

Application Progress of Arterial Spin Labeling Techniques In Kidney Disease*

综述

ZHANG Xin-yue¹, YANG Jing¹, WANG Chen^{2,*}.

1.Department of Nephrology, Seventh People's Hospital, Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 200137, China

2.Department of Nephrology, Shuguang Hospital Affiliated to Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 201203, China

动脉自旋标记磁共振技术在肾脏病中的应用进展*

张欣悦¹ 杨婧¹ 王琛^{2,*}

1.上海中医药大学附属第七人民医院

肾内科 (上海 200137)

2.上海中医药大学附属曙光医院

肾内科 (上海 201203)

【摘要】各类肾脏病均存在着不同程度的肾血流灌注(RBP)的异常,并与患者预后密切相关。动脉自旋标记(ASL)技术作为一种动态检测技术,无需外源性对比剂,可准确检测RBP,在多种肾脏病的诊断、预后预测及干预指导中表现出良好的临床应用价值。本文就ASL技术的概况及在肾脏病评估运用中的研究进展进行综述。

【关键词】功能性磁共振;动脉自旋标记;肾血流灌注;肾脏病

【中图分类号】R445.2; R692

【文献标识码】A

【基金项目】国家自然科学基金(81973770);上海市浦东新区卫生系统重点学科群建设(No.PWZxq2017-07)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2026.01.053

ABSTRACT

All types of kidney diseases have different degrees of abnormal renal blood perfusion (RBP) and are closely related to patient prognosis. Arterial spin labeling (ASL) technology, as a dynamic detection technology, can accurately detect RBP without an exogenous contrast machine, and has shown good clinical application value in the diagnosis, prognosis prediction, and intervention guidance of various renal diseases. In this article, we review the overview of ASL technology and the research progress in the use of ASL in the assessment of kidney disease.

Keywords: Functional magnetic resonance; Arterial spin labeling; Renal blood perfusion; Kidney disease

肾脏具有丰富的血流供应,接受静息心输出量的20~25%的血液^[1]。肾脏的高血流量保证了血浆的充分滤过,在维持机体生理稳态中发挥重要作用^[2]。研究表明,各类急慢性、原发及继发性肾脏病中均存在肾血流灌注(renal blood perfusion, RBP)的异常^[3]。RBP下降是肾功能恶化、肾脏疾病进展的独立危险因素,动脉自旋标记(arterial spin labeling, ASL)技术为临床检测RBP提高了参考。ASL技术无需外源性对比剂,利用动脉血液中水分子作为内源性对比剂进行成像,可无创、安全、定量检测RBP水平,在肾脏病临床研究领域具有很大前景^[4]。早期ASL技术主要运用于脑组织检测,利用内源性血液信号获取组织灌注信息尤其适用于对患者进行多次追踪成像^[5],而近年来的研究发现,ASL技术在外周器官评估中有着广阔的应用空间^[6]。本文就ASL技术概况及在肾脏病临床运用中的现状进行总结和分析。

1 ASL技术检测原理

ASL技术使用动脉血中磁化后的质子作为内源性、可自由扩散的造影剂,从而检测肾脏毛细血管血流的灌注程度,并生成以RBP(通常为 mL/min/100g 组织)为单位的组织灌注的定量参数图像^[7]。基本的 ASL检测技术采集两种图像,分别称为“标记”和“对照”图像。检测开始时,预先使用射频脉冲将动脉血中的质子纵向磁化,经过一段时间的延迟后采集得到标记图像;随后在相同的时间延迟下采集对照图像,但不对动脉血质子进行标记。在两次检测之间,只需从对照图像中减去标记,即可得到灌注加权图像,其信号强度与RBP成正比^[8]。最后,通过感兴趣区域(regions of interest, ROI)技术勾选图像以此计算肾脏的RBF定量。通常ROI的勾选一般位于肾脏的上中下极,大小包含约4~5个像素,并排除伪影、肾脏血管等干扰因素^[9]。这需要操作者具备熟练的检测技术,并由两名相关专业影像医师独立对数据进行审核,选取两者平均值作为RBP测量值。

2 ASL检测序列

所有 ASL 脉冲序列都由两部分组成:(1)标记模块,对流入的血液进行磁化标记;(2)成像读出模块,在“标记”和“对照”条件下生成目标组织的参数图像。ASL 检测方法可根据每个模块的构建方式进行分类。其分类及特点见表1。

