

✧ 专论

Chest contrast-enhanced CT combined with artificial intelligence iterative reconstruction for bronchial artery imaging

WEI Youyong^{1*}, WANG Tiantian², LUO Yingwei¹, LU Linyu¹, DING Yanping¹,
YAO Guoqing¹, LI Qinglian¹, GUAN Xiaohui¹

(1. Department of Radiology, the People's Hospital of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530012, China; 2. United Imaging Healthcare, Shanghai 201800, China)

[Abstract] **Objective** To investigate the value of chest contrast-enhanced CT (C-CECT) combined with artificial intelligence iterative reconstruction (AIIR) for bronchial artery (BA) imaging. **Methods** Seventy patients who underwent C-CECT were prospectively enrolled. The images were reconstructed with AIIR (AIIR group) and hybrid iterative reconstruction (HIR, HIR group), respectively. The overall image quality, the traceability of BA, the sharpness of BA and the diagnostic confidence of abnormalities of BA were subjectively graded using a 5-point scale by two radiologists, respectively. The subjective scores and inter-observer agreement were compared between groups. The noise (SD) in reconstructed images of thoracic aorta, pulmonary trunk, BA and spinal erectors, the contrast-to-noise ratio (CNR) of the above 3 arteries relative to spinal erectors, and the diameters of BA at the origin, bifurcation and pulmonary hilum were compared between groups. **Results** The scores of the overall image quality, the traceability of BA, the sharpness of BA and the diagnostic confidence of abnormalities of BA were all significantly higher in AIIR group than those in HIR group (all $P < 0.001$), all with good inter-observer agreement ($\text{Kappa} = 0.46 - 0.73$). SD of the aorta, pulmonary artery trunk, BA and erector spinal muscle in AIIR group were lower than those in HIR group, while CNR of above 3 arteries were higher than those in HIR group (all $P < 0.05$). No significant difference of the diameter of BA at each position was found between groups (all $P > 0.05$), while the consistency of measurement of AIIR group was higher than that of HIR group (intra-class correlation coefficient: $0.89 - 0.94$ vs. $0.63 - 0.78$). **Conclusion** C-CECT combined with AIIR could significantly improve imaging quality and diagnostic confidence of BA.

[Keywords] bronchial arteries; tomography, X-ray computed; artificial intelligence; prospective studies

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2025.04.005

胸部增强 CT 联合深度学习全模型迭代算法 用于支气管动脉成像

韦有永^{1*}, 王甜甜², 罗颖薇¹, 卢林玉¹, 丁艳萍¹, 姚国庆¹, 李清恋¹, 官晓晖¹

(1. 广西壮族自治区人民医院放射科, 广西 南宁 530012; 2. 上海联影医疗科技股份有限公司, 上海 201800)

[摘要] **目的** 探讨胸部增强 CT(C-CECT)联合深度学习全模型迭代算法(AIIR)用于支气管动脉(BA)成像的价值。**方法** 前瞻性纳入 70 例接受 C-CECT 检查的患者, 分别以 AIIR(AIIR 组)与混合迭代重建(HIR, HIR 组)重建图像。由 2 名医师采用 5 分法对整体图像质量、BA 可追溯性、BA 锐利度和诊断 BA 异常信心进行主观评估, 比较组间评分及观察者间评估结果的一致性。比较组间重建图像中胸主动脉、肺动脉干、BA 及竖脊肌噪声(SD), 上述 3 支血管相对竖脊肌的

[第一作者] 韦有永(1971—), 男, 广西百色人, 本科, 副主任医师。研究方向: 医学影像学。

[通信作者] 韦有永, 广西壮族自治区人民医院放射科, 530012。E-mail: gxwyy2816@163.com

[收稿日期] 2024-10-19 **[修回日期]** 2024-12-02

对比度噪声比(CNR),以及 BA 起源处、分叉处与肺门处直径。**结果** AIIR 组整体图像质量、BA 可追溯性、BA 边缘锐利度及诊断 BA 异常信心评分均高于 HIR 组(P 均 <0.001),且观察者间主观评分的一致性较好($Kappa=0.46\sim0.73$)。AIIR 组主动脉、肺动脉干、BA 及竖脊肌 SD 均低于、而上述 3 支血管 CNR 均高于 HIR 组(P 均 <0.05)。组间 BA 各处直径差异均无统计学意义(P 均 >0.05),而观察者间针对 AIIR 组测量结果的一致性高于 HIR 组(组内相关系数: $0.89\sim0.94$ vs. $0.63\sim0.78$)。**结论** C-CECT 联合 AIIR 可显著提升 BA 成像质量与诊断信心。

