Exp Med Biol, 2019, 1165: e3-e15. DOI: 10. 1007/978-981-13-8871-2_1.
- [3] 毕新军, 张学琴, 陆健, 等. 钆塞酸二钠增强 MRI 肝细胞摄取定量参数评估肝功能[J]. 放射学实践, 2021, 36(4): 514-519.
- [4] 张涛, 陆健, 张学琴, 等. 钆塞酸二钠增强 T₁-mapping 成像和 DWI 对肝纤维化分期的评估价值[J]. 放射学实践, 2020, 35(2): 203-207.
- [5] Tunnicliffe EM, Banerjee R, Pavlides M, et al. A model for hepatic fibrosis: the competing effects of cell loss and iron on shortened modified Look-Locker inversion recovery T₁ (shMOLLI-T₁) in the liver[J]. J Magn Reson Imaging, 2017, 45(2): 450-462.
- [6] Bull S, White SK, Piechnik SK, et al. Human non-contrast T₁ values and correlation with histology in diffuse fibrosis[J]. Heart, 2013, 99(13): 932-937.
- [7] 胡富碧, 唐芳, 车梦娇, 等. 正常青年人肾脏磁共振 T₁-mapping 成像的定量研究[J]. 成都医学院学报, 2015, 10(6): 661-664.
- [8] Levey AS, Coresh J, Balk E, et al. National kidney foundation practice guidelines for chronic kidney disease: evaluation, classification, and stratification[J]. Ann Intern Med, 2003, 139(2): 137-147.
- [9] Levey AS, Coresh J, Greene T, et al. Using standardized serum creatinine values in the modification of diet in renal disease study equation for estimating glomerular filtration rate[J]. Ann Intern Med, 2006, 145(4): 247-254.
- [10] National Kidney Foundation. K/DOQI clinical practice guidelines for chronic kidney disease: evaluation, classification, and stratification[J]. Am J Kidney Dis, 2002, 39(2 Suppl 1): S1-S266.
- [11] Kido A, Kataoka M, Yamamoto A, et al. Diffusion tensor MRI of the kidney at 3.0 and 1.5 Tesla[J]. Acta Radiol, 2010, 51(9): 1059-1063.
- [12] Shah B, Anderson SW, Scalera J, et al. Quantitative MR imaging;

physical principles and sequence design in abdominal imaging[J]. Radiographics, 2011, 31(3): 867-880.

- [13] Hueper K, Peperhove M, Rong S, et al. T₁-mapping for assessment of ischemia-induced acute kidney injury and prediction of chronic kidney disease in mice[J]. Eur Radiol, 2014, 24(9): 2252-2260.
- [14] 单德娟. 体素内不相干运动成像及 T₁-mapping 在评价长期存活移植肾功能中的价值[D]. 山东大学影像医学与核医学, 2021.
- [15] Han Q, Lu Y, Wang D, et al. Assessment of dynamic hepatic and renal imaging changes in COVID-19 survivors using T₁-mapping and IVIM-DWI[J]. Abdom Radiol (NY), 2022, 47(5): 1817-1827.
- [16] 商芳芳, 施钊钰, 王垚, 等. 应用 Native T₁-mapping 成像在评估糖尿病肾脏疾病患者肾功能及病理损伤中的价值[J]. 中国糖尿病杂志, 2022, 30(7): 507-512.
- [17] Ozkok S, Buz A, Erdemli S, et al. Non-invasive assessment of subclinical renal parenchymal changes in chronic hepatitis B virus by T₁-mapping magnetic resonance imaging[J]. Balkan Med J, 2022, 39(2): 115-120.
- [18] 施钊钰, 王欣全, 顾红梅, 等. Native T₁-mapping 在评估慢性肾小球肾炎肾脏纤维化中的应用[J]. 中国医学影像学杂志, 2021, 29(9): 930-934.
- [19] 陈丽华, 任涛, 温成龙, 等. 体素内不相干运动及 T₁-mapping 成像评估肾移植术后早期移植肾功能的价值[J]. 中华放射学杂志, 2016, 50(10): 762-767.
- [20] 任涛, 陈丽华, 谢双双, 等. T₁-mapping 定量分析肾移植术后早期不同功能移植肾皮髓质 T₁ 值差异的价值[J]. 放射学实践, 2017, 32(12): 1277-1281.
- [21] de Miguel MH, Yeung HN, Goyal M, et al. Evaluation of quantitative magnetic resonance imaging as a noninvasive technique for measuring renal scarring in a rabbit model of antglomerular basement membrane disease[J]. J Am Soc Nephrol, 1994, 4(11): 1861-1868.
- [22] Graham-Brown MP, Singh A, Wormleighton J, et al. Association between native T₁-mapping of the kidney and renal fibrosis in patients with IgA nephropathy[J/OL]. BMC Nephrol, 2019, 20(1): e256. DOI: 10. 1186/s12882-019-1447-2.
- [23] Wu J, Shi Z, Zhang Y, et al. Native T₁-mapping in assessing kidney fibrosis for patients with chronic glomerulonephritis[J/OL]. Front Med (Lausanne), 2021, 8: e772326. DOI: 10. 3389/fmed. 2021. 772326. eCollection 2021.
- [24] Hu G, Liang W, Wu M, et al. Comparison of T₁-Mapping and T₁ rho values with conventional diffusion-weighted imaging to assess fibrosis in a rat model of unilateral ureteral obstruction[J]. Acad Radiol, 2019, 26(1): 22-29.
- [25] Schmidbauer M, Rong S, Gutberlet M, et al. Diffusion-weighted imaging and mapping of T₁ and T₂ relaxation time for evaluation of chronic renal allograft rejection in a translational mouse model[J/OL]. J Clin Med, 2021, 10(19): e4318. DOI: 10. 3390/jcm10194318.
- [26] Peperhove M, Vo CV, Jang MS, et al. Assessment of acute kidney injury with T₁-mapping MRI following solid organ transplantation[J]. Eur Radiol, 2018, 28(1): 44-50.

(收稿日期: 2022-09-05 修回日期: 2023-11-26)