表1 各类ASL检测序列及特点

ASL序列	特点
标记模块 CASL	传统标记序列,标记时间长,信噪比较高,存在高估灌注的缺点
PASL	标记时间短、效率高,但信噪比低
pCASL	结合了CASL与PASL两者优势,高效率、高信噪比
成像模块 2D-GRASE	传统的成像模块序列
3D-GRASE	成像速度快、范围大,高信噪比
3D-RARE	较GRASE信噪比更高,但读出时间长,图像质量一般

2.1 标记模块 早期ASL技术主要有两种标记模块:脉冲动脉自旋标记(pulsed arterial spin labelling, PASL)与连续动脉自旋标记(continuous arterial spin labelling, CASL),两者在标记的空间范围和持续时间上有本质区别^[10]。CASL 技术则在成像平面上使用

【第一作者】张欣悦,男,住院医师,主要研究方向:慢性肾脏病治疗。E-mail: zhangxinyue214@163.com

【通讯作者】王琛,男,主任医师,主要研究方向:慢性肾脏病治疗。E-mail: chenwang42@163.com

连续射频波,以产生流经该平面动脉血的流动驱动反转。而PASL技术则使用单个短脉冲或数量有限的脉冲来反转动脉水质子的自旋。它又可按照标记自旋的方法分为交替射频脉冲信号定位(STAR序列);控制非共振效应的近端反转(PICORE序列)和流动敏感交替反转恢复(FAIR序列)^[11]。伪连续动脉自旋标记(pseudocontinuous arterial spin labeling, pCASL)为后期ASL的一种改进序列,它使用一长串短射频脉冲,同样可产生血液质子自旋的反转,并具有图像质量高,信噪比低的特点^[12]。

2.2 成像模块 准确进行RBP评估的一个重要前提是能够快速成像,以限制被检测者运动对检测的干扰^[13]。因此,ASL采用了多种快速图像读出技术,目前ASL成像读出技术可大致分为二维(2D)或三维(3D)梯度自旋回波(gradient and spin echo, GRASE)序列。3D-GRASE的扫描时间短于2D-GRASE,显著增加了灌注成像的范围,并改善了2D-ASL成像的信噪比低、灌注不均匀等缺点,在肾脏成像领域运用具有更高的可靠性^[14]。3D-弛豫增强快速采集(rapid acquisition with relaxation enhancement, RARE)是3D-GRASE的替代方案,其信噪比更低,但由于读出时间较长,会导致通图像模糊^[15]。

3 ASL技术运用于肾脏病评估

3.1 肾脏肿瘤 肾肿瘤可依据组织来源分为肾细胞肿瘤、囊性肿瘤、间叶瘤等亚型^[16]。ASL技术能准确地通过评估肿瘤的血供情况来预测肿瘤的病理类型并鉴别与良性组织的区别,并相应评估肿瘤的治疗效果。Ye等^[17]通过ASL检测对比发现,肾透明细胞癌患者的肿瘤血流量值显著高于平滑肌脂肪瘤患者,ASL技术可准确评估肿瘤组织的血供情况,在肾肿瘤的鉴别中发挥良好作用。另一项包含经组织病理学证实的20例患者的前瞻性研究表明,ASL图像可以通过RBP灌注情况预测肾肿瘤的假性包膜缺损情况^[18]。此外,ASL技术亦可运用与肾肿瘤对治疗效果的评估中。Tsai等^[19]比较了17名服用酪氨酸激酶抑制剂的肾细胞癌患者用药后基线、第2周、第12周、第24周之间的肾脏灌注情况,发现ASL可有助于识别经酪氨酸激酶抑制剂治疗后的肾脏血流改变,并可能有助于发现早期转移性肾细胞癌。在儿科领域,Harteveld等^[20]的研究发现,与高度灌注的肾脏相比,肾实质肿瘤表现出相对较低的灌注加权信号,使用ASL-MRI可非侵入性地检测BRP,为实体肾脏肿瘤的判断提供基础。

