Modern Practical Medicine, November 2025, Vol.37, No.11

·临床研究·

基于增强 CT 的肾脏图像自动分割模型在糖尿病早期肾损伤诊断中的应用

郑斯元，罗辉，李强，姚彬

【摘要】目的　评估基于计算机断层扫描（CT）的肾脏图像人工智能（AI）自动分割模型对糖尿病患者（DM）早期肾损伤的诊断价值。方法　回顾性分析 2023 年 1 月至 2024 年 3 月宁波市鄞州区第二医院收治的 44 例 DM 且不符合糖尿病肾病（DKD）诊断标准患者及 54 例健康对照者的临床和双肾增强 CT 影像学资料。使用基于 3D nnU-Net 的 AI 自动分割模型分割肾实质（RP）、肾皮质（RC）和肾髓质（RM），并计算肾脏各部位体积（V_{RP}、V_{RC}、V_{RM}）和相应平均 CT 值（CT_{RP}、CT_{RC}、CT_{RM}），比较两组间的影像学参数差异。采用受试者工作特征（ROC）曲线评估影像学参数在预测 DM 早期肾损伤中的价值。结果　两组肾脏体积参数（V_{RP}、V_{RC}、V_{RM}）及 CT 值参数（CT_{RP}、CT_{RC}、CT_{RM}）差异均有统计学意义（均 $P < 0.05$）。ROC 曲线分析显示，各影像学参数可用于区分 DM 早期肾损伤（均 $P < 0.05$），且肾脏体积参数（AUC=0.774 ～ 0.818）较 CT 值参数（AUC=0.620 ～ 0.654）诊断性能更佳。结论　基于增强 CT 的肾脏图像 AI 自动分割模型可实现 DM 患者肾损伤的早期诊断，且肾脏体积参数较 CT 值参数诊断性能更佳。

【关键词】糖尿病肾脏病；X 射线，计算机断层扫描；人工智能；肾脏容积；肾脏密度

doi:10.3969/j.issn.1671-0800.2025.11.010

【中图分类号】R587　【文献标志码】A　【文章编号】1671-0800(2025)11-1140-04

近年来糖尿病（diabetes mellitus，DM）的发病率不断升高，2024 年全球 20 ～ 79 岁患者达 5.89 亿[1]。糖尿病肾病（diabetic kidney disease，DKD）是 DM 最常见的慢性并发症之一，影响超过三分之一的 1 型 DM 患者和近一半的 2 型 DM 患者[2]。肾脏有强大的代偿能力，早期肾损伤［尿白蛋白/肌酐比值（UACR）＜ 30 mg/g］临床症状不明显，肾功能检查也处于正常状态[3]。肾活检是 DKD 诊断的“金标准”，但属于有创检查，存在出血和感染等风险[4]，致使应用受限。计算机断层扫描（computed tomography，CT）是目前常用的影像学检查方法，具有成像速度快、图像空间分辨率高等优点。DM 患者早期肾功能仍在正常范围内，腹部增强 CT 是其可选择的影像检查方法。研究显示[5]，腹部 CT 影像可显示 DM 患者早期肾损伤的细微征象，包括肾体积增大或缩小、肾包膜增厚、肾脏外形改变以及肾周脂肪间隙渗出等。近年来随着计算机图像分割和人工智能（AI）技术的发展和应用，DM 患者早期肾脏损伤所导致的肾脏形态、皮髓质体积和密度等改变有望实现定量评估。本研究分析基于腹部增强 CT 的肾脏图像 AI 自动分割模型在 DM 患者早期肾损伤诊断中的可行性，现报道如下。

1　资料与方法

1.1　一般资料　回顾性选取 2023 年 1 月至 2024 年 3 月宁波市鄞州区第二医院收治的 44 例 DM 患者，设为研究组。纳入标准：（1）年龄 18 ～＜ 80 岁；（2）符合临床 DM 的诊断标准[6]，且不符合 DKD 诊断标准[7]；（3）曾 1 次或以上行包括双侧肾脏的增强 CT 检查（全腹部增强 CT、上腹部增强 CT、泌尿系增强 CT 或包含双肾的 CT 血管成像检查），且双侧肾脏图像完整、清晰，符合诊断要求；（4）增强 CT 检查前曾行 DKD 相关实验室检查，包括血肌酐（SCr）、糖化血红蛋白（HbA1c）、UACR、空腹血糖（FPG）、餐后 2 h 血糖（2 h PG）等，且不超过 2 周。排除标准：（1）存在肾脏先天畸形、肾积水、多囊肾、肾脏手术、外伤或梗死等影响图像自动分割精准度的因素；（2）存在心力衰竭、贫血、肝硬化、多发性骨髓瘤等对比剂肾病风险因素；（3）存在高血压、高尿酸血症、药物性肾损

