

能谱CT在糖尿病足部动脉成像中小血管的图像质量应用探究

臧奕恺, 李静, 陆秀良, 严诚

Image Quality Improvement for Small Vessel in Diabetic Foot Arteriography Using Dual-energy Computed Tomography

ZANG Yikai, LI Jing, LU Xiuliang, and YAN Cheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2024.130>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

糖尿病性夏科氏足影像表现的回顾分析

A Retrospective Analysis of the Imaging Manifestations of Diabetic Charcot's Foot

CT理论与应用研究. 2020, 29(1): 39-48

CT血管造影联合血脂水平对糖尿病合并冠脉病变的预测价值

Predictive Value of CT Angiography Combined with Blood Lipid Level in Diabetes Mellitus with Coronary Artery Disease

CT理论与应用研究. 2020, 29(6): 711-717

虚拟单能图像与常规CT图像的图像质量对比

Comparison of Image Quality between Virtual Monochromatic Images and Conventional CT Images

CT理论与应用研究. 2022, 31(2): 219-226

双能量CT虚拟单能量成像在鉴别脊柱急性慢性压缩骨折中的应用价值

The Application Value of Dual-Energy CT Virtual Monoenergetic Imaging in the Differential Diagnosis of acute and Chronic Spinal Compression Fractures

CT理论与应用研究. 2021, 30(2): 209-216

基于深度学习的CT定量指标对糖尿病合并新型冠状病毒肺部感染的影像学研究

Imaging Study of COVID-19 Patients with Diabetes Mellitus by Computed Tomography Quantitative Indicators Based on Deep Learning

CT理论与应用研究. 2023, 32(3): 373-379

糖尿病患者冠状动脉粥样硬化的CTA特征分析

Analysis of CTA Characterisation of Coronary Atherosclerosis with Diabetes Mellitus

CT理论与应用研究. 2020, 29(3): 347-354



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

臧奕恺, 李静, 陆秀良, 等. 能谱 CT 在糖尿病足部动脉成像中小血管的图像质量应用探究[J]. CT 理论与应用研究 (中英文), 2025, 34(1): 83-88. DOI:10.15953/j.ctta.2024.130.
ZANG Y K, LI J, LU X L, et al. Image Quality Improvement for Small Vessel in Diabetic Foot Arteriography Using Dual-energy Computed Tomography[J]. CT Theory and Applications, 2025, 34(1): 83-88. DOI:10.15953/j.ctta.2024.130. (in Chinese).

能谱 CT 在糖尿病足部动脉成像中小血管 的图像质量应用探究

臧奕恺¹, 李静², 陆秀良¹, 严诚¹

1. 上海市复旦大学附属中山医院放射科, 上海 200032
2. 上海联影医疗科技有限公司, 上海 201815

摘要: 目的: 探究能谱 CT 在糖尿病患者足部动脉造影中小血管成像的应用价值。材料和方法: 前瞻性收集 2022 年 1 月至 2023 年 1 月于我院放射科行下肢血管 CTA 检查的 30 例糖尿病患者。在患者行下肢 CT 血管造影 (传统 CTA 组) 后, 立即采集足部血管的能谱图像, 获得最佳虚拟单能图像 (能谱 CTA 组), 将两组的足部图像进行比较, 以观察足部动脉小血管的显示并且计算对比噪声比 (CNR) 和信噪比 (SNR)。使用 5 分法对动脉走向和小血管显示进行评分。结果: 能谱 CTA 组中的 CNR 和 SNR 显著优于传统 CTA 组。能谱 CTA 组的胫后动脉和足背动脉的主观评分也显著高于传统 CTA 组 (均 > 3 分)。结论: 与传统 CTA 成像相比, 能谱成像能够提供更好的图像质量, 提高足动脉造影的诊断性能, 增加医生对疾病诊断的信心。

关键词: 能谱 CT; 足部血管 CT 造影; 虚拟单能图像; 图像质量; 糖尿病

DOI:10.15953/j.ctta.2024.130 中图分类号: R 814.42; R 587.1 文献标识码: A

Image Quality Improvement for Small Vessel in Diabetic Foot Arteriography Using Dual-energy Computed Tomography

