

· 心血管影像学 ·

超高速宽体探测器 CT 单心动周期冠状动脉成像:快速与慢速心率的对比

刘军波, 张晓浩, 管延芳, 周伟, 范丽娟

【摘要】 目的:探讨在快速心率(≥ 100 次/分)患者中超高速宽体探测器 CT 单心动周期冠状动脉成像质量和最佳期相。**方法:**回顾性分析临床疑似冠状动脉病变而行单心动周期冠状动脉宽体探测器 CT 扫描的 300 例患者的病例资料,其中快速心率组(≥ 100 次/分)150 例,对照组(≤ 65 次/分)150 例。测量两组 MSCT 图像上主动脉根部、LAD 和 RCA 中段的 CT 值,计算前降支中段的信噪比(SNR)和对比噪声比(CNR),分析冠状动脉可诊断率和图像质量优等率,计算两组扫描的有效辐射剂量(ED),比较两组间各项测量指标间的差异。**结果:**快速心率组最佳期相为($49.1\% \pm 6.7\%$)R-R 间期,对照组为($72.1\% \pm 11.8\%$)R-R 间期。两组图像质量客观指标(主动脉根部 CT 值、LAD 和 RCA 中段 CT 值、前降支中段的 SNR 和 CNR)间的差异均无统计学意义($P > 0.05$)。两组图像上 LAD、LCX 和 RCA 可诊断率的差异均无统计学意义($P > 0.05$);但图像优等率的差异均有统计学意义($P < 0.05$),快速心率组均低于对照组(72.6% vs. 83.2% , 60.1% vs. 84.5% , 74.6% vs. 90.6%)。两组间扫描中辐射剂量的差异有统计学意义($P < 0.05$),快速心率组低于对照组。**结论:**超高速宽体探测器 CT 单心动周期冠状动脉成像可作为快速心率患者的常规检查方法,但成像质量的优等率低于慢心率的患者。

【关键词】 体层摄影术, X 线计算机; 冠状动脉; 血管成像; 心率; 辐射剂量; 运动伪影

【中图分类号】 R814.42; R543.3 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2019)12-1322-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2019.12.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Coronary CT angiography in single cardiac cycle using ultra-high-speed and wide detector CT: a comparative study of high and low heart rate LIU Jun-bo, ZHANG Xiao-hao, FAN Li-juan, et al. Department of Radiology, Tianjin Economic-Technological Development Area (TEDA) International Cardiovascular Hospital, Tianjin 300457, China

【Abstract】 Objective: To investigate the imaging quality and optimal phase of coronary CT angiography (CCTA) in single heart cycle with high heart rate (heart rate ≥ 100 bpm) using ultra-high-speed and wide detector CT. **Methods:** 300 cases with suspected coronary artery disease were included retrospectively, including 150 cases as high heart rate group (≥ 100 bpm) and 150 cases as control group (≤ 65 bpm). All the subjects underwent CCTA examination within single cardiac cycle using ultra-high-speed and wide detector CT. Parameters including CT values of the aorta root and middle segment of left anterior descending artery (LAD) and right coronary artery (RCA), the signal to noise ratio (SNR) and the contrast noise ratio (CNR) of the images, the diagnostic rate and the excellent rate of coronary artery on CT images, and effective dose (ED) were measured and calculated, and the differences of such indexes between the two groups were compared. **Results:** The optimal phase of the high heart rate group was at the end of the systolic period ($49.1\% \pm 6.7\%$ R-R interval), and the optimal phase of the control group was in the middle and late systolic period ($72.1\% \pm 11.8\%$ R-R interval). There were no significant differences (all $P > 0.05$) between the two groups in objective indexes of image quality (CT values of aortic root, middle segment of LAD and RCA, SNR and CNR). There was no significant difference in the diagnostic rate of LAD, LCX and RCA (all $P > 0.05$). The excellent rates of LAD, LCX and RCA images in the high heart rate group and the control group were sta-

作者单位: 300457 天津, 泰达国际心血管病医院放射科

作者简介: 刘军波(1979-), 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 副主任技师, 主要从事心脏大血管 CT 成像技术和研究工作。

