

· 心血管影像学 ·

第三代双源 CT 双低肺动脉成像降低线束硬化伪影的可行性研究

杨萌, 张璋, 李锋坦, 梁蓉, 姜英健, 任雯, 李睿君, 李东

【摘要】 目的:探讨使用第三代双源 CT(DSCT)低管电压、低对比剂用量扫描方案行 CT 肺动脉成像(CTPA)检查的可行性及其对降低线束硬化伪影的价值。**方法:**前瞻性将拟行 CTPA 检查的 60 例受试者随机分为 2 组:分别采用常规扫描方案(管电压 90 kV,对比剂 30 mL)和双低剂量扫描方案(管电压 70 kV,对比剂 20 mL)。记录 2 组的辐射剂量。测量并计算肺动脉干及其主要分支血管腔内的 CT 值、信噪比(SNR)、对比噪声比(CNR)、线束硬化伪影指数(AI)。通过五分量表法对图像质量进行主观评估。分别采用 Wilcoxon 秩和检验和 Student 独立样本 t 检验对 2 组图像的图像质量及 AI 值进行比较,采用单因素方差分析对各组内不同肺动脉分支间的 AI 值进行比较。**结果:**双低组辐射剂量低于常规组。两组间各项客观图像质量指标(CT 值、SNR、CNR)的差异无统计学意义($P>0.05$)。常规组中右肺动脉(RPA)、右肺上叶肺动脉(RULPA)的 AI 值高于其它分支($P<0.05$),而双低组中两者的 AI 值明显降低且与其它分支间的差异无统计学意义($P>0.05$),RPA 和 RULPA 的 AI 值在两组间的差异有统计学意义($t=5.38, P<0.01; t=7.82, P<0.01$),同时两者在双低组的图像质量评分优于常规组($Z=4.33, P<0.01; Z=4.53, P<0.01$)。**结论:**第三代 DSCT 双低 CTPA 扫描方案可行,能显著降低线束硬化伪影对右肺动脉和右肺上叶肺动脉图像质量的影响。

【关键词】 肺栓塞; 体层摄影术, X 线计算机; 对比剂

【中图分类号】 R814.42; R543.2 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2018)04-0378-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2018.04.011

CT pulmonary angiography with low tube voltage and low contrast dose for reducing beam-hardening artifact: the feasibility with the third-generation dual-source CT YANG Meng, ZHANG Zhang, LI Feng-tan, et al. Department of Radiology, Tianjin Medical University General Hospital, Tianjin 300052, China

【Abstract】 Objective: To explore the feasibility of low tube voltage and low contrast dose CT pulmonary angiography (CTPA) using the third-generation dual-source CT and its application value in reducing the beam-hardening artifacts. **Methods:** Totally 60 patients underwent CTPA. All patients were randomly divided into 2 groups: standard group [90kV and 30mL contrast media (CM)] and "double-low" group (70kV and 20mL CM). Objective image quality was evaluated by calculating CT attenuation, signal-to-noise ratio (SNR), contrast-to-noise ratio (CNR), and beam-hardening artifact index (AI). Subjective image quality was assessed by five-point scale. Radiation dose was also recorded. The parameters of objective and subjective image quality were compared with Wilcoxon rank sum test and independent-sample t -test. AI of different branches of pulmonary artery in each group was compared by one-way ANOVA test. **Results:** There was no significant difference (CT value, SNR and CNR) between the two groups in objective image quality ($P>0.05$). In "double-low" group, radiation dose was significantly lower than that of standard group ($P<0.05$). The AIs of right pulmonary artery (RPA) and right upper lobe pulmonary artery (RULPA) in standard group were significantly higher than those in "double-low group" ($t=5.38, P<0.01; t=7.82, P<0.01$). The AIs of RPA and RULPA were higher than those in other branches in standard group, while no difference was found in "double-low" group. The subjective image quality of "double-low" group was also better than that of

作者单位: 300052 天津, 天津医科大学总医院医学影像科

作者简介: 杨萌(1991-), 女, 天津人, 硕士研究生, 主要从事胸部 CT 及 MRI 诊断工作,

通讯作者: 李东, E-mail: dr_lidong@163.com

基金项目: 天津市应用基础与前沿技术研究计划重点项目(14JCZDJC57000); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(81301217)

standard group ($Z=4.33, P<0.01; Z=4.53, P<0.01$). **Conclusion:** Low tube voltage and low contrast dose CTPA with third-generation CT can obtain satisfactory image quality and reduce the influence of beam-hardening artifacts in right pulmonary artery and right upper lobe pulmonary artery.