ZANG Yikai¹, LI Jing², LU Xiuliang¹, YAN Cheng¹

1. Department of Radiology, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200023, China
2. Shanghai United imaging Healthcare Co., Ltd., Shanghai 201815, China

Abstract: Objective: To investigate the feasibility of dual-energy computed tomography (DECT) in foot arteriography for small vessel image quality in patients with diabetes. Methods: A total of 30 patients with diabetes were enrolled prospectively between January and November 2022 in the radiology department of our hospital, where DECT was acquired immediately after the CT angiography (routine CTA group) of the lower extremity. The optimal virtual monochromatic images (DECT group) were derived from the DECT data. Image quality was assessed by measuring the CT values and noise in foot arteries, and signal-to-noise ratio (SNR) and contrast-to-noise ratio (CNR) were calculated. The arterial course and small vessel display were scored using a 5-point scale (1, poor; 5, excellent). Results: The CNR and SNR were significantly better in the DECT group than in the routine CTA group. The DECT group received higher subjective scores on the posterior tibial artery and the foot arteries (all > 3) than did the routine CTA group. Conclusion: Compared to the routine CTA imaging, DECT offers superior image quality for foot arteriography, thereby enhancing the diagnostic accuracy of foot arteriography and bolstering physicians' confidence in disease diagnosis.

Keywords: dual-energy CT; foot angiography; virtual monoenergetic images; image quality; diabetes

糖尿病是以血糖代谢异常导致的机体血糖长期偏高的代谢性疾病, 并且伴有多种并发症^[1]。据统计, 在我国 50 岁以上的糖尿病患者糖尿病足的发

病率高达 8.1%^[2], 截肢率为 2.14%, 术后的 5 年死亡率高达 40%, 因此糖尿病足已成为糖尿病患者死亡、残疾的主要原因之一^[3]。研究表明由于动脉供

收稿日期: 2024-07-07。

第一作者: 臧奕恺, 男, 主管技师, 主要从事放射影像技术工作, E-mail: 13501928420@163.com。

通信作者: 严诚^{*}, 男, 副主任技师, 主要从事放射影像技术工作, E-mail: yan.cheng@zs-hospital.sh.cn。

血受阻引起营养不足, 导致糖尿病足周围神经病变和周围动脉疾病发生^[4-7]。因此, 糖尿病患者早期发现糖尿病足至关重要。

计算机断层扫描下肢血管造影 (lower extremities CT angiography, LECTA) 是一种可靠的无创伤性检查方法^[8]。然而, 对于下肢远端和足部血管距离远, 直径小, 血流相对缓慢而且对比剂大幅减少, 普通 CTA 对下肢远端和足部血管成像需优化^[9]。双能 CT 血管造影可以应对这个问题, 因为它利用高低两种能量进行成像, 在此基础上通过物质分离算法, 重建的虚拟单能图像 (virtual monochromatic image, VMI) 可以进一步模拟各级能量下不同物质的衰减从而实现了对比剂可检测性^[10-13], 并且 VMI 对于血管显示不佳图像能在噪声增加不显著的情况下改善血管的可视化及图像的信噪比和对比噪声比^[14]。尽管证明了双能量下肢 CT 优于普通 CTA, 但针对于远离中心的足动脉, 仍需要深度探究, 此次研究集中在 3 个动脉, 即胫后动脉、足背动脉和足底动脉^[15]。

1 资料与方法

1.1 一般资料

2022 年 1 月至 11 月期间, 从糖尿病患者中招募志愿者, 在预定进行下肢 CTA 检查后立即进行额外足部的能谱 CTA 检查。每位患者均获得了书面知情同意 (伦理编号: B2023-057R)。

最终被扫描的志愿者包括 30 名患者。其中, 10 例女性, 20 例男性; 平均年龄 (67.6 ± 7.5) 岁, 范围 56 ~ 87 岁; CTA 和 DECT 的平均剂量-长度积分别为 (425 ± 34) mGy·cm 和 (397 ± 41) mGy·cm。

