

双低技术联合基于原始数据的迭代重建 在下肢动脉 CT 血管成像中的应用



蒋 严^{1,2}, 郭苗苗², 刁 楠², 马桂娜², 何 铭², 叶天和², 沈 楠², 韩 萍²

(1 华中科技大学同济医学院附属武汉中心医院影诊断科, 湖北 武汉 430014;

2 华中科技大学同济医学院附属协和医院放射科, 湖北 武汉 430022)

摘要:目的 评价基于原始数据的迭代重建(SAFIRE)技术对于下肢动脉成像质量的影响,并探讨下肢动脉 CTA 可行的双低剂量方案。**方法** 采用 128 层 CT 行下肢动脉 CTA 检查 116 例患者,根据扫描电压及对比剂浓度的不同分为 4 组:100 kV+350 mg I/mL, 100 kV+320 mg I/mL, 100 kV+300 mg I/mL, 80 kV+Care kV+300 mg I/mL。各组数据均进行传统滤波反投影(FBP)及 SAFIRE 技术图像重建,比较各重建组血管图像的 SNR 及 CNR。**结果** 同组内,SAFIRE 图像优于 FBP 图像。组间比较,低剂量组 SAFIRE 图像能够达到或优于更高剂量组的 FBP 图像质量。SAFIRE 技术能有效降低图像噪声并改善图像的 SNR、CNR。**结论** 80 kV+Care kV、联合 SAFIRE 重建及 300 mg I/mL 浓度对比剂的扫描方案,能够达到下肢血管病变诊断要求的图像质量,并降低了辐射剂量及对比剂浓度。

关键词:下肢动脉 CT 血管成像;基于原始数据的叠代重建;低剂量

DOI:10.3969/j.issn.1002-1671.2019.04.031

中图分类号:R323.7⁺2;R814.43 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1671(2019)04-0638-05

The study of lower extremity CT angiography by low radiation dose and low contrast medium with sinogram-affirmed iterative reconstruction

JIANG Yan^{1,2}, GUO Miaomiao², DIAO Nan², MA Guina², HE Ming², YE Tianhe², SHEN Nan², HAN Ping²,

(1 Department of Radiology, the Central Hospital of Wuhan, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430014, China; 2 Department of Radiology, Union Hospital, Tongji Medical

College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430022, China)

Abstract: Objective To evaluate image quality of lower extremity CTA of low radiation dose and low contrast medium protocol with sinogram-affirmed iterative reconstruction (SAFIRE). **Methods** This study included 116 patients who referred to lower extremity CT angiography using a 128-slice CT scanner. According to voltage and contrast medium concentration, patients were divided into four groups: 100 kV+350 mg I/mL, 100 kV+320 mg I/mL, 100 kV+300 mg I/mL, 80 kV+Care kV+300 mg I/mL. Image reconstruction underwent conventional filtered back-projection (FBP) and SAFIRE technique in each protocol to compare SNR, CNR of arterial images. **Results**

Comparison of two subgroups in the same group, SAFIRE had significantly higher image quality than FBP. Comparison among groups showed: image quality in low contrast medium and low radiation dose SAFIRE group could reach similar or better than that in higher dose FBP group. SAFIRE could reduce image noise and improve image SNR and CNR. **Conclusion** In lower extremity CTA, 80 kV+Care kV, 300 mg I/mL contrast medium with SAFIRE examine protocol could reduce contrast medium concentration and radiation dose with no compromised diagnostic demand.