【Key words】 Pulmonary embolism; Tomography, X-ray computed; Contrast media

肺动脉栓塞(pulmonary embolism, PE)是一类引起循环功能、呼吸功能障碍的常见临床疾病,其常见病因包括深静脉血栓形成、凝血功能异常和恶性肿瘤等^[1],具有潜在致死性,严重危害人类生命健康^[2]。目前,CT 肺动脉成像(CT pulmonary angiography, CT-PA)是疑似 PE 患者的首选影像学检查方法^[3]。CT-PA 图像上充盈高浓度对比剂的上腔静脉系统所产生的线束硬化伪影通常会影响到邻近结构的观察^[4-5],易造成对其邻近的肺动脉分支内栓子的漏诊和误诊。本研究的目的是使用第三代双源 CT 探究低管电压、低对比剂用量的双低 CTPA 扫描方案的可行性及其对减少线束硬化伪影的价值。

材料与方法

1. 一般资料

将 2016 年 10 月—2017 年 2 月临床疑似肺栓塞拟行 CTPA 检查的连续 60 例患者纳入本研究。主要表现为胸闷、憋气和冠心病等。纳入标准:年龄>18 岁、临床怀疑肺动脉栓塞、无碘对比剂过敏史、无心肾功能不全、生命体征平稳。排除标准:注射过程中出现对比剂外渗、有肺实变、肺不张、肺气肿或肺内肿瘤性病变等、对比剂过敏、合并其它系统严重疾病以及不能良好配合者。将所有患者随机均分为常规组和双低组。常规组中男 11 例、女 19 例,年龄 31~81 岁,平均 66.7 岁;双低组中男 13 例、女 17 例,年龄 22~93 岁,平均 62.2 岁。本研究获得本院伦理委员会批准,所有患者知情同意并签署知情同意书。

2. CTPA 检查

使用 Siemens Somatom Force 第三代 DSCT 机。经肘前静脉注射对比剂碘普罗胺(370 mg I/mL)和生理盐水。常规组对比剂用量为 30 mL,双低组对比剂用量为 20 mL,注射流率均为 3.0 mL/s;然后以相同流率注射生理盐水 30 mL。在肺动脉干设置兴趣区(region of interest, ROI),当 ROI 内 CT 值达 200 HU 时延迟 3 s 启动 CTPA 扫描。于平静呼气末屏气扫描,扫描范围自肺尖至膈底水平。扫描参数:90 kV(常规组)或 70 kV(双低组),管电流自动调制,192×0.6 mm,0.25 s/r,螺距 0.55。重建参数:层厚 2 mm,层间距 1.6 mm,矩阵 512×512,采用新型迭代重建算法(advanced modeled iterative reconstruction, ADMIRE),级别 3,软组织卷积核(Bf 40)。

将所有 CT 扫描数据传输至 Siemens Syngo VA30 工作站进行图像观察、后处理和相关指标测量。后处理方法包括容积再现(VR)和多平面重组(MPR)等。

分别在肺动脉干(pulmonary trunk, PT)、右肺动脉(right pulmonary artery, RPA)、左肺动脉(left pulmonary artery, LPA)及右肺上叶肺动脉(right upper lobe pulmonary artery, RULPA)、右肺叶间肺动脉(right interlobar pulmonary artery, RILPA)、右肺中叶肺动脉(right middle lobe pulmonary artery, RMLPA)、右肺下叶肺动脉(right lower lobe pulmonary artery, RLLPA)、左肺上叶肺动脉(left upper lobe pulmonary artery, LULPA)、左肺下叶肺动脉(left lower lobe pulmonary artery, LLLPA)等肺动脉主要分支的最大层面测量各支血管的 CT 值($CT_{血管}$)及标准差(SD)。ROI 为圆形,直径取管腔直径的 1/2~2/3,并置于血管显示清晰处,避开边缘、栓子及线束硬化伪影;其中,RPA 内 ROI 的大小以邻近的上腔静脉管径作为参考。在同一层面测量空气的 CT 值,以其 SD 值($SD_{空气}$)作为图像噪声(noise, N);测量两侧胸肌的 CT 值并取其平均值($CT_{胸肌}$)。计算图像质量的客观评价指标,包括信号噪声比(signal-noise ratio, SNR)、对比噪声比(contrast noise ratio, CNR)和线束硬化伪影指数(artifact index, AI),计算公式如下^[6]:

