· 方法技术学 ·

Image quality and impact factors for single heart-beat coronary CTA using prospectively ECG-triggered 256-slice CT

LI Yuan[1], XIE Xueqian[1*], ZHANG Hao[1], WANG Yi[2], LI Nianyun[1], MENG Jie[1], ZHANG Guixiang[1]

(1. Department of Radiology, 2. Department of Cardiology, Shanghai General Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200080, China)

[**Abstract**] **Objective** To observe image quality and impact factors for single heart-beat coronary CTA (CCTA) with prospectively ECG-triggered CT in patients with low, high heart rate (HR) and arrhythmia. **Methods** Single heart-beat CCTA was performed for 208 patients with prospectively ECG-triggered 256-slice wide-detector CT without drug control of HR. The patients were divided into 3 groups, including low HR group ($n=87$, HR≤70 bpm), high HR group ($n=38$, HR>70 bpm) and arrhythmia group ($n=83$, HR variation >10 bpm in 5 cardiac cycles). The normal reconstruction phase was set as 75% or 45% in R-R interval, while the optimal phase was that with the least motion artifacts. Univariate linear regression was used to analyze the impact factors for image quality. **Results** Compared with images of normal phase, the optimal phase of 105 patients (105/208, 50.48%) was altered. In the optimal images, imaging quality, SNR and CNR were not significantly different among 3 groups (all $P>0.05$). Image quality was significantly influenced by reconstruction phase and artifact type (both $P<0.001$). **Conclusion** During prospectively ECG-triggered 256-slice wide-detector CCTA without drug control of HR, high HR and arrhythmia are not significant impact factors of image quality.

[**Key words**] Tomography, X-ray computed; Angiography; Image quality

DOI:10.13929/j.1672-8475.201711060

前瞻性心电门控单心动周期 256 排 CT 成像图像质量影响因素

李　远[1]，解学乾[1*]，张　皓[1]，王　毅[2]，李念云[1]，孟　捷[1]，张贵祥[1]

（1. 上海交通大学附属第一人民医院放射科，2. 心内科，上海　200080）

[摘　要] **目的**　对低心率、高心率和心律不齐患者采用前瞻性心电门控单心动周期冠状动脉 CTA，比较图像质量差异及其影响因素。**方法**　采用 256 排宽探测器 CT 对 208 例患者行前瞻性心电门控单心动周期冠状动脉 CTA 检查，不使用药物控制心率；其中低心率组 87 例（心率≤70 次/分），高心率组 38 例（心率>70 次/分），心律不齐组 83 例（5 个心动周期内的心率变化>10 次/分）。常规重建相位为 75%或 45%；以多时相重建中运动伪影最小者为最优相位。采用单变量线性回归评估影响图像质量评分的因素。**结果**　105 例（105/208，50.48%）最优相位与常规相位不同。最优相位图像中，3 组图像质量评分、SNR 和 CNR 差异均无统计学意义（P 均>0.05）。线性回归显示，心脏相位和伪影类型是图像质量评分的影响因素（P 均<0.001）。**结论**　在不限制心率的前瞻性心电门控宽探测器冠状动脉 CTA 中，高心率或心律不齐并非影响图像质量的重要因素。

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目（81471662）、科技部国际合作项目（2016YFE0103000）。

[第一作者] 李远（1985—），女，吉林长春人，硕士，医师。研究方向：心血管影像学。E-mail: 522452130@qq.com

[通信作者] 解学乾，上海交通大学附属第一人民医院放射科，200080。E-mail: xiexueqian@hotmail.com

[收稿日期] 2017-11-29　　[修回日期] 2018-03-31

［关键词］ 体层摄影术，X 线计算机；血管造影术；图像质量
［中图分类号］ R816.2；R814.42 ［文献标识码］ A ［文章编号］ 1672-8475(2018)06-0369-05

