

· CT 低剂量扫描 ·

迭代重建对前置门控冠状动脉 CT 图像质量及辐射剂量的影响

侯阳 于兵 郭启勇 王玉科 余美

【摘要】 目的 探讨 256 层螺旋 CT 前置门控冠状动脉 CTA 成像中应用迭代重建时,与常规剂量滤波反投影(FBP)重组图像质量相当的最适低剂量水平。方法 120 例拟行冠状动脉 CTA 检查者按照同期随机原则分为 4 组,每组 30 例。A 组(对照组)采用常规剂量前置门控扫描及 FBP 重组, B~D 组为低剂量组,采用逐级降低管电流的方式使辐射剂量较 A 组分别降低 50%、60%、70%,并采用相应等级的迭代重建。采用方差分析比较各组客观评价指标(噪声、对比噪声比)及辐射剂量(CT 剂量指数、CT 剂量长度乘积、有效辐射剂量)的差异。采用 *Kruskal-Wallis* 检验比较各组主观图像质量评分(管腔对比度、边缘锐利度、主观噪声及图像总体质量,采用 4 分法)。利用 ROC 曲线确定能维持图像质量等同于 A 组的最适低剂量组。结果 低剂量 B~D 组噪声为 33.2~36.0 HU,低于常规剂量 A 组(37.4 HU),但差异无统计学意义($F=1.48, P=0.22$)。B~D 组对比噪声比为 15.3~16.5,高于 A 组(15.0 ± 2.3),但各组间差异无统计学意义($F=1.70, P=0.17$)。B、C 组显示了很好的主观图像质量,各项主观评分均 ≥ 3 分,与 A 组(主观评分均 ≥ 3 分)差异无统计学意义($P=0.31 \sim 1.00$)。D 组血管边缘锐利度及总体图像质量(2 分均有 3 例)下降,与 A 组(均无 2 分)差异有统计学意义($P<0.05$)。ROC 曲线显示,C 组为维持图像质量等同于常规剂量的最适低剂量组,曲线下面积为 0.76,95% 可信区间为 0.65~0.87。该组有效辐射剂量值为(1.2 ± 0.1) mSv,较 A 组剂量(3.1 ± 0.6)降低约 61%。结论 迭代重建可以显著降低噪声,在剂量降低 61% 的条件下仍可得到与常规剂量 FBP 重组相当的图像质量。由此,可使患者的冠状动脉 CTA 辐射剂量降至 1.2 mSv。

【关键词】 冠状血管造影术; 体层摄影术,X 线计算机; 辐射剂量

Application of iterative reconstruction in prospective electrocardiography-triggered CT coronary angiography HOU Yang, YU Bing, GUO Qi-yong, WANG Yu-ke, YU Mei. Department of Radiology, Shengjing Hospital of China Medical University, Shenyang 110004, China
Corresponding author: GUO Qi-yong, Email: guoqy@sj-hospital.org

【Abstract】 **Objective** To assess the image quality (IQ) of an iterative reconstruction (IR) technique (iDose⁴) from prospective electrocardiography (ECG)-triggered coronary CTA on a 256 MSCT scanner and determine the optimal dose reduction using IR that can provide IQ comparable to filtered back projection (FBP). **Methods** Prospectively ECG gated CCTA were performed on 120 patients [76 men, 44 women; age: (53 ± 10) y] using a 256-slice MSCT (Brilliance iCT, Philips Healthcare). The control group (Group A, $n=30$) were scanned using the conventional tube output (120 kVp, 210 mAs) and reconstructed using FBP. The other 3 groups were scanned with the same kVp but successively reduced tube output as follows: B ($n=30$): 105 mAs, C ($n=30$): 84 mAs; D ($n=30$): 65 mAs and reconstructed using IR levels of L4 to L6, respectively. All images were reconstructed using the same kernel (XCB). Two radiologists graded IQ in a blinded fashion on a 4-point scale (4- excellent, 3- good, 2- fair and 1-poor). Quantitative measurements of CT values, image noise, Signal-to-noise ratio (SNR) and contrast-to-noise ratio (CNR) were obtained in each group. Analysis of variance (ANOVA) was used for comparisons of objective evaluation indices (noise, CNR) and radiation dose (CTDIvol, DLP, ED) between the four groups. The *Kruskal-Wallis* test was used for comparisons of demographic data and for detection of differences in subjective evaluation of IQ among groups. A level of $P<0.05$ was considered statistically significant. A ROC

