

超声技术在糖尿病肾病诊断中的研究现状

陶 园^{1,2}, 张东竹^{1,2*}

¹重庆医科大学附属永川医院超声科, 重庆

²重庆医科大学全科医学院, 重庆

收稿日期: 2026年4月13日; 录用日期: 2026年5月7日; 发布日期: 2026年5月15日

摘 要

糖尿病肾病(Diabetic Kidney Disease, DKD)是糖尿病患者常见的微血管病变并发症之一,也是引起终末期肾脏疾病的主要原因,因此DKD的早期诊断和动态监测对延缓疾病进展至关重要。超声检查作为公认的一种简便、经济、无创的动态检测手段,在临床上被广泛应用。并且随着超声技术的不断发展和研究的深入,除了常规的二维超声及彩色多普勒超声,近年来,学者们发现三维超声、超声造影、超微血流成像及弹性成像技术等超声新技术在DKD中也有一定的临床应用价值。本文将简要概述近年来国内外应用超声技术诊断DKD的研究现状和进展情况,为后续DKD的研究提供参考依据。

关键词

糖尿病肾病, 超声技术, 超声造影, 弹性成像, 超微血流成像

Current Research Status of Ultrasound Technology in the Diagnosis of Diabetic Nephropathy

Yuan Tao^{1,2}, Dongzhu Zhang^{1,2*}

¹Department of Ultrasound, The Affiliated Yongchuan Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

²General Practice School of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: April 13, 2026; accepted: May 7, 2026; published: May 15, 2026

Abstract

Diabetic Kidney Disease (DKD) is one of the common microvascular complications in diabetic patients and a leading cause of end-stage renal disease. Therefore, early diagnosis and dynamic

*通讯作者。

文章引用: 陶园, 张东竹. 超声技术在糖尿病肾病诊断中的研究现状[J]. 临床医学进展, 2026, 16(5): 1233-1241.

DOI: 10.12677/acm.2026.1651923

monitoring of DKD are crucial for delaying disease progression. Ultrasound examination, recognized as a simple, economical, and non-invasive dynamic detection method, is widely used in clinical practice. With the continuous development and in-depth research of ultrasound technology, in addition to conventional two-dimensional ultrasound and color Doppler ultrasound, recent studies have found that new ultrasound techniques such as three-dimensional ultrasound, contrast-enhanced ultrasound, ultrafast Doppler imaging, and elastography also have certain clinical application value in DKD. This article will briefly review the current research status and progress of ultrasound technology in the diagnosis of DKD both domestically and internationally, providing a reference for future research on DKD.

Keywords

Diabetic Kidney Disease, Ultrasound Technology, Contrast-Enhanced Ultrasound, Elastography, Superb Microvascular Imaging

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

糖尿病肾病(Diabetic Kidney Disease, DKD)属于糖尿病的微血管病变之一,全球约 27%的 2 型糖尿病患者会并发肾脏损伤[1]。而拥有全球糖尿病患者最多的中国,患有 DKD 的人占到糖尿病患者的三分之一[2]。同时,DKD 也是终末期肾病(End-Stage Renal Disease, ESRD)的主要原因,全球约 30%~50%的 ESRD 是由 DKD 发展而来[3]-[5]。但 DKD 的起病隐匿、早期临床表现不典型,传统实验室筛查指标如尿微量白蛋白等存在一定滞后性,部分患者确诊时已进入不可逆的肾损伤阶段[6][7],而作为金标准的肾穿刺也因为其有创性在临床应用上有一定禁忌证。因此,寻找能够更早期、无创、准确评估肾脏结构及功能改变的检查方法具有重要临床意义。

超声作为一种无创、实时、便捷的影像检查技术,在肾脏疾病评估中发挥着不可替代的作用。近年来,超声技术经历了从灰阶二维形态学、多普勒血流评估,到超声造影、微循环显像及弹性成像组织硬度测定的快速发展,并且随着多模态超声和人工智能辅助诊断系统的引入,超声技术可以更好地为临床医生提供可靠的临床决策[8]-[11]。本文旨在整合传统超声技术与前沿进展,阐述超声技术在 DKD 诊断中的临床应用价值与研究进展。