3.2 急性肾损伤 现代流行病学显示,急性肾损伤(acute kidney injury, AKI)是一个与高发病率的公共卫生问题,会显著增加患者终末期肾病发生的风险^[21]。ASL已在各类AKI动物模型研究中展现出良好评估价值。Hueper等^[22]通过夹闭大鼠肾蒂的方式进行AKI诱导,将27只小鼠分为中度AKI组(夹闭35分钟)与重度AKI组(夹闭45分钟)进行ASL检测,并与评估肾脏清除功能的金标准菊粉清除率结果进行比较。研究显示ASL可准确评估小鼠AKI后RBP相关的肾体积和组织学变化相关的损伤,并可作为AKI的非侵入性生物标志物。Wang等^[23]则对造影剂诱导大鼠进行ASL检测,并评估了中性粒细胞明胶酶相关脂质运载蛋白、血清胱抑素C、缺氧诱导因子-1等AKI及肾功能指标。结果显示RBP结果与相关指标相关性良好,ASL可用于无创和纵向检测造影剂相关AKI。在临床研究领域,Hellms等^[24]的研究纳入了24名健康志愿者,通过ASL与传统肾功能指标进行对比,发现ASL技术可准确发现服用单剂量双氯芬酸导致的RBP下降,为临床药物评估提供参考。

3.3 慢性肾功能不全 慢性肾脏病(chronic kidney disease, CKD)是一种进展缓慢的损伤性疾病,各类CKD均存在着不同程度的肾小球滤过率(glomerular filtration rate, GFR)下降,最终导致肾衰竭发生^[25]。GFR与RBP密切相关,因此如何检测RBP、评估肾脏缺血情况有助于早期评估肾功能的衰减程度,对CKD的防治具有重要意义。Pi等^[26]对45名经活检证实的CKD患者和17名健康志愿者进行ASL检查,获取肾皮质血流量,评估患者RBP、血清肌酐、eGFR和病理评分之间的相关性。研究发现轻度肾损伤组RBP评估敏感性高于中重度肾损伤组,表明ASL可用于肾脏病变的无创评估,特别是预测CKD患者的早期肾功能损伤。Mao等^[27]在肾血流评估的基础上进一步证明了ASL在肾功能评估领域的稳定

性,发现RBP检测值与尿蛋白定量呈负相关,而与GFR显著呈正相关。Xiong等^[28]的最新的荟萃分析纳入了近18项有关CKD的功能性磁共振研究,发现不同阶段的CKD患者和健康对照组的肾皮质、髓质RBP值差异很大,ASL可以补充提供有关肾功能的数据,并且可能更全面地了解患者的肾脏生理状态。

3.4 糖尿病肾病 糖尿病肾病(diabetic kidney disease, DKD)作为糖尿病引起的微血管并发症,占全球总慢性肾衰病因的第一位^[29]。早期DKD存在血流灌注异常增高的特点,由于DKD的诊断金标准为有创性肾活检,且其他临床生化指标在DKD评估中的精确性并不稳定,因此其早期诊断及有效干预依然存在问题^[30]。Brown等^[31]纳入30名DKD1-5期患者和13名健康人群接受了ASL血流测量。发现受试者RBP从健康组的 $480 \pm 136 \text{ mL/min/100g}$ 组织逐渐下降到3、4和5期DKD的 302 ± 95 、 229 ± 7 和 $152 \pm 32 \text{ mL/min/100g}$ 。值得注意的是,研究发现了仅含有轻度蛋白尿的早期DKD患者RBP为 $593 \pm 12 \text{ mL/min/100g}$,远高于健康组。相比于肾活检穿刺,ASL在DKD早期运用准确信良好,且更容易被患者接受。另一项前瞻性多参数磁共振研究发现^[32],几种功能性磁共振标志物均可良好区分GFR分期,并将DKD与健康肾脏区分开来,其中ASL技术检测的肾脏血流动力学与GFR相关性最佳,为DKD潜在的病理生理学进展判断及疾病干预提供有价值的帮助。

3.5 输尿管梗阻性肾病 泌尿道梗阻是造成CKD及慢性肾衰的主要因素,梗阻通过改变肾脏血流动力学、改变肾小球滤过和肾脏代谢以及诱发肾实质结构畸形(肾纤维化)极大地影响肾脏生理状态^[33]。其中单侧输尿管结扎模型是基础研究中最为常用的泌尿道梗阻模型^[34]。Hu等^[35]通过研究ASL评估大鼠可逆性输尿管梗阻后肾脏的继发性改变,发现输尿管梗阻5日内RBP随时间增加而降低,在梗阻释放后增加;病理组织学证实梗阻后肾脏出现肾小管肿胀,间质纤维含量增加,解除梗阻后肾小管肿胀缓解。证实ASL能有助于跟踪CKD的进展,并符合病理学表现。临床研究中,Lanzman等^[36]的研究对疑似输尿管梗阻的患者进行ASL加权检测及磁共振尿路造影,发现ASL可良好判断出现的泌尿道梗阻,在血流量及肾脏血管检测均具有良好前景。

