

优化采集时间窗对冠状动脉 CT 血管成像图像质量及辐射剂量的影响

刘卓, 王征, 洪楠, 张卓璐

【摘要】 目的: 确定冠状动脉 CT 血管成像(CCTA)最佳重建期相, 优化采集时间窗。评价优化采集时间窗对图像质量及辐射剂量的影响。**方法:** 400 例受检者(A 组)行全心动周期(0~100% RR 间期)采集时间窗冠状动脉 CT 血管成像, 确定最佳重建期相。优化采集时间窗设置为最佳重建期相的 95% 置信区间, 即平均值±标准差×2。比较优化采集时间窗扫描模式(B 组, 400 例)与全期相扫描模式(A 组)的心率、信噪比、图像质量主观评分及辐射剂量, 并进行统计学分析。**结果:** 心率<61 bpm 者纳入低心率组(A1、B1); 心率介于 61~75 bpm 者纳入中心率组(A2、B2); 心率>75 bpm 者纳入高心率组(A3、B3)。A1 组最佳重建期相(76±3)%RR 间期(95% 置信区间 70%~82%)。A2 组最佳重建期相(44±3)%及(76±3)% RR 间期(95% 置信区间: 38%~50%及 70%~82%)。A3 组最佳重建期相(48±5)%RR 间期(95% 置信区间 38%~58%)。A、B 两组的心率[A 组为(70.54±13.06) bpm, B 组为(70.38±13.05) bpm]、图像质量主观评分[A 组为(1.52±0.65)分, B 组为(1.51±0.63)分]、信噪比(A 组为 15.76±3.70, B 组 15.66±4.59)差异均无统计学意义(P 值均>0.05)。A1 组[(36.73±14.39) mGy]与 B1 组[(7.13±2.53) mGy]、A2 组[(27.57±11.69) mGy]与 B2 组[(12.13±3.39) mGy]、A3 组[(25.55±10.33) mGy]与 B3 组[(7.74±3.13) mGy]之间的容积 CT 剂量指数(CTDIvol)差异均有统计学意义(P 值均<0.05)。对于低、中、高心率受检者, 优化采集时间窗扫描模式与全心动周期扫描模式相比, 辐射剂量分别降低了 81%、56%、70%。**结论:** 慢心率者冠脉最佳成像时间位于舒张中末期, 高心率者位于收缩末期; 中心率者位于收缩末期或舒张中末期。优化采集时间窗, 可以在保证图像质量的前提下缩短曝光时间从而降低辐射剂量。

【关键词】 心率; 冠状血管; 冠状动脉 CT 血管成像; 体层摄影, X 线计算机; 辐射剂量

【中图分类号】 R543.3; R814.42 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2019)09-0984-05

DOI: 10.13609/j.cnki.1000-0313.2019.09.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimized CT window acquisition time on image quality and radiation dose in coronary computed tomography angiography LIU Zhou, WANG Zheng, HONG Nan, et al. Department of Radiology, People's Hospital, Peking University, Beijing 100044, China

【Abstract】 Objective: To determine the best reconstruction phase of coronary CT angiography (CCTA) and optimize window acquisition time (WAT). To evaluate the effect of optimized WAT on image quality and radiation dose. **Methods:** Four hundred patients (group A) underwent coronary CT angiography during the whole cardiac cycle (0~100% RR interval) were included to determine the best phase of reconstruction. The optimized WAT was set as the 95% confidence interval of the best reconstruction phase, i. e., mean±standard deviation×2. The heart rate, signal-to-noise ratio, subjective score of image quality and radiation dose of the optimized WAT scanning mode (group B, 400 cases) and the whole-phase scanning mode (group A) were compared and statistically analyzed. **Results:** The optimized WAT were at the 76±3% of the R-R intervals for low HR (<61bpm, group A1), 48±5% for high HR (>75bpm, group A3) and 44±3% or 76±3%, for intermediate HR (61~75bpm, group A2), respectively. There were no significantly difference between two methods (P >0.05) HR (70.54±13.06 bpm in group A vs. 70.38±13.05 bpm in group B), SNR (16.55±4.65 in group A

作者单位: 100044 北京, 北京大学人民医院放射科

作者简介: 刘卓(1983-), 男, 陕西人, 硕士, 工程师, 主要从事 CT 影像技术工作。

通讯作者: 洪楠, E-mail: hongnanmyy@sina.cn

vs. 15.61 ± 3.79 in group B) and image quality (1.52 ± 0.65 in group A vs. 1.51 ± 0.63 in group B). Radiation dose were reduced by 81% for low HR, 70% for high HR, and 56% for intermediate HR patients in comparison with acquisitions using the entire R-R interval. **Conclusion:** For low HR, The optimized WAT was at the duration of mid-end diastole; for high HR, at the end of a systole; and for intermediate HR at both duration of mid-end diastole and end systole. With optimized WAT, radiation exposure to patients can be significantly reduced with preservation of image quality.