[关键词] 支气管动脉; 体层摄影术, X 线计算机; 人工智能; 前瞻性研究

[中图分类号] R563; R817.42 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1003-3289(2025)04-0530-05

支气管动脉(bronchial artery, BA)为支气管扩张、肺癌等所致咯血的主要责任血管^[1-2]。胸部增强 CT(chest contrast-enhanced CT, C-CECT)可判断有无咯血、初步评估及确定是否需行 BA 栓塞(BA embolization, BAE)^[3]。BAE 是治疗咯血的有效微创方法^[4],精准 BA 成像对于 BAE 成功至关重要^[5-7];但 BA 管径细小、走行迂曲、解剖变异性高,精准成像常遇挑战。深度学习全模型迭代算法(artificial intelligence iterative reconstruction, AIIR)融合深度学习(deep learning, DL)及全模型迭代重建(model-based iterative reconstruction, MBIR)的优势,可有效降噪、保持自然纹理特征,提高血管对比度,现已用于胸部^[8]、腹部^[9-10]及心血管成像^[11-14]。本研究观察 C-CECT 联合 AIIR 用于 BA 成像的价值。

1 资料与方法

1.1 研究对象 前瞻性纳入 2024 年 6 月—8 月广西壮族自治区人民医院 70 例因胸部病变而接受 C-CECT 患者,男 41 例、女 29 例,年龄 25~85 岁、平均(57.7 ± 13.5)岁,体质指数 $15.81\sim32.18\text{ kg/m}^2$ 、平均(22.16 ± 3.53) kg/m^2 ;其中,中央型肺癌 2 例、周围型肺癌 5 例、转移性肺癌 10 例、食管癌术后复发及肝转移癌各 2 例,肺结核 2 例、慢性阻塞性肺疾病 2 例、肺栓塞 1 例、肺炎 19 例、肺结节 10 例、支气管扩张 7 例、主动脉动脉瘤 1 例及肝血管瘤 7 例。排除呼吸、运动伪影严重而影响临床诊断者。本研究获院伦理委员会批准(伦理-KY-IIT-2024-131)。检查前患者均签署知情同意书。

1.2 仪器与方法 以联影 uCT968 320 排螺旋 CT 扫描仪行仰卧位 C-CECT。采用高压注射器经肘前静脉以 $3.0\sim4.0\text{ ml/s}$ 流率注入 $70\sim80\text{ ml}$ 非离子型碘对比剂碘佛醇(350 mgI/ml)并以相同流率跟注 40 ml 生理盐水;采用对比剂智能追踪技术,将 ROI 置于降主动脉,于其内 CT 值达 150 HU 后延迟 8 s 触发扫描;参数:管电压 100 kVp,自动调制管电流(参考值 150 mAs),准直宽度 80 mm,螺距 0.856 3,转速 0.5 s/rot 。之后分别以联影 AIIR 及混合迭代重建(hybrid iterative

reconstruction, HIR)重建 C-CECT 图像(层厚、层间距均为 1 mm),获得 AIIR 组及 HIR 组图像。将重建后的图像上传至联影后处理工作站(uWS-CT)进行容积再现及最大密度投影等后处理。

1.3 图像评价

1.3.1 主观评价 由 2 名(医师 1、2)具有 10 年以上经验的放射科医师以双盲法采用 5 分制对 2 组图像进行主观评分,评估指标包括整体图像质量、BA 可追溯性、BA 锐利度及诊断 BA 异常(扩张、异位、畸形、为肺部肿瘤供血动脉)信心,见表 1 及图 1。

