

超声技术在肾移植中的应用进展

Recent advances in ultrasound applications in kidney transplantation

陈跃进¹, 黄丽¹, 熊雯^{1,2△}

CHEN Yi-jin, HUANG Li, XIONG Wen

1. 电子科技大学医学院, 四川 成都 610072; 2. 四川省医学科学院·四川省人民医院(电子科技大学附属医院)超声科, 四川 成都 610072

【摘要】 超声技术(ultrasound, US)是肾移植围手术期评估的核心影像工具,尤其在同种移植中已形成标准化体系。近年发展的定量超声技术(如超声造影、剪切波弹性成像)显著提升了亚临床排斥反应的早期诊断能力。本文综述了 US 在移植肾功能评估、并发症诊断及长期存活预测方面的研究进展,异种移植的影像研究尚属探索阶段,但定量超声技术为未来监测提供了潜在方向。

【关键词】 肾移植;超声造影;弹性成像;定量超声;异种移植

【中图分类号】 R617;R445.1

【文献标志码】 B

【文章编号】 1672-6170(2026)03-0202-05

肾移植是目前改善终末期肾病患者生活质量的最佳选择,在我国已广泛开展,年手术量超过 1 万例^[1]。尽管肾移植手术技术已较成熟,术后仍存并发症风险,可能影响移植肾功能甚至导致衰竭。超声技术(ultrasound, US)因其无创、便捷及易于重复的优势,长期用于移植肾的形态与血流监测,有助于并发症早期识别与治疗指导。近年来,异种移植作为缓解器官短缺的探索方向,受到越来越多关注,实际应用需借鉴同种移植经验,以更好地应对解剖差异与免疫排斥等挑战。

1 US 在同种肾移植中的核心应用

1.1 B 型超声 B 超是评估移植肾形态的基础手段,用于定期监测移植肾大小、皮髓质厚度等指标,并通过个体前后对比观察其变化趋势,移植肾的异常肿大或萎缩是重要警示信号。超声可清晰显示移植肾结构异常,包括回声改变、皮髓质分界模糊、锥体轮廓不清,识别囊肿、钙化、瘢痕等局灶病变,并评估肾盂肾盏扩张及肾周积液。

1.2 多普勒超声

1.2.1 彩色多普勒(color doppler flow imaging, CDFI)与能量多普勒(power doppler, PD) CDFI 与 PD 可实时评估移植肾血流灌注,辅助检测血管血栓、狭窄及动静脉瘘,为术后血管并发症提供动态检测。血管化百分比(percentage of vascularization, POV) $<30\% \sim 50\%$ 提示灌注密度下降,常见于排斥反应或纤维化;外周血管距离(peripheral vessel distance, PVD) >0.25 cm 提示远端血流灌注稀疏,多与机械压迫及钙调磷酸酶抑制剂毒性相关^[2]。CDFI 显示血流方向与速度快慢,PD 以彩色显示多普勒

信号的强度,对低速血流检测更为敏感,可识别 CDFI 无法检测到的血流,常用于评估梗塞相关的无灌注区域。

1.2.2 脉冲多普勒(pulse wave doppler, PW) PW 能定量评估移植肾内血流速度和血管阻力。阻力指数(resistive index, RI) >0.8 提示阻力增高,常见于排斥反应,但 RI 受供体血管弹性及受体血管状态影响,不能单独作为排斥反应标志,需结合其他指标及临床背景^[3]。

