

高级模型迭代重建算法联合 Sa36 卷积核对人工智能冠状动脉钙化定量测量的影响:单臂前瞻性研究

杜华阳,何泉宇,江南,杨桂松,胥化虎,任佳,王彦玲,韩飞

【摘要】 目的:以 FBP 算法 Sa36 图像人工智能(AI)冠状动脉钙化(CAC)定量为参考标准,探究 ADMIRE 重建算法不同迭代等级 Sa36 图像 AI CAC 定量结果及危险分层的影响。**方法:**连续纳入 271 例行冠状动脉 CTA 检查的患者。应用第三代双源 CT 扫描仪,采用 120 kVp、自动管电流(预设值 60 mAs),心电门控下进行平扫。所得原始数据采用 FBP、ADMIRE 1~5 级重建(Sa36)图像,重建层厚 3.0 mm、层间距 1.5 mm。测量并记录各组图像 AI CAC 定量结果(钙化体积、质量、Agatston 积分),并根据 Agatston 积分进行危险分层。采用 Friedman 非参数检验对 6 组图像进行统计学分析。**结果:**271 名患者 FBP 组、ADMIRE 1 组、ADMIRE 2 组、ADMIRE 3 组、ADMIRE 4 组、ADMIRE 5 组图像噪声(HU)分别为 14.92±2.25、13.54±2.06、12.08±1.83、10.70±1.68、9.19±1.46、7.53±1.39;ADMIRE 1~5 组较 FBP 组噪声分别降低 9.70%、19.11%、28.42%、38.48%、49.78%($F=8224.929, P<0.001$)。FBP 组、ADMIRE 1~5 组冠脉钙化最大 CT 值(HU)分别为 443.75 (293.00, 643.38)、440.25 (287.13, 640.63)、437.50 (282.00, 636.63)、434.25 (277.00, 632.63)、429.75 (273.38, 628.00)、420.5 (264.75, 617.88),组间具有统计学差异($\chi^2=785.465, P<0.001$)。170 名患者 CAC 体积(mm^3)分别为 89.40 (22.83, 347.34)、82.73 (20.59, 327.89)、78.55 (19.13, 306.44)、76.52 (18.08, 289.41)、70.51 (17.02, 270.19)、64.79 (14.13, 251.47),ADMIRE 1~5 组钙化体积较 FBP 组分别降低 4.51%、9.75%、13.16%、18.85%、24.92%($\chi^2=620.833, P<0.001$),差异具有统计学意义。CAC 质量(mg)分别为 16.27 (3.65, 64.00)、16.18 (3.31, 61.09)、15.86 (3.04, 59.51)、14.26 (2.83, 57.40)、13.49 (2.55, 55.14)、12.43 (2.22, 52.17),ADMIRE 1~5 组 CAC 质量较 FBP 组分别降低 4.84%、9.27%、13.34%、18.63%、25.23%($\chi^2=603.029, P<0.001$),差异具有统计学意义。Agatston 积分分别为 92.30 (19.73, 374.46)、89.80 (17.46, 347.96)、85.88 (14.62, 331.21)、84.01 (13.64, 316.02)、79.34 (12.41, 299.03)、70.64 (11.53, 281.26),ADMIRE 1~5 组 Agatston 积分较 FBP 组分别降低 4.75%、9.05%、12.98%、19.71%、25.09%($\chi^2=606.598, P<0.001$),差异具有统计学意义。29 名患者(29/170)风险分层受到 ADMIRE 等级的影响。271 例患者的平均 ED 为(0.61±0.18) mSv。**结论:**ADMIRE 重建算法可明显降低图像噪声、钙化最大 CT 值,也使 CAC 体积、质量、Agatston 积分的降低,造成部分患者危险分层低估。

【关键词】 冠状动脉;血管钙化;体层摄影术,X 线计算机;增强机器学习算法

【中图分类号】 R322.12;R561.2;R814.4;R319 **【文献标志码】** A

【文章编号】 1000-0313(2026)02-0166-09

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2026.02.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Impact of the ADMIRE reconstruction algorithm combined with the Sa36 kernel on quantitative measurement of coronary artery calcification in AI: a single-arm prospective study DU Hua-yang, HE Quan-yu, REN Jia, et al. Department of Radiology, West China Second University Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China

【Abstract】 Objective: To investigate the impact of different iteration levels of the ADMIRE reconstruction algorithm on AI coronary artery calcium (CAC) quantification results and risk stratifica-

作者单位: 610041 成都,四川大学华西第二医院放射科/出生缺陷与相关妇儿疾病教育部重点实验室(杜华阳);621000 四川,绵阳市中医医院放射科(何泉宇、江南、杨桂松、胥化虎);012000 内蒙古,乌兰察布市中心医院放射科(任佳);650032 昆明,昆明医科大学第一附属医院放射科(王彦玲);200030 上海,上海联影智能医疗科技有限公司(韩飞)

作者简介: 杜华阳(1990-),男,河北邢台人,博士,住院医师,主要从事心胸放射学研究工作。

通讯作者: 胥化虎, E-mail: 13708112492@163.com

基金项目: 2025 年四川省中医药科研专项项目(25MSZX317);四川省中医药管理局科学技术研究专项课题(2024MS371);绵阳市卫健委补助课题(202008);绵阳市卫健委鼓励项目(202135);成都中医药大学“杏林学者”学科人才科研提升计划(YYZX2021093)

tion of Sa36 images, using the artificial intelligence (AI) CAC quantification results from FBP algorithm Sa36 images as the reference standard. **Methods:** 271 consecutive patients with coronary CTAs were enrolled. A third-generation dual-source CT scanner with tube voltage 120kVp and automatic tube current (preset value 60mAs) scanning protocol. The raw data obtained were reconstructed using FBP, ADMIRE level 1~5, kernel (Sa36) with a layer thickness of 3.0mm and a layer spacing of 1.5mm. AI CAC quantitative results (calcification volume, mass, and Agatston Score) were measured and recorded for each group of images, and risk stratification was performed according to the Agatston Score. The six groups of images were statistically analyzed using the Friedman nonparametric test. **Results:** The image noise (HU) in the FBP, ADMIRE 1~5 groups of 271 patients were 14.92 ± 2.25 , 13.54 ± 2.06 , 12.08 ± 1.83 , 10.70 ± 1.68 , 9.19 ± 1.46 , and 7.53 ± 1.39 , respectively. Noise decreased by 9.70%, 19.11%, 28.42%, 38.48% and 49.78% in the ADMIRE 1 to 5 groups compared with the FBP group, respectively ($F = 8224.929$, $P < 0.001$). Maximum CT values (HU) of CAC in the FBP group and the ADMIRE 1 to 5 groups were 443.75 (293.00, 643.38), 440.25 (287.13, 640.63), 437.50 (282.00, 636.63), 434.25 (277.00, 632.63), 429.75 (273.38, 628.00) and 420.5 (264.75, 617.88), respectively, with statistically significant differences between the groups ($\chi^2 = 785.465$, $P < 0.001$). The CAC volumes (mm^3) of 170 patients were 89.40 (22.83, 347.34), 82.73 (20.59, 327.89), 78.55 (19.13, 306.44), 76.52 (18.08, 289.41), 70.51 (17.02, 270.19), 64.79 (14.13, 251.47), respectively, and the calcification volumes of the ADMIRE 1~5 group were reduced by 4.51%, 9.75%, 13.16%, 18.85%, and 24.92% compared with the FBP group ($\chi^2 = 620.833$, $P < 0.001$), and the difference was statistically significant. CAC mass (mg) were 16.27 (3.65, 64.00), 16.18 (3.31, 61.09), 15.86 (3.04, 59.51), 14.26 (2.83, 57.40), 13.49 (2.55, 55.14), and 12.43 (2.22, 52.17), respectively. And ADMIRE 1~5 groups had 4.84%, 9.27%, 13.34%, 18.63%, and 25.23% lower calcification mass than the FBP group, respectively ($\chi^2 = 603.029$, $P < 0.001$), and the difference was statistically significant. Agatston's scores were 92.30 (19.73, 374.46), 89.80 (17.46, 347.96), 85.88 (14.62, 331.21), 84.01 (13.64, 316.02), 79.34 (12.41, 299.03), and 70.64 (11.53, 281.26), and Agatston's scores in the ADMIRE 1~5 groups were 4.75%, 9.05%, 12.98%, 19.71%, and 25.09% lower than those in the FBP group, respectively ($\chi^2 = 606.598$, $P < 0.001$), with statistically significant differences. Risk stratification was affected by ADMIRE grade in 29 patients (29/170). 271 patients presented with a mean ED of (0.61 ± 0.18) mSv. **Conclusion:** The ADMIRE reconstruction algorithm significantly reduces image noise, calcified maximum CT values, and also the reduction of CAC volume, mass, and Agatston's score, resulting in an underestimation of risk stratification in some patients.