1.3.2 客观评价 由 1 名具有 5 年经验的放射科医师(医师 3)避开伪影、血管壁及钙化斑块等,分别于 2 组胸主动脉(第 5 胸椎水平)、肺动脉干及 BA 放置直径为管腔 $1/2\sim2/3$ 的圆形 ROI,同时于竖脊肌放置大小约为 100 mm^2 的圆形 ROI,使 2 组相应位置 ROI 保持一致,测量 CT 值,计算标准差(standard deviation, SD)并以之代表噪声,均测量 3 次并以平均值作为结果;计算各支动脉相对竖脊肌的对比度噪声比(contrast-to-noise ratio, CNR): $CNR=(CT_{\text{血管}}-CT_{\text{竖脊肌}})/SD_{\text{竖脊肌}}$;与 1 名具有 7 年工作经验的放射科医师(医师 4)共同测量 BA 起源处、分叉处及肺门处直径。

1.4 统计学分析 采用 SPSS 27.0 统计分析软件。以 $\bar{x}\pm s$ 表示呈正态分布计量资料,行配对样本 t 检验;以中位数(上下四分位数)表示呈偏态分布计量资料,行 Wilcoxon 符号秩检验。采用 Kappa 检验评价观察者间主观评分的一致性: $Kappa\leq0.4$ 为一致性较差, $0.4<Kappa<0.7$ 为一致性较好, $Kappa\geq0.75$ 为一致性良好。以组内相关系数(intra-class correlation coefficient, ICC)及 Bland-Altman 图评估观察者间测量 BA 直径结果的一致性。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 主观评价 AIIR 组整体图像质量、BA 可追溯性、BA 边缘锐利度及诊断 BA 异常信心评分均高于 HIR 组(P 均 <0.001)。观察者间主观评分的一致性较好($Kappa=0.46\sim0.73$)。见表 2 及图 2~4。针对 AIIR 组,医师 1 评价整体图像质量、BA 可追溯

性、BA 边缘锐利度及诊断 BA 异常信心的 ≥ 4 分(优秀)病例占比分别为 91.43%、67.14%、71.43% 及 81.43%, 医师 2 分别为 92.75%、84.29%、64.29% 及 84.29%; 针对 HIR 组, 医师 1 评价为优秀病例占比分别为 58.57%、32.86%、21.43% 及 30.00%, 医师 2 分别为 57.14%、41.43%、4.29% 及 25.71%。

2.2 客观评价 AIIR 组主动脉、肺动脉干、BA 及竖脊肌 SD 均低于, 而上述血管的 CNR 均高于 HIR 组 (P 均 <0.05), 见表 3。AIIR 组 BA 起源处、分叉处及肺门处直径分别为 1.7(1.5, 2.1)mm、2(1.7, 2.3)mm 及 1.4(1.2, 1.7)mm, HIR 组分别为 1.7(1.4,

2.1)mm、1.9(1.7, 2.3)mm 及 1.4(1.2, 1.7)mm, 差异均无统计学意义 ($Z=1.487, 0.689, 0.602, P$ 均 >0.05)。观察者间基于 AIIR 组测量 BA 直径的一致性高于 HIR 组 ($ICC: 0.89 \sim 0.94$ vs. $0.63 \sim 0.78$)。于 AIIR 图测量 BA 起源处、分叉处及肺门处直径的偏差值分别为 0、 -0.001 及 0.003 , 95% 一致性界限 (limits of agreement, LoA) 分别为 $-0.39 \sim 0.39$ 、 $-0.44 \sim 0.43$ 及 $-0.37 \sim 0.38$; HIR 组分别为 $-0.007, 0.054$ 及 0.020 , 95% LoA 分别为 $-0.75 \sim 0.74$ 、 $-0.66 \sim 0.77$ 及 $-0.86 \sim 0.90$, 即基于 AIIR 图测量偏差值小于 HIR 图, 见图 5。