1.2.3 诊断移植肾血管并发症 肾动脉狭窄(transplant renal artery stenosis, TRAS)是最常见的血管并发症,常见于术后 3 个月至 2 年,多位于吻合口处^[4]。CDFI 可见狭窄节段局灶性彩色混叠, PW 呈低阻频谱,狭窄处主肾动脉收缩期峰值流速(peak systolic velocity, PSV) ≥ 2.5 m/s 以及主肾动脉与叶间动脉的 PSV 比值 ≥ 10 被认为是 TRAS 的常用诊断指标^[5],狭窄远端及肾弓状动脉内表现出"tardus-parvus"波形(上升延迟+波幅降低)也是一种提示性诊断^[6]。肾静脉血栓(transplant renal vein thrombosis, TRVT)是一种早期并发症,多发生于术后 1 周内^[7]。CDFI 显示静脉血流消失伴管径增粗, PW 可见肾动脉舒张期反向血流(持续时间 $>80\%$ 心动周期)及 RI >0.9 ^[8]。

1.3 超声造影(contrast-enhanced ultrasound, CEUS) CEUS 利用直径 2~6 μm 的微泡造影剂增强移植肾微循环信号,并结合时间-强度曲线(time-intensity curve, TIC)定量分析血流动力学,如造影剂出现时间(AT)、达峰时间(TTP)、峰值强度(PE)、曲线下面积(AUC)以及灌注指数(WiPI),用于动态评估移植肾血流和功能状态^[9]。

CEUS 对微血管灌注异常敏感,诊断术后血管并发症、排斥反应及占位性病变的效果优于传统多普勒,其估测的移植肾血流量与血清肌酐密切相

【基金项目】 四川省科技厅重点项目(编号:2021YFS0381);成都市科技局课题(编号:2024-YF05-01871-SN)

△通讯作者

关,在监测肾功能方面表现优异,功能良好的移植肾造影剂分布均匀,而功能障碍患者因血管阻力增高,表现为造影剂增强延迟或缺损,分布不均^[10]。此外,CEUS 无肾毒性、代谢快,安全性高^[11],对肥胖患者及移植肾位置较深者仍然适用,微泡技术还具备潜在的分子靶向诊疗价值。但 CEUS 操作高度依赖经验,定量参数缺乏统一标准,受剂量、注射方式、感兴趣区域(ROI)选择及设备设置影响大,TIC 结果变异性较高^[12]。微泡稳定性差、造影剂成本高等问题也限制了其推广应用。未来可借助人工智能(AI)辅助标准化操作,建立多中心数据库,提升诊断一致性。

1.4 弹性成像 影响移植肾长期存活的关键因素是慢性移植肾肾病(chronic allograft nephropathy, CAN),其主要病理特征为纤维化、炎症浸润及微血管损伤。传统 US 难以定量评估这些改变,而弹性成像技术通过量化组织的力学特性(弹性、黏性及频散特征)为无创评估提供了新维度^[13]。

1.4.1 剪切波弹性成像(shear wave elastography, SWE) SWE 通过测量剪切波传播速度定量评估组织硬度,常以杨氏模量(E 值)表示。研究表明,髓质 E 值与移植肾不良结局显著相关,且具有独立预测价值,髓质 E 值 >9.68 kPa 时,不良结局风险为低值组的 3.2 倍,而皮质 E 值无统计学意义,可能源于髓质血流更丰富,对血流动力学和免疫损伤更敏感,更能反映早期功能异常和纤维化进程^[14]。但 SWE 应用亦有局限性,E 值易受 BMI、移植肾深度和供体年龄等因素影响。研究显示,E 值与移植深度显著负相关,BMI ≥ 25 kg/m² 时测量变异性增高^[15],可通过重复测量取中位数、调整增益补偿、使用衰减校正算法等手段提高稳定性。供体年龄影响 E 值基线,年长供体因组织硬化致 E 值升高^[16],可根据年龄分层建立基线参考区间,也可通过比值处理进行归一化,减少年龄相关偏移。此外,高灌注状态下的非特异性组织张力增加可引起 E 值假性升高,建议联合黏弹性参数或 CEUS 以提高诊断特异性。

