

论著

基于能谱CT低流速低对比剂在肺动脉CTA图像质量的研究*

周大伟^{1,2} 赵英明³ 李欣欣^{1,2}
段惠予^{1,2} 仇好^{1,2} 刘欣^{1,2}
张晓龙^{1,2} 高之振^{1,*}

1.蚌埠医学院第一附属医院放射科

(安徽 蚌埠 233004)

2.蚌埠医学院研究生院(安徽 蚌埠 233030)

3.中国科学技术大学附属第一医院(安徽省立医院)CT室(安徽 合肥 230001)

【摘要】目的 探讨采用能谱CT结合低流速低对比剂在肺动脉CTA中的可行性，并评价其图像质量。

方法 回顾性分析在安徽省立医院行肺动脉CTA检查的146例患者，随机分成两组，对照组采用常规螺旋CT扫描，观察组用能谱CT联合低对比剂、低流速方法扫描，比较两组图像的客观评分、主观评分及平均碘摄入量。结果 两组患者的肺动脉主干、左、右肺动脉干的平均CT值和图像主观评分差异无统计学意义($P>0.05$)，观察组的背景噪声(SD值)、信噪比(SNR)、对比噪声比(CNR)较对照组略高，但差异无统计学意义($P>0.05$)，与对照组相比观察组的CT容积剂量指数(CTDI vol)、辐射剂量长度乘积(DLP)和有效辐射(ED)显著降低，差异有统计学意义($P<0.05$)；观察组有效辐射、平均碘摄入量比对照组分别降低34.82%、48.25%，差异有统计学意义($P<0.05$)。结论 应用低流速低对比剂结合能谱CT单能量技术，在图像质量满足诊断要求的基础上，显著降低了患者的辐射剂量和碘摄入量。

【关键词】 双低技术；能谱CT；肺栓塞；肺动脉CT血管造影；图像质量

【中图分类号】 R445.3；R563.5

【文献标识码】 A

【基金项目】 蚌埠医学院研究生科研创新计划自筹经费项目(Byycxz22105)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2024.01.020

Study on the Image Quality of Low Flow Rate and Low Contrast Agent in the Pulmonary Artery Based on Energy Spectrum CT*

ZHOU Da-wei^{1,2}, ZHAO Ying-ming³, LI Xin-xin^{1,2}, DUAN Hui-yu^{1,2}, QIU Hao^{1,2}, LIU Xin^{1,2}, ZHANG Xiao-long^{1,2}, GAO Zhi-zhen^{1,*}.

1.Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Bengbu Medical College, Bengbu 233004, Anhui Province, China

2.School of Graduate, Bengbu Medical College, Bengbu 233030, Anhui Province, China

3.The First Affiliated Hospital of University of Science and Technology of China, Hefei 230001, Anhui Province, China

ABSTRACT

Objective To investigate the feasibility of spectral CT monochromatic energy technology combined with low flow rate and low contrast agent in pulmonary artery CTA, and to evaluate the image quality.

Methods A retrospective analysis of 146 patients who underwent pulmonary artery CTA examination in our hospital was conducted. They were randomly divided into two groups, 73 cases in each group. The control group was scanned by conventional spiral CT, and the observation group was scanned by energy spectrum CT combined with low contrast agent and low flow rate method. The objective score, subjective score and average iodine intake of the two groups were compared. **Results** there was no significant difference in the average CT value and image subjective score of pulmonary artery trunk, left and right pulmonary artery trunk between the two groups. The background noise (SD), signal-to-noise ratio (SNR) and contrast-to-noise ratio (CNR) in the observation group were slightly higher than those in the control group, but there was no significant difference between the two groups. The CT volume dose index (CTDI vol), radiation dose length product (DLP) and effective radiation (ED) in the observation group were significantly lower than those in the control group ($P<0.05$). The effective radiation and average iodine intake in the observation group were 34.82% and 48.25% lower than those in the control group, respectively, and the difference was statistically significant ($P<0.05$).

Conclusion the application of low flow rate and low contrast medium combined with energy spectrum CT single energy technique can significantly reduce the radiation dose and iodine intake of patients on the basis of image quality meeting the diagnostic requirements.

