

联合人工智能模型迭代重建和 70kV 超低管电压大幅度降低肺动脉 CTA 辐射剂量的研究

曹建新, 朱卓, 张清, 韩锦涛, 陈颖, 许炜

【摘要】 目的:探讨联合人工智能模型迭代重建(AIIR)和 70kV 超低管电压在大幅度降低肺动脉 CTA(CTPA)辐射剂量中的应用价值。**方法:**100 例疑似肺动脉栓塞或肺动脉栓塞复查的患者随机分成 A 组(100 kV 管电压)和 B 组(70 kV 管电压)行 CTPA 检查, A 组采用混合迭代重建(HIR), B 组采用 HIR 和 AIIR。评估 A、B 两组辐射剂量。评估 A 组 HIR 图像、B 组 HIR 图像和 AIIR 图像背景噪声、肺动脉信噪比(SNR)和对比噪声比(CNR), 并采用 5 分法对 CTPA 图像质量进行评分。**结果:**100 例患者中 10 例存在呼吸运动伪影或大量胸腔积液被排除, 最终 A 组和 B 组分别有 50 例和 40 例患者纳入。A、B 两组有效辐射剂量(ED)分别为 (4.3 ± 0.8) mSv 和 (1.3 ± 0.2) mSv, 与 A 组相比 B 组 ED 下降 69.8% ($P < 0.001$)。A 组 HIR 图像、B 组 HIR 和 AIIR 图像背景噪声分别为 (19.2 ± 3.7) HU、 (28.1 ± 4.4) HU 和 (13.7 ± 6.5) HU; B 组 AIIR 图像背景噪声显著低于 A 组 HIR 图像和 B 组 HIR 图像 ($P < 0.001$)。A 组 HIR 图像上右肺动脉信噪比(SNR)和对比噪声比(CNR)分别为 21.5 ± 5.9 和 18.8 ± 5.6 , 左肺动脉 SNR 和 CNR 分别为 21.9 ± 6.2 和 19.2 ± 5.9 ; B 组 HIR 图像上右肺动脉 SNR 和 CNR 分别为 19.4 ± 3.7 和 17.2 ± 3.5 , 左肺动脉相应数值分别为 19.4 ± 3.5 和 17.2 ± 3.3 ; B 组 AIIR 图像上右肺动脉 SNR 和 CNR 分别为 45.7 ± 14.5 和 40.9 ± 13.4 , 左肺动脉相应数值分别为 46.0 ± 14.6 和 41.1 ± 13.6 ; B 组 AIIR 图像上右肺动脉及左肺动脉 SNR 和 CNR 均明显高于 A 组 HIR 图像和 B 组 HIR 图像 ($P < 0.001$)。A 组 HIR 图像、B 组 HIR 图像和 B 组 AIIR 图像主观评分分别为 4.5 ± 0.6 、 4.1 ± 0.5 和 4.9 ± 0.3 , B 组 AIIR 图像主观评分显著高于 A 组和 B 组 HIR 图像 ($P < 0.001$)。**结论:**联合 AIIR 和 70kV 超低管电压在大幅度降低 CTPA 辐射剂量的同时, 图像质量相对于 100kV 管电压 HIR 图像更优。

【关键词】 CT 血管造影术; 人工智能; 图像处理, 计算机辅助; 图像增强; 辐射剂量; 体层摄影术, X 线计算机

【中图分类号】 R-05; R814.3; R814.4; R814; R144 **【文献标志码】** A

【文章编号】 1000-0313(2024)10-1361-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2024.10.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study of dramatic reducing radiation dose of CT pulmonary angiography using artificial intelligence model-based iterative reconstruction with 70kV ultra-low tube voltage setting CAO Jian-xin, ZHU Zhuo, ZHANG Qing, et al. Department of Radiology, Puren Hospital Affiliated to Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China

【Abstract】 Objective: To explore the application value of dramatic reducing radiation dose of CT pulmonary angiography (CTPA) using artificial intelligence model-based iterative reconstruction (AIIR) combined with 70kV ultra-low tube voltage setting. **Methods:** A total of 100 patients with suspected pulmonary embolism or follow-up of pulmonary artery embolism were underwent CTPA and randomly divided into group A (100kVp) and group B (70kVp), hybrid iterative reconstruction (HIR) was used in group A, and HIR and AIIR were used in group B. Radiation doses were evaluated for group A and B. Background noise, signal-to-noise ratio (SNR) and contrast-to-noise ratio (CNR) of