1.4.2 应变弹性成像(strain elastography, SE) SE 通过比较组织在不同外力下的形变程度以反映其弹性^[17]。但结果易受操作手法及探头压力波动影响,限制了临床推广。相比之下,新兴的声辐射力脉冲成像(acoustic radiation force impulse, ARFI)采用标准化机械激励生成剪切波,有效减少了人为误差。研究显示,ARFI 与 SWE 在组织弹性评估中具有良好一致性,相关系数可达 $r = 0.82$ ^[18]。

1.4.3 黏弹性成像(viscoelastic imaging) 黏弹性成像突破传统纯弹性模型,同时评估组织弹性

(E_{mean}, kPa)和黏性(V_{mean}, Pa·s)。其中,E_{mean}反映组织结构中胶原沉积所致硬度变化,V_{mean}则对炎性细胞浸润、基质重塑及微循环障碍等早期病理过程更敏感^[19]。

相较传统 SWE,黏弹性参数受测量深度和 BMI 影响较小,稳定性更高^[20]。此外,组织黏性随剪切波频率变化产生频散现象,通过剪切波频散斜率(如 D_{mean})能进一步量化黏性,增强对组织生物力学特征的识别。在肾移植慢性排斥反应中,研究发现 V_{mean} 和 D_{mean} 与白细胞计数、间质纤维化程度及肾功能(estimated glomerular filtration rate, eGFR)下降密切相关,E_{mean} >6.61 kPa, D_{mean} >7.51 (m·s·kHz)、V_{mean} >1.86 Pa·s 可能提示肾功能异常,联合应用可提高排斥反应诊断效率,并有助于区分炎症型与纤维化型病理亚型^[21]。但目前黏性指标界值多源于单中心小样本研究,缺乏统一标准,尚无系统研究区分抗体介导与 T 细胞介导排斥。操作标准亦待规范,可通过屏气固定呼吸减少干扰,ROI 选择应避免坏死、钙化等非代表性区域。

1.5 超微血管成像(superb microvascular imaging, SMI) SMI 是一种高灵敏彩色多普勒技术,利用高级滤波算法分离低速血流(<1 cm/s)与背景噪声,显著提升微血管显示效果^[22],相比传统多普勒,SMI 具有更高的灵敏度,并可量化血管指数(vascular index, VI),即 ROI 血流信号像素占比,为微循环定量评估提供依据。研究表明 VI 值在不同慢性肾病分期间差异显著,且与 eGFR 高度相关,可作为移植肾功能的无创评估指标^[23]。一项研究显示,稳态组 VI 约为 49.5,显著高于慢性排斥组的 33.8($P = 0.028$),同时组织弹性也存在显著差异,提示 SMI 联合弹性成像有助于识别血流减少伴纤维化^[24]。SMI 在预测慢性损伤方面不逊于传统多普勒,且在排除严重排斥时特异性更高,兼具微循环成像与功能监测能力,是移植肾早期评估的有力工具。

2 US 在同种移植排斥反应中的诊断价值

US 在排斥反应的早期识别、分型及鉴别中具有重要价值。二维灰阶 US 异常表现包括移植肾显著增大或萎缩、回声异常、皮髓质分界模糊、集合系统扩张及肾周积液等。但由于二维 US 特异性较低,不易确定具体病因,多需结合其他成像方法和必要时的穿刺活检。对比正常与排斥性病变移植肾的二维与彩色多普勒图像(见图 1),可见异常移植肾实质回声增强、皮髓质分界不清及血流灌注减少;进一步对异常移植肾行频谱分析显示主肾动脉及其分支的 RI 普遍升高(见图 2)。