Keywords: Double Low Technology; Energy Spectrum CT; Pulmonary Embolism; CT Pulmonary Angiography; Image Quality

肺栓塞(pulmonary embolism, PE)早期临床症状不明显，D-二聚体等实验室检查特异性低，在心血管疾病中死亡率较高^[1]。随着CT技术的发展，肺动脉CTA(computer tomography pulmonary angiography, CTPA)成为检查肺栓塞的第一选择^[2]，但在CTPA中如何使用低剂量、低对比剂进行检查一直是国内外学者研究的热点^[3-4]。

常规螺旋CT行CTPA检查虽能对PE进行检测和诊断，但图像质量不佳，容易造成漏诊、误诊，且使用对比剂的浓度和辐射剂量较高，增加了患者对比剂肾病(contrast induced nephropathy, CIN)的发生率^[5]。随着CT机器的更新换代，宝石能谱单能量成像技术具有降低噪声，优化图像质量等优点，为更低剂量的CTPA检查提供理论基础，且能谱CT重建的碘密度图可显示更多物质信息，提高肺小栓子的检出率^[6]。

因此，本研究采用常规螺旋CT扫描获得的图像与能谱CT扫描获得的单能量图像进行对比，系统的比较了CT扫描参数、不同浓度的造影剂、注射速率对碘剂量、辐射剂量以及图像质量的影响，为更优方案的CTPA检查的可行性提供参考，具体研究如下。

1 资料与方法

1.1 一般材料 回顾性分析2021年1月至2022年12月在我院行CTPA检查的146患者，随机将其分成两组，每组73例，患者一般临床资料(见表1)。将患者年龄 >18 周岁，无碘过敏史的患者列为纳入标准；将肝肾功能严重碍者、备孕或孕女性、有精神疾病者列为排除标准。患者在检查前需签署CTPA检查知情同意书。

表1 两组患者的一般临床资料对比

组别	例数	性别(男/女)	年龄(岁)	身高(cm)	体重(kg)	BMI(kg·m ⁻²)
观察组	73	36/37	59.81±18.95	166.65±7.52	68.94±11.09	22.01±2.63
对照组	73	51/22	60.93±16.24	168.65±7.27	69.64±11.24	23.18±2.46
t/χ ² 值		1.581 ^a	0.385	1.382	0.114	0.771
P值		>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05

注：BMI：体质指数；a，χ²值。

【第一作者】周大伟，男，硕士研究生，主要研究方向：成像技术与方法。E-mail: 1127759854@qq.com

【通讯作者】高之振，男，主任技师，主要研究方向：成像技术与方法。E-mail: gaozhizhen269@163.com

1.2 方法 采用GE Revolution 256(美国GE公司)仪器和双流高压注射器以及密闭式静脉留置针(競玛) (22G*1.00IN (0.9mmX19mm)直筒型)。检查前告知患者在检查中需根据指令进行屏气或平静呼吸,将患者按照标准体位摆好(仰卧位,双手举过头顶,头先进),患者腹部用绑带固定以减少检查过程中呼吸运动产生的伪影,扫描范围从胸廓至膈肌。

观察组采用宝石能谱成像扫描模式联合双低技术,管电压和管电流采用能谱自动调节模式,检查时高压注射器A管以 $3.5\text{mL}\cdot\text{s}^{-1}$ 经留置针注射 $300\text{mgI}\cdot\text{mL}^{-1}$ 碘海醇 25mL ,注药 3s 后,当达到 90HU 阈值时自动触发扫描,B管以同样流速注射生理盐水 35mL 冲管,扫描后用能谱分析软件重建出 60keV 最佳单能量图像;对照组用常规螺旋CT扫描方式,管电压和管电流分别为 120kV 、 350mA ,检查时以 $5.5\text{mL}\cdot\text{s}^{-1}$ 经肘静脉注射 $350\text{mgI}\cdot\text{mL}^{-1}$ 碘佛醇 45mL ,扫描步骤同观察组,两组其他参数相同,详细参数(见表2)。将扫描后的图像传至工作站(AW4.7)用自适应统计迭代算法重建,重建层厚、层间距均为 1.25mm ,采用最大密度投影、多平面重组、容积再现等后处理技术对两组图像进行后处理。