Key words: lower extremity computed tomography angiography; sinogram-affirmed iterative reconstruction; low dose

下肢动脉 CTA 检查作为诊断下肢动脉疾病的重要方法,能够无创、直观地显示血管腔内及血管壁病变情况。近年随着计算机科技的进步,迭代重建(iterative reconstruction, IR)技术逐步被应用于 CT 的图像重建

中。IR 技术对比传统滤波反投影(filtered back-projection, FBP)技术,能够有效减小图像噪声及伪影,改善图像质量^[1]。其中基于原始数据的迭代重建(sinogram-affirmed iterative reconstruction, SAFIRE)技术就是德国西门子公司所提出的一种迭代重建技术。本研究通过在下肢动脉 CTA 检查中分别应用 SAFIRE、FBP 技术重建图像,比较 2 种技术的重建图像质量,并通过采用不同扫描方案探讨下肢动脉 CTA 可行的双低剂

作者简介:蒋 严(1990-),男,福建省三明市人,硕士,住院医师,主要从事放射影像诊断工作。

通信作者:沈 楠, E-mail: 312820086@qq.com; 韩 萍, E-mail: hanping@vip.163.com

量扫描方案(低辐射剂量与低对比剂剂量)。

1 资料与方法

1.1 一般资料 前瞻性选取华中科技大学同济医学院附属协和医院 2014 年 11 月至 2015 年 4 月下肢动脉 CTA 检查患者共 116 例,其中男 93 例,女 23 例。年龄 19~94 岁,平均(57.9±16.2)岁。研究中所纳入患者的 BMI 为 15.6~32.7 kg/m²,平均为 22.8 kg/m²,其中体质质量过低(BMI<18.5 kg/m²)8 例,体质质量正常(18.5 kg/m²≤BMI<24.0 kg/m²)67 例,超重(24.0 kg/m²≤BMI<28.0 kg/m²)35 例,肥胖(BMI>28.0 kg/m²)6 例。本研究中,将拟检查患者依入组时间的顺序依次分为 4 组,并分别采用不同扫描方案行下肢 CTA 检查。入组患者在检查前均已被充分告知检查目的、方法与风险,并签署知情同意书。

1.2 检查方法 采用德国西门子公司 128 层螺旋 CT (SOMATOM Definition AS)行下肢动脉 CTA 扫描。主要参数:准直器宽度 128×0.6 mm,螺距 0.5,转速 0.5 s,重建层厚 0.75 mm,层间距 0.4 mm。

根据扫描所采用的管电压及对比剂浓度的不同将病例分为 4 组:A 组,管电压 100 kV,对比剂浓度 350 mg I/mL; B 组,管电压 100 kV,对比剂浓度 320 mg I/mL; C 组,管电压 100 kV,对比剂浓度 300 mg I/mL; D 组,开启 Care kV 并将参考电压定为 80 kV,对比剂浓度 300 mg I/mL。

对 A、B、C、D 4 组病例扫描原始数据均采用 FBP、SAFIRE(等级 3)进行图像重建。按重建技术的不同,得到 A1/A2、B1/B2、C1/C2、D1/D2 共 8 个亚组(其中 1 代表 FBP 重建,2 代表 SAFIRE 重建)。

对比剂总量及流速根据患者体循环情况,总量 1.6~1.8 mL/kg,流速 4.0~5.0 mL/s。使用双筒压力注射器经肘静脉注射对比剂,通过 Bolus Tracking 技术在腹主动脉下段选取 ROI,阈值 280~300 HU 时启动扫描。扫描开启自动管电流调节技术 CARE Dose 4D,参考电流 120 mAs。4 组病例除使用的管电压及对比剂浓度不同以外,其余检查方案和扫描参数均一致。

1.3 图像后处理与数据测量 扫描后应用西门子工作站进行图像后处理与数据测量。

1.3.1 数据测量与计算 测量部位:将下肢动脉分为 6 段进行测量,即髂总动脉、髂外动脉、股动脉(上段)、股动脉(中段)、腘动脉、胫后动脉。测量内容及方法:测量各血管腔内 ROI 的 CT 值及标准差(SD)值,ROI 范围选取血管近中心处,ROI 直径取血管直径 1/2,避开血管壁、钙化、斑块等,测量 3 次取平均值。同时测量同层面血管旁肌肉组织 ROI 的 CT 值及皮下脂肪 ROI 的 SD 值。将血管腔内 ROI 的 SD 值定义为血管

噪声。将皮下脂肪 ROI 的 SD 值定义为图像背景噪声。血管 SNR 定义为:血管平均 CT 值/血管平均 SD 值。血管 CNR 定义为:(血管平均 CT 值-肌肉组织平均 CT 值)/皮下脂肪平均 SD 值。

1.3.2 图像质量评分 由 2 名诊断医生对图像进行主观评分,意见不一致时通过协商后决定。评分方法采用将下肢血管以股骨下 1/3 为界,分为上段、下段分别进行评分,取 2 段平均值作为该下肢血管的最后评分。评分标准参考 Oda 等^[2]的标准,采用 4 分法:1 分,图像质量差,有大量噪声及硬化伪影,无法诊断;2 分,图像质量一般,有较明显噪声及硬化伪影;3 分,图像质量较好,有部分图像噪声及硬化伪影;4 分,图像质量好,图像噪声及硬化伪影小。

1.4 统计学分析 使用 SPSS 19.0 进行统计学分析。同组内亚组 SNR、CNR 比较采用配对样本 *t* 检验;各亚组间基本信息、SNR、CNR 比较采用方差分析, $P<0.05$ 则进一步比较采用 *LSD-t* 检验;图像质量评分采用 *Mann-Whitney Test U* 检验。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 基本数据统计 A、B、C、D 4 组,各组间患者的身高、体质质量、BMI、扫描有效管电流(mAs)无明显差异(表 1)。

2.2 客观图像质量评价

2.2.1 组内 2 个亚组之间的比较(表 2) 同组内采用 FBP、SAFIRE 重建的 2 个亚组间比较,SAFIRE 迭代技术的图像较 FBP 技术的血管噪声、背景噪声小,而 SNR、CNR 更高,且结果均有统计学差异,提示 SAFIRE 迭代技术能够有效降低图像噪声,并提高 SNR、CNR。

2.2.2 各组间的比较 C1 组在 SNR、CNR 上低于 A1 组($P<0.001$ 和 $P=0.004$);而 C2 组在 SNR、CNR 上与 A1 组无明显差异($P=0.07$ 和 0.929),提示 C2 组 300 mg I/mL 对比剂联合 SAFIRE 的重建图像,在图像客观质量方面能够达到 A1 组 350 mg I/mL 对比剂联合 FBP 的重建图像质量。

B1 组在 SNR 上低于 A1 组($P=0.007$),但在 CNR 上无明显差异($P=0.134$);B2 组在 SNR 上与 A1 组无明显差异($P=0.999$),在 CNR 上高于 A1 组($P=0.043$),提示 B2 组 320 mg I/mL 对比剂联合 SAFIRE 的重建图像,在图像客观质量方面能够优于 A1 组 350 mg I/mL 对比剂联合 FBP 的重建图像质量。

D1 组在 SNR、CNR 上均低于 A1 组($P<0.001$ 和 $P=0.003$);D2 组在 SNR 上低于 A1 组($P=0.002$),但在 CNR 上与 A1 组无明显差异($P=0.444$)。

表 1 各组病例基本信息

	A 组	B 组	C 组	D 组	F 值	P 值
例数	50	26	23	17		
身高(cm)	169.53±7.45	166.10±7.14	169.70±6.63	166.82±6.95	1.287	0.282
体质量(kg)	63.58±10.02	66.02±11.86	64.83±11.74	64.59±11.07	0.291	0.832
BMI(kg/m ²)	22.36±3.07	23.79±3.13	22.44±3.29	23.19±3.66	1.315	0.273
有效管电流(mAs)	76.62±4.15	78.08±5.14	76.91±4.80	75.88±5.75	0.845	0.472

注:F 值与 P 值为组间比较方差分析的结果, P<0.05 认为有统计学意义

表 2 组内 FBP、SAFIRE 重建亚组间的比较

	血管 CT 值	血管噪声	肌肉 CT 值	背景噪声	SNR	CNR
A 组 A1 (FBP)	467.09±82.91	24.38±5.47	52.33±5.73	18.29±2.67	19.97±5.43	23.30±6.49
A 组 A2(SAFIRE)	469.17±84.20	20.15±5.38	52.43±5.60	13.82±1.99	24.51±6.89	30.98±8.75
P 值	0.063	0.000	0.352	0.000	0.000	0.000
B 组 B1 (FBP)	419.07±95.66	25.71±4.63	52.28±5.50	18.72±2.63	16.49±3.75	20.33±7.22
B 组 B2(SAFIRE)	420.35±98.76	21.42±5.05	52.13±5.65	13.94±1.86	19.97±4.42	27.32±9.76
P 值	0.316	0.000	0.090	0.000	0.000	0.000
C 组 C1(FBP)	376.27±106.45	26.27±4.53	54.82±5.69	18.97±2.26	14.57±4.50	17.36±6.95
C 组 C2(SAFIRE)	378.50±107.02	22.24±4.63	54.71±5.61	14.42±1.98	17.53±5.71	23.11±9.35
P 值	0.000	0.000	0.067	0.000	0.000	0.000
D 组 D1(FBP)	507.92±130.60	40.44±8.95	60.37±6.02	29.52±8.04	12.91±3.83	16.48±7.31
D 组 D2(SAFIRE)	511.75±131.54	34.50±8.46	60.16±6.03	23.22±7.13	15.30±4.50	21.54±9.94
P 值	0.000	0.000	0.019	0.000	0.000	0.000

注:P 值为配对样本 t 检验的 P 值

2.3 图像质量评分 比较 A、B、C、D4 组分别采用 FBP、SAFIRE 重建后组内 (A1 与 A2, B1 与 B2, C1 与 C2, D1 与 D2) 亚组之间的图像得分, 其差异均有统计学意义 (P<0.05), SAFIRE 重建图像得分高于 FBP; 表明 SAFIRE 技术较 FBP 技术能够提高血管图像视觉质量 (图 1, 2)。

FBP 重建时, A1、B1、C1 3 组间两两比较图像质量评分, 其差异均无统计学意义 (P>0.05); 而 D1 组分别与 A1、B1、C1 3 组图像质量评分比较, 其差异均有统计学意义 (P<0.05), D1 组评分低于 A1、B1、C1 组。但采用 SAFIRE 重建的 D2 组与 A1、B1、C1 组比较时, 差异无统计学意义 (P>0.05), 表明 SAFIRE 技术能有效改善 D2 组的血管图像质量。

2.4 辐射剂量的测算 各组的容积 CT 剂量指数

(volume CT dose index, CTDIvol)、剂量长度乘积 (dose length product, DLP) 和有效辐射剂量 (effective dose, ED) 见表 3。A、B、C 3 组间 CTDIvol、DLP 近似 (P>0.05); 而 D 组 CTDIvol、DLP 均明显低于 A、B、C 3 组 (P<0.001), DLP 较前 3 组下降约 53%。ED 估算: 参考 Saltybaeva 等^[3] 的报道, 本研究采用的转换系数 k 为 0.004 6 (80 kV) 及 0.005 8 (100 kV)。结果 A、B、C 3 组间无统计学差异 (P>0.05), 而 D 组较 A、B、C 组明显降低 (P<0.001), 下降约 63%。

3 讨论

随着 CT 检查的广泛应用, 如何在满足病变诊断的同时尽量减少 CT 检查的辐射剂量与对比剂剂量也受到人们关注。辐射剂量的降低常可通过优化扫描参数的方

表 3 4 组辐射剂量数据

	A 组	B 组	C 组	D 组
CTDIvol(mGy)	3.02±0.16	3.08±0.20	3.04±0.20	1.42±0.11
DLP(mGy·cm)	333.16±25.82	335.65±36.08	336.13±34.83	157.06±12.93
ED(mSv)	1.93±0.15	1.95±0.21	1.95±0.20	0.72±0.06

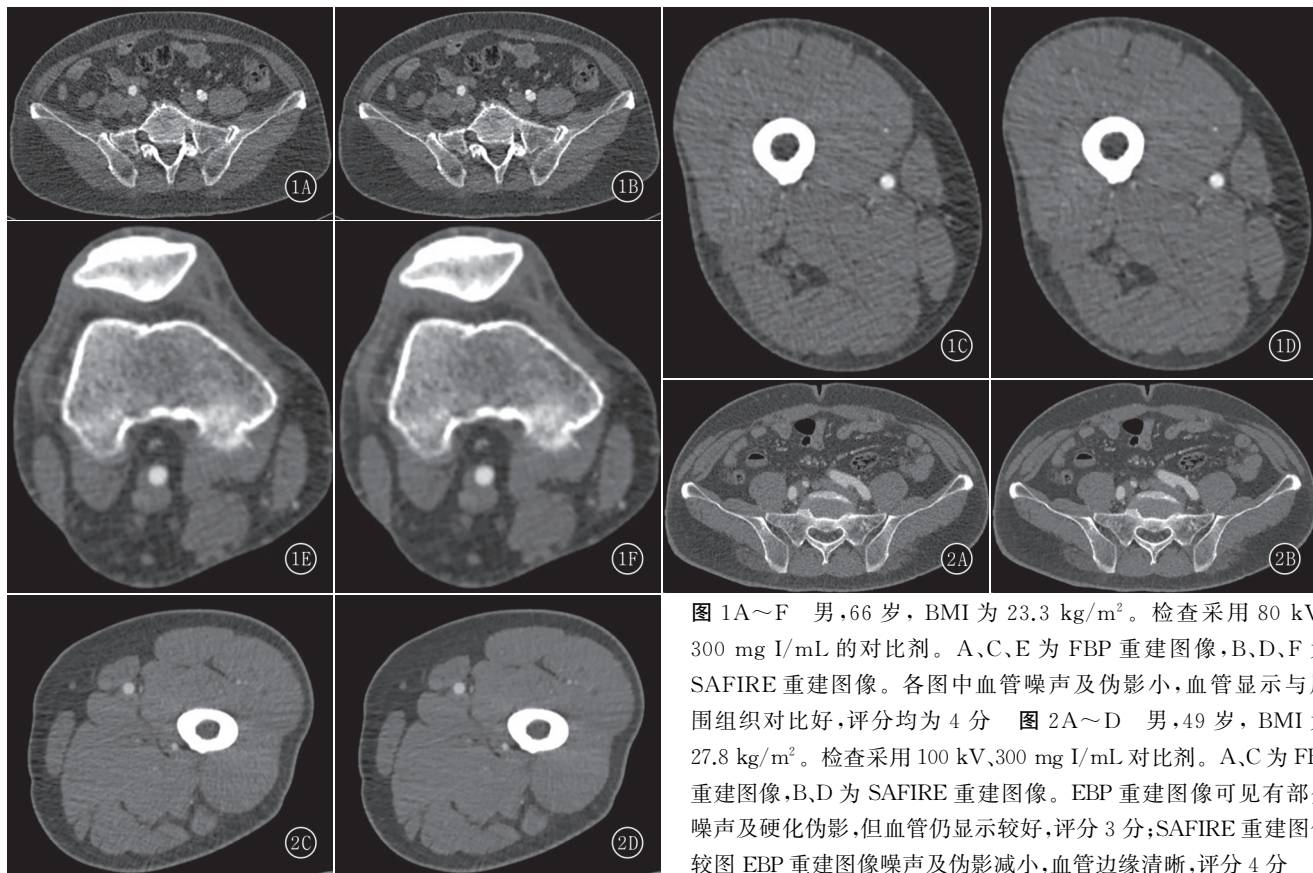


图 1A~F 男,66 岁, BMI 为 23.3 kg/m²。检查采用 80 kV、300 mg I/mL 的对比剂。A、C、E 为 FBP 重建图像, B、D、F 为 SAFIRE 重建图像。各图中血管噪声及伪影小, 血管显示与周围组织对比好, 评分均为 4 分 图 2A~D 男,49 岁, BMI 为 27.8 kg/m²。检查采用 100 kV、300 mg I/mL 对比剂。A、C 为 FBP 重建图像, B、D 为 SAFIRE 重建图像。EBP 重建图像可见有部分噪声及硬化伪影, 但血管仍显示较好, 评分 3 分; SAFIRE 重建图像较图 EBP 重建图像噪声及伪影减小, 血管边缘清晰, 评分 4 分

式, 如管电压、管电流、螺距、转速等^[4]。但伴随辐射剂量的减少所带来的常是噪声和伪影的增加, 图像质量的降低。近年由于迭代重建(iterative reconstruction, IR)技术的应用, 使得 CT 图像质量提高的同时, 提供了一种新的降低辐射剂量的途径。在 Noël 等^[5]报道的一项包含 15 000 例病例的回顾性研究中, 通过比较 IR 技术引入前后的检查, 得出 IR 技术能够实质性降低 CT 检查的 ED。其中 SAFIRE 技术, 有文献报道其在胸部大血管 CTA 检查中, 能够在降低 50% 剂量的同时获得优于常规剂量 FBP 的图像的 SNR、CNR, 并有相似的噪声水平及主观图像质量^[6]。吴永娟等^[7]在冠状动脉 CTA 研究中, 通过低电压、低浓度对比剂(80 kV, 270 mg I/mL)联合 SAFIRE 技术, 能够获得同常规剂量组(100 kV, 350 mg I/mL)相似的图像质量, 并显著降低患者辐射剂量和不良反应发生。金弋人等^[8]在鼻窦 CT 平扫的研究中, 70 kV_p 联合 SAFIRE 重建能够有效降低低电压所致噪声的同时, 得到满足诊断要求的图像质量。

关于本研究中 D 组(低辐射剂量组)扫描条件的设定, 由于所使用的西门子 128 层 CT 机在未开启 Care kV 的情况下仅将管电压调节至 80 kV 时, 扫描有效电流较开启 Care kV 后出现明显减低, 因此研究中采用开启 Care kV 的扫描方案, 也由此得到了 D 组

的有效电流与 A、B、C 3 组相似的结果, 保证了除管电压不同以外, 其他扫描参数的一致。在本研究中所有采用该扫描方案的 D 组病例, 实际扫描管电压也均为 80 kV, 开启 Care kV 后电压没有改变。

在本研究中, 从表 2 可以看出, 在相同 100 kV 电压的情况下, 随着对比剂浓度的降低, 血管强化 CT 值逐级降低。但 C 组与 D 组在相同对比剂浓度下, D 组因采用 80 kV 的电压扫描, 使得扫描射线束的平均光子能量向碘原子的 K 边缘靠近, 引起碘对比剂的衰减增加, 表现为增强血管的 CT 值显著上升, 提高了血管与组织的对比度^[9-10], D 组血管 CT 值甚至超过 A 组高对比剂浓度组。但不可否认由于降低电压后的低能光子较高能光子更加快速地被组织所吸收, 因此在低 kV 扫描时更易于产生线束硬化伪影^[11]。

本研究中可以看到 SAFIRE 技术能够较 FBP 技术有效提高重建图像的 SNR、CNR 及图像质量评分, 使 B、C 组 SAFIRE 图像达到或超过 A 组 FBP 图像水平。对于 D 组, 采用 FBP 重建图像的 D1 组在 SNR、CNR 及主观图像质量评分均低于 A 组 FBP 图像; 但 D2 组由于 SAFIRE 的应用, 加之低 kV 扫描所带来的高 CT 值高对比度的影响, 使得比较 A 组 FBP 图像, 其在 CNR 及图像质量评分均达到相似水平, 虽然在 SNR 上有所下降, 但总体仍能较好地满足下肢血管病

变的诊断要求。

因本研究以达到满足血管病变(动脉粥样硬化、栓塞等)诊断为标准,故 D 组在降低电压的同时并没有提高参考电流,但在该组扫描方案下却也造成了盆腔及大腿中段以上的软组织图像质量欠佳,因此对于需要观察软组织情况的病变则方案可能需要进一步改进,如适当提高参考电流等。