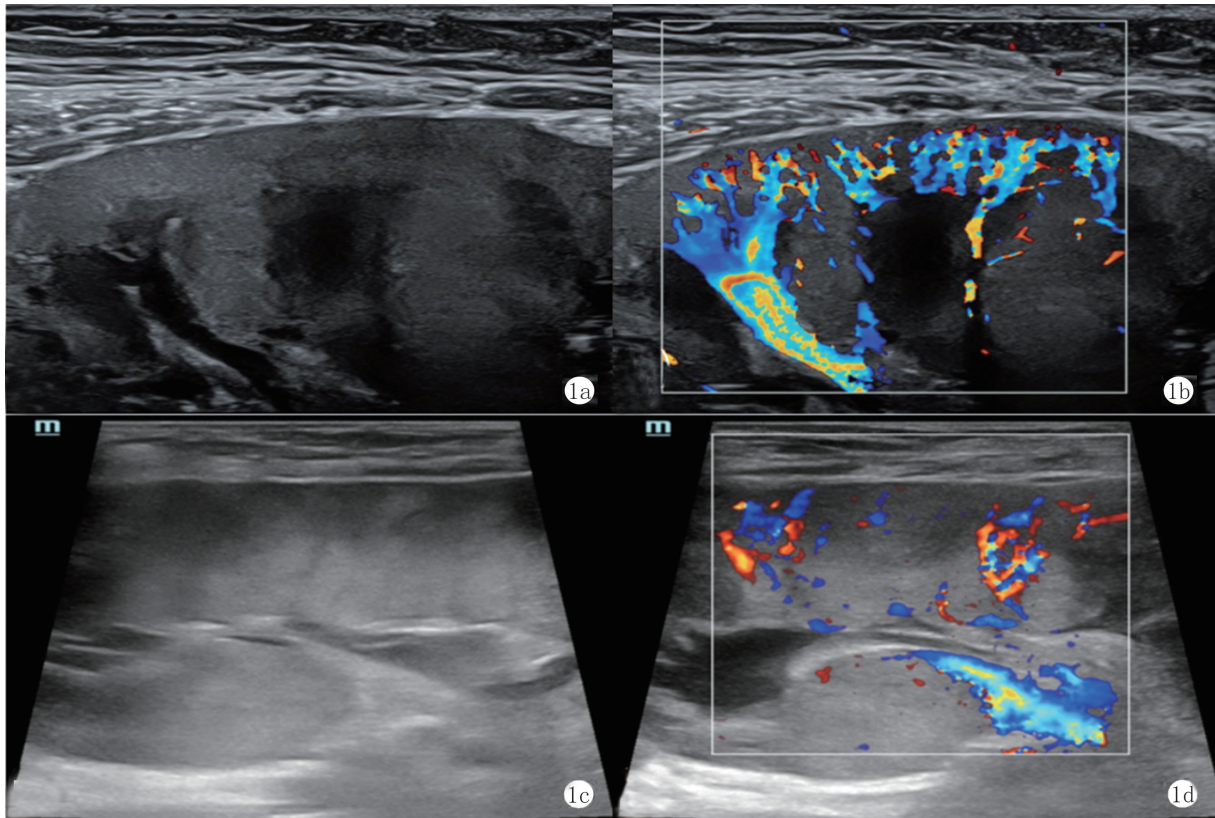


图1 移植肾实质二维及彩色血流图像 a、b:正常移植肾皮髓质分界清晰,血流灌注丰富,可达肾包膜;c、d:异常移植肾实质回声增强,皮髓质分界欠清,血流灌注减少

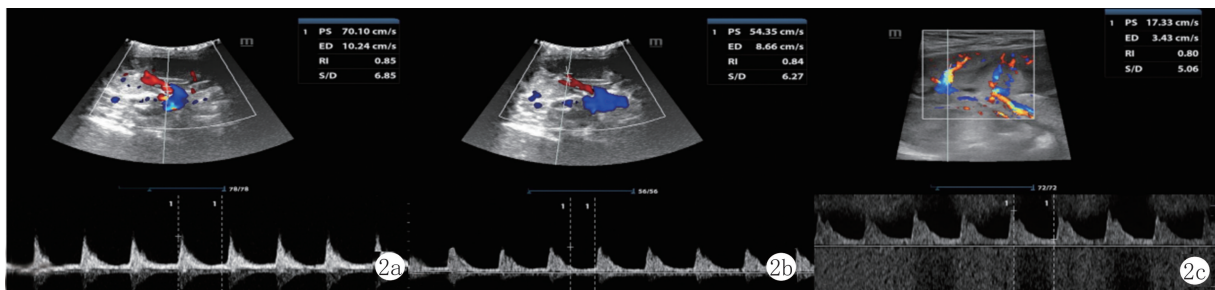


图2 异常移植肾主肾动脉及分支血流频谱图 a:主肾动脉;b:段动脉;c:叶间动脉

2.1 超急性排斥反应 超急性排斥反应多发生于术中或术后数分钟内,由受者预存抗体介导血管内皮细胞损伤,引发广泛微血栓形成,临床罕见且预后极差^[25]。病理上可见移植肾血管广泛血栓形成,组织斑驳变暗且严重坏死。US表现为移植肾迅速肿胀,内部结构模糊,皮质呈弥漫或斑片状低回声,肾周常见无回声积液,多普勒显示肾动脉及肾内动脉血流消失,整个移植肾无血流信号,可见典型的“雪崩效应”。因发作急骤,US检查常示全肾灌注缺如或灶性缺血表现,提示移植肾大面积梗死。

2.2 急性排斥反应(acute rejection, AR) AR多发生于术后1~12周,分为细胞免疫介导型和体液介导型,病理特征为间质水肿和血管炎。二维超声常见移植肾水肿增大、轮廓不光滑,肾皮质回声增强或呈局灶性低回声,肾锥体增大、回声减低,严重

者集合系统受压扁平,敏感性高但特异性低^[26]。多普勒表现为移植肾内血流不均、皮质灌注减少,小动脉血流减少或中断,动脉收缩期呈高尖波形、舒张期血流间断,静脉搏动增强呈“动脉样”改变,RI常增高但诊断意义有限。

