❖综述

Research progresses of ultrasound and artificial intelligence for diagnosing and treating chronic kidney disease

FU *Jingzi*[1,2], YE *Jieyi*[2], HUANG *Weijun*[1,2*]

(1. *The First School of Clinical Medicine, Guangdong Medical University, Zhanjiang* 524000, *China*;
2. *Department of Medical Ultrasound, the First People's Hospital of Foshan, Foshan* 528000, *China*)

[**Abstract**]　As a major global public health issue, chronic kidney disease (CKD) brought a substantial disease burden. Percutaneous renal biopsy is the gold standard for pathological classification of CKD and evaluating the degree of kidney damage, which is also invasive with bleeding risk. In recent years, ultrasound and artificial intelligence (AI) provided new avenues for non-invasive diagnosis and treatment of CKD. The research progresses of ultrasound elastography, contrast-enhanced ultrasound and ultrasonic AI models in early identification and monitoring CKD, as well as pathological classification and efficacy evaluation were reviewed in this article.

[**Keywords**]　renal insufficiency, chronic; ultrasonography; artificial intelligence

DOI: 10.13929/j.issn.1003-3289.2025.12.032

超声及人工智能用于诊断和治疗慢性肾脏病研究进展

符靖孜[1,2]，叶洁仪[2]，黄伟俊[1,2*]

（1.广东医科大学第一临床医学院，广东 湛江　524000；2.佛山市第一人民医院超声诊疗中心，广东 佛山　528000）

[摘　要]　慢性肾脏病(CKD)为全球重大公共卫生问题，造成沉重疾病负担。肾穿刺活检是明确 CKD 病理分型及评估肾损伤程度的金标准，但有创，且存在出血风险。近年来，超声与人工智能(AI)技术相结合，为无创诊疗 CKD 提供了新的途径。本文就超声弹性成像、超声造影及超声 AI 模型用于早期识别及监测 CKD、预测其病理分型及评估疗效中的研究进展进行综述。

[关键词]　肾功能不全，慢性；超声检查；人工智能

[中图分类号]　R692；R445.1　[文献标识码]　A　[文章编号]　1003-3289(2025)12-2082-04

慢性肾脏病(chronic kidney disease, CKD)为全球重大公共卫生问题[1]。经皮肾穿刺活检是明确 CKD 病理分型及评估肾脏损伤程度的金标准，但有创，穿刺后出血发生率高于 30%、严重出血发生率 0.49%～4.30%[2]。近年来，超声与人工智能(artificial intelligence, AI)辅助诊断等新技术相结合，可识别常规超声难以发现的病变，为优化临床管理 CKD 提供了新的手段。本文就超声弹性成像、超声造影(contrast-enhanced ultrasound, CEUS)及超声 AI 模型用于早期识别及监测 CKD、预测其病理分型及评估疗效中的研究进展进行综述。

1　早期识别 CKD

1.1　超声弹性成像　CKD 早期即可出现肾纤维化，其主要特征为细胞外基质过度沉积而致组织硬度增加。剪切波弹性成像(shear wave elastography, SWE)通过测量剪切波传播速度而定量评估组织弹性模量，能直接反映组织硬度。SWE 定量分析[3]结果显示，随病情进展，CKD 患者肾皮质硬度呈增高趋势，且

[第一作者] 符靖孜(2001—)，女，广东中山人，在读硕士。研究方向：浅表与腹部超声诊断。E-mail：2321673252@qq.com

[通信作者] 黄伟俊，广东医科大学第一临床医学院，524000；佛山市第一人民医院超声诊疗中心，528000。E-mail：hwjun36@126.com

[收稿日期] 2025-05-06　　[修回日期] 2025-10-24

肾纤维化及肾皮质硬度均随 CKD 分期升高而加剧。唐小清等[4]指出,弹性模量最大值是识别早期 CKD 的独立因子,联合应用弹性模量参数与肾门血流参数可获得更优的早期诊断 CKD 模型。应变弹性成像(strain elastography, SE)通过分析组织受压形变在空间分布中的差异而实现可视化组织硬度,为早期诊断 CKD 提供了更加直观的手段。ZHANG 等[5]通过定量分析 SE 图像,发现早期 CKD 患者组织形变的均值较健康志愿者显著降低、而高硬度区域面积显著增加,证实弹性成像可无创识别早期 CKD。总体而言,超声弹性成像虽具有早期筛查 CKD 的潜力,但难以免除深部器官回声衰减、血流动力学代偿性变化等因素的影响,尚需通过大规模临床研究观察其诊断准确性。