3.6 肾血管疾病 肾血管狭窄或畸形也是原发或继发性CKD进展的另一诱因。Fenchel等^[37]收集6例无肾动脉疾病史的高血压患者和12例肾动脉狭窄(renal artery stenosis, RAS)患者接受了PASL-FAIR序列成像。在FAIR灌注图像上,重度RAS($>70\%$ 管腔狭窄)可以清楚地与中、轻度RAS($\leq 70\%$ 管腔狭窄)进行区别。因此ASL与灌注数据与狭窄等级之间存在显著相关性,适用于RAS患者肾脏的定量灌注成像。随后的研究中,Wytenbach等^[38]对比了3D-ASL与血管增强造影两种检测模式,虽然ASL存在部分高估了RAS的严重程度,依然在检测中具有高灵敏度、特异性、准确性,无需造影剂的特点。

3.7 移植肾 肾移植是终末期肾病患者临床治疗的根本方法。然而移植后的肾性反应(主要为排斥反应)和术后反应(肾周积液、梗阻、肾动脉狭窄等)所造成的肾灌注损伤,严重影响着肾移植的成功率^[39]。

ASL技术在肾移植开始前评估、移植后灌注判断上均具有良好价值。计算机断层扫描血管造影(computed tomography angiography, CTA)评估是潜在肾脏供体术前肾血管评估的既定方法。然而,CTA成像结果与大量辐射暴露和静脉造影剂给药有关。Patil等^[40]在一项前瞻性比较研究中,共有43名肾移植受试者接受了CTA与ASL,ASL技术共显示出64条单动脉、20条双动脉和2条三动脉,其血管细节呈现与准确性多于传统的CTA。因此在评估潜在肾脏供体时,较新的ASL技术可能是CTA的潜在替代方案。另一项Peng等^[41]的比较研究显示,临床肾移植功能中ASL的无创评估比血氧水平依赖(blood oxygen level dependent)磁共振技术更有前途的成像技术。该研究的尤登指数分析显示,ASL的诊断准确率为80.00%,优于BOLD的71.85%;ASL诊断同种异体移植肾功能障碍的敏感性和特异性分别为79.57%和80.95%,优于BOLD的77.42%和59.52%。在移植后肾脏评估领域内,Li等^[42]通过ASL测量发现异体移植皮质灌注显著降低,可

评估移植后出现的肾动脉灌注不足。与Li等研究不同的是, Jiang等^[43]研究了63例肾移植后长期肾移植生存患者, 其RBP和T1值随着eGFR的降低而降低, 其稳定性良好, ASL可作为肾移植后的灌注评估中。

4 小结与展望

如何准确并早期评估RBP的情况对肾脏病其治疗及预后具有重要意义。现有的常用检测技术在各类肾脏病评估中依然存在许多局限。ASL技术使用动脉血中氢质子作为显影剂, 在评估RBP水平上具有灵敏度高、操作简便、无创伤性、准确性和重复性好等优势。在临床实际应用范围不仅限于急慢性肾脏病, 还在肾血管疾病、肾肿瘤、移植肾、继发性肾病中扮演重要角色。相信伴随ASL技术的推广发展, 其能在更多肾脏病的预防、治疗、监测等专业领域, 提供重要的临床指导意义。