【Key words】 Heart rate; Coronary vessel; Coronary computed tomography angiography; Tomography, X-ray computed; Radiation dose

随着 CT 技术的发展, 冠状动脉 CT 血管成像 (coronary computed tomography angiography, CCTA) 已成为诊断冠状动脉疾病 (coronary artery disease, CAD) 的重要影像学检查方法^[1]; 然而, CCTA 图像中的伪影特别是冠脉运动伪影成为影响图像质量的重要原因。提高成像时间分辨率是抑制运动伪影的首要途径, 但由于硬件条件的制约, 时间分辨率的提高受到限制。在时间分辨率一定的条件下, 选择最佳采集时间窗即在冠脉运动最缓慢的时刻采集数据成为抑制运动伪影的有效方法。另一方面, 在最佳采集时间窗以外的时间减少曝光剂量甚至不曝光可以大幅降低受检者所接受的辐射剂量^[2-4]。因此, 确定冠脉最佳成像期随心率分布的规律成为优化采集时间窗、抑制冠脉运动伪影、降低辐射剂量的关键^[5-7]。本研究旨在探讨 CCTA 的最佳重建期相, 优化采集时间窗, 比较优化采集时间窗扫描模式与全心动周期全剂量扫描模式的图像质量及辐射剂量。

材料与方法

1. 病例资料

搜集以心功能分析为检查目的而行全心动周期曝光模式的 CCTA 检查者 400 例 (A 组), 确定最佳重建期相。以最佳重建期相的 95% 置信区间作为优化的采集时间窗, 即最佳重建期相平均值 \pm 标准差 $\times 2$ 。400 例受检者 (B 组) 应用优化的采集时间窗完成 CCTA 检查。

2. 检查方法

CT 检查采用 256 排探测器 CT (Revolution CT, GE Healthcare), 扫描范围包括气管分叉至心底。探测器 Z 轴扫描范围可选择 12、14 或 16 cm, 全部数据可在一个心动周期内采集完成。扫描参数: 球管旋转速度为 0.28 s/r, 重建层厚、层间隔均为 0.625 mm, 管电压、管电流由自动曝光控制系统决定, 管电压选择 100 kV 或 120 kV, 管电流范围为 200~740 mA。噪声指数 (noise index, NI) 选择 25 HU。

A、B 两组均采用以下对比剂注射方案: 以 5 mL/s 的流率经肘正中静脉注射非离子型碘对比剂碘普罗胺

(370 mg I/mL) 50 mL。对比剂注射完成后以相同流率追加注射 30 mL 生理盐水。采用对比剂智能触发技术, 感兴趣区 (region of interest, ROI) 位于气管分叉层面的降主动脉, ROI 内 CT 值增加超过 80HU 后 6s 启动扫描。A 组采集时间窗为 0~100% RR 间期, 即全心动周期全剂量曝光模式; 根据 A 组最佳重建期相的统计结果优化曝光时间窗, 应用于 B 组。

3. 最佳重建期相的确定方法

最佳 (冠脉运动伪影最小) 重建期相的确定包括两个步骤: 第一步, 以 5% 的间隔重建 0%~95% 心动周期的 20 套图像, 并以主观评价的方法从中挑选出最佳的一套; 第二步, 以第一步选出的最佳期相为中心, 以 1% 的间隔重建其前后的各 4 个期相图像 (共 8 套图像)。从这 8 套图像及第一步选出的一套图像共计 9 套图像中挑选出一套最佳图像, 以此套图像对应的期相作为该病例冠脉成像的最佳重建期相。

4. 图像质量评价

图像质量主观评价: 按照美国心脏协会 15 段分段标准, 评价直径超过 2 mm 的冠脉节段。图像由两位具备 5 年以上诊断经验的放射医师采用盲法进行评价。阅片者对图像质量进行独立评分, 采用 4 分制进行评价: 1 分, 图像质量优, 冠脉无伪影; 2 分, 图像质量良, 冠脉轻度伪影, 不影响诊断; 3 分, 图像质量中, 冠脉伪影明显, 但不影响诊断; 4 分, 图像质量差, 伪影严重, 无法诊断。1~3 分的图像可用于诊断。各节段评分取最低值, 记为该病例的最终得分。