1.2 方法

所有检查均使用 320 排 CT 系统 (uCT 960, 联影) 进行。该方案由两部分组成: 传统 CTA 范围从第 1 腰椎到末端脚趾, 能谱 CTA 范围从胫骨中部以下到脚趾。所有患者均采用相同的造影剂增强方案, 根据患者体重使用 90 至 120 mL 碘化造影剂 (碘帕醇, 370 mg 碘/mL, Bayer, Leverkusen), 通过静脉以 3 ~ 4 mL/s 的注射速率注射, 并以同样的速率使用 40 mL 生理盐水冲洗。用于团注跟踪的感兴趣区域 (region of interesting, ROI) 设置在腹主动脉上第 1 腰椎的水平处, 触发阈值为 200 HU, 延迟时间为 19 s。

传统 CTA 和能谱 CTA 均在螺旋模式下进行, 旋转时间为 0.5 s。对于传统 CTA, 使用 100 kV 管

电压、自动管电流 77 mAs、40 mm 纵向准直和 1.0 螺距。能谱 CT 采用 80 mm 准直, 螺距 0.24, 高能部分采用管电压 140 kVp, 管电流 80 mAs, 低能部分采用管电压 80 kVp, 管电流 332 mAs。

所有 CT 图像均采用常规可用的混合迭代重建算法 (Karl 3D) 进行图像重建, 层厚度为 1 mm, 层间隔为 1 mm。所有患者在 CTA 扫描中可以获得两个图像集: 100 kVp CTA 图像和一对分别为 80 kVp 和 140 kVp 的 DECT 图像, 其中后两个图像被转移到临床工作站进行双能量后处理。虚拟单能图像 (VMI) 的最佳能量被确定为 60 keV, 选取传统 CTA 图像和能谱中的 VMI 来比较图像质量。

1.3 图像分析

客观图像测量。足部动脉的图像质量由具有 8 年 CT 成像经验的放射科医生测量。所有感兴趣区域 (ROI) 均设置为尽可能大, 不包括血管边界、钙化或斑块。胫后动脉的 ROI 平均大小为 5 mm^2 , 足背动脉和足底内侧动脉的 ROI 平均大小为 3 mm^2 , 小腿肌肉的 ROI 平均大小为 100 mm^2 。每次测量均在 3 个不同的横断面图像上重复 3 次得出。为了评估图像对比度, 对小腿肌肉进行了额外的测量。

噪声定义为 ROI 内像素值的标准差 (standard deviation, SD), 单位为 HU。信噪比 (Signal-to-noise ratio, SNR) 和对比度噪声比 (contrast-to-noise ratio, CNR) 的计算方法:

$$\text{SNR} = \mu_{\text{动脉}} / \text{SD}_{\text{动脉}}, \quad (1)$$

$$\text{CNR} = (\mu_{\text{动脉}} - \mu_{\text{肌肉}}) / \text{SD}_{\text{肌肉}}, \quad (2)$$

其中, μ 是 ROI 内像素的平均值, SD 是 ROI 内像素的噪声。

主观图像评估。胫后动脉、足背动脉和足底内侧动脉的图像由两名具有 4 年和 6 年下肢 CT 成像经验的放射科医生采用双盲法进行主观评价。结合虚拟现实 (virtual reality, VR), 轴向 CT 图像和最大密度投影图像 (maximum intensity projection, MIP) 对图像质量进行评分^[16-18]。

对于动脉走向和动脉血管的对比度使用一个 5 分法的评分。5 分代表优秀: 轮廓清晰, 连续下行不间断, 直至远端细小分支, 血管内造影剂充盈极佳, 可完全用于诊断; 4 分代表良好: 轮廓结构无明显的不连续性或可见度丢失, 对比度良好, 充盈好, 诊断信心充足; 3 分代表一般: 轮廓具有小的不连续性且可见度尚可, 血管对比度适中, 不影响诊断; 2 分代表不足: 轮廓呈现不连续性且可见度

明显降低，对比度明显不足，诊断信心降低；1 分代表差：轮廓严重不连续性且几乎无可见度，无法用于诊断。主观评分大于 3 分代表可以用于临床诊断。

1.4 统计分析

应用 SPSS21.0 软件进行数据统计与分析。采用 Kolmogorov-Smirnov 检验验证数据的正态性，符合正态分布的计量资料以（平均值 ± 方差）表示，样本间比较采用相关样 t 检验。非正态分布的计量资料以中位数及四分位数 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示，样本间比较采用 Wilcoxon Signed Rank Test 检验比较两组图像的图像质量。