$$SNR = \frac{CT_{血管}}{N} \quad (1)$$

$$CNR = \frac{CT_{血管} - CT_{胸肌}}{N} \quad (2)$$

$$AI = \sqrt{SD_{血管}^2 - SD_{空气}^2} \quad (3)$$

由两位从事胸部放射诊断 3 年以上的放射科医师独立完成肺动脉图像质量评分,采用五级评分法^[3]:1 分,图像质量不可接受;2 分,图像质量使可诊断性显著减低;3 分,图像质量标准;4 分,图像质量良好;5 分,图像质量优秀。在实际评估中,若两位医师的评分不一致,则通过相互讨论达成一致意见。

记录 CT 扫描仪剂量报告中的 CT 容积剂量指数(CT dose index volume, CTDIvol)和剂量长度乘积(dose length product, DLP),计算有效剂量(effective dose, ED),转换系数 $k=0.014 \text{ mSv}/(\text{mGy} \cdot \text{cm})$ 。

3. 统计学分析

使用 SPSS 19.0 软件包进行统计学分析。两组中肺动脉及其分支的 CT 值、SNR、CNR、AI 值及辐射剂

量的比较采用 Student 独立样本 t 检验, 各组内不同肺动脉分支间 AI 值的比较采用 ANOVA 单因素分析; 频数资料以百分率表示, 采用 χ^2 检验; 两组图像质量主观评分的比较采用 Wilcoxon 秩和检验。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

1. 两组患者的基本临床资料

两组患者的基本临床资料及统计分析结果见表 1。对两组的性别构成、年龄、体质量指数 (body mass index, BMI) 和肺栓塞患者的比例进行比较, 差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。

表 1 两组患者的基本临床资料

指标	常规组	双低组	χ^2/t 值	P 值
男/女	11/19	13/17	0.278	0.598
年龄(岁)	66.7±12.6	62.2±13.2	1.361	0.179
BMI(kg/m ²)	23.52±3.86 (13.67~29.30)	23.72±4.81 (15.35~33.43)	0.180	0.858
PE 占比	14/30 (46.70%)	8/30 (26.70%)	2.584	0.108

2. 图像质量的客观评价

两组图像上肺动脉及其主要分支的 CT 值、SNR 和 CNR 均略高于常规组 (图 1a~c), 但差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。

两组图像上肺动脉及其各段分支的 AI 值及统计分析结果见表 2。双低组中 RPA 和 RULPA 的 AI 值小于常规组 (图 1d), 差异有统计学意义 ($P < 0.01$); 其它肺动脉分支的 AI 值在两组间的差异无统计学意义。常规组内肺动脉各段分支间 AI 值的差异有统计学意义 ($F = 11.54, P < 0.001$), 其中 RPA 和 RULPA 的 AI 值高于其它分支; 而双低组内肺动脉各段分支间 AI 值的差异无统计学意义 ($F = 0.92, P = 0.499$)。

表 2 两组图像上各段肺动脉 AI 值的比较

部位	常规组	双低组	t 值	P 值
PT	21.18±4.77	21.10±4.94	0.02	0.985
RPA	28.12±3.46	21.96±5.24	5.38	<0.001
LPA	22.11±6.32	21.26±6.31	0.52	0.604
RULPA	25.19±2.78	19.79±2.55	7.82	<0.001
RILPA	21.81±3.83	21.91±4.48	0.09	0.926
RMLPA	20.53±3.01	20.67±4.99	0.13	0.900
LULPA	21.15±4.14	20.33±3.64	0.81	0.424
RLLPA	20.27±4.41	19.98±3.98	0.26	0.793
LLLPA	20.72±4.56	20.19±4.26	0.46	0.647