【Key words】 Coronary arteries; Vascular calcification ; Tomography, X-ray computed; Boosting machine Learning algorithms

冠状动脉钙化积分 (coronary artery calcification score, CACS) 是冠状动脉钙化 (coronary artery calcium, CAC) 定量分析的工具, 是冠心病的独立预测因素, 在冠心病风险评估、冠心病的随访具有重要价值^[1,2]。CACS 常规扫描模式下受检者的射剂量相对较高, 因扫描机机型、扫描方案不同辐射剂量差异较大 (有效剂量范围 0.8~10.5 mSv)^[3], 降低 CACS 的辐射剂量具有重要的临床意义。CACS 定量受管电压^[4,5]、管电流^[6]、迭代重建技术 (iterative reconstruction, IR)^[4-7]、图像层厚层间距^[8]、卷积核^[9]等因素影响。低剂量技术的冠状动脉 CACS 的辐射剂量可降至 1 mSv 以下, 但低辐射剂量会导致图像噪声过大, 会影响

CACS 的定量结果及心血管风险分层。不同 IR 技术的使用可有效降低图像噪声, 保证低辐射剂量扫描下 CACS 诊断结果的准确性。既往国内外学者使用不同类型的 CT 扫描机联合 IR 技术对 CACS 进行研究, 得出不同的结论^[10-12]。其中, 有关高级模型迭代重建算法 (advanced model-based iterative reconstruction, ADMIRE) 在 CACS 的研究相对较少, 研究中纳入样本量相对较小^[13,14], 且采用的卷积核 (如 Qr36、Bv36、Br36) 易受管电压影响^[9,13,14]。独立管电压千伏 (kV-independent) 的 Sa36 卷积核可在任何管电压下保持骨骼和钙 CT 值, 可创建等效 120 kVp 扫描^[9]。此外, 既往 CAC 采用阈值半自动技术人工定量^[11-14], 人工

勾画存在耗时耗力、受操作者经验影响等众多不足。新兴的人工智能软件(artificial intelligence, AI)具有可重复性强、结果一致性佳等优势, AI 已在 CAC 定量、冠状动脉后处理重建中发挥越来越重要的作用。本研究以常规管电压 120 kVp 扫描条件下滤波反投影(filtered back projection, FBP)算法 Sa36 卷积核图像 AI CAC 定量结果作为参考标准, 探究 ADMIRE 不同等级 Sa 图像对 CAC 的影响, 为利用 AI 技术研究 CAC 提供参考依据, 并为临床应用 Sa36 卷积核提供指导。

材料与方 法

1. 样本量估算

使用 PASS 软件(version 21.0.3)对研究所需样本量进行估算。选用重复测量的单因素方差分析(One-Way Analysis of Variance F-Tests), 显著水平 α 为 0.05, power 值为 90%, 组别为 6 组, σ 标准差值(Standard Deviation, SD)设为预实验 50 名患者升主动脉 FBP 算法平均 SD 值(HU)15.33、ADMIRE 5 级算法平均 SD 值 7.91, u_i 's (u_1, u_2, \dots, u_M) 分别为 FBP、ADMIRE 1~5 级升主动脉的平均 SD 值(15.33, 13.86, 12.21, 10.76, 9.30, 7.91), 计算最小样本量分别为 51、15。结合 PASS 软件最小样本量及既往文献, 确定本研究所需样本量为 102 名以上患者。

2. 临床资料

本研究为单臂前瞻性研究, 已通过本院伦理委员会审查(伦理学批号: 2024-092), 对所有患者进行告知并签署知情同意书。连续纳入 2024 年 8 月 01 日—9 月 29 日于本院行冠状动脉 CTA 的患者, 纳入标准: 疑似冠心病患者; 图像质量清晰。排除标准: 冠状动脉搭桥术后、支架术后、对碘对比剂过敏、心脏瓣膜手术史者, 扫描范围内有金属置入物者、主动脉瓣或心包多发钙化。检查前对所有患者进行告知并签署知情同意书。

3. 检查方法及图像重建参数

全部患者均在第三代双源 CT 扫描机(SOMA-TOM Force)上完成。扫描前对患者进行呼吸训练, 使其更好配合屏气指令。患者取仰卧位, 双臂上举, 深吸气末扫描。CACS 采用前瞻性心电门控触发序列模式扫描, 轴扫。扫描范围: 气管隆突下至膈肌水平; 扫描方向: 头向足。扫描参数: 管电压 120 kV, 参考管电流 60 mAs(CARE Dose4D), 准直 38×1.2 mm, 机架旋转时间 0.25 s/r。

所有患者原始数据采用 FBP、ADMIRE 重建算法(等级分别为 1、2、3、4、5)进行重建, 图像重建层厚与层间距分别为 3.0 mm、1.5 mm(厂商推荐), 卷积核

Sa36, 矩阵 512×512 , 显示视野(field of view, FOV) 20 cm, 纵膈窗(窗宽 350 HU, 窗位 50 HU), 共获得 6 组图像, 分别记录为 FBP 组、ADMIRE 1 组、ADMIRE 2 组、ADMIRE 3 组、ADMIRE 4 组、ADMIRE 5 组。将所有图像传输至西门子后处理工作站(syngo.via, 版本: VB20A_HF91)、联影智能冠脉辅助诊断软件(uAI Discover CCTA)(版本号: R001, 上海联影智能医疗科技有限公司)进行定量参数测量。

4. 客观指标测量及 CACS 定量分析

客观指标测量: 由 2 名具有 10 年以上工作经验的 CT 影像医师分别在西门子工作站(syngo.via)使用椭圆形测量工具进行感兴趣区(region of interest, ROI)勾画, 于 FBP 组图像升主动脉根部(近左冠状动脉)管腔中央勾画 ROI, ROI 大小 $50 \sim 100$ mm², 并将其复制、粘贴至其他 5 组图像。记录各组图像 ROI 的平均 CT 值及其标准差值(standard deviation, SD)。以平均 SD 值作为图像的背景噪声(background noise, BN)。