2.3 慢性排斥反应(chronic rejection, CR) CR多发生于移植后数月或数年,以进行性肾功能下降、蛋白尿和间质纤维化为特征。结构上,移植肾逐渐萎缩、体积进行性缩小、形状不规则,肾皮质变薄、回声增强、皮髓质分界模糊,晚期无法分辨肾窦与实质结构。血流动力学上,常见肾动脉狭窄与微循环闭塞,RI常持续增高,多在0.8以上。研究提示 $RI \geq 0.8$ 与慢性移植肾功能不全和长期不良预后相关,但RI增高也可见于其他病因所致的肾功能损害,诊断时应综合评估。

2.4 鉴别诊断 急性肾小管坏死 (acute tubular necrosis, ATN) 临床表现与 AR 相似, ATN 多见肾肿大但皮质回声变化轻微, 血流正常或轻度减少, RI 通常不增高。研究表明 CEUS 有助于区分: AR 组灌注延迟, TIC 曲线峰值降低且分布不均, 而 ATN 组充盈较快, 整体灌注峰值降低但时序正常^[27]。弹性成像中, AR 因间质水肿硬度增高, 但需结合其他参数排除纤维化干扰。

CAN 与 CR 均表现为肾萎缩、皮质变薄等纤维化特征, 二维超声不易区分。CEUS 中, CR 表现为微血管显著灌注稀疏、TTP 延长、AUC 下降达 50%; 而 CAN 则以整体血流速率下降 (<1.2 cm/s) 为主, AUC 仅下降 20%~30%, 血清肌酐与 RI 多无明显异常^[28]。弹性成像中, CR 髓质硬度升高 (E 值 >9.68 kPa), 皮质 E 值波动较大; CAN 则呈皮质-髓质同步硬化 (皮质 E 值 >8.5 kPa, 髓质 E 值 >10.2 kPa), 与 eGFR 下降密切相关^[29]。此外, CR 还需要与高血压肾病、药物毒性等其他病因鉴别。

总体而言, US 在提示排斥反应方面较敏感, 但准确鉴别仍需结合临床、实验室及活检结果, 其中肾穿刺活检是区分抗体介导排斥、细胞介导排斥及非免疫性损伤的金标准^[30]。

