



Revolution CT 单能量成像在不同浓度对比剂中 对冠状动脉斑块检出价值的体模研究

李伟然, 吕培杰, 赵慧萍, 李莹, 王会霞, 高剑波

(郑州大学第一附属医院放射科, 河南 郑州 450052)

摘要:目的 探讨 Revolution CT 单能量成像在不同浓度对比剂中检出冠状动脉斑块的价值。方法 选取的体模有编号为 3、4、5、6、8、9 的 6 支试管, 分别含有 20、10、5、2.5、0、13 mg I/mL 等不同浓度的碘溶液, 每支试管内放有模拟钙化斑块的鱼刺和模拟脂质斑块及纤维斑块的五花肉; 分别对体模进行能谱及 120 kVp 扫描, 获得试验组 70 keV 单能量图像及对照组 120 kVp 图像; 对 2 组图像斑块检出能力进行主观评分, 对评分 ≥ 3 分的图像进一步分析, 组内不同试管同性质斑块 CT 值及 CNR 比较采用单因素方差分析, 组内两两比较采用 Bonferroni 法, 组间同号试管同性质斑块的 CT 值、CNR 及组间标准差(SD)值比较采用配对 t 检验或符号秩和检验。结果 试验组及对照组 4 号、5 号及 9 号试管各斑块的主观评分均符合诊断要求; 组内比较显示, 试验组及对照组 5 号试管钙化斑块 CNR、9 号试管脂质斑块及纤维斑块 CNR 高于其余试管同性质斑块, 差异有统计学意义($t = 4.105 \sim 29.214$, 均 $P < 0.001$); 组间比较显示, 9 号试管钙化斑块 CNR 差异无统计学意义($t = -1.576$, $P = 0.130$), 余各斑块 CNR 均为试验组高于对照组($Z = -4.074 \sim -3.815$, $t = -14.782 \sim -3.520$, 均 $P < 0.05$)。结论 Revolution CT 能谱单能量成像能够获得优质的图像, 在 5~13 mg I/mL 对比剂条件下较好地显示冠状动脉斑块。

关键词:单能量成像; 体模; 斑块; 对比剂

DOI: 10.3969/j.issn.1002-1671.2019.04.033

中图分类号: R814.42; R-331 文献标志码: A 文章编号: 1002-1671(2019)04-0647-05

The value of monochromatic energy imaging derived from Revolution CT in detecting coronary plaques with different concentration of contrast agent: a phantom experiment

LI Weiran, Lü Peijie, ZHAO Hui ping, LI Ying, WANG Hui xia, GAO Jianbo

(Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Objective To explore the value of monochromatic energy imaging generated from Revolution CT in detecting coronary plaques in different concentrations of contrast agent. **Methods** Six test tubes numbered 3, 4, 5, 6, 8 and 9 in the phantom were selected and filled up with different concentrations of iodine solutions (20, 10, 5, 2.5, 0, 13 mg I/mL, respectively), fishbone simulating calcified plaque and streaky pork simulating lipid/fibrous plaque. Each tube underwent spectral CT scan (study group, 70 keV monochromatic energy imaging) and 120 kVp CT scan (control group) respectively in Revolution CT. The ability of plaque detection was evaluated subjectively, and further analysis was made on the images with a score greater than or equal to three points. **One-way ANOVA** and **Bonferroni** method were used to compare the CT values and CNR in different tubes in the intra-group comparison, while paired t test and **Mann-Whitney U** test were used for the inter-group comparison. **Results** The overall image quality of No.4, 5 and 9 test tubes in both groups met the clinical diagnostic level. In the intra-group comparison, No.5 test tube showed higher CNR of calcified plaque and No.9 test tube showed higher CNR of lipid plaque and fibrous plaque than the others ($t = 4.105 \sim 29.214$, all $P < 0.001$). While in the inter-group comparison, the study group showed similar CNR of calcified plaque in No.9 test tube ($t = -1.576$, $P = 0.130$) to the control group, and higher CNR in the others than the control group ($Z = -4.074 \sim -3.815$, $t = -14.782 \sim -3.520$, all $P < 0.05$). **Conclusion**

Compared with 120 kVp CT images, monochromatic energy imaging at 70 keV from Revolution CT showed better overall image quality and could display coronary plaques better with the contrast agent concentration from 5 mg I/mL to 13 mg I/mL.