作者单位: 430081 武汉, 武汉科技大学附属普仁医院放射科(曹建新、朱卓、张清、陈颖、许炜); 201800 上海, 上海联影医疗科技股份有限公司(韩锦涛)

作者简介: 曹建新(1977—), 男, 湖北嘉鱼人, 硕士, 副主任医师, 主要从事心胸血管性疾病影像诊断及 CT 新技术应用与研究。

通讯作者: 张清, E-mail: 221478524@qq.com

基金项目: 武汉科技大学职业危害识别与控制湖北省重点实验室开放基金项目(OHIC2021G04)

pulmonary artery on the HIR images in group A and those on the HIR and AIIR images in group B were evaluated, image quality of CTPA was graded on a 5-point scale. **Results:** Among the 100 patients, 10 patients were excluded because of respiratory motion artifacts or massive pleural effusion. Finally, 50 and 40 patients were included in group A and group B, respectively. The effective doses (ED) were (4.3 ± 0.8) mSv in group A and (1.3 ± 0.2) mSv in group B, compared to group A, the ED was decreased by 69.8% in group B ($P < 0.001$). The background noise was (19.2 ± 3.7) HU, (28.1 ± 4.4) HU and (13.7 ± 6.5) HU on the HIR images in group A, the HIR and AIIR images in group B, respectively; the background noise on the AIIR images in group B was significantly lower than that on the HIR images in group A and B ($P < 0.001$). On the HIR images in group A, the SNR and CNR of right pulmonary were 21.5 ± 5.9 and 18.8 ± 5.6 , and those of left pulmonary were 21.9 ± 6.2 and 19.2 ± 5.9 , respectively; on the HIR images in group B, the SNR and CNR of right pulmonary were 19.4 ± 3.7 and 17.2 ± 3.5 , and those of left pulmonary were 19.4 ± 3.5 and 17.2 ± 3.3 , respectively; on the AIIR images in group B, the SNR and CNR of right pulmonary were 45.7 ± 14.5 and 40.9 ± 13.4 , and those of left pulmonary were 46.0 ± 14.6 and 41.1 ± 13.6 , respectively; the SNR and CNR of right and left pulmonary on AIIR images in group B were all significantly higher than those on HIR images in group A and B ($P < 0.001$). The subjective scores were 4.5 ± 0.6 , 4.1 ± 0.5 and 4.9 ± 0.3 for the HIR images in group A, the HIR images and AIIR images in group B, respectively; the subjective scores for the AIIR images in group B were significantly higher than those for the HIR images in group A and B ($P < 0.001$). **Conclusion:** The radiation dose of CTPA can be reduced significantly using AIIR combined with 70kV ultra-low tube voltage setting while image quality is better than the HIR image using 100kV tube voltage.

【Key words】 CT angiography; Artificial intelligence; Image processing, computer-assisted; Image enhancement; Radiation dosage; Tomography, X-ray computed

肺动脉 CTA (CT pulmonary angiography, CTPA) 是诊断和排除肺动脉栓塞的首选检查方法, 在评估肺动脉栓塞严重程度和指导临床治疗决策中起到非常重要的作用^[1-2]。但 CTPA 存在电离辐射, 根据国际放射防护委员会可合理的最低剂量原则, 降低 CTPA 辐射剂量十分有必要^[3]。目前 100 kV 管电压已被广泛用于降低 CTPA 辐射剂量^[4], 但采用超低压 70 kV 来降低 CTPA 辐射剂量受到一定限制, 主要是由于随着管电压的进一步降低, 图像噪声显著增加^[5]。近年来基于深度学习的人工智能图像重建能够大幅度降低 CT 图像噪声, 并显著优于迭代重建^[6-9]。有报道了一种人工智能模型迭代重建 (artificial intelligence model-based iterative reconstruction, AIIR) 技术, 它结合了人工智能图像重建和模型迭代重建的优点, 能够大幅度提升超低剂量主动脉 CTA 的图像质量, 辐射剂量下降 84%^[10]。本研究采用 AIIR 来提升 70 kV 超低压管电压低辐射剂量 CTPA 的图像质量, 并与 CTPA 常规剂量混合迭代重建 (hybrid iterative reconstruction, HIR) 图像相比较, 以探讨联合 AIIR 和 70 kV 超低压管电压在大幅度降低 CTPA 辐射剂量中的应用价值。