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：315100 宁波，宁波市鄞州区第二医院（郑斯元、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

伤或其他导致急慢性肾损伤的因素；(4)图像有严重伪影或其他导致图像质量不达标；(5)临床资料不完整或有缺失。另选同期在本院体检的 54 例无 DM、高血压、高尿酸血症、肾盂肾炎等影响肾功能相关疾病且肾功能正常的健康人群为对照组。本研究获得宁波市鄞州区第二医院伦理委员会批准(批件号：鄞二伦审 2024 研批 037 号)。

1.2　方法

1.2.1　检查前准备　对研究对象进行对比剂肾病风险分层，并根据风险程度在增强 CT 检查前后给予相应水化预防措施。不存在危险因素（年龄＞ 70 岁、DM、心力衰竭、贫血、肝硬化、多发性骨髓瘤）者列为对比剂肾病低风险者，嘱其于检查前后 6 h 内口服 500 ～ 1 000 ml 0.9%氯化钠注射液或检查前后 6 ～ 12 h 按 1 ml • kg^{-1} • h^{-1} 进行口服液体水化；存在 1 项危险因素者列为对比剂肾病中风险者，检查前 1 ～ 4 h 至检查后 3 ～ 12 h 静脉输入 500 ml 0.9%氯化钠注射液或基于患者体质量调整，按每小时 1 ～ 3 ml/kg 静脉输入 0.9%氯化钠注射液进行水化；存在 2 项及以上危险因素者列为对比剂肾病高风险者，应停止检查。

1.2.2　增强 CT 检查　使用 64 排螺旋 CT(America，GE，Optima™ CT660)对研究对象进行全腹部或上腹部增强扫描。扫描参数：管电压 120 kV，管电流采取自动调整技术，平均值约 200 mAs，转速为 0.42 s/转，螺距 0.6，扫描层厚 5mm，层间距 5mm，探测器宽 40mm，使用高压注射器经肘正中静脉注射非离子型碘对比剂(碘海醇，350 mgI/ml)，根据患者体质量调节剂量(1 ～ 1.5 mgI/kg)，总剂量 80 ～ 100ml，注射速率 2.5ml/s，后续以同样速率注射 30 ml 0.9%氯化钠注射液。采取血管跟踪技术，设置感兴趣于膈面腹主动脉上，触发值 120 Hu，3 s 后开始扫描皮质期，65 s 后扫描髓质期，500 s 后扫描排泄期，其中皮质期扫描时间 35 ～ 40 s。

检查前禁食 6 h 以上，扫描前安静休息半小时以上，嘱饮白开水约 500 ml。研究对象采用仰卧、头先进方式进床，全腹部增强 CT 扫描范围从膈顶到耻骨联合水平，上腹部增强 CT 扫描范围从膈顶到双肾下极水平，泌尿系增强 CT 及包含双肾的 CT 血管造影扫描范围包括双肾上下极。采取吸气后屏气曝光，扫描结束后嘱患者静坐观察 20 min。将原始数据和图像传至后处理工作站。

1.2.3　图像处理　利用肾脏 AI 图像自动分割模型[5](以 3D nnU-Net 算法为基础)对增强 CT 检查获得的肾脏皮质期图像进行肾实质(RP)、肾皮质(RC)和肾髓质(RM)分割(图 1)，计算肾脏各部位的容积和皮质期肾脏各部位的平均 CT 值，以及模型分割性能评价指标。记录的数据包括肾实质体积(V_{RP})、肾皮质体积(V_{RC})和肾髓质体积(V_{RM})；皮质期肾实质平均 CT 值(CT_{RP})，皮质期肾皮质平均 CT 值(CT_{RC})和皮质期肾髓质平均 CT 值(CT_{RM})；模型分割肾实质、肾皮质的平均 Dice 系数和平均 Jaccard 指数。根据慢性肾脏病流行病学合作组织公式(chronic kidney disease-epidemiology collaboration，CKD-EPI)[8]计算估算的肾小球滤过率(eGFR)。

