·综述·

非对比剂增强 MR 血管成像技术用于肾动脉成像的研究进展

钟志明　蒋洁瑛*　潘慧　班统幸　刘然申

（广西中医药大学附属国际壮医医院放射科，南宁 530041）

【摘要】 肾血管性高血压疾病常见于中老年患者且处于持续上升阶段，肾动脉狭窄是其主要致病原因，若不尽早治疗易发生肾功能损伤，更有甚者会出现肾功能衰竭。及时评估肾动脉狭窄有助于肾血管性高血压的诊断及其预后评价。肾动脉影像检查方式有很多种，如超声、数字减影血管成像、CT血管造影、对比增强MR血管成像技术、非对比剂增强MR血管成像技术等。其中，非对比剂增强MR血管成像技术具有多参数多角度、无创无辐射、无对比剂伤害、高分辨率成像等优点。本文将着重对不同非对比剂增强MR血管成像技术评价肾动脉狭窄的研究进展进行综述。

【关键词】 非对比剂增强MR血管成像技术；肾动脉狭窄；平衡稳态自由进动序列；非对比剂非触发增强血管成像技术

【中图分类号】 TH77; R445.2　【文献标识码】 A　【DOI】 10.11876/mimt202502017

Advance of non contrast enhanced MR angiography in renal artery imaging

Zhong Zhiming, Jiang Jieying, Pan Hui, Ban Tongxing, Liu Ranshen

(Department of Radiology, International Zhuang Hospital Affiliated to Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning 530041, China)

【Abstract】 Renal vascular hypertension is in a continuous rising stage, which is common in middle-aged and elderly patients. Renal artery stenosis is the main cause of its disease. If it is not treated as soon as possible, it is prone to renal function injury, and even renal failure may occur. Timely assessment of renal artery stenosis is helpful for pre-treatment and prognosis evaluation of renovascular hypertension. There are many ways to evaluate renal artery imaging, such as ultrasound, digital subtraction angiography, CT angiography, contrast enhanced MR angiography, non contrast enhanced MR angiography, etc. Non contrast enhanced MR angiography has the advantages of multi parameter, multi angle, non-invasive, non radiation, no contrast injury, high-resolution imaging and so on. Compared with the commonly used methods of renal artery imaging evaluation, such as ultrasound and CT angiography, this article focuses on the research progress of different non contrast enhanced MR angiography techniques in the evaluation of renal artery stenosis.

【Key words】 Non contrast enhanced MR angiography techniques; Renal artery stenosis; Balance steady state free precession; Relaxation-enhanced angiography without contrast and triggering

肾动脉狭窄（Renal Artery Stenosis，RAS）容易发生在含有心血管疾病的中老年患者，其患者数量日益增多，据统计，动脉粥样硬化为其重要的病因[1]。而 RAS 是引发肾血管性高血压（Renal Vascular Hypertension，RVH）的最主要原因[2]，若不及时治疗，易诱发肾功能损伤，严重者甚至会发展为肾功能衰竭。因此，对 RAS 的早期评价，对于 RVH 的诊断和预后评估极为有利。目前，常用于显示肾动脉结构解剖的影像检查技术包括数字减影血管成像（Digital Subtraction Angiography，DSA）、超声（Ultrasound，US）、计算机断层血管造影（Computed Tomography Angiography，CTA）、对比增强磁共振血管成像（Contrast Enhanced Magnetic Resonance Angiography，CE MRA）等。DSA是评价肾动脉的金标准[3]，但其具有有创性，电离辐射量大，且易引发碘对比剂过敏反应。US 可无创、无辐射地评估肾

基金项目：广西中医药大学校级科研项目（2022QN030）；广西壮族自治区卫生健康委员会自筹经费科研课题（Z-A20220391）

第一作者：钟志明，男，硕士研究生，主管技师，磁共振成像新技术

通讯作者：蒋洁瑛，女，本科，主管技师，血管成像技术

动脉，然而其诊断易受到肠内积气、患者配合程度、操作医生主观性等多种因素的干扰[4]，视野范围也局限于血管近端，无法了解中远端及远端分支的情况[5]。CTA和CE MRA是微无创性评价肾动脉的常用有效手段，近年来有取代DSA的趋势[6]。但CTA存在电离辐射和碘对比剂伤害的风险，相较之下，CE MRA无疑是一种更优选择。CE MRA评估RAS不存在电离辐射，也无碘对比剂伤害，其评价准确度与CTA、DSA相近，因此不少研究表明CE MRA或许更应成为筛查RAS的首选方法[7,8]。