冠状动脉 CT 血管成像（coronary CTA，CCTA）常用于诊断冠状动脉粥样硬化性心脏病（以下简称冠心病）[1-2]。前瞻性心电门控 CCTA 可在 R-R 间期中的特定相位触发扫描，有效降低幅射剂量，但对于高心率和心律不齐患者则降低了扫描成功率和图像质量，而前瞻性心电门控单心动周期扫描有望减少对心率的依赖。传统 CT 技术可实现对心率≤70 次/分患者的单心动周期扫描[3-4]，也可用于部分高心率患者[5]。本研究采用 256 排宽探测器 CT 对低心率、高心率和心律不齐患者行单心动周期前瞻性心电门控 CCTA 扫描，比较其图像质量，并初步分析影响图像质量的因素。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性分析 2016 年 8 月—10 月在本院接受 CCTA 的 208 例患者，男 57 例、女 151 例，年龄 34～85 岁，平均（62.8±11.4）岁。纳入标准：有胸痛症状、体征且疑为冠心病，不限年龄、性别和心率；扫描前未服用 β 受体阻滞剂等控制心率的药物。排除标准：肾功能不全、冠状动脉阻塞、支架或旁路移植术后。208 例患者分为低心率组（≤70 次/分，n＝87），高心率组（＞70 次/分；n＝38）和心律不齐组（扫描前 5 个心动周期内的心率变化＞10 次/分[6]，n＝83）。患者一般资料见表 1。

1.2 仪器与方法 采用 GE Revolution 256 排 CT 行前瞻性心电门控扫描。参数：准直器宽度 256×0.625 mm，单次扫描宽度根据心脏大小设为 12～16 cm，球管旋转时间 280 ms，自动曝光控制技术根据年龄、体质量指数、定位图和图像噪声指数（noise index，NI；NI＝25）等自动计算管电压和管电流（表 1）。采用 SnapShot Freeze（SSF）技术，于 1 个心动周期内完成扫描。以高压注射器经肘静脉以 4.0～5.0 ml/s 流率注射 40～50 ml 对比剂（碘必乐，370 mgI/ml），之后以相同流率注射 30 ml 生理盐水，在升主动脉近端 CT 值达 120 HU 后 8 s 开始扫描。心率≤70 次/分时采集 R-R 间期的 70%～80%相位数据；＞70～85 次/分时采集 R-R 间期的 40%～55%和 70%～80%相位数据；＞85 次/分时采集 R-R 间期的 40%～55%相位数据。

1.3 图像重建 常规相位：采用迭代重建模式（ASiR-V），参数为 50%；心率≤70 次/分时重建 75%相位，心率为＞70～85 次/分时重建 45%和 75%相位，心率＞85 次/分时重建 45%相位。于常规相位两侧以 2%步长共重建 4～6 组图像，层厚和间隔均为 0.625 mm。

1.4 图像分析 由 2 名分别具有 5 和 15 年心血管诊断经验的医师对图像进行评分，并评估图像质量受损原因，意见不一时经协商决定。评价常规相位和邻近相位图像质量，选出冠状动脉运动伪影最小图像作为最优重建图像，并测量 SNR、CNR 及冠状动脉狭窄程度。

根据美国心脏协会心血管 CT 指南[7]，将冠状动脉分成 18 个节段，采用 Likert 评分系统评估每个冠状动脉节段的图像质量[8]：4 分，优秀，无伪影，完全满足诊断；3 分，良好，有很少伪影，可满足诊断；2 分，尚可，适度伪影，可接受诊断；1 分，差，不能诊断。将图像质量受损原因分为硬化线束伪影和冠状动脉运动伪影。SNR 和 CNR 计算方法：测量直径＞2 mm 冠状动脉和邻近脂肪组织的平均 CT 值和标准差；SNR＝冠状动脉平均 CT 值/冠状动脉标准差；CNR＝（冠状动脉平均 CT 值－脂肪组织平均 CT 值）/脂肪组织标准差。冠状动脉狭窄程度计算方法：冠状动脉狭窄程度＝冠状动脉最狭窄处/相邻两端正常横径均值×100%。

