·综述·

超声剪切波弹性成像模式评估慢性肾脏病的研究进展

吴颖仪[1],张海春[1,2*]

([1]广东医科大学第一临床医学院,广东 湛江 524000;[2]暨南大学附属广东省第二人民医院超声科,广州 510317)

【摘 要】 慢性肾脏病(CKD)是全球范围内的重要公共健康问题,其早期诊断和进展监测对改善患者预后至关重要。近年来,超声剪切波弹性成像(SWE)作为一种新型无创影像技术,凭借其良好的定量评估肾组织硬度的能力,在CKD的评估中得到了广泛应用。本文针对SWE在糖尿病肾病、缺血性肾病、慢性肾小球肾炎、高血压肾病等不同类型CKD中的具体应用进行综述。

【关键词】 超声剪切波弹性成像模式;慢性肾脏病;评估

【中图分类号】 R692 【文献标志码】 A 【DOI】 10.11915/j.issn.1671-5403.2026.01.016

Research progress in assessment of chronic kidney disease using ultrasound shear wave elastography

Wu Yingyi[1], Zhang Haichun[1,2*]

([1]First Clinical Medical School, Guangdong Medical University, Zhanjiang 524000, Guangdong Province, China; [2]Guangdong Provincial Second People's Hospital Affiliated to Jinan University, Guangzhou 510317, China)

【Abstract】 Chronic kidney disease (CKD) is a significant public health issue globally. Its early diagnosis and progression monitoring are crucial for improving patients' prognosis. In recent years, ultrasound shear wave elastography (SWE), as a novel non-invasive imaging technique, has been widely used in the assessment of CKD due to its excellent ability to quantitatively assess renal tissue stiffness. In this article, we reviewed the specific SWE applications in different types of CKD, including diabetic nephropathy, ischemic nephropathy, chronic glomerulonephritis, and hypertensive nephropathy.

【Key words】 shear wave elastography; chronic kidney disease; assessment

This work was supported by the Science and Technology Program of Guangdong Province (2023G00288).

Corresponding author: Zhang Haichun, E-mail: 787272673@qq.com

慢性肾脏病(chronic kidney disease,CKD)是全球范围内导致死亡和残疾的主要原因之一,影响了超过10%的成人人口[1]。在发展中国家,由于不良生活方式、糖尿病和高血压等风险因素的增加,CKD的发病率呈上升趋势。CKD通常在早期无明显症状,许多患者在被诊断时已进入中晚期,导致治疗干预的有效性下降[2]。因此,早期识别和监测CKD的进展对改善患者预后具有至关重要的意义。传统的CKD评估手段主要依赖于血液生化指标,如肌酐、尿素氮、尿液检查等,这些方法虽然有效,但往往无法及时反映肾组织的结构和功能变化[3]。随着肾脏病理生理机制的深入研究,临床需求催生了新型的影像评估技术,以实现更早期的诊断和更精确的疾病监测。在此背景下,超声剪切波弹性成像(shear wave elastrography,SWE)逐渐被应用于肾脏病的评估。SWE是一种无创、实时的超声成像技术,能够通过检测肾组织对剪切波的响应来定量分析肾脏的弹性和硬度[4]。研究显示,肾脏组织硬度的增加往往与慢性肾损伤及肾纤维化进展密切相关[5]。SWE的灵敏度和特异度使其成为一种优于传统生物标志物的评估工具,为CKD的分期、预后评估和疗效监测提供了新的可能。本文对近年来SWE在慢性肾脏病中的应用价值进行综述,以期为慢性肾脏病的临床诊断和分期评估提供客观依据。

1 CKD流行病学特点及危害

1.1 CKD流行病学特点

CKD的全球流行病学特点表现为显著的地域

收稿日期:2025-04-18;**接受日期**:2025-05-19

基金项目:广东省科技计划项目(2023G00288)