表 1 BA 成像质量主观评分标准

评估指标	1 分	2 分	3 分	4 分	5 分
整体图像质量	噪声及伪影严重, 血管边界模糊不清, 小动脉难以区分, 图像质量极差	噪声及伪影重, 血管边界模糊毛糙, 小动脉显示不清, 图像质量差	噪声及伪影一般, 血管边界较清晰, 小动脉描绘一般, 图像质量中等, 满足临床诊断	噪声小, 有少量伪影, 血管边界清晰, 小动脉描绘良好, 图像质量佳	噪声极小, 几乎无伪影, 血管边界锐利, 小动脉显示清晰, 图像质量极好
BA 可追溯性	BA 无法识别	BA 起源显示, 不可追溯到肺门	BA 可追溯到肺门	BA 可追溯到肺门外	BA 可追溯到肺实质
BA 锐利度	BA 显示不清	BA 边缘模糊	BA 边缘较清晰	BA 边缘清晰	BA 边缘显影锐利, 与周围组织边界清晰
诊断 BA 异常信心	无法诊断	诊断困难, 信心低	基本可诊断, 但信心一般	信心较高	诊断明确

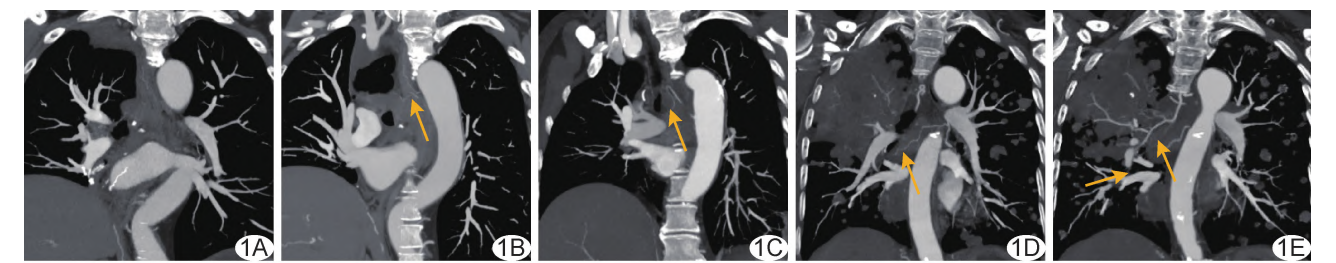


图 1 BA 可追溯性主观评分示意图 A. 1 分, 无法识别; B. 2 分, 可显示 BA 起源, 但无法追溯到肺门; C. 3 分, 可追溯到肺门; D. 4 分, 可追溯至肺门外, 但无法至肺实质; E. 5 分, 可追溯至肺实质 (箭示 BA)

表 2 不同重建算法 C-CECT 图像主观评价结果比较(分)

组别	整体图像质量			BA 可追溯性		
	医师 1	医师 2	Kappa 值	医师 1	医师 2	Kappa 值
AIIR 组 ($n=70$)	4.44 $\pm$ 0.65	4.53 $\pm$ 0.74	0.599	3.91 $\pm$ 0.76	4.16 $\pm$ 0.71	0.488
HIR 组 ($n=70$)	3.57 $\pm$ 0.53	3.54 $\pm$ 0.72	0.729	3.40 $\pm$ 0.79	3.43 $\pm$ 0.88	0.465
Z 值	7.685	7.069	—	6.000	6.741	—
P 值	<0.001	<0.001	—	<0.001	<0.001	—

组别	BA 边缘锐利度			诊断 BA 异常信心		
	医师 1	医师 2	Kappa 值	医师 1	医师 2	Kappa 值
AIIR 组 ($n=70$)	3.89 $\pm$ 0.75	3.66 $\pm$ 0.66	0.461	4.40 $\pm$ 0.79	4.34 $\pm$ 0.74	0.527
HIR 组 ($n=70$)	2.97 $\pm$ 0.72	2.43 $\pm$ 0.75	0.675	3.07 $\pm$ 0.80	3.06 $\pm$ 0.78	0.503
Z 值	7.019	7.013	—	7.448	7.276	—
P 值	<0.001	<0.001	—	<0.001	<0.001	—

