

· 超低剂量 CTA 研究专题 ·

70 kVp 管电压和 30mL 对比剂的前瞻性心电门控触发大螺距 CT 冠状动脉成像

祁丽, 张龙江, 周长圣, 郑玲, 顾海峰, 卢光明

【摘要】 目的:联合前瞻性心电门控及大螺距技术,探讨 70 kVp 管电压、30 mL 对比剂 CT 冠状动脉成像(CTCA)的可行性。**方法:**将 80 例体质指数 $\leq 25 \text{ kg/m}^2$ 、心率 ≤ 70 次/分行 CTCA 的患者随机分为两组,其中 40 例患者采用 100 kVp,60 mL 对比剂的扫描方案行 CTCA 检查,另 40 例患者采用 70 kVp,30 mL 对比剂的扫描方案行 CTCA 检查。所有 CTCA 检查都在前瞻性心电门控及大螺距(3.4)模式下进行。100 kVp 组数据采用滤波反投影重建算法进行重建,而 70 kVp 组数据采用迭代重建算法进行重建。测量每例患者主动脉根部、各冠状动脉起始处部及纵膈脂肪 CT 值和标准差并计算各段血管的信噪比(SNR)和对比噪声比(CNR)。两名放射科医师对所有图像以 4 分法进行评分。比较两组图像质量及辐射剂量。**结果:**70 kVp 组的平均冠状动脉 CT 值 $[(603 \pm 86) \text{ HU}]$ 及图像噪声 $[(42 \pm 5) \text{ HU}]$ 均明显高于 100 kVp 组的平均冠状动脉 CT 值 $[(503 \pm 68) \text{ HU}]$, $P < 0.001$ 及图像噪声 $[(25 \pm 4) \text{ HU}]$, $P < 0.01$,而 70 kVp 组的 SNR 及 CNR $(14.6 \pm 3.0, 17.8 \pm 3.4)$ 均明显低于 100 kVp 组 $(20.7 \pm 3.8, 24.4 \pm 4.1)$, $P < 0.001$ 。两组间各冠状动脉主观图像质量评分无统计学差异($P > 0.05$)。70 kVp 组患者所接受的辐射剂量比 100 kVp 组降低了 76%,对比剂用量降低了 50%。**结论:**联合前瞻性心电门控、大螺距及迭代重建技术,70 kVp 管电压、30 mL 对比剂 CTCA 在体质指数 $\leq 25 \text{ kg/m}^2$ 、心率 ≤ 70 次/分的患者中是可行的,可在大幅度降低辐射剂量及对比剂用量的条件下获得满足诊断的图像质量。

【关键词】 血管成像; 冠状动脉疾病; 辐射剂量; 对比剂; 体层摄影术, X 线计算机

【中图分类号】 R814.42; 541.4 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2014)06-0601-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2014.06.006

The feasibility of coronary CT angiography using a tube voltage of 70kVp and 30mL of contrast material QI Li, ZHANG Long-jiang, ZHOU Chang-sheng, et al, Department of Medical Imaging, Jinling Hospital, Clinical School of Medical College, Nanjing University, Nanjing 210002, P. R. China

【Abstract】 Objective: To investigate the feasibility of computed tomography coronary angiography (CTCA) using 70kVp tube voltage and 30mL contrast material combined with prospectively ECG-triggering, high-pitch and iterative reconstruction. **Methods:** A total of 80 patients with BMI less than 25 kg/m^2 and heart rate (HR) lower than 70bpm were randomized divided into two groups and underwent CTCA examination. Forty patients were scanned using a tube voltage of 100kVp after administration of 60mL of iodinated contrast material (100kVp group). Another 40 patients were scanned using 70kVp and 30mL contrast material (70kVp group). CT images were reconstructed with filter back projection (FBP) algorithm in 100kVp group and with iterative reconstruction algorithm in 70kVp group. The mean CT attenuation and standard deviation (SD) of coronaries and adjacent perivascular tissue were measured and SNR and CNR were calculated. Two radiologists reviewed all images and scored using a 4-point scale. The image quality and radiation dose were compared between the two groups. **Results:** The mean attenuation in 70kVp group $[(603 \pm 86) \text{ HU}]$ was significantly higher than in 100kVp group $[(503 \pm 68) \text{ HU}]$, $P < 0.001$, as well as the image noise $[(42 \pm 5) \text{ HU}]$ vs $(25 \pm 4) \text{ HU}$, $P < 0.001$. SNR and CNR in 70kVp $(14.6 \pm 3.0, 17.8 \pm 3.4)$ was significantly lower than in 100kVp group $(20.7 \pm 3.8, 24.4 \pm 4.1)$, $P < 0.001$. There was no difference in the subjective image quality between the two groups (all $P > 0.05$). The radiation dose and contrast material in patients of 70kVp group were reduced by 76% and 50% respectively when compared with 100kVp group. **Conclusion:** Our study shows that prospectively ECG-triggered high-pitch CTCA at 70kVp with 30mL iodinated contrast medium volume can obtain diagnostic image quality with substantially reduced radiation dose in selected patients with BMI less than 25 kg/m^2 and heart rate lower than 70bpm.