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2013.04.004

基金项目:辽宁省教育厅创新团队基金资助项目(LT2010105);沈阳市科学技术项目计划资助项目(F12-193-9-35)

作者单位:110004 沈阳,中国医科大学附属盛京医院放射科

通信作者:郭启勇,Email: guoqy@sj-hospital.org

analysis was performed to determine a radiation reduction threshold up to which excellent IQ was maintained. **Results** There was no significant differences in objective noise among Groups A (37.4 ± 7.9) HU, B (33.2 ± 7.1) HU, C (35.7 ± 9.8) HU, and D (36.0 ± 6.8) HU ($F = 1.48, P = 0.22$). There was no significant differences in CNR among Groups A (15.0 ± 2.3), B (16.5 ± 3.6), C (16.3 ± 3.5), and D (15.3 ± 2.8) ($F = 1.70, P = 0.17$). Group B and C had good and excellent scores of the subjective IQ (≥ 3), and there was no significant differences in the scores of the subjective IQ between Group A, and Groups B, C ($P = 0.30-1.00$). Significant differences in image sharpness and study acceptability were observed between groups A and D ($P < 0.01$). Using the criterion of excellent IQ (score 4), the ROC curve of dose levels and IQ acceptability established a reduction of 60% of tube output (Group C) as optimum cutoff point (AUC: 0.76, 95% CI: 0.65—0.87). The effective dose (ED) of Group C was 61% lower than that of Group A, (1.2 ± 0.1) mSv vs. (3.1 ± 0.6) mSv. **Conclusion** Iterative reconstruction techniques can provide 61% ED reduction in prospectively-triggered coronary CTA using 256-slice MSCT while maintaining excellent image quality.

【Key words】 Coronary angiography; Tomography, X-ray computed; Radiation dose

近年来,随着 MSCT 技术的发展,冠状动脉 CTA 以较高的敏感度、特异度成为冠心病的首选筛查手段^[1]。与此同时,人们对其辐射剂量的关注也与日俱增。降低冠状动脉 CTA 剂量的主要方式包括:降低管电压、管电流,缩短扫描长度,缩小 FOV,应用心电门控(ECG)管电流调制技术,采用前瞻性门控扫描及大螺距快速扫描等^[2]。前置门控扫描是其中较为常用的低剂量技术,较回顾门控扫描剂量降低 63% ~ 83%^[3],尽管如此,其辐射剂量仍达到 2.1 ~ 6.2 mSv^[3],远大于导管法冠状动脉造影的辐射剂量^[4]。迭代重建(iterative reconstruction, IR)算法应用于冠状动脉 CTA 的研究显示,IR 法可以在保证冠状动脉腔内强化程度不变的同时明显降低图像噪声,改善图像质量。在不同机型的冠状动脉 CTA 检查中,应用不同类型的迭代重建可以使辐射剂量降低 40% ~ 76%^[5]。根据辐射的合理及最低化原则(as low as reasonably achievable, ALARA), IR 算法所致的冠状动脉 CTA 降低剂量的最大程度应被确定。因而,本研究中,拟通过不同级别低剂量组常规剂量滤波反投影(FBP)图像与 IR 重组图像的比较,探讨新型 IR 算法(iDose⁴)技术降低冠状动脉 CTA 辐射剂量的最大能力。