表 1 3 组患者一般资料

组别	年龄（岁）	男性（例）	体质量指数（kg/m²）	心率（次/分）		扫描期间心率变异（次/分）	扫描窗口（ms）
				扫描前	扫描期间		
低心率组（n＝87）	65.7±10.7	11	23.81±4.42	60.32±6.11	59.83±6.70	6.09±2.61	412.02±129.95
高心率组（n＝38）	62.6±9.3	14	25.33±3.47	76.80±11.41	78.78±8.39	5.79±2.67	566.13±110.23
心律不齐组（n＝83）	59.9±12.3	32	23.88±2.79	65.64±9.42	64.74±10.51	19.21±10.52	531.00±157.34
总体（n＝208）	62.8±11.4	57	24.10±3.68	65.31±10.32	64.84±11.19	11.40±9.58	485.31±153.29

组别	管电压（例）		管电流（mA）	有效辐射剂量（mSv）	冠状动脉狭窄（例）	有最优重建图像［例（%）］
	100 kVp	120 kVp				
低心率组（n＝87）	32	55	587.81±85.90	1.10±0.51	4	18 (20.69)
高心率组（n＝38）	14	24	607.88±76.52	1.84±0.62	6	30 (78.95)
心律不齐组（n＝83）	34	49	570.11±95.51	1.34±0.71	11	57 (68.67)
总体（n＝208）	80	128	582.86±89.74	1.33±0.70	21	105 (50.48)

1.5 统计学分析　采用 SPSS 17.0 统计分析软件。以配对 t 检验比较常规相位与最优重建相位图像间 SNR、CNR 值，以 χ^2 检验比较图像质量评分。采用单因素方差分析比较 3 组间客观测量值，以 *Kruskal-Walis H* 检验比较图像质量评分。使用单变量线性回归评估图像质量的影响因素，因变量分别为图像质量评分（1～4 分）、SNR、CNR；自变量分别为体质量指数、平均心率、心率变异性、伪影类型（硬化线束为 1 和运动伪影为 2）、心脏相位（常规为 1 和最优为 2）和冠状动脉狭窄程度。$P<0.05$ 为差异有统计学意义。