材料与方法

1. 一般资料

选取 2022 年 10 月—2023 年 5 月 100 例行 CTPA 检查的患者作为研究对象, 检查前随机分为 A 组 (管电压 100 kV) 和 B 组 (管电压 70 kV), 入组标准: ①年龄 > 20 岁; ②体质指数 (body mass index, BMI) $< 25.0 \text{ kg/m}^2$; ③疑似肺动脉栓塞或肺动脉栓塞治疗后复查。排除标准: ①甲状腺功能亢进未治愈; ②估算肾小球滤过率 $< 60 \text{ mL}^{-1} \cdot (1.73 \text{ m}^2)^{-1}$; ③有碘对比剂过敏史; ④妊娠或 3 个月内准备怀孕; ⑤憋气不能配合; ⑥胸部存在金属内固定物; ⑦大量胸腔积液; ⑧心功能衰竭。本研究已通过本单位医学伦理委员会批准 (2022 年审第 00601)。患者检查前签署知情同意书。

2. 检查方法

采用 320 排 CT 扫描仪 (联影医疗 uCT960+, 上海)。先采用小剂量测试法测量肺动脉干 CT 值达峰时间。CTPA 扫描参数: A 组管电压 100 kV, B 组管电压 70 kV, 其他参数两组相同: 自动管电流调制, 参考管电流 120 mAs; 机架转速 0.35 秒/圈, 准直器宽度 80 mm, 螺距 1.0。碘对比剂 (碘海醇 350 mg I/mL, 扬子江药业) 采用 3 期注射方案: 第一期注射碘对比剂

6 s;第二期注射碘对比剂与生理盐水混合物 5~6 s,碘对比剂与生理盐水体积比=2:8;第三期注射生理盐水 20~30 mL;A 组注射流率=体质量×0.07 mL/s·kg⁻¹,B 组注射流率=体质量×0.06 mL/s·kg⁻¹,且 3 期注射流率一致。

3. 图像重建

A、B 组重建生成 HIR 图像(Karl 3D,7 级)。B 组 AIIR 图像在联影科研工作站(探索者平台 ulnno-
vation-CT,R001)使用生数据生成,重建等级为 4 级。图像层厚及层间距 1 mm。AIIR 是将人工智能与模型迭代重建算法相结合,它与传统的模型迭代重建算法有所不同。传统的模型迭代重建算法的优化函数如下: $U^* = \operatorname{argmin} U[||FP(U) - Y||^2W + \beta R(U)]$,其中 U^* 为目标图像, U 为输入图像, Y 为原始数据, β 为正则化系数, $FP(U)$ 为迭代过程, $R(U)$ 为正则化过程。AIIR 则对上述函数进行了修改,它采用人工智能卷积神经网络替代正则化项 $R(U)$,通过该神经网络学习图像中的噪声及纹理特征,能够根据所输入的图像自动地识别图像中的有用信号与噪声,从而实现图像质量提升与噪声抑制。

4. 图像客观参数分析

由一名 4 年以上工作经验的 CT 技师对感兴趣区进行测量和分析。将肺动脉干定为 1 级,左、右肺动脉为 2 级分支,肺叶动脉为 3 级分支,肺段动脉为 4 级分支,亚段肺动脉为 5 级分支,以此类推。依次测量肺动脉 1、2 级的 CT 值,并将肺动脉干 CT 值的标准差视作背景噪声,感兴趣区尽可能大并避开血管壁、栓子及上腔静脉线束硬化伪影。测量肺动脉干水平双侧冈下肌的 CT 值,并取其平均值。计算双侧肺动脉的信噪比(signal to noise ratio,SNR)及对比噪声比(contrast to noise ratio,CNR),相应的公式如下:肺动脉 SNR=肺动脉 CT 值/噪声,肺动脉 CNR=(肺动脉 CT 值-冈下肌平均 CT 值)/噪声。

