



能量CT联合标准化碘含量在评估下肢动脉支架狭窄程度中的诊断价值

黄晓颖, 郭方凯, 王鹏朝, 单春辉, 暴云锋

Diagnostic Value of Dual-energy Computed Tomography Combined with Standardized Iodine Content in Assessing Restenosis of Lower Extremity Artery Stents

HUANG Xiaoying, GUO Fangkai, WANG Pengchao, SHAN Chunhui, and BAO Yunfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2024.141>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

优化高心率时支架CT成像的体模实验研究

A Phantom Experimental Study on Improving the Imaging Quality of Stent CT at a Fast Heart Rate

CT理论与应用研究. 2024, 33(5): 594–600

低管电压结合迭代重建在下肢动脉CT血管成像中的临床应用

Clinical Application of Low Tube Voltage Combined with Iterative Reconstruction in Lower Extremity Arterial CTA

CT理论与应用研究. 2020, 29(1): 55–60

下肢动脉CE-MRA血管成像钆对比剂最佳用量研究

Study on the Optimal Dosage of Gadolinium Contrast Agent for Lower Extremity Artery CE-MRA Angiography

CT理论与应用研究. 2022, 31(2): 203–210

CT评价继发性下肢淋巴水肿分级的价值研究

Evaluation of CT Imaging in Secondary Lower Extremity Lymphedema: A Prospective Study

CT理论与应用研究. 2022, 31(2): 237–243

能谱CT多物质解析评价继发性下肢淋巴水肿分级

Spectral CT Multi-material Decomposition in Evaluation of Secondary Lower Extremity Lymphedema: A Prospective Study

CT理论与应用研究. 2022, 31(3): 365–371

双源双能量CT碘值测定对诊断胃癌术前T分期的应用价值分析

Application Value of Dual-source Dual-energy CT Iodine Determination for Preoperative T Staging of Gastric Cancer

CT理论与应用研究. 2019, 28(3): 347–354



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄晓颖, 郭方凯, 王鹏朝, 等. 能量 CT 联合标准化碘含量在评估下肢动脉支架狭窄程度中的诊断价值[J]. CT 理论与应用研究 (中英文), 2024, 33(6): 701-708. DOI:10.15953/j.ctta.2024.141.

HUANG X Y, GUO F K, WANG P C, et al. Diagnostic Value of Dual-energy Computed Tomography Combined with Standardized Iodine Content in Assessing Restenosis of Lower Extremity Artery Stents[J]. CT Theory and Applications, 2024, 33(6): 701-708. DOI:10.15953/j.ctta.2024.141. (in Chinese).

能量 CT 联合标准化碘含量在评估下肢动脉支架狭窄程度中的诊断价值

黄晓颖^a, 郭方凯^a, 王鹏朝^a, 单春辉^a, 暴云锋^b

河北省人民医院 a) 医学影像科; b) 体检中心, 石家庄 050051

摘要: 目的: 探讨双能量 CT (DECT) 联合标准化碘含量 (NIC) 在评估下肢动脉支架狭窄程度中的诊断价值。方法: 回顾性收集 2020 年 1 月至 2024 年 6 月于我院行双能量下肢 CTA 检查的支架植入患者 32 例, 共 48 枚支架。均在 CTA 检查后 1 周内行 DSA 检查。双能数据分别重建 50~90keV 间隔 10keV 的 5 组虚拟单能量图像和 1 组最佳非线性融合 (OCM) 图像, 共 6 组; 测量并比较支架内管腔 CT 值、SD 值、CNR、SNR 及 NIC 值及进行图像质量主观评价; 诊断管腔狭窄率 and 是否达到支架内再狭窄 (ISR), 并以 DSA 为金标准, 评价管腔狭窄率和 ISR 的诊断准确性。结果: ① 客观评价: 50keV 时 SNR、CNR 值最高, 随着单能量能级上升逐渐降低; OCM 与 60keV 两组图像的 SNR、CNR 值仅低于 50keV, 比较差异无统计学意义。② 主观评价: 6 组主观评价得分比较差异有统计学差异。OCM (4.23 ± 0.89) 和 60keV (4.19 ± 0.64) 两组图像评分最高且差异无统计学意义。③ 与 DSA 相比, DECT 在管腔狭窄率和 ISR 的诊断中一致性均一般 (Kappa = 0.563 和 Kappa = 0.654)。DECT 联合 NIC 在 ISR 诊断中一致性良好 (Kappa = 0.830), NIC 数值分别是支架无明显狭窄病变 (1.02 ± 0.14)、ISR (0.73 ± 0.14)。闭塞性病变 (0.18 ± 0.09), 联合诊断的敏感性、特异性、阳性预测值、阴性预测值和诊断准确率分别为 94.11%、85.71%、94.11%、85.71% 和 91.66%。结论: DECT 重组 60keV 和 OCM 图像用于评估下肢动脉支架图像质量最佳, 进一步联合应用 NIC 定量分析可提高支架内管腔狭窄率和 ISR 诊断准确率, 具有较高的诊断价值。