1.3　统计方法　使用 IBM SPSS Statistics 27.0.0 软件对数据进行统计学分析。正态分布计量资料用均数±标准差描述，两组间比较采用独立样本 t 检验；非对称分布的计量资料用 $M(P_{25}, P_{75})$ 描述，两组间比较采用 Mann-Whitney U 检验；分类资料采用频数和百分比描述，组间比较采用 χ^2 检验；采用受试者工作特征曲线法(receiver operating characteristic，ROC)分析肾脏影像参数评估肾功能的价值。$P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

2　结果

2.1　两组基线资料比较　两组性别、年龄、SCr 及 eGFR 等指标差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$)，研究 FPG、2 h PG 均高于对照组(均 $P < 0.05$)，见表 1。

2.2　模型性能验证　基于增强 CT 的肾脏图像自动分割模型对肾实质、肾皮质的分割性能定量评价见



注：A 为增强 CT 肾脏皮质期图像，B 为肾脏实质分割图像，C 为肾脏皮质分割图像，D 为肾脏髓质分割图像

图 1　肾脏图像人工智能自动分割模型分割肾脏增强 CT 示意图

Modern Practical Medicine, November 2025, Vol.37, No.11

表 1　两组基线特征比较

项目	对照组（n=54）	研究组（n=44）	t（χ^2）[U]值	P 值
性别[例（%）] 男	33（61.1）	28（63.6）	（0.07）	＞0.05
女	21（38.9）	16（36.4）		
年龄（岁）	60.2±9.1	63.6±8.5	1.94	＞0.05
FPG（mmol/L）	5.6±0.7	11.3±2.2	17.92	＜0.05
2 h PG（mmol/L）	6.7±0.6	18.4±2.8	30.51	＜0.05
UACR（mg/g）		8.66（5.67，12.71）		
SCr（μmol/L）	62（55，79）	64（49，74）	[1 117.50]	＞0.05
eGFR（ml • min^{-1} • 1.73m^{-2}）	106.89（92.80，120.79）	114.36（85.44，137.18）	[1 067.00]	＞0.05

注：UACR 为尿白蛋白/肌酐比值，SCr 为血肌酐，eGFR 为估算的肾小球滤过率；FPG 为空腹血糖；2 h PG 为 2 h 血糖

表 2。模型分割肾实质、肾皮质的平均 Dice 系数和平均 Jaccard 指数表明该模型分割性能较好。

2.3　两组肾脏影像参数比较　研究组 V_{RP}、V_{RC} 和 V_{RM} 均大于对照组，且 CT_{RP}、CT_{RC} 和 CT_{RM} 均小于对照组，差异均有统计学意义（均 P ＜ 0.05），见表 3。

2.4　肾脏影像参数预测 DM 早期肾损伤的诊断价值　各影像学参数对区分 DM 早期肾损伤均具有统计学意义（均 P ＜ 0.05），V_{RP}、V_{RC} 和 V_{RM} 的 AUC 分别为 0.818、0.790 和 0.774，CT_{RP}、CT_{RC} 和 CT_{RM} 的 AUC 分别为 0.620、0.654、0.620，肾脏体积参数较 CT 值参数的诊断性能更佳，见图 2。

3　讨论

DM 患者肾损伤无创评价方法以超声和功能磁共振成像（functional magnetic resonance imaging，fMRI）较为多见。超声检查以血流灌注、微血管形态改变等为评价指标，在宏观定量分析肾脏灌注方面具有优势[9]，有助于实现 DKD 的血流长期可视化管理[10]。fMRI 通过微观结构及功能改变评估 DM 早期肾损伤[11]，如体素内不相干运动成像的伪扩散系数有助于鉴别早期 DKD、移植肾、免疫球蛋白 A 肾病等[12]。血氧水平依赖成像能检测肾脏缺氧区域[13]。然而，超声存在主观性强、仪器间一致性分析欠佳等局限性；fMRI 不适用于幽闭恐惧症、体内含铁磁性异物者，且对比剂可能于脑内沉积或致肾源性系统纤维化的风险[14]。