5. 图像质量主观评价

由 1 名 8 年和 1 名 20 年以上工作经验的放射科

医师采用双盲法对图像质量进行评分,采用 Likert 5 分制,标准如下:5 分,图像质量优秀,噪声不明显,血管壁及栓子边界清晰锐利,无伪影及蜡像感,并可显示 7 级肺动脉分支;4 分,图像质量良好,噪声小,血管壁及栓子边界锐利,有少量伪影或轻微蜡像感,可显示 5~6 级肺动脉分支;3 分,图像质量中等,噪声、伪影和蜡像感一般但能接受,血管壁及栓子边界稍欠清晰,可以显示 3~4 级肺动脉,基本达到临床诊断要求;2 分,图像质量较差,噪声、伪影和蜡像感较重,血管壁及栓子显示模糊,显示 1~2 级肺动脉,3 级及以上肺动脉分支及远端血管显示差,不能达到诊断要求;1 分:图像质量极差,噪声、伪影及蜡像感严重,主干及分支血管显示差,无法诊断。其中 3~5 分视为可用于诊断图像质量评分。当两位医师的评分不一致时,由第三位有 20 年以上工作经验的放射科医师作最终评判。

6. 辐射剂量评价

记录扫描长度、CT 剂量容积指数(CT volume dose index,CTDIvol)和放射剂量长度乘积(dose length product,DLP)。计算有效辐射剂量(effective dose,ED),计算公式为: $ED = k \times DLP$,其中 k 为转换系数,参照欧洲 CT 质量标准指南取胸部平均值 0.014 mSv/mGy·cm。本研究只统计 CTPA 的辐射剂量,不包括定位像和小剂量测试的辐射剂量。

7. 统计学处理

采用 IBM 公司 SPSS 22.0 软件进行数据处理。两独立样本间计量资料比较时,符合正态分布的采用 t 检验,否则使用 Mann-Whitney U 检验。计数资料在两组间比较采用 χ^2 检验。在配对样本间计量资料比较时,符合正态分布的采用配对样本 t 检验,否则采用配对样本 Wilcoxon 检验。两位医师间图像质量评分一致性评价采用 Kappa 检验(Kappa 值 ≥ 0.80 为一致好,0.60<Kappa 值<0.80 为一致性较好,0.40<Kappa 值 ≤ 0.60 为一致性中等,0.20<Kappa 值 ≤ 0.40 为一致性一般,Kappa 值 ≤ 0.20 为一致性差)。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

表 1 两组患者基本资料、辐射剂量及对比剂用量比较

组别	A 组 (n=50)	B 组 (n=40)	检验值	P 值
年龄(岁)	69.4±14.4	69.5±12.9	0.366 ^a	0.715
男性(例)	30	17	2.071 ^b	0.150
BMI(kg/m ²)	23.1±2.3	22.7±1.8	0.934 ^c	0.353
扫描长度(cm)	30.5±3.5	30.4±3.4	0.182 ^c	0.856
CTDIvol(mGy)	7.7±1.1	2.4±0.2	32.304 ^c	0.000
DLP(mGy·cm)	304.4±55.6	92.6±12.0	26.200 ^c	0.000
ED(mSv)	4.3±0.8	1.3±0.2	26.196 ^c	0.000
对比剂流率(mL/s)	4.6±0.5	3.6±0.4	7.694 ^a	0.000
对比剂量(mL)	30.5±3.8	23.9±2.3	7.155 ^a	0.000

注:A 组,100 kV 管电压;B 组,70 kV 管电压;BMI,体质量指数;CTDIvol,CT 剂量容积指数;DLP,放射剂量长度乘积;ED,有效剂量;^a独立样本 U 检验;^b χ^2 检验;^c 独立样本 t 本检验

结 果

1. 两组患者基本资料、辐射剂量及对比剂用量比较

8 例患者因存在明显呼吸运动伪影、2 例有大量胸腔积液被排除。最终共有 90 例者被纳入最终的研究(A 组 50 例、B 组 40 例)。两组患者年龄、性别、BMI、扫描长度比较差异均无统计学意义,两组患者 CTDI-vol、DLP、ED、对比剂注射流率及用量有显著差异(表 1),与 A 组相比,B 组 ED 下降 69.8%。