2. 传统超声技术在 DKD 评估中的经典应用

2.1. 二维/灰阶超声

DKD 可以导致肾脏出现一系列病理生理变化及形态学改变,常表现为肾脏大小、形态、实质回声的改变,灰阶/二维超声技术则可以很好地观察到肾脏的这系列形态学改变。一项研究就根据 24 h 尿白蛋白排泄量(24 hUAE)将 DKD 患者根据肾损伤严重程度由轻到重依次分组,分别测量肾脏长径、皮质厚度及髓质厚度。经过统计学分析后发现,肾损伤较轻的 DKD 患者(24 hUAE < 30 mg)肾脏长径比其他肾损伤较严重的两个组及对照组有所增大,而进入临床肾病期后,肾实质开始萎缩,肾损伤最严重的实验组(24 hUAE > 300 mg)测得的肾脏长径、皮髓质厚度均比其他组减小[12]。并且,这不是个例,其他学者也得到过相似结论,有学者发现随着尿白蛋白排泄率升高,即肾脏损伤加重,肾脏长径会先相对变大,而

后长度和皮质厚度、髓质厚度会相对变小,大量蛋白尿患者以上肾脏参数会明显小于对照组。该学者还认为肾实质回声对评估肾纤维化程度具有一定价值,通过将各组患者肾脏实质改变进行分级,发现 DKD 患者肾实质回声随病程进展而逐渐增强、皮髓质逐渐分界不清[13]。由此可知,通过超声技术测量肾脏长度及皮质、髓质厚度,可为临床初步判断 DKD 所处阶段及肾脏受损程度提供依据。但仅用肾脏长度、厚度等直接反映肾脏整体形态略显片面,因此为了进一步更加全面地评估肾脏大小,也有学者利用超声技术测量相关肾脏大小参数并通过公式计算得到肾脏体积这一参数,进而发现单纯糖尿病组患者的肾脏体积(136.24 cm^3)明显小于 DKD 组(160.51 cm^3) [14]。

基于众多研究结论,我们不难发现,在 DKD 早期肾脏会因为高灌注、高滤过使体积增大,随着病程进展,当肾小球硬化、间质纤维化时会导致肾萎缩、肾脏体积逐步缩小、皮质变薄、实质回声增强[12][13][15]。而二维灰阶超声技术的优势在于不仅可以无创便捷地观测到这一系列形态学变化,还具有较好的重复性,能够实时动态监测肾脏形态变化,为临床医生判断肾脏病变严重程度及随访复查提供支持。

然而,单一运用二维灰阶超声技术存在一定局限,对实质回声的判断有一定主观性、无法全面反映血流动力学改变及组织硬度变化,且难以满足早期诊断需求,因为肾脏形态发生改变时往往肾脏功能已经出现较严重损伤。因此,在实际临床工作中提倡将此项技术与其他超声技术或检验检查结合使用、综合分析。

2.2. 彩色多普勒超声

DKD 作为糖尿病微血管病变之一,肾脏血供变化甚至可能早于尿蛋白出现,同时肾脏血流状态的改变对肾损伤的持续进展可能也起到推进作用[16]。因此能早期发现、评估肾脏血流动力学的改变,对早期诊断 DKD 至关重要。而彩色多普勒血流成像技术(Color Doppler Flow Imaging, CDFI)正好可以通过检测肾内动脉血流参数,比如收缩期峰值流速(PSV)、舒张末期流速(EDV)、阻力指数(RI)及搏动指数(PI)等,对 DKD 患者肾脏血流动力学情况进行半定量评估,从而为评价肾功能水平提供依据[15]。

DKD 早期由于出球小动脉收缩强于入球小动脉,所以表现为肾内动脉血流速度加快;随着病情进展,肾血管阻力会逐渐升高,则表现为 RI 和 PI 升高[14][17][18]。就如冯岩等[14]利用 CDFI 技术对比患有 DKD 的患者与单纯糖尿病患者的各级肾动脉血流参数,发现 DKD 患者各级肾动脉的 PSV 和 EDV 均显著低于单纯糖尿病患者,而阻力指数(RI)显著升高。受试者工作特征曲线分析证明,CDFI 联合检测肾脏各级动脉的血流参数,对诊断 DKD 具有较高的效能,随着病情的进展,各级肾动脉的 PSV、EDV 进一步下降,RI 会进一步升高。同时该研究还进一步认为叶间动脉(IRA)可能是 DKD 血流动力学异常的更加敏感的检测部位,但具体情况仍需学者们通过大量数据和研究进一步证实。国外的文献也表明,DKD 患者肾段动脉及叶间动脉的 RI 测值显著高于正常对照组[19]。在肾脏发生形态学变化之前,CDFI 即可通过血流动力学分析,早期识别肾损伤。一项来自中国的研究[17]就曾将研究对象分为 DKD 患者、单纯糖尿病患者以及健康对照组,在 3 组之间的肾脏体积还未出现显著改变时,早期 DKD 患者的肾动脉 PSV、EDV 已经开始下降而 RI 则升高。并且 RI 联合实验室指标肾小球滤过率(eGFR)可将受试者工作特征曲线下面积(AUC)提升至 0.86,CDFI 联合 eGFR 可以提高对 DKD 的诊断效能、更好地反映肾功能的好坏。在经过治疗后,再次对这些患者进行超声检查,发现肾动脉血流动力学参数得到改善,因此血流动力学变化可能早于肾脏形态学改变。所以,如果能够诊断早期 DKD、早期识别肾功能损伤,就能提示临床医生进行早期干预,有望逆转肾损伤。但该项研究为单中心研究,具有相关局限性,并且,研究中也并没有进一步明确能够通过治疗逆转的肾损伤的界限,因此结论的可信度存疑,后续还需要更进一步的研究和证实。但不可否认的是该研究为广大学者对改善 DKD 预后提供了新思路。