表2 两组患者的扫描参数

参数	观察组	对照组
管电压	80kVp~140kVp瞬切	120kV
管电流	自动毫安调制	350mA
噪声指数	10	10
层厚	5mm	5mm
层间距	5mm	5mm
螺距	0.984: 1	0.984: 1
螺旋扫描速度	$0.7\text{s}\cdot\text{r}^{-1}$	$0.7\text{s}\cdot\text{r}^{-1}$
重建方法	ASIR	ASIR
碘对比剂	碘海醇($300\text{mgI}\cdot\text{mL}^{-1}$)	碘佛醇($350\text{mgI}\cdot\text{mL}^{-1}$)
对比剂用量	25mL	45mL
速率	$3.5\text{mL}\cdot\text{s}^{-1}$	$5.5\text{mL}\cdot\text{s}^{-1}$

1.3 观察指标评价

1.3.1 主观评价 由两位具有多年工作经验的放射科医师采用双盲法5分值标准(5,优秀;4,良好;3,中等;2,差;1,极差)对图像进行分析。医师根据所显示的肺支水平和上腔静脉碘对比剂射束硬化伪影的严重程度对两组图像进行评分。CTPA图像需至少显示第四肺分支,才能满足诊断要求。上腔静脉碘对比剂射束硬化伪影的严重程度为:轻度伪影,不影响整体测量;中度伪影,少数伪影影响右肺动脉测量;重度伪影,严重影响右肺动脉和上叶动脉测量。结果取两位医师的平均分,保留整数,1-2分的图像不满足诊断要求。

1.3.2 客观评价 分别多次测量肺动脉主干、右肺动脉干、左肺动脉干及竖脊肌的衰减值和标准差(SD值),测量时将相同大小的感兴趣区分别放在靶血管和竖脊肌的中间且每个患者放置的位置尽量保持一致,为防止部分容积效应测量时应避开管壁和钙化斑块。用公式计算两组图像平均CT值和信噪比(SNR)以及对比噪声比(CNR),公式如下:

$$\text{SNR} = (\text{CT值}_{\text{靶血管}} / \text{SD值}_{\text{竖脊肌}});$$

$$\text{CNR} = (\text{CT值}_{\text{靶血管}} - \text{CT值}_{\text{竖脊肌}}) / \text{SD值}_{\text{竖脊肌}}$$

读取扫描结束后自动生成的剂量:容积CT剂量指数(CTDIvol)和剂量长度乘积(DLP),并计算有效剂量(ED)和平均碘摄入量, $ED = K \times \text{DLP} [K=0.014\text{mSv}\cdot(\text{mGy}\cdot\text{cm})^{-1}]$, K为转换系数^[7];

$$\text{平均碘摄入量} = [\text{对比剂总量} \times \text{浓度} / \text{体质量}].$$

1.4 统计学分析 采用SPSS(26.0版, IBM)软件对数据进行统计学分析。两组患者性别、主观评分用例(n)/百分比(%)表示,用卡方检验作组间比较;计量资料用($\bar{x} \pm s$)表示, Shapiro-Wilk检验其正态性,符合正态分布采用双侧t检验作组间比较,不符合正态分布的数据采用Mann-Whitney U检验, $P < 0.05$ 差异有统计学意义。

2 结果

本研究结果显示146例患者的图像质量均满足诊断要求,统计学结果显示两组患者的一般临床资料差异无统计学意义($P > 0.05$,表2),具有可比性。

表3 两组图像质量主观评分比较[例(%)]

组别	5分	4分	3分	2分	1分
观察组	38(52.05%)	27(36.99%)	8(10.96%)	0	0
对照组 ^a	34(46.58%)	25(34.25%)	14(19.18%)	0	0