然而，有研究证实钆对比剂和肾源性系统性纤维化（Nephrogenic Systemic Fibrosis，NSF）的发生存在密切的相关性[9]，研究表明，注射钆对比剂者发生NSF的概率大约为未注射钆对比剂者的27倍[10]。此外，使用钆对比剂也许会发生颅脑、骨骼等组织的钆元素沉积[11,12]。同时，获取CE MRA的优质图像需要抓取恰当的动静脉期相，若患者无法良好配合屏气，或者技术员期相时机抓取不当，都可能导致血管成像质量差甚至成像失败[13]。因此，基于CE MRA的NSF和钆沉积等风险以及期相采集的严格性，非对比增强磁共振血管成像（Non-Contrast-Enhanced Magnetic Resonance Angiography，NCE MRA）或许是一个不错的选择，本文将重点对不同NCE MRA技术评价RAS的研究进展进行综述。

1 NCE MRA技术在肾动脉血管成像上的应用研究

时间飞跃法（Time of fly，TOF）MRA和相位对比法（Phase Contrast，PC）MRA是最初用于肾动脉血管评估的NCE MRA技术，但PC-MRA扫描时间非常长，而TOF-MRA对肾动脉血管显示较差，特别是对于存在湍流的血管如移植肾动脉。目前常用于肾动脉血管成像的NCE MRA技术主要包含多翻转脉冲空间标记技术（Spatial Labeling With Multiple Inversion Pulses，SLEEK）、平衡稳态自由进动序列（Balance Steady State Free Precession，B-SSFP）、非对比剂非触发增强血管成像技术（Relaxation-Enhanced Angiography Without Contrast And Triggering，REACT）以及动脉自旋标记技术（Arterial Spin Labeling，ASL）。B-SSFP用于肾脏动脉血管成像时，用脂肪抑制技术抑制脂肪信号，用选择性反转恢复（Inversion Recovery，IR）脉冲抑制肾动脉范围区域内静止液体信号，同时从下往上流动的肾静脉信号通过IR脉冲区域时被翻转导致信号被抑制，最终B-SSFP序列中只显示肾动脉信号。基于B-SSFP的NCE MRA技术，包括真稳态进动快速成像（True Fast Imaging with Steady-State Precession，True-FISP）、流入反转恢复序列（Inflow Inversion Recovery, IFIR）、平衡式快速场回波（Balance Turbo Field Echo，BTFE）。

1.1 SLEEK在肾动脉血管成像上的应用研究

汤浩等[14,15]以US检查结果与手术记录结果作为参照标准，评估了SLEEK技术在显示移植肾动静脉血管解剖方面和显示移植肾血管并发症方面的应用价值，研究发现SLEEK检查结果与手术记录结果吻合度较高，对于移植肾血管的显示以及移植肾血管并发症的显示均具有较高的应用价值，它是评估移植肾血管的可靠检查手段。廖云杰等[16]以CTA检查结果作为对照标准，探讨了SLEEK技术对肾动脉及其病变的显示效能，结果表明SLEEK技术可以良好地显示肾动脉且能有效评估RAS，相较于CTA可以更清晰地显示肾动脉分支，是一种能取代CTA成为筛查肾动脉病变的有效检查手段。SLEEK技术通过调整血液抑制反转时间（Blood Suppression Inversion Time，BSP TI），可良好地用于不同血管成像，但BSP TI参数需根据血流速度及个体差异调整，参数设置不当可能导致信号强度不足或背景抑制不充分，影响诊断准确性。