Key words: monochromatic energy imaging; phantom; plaque; contrast agent

作者简介:李伟然(1994-),男,江西省景德镇市人,在读硕士。研究方向:腹部 CT 诊断。

通信作者:高剑波, E-mail: cjr.gaojianbo@vip.163.com

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(81301220);河南省医学科技攻关计划普通项目(201403016);郑州大学第一附属医院青年创新基金项目(2012-233)。

冠状动脉粥样硬化性心脏病已成为威胁人类健康的

重大疾病,研究表明,冠状动脉斑块的大小、数量、成分在诱发急性心肌梗死等疾病具有重要的临床意义^[1]。随着 CT 硬件设备和扫描技术的发展,MSCT 冠状动脉造影已成为诊断冠状动脉狭窄的有效工具^[2-5]。传统 CT 成像为混合能量成像,线束硬化伪影不可避免,同时受到部分容积效应影响,容易在冠状动脉钙化斑块周围产生环形伪影^[6],进而导致管腔狭窄程度测量不准确。Revolution CT 具有 16 cm 的宽体探测器,1 次旋转即可完成单器官扫描,有利于提高时间分辨率,减少扫描过程中由于呼吸运动等带来的图像伪影。而且其能谱单能量成像能有效抑制线束硬化伪影,有利于斑块的精确观察^[7]。CT 冠状动脉造影检查时选择合适浓度的对比剂有利于对冠状动脉斑块的诊断^[8],而在何种浓度下显示冠状动脉斑块成分最佳,国内外尚无相关报道。本研究旨在探讨 Revolution CT 能谱成像重建 70 keV 单能量图像相对于常规 120 kVp 图像在不同浓度对比剂中对不同性质斑块的检出价值。

1 材料与方 法

1.1 体模 选用 GE HealthCare 公司提供的标准定量分析体模模型,该体模直径约 20 cm,高约 11.5 cm,圆周有 8 个孔,中央有 1 个孔,圆周孔的间隔为 45°,其内有编号为 1~9 的 9 支试管,每支试管长约 10 cm,外径约 25 mm,内径约 20 mm,试管周围填充聚丙烯材质,试管内容量约 20 mL,其内装有蒸馏水将含碘对比剂的溶液(碘海醇,350 mg I/mL,GE,US)分散成 8 种不同浓度的溶液(图 1),分别为 0、1.25、2.5、5、10、13、20、40 mg I/mL(表 1)。实际扫描中抽出了含有高浓度对比剂的 1 号及 2 号试管,以减少对比剂硬化伪影的干扰。本研究选取了 3、4、5、6、8、9 号试管,每支试管内均含有大小相似 的鱼刺及五花肉,鱼刺模拟钙化斑块,五花肉模拟脂质斑块及纤维斑块。

表 1 不同试管内碘溶液浓度

试管编号	碘浓度(mg I/mL)
1	40
2	40
3	20
4	10
5	5
6	2.5
7	1.25
8	0
9	13

1.2 检查方法 采用 GE Revolution CT,通过调节管

电流在相同辐射剂量下进行扫描。对照组 120 kVp 扫描:探测器宽度 40 mm,管电流 190 mA,转速 1 s/r,螺距 0.984 : 1,覆盖速度 39.38 mm/s,联合滤波反投影(filtered back projection,FBP)重建;试验组采用能谱扫描:探测器宽度 80 mm,管电压 80 kVp 和 140 kVp 瞬时切换,管电流 485 mA,转速 0.5 s/r,螺距 0.992 : 1,覆盖速度 158.75mm/s,联合多模型迭代重建技术(adaptive statistical iterative reconstruction V,ASIR-V)重建。对照组和试验组扫描层厚为 5 mm,FOV 为大视野(50 cm×50 cm),显示野 35 cm,重建层厚、层间距分别为 1.25 mm 及 1.25 mm。试验组通过结合能谱成像浏览器产生 70 keV 单能量图像。