图像质量客观评价: 于升主动脉根部设置 ROI, 记录 ROI 内 CT 值平均值及标准差 (standard deviation, SD)。以标准差作为评价图像噪声水平的指标, 以信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 作为评价图像质量的客观指标, $SNR = CT \text{ 值平均值} / SD$ 。

5. 辐射剂量

本研究讨论的辐射剂量仅针对 CCTA, 不包括定位像、钙化积分扫描等造成的辐射剂量。由于采集时间窗的宽窄仅影响容积 CT 剂量指数 (volume CT dose index, CTDI_{vol}), 不影响扫描范围, 因此讨论辐射剂量时仅涉及 CTDI_{vol}, 无需考虑剂量长度乘积

(dose length product, DLP) 和有效剂量 (effective dose, ED)。

6. 统计学分析

采用 SPSS 20.0 软件进行统计学分析。两位观测者间的一致性评价采用 Kappa 分析, K 值 < 0.40 为一致性较差, $0.40 \leq K$ 值 < 0.75 为一致性一般, K 值 ≥ 0.75 为一致性较好。连续变量以平均值 \pm 标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示, 组间比较采用独立样本 t 检验; 等级数据如主观评分等的组间比较采用 Mann-Whitney u 检验。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结果

A、B 两组的受检者年龄、性别、体质指数 (body mass index, BMI) 差异均无统计学意义 (P 值均 > 0.05)。两位观察者间的一致性较好, K 值 = 0.87。

A 组 400 例受检者的平均心率为 (70.54 ± 13.06) bpm (43~137 bpm)。最佳重建期相按心率的分布情况见图 1~4。心率 < 61 bpm 的受检者, 最佳重建期相位于 60%~90% RR 间期; 心率 > 75 bpm 的受检者, 最佳重建期相位于 30%~70% RR 间期 (图 1)。因此, 选择 61 bpm、75 bpm 作为分界点, 将心率 < 61 bpm 的受检者纳入低心率组 (A1 组), 心率介于 61~75 bpm 的受检者纳入中心率组 (A2 组), 心率 > 75 bpm 的受检者纳入高心率组 (A3 组)。

低心率组最佳重建期相为 $(76 \pm 3)\%$ RR 间期 (95% 置信区间: 70%~82% RR 间期); 中心率组以 60% RR 间期为界, 最佳重建期相位于 $(44 \pm 3)\%$ 及 $(76 \pm 3)\%$ RR 间期 (95% 置信区间 38%~50%、70%~82% RR 间期); 高心率组最佳重建期相为 $(48 \pm 5)\%$ RR 间期 (95% 置信区间 38%~58% RR 间期)。根据上述结果, 取最佳重建期相的 95% 置信区间作为优化的采集时间窗 (图 2, 表 1), 应用于 B 组检查。

B 组 400 例受检者的平均心率为 (70.38 ± 13.05) bpm (42~149 bpm), 心率 < 61 bpm 的受检者纳入 B1 组, 心率介于 61~75 bpm 的受检者纳入 B2 组, 心率 > 75 bpm 的受检者纳入 B3 组。

A 组的图像质量主观评分为 (1.52 ± 0.65) 分, B

组为 (1.51 ± 0.63) 分, 两组差异无统计学意义 ($Z = -0.025, P = 0.980$); A1 组的图像质量主观评分为 (1.11 ± 0.32) 分, B1 组的主观评分为 (1.08 ± 0.27) 分, 两组差异无统计学意义 ($Z = -0.811, P = 0.418$); A2 组的图像质量主观评分为 (1.50 ± 0.54) 分, B2 组为 (1.57 ± 0.55) 分, 两组差异无统计学意义 ($Z = -1.191, P = 0.234$); A3 组的图像质量主观评分为 (1.84 ± 0.80) 分, B3 组为 (1.74 ± 0.76) 分, 两组差异无统计学意义 ($Z = -0.917, P = 0.359$, 表 2)。A 组 SNR 值为 15.76 ± 3.70 , B 组为 15.66 ± 4.59 , 两组差异无统计学意义 ($t = 0.333, P = 0.739$)。CTDIvol 方面, B1 组较 A1 组降低 81%; B2 组较 A2 组降低 56%; B3 组较 A3 组降低 70% (表 2)。