关键词: 能量 CT; CT 血管成像; 下肢动脉; 支架内再狭窄

DOI:10.15953/j.ctta.2024.141

中图分类号: R814; R543

文献标识码: A

下肢动脉硬化闭塞症 (arteriosclerosis obliterans, ASO) 也称下肢外周动脉疾病 (peripheral arterial disease, PAD), 是一种常见的外周血管疾病。血管腔内介入治疗如经皮球囊扩张成形术和支架植入术是目前最常用的血运重建方法^[1-3], 但介入术后血管腔结构改变, 导致支架内再狭窄 (in-stent restenosis, ISR) 甚至闭塞发生率较高, 因此准确评估支架内管腔狭窄程度、避免动脉再闭塞至关重要^[4-5]。下肢 CT 血管造影 (CT angiography, CTA) 作为诊断下肢动脉狭窄及闭塞的首选影像学检查方法, 与 DSA 有着较高的一致性^[6-7], 但是支架材质多为镍钛合金等金属, CTA 检查时放射状伪影较大, 增加了支架内狭窄程度判定难度。

双能量 CT (dual-energy CT, DECT) 可以提供不同能级虚拟单能量和最佳非线性融合图像, 其中低能级图像可提高强化效果抑制噪声, 高能级图像可有效抑制线束硬化效应^[8-9], 同时双能量数据还可以进行标准化碘含量 (normalized iodine concentration, NIC) 量化分析摄碘能力^[10-11]。

以往研究多为支架显示的最佳虚拟单能量或最优重建算法等^[12-14], 进一步应用 NIC 量化分析的相关研究较少。因此, 本研究通过对 DECT 的不同重组图像进行对比, 探究下肢动脉支架显示的最佳能级, 分析支架腔内 NIC 数值, 探讨两者联合应用在支架内管腔狭窄程度准确性评估中的诊断价值。

收稿日期: 2024-07-21。

1 材料和方法

1.1 一般资料

回顾性收集 2020 年 1 月至 2024 年 6 月于我院行双能量下肢 CTA 检查的支架植入患者 32 例, 男 26 例、女 6 例, 平均 (69.50 ± 7.60) 岁。排除标准: ① 碘对比剂过敏; ② 患侧有除下肢动脉支架植入术外的动脉手术史; ③ 图像有明显运动伪影; ④ 影像资料不完整; ⑤ 双能量 CTA 检查与之后 DSA 检查时间间隔超过 1 周。

32 例患者图像质量均满足诊断要求, 其中 8 例患者植入 2 枚支架, 4 例患者植入 3 枚支架, 共 48 枚支架。本研究所有患者及家属均签署检查知情同意书。

1.2 仪器与方法

采用西门子第 3 代双源 CT (SOMATOM Force; Siemens) 行双能量下肢 CTA 检查。扫描参数: 双能量扫描管电压 80/Sn 150 kVp, 参考管电流 120/67 mAs, 开启 CARE Dose 4D, 探测器准 64×0.6 mm, 转速 0.5 s/r, 螺距 0.7, 使用迭代重建 (ADMIRE 3), 图像层厚 1 mm, 重建间隔 0.7 mm。

采用阈值触发扫描技术, 监测膝关节层面动脉, 当目测到监测层面内动脉明显强化显影时手动触发, 触发后延迟 4 s 开始头足向扫描, 扫描范围腹主动脉 (L3 水平) 至足尖。对比剂使用碘佛醇 (含碘 350 mg/mL), 采用德国欧力奇双筒高压注射器经肘正中静脉注射, 个性化对比剂注射方案, 用量 0.8~1.0 mL/kg, 注射流速 4.5~5.0 mL/s, 随后以相同流率注射 30 mL 的生理盐水冲洗。

1.3 图像处理与数据测量

将双能量下肢 CTA 扫描的图像数据传输至 Syngo.via 后处理工作站, 在双能量模式下重组获得 6 组图像, 分别是 50~90 keV (间隔 10 keV) 的 5 组虚拟单能量图像和经过对比优化后的 1 组最佳非线性融合 (optimum contrast, OCM) 图像^[15]。

在虚拟平扫模式下生成碘图, 分别测量腹主动脉、支架近端、远端 (5 mm 内) 和支架血管标准轴位层面支架腔内的碘含量。若支架腔内可见病变, 则测量病变区碘含量; 若支架腔内未见病变, 则测量支架近、中、远段 3 处碘含量取平均值, 最后将所测碘含量分别与腹主动脉碘含量相比即为支架内管腔的标准化碘含量 NIC^[10, 16]。

1.4 图像质量评价标准

客观评价标准。分别在 50~90 keV 和 OCM 6 组图像上放置 ROI, ROI 位置选择支架标准轴位断面中心, 大小约占管腔内可视范围的 1/2~2/3, 注意避开血管壁、斑块、支架及伪影等, 测量 ROI 的 CT 值、同层面肌肉 CT 值及标准差 (standard deviation, SD), 将肌肉 CT 值的标准差作为图像背景噪声。测量 3 次取平均值, 确保结果的一致性和稳定性。完全闭塞的支架不进行客观评价^[12]。计算信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 和对比噪声比 (contrast-to-noise ratio, CNR):

$$\text{SNR} = \text{CT}_{\text{血管}} / \text{SD}_{\text{血管}}, \quad (1)$$

$$\text{CNR} = (\text{CT}_{\text{血管}} - \text{CT}_{\text{肌肉}}) / \text{SD}_{\text{肌肉}}。 \quad (2)$$