2. 不同图像质量比较

与 A 组 HIR 图像相比,B 组 AIIR 图像上肺动脉干、右肺动脉及左肺动脉 CT 值增加幅度分别为 27.9%、38.1%和 36.4%,噪声下降 28.6%,右肺动脉 SNR 及 CNR 分别增加 112.6%和 117.6%,左肺动脉 SNR 及 CNR 分别增加 110.0%和 114.1%。B 组内 AIIR 图像与 HIR 图像相比,噪声下降 51.2%,肺动脉 CT 值稍有增加,右肺动脉 SNR 与 CNR 分别增加 135.6%和 137.8%,左肺动脉 SNR 与 CNR 分别增加 137.1%和 139.0%。

图像主观评分两位医师间的一致性较好(A 组 HIR 图像 Kappa 值=0.671,B 组 HIR 图像 Kappa 值=0.705;B 组 AIIR 图像 Kappa 值=0.727)。B 组 AIIR 图像评分高于 B 组 HIR 图像和 A 组 HIR 图像(图 1、2,表 2),且两组中所有图像均不存在因噪声过大而不能满足诊断需求。

讨 论

100 kV 管电压已广泛用于降低 CTPA 辐射剂量,但将管电压降低至 70 kV 或更低,图像噪声会有显著增加。尽管迭代重建技术可以用于降低 CT 图像噪声,但如果迭代权重过大则会改变原始数据中噪声的分布,导致图像纹理结构发生变化,使图像失真及细节

丢失产生蜡像感^[11-12]。

随着人工智能技术的快速发展,人工智能图像重建算法逐渐应用于医学领域中,它使用深度卷积神经网络对低剂量图像不断进行优化,在尽量不改变图像纹理结构的情况下实现图像降噪。与以往的迭代重建算法相比,人工智能深度学习重建算法具有以下优势:①具有更强的图像降噪能力;②有效减轻束硬化伪影;③允许使用更低的辐射剂量甚至超低剂量完成 CT 检查^[7-8,10,13-16]。但目前大多数的人工智能图像重建采用高质量下的 FBP 图像或 HIR 图像作为训练模型。而本研究中所使用的 AIIR 结合了人工智能与模型迭代重建算法的优点,所使用的训练数据集是由数百万模型迭代重建高质量图像与其相应的低剂量图像组成的,前期相关研究也显示了其提升低辐射剂量 CT 图像质量的强大能力^[10]。

邱慎满等^[6]对 80 kV 管电压 CTPA 采用了标准重建内核的深度学习算法时,显示图像质量优于 HIR 图像,但他们的研究并没有与常规剂量图像作对比,且他们所使用的深度学习算法采用的是标准剂量 FBP 图像作为训练模型。田杜雪等^[17]采用基于模型迭代的人工智能 CT 图像重建时,CTPA 辐射剂量降低 35%,且图像质量明显优于标准剂量图像,但没有采用超低管电压。关于 70 kV 的 CTPA 应用研究,前期已有一些报道并证实是可行的,但并没有使用人工智能降噪技术。闫莉等^[18]采用了与本研究相同型号的 320 排 CT,他们对 BMI 值<25.0 kg/m² 的患者行 CTPA 检查时将管电压由 100 kV 降低至 60 kV,管电流不变,采用 HIR 时 CTPA 图像质量并没有显著下降,因此在本研究中 70 kV 组没有增加管电流。本研究结果显示 B 组 AIIR 图像与同组 HIR 图像相比较时,肺动脉噪声大幅度降低且图像评分显著提升;且 B 组 AIIR 图像与 A 组 HIR 图像相比时,B 组 AIIR 图像噪声更低,相应的肺动脉的 SNR 和 CNR 更高,图像质量主观评分优于 A 组 HIR 图像。辐射剂量方