在 FBP 组图像上选取冠状动脉面积 > 3 mm² 的钙化斑块, 放大后勾画 ROI, ROI 置于钙化斑块中央, 并将其复制至 ADMIRE 1~5 组图像, 记录其平均 CT 值、最大 CT 值、最小 CT 值。每组图像测量 3 次, 求平均值。在测量过程中, 允许医师调节窗宽、窗位。

冠状动脉钙化自动检测: 由两名具有丰富心血管诊断经验的放射科医师(1 名主治医师, 1 名副主任医师)共同对 AI 软件自动识别的钙化分割区域进行审核, 有异议处经协商达成一致。对 AI 识别不准确处, 进行手动修正、并由 AI 软件重新计算。分别记录 AI 软件自动计算的各组图像冠状动脉钙化斑块总体积(mm³)、总等效质量(mg CaHA)、Agatston 钙化总积分。其中, 冠状动脉钙化斑块 CT 值阈值 130 HU、校正因子 0.743。根据 Agatston 积分对患者进行危险分层^[15], 具体标准: Agatston 积分 = 0(0 级, 极低); $0 < \text{Agatston 积分} \leq 100$ (I 级, 低); $100 < \text{Agatston 积分} \leq 400$ (II 级, 中); $\text{Agatston 积分} > 400$ (III 级)。

5. 辐射剂量

记录扫描结束后机器自动生成的 CT 剂量指数(CT dose index of volume, CTDIvol)、剂量长度乘积(dose length product, DLP)。有效辐射剂量(effective dose, ED)根据公式: $ED = DLP \times k$, 转换系数 k 参考欧盟委员会 CT 质量标准指南^[16], 胸部 $k = 0.014$ mSv \cdot mGy⁻¹ \cdot cm⁻¹。

6. 统计学分析

采用 SPSS 25.0 软件进行统计学分析。对计量资料进行正态分布检验(Kolmogorov-Smirnov 检验), 符合正态分布的计量资料以均数 \pm 标准差($\bar{x} \pm s$)[均数

95% Confidence interval, CI]表示;并对计量资料方差齐次性进行检验,满足方差齐次性要求则采用单因素方差(One way ANOVY)中的 LSD-*t* 比较组间 CT 值、BN 值、CAC(体积、质量、Agatston 积分)的差异性,不满足方差齐性要求则采用单因素方差中的 Tamhane's T2 进行组间对比,并采用事后多重比较对比不同组间的 CT 值、SD 值、BN 值、CAC 定量指标, $P < 0.05$ 具有统计学差异。不符合正态分布的计量资料以中位数及四分位数 $M(Q1, Q3)$ [中位数 95% CI]表示,采用 Friedman 非参数检验比较组间是否具有差异性,以 $P < 0.05$ 具有统计学差异。使用组内相关系数(Intra-class Correlation Coefficient, ICC)及 95% CI 评估两名医师间客观测量的一致性,ICC 采用双向混合模型、绝对一致。

结果

1. 患者一般资料

本研究连续性纳入 278 名患者,其中,3 例检查后告知置入冠状动脉支架,1 例放置输液港,2 例心率不齐、图像存在伪影,1 例胸椎金属钉伪影,排除该 7 例患者,共纳入 271 名患者。其中,男 137 名,女 134 名,平均年龄(60.41±12.19)岁(21~88 岁)。

2. 升主动脉及钙化斑块客观测量结果

271 名患者 FBP 组升主动脉的平均 CT 值(49.02±4.50)HU,FBP 组与 ADMIRE 1~5 组升主动脉平均 CT 值组间无统计学差异($P > 0.05$,表 1)。两名医师对升主动脉 CT 值测量在 FBP 组、ADMIRE 1~5 组均具有较好的一致性,ICC(95% CI)分别为 [FBP 组:0.844 (0.802, 0.877), ADMIRE 1 组:0.768 (0.705, 0.817), ADMIRE 2 组:0.840 (0.797, 0.874), ADMIRE 3 组:0.705 (0.625, 0.768), ADMIRE 4 组:0.722 (0.647, 0.781), ADMIRE 5 组:0.815 (0.765, 0.855)]。

FBP 组 BN 平均值[(14.93±2.25) HU]最高,随 ADMIRE 等级的增高,BN 逐渐降低,ADMIRE 5 组 BN 最低,为(7.54±1.39)HU(表 1、图 1a)。与 FBP 组相比,ADMIRE 1~5 组 BN 值绝对值(HU)分别降低(1.44±0.37)、(2.85±0.47)、(4.23±0.75)、(5.74±0.91)、(7.37±1.53)($F = 2451.388, P < 0.001$),百分比(%)分别降低(9.70±2.41)、(19.11±1.26)(28.42±2.07)(38.48±2.54)、(49.78±4.34)($F = 8224.929, P < 0.001$)。

冠状动脉钙化斑块 CT 值:166 名患者 FBP 组钙化平均 CT 值、最大 CT 值及最小 CT 值均最高,随 ADMIRE 等级的增高,钙化斑块平均 CT 值、最大 CT 值及最小 CT 值均逐渐降低,FBP 组、ADMIRE 1~5

表 1 客观测量结果及 AI CACS 定量结果

参数	FBP 组	ADMIRE 1 组	ADMIRE 2 组	ADMIRE 3 组	ADMIRE 4 组	ADMIRE 5 组	F/ χ ²	P 值
升主动脉 CT 值 1#								
平均值(HU)	49.02±4.50	49.08±4.67	49.00±4.44	49.29±4.95	49.20±4.67	49.05±4.53	0.162*	0.976
(n=271)	[48.48, 49.56]	[48.52, 49.64]	[48.47, 49.53]	[48.7, 49.88]	[48.65, 49.76]	[48.51, 49.59]		
BN(HU)	14.92±2.25	13.54±2.06	12.08±1.83	10.70±1.68	9.19±1.46	7.53±1.39	705.725*	<0.001
(n=271)	[14.66, 15.2]	[13.29, 13.79]	[11.86, 12.3]	[10.5, 10.9]	[9.01, 9.36]	[7.37, 7.71]		
钙化斑块 CT 值 2#								
平均值(HU)	383.74(267.67, 527.37)	381.48(261.32, 520.87)	377.85(257.84, 521.01)	372.61(251.91, 517.30)	368.73(244.47, 511.29)	360.80(236.29, 503.95)	732.716#	<0.001
(n=166)	[378.68, 433.05]	[371.18, 471.61]	[370.86, 425.91]	[367.18, 422.19]	[360.60, 417.00]	[353.06, 408.97]		
最大值(HU)	443.75(293.00, 643.38)	440.25(287.13, 640.63)	437.50(282.00, 636.63)	434.25(277.00, 632.63)	429.75(273.38, 628.00)	420.50(264.75, 617.88)	785.465#	<0.001
(n=166)	[449.15, 520.89]	[445.76, 517.68]	[440.27, 512.82]	[436.31, 508.55]	[434.11, 507.56]	[423.09, 496.04]		
最小值(HU)	297.25(210.00, 401.00)	292.00(205.75, 394.63)	287.00(196.25, 389.63)	282.00(194.13, 384.63)	274.00(186.00, 379.25)	265.50(177.88, 365.00)	746.343#	<0.001
(n=166)	[288.45, 328.55]	[284.22, 324.41]	[278.84, 319.61]	[275.35, 316.19]	[269.92, 325.57]	[259.46, 300.72]		
冠状动脉 CACS 定量结果 2#								
钙化总体(mm ³)	89.40(22.83, 347.34)	82.73(20.59, 327.89)	78.55(19.13, 306.44)	76.52(18.08, 289.41)	70.51(17.02, 270.19)	64.79(14.13, 251.47)	735.378#	<0.001
(n=170)	[211.1, 347.97]	[205.01, 340.07]	[199.43, 332.45]	[194.30, 325.26]	[188.15, 316.90]	[179.81, 305.58]		
钙化总质量(mg)	16.27(3.65, 64.00)	16.18(3.31, 61.09)	15.86(3.04, 59.51)	14.26(2.83, 57.40)	13.49(2.55, 55.14)	12.43(2.22, 52.17)	723.835#	<0.001
(n=170)	[46.47, 80.12]	[45.42, 78.68]	[44.50, 77.36]	[43.50, 75.90]	[42.52, 74.65]	[40.78, 72.15]		
Agatston 积分	92.30(19.73, 374.46)	89.80(17.46, 347.96)	85.88(14.62, 331.21)	84.01(13.64, 316.02)	79.34(12.41, 299.03)	70.64(11.53, 281.26)	723.679#	<0.001
(n=170)	[243.32, 412.86]	[236.95, 404.31]	[231.45, 396.31]	[225.87, 388.19]	[219.80, 379.39]	[210.41, 366.35]		