彩色多普勒能量图(Color Doppler Energy, CDE)是另一种多普勒技术,它可以比 CDFI 更加直观地显

示肾皮质血流灌注状态、对低速血流更加敏感。有学者对比了 CDFI 与 CDE 两种超声技术发现, 在同一组 DKD 患者中, 用两种方法分别显示肾内血流分布情况, CDFI 多表现为 IV 型(无明显血流), 而 CDE 多为 I~III 型(充满型 - 星点型血流), 这说明 CDE 对末梢血流、低速信号血流较 CDFI 敏感, 能更敏感地反映 DKD 早期肾皮质血流减少; 但又因为 CDE 的高敏感性, 会夸大血流信号, 所以 CDFI 对肾内近端血管血流速度显示较好[20]。将 CDE 与 CDFI 联合使用, 可以相互补充、更好地显示肾脏血流、了解肾脏损伤情况。

这些研究结论都表明, 彩色多普勒超声能够通过测量肾动脉血流参数, 对 DKD 的早期诊断、病情演变的动态监测以及为临床分期和治疗策略制定都能提供重要依据。然而, 多普勒超声也有一定的不足, 最重要的就是该技术存在角度依赖性以及无法具体定量微循环血流量。但是随着近年来超声新技术的发展, 多种超声技术联合使用在一定程度上可以弥补这些不足。

3. 超声新技术在 DKD 中的前沿进展

随着超声影像技术的不断发展, 三维超声、超声弹性成像、超微血流成像及超声造影等新技术为 DKD 的早期诊断和病情评估提供了新的视角。

3.1. 三维超声

三维超声成像是通过数字化波束形成技术, 采集一系列具有空间位置信息的连续二维图像, 再经过计算机技术叠加、重建最后形成立体的三维图像的一种超声新技术。它能够精准测量肾脏体积、克服了二维超声的取样误差, 比传统二维灰阶超声更好地反映肾脏形态大小, 并且对区分 DKD 与非糖尿病肾脏疾病(NDKD)有一定应用价值。Li 等人[21]、李楠等人[22]、马妍等人[23]均通过研究发现, 三维超声测量得到的 DKD 患者的肾脏体积显著高于 NDKD 患者, 并且, 他们各自联合相关检查指标、综合构建了诊断 DKD 的预测模型, 通过统计学分析后得到的 ROC 曲线下面积分别为 0.703、0.921、0.831, 证明基于三维超声技术构建的预测模型具有一定可靠性。三维超声技术除了能反映 DKD 患者的体积变化, 同时, 近年来一个来自国外的团队认为它甚至可以为肾脏血流灌注的定量评估提供新手段。该团队基于三维超声技术开发了 3D 超快多普勒成像(3D UFD)技术[24]。该技术可以在无需造影剂的前提下, 对肾脏的微血管进行三维成像, 能显示直径小至 167 μm 的血管, 同时融合了三维成像和微血流技术的优势。研究中通过该技术捕捉大鼠的整个肾脏血管网络, 再定量评估各个血流动力学和血管形态参数——包括血管体积占满率(VVO)、血流量比例(FMBV)、血管数密度(VND)和血管扭曲度(VT)。他们发现 DKD 组的 VVO、VND 等比对照组下降了约 23%, 而 VT 则增加了 9%, 这也能够很好的解释了肾脏损伤过程中的一系列组织病理学改变, 对基于血管树参数进行的肾脏灌注水平的多维定量评估具有潜在价值。