CT 具有时间和空间分辨率高、检查方便、患者依从性好等优点，已广泛应用于临床。增强 CT 中组织的 CT 值与碘对比剂浓度呈线性相关，可反映肾脏血供情况[15]。既往研究虽提示肾体积与肾功能相关[16]，但测量方法繁杂；能谱 CT 虽能定量评价 DM 早期肾脏灌注变化[17]，但受限于设备昂贵及图像解读难度较高。另有研究通过 CT 评估腹部脂肪间接

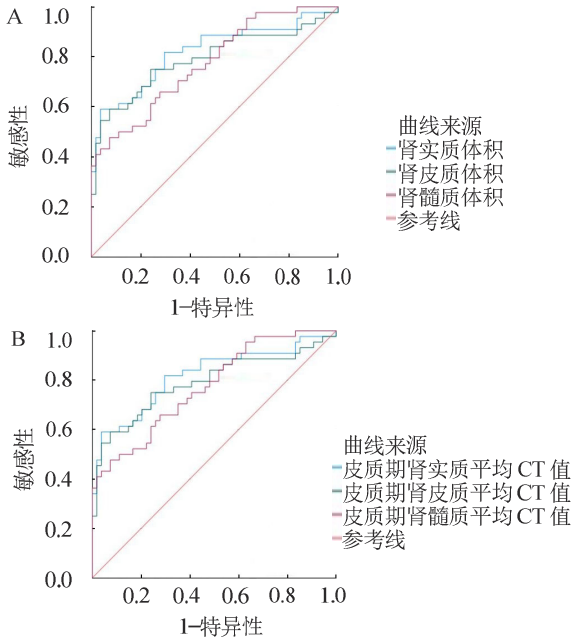
表 2　模型自动分割增强 CT 肾脏图像性能

分割部位	Dice 系数（%）	Jaccard 指数（%）
肾实质	94.05	89.17
肾皮质	81.86	80.34

表 3　两组肾脏影像参数比较

参数	对照组（n=54）	研究组（n=44）	t 值	P 值
V_{RP}（cm^3）	275.71±42.93	358.18±83.12	6.33	＜0.05
V_{RC}（cm^3）	177.03±33.67	233.43±63.02	5.66	＜0.05
V_{RM}（cm^3）	97.32±16.68	123.11±30.46	5.32	＜0.05
CT_{RP}（Hu）	111.57±18.04	104.21±19.59	2.02	＜0.05
CT_{RC}（Hu）	131.89±21.15	121.46±22.94	2.34	＜0.05
CT_{RM}（Hu）	75.25±9.98	71.24±9.70	2.01	＜0.05

注：V_{RP} 为肾实质体积，V_{RC} 为肾皮质体积，V_{RM} 为肾髓质体积，CT_{RP} 为皮质期肾实质平均 CT 值，CT_{RC} 为皮质期肾皮质平均 CT 值，CT_{RM} 为皮质期肾髓质平均 CT 值



注：A 为肾脏各部位容积预测糖尿病肾病早期肾损伤的受试者工作特征曲线，B 为皮质期肾脏各部位 CT 值预测糖尿病肾病早期肾损伤的受试者工作特征曲线

图 2　肾脏影像参数预测糖尿病肾病早期肾损伤的受试者工作特征曲线

推测DKD风险，但无法直接评价肾功能[18]。3D nnU-Net是一种基于U-Net的深度学习架构，具有高效的图像分割性能[5]。本研究采用基于该算法建立的肾脏图像AI自动分割模型，对DM患者增强CT图像中RP、RC及RM进行分割，直接计算其体积与皮质期CT值，结果显示，与对照组相比，DM患者的V_{RP}、V_{RC}和V_{RM}均显著增大，而CT_{RP}、CT_{RC}、CT_{RM}则降低，证实DM早期肾损伤存在肾脏高灌注和肾小球超滤过现象[19]。此外，早期DKD肾脏在血供灌注上未出现明显减低，说明缺氧是由耗氧增多导致，与文献[12]的结论是一致的。ROC曲线分析显示，该AI自动分割模型对DM早期肾损伤有预测价值，且其体积参数的诊断性能优于CT值参数。这提示该AI自动分割模型有助于DM患者肾脏损伤的早期诊断，为临床早期诊断提供了可靠工具。