注:1# 数据用均数±标准差[均数 95% CI]表示,2# 数据用中位数及四分位数 $M(Q1, Q3)$ [中位数 95% CI]表示。* 单因素方差分析 F 值,# Friedman 检验卡方值。

表 2 不同 ADMIRE 等级较 FBP 算法 CAC 降低值

参数	ADMIRE 1 组	ADMIRE 2 组	ADMIRE 3 组	ADMIRE 4 组	ADMIRE 5 组	χ ² *	P 值#
绝对值							
钙化总体积(mm ³)	3.25(1.60, 10.80)	7.16(3.01, 18.79)	10.19(4.16, 32.42)	14.90(5.95, 46.24)	19.55(8.09, 62.76)	620.833	<0.001
(n=170)	[6.64, 9.88]	[12.23, 18.25]	[18.39, 27.09]	[26.59, 40.59]	[34.93, 51.79]		
钙化总质量(mg)	0.61(0.25, 2.04)	1.22(0.45, 3.75)	1.62(0.66, 5.93)	2.37(0.93, 8.12)	3.29(1.33, 11.27)	603.029	<0.001
(n=170)	[1.30, 2.14]	[2.35, 3.71]	[3.44, 5.34]	[4.92, 8.72]	[6.71, 11.01]		
Agatston 积分	4.18(1.14, 11.43)	7.95(2.02, 18.84)	10.09(3.41, 29.68)	14.05(5.19, 44.77)	19.73(6.71, 58.71)	606.598	<0.001
(n=170)	[7.32, 11.38]	[12.92, 20.27]	[19.89, 30.67]	[28.41, 46.06]	[37.78, 58.88]		
百分比(%)							
钙化总体积	4.51(2.41, 9.00)	9.75(5.22, 16.97)	13.16(8.16, 25.61)	18.85(11.5, 34.01)	24.92(15.96, 43.6)	620.833	<0.001
(n=170)	[6.54, 11.11]	[12.53, 18.43]	[17.83, 24.59]	[23.66, 31.09]	[30.28, 38.3]		
钙化总质量	4.84(2.51, 8.69)	9.27(4.79, 16.34)	13.34(7.25, 25.08)	18.63(11.27, 34.26)	25.23(15.41, 43.29)	603.029	<0.001
(n=170)	[6.82, 11.52]	[12.82, 19.14]	[17.74, 24.65]	[23.57, 31.17]	[30.28, 38.43]		
Agatston 积分	4.75(2.43, 8.74)	9.05(5.19, 17.34)	12.98(8.05, 25.20)	19.71(11.3, 35.42)	25.09(16.18, 43.62)	606.598	<0.001
(n=170)	[6.76, 11.46]	[12.80, 18.86]	[18.15, 25.18]	[24.32, 32.10]	[30.93, 39.22]		

注:数据用中位数及四分位数 $M(Q1, Q3)$ [中位数 95% CI]表示,* Friedman 检验卡方值,# Friedman 检验 P 值

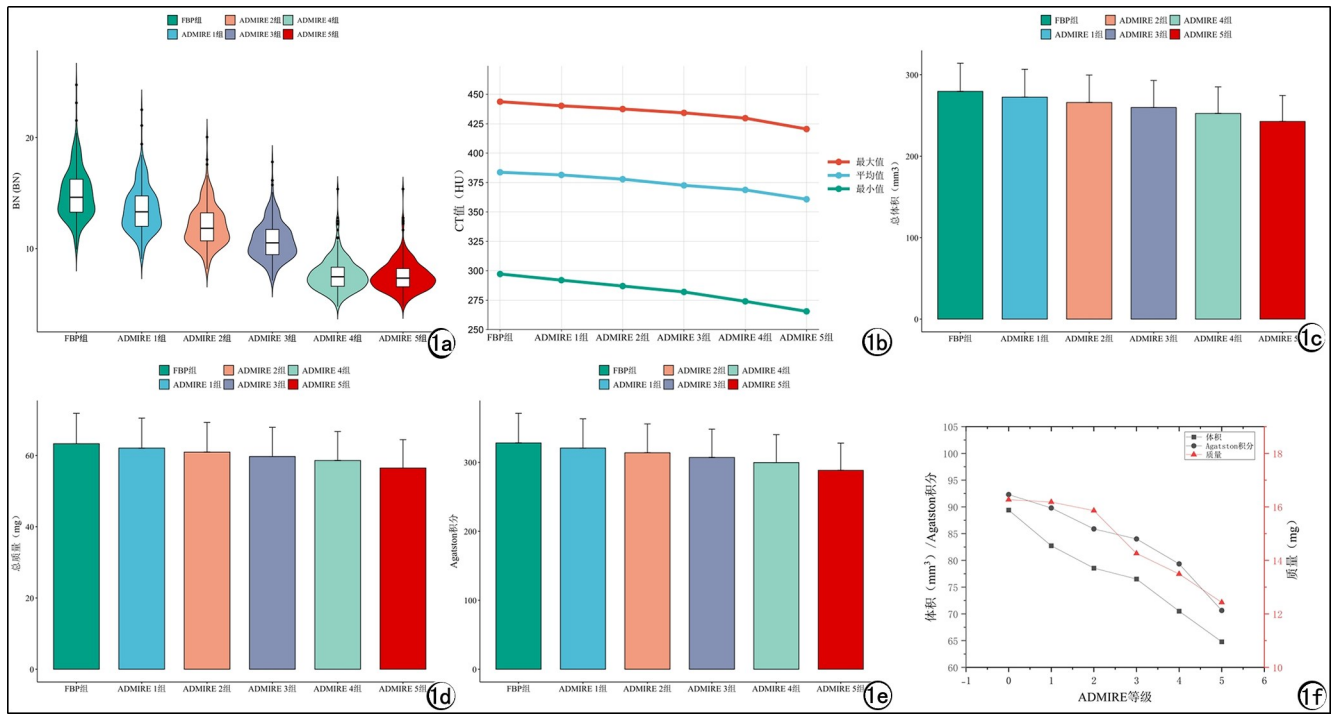


图 1 客观参数及 CAC 定量随 ADMIRE 等级的变化。a) 不同 ADMIRE 等级图像噪声的变化; b) 不同 ADMIRE 等级钙化斑块 CT 值(中位数)的变化; c) 不同 ADMIRE 等级冠状动脉钙化总体积的变化; d) 不同 ADMIRE 等级冠状动脉钙化总质量的变化; e) 不同 ADMIRE 等级 CAC Agatston 积分的变化; f) 不同 ADMIRE 等级 CAC 定量随 ADMIRE 等级的改变。

