

Impact of reconstruction algorithm on coronary artery CT quantitative analysis

ZHANG Zhuolu, AN Bei, SHANG Xu, LIU Zhuo*, WANG Yi, HONG Nan
(Department of Radiology, Peking University People's Hospital, Beijing 100044, China)

[Abstract] **Objective** To explore the impact of reconstruction algorithm on the quantitative analysis of coronary artery CT. **Methods** Raw data of coronary artery CT, including calcium scoring scanning and angiography of 58 patients were collected. The images were reconstructed using adaptive statistical iterative reconstruction V (ASIR-V) with different blending weights (ASIR-V0%, ASIR-V50%, ASIR-V100%) and deep learning image reconstruction (DLIR) at low, medium and high levels (DLIR-L, DLIR-M, DLIR-H). Calcium scores (Agatston score, mass score and volume score), quantitative analysis results of plaques and lumen, CT value of pericoronary adipose tissue and of ascending aorta were measured and compared. **Results** Significant overall differences of Agatston score, volume score and mass score were found among different reconstruction algorithms (all $P < 0.05$). Agatston score gradually decreased with increasing IR weight or DLIR level. Significant differences of plaque volume and luminal volume were detected among low, medium and high-density plaques obtained with different reconstruction algorithms (all $P < 0.05$). For both non-enhanced and enhanced scanning, the reconstruction algorithm showed significant differences of standard deviation of aortic CT values were found among different reconstruction algorithms (both $P < 0.05$). With IR weight increased or DLIR level increased, the noise gradually decreased, and DLIR-H image had the lowest noise. **Conclusion** The ability of DLIR for reducing image noise was superior to that of iterative reconstruction algorithms. Reconstruction algorithm had significant impact on Agatston integral, plaque volume and luminal volume.

[Keywords] deep learning; coronary vessels; tomography, X-ray computed; plaque

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2026.03.025

重建算法对于冠状动脉 CT 量化分析的影响

张卓璐, 安 备, 商 旭, 刘 卓*, 王 屹, 洪 楠

(北京大学人民医院放射科, 北京 100044)

[摘要] **目的** 观察重建算法对于冠状动脉 CT 量化分析的影响。 **方法** 收集 58 例患者的原始冠状动脉 CT (包括钙化积分扫描及血管成像) 数据, 采用自适应统计迭代重建 (ASIR-V) 和深度学习图像重建 (DLIR), 分别以不同权重 ASIR-V (ASIR-V0%、ASIR-V50%、ASIR-V100%) 及低、中、高级别 DLIR (DLIR-L、DLIR-M、DLIR-H) 重建图像, 测量其中的钙化评分 (Agatston 积分、质量积分、体积分)、斑块, 以及管腔量化分析结果、血管周围脂肪 CT 值及升主动脉 CT 值并进行比较。 **结果** 各重建算法之间, Agatston 积分、体积分及质量积分总体差异均有统计学意义 (P 均 < 0.05)。随 IR 权重或 DLIR 级别增加, Agatston 积分逐渐降低。以不同重建算法所获低、中、高密度斑块体积及管腔体积差异均有统计学意义 (P 均 < 0.05); 基于不同重建算法的平扫及增强图像中的主动脉 CT 值标准差差异均有统计学意义 (P 均 < 0.05)。随 IR 权重增加或 DLIR 级别增高, 噪声逐渐减小; DLIR-H 图像噪声最低。 **结论** DLIR 降低图像噪声能力优于迭代重建算法; 重建算法对于 Agatston 积分、斑块体积及管腔体积等均有显著影响。

[关键词] 深度学习; 冠状血管; 体层摄影, X 线计算机; 斑块

[中图分类号] R543; R814.74 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2026)03-0444-04