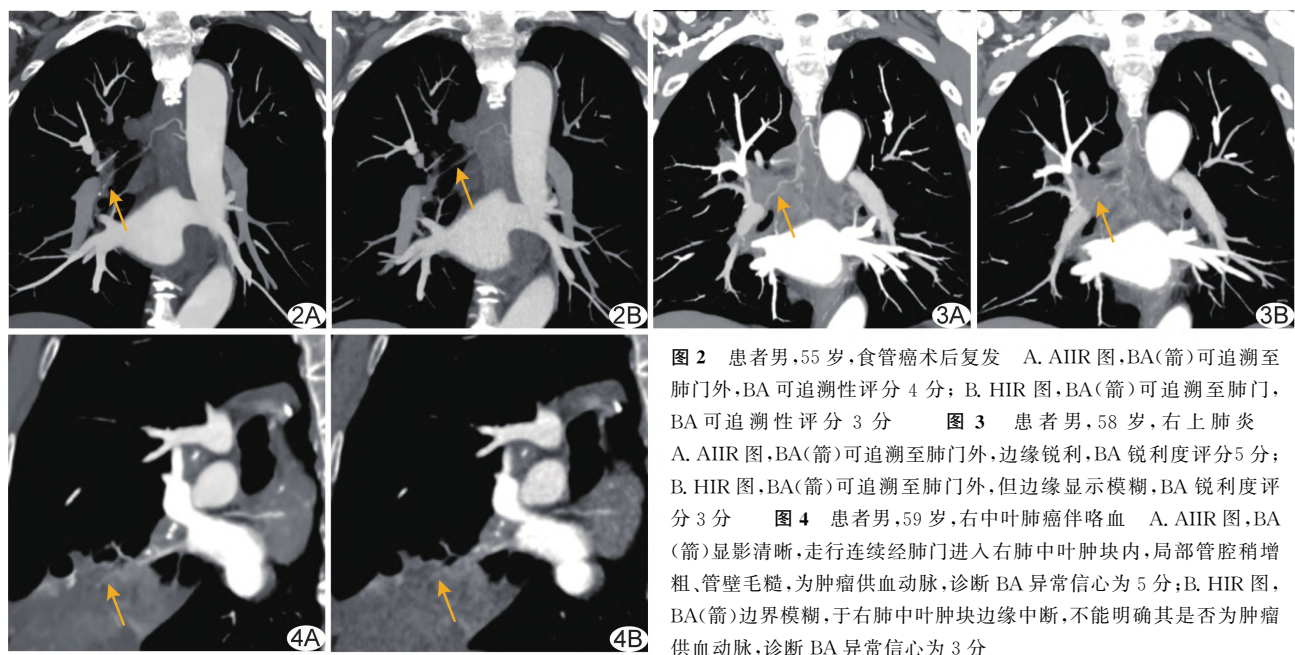


图 2 患者男,55 岁,食管癌术后复发 A. AIIR 图,BA(箭)可追溯至肺门外,BA 可追溯性评分 4 分; B. HIR 图,BA(箭)可追溯至肺门,BA 可追溯性评分 3 分 图 3 患者男,58 岁,右上肺炎 A. AIIR 图,BA(箭)可追溯至肺门外,边缘锐利,BA 锐利度评分 5 分; B. HIR 图,BA(箭)可追溯至肺门外,但边缘显示模糊,BA 锐利度评分 3 分 图 4 患者男,59 岁,右中叶肺癌伴咯血 A. AIIR 图,BA(箭)显影清晰,走行连续经肺门进入右肺中叶肿块内,局部管腔稍增粗、管壁毛糙,为肿瘤供血动脉,诊断 BA 异常信心为 5 分;B. HIR 图,BA(箭)边界模糊,于右肺中叶肿块边缘中断,不能明确其是否为肿瘤供血动脉,诊断 BA 异常信心为 3 分

表 3 不同重建算法 C-CECT 图像客观评价结果比较

组别	SD				CNR		
	主动脉	肺动脉干	BA	竖脊肌	主动脉	肺动脉干	BA
AIIR 组(n=70)	8.54±1.82	10.59±3.73	23.64±19.24	11.16±4.42	41.22±16.09	29.51±15.81	24.84±13.57
HIR 组(n=70)	16.93±2.81	18.91±4.19	26.16±19.70	18.07±3.80	23.09±6.36	16.31±7.23	11.75±5.44
t 值	-22.041	-38.743	-2.337	-20.025	11.806	10.518	10.701
P 值	<0.001	<0.001	0.024	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