组 6 组间均具有统计学差异(P 均 <0.001 , 表 1、图 1b)。

3. AI 软件 CACS 定量结果

101(101/271)名患者 FBP 组 Agatston 积分为 0, ADMIRE 1~5 级组 Agatston 积分均为 0。170(170/271)名患者 FBP 组钙化总体积[89.40 (22.83, 347.34) mm^3]、质量[16.27 (3.65, 64.00) mg]、Agatston 积分 92.30 (19.73, 374.46)均最高。随 ADMIRE 等级增高, 钙化总体积、质量、Agatston 积分均逐渐降低, ADMIRE 5 组最低(图 1c~f)。与 FBP 组钙化总体积、质量、Agatston 积分相比, ADMIRE 5 组绝对值

分别降低 19.55 (8.09, 62.76) mm^3 , 3.29 (1.33, 11.27) mg, 19.73 (6.71, 58.71), 百分比分别降低 24.92 (15.96, 43.60)%, 25.23 (15.41, 43.29)%, 25.09 (16.18, 43.62)%(表 2)。

4. 风险等级

271 名患者在 FBP 组、ADMIRE 1~5 级组的危险分层分布见表 3。冠状动脉有钙化的 170 名患者中共有 29 名患者风险分层受到 ADMIRE 等级的影响, 其中 15 名患者由 I 级降至 0 级, 11 名患者有 II 级降至 I 级, 3 名患者由 III 级降至 II 级(表 4, 图 2、3)。

表 3 271 名患者在不同重建算法的风险分层分布 (例)

危险分层	FBP 组	ADMIRE 1 级组	ADMIRE 2 级组	ADMIRE 3 级组	ADMIRE 4 级组	ADMIRE 5 级组
0 级	101	104	106	107	111	116
I 级	86	85	86	88	84	76
II 级	43	41	38	36	38	40
III 级	41	41	41	40	38	39

表 4 29 例患者不同重建算法的风险分层再分类 (例)

危险分层变化	ADMIRE 1-FBP	ADMIRE 2-ADMIRE 1	ADMIRE 3-ADMIRE 2	ADMIRE 4-ADMIRE 3	ADMIRE 5-ADMIRE 4
I 级降至 0 级	3	2	1	4	5
II 级降至 I 级	2	3	3	0	3
III 级降至 II 级	0	0	1	2	0