3.2. 超微血流成像

超微血流成像(Superb Microvascular Imaging, SMI), 亦称超声微血流成像(Micro Flow Imaging, MFI), 是一种新型超声血管成像技术, 也是在不使用造影剂的情况下, 可以灵敏地显示低速血流和微小血管(直径 $< 0.1 \text{ mm}$), 能够弥补传统彩色多普勒技术在检测微血管方面敏感性不足的缺点[25][26]。因为传统多普勒技术为了更好地显示血流信号, 通常会较大程度地抑制杂波, 但这也同时滤除了一些低速血流信号。而 SMI 通过其独特的杂波抑制算法, 采用自适应算法将真实的低速血流信号与组织运动伪像分离, 从而保留并且清晰显示微小血管内的血流信息, 在微血管损伤评估中展现出独特价值。因此众多学者对该项技术展开了各项研究, 现已被广泛用于研究各种乳腺、甲状腺、肾脏等肿瘤性病变的良恶性鉴别, 也有不少学者将这项技术用于研究 DKD 患者的肾脏微血流变化, 想要达到早期诊断疾病的目的。张栋杰等人

[27]就利用超声微血流成像技术测量 DKD 患者和单纯糖尿病患者的 MFI 值并联合血清炎症因子等实验室指标, 通过统计学方法分析肾脏 MFI 值与血清 IL-6 对 DKD 的早期诊断价值。他们发现 MFI 值、血清 IL-6 单独诊断 T2DM 患者发生 DKD 的 AUC 分别为 0.949、0.83, 而两者联合诊断的 AUC 为 0.970, 说明两者联合应用可以提升 DKD 的早期诊断率。

此外, SMI 在血流显示能力方面也比传统 CDFI 和 CDE 更有优势。一项肾移植后肾脏慢性损伤的研究中就对比了 SMI 与传统彩色多普勒对移植肾微血管方面的诊断效能[28]。通过测量肾包膜与最靠近肾包膜的血管之间的距离这一指标进行定量评估, 得到的结果如下: CDFI 模式下测得的血管与皮质距离为 2.44 ± 2.0 mm, CDE 模式为 1.34 ± 1.2 mm, 彩色 SMI(cSMI)模式为 0.99 ± 1.8 mm, 单色 SMI (mSMI)模式为 0.86 ± 1.8 mm。这表明 SMI 技术在对肾皮质微血管的显示要优于传统 CDFI 和 CDE。除了评估肾脏血流状态, SMI 模式下还可以早期评估肾功能不全和肾纤维化程度。对慢性肾功能不全分期为 2~5 期的患者进行 SMI 指数的测量, DKD 患者的 SMI 指数($49.9\% \pm 16.7\%$)显著低于健康对照组($72.2\% \pm 12.9\%$), 且 SMI 的相关数值与 eGFR 呈正相关, 与血清肌酐呈负相关[29]。因此, SMI 成像有可能评估不同分期 DKD 患者的肾损伤程度及其分级。

SMI 技术在轻度微血管损伤时, 也能很好地起到提示作用, 因为在肾功能尚无明显下降的早期阶段该技术也可能检出微循环的改变, 但对于相关研究还是不够充足, 未来可能需要更多更细致的研究来证明该技术识别出的血流变化与肾脏病理改变之间的相关程度。但近两年来的研究确实提示我们, SMI 在评估肾皮质血流状态、反映病理损伤程度、慢性肾病甚至肾移植术后的监测都具有一定的应用前景。同时, SMI 无需造影剂即可显示微血流的特点, 使其对造影剂禁忌的患者也具有独特优势。因此 SMI 作为一项超声新技术, 对 DKD 的早期肾损伤的动态监测有很大研究前景。

3.3. 超声造影

超声造影(contrast-enhanced ultrasound, CEUS)是通过静脉注射微泡造影剂后, 实时动态评估肾皮质微循环灌注的一种超声新技术, 该项技术在临床上已经广泛用于各种脏器肿瘤的定性评估, 同时 CEUS 的相关定量参数也可敏感反映 DKD 早期血流灌注异常[30][31]。Wang 等人[32]、杨维维等人[30]通过对比 CEUS 技术与肾穿刺活检对 DKD 的诊断效能, 想要发现超声技术与病理结果之间的关联程度。随着肾小球损伤严重程度的升高, CEUS 灌注体积相关参数下降, 而灌注时间相关参数延长, 峰值强度与肾小球全球硬化率呈负相关。证明了 CEUS 可能反映肾小球硬化程度、间质纤维化、小动脉玻璃样变等病理特征, 为 CEUS 作为一种“无创活检”的手段提供了一定依据。不足之处在于, 这些研究的样本量较小, 没有将肾脏损伤的具体程度与超声参数的相关性进行详细对比分析, 且肾脏三维图像的采集易受到呼吸运动、肥胖等干扰, 三维重建的成功率和图像质量难以保证。不过, 当下学者们对 CEUS 的研究都表明, 该项新技术对 DKD 的早期诊断、筛查有一定推进作用。并且近年来 CEUS 技术发展比较成熟, 经过规范化培训后, CEUS 定量参数的测量具有较好的可重复性, 能够为 DKD 临床决策提供可靠的依据[33]。当然值得注意的是, 极少数不适应超声造影操作的患者需要慎用该技术。