表 1 最佳重建期相及最佳采集时间窗 (% RR 间期)

| 心率 (bpm) | 最佳重建期相 | | 采集时间窗 |
|----------|--------|-----|-------|
| | 平均值 | 标准差 | |
| < 61 | 76 | 3 | 70~82 |
| 61~75 | 44 | 3 | 38~50 |
| | 76 | 3 | 70~82 |
| > 75 | 48 | 5 | 38~58 |

讨论

CCTA 已经成为诊断冠状动脉疾病重要的影像学手段。随着 CT 技术的提升, 图像质量得到明显改善, 辐射剂量大幅降低^[8,9]。然而电离辐射危害、高心率等因素的制约仍然是 CCTA 技术面临的挑战。抑制冠脉运动伪影、降低辐射剂量始终是研究的重要方向。管电流心电门控技术是降低 CCTA 辐射剂量的有效手段^[10-13]。在心动周期的某段时间内, 受检者接

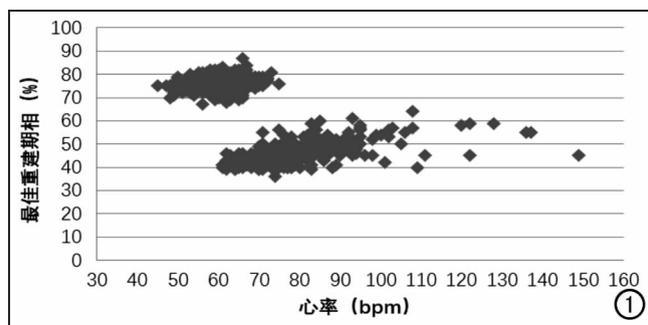


图 1 A 组 400 例受检者冠脉 CT 最佳重建期相按心率分布散点图。

表 2 图像质量主观评分及 CTDIvol (mGy)

| 组别 | 例数 (例) | 1 分 (例) | 2 分 (例) | 3 分 (例) | 4 分 (例) | 评分 (分) | CTDIvol (mGy) |
|------|--------|---------|---------|---------|---------|-----------------|-------------------|
| A1 组 | 89 | 79 | 10 | 0 | 0 | 1.11 ± 0.32 | 36.73 ± 14.39 |
| A2 组 | 188 | 98 | 86 | 4 | 0 | 1.50 ± 0.54 | 27.57 ± 11.69 |
| A3 组 | 123 | 47 | 53 | 19 | 4 | 1.84 ± 0.80 | 25.55 ± 10.33 |
| B1 组 | 91 | 84 | 7 | 0 | 0 | 1.08 ± 0.27 | 7.13 ± 2.53 |
| B2 组 | 189 | 87 | 97 | 5 | 0 | 1.57 ± 0.55 | 12.13 ± 3.39 |
| B3 组 | 120 | 51 | 52 | 14 | 3 | 1.74 ± 0.76 | 7.74 ± 3.13 |

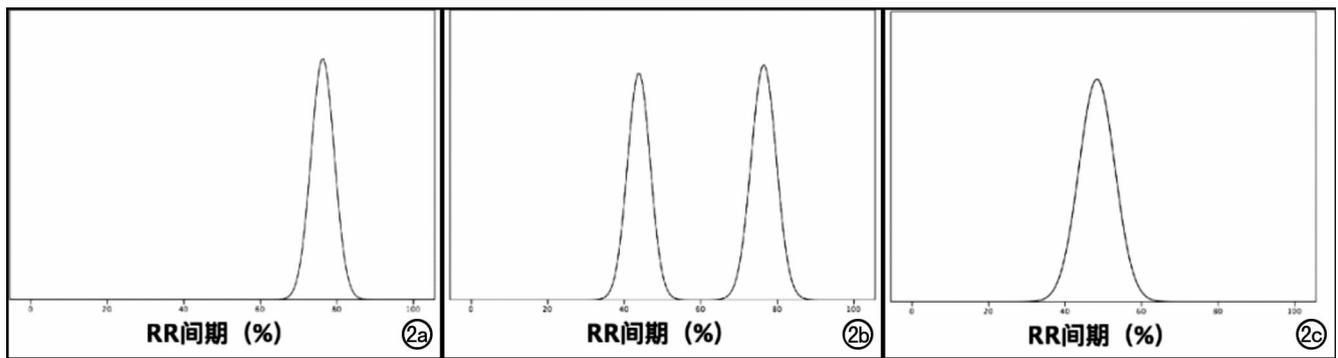


图2 低、中、高心率组最佳重建期相分布。a) 低心率组最佳重建期相；b) 中心率组最佳重建期相；c) 高心率组最佳重建期相。

受较高的管电流；在其它时间，受检者接受较低的管电流（通常设置为最高剂量的20%）甚至完全不接受曝光。应用管电流心电门控技术的前提是根据心率等情况设置合理的采集时间窗：在冠状动脉运动相对较慢的时间全剂量曝光，在冠状动脉运动相对较快的时间低剂量曝光或者不曝光。