【Key words】 Angiography; Coronary artery disease; Radiation dosage; Tomography, X-ray computed

CT 冠状动脉成像(computed tomography coronary angiography, CTCA)是一种无创、快速、可靠的

检测冠状动脉病变的检查方法,已被广泛应用于临床。随着多排螺旋 CT 尤其是双源 CT 的出现,CTCA 的技术成功率及检测冠状动脉狭窄的准确性大幅度提高,但其相对较高的辐射剂量及对比剂用量一直是人们关注的焦点。降低管电压可有效降低 CT 检查的辐

作者单位: 210002 南京,南京军区南京总医院/南京大学附属金陵医院医学影像科
作者简介: 祁丽(1988—),女,湖北随州人,硕士,住院医师,主要从事低辐射剂量低对比剂用量 CT 冠状动脉成像工作。
通讯作者: 张龙江, E-mail: kevinzhjlj@163.com

射剂量,因为辐射剂量与管电压的平方成正比^[1]。Jun 等^[2]研究表明当管电压从 120 kVp 降至 80 kVp 时,CTCA 的辐射剂量降低了 70%。在行 CTA 检查时降低管电压的同时还可以减少对比剂的用量。Nakaura 等^[3]结果表明 80 kVp 管电压可用于 CTCA,并且可在辐射剂量降低 74%、对比剂用量降低 50%的条件下获得与标准条件(120 kVp)相同的影像质量。以往研究所使用的最低管电压为 80 kVp^[3,4],目前 70 kVp 管电压已可在临床应用,已有研究证实 70 kVp 下肢 CTA 检查有较高的诊断准确性^[5]。但是 70 kVp 管电压 CTCA 的应用尚未见文献报道。本研究的目的是评价联合前瞻性心电门控、大螺距、迭代重建的 70 kVp 管电压、30 mL 对比剂 CTCA 的图像质量和辐射剂量。

材料与方法

1. 临床资料

选择 2013 年 11 月—2014 年 1 月在我院行 CTCA 检查、正常体型(BMI ≤ 25 kg/m²)的患者 80 例。男 42 例,女 38 例,年龄 36~81 岁,平均(58 $\pm$ 10)岁。随机分为两组,其中 40 例患者男 21 例,女 19 例,年龄 36~76 岁,平均(56 $\pm$ 9)岁行 100 kVp CTCA 检查,另 40 例患者男 21 例,女 19 例,年龄 43~81 岁,平均(60 $\pm$ 10)岁行 70 kVp CTCA 检查。所有患者行 CTCA 检查的适应证是已知罹患或排除冠状动脉狭窄性疾病或为了进行术前检查。心率 >70 次/分的患者检查前 1h 内口服 25~50 mg 倍他乐克,在心率降至 70 次/分以下后行 CTCA 检查。排除标准:①对碘对比剂过敏的患者;②有急性心功能衰竭、严重肾功能损害及心律失常的患者;③体重指数 >25 kg/m² 的患者;④口服倍他乐克后,心率不能降至 70 次/分以下的患者;⑤支架、搭桥术后或者心脏起搏器术后的患者。