参考文献

- [1] Edwards A, Kurtcuoglu V. Renal blood flow and oxygenation[J]. *Pflugers Arch*, 2022; 474(8): 759-770.
- [2] Staruschenko A, Ma R, Palygin O, et al. Ion channels and channelopathies in glomeruli[J]. *Physiol Rev*, 2023, 103(1): 787-854.
- [3] Yang J, Yang S, Xu Y, et al. Evaluation of renal oxygenation and hemodynamics in patients with chronic kidney disease by blood oxygenation level-dependent magnetic resonance imaging and intrarenal Doppler ultrasonography[J]. *Nephron*, 2021, 145(6): 653-663.
- [4] Chuang KH, Meier M, Fernández-seara MA, et al. Renal blood flow using arterial spin labeling (ASL) MRI: experimental protocol and principles[J]. *Methods Mol Biol*, 2021, 2216: 443-453.
- [5] Reid M, Tadros GS, McDougall CC, et al. Arterial spin labelling reveals multi-regional cerebral hypoperfusion in patients with transient ischemic attack that are unrelated to ischemia location: a proof-of-concept study[J]. *Cereb Circ Cogn Behav*, 2023; 4: 100164.
- [6] Echeverria-chasco R, Vidorreta M, Aramendia-vidaurreta V, et al. Optimization of pseudo-continuous arterial spin labeling for renal perfusion imaging[J]. *Magn Reson Med*, 2021, 85(3): 1507-1521.
- [7] Panda A, Francois CJ, Bookwalter CA, et al. Non-contrast magnetic resonance angiography: techniques, principles, and applications[J]. *Magn Reson Imaging Clin N Am*, 2023, 31(3): 337-360.
- [8] Ahn HS, Jung Y, Park SH. Measuring glomerular blood transfer rate in kidney using diffusion-weighted arterial spin labeling[J]. *Magn Reson Med*, 2022, 88(6): 2408-2418.
- [9] 史素敏, 杜雷, 马国林. 动脉自旋标记技术在脑血管疾病的临床应用进展[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2020, 18(5): 149-152.
- [10] Chuang KH, Kober F, Ku MC. Quantitative analysis of renal perfusion by arterial spin labeling[J]. *Methods Mol Biol*, 2021, 2216: 655-666.
- [11] Ku MC, Fernández-seara MA, Kober F, et al. Noninvasive renal perfusion measurement using arterial spin labeling (ASL) MRI: basic concept[J]. *Methods Mol Biol*, 202, 2216: 229-239.
- [12] Tanaka F, Umino M, Maeda M, et al. Pseudocontinuous arterial spin labeling: clinical applications and usefulness in head and neck entities[J]. *Cancers*, 2022, 14(16): 3872.
- [13] Prevost VH, Girard OM, Callot V, et al. Fast imaging strategies for mouse kidney perfusion measurement with pseudocontinuous arterial spin labeling (pCASL) at ultra high magnetic field (11.75 tesla) [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2015, 42(4): 999-1008.
- [14] Lu F, Yang J, Yang S, et al. Use of Three-dimensional arterial spin labeling to evaluate renal perfusion in patients with chronic kidney disease[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2021, 54(4): 1152-1163.
- [15] Robson PM, Madhuranthakam AJ, Smith MP, et al. Volumetric arterial spin-labeled perfusion imaging of the kidneys with a three-dimensional fast spin echo acquisition[J]. *Acad Radiol*, 2016, 23(2): 144-154.
- [16] 王颖豪, 杨凌菲, 朱晨晨. 超声造影对不同病理类型肾脏实质性肿瘤的诊断价值[J]. *中国CT和MRI杂志*, 2024, 22(2): 121-124.
- [17] Ye J, Xu Q, Wang SA, et al. Differentiation between fat-poor angiomyolipoma and clear cell renal cell carcinoma: qualitative and quantitative analysis using arterial spin labeling MR imaging[J]. *Abdom Radiol*, 2020, 45(2): 512-519.
- [18] Zhang H, Wu Y, Xue W, et al. Arterial spin labelling MRI for detecting pseudocapsule defects and predicting renal capsule invasion in renal cell carcinoma[J]. *Clin Radiol*, 2017, 72(11): 936-943.
- [19] Tsai LL, Bhatt RS, Strob MF, et al. Arterial spin labeled perfusion MRI for the evaluation of response to tyrosine kinase inhibition therapy in metastatic renal cell carcinoma[J]. *Radiology*, 2021; 298(2): 332-340.
- [20] Hartevelde AA, Littooijs AS, Vannoessel MM, et al. Perfusion imaging of neuroblastoma and nephroblastoma in a paediatric population using pseudo-continuous arterial spin-labelling magnetic resonance imaging[J]. *MAGMA*, 2022, 35(2): 247.
- [21] Zhu Z, Hu J, Chen Z, et al. Transition of acute kidney injury to chronic kidney disease: role of metabolic reprogramming[J]. *Metabolism*, 2022, 131: 155194.
- [22] Hueper K, Gutberlet M, Rong S, et al. Acute kidney injury: arterial spin labeling to monitor renal perfusion impairment in mice-comparison with histopathologic results and renal function[J]. *Radiology*, 2014, 270(1): 117-124.
