·综　述·

糖尿病早期肾损伤医学影像学评估的研究进展

郑斯元，罗辉，李强，姚彬

DOI:10.3969/j.issn.1671-0800.2026.02.029
【中图分类号】 R587.2；R445　【文献标志码】 C　【文章编号】 1671-0800(2026)02-0217-04

近年来，全球糖尿病（diabetes mellitus，DM）发病率持续攀升，2024 年 20 ～ 79 岁患者已达 5.89 亿[1]。糖尿病肾病（diabetic nephropathy，DN）是 DM 最常见的微血管并发症之一，已成为慢性肾脏病（chronic kindney disease，CKD）及终末期肾病（end-stage renal disease，ESRD）的主要病因。持续高血糖引起肾小球高滤过、微血管损伤及闭塞、炎症及脂代谢紊乱等多重异常，宏观表现为肾脏总体积（TKV）增大，随着耗氧量增加，血液高凝、线粒体功能障碍等，肾脏缺氧加重，从而引起弥漫性肾小球基底膜增厚、细胞外基质沉积，肾小球硬化与间质纤维化（IF），最终导致肾功能不可逆性损伤。

DN 起病隐匿，早期临床症状不典型，早期诊断与干预对 DN 管理和预后至关重要。然而，目前临床常用的血、尿生化指标对早期 DN 敏感性和特异性有限。肾活检虽是“金标准”，但其有创且存在出血或感染等风险，大多数患者在 DN 临床前期未能及时确诊。因此，开发无创、高效的早期肾损伤评估工具日益迫切。随着医学影像学迅速发展，多种无创评估方法逐渐应用于 DN 早期诊断。本文综述了 DN 医学影像学评估的最新进展。

1　DN 的医学影像学评估

随着医学影像技术的发展，结构成像如超声检查（ultrasonography，US）、计算机断层扫描（computed tomography，CT）、磁共振（magnetic resonance imaging，MRI）和功能成像（如动态增强 MRI、核医学显像）为 DM 早期肾损伤的无创评估提供了新方法。

1.1　US　US 具有无创、简便、成本低等优势。传统二维超声可评估肾脏形态，彩色多普勒超声可测量肾动脉阻力指数（RI）等血流参数，但对早期 DN 微循环变化的敏感性不足。

超声造影（CEUS）显著提高了微血管显像能力，可实现肾脏灌注定量评估。研究显示，肾皮质峰值增强（PE）和灌注速率（WiR）与 DN 病变严重程度呈负相关（$P < 0.05$），而上升时间（RT）和下降时间（FT）则呈正相关（$P < 0.05$），这表明 CEUS 参数可有效反映肾小球病理改变[2]。多项新技术在动物实验中展现出卓越的微血管成像潜力：三维超快多普勒（UFD）成像分辨率达 167 μm，可呈现全肾血管三维结构[3]；超声定位显微镜（ULM）可实现微血管流速定量检测[4]；高帧频超声造影（H-CUS）以 40 帧/s 的帧率（常规 CEUS 为 10 帧/s）显著提升时空分辨率，获取更丰富的灌注信息[5]。这些技术通过血管密度等指标实现微血管的可视与定量评估，但尚需更多临床数据支持。

剪切波弹性成像（SWE）通过测量组织硬度为纤维化评估提供新途径，其以杨氏模量将剪切波转换为以千帕（kPa）为单位的定量硬度值。研究发现 CKD 患者肾皮质硬度显著低于正常肾脏，杨氏模量与估算的肾小球滤过率（eGFR）及肾动脉 RI 显著相关，但其无法鉴别 CKD 的具体病因[6]。且纤维化多见于 DN 晚期，此时微血管损伤导致灌注下降，可能影响 SWE 测量准确性[7]。因此，SWE 在 DN 早期诊断和分级中价值有限。

尽管 US 存在操作者依赖性强等局限性，但其无创、便捷的特点仍支持其作为 DN 早期肾损伤的首选筛查方法。

基金项目： 宁波市鄞州区卫生健康科技计划项目（2024Y06）
作者单位： 315211 宁波，宁波大学医学部（郑斯元）；宁波市中西医结合医院（罗辉）；宁波大学附属人民医院（李强，姚彬）
通信作者： 李强，Email：17753963@qq.com