2. 扫描方法

扫描设备为德国西门子生产的第二代双源 CT (Definition Flash, Siemens Healthcare, Forchheim, Germany)。密闭式静脉留置针(20-gauge i. v)埋于肘前静脉。患者仰卧于扫描床上,按照标准位置放置心电导联线,足先进,扫描范围均为气管分叉处至膈肌水平。100 kVp 组的管电压为 100 kVp,70 kVp 组管电压为 70 kVp。除了管电压外,其余扫描参数均一致。开启实时动态曝光剂量调节(CARE Dose 4D)管电流,使用前瞻性心电门控,螺距 3.4,球管旋转时间为 0.28 s,准直器宽度为 2 mm $\times$ 64 mm $\times$ 0.6 mm。采用团注示踪触发扫描,100 kVp 组以 4~5 mL/s 流率团注 60 mL 优维显(370 mg I/mL),随后以相同的流率注射生理盐水 40 mL;70 kVp 组以 4~5 mL/s 流率团注 30 mL 优维显(370 mg I/mL),随后亦以相同的流

率注射 40 mL 生理盐水。兴趣区设在主动脉根部,当 CT 值达 100 HU 后延迟 4 s 后触发扫描。

3. 图像重建

100 kVp 组数据采用滤波反投影重建算法(filtered back projection,FBP)进行图像重建,重建卷积核为 B26(Siemens);70 kVp 组数据采用基于原始数据域迭代重建算法(sinogram affirmed iterative reconstruction,SAFIRE)进行图像重建,卷积核为与 B26 相对应的 I26,FBP 及 SAFIRE 重建均采用 0.75 mm 的重建层厚及 0.6 mm 的重建间隔。SAFIRE 有 5 种不同水平的重建算法,本研究采用西门子公司推荐的第 3 级。

4. 图像评价

所有图像数据均传到工作站 MMWP 及 Syngovia (Siemens)进行客观和主观评价。为了进行客观图像质量评估,由 1 名放射科医师测量每名患者升主动脉根部(ascending aorta,AA)、右冠状动脉(right coronary artery,RCA)起始处、左冠状动脉主干(left main coronary artery,LMA)、左冠状动脉前降支(left anterior descending artery,LAD)起始处、左冠状动脉回旋支(left circumflex artery,LCX)起始处及纵膈脂肪的 CT 值及标准差,将主动脉根部的标准差作为图像噪声。测量时兴趣区的面积应该在避免钙化及软斑后尽可能大。最后,计算每支血管的信噪比(signal-to-noise ratio,SNR)和对比噪声比(contrast-to-noise ratio,CNR)。计算方法如下^[6-8]:

$$SNR = \frac{\text{管腔内的平均 CT 值}}{\text{图像噪声}}$$

$$CNR = \frac{\text{管腔内平均 CT 值} - \text{纵膈脂肪 CT 值}}{\text{噪声}}$$

为了进行主观图像质量评估,将冠状动脉按照美国心脏病学会制定的冠状动脉分段标准分为 15 段^[9],当有左冠状动脉中间支时,记为第 16 段。由两名有经验的放射科医师独立观察横断面图像及曲面重组图像对每段血管进行评分,图像评分采用 4 分法^[10]。1 分,血管壁显示不清,血管不连续,运动伪影大,血管对比不好,噪声大,不能用于诊断;2 分,有中度运动伪影、噪声,血管对比一般;3 分,轻度的运动伪影、噪声,血管对比好;4 分,无运动伪影,很小的噪声,血管对比很好。意见不一致时,共同商议确定最后评分。把每支冠状动脉所含有段中的最低分定义为该支冠状动脉的分数。

5. 辐射剂量

记录每例患者的剂量长度乘积(dose length product,DLP)、CT 容积剂量指数(volume computed tomography dose index,CTDIvol),并计算有效剂量(effective dose,ED)及体型特异性剂量估计(size-spe-

cific dose estimates, SSDE)^[11-13]。

6. 统计学处理

采用 SPSS 16.0 软件包分析数据, 计量资料数据以均数±标准差表示, 计数资料以频数或百分比表示。两组间年龄、心率、BMI、CT 值、SNR、CNR、DLP、CT-DIvol、SSDE 的比较用两样本 *t* 检验进行分析, 性别及冠状动脉主观评分用两独立样本非参数检验进行分析。观察者间的一致性采用 Kappa 分析(K 0.81~1.0 为一致性非常好, K 0.61~0.80 为一致性好, K 0.41~0.6 为一致性中度, K<0.4 为一致性差)。以 *P*<0.05 为差异有统计学意义。

结 果

1. 患者一般特征比较

100 kVp 组与 70 kVp 组间患者的性别(男性比例: 53% vs 53%, *P*=1.000)、年龄(56±9 岁 vs 60±10 岁, *P*=0.098)均无统计学差别。两组患者的平均心率[100 kVp 组 vs 70 kVp 组, (60.4±5.3)次/分 vs (61.5±5.9)次/分, *P*=0.368]、BMI[100 kVp 组 vs 70 kVp 组, (22.02±1.95) kg/m² vs (22.52±1.74) kg/m², *P*=0.234]亦无统计学差异。