1.2 CEUS CEUS 可实时评估实质脏器微循环灌注,所用微泡造影剂经肺代谢,对肾功能受损者亦可使用。WANG 等[6]发现早期糖尿病肾病患者肾灌注显著低于健康志愿者,提示 CEUS 可敏感地识别处于微量蛋白尿阶段的肾小球内皮损伤与微循环障碍。目前 CEUS 在 CKD 中主要用于糖尿病肾病,有待未来拓展至其他肾病类型、深入探讨血流灌注参数变化与肾脏病理改变的关系。

1.3 AI 基于超声辅助诊断 影像组学可通过提取定量影像学特征并整合机器学习(machine learning, ML)算法而识别常规超声难以检出的早期 CKD 病变。肾小管萎缩和间质纤维化(tubular atrophy and interstitial fibrosis, TA/IF)是 CKD 进展的核心病理特征;其中,0 分(病变范围<5%)表明肾功能尚无显著变化、1 分(病变范围 5%~25%)提示明确病理损伤伴肾功能正常或轻度下降,准确区分二者对识别早期 CKD 及指导临床干预至关重要。胡小敏等[7]基于 TA/IF 0 分组与 1 分组之间存在显著差异的超声影像组学特征构建分类模型,其在训练集和验证集的曲线下面积(area under the curve, AUC)分别为 0.88 和 0.84;以之结合临床因素构建的联合模型效能更优,在训练集和验证集的 AUC 分别为 0.94、0.93,对于早期筛查 CKD 具有重要价值义。QIN 等[8]基于常规超声、弹性成像及超微血流成像数据构建的多模态超声深度学习(deep learning, DL)模型能有效区分 TA/IF 0 分与 1 分 CKD,其 AUC 为 0.86,且诊断效能优于各单一模态模型及临床模型。目前 DL 模型存在样本量有限及模型决策过程可解释性不足的缺陷,需进一步验证和优化。

2 预测 CKD 病理分型

2.1 免疫球蛋白 A(immunoglobulin A, IgA)肾病与非 IgA 肾病 为区分 IgA 肾病与膜性肾病,ZHANG 等[9]基于常规超声影像组学特征构建模型,其中的随机森林模型鉴别效能最佳(AUC 为 0.76)。QIN 等[10]通过整合 DL 模型、常规超声、超微血流成像及临床特征而构建列线图模型以预测 IgA 肾病,为无创鉴别 IgA 肾病与其他肾小球疾病提供了新的方法。

2.2 糖尿病肾病与非糖尿病肾病 糖尿病肾病呈渐进性发展,对症治疗以控制血糖、延缓肾功能进展等为主要目的,且进展至需要透析者预后较差;而对于非糖尿病肾病如膜性肾病、IgA 肾病等,通过规范的免疫抑制治疗可能实现临床缓解甚至治愈。糖尿病肾病与非糖尿病肾病在治疗及预后方面差异显著,精准鉴别是临床决策的关键。李楠等[11]在临床指标基础上引入肾脏体积指数构建的模型能显著提高预测糖尿病肾病的效能,使 AUC 从 0.89 提高至 0.92。欧长笛等[12]通过整合超声肾脏体积指数和肾皮质弹性模量值而构建的模型用于鉴别糖尿病肾病与非糖尿病肾病效能较佳,其 AUC 为 0.86。另有研究[13-14]显示,糖尿病肾病 CEUS 参数峰值强度(peak enhancement, PE)及 AUC 均显著低于膜性肾病($P<0.05$)[13]及局灶性节段性肾小球硬化[14]。各型肾脏病的特征性病理改变不同,并通过影响肾内血流动力学而造成 CEUS 参数间出现显著差异。

2.3 增殖性狼疮性肾炎(proliferative lupus nephritis, PLN)与非 PLN PLN 与毛细血管细胞增殖相关、需强化免疫抑制治疗,而非 PLN 经对症治疗后预后较好[15]。YUAN 等[16]发现 PLN 组黏性模量及弹性模量平均值均显著高于非 PLN 组($P<0.05$),且黏性模量平均值与活动性指数和慢性指数呈正相关;以 2.16 Pa·s 为黏性模量平均值的截断值诊断 PLN 的效能较好(AUC 为 0.77),联合血清肌酐等临床指标构建的诊断模型的 AUC 为 0.83。PLN 病理表现为内皮下免疫复合物沉积、内皮或系膜细胞增生及炎性浸润,组织黏度较高;而非 PLN 以系膜区免疫复合物沉积为主,炎症反应轻微;二者黏弹性参数存在差异。QIN 等[17]开发了基于超声影像组学的 ML 模型以无创鉴别 PLN,其中的多层感知器分类器表现最优,其在训练集和验证集的 AUC 分别为 0.89 和 0.82;且该模型能识别亚临床病理改变,可用于 PLN 初步分类。