两名医生主观评价的一致性采用 Kappa 统计进行评价：Kappa = 0.75 ~ 1.00，一致性好；Kappa = 0.4 ~ 0.75，一致性一般；Kappa < 0.4，一致性较差。P < 0.05 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 客观图像质量

客观评价结果如表 1 所示。能谱 CTA 在足背动脉和足底内侧动脉上的 SNR 显著高于传统 CTA。能谱 CTA 在两个足部动脉上的 CNR 分别显著高于传统 CTA。

因此，对于足部动脉的图像质量而言，能谱 CTA 优于传统 CTA。

表 1 两组 CTA 图像质量客观评估
Table 1 Comparison of objective image quality scores between the two CTA groups

组别	项目	传统 CTA	双能 CTA	统计检验	
				Z	P
SNR	胫后动脉	6.66 ± 3.00	10.05 ± 6.40	-3.279	0.001
	足背动脉	4.57 ± 2.99	7.37 ± 3.12	-3.748	< 0.001
	足底动脉	6.20 ± 3.25	8.60 ± 4.51	-3.416	0.001
CNR	胫后动脉	16.63 ± 4.72	23.72 ± 9.53	-4.008	< 0.001
	足背动脉	12.67 ± 6.45	20.50 ± 7.89	-4.012	< 0.001
	足底动脉	13.73 ± 4.78	22.75 ± 9.13	-4.349	< 0.001

2.2 主观图像质量

两组的主观图像质量评分汇总如表 2。能谱 CTA 的胫后动脉和足部动脉的主观评分高于传统 CTA，而传统 CTA 的足背动脉和足底内侧动脉的主观评分均低于 3 分，即相应的图像质量无法满足诊断要求。医生对图像质量的评价高度一致，如表 2 所列（Kappa > 0.80），表明能谱 CTA 的主观图像质量优于传统 CTA。

图 1 显示两种不同成像方式对足部血管的显示，其中能谱 CTA 组对足部侧支循环的成像效果更清楚。此外，从 MIP 图上来看，CTA 的 MIP 图像显示的动脉比较模糊，但能谱 CTA 的 MIP 图像上显