通信作者:张海春,E-mail:787272673@qq.com

差异、病因多样性及疾病负担不均,其中发展中国家因人口老龄化、代谢性疾病高发及医疗资源不足面临更严峻挑战[6]。我国单中心研究显示,原发性肾小球疾病占 74.56%,膜性肾病和 IgA 肾病分别占 35.1%和 29.33%,且膜性肾病比例近年显著上升,这可能与环境污染、生活方式改变及诊断技术提升相关[7];继发性疾病中狼疮性肾炎和糖尿病肾病常见,而乙型肝炎病毒(hepatitis B Virus,HBV)相关性肾炎在乙肝高发地区亦不容忽视,其病理类型以膜性肾病为主,与病毒直接损伤及免疫复合物沉积相关[8]。此外,发展中国家 CKD 患者早期诊断率低,且医疗资源多集中于终末期救治,加剧疾病诊治水平差异性。中国 CKD 患者达 1.32 亿,西南地区患病率最高,而代谢性疾病相关 CKD 死亡率较 1990 年增长 33.3%,凸显综合防控及早期筛查的紧迫性[9]。

1.2 CKD 的危害及检测现状

CKD 患者的转归通常较差,患者的肾脏组织会逐渐被破坏,肾小球滤过率持续下降。随着病情进展,患者肾脏排泄代谢废物、调节水电解质和酸碱平衡的能力不断减弱,早期可能仅有轻微的肾功能异常,如血肌酐、尿素氮轻度升高,但晚期患者肾脏功能几乎完全丧失,发展为终末期肾病(end stage renal disease,ESRD),需要依靠透析或肾移植来维持生命[10]。CKD 还被认为是心血管疾病的独立危险因素,这进一步增加了患者的死亡风险。CKD 还会引发患者代谢紊乱,CKD 患者肾脏合成活性维生素 D 减少,导致肠道对钙的吸收减少,血钙降低,影响患者的生活质量[11]。目前,CKD 早期筛查仍面临技术瓶颈,血肌酐和尿蛋白检测对早期肾功能损伤敏感性不足,肾活检作为金标准存在侵入性风险且依赖医疗资源,而超声等传统影像学对肾纤维化等早期病变分辨率有限[12]。这导致发展中国家 CKD 诊断延迟问题突出,约 50%患者确诊时已进展至中晚期。因此,开发无创、灵敏的早期监测技术成为改善预后的关键突破口,而 SWE 等新型影像学手段的兴起,为动态评估肾脏硬度及纤维化程度提供了潜在解决方案。

2 SWE 技术概述

2.1 超声剪切波的产生与传播

超声剪切波是一种机械波,主要由横向振动引起,其传播速度与组织的弹性性质密切相关,其生成通常依赖于一系列超声脉冲,通过对声波反射和干涉的精确控制发射和接收,在不同深度的组织中产生剪切波[13]。在肾脏成像中,弹性成像能够纵深探测并测量不同区域的组织硬度,这对肾脏结构的评估尤其重要[14]。剪切波的传播速度受多种因素影响,包括组织的内部结构、成分及生理状态等,而在 CKD 患者中,肾组织的硬化和纤维化会导致其弹性性质改变,因此超声剪切波的传播速度可以作为反映病理变化的一种有效指标。

2.2 超声弹性成像的分类与应用

超声弹性成像主要分为静态弹性成像和动态弹性成像,前者通过瞬时施加外力并观察组织的变形,后者则实时监测剪切波的传播情况。研究发现,动态弹性成像在肾脏评估中具有更高的灵敏性和特异性,可以在短时间内获得多次回波数据,反映组织的瞬时弹性变化[15]。在临床应用中,SWE 已在多种组织类型的评估中展现出潜力,包括肝脏、乳腺及甲状腺等。在肾脏方面,有研究表明,该技术能够有效区分正常肾组织与不同程度的肾纤维化,帮助临床医师制定治疗方案[16]。