2. 图像质量比较

70 kVp 组的平均冠状动脉 CT 值为(603±86) HU, 100 kVp 组的平均冠状动脉 CT 值为(503±68) HU(*P*<0.001), 前者平均 CT 值较后者增加了 20%。70 kVp 组图像噪声[(42±5) HU]明显高于 100 kVp 组的图像噪声[(25±4) HU]。70 kVp 组的 SNR 及 CNR(14.6±3.0, 17.8±3.4)均明显低于 100 kVp 组(20.7±3.8, 24.4±4.1, *P*<0.001, 表 1)。

表 1 两组客观图像质量的比较

位置	100 kVp 组	70 kVp 组	<i>P</i> 值
RCA			
CT	510±92	576±78	0.001
SNR	20.8±4.1	13.9±2.5	<0.001
CNR	24.5±4.3	17.1±2.9	<0.001
LM			
CT	498±79	624±102	<0.001
SNR	20.4±4.1	15.1±3.4	<0.001
CNR	24.1±4.4	18.3±3.8	<0.001
LAD			
CT	494±73	593±126	<0.001
SNR	20.3±4.2	14.4±3.8	<0.001
CNR	24.0±4.4	17.6±4.2	<0.001
LCX			
CT	512±76	618±110	<0.001
SNR	21.1±4.2	14.9±3.4	<0.001
CNR	24.8±4.5	18.1±3.8	<0.001
图像噪声	25±4	42±5	<0.001
平均			
CT	503±68	603±86	<0.001
SNR	20.7±3.8	14.6±3.0	<0.001
CNR	24.4±4.1	17.8±3.4	<0.001

主观图像质量: 80 例患者共 987 段血管纳入分析, 另外 213 段血管由于解剖变异或者管腔直径<1.5 mm而被排除。100 kVp 组及 70 kVp 组观察者的一致性的 kappa 值分别为 0.560 及 0.639(*P*<0.001)。70 kVp 组及 100 kVp 组各冠状动脉评分见表 2, 70 kVp 组与 100 kVp 组的主观图像质量亦无差别(图 1、2)。

表 2 两组冠状动脉主观图像质量评分比较

读者	100 kVp 组	70 kVp 组	<i>P</i> 值
RCA			
读者 1	2.9±0.9	3.2±0.7	0.099
读者 2	2.8±1.1	3.1±0.7	0.286
共同	2.9±1.1	3.2±0.7	0.416
LMA			
读者 1	3.8±0.4	3.9±0.3	0.155
读者 2	3.8±0.5	3.9±0.4	0.729
共同	3.8±0.5	3.9±0.3	0.509
LAD			
读者 1	3.1±0.5	3.2±0.6	0.754
读者 2	3.2±0.5	3.1±0.6	0.527
共同	3.2±0.5	3.2±0.6	0.923
LCX			
读者 1	2.9±0.8	2.8±0.7	0.449
读者 2	2.9±0.9	2.6±0.8	0.076
共同	2.9±0.7	2.7±0.8	0.102

3. 辐射剂量比较

70 kVp 组的 DLP、CTDIvol、ED 及 SSDE[(12.6±1.8) mGy·cm、(0.7±0.1) mGy、(0.2±0.01) mSv 及 (1.0±0.1) mSv]均明显低于 120 kVp 组[(51.4±9.8) mGy·cm、(2.8±0.5) mGy、(0.7±0.1) mSv 及 (4.1±0.7) mSv, *P*<0.01], 辐射剂量分别降低了 75%、75%、71%及 76%(表 3)。

表 3 两组辐射剂量的比较

参数	100 kVp 组	70 kVp 组	<i>P</i> 值
DLP	51.4±9.8	12.6±1.8	<0.001
CTDI	2.8±0.5	0.7±0.1	<0.001
ED	0.7±0.1	0.2±0.01	<0.001
SSDE	4.1±0.7	1.0±0.1	<0.001