主观评价标准。采用 4 分制: 4 分 (支架、血栓边界清晰, 对比度好), 3 分 (支架边界欠清晰, 支架、管腔、血栓三者可模糊分辨), 2 分 (支架边界模糊, 管腔、血栓不可分辨), 1 分 (三者均不可分辨)^[14]。

1.5 狭窄程度分析

选择主观评价得分最高组图像的血管横断面进行支架狭窄程度分析。① 管腔直径狭窄率^[17-18], 分为 5 个等级: 0 级: 通畅无狭窄 (0%); 1 级: 轻度狭窄 (1%~49%); 2 级: 中度狭窄 (50%~74%); 3 级: 重度狭窄 (75%~99%); 4 级: 闭塞 (100%)。② 支架内再狭窄 (ISR) 判

定^[19-20]：支架及两端 5 mm 范围内管腔狭窄程度 $\geq 50\%$ （狭窄率 2~4 级），此时为诊断结果阳性。

同一支架内存在多处狭窄时，取其级别最重的狭窄进行分析。以一周内 DSA 结果为参考金标准，分析支架内狭窄程度的诊断准确性。主观评价和狭窄程度分析均由两名具有 5 年以上丰富工作经验的诊断医生进行双盲评价，意见不一致时协商解决。

1.6 统计学分析

采用 SPSS 25.0 统计分析软件。符合正态分布计量资料以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示，多组间比较采用单因素方差分析或 welch 方差分析，两两比较采用 LSD 或 Games-Howell 检验。非正态分布资料采用中位数（上下四分位数）表示，采用非参数 Wilcoxon 检验。

采用 Kappa 检验分析 DECT 与 DSA 对支架内狭窄程度评价的一致性：Kappa ≥ 0.75 为一致性良好， $0.40 \leq \text{Kappa} < 0.75$ 为一致性一般，Kappa < 0.4 为一致性差。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 客观评价结果

共计 48 枚支架纳入研究，其中 19 枚支架完全闭塞不进行客观评价，余 29 枚支架客观评价结果比较：6 组图像的支架内血管腔的 SNR 值差异无统计学意义，CT 值、SD 值、CNR 值的差异均有显著统计学意义；50 keV 时各项数值最高，50~90 keV 随着单能量能级上升逐渐降低；OCM 与 60 keV 两组图像的 SNR、CNR 值次之，比较差异无统计学意义（表 1）。

表 1 6 组图像质量客观评价结果比较 (n = 29)
Table 1 Comparison of objective evaluation results of image quality for six groups (n = 29)

1 分组	OCM	50 keV	60 keV	70 keV	80 keV	90 keV	F	P
支架 CT 值/HU	935.03 $\pm$ 370.58	1170.37 $\pm$ 454.12	936.79 $\pm$ 356.44	728.37 $\pm$ 303.79	583.06 $\pm$ 267.78	495.44 $\pm$ 249.53	15.19	< 0.001
血管 CT 值/HU	493.72 $\pm$ 152.94	657.79 $\pm$ 178.10	502.96 $\pm$ 146.59	374.31 $\pm$ 101.84	291.586 $\pm$ 90.81	233.93 $\pm$ 66.14	42.57	< 0.001
肌肉 SD 值/HU	20.68 $\pm$ 3.56	24.48 $\pm$ 5.82	20.96 $\pm$ 5.87	17.10 $\pm$ 4.26	15.59 $\pm$ 3.13	15.20 $\pm$ 3.74	20.65	< 0.001
SNR	21.50 $\pm$ 13.78	21.94 $\pm$ 11.09	21.54 $\pm$ 10.10	21.62 $\pm$ 11.14	21.03 $\pm$ 10.15	20.03 $\pm$ 10.82	0.75	1.00
CNR	21.86 $\pm$ 12.21	26.03 $\pm$ 10.03	22.82 $\pm$ 9.04	19.42 $\pm$ 7.95	17.31 $\pm$ 6.82	12.93 $\pm$ 5.63	11.53	< 0.001

2.2 主观评价结果

48 枚支架进行主观评价。OCM (4.23 $\pm$ 0.89) > 60 keV (4.19 $\pm$ 0.64) > 70 keV (4.06 $\pm$ 0.29) > 50 keV (3.81 $\pm$ 0.41) > 80 keV (3.53 $\pm$ 0.24) > 90 keV (3.24 $\pm$ 0.51)，差异有统计学差异。其中 OCM 和 60 keV 两组图像评分最高，差异无统计学意义（图 1）。

2.3 标准化碘浓度结果

48 枚支架的 NIC 结果。14 枚未见明显狭窄病变，34 枚可见狭窄病变，其支架内血管腔 NIC 值分别为 (1.02 $\pm$ 0.14)、(0.41 $\pm$ 0.29)。在可见狭窄的 34 枚支架中，其支架内完全闭塞和再狭窄（管腔狭窄率 $\geq 50\%$ ）的 NIC 值分别为 (0.18 $\pm$ 0.09)、(0.73 $\pm$ 0.14)（图 2）。