掌握冠状动脉的运动规律是优化采集时间窗、抑制冠脉运动伪影、降低辐射剂量的关键。一个心动周期（RR间期）内，有两段冠脉运动较慢的时间即相对静止期，分别出现在舒张中末期及收缩末期。通常，慢

心率者的冠脉运动速度在舒张中末期低于收缩末期，因此舒张中末期冠脉运动伪影相对较小；而高心率者冠脉运动速度在收缩末期低于舒张中末期，因此收缩末期冠脉运动伪影相对较小。简单来说，对于慢心率受检者最佳成像时间通常位于舒张中末期，对于快心率受检者最佳成像时间通常位于收缩末期^[14-19]。

受成像时间分辨率的制约，既往研究中受检者心率受到一定限制，多不超过100 bpm。本研究纳入的受检者，扫描时心率最高达到149 bpm，心率超过100

bpm者达23例。因此，通过分析上述病例计算出的最佳成像时间窗适用范围更广、说服力更强。本研究最佳重建时相的选择方法简单有效，具有较大的适用范围和较高的推广价值。本研究结果显示，低心率（<61 bpm）受检者最佳成像时间位于舒张中末期（70%~82%）；中心率（61~75 bpm）受检者最佳成像时间位于舒张中末期（70%~82%）或收缩末期（38%~50%）；高心率（>75 bpm）受检者最佳成像时间位于收缩末期（38%~58%）。本研究的局限性：本研究为单中心研究，结论是否适用于其它类型的CT设备尚未可知，有待进一步研究观察；另外，本研究未涉及心率变化的情况，心率波动对最佳成像时间窗的影响有待进一步研究。

综上所述，合理优化采集时间窗，缩短曝光时间可大幅降低CCTA检查的辐射剂量且不影响图像质量。

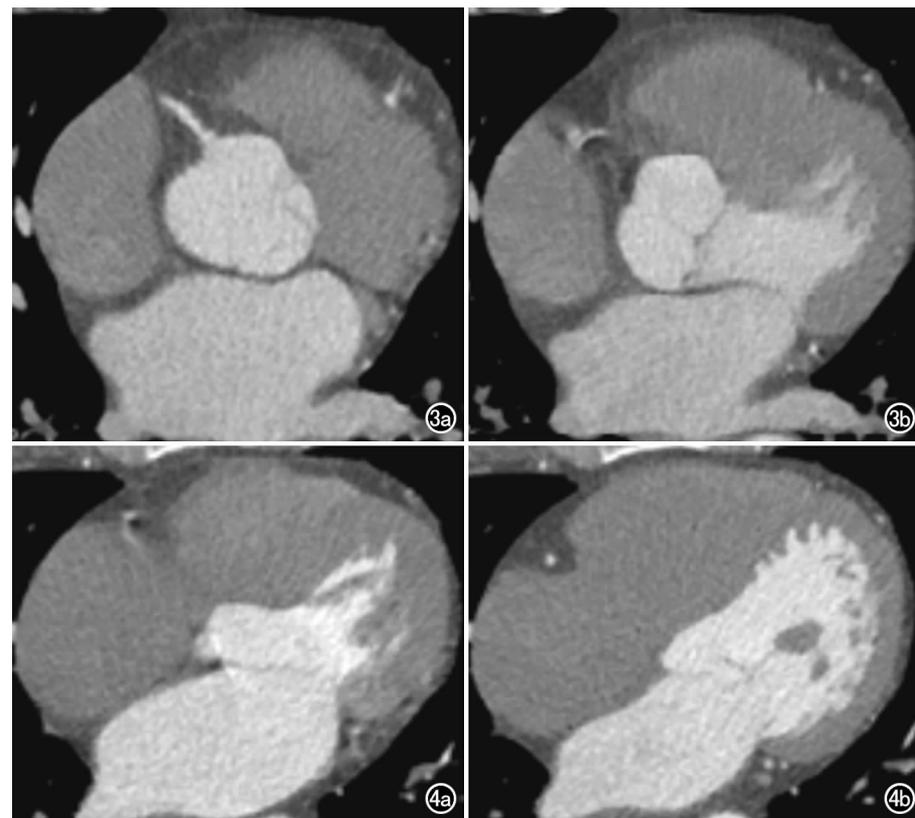


图3 高心率受检者(77bpm)45%RR间期图像优于75%RR间期图像。a) 45%RR间期图像；b)75%RR间期图像。图4 低心率受检者(59bpm)75%RR间期图像优于45%RR间期图像。a)45%RR间期图像；b)75%RR间期图像。