示的动脉清晰度和对比度分辨率明显更优。

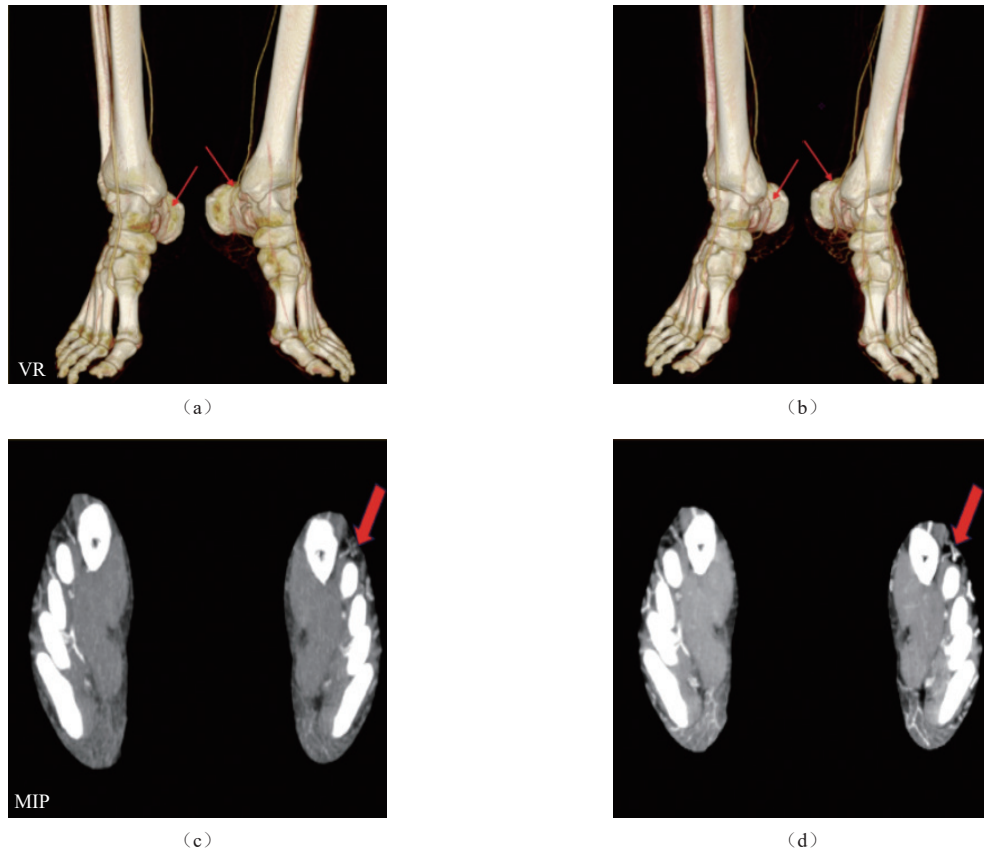
3 讨论

全球范围内目前预估有 5.37 亿人患有糖尿病，到 2045 年将有 7.83 亿人受到影响^[19]。糖尿病患者的动脉疾病特点是多节段和双侧病变，通常是长节段胫动脉闭塞，累及下肢末梢动脉，表现为膝下动脉闭塞性疾病症状^[20-22]。糖尿病足部并发症包括溃疡、坏疽和截肢，甚至死亡的风险，考虑到这些，更需要重点关注。

下肢动脉影像学检查包括：数字减影血管造影术（digital subtraction angiography, DSA）、磁共振成像（magnetic resonance imaging, MRI）和 CTA。

表 2 主观图像评分
Table 2 Comparison of subjective image quality scores between the two groups

血管走行与对比剂显示	传统 CTA		能谱 CTA		P
	Score (mean ± SD)	Kappa value	Score (mean ± SD)	Kappa value	
胫后动脉	3.45 ± 0.72	0.80	4.00 ± 0.84	0.88	0.001
足背动脉	2.14 ± 0.89	0.88	3.23 ± 1.05	0.86	0.001
足底动脉	2.33 ± 0.85	0.88	3.23 ± 1.20	0.87	0.001



注: 如红色箭头所示, (b) 能谱 CTA (60 keV VMI) 在 VR 和 MIP 中对足部小血管的显示更加清晰, (d) MIP 视图下, 足背和足底血管尤为明显。

图 1 同一患者的传统 CTA (a) 和 (c) 与能谱 CTA (b) 和 (d) 的足部血管图像质量对比

Fig.1 Comparison of foot vascular image quality between conventional CTA (a) and (c) and dual-energy CTA (b) and (d) of the same patient

DSA 已被用作诊断下肢动脉的“金标准”^[23]。然而, 由于血管直径小, DSA 在显示足部末梢血管分支方面存在局限性^[24]。MRI 有许多禁忌症, 检查时间长导致患者无法忍受并且容易出现运动伪影。

因此在本研究中, 使用两组患者评估下肢动脉, 一组使用 CTA, 另一组使用双能 CT, 证明了双能 CT 观察远端足动脉细小分支的可行性。VMI 的足部血管造影 CNR、SNR 和主观质量评分均高于传统 CTA。此外, 双能 CT 对跖底动脉显示效果极佳。

目前的结果表明, 双能 CT 是观察远端小血管最佳的解决方案。由于足部动脉的个体差异可能很大, 因此在解释当前结果时必须考虑不确定性。在这项研究中, CTA 和双能 CT 扫描是在同一患者进行数据采集, 且两种扫描方式的采集间隔时间切换极快并最大程度保持扫描的一致性。

临床上通过触诊检查足脉搏仍然是一种有用的临床方法^[24]。本研究检索了患者的临床信息, 包括临床检查者对足背动脉脉搏的触诊结果 ($n = 11$),

其中左足背动脉脉搏消失 8 例, 右足背动脉脉搏消失 7 例。CTA 未显示左足背动脉 3 例, 右足背动脉 3 例; DECT 均能显示并测得左足背动脉和右足背动脉。因此, 双能 CT 可作为临床足背动脉搏动的辅助检查。