2.4 支架狭窄程度分析结果

32 例患者被纳入研究，共 48 枚支架，支架及血管腔内显影清晰达到评估要求。

支架内管腔狭窄率。诊断符合率分别为总体是 68.75% (33/48)，通畅为 91.7% (11/12)，轻度狭窄为 0.0% (0/2)，中度狭窄为 33.3% (1/3)，重度狭窄为 45.5% (5/11)，完全闭塞为 80.0% (16/20)。一致性检验得 Kappa = 0.563，提示 DECT 评估支架内血管腔狭窄率与 DSA 一致性一般（表 2）。

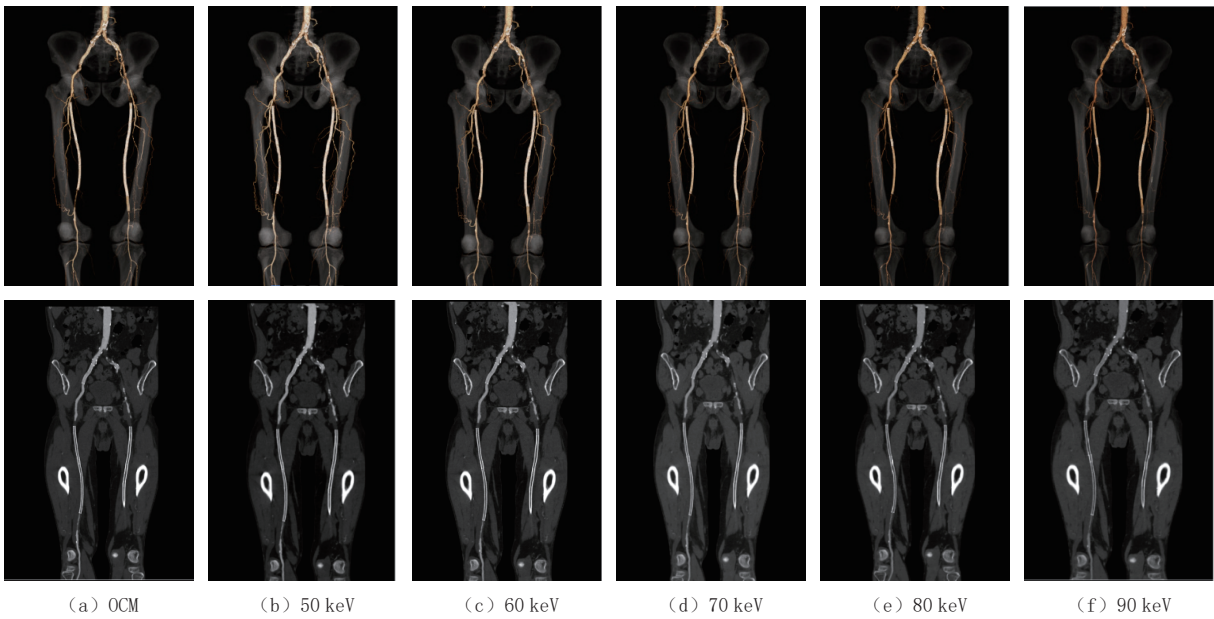


图 1 患者男, 65 岁, 右侧髂动脉及双侧股动脉支架植入术后, CTA 在不同能级和 OCM 图像的容积再现和曲面重组后处理图像, 60 keV 和 OCM 两组图像最佳

Fig.1 A 65-year-old male patient with post stent implantation in the right iliac artery and bilateral femoral arteries. CTA post-processing images with volume rendering and curved planar reformation at different energy levels as well as OCM images

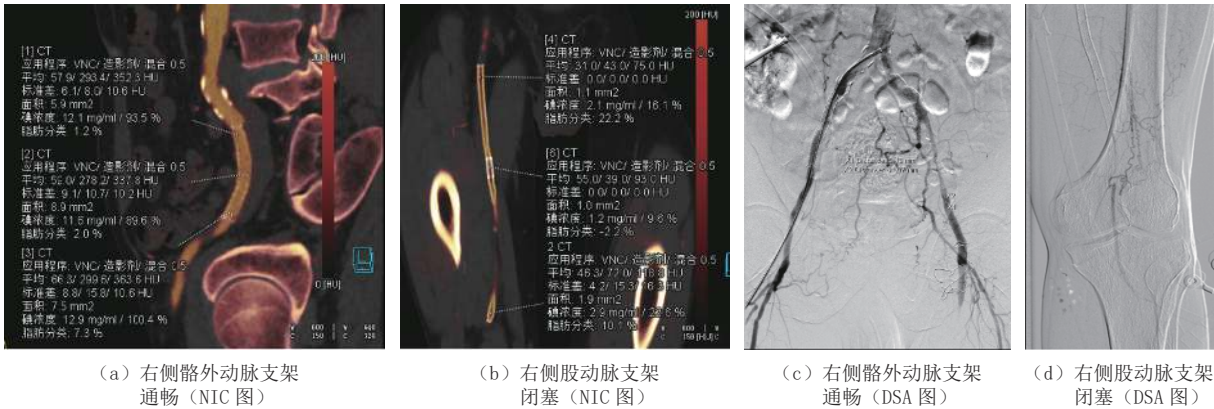


图 2 同一患者的 NIC 测量与 DSA 示意图

Fig.2 Diagram of NIC measurement and DSA for the same patient

表 2 支架内血管腔狭窄率结果比较 ($n=48$)