[第一作者] 张卓璐 (1990—), 女, 山西长治人, 博士, 副主任医师。研究方向: 心胸影像学。E-mail: zhangzhuolu@yeah.net

[通信作者] 刘卓, 北京大学人民医院放射科, 100044。E-mail: liuzhuormy@sina.cn

[收稿日期] 2025-07-16 **[修回日期]** 2025-11-06

如何在满足诊断要求的前提下降低 CT 辐射剂量已成为重要临床问题。相比滤波反投影(filtered back projection, FBP), 迭代重建(iterative reconstruction, IR)可降低图像噪声、改善图像质量^[1-2]。深度学习图像重建(deep learning image reconstruction, DLIR)在学习过程中以高质量 FBP 或 IR 图像作为标准进行训练,可优化深度卷积神经网络(deep convolutional neural networks, DNN)并改进图像质量^[3-4]。本研究观察 FBP、自适应统计迭代重建(adaptive statistical iterative reconstruction Veo, ASIR-V)及 DLIR 对于冠状动脉 CT 量化分析的影响。

1 资料与方法

1.1 研究对象 回顾性分析 2024 年 11 月 249 名于北京大学人民医院接受冠状动脉 CT 检查(包括钙化积分扫描及血管成像)的受检者,其冠状动脉存在钙化斑块且图像质量优,排除冠状动脉支架植入后、旁路移植术后及图像质量差者;最终纳入 58 例,男 34 例、女 24 例,年龄 41~82 岁、平均(64.9±9.0)岁,平均体重(65.5±10.9)kg。本研究经医院伦理委员会批准(2026PHB345-001),免除受检者知情同意。

1.2 仪器与方法 采用 GE Revolution Apex 256 排 CT 仪。先行钙化积分扫描,嘱患者仰卧、上举双手,扫描范围由气管分叉至心底;管电压 120 kVp,管电流由自动曝光控制系统设定,球管转速 0.28 s/rot,重建层厚和层间距均为 0.625 mm;心率<65 次/分时曝光时间窗为 75%R-R 间期,≥65 次/分时曝光时间窗为 45%R-R 间期。之后行血管成像,扫描范围从气管分叉至心底,选择探测器纵向覆盖范围为 12、14 或 16 cm,由自动曝光控制系统设定管电压、管电流,余同钙化积分扫描。以 4~6 ml/s 流率注射碘普罗胺 40~60 ml(370 mgI/ml)并以相同流率追加 30 ml 生理盐水后,应用对比剂自动触发技术,触发 ROI 位于气管分叉层面的降主动脉内,待 ROI 内 CT 值升高幅度>80 HU 后延时 6 s 曝光;对心率<60 次/分者曝光时间窗为 70%~80%R-R 间期,>75 次/分时曝光时间窗为 40%~60%R-R 间期,心率 60~75 次/分者曝光时间窗为 40%~80%R-R 间期。

1.3 二次重建 分别以不同权重 IR(ASIR-V0%即 FBP、ASIR-V50%、ASIR-V100%)及低、中、高级别 DLIR(DLIR-L、DLIR-M、DLIR-H)对图像进行二次重建;钙化积分图像重建层厚及层间距均为 2.5 mm。血管成像图像重建层厚、层间距均为 0.625 mm。

1.4 测量与分析 将钙化积分图像传输至 GE AW

4.7 后处理工作站,于升主动脉根部勾画 ROI,记录其 CT 值的平均值和标准差(即噪声)。利用钙化积分半自动测量软件(GE smart score 4.0)计算 Agatston 积分、体积积分及质量积分。应用冠状动脉分析软件半自动测量病变血管狭窄程度、不同密度斑块成分体积、管腔体积、管腔最小直径、管腔截面积、管腔与斑块总截面积、右冠状动脉中段周围脂肪 CT 值等量化分析结果;于不同重建算法图像间保持测量位置一致。

1.5 辐射剂量 记录容积 CT 剂量指数(volume CT dose index, CTDIvol)、剂量长度乘积(dose length product, DLP),计算有效剂量(effective dose, ED): $ED=DLP \times k [k=0.014 \text{ mSv}/(\text{mGy} \cdot \text{cm})]$ 。