1.2 BTFE在肾动脉血管成像上的应用研究

Sebastià等[17]以DSA和CE MRA检查结果为对照，研究BTFE技术在肾动脉血管成像上的显示效能以及评估RAS的可行性，他们认为BTFE序列在肾动脉结构解剖上有着准确的显示且能有效评估RAS。袁颖等研究表明BTFE序列结合压缩感知（Compressed Sensing，CS）技术有助于改善呼吸不规律患者的肾动脉成像质量，且能在保证血管成像质量的同时大幅度缩短扫描时间，为临床提供高效可靠的肾动脉检查方案[18]。Pan等[19]以60例移植肾动脉患者为研究对象，对比DSA检查结果发现，BTFE序列评估移植肾动脉狭窄具有高灵敏度和高特异性，与DSA具有良好的一致性，是评价移植肾动脉狭窄的有效手段。BTFE通过平衡梯度设计，可显著提升组织对比度，能有效显示RAS，但值得注意的是，在血流复杂区域（如湍流或低流速血管），BTFE可能因信号丢失导致假阳性结果。

1.3 True-FISP在肾动脉血管成像上的应用研究

周雯等[20]以CE MRA影像结果作为参考标

准，评估True–FISP技术应用于肾动脉血管成像的临床价值，他们认为True–FISP技术可以清晰显示肾动脉及其变异血管的解剖结构，与CE MRA检查结果有着较好的一致性，在一定程度上可以替代CE MRA技术。赵龙等[21]运用True–Fisp技术与肾动脉US进行对比评估肾功能不全患者的肾动脉狭窄程度，比较结果显示True–Fisp技术在RAS诊断上是优于US的。颜美静等将老年2型糖尿病肾病（Type 2 Diabetic Kidney Disease, T2DKD）患者作为研究对象，以CE MRA检查结果作为对照标准，探讨T2DKD患者肾动脉受累情况，研究结果表明True–Fisp技术与CE MRA具有良好的一致性，可有效评价T2DKD肾动脉受累情况[22]。True–FISP序列通过稳态自由进动技术，显著提升图像信噪比和对比噪声比，能清晰显示肾动脉分支及周围解剖结构，并支持呼吸导航技术以减少运动伪影。但扫描时比较依赖患者呼吸配合，呼吸节律不规律时易失败或检查时间延长，且在低流速或湍流区域（如狭窄远端）可能出现信号丢失，导致假阳性结果。

1.4 IFIR在肾动脉血管成像上的应用研究

Lal H等[23]以400条肾动脉为大样本，使用IFIR技术与CE MRA进行对照研究，结果表明IFIR技术可有效替代CE MRA技术用于RAS的早期筛查，且能有效避免钆对比剂伤害。高玉萍[24]以疑似RAS患者作为研究对象，用CTA检查结果作为对照标准，探究IFIR技术评价RAS的应用价值，研究发现IFIR技术在检测RAS中有着较高的准确性，并与CTA检查结果有着高度的一致性，可用于无创性筛查RAS。王甜等[25]以肾功能不全且疑似RAS患者为研究对象，将DSA检查结果作为参照标准，对比评估IFIR技术与肾动脉US在不同程度RAS诊断上的应用价值，结果表明IFIR技术更有利于轻中度RAS的诊断，其特异度、准确性均高于US，是检测RAS的良好手段。孙理[26]、任晓璇等[27]以CE MRA作为对照标准，探讨IFIR技术在评估RAS方面的应用价值，他们发现IFIR技术可以全面地显示RAS情况，在肾动脉主干血管及狭窄情况的显示与CE MRA具有较好的一致性，且在显示肾动脉各级分支方面有着优于CE MRA的显示效能。张超越等[28]研究发现IFIR技术对于副肾动脉具有良好的显示效能，可用于副肾动脉血管解剖结构的显示，为临床肾脏相关手术或肾移植手术提供术前指导以避免相关严重并发症的发生。Elmokadem等[29]以CTA检查结果作为参照标准，探究IFIR技术评估肾移植潜在供体肾动脉血管解剖的应用价值，研究表明IFIR技术能有效评估潜在供体肾动脉解剖结构以及识别不同血管解剖变异，可作为肾动脉CTA的有效替代手段。段莉莉等[30,31]以DSA检查结果作为对照标准，探讨了IFIR技术联合肾动态显像对RAS的诊断价值，研究表明IFIR与肾动态显像技术都是筛查RAS的有效手段，两者联合应用相较于单一技术有着更高的诊断价值。但是，值得注意的是，B–SSFP序列成像往往需屏气或呼吸触发，血管成像质量易受呼吸状态影响。Ayako等[32]在屏气结合CS和呼吸触发两种不同方式下门静脉血管成像质量对比研究中发现，屏气不佳和自由呼吸不规律会严重影响腹部血管成像质量。董海洋等[33]指出，IFIR序列用于腹部血管成像时，背景信号抑制不够彻底且存在磁敏感伪影，整体成像质量以及对细小血管分支的显示已无法较好地满足影像诊断与临床应用。IFIR技术的肾动脉成像质量与CTA无显著差异，且优于CE–MRA，尤其在肾静脉伪影抑制方面表现更优。然而，IFIR技术对肾动脉远端或次级分支的显示能力弱于CTA，可能漏检微小病变，且因血流伪影或信号丢失，可能高估RAS程度，需结合其他影像学验证。