3 监测及评估疗效

超声不仅能诊断疾病,还可用于监测疾病进展及

评估疗效。

3.1　糖尿病肾病　对于 CKD，Kimmelstiel-Wilson (K-W)结节是区分Ⅱ、Ⅲ期肾小球病变的关键标志物。王一茹等[18]比较 CEUS 血流灌注参数，发现 K-W 结节组肾皮质 PE、流入相最大斜率显著低于无结节组，且结节组皮髓质血流差异更明显、造影剂上升及下降时间延长；表明 CEUS 可定量评估糖尿病肾病进展程度。但目前此类研究多仅局限于观察 CKD 有无 K-W 结节，评估其数量的研究较少。

VOZZA 等[19]发现，接受钠-葡萄糖协同转运蛋白 2 抑制剂治疗 6 个月后，糖尿病肾病患者的估算肾小球滤过率（estimated glomerular filtration rate，eGFR)与蛋白尿虽未获得明显改善，但常规超声肾血流阻力指数已出现显著下降，表明超声指标可作为评估药物肾脏保护效应的影像学标志物。

3.2　IgA 肾病　牛津 MEST 分级是国际标准化病理评估 IgA 肾病体系，可量化肾脏损害程度；其中，肾小管萎缩/间质纤维化（T）为 CKD 发展的独立预测因子。谌典等[20]基于肾脏常规超声图像建立影像组学模型，以区分 IgA 肾病牛津分型轻度与中重度 T 病变，并联合 eGFR 和 24 h 尿蛋白构建联合模型；结果显示，联合模型评估效能显著优于单一影像组学模型，其训练集和验证集的 AUC 分别为 0.96 和 0.90，为无创分级 T 病变和预测疾病进展提供了新的方法。此外，谌典等[21]基于超声特征联合影像组学构建的 ML 模型能有效预测 CKD 患者肾功能损伤程度。

肾损伤快速进展与新月体形成相关；2016 年牛津分型将新月体病变(C)纳入了修订后的 MEST-C 评分系统[22]。超声与 AI 相结合，为无创评估新月体形成提供了新方法。为识别 IgA 肾病中的 C0(无新月体)与 C1(＜25％肾小球呈新月体)，QIN 等[23]基于肾脏常规超声图像建立的影像组学模型效能均良好，尤以逻辑回归模型表现最优，其在训练集和验证集的 AUC 分别为 0.84 和 0.81；结合尿潜血等临床指标构建的联合模型可进一步优化预测效能，训练集和验证集的 AUC 分别为 0.84 和 0.86。TANG 等[24]结合常规超声图像与超微血流成像特征构建的极端梯度提升 ML 模型的鉴别效能亦佳，在训练集和验证集的 AUC 分别为 0.84 和 0.86。

4　小结及展望

CKD 为全球重要公共卫生问题，具有患病率高、病情隐匿性强及预后不良等特点。经皮肾穿刺活检虽是病理诊断 CKD 的金标准，但有创且存在出血风险。超声无创、便捷、可实时监测，对于诊疗 CKD 具有显著价值。超声与 AI 相结合，为早期识别 CKD、预测其病理类型及监测疾病进展提供了新的无创手段。然而现有预测模型多仅基于回顾性、小样本、单中心研究结果；未来应以大样本、多中心、多模态、多特征融合等作为锚点，推动个体化、智能化诊疗 CKD 的进一步发展。

利益冲突：全体作者声明无利益冲突。

作者贡献：符靖孜查阅文献、撰写和修改文章；叶洁仪指导、修改文章；黄伟俊指导、审阅文章。

[参考文献]

[1] ZHANG L, WANG F, WANG L, et al. Prevalence of chronic kidney disease in China: A cross-sectional survey[J]. Lancet, 2012,379(9818):815-822.

[2] PALSSON R, SHORT S A P, KIBBELAAR Z A, et al. Bleeding complications after percutaneous native kidney biopsy: Results from the boston kidney biopsy cohort[J]. Kidney Int Rep, 2020, 5(4):511-518.

[3] 李奇默，董晓秋，梁越，等.剪切波弹性成像及超声造影定量评估慢性肾脏病[J].中国医学影像技术，2023,39(7):1051-1055.