通讯作者: 范丽娟, E-mail: lijuanfan111@sina.com

基金项目: 天津市滨海新区卫生局科技项目(2013BWKZ008)

tistically different (all $P < 0.05$), and the high heart rate group was lower than that of the control group (72.6% vs. 83.2%, 60.1% vs. 84.5%, 74.6% vs. 90.6%). The radiation dose of the high heart rate group and the control group was statistically significant ($P < 0.05$), and the high heart rate group was lower than that of the control group. **Conclusion:** Single cardiac cycle scan of high heart rate with high heart rate using ultra-high-speed and wide detector CT can be used as a routine examination of coronary artery disease, but the rate of excellent image quality in patients with high heart rate is lower than that of the subjects with lower heart rate.

【Key words】 Tomography, X-ray computed; Coronary artery; Angiography; Heart rate; Radiation dose; Motion artifact

冠状动脉 CT 血管成像 (coronary computed tomography angiography, CCTA) 因其方便、无创已经成为冠状动脉病变筛查和诊断的重要手段^[1]。但是在快速心率 (心率 ≥ 100 次/分) 患者的 CCTA 图像质量一直受到广泛关注。快速心率会导致冠状动脉运动伪影而影响 CCTA 图像质量^[2-3], 所以在 CCTA 检查前很多医疗机构常规采用让患者服用降心率药物 (如 β 受体阻滞剂等) 的方法来控制心率 (降至 65 次/分或以下), 但服用降心率药物可能发生潜在的副作用, 如心脏传导阻滞、心动过缓、低血压和加重哮喘等^[4-5], 而且部分患者对降心率药物无法耐受。随着软硬件技术的不断发展, 宽体探测器 CT 机的时间分辨率已提高至 0.28 ms, 为单心动周期 CCTA 应用于快速心率患者提供了条件。本文通过对快速心率宽体探测器单心动周期 CCTA 的图像质量和辐射剂量进行分析, 旨在进一步提高冠心病患者的诊断水平。

材料与方法

1. 一般资料

本研究为回顾性, 选取 2016 年 10 月—2017 年 4 月临床疑似冠状动脉病变而行 CCTA 检查的 339 例患者的临床和影像资料。剔除标准: 心律不齐; 体质指数 (body mass index, BMI) $> 28 \text{ kg/m}^2$; 有心脏起搏器植入术、冠脉旁路移植术、瓣膜置换术或支架植入术病史; 冠状动脉弥漫性钙化; 严重肾或心功能不全; 有碘对比剂或硝酸甘油禁忌证; 排除冠状动脉开口变异以及中度以上狭窄者。按照剔除标准将 3 例冠脉旁路移植术后、7 例心律不齐、27 例 BMI $> 28 \text{ kg/m}^2$ 和 2 例冠状动脉开口变异者剔除, 其余 300 例患者纳入分析。根据患者在检查中的心率将其分为两组: 快速心率组 (心率 ≥ 100 次/分) 150 例, 其中男 72 例、女 78 例, 平均年龄 (55.0 ± 8.5) 岁, BMI $(24.0 \pm 2.5) \text{ kg/m}^2$; 对照组 (≤ 65 次/分) 150 例, 其中男 80 例, 女 70 例, 平均年龄 (58.0 ± 7.7) 岁, BMI 平均值 $(25.0 \pm 2.8) \text{ kg/m}^2$ 。

本研究已通过本院医学伦理委员会的批准, 所有受检者签署了 CT 检查知情同意书。

2. 检查方法

使用 GE Revolution 256 排宽体探测器 CT 扫描仪。本研究中采用前瞻性心电触发单心动周期横轴面扫描模式, 扫描参数: 智能 kV (100~120 kV) 和自动 mA (400~740 mA) 技术, 层厚 0.625 mm, 准直器宽度 16 cm, 矩阵 512×512 , 视野 $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$, 迭代算法为 50% ASIR-V, 使用设备的 auto-gating 功能, 根据预扫描心率自动设定扫描期相: 快速心率组扫描期相为 35%~55% R-R 间期, 对照组为 65%~85% R-R 间期。对比剂使用碘海醇 (350 mg/mL), 在保温箱加热至 37.5°C , 使用德国欧利奇双筒高压注射器经静脉注入, 剂量 0.75 mL/kg , 注射流速为 5 mL/s (体重 $< 80 \text{ kg}$) 或 6 mL/s (体重 $\geq 80 \text{ kg}$), 对比剂注射完毕后注射 20 mL 生理盐水。使用对比剂智能跟踪技术, 在主肺动脉分叉水平的升主动脉中心勾画约 1 cm^2 的圆形感兴趣区, 触发阈值为 60 HU, 延迟 10 s 启动扫描, 扫描时嘱患者屏气。