1.5 非对比剂非触发增强血管成像技术在在肾动脉血管成像上的应用研究

非对比剂非触发增强血管成像技术（Relaxation–Enhanced Angiography Without Contrast And Triggering，REACT）是一种能应用于全身多部位的动静脉血管成像新技术。有研究[34]通过与其他NCE–MRA技术如B–SSFP序列等对比分析发现，REACT技术可不受呼吸规律与屏气时长影响，实现大范围的均匀抑脂和良好的血–组织对比，得到高质量的血管图像，目前在颅内外及颈内动脉[35]、肺动脉[36]、肝门静脉[37]、髂静脉[38]、盆腔静脉系统[39]等均有着广泛应用。Gietze等[40]以CE MRA作为对照标准，探讨REACT在腹部动脉成像中的临床应用价值，重点比较其图像质量及血管狭窄评估能力，结果表明REACT仅需约5min的短扫描时间内，即可对腹部动脉（如肾动脉等）的显著性狭窄、解剖变异及相关血管异常征象展现出良好的诊断效能，其图像质量也与CE MRA具有高度的一致性。REACT利用血液与周围组织的固有弛豫差异成像，避免伪影干扰，可清晰显示肾动脉主干且不受

呼吸规律影响。但没有触发技术也带来了弊端，患者轻微移动或呼吸波动易导致图像模糊，需重复扫描进而延长扫描时间。同时，目前研究数据较少，标准化流程尚未建立，需进一步验证其诊断准确性。

1.6 动脉自旋标记技术在肾动脉血管成像上的应用研究

动脉自旋标记技术（Arterial Spin Labeling，ASL）是利用动脉血液中的水分子作为内源性、自由扩散示踪剂，可用于肾脏血流灌注成像的技术[41,42]。一项研究发现，ASL可准确测量DKD早期肾脏血管血流量，是无创性评估DKD病情进展的有效技术手段[43]。徐乐吟[44]以RAS患者为研究对象，采用ASL评估腔内治疗RAS的疗效及预后，结果发现ASL可有效评价腔内治疗RAS的疗效及其预后改善情况。彭晋[45]以169例肾移植患者作为研究对象，将组织病理学检查结果作为对照标准，探讨ASL评价同种异体移植肾功能和病理生理变化的准确率，研究表明ASL具有无创性、无辐射、无对比剂伤害等优点，是评估移植肾病理生理变化的有效检查方法。Andersson等[46]以28例潜在的活体肾脏捐赠者为研究对象，对照标准为CE MRA和DSA检查结果，探讨ASL联合静态间隔单次激发技术（Quiescent Interval Slice Selective，QISS）MRA在肾移植手术中的临床应用价值，研究结果发现ASL联合QISS-MRA有助于肾动脉供血异常的可视化和定量评估肾脏体积及相关的肾脏血管灌注情况，能有效避免钆对比剂相关不良反应及电离辐射风险且允许重复检查，是用于术前初始方案筛查的可靠手段。ASL通过标记动脉血质子直接测量肾血流量，为肾功能评估提供血流动力学信息，适合长期随访或肾功能动态监测。但单次信号采集时间短，图像分辨率不足，难以清晰显示肾动脉解剖细节，若增加采集次数则大幅度增加扫描时间，受检者耐受性差。此外，ASL对磁场均匀性及后处理算法要求严格，易受运动或磁场干扰影响。