Table 2 Comparison of the results of vascular lumen stenosis rate within stents ($n=48$)

DECT	DSA					合计
	通畅	轻度	中度	重度	闭塞	
通畅	11	0	1	1	0	13
轻度	0	0	1	1	0	2
中度	1	2	1	1	0	5
重度	0	0	0	5	4	9
闭塞	0	0	0	3	16	19
合计	12	2	3	11	20	48

注: 通畅无狭窄: 0%; 轻度狭窄: 1%~49%; 中度狭窄: 50%~69%; 重度狭窄: 70%~99%; 闭塞: 100%。

支架内再狭窄 (ISR)。DECT 与 DSA 的诊断符合率分别为总体是 85.42% (41/48), 阴性无狭窄为 78.57% (11/14), 阳性再狭窄为 88.24% (30/34)。一致性检验得 Kappa = 0.654, 提示 DECT 评

估支架内再狭窄与 DSA 一致性一般，稍高于狭窄率评价一致性。其中有 7 枚支架评估结果不一致（假阳性 3 枚，假阴性 4 枚），通过 NIC 对不一致图像再次定量分析，不一致减少为 4 枚（假阳性 2 枚，假阴性 2 枚）。一致性检验得到 $Kappa = 0.830$ ，提示 DECT + NIC 评估支架内再狭窄与 DSA 一致性良好（表 3）。支架内狭窄诊断效能比较中 DECT 联合 NIC 的敏感性、特异性、阳性预测值、阴性预测值和诊断准确率均高于 DECT 单独评价（表 4）。

表 3 支架内再狭窄结果比较 ($n = 48$)
Table 3 Comparison of in-stent restenosis results ($n = 48$)

DECT	DSA		合计	Kappa	DECT + NIC	DSA		合计	Kappa
	阴性	阳性				阴性	阳性		
阴性	11	4	15	0.654	阴性	12	2	14	0.830
阳性	3	30	33		阳性	2	32	34	
合计	14	34	48		合计	14	34	48	

注：阳性：支架内再狭窄，支架及两端 5 mm 范围内管腔狭窄程度 $\geq 50\%$ （狭窄率 2~4 级）；阴性：支架内无狭窄，管腔狭窄程度 $< 50\%$ （狭窄率 0~1 级）。

表 4 支架内再狭窄的诊断效能比较
Table 4 Comparison of diagnostic efficacy for in-stent restenosis

组别	敏感性/%	特异性/%	阳性预测值/%	阴性预测值/%	诊断准确度/%
DECT	88.24	78.57	90.90	73.33	85.41
DECT + NIC	94.11	85.71	94.11	85.71	91.66

3 讨论

下肢动脉硬化闭塞症好发于老年人，且发病率逐年上升。血管腔内介入治疗并发症发生率及死亡率均较低，是改善患者下肢缺血症状最为常用的血运重建方法^[3-5]。介入治疗的支架常因血管内皮损伤、新生动脉粥样硬化改变、细胞炎症反应等导致支架内再狭窄（ISR）的发生，介入术后一年内继发 ISR 的发生率为 30%~55%，早期发现及治疗 ISR 显得尤为重要^[3,12]。下肢 CTA 检查是术前制定血管重建方案的常用无创检查，但在术后复查中会因金属支架产生的放射线束硬化伪影引起溢出效应^[12-14]，造成支架边界不清，无法准确评估血管壁附壁血栓、钙化斑块和支架内血流通畅情况。

能量 CT 成像是在两个或更多的能量下获取物质衰减信息，不同组织的能量依赖性不同，可基于光子吸收的差异对不同组织进行鉴别和分类，现广泛用于临床^[8]。应用于支架植入术后的双能量 CTA 可重建虚拟单能量图像，低 keV 图像在保证碘衰减的前提下进行噪声优化，高 keV 图像可以有效减少支架引起的线束硬化伪影、晕状伪影和图像噪声，提高管腔狭窄程度评估的准确度和支架内管腔的可视化^[21-23]。

目前只有少数研究^[12,14,22]使用 DECT 和虚拟单能量成像来评估下肢动脉支架狭窄情况，并且结果并不相同，显示最佳 keV 范围从至 50 keV 到 80 keV。基于此，本研究选择 50~90 keV 单能量和最佳非线性融合图像（OCM）共 6 组图像进行分析。48 枚支架中 19 枚完全闭塞不进行客观评价，结果表明 50 keV 时客观评价的 CNR 值和 SNR 值高，其次是 60 keV 和 OCM，并且两组差异并无统计学意义；同时主观评价得分最高也是 60 keV 和 OCM，分别是 OCM (4.23 ± 0.89) $>$ 60 keV (4.19 ± 0.64)，由于 50 keV 时支架 CT 值高达 (1170.37 ± 454.12) HU，支架-血管密度差值大，晕状伪影明显，因此主观评分 (3.81 ± 0.41) 较低。