1.6 统计学分析 采用 MedCalc 统计分析软件。以 $\bar{x} \pm s$ 表示符合正态分布的计量资料,行单因素方差分析及事后两两比较(Bonferroni 校正);以中位数(上下四分位数)表示非正态分布计量资料,采用 Friedman 检验并进行检验后多重比较。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 钙化积分 以不同重建算法所获图像之间,Agatston 积分、体积积分及质量积分总体差异均有统计学意义(P 均<0.001),见表 1。各算法间两两比较 Agatston 积分差异均有统计学意义(P 均<0.05)。随 IR 权重或 DLIR 级别增加,Agatston 积分逐渐降低,见图 1。

表 1 基于不同重建算法图像所获钙化积分

重建算法	Agatston 积分	体积积分(mm ³)	质量积分(mg)
FBP	120.5(53.0,273.0)	16.0(8.0,37.0)	49.0(24.0,114.0)
ASIR-V50%	116.0(53.0,259.0)	16.0(8.0,38.0)	48.0(23.0,110.0)
ASIR-V100%	111.5(52.0,250.0)	17.5(7.0,35.0)	47.5(21.0,107.0)
DLIR-L	118.5(52.0,264.0)	16.0(8.0,36.0)	48.5(24.0,112.0)
DLIR-M	116.0(51.0,258.0)	15.5(7.0,37.0)	48.5(25.0,110.0)
DLIR-H	108.5(51.0,254.0)	16.5(8.0,38.0)	47.5(23.0,108.0)
F 值	106.096	5.535	31.937
P 值	<0.001	<0.001	<0.001

2.2 定量分析 不同重建算法之间,低、中、高密度斑块体积及管腔体积差异均有统计学意义(P 均<0.05),见表 2。平扫及增强 CT 中,不同重建算法图像中的主动脉 CT 值标准差差异均有统计学意义(P 均<0.001),而平均值差异均无统计学意义(P 均>0.05)。事后两两比较显示,各重建算法之间 CT 值标准差差异均有统计学意义(P 均<0.05),且随 IR 权重增加或 DLIR 级别增高,标准差逐渐降低;DLIR-H 的 CT 值标准差最小,即噪声最低,见表 3 和图 2。