注: ^a与观察组比较, $Z=1.872$, $P=0.061$ 。

2.1 主观评价 结果显示1-2分的评分0例,3-5分的评分观察组分别为8例(10.96%)、27例(36.99%)、38例(52.05%);对照组分别为14例(19.18%)、25例(34.25%)、34例(46.58%)。观察组的总体评分较高,但差异无统计学意义($Z=1.872$, $P > 0.05$,表3)。

2.2 客观评价 观察组的平均CT值、SD值、SNR和CNR均略高于对照组,但差异无统计学意义($P > 0.05$,表4),表明两组图像质量无显著差异;观察组患者的辐射剂量参数(CTDIvol、DLP、ED)分别为(5.57 ± 1.33)mGy、(186.67 ± 37.32)mGy·cm、(2.19 ± 0.52)mSv·(mGy·cm)⁻¹,对照组患者的参数分别为(9.73 ± 11.07)mGy、(236.71 ± 78.45)mGy·cm、(3.36 ± 1.89)mSv·(mGy·cm)⁻¹,观察组的剂量参数值明显低于对照组,差异有统计学意义($P < 0.05$,表5),且观察组有效辐射剂量比对照组降低34.82%;两组患者的平均碘摄入量分别为(131.39 ± 24.15)mgI·Kg⁻¹、(253.93 ± 39.53)mgI·Kg⁻¹,观察组比对照组减少48.25%,差异有统计学意义($t=22.603$, $P < 0.05$,表5)。

表4 两组患者客观评价指标比较

评价指标	观察组(n=73)	对照组(n=73)	t值	P值
肺动脉干(HU)	419.37±74.59	401.76±89.58	-0.321	0.749
右肺动脉(HU)	389.11±89.15	354.68±95.38	-0.545	0.586
左肺动脉(HU)	383.82±84.10	361.71±90.13	0.708	0.480
SD值(HU)	35.93±10.24	30.13±10.24	0.489	0.625
SNR				
肺动脉干(HU)	22.24±5.25	21.42±4.85	-0.221	0.826
右肺动脉(HU)	22.58±5.29	21.81±4.37	-0.290	0.773
左肺动脉(HU)	22.38±5.18	21.03±4.15	0.455	0.649
CNR				
肺动脉干(HU)	21.47±4.99	19.76±4.69	-0.368	0.714
右肺动脉(HU)	21.81±5.02	19.15±4.17	-0.449	0.654
左肺动脉(HU)	21.61±4.91	19.37±3.88	0.332	0.740

注: SNR: 信噪比; CNR: 对比噪声比。

表5 两组患者的诊断率、辐射剂量及平均碘摄入量主观评分比较

组别	例数	CTDIvol(mGy)	DLP(mGy·cm)	ED[mSv·(mGy·cm) ⁻¹]	平均碘摄入量(mgI·Kg ⁻¹)
观察组	73	5.57 ± 1.33	186.67 ± 37.32	2.19 ± 0.52	131.39 ± 24.15
对照组	73	9.73 ± 11.07	236.71 ± 78.45	3.36 ± 1.89	253.93 ± 39.53
t值		3.959	9.251	5.598	22.603
P值		<0.01	<0.01	<0.01	<0.01



图1A-图1C 女, 74岁, 采用能谱CT行CTPA检查($300\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, 25mL , $3.5\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$), 左右肺动脉主干末端及部分分支多发肺栓塞(红色箭头)。图1A 轴位图; 图1B MIP(冠状位); 图1C VR。

图2A-图2C 男, 79岁, 采用常规螺旋CT行CTPA检查($350\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, 45mL , $5.5\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$), 右下肺动脉二级分支肺栓塞(红色箭头)。图2A 轴位图; 图2B MIP(冠状位); 图2C VR。

3 讨论

CTPA作为一种无创性的诊断方法, 可以检测肺动脉狭窄程度, 观察到肺动脉亚节段水平, 显示肺动脉斑块的性质, 是临床医生检测和识别PE的首选方法^[2]。随着CTPA检查技术的普及应用, 人们对于放射损伤和对比剂所带来的不良反应愈发重视, 以前的研究大多集中在CTPA的辐射剂量以及对比剂的用量或浓度^[8-9], 本研究系统的比较了CT扫描参数、不同浓度的造影剂、注射速率对碘剂量、辐射剂量以及图像质量的影响, 探讨能谱CT联合低剂量、低流速在CTPA中的可行性。