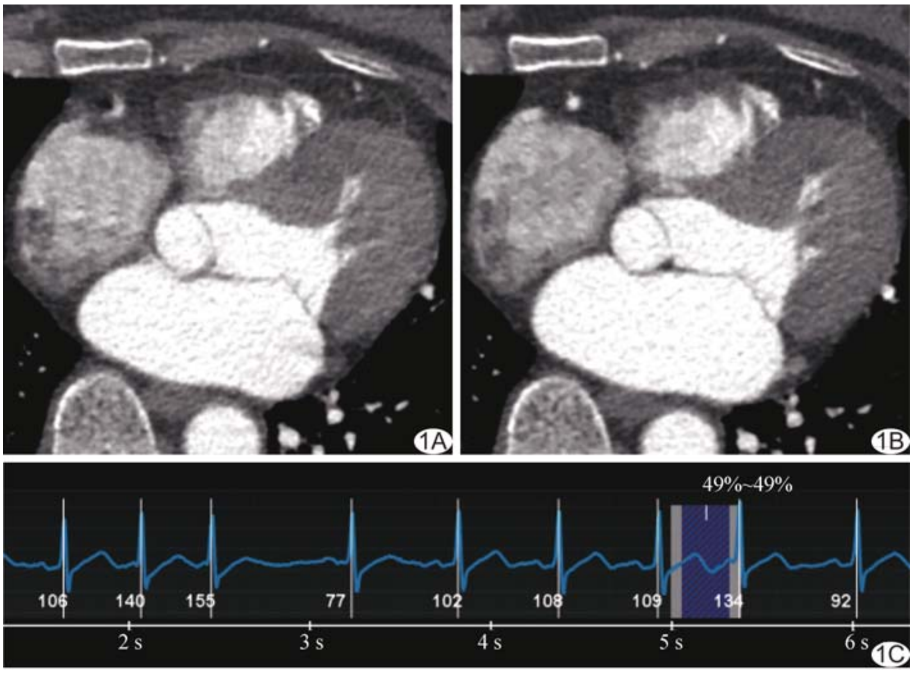

图 1　患者男，56 岁，心律不齐，平均心率 102 次/分　A. CCTA 常规重建 45%相位，右冠状动脉中段图像质量 1 分；B. CCTA 最优重建 49%相位，图像质量 4 分；C. 心电门控图像示扫描前 5 个心动周期的心率为 77～155 次/分，最大心率变化为 78 次/分

2 结果

208 例中，105 例（105/208，50.48%）最优重建相位与常规相位不同（图 1）；103 例（103/208，49.52%）最优重建相位与常规相位相同。

2.1 图像质量评分　共评估 1 869 个冠状动脉节段。常规相位 1 869 个冠状动脉节段，低心率组 479 个节段（479/599，79.97%）、高心率组 301 个节段（301/425，70.82%）、心律不齐组 555 个节段（555/845，65.68%）图像质量 4 分。最优重建相位 1 869 个冠状动脉节段，低心率组 509 个节段（509/599，84.97%）、高心率组 353 个节段（353/425，83.06%）、心律不齐组 693 个节段（693/845，82.01%）图像质量 4 分。常规相位中，高心率组 2.59%（11/425）、心律不齐组 5.44%（46/845）节段的图像质量 1 分，；最优重建相位中，3 组均无图像质量为 1 分的图像（表 2）。

最优重建相位图像质量评分 3 组间差异无统计学意义（$H=2.688$，$P=0.261$）。常规相位图像质量评分 3 组间差异有统计学意义（$H=56.398$，$P<0.001$），低心率组图像质量评分高于高心率组、心律不齐组（P 均<0.05），见表 3。

2.2 客观测量　测量 208 例患者中直径>2 mm 的冠状动脉 1 530 个节段。3 组中，常规相位与最优重建相位间 CT 值、SNR 和 CNR 差异无统计学意义（P 均>0.05）。常规相位及最优重建相位 3 组间的 CT 值、SNR 和 CNR 差异无统计学意义（P 均>0.05）。见表 4。

表 2　3 组常规和最优重建相位不同图像质量评分的冠状动脉节段（个）

组别	LAD 各节段				LCx 各节段				RCA 各节段			
	4 分	3 分	2 分	1 分	4 分	3 分	2 分	1 分	4 分	3 分	2 分	1 分
低心率组（$n=599$）												
常规	154	16	14	0	175	30	14	0	150	32	14	0
最优重建相位	166	9	9	0	184	25	9	0	159	30	8	0
高心率组（$n=425$）												
常规	87	30	9	4	115	31	10	4	99	26	7	3
最优重建相位	104	20	6	0	134	19	7	0	115	16	4	0
心律不齐组（$n=845$）												
常规	164	52	31	23	233	39	27	13	158	67	28	10
最优重建相位	209	41	20	0	272	28	12	0	212	40	11	0

注：LAD：左前降支，包括第 6～10 节段；LCx：左回旋支，包括第 11～15 和 18 节段；RCA：右冠状动脉，包括 1～4 和 16 节段

表 3 3 组常规相位和最优重建相位冠状动脉节段图像质量评分(分)

组别	LAD 各段	LCx 各段	RCA 各段
低心率组			
常规	3.76±0.54	3.74±0.46	3.69±0.39
最优重建	3.85±0.37	3.80±0.41	3.78±0.51
高心率组			
常规	3.54±0.41	3.60±0.43	3.64±0.35
最优重建	3.75±0.51	3.79±0.45	3.82±0.47
心律不齐组			
常规	3.32±0.45	3.58±0.41	3.42±0.59
最优重建	3.70±0.56	3.83±0.44	3.92±0.32