3.4. 超声弹性成像

超声弹性成像是通过多种方式对具有弹性的物体施加外力, 再检测物体所产生的形变, 进而反映组织硬度。根据施加外力的方式不同, 主要分为应变式弹性成像、剪切波弹性成像等[34][35]。剪波弹性成像(shear wave elastography, SWE)可以用于肾脏组织硬度、纤维化程度的监测, 因为它具有较好的重复性, 并且能够通过实时定量测量弹性模量更好的获得局部组织的硬度。然而, 将其应用于肾脏时需注意诸多混杂因素, 肾血流灌注的状态、呼吸运动导致的位置偏移、探头压力过大产生的假性硬度增加以及肾周

脂肪对剪切波信号的衰减等都可能影响测量的准确性。此外,不同 SWE 技术在肾脏应用中各有优劣:点剪切波弹性成像采用单焦点发射,采样区域较小,测量快速且受呼吸影响相对较小,但单次测量信息有限,难以全面评估不均质病变;二维剪切波弹性成像利用多焦点或多波束形成二维弹性图,可覆盖更大范围并观察硬度分布,但更易受呼吸运动和探头压力的干扰,在深部肾脏测量时信噪比下降明显[36]。因此,临床应用中需根据具体场景选择合适的技术,并严格控制操作因素,以获取可靠的肾脏硬度值。

在实际工作中,SWE 技术在 DKD 中多用于辅助诊断,常常需要将其与其他超声技术联合使用综合评估,也有研究将其与常用反映肾功能状态的实验室指标结合起来,以期达到对 DKD 更好的诊断。一项国内外首次用 SWE 测量不同分期 DKD 患者肾脏弹性的研究中,就探讨了 SWE 与不同分期 DKD 患者的肾小球硬化程度和肾间质纤维化程度的相关性。肾小球硬化程度 1 级至 4 级患者的肾皮质杨氏模量分别为 11.18 kPa、12.86 kPa、14.02 kPa、15.35 kPa,剪切波速度分别为 1.52 m/s、1.83 m/s、2.30 m/s、2.76 m/s,即随着肾小球硬化程度的加重,肾皮质、髓质的杨氏模量与剪切波速度均呈递增趋势。该研究通过类似的方法得到结论:随着肾间质纤维化程度的加重(从 1 级到 4 级),肾皮质、髓质的杨氏模量与剪切波速度同样呈显著递增趋势。即肾小球硬化、肾间质纤维化越严重,肾组织的硬度则越大、弹性越差、尿微量白蛋白/肌酐比值(ACR)越高,这与 DKD 疾病进展的病理生理特点相符[37]。该研究将经过活检证实的不同病理分级的 DKD 患者的肾脏进行 SWE 检测,弥补了传统超声技术不能提供生态学特性的不足,为临床医生无创了解肾脏纤维化、硬化程度,及时干预、逆转病情提供便捷手段。也证实 SWE 技术作为早期诊断 DKD、了解肾脏病理损伤程度的手段是可行的。也有研究[38]证实,DKD 患者的肾实质弹性模量值与胱抑素 C (CysC)呈正相关,SWE 可以联合 Cys C 定量评价 DKD 患者肾损害程度、动态监测疾病的进展。且各专家学者得到的结论都比较一致,都主张联合其他指标综合分析,认为 SWE 能够量化肾组织的弹性,且联合其他反映肾损伤的实验室指标更有助于 DKD 的早期诊断。

弹性成像作为一种超声新技术,可能通过与不同检测方法结合使用或发现不同测量数值之间的关联,对疾病(不限于 DKD)起到无创的早期诊断、病理严重程度分度等作用,因此,超声弹性成像还有很大的研究空间可供学者们去发现和探索。

3.5. 多模态超声联合评估

单一的超声技术各有其优势和局限,为了更全面、综合地评估病变,为临床决策提供更精确可靠的信息,近年来,学者们将目光聚焦在多模态超声联合临床资料、构建综合诊断模型上。有学者发现 DKD 患者的肾实质剪切波速度(SWV)与肾动脉血流动力学变化存在相关性,肾实质的 SWV 与主肾动脉和段动脉 RI 均呈负相关,与段动脉和叶间动脉 PSV,以及各级动脉的 EDV 呈正相关[39]。虽然该研究并未进一步探究超声弹性技术与 CDFI 技术联合使用对早期诊断 DKD 的效能如何,但却为诊断 DKD 提供了多模态超声联合的新思路和初步依据。王丹等人[40]就通过联合二维灰阶、彩色多普勒、三维容积成像、剪切波弹性成像等全面获取肾相关超声参数,再选取有意义的参数构建多模态超声预测模型,经过验证,该模型对预测 DKD 准确率可达 95.0%。由此可知,多模态超声模型在 DKD 上有一定价值,并且有很大的研究空间,它可以将比较有主观性、需要依赖超声医生经验的超声诊断,转变为更客观的数学模型,提供比单一超声技术及指标更稳定、更全面、更综合、更精准的临床决策信息。