注: CTDIvol=CT 容积剂量指数; DLP=剂量长度乘积; ED=有效剂量; SSDE=体型特异性剂量估计。

讨 论

本研究结果表明前瞻性心电门控、大螺距、70 kVp 管电压及 30 mL 对比剂 CTCA 的扫描序列在 BMI≤25 kg/m²、心率≤70 次/分的患者是可行的, 可以在大幅度降低辐射剂量及对比剂用量的情况下获得满足诊断的图像质量。

低管电压技术是降低 CTA 检查辐射剂量的最有效的方法之一, 联合前瞻性心电门控及大螺距技术可以更大程度地降低辐射剂量。Schuhbaeck 等^[4]联合前瞻性心电门控、大螺距及 80 kVp 管电压甚至将辐射

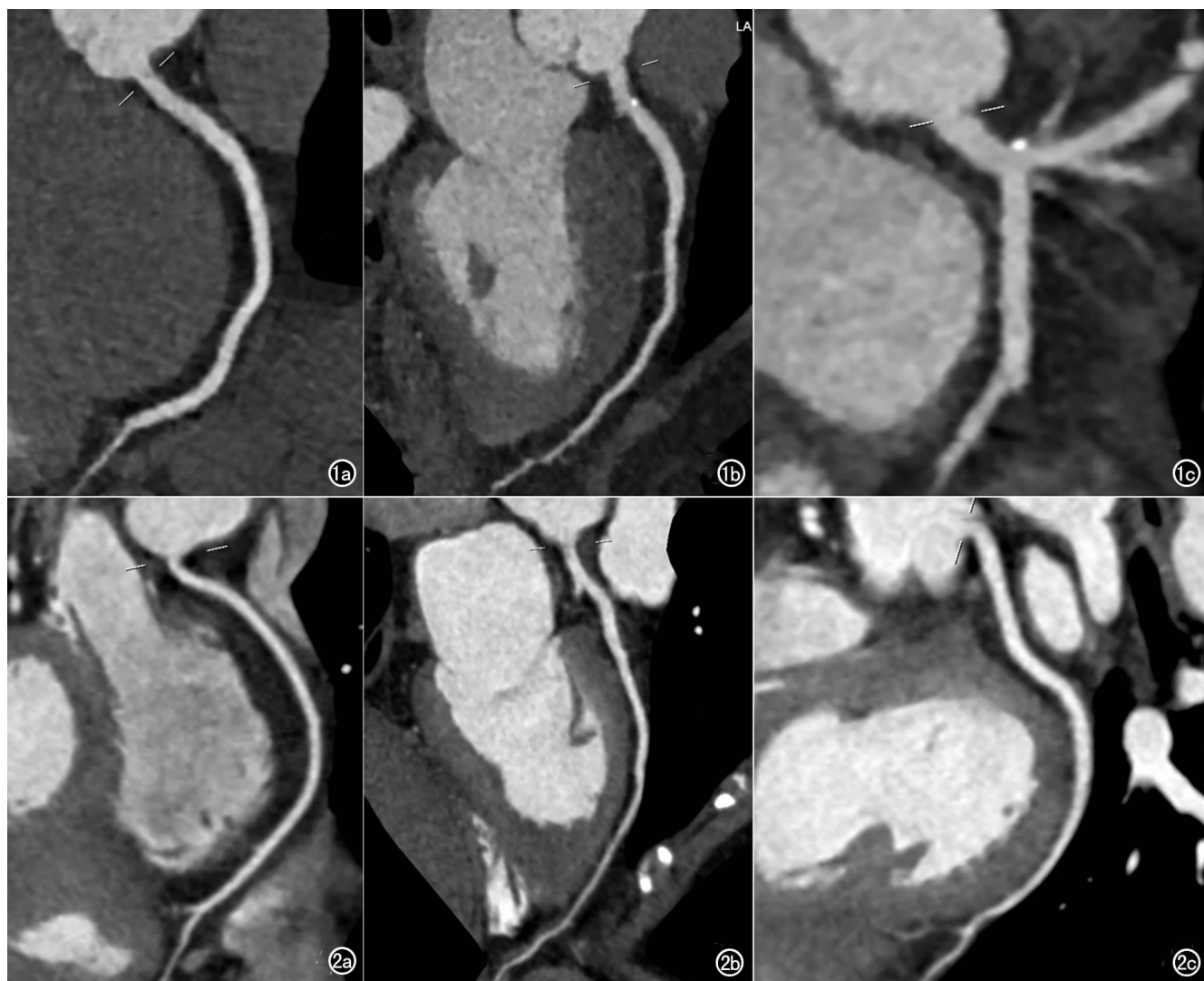


图1 70kVp组CTCA图像。a)右冠状动脉的曲面重组图像；b)左冠状动脉前降支的曲面重组图像，可见左冠状动脉主干分叉处混合型斑块；c)左冠状动脉回旋支的曲面重组图像。图2 100kVp组CTCA图像。a)右冠状动脉的曲面重组图像；b)左冠状动脉前降支的曲面重组图像；c)左冠状动脉回旋支的曲面重组图像。70kVp组的图像噪声高于100kVp组，但图像质量仍可获得满足诊断。