2.3 辐射剂量 钙化积分扫描 CTDIvol 为(2.70±0.61)mGy,DLP 为(37.54±9.18)mGy·cm,ED 为

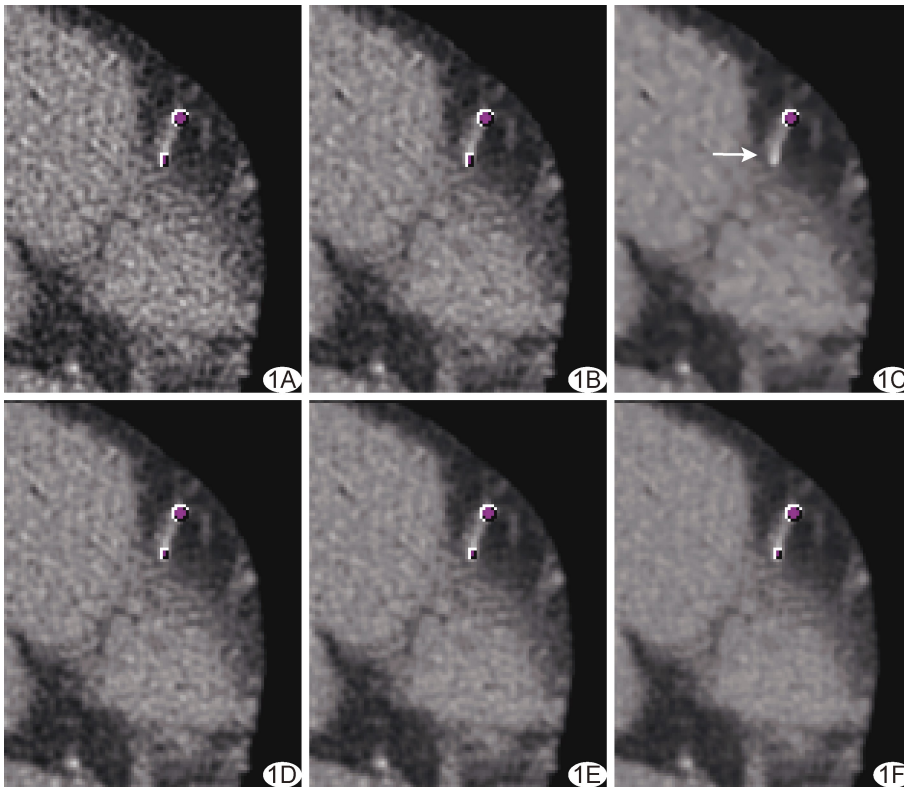


图 1 患者男,62 岁,主因胸痛就诊;不同重建算法所获钙化积分图像显示左前降支钙化斑块(软件自动识别钙化斑块并以红色标记) A. FBP; B. ASIR-V50%; C. ASIR-V100%(箭头一处斑块未识别); D. DLIR-L; E. DLIR-M; F. DLIR-H

表 2 基于不同重建算法所获图像的量化分析结果

重建算法	低密度斑块 体积(mm ³)	中密度斑块 体积(mm ³)	高密度斑块 体积(mm ³)	狭窄程度(%)
FBP	0.45(0.10,2.00)	19.20(12.40,38.20)	4.25(1.60,11.30)	34.00(25.00,43.00)
ASIR-V50%	1.20(0.4,1.0)	20.15(12.30,46.80)	4.05(1.20,11.50)	35.00(23.00,43.00)
ASIR-V100%	0.35(0.4,0.0)	20.80(9.40,46.80)	4.00(1.40,11.40)	32.00(19.00,46.00)
DLIR-L	0.10(0.2,0.3)	15.65(8.70,36.60)	4.05(1.10,11.30)	30.00(22.00,45.00)
DLIR-M	0.05(0.1,0.8)	15.35(9.20,36.90)	4.30(11.00,11.40)	31.50(20.00,43.00)
DLIR-H	0(0,1.40)	14.30(7.90,38.80)	4.10(0.80,11.40)	31.50(20.00,42.00)
F 值	6.925	7.339	8.547	2.127
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	0.062

重建算法	最小直径 (mm)	管腔截 面积(mm ²)	管腔+斑块截 面积(mm ²)	管腔体积 (mm ³)	右冠状动脉周围 脂肪 CT 值(HU)
FBP	1.69±0.50	3.52±1.72	8.26±3.97	126.95±53.82	-104.02±12.85
ASIR-V50%	1.70±0.51	3.67±1.75	8.38±4.04	124.74±53.68	-103.54±12.20
ASIR-V100%	1.72±0.54	3.71±1.98	8.43±4.17	123.81±54.88	-103.03±11.84
DLIR-L	1.73±0.54	3.70±1.84	8.13±3.97	123.52±54.16	-103.66±12.16
DLIR-M	1.72±0.59	3.79±1.97	8.12±3.89	123.91±54.15	-103.40±12.05
DLIR-H	1.77±0.53	3.76±1.85	8.10±3.86	124.93±56.06	-103.00±11.60
F 值	1.430	2.380	0.880	3.080	2.070
P 值	0.230	0.057	0.452	0.024	0.144

(0.53±0.13)mSv;血管成像依次为(11.88±4.09)mGy、(165.93±64.76)mGy·cm 及(2.32±0.91)mSv。

3 讨论

冠状动脉疾病是目前临床多发且致死率、致残率均较高的疾病之一。基于平扫 CT 的钙化积分对于预测急

性冠状动脉事件具有较高价值^[5-10],冠状动脉 CT 血管成像可用于诊断冠心病和进行随访。基于 CT 获得的血管狭窄程度、斑块成分等信息具有重要临床价值;定量评估冠状动脉斑块性质对于心血管疾病危险分层及指导个体化预防具有一定价值。相比计算冠状动脉血管狭窄率,评估斑块性质对于预测心血管不良事件的价值更高;斑块负荷是心血管不良事件的有效预测因子。近年研究^[11-12]发现冠状动脉周围脂肪组织(pericoronary adipose tissue, PCAT)与冠心病发生、发展密切相关,可用于预测冠心病;根据右冠状动脉 PCAT 的 CT 值可评估冠状动脉整体炎症状态;较高的 PCAT CT 值与高风险心源性死亡及全因死亡具有较高相关性。