3 异种肾移植影像学的挑战与方向

异种肾移植因供体来源丰富, 为缓解器官短缺提供了可行方案, 但临床应用仍面临多重挑战。解剖结构上, 猪肾血管壁薄、口径小, 尤其静脉迂曲纤细, 增加了术中吻合难度^[31], 术后肾血管在超声下显示效果欠佳, 需依赖高分辨率探头及微血流成像等技术以增强可视化。猪肾在形态、回声及周围结构上均异于人肾, 且常植入腹腔深部, 穿透路径增加, 信号衰减明显, 导致成像声窗受限, 检查时需灵活调整扫描角度、探头频率和动态调整扫描参数以优化图像质量, 未来可应用三维超声容积成像, 并借助深度学习算法校正深部成像误差, 改善成像效果。更重要的是, 异种移植免疫排斥更为剧烈, 尤其抗体介导的排斥易引发肾小球微血栓及补体沉积, 导致肾内血管阻力骤增^[32]。动物实验发现, 在猪-灵长类模型中, 急性排斥期常见移植肾体积迅速增大、实质回声增强、伴随肾动脉 RI 升高、皮质血流灌注受损及实质弹性下降^[33], 其 US 表现虽与同种移植相似, 但进展更迅速, 应及时识别与干预。

展望未来, 应发展多中心大样本研究, 收集不同物种供体的特异性 US 参数, 参考国际移植数据库标准进行规范化, 最终建立异种移植专用的 US 诊断标准, 同时可借助全球异种移植影像资料库训练 AI 模型, 通过迁移学习可将人类移植肾经验拓展

至异种模型, 提升智能算法的适应性与精准度。

4 未来展望

4.1 H-scan 成像量化纤维化 H-scan 是一种基于超声射频信号的定量分析算法, 通过解码组织微结构的声学散射特性, 将散射体尺寸转化为可视化色彩图谱, 能敏感反映组织中散射体尺寸变化, 间接量化基质沉积程度。在 61 例供肾研究中, H-scan 全肾纤维化评分与术后 eGFR 密切相关 ($r = -0.53$, $P < 0.0001$), 预测效果优于局部活检。AI 辅助 H-scan 算法进一步优化散射体分析, 能区分纤维化与急性水肿, 并已配合经皮探头实现全肾热力图生成。未来有望部分替代活检, 提升供肾筛选与预后评估能力^[34]。

4.2 多模态成像融合 整合不同 US 的优势可显著提升早期诊断效能。例如, CEUS 与 SWE 联合可同时评估微循环灌注与组织硬度。进一步融合其他影像手段有望突破单一模态局限, 如联合功能磁共振及核医学分子成像, 可增强对纤维化、炎症及微血流变化的多维可视化能力^[35]。

4.3 动态风险模型开发 AI 赋能可实现多模态数据的自动分析, 降低操作者依赖性。Kim 等^[36]整合 CEUS 参数、弹性指数、多普勒指标及血清标志物 (供体来源无细胞 DNA、血尿素氮), 开发了动态排斥风险评估模型, 能有效预测亚临床排斥反应。未来趋势是打造 AI 融合平台整合多维数据, 生成“移植肾风险评估”, 实现长期预后智能预测。

5 小结

US 技术在肾移植管理中具有不可替代的作用。随着成像技术及 AI 智能辅助分析的发展, 未来将推动移植肾的无创监测体系向“结构-功能-微循环”整合方向转型。US 在术后管理中不只是“发现异常”, 更应承担“预测风险”和“评估干预”的任务, 实现从被动监测向主动管理、个体化精准治疗的跨越。