注:LAD:左前降支,包括第 6~10 节段;LCx:左回旋支,包括第 11~15 和 18 节段;RCA:右冠状动脉,包括第 1~4 和 16 节段

表 4 常规和最优重建相位冠状动脉图像质量测值

组别	LAD 各段		
	CT 值(HU)	SNR	CNR
低心率组			
常规	367.21±119.22	11.10±7.10	14.92±8.94
最优重建	372.52±112.16	12.11±6.88	15.16±8.37
高心率组			
常规	337.27±118.81	10.72±6.49	14.11±7.90
最优重建	340.33±114.91	11.01±6.43	14.38±7.73
心律不齐组			
常规	370.41±116.24	11.91±9.52	15.12±10.00
最优重建	374.40±120.20	12.71±8.52	15.94±9.91

组别	LCx 各段		
	CT 值(HU)	SNR	CNR
低心率组			
常规	355.21±111.52	12.01±11.02	15.10±12.88
最优重建	362.52±111.51	12.52±11.82	15.37±13.78
高心率组			
常规	330.50±112.02	12.04±12.71	17.09±14.22
最优重建	334.52±104.52	12.61±11.68	17.48±14.12
心律不齐组			
常规	330.78±119.18	10.19±8.00	13.89±7.91
最优重建	340.78±114.24	10.79±6.26	14.01±7.91

组别	RCA 各段		
	CT 值(HU)	SNR	CNR
低心率组			
常规	401.21±129.81	12.22±8.54	13.82±9.01
最优重建	407.19±126.39	12.24±7.88	14.82±9.12
高心率组			
常规	375.09±131.61	10.18±5.94	13.12±6.94
最优重建	385.02±126.63	10.66±5.64	13.76±6.90
心律不齐组			
常规	401.12±120.01	12.02±8.91	13.86±10.09
最优重建	414.43±120.84	12.36±8.49	15.11±9.92

注:LAD:左前降支,包括第 6~10 节段;LCx:左回旋支,包括第 11~15 和 18 节段;RCA:右冠状动脉,包括第 1~4 和 16 节段

2.3 图像质量的影响因素 线性回归显示心脏相位和伪影类型为显著影响图像质量评分的因素(P 均<0.001),表 5。

3 讨论

传统观点认为高心率和心律不齐均可降低 CCTA 图像质量,而既往指南不建议对此类患者进行检查[1]。虽然有学者发现使用传统宽探测器 CT 对心率≤69 次/分和≥91 次/分患者进行扫描时,图像质量差异无统计学意义[5],但对心律不齐者进行扫描仍是挑战。使用传统宽探测器 CT 对心律不齐者进行 CCTA 时,对 73% 患者需采集 2~4 个心动周期的数据,才能重建出具备诊断质量的图像,而辐射剂量则平均升高 1.8 倍[9]。

前瞻性心电门控 CCTA 可有效降低辐射剂量。一项 Meta 分析[10]结果显示,前瞻性心电门控扫描的有效剂量可降至 3.5 mSv,而使用回顾性扫描有效剂量为 12.1 mSv [2]。前瞻性心电门控单次心动周期 CCTA 可进一步减少辐射剂量,低剂量扫描可用于心率<70 次/分的患者[3-4],但不控制心率的单次心动周期 CCTA 难度较高。Oda 等[11]用传统宽探测器 CT 进行图像采集,需 2 个和 3 个心动周期才能完成对心率为 75~90 次/分和>90 次/分患者的扫描。

前瞻性心电门控触发扫描需在冠状动脉运动相对较慢的相位曝光,但采集之前确定的曝光相位会受心律不齐的影响。本研究采用前瞻性心电门控多相位图像扫描和重建,可回顾性重建多相位图像,有助于识别较少运动伪影的图像,大幅度提高了高心率