DLIR 对于提升 CCTA 图像质量具有重要临床价值与应用前景。IR 在降低图像噪声的同时造成图像过度平滑及噪声纹理变化并带来蜡像状伪影,且混合权重或迭代级别越高,蜡像伪影越明显,图像显得越不自然,主观接受程度越低。既往研究^[13]发现,随 DLIR 级别升高,降噪能力增加、空间分辨率提高,检测细微病变能力亦有所提升。王宏伟等^[14]报道,采用 DLIR 可显著降低肥胖人群 CCTA 图像噪声、提高图像质量、增加可评估冠状动脉节段数量,且高级别降噪可进一步提高图像质量。张超等^[15]指出,与 ASIR-V 相比,DLIR 能在保证图像质量的同时更加显著地降低 CCTA 噪声;本研究结果支持上述观点。

综上所述,DLIR 降低图像噪声能力优于迭代重建算法;重建算法对于 Agatston 积分、斑块体积及管腔体积等有显著影响。本研究的主要不足:①未能观察重建算法对于支架、桥血管及壁冠状动脉等的影响;②只采用半自动测量方法,未纳入人工智能辅助诊断

表 3 不同重建算法所获主动脉 CT 值的平均值及其标准差(HU)

重建算法	平扫 CT 值		增强扫描 CT 值	
	平均值	标准差	平均值	标准差
FBP	45.88±5.71	26.84±3.27	524.85±114.74	49.92±6.82
ASIR-V50%	45.91±5.72	19.25±2.60	524.87±114.71	38.38±6.45
ASIR-V100%	45.97±5.63	12.26±2.01	524.87±114.62	27.79±6.87
DLIR-L	45.88±5.61	18.55±2.75	524.76±114.72	30.83±6.70
DLIR-M	45.90±5.61	15.49±2.47	524.67±114.63	26.20±5.86
DLIR-H	45.97±5.60	10.92±1.58	524.67±114.57	18.98±3.92
F 值	0.610	3 370.670	1.730	1 215.800
P 值	0.531	<0.001	0.184	<0.001