1.2　功能磁共振成像技术（functional magnetic resonance imaging，fMRI）　fMRI 无需外源性对比剂，即可提供定量参数评估肾脏微观结构与功能变化，具有组织分辨率高、无电离辐射的优势，在检测微观结构、氧合状态及组织灌注方面具有独特价值。

1.2.1　弥散磁共振成像　水分子在纤维化组织中扩散受限，因此可通过检测其运动来评估组织微观结构。扩散加权成像（DWI）通过表观扩散系数（ADC）反映水分子扩散能力，其值随纤维化进展而降低，但由于受微循环灌注影响，对早期 DN 敏感性有限，更适用于 ESRD 评估[8-9]。体素内不相干运动成像（IVIM）通过多 b 值（0 ～ 200 s/mm^2）双指数模型区分水分子的真实扩散与微循环及小管内液体流动的伪扩散，其伪扩散系数（D*）可反映肾小球超滤过状态，为早期 DN 鉴别提供了依据[10]。

扩散张量成像（DTI）通过检测水分子扩散运动轴向评估组织结构改变，其各向异性分数（FA）反映水分子扩散的异向程度。研究发现 DM 患者髓质 FA 值显著降低，且与 eGFR 呈正相关（$P < 0.05$），表明其可作为早期损伤的特异性标志物[11]。

1.2.2　氧合及血流灌注检测　早期 DN 因超滤过导致肾脏缺氧，监测氧合水平有助于早期诊断。血氧水平依赖成像（BOLD）以脱氧血红蛋白为内源对比剂，其参数表观弛豫率（R2*）与血氧饱和度呈负相关。目前 BOLD 图像分析主要采用两种方法：（1）感兴趣区域（ROI）技术；（2）12 层同心圆分析法（TLCO）。研究显示 TLCO 识别 CKD 氧合变化更敏感[12]，但其用于早期 DN 仍需进一步验证[13]。

动脉自旋标记（ASL）以磁标记动脉血为内源性示踪剂，可实现无创灌注测量，其参数肾血流量（RBF）在 CKD 中显著降低[14]，诊断效能优于 DWI（$P < 0.05$）[15]。动物实验发现[16]，BOLD 在 DN 兔早期就能显示肾皮质、外髓 R2* 显著升高，而同期 ASL 检测 RBF 则无显著变化，这表明 BOLD 可更早检出肾脏缺氧改变。

1.2.3　脂代谢异常及钠离子（Na^+）分布变化　高血糖促进胰岛素过度分泌，导致脂肪合成与异常沉积。化学位移水脂分离技术—Dixon 成像法通过水脂分离技术实现脂肪定量分析，其脂肪分数（FF）与脂肪沉积正相关，已证实早期 DN 患者存在特征性肾脂肪沉积[17]。改良的 mDixon-Quant 技术可在单次屏气内同步获取 FF、T2* 及 R2* 等多参数数据，实现脂肪与血氧同步评估，在早期诊断中具有价值[18]。

正常肾脏通过调节 Na^+ 形成逆流倍增系统，髓质 Na^+ 浓度由外向内递增促进水重吸收。高血糖使近端小管过度重吸收葡萄糖和 Na^+，致髓袢升支粗段 Na^+ 重吸收减少，破坏逆流系统。钠磁共振成像（^{23}Na-MRI）可直观显示 Na^+ 分布异常。动物研究表明[19]，DM 小鼠在结构损伤前即出现髓质 Na^+ 浓度及梯度降低，提示逆流倍增系统破坏，为 ^{23}Na-MRI 作为极早期肾功能改变的筛查工具提供依据。

然而，fMRI 也存在一定局限：（1）不适用于幽闭恐惧症或体内有铁磁性植入物者；（2）检查时间长、费用高；（3）部分序列易受运动伪影影响；（4）BOLD 受血容量、小管容积等肾血氧以外的多因素影响，无法定量评估血氧饱和度[20]。

1.3　CT　CT 凭借其高空间分辨率和操作便捷性，已广泛应用于临床。研究表明，肾脏体积和表面积等形态学参数与肾功能状态显著相关[21]。然而，常规平扫 CT 在评估肾脏血流灌注及氧合状态方面存在明显局限，主要适用于中晚期 DN 的肾功能预测和预后评估。

为克服常规 CT 的局限，早期 DM 肾损伤评估可借助碘对比剂（CM）及新型 CT 技术。研究发现[22]，动态增强 CT（DCE-CT）灌注扫描结合 Patlak 曲线法，可通过多时间点数据计算肾小球滤过率（GFR），该方法计算所得双肾总 GFR 与慢性肾脏病流行病学合作组（CKD-EPI）和肾脏病饮食改良（MDRD）公式得出的 eGFR 无明显差异。