2 总结与展望

RAS是RVH的主要致病原因，若治疗不及时，可能导致患者出现肾萎缩和肾功能衰竭，会严重影响居民的生活与健康。肾动脉结构解剖的准确显示和RAS的早期发现为RVH的诊断、治疗及预后均有着积极重要的意义。NCE-MRA技术可无创无辐射无对比剂伤害地获得直观、高分辨的肾动脉血管图像，且能有效评价RAS，有效避免对比剂肾毒性和NSF风险，为RVH疾病的防治工作提供了新的检测手段与思路。虽然，基于B-SSFP的NCE-MRA技术评价RAS存在一定的局限性，血管成像质量易受屏气时长或自由呼吸不规律的影响，但它为临床与患者提供了更加多元化的检查手段。虽然ASL技术可无创测量肾动脉血流灌注信息，但磁场均匀性及后处理算法要求严格，易受运动或磁场干扰。REACT序列作为新型血管成像技术可不受呼吸状态影响且能获取高质量的血管图像，目前已有少许研究将其应用于肾动脉血管成像，成像质量与诊断效能较好，但研究样本量较小，其成像效能可靠性仍需更多的前瞻性研究进行相应验证。为更好评估肾动脉，可将ASL技术与REACT序列相结合，保证优质图像同时增加血流灌注信息。总体来讲，目前对于如何运用NCE MRA技术来获取优质可靠的肾动脉图像尚缺乏统一的规范与指南，需进一步研究来优化与制定。

[参 考 文 献]

[1] Zhang J, Ma C, Hua Y, et al. Contradictory regulation of macrophages on atherosclerosis based on polarization,death and autophagy[J]. Life Sciences, 2021, 276(2):118957-118970.

[2] Simeoni M, Borrelli S, Garofalo C, et al. Atherosclerotic-nephropathy:an updated narrative review[J]. J Nephrol, 2021, 34(1):125-136.

[3] 邹子然,杨萍,樊韵玲,等.彩色多普勒超声联合超声造影对移植肾动脉狭窄的诊断价值[J].中国临床医学,2021,28(4):629-634.

[4] 徐钟慧,孙晓峰,张晓东,等.肾动脉狭窄的超声诊断专家共识[J].中华医学超声杂志(电子版),2021,18(6):543-553.

[5] van Twist DJ, Houben AJ, de Haan MW, et al. Pathophysiological differences between multifocal fibromuscular dysplasia and atherosclerotic renal artery stenosis[J]. J Hypertens, 2017, 35(4):845-852.

[6] Knobloch G, Lauff MT, Hanke M, et al. Non-contrast-enhanced MR-angiography (MRA) of lower extremity peripheral arterial disease at 3 tesla: Examination time and diagnostic performance of 2D quiescent-interval single-shot MRA vs. 3D fast spin-Echo MRA[J]. Magn Reson Imaging, 2021, 76(1):17-25.

[7] 刘婷,李楠.CT血管成像及重组技术在移植肾动脉狭窄中的应用[J].临床放射学杂志,2021,40(8):1588-1593.

[8] Nagpal P, Grist TM. MR Angiography: Contrast-Enhanced Acquisition Techniques[J]. Magn Reson Imaging Clin N Am, 2023, 31(3):493-501.

[9] Alabousi M, Davenport MS. Use of intravenous gadolinium-based contrast media in patients with kidney disease and the risk of nephrogenic systemic fibrosis: radiology in training[J]. Radiology, 2021, 300(2):279-284.

[10] Starekova J, Pirasteh A, Reeder SB. Update on gadolinium-based contrast agent safety, from the ajr special series on contrast media[J]. AJR Am J Roentgenol, 2024, 223(3): e2330036-e2330042.