表 2 不同 CTPA 图像质量参数评价指标比较

图像类别	A 组 HIR (n=50)	B 组 HIR (n=40)	B 组 AIIR (n=40)	B 组 AIIR 与 B 组 HIR 比较		B 组 AIIR 与 A 组 HIR 比较	
				检验值	P 值	检验值	P 值
肺动脉干 CT 值(HU)	421.5±91.2	524.6±69.9	539.1±65.8	3.846 ^c	0.000	7.097 ^a	0.000
右肺动脉 CT 值(HU)	400.0±82.3	534.3±77.2	552.4±80.4	6.728 ^c	0.000	6.472 ^b	0.000
左肺动脉 CT 值(HU)	408.0±86.0	534.7±75.9	556.5±80.2	7.451 ^c	0.000	8.384 ^a	0.000
背景噪声(HU)	19.2±3.7	28.1±4.4	13.7±6.5	-5.511 ^d	0.000	-5.583 ^b	0.000
冈下肌 CT 值(HU)	49.9±7.2	59.3±10.9	59.5±11.0	2.764 ^d	0.006	5.481 ^b	0.000
右肺动脉 SNR	21.5±5.9	19.4±3.7	45.7±14.5	12.941 ^c	0.000	6.740 ^b	0.000
左肺动脉 SNR	21.9±6.2	19.4±3.5	46.0±14.6	13.030 ^c	0.000	6.796 ^b	0.000
右肺动脉 CNR	18.8±5.6	17.2±3.5	40.9±13.4	12.886 ^c	0.000	6.780 ^b	0.000
左肺动脉 CNR	19.2±5.9	17.2±3.3	41.1±13.6	12.717 ^c	0.000	9.503 ^a	0.000
图像质量评分	4.5±0.6	4.1±0.5	4.9±0.3	-5.416 ^d	0.000	3.611 ^b	0.000

注:A 组,100 kV 管电压;B 组,70 kV 管电压;HIR,混合迭代重建;AIIR,人工智能模型迭代重建;SNR,信噪比;CNR,对比噪声比;^a独立样本 t 值检验;^b独立样本 Mann-Whitney U 检验;^c配对样本 t 检验;^d配对样本 Wilcoxon 检验