注: ADMIRE 1-FBP 为 FBP 增至 ADMIRE 1 级, ADMIRE 2-ADMIRE 1 为 ADMIRE 算法由 1 级增至 2 级

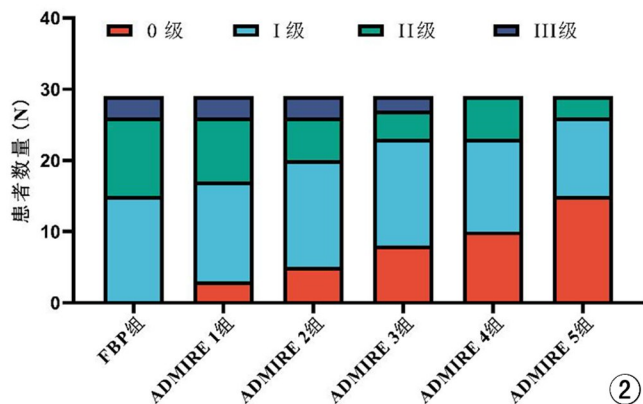


图 2 29 名患者随重建等级危险分层改变

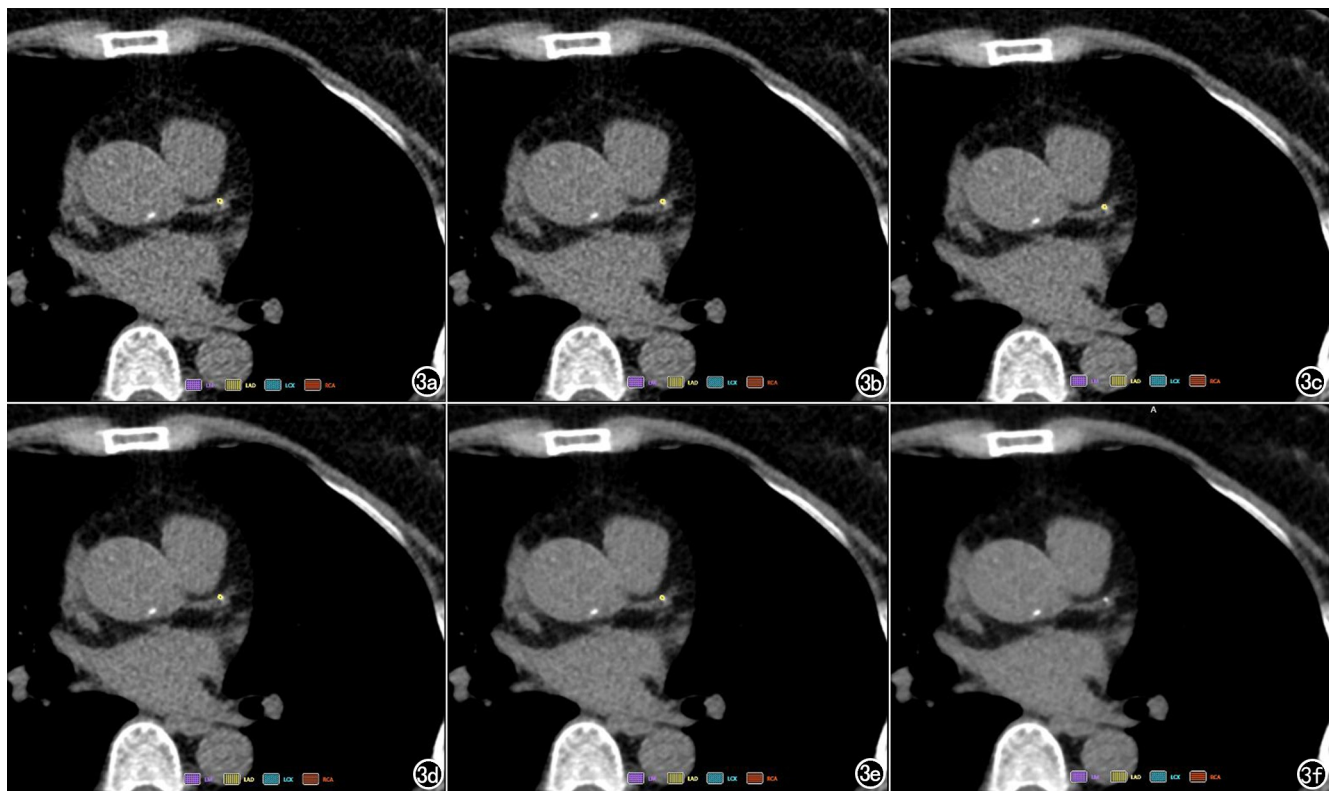


图3 CAC定量随ADMIRE等级的变化。患者,女62岁,因胸闷、慢性胸痛就诊,行冠状动脉CTA检查。a)FBP图像,图像噪声14.75 HU,AI自动识别并标注出钙化(黄色部分),前降支(LAD)钙化AI定量体积、质量、Agatston积分分别为 6.88 mm^3 、 0.81 mg 、 3.44 ,危险分层I级;b)ADMIRE 1级图像,图像噪声14.75 HU,LAD钙化AI定量分别为 4.25 mm^3 、 0.49 mg 、 1.42 ,危险分层I级;c)ADMIRE 2级图像,图像噪声13.34 HU,LAD钙化AI定量分别为 2.02 mm^3 、 0.24 mg 、 0.67 ,危险分层I级;d)ADMIRE 3级图像,图像噪声10.58 HU,LAD钙化AI定量分别为 1.82 mm^3 、 0.20 mg 、 0.61 ,危险分层I级;e)ADMIRE 4级图像,图像噪声9.09 HU,LAD钙化AI定量分别为 1.82 mm^3 、 0.19 mg 、 0.60 ,危险分层I级;f)ADMIRE 5级图像,图像噪声7.35 HU,LAD钙化AI定量分别为 0 mm^3 、 0 mg 、 0 ,危险分层0级。该患者CTDIvol 2.99 mGy ,DLP $45.40\text{ mGy}\cdot\text{cm}$,ED 0.64 mSv 。

5. 辐射剂量

本研究271例患者的平均CTDIvol为 $(2.64 \pm 0.76)\text{ mGy}$ ($1.30 \sim 5.94\text{ mGy}$),DLP为 $(43.33 \pm 12.75)\text{ mGy}\cdot\text{cm}$ ($22.10 \sim 98.60\text{ mGy}\cdot\text{cm}$),ED为 $(0.61 \pm 0.18)\text{ mSv}$ ($0.31 \sim 1.38\text{ mSv}$)。

讨论

本研究应用AI探究Sa36卷积核联合ADMIRE不同迭代等级对冠状动脉钙化定量测量的影响。结果显示随着ADMIRE等级的升高,图像噪声显著降低,但升主动脉的CT值并未受到影响。同时,AI软件CACS定量结果(钙化总体积、质量、Agatston积分)随ADMIRE等级升高而降低,导致部分患者的危险分层被低估。因此,在临床实际中,应注意ADMIRE迭代重建技术对冠状动脉钙化定量及危险分层的潜在影响。

基于心电门控的冠状动脉CT图像进行CAC定量已成为评估心血管风险和预测未来心脏事件的重要工具^[17]。此外,CAC在我国部分省份已成为常规体检筛查项目^[12]。然而,CT扫描过程中的电离辐射,会不同程度引起受检者的焦虑,限制了其广泛应用。因此,尽可能降低受检者CAC扫描过程中的辐射剂量一直是成像技术研究的关键方向。不同IR重建算法在临床中的应用可明显降低图像噪声,为降低患者的辐射剂量提供了可能。低剂量扫描模式联合多种IR技术在临床中应用最广泛。国内外相关研究表明^[11,18,19],不同的IR技术能够有效降低噪声,但会影响冠状动脉钙化斑块CT值,也会不同程度影响CAC量化结果。CAC定量结果关系到患者后续治疗和干预方式,因此其可重复性、复查时的可比性至关重要。

ADMIRE算法在显著降低图像噪声的同时,能够保证组织CT值不变。本研究结果显示,升主动脉的

CT 值在 FBP 组、ADMIRE 1~5 组间无明显差异,而图像噪声则随迭代等级的增高而逐渐降低。这表明,ADMIRE 重建算法在降低噪声的同时,并不会引起组织 CT 值的改变,可确保组织 CT 值的稳定性。这与胸部 LDCT 中 ADMIRE 算法不会引起纵膈组织(脂肪、竖脊肌、主动脉)CT 值改变的研究结论相一致^[20]。ADMIRE 算法结合了系统模型、解剖结构感知模型、原始数据与统计模型以及噪声模型,在保持信息值不变的前提下显著降低图像噪声^[20]。同时,也进一步说明,冠脉钙化的最大值、平均值、最小值的改变并非由噪声减少所致,而是图像重建过程中多模型综合影响所致。

不同的 IR 技术对 CAC 定量结果有不同影响。Gebhard 等^[11]使用自适应统计迭代重建(Adaptive Statistical Iterative Reconstruction, ASIR)评估 CAC 的研究中,与 FBP 算法相比,ASIR 算法从 20% 增加至 100% 时,Agatston 评分从 -6.0% 降至 -22.4%,CAC 体积从 -3.7% 降至 -18.6%。但 CAC 质量并未随 ASIR 百分比发生明显改变。这是由于 CAC 质量是钙密度与体积的乘积,随 ASIR 百分比的增加,钙化斑块边缘变得平滑导致体积减小,钙化中心部分变得更致密导致钙化密度增加,从而 CAC 整体质量并未发生改变。与使用 ASIR 的研究结果不同,本研究中随 ADMIRE 等级的增高,钙化体积、质量与 Agatston 积分均呈下降趋势、且下降百分比相似;在 ADMIRE 5 组,钙化容积、质量、Agatston 积分分别下降 24.92%、25.23%、25.09%。与 SAFIRE CAC 研究结果相似,随着 SAFIRE 等级增高,CAC 体积、质量、Agatston 积分均下降,且下降百分比相似。需要注意的是:在 SAFIRE 1 级时,钙化斑块的 CT 值、CAC 体积、质量、Agatston 积分均高于 FBP^[18];在 SAFIRE 1~5 级时相关参数随迭代等级增高而逐渐下降。与 SAFIRE 结果不同,和 FBP 组相比,本研究 170 名钙化患者 ADMIRE 1~5 级组中并没有任何患者 CAC 积分增加,说明 ADMIRE 技术对 CAC 定量结果的“鲁棒性”非常好^[21]。

CAC 体积、质量及 Agatston 积分的变化是 ADMIRE 算法在图像重建过程中,通过边缘增强、伪影抑制与密度重构等机制,系统性重塑钙化斑块的空间结构与 CT 值分布,综合影响 CAC 的定量结果。ADMIRE 作为一种基于模型的高级迭代重建算法,通过在原始数据域中进行统计加权,在图像域中引入结构感知的正则化策略,实现对图像噪声和伪影的有效抑制,同时保留关键解剖结构信息。该算法根据射线的信噪比对投影数据进行加权,降低高噪声区域对最终图像的干扰;在图像域中引入基于梯度的正则化函数,

可抑制非结构性噪声突变,增强解剖边缘锐利度,尤其在冠脉钙化区域,有助于减少“晕状伪影”^[22,23],改善钙化边界清晰度,减少由伪影造成的高 CT 值像素,从而使 CAC 面积和体积的测量值下降。此外,该算法在优化图像结构表现的过程中,可能引起钙化区域最大 CT 值的轻微下调。这一现象源于图像域正则化机制在抑制非结构性高频信号的同时,对极端 CT 值进行平滑调控,进而影响以密度为权重的 CAC 质量积分与 Agatston 积分估算。需要指出的是,这种影响并非由于病灶本身的改变,而是图像重建策略在结构保留与噪声压控之间取得平衡的表现。因此,理解 ADMIRE 对 CAC 定量参数的潜在影响,有助于提高临床解读的准确性,并在随访过程中保证重建参数的一致性,从而提升 CAC 评估结果的可比性与稳定性。