[11] Wang Y, Fushimi Y, Nakajima S, et al. Quantitative assessment of gadolinium deposition in dentate nuclei with MR fingerprinting [J]. Acad Radiol, 2025, 32(1):391–399.

[12] Zhang X, Zhou B, Chen Y, et al. Evaluation of gadolinium deposition in cortical bone using three–dimensional ultrashort echo time quantitative susceptibility mapping: A preliminary study [J]. Nmr In Biomedicine, 2024, 37(1):e5035–e5051.

[13] Edelman RR, Koktzoglou I. Noncontrast MR angiography: An update. [J]. J Magn Reson Imaging, 2019, 49(2):355–373.

[14] 汤浩,胡晓萌,王秋霞,等.非对比剂增强磁共振血管成像技术在评估移植肾血管并发症方面的研究[J].放射学实践,2015,30(5):536–541.

[15] 汤浩,王秋霞,孟晓岩,等.评估移植肾动脉狭窄：非对比剂增强MRA与DSA对照研究[J].放射学实践,2022,37(10):1249–1254.

[16] 廖云杰,裴贻刚,李利丰,等.对照CTA评价SLEEK序列显示高血压患者肾动脉及其病变的能力[J].磁共振成像,2017,8(10):760–766.

[17] Sebastià C, Sotomayor AD, Paño B, et al. Accuracy of unenhanced magnetic resonance angiography for the assessment of renal artery stenosis [J]. Eur J Radiol Open, 2016, 4(3):1–7.

[18] 袁颖,任浩,韩昕君,等.压缩感知技术在非对比增强肾动脉MRA中的应用[J].中国中西医结合影像学杂志,2023,21(5):571–574.

[19] Pan L, Shen L, Fan M, et al. Assessment of transplant renal artery stenosis with non–contrast–enhanced magnetic resonance angiography: Comparison with digital subtraction angiography [J]. Acad Radiol, 2024, 31(6):2405–2411.

[20] 周雯,冯飞,戚玉龙,等.MR NATIVE TrueFISP序列肾动脉血管造影的临床应用[J].中国CT和MRI杂志,2013,11(3):24–26.

[21] 赵龙,李国奇,孟凡宇,等.非增强磁共振血管成像与超声检查对肾功能不全患者肾动脉狭窄程度诊断价值的对比研究[J].心肺血管病杂志,2021,40(3):265–269.

[22] 颜美静,李仕红,林光武.磁共振b–SSFP序列在老年2型糖尿病肾病肾动脉成像的应用价值[J].老年医学与保健,2023,29(2):200–205.

[23] Lal H, Singh RKR, Yadav P, et al. Non–contrast MR angiography versus contrast enhanced MR angiography for detection of renal artery stenosis: a comparative analysis in 400 renal arteries [J]. Abdom Radiol, 2020, 46(5):2064–2071.

[24] 高玉萍.IFIR–FIESTA序列非对比增强肾动脉磁共振血管成像应用价值研究[J].中国医学创新,2022,19(11):153–156.

[25] 王甜,任晓璇,公维兴,等.NCE–MRA与超声检查对比评估肾功能不全患者肾动脉狭窄程度的价值[J].影像技术,2024,36(4):49–53.

[26] 孙理,张燕,张陶,等.IFIR–FIESTA磁共振肾动脉成像60例分析[J].云南医药,2024,45(2):27–30.

[27] 任晓璇.比较肾动脉流入反转恢复MR血管成像和增强MR血管成像对肾动脉疾病的评估价值[J].中国医药指南,2024,22(14):28–31.

[28] 张超越,孟玉莲,张海萍,等.3.0T流入反转恢复非增强磁共振血管成像评估副肾动脉解剖特征的可行性[J].心肺血管病杂志,2023,42(6):614–617+620.

[29] Elmokadem AH, Ouda MA, Amer T, et al. Inter–observer and inter–modality concordance of non–contrast MR angiography and CT angiography for preoperative assessment of potential renal donors [J]. Egypt J Radiol Nucl Med, 2024, 55(1):135–145.