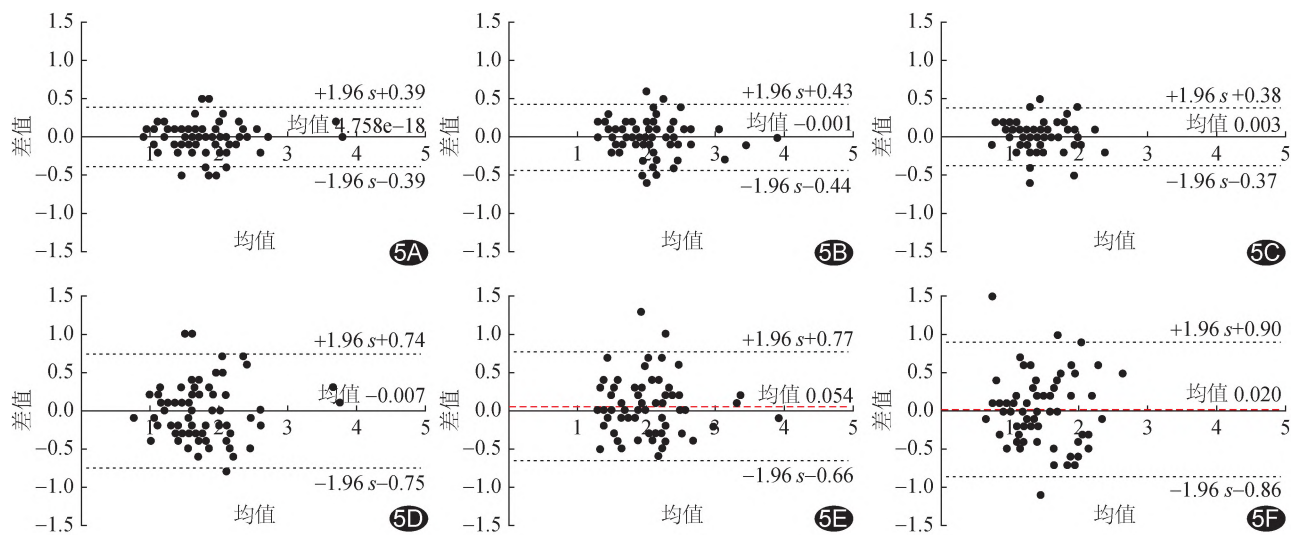


图 5 BA 直径 Bland-Altman 图 A~C. 基于 AIIR 图测量 BA 起源(A)、分叉(B)及肺门处(C)直径; D~F. 基于 HIR 图 BA 起源(D)、分叉(E)及肺门处(F)直径

3 讨论

BAE 前行 C-CECT 或 CT 血管造影 (CT angiography, CTA)有助于识别责任血管、缩短操作时间、降低辐射剂量,提高 BAE 疗效。C-CECT 对设

备及后处理技术要求均较低,但责任血管检出率与 CTA 相当(91.67% vs. 92.74%)^[7],尤其适用于基层医疗单位。BA 管径细小,精准成像具有挑战。AIIR 基于

MBIR 框架引入 DL 降噪模块代替 MBIR 中的正则化项,以解决降噪过程中图像纹理特征发生改变的问题;先进的算法架构使其在降噪、抑制伪影、提升空间分辨率和低对比度分辨率等方面表现出色。同时,AIIR 的训练数据集涵盖多种预期临床场景,包括不同身体部位、扫描协议、剂量水平及疾病等,使其泛化能力与鲁棒性均有所保障。AIIR 用于提升血管如主动脉、肺动脉及小血管等的可视化效果均具有优势^[11-14]。本研究结果显示,AIIR 可显著提升 BA 的可追溯性,医师 1、2 对 AIIR 组所有 BA 均可追溯至肺门,而医师 1 对 HIR 组 4 例、医师 2 对该组 6 例 BA 不可追溯至肺门;且 AIIR 组 BA 成像整体质量佳,医师 1、2 基本可判断所有 BA 有无异常,而医师 1 对 HIR 组 18 例、医师 2 对该组 15 例难以判断。

BA 直径与其有无异常相关,通常以右侧 BA 直径 $>2\text{ mm}$ 、左侧 BA 直径 $>1.5\text{ mm}$ 为 BA 扩张^[15]。本研究结果显示,观察者间针对 AIIR 图测量 BA 开口、分叉及肺门处直径的一致性高(ICC 均 ≥ 0.89),测量偏差小(均 ≤ 0.003),可能原因在于 AIIR 可显著提升 BA CNR 及边缘锐利度,显示血管边缘更为明确。