4. 小结与展望

综上所述,超声技术可以为早期、无创、准确地诊断及评估 DKD 肾损伤严重程度提供一定临床决策依据。以 SMI 和 CEUS 为代表的微循环灌注成像、SWE 对肾组织硬度的测定以及基于超声技术诊断预测 DKD 的多模态模型等,在反映早期肾功能损伤方面显示出了优于传统指标(如尿微量白蛋白)的敏感性,

为早期发现 DKD 患者肾组织出现异常变化提供了新的影像学诊断依据, 初步回应了“更早期、无创”诊断的 DKD 临床需求[41]。然而, 这些新技术目前尚不能替代肾穿刺活检这一金标准, 高血流灌注、呼吸运动影响、肾周脂肪衰减、探头压力干扰等均会对超声参数的测量及图像质量造成影响; 基于多中心大样本的研究不足, 缺乏对各人群正常参考值及 DKD 分期阈值的权威研究; 超声技术相关参数与肾组织病理学改变(如肾小球硬化、间质纤维化、肾小管损伤)之间的对照验证研究仍有待加强, 多中心前瞻性研究稀缺, 各超声技术在不同 DKD 分期中的诊断效能尚未明确; 基层医院超声新设备与人才技术瓶颈等均限制了技术的临床转化[9] [42]。超声技术对精准可靠地诊断 DKD 以及对肾损伤程度的评估还有待更多学者去探索、证实。

未来, 需要开展多中心、大样本、前瞻性的研究, 制定标准化肾脏超声操作规范(如控制呼吸时相、探头压力、测量深度), 建立不同年龄、性别、BMI 人群的超声参数正常参考值及 DKD 分期阈值; 同步加强超声参数与肾穿刺病理的逐层对照研究, 明确各技术在不同病理改变(如肾小球硬化程度、间质纤维化程度)中的诊断效能; 开发基于多模态超声影像组学的预测模型, 不局限于传统生物标志物与单一超声参数的简单联合, 而是融合 SMI 微循环参数、SWE 硬度值、二维灰阶超声特征等构建多模态影像组学模型, 结合机器学习算法(如随机森林、XGBoost), 识别 DKD 快速进展的高危人群, 并通过前瞻性队列研究验证其预测效能; 研发智能化的超声采集与分析系统, 开发基于深度学习的一站式超声系统, 可自动识别肾脏区域、实时监测并校正呼吸运动与探头压力引起的伪差, 输出标准化的弹性模量值和灌注参数; 构建 DKD 早期风险预测模型, 并通过多中心临床场景中验证其自动化、标准化诊断能力。通过上述方向的研究, 超声技术有望从“辅助评估”走向“精准诊断”, 真正实现 DKD 的早期、无创、准确识别与个体化管理。

基金项目

重庆医科大学附属永川医院 2025 年度院内科研课题资助项目(项目编号: YJJL2025069)。

参考文献

- [1] Fenta, E.T., Eshetu, H.B., Kebede, N., Bogale, E.K., Zewdie, A., Kassie, T.D., *et al.* (2023) Prevalence and Predictors of Chronic Kidney Disease among Type 2 Diabetic Patients Worldwide, Systematic Review and Meta-Analysis. *Diabetology & Metabolic Syndrome*, **15**, Article No. 245. <https://doi.org/10.1186/s13098-023-01202-x>
- [2] Jia, W., Yu, R., Wang, L., *et al.* (2025) Prevalence of Chronic Kidney Disease among Chinese Adults with Diabetes: A Nationwide Population-Based Cross-Sectional Study. *The Lancet Regional Health—Western Pacific Journal*, **55**, Article 101463.
- [3] Alicic, R. and Nicholas, S.B. (2022) Diabetic Kidney Disease Back in Focus: Management Field Guide for Health Care Professionals in the 21st Century. *Mayo Clinic Proceedings*, **97**, 1904-1919. <https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2022.05.003>
- [4] 中华医学会糖尿病学分会微血管并发症学组. 中国糖尿病肾脏疾病防治临床指南[J]. 中华糖尿病杂志, 2019, 11(1): 15-28.
- [5] Ruiz-Ortega, M., Rodrigues-Diez, R.R., Lavoz, C. and Rayego-Mateos, S. (2020) Special Issue “Diabetic Nephropathy: Diagnosis, Prevention and Treatment”. *Journal of Clinical Medicine*, **9**, Article 813. <https://doi.org/10.3390/jcm9030813>
- [6] 刘莉莉, 陈飞, 谢希. 糖尿病肾病诊断及治疗研究进展[J]. 医学综述, 2020, 26(6): 1188-1192.
- [7] 熊英俊, 杨志勇. 尿蛋白和尿微量白蛋白在糖尿病肾病检验中的应用探讨[J]. 基层医学论坛, 2019, 23(28): 4105-4106.
- [8] 郭娟, 杨志芳, 吉日. 超声在糖尿病肾病诊断中的应用进展[J]. 诊断学理论与实践, 2025, 24(3): 342-348.
- [9] 陈秀, 王诗佳, 徐茂晟, 等. 超声新技术在糖尿病肾病研究中的应用进展[J]. 中国现代医生, 2021, 59(25): 189-192.
- [10] 邝楠珍, 易菁琳, 侯佳慧, 等. 超声造影技术在糖尿病慢性并发症诊疗中的应用[J]. 临床与病理杂志, 2023, 43(1):