【参考文献】

- [1] 黄洁夫. 中国器官移植发展报告[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2022: 164.
- [2] Stigler J, Tiefenthaler M. Value and limitations of sonography in kidney transplant recipients with special attention to the resistive index-an update[J]. *Frontiers in Nephrology*, 2022, 2: 997839.
- [3] Azzouz S, Chen A, Ekmekjian T, et al. The role of renal resistive index as a prognostic tool in kidney transplantation: a systematic review[J]. *Nephrology Dialysis Transplantation*, 2022, 37(8): 1552-1565.
- [4] Blain Y, Alessandrino F, Scortegagna E, et al. Transplant renal artery stenosis: utilization of machine learning to identify ancillary sonographic and doppler parameters to predict stenosis in patients with graft dysfunction[J]. *Abdominal Radiology*, 2023, 48(6):

- 2102-2110.
- [5] 邹子然, 杨萍, 杨橙, 等. 彩色多普勒超声在移植肾动脉狭窄中的临床应用[J]. 复旦学报(医学版), 2022, 49(4): 507-513, 521.
- [6] Granata A, Clementi S, Londrino F, et al. Renal transplant vascular complications: the role of Doppler ultrasound[J]. *Journal of Ultrasound*, 2015, 18(2): 101-107.
- [7] Ponticelli C, Moia M, Montagnino G. Renal allograft thrombosis[J]. *Nephrology Dialysis Transplantation*, 2009, 24(5): 1388-1393.
- [8] Franke D. The diagnostic value of Doppler ultrasonography after pediatric kidney transplantation[J]. *Pediatric Nephrology*, 2022, 37(7): 1511-1522.
- [9] 孙静, 王建红. 超声造影在肾脏疾病中的研究进展[J]. 临床泌尿外科杂志, 2025, 40(6): 570-575.
- [10] Kazmierski BJ, Sharbidre KG, Robbin ML, et al. Contrast-enhanced ultrasound for the evaluation of renal transplants[J]. *Journal of Ultrasound in Medicine*, 2020, 39(12): 2457-2468.
- [11] Jimenez C, Lopez MO, Gonzalez E, et al. Ultrasonography in kidney transplantation: values and new developments[J]. *Transplantation Reviews*, 2009, 23(4): 209-213.
- [12] Friedl S, Jung EM, Bergler T, et al. Factors influencing the time-intensity curve analysis of contrast-enhanced ultrasound in kidney transplanted patients: Toward a standardized contrast-enhanced ultrasound examination[J]. *Frontiers in Medicine*, 2022, 9: 928567.
- [13] 戴俊臣, 陈琴, 周果, 等. 应用超声弹性成像技术评价移植肾硬度的研究进展[J]. 实用医院临床杂志, 2015, 12(3): 153-156.
- [14] Zhang Ty, Yan J, Wu J, et al. Shear wave elastography parameters adds prognostic value to adverse outcome in kidney transplantation recipients[J]. *Renal Failure*, 2023, 45(1): 2235015.
- [15] Early HM, Cheang EC, Aguilera JM, et al. Utility of shear wave elastography for assessing allograft fibrosis in renal transplant recipients: a pilot study[J]. *Journal of Ultrasound in Medicine*, 2018, 37(6): 1455-1465.
- [16] Elbadri A, Traynor C, Veitch JT, et al. Factors affecting eGFR 5-year post-deceased donor renal transplant: analysis and predictive model[J]. *Renal Failure*, 2015, 37(3): 417-423.
- [17] Sigrist RMS, Liau J, Kaffas AE, et al. Ultrasound elastography: review of techniques and clinical applications[J]. *Theranostics*, 2017, 7(5): 1303-1329.
- [18] Kim BJ, Kim CK, Park JJ. Non-invasive evaluation of stable renal allograft function using point shear-wave elastography[J]. *The British Journal of Radiology*, 2018, 91(1081): 20170372.
- [19] Chen X, Li X, Turco S, et al. Ultrasound viscoelastography by acoustic radiation force: a state of the art review[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2024, 71(5): 536-557.