能谱 CT 作为先进成像技术，可利用 X 射线能量分离生成多个对应不同理、化特性的能量级别图像。有研究利用能谱 CT 碘图评估早期 DM 肾损伤，发现 DM 组有效原子序数（Zeff）、碘密度（ID）、标准化碘密度（NID）和能谱曲线斜率（λ）均显著高于健康对照组（均 $P < 0.05$），这表明能谱 CT 有助于早期识别 DM 肾损伤[23]。

尽管 CT 检查存在电离辐射和对比剂肾毒性风险，但对肾功能正常的早期 DM 患者影响较小。未来应致力于优化扫描方案、控制辐射剂量及规范对比剂使用，以提升 CT 在肾功能评估中的效能与安全性。

1.4　核医学检查　核素肾动态显像可定量检测示踪剂的摄取、转运和排泄过程，同时观察肾脏形态、血流及功能，是目前临床测量 GFR 的常规手段。

正电子发射断层扫描/CT（PET/CT）较单光子发射计算机断层扫描（SPECT）具备更高的空间分辨率和定量能力。使用 N-[6-（^{18}F）氟吡啶-3-基]甘氨酸[6-（^{18}F）FPyGly]示踪剂的研究发现，半排时间（$C_{1/2}$）和峰值活度（P）等参数在反映肾功能异常方面优于血尿素氮（BUN）和血肌酐（SCr）等传统指标[24]。

肾纤维化时，成纤维细胞活化蛋白（FAP）常在炎症和纤维化组织中异常表达。镓标记的 FAP 抑制剂[（^{68}Ga）Ga-FAPI-04]可与 FAP 结合，实现肾纤维化的快速无创识别[25]。新型 PET/CT 示踪剂（^{18}F）AlF-NOTA-FAPI-04 可有效改善 ^{68}Ga 半衰期较短（68 min）的限制，在各类肾脏疾病中，DN 患者对该新型示踪剂呈中高水平摄取，显示出其在评估肾纤维化方面的良好潜力[26]。

尽管核素肾动态显像可实现分肾功能测定，但因其具有侵入性，目前临床上主要应用于肾纤维化检测和移植肾功能的评估。

2　人工智能在医学影像学中的应用

纹理分析技术通过分析图像灰度分布和像素空间关系，提供超越传统视觉评估的客观影像学指标。可提取的特征有三维形态、一阶统计量、灰度共生矩阵（GLCM）、灰度依赖矩阵（GLDM）和灰度游程矩阵（GLRLM）等，能够有效识别肉眼难以察觉的影像特征。

机器学习通过数据建模预测未知结果，已广泛应用于医学影像纹理分析。常用算法包括特征选择类（如最小绝对收缩和选择算子）和分类预测类（如随机森林、支持向量机）。模型评估采用敏感度、特异度、准确性、阳性预测值、阴性预测值及综合判别能力（*AUC* 值）等多维度指标。研究开发的超声模型在鉴别病理分期低于 IV 期的 DN 患者 *AUC* 达 0.91[27]。

作为机器学习的重要分支，深度学习通过多层神经网络实现端到端特征提取，在肾功能评估中表现出显著优势。Narikiyo 等[28]采用 SYNAPSE VINCENT 软件自动测量 CT 肾脏体积，发现不同 CKD 分期患者肾脏体积存在显著差异（$P < 0.05$）。Luo 等[29]开发的增强 CT 皮质期自动分割模型达到高精度分割效果，其分割肾实质的平均 Dice 相似系数（DSC）达 93.53%。此外，基于三维 U-Net 的全自动 ASL 定量模型自动分割肾皮质并测得 RBF 与人工结果高度一致（一致性界限：$-11 \sim 4.6\ ml \cdot min^{-1} \cdot 100\ g^{-1}$）[30]。

基于深度学习的自动分割技术已在纹理分析中取得进展。研究显示，采用 DTI 联合扩散峰度成像（DKI）的自动分割模型不仅能实现高精度分割且其预测 DN 的效能达 *AUC*=0.918[31]。另一项平扫 CT 的研究也证实，自动分割提取的纹理特征可识别 CKD 高风险患者（*AUC*=0.878）[32]。