PE患者在行CTPA检查时必定伴随着医源性损伤, 根据最低辐射原则表示所有CT检查在达到诊断标准的基础上, 将对患者的辐射伤害降到最低。研究表明^[10]可通过降低千伏、管电流调制、高螺距调节等可以通过多种技术联合来降低患者的辐射剂量, 常规螺旋CT行CTPA检查时常用降低电压的方法来降低辐射剂量^[11]。Sauter等^[5]用低管电压(100kV)的CTPA方法与常规(120kV)方法相比, 中央和外周肺动脉衰减更高, 且辐射剂量降低了53%。虽然常规螺旋CT可通过多种方法联合降低辐射剂量, 但诊断效果不佳, 且不良反应较多包括CIN、对比剂外渗以及血管破裂等。

随着CT机器的更新换代, 宝石能谱CT被引入临床, 其探测器上下两层由不同的闪烁晶体(上层是金属钆和下层为稀土陶瓷材料)组成, 一次扫描可以获得101组(40~140keV)单能量图像、碘密度图、有效原子序数图等^[12]。相较于常规混合能量技术, 能谱CT的单能量技术可以提高组织对比度, 优化图像质量, 降低射线硬化伪影。本研究观察组以60keV为最佳单能量^[13]测得肺血管平均CT值、SNR、CNR均比对照组高, 差异无统计学意义, 这是因为动脉血管衰减被单能量技术改善, 发生的光电效应被增加, 低能级时, 血管内的对比剂强化明显, 从而减少硬化伪影和增加病变显著性^[14]。而两组患者有效辐射剂量相比观察组比对照组降低了34.82%, 与相关研究结果一致^[15], 但其低kV组较常规组有效辐射剂量降低18.43%, 本研究辐射剂量降低更显著。

造影剂的使用随着CT血管成像(CT angiography, CTA)的应用越来越普遍, 其浓度和用量不仅影响图像质量, 还与不良反应的发生率相关, 低浓度、低剂量的造影剂可以降低CIN的发生率^[16]。CTA检查的关键因素是对比剂的用量和注射速率, 若用量过高会产生来自上腔静脉的放射状伪影, 或使肺静脉进一步显影^[17-18]; 注射速率过高会导致碘外渗和血管破裂, 过低时导致血管显影浅淡或浓度不均, 以上情况都会使诊断医生在诊断时造成漏诊、误诊。Davenport等^[19]指出对比剂用量在肾病患者中的影响, 表明在行CTA检查时使用低浓度低剂量对比剂, 图像质量不受影响, 且一定程度上可以控制CIN的发生率。本研究中观察组仅使用25mL造影剂便可以显示亚节段水平的肺动脉, 且CNR和SNR显著提高(表4), 与其他研究报告的剂量相比要少^[20], 与对照组(45mL)相比平均碘摄入量从(253.93 ± 39.53) $\text{mgI} \cdot \text{Kg}^{-1}$ 减少到(131.39 ± 24.15) $\text{mgI} \cdot \text{Kg}^{-1}$, 降低了48.25%, 且观察组的患者均未出现不良反应, 而对照组患者少部分患者出现呕吐、头晕等不良反应。

本研究存在一定的局限性, 首先, 研究的病例数较少, 应进行大数据对比研究; 其次, 观察组仅重建60keV图像, 未重建不同单能量图像行组间比较; 没有对单能量图和碘基图的组合进行评估。尽管存在这些缺陷, 但本研究给出一个基本的指标, 表明这两种方法都有可能被采用, 具有高诊断性能, 并且没有重大缺陷。

综上所述, 能谱CT联合低对比剂、低流速相较于常规螺旋CT, 在大幅度降低辐射剂量和对比剂浓度的同时, 仍可以获得满意的图像质量, 且患者平均摄碘量少, 从而减少不良反应的发生, 具有一定的临床价值。