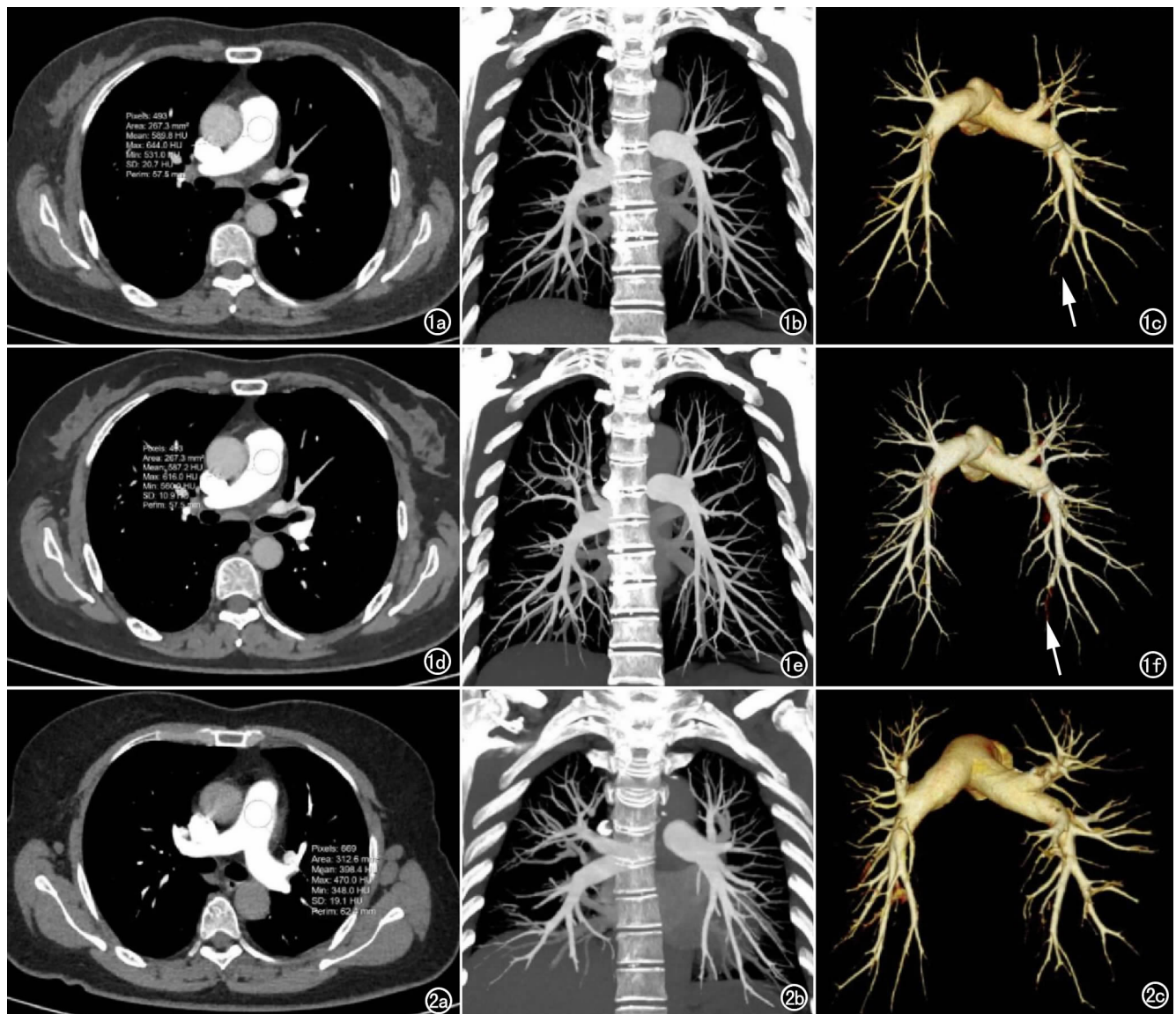


图 1 70 kV 组, 53 岁, 女, 右下肺动脉分支栓塞(箭), BMI 22.6 kg/m², ED 1.3 mSv。a) HIR 横断面图像, 背景噪声 20.7 HU; b) HIR 最大密度投影图像, 双上肺动脉部分远端 7 级分支显示欠佳; c) HIR 容积再现图像, 双侧肺动脉远端分支显示欠佳; d) AIIR 横断面图像, 背景噪声 10.9 HU; e) AIIR 最大密度投影图像, 双上肺动脉远端 7 级分支可见显示; f) AIIR 容积再现图像, 双侧肺动脉远端分支显示清晰。图 2 100 kV 组, 女, 63 岁, BMI 22.9 kg/m², ED 3.8 mSv, HIR 重建。a) 横断面图, 背景噪声 19.1 HU; b) 最大密度投影图; c) 容积再现图。

面, B 组 ED 为 (1.3±0.2) mSv, 与 A 组相比辐射剂量下降达 69.8%。

B 组 AIIR 图像上肺动脉 CT 值稍高于 HIR 图像, 这可能与 AIIR 算法在前期的训练过程中所使用的训练样本有关。因 AIIR 训练时所采用的样本图像是由模型迭代重建获得的, 有研究表明, 模型迭代重建图像 CT 值高于 HIR 图像, 因此 AIIR 图像肺动脉 CT 值也高于 HIR 图像^[19]。但对不含碘对比剂的软组织, 前期研究显示 AIIR 和 HIR 图像上 CT 值几乎一致^[14], 在本研究中 B 组 HIR 图像和 AIIR 图像上冈下肌的 CT 值十分接近也证实了这一点。在本研究中, B

组所使用的碘对比剂流率及总量比 A 组低, 但肺动脉 CT 值反而更高, 主要是由于 70 kV 管电压时含碘结构的光电效应更强, 使肺动脉 CT 值显著增加, 有利于栓子及肺动脉分支的显示。

本研究也存在一定的不足。首先, 本研究的例数较少。其次, 本研究中只使用了一种低剂量成像方案, 没有更低剂量的 CTPA 多组对比研究, 在使用 AIIR 技术的情况下, 更低剂量的 CTPA 还有待评估。第三, 本组病例没有明显超重和肥胖患者, 对 BMI 值较大的患者联合 AIIR 和 70 kV 超低管电压的应用还有待验证。

综上所述,对于 BMI<25.0 kg/m² 的患者采用 70 kV 超低管电压和 AIIR 技术不仅能够大幅度降低 CTPA 的辐射剂量,而且图像质量相对于 100 kV 图像更佳。

参考文献:

[1] Cozzi D, Moroni C, Cavigli E, et al. Prognostic value of CT pulmonary angiography parameters in acute pulmonary embolism[J]. Radiol Med, 2021, 126(8): 1030-1036.