综上,C-CECT 联合 AIIR 可显著提高 BA 成像质量、提升诊断 BA 异常信心。本研究的主要局限性在于为单中心观察,样本量有限,且未展开完整的诊断测试,有待后续加以完善。

利益冲突:全体作者声明无利益冲突。

作者贡献:韦有永指导、研究设计和实施、统计分析、撰写、修改和审阅文章;王甜甜图像处理、修改文章;罗颖薇和卢林玉查阅文献、图像分析;丁艳萍、姚国庆和李清恋数据分析;官晓晖图像分析、审阅文章。

[参考文献]

- [1] LARICI A R, FRANCHI P, OCCHIPINTI M, et al. Diagnosis and management of hemoptysis[J]. Diagn Interv Radiol, 2014, 20(4):299-309.
- [2] 中国抗癌协会肿瘤介入专业委员会.支气管动脉灌注术和支气管动脉化疗栓塞术治疗肺癌的中国专家共识(2023 版)[J]. 介入放射学杂志, 2024, 33(3):219-229.
- [3] MORI H, OHNO Y, TSUGE Y, et al. Use of multidetector row CT to evaluate the need for bronchial arterial embolization in hemoptysis patients[J]. Respiration, 2010, 80(1):24-31.
- [4] PANDA A, BHALLA A S, GOYAL A. Bronchial artery embolization in hemoptysis: A systematic review [J]. Diagn Interv Radiol, 2017, 23(4):307-317.
- [5] 徐秋贞,王钟江,居胜红,等. 64 层螺旋 CT 支气管动脉成像观察支气管动脉三维解剖结构[J]. 中国医学影像技术, 2012, 28(1):90-93.
- [6] 张雨洁,俞同福,梁静. 支气管动脉 CTA 对支气管动脉栓塞术的指导作用[J]. 中国介入影像与治疗学, 2015, 12(8):472-476.
- [7] 袁凯,秦伟,杨光强,等. 术前胸部增强 CT 检查在支气管扩张症伴大咯血患者支气管动脉栓塞术治疗中的指导作用[J]. 山东医药, 2024, 64(23):76-78.
- [8] YANG L, LIU H, HAN J, et al. Ultra-low-dose CT lung screening with artificial intelligence iterative reconstruction: Evaluation via automatic nodule-detection software [J]. Clin Radiol, 2023, 78(7):525-531.
- [9] LI J, ZHU J, ZOU Y, et al. Diagnostic CT of colorectal cancer with artificial intelligence iterative reconstruction: A clinical evaluation[J]. Eur J Radiol, 2024, 171:111301.
- [10] YOU Y, ZHONG S, ZHANG G, et al. Exploring the low-dose limit for focal hepatic lesion detection with a deep learning-based CT reconstruction algorithm: A simulation study on patient images[J]. J Imaging Inform Med, 2024, 37(5):2089-2098.
- [11] GONG H, PENG L, DU X, et al. Artificial intelligence iterative reconstruction in computed tomography angiography: An evaluation on pulmonary arteries and aorta with routine dose settings[J]. J Comput Assist Tomogr, 2024, 48(2):244-250.
- [12] LI W, YOU Y, ZHONG S, et al. Image quality assessment of artificial intelligence iterative reconstruction for low dose aortic CTA: A feasibility study of 70 kVp and reduced contrast medium volume[J]. Eur J Radiol, 2022, 149:110221.
- [13] 游永春,李万江,刘洪川,等. “三低”技术联合人工智能迭代重建算法在主动脉 CT 血管成像中的临床应用[J]. 四川大学学报(医学版), 2022, 53(4):676-681.
- [14] 游永春,李万江,钟思华,等. AIIR 重建算法对 70 kVp 低管电压扫描主动脉 CTA 图像质量影响的研究[J]. 中国医疗设备, 2021, 36(10):75-79.
- [15] FURUSE M, SAITO K, KUNIEDA E, et al. Bronchial arteries: CT demonstration with arteriographic correlation[J]. Radiology, 1987, 162(2):393-398.