资料与方法

一、患者选择

2012 年 3 月至 5 月间 120 例疑诊冠心病拟行冠状动脉 CTA 检查者被招募入组。排除标准:体质量指数(BMI) < 20 或 > 30 kg/m²;严重的肾功能不全(肌酐清除率 ≤ 120 $\mu\text{mol/L}$)、怀孕、已知碘对比剂过敏、冠状动脉支架植入术后、冠状动脉旁路移植术后复查、严重的心律不齐、心功能 III 级以下等。其中男 76 例,女 44 例,年龄 29 ~ 79 岁,平均($53 \pm$

10)岁, BMI 21.9 ~ 30.0 kg/m², 平均(25.4 ± 2.8)kg/m², 冠状动脉钙化积分为 0 ~ 817.5 分, 平均(289.5 ± 216.5)分。受检者按照同期随机原则分入 4 组, 每组 30 例。A 组采用常规剂量前置门控扫描(120 kV, 210 mAs), B ~ D 组为低剂量组, 采用管电压 120 kV, 管电流分别为 105、84、63 mAs, 使辐射剂量分别降低 50%、60%、70%。该试验经本院伦理委员会批准, 所有患者均签署知情同意书。

二、扫描方法

冠状动脉 CTA 检查采用 256 层 CT (荷兰 Philips Brilliance 256iCT)。扫描范围从气管分叉下方 1 cm 至膈肌。采用对比剂跟踪触发技术, 感兴趣区设于主肺动脉窗层面的升主动脉内, 触发阈值为 180 HU。达阈值后嘱患者屏气, 6 s 后开始扫描。采用 Ulrich REF XD 2051 双筒高压注射器, 18 G 套管针, 置于前臂静脉, 注射对比剂碘海醇 (350 mg I/ml) 70 ml, 流率 5.0 ml/s, 随后相同流率注入 20 ml 生理盐水。扫描参数: 管电压 120 kV, A ~ D 组的管电流分别为 210、105、84、63 mAs。准直器宽度: 根据扫描范围自动调整为 128、112 或 96 \times 0.625 mm, FOV 250 mm \times 250 mm, 扫描长度 9.3 ~ 18.8 mm, 平均(12.9 ± 2.0) mm。重组层厚 0.9 mm, 重组间隔 0.45 mm。心率 ≥ 70 次/min 者, CT 检查前口服 β 阻滞剂(美托洛尔片) 25 ~ 50 mg 以降低心率。受检者扫描实时心率 39 ~ 69 次/min, 平均为 (60 ± 7) 次/min, 心率变异均值为 0 ~ 3.5 次, 平均(1.5 ± 1.0) 次。

三、图像处理及分析

A 组原始数据采用 FBP 重组。B、C、D 组采用 iDose⁴ 重组, 迭代等级参数根据厂家建议分别选择 iDose⁴ Level 4 ~ 6。各序列均采用常规心脏卷积函数 XCB。

1. 图像质量主观评价:将图像质量最佳时相的各组横断面数据传至 EBW4.01 工作站进行分析。采用横断面及 MPR 图像对受检者的前降支、回旋支及右冠状动脉进行图像质量的综合评估,内容包括:血管和周围结构的对比度、管腔边缘的锐利度、主观噪声、总体图像质量。上述主观指标均按照 4 分法评定^[3],4 分:血管显示连续,血管边缘锐利,无伪影;3 分:血管显示连续,血管边缘少量伪影,不影响管腔评价;2 分:血管显示连续,血管边缘中度伪影,管腔模糊,难于评价;1 分:血管显示连续,边缘严重伪影,管腔不能评价或血管显示中断、移位。由 2 名不知扫描条件及患者临床资料的有经验的放射科医师(从事冠状动脉 CT 诊断 5 年以上)对图像质量独立进行评价。取 2 名医师的平均分作为最终评分。

2. 图像质量客观评价:左冠状动脉起始部水平的主动脉根部内设定 2 cm² 感兴趣区,测定其 CT 值,并以其标准差作为图像噪声。测定同层面左主干周围的心包内脂肪 CT 值作为背景,其感兴趣区大小取不包含血管的最大面积值。按照公式:对比噪声比(CNR) = (CT_{主动脉} - CT_{心包脂肪}) / 图像噪声_{主动脉}^[6], 计算 CNR。