3. 图像质量的主观评价

主观评价结果见表 3。双低组中 RPA 和 RULPA 的图像质量优于常规组 (图 2~5), 差异有统计学意义 ($P < 0.01$), 其余肺动脉分支的图像质量评分在两组间的差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。

4. 两组辐射剂量的比较

两组中辐射剂量各项指标的测量值及统计分析结

果见表 4。双低组的 CTDIvol、DLP 和 ED 均低于常规组, 差异均有统计学意义 ($P < 0.05$)。

表 3 常规组、双低组图像主观评分比较

部位	常规组	双低组	Z 值	P 值
PT	3.47±0.57	3.77±0.62	1.89	0.058
RPA	3.10±0.61	3.87±0.63	4.33	<0.001
LPA	3.40±0.56	3.63±0.67	1.40	0.161
RULPA	3.06±0.58	3.80±0.55	4.53	<0.001
RILPA	3.50±0.63	3.77±0.68	1.59	0.112
RMLPA	3.50±0.57	3.83±0.70	1.88	0.060
LULPA	3.43±0.57	3.67±0.61	1.55	0.120
RLLPA	3.37±0.56	3.60±0.56	1.72	0.085
LLLPA	3.33±0.56	3.50±0.59	1.79	0.073

表 4 常规组、双低组图像辐射剂量比较

指标	常规组	双低组	t 值	P 值
CTDIvol(mGy)	1.09±0.40	0.87±0.38	2.21	0.031
DLP (mGy·cm)	33.37±3.61	31.34±3.68	2.16	0.035
ED(mSv)	0.47±0.05	0.44±0.05	2.16	0.035

讨 论

CTPA 不仅能及时准确地诊断肺动脉栓塞, 而且能较好地识别病变血管的受累情况^[7]。近些年来, 随着 CT 技术的不断进步, 针对如何有效降低 CT 扫描中辐射剂量的研究取得了较好的进展^[8], 低辐射剂量 CT 扫描成为当前研究的热点。常用的降低辐射剂量的方法包括降低管电压、降低管电流及采用迭代重建算法等。理想状态下, 辐射剂量与管电压的平方呈正比。因此, 降低管电压是降低辐射剂量的有效方法。然而, 管电压降低的同时会伴随着图像噪声的增加, 使图像的诊断质量下降。第三代 DSCT 具有强大的硬件性能, 并使用新型迭代重建算法 (ADMIRE) 进行图像重建, 能够在降低管电压的同时保证图像质量, 且降低了患者心率变化对图像质量的影响^[9]。

CTPA 检查需经静脉注射一定量的碘对比剂。碘对比剂使用过程中的常见危害为对比剂过敏反应, 更严重者是碘对比剂对肾功能的潜在危害, 肾功能不全或受损的患者在注射大量对比剂后甚至可能导致对比剂肾病^[10]。此外, 慢性肾病和急性肾功能不全还是 PE 的常见危险因素, 这类患者常常需要排除 PE。因此, 在临床实践中应尽可能地减少 CTPA 检查过程中的对比剂用量^[11]。

CTPA 检查主要是观察肺动脉管腔内对比剂的充盈情况。肺组织内含有大量气体, 在 CT 图像上表现为相对较低密度, 为肺动脉的显示提供了良好的天然背景, 这也是减少 CTPA 对比剂用量的解剖学基础^[12]。此外, 随着管电压的降低, X 线的有效光能更接近碘的衰减 K 缘, 从而使肺动脉腔内的 CT 值升高^[13]。因此, 低管电压技术在降低辐射剂量的同时, 还有助于进一步减少对比剂用量。此前研究已证实,

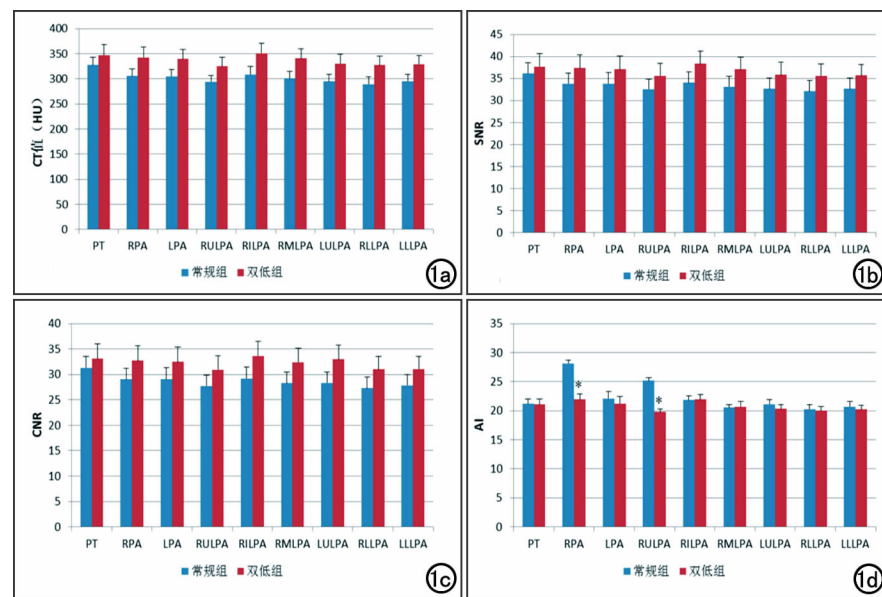


图1 两组图像质量的客观评价指标的柱形分析图,双低组中CT值、SNR和CNR略高于常规组,AI值低于常规组。a) CT值; b) SNR; c) CNR; d) AI值。

使用 90 kV 管电压、30 mL 对比剂的 CTPA 检查具有良好的图像诊断质量,适合作为 PE 检查的常规检查方案^[10]。以往工作中,青少年及体弱消瘦患者因疑诊 PE 而行 CTPA 检查的情况时有发生;针对此种情况,本着减少患者辐射剂量的目的,检查中曾使用 70 kV 管电压,20 mL 对比剂,所得图像质量可以满足诊断要求。在此基础上,本研究尝试将此双低方案应用于日常非选择性患者的 CTPA 检查,检查过程中管电流自动调制(本研究患者实际管电流自动调制范围为 78~1299 mA),以适应不同体型患者的检查需求,保证较肥胖患者的图像可诊断性。重建参数选择日常工作中常用的层厚 2 mm,可能会造成外周小的肺动脉分支显示欠佳,但基本可以保证常规 CTPA 检查中需要观察的肺动脉主干及肺段及以上肺动脉分支的显示。

常规组的 BMI 为 13.67~29.30 kg/m²,双低组为 15.35~33.43 kg/m²。因样本量有限,双低组中仅有 2 例患者的 BMI>30 kg/m²,其 CTPA 图像质量较好,符合诊断要求。双低组的检查方案成功率较高,基本可以认为对采用这种方法无需对患者的 BMI 进行严格要求,可以进一

步推广适用于其它设备。但若临床中患者实际 BMI 较此数值进一步增大,需结合患者自身基础疾病史及实际情况谨慎减少对比剂用量,避免造成图像质量不符合诊断要求。本研究结果中双低组的辐射剂量较常规组显著降低($t=2.16, P=0.035$),而图像质量客观评价指标(CT 值、SNR、CNR)较常规组略增加,表明双低 CTPA 扫描方案是可行的。

在 CTPA 检查中,线束硬化伪影的产生也是影响图像质量和诊断效能的重要因素,其产生原因是由于 X 射线束具有一定的能量范围,在穿透充盈着高浓度对比剂的静脉系统时,低能量射线被吸收,线束由其余高能射线组成,平均能量增高,射线逐渐变硬称之为线束硬化效应。表现为充盈高浓度对比剂的静脉系统在其周围产生低密度区,从而影响邻近结构的观察^[14],易造成误诊或漏诊。Trad 等^[15]使用 50 mL 对比剂及 64 排 CT 行 CTPA 检查,Delesalle 等^[4]则利用

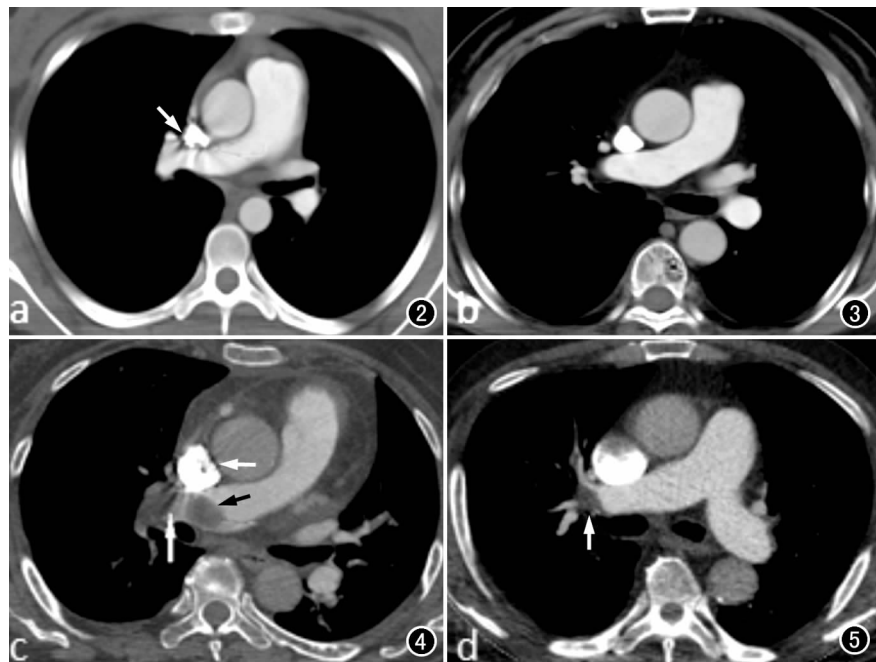


图2 常规组患者(女,19岁,PE阴性),CTPA 图像显示右肺动脉及上腔静脉旁可见伪影(箭)。图3 双低组患者(男,57岁,PE阴性),CTPA 图像显示上腔静脉旁和右肺动脉等处未见明显线束硬化伪影。图4 常规组患者(女,64岁,两肺多发PE),CTPA 图像显示肺动脉内多发栓子(黑箭),上腔静脉旁可见伪影(白箭)。图5 双低组患者(女,77岁,两肺多发PE),CTPA 图像显示肺动脉内多发栓子(白箭),上腔静脉旁和右肺动脉等处均未见明显线束硬化伪影。

DSCT 行胸部血管成像检查,这两项研究均证实降低对比剂浓度和用量是减少线束硬化伪影影响肺动脉成像质量的重要方法。

本研究关注的重点是采用低管电压、低对比剂剂量进行 CTPA 检查,在确保图像质量和可诊断性的基础上,线束硬化伪影对肺动脉成像质量的影响。由于经上肢静脉注射后,对比剂流经右心房和右心室后即充盈至肺动脉内,显影利用率高,为探究低对比剂用量可行性提供了理论基础。本研究中 CTPA 扫描开始的平均时间为肺动脉干 ROI 内 CT 值达 200 HU 后延迟 3 s。考虑注射安全及患者普遍血管情况,均以 3 mL/s 速率完成对比剂注射,双低组采用 20 mL 对比剂(碘总量为 7.4 g,碘注射流率约 1.06 g/s^[10])。后期采用同样流率注射生理盐水,不仅维持了对比剂的团注流率,保证了肺动脉的显影,而且降低了对比剂在上腔静脉内滞留的时间和浓度,减少了高浓度对比剂所造成的线束硬化伪影。本研究结果显示,双低组中 RPA 和 RULPA 的 AI 值小于常规组,其主观评分也优于常规组。本实验设计所采用扫描延时方案广泛应用于本院日常工作中,可以较好地采集充盈对比剂的肺动脉图像,故两组患者仍选用相同的延迟时间。因常规组中对比剂总量相对较多,延迟时间相同时,残留于上腔静脉内的对比剂较双低组多,产生的线束硬化伪影更显著,这进一步佐证了 CTPA 检查中减少对比剂用量的价值。此外,本研究中还进一步分析发现,常规组中肺动脉各分支间 AI 值的差异有统计学意义($F=11.54, P=0.000$),RPA 和 RULPA 的 AI 值明显高于其它分支;而双低组中 RPA 和 RULPA 的 AI 值则与其它分支间无明显差异($F=0.92, P=0.499$)。这一结果表明双低 CTPA 方案所产生的线束硬化伪影对 RPA 和 RULPA 的影响微乎其微,是可以忽略的。主观评估也表明在减少对比剂用量的情况下,CTPA 图像质量并未减低,为及时诊断 PE 提供了可靠的影像学依据。