3. 图像后处理

扫描完成后设备自动计算并重建最佳期相, 若最佳期相不理想则手动设置间隔 5% R-R 间期进行多期相重建, 从中选择最佳期相。最佳期相数据传送至 GE AW4.6 进行后处理, 采用冠状动脉追踪冻结技术 (snapshot freeze, SSF) 进行图像重建, 再使用心脏后处理软件进行图像重组, 包括容积再现 (volume rendering, VR) 和曲面重组 (curve planar reformation, CPR)。

4. 图像分析

客观评价: 测量主动脉根部、左前降支 (left anterior descending artery, LAD) 和右冠状动脉 (right coronary artery, RCA) 中段的 CT 值, 测量心内膜下脂肪的 CT 值和噪声, 感兴趣区面积 $1 \sim 2 \text{ mm}^2$, 每个指标测量 3 次取平均值。计算对比噪声比 (contrast noise ratio, CNR) 和信噪比 (signal noise ratio, SNR):

$$\text{CNR} = \frac{\text{前降支中段的 CT 值} - \text{脂肪 CT 值}}{\text{脂肪噪声}} \quad (1)$$

$$\text{SNR} = \frac{\text{前降支中段的 CT 值}}{\text{脂肪噪声}} \quad (2)$$

主观评价:由两位有经验的主治医师对两组图像上冠状动脉的成像质量进行评价。采用 4 级评分法,对 LAD 和左回旋支(left circumflex artery,LCX)和 RCA 的成像质量进行评估。4 分(优等):冠状动脉显示好,血管壁边缘清晰,无伪影;3 分(良好):冠状动脉显示一般,血管壁边缘轻度模糊,有轻度伪影;2 分:冠状动脉连续,有中度伪影,影响诊断;1 分,冠状动脉显示不连续,有重度伪影,无法诊断(图 1)^[6]。如两位医师评分不一致,协商后得出一致结果。其中 4 分和 3 分为图像质量能够满足诊断要求,2 分和 1 分为不能满足诊断要求。

4. 有效辐射剂量

记录受检者 CCTA 检查中的剂量长度乘积(dose length product,DLP),根据公式(1)计算有效辐射剂量(effective dose,ED)^[7]: $ED=k\times DLP$ 。其中,k 值取 0.014 mSv/mGy·cm。

5. 统计分析

统计学处理使用 SPSS 23.0 软件包,呈正态分布的计量资料以均数±标准差的形式表示,并采用方差分析进行统计学分析,计数和等级资料采用非参数检验进行统计描述,计数资料的分布采用卡方检验进行

统计描述。 $P<0.05$ 认为差异有统计学意义。

结 果

1. 基本临床资料

两组患者的基本临床资料见表 1。两组患者的性别、年龄、身高、体重以及 BMI 的差异均无统计学意义($P>0.05$)。

表 1 两组患者临床资料的比较

指标	快速心率组	对照组	统计量	P 值
性别(男/女)	72/78	80/70	0.853 ^a	0.356
心率(次/min)	108.79±7.24 (100~135)	59.9±4.85 (51~75)	—	—
年龄(岁)	55±8.5	58±7.7	2.314 ^b	0.216
身高(cm)	168.1±8.2	167.2±6.4	-3.150 ^b	0.786
体重(kg)	65.8±7.2	66.5±6.5	-0.061 ^c	0.894
BMI(kg/m ²)	24.3±2.5	25.2±2.8	0.220 ^c	0.835

注:^a为 χ^2 值;^b为 Z 值;^c为 t 值。

2. 图像质量

快速心率组和对照组图像质量客观指标的比较结果见表 2。两组间主动脉根部、LAD 和 RCA 中段的 CT 值、前降支中段的 SNR 及 CNR 的差异均无统计学意义($P>0.05$)。