- [20] Li J, Yuan H, Gao Y. Influencing factors, reference range and repeatability of salivary gland ultrasound viscoelastic imaging in healthy adults[J]. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2024, 50(10): 1544-1550.
- [21] Yuan H, Huang Q, Wen J, et al. Ultrasound viscoelastic imaging in the noninvasive quantitative assessment of chronic kidney disease[J]. *Renal Failure*, 2024, 46(2): 2407882.
- [22] Cannella R, Pilato G, Mazzola M, et al. New microvascular ultrasound techniques: abdominal applications[J]. *La radiologia medica*, 2023, 128(9): 1023-1034.
- [23] Bae SH, Lee EJ, Hwang J, et al. Novel non-invasive and quantitative assessment of the renal function of transplanted kidneys using Doppler ultrasonography with the vascular index of superb microvascular imaging[J]. *Ultrasonography*, 2025, 44(2): 160-169.
- [24] Huang X, Nie F, Zhu J, et al. Application value of shear-wave elastography combined with monochrome superb microvascular imaging in renal allograft chronic rejection[J]. *Clinical Hemorheology and Microcirculation*, 2022, 82(4): 303-311.
- [25] Cooper JE. Evaluation and treatment of acute rejection in kidney allografts[J]. *Clinical Journal of the American Society of Nephrology*, 2020, 15(3): 430-438.
- [26] Frick MP, Feinberg SB, Sibley R, et al. Ultrasound in acute renal transplant rejection. [J]. *Radiology*, 1981, 138(3): 657-660.
- [27] Goyal A, Hemachandran N, Kumar A, et al. Evaluation of the graft kidney in the early postoperative period: performance of contrast-enhanced ultrasound and additional ultrasound parameters[J]. *Journal of Ultrasound in Medicine*, 2021, 40(9): 1771-1783.
- [28] Pittappilly M, Sharshir M, Paramesh A. Chronic allograft nephropathy—a narrative review of Its pathogenesis, diagnosis, and evolving management strategies[J]. *Biomedicines*, 2025, 13(4): 929.
- [29] Järvi L, Kull I, Riispere Z, et al. Ultrasound elastography correlations between anthropometrical parameters in kidney transplant recipients[J]. *Journal of Investigative Medicine*, 2019, 67(8): 1137-1141.
- [30] 郭晖. 由表象到实质——论移植肾活检病理学诊断在肾移植中的独特作用[J]. 实用医院临床杂志, 2015, 12(4): 7-12.
- [31] Firl DJ, Markmann JF. Measuring success in pig to non-human-primate renal xenotransplantation: Systematic review and comparative outcomes analysis of 1051 life-sustaining NHP renal allo- and xeno-transplants[J]. *American Journal of Transplantation*, 2022, 22(6): 1527-1536.
- [32] Adams AB, Lovasik BP, Faber DA, et al. Anti-C5 antibody tesidolumab reduces early antibody-mediated rejection and prolongs survival in renal xenotransplantation[J]. *Annals of Surgery*, 2021, 274(3): 473-480.
- [33] Qi R, Ma S, Han S, et al. Intensive surveillance of porcine-rhesus kidney xenotransplant using different ultrasound techniques[J]. *Xenotransplantation*, 2024, 31(4): e12873.
- [34] Hysi E, Baek J, Koven A, et al. A first-in-human study of quantitative ultrasound to assess transplant kidney fibrosis[J]. *Nature Medicine*, 2025, 31(3): 970-978.
- [35] 李琼, 任涛, 谢双双, 等. 功能磁共振成像对移植肾急性排斥反应诊断价值的初探[J]. 实用器官移植电子杂志, 2016, 4(4): 207-212.
- [36] Kim DG, Lee JY, Ahn JH, et al. Quantitative ultrasound for non-invasive evaluation of subclinical rejection in renal transplantation[J]. *European Radiology*, 2022, 33(4): 2367-2377.

(收稿日期:2025-07-30;修回日期:2025-09-12)

(本文编辑:彭羽)