然而，该技术仍面临需大量人工标注数据、筛选多种网络架构以确定最优模型、且对硬件和操作者经验要求较高等挑战。未来应推进多中心验证、规范患者准备流程（如水合状态、禁食要求等），以提升纹理特征分析技术在 DN 早期诊断和分期中的价值。

3　结论

US、fMRI、CT 及核医学等医学影像技术结合人工智能为 DM 早期肾损伤的诊断提供了多种有价值的评估方法，展现出良好的临床应用前景。然而，现有影像学方法仍处于研究阶段，尚无法替代肾脏活检的“金标准”地位。未来应通过大规模多中心研究进一步统一诊断标准，使影像学技术能够为 DM 早期肾损伤的临床诊疗提供更可靠依据，从而有效降低 ESRD 发生率，改善患者长期预后和生活质量。

利益冲突　所有作者声明无利益冲突

参　考　文　献

[1] Duncan B B, Magliano D J, Boyko E J. IDF Diabetes Atlas 11th edition 2025: Global prevalence and projections for 2050[J]. Nephrol Dial Transplant, 2025, 41(1): 7-9.

[2] Wang Y R, Zhao P, Li N, et al. A study on correlation between contrast-enhanced ultrasound parameters and pathological features of diabetic nephropathy[J]. Ultrasound Med Biol, 2022, 48(2): 228-236.

[3] Oh D, Lee D, Heo J, et al. Contrast agent-free 3D renal ultrafast Doppler imaging reveals vascular dysfunction in acute and diabetic kidney diseases[J]. Adv Sci (Weinh), 2023, 10(36): e2303966.

[4] Zhang H, Huang L J, Yang Y, et al. Evaluation of early diabetic kidney disease using ultrasound localization microscopy: A feasibility study[J]. J Ultrasound Med, 2023, 42(10): 2277-2292.

[5] Yang F R, Jiang L, Ma Y, et al. Quantitative assessment of early kidney injury using high frame rate contrast-enhanced ultrasonography in a rabbit model of diabetic nephropathy[J]. Med Ultrason, 2024,

26(1): 7-14.

[6] Kuttancheri T, Krishnan K, Das S K, et al. Shear wave elastography: Usefulness in chronic kidney disease[J]. Pol J Radiol, 2023, 88: 286-293.

[7] Wu J P, Li G H, Liu J, et al. Utility of shear wave-based ultrasound elastography in chronic kidney disease and related pathological quantitative analysis[J]. Eur Radiol, 2023, 33(8): 5625-5633.

[8] Zhao K X, Li S, Liu Y, et al. Diagnostic and prognostic performance of renal compartment volume and the apparent diffusion coefficient obtained from magnetic resonance imaging in mild, moderate and severe diabetic kidney disease[J]. Quant Imaging Med Surg, 2023, 13(6): 3973-3987.

[9] Mohamed Osman N M, Abdel Kader M, Aziz Nasr T A E L, et al. The role of diffusion-weighted MRI and apparent diffusion coefficient in assessment of diabetic kidney disease: Preliminary experience study[J]. Int J Nephrol Renovasc Dis, 2021, 14: 1-10.

[10] Zhou S P, Wang Q, Chen P, et al. Assessment of the added value of intravoxel incoherent motion diffusion-weighted MR imaging in identifying non-diabetic renal disease in patients with type 2 diabetes mellitus[J]. J Magn Reson Imaging, 2024, 59(5): 1593-1602.

[11] Mrdanin T, Nikolic O, Molnar U, et al. Diffusion-weighted imaging in the assessment of renal function in patients with diabetes mellitus type 2[J]. MAGMA, 2021, 34(2): 273-283.

[12] Li L P, Milani B, Pruijm M, et al. Renal BOLD MRI in patients with chronic kidney disease: Comparison of the semi-automated twelve layer concentric objects (TLCO) and manual ROI methods[J]. MAGMA, 2020, 33(1): 113-120.

[13] Sorensen S S, Gullaksen S, Vernstrom L, et al. Evaluation of renal oxygenation by BOLD-MRI in high-risk patients with type 2 diabetes and matched controls[J]. Nephrol Dial Transplant, 2023, 38(3): 691-699.

[14] Kannenkeril D, Janka R, Bosch A, et al. Detection of changes in renal blood flow using arterial spin labeling MRI[J]. Am J Nephrol, 2021, 52(1): 69-75.