常规电压、低管电压(门控、非门控)扫描条件下,CACS 定量均会受卷积核影响,从而影响受检者心血管风险评估的有效性^[9,12,24]。Sa36 是专门用于 CACS 定量的独立千伏卷积核,该卷积核使用迭代硬化线束校正技术,使人体内骨骼和钙化物质在不同的管电压下表现出类似 120 kVp 衰减特性^[9]。即 Sa36 卷积核不受管电压的影响,可在 70~110 kVp 及能谱纯化协议下(Sn100、Sn150)创建 120 kVp 扫描的等效图像^[9,25]。模体和临床研究均证实 Sa36 用于低管电压下 CACS CT 的准确性,同时减少受检者的辐射剂量^[9,25]。Sa36 卷积核在低剂量 CACS CT 应用中具有较大的潜力。

基于 CT 图像的 CACS 是评估心血管不良事件的重要预测指标、也是早期诊断冠心病的重要指标。CAC 钙化精确测量对预测心血管不良事件的发生率、下一步的治疗具有重要的临床意义^[17,26]。但临床实际中,多数医院应用厂商配备的后处理工作站进行阈值半自动技术人工定量,人工测量存在耗费操作医师时间精力、可重复性相对较差、不同医师测量结果可能不一致等众多不足。AI 软件的引入除了可有效弥补上述不足外,还可提升测量效率、减少因操作者差异或经验导致的误差,且多次测量结果稳定。同时,也可减少医疗纠纷的发生,为临床决策提供更准确的价值。需要说明的是:CAC AI 软件识别钙化的准确性并不是 100%,会将部分患者钙化淋巴结、邻近冠状动脉的主动脉钙化识别为冠脉钙化,造成 CAC 的高估;也会漏掉多发钙化的部分钙化、冠脉的远段微小钙化,造成 CAC 的低估。在使用 AI 软件时,要核对识别钙化的准确性,并手动修正识别有误的钙化以保证结果的准确性。相信随着 AI 软件的更新升级,冠脉钙化识别的准确性会进一步提升。

本研究 271 名患者的平均 ED 为 0.61 mSv,低于

256层 Philips 螺旋 CT 门控下的平均 ED (1.5 mSv)^[12], 低于 GE Revolution CT 扫描机的平均 ED(0.70 mSv)^[19], 亦低于第二代双源 CT 扫描机的平均 ED(0.81 mSv)^[11], 仅为国家肺癌筛查试验 NLST (The National Lung Screening Trial, NLST) 中 BMI ≤ 30 kg/m² 的整个胸部 CT 的总有效剂量 3.0 mSv 的五分之一左右^[27], 与常规 LDCT(0.6~1.5 mSv) 最低辐射剂量相同^[28]。尽管第三代双源 CT 扫描机配有 70 kVp 的低管电压^[29] 及能谱纯化技术^[20], 可大幅度降低受检者辐射剂量, 但 CACS 的辐射剂量并不是越低越好。IR 算法可以降低图像噪声, 但当辐射剂量过低时, 会导致 FBP 算法图像噪声过大, 人工半定量或 AI 软件会将噪声识别为钙化斑点、可能会造成 CAC 定量的假阳性^[30,31]。因此, CACS CT 指南推荐用 3.0 mm 的层厚重建图像, 同时要求用于 CACS 的各组图像噪声应小于 20 HU^[32,33]。既往部分研究未考虑图像层厚及噪声对 CAC 的影响, 如张卓璐等^[19,34] 采用 2.5 mm 的层厚重建图像, 且 ASIR-V0、ASIR-V20 图像噪声均大于 20 HU, 白国杰等^[35] 及顾海峰等^[13] 研究中 120 kVp 3.0 mm 层厚 FBP 图像噪声大于 20 HU, 研究试验方案设置不严谨、得出的结果可能不准确。本研究采用 120 kVp 常规管电压和自动 mAs 曝光技术, 并在扫描过程中开启 CARE Dose4D 功能, 曝光时系统根据定位图像调整不同扫描层面的管电流, 从而避免因管电流不足引起的“光子饥饿”现象, 可获得满足 CACS 定量要求的诊断图像, 同时为每位患者提供合适的辐射剂量。此外, 第三代双源 CT 扫描仪配备 3D Camera 智能定位技术, 能够更精确的确定水平中心线, 从而进一步优化扫描剂量^[36]。

本研究尚存在一定的不足之处: ①采用固定管电压的扫描方案, 未进行个体化设置; ②未使用后处理软件进行人工测量, 人工半定量与 AI 测量结果的一致性尚待进一步研究; ③仅设置 Sa36 一种卷积核, 未设置其他的卷积核(如 Qr36, Br36 等); ④仅对冠状动脉钙化总容积、总质量、总 Agatston 积分进行探究, 未对 CAC 块数、冠状动脉各分支(左主干、左前降支、左回旋支、右冠状动脉)进行详细评估。今后我们将扩大样本量、设置不同的卷积核、进行人工半定量、对冠状动脉详细分支, 进一步探究不同重建参数在 CACS 定量中的应用。

综上所述, ADMIRE 重建算法能明显降低图像噪声, 导致钙化斑块的最大 CT 值、平均 CT 值降低, 使冠状动脉钙化体积、质量、Agatston 积分大幅度降低, 影响患者冠心病风险分层评估。在冠状动脉钙化患者的随访复查过程中, 建议使用相同等级的重建算法, 以提升评估的稳定性。

致谢:感谢西门子工程师吕孟哲在研究过程中给予的技术支持

参考文献:

- [1] Yao H, Feng G, Liu Y, et al. Coronary artery calcification burden, atherogenic index of plasma, and risk of adverse cardiovascular events in the general population; evidence from a mediation analysis[J]. *Lipids in health and disease*, 2024, 23(1): 258 [Aug 20 2024]. DOI: 10.1186/s12944-024-02255-1.
- [2] Vatsa N, Faaborg-Andersen C, Dong T, et al. Coronary atherosclerotic plaque burden assessment by computed tomography and its clinical implications[J]. *Circulation Cardiovascular Imaging*, 2024, 17(8): e016443. DOI: 10.1161/CIRCIMAGING.123.016443.
- [3] Allio IR, Caobelli F, Popescu CE, et al. Low-dose coronary artery calcium scoring compared to the standard protocol[J]. *J Nucl Cardiol*, 2023, 30(3): 1191-1198.
- [4] Kamani CH, Huang W, Lutz J, et al. Impact of adaptive statistical iterative reconstruction-V on coronary artery calcium scores obtained from low-tube-voltage computed tomography-a patient study[J]. *Acad Radiol*, 2022, 29(Suppl 4): S11-S16.
- [5] Bechtiger FA, Grossmann M, Bakula A, et al. Risk stratification using coronary artery calcium scoring based on low tube voltage computed tomography[J]. *International J Cardiovascular Imaging*, 2022, 38(10): 2227-2234.
- [6] Dey D, Nakazato R, Pimentel R, et al. Low radiation coronary calcium scoring by dual-source CT with tube current optimization based on patient body size[J]. *J Cardiovascular Computed Tomography*, 2012, 6(2): 113-120.
- [7] Wang W, Zhao YE, Qi L, et al. Sinogram-affirmed iterative reconstruction negatively impacts the risk category based on Agatston score; a study combining coronary calcium score measurement and coronary CT angiography [J]. *BioMed Research International*, 2020; 6909130 [Jul 13 2020]. DOI: 10.1155/2020/6909130.
- [8] Kang HW, Ahn WJ, Jeong JH, et al. Evaluation of fully automated commercial software for Agatston calcium scoring on non-ECG-gated low-dose chest CT with different slice thickness[J]. *European Radiology*, 2023, 33(3): 1973-1981.
- [9] Zook S, Tayal B, Kragholm K, et al. Intraindividual comparison of dose reduction and coronary calcium scoring accuracy using kilovolt-independent and tin filtration CT protocols[J]. *Radiology Cardiothoracic Imaging*, 2024, 6(3): e230246. DOI: 10.1148/ryct.230246.
- [10] Mousavi-Gazafroudi SS, Sajjadih-Khajouei A, Moradi M, et al. Evaluation of image quality and radiation dose in low tube voltage coronary computed tomography angiography[J]. *ARYA Atheroscler*, 2019, 15(5): 205-210.
- [11] Gebhard C, Fiechter M, Fuchs TA, et al. Coronary artery calcium scoring: influence of adaptive statistical iterative reconstruction using 64-MDCT[J]. *International J Cardiology*, 2013, 167(6): 2932-2937.
- [12] 孙安, 樊荣荣, 孙瑶, 等. CT 重组算法对低剂量胸部 CT 筛查冠状动脉钙化积分准确性影响研究[J]. *临床放射学*, 2022, 41(5): 881-885.
- [13] 顾海峰, 鲍雪琴, 王清清, 等. 高级建模迭代重建对冠状动脉钙化积分的影响[J]. *放射学实践*, 2022, 37(8): 1028-1034.