两组图像质量主观评价结果见表 3。两组均无评

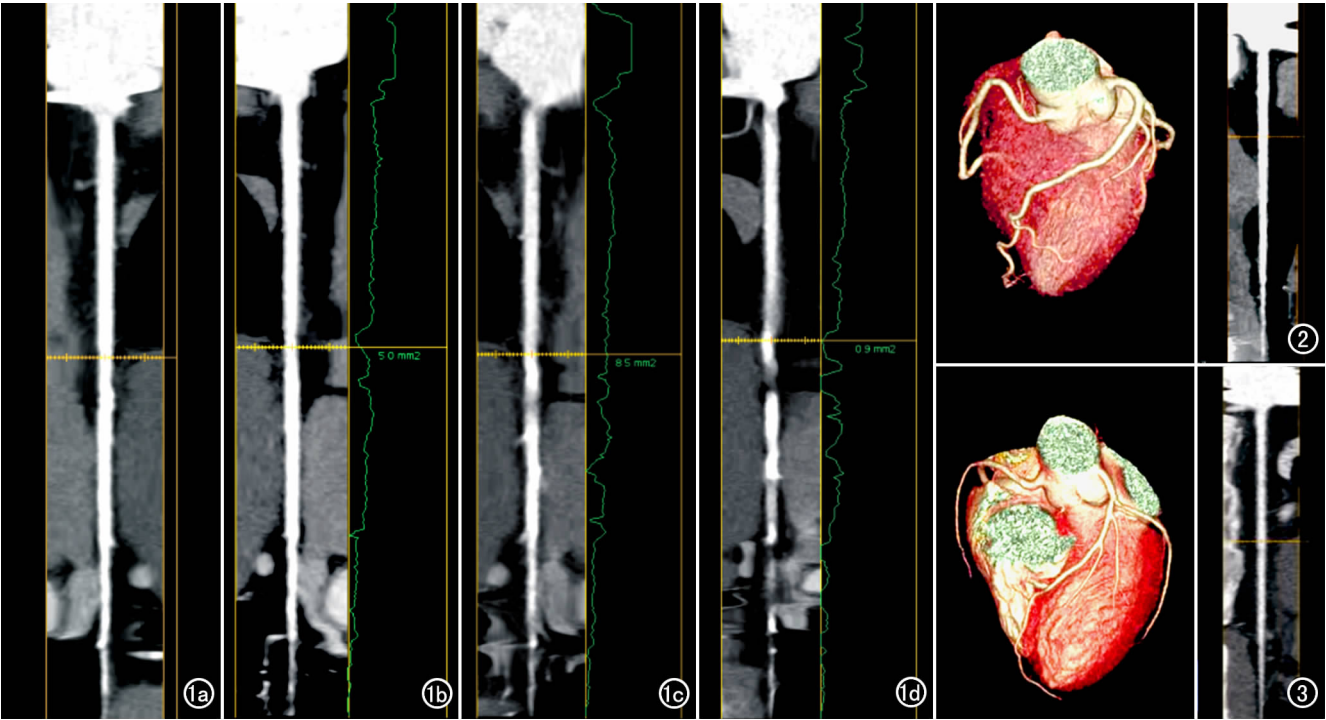


图 1 左冠状动脉前降支曲面重组图像,显示图像质量评分标准。a)冠状动脉显示好,血管壁边缘清晰,无伪影,图像质量评分为 4 分;b)左冠状动脉前降支曲面重组图像,冠状动脉显示一般,血管壁边缘轻度模糊,轻度伪影,图像质量评分为 3 分;c)左冠状动脉前降支曲面重组图像,冠状动脉连续,有中度伪影,影响诊断,图像质量评分为 2 分;d)左冠状动脉前降支曲面重组图像,冠状动脉显示不连续,重度伪影,无法诊断,图像质量评分为 1 分。图 2 心率为 121 次/分患者的 CCTA 图像,LAD、LCX 和 RCA 显示清晰,图像质量为 4 分。a)VR;b)CPR 图像。图 3 心率为 62 次/分患者的 CCTA 图像,LAD、LCX 和 RCA 显示清晰,图像质量为 4 分。a)VR;b)CPR 图像。