2.3 SWE 与传统影像学方法优缺点比较

与传统影像学技术 CT 和 MRI 相比,SWE 具有无创、快速、成本低等优点,尤其是在肾脏监测方面,超声技术能够在不需要对患者施加辐射的情况下高效地提供组织硬度的评估,减少了患者的不适和后续并发症。尽管 SWE 具有众多优势,但也存在一些局限性,如操作的依赖性、环境因素对结果的影响等,未来的基础研究和技术优化将是提高 SWE 准确性的关键。

3 SWE 在 CKD 评估中的应用

近年来,SWE 技术在 CKD 评估中的应用受到越来越多的关注,该技术通过无创方式实时评估肾组织刚度,为不同类型 CKD 的早期诊断和管理提供了重要支持。以下分别探讨 SWE 在糖尿病肾病、缺血性肾病、慢性肾小球肾炎、高血压肾病等不同类型 CKD 中的应用。

3.1 SWE 在慢性肾小球肾炎中的应用

慢性肾小球肾炎是一组以肾小球损伤为主要病理特征的异质性疾病,其病因复杂,可继发于免疫异常、遗传因素或代谢紊乱等,临床常表现为持续性蛋白尿、血尿及进行性肾功能下降[17]。早期诊断与动态评估对延缓疾病进展、改善预后具有重要意义。近年来,SWE 作为一种无创性影像学技术,在肾脏纤维化及功能评估领域的研究逐渐受到关注[18]。有研究显示,SWE 可通过量化肾脏实质硬度,为评估慢性肾小球肾炎患者的纤维化程度补充实时、定量的诊断依据[19]。而 Jha 等[20]研究显示,在接受免疫抑制治疗的患者中,随着治疗的开展,肾实质硬度有下降趋势,说明 SWE 能够及时反映肾脏治疗的

结果,为进一步治疗决策提供依据。

3.2 SWE 在糖尿病肾病中的应用

糖尿病肾病是由糖尿病引起的慢性肾脏损伤,随着糖尿病患者数量的增加,糖尿病肾病对公共健康的影响也日益严重[21]。SWE 技术在糖尿病肾病领域的应用愈加受到重视,欧长笛等[22]研究显示,在糖尿病患者中,肾脏的硬度随着病程及病情的加重而增加。与正常人群相比,糖尿病肾病患者的肾实质硬度明显升高,这与肾脏的疾病进展有直接关系,如一项针对 2 型糖尿病患者的研究发现,肾实质硬度的增加与尿白蛋白排泄率(urinary albumin excretion rate, UAE)和肾小管功能的损害呈正相关[23]。这表明,通过 SWE 评估肾实质硬度,能够有效反映糖尿病肾病患者的病情进展。SWE 在早期筛查糖尿病肾病中显示出良好的应用前景,通过对接受常规体检的糖尿病患者进行 SWE 评估,无需依赖肾穿刺等有创操作,即可无创量化肾实质硬度。张文[24]研究发现,即使在早期肾病阶段也能通过 SWE 识别出肾脏的微小硬度变化,这种早期识别能力对于制定及时的干预措施及改善患者预后至关重要。

3.3 SWE 在缺血性肾病中的应用

缺血性肾病是由肾脏供血不足造成的慢性肾脏病,其主要原因包括肾动脉狭窄、心脏功能不全等,缺血性肾病患者常出现肾功能逐渐衰退,必须通过早期的监测和评估来避免病情恶化,SWE 技术在这一领域的应用有望为缺血性肾病的早期诊断提供新的思路。蒲金赟等[25]研究表明,缺血状态会导致肾脏组织微环境的改变,SWE 可以通过肾实质硬度的测量反映这些改变。临床研究中,缺血性肾病患者的肾实质硬度通常显著高于健康人群,这种增加的硬度与肾脏血流动力学的变化密切相关,因此 SWE 能够为评估肾脏供血状况提供重要参考。缺血性肾病患者的肾实质硬度与肾小管功能的损害呈显著相关性,通过定期 SWE 监测,医师可以实时了解肾脏的供血情况与功能变化[26]。SWE 不仅能评估缺血性肾病的严重程度,还能用于评估保肾治疗的效果,若在治疗过程中肾实质硬度有所减小,这通常表明治疗效果显著,反之则可能提示病情加重,需要调整治疗方案[27]。未来,结合 SWE 与其他影像学评估工具,如多普勒超声、磁共振血管成像等,可能会为缺血性肾病提供综合性评估策略,通过跨学科合作,整合不同的监测方法与指标,为临床提供全面、个性化的评估方案。