189-197.

- [11] 王丹丹, 杨斌. 超声造影定量分析在不同类型慢性肾病诊断中的应用[J]. 医学研究生学报, 2022, 35(4): 443-448.
- [12] 刘晓华. 肾脏超声检查在不同时期糖尿病肾病患者诊治中的价值[J]. 糖尿病新世界, 2021, 24(4): 37-39+75.
- [13] 魏秋菊, 李红, 杜菲, 等. 肾脏超声检查在不同时期糖尿病肾病患者诊治中的价值[J]. 中国老年学杂志, 2017, 37(2): 350-352.
- [14] 冯岩, 王静, 金潇雅, 等. 彩色多普勒超声检测肾动脉血流参数在早期糖尿病肾病的诊断和病情评估中的应用价值[J]. 海南医学, 2025, 36(2): 238-242.
- [15] 中华医学会内分泌学分会. 中国人糖尿病肾脏疾病临床诊断的专家共识[J]. 中华内分泌代谢杂志, 2015, 31(5): 379-385.
- [16] 张慧杰, 丁戌坤, 赵大鹏, 等. 温针灸联合滋肾降糖方对糖尿病肾病患者 NO、eNOS 及肾动脉血流动力学的影响[J]. 中医药信息, 2022, 39(12): 50-55+61.
- [17] 袁方, 何金朋, 高天奇, 等. 彩色多普勒超声监测肾血流动力学相关参数在早期糖尿病肾病诊断的临床价值[J]. 医学影像学杂志, 2023, 33(9): 1699-1702.
- [18] Noor, R., Taher, M.A., Rahman, M.T., et al. (2024) Duplex Color Doppler Evaluation of Intrarenal Resistive Index in Type 2 Diabetic Patients Having Diabetic Nephropathy. *Mymensingh Medical Journal*, **33**, 1115-1120.
- [19] Ke, L., Guo, Y. and Geng, X. (2022) Value of Color Doppler Ultrasonography for Diagnosing Early Diabetic Nephropathy. *Iranian Journal of Kidney Diseases*, **16**, 284-291.
- [20] 姜丹凤, 刘锋. 联合应用彩色多普勒血流显像与彩色多普勒能量显像在糖尿病肾病诊断中的意义[J]. 中国老年学杂志, 2012, 32(11): 2275-2276.
- [21] Li, N., Wang, Y., Tian, X., Lin, L., Liang, S., Li, Q., et al. (2020) Potential Value of Three-Dimensional Ultrasonography in Diagnosis of Diabetic Nephropathy in Chinese Diabetic Population with Kidney Injury. *BMC Nephrology*, **21**, Article No. 243. <https://doi.org/10.1186/s12882-020-01902-w>
- [22] 李楠, 唐杰, 王一茹, 等. 基于三维超声构建糖尿病肾病诊断预测模型的初步研究[J]. 中华医学超声杂志(电子版), 2019, 16(9): 702-708.
- [23] 马妍, 欧长笛, 王晶晶, 等. 肾脏三维超声与糖尿病肾病肾组织病理改变的关联[J]. 肾脏病与透析肾移植杂志, 2021, 30(6): 514-519.
- [24] Oh, D., Lee, D., Heo, J., Kweon, J., Yong, U., Jang, J., et al. (2023) Contrast Agent-Free 3D Renal Ultrafast Doppler Imaging Reveals Vascular Dysfunction in Acute and Diabetic Kidney Diseases. *Advanced Science*, **10**, e2303966. <https://doi.org/10.1002/advs.202303966>
- [25] Ong, E.M.W. (2023) Translating New Breast Ultrasound Techniques into Clinical Practice: Evaluating Their Intended Uses and Describing Other Unexpected Uses for Them. *Translational Breast Cancer Research*, **4**, Article 23. <https://doi.org/10.21037/tbcr-23-29>
- [26] Artul, S., Nseir, W., Armaly, Z. and Soudack, M. (2017) Superb Microvascular Imaging: Added Value and Novel Applications. *Journal of Clinical Imaging Science*, **7**, Article 45. https://doi.org/10.4103/jcis.jcis_79_17
- [27] 张栋杰, 郑曙光, 张行健, 等. 超声微血流成像联合血清炎症因子对糖尿病肾病的诊断价值[J]. 精准医学杂志, 2024, 39(4): 356-360.
- [28] Gürbüz, A.F., Keven, A., Elmalı, A., et al. (2023) A Comparison between the Superb Microvascular Imaging Technique and Conventional Doppler Ultrasound in Evaluating Chronic Allograft Damage in Renal Transplant Recipients. *Diagnostic and Interventional Radiology*, **29**, Article 212.
- [29] Armaly, Z., Abu-Rahme, M., Kinaneh, S., Hijazi, B., Habbasshi, N. and Artul, S. (2022) An Innovative Ultrasound Technique for Early Detection of Kidney Dysfunction: Superb Microvascular Imaging as a Reference Standard. *Journal of Clinical Medicine*, **11**, Article 925. <https://doi.org/10.3390/jcm11040925>
- [30] 杨维维, 王一茹, 赵萍, 等. 超声造影评估 2 型糖尿病肾病肾脏血流灌注的价值[J]. 中国医学影像学杂志, 2024, 32(3): 284-288.
- [31] 李莉, 林志艳, 张薇薇, 等. 超声造影定量分析技术在糖尿病肾病早期诊断中的应用价值分析[J]. 影像研究与医学应用, 2018, 2(2): 114-115.
- [32] Wang, Y., Zhao, P., Li, N., Dong, Z., Lin, L., Liu, J., et al. (2022) A Study on Correlation between Contrast-Enhanced Ultrasound Parameters and Pathological Features of Diabetic Nephropathy. *Ultrasound in Medicine & Biology*, **48**, 228-236. <https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2021.08.014>
- [33] Lin, L., Wang, Y., Yan, L., Li, N., Tian, X., Li, Q., et al. (2022) Interobserver Reproducibility of Contrast-Enhanced Ultrasound in Diabetic Nephropathy. *The British Journal of Radiology*, **95**, Article 202101189.