本研究的局限性。① 未评估腹髂段和股腘段的 CTA, 腹髂段和股腘段病变可能影响足动脉造影; ② 鉴于糖尿病患者对比剂诱发肾病风险增加, 减少对比剂剂量的双能 CT 性能仍然是值得进一步探索的课题; ③ 此研究未与其它成像手段进行对比, 未对足动脉进行阻塞程度的诊断。

总之, 本研究结果证实能谱 CT 相比于普通 CTA 提供了优级图像质量并提高了下肢远端及足动脉造影的诊断性能。对于下肢以外的小血管和造影剂减少的区域, 能谱 CT 通常是一种有利的成像解决方案。

参考文献

[1] MISHRA S C, CHHATBAR K C, KASHIKAR A,

- et al. Diabetic foot[J]. *British Medical Journal*, 2017, 359(S1): 1-7.
- [2] 纪东华, 刘暴. 膝下动脉血运重建的临床实践中国专家共识[J]. *中国循环杂志*, 2024, 39(2): 116-122. DOI:10.3969/j.issn.1000-3614.2024.02.002.
- JI D H, LIU B. Chinese expert consensus on the standards of practice on below-the-knee arteries revascularisation[J]. *Chinese Circulation Journal*, 2024, 39(2): 116-122. DOI:10.3969/j.issn.1000-3614.2024.02.002. (in Chinese).
- [3] 孙旭, 王东军, 朱朝军, 等. 中医外治视域下糖尿病足研究关键问题及思考[J]. *时珍国医国药*, 2023, 34(12): 2984-2986.
- [4] COLE J B, FLOREZ J C. Genetics of diabetes mellitus and diabetes complications[J]. *Nature Review Nephrology*, 2020, 16(7): 377-390. DOI:10.1038/s41581-020-0278-5.
- [5] FORBES J M, COOPER M E. Mechanisms of diabetic complications[J]. *Physiological Review*, 2013, 93(1): 137-188. DOI:10.1152/physrev.00045.2011.
- [6] CORRIERE M, ROOPARINESINGH N, KALYANI R R. Epidemiology of diabetes and diabetes complications in the elderly: An emerging public health burden[J]. *Current Diabetes Report*, 2013, 13(6): 805-813. DOI:10.1007/s11892-013-0425-5.
- [7] SHARMA S, SCHAPER N, RAYMAN G. Microangiopathy: Is it relevant to wound healing in diabetic foot disease?[J]. *Diabetes/Metabolism Research and Review*, 2020, 36(S1): e3244. DOI:10.1002/dmrr.3244.
- [8] 郭晓曦, 林禹, 吕绍茂, 等. 下肢动脉双能量 CT 成像不同能量融合图像与单能量图像的对比研究[J]. *临床放射学杂志*, 2021, 40(2): 363-368.
- GUO X X, LIN Y, LV S M, et al. A comparative study of different fusion image and monoenergetic image in dual-energy CT of lower extremity artery[J]. *Journal of Clinical Radiology*, 2021, 40(2): 363-368. (in Chinese).
- [9] 刘衡, 冉启胜, 夏传江, 等. 下肢动脉血管造影技术对糖尿病足患者末梢动脉准确显示的应用研究[J]. *重庆医科大学学报*, 2019, 44(10): 1351-1354.
- LIU H, RAN Q S, XIA C J, et al. Application of CT-angiography in accurate display of peripheral arteries in patients with diabetic foot[J]. *Journal of Chongqing Medical University*, 2019, 44(10): 1351-1354. (in Chinese).
- [10] HSIEH J, FLOHR T. Computed tomography recent history and future perspectives[J]. *Journal of Medical Imaging*, 2021, 8(5): 52109.
- [11] MCCOLLOUGH C H, LENG S, YU L, et al. Dual-and multi-energy CT: Principles, technical approaches, and clinical applications[J]. *Radiology*, 2015, 276(3): 637-653. DOI:10.1148/radiol.2015142631.
- [12] JACOBSEN M C, THROWER S L, GER R B, et al. Multi-energy computed tomography and material quantification: Current barriers and opportunities for advancement[J]. *Journal of Medical Physics*, 2020, 47(8): 3752-3771. DOI:10.1002/mp.14241.
- [13] 王文杰, 陈平, 潘晋孝, 等. 基于参考组分的双能 CT 成像方法[J]. *CT 理论与应用研究*, 2021, 30(1): 61-69. DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.01.06.
- WANG W J, CHEN P, PAN J X, et al. Dual-energy CT imaging method based on reference components[J]. *CT Theory and Applications*, 2021, 30(1): 61-69. DOI:10.15953/j.1004-4140.2021.30.01.06. (in Chinese).
- [14] 梁洪伟, 周晔, 张志伟, 等. 双能 CT 虚拟单能级成像显示胰周血管: 与线性融合图像对照研究[J]. *中国医学计算机成像杂志*, 2022, 28(1): 56-62. DOI:10.3969/j.issn.1006-5741.2022.01.012.
- LIANG H W, ZHOU Y, ZHANG Z W, et al. Dual-energy CT with virtual monoenergetic images in demonstration of peripancreatic vessels: Comparison with polyenergetic images[J]. *Chinese Computed Medical Imaging*, 2022, 28(1): 56-62. DOI:10.3969/j.issn.1006-5741.2022.01.012. (in Chinese).
- [15] 侯凯, 吕鹏, 顾君英, 等. 实时阈值手动触发技术在下肢动脉 CT 血管成像中的临床应用价值[J]. *中国临床医学*, 2016, 23(1): 81-85.
- HOU K, LV P, GU J Y, et al. The clinical application value of real time threshold manual triggering technique in the lower extremity arterial CT angiography[J]. *Chinese Journal of Clinical Medicine*, 2016, 23(1): 81-85. (in Chinese).
- [16] WICHMANN J L, GILLOTT M R, de CECCO C N, et al. Dual-energy computed tomography angiography of the lower extremity runoff: Impact of noise-optimized virtual monochromatic imaging on image quality and diagnostic accuracy[J]. *Investigative Radiology*, 2016, 51(2): 139-146. DOI:10.1097/RLI.0000000000000216.
- [17] JIA X, LI X, LI J, et al. Improving diagnostic accuracy for arteries of lower extremities with dual-energy spectral CT imaging[J]. *European Journal of Radiology*, 2020, 128: 109061. DOI:10.1016/j.ejrad.2020.109061.
- [18] WANG G, ZHAO D, LING Z, et al. Evaluation of the best single-energy scanning in energy spectrum CT in lower extremity arteriography[J]. *Experimental and Therapeutic Medicine*, 2019, 18(2): 1433-1439.
- [19] SUN H, SAEEDI P, KARURANGA S, et al. IDF diabetes atlas: Global, regional and country-level diabetes prevalence estimates for 2021 and projections for 2045[J/OL]. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 2022, 183: 109-119.
- [20] JUDE E B, OYIBO S O, CHALMERS N, et al.

- Peripheral arterial disease in diabetic and nondiabetic patients: A comparison of severity and outcome[J]. *Diabetes Care*, 2001, 24(8): 1433-1437. DOI:10.2337/diacare.24.8.1433.
- [21] GOLLEDGE J. Update on the pathophysiology and medical treatment of peripheral artery disease[J]. *Nature Reviews Cardiology*, 2022, 19(7): 456-474. DOI:10.1038/s41569-021-00663-9.
- [22] LOW WANG C C, BLOMSTER J I, HEIZER G, et al. Cardiovascular and limb outcomes in patients with diabetes and peripheral artery disease: The EUCLID Trial[J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2018, 72(25): 3274-3284. DOI:10.1016/j.jacc.2018.09.078.
- [23] 任宁, 李启富, 程庆丰. 糖尿病周围动脉疾病的诊疗进展[J]. *重庆医学*, 2012, 41(33): 3547-3549. DOI:10.3969/j.issn.1671-8348.2012.33.037.
- [24] American Diabetes Association. Microvascular complications and foot care: Standards of medical care in diabetes[J]. *Diabetes Care*, 2018, 41(S1): S105-S118.