综上所述，基于增强CT的肾脏图像自动分割模型有助于实现DM相关肾损伤的早期诊断。但是本研究存在一定局限性：(1)本研究数据来源于因其他疾病而进行腹部增强CT检查且肾功能正常的患者，并非每位患者均有肾穿刺的病理结果，仅依据eGFR、UACR等实验室指标进行诊断，可能存在非DM性肾损伤的干扰；(2)入组患者未区分1型和2型DM，结果准确性受到一定影响；(3)本研究为区域性单中心回顾性研究，存在选择偏倚。有待增加样本量，多中心研究研究验证。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 郑斯元、姚彬：实验操作、论文撰写；罗辉：数据整理、统计学分析；李强：研究指导、论文修改、经费支持

参 考 文 献

[1] International Diabetes Federation (IDF). IDF Diabetes Atlas[M]. 11th edition. Brussels, Belgium: International Diabetes Federation, 2025. [2025-07-01]. http://diabetesatlas.org.

[2] MŁYNARSKA E, BUŁAWSKA D, CZARNIK W, et al. Novel insights into diabetic kidney disease[J]. Int J Mol Sci, 2024, 25(18):10222.

[3] DE BOER I H, KHUNTI K, SADUSKY T, et al. Diabetes management in chronic kidney disease: A consensus report by the American diabetes association (ADA) and kidney disease: Improving global outcomes (KDIGO)[J]. Diabetes Care, 2022, 45(12): 3075-3090.

[4] LUCIANO R L, MOECKEL G W. Update on the native kidney biopsy: Core curriculum 2019[J]. Am J Kidney Dis, 2019, 73(3):404-415.

[5] 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: 16890.

[6] ELSAYED N A, ALEPPO G, BANNURU R R, et al. 2. diagnosis and classification of diabetes: Standards of care in diabetes—2024[J]. Diabetes Care, 2024, 47(Supplement_1): S20-S42.

[7] ELSAYED N A, ALEPPO G, BANNURU R R, et al. 11. chronic kidney disease and risk management: Standards of care in diabetes—2024[J]. Diabetes Care, 2024, 47(Supplement_1): S219-S230.

[8] MILLER W G, KAUFMAN H W, LEVEY A S, et al. National kidney foundation laboratory engagement working group recommendations for implementing the CKD-EPI 2021 race-free equations for estimated glomerular filtration rate: Practical guidance for clinical laboratories[J]. Clin Chem, 2022, 68(4): 511-520.

[9] 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.

[10] 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, 2023, 10(36): 2303966.

[11] ZHAO K X, SEELIGER E, NIENDORF T, et al. Noninvasive assessment of diabetic kidney disease with MRI: Hype or hope?[J]. J Magn Reson Imaging, 2024, 59(5): 1494-1513.

[12] 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.

[13] FENG Y Z, YE Y J, CHENG Z Y, et al. Non-invasive assessment of early stage diabetic nephropathy by DTI and BOLD MRI[J]. Br J Radiol, 2020, 93(1105): 20190562.

[14] SCHIEDA N, BLAICHMAN J I, COSTA A F, et al. Gadolinium-based contrast agents in kidney disease: Comprehensive review and clinical practice guideline issued by the Canadian association of radiologists[J]. Can Assoc Radiol J, 2018, 69(2): 136-150.

[15] YUAN X D, TANG W, SHI W W, et al. Determination of glomerular filtration rate (GFR) from fractional renal accumulation of iodinated contrast material: A convenient and rapid single-kidney CT-GFR technique[J]. Eur Radiol, 2018, 28(7): 2763-2771.

[16] 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.

[17] 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.

[18] LEE E J, CHO N J, KIM H, et al. Abdominal periaortic and renal sinus fat attenuation indices measured on computed tomography are associated with metabolic syndrome[J]. Eur Radiol, 2022, 32 (1): 395-404.

[19] MOGENSEN C E, CHRISTENSEN C K, VITTINGHUS E. The stages in diabetic renal disease. With emphasis on the stage of incipient diabetic nephropathy[J]. Diabetes, 1983, 32(Suppl 2): 64-78.

收稿日期：2025-08-18

（本文编辑：孙海儿）