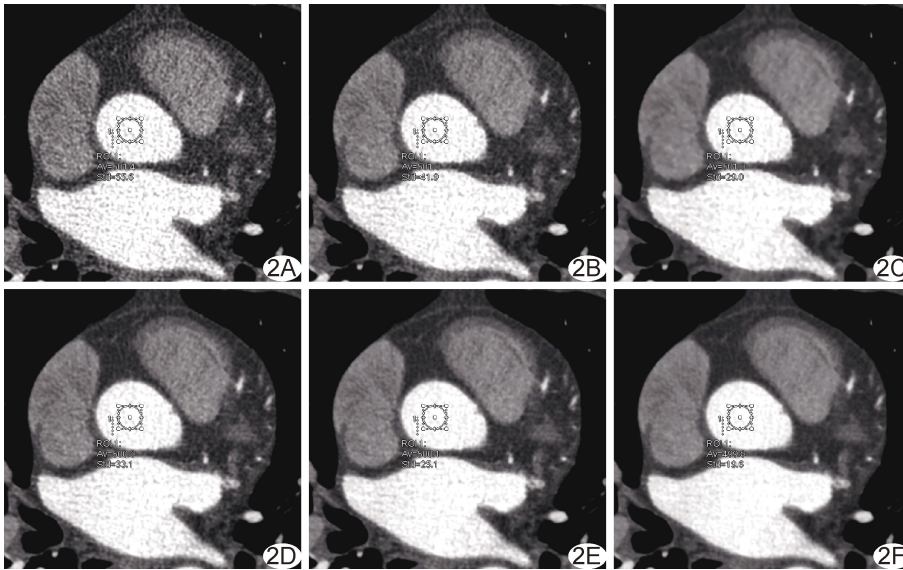


图 2 患者男,65 岁,主因胸痛就诊,不同重建算法图像中的升主动脉根部 CT 值的平均值及标准差
A. FBP,平均 501.4 HU,标准差 55.6 HU; B. ASIR-V50%,平均 501.3 HU,标准差 41.9 HU;
C. ASIR-V100%,平均 501.3 HU,标准差 29.0 HU; D. DLIR-L,平均 500.3 HU,标准差 33.1 HU;
E. DLIR-M,平均 500.1 HU,标准差 25.1 HU; F. DLIR-H,平均 499.8 HU,标准差 19.6 HU

软件作为评价对象,重建算法对人工智能分析结果的影响有待观察;③未能定量评估重建算法对于钙化积分等的影响程度。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:张卓璐查阅文献、统计分析、撰写文章;安备和商旭图像分析和处理;刘卓修改和审阅文章;王屹和洪楠审阅文章。

[参考文献]

[1] SCHOFIELD R, KING L, TAYAL U, et al. Image reconstruction: Part 1: Understanding filtered back projection, noise and image acquisition[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2020,14(3):219-225.
[2] 张卓璐, 孙建, 刘卓, 等. 重组算法对冠状动脉 CT 血管造影量化分析

的影响[J]. 临床放射学杂志, 2022, 41(10):1879-1883.

[3] ARNDT C, GÜTTLER F, HEINRICH A, et al. Deep learning CT image reconstruction in clinical practice [J]. Rofo, 2021,193(3):252-261.
[4] HIGAKI T, NAKAMURA Y, ZHOU J, et al. Deep learning reconstruction at CT: Phantom study of the image characteristics[J]. Acad Radiol, 2020, 27(1):82-87.
[5] 中国医师协会放射医师分会. 冠心病 CT 检查和诊断中国专家共识[J]. 中华放射学杂志, 2024, 58(2):135-149.
[6] 中华医学会放射学分会心胸学组, 中国医师协会放射医师分会心血管学组, 中国食品药品检定研究院. 冠状动脉 CT 血管成像数据标注和质量控制专家共识[J]. 中华放射学杂志, 2024, 58(1):25-33.
[7] 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.
[8] 中华医学会放射学分会质量控制与安全管理专业委员会, 江苏省医学会放射学分会智能影像与质量安全学组. 冠状动脉 CT 血流储备分数应用中国专家建议[J]. 中华放射学杂志, 2020, 54(10):925-933.
[9] 中华医学会放射学分会心胸学组, 中国医师协会放射医师分会心血管学组, 北京医学会放射学分会心血管学组. CT 血流储备分数操作规范及临床应用中国专家共识[J]. 中华放射学杂志, 2023, 57(7):711-722.
[10] 中国医师协会放射医师分会心血管影像学组. 冠状动脉 CT 血管成像人工智能研究和应用专家建议[J]. 中华放射学杂志, 2025, 59(1):9-19.
[11] 韩婷婷, 穆玥, 洪叶, 等. CCTA 定量斑块特征及血管周围脂肪在急性冠脉综合征中的临床价值[J]. 放射学实践, 2021, 36(3):361-365.
[12] 周茜洋, 唐春香, 张龙江, 等. 冠状动脉周围脂肪影像学的研究进展[J]. 中华放射学杂志, 2021, 55(3):320-323.
[13] PARK C, CHOO K S, JUNG Y, et al. CT iterative vs deep learning reconstruction: Comparison of noise and sharpness[J]. Eur Radiol, 2021, 31(5):3156-3164.
[14] 王宏伟, 李瑛, 高一峰, 等. 深度学习图像重建算法用于肥胖个体低剂量冠状动脉 CT 血管成像[J]. 中国医学影像技术, 2021, 37(5):754-758.
[15] 张超, 董栋, 王铭君, 等. 深度学习图像重建算法在提高 CCTA 图像质量中的临床价值研究[J]. 临床放射学杂志, 2021, 40(6):1126-1130.