3.4 SWE 在高血压肾病中的应用

高血压肾病是长期高血压引发的慢性肾脏损害,主要表现为肾脏结构重塑与功能进行性减退,二者互为因果、相互加重。作为全球及中国 CKD 的重要病因之一,高血压肾病的发病率持续攀升:全球范围内,2019 年其年龄标准化发病率达 19.45/10 万,较 1990 年增长 17.89%[28]。而 SWE 技术可通过无创量化肾实质硬度,精准反映高血压导致的肾脏纤维化及血流动力学改变,为高血压肾病的早期筛查、病情监测提供客观依据,成为临床干预决策的重要辅助手段[29]。针对高血压患者的研究表明,长期高血压状态使肾脏的弹性受到影响,造成肾实质硬度显著增加,通过测定高血压患者的肾实质硬度,医师能够判断肾脏损伤的程度并制定相应的治疗策略[30]。

3.5 SWE 在肾结石引起的 CKD 中的应用

肾结石引起的 CKD 多因长期尿路梗阻、反复感染或结石直接损伤肾实质,导致肾小管间质纤维化及肾功能进行性下降,此类患者早期常缺乏特异性症状,但纤维化进程隐匿,亟需无创技术动态评估肾脏结构与功能改变。近年来,SWE 凭借其量化组织硬度的优势,为肾结石相关 CKD 的病情监测提供了新思路。临床观察表明,结石清除术后,肾实质硬度随肾积水缓解及炎症消退而逐渐下降,其动态变化可作为判断肾功能可逆性的参考指标[31]。值得注意的是,SWE 还能识别结石继发的隐匿性纤维化,尤其在无显著影像学结构异常的患者中,硬度值的异常升高可能提示早期肾小管间质病变,这为临床干预争取了时间。

4 SWE 在 CKD 分期中的诊断效能

根据肾小管的损伤程度,CKD 分为 5 期(1~5 期),其中 1 期为轻度病变,而 5 期为终末期肾病,早期阶段患者往往无明显症状,因此及时的诊断对于干预和管理至关重要。SWE 可有效评估肾组织的弹性改变,与肾脏纤维化程度呈正相关,能够帮助医师判断病情的严重程度。唐小清等[32]提出,SWE 及超声造影在 CKD 不同分期中具有较高的评估价值,进一步验证了 SWE 在 CKD 分期诊断中的优越性,有望为临床诊断及治疗提供有效依据。

5 总结

随着影像学技术的进展,SWE 作为一种新兴的无创性影像学技术,在 CKD 的早期诊断和评估中展现出巨大的潜力,SWE 在糖尿病肾病、缺血性肾病、慢性肾小球肾炎、高血压肾病等多种肾病中的应用均有显著效果,不仅能够提高早期诊断率,还能为治疗效果的评估提供可靠依据。然而,尽管 SWE 在

CKD 患者中的应用前景广阔,仍需面临标准化协议的制定、多中心验证、技术升级等挑战。未来的研究可以着重于 SWE 与传统生化指标、其他成像技术或人工智能的结合,进一步探索其临床价值。

【参考文献】

[1] Kidney Disease: Improving Global Outcomes (KDIGO) CKD Work Group. KDIGO 2024 clinical practice guideline for the evaluation and management of chronic kidney disease[J]. Kidney Int, 2024, 105(4S): S117-S314. DOI: 10.1016/j.kint.2023.10.018.