剂量降至0.06 mSv左右。本研究联合前瞻性心电门控、大螺距技术，使用70 kVp管电压将CTCA的有效剂量降至0.2 mSv，高于Schuhbaeck等的研究结果^[4]。这主要与本研究采用了自动管电流调节技术有关，与Schuhbaeck等使用的50 mAs固定管电流不同。Gnannt等^[14]研究了70 kVp管电压在CT颈部增强检查中的应用，其研究结果显示当管电压从120 kVp降至70 kVp时，使用自动管电流调节技术，辐射剂量仅降低了34%。

低管电压技术在CTA方面具有独特的优势，它不仅可以减少辐射剂量，还可以增大靶血管的CT值。Waaier等^[15]表明当管电压从120 kVp的降至90 kVp时，每毫克碘的CT值增加了43%。另外，大螺距扫描会缩短采集时间，即在冠状动脉血管内对比剂浓度达到峰值很短的时间内完成扫描，无需过多持续的

对比剂注射来维持血管内对比剂较高的浓度，增大螺距可以降低对比剂用量。本研究中尽管70 kVp组所用的对比剂仅为100 kVp组的一半，但是70 kVp组的平均CT值却比100 kVp组的平均CT值增加了20%。研究表明最适合CTCA诊断的平均CT值在250~350 HU左右^[16]，本研究70 kVp组的平均CT值高于600 HU，说明70 kVp组的对比剂用量可以进一步减少。

大螺距和低管电压技术的联合应用可以大幅度降低辐射剂量和对比剂用量，但同时也会产生较大图像噪声，这可能会影响图像诊断的准确性。为了克服这个问题，我们在70 kVp组中使用了SAFIRE迭代重建算法。SAFIRE可以反复估计在每个图像像素的局部噪声并将其从当前图像数据中移除^[17]。Han等^[18]研究表明低剂量心脏扫描时采用基于原始数据迭代重

建算法的图像噪声比使用滤波反投影重建算法的图像噪声减少 34%。本研究中尽管 70 kVp 组使用 SAFIRE 迭代重建技术降低图像噪声,70 kVp 组的图像噪声仍大于 100 kVp 组,这与本研究采用的更低的管电压有关,使用更低的管电压,图像的噪声会更大。此外,这可能也与本研究使用的第 3 种 SAFIRE 重建强度有关。SAFIRE 共有 5 种重建强度,第 3 种重建强度是厂家推荐的重建强度,已被用于 80 kVp 及 100 kVp 管电压中^[19,20],但是适合 70 kVp 管电压的重建强度尚未可知。由于更低的管电压(70 kVp)产生的更大的图像噪声,可能需要加大 SAFIRE 的重建强度进一步降低图像噪声。虽然 70 kVp 组有更高的 CT 值,但由于其更大的图像噪声,70 kVp 组的 SNR 和 CNR 均明显低于 100 kVp 组。据我们所知,目前尚没有文献确切地说明 SNR 及 CNR 可满足诊断的最低值,并且我们的客观图像质量评估表明两组间的客观图像质量是无统计学差别的。

总之,本研究表明在 BMI ≤ 25 kg/m²、心率 ≤ 70 次/分的患者的中采用前瞻性心电门控、大螺距、70 kVp 管电压及 30 mL 对比剂 CT 冠状动脉成像是可行的,可以在大幅度地降低辐射剂量及对比剂用量的条件下获得满足诊断的图像质量。

参考文献:

- [1] Tack D, Gevenois PA. Radiation dose from adult and pediatric multidetector computed tomography [M]. Berlin, Germany: Springer, 2007; 276.
- [2] Jun BR, Yong HS, Kang EY, et al. 64-slice coronary computed tomography angiography using low tube voltage of 80kV in subjects with normal body mass indices: comparative study using 120kV[J]. Acta Radiol, 2012, 53(10): 1099-1106.
- [3] Nakaura T, Kidoh M, Sakaino N, et al. Low contrast- and low radiation dose protocol for cardiac CT of thin adults at 256-row CT: usefulness of low tube voltage scans and the hybrid iterative reconstruction algorithm[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2013, 29(4): 913-923.
- [4] Schuhbaeck A, Achenbach S, Layritz C, et al. Image quality of ultra-low radiation exposure coronary CT angiography with an effective dose < 0.1 mSv using high-pitch spiral acquisition and raw data-based iterative reconstruction[J]. Eur Radiol, 2013, 23(3): 597-606.
- [5] Duan Y, Wang X, Yang X, et al. Diagnostic efficiency of low-dose CT angiography compared with conventional angiography in peripheral arterial occlusions[J]. AJR, 2013, 201(6): W906-W914.
- [6] Wang R, Schoepf UJ, Wu R, et al. Image quality and radiation dose of low dose coronary CT angiography in obese patients: sinogram affirmed iterative reconstruction versus filtered back projection [J]. Eur J Radiol, 2012, 81(11): 3141-3145.
- [7] Leschka S, Stolzmann P, Schmid FT, et al. Low kilovoltage cardiac dual-source CT: attenuation, noise, and radiation dose[J]. Eur Radiol, 2008, 18(9): 1809-1817.
- [8] Tatsugami F, Matsuki M, Nakai G, et al. The effect of adaptive iterative dose reduction on image quality in 320-detector row CT coronary angiography[J]. Br J Radiol, 2011, 85(1016): 378-382.
- [9] Austen WG, Edwards JE, Frye RL, et al. A reporting system on patients evaluated for coronary artery disease: report of the ad hoc committee for grading of coronary artery disease, council on cardiovascular surgery, American Heart Association[J]. Circulation, 1975, 51(4 Suppl): 5-40.
- [10] Brodoefel H, Reimann A, Burgstahler C, et al. Noninvasive coronary angiography using 64-slice spiral computed tomography in an unselected patient collective: effect of heart rate, heart rate variability and coronary calcifications on image quality and diagnostic accuracy[J]. Eur J Radiol, 2008, 66(1): 134-141.
- [11] Stolzmann P, Scheffel H, Schertler T, et al. Radiation dose estimates in dual-source computed tomography coronary angiography [J]. Eur Radiol, 2008, 18(3): 592-529.
- [12] Size-specific dose estimates (SSDE) in pediatric and adult body CT examinations: report of AAPM Task Group 204, retrieved from http://www.aapm.org/pubs/reports/rpt_204.pdf on September 9, 2013.
- [13] Christner JA, Braun NN, Jacobsen MC, et al. Size-specific dose estimates for adult patients at CT of the torso[J]. Radiology, 2012, 265(3): 841-847.
- [14] Gnannt R, Winklehner A, Goetti R, et al. Low kilovoltage CT of the neck with 70kVp: comparison with a standard protocol[J]. AJNR, 2012, 33(6): 1014-1019.
- [15] Waaijer A, Prokop M, Velthuis BK, et al. Circle of Willis at CT angiography: dose reduction and image quality—reducing tube voltage and increasing tube current settings[J]. Radiology, 2007, 242(3): 832-839.
- [16] Marwan M, Mettin C, Pflederer T, et al. Very low-dose coronary artery calcium scanning with high-pitch spiral acquisition mode: comparison between 120kV and 100kV tube voltage protocols [J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2013, 7(1): 32-38.
- [17] Willeminck MJ, de Jong PA, Leiner T, et al. Iterative reconstruction techniques for computed tomography Part 1: technical principles[J]. Eur Radiol, 2013, 23(6): 1623-1631.
- [18] Han BK, Grant KLR, Garberich R, et al. Assessment of an iterative reconstruction algorithm (SAFIRE) on image quality in pediatric cardiac CT datasets[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2012, 6(3): 200-204.
- [19] Halliburton SS, Abbata S, Chen MY, et al. SCCT guidelines on radiation dose and dose-optimization strategies in cardiovascular CT[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2011, 5(4): 198-224.
- [20] Yang WJ, Chen KM, Liu B, et al. Contrast media volume optimization in high-pitch dual-source CT coronary angiography: feasibility study[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2013, 29(1): 245-252.

(收稿日期: 2014-05-01)