分为 1 分的图像,两组中 3 支冠脉(LAD、LCX 和 RCA)图像质量评分为 2 分者均较少,组间比较差异均无统计学意义($P>0.05$);3 支冠脉评分为 3 分和 4 分者在两组中均较多,但以对照组中占比更高,两组间比较差异均有统计学意义($P=0.036$ 、 0.000 和 0.000 ; $P=0.014$ 、 0.000 和 0.000)。两组中大部分患者的 LAD、LCX 和 RCA 成像质量均能满足诊断要求(图 2~3),可诊断率在两组间的差异均无统计学意义($P>0.05$);但是 3 支血管图像质量为优秀者的比例均以对照组要高,两组间优秀率的差异均有统计学意义($P=0.014$ 、 0.000 和 0.000)。

表 2 快速心率组和对照组图像质量客观指标对比

指标	快速心率组	对照组	统计量	P 值
主动脉根部 CT 值(HU)	436±60	428±71	-0.782	0.460
LAD 中段 CT 值(HU)	387±75	401±60	0.241	0.815
RCA 中段 CT 值(HU)	401±70	411±65	0.163	0.892
前降支中段 SNR	24.2±3.5	24.6±4.1	-0.387	0.701
前降支中段 CNR	16.5±4.8	16.2±3.4	0.641	0.675

3. 最佳扫描期相

快速心率组最佳期相为 38%~54% R-R 间期,平均(46.3%±3.9%)R-R 间期;对照组最佳期相为 69%~82% R-R 间期,平均(75.0%±2.1%)R-R 间期(图 4)。

4. 辐射剂量

快速心率组 CCTA 检查的有效辐射剂量为 0.71~4.49 mSv,平均(1.81±1.18) mSv;对照组为 0.66~5.29 mSv,平均(2.45±1.21) mSv,对照组高于快速心率组,两组间差异有统计学意义($t=0.140$, $P=0.000$)。

讨 论

GE Revolution 256 排 CT 机的宽探测器单心动周期轴扫模式提高了心脏成像的时间分辨率,使得 CCTA 扫描能在一个心动周期内完成(图 5),缩短了曝光时间,降低了辐射剂量^[8]。宽探测器以及轴扫方

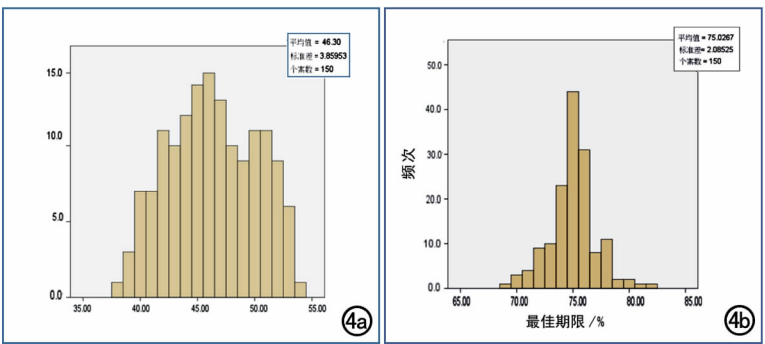


图 4 最佳期相分布直方图。a)快速心率组;b)对照组。

式消除了常规 CT 螺旋扫描图像 Z 轴方向的阶梯状错层伪影,扫描速度加快,容积时间分辨率提高,尤其是结合 SSF 对运动伪影的校准,使冠状动脉成像质量更佳。上述原因使得冠状动脉 CT 扫描不再受心率的限制,为快速心率(心率≥100 次/分)患者的冠状动脉 CT 成像奠定了基础。

对于不同心率患者的冠状动脉 CT 扫描,选择合适的扫描和重建时相直接关系到冠状动脉 CT 图像质量和辐射剂量。宽体探测器 CT 的 SmartPhase 软件是心脏扫描的一种新的图像重建方式,SmartPhase 将自动计算出所获取扫描数据中运动伪影最小的相位,与 SSF 技术结合使用,可提供更佳的图像质量。例如,心率在 60 次/分左右时,在 75%期相左右 LAD、LCX 和 RCA(即心室舒张中晚期)相对静止,成像质量最佳;随着心率的增加,心动周期缩短,尤其以舒张期缩短为主,当心率>75 次/分时,冠脉成像的最佳期相则为心室收缩末期^[9-10]。本研究中直方图分析(图 2)显示快速心率组最佳期相为(46.3%±3.9%)R-R 间期(即心室收缩末期),而对照组最佳期相为(75.0%±2.1%)R-R 间期(即心室舒张末期),与国外学者的研究结果一致^[9-10]。