<https://doi.org/10.1259/bjr.20210189>

- [34] 刘浩, 梁波, 冯山丹, 等. 超声剪切波弹性成像定量评估慢性肾病的应用进展[J]. 医学影像学杂志, 2025, 35(4): 150-153.
- [35] 秦琴, 王丹丹, 等. 实时剪切波弹性成像技术在肾脏疾病中的应用进展[J]. 临床肾脏病杂志, 2020, 20(10): 846-849.
- [36] 杨家丽, 宋龄, 罗燕. 不同超声弹性成像技术的原理及检测健康成人肝脏硬度的影响因素[J]. 分子影像学杂志, 2024, 47(4): 433-437.
- [37] 何媛芳, 林威远, 李拾林, 等. 剪切波弹性成像与不同分期糖尿病肾病肾脏结构特征和功能的相关性[J]. 中国慢性病预防与控制, 2021, 29(1): 59-62.
- [38] 种静, 杨雪, 武斌, 等. 剪切波弹性成像定量评估糖尿病肾病患者肾损害程度[J]. 中华医学超声杂志(电子版), 2021, 18(4): 398-401.
- [39] 于梦霞, 戚庭月, 於晓平, 等. 糖尿病肾病肾实质剪切波速度与肾动脉血流参数的相关性分析[J]. 临床超声医学杂志, 2018, 20(3): 173-176.
- [40] 王丹, 王文平, 相三婷, 等. 多模态超声预测早期2型糖尿病肾病的临床价值[J]. 临床超声医学杂志, 2025, 27(3): 198-203.
- [41] 朱连华, 李秋洋, 罗渝昆. 靶向超声造影剂在肾疾病诊疗中的研究进展[J]. 中国医学影像学杂志, 2024, 32(8): 845-849.
- [42] 冯琳, 刘慧颖, 赵毅玲. 超声技术在糖尿病肾病中的应用现状[J]. 影像研究与医学应用, 2022, 6(23): 7-9.