[2] Naber T, Purohit S. Chronic kidney disease: role of diet for a reduction in the severity of the disease[J]. Nutrients, 2021, 13(9): 3277. DOI: 10.3390/nu13093277.

[3] Panzarino V, Lesser J, Cassani FA. Pediatric chronic kidney disease[J]. Adv Pediatr, 2022, 69(1): 123-132. DOI: 10.1016/j.yapd.2022.03.008.

[4] Chen Z, Wang Y, Gunda ST, *et al*. Integrating shear wave elastography and estimated glomerular filtration rate to enhance diagnostic strategy for renal fibrosis assessment in chronic kidney disease[J]. Quant Imaging Med Surg, 2024, 14(2): 1766-1777. DOI: 10.21037/qims-23-962.

[5] Li Q, Zheng D, Lin H, *et al*. High circulating follicle-stimulating hormone level is a potential risk factor for renal dysfunction in postmenopausal women[J]. Front Endocrinol (Lausanne), 2021, 12(1): 627903.DOI: 10.3389/fendo.2021.627903.

[6] 谢书乐, 张瑾, 张培, 等. 终末期肾脏病患者肝纤维化的发生及影响因素分析[J]. 安徽医科大学学报, 2022, 57(11): 1831-1835. DOI: 10.19405/j.cnki.issn1000-1492.2022.11.026.

[7] Bover J, Massó E, Gifre L, *et al*. Vitamin D and chronic kidney disease association with mineral and bone disorder: an appraisal of tangled guidelines[J]. Nutrients, 2023, 15(7): 1576. DOI: 10.3390/nu15071576.

[8] Ma K, Zheng ZR, Meng Y. Pathogenesis of chronic kidney disease is closely bound up with Alzheimer's disease, especially *via* the renin-angiotensin system[J]. J Clin Med, 2023, 12(4): 1459. DOI: 10.3390/jcm12041459.

[9] GBD Chronic Kidney Disease Collaboration. Global, regional, and national burden of chronic kidney disease, 1990-2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017[J]. Lancet, 2020, 395 (10225): 709-733. DOI: 10.1016/S0140-6736(20)30045-3.

[10] Yanai H, Adachi H, Hakoshima M, *et al*. Molecular biological and clinical understanding of the pathophysiology and treatments of hyperuricemia and its association with metabolic syndrome, cardiovascular diseases and chronic kidney disease[J]. Int J Mol Sci, 2021, 22(17): 9221. DOI: 10.3390/ijms22179221.

[11] Nakamura M, Akagi R. Ultrasonic shear-wave elastography:a novel method for assessing musculoskeletal soft tissue and nerves[J]. Clin Neurophysiol, 2022, 140(12): 163-164. DOI: 10.1016/j.clinph.2022.05.006.

[12] 李利丽, 陈菊红, 王李胜. 武汉市慢性肾脏病流行现状及影响因素[J]. 中华老年多器官疾病杂志, 2024, 23(9): 646-649. DOI: 10.11915/j.issn.1671-5403.2024.09.143.

[13] Wu T, Shen EX, Jin ZB, *et al*. Characterization of anisotropy of elastic modulus with three-dimensional freehand scan shear wave elasticity imaging[J]. J Med Imaging (Bellingham), 2023, 10(6): 066002. DOI: 10.1117/1.JMI.10.6.066002.

[14] Chen J, Wang S, Wu Q, *et al*. Doppler ultrasound imaging and shear wave elastography for evaluation of interstitial fibrosis/tubular atrophy in IgA nephropathy[J]. Abdom Radiol (NY), 2025, 50(3): 1266-1272. DOI: 10.1007/s00261-024-04613-0.