[15] Pi S, Li Y, Lin C R, et al. Arterial spin labeling and diffusion-weighted MR imaging: Quantitative assessment of renal pathological injury in chronic kidney disease[J]. Abdom Radiol (NY), 2023, 48 (3): 999-1010.

[16] Wang R, Lin Z Y, Yang X D, et al. Noninvasive evaluation of renal hypoxia by multiparametric functional MRI in early diabetic kidney disease[J]. J Magn Reson Imaging, 2022, 55(2): 518-527.

[17] Wang Y C, Feng Y L, Lu C Q, et al. Renal fat fraction and diffusion tensor imaging in patients with early-stage diabetic nephropathy[J]. Eur Radiol, 2018, 28(8): 3326-3334.

[18] Yang C, Wang Z, Zhang J L, et al. Mri assessment of renal lipid deposition and abnormal oxygen metabolism of type 2 diabetes mellitus based on mDixon-Quant[J]. J Magn Reson Imaging, 2023, 58(5): 1408-1417.

[19] Nakagawa Y, Kaseda R, Suzuki Y, et al. Sodium magnetic resonance imaging shows impairment of the counter-current multiplication system in diabetic mice kidney[J]. Kidney360, 2023, 4(5): 582-590.

[20] Bane O, Seeliger E, Cox E, et al. Renal MRI: From nephron to NMR signal[J]. J Magn Reson Imaging, 2023, 58(6): 1660-1679.

[21] Zheng M M, Zhu Y C, Shang L M, et al. Use of CT-based renal volumetry for the measurement of split renal function: A split glomerular filtration rate prediction model based on unilateral renal volume parameters[J]. Clin Radiol, 2022, 77(10): 759-766.

[22] Jeong S, Park S B, Chang I H, et al. Estimation of renal function using kidney dynamic contrast material-enhanced CT perfusion: Accuracy and feasibility[J]. Abdom Radiol (NY), 2021, 46(5): 2045-2051.

[23] Zheng W, Mu R H, Qin X Y, et al. Spectral computed tomography parameters could be surrogate imaging markers to detect early perfusion changes in diabetic kidneys[J]. Quant Imaging Med Surg, 2023, 13(9): 6116-6128.

[24] Wang H L, Yang L, Lu K Y, et al. Evaluation of N-(6-[^{18}F] Fluoropyridin-3-yl)*Glycine* PET renography to detect renal function progression in a rat model of diabetic nephropathy[J]. Nucl Med Biol, 2022, 112/113: 59-65.

[25] Mao H X, Chen L M, Wu W H, et al. Noninvasive assessment of renal fibrosis of chronic kidney disease in rats by [^{68}Ga] Ga-FAPI-04 small animal PET/CT and biomarkers[J]. Mol Pharm, 2023, 20 (5): 2714-2725.

[26] Wang H, Zhang P, Wang W, et al. [^{18}F] AlF-NOTA-FAPI-04 PET/CT for non-invasive assessment of tubular injury in kidney diseases[J]. Clin Kidney J, 2024, 17(5): sfae064.

[27] Su X E, Lin S, Huang Y Q. Value of radiomics-based two-dimensional ultrasound for diagnosing early diabetic nephropathy[J]. Sci Rep, 2023, 13(1): 20427.

[28] Narikiyo K, Tanabe M, Higashi M, et al. Longitudinal changes in renal volumes evaluated by automated three-dimensional volumetric computed tomography of the whole kidney: The association with the renal function and disease progression[J]. Eur J Radiol, 2024, 170: 111245.

[29] Luo H, Li J Z, Huang H Y, et al. AI-based segmentation of renal enhanced CT images for quantitative evaluate of chronic kidney disease[J]. Sci Rep, 2024, 14(1): 16890.

[30] Bones I K, Bos C, Moonen C, et al. Workflow for automatic renal perfusion quantification using ASL-MRI and machine learning[J]. Magn Reson Med, 2022, 87(2): 800-809.

[31] Yang D Y, Tian C, Liu J, et al. Diffusion tensor and kurtosis MRI-based radiomics analysis of kidney injury in type 2 diabetes[J]. J Magn Reson Imaging, 2024, 60(5): 2078-2087.

[32] Bialek P, Dobek A, Falenta K, et al. Usefulness of radiomics and kidney volume based on non-enhanced computed tomography in chronic kidney disease: Initial report[J]. Kidney Blood Press Res, 2025, 50(1): 161-170.

收稿日期：2025-08-08

（本文编辑：方能）