综上所述,第三代 DSCT 低管电压、低对比剂用量的 CTPA 扫描方案是可行的,且能有效减少、甚至忽略上腔静脉系统所产生的线束硬化伪影的影响,有助于提高 PE 诊断的准确性,降低误诊和漏诊率,可在临床实践中推广应用。

参考文献:

[1] Rybicki FJ, Udelson JE, Peacock WF, et al. 2015 Appropriate utilization of cardiovascular imaging in emergency department patients with chest pain: a joint document of the American College of Radiology Appropriateness Criteria Committee and the American College of Cardiology Appropriate Use Criteria Task Force[J]. J Am Coll Cardiol, 2016, 67(7): 853-879.

[2] Ostovan MA, Ghaffari S, Pourafkari L, et al. Modification of sim-

plified pulmonary embolism severity index and its prognostic value in patients with acute pulmonary embolism[J]. Heart Lung Circ, 2016, 25(2): 184-190.

[3] Zhao Y, Wu Y, Zuo Z, et al. CT pulmonary angiography using different noise index values with an iterative reconstruction algorithm and dual energy CT imaging using different body mass indices: image quality and radiation dose[J]. J Xray Sci Technol, 2016, 25(1): 79-91.

[4] Delesalle MA, Pontana F, Duhamel A, et al. Spectral optimization of chest CT angiography with reduced iodine load: experience in 80 patients evaluated with dual-source, dual-energy CT[J]. Radiology, 2013, 267(1): 256-266.

[5] 马延贺, 张洪, 杨雅朋, 等. 非肺栓塞灌注缺损的双能量 CT 肺灌注成像表现及病因分析[J]. 放射学实践, 2015, 29(3): 240-244.

[6] De Crop A, Casselman J, van Hoof T, et al. Analysis of metal artifact reduction tools for dental hardware in CT scans of the oral cavity: kVp, iterative reconstruction, dual-energy CT, metal artifact reduction software: does it make a difference[J]. Neuroradiology, 2015, 57(8): 841-849.

[7] Konstantinides SV, Torbicki A, Agnelli G, et al. 2014 ESC guidelines on the diagnosis and management of acute pulmonary embolism[J]. Eur Heart J, 2014, 35(43): 3033-3069, 3069a-3069k.

[8] 钟晶, 杨凤娇, 张艳, 等. 双能量 CT 增强扫描在肺部血管容积再现中的价值[J]. 放射学实践, 2017, 31(7): 701-704.

[9] 梁蓉, 张璋, 李锋坦, 等. 第三代双源 CT 冠状动脉成像三低扫描方案的初步经验[J]. 放射学实践, 2017, (4): 378-382.

[10] Meier A, Higashigaito K, Martini K, et al. Dual energy CT pulmonary angiography with 6g iodine-A propensity score-matched study[J]. PLoS One, 2016, 11(12): e0167214.

[11] Szucs-Farkas Z, Christe A, Megyeri B, et al. Diagnostic accuracy of computed tomography pulmonary angiography with reduced radiation and contrast material dose: a prospective randomized clinical trial[J]. Invest Radiol, 2014, 49(4): 201-208.

[12] Lee JW, Lee G, Lee NK, et al. Effectiveness of adaptive statistical iterative reconstruction for 64-slice dual-energy computed tomography pulmonary angiography in patients with a reduced iodine load: comparison with standard computed tomography pulmonary angiography[J]. J Comput Assist Tomogr, 2016, 40(5): 777-783.

[13] Godoy MC, Heller SL, Naidich DP, et al. Dual-energy MDCT: comparison of pulmonary artery enhancement on dedicated CT pulmonary angiography, routine and low contrast volume studies[J]. Eur J Radiol, 2011, 79(2): 11-17.

[14] He T, Qian X, Zhai R, et al. Computed tomography number measurement consistency under different beam hardening conditions: comparison between dual-energy spectral computed tomography and conventional computed tomography imaging in phantom experiment[J]. J Comput Assist Tomogr, 2015, 39(6): 981-985.

[15] Trad HS, Boasquevisque GS, Giacometti TR, et al. Pulmonary 64-MDCT angiography with 50mL of iodinated contrast material in an unselected patient population: a feasible protocol[J]. Radiologia Brasileira, 2016, 49(2): 75-78.