本研究结果显示,快速心率组和对照组中 LAD、LCX 和 RCA 可诊断率的差异无统计学意义($P>0.05$),尤其是两组中 RCA 的可诊断率均为 100%,笔

表 3 两组图像质量评分和可诊断率及优良率对比 (例)

分值	快速心率组			对照组			统计量			P 值		
	LAD	LCX	RCA	LAD	LCX	RCA	LAD	LCX	RCA	LAD	LCX	RCA
1 分	0	0	0	0	0	0	—	—	—	—	—	—
2 分	4 (2.67%)	2 (1.33%)	0 (0.00%)	1 (0.67%)	1 (0.67%)	0 (0.00%)	1.831	0.337	—	0.176	0.562	—
3 分	40 (26.67%)	59 (39.33%)	38 (25.33%)	25 (16.67%)	23 (15.33%)	14 (9.33%)	4.419	21.750	13.4	0.036	0.000	0.000
4 分	106 (70.67%)	89 (59.33%)	112 (74.67%)	124 (82.67%)	126 (84.00%)	136 (90.67%)	6.037	22.473	13.4	0.014	0.000	0.000
可诊断例数	146 (97.3%)	148 (98.3%)	150 (100%)	149 (99.3%)	149 (99.3%)	150 (100%)	1.831	0.337	—	0.176	0.562	—
优秀率	106/150 (70.7%)	89/150 (59.3%)	112/150 (74.7%)	124/150 (82.7%)	126/150 (84.0%)	136/150 (90.7%)	6.037	22.473	13.40	0.014	0.000	0.000

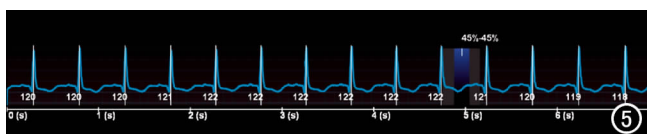


图5 单心动周期成像图例。

者认为良好的图像质量与使用了 SSF 技术密不可分。高心率成像时会导致冠脉运动伪影增加,SSF 技术通过选取与目标期相相邻的前后各 80ms 期相的图像信息来校准血管运动,包括血管的运动路径、方向和速度,以确定目标期相血管真实的位置,并对目标期相的冠脉运动进行相应的补偿,通过缩短有效时间窗来改善图像质量,抑制血管运动伪影^[11]。有研究表明 SSF 能够很大程度上改善血管的运动伪影,尤其是右冠状动脉。在本研究中 RCA 的可诊断率在快速心率组和对照组完全一致,明显优于 LAD 和 LCX。这从一定程度上说明 SSF 对右冠状动脉运动伪影校准的优势性^[12]。但在对比剂充盈不佳或者严重钙化的情况下,SSF 校准的效果并不满意,需手动绘制冠状动脉的血管中心来进行校准。

虽然本研究中快速心率组和对照组 LAD、LCX 和 RCA 的可诊断率差异无统计学意义,但是优等率的差异均有统计学意义($P=0.014, 0.000$ 和 0.000)。本研究结果表明,快速心率组 CCTA 图像质量能够满足诊断要求,CCTA 可作为冠状动脉疾病的常规检查方法,但也表明快速心率组冠状动脉成像的优等率低于对照组,尤其以 LCX(59.3% vs. 80.4%)最为显著。

冠状动脉 CT 成像已经成为筛查冠心病的常规检查方法,但其辐射剂量一直受到关注。虽然本研究中两组患者图像采集的期相范围都是 20%(分别为 35%~55% 和 65%~85% R-R 间期),但是高心率组的 R-R 间期时间宽度小于对照组,导致高心率组实际的曝光时间窗的宽度低于低心率组,因此快速心率组有效辐射剂量相对较低。与文献报道基本一致^[13-15]。