表 5　图像质量相关因素的线性回归分析

因素	质量评分		SNR		CNR	
	回归系数	P 值	回归系数	P 值	回归系数	P 值
体质量指数	−0.002	0.518	−0.126	0.149	−0.130	0.237
平均心率	−0.001	0.246	−0.020	0.450	0.001	0.995
心率变异性	−0.001	0.442	−0.045	0.094	0.043	0.200
伪影类型	−0.235	<0.001	1.790	0.244	1.886	0.664
心脏相位	0.338	<0.001	1.925	0.544	1.230	0.319
冠状动脉狭窄	0.127	0.149	2.944	0.057	2.533	0.160

和心律不齐者的图像质量，为实现一次心动周期CCTA 扫描技术构筑了基础。

β受体阻滞剂等药物可用于降低心率、降低冠状动脉运动速度，但对一些患者属于禁忌或无明显效果[12]。虽然目前指南建议使用药物来控制心率[13]，但不依赖于药物的稳定、快速扫描对于改善患者临床体验和加快检查流程更为重要。

本研究的局限性：①为单中心研究，需增加多中心和大样本研究，以确认前瞻性心电门控单心动周期CCTA 对于高心率和心律不齐者的临床应用价值；②本研究仅针对成人，在儿童和肥胖人群中还需进一步验证。

［参考文献］

[1] 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.中华放射学杂志,2011,45(1):9-17.

[2] Hausleiter J, Meyer T, Hermann F, et al. Estimated radiation dose associated with cardiac CT angiography. JAMA, 2009,301(5):500-507.

[3] Chen MY, Shanbhag SM, Arai AE. Submillisievert median radiation dose for coronaryangiography with a second-generation 320-detector row CT scanner in 107 consecutive patients. Radiology, 2013,267(1):76-85.

[4] Fuchs TA, Stehli J, Bull S, et al. Coronary computed tomography angiography with model-based iterative reconstruction using a radiation exposure similar to chest X-ray examination. Eur Heart J, 2014,35(17):1131-1136.

[5] 汪芳,郝万庆,杨利莉,等.256 排宽体探测器 CT 智能心电门控技术在不控制心率患者冠状动脉 CTA 中的应用.中国医学影像技术,2017,33(7):1080-1084.

[6] Andreini D, Pontone G, Mushtaq S, et al. Low-dose CT coronary angiography with a novel IntraCycle motion-correction algorithm in patients with high heart rate or heart rate variability. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2015, 16(10):1093-1100.

[7] Raff GL, Abidov A, Achenbach S, et al. SCCT guidelines for the interpretation and reporting of coronary computed tomographic angiography. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2009, 3(2):122-136.

[8] Leipsic J, Labounty TM, Hague CJ, et al. Effect of a novel vendor-specific motion-correction algorithm on image quality and diagnostic accuracy in persons undergoing coronary CT angiography without rate-control medications. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2012,6(3):164-171.

[9] Kondo T, Kumamaru KK, Fujimoto S, et al. Prospective ECG-gated coronary 320-MDCT angiography with absolute acquisition delay strategy for patients with persistent atrial fibrillation. AJR Am J Roentgenol, 2013,201(6):1197-1203.

[10] Menke J, Unterberg-Buchwald C, Staab W, et al. Head-to-head comparison of prospectively triggered vs retrospectively gated coronary computed tomography angiography: Meta-analysis of diagnostic accuracy, image quality, and radiation dose. Am Heart J, 2013,165(2):154-163,e153.

[11] Oda S, Utsunomiya D, Yuki H, et al. Low contrast and radiation dose coronary CT angiography using a 320-row system and a refined contrast injection and timing method. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2015,9(1):19-27.

[12] Aggarwal A, Smith JL, Chinnaiyan KM, et al. β-Blocker premedication does not increase the frequency of allergic reactions from coronary CT angiography: Results from the Advanced Cardiovascular Imaging Consortium. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2015,9(4):270-277.

[13] Rich ME, Utsunomiya D, Simprini LA, et al. Prospective evaluation of the updated 2010 ACCF Cardiac CT Appropriate Use Criteria. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2012, 6(2):108-112.