- [14] Messerli M, Rengier F, Desbiolles L, et al. Impact of advanced modeled iterative reconstruction on coronary artery calcium quantification[J]. *Academic Radiology*, 2016, 23(12):1506-1512.
- [15] Wang Y, Zhan H, Hou J, et al. Influence of deep learning image reconstruction and adaptive statistical iterative reconstruction-V on coronary artery calcium quantification[J]. *Ann Transl Med*, 2021, 9(23):1726.
- [16] Deak PD, Smal Y, Kalender WA. Multisection CT protocols: sex- and age-specific conversion factors used to determine effective dose from dose-length product[J]. *Radiology*, 2010, 257(1):158-166.
- [17] Wongyikul P, Tantraworasin A, Suwannasom P, et al. Prediction model for recommending coronary artery calcium score screening (CAC-prob) in cardiology outpatient units: a development study [J]. *PloS One*, 2024, 19(9): e0308890 [Sep 30 2024]. DOI: 10.1371/journal.pone.0308890.
- [18] 龙斌, 宋少辉, 刘怡, 等. SAFIRE 算法对冠状动脉钙化积分的影响[J]. *临床放射学*, 2018, 37(7):1117-1120.
- [19] 张卓璐, 王征, 刘卓, 等. 迭代重建算法对冠状动脉 Agatston 钙化积分的影响[J]. *临床放射学*, 2020, 39(10):2093-2097.
- [20] 杜华阳, 秦瑞遥, 隋昕, 等. 能谱纯化技术联合 ADMIRE 重组算法在超低剂量胸部 CT 中应用的单臂前瞻性探究[J]. *临床放射学*, 2022, 41(12):2224-2231.
- [21] 余彬, 谢文波, 李永强. 基于治疗室 CT 分析前列腺癌碳离子治疗前剂量分布的鲁棒性[J]. *中华放射肿瘤学*, 2024, 33(1):33-39.
- [22] Liu H, Wingert A, Wang J, et al. Extraction of coronary atherosclerotic plaques from computed tomography imaging: a review of recent methods[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2021, 8: 597568 [Feb 10 2021]. DOI: 10.3389/fcvm.2021.597568.
- [23] Kang DK. Assessment of coronary stenosis using coronary CT angiography in patients with high calcium scores: current limitations and future perspectives[J]. *J Korean Society of Radiology*, 2024, 85(2):270-96.
- [24] 孙安, 朱一白, 史亮, 等. CT 重建算法对基于深度学习非门控冠脉钙化积分模型评价心血管风险分层的影响[J]. *放射学实践*, 2023, 38(4):419-425.
- [25] Vingiani V, Abadia AF, Schoepf UJ, et al. Low-kV coronary artery calcium scoring with tin filtration using a kV-independent reconstruction algorithm[J]. *J Cardiovascular Computed Tomography*, 2020, 14(3):246-250.
- [26] Frey SM, Huré G, Leibfarth JP, et al. Diagnostic utility of coronary artery calcium score percentiles and categories to exclude abnormal scans and relevant ischemia in rubidium positron emission tomography [J]. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, 2024, 11: 1467916 [Sep 23 2024]. DOI: 10.3389/fcvm.2024.1467916.
- [27] Wood DE, Kazerooni EA, Baum SL, et al. Lung cancer screening, Version 3. 2018, NCCN clinical practice guidelines in oncology [J]. *J National Comprehensive Cancer Network: JNCCN*, 2018, 16(4):412-441.
- [28] 赫捷, 李霓, 陈万青, 等. 中国肺癌筛查与早诊早治指南(2021, 北京) [J]. *中国肿瘤*, 2021, 30(2):81-111.
- [29] Jia CF, Zhong J, Meng XY, et al. Image quality and diagnostic value of ultra low-voltage, ultra low-contrast coronary CT angiography[J]. *Eur Radiology*, 2019, 29(7):3678-3685.
- [30] Fink N, Zsarnoczay E, Schoepf UJ, et al. Radiation dose reduction for coronary artery calcium scoring using a virtual noniodine algorithm on photon-counting detector computed-tomography phantom data[J]. *Diagnostics (Basel, Switzerland)*, 2023, 13(9): 1540 [Apr 25 2023]. DOI: 10.3390/diagnostics13091540.
- [31] Madaj P, Li D, Nakanishi R, et al. Radiation doses in patients undergoing computed tomographic coronary artery calcium evaluation with a 64-slice scanner Versus a 256-slice scanner[J]. *Texas Heart Institute J*, 2022, 49(2): e186793. DOI: 10.14503/THIJ-18-6793.
- [32] Vonder M, Van Der Werf NR, Leiner T, et al. The impact of dose reduction on the quantification of coronary artery calcifications and risk categorization: a systematic review[J]. *J Cardiovascular Computed Tomography*, 2018, 12(5):352-363.
- [33] Voros S, Rivera JJ, Berman DS, et al. Guideline for minimizing radiation exposure during acquisition of coronary artery calcium scans with the use of multidetector computed tomography: a report by the Society for Atherosclerosis Imaging and Prevention Tomographic Imaging and Prevention Councils in collaboration with the Society of Cardiovascular Computed Tomography[J]. *J Cardiovascular Computed Tomography*, 2011, 5(2):75-83.
- [34] 张卓璐, 刘卓, 洪楠. 混合迭代重建混合权重对心脏 CT 冠状动脉钙化积分影响[J]. *放射学实践*, 2021, 36(6):751-755.
- [35] 白国杰, 刘文远, 李珂欣, 等. 迭代重建技术对冠状动脉钙化积分定量评估的影响[J]. *实用医技*, 2022, 29(5):457-561.561.
- [36] 杨尚文, 朱小倩, 辛小燕, 等. 三维人工智能定位技术在 CT 胸部扫描中的应用[J]. *中华放射学*, 2022, 56(1):50-54.

(收稿日期:2024-12-10 修回日期:2025-03-21)