[4] 唐小清，何萍，杨友，等.声触诊弹性成像联合脉冲多普勒超声成像参数与早期慢性肾脏病分期的相关性及临床价值[J/CD].中华医学超声杂志(电子版)，2024,21(5):491-499.

[5] ZHANG D L, CHEN S, XU J M, et al. The value of tissue quantitative diffusion analysis of ultrasound elastography in the diagnosis of early-stage chronic kidney disease[J]. BMC Nephrol, 2024,25(1):328.

[6] WANG L, WU J, CHENG J F, et al. Diagnostic value of quantitative contrast-enhanced ultrasound (CEUS) for early detection of renal hyperperfusion in diabetic kidney disease[J]. J Nephrol, 2015,28(6):669-678.

[7] 胡小敏，肖为瀚，刘学彬，等.基于超声影像组学的临床列线图预测模型在慢性肾脏病纤维化程度诊断中的价值[J].中国医学影像学杂志，2025,33(3):331-336.

[8] QIN X, LIU X, XIA L, et al. Multimodal ultrasound deep learning to detect fibrosis in early chronic kidney disease[J]. Ren Fail, 2024,46(2):2417740.

[9] ZHANG L, CHEN Z, FENG L, et al. Preliminary study on the application of renal ultrasonography radiomics in the classification of glomerulopathy[J]. BMC Med Imaging, 2021,21(1):115.

[10] QIN X, XIA L, MA Q, et al. Development of a novel combined nomogram model integrating deep learning radiomics to diagnose IgA nephropathy clinically[J]. Ren Fail, 2023,45(2):2271104.

[11] 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/CD].中华医学超声杂志(电子版)，2019,16(9):702-708.

[12] 欧长笛，马妍，邵文洁，等.三维量化和剪切波弹性定量评估糖尿

病肾病肾小球病理分级的研究[J].中国超声医学杂志,2022,38(11):1263-1267.

[13] 林林,王一茹,李楠,等.超声造影评估 2 型糖尿病肾病和膜性肾病血流灌注的临床价值[J].中国医学影像学杂志,2020,28(8):637-640.

[14] 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.

[15] Kidney Disease: Improving Global Outcomes (KDIGO) Lupus Nephritis Work Group. KDIGO 2024 clinical practice guideline for the management of LUPUS NEPHRITIS[J]. Kidney Int, 2024,105(1S):S1-S69.

[16] YUAN H, CHEN Y, WEI L, et al. Noninvasive quantitative evaluation of proliferative lupus nephritis based on ultrasonic viscoelastic imaging[J]. J Inflamm Res, 2025,18:3269-3281.

[17] QIN X, XIA L, ZHU C, et al. Noninvasive evaluation of lupus nephritis activity using a radiomics machine learning model based on ultrasound[J]. J Inflamm Res, 2023,16:433-441.

[18] 王一茹,李楠,赵萍,等.超声造影参数在糖尿病肾病 K-W 结节形成中的评估价值[J].中国医学科学院学报,2021,43(3):314-321.

[19] VOZZA A, VOLPE S, CUSTODERO C, et al. Glucagon-like peptide 1 receptor agonists and sodium-glucose cotransporter 2 inhibitors improve renal resistive index in patients with type 2 diabetes: A 26-week prospective observational real-life study[J]. J Diabetes Res, 2025,2025:8182211.

[20] 谌典,周畅,陈伟,等.基于超声影像组学及临床参数构建预测 IgA 肾病牛津分型 T 病变分级的模型[J].中国超声医学杂志,2024,40(9):1026-1030.

[21] 谌典,周畅,张奥懿,等.基于临床、超声特征及影像组学构建机器学习模型预测慢性肾脏病患者肾功能损伤程度[J].中国医学影像技术,2024,40(4):575-579.

[22] TRIMARCHI H, BARRATT J, CATTRAN D C, et al. Oxford classification of IgA nephropathy 2016: An update from the IgA nephropathy classification working group[J]. Kidney Int, 2017,91(5):1014-1021.

[23] QIN X, XIA L, HU X, et al. A novel clinical-radiomic nomogram for the crescent status in IgA nephropathy[J]. Front Endocrinol (Lausanne), 2023,14:1093452.

[24] TANG Y, LIU X, ZHOU W, et al. Interpretable machine learning model based on superb microvascular imaging for non-invasive determination of crescent status of IgAN[J]. J Inflamm Res, 2024,17:5943-5955.