[15] Maralescu FM, Vaduva A, Schiller A, *et al*. Relationship between novel elastography techniques and renal fibrosis — preliminary experience in patients with chronic glomerulonephritis[J]. Biomedicines, 2023, 11(2): 365. DOI: 10.3390/biomedicines11020365.

[16] 李淑敏, 宋林潼, 杨寒凝, 等.实时剪切波弹性成像评估原发性肾病综合征肾脏硬度的临床研究[J]. 临床超声医学杂志, 2020, 22(2): 95-98. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6978.2020.02.006.

[17] Neyra JA, Chawla LS. Acute kidney disease to chronic kidney disease[J]. Crit Care Clin, 2021, 37(2): 453-474. DOI: 10.1016/j.ccc.2020.11.013.

[18] 钟晓珠, 林佳钏, 宋其荣, 等. 常规超声联合剪切波弹性成像在慢性肾脏病患者肌肉减少症中的诊断价值[J]. 中山大学学报(医学科学版), 2024, 45(6): 912-922. DOI: 10.13471/j.cnki.j.sun.yat-sen.univ(med.sci).20241021.009.

[19] Chan W. Chronic kidney disease and nutrition support[J]. Nutr Clin Pract, 2021, 36(2): 312-330. DOI: 10.1002/ncp.10658.

[20] Jha V, Al-Ghamdi SMG, Li G, *et al*. Global economic burden associated with chronic kidney disease: a pragmatic review of medical costs for the inside CKD research programme[J]. Adv Ther, 2023, 40(10): 4405-4420. DOI: 10.1007/s12325-023-02608-9.

[21] 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. DOI: 10.16386/j.cjpccd.issn.1004-6194.2021.01.014.

[22] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0101.2022.11.017.

[23] 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. DOI: 10.13929/j.issn.1003-3289.2023.07.023.

[24] 张文. 老年缺血性肾病的诊断和治疗[J]. 肾脏病与透析肾移植杂志, 2023, 32(4): 346-347. DOI: 10.3969/j.issn.1006-298X.2023.04.010.

[25] 蒲金赟, 叶蕾, 何永华, 等. 超声剪切波弹性成像技术无创性评价肾组织病理的探索性研究[J]. 中华肾脏病杂志, 2023, 39(8): 587-594. DOI:10.3760/cma.j.cn441217-20221121-01137.

[26] 邹震宇, 刘泽政, 陈玲, 等. 二维剪切波弹性成像评估高血压肾病小鼠肾纤维化的实验研究[J]. 临床超声医学杂志, 2023, 25(12): 945-950. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6978.2023.12.002.

[27] 李淑敏, 宋林潼, 杨寒凝, 等. 实时剪切波弹性成像评估原发性肾病综合征肾脏硬度的临床研究[J]. 临床超声医学杂志, 2020, 22(2): 95-98. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6978.2020.02.006.

[28] Agarwal P, Garg V, Karagaiah P, *et al*. Chronic kidney disease-associated pruritus[J]. Toxins (Basel), 2021, 13(8): 527. DOI: 10.3390/toxins13080527.

[29] Hojs R, Ekart R, Bevc S, *et al*. Chronic kidney disease and obesity[J]. Nephron, 2023, 147(11): 660-664. DOI: 10.1159/000531379.

[30] 高琦, 蒋翠萍, 陈松旺. 二维剪切波弹性成像对慢性肾脏病的诊断价值及其影响因素分析[J]. 临床超声医学杂志, 2022, 24(2): 98-105. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6978.2022.02.005.

[31] 范向阳, 张艳, 贺晓, 等. 实时剪切波弹性成像联合生化指标评估慢性肾脏病患者肝损伤[J]. 中国医学影像技术, 2024, 40(8): 1221-1225. DOI: 10.13929/j.issn.1003-3289.2024.08.024.

[32] 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]. 中华医学超声杂志(电子版), 2024, 21(5): 491-499.

(编辑: 郑真真)