3. 辐射剂量测量:采用 CT 剂量指数(CT dose index, CTDI), CT 剂量长度乘积(dose-length products, DLP)及有效辐射剂量(effective dose, ED)评价患者的辐射剂量。记录扫描过程中 CTDI 及 DLP 值。采用公式:ED = DLP × k 计算患者有效辐射剂量(k = 0.014 mSv · mGy⁻¹ · cm⁻¹)^[7]。

四、统计学分析

所有计量资料采用 $\bar{x} \pm s$ 表示。采用 SPSS 17.0 软件进行统计学分析。各组间客观评价指标(噪声、CNR)及辐射剂量(CTDI、DLP、ED)采用方差分析(ANOVA)。2 名观察者对各组图像质量主观评分的一致性采用 Kappa 检验。各组间图像主观评分的差异采用 Kruskal-Wallis 检验。ROC 用于确定与常规剂量 FBP 重组图像质量相当的最适低剂量水平。P < 0.05 为两组间差异有统计学意义。

结 果

所有受检者均顺利通过检查,无不良反应发生。

一、图像质量评价与比较

1. 主观评价结果:2 名放射科医师对 4 组图像的主观评分显示了较好的组间一致性。对图像对比度、锐利度、主观噪声及总体图像质量的 Kappa 值分别为 0.77、0.74、0.79、0.82。常规剂量 FBP 重组组与低剂量迭代重建组图像主观评分结果见表 1。

低剂量迭代重建 B、C 组显示了很好的主观图像质量,各项主观评分均 ≥ 3 分,与 A 组比较差异无统计学意义。当剂量降低 70% (D 组),血管边缘锐利度下降,出现 3 例血管边缘模糊,评分为 2 分,总体图像质量亦下降,且与 A 组比较差异有统计学意义(P < 0.01,图 1~4)。ROC 分析显示以总体图像质量优秀(4 分)为标准时,C 组为维持图像质量等同于常规剂量的最适低剂量组,曲线下面积为 0.76,95% 可信区间为 0.65~0.87(图 5)。

表 1 常规剂量滤波反投影重组组与低剂量迭代重建组图像主观评分比较(例)

组别	例数	对比度				锐利度			
		1 分	2 分	3 分	4 分	1 分	2 分	3 分	4 分
A 组	30	0	0	1	29	0	0	3	27
B 组	30	0	0	2	28	0	0	1	29
C 组	30	0	0	1	29	0	0	5	25
D 组	30	0	0	5	25	0	3	7	20
F 值		5.12				11.75			
P 值		0.19				0.01			

组别	主观噪声				总体图像质量			
	1 分	2 分	3 分	4 分	1 分	2 分	3 分	4 分
A 组	0	0	4	26	0	0	3	27
B 组	0	0	3	27	0	0	3	27
C 组	0	0	4	26	0	0	4	26
D 组	0	0	8	22	0	3	12	15
F 值	3.66				21.65			
P 值	0.35				<0.01			

注:A 组:常规剂量滤波反投影重组组;B~D 组:低剂量迭代重建组。对比度 A 组分别和 B、C、D 组比较,差异均无统计学意义(P 值分别为 0.56、1.00 和 0.09);锐利度 A 组分别和 B、C、D 组比较,P 值分别为 0.31、0.45 和 0.02;主观噪声 A 组分别和 B、C、D 组比较,P 值分别为 0.69、1.00 和 0.20;总体图像质量 A 组分别和 B、C、D 组比较,P 值分别为 1.00、1.00 和 <0.01