本研究存在的不足之处:为了控制辐射剂量,快速心率组和对照组的扫描期相是根据经验值而分别设置为 35%~55% 和 65%~85% R-R 间期,但是每例患者的最佳期相是否在此范围之内尚有待探究,需要扩大扫描期相范围进行进一步研究。

256 排宽体探测器超高速 CT 可作为快速心率患者冠状动脉成像的常规检查方法,能够满足不控制心率情况下的影像诊断要求。但是,快速心率组 CCTA 图像质量的优等率低于对照组,所以在条件允许的情况下通过控制心率可获得更佳的 CCTA 质量。

参考文献:

[1] Miller JM, Rochitte CE, Dewey M, et al. Diagnostic performance of coronary angiography by 64-row CT[J]. N Engl J Med, 2008, 359(22):2324-2336.

[2] Zhang LJ, Qi L, de Cecco CN, et al. High-pitch coronary CT angiography at 70kVp with low contrast medium volume; comparison of 80 and 100kVp high-pitch protocols[J/OL]. Medicine (Baltimore), 2014, 93(22):e92.

[3] Wintersperger BJ, Nikolaou K, von Ziegler F, et al. Image quality, motion artifacts, and reconstruction timing of 64-slice coronary computed tomography angiography with 0.33s rotation speed[J]. Invest Radiol, 2006, 41(5):436-442.

[4] de Graaf FR, Schuijff JD, van Velzen JE, et al. Evaluation of contraindications and efficacy of oral Beta blockade before computed tomographic coronary angiography[J]. Am J Cardiol, 2010, 105(6):767-772.

[5] Mc Parland P, Nicol ED, Harden SP. Cardiac drugs used in cross-sectional cardiac imaging: what the radiologist needs to know[J]. Clin Radiol, 2010, 65(9):677-684.

[6] Apfaltrier P, Schoendube H, Schoepf UJ, et al. Enhanced temporal resolution at cardiac CT with a novel CT image reconstruction algorithm: initial patient experience[J]. Eur J Radiol, 2013, 82(2):270-274.

[7] Geleijns J, Golding S, Menzel HG, et al. A workshop on quality criteria for computed tomography held in Aarhus[J]. Eur Radiol, 2000, 10(3):544-545.

[8] 梁俊福, 王辉, 徐磊, 等. 256 层 CT 单个心动周期冠状动脉成像在高心率患者中应用的可行性研究[J]. 中华放射学杂志, 2017, 51(2):108-113.

[9] Tigges S, Arepalli CD, Tridandapani S, et al. A phantom study of the effect of heart rate, coronary artery displacement and vessel trajectory on coronary artery calcifications core: potential for risk misclassification[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2012, 6(4):260-267.

[10] Horii Y, Yoshimura N, Hori Y, et al. Relationship between heart rate and optimal reconstruction phase in dual-source CT coronary angiography[J]. Acad Radiol, 2011, 18(6):726-730.

[11] Fuchs TA, Stehli J, Dougoud S, et al. Impact of a new motion-correction algorithm on image quality of low-dose coronary CT angiography in patients with insufficient heart rate control[J]. Acad Radiol, 2014, 21(3):312-317.

[12] Achenbach S, Giesler T, Ropers D, et al. Comparison of image quality in contrast-enhanced coronary-artery visualization by electron beam tomography and retrospectively electrocardiogram-gated multislice spiral computed tomography[J]. Invest Radiol, 2003, 38(2):119-128.

[13] Mayurasakorn S, Dirapiasith T, Wasinrat J. Influence of heart rate on image quality to identify the best cardiac phase in 16-slice coronary CT angiography[J]. J Med Assoc Thai, 2008, 91(7):1076-1081.

[14] Weustink AC, Mollet NR, Pugliese F, et al. Optimal electrocardiographic pulsing windows and heart rate: effect on image quality and radiation exposure at dual-source coronary CT angiography[J]. Radiology, 2008, 248(3):792-798.

[15] Feng R, Mao J, Liu X, et al. High-pitch coronary computed tomographic angiography using the third-generation dual-source computed tomography: initial experience in patients with high heart rate[J]. J Comput Assist Tomogr, 2018, 42(2):248-255.