[2] 张凡涛, 罗涛. 中高危急性肺血栓栓塞症患者 CTPA 检查中 Qanadli 指数的预后意义[J]. 放射学实践, 2020, 35(12): 1537-1541.

[3] 牛延涛, 张永县, 卓维海, 等. 加强放射诊断辐射剂量管理的必要性及应对策略[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2023, 43(4): 241-247.

[4] 张玉兰, 黄军荣, 郑晓林, 等. 256 层螺旋 CT 结合迭代重建及“三低”肺动脉成像的可行性研究[J]. 放射学实践, 2017, 32(2): 144-148.

[5] 邱慎满, 徐东风, 计一丁, 等. 70kVp 管电压及 25mL 对比剂在大螺旋距肺动脉成像中的应用[J]. 实用放射学杂志, 2019, 35(2): 294-298.

[6] 邱慎满, 张贺, 刘忠啸, 等. 深度学习重建在改善双低肺动脉 CTA 图像质量、评估 Qanadli 栓塞指数中的应用价值[J]. 中华医学杂志, 2023, 103(19): 1477-1482.

[7] Nam JG, Ahn C, Choi H, et al. Image quality of ultralow-dose chest CT using deep learning techniques: potential superiority of vendor-agnostic post-processing over vendor-specific techniques[J]. Eur Radiol, 2021, 31(7): 5139-5147.

[8] Jensen CT, Gupta S, Saleh MM, et al. Reduced-dose deep learning reconstruction for abdominal CT of liver metastases[J]. Radiology, 2022, 303(1): 90-98.

[9] 徐橙, 易妍, 李颜玉, 等. 深度学习重建算法在提升冠状动脉 CT 血管成像钙化所致血流梗阻性病变诊断准确性中的价值[J]. 中华医学杂志, 2021, 101(39): 3202-3207.

[10] Li W, You Y, Zhong S, et al. Image quality assessment of arti-

cial intelligence iterative reconstruction for low dose aortic CTA: a feasibility study of 70kVp and reduced contrast medium volume[J]. Eur J Radiol, 2022, 149(4): 110221.

[11] Laurent G, Villani N, Hossu G, et al. Full model-based iterative reconstruction (MBIR) in abdominal CT increases objective image quality, but decreases subjective acceptance[J]. Eur Radiol, 2019, 29(8): 4016-4025.

[12] Stiller W. Basics of iterative reconstruction methods in computed tomography: A vendor-independent overview[J]. Eur J Radiol, 2018, 109(12): 147-154.

[13] Bornet PA, Villani N, Gillet R, et al. Clinical acceptance of deep learning reconstruction for abdominal CT imaging: objective and subjective image quality and low-contrast detectability assessment[J]. Eur Radiol, 2022, 32(5): 3161-3172.

[14] 曹建新, 朱卓, 许炜, 等. 人工智能模型迭代重建对低剂量腹部增强 CT 图像质量的影响[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2023, 44(5): 547-555.

[15] 张磊, 时洪坤, 朱万安. 人工智能图像优化技术在低剂量胸部 CT 检查中的初步应用研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2020, 40(9): 722-727.

[16] Hata A, Yanagawa M, Yoshida Y, et al. Combination of deep learning-based denoising and iterative reconstruction for ultra-low-dose CT of the chest: image quality and lung-RADS evaluation[J]. AJR Am J Roentgenol, 2020, 215(6): 1321-1328.

[17] 田杜雪, 宋兰, 隋昕, 等. 深度学习重建在低辐射剂量 CT 肺动脉成像中的临床应用价值[J]. 中华放射学杂志, 2022, 56(5): 563-568.

[18] 闫莉, 邹奕轩, 王静怡, 等. 双低技术在肺动脉血管 CT 造影中的应用研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2023, 43(4): 301-306.

[19] Hajdu SD, Daniel RT, Meuli RA, et al. Impact of model-based iterative reconstruction (MBIR) on image quality in cerebral CT angiography before and after intracranial aneurysm treatment[J]. Eur J Radiol, 2018, 102(5): 109-114.

(收稿日期: 2023-11-09 修回日期: 2024-03-25)