1.3 图像分析 所有图像均传输到 GE Health Care ADW 4.6 工作站进行分析。(1)主观评价:对斑块检出能力进行评分。由 2 名放射科医师在不知扫描条件的情况下共同对 2 组图像进行评分。采用 5 分制等级评分法:5 分,优异;4 分,良好;3 分,中等;2 分,较差;1 分,极差。评分≥3 分即符合诊断要求^[9],对符合诊断要求的图像进一步分析。(2)客观评价:选取层厚为 1.25 mm 的图像,通过勾画 ROI 测量每组图像每支试管内斑块及碘溶液的 CT 值,试管邻近背景的 SD 值(相应 ROI 内 CT 值的标准差),同一物质在不同层面测量 22 次,计算每支试管内不同斑块的 CNR, $CNR = (CT_{\text{斑块}} - CT_{\text{碘溶液}}) / SD_{\text{背景}}$ 。

1.4 统计学分析 使用 SPSS 17.0 统计学软件,组内不同试管同性质斑块 CT 值及 CNR 比较采用单因素方差分析,组内两两比较采用 Bonferroni 法;组间同号试管同性质斑块的 CT 值、CNR 及组间 SD 值比较采用配对 t 检验或符号秩和检验,检验水准 $\alpha = 0.05$;使用 Bonferroni 法对组内结果进行两两比较,检验水准 $\alpha = 0.017(0.05/3)$ 。

2 结果

2.1 主观评价 对照组和试验组主观评分的结果见图 2,3。2 组图像中 3 号试管的钙化斑块、纤维斑块,6 号试管的纤维斑块,8 号试管的纤维斑块主观评分均 <3 分;4 号试管、5 号试管及 9 号试管 3 种斑块的主观评分均符合诊断要求。不同扫描方案所得图像见图 4。

2.2 客观评价

2.2.1 图像噪声(SD 值) 试验组图像噪声(7.0±0.8) HU 低于对照组(9.9±1.1) HU,差异有统计学意义($t = 25.002, P < 0.001$)。

2.2.2 组内比较 2 组图像中不同试管内各斑块 CT 值及 CNR 见表 2,3。对照组及试验组各试管内同性

表 3 试验组 70 keV 图像各斑块 CT 值及 CNR

试管编号	钙化斑块		脂质斑块		纤维斑块	
	CT 值	CNR	CT 值	CNR	CT 值	CNR
3	695.9±30.0	26.0±5.6	-41.5±5.9	78.1±8.2	80.0±7.6	60.9±6.5
4	503.7±24.2	34.5±4.9	-53.3±8.2	46.9±4.0	63.9±10.2	30.3±3.3
5	488.6±18.1	52.5±6.3	-56.8±7.7	30.2±3.5	68.2±8.9	11.2±1.8
6	313.7±17.3	34.3±4.9	-62.7±4.2	20.8±2.6	73.1±3.9	0.9±0.6
8	379.2±46.8	52.0±9.6	-57.9±5.8	10.2±1.5	62.9±7.7	7.0±1.4
9	553.7±33.0	27.7±5.3	-50.6±6.1	54.1±5.6	73.3±9.2	37.3±3.5
F 值	440.432	75.641	27.995	594.766	13.930	952.059
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

表 4 2 组图像各试管内不同斑块 CT 值对比

组别	钙化斑块			脂质斑块			纤维斑块		
	5	4	9	5	4	9	5	4	9
对照组 120 kVp	540.0(56.3)	519.3(23.8)	579.9(51.3)	-57.6(6.2)	-50.2(5.8)	-54.6(11.0)	69.5(6.3)	70.8(9.2)	73.2(6.4)
试验组 70 keV	488.6(18.1)	503.7(24.2)	553.7(33.0)	-56.8(7.7)	-53.3(8.2)	-50.6(6.1)	68.2(8.9)	63.9(10.2)	73.3(9.2)
t 值或 Z 值	-2.873*	-3.490*	-1.412*	-0.530	1.693	-1.542*	0.584	-0.731*	-0.017
P 值	0.004	<0.001	0.158	0.602	0.105	0.123	0.566	0.465	0.987