- [23] Wang B, Wang Y, Li L, et al. Diffusion kurtosis imaging and arterial spin labeling for the noninvasive evaluation of persistent post-contrast acute kidney injury[J]. *Magn Reson Imaging*, 2022, 87: 47-55.
- [24] Hellms S, Gueler F, Gutberlet M, et al. Single-dose diclofenac in healthy volunteers can cause decrease in renal perfusion measured by functional magnetic resonance imaging[J]. *J Pharm Pharmacol*, 2019, 71(8): 1262-1270.
- [25] Wang L, Xu X, Zhang M, et al. Prevalence of chronic kidney disease in China: results from the sixth China chronic disease and risk factor surveillance[J]. *JAMA internal medicine*, 2023, 183(4): 298-310.
- [26] Pi S, Li Y, Lin C, et al. Arterial spin labeling and diffusion-weighted MR imaging: quantitative assessment of renal pathological injury in chronic kidney disease[J]. *Abdom Radiol*, 2023, 48(3): 999-1010.
- [27] Mao W, Ding Y, Ding X, et al. Capability of arterial spin labeling and intravoxel incoherent motion diffusion-weighted imaging to detect early kidney injury in chronic kidney disease[J]. *Eur Radiol*, 2023, 33(5): 3286-3294.
- [28] Xiong LQ, Ma LL, Shi LY, et al. Functional magnetic resonance imaging for staging chronic kidney disease: a systematic review and meta-analysis[J]. *Int Urol Nephrol*. Published online April 17, 2024.
- [29] Rossing P, Camorini M L, Chan J CN, et al. Executive summary of the KDIGO 2022 clinical practice guideline for diabetes management in chronic kidney disease: an update based on rapidly emerging new evidence[J]. *Kidney Int*, 2022, 102(5): 990-999.
- [30] Zhang Z, Chen Y, Zhou X, et al. The value of functional magnetic resonance imaging in the evaluation of diabetic kidney disease: a systematic review and meta-analysis[J]. *Front Endocrinol*, 2023, 14: 1226830.
- [31] Brown RS, Sun M RM, Stillman IE, et al. The utility of magnetic resonance imaging for noninvasive evaluation of diabetic nephropathy[J]. *Nephrol Dial Transplant*, 2020, 35(6): 970-978.
- [32] Makvandi K, Hockings PD, Jensen G, et al. Multiparametric magnetic resonance imaging allows non-invasive functional and structural evaluation of diabetic kidney disease[J]. *Clin Kidney J*, 2022, 15(7): 1387-1402.
- [33] Nørregaard R, Mutsaers H, Frøkingær J, et al. Obstructive nephropathy and molecular pathophysiology of renal interstitial fibrosis[J]. *Physiol Rev*, 2023, 103(4): 2827-2872.
- [34] Wang Y, Deng X, Yang Z, et al. Global research trends in unilateral ureteral obstruction-induced renal fibrosis: A bibliometric and visualized study[J]. *Medicine*, 2023, 102(32): e34713.
- [35] 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*, 2019, 50(1): 288-296.
- [36] Lanzman RS, Wittsack HJ, Martirosian P, et al. Quantification of renal allograft perfusion using arterial spin labeling MRI: initial results[J]. *Eur Radiol*, 2010, 20(6): 1485-1491.
- [37] Fenchel M, Martirosian P, Langanke J, et al. Perfusion MR imaging with FAIR true FISP spin labeling in patients with and without renal artery stenosis: initial experience[J]. *Radiology*, 2006, 238(3): 1013-1021.
- [38] Wytenbach R, Braghetti A, Wyss M, et al. Renal artery assessment with nonenhanced steady-state free precession versus contrast-enhanced MR angiography[J]. *Radiology*, 2007, 245(1): 186-195.
- [39] Mamode N, Bestard O, Claas F, et al. European guideline for the management of kidney transplant patients with HLA antibodies: by the European Society for Organ Transplantation Working Group[J]. *Transpl Int*, 2022, 35: 10511.
- [40] Patil AD, Shailage K, Nadarajah J, et al. Comparison of computed tomographic angiography and noncontrast magnetic resonance angiography in preoperative evaluation of living renal donors[J]. *Indian J Urol*, 2017, 33(1): 30-35.
- [41] Peng J, Hong Y, Zhu F, et al. A clinical study of using ROC to compare the efficiency of ASL and BOLD in diagnosis of renal allograft function. *Transl Androl Urol*, 2023, 12(4): 612-621.
- [42] Li X, Wang W, Cheng D, et al. Perfusion and oxygenation in allografts with transplant renal artery stenosis: Evaluation with functional magnetic resonance imaging[J]. *Clin Transplant*, 2022, 36(11): e14806.
- [43] Jiang B, Li J, Wan J, et al. Arterial spin labeling combined with T1 mapping for assessment of kidney function and histopathology in patients with long-term renal transplant survival after kidney transplantation[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2024, 14(3): 2415-2425.

(收稿日期: 2024-06-27)

(校对编辑: 韩敏东)