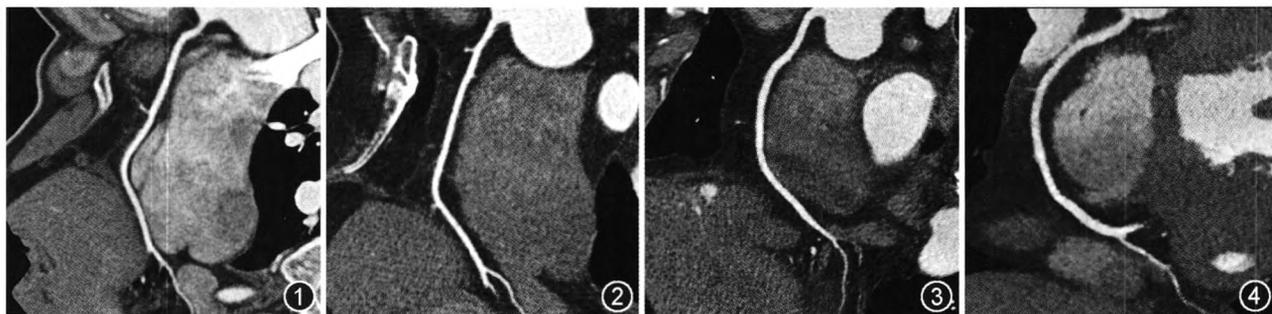


图1 男,52岁,体质指数(BMI)25.4 kg/m²,常规剂量(120 kV,210 mAs)滤波反投影(FBP)重组右冠状动脉 MPR 图像,血管对比度、边缘锐利度、主观噪声及图像总体质量评分均为4分 图2 男,54岁,BMI = 25.8 kg/m²,低剂量B组(120 kV,105 mAs)迭代重建(iDose⁴) Level 4 右冠状动脉 MPR 图像,血管对比度、边缘锐利度、主观噪声及图像总体质量评分均为4分 图3 男,48岁,BMI = 26.0 kg/m²,低剂量C组(120 kV,84 mAs)iDose⁴ Level 5 右冠状动脉 MPR 图像,血管对比度、边缘锐利度、主观噪声及图像总体质量评分均为4分 图4 男,58岁,BMI = 25.7 kg/m²,低剂量D组(120 kV,63 mAs)iDose⁴ Level 6 右冠状动脉 MPR 图像,血管对比度良好,但血管边缘略模糊,主观噪声增大,图像总体质量下降

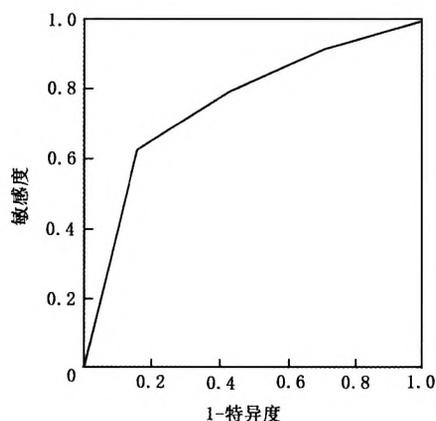


图5 与常规滤波反投影重组图像质量相当的最最低剂量水平 ROC 曲线。以图像总体质量4分为标准时,截点为剂量降低60%组(C组),曲线下面积0.76,95%可信区间为0.65~0.87

2. 图像客观指标的比较:低剂量B、C、D组的噪声值较A组噪声更低,但差异无统计学意义($P = 0.12$)。在CNR方面,iDose⁴重组的各组(15.3~16.5)均高于FBP重组的A组(15.0±2.3),但各組间差异无统计学意义($P > 0.05$,表2)。

二、辐射剂量的比较

各组CTDI、DLP及ED值比较见表3。各组辐射剂量差异均有统计学意义。常规剂量FBP组ED值为(3.1±0.6)mSv,而与A组主观图像质量相当,且客观噪声、CNR更佳的C组的ED值为(1.2±0.1)mSv,较A组剂量降低约61%。

讨 论

CT原始数据的重组算法主要有滤波反投影及迭代重建两大类。近两年来,随着计算机设备的迅

表2 常规剂量滤波反投影组与低剂量迭代重建组图像客观评分比较($\bar{x} \pm s$)