注:括号内为 CT 值的标准差;5、4、9 为试管编号;*,Z 值

表 5 2 组图像各试管内不同斑块 CNR 对比

组别	钙化斑块			脂质斑块			纤维斑块		
	5	4	9	5	4	9	5	4	9
对照组 120 kVp	42.8(8.7)	27.4(3.3)	24.6(6.2)	20.5(2.0)	31.2(2.4)	38.7(4.8)	7.1(0.8)	18.8(1.6)	26.0(3.2)
试验组 70 keV	52.5(6.3)	34.5(4.9)	27.7(5.3)	30.2(3.5)	46.9(4.0)	54.1(5.6)	11.2(1.8)	30.3(3.3)	37.3(3.5)
t 值或 Z 值	-3.520	-3.815*	-1.576	-10.330	-14.782	-9.220	-9.670	-12.748	-4.074*
P 值	0.002	<0.001	0.130	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注:括号内为 CNR 的标准差;5、4、9 为试管编号;*,Z 值

狭窄的特异度。宽体探测器具有 16 cm 的 z 轴覆盖面积,1 次旋转即可完成单器官扫描,提高时间分辨率,减少扫描过程中呼吸运动等带来的图像伪影。ASIR-V 技术是在基于模型迭代重建(model-based iterative reconstruction, MBIR)基础上开发的一种新的迭代重建技术,能显著地降低图像噪声、提高图像质量、提高密度分辨率以及抑制伪影。有研究表明,前置以及后置 ASIR-V 不同百分比的优化组合能够有效地降低辐射剂量同时保证图像质量^[14-15]。

3.2 本研究显示对比剂浓度为 5 mg I/mL、10 mg I/mL 及 13 mg I/mL 时 2 组扫描方案获得的图像均可供临床诊断;对比剂浓度过低(2.5 mg I/mL)时,纤维斑块检出价值较低,浓度过高(20 mg I/mL)时,钙化斑块检出价值较低。2 组图像在 10 mg I/mL 对比剂条件下对 3 种斑块检出的主观评分均为最高。不同浓度(5、10、13 mg I/mL)对比剂中,钙化斑块 CNR 在 5 mg I/mL 条件下最高,脂质斑块及纤维斑块 CNR 在 13 mg I/mL 水平下最高,说明低浓度对比剂易显

示高密度的钙化斑块,高浓度对比剂易显示较低密度的脂质斑块及纤维斑块。本研究显示在不同浓度对比剂条件下同一性质斑块 CT 值及 CNR 均存在差异,对比剂浓度是斑块 CT 值及 CNR 的影响因素。

3.3 本研究中 3 种对比剂浓度(5、10、13 mg I/mL)水平下,试验组 70 keV 图像各斑块 CNR 普遍高于对照组 120 kVp 图像,试验组图像对斑块的显示较对照组好。

本研究的不足:(1)本研究设置对比剂浓度梯度较少,为探讨可供临床诊断的对比剂浓度范围应增加浓度梯度的设置。(2)本研究为体模试验,研究结果需要针对年龄、体型等不同情况患者的临床研究进一步证实。(3)Revolution CT 能谱成像重建不同水平 keV 图像的对比度及噪声均有差异,不同 keV 图像的诊断价值需要进一步研究。

综上所述,Revolution CT 能谱单能量成像能获得优质的图像,在 5~13 mg I/mL 对比剂条件下能较好地显示冠状动脉斑块。

- e3186. DOI: 10.1161/CIRCIMAGING.115.003186.
- [21] HECHT H, BLAHA M J, BERMAN D S, et al. Clinical indications for coronary artery calcium scoring in asymptomatic patients: expert consensus statement from the society of cardiovascular computed tomography[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2017, 11(2): 157-168. DOI: 10.1016/j.jcct.2017.02.010.
- [22] MIEDEMA M D, DUPREZ D A, MISIALEK J R, et al. Use of coronary artery calcium testing to guide aspirin utilization for primary prevention: estimates from the multi-ethnic study of atherosclerosis[J]. *Circ Cardiovasc Qual Outcomes*, 2014, 7(3): 453-460. DOI: