

• 双低剂量 CT 成像专题 •

80 kVp 条件下碘克沙醇(270 mg I/mL)应用于冠状动脉 CTA 检查的可行性研究

蒋孟茜, 王鹤, 王霄英, 邹明宇, 衣闯, 胡刚, 王蕊, 赵承琳, 姜健, 张保翠, 罗健, 高福生

【摘要】 目的:探讨在 80 kVp 条件下应用碘克沙醇(270 mg I/mL)行冠状动脉 CTA 检查的可行性,并评估自适应统计迭代重建(ASiR)的应用价值。**方法:**招募 47 例受试者行冠状动脉 CTA 检查。采用前瞻性心电触发扫描模式行冠状动脉 CTA 扫描,管电压 80 kVp,管电流 600 mA。对比剂为碘克沙醇(270 mg I/mL),总量 60 mL。对原始图像的重建采用滤波反投影(FBP)、30%~40%、60%、80%及 100%ASiR 算法。记录所有患者接受的辐射剂量。由 2 名心血管系统影像诊断医师分别对冠脉 4 段主要分支、5 组重建图像的诊断信息(冠脉边缘锐利度、斑块与冠脉管腔对比度、图像主观噪声、诊断信心)按 5 分法进行主观评定,并行统计学分析。将冠脉分为 16 个节段,测量其 CT 值及图像背景噪声,并计算图像对比噪声比(CNR)及信噪比(SNR),并进行统计学分析。**结果:**共 37 例受试者入组。分析 4 个血管节段,冠脉图像质量均可达到临床诊断要求,60%及 80%ASiR 组的诊断信心高于其它各组,且 60%ASiR 组冠脉边缘锐利度优于 80% ASiR 组,并在其它细节评估方面不低于其它各组。共分析 16 个血管节段,冠脉各节段 CT 值均>250 HU。随 ASiR 比例的增加,噪声值逐渐下降,CNR、SNR 逐渐增高,且各组间差异均有统计学意义。**结论:**在 80 kVp 条件下应用碘克沙醇 270 mg I/mL 行冠状动脉 CTA 检查,获得的图像可满足临床需求,推荐使用 60%ASiR 重建。

【关键词】 冠状动脉; 体层摄影术,X 线计算机; 对比剂; 迭代重建; 辐射剂量; 体型特异性剂量估计

【中图分类号】 R814.42; R816.2 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2014)03-0249-05

Coronary CT angiography with 80kVp and iodixanol (270mg I/mL) using iterative reconstruction; a feasibility study JIANG Meng-xi, WANG He, WANG Xiao-ying, et al. Department of Radiology, Peking University First Hospital, Beijing 100034, P. R. China

【Abstract】 Objective: To evaluate the image quality of 80kVp coronary CT angiography (CCTA) with 80kVp and contrast of iodixanol (270mg I/mL) using iterative reconstruction. **Methods:** Forty-seven patients with body mass index (BMI) 20~25kg/m² were prospectively collected, and underwent prospective ECG-gated CCTA (80kVp, 600mA, iodixanol 270mg I/mL, total volume 60mL). The raw data were reconstructed with filtered back projection (FBP) and 30%~40%, 60%, 80%, 100% adaptive statistical iterative reconstruction (ASiR), respectively. For subjective assessment, both the overall image impression and details of vessel demonstration for each segment were assessed by 2 experienced radiologists. For objective assessment, CT values were measured by segment and the image quality (noise, CNR and SNR) was estimated. **Results:** Thirty-seven cases were enrolled. The image quality of CCTA met clinical diagnostic needs, both as whole and as segment. Among the CCTA images with different reconstruction algorithm, images with 60% and 80% ASiR were considered to provide higher diagnostic confidence than others. Comparing with images of 80% ASiR, the sharpness of coronary vessel on images of 60% ASiR was better. CNR and SNR were higher in ASiR groups than in FBP group, meanwhile, noise was reduced significantly. **Conclusion:** To the patients whose BMI 20~25kg/m², CCTA with 80kVp using iodixanol (270mg I/mL) is feasible for clinical application, and image reconstruction with 60%ASiR is recommended.

【Key words】 Coronary artery; Tomography, X-ray computed; Contrast medium; Iterative reconstruction; Radiation dose; Size-specific dose estimate

冠状动脉 CTA 做为冠状动脉常规检查方法,已广泛应用于临床,但存在 X 线辐射和对比剂肾损害的风险。近年来,基于合理使用低剂量(as low as reasonably acceptable, ALARA)^[1] 的原则,在满足影像诊断要求的前提下,如何降低 CT 辐射剂量已成为研

究热点^[2-4]。同时,减少注射到体内的对比剂总碘量可降低对比剂肾病(contrast-induced nephropathy, CIN)的风险^[5]。与传统的滤波反投影(filter backprojection, FBP)算法相比,自适应统计迭代重建(adaptive statistical iterative reconstruction, ASiR)算法可有效降低噪声,改善低剂量 CT 图像噪声增加的问题,也可同时降低碘对比剂的用量^[6]。本研究旨在探讨在满足临床诊断需求的前提下,80 kVp 条件下碘克沙醇(270 mg I/mL)应用于冠状动脉 CTA 检查的可行性。

作者单位: 100034 北京,北京大学第一医院影像科(蒋孟茜、王鹤、王霄英、王蕊、赵承琳、姜健、张保翠、罗健、高福生); 110016 沈阳,沈阳军区总医院(邹明宇); 130021 长春,吉林省人民医院(衣闯); 100700 北京,北京军区总医院(胡刚)

作者简介: 蒋孟茜(1989-),女,北京人,博士研究生,主要从事影像诊断新技术研究。

通讯作者: 王霄英, E-mail: cjr. wangxiaoying@vip. 163. com

材料与方法

1. 临床资料

本研究为前瞻性、多中心研究,由北京大学第一医院、沈阳军区总医院、吉林省人民医院及北京军区总医院共同参与。获得北京大学第一医院伦理委员会批准,所有受试者均签署知情同意书。

入组标准:①临床疑诊冠心病而行 CCTA 检查的患者;②身体质量指数(body mass index, BMI) $20 \sim 25 \text{ kg/m}^2$;③年龄 $18 \sim 80$ 岁。

排除标准:①孕妇或哺乳期妇女;②严重器官衰竭;③碘对比剂过敏;④中度以上肾功能不全($\text{eGFR} < 60 \text{ mL/min/1.73 m}^2$);⑤甲亢,或其它使用碘对比剂禁忌证;⑥具有不太可能完成本试验所需程序的伴随疾病的患者。

2. CT 检查方案

向患者说明使用对比剂可能出现的不良反应,患者签署知情同意书。监测患者心率,如患者心率 > 65 次/分,于检查前 $0.5 \sim 1.0 \text{ h}$ 口服倍他乐克 $25 \sim 50 \text{ mg}$,所有患者均接受屏气训练,且于检查前 5 min 舌下含服硝酸甘油 0.25 mg 以扩张冠状动脉。

采用 GE Discovery CT750 HD 扫描仪,采用前瞻性心电触发扫描模式,管电压 80 kVp ,管电流 600 mA 。常规钙化积分扫描后,使用双筒高压注射器以 5 mL/s 流率经肘正中静脉注射碘克沙醇(270 mg I/mL) 60 mL ,对比剂注射完毕后,以 5 mL/s 流率追加注射 30 mL 生理盐水。采用对比剂智能跟踪触发技术,兴趣区(region of interest, ROI)设定于升主动脉根部,触发阈值为 100 HU ,延时 5 s 扫描。

3. CT 射线剂量记录和评估

记录设备上显示的 CT 剂量指数(CT dose index, CTDIvol)及剂量长度乘积(dose length product, DLP),根据公式①及公式②分别计算每位患者的体型特异性剂量估计(size-specific dose estimate, SSDE)^[7]值及有效剂量(effective dose, ED)。

$$\text{SSDE} = f_{\text{size}}^{32X} \times \text{CTDIvol} \quad (1)$$

f_{size}^{32X} 为转换系数,测量扫描范围内胸廓前后径的最大值(AP)及相应水平胸廓左右径(LAT),计算两者之和,查询相应的线性关系表,找到对应转换系数。

$$\text{ED} = \text{DLP} \times \text{转换因子} \quad (2)$$

转换因子采用心血管计算机体层摄影学会 CT 质量标准指南提出的胸部平均值,即 $0.014 \text{ mSv}/(\text{mGy} \cdot \text{cm})$ ^[8]。

4. 图像处理

行 75% R-R 间期 FBP 及 $30\% \sim 40\%$ 、 60% 、 80% 、 100% ASiR 重建,每个病例得到 5 组图像进行评估(分别为 A、B、C、D、E 组)。

5. 图像评估

由两位心血管系统影像诊断医师对图像进行评分,当两位医师对图像的分析结果有不同意见时,由另一位高年资心血管影像诊断专家进行判断,并得出最终结论。

将冠脉分为左主干(left main coronary artery, LM)、左前降支(left anterior descending branch, LAD)、左回旋支(left circumflex branch, LCX)及右冠状动脉(right coronary artery, RCA)分别进行主观评分。应用 5 分法评价冠状动脉 CTA 检查的图像质量,评价标准为:5 分,血管显示非常好,无噪声或伪影;4 分,血管显示较好,有极轻微的噪声或伪影;3 分,血管显示尚可,有轻度噪声和/或伪影;2 分,血管显示欠清,有中度噪声和/或伪影;1 分,血管显示不清,有重度噪声和/或伪影。图像总体主观评分 ≥ 3 分符合诊断要求, < 2 分不符合诊断要求。

对 5 组图像的诊断信息(冠脉边缘锐利度、斑块与冠脉血管对比度、图像主观噪声、诊断信心)按照 5 分法进行评分,评价标准为:5 分:冠脉边缘清晰锐利,斑块与正常冠脉血管对比度极佳,几乎无图像噪声,诊断信心充足;4 分:冠脉边缘较锐利,斑块与正常冠脉血管对比度较好,图像噪声极轻微,诊断信心较大;3 分:冠脉边缘尚锐利,斑块与正常冠脉血管对比度尚可,图像噪声较小,诊断信心尚可;2 分:冠脉边缘较模糊,斑块与正常冠脉血管对比度较差,图像噪声较大,诊断信心有限;1 分:冠脉边缘模糊,斑块与正常冠脉血管对比度很差,图像噪声很大,诊断信心不足。图像细节主观评分 ≥ 3 分符合诊断要求, < 2 分不符合诊断要求。

冠状动脉管腔 CT 值测量:采用美国心脏病协会(American Heart Association, AHA)的冠脉分段方法,将冠状动脉分为 15 个节段,包括 LM, LAD 近、中、远段,第一对角支(1st diagonal branch, D1),第二对角支(2nd diagonal branches, D2), LCX 近、远段,钝缘支(obtuse marginal branch, OM),左室后侧支(posterolateral branch, PL),后降支(左冠优势型及均衡型)(left posterior descending artery, l-PDA), RCA 近、中、远段,及后降支(右冠优势型)(right posterior descending artery, r-PDA)。分别对主动脉根部及冠状动脉各段的 CT 值进行测量。于每段冠脉走行的中间部分及其前、后分别测量三次,取平均值,选择的 ROI 面积超过血管管腔面积的一半,同时避开钙化斑块及软斑块,不测量内径 $< 2 \text{ mm}$ 的冠脉。

噪声测量及 CNR、SNR 计算:测量 LM 发出水平的主动脉根部 CT 值的平均值及标准差,分别作为主动脉信号值($\text{CT}_{\text{主动脉}}$)及图像噪声值($\text{CT}_{\text{噪声}}$),ROI 面积为 100 mm^2 左右。测量 LM 发出水平脂肪的 CT 值

作为对比信号值 (CT_{脂肪}), 选择的 ROI 面积为 20 mm², 按公式③及公式④计算对比噪声比 (contrast-to-noise ratio, CNR) 及信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR)。

$$\text{CNR} = \frac{\text{CT}_{\text{主动脉}} - \text{CT}_{\text{脂肪}}}{\text{CT}_{\text{噪声}}} \quad (3)$$

$$\text{SNR} = \frac{\text{CT}_{\text{主动脉}}}{\text{CT}_{\text{噪声}}} \quad (4)$$

6. 统计学分析

采用 SPSS 20.0 软件进行统计学分析。患者的年龄和 BMI 以均值±标准差表示,冠脉各段的 CT 值及辐射剂量亦以均值±标准差表示。5 组重建图像(FBP、30%~40%、60%、80%及 100%ASiR)主观评分的比较采用非参数检验(Friedman 检验),图像噪声、CNR 及 SNR 的比较采用重复测量数据方差分析。

结 果

1. 受试者入组情况

2013年4月—8月共招募受试者47名,受试者均签署知情同意书。其中因触发延迟导致冠脉CT值过低而无法评价出组2例,因数据缺失出组7例,因扫描时心率突然加快出组1例。最后共37例受试者入组。其中男性19例,女性18例。患者年龄38~77岁,平均 (55.4 ± 11.4) 岁。BMI $20.8 \sim 24.9 \text{ kg/m}^2$,平均 $(23.2 \pm 1.3) \text{ kg/m}^2$ 。

2. CT 射线剂量报告

平均 CTDIvol 为 (6.63 ± 2.44) mGy, DLP 为 (85.48 ± 58.02) mGy · cm。SSDE 为 (8.72 ± 3.37) mGy, ED 为 (1.20 ± 0.81) mSv。

3. 图像评估结果

图像总体主观评分:37 例受试者中,每例得到 5 组重建图像,每组图像分为 4 个节段评价,共计 740 个评分数值,其中 5 分 298 个,4 分 330 个,3 分 112 个,无 3 分以下的节段,故所有图像质量均满足临床要求。

图像细节主观评分:FBP、30%~40%及60%ASiR组的图像冠脉边缘清晰、锐利,3组间差异无统计学意义;5组图像的斑块与冠脉管腔对比度大部分均极佳,各组间差异无统计学意义;60%、80%及100%ASiR组的图像主观噪声评分较高,分别与FBP

及 30%~40% ASiR 组间差异有统计学意义,但 3 组之间差异无统计学意义;60%及 80% ASiR 组的诊断信心明显优于其它组,两组间差异无统计学意义,且分别与其它 3 组间差异有统计学意义(表 1,2)。客观评估:冠脉各段平均 CT 值均大于 250HU,具体结果见表 3。

表 1 5 组图像细节主观评估结果 (例)

图像细节评分	A 组	B 组	C 组	D 组	E 组
冠脉边缘锐利度					
1 分	0	0	0	0	0
2 分	0	0	0	0	0
3 分	0	0	0	9	20
4 分	1	1	4	29	16
5 分	36	36	33	8	1
斑块与冠脉管腔对比度					
1 分	0	0	0	0	0
2 分	0	0	0	0	0
3 分	0	0	0	0	0
4 分	1	1	1	1	1
5 分	36	36	36	36	36
图像主观噪声					
1 分	0	0	0	0	0
2 分	0	0	0	0	0
3 分	19	8	7	7	7
4 分	18	26	15	13	13
5 分	0	3	15	17	17
诊断信心					
1 分	0	0	0	0	0
2 分	0	0	0	0	0
3 分	12	8	7	7	14
4 分	23	20	8	11	22
5 分	2	9	22	19	1

表 3 冠脉各节段平均 CT 值(HU)

血管节段	测量节 段数	最小 CT 值	最大 CT 值	平均 CT 值
主动脉	37	442	855	603.22±95.56
RCA 近段	36	384	801	567.17±109.82
RCA 中段	35	251	794	470.86±127.37
RCA 远段	31	254	777	520.06±129.56
r-PDA	22	280	798	454.41±122.58
LM	34	411	825	566.06±93.79
LAD 近段	36	399	772	543.28±91.00
LAD 中段	36	306	762	500.36±109.94
LAD 远段	37	258	714	450.27±96.97
D1	35	241	662	419.66±96.27
D2	24	270	807	395.71±108.03
LCX 近段	36	395	820	545.39±100.99
LCX 远段	35	267	755	438.57±113.93
OM	32	258	701	429.78±114.57
PL	17	308	564	425.06±78.10
l-PDA	8	327	718	443.38±121.92

表 2 5 组图像细节、噪声、SNR 及 CNR 两两比较的 P 值[illegible]

各组的噪声、CNR 及 SNR 差异均有统计学意义 ($P<0.001$)。随 ASiR 百分比的增加,噪声值逐渐下降,CNR、SNR 逐渐增高(表 2,4)。

讨 论

冠状动脉 CTA 以其无创性的优势,已成为冠心病的常用检查方法。在保证冠脉 CTA 图像质量的前提下,如何合理降低射线剂量及对比剂风险已受到广泛关注。越来越多的研究秉承 ALARA 原则,尽可能优化扫描方案、降低辐射剂量。有文献表明,非离子型碘剂可引起肾管形细胞的凋亡和坏死,因此,对比剂用量应尽量减少^[5,11]。本研究的 CT 扫描方法中,针对降低辐射剂量,使用了如下参数的组合:①前瞻性心电触发扫描模式;②80 kVp 管电压;③迭代重建。针对降低对比剂风险,使用了低浓度(270 mg I/mL)。

前瞻性心电触发扫描模式是较为常用的低剂量技术,较回顾性心电门控扫描模式剂量降低 63%~83%^[12-13]。本研究中,在保证患者心率得到良好控制的情况下,使用前瞻性心电触发扫描模式,与其他参数

调整比较,此项选择对降低辐射剂量效果最明显。Leschka 等^[9]采用 100 kVp 进行冠脉 CTA 检查,受试者 BMI 18.5~25 kg/m²,结果表明,图像质量无显著降低,不影响影像诊断,且将剂量从 8.9 mSv 减少到 4.4 mSv。本院王蕊等^[10]采用 80 kVp 及 300 mg I/mL 对比剂行冠状动脉 CTA 检查,BMI 20~25 kg/m²,结果显示可获得较高的图像质量,能够满足临床诊断需要,同时大幅度减低患者所受辐射剂量。本研究的结果也表明,对于 BMI 20~25 kg/m² 患者人群,80kVp 管电压成像是可行的。

本研究在采用低管电压的同时,也采用低浓度对比剂以减低肾脏损伤,联合前瞻性心电触发扫描模式更是大大降低了患者所接受的辐射剂量。由于低浓度对比剂含碘量少,会导致冠脉 CT 值降低,但当管电压由常规的 120 kVp 降为 80 kVp 时,碘的 CT 值增加,而软组织 CT 值随管电压降低变化不大,因此低管电压成像更能增加 CT 血管造影时碘对比剂充盈的血管结构与周围软组织结构的对比,为减少含碘对比剂的用量提供了理论依据。Schoepf^[14]认为,冠状动脉增

表 4 五组图像噪声、SNR 及 CNR 测量结果

参数	A 组	B 组	C 组	D 组	E 组
噪声	59.87±11.27	47.76±9.38	40.56±8.51	34.92±7.86	29.88±7.43
SNR	10.40±2.44	13.03±2.98	15.49±3.32	17.90±3.94	21.06±4.88
CNR	12.33±2.98	15.47±3.68	18.39±4.12	21.25±4.92	25.02±6.10

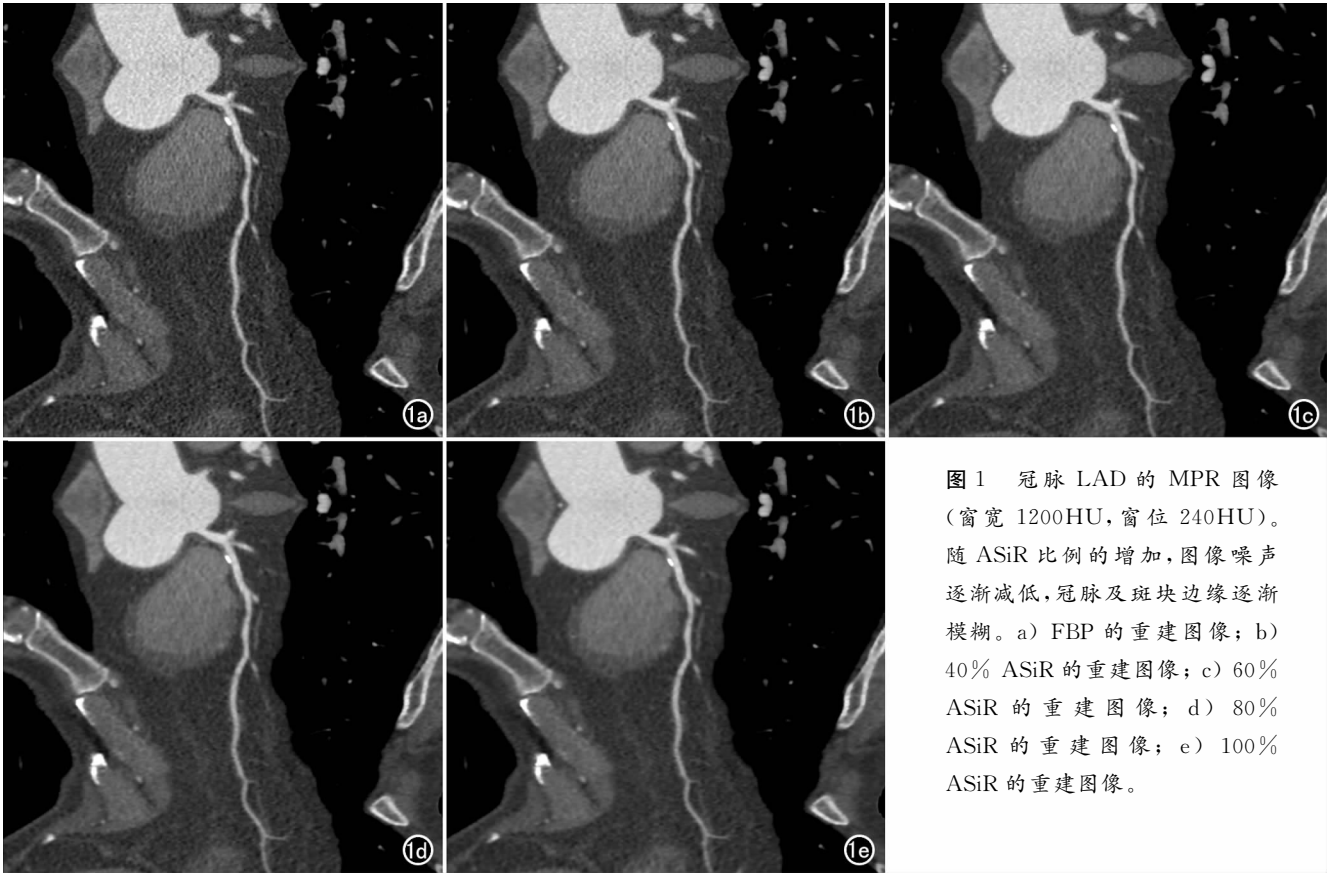


图 1 冠脉 LAD 的 MPR 图像(窗宽 1200HU,窗位 240HU)。随 ASiR 比例的增加,图像噪声逐渐减低,冠脉及斑块边缘逐渐模糊。a) FBP 的重建图像; b) 40% ASiR 的重建图像; c) 60% ASiR 的重建图像; d) 80% ASiR 的重建图像; e) 100% ASiR 的重建图像。

强后 CT 值大于 250 HU 即可达到诊断要求^[14]。本研究中 80 kVp 组的冠状动脉各主支的 CT 值均 >250 HU,且主观整体评分均在 3 分以上,故图像满足临床诊断要求。

但 80 kVp 扫描同时带来了图像噪声增高的问题。许多研究表明,将迭代重建算法与低电压扫描相结合,可在降低患者所接受的射线剂量的同时,提高图像对比噪声比、降低对比剂剂量^[15]。FBP 重建算法速度较快,但忽略了焦点、体素和探测器的实际几何大小,且未考虑 X 线光子的系统光学与统计学波动,具有较高的噪声、明显的条纹状伪影和较差的低对比检测性。而迭代重建算法考虑到焦点、体素和探测器的因素,重建出的图像,噪声和条纹状伪影显著减少^[16]。与 FBP 相比,使用 ASiR 技术可在辐射剂量降低的情况下,改善冠状动脉 CTA 的图像质量,使之达到临床诊断要求^[17]。本研究亦表明,随 ASiR 比例的增加,噪声水平逐渐降低,CNR、SNR 呈递增趋势。但研究中同时发现,虽然 80% ASiR 图像的客观评分优于 60% ASiR 图像,但两者主观噪声并无显著差异。80% 及 100% ASiR 图像的客观评分虽高,但血管边缘锐利度的细节主观评分较低,这可能与 ASiR 技术是基于单一模型的迭代重建技术,与真实的噪声原理并不完全一致有关,过度迭代可导致图像出现“蜡像样伪影”,读片者对图像的感受欠佳^[18]。

本研究有一定的局限性:首先,心脏搭桥术后的患者、冠状动脉支架术后患者未纳入研究,本组扫描方案能否在此类患者中应用,需要进一步研究;其次,本研究入组的受试者冠状动脉钙化评分较低,本组扫描方案对于严重钙化患者的成像质量尚待进一步评估;最后,未评价本组扫描方案下 CCTA 对冠状动脉病变诊断的准确性,将来应以 DSA 为金标准,进一步评价低剂量 CCTA 的诊断效能。

综上所述,在 80 kVp 条件下,对于 BMI 20 ~ 25 kg/m² 的患者,应用碘克沙醇(270 mg I/mL)行冠状动脉 CTA 检查获得的图像可满足临床需求,较常规扫描方案减少辐射剂量与对比剂浓度。在此种情况下,推荐使用 60% ASiR 进行图像重建。

参考文献:

- [1] Frush DP, Applegate K. Computed tomography and radiation: understanding the issues[J]. J Am Coll Radiol, 2004, 1(2): 113-119.
- [2] Neefjes LA, Dharampal AS, Rossi A, et al. Image quality and radiation exposure using different low-dose scan protocols in dual-

- source CT coronary angiography: randomized study[J]. Radiology, 2011, 261(3): 779-786.
- [3] Ketelsen D, Buchgeister M, Korn A, et al. High-pitch computed tomography coronary angiography—a new dose-saving algorithm: estimation of radiation exposure[J]. Radiol Res Pract, 2012, 2012(): 724129.
- [4] 赵凯, 姜原, 郭小超, 等. 100kVp 冠状动脉 CTA 检查的可行性研究[J]. 放射学实践, 2013, 28(5): 496-500.
- [5] Zhao Y, Tao Z, Xu Z, et al. Toxic effects of a high dose of non-ionic iodinated contrast media on renal glomerular and aortic endothelial cells in aged rats in vivo[J]. Toxicol Lett, 2011, 202(3): 253-260.
- [6] Singh S, Kalra MK, Gilman MD, et al. Adaptive statistical iterative reconstruction technique for radiation dose reduction in chest CT: a pilot study[J]. Radiology, 2011, 259(2): 565-573.
- [7] 张晓东, 郭小超, 王霄英, 等. 体型特异性剂量估计的概念和方法[J]. 放射学实践, 2013, 28(3): 312-314.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 王蕊, 张保翠, 王霄英, 等. 80kVp、低浓度对比剂冠状动脉 CTA 检查的初步研究[J]. 放射学实践, 2013, 28(5): 501-504.
- [11] Romano G, Briguori C, Quintavalle C, et al. Contrast agents and renal cell apoptosis[J]. Eur Heart J, 2008, 29(20): 2569-2576.
- [12] Earls JP, Berman EL, Urban BA, et al. Prospectively gated transverse coronary CT angiography versus retrospectively gated helical technique: improved image quality and reduced radiation dose[J]. Radiology, 2008, 246(3): 742-753.
- [13] 吕秀玲, 王爱军, 李炯. 双源 CT 低剂量冠状动脉 CTA 成像的扫描参数、图像质量及辐射剂量的探讨[J]. 中国医疗设备, 2011, 26(7): 146-148.
- [14] Schoepf UJ. CT of the heart: principles and applications[M]. New York: Humana Press, 2005: 377-380.
- [15] 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, 2012, 85(1016): 378-382.
- [16] 黄伟, 张艳, 徐益明. 迭代重建技术在临床低剂量 CT 扫描中的应用进展[J]. 中国介入影像与治疗学, 2012, 9(5): 392-395.
- [17] Leipsic J, Labounty TM, Heilbron B, et al. Estimated radiation dose reduction using adaptive statistical iterative reconstruction in coronary CT angiography: the ERASIR study[J]. AJR, 2010, 195(3): 655-660.
- [18] 胡娟, 王鹤, 王霄英, 等. 迭代算法在 100kVp 分次团注双期 CTU 检查中的应用研究[J]. 放射学实践, 2013, 28(5): 509-513.

(收稿日期: 2014-01-08)