组别	例数	CT _{主动脉根部} (HU)	噪声(HU)	信噪比	对比噪声比
A组	30	422.8±40.0	37.4±7.9	11.7±2.7	15.0±2.3
B组	30	437.5±46.9	33.2±7.1	13.3±4.2	16.5±3.6
C组	30	424.9±48.5	35.7±9.8	13.2±2.1	16.3±3.5
D组	30	434.3±48.2	36.0±6.8	12.7±2.6	15.3±2.8
F值		0.72	1.48	1.80	1.70
P值		0.55	0.22	0.15	0.17

注:分组同表1

表3 常规剂量组与各低剂量组辐射剂量比较($\bar{x} \pm s$)

组别	例数	CTDI(mGy)	DLP(mGy/cm)	ED(mSv)
A组	30	19.8±3.1	221.1±37.9	3.1±0.6
B组	30	8.2±0.2	100.1±8.0	1.4±0.2
C组	30	6.8±0.2	86.3±9.7	1.2±0.1
D组	30	5.1±0.2	63.0±4.0	0.9±0.1
F值		293.4	262.3	225.3
P值		<0.01	<0.01	<0.01

注:分组同表1。CTDI:CT剂量指数;DLP:CT剂量长度乘积;ED:有效辐射剂量

猛发展及新型迭代算法的产生,迭代算法的临床应用价值逐渐受到肯定。以往的研究显示,迭代重建可以显著地降低噪声,改善对比噪声比及信噪比^[6]。应用不同类型的迭代重建算法可使冠状动脉CTA的剂量降低17%~50%^[8]。然而,早期的迭代重建的缺点是容易产生蜡像样伪影,且图像重组的速度偏慢。

本研究采用的iDose⁴是新型的迭代重建算法,其特点是在双空间(投影空间及图像空间),利用多种噪声模型和解剖模型,对噪声予以精确刻画和处理的同,保持图像真实呈现。其首先在投影空间,

通过最新投影和之前投影逐一对比,构造噪声模型,并对噪声加以抑制和消除。第一步降噪之后的数据转换为图像空间;针对图像空间的噪声模型和解剖模型,进一步降低图像噪声,并提高图像分辨率(空间分辨率和密度分辨率)。降噪和图像质量也是以迭代方式向优化条件逐步逼近。由于噪声模型和解剖模型的采用,不仅加速重建过程,提高图像分辨率,且不改变图像的噪声谱^[5],从而有助于消除伪影(如蜡像状伪影)。而且,其 20 帧/s 的图像重组速度,亦可以满足临床实时成像的需求。

笔者发现,在冠状动脉 CTA 成像中,应用 iDose⁴ 能够明显的补偿低剂量成像造成的图像噪声增大,改善对比噪声比,从而得到与常规剂量 FBP 相当的图像质量。各低剂量组应用不同迭代等级函数补偿后其噪声略低于常规剂量 FBP 组。噪声的降低,使得对比噪声比有所提高。低剂量 iDose⁴ 重组各组 CNR 均值为 15.3 ~ 16.5,较常规剂量 FBP 组略高(CNR = 12.39),CNR 的升高考虑为降低噪声所致。上述结果与 Hara 等^[9]的研究结果一致。

本研究显示,应用 iDose⁴ 重组低剂量各组主观噪声评分与 A 组大致相当而无显著的统计学差异($P > 0.05$)。而在图像对比度、边缘锐利度及总体图像质量的主观评分上,B、C 组与 A 组亦无统计学差异($P > 0.05$)。管电流降低 60% 时(C 组),其各项主观指标的优秀率(4 分)为 83.3% ~ 96.7%,与常规剂量 FBP 重组大致相当(86.7% ~ 96.7%)。ROC 曲线分析证实在取 4 分为图像优秀的标准时,最适剂量的截点是剂量降低 60% 组。此组的实际扫描剂量为 (1.2 ± 0.1) mSv,较常规剂量组 (3.1 ± 0.6) mSv 降低 61%。此剂量降低程度与以往文献大致相当^[5,8-9]。

B 组的血管边缘锐利度及主观噪声得分略优于 A 组,综合客观指标,B 组的图像质量优于常规剂量 FBP 组。按照 ALARA 原则,B 组并非本研究所探寻的最适剂量组,然而,其优异的图像质量可能更有利于冠状动脉支架植入及严重钙化斑块的血管节段的显示,因为显示这些病变通常需要更高的空间分辨率和更优的图像质量,此方面研究尚待进一步开展。

采用更低的管电流时,尽管有更高等级的迭代等级参数对噪声进行补偿,但是图像质量仍有下降。D 组出现不可接受的图像 3 例,图像质量 4 分所占比例为 50% (15/30),较其他组明显下降(86.7% ~ 90.0%)。此点与 Hou 等^[10]应用迭代重建的回顾门控扫描冠状动脉 CTA 中发现的现象一致。主要原

因是血管边缘过于平滑,考虑与空间分辨率下降有关。Hara 等^[9]的模体实验也证实半剂量扫描迭代重建与全剂量扫描 FBP 重组比较空间分辨率略有下降。虽然图像的过于平滑,可以通过采用更高的卷积函数(如 XCC)或调整窗宽、窗位来改善,但是考虑到空间分辨率的下降可能影响冠状动脉细微病变的显示,因此 120 kV、63 mAs 这一剂量等级可能更适合纤细人群而非本组的中等体型人群。

本研究的局限性:(1) 每组患者数偏少,有待进一步扩大样本量。(2) 本实验受检者的 BMI 在 20 ~ 30 kg/m² 之间,因而本研究结论仅适用于中等体型的受检者,肥胖及瘦小患者的低剂量条件尚待进一步研究。(3) 没有进行低剂量 iDose⁴ 重组 CTA 图像与常规导管法冠状动脉造影或血管内超声的对照研究,iDose⁴ 重组能否客观真实地反映斑块的形态特征,及其诊断血管狭窄的准确性尚待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Kerl JM, Schoepf UJ, Zwerner PL, et al. Accuracy of coronary artery stenosis detection with CT versus conventional coronary angiography compared with composite findings from both tests as an enhanced reference standard. *Eur Radiol*, 2011, 21:1895-1903.
- [2] McCollough CH. Re: Maximizing dose reductions with cardiac CT. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2009, 25:647.
- [3] Hou Y, Yue Y, Guo W, et al. Prospectively versus retrospectively ECG-gated 256-slice coronary CT angiography: image quality and radiation dose over expanded heart rates. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2012, 28:153-162.
- [4] Morin RL, Gerber TC, McCollough CH. Radiation dose in computed tomography of the heart. *Circulation*, 2003, 107:917-922.
- [5] Funama Y, Taguchi K, Utsunomiya D, et al. Combination of a low-tube-voltage technique with hybrid iterative reconstruction (idose) algorithm at coronary computed tomographic angiography. *J Comput Assist Tomogr*, 2011, 35:480-485.
- [6] Zhang C, Zhang Z, Yan Z, et al. 320-row CT coronary angiography: effect of 100-kV tube voltages on image quality, contrast volume, and radiation dose. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2011, 27:1059-1068.
- [7] Leipsic J, Labounty TM, Heilbron B, et al. Adaptive statistical iterative reconstruction: assessment of image noise and image quality in coronary CT angiography. *AJR Am J Roentgenol*, 2010, 195:649-654.
- [8] Leipsic J, Labounty TM, Heilbron B, et al. Estimated radiation dose reduction using adaptive statistical iterative reconstruction in coronary CT angiography: the ERASIR study. *AJR Am J Roentgenol*, 2010, 195:655-660.
- [9] Hara AK, Paden RG, Silva AC, et al. Iterative reconstruction technique for reducing body radiation dose at CT: feasibility study. *Am J Roentgenol*, 2009, 193:764-771.
- [10] Hou Y, Liu X, Xv S, et al. Comparisons of image quality and radiation dose between iterative reconstruction and filtered back projection reconstruction algorithms in 256-MDCT coronary angiography. *AJR Am J Roentgenol*, 2012, 199:588-594.

(收稿日期:2012-08-13)

(本文编辑:任晓黎)