本研究的局限性:首先,本研究中 D 组的患者与其他各组比较数量相对较少;其次,DSA 仍是下肢动脉病变诊断的金标准,由于本研究目的为比较各组扫描方案及重建技术的图像质量,因此研究中并无与 DSA 检查进行病变对比,这也有待于进一步研究。

综上所述,在下肢动脉 CTA 检查中,SAFIRE 重建技术能够有效降低图像噪声并改善图像的 SNR、CNR 及图像质量。管电压 80 kV + CarekV、联合 SAFIRE 技术及 300 mg I/mL 对比剂的扫描方案,能够达到下肢血管病变诊断要求的图像质量,并较常规方案降低了辐射剂量及对比剂浓度。

参考文献:

- [1] RUSSO V, GARATTONI M, BUIA F, et al. 128-slice CT angiography of the aorta without ECG-gating: efficacy of faster gantry rotation time and iterative reconstruction in terms of image quality and radiation dose[J]. *Eur Radiol*, 2015, 26(2): 359-369. DOI: 10.1007/s00330-015-3848-3.
- [2] ODA S, UTSUNOMIYA D, YUKI H, et al. Low contrast and radiation dose coronary CT angiography using a 320-row system and a refined contrast injection and timing method[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2015, 9(1): 19-27. DOI: 10.1016/j.jcct.2014.12.002.
- [3] SALTIBAIEVA N, JAFARI M E, HUPFER M, et al. Estimates of

effective dose for CT scans of the lower extremities[J]. *Radiology*, 2014, 273(1): 153-159. DOI: 10.1148/radiol.14132903.

- [4] PARK C K, CHOO K S, JEON U B, et al. Image quality and radiation dose of 128-slice dual-source CT venography using low kilovoltage combined with high-pitch scanning and automatic tube current modulation[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2013, 29(Suppl 1): 47-51. DOI: 10.1007/s10554-013-0252-4.
- [5] NOËL P B, RENGIER B, FIEBICH M, et al. Does iterative reconstruction lower CT radiation dose: evaluation of 15,000 examinations[J]. *PLoS One*, 2013, 8(11): e81141. DOI: 10.1371/journal.pone.0081141.
- [6] PONTANA F, PAGNIEZ J, DUHAMEL A, et al. Reduced-dose low-voltage chest CT angiography with sinogram-affirmed iterative reconstruction versus standard-dose filtered back projection[J]. *Radiology*, 2013, 267(2): 609-618. DOI: 10.1148/radiol.12120414.
- [7] 吴永娟, 毕纯龙, 雍敏, 等. 双源 CT Flash 模式双低剂量扫描联合 SAFIRE 在冠状动脉成像中的可行性研究[J]. *临床放射学杂志*, 2016, 35(1): 142-145. DOI: 10.13437/j.cnki.jcr.2016.01.040.
- [8] 金弋人, 韩丹, 赵迅冉, 等. 70 kVp 联合迭代重建技术对鼻窦 CT 平扫的研究[J]. *中国医学影像学杂志*, 2017, 25(6): 432-434. DOI: 10.3969/j.issn.1005-5185.2017.06.009.
- [9] BEITZKE D, NOLZ R, UNTERHUMER S, et al. Low-dose high-pitch CT angiography of the supraaortic arteries using sinogram-affirmed iterative reconstruction [J]. *PLoS One*, 2014, 9(6): e99832. DOI: 10.1371/journal.pone.0099832.
- [10] 赵兴汉, 王涛. SAFIRE 在低碘总量、低辐射冠状动脉扫描中的价值[J]. *医学影像学杂志*, 2017, 27(1): 52-55.
- [11] NAKAGAWA M, OZAWA Y, SAKURAI K, et al. Image quality at low tube voltage (70 kV) and sinogram-affirmed iterative reconstruction for computed tomography in infants with congenital heart disease [J]. *Pediatr Radiol*, 2015, 45(10): 1472-1479. DOI: 10.1007/s00247-015-3372-2.

(收稿日期: 2018-06-26; 修回日期: 2018-07-22)