[30] 段莉莉,阮谢妹,武新宇,等.卡托普利肾动态显像联合非对比增强磁共振血管成像对肾血管性高血压的诊断价值[J].中华核医学与分子影像杂志,2020,40(2):88–92.

[31] 刘敏,张晨,田丹丹,等.非对比增强磁共振血管成像联合肾动态显像对动脉粥样硬化性肾动脉狭窄的诊断价值[J].郑州大学学报(医学版),2024,59(2):256–260.

[32] Ayako O, Shigeki A, Koji F, et al. Non–contrast–enhanced 3D MR portography within a breath–hold using compressed sensing acceleration: A prospective noninferiority study [J]. Magnetic Resonance Imaging, 2017, 43(3):42–47.

[33] 董海洋,孙炎冰,朱莉,等.时间–空间标记反转脉冲非增强肝门静脉TRANCE与bFFE成像对比研究[J].中国医学计算机成像杂志,2020,26(2):130–134.

[34] Yoneyama M, Zhang S, Hu HH, et al. Free–breathing non–contrast–enhanced flow–independent MR angiography using magnetization–prepared 3D non–balanced dual–echo Dixon method–A feasibility study at 3 Tesla [J]. Magnetic Resonance Imaging, 2019, 63(5):137–146.

[35] Pennig L, Kabbasc C, Ulrike H, et al. Relaxation–enhanced angiography without contrast and triggering (REACT) for fast imaging of extracranial arteries in acute ischemic stroke at 3 T [J]. Clin Neuroradiol, 2021, 31(3):815–826.

[36] Isaak A, Luetkens JA, Faron A, et al. Free–breathing non–contrast flow–independent cardiovascular magnetic resonance angiography using cardiac gated, magnetization–prepared 3D Dixon method: assessment of thoracic vasculature in congenital heart disease [J]. J Cardiovasc Magn R, 2021, 23(1): 91–103.

[37] 钟志明,潘慧,班统幸,等.新型非对比剂增强MR血管成像技术用于肝门静脉成像的可行性研究[J].影像科学与光化学,2024,42(1):16–22.

[38] 陶黎,朱嵬,张晓宇,等.NCE–MRA对髂静脉压迫综合征的诊断及腔内介入指导[J].中国医疗设备,2021,36(10):117–121.

[39] Terwolbeck MN, Zhang S, Bode M, et al. Relaxation–enhanced angiography without contrast and triggering (REACT) for pelvic MR venography in comparison to balanced gradient–echo and T 2–weighted spin–echo techniques [J]. Clin Imag, 2021, 75(6):149–155.

[40] Gietzen C, Janssen JP, Görtz L, et al. Non–contrast–enhanced MR–angiography of the abdominal arteries: intraindividual comparison between relaxation–enhanced angiography without contrast and triggering (REACT) and 4D contrast–enhanced MR–angiography [J]. Abdom Radiol, 2024, 24(4):4639–4650.

[41] Nery F, Buchanan CE, Harteveld AA, et al. Consensus–based technical recommendations for clinical translation of renal ASL MRI [J]. MAGMA, 2020, 33(1):141–161.

[42] 黄婧荷,宋焱,郭立新.糖尿病肾脏病的磁共振成像评估方法及进展[J].国际内分泌代谢杂志,2023,43(4):309–312.

[43] Mora–Gutiérrez JM, Fernández–Seara MA, Echeverria–Chasco R, et al. Perspectives on the role of magnetic resonance imaging (MRI) for noninvasive evaluation of diabetic kidney disease [J]. J Clin Med, 2021, 10(11):2461–2476.

[44] 徐乐吟.肠系膜上动脉夹层的治疗策略及肾脏组织灌注评估在肾动脉狭窄中的应用[D].北京:北京协和医学院,2021.

[45] 彭晋.多参数磁共振成像评价移植肾的临床研究[D].广州:南方医科大学,2022.

[46] Andersson J, Meik R, Pravdivtseva MS, et al. Non–contrast preoperative MRI for determining renal perfusion and visualizing renal arteries in potential living kidney donors at 1.5 Tesla [J]. Clin Kidney J, 2024, 17(6):101–110.