参考文献:

- [1] 中华医学会放射学分会心胸学组. 心脏冠状动脉 CT 血管成像技术规范应用中国指南[J]. 中华放射学杂志, 2017, 51(10): 732-742.
- [2] Leipsic J, Abbara S, Achenbach S, et al. SCCT guidelines for the interpretation and reporting of coronary CT angiography: a report of the society of cardiovascular computed tomography guidelines committee[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2014, 8(5): 342-358.
- [3] Abbara S, Blanke P, Maroules CD, et al. SCCT guidelines for the performance and acquisition of coronary computed tomographic angiography: a report of the society of cardiovascular computed tomography guidelines committee; endorsed by the north American society for cardiovascular imaging (NASCI)[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2016, 10(6): 435-449.
- [4] 中华放射学杂志心脏冠状动脉多排 CT 临床应用协作组. 心脏冠状动脉多排 CT 临床应用专家共识[J]. 中华放射学杂志, 2011, 45(1): 9-17.
- [5] 孙钢, 李敏, 李国英, 等. 320 排容积 CT 冠状动脉血管成像心率与重组时相对图像质量的影响[J]. 中华医学杂志, 2011, 91(1): 5-10.
- [6] 陈刚, 吴东, 曾蒙苏, 等. 双源 CT 冠状动脉成像辐射剂量的优化[J]. 放射学实践, 2014, 29(6): 593-596.
- [7] 卢光明. 积极推进超低剂量 CT 血管成像研究[J]. 放射学实践, 2014, 29(6): 582-583.
- [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] Liang J, Wang H, Xu L, et al. Diagnostic performance of 256-row detector coronary CT angiography in patients with high heart rates within a single cardiac cycle: a preliminary study[J]. Clin Radiol, 2017, 72(8): 694. e7-694. e14.
- [10] Steigner ML, Otero HJ, Cai T, et al. Narrowing the phase window width in prospectively ECG-gated single heart beat 320-detector row coronary CT angiography[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2009, 25(1): 85-90.
- [11] Lee AM, Beaudoin J, Engel LC, et al. Assessment of image quality and radiation dose of prospectively ECG-triggered adaptive dual-source coronary computed tomography angiography with arrhythmia rejection algorithm in systole versus diastole: a retrospective cohort study[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2013, 29(6): 1361-1370.
- [12] Labounty TM, Leipsic J, Min JK, et al. Effect of padding duration on radiation dose and image interpretation in prospectively ECG-triggered coronary CT angiography[J]. AJR Am J Roentgenol, 2010, 94(4): 933-937.
- [13] Achenbach S, Manolopoulos M, Schuhbäck A, et al. Influence of heart rate and phase of the cardiac cycle on the occurrence of motion artifact in dual-source CT angiography of the coronary arteries[J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2012, 6(2): 91-98.
- [14] Stassi D, Dutta S, Ma H, et al. Automated selection of the optimal cardiac phase for single-beat coronary CT angiography reconstruction[J]. Med Phys, 2016, 43(1): 324-335.
- [15] 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.
- [16] Akgöz A, Akata D, Hazirolan T, et al. Optimal reconstruction interval in dual source CT coronary angiography: a single-center experience in 285 patients[J]. Diagn Interv Radiol, 2014, 20(5): 399-406.
- [17] Mok GS, Yang CC, Chen LK, et al. Optimal systolic and diastolic image reconstruction windows for coronary 256-slice CT angiography[J]. Acad Radiol, 2010, 17(11): 1386-1393.
- [18] Sun G, Li M, Li L, et al. Optimal systolic and diastolic reconstruction windows for coronary CT angiography using 320-detector rows dynamic volume CT[J]. Clin Radiol, 2011, 66(7): 614-620.
- [19] Yang CC, Mok GS, Law WY, et al. Potential dose reduction of optimal ECG-controlled tube current modulation for 256-slice CT coronary angiography[J]. Acad Radiol, 2011, 18(6): 731-737.

(收稿日期: 2018-11-14 修回日期: 2019-04-26)