参考文献

- [1]管学春, 龙莉玲. 肺栓塞的影像检查现状[J]. 广西医科大学学报, 2022, 39(11): 1847-1853.
- [2]Essien, Rali, Mathai. Pulmonary Embolism[J]. Med Clin North Am, 2019, 103(3): 549-564.
- [3]Huang, Gao, Ma, et al. The optimal monoenergetic spectral image level of coronary computed tomography (CT) angiography on a dual-layer spectral detector CT with half-dose contrast media[J]. Quant Imaging Med Surg, 2020, 10(3): 592-603.
- [4]Armitage, Mughal, Huntley, et al. A multicentre observational study of the prevalence, management, and outcomes of subsegmental pulmonary embolism[J]. J Thromb Thrombolysis, 2022.
- [5]Sauter, Shapira, Kopp, et al. CTPA with a conventional CT at 100 kVp vs. a spectral-detector CT at 120 kVp: comparison of radiation exposure, diagnostic performance and image quality[J]. Eur J Radiol Open, 2020, 7: 100234.
- [6]杜华阳, 宋伟. 双层探测器光谱CT在CTPA中的应用现状及进展[J]. 临床放射学杂志, 2021, 40(7): 1431-1434.
- [7]Huda, Ogden, Khorasani. Converting dose-length product to effective dose at CT[J]. Radiology, 2008, 248(3): 995-1003.
- [8]Winkelmann, Walter, Stock, et al. Effects of radiation dose reduction on diagnostic performance of 3rd generation Dual Source CT pulmonary angiography[J]. Eur J Radiol, 2021, 134: 109426.
- [9]Silva, Milanese, Cobelli, et al. CT angiography for pulmonary embolism in the emergency department: investigation of a protocol by 20 ml of high-concentration contrast medium [J]. Radiol Med, 2020, 125(2): 137-144.
- [10]李碧雪. 低剂量扫描结合个体化对比剂用量在CT肺动脉成像中的价值研究[J]. 中国实用医药, 2022, 17(27): 110-112.
- [11]冯昭, 刘刚, 李小花, 等. 能谱CT低剂量扫描对肺孤立小结节的诊断价值研究[J]. 中国CT和MRI杂志, 2021, 19(10): 39-42.
- [12]曹文, 伍雪婷, 谢开元. PE患者应用GE宝石能谱CT诊断的临床价值分析[J]. 中国CT和MRI杂志, 2020, 18(6): 82-84.
- [13]李又洁, 高宗辉, 王明超, 等. 宝石CT肺动脉能谱成像最佳单能量图像的选择[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2018, 24(4): 306-310.
- [14]燕云霄, 田晓娟, 丁雷, 等. 双层探测器光谱CT在肺动脉栓塞诊断中的价值[J]. 中国CT和MRI杂志, 2022, 20(12): 73-75.
- [15]杜华阳, 宋伟, 隋昕, 等. 光子探测器CT低流速低剂量CTPA图像质量的客观评估[J]. 临床放射学杂志, 2021, 40(3): 470-475.
- [16]何骥. 注射速率对CT增强检查造影剂渗漏的影响分析[J]. 影像研究与医学应用, 2022, 6(16): 140-142.
- [17]Wu, Chen, Zhou, et al. An optimized test bolus for computed tomography pulmonary angiography and its application at 80kV with 10ml contrast agent[J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 10208.
- [18]Tang, Fan, Qiu, et al. Clinical value and feasibility of CT pulmonary angiography with personalized injection of contrast agent in pulmonary embolism[J]. Am J Transl Res, 2022, 14(9): 6774-6781.
- [19]Davenport, Perazella, Yee, et al. Use of intravenous iodinated contrast media in patients with kidney disease: consensus statements from the American College of Radiology and the National Kidney Foundation[J]. Radiology, 2020, 294(3): 660-668.
- [20]Rajiah, Ciancibello, Novak, et al. Ultra-low dose contrast CT pulmonary angiography in oncology patients using a high-pitch helical dual-source technology [J]. Diagn Interv Radiol, 2019, 25(3): 195-203.

(收稿日期: 2023-02-27)

(校对编辑: 姚丽娜)