综合主、客观评价结果和支架 CT 值，本研究推荐 60 keV 和 OCM 两组作为支架内管腔显示的最佳图像，这与 Almutairi 等^[22]研究结果的 72 keV 和魏淼等^[14]的 80 keV 稍有不同，但与胡莹莹等^[24]推荐腘动脉及以近节段最佳单能量 60 keV，以远节段 50 keV 相符，考虑主要是支架内管腔直径较小和支架材质不同的影响。因此，针对不同支架内径、材质、厚度等对支架内管腔显示影响还可进一步探

究。同时 OCM 图像采用两种高低能量图像非线性融合技术,可有效提高支架管腔强化效果,增强对比,是本研究 OCM 图像评价高于其他单能量图像的理论基础,也与郭晓曦等^[15]研究相符。

由于下肢支架 CTA 成像不仅要显示外周血管情况,更要评价支架细节和腔内狭窄,而支架金属伪影导致腔内衰减程度不一,仅依靠 DECT 提供的不同能级和 OCM 图像无法完全解决再狭窄诊断阳性率高于真实情况的问题。有研究报道^[11,16]联合应用 NIC 定量分析可以避免常规 CT 值易受金属伪影及容积效应影响问题。目前国内外有关 NIC 在评价支架狭窄程度方面的相关报道较少,且多数是对冠状动脉支架腔内碘含量的研究^[10]。本研究基于 DECT 数据进行下肢动脉支架内 NIC 定量分析,同时根据碘分布差异进行彩色编码,突出显示支架内管腔的不同狭窄程度。同时在支架狭窄程度分析上首先采用符合影像检查常用的管腔狭窄率进行分级,其次参考相关标准与临床应用^[5,19],再次对是否达到支架内再狭窄 (ISR) 进行判定。

本研究结果中,DECT 在管腔狭窄率和 ISR 的诊断结果与 DSA 的 Kappa 一致性检验分别是 $k=0.563$ 和 $k=0.654$,一致性均一般。其中有 7 枚支架评估结果不一致(假阳性 3 枚,假阴性 4 枚),不一致性主要在中、重度狭窄与闭塞的诊断上,考虑主要为支架的放射状伪影导致管腔内 CT 值增高。

通过 NIC 对不一致图像再次定量分析,NIC 值分别是未见狭窄病变为 (1.02 ± 0.14) 、再狭窄为 (0.73 ± 0.14) 、完全闭塞为 (0.18 ± 0.09) ,不一致减少为 4 枚(假阳性 2 枚,假阴性 2 枚),Kappa 值上升至 0.830,说明 DECT + NIC 判定 ISR 时与 DSA 一致性良好。

DECT + NIC 联合应用的 ISR 诊断效能的敏感度、特异度、阳性预测值、阴性预测值和诊断准确度分别为 94.11%、85.71%、94.11%、85.71% 和 91.66%,优于单独的 DECT 诊断。

本研究存在的局限性。① 未对支架材质、厚度、植入年限等进行分类研究;② 本研究所纳入的病例及支架数量相对较少,未计算 NIC 鉴别支架内管腔狭窄率及 ISR 诊断效能截断值。未来仍需大样本分类研究进一步完善。

综上所述,DECT 重组 60 keV 和 OCM 图像用于评估下肢动脉支架图像质量最佳,进一步联合应用 NIC 定量分析可提高支架内管腔狭窄率和 ISR 诊断准确率,具有较高的诊断价值。

参考文献

- [1] GORNIK H L, ARONOW H D, GOODNEY P P, et al. 2024 ACC/AHA/AACVPR/APMA/ABC/SCAI/SVM/SVN/SVS/SIR/VESSE guideline for the management of lower extremity peripheral artery disease: A report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on Clinical Practice Guidelines[J]. *Circulation*, 2024, 149(24): e1313-e1410. DOI:10.1161/CIR.0000000000001251.
- [2] 中华医学会外科学分会血管外科学组. 下肢动脉硬化闭塞症诊治指南[J]. *中华医学杂志*, 2015, 95(24): 1883-1896. DOI:10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2015.24.004.
- [3] 包俊敏. 下肢动脉闭塞腔内治疗策略的新思考[J]. *中国血管外科杂志(电子版)*, 2017, 9(2): 81-83. BAO J M. New Considerations on endovascular treatment strategies for lower extremity arterial occlusion[J]. *Chinese Journal of Vascular Surgery (Electronic Version)*, 2017, 9(2): 81-83. (in Chinese).
- [4] KLEIN L W, NATHAN S, MAEHARA A, et al. SCAI expert consensus statement on management of In-Stent restenosis and stent thrombosis[J]. *Journal of the Society for Cardiovascular Angiography & Interventions*, 2023, 2(4): 100971. DOI:10.1016/j.jscai.2023.100971.
- [5] 胡路, 刘明远. 下肢动脉介入术后支架内再狭窄的危险因素分析[J]. *血管与腔内血管外科杂志*, 2024, 10(2): 156-160. DOI:10.19418/j.cnki.issn2096-0646.2024.02.07. HU L, LIU M Y. Analysis of risk factors for in-stent restenosis after lower extremity arterial interventional surgery[J]. *Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, 2024, 10(2): 156-160. DOI:10.19418/j.cnki.issn2096-0646.2024.02.07. (in Chinese).
- [6] 郑琪, 张爱武, 李宇龙. 下肢动脉 CT 血管造影及血管重建技术在老年下肢动脉硬化闭塞症中的应用价值[J]. *中国老年学杂志*, 2022, 42(21): 5286-5288. DOI:10.3969/j.issn.1005-9202.2022.21.040. ZHENG Q, ZHANG A W, LI Y L. The application value of lower extremity arterial CT angiography and vascular reconstruction techniques in elderly patients with lower extremity arterial atherosclerotic occlusive disease[J]. *Chinese Journal of Gerontology*, 2022, 42(21): 5286-5288. DOI:10.3969/j.issn.1005-9202.2022.21.040. (in Chinese).

- [7] 中华医学会放射学分会下肢动脉 CTA 扫描技术专家共识协作组. 下肢动脉 CT 血管成像扫描技术专家共识[J]. *中华放射学杂志*, 2019, 53(2): 88-92. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2019.02.002.
- [8] 中华医学会放射学分会, 中国医师协会放射医师分会, 安徽省影像临床医学研究中心. 能量 CT 临床应用中国专家共识[J]. *中华放射学杂志*, 2022, 56(5): 476-487. DOI:10.3760/cma.j.cn112149-20220118-00051.
- [9] LENNARTZ S, CAO J, PISUCHPEN N, et al. Intra-patient variability of iodine quantification across different dual-energy CT platforms: Assessment of normalization techniques[J]. *European Radiology*, 2024, 34(8): 5131-5141. DOI:10.1007/s00330-023-10560-z.
- [10] 梁莉, 陈梓娴, 郭奇虹, 等. 双能量 CT 支架内碘含量诊断 PCI 术后支架内再狭窄的初步研究[J]. *中西医结合心血管病电子杂志*, 2019, 7(25): 41-43, 46. DOI:10.16282/j.cnki.cn11-9336/r.2019.25.033.
- [11] LI W, YU F, ZHU W, et al. Detection of left atrial appendage thrombi by third-generation dual-source dual-energy CT: Iodine concentration versus conventional enhancement measurements[J]. *International Journal of Cardiology*, 2019, 292: 265-270. DOI:10.1016/j.ijcard.2019.04.079.
- [12] MANGOLD S, de CECCO C N, SCHOEPP U J, et al. A noise-optimized virtual monochromatic reconstruction algorithm improves stent visualization and diagnostic accuracy for detection of in-stent re-stenosis in lower extremity run-off CT angiography[J]. *European Radiology*, 2016, 26(12): 4380-4389. DOI:10.1007/s00330-016-4304-8.
- [13] HWANG J H, KANG J M, PARK S, et al. Advanced virtual monoenergetic imaging algorithm for lower extremity computed tomography angiography: Effects on image quality, artifacts, and peripheral arterial disease evaluation[J]. *Diagn Interv Radiol*, 2022, 29(1): 175-182. DOI:10.5152/dir.2022.21551.
- [14] 魏淼, 李信友, 赵渝, 等. 单色能量 CTA 成像结合锐利迭代重建技术评价支架后再狭窄的效果[J]. *重庆医科大学学报*, 2019, 44(10): 1332-1336. DOI:10.13406/j.cnki.cyx.002111.
- WEI M, LI X Y, ZHAO Y, et al. Application of CTA with monoenergetic imaging combined with iterative reconstruction using a sharp convolution kernel in the evaluation of in-stent restenosis[J]. *Journal of Chongqing Medical University*, 2019, 44(10): 1332-1336. DOI:10.13406/j.cnki.cyx.002111. (in Chinese).
- [15] 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. DOI:10.13437/j.cnki.jcr.2021.02.036.
- 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. DOI:10.13437/j.cnki.jcr.2021.02.036. (in Chinese).
- [16] LENNARTZ S, CAO J, PISUCHPEN N, et al. Intra-patient variability of iodine quantification across different dual-energy CT platforms: Assessment of normalization techniques[J]. *European Radiology*, 2024, 34(8): 5131-5141. DOI:10.1007/s00330-023-10560-z.
- [17] 张媛, 刘浩. CTA 对下肢动脉硬化闭塞症支架内再狭窄的评估价值[J]. *中国 CT 和 MRI 杂志*, 2017, 15(12): 127-129. DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2017.12.039.
- ZHANG Y, LIU H. Value of CTA in the evaluation of in stent restenosis in patients with lower extremity arteriosclerosis obliterans[J]. *Chinese Journal of CT and MRI*, 2017, 15(12): 127-129. DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2017.12.039. (in Chinese).
- [18] CURY R C, ABBARA S, ACHENBACH S, et al. CAD-RADS: Coronary artery disease-reporting and data system: An expert consensus document of the society of cardiovascular computed tomography (SCCT), the american college of radiology (ACR) and the north american society for cardiovascular imaging (NASCI) endorsed by the american college of cardiology[J]. *Journal of the American College of Radiology*, 2016, 13: 1458-1466. DOI:10.1016/j.jacr.2016.04.024.
- [19] 国家心血管病专业质控中心心血管影像质控专家工作组, 中华医学会放射学分会心胸学组, 《中华放射学杂志》心脏冠状动脉多排 CT 临床应用指南写作专家组. 冠状动脉 CT 血管成像的适用标准及诊断报告书写规范[J]. *中华放射学杂志*, 2020, 54(11): 1044-1055. DOI:10.3760/cma.j.cn112149-20200413-00544.
- [20] 苏晓雪, 袁晓庆, 赵士博, 等. 下肢动脉硬化性闭塞介入术后支架内再狭窄的危险因素 Meta 分析[J]. *血管与腔内血管外科杂志*, 2022, 8(8): 926-934. DOI:10.19418/j.cnki.issn2096-0646.2022.08.07.
- SU X X, YUAN X Q, ZHAO S B, et al. Meta analysis of risk factors of in-stent restenosis after interventional therapy for arteriosclerotic occlusion of lower extremity[J]. *Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, 2022, 8(8): 926-934. DOI:10.19418/j.cnki.issn2096-0646.2022.08.07. (in Chinese).
- [21] QIN L, GU S, CHEN C, et al. Initial exploration of coronary stent image subtraction using dual-layer spectral CT[J]. *European Radiology*, 2019, 29(8): 4239-4248. DOI:10.1007/s00330-018-5990-1.
- [22] ALMUTAIRI A, AL SAFRAN Z, ALZAABI S A, et al. Dual energy CT angiography in peripheral arterial stents: Optimal scanning protocols with regard to image quality and radiation dose[J]. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 2017, 7(5): 520-531. DOI:10.21037/qims.2017.10.07.
- [23] KIM J S, PARK S H, PARK S, et al. Imaging findings of peripheral arterial disease on lower-extremity

CT angiography using a virtual monoenergetic imaging algorithm[J]. Journal of the Korean Society of Radiology, 2022; 83(5): 1032-1045. DOI:10.3348/jksr.2021.0191.

[24] 胡莹莹, 张珂, 何辰宇, 等. 优化双下肢动脉能谱 CT 血管造影成像方案[J]. 中国介入影像与治疗学, 2024, 21(4): 242-246. DOI:10.13929/j.issn.1672-8475.2024.04.012.

HU Y Y, ZHANG K, HE C Y, et al. Optimazation of energy spectrum CT single energy imaging for lower limb artery CT angiography[J]. Chinese Journal of Interventional Imaging and Therapy, 2024, 21(4): 242-246. DOI:10.13929/j.issn.1672-8475.2024.04.012. (in Chinese).

Diagnostic Value of Dual-energy Computed Tomography Combined with Standardized Iodine Content in Assessing Restenosis of Lower Extremity Artery Stents

HUANG Xiaoying^a, GUO Fangkai^a, WANG Pengchao^a, SHAN Chunhui^a, BAO Yunfeng^{b✉}

a).Department of Medical Imaging; b).Physical Examination Center,
Hebei General Hospital, Shijiazhuang 050051, China

Abstract: Objective: To explore the diagnostic value of dual-energy computed tomography (DECT) combined with standardized iodine concentration (NIC) for assessing the degree of lower-extremity artery stent stenosis. Methods: A retrospective study was conducted on 32 patients with 48 stents who underwent dual-energy lower-extremity CTA at our hospital between January 2020 and June 2024. All patients underwent DSA within one week of CTA. Dual-energy data were reconstructed into five sets of virtual monochromatic images from 50~90 keV with 10 keV intervals, along with one set of optimum contrast (OCM) images. The CT, SD, CNR, SNR, and NIC values within the stent lumen were measured and compared, and subjective image quality evaluations were performed. The diagnostic accuracy of DECT for lumen stenosis rate and in-stent restenosis (ISR) was evaluated using DSA as the gold standard. Results: The SNR and CNR values were highest at 50 keV, gradually decreasing as the monochromatic energy level increased. The SNR and CNR values of the OCM and 60 keV groups were slightly lower than those of the 50 keV group, though were not significantly different. There were significant differences in the subjective evaluation scores among the six groups. The OCM (4.23 ± 0.89) and 60 keV (4.19 ± 0.64) groups had the highest scores but were not significantly different. Compared with DSA, DECT had moderate consistency in diagnosing lumen stenosis rate and ISR ($\kappa = 0.563$ and 0.654 , respectively). DECT combined with NIC showed good consistency in ISR diagnosis ($\kappa = 0.830$). The NIC values were 1.02 ± 0.14 for no significant stenosis, 0.73 ± 0.14 for ISR, and 0.18 ± 0.09 for occlusive lesions. The sensitivity, specificity, positive predictive value, negative predictive value, and accuracy of the combined diagnosis were 94.11%, 85.71%, 94.11%, 85.71%, and 91.66%, respectively. Conclusion: DECT reconstructed at 60 keV and OCM images were best for assessing lower-extremity artery stent stenosis. Combining quantitative analysis with NIC can improve the accuracy of grading stent lumen stenosis and judging ISR, which has high diagnostic value.

Keywords: multi-energy CT; CT angiography; lower extremity arteries; in-stent restenosis



作者简介: 黄晓颖, 女, 河北省人民医院医学影像科主管技师, 主要从事能量 CT 技术研究及图像后处理, E-mail: 15128279399@163.com; 暴云锋[✉], 男, 河北省人民医院体检中心主任技师、硕士生导师, 主要从事放射物理与辐射防护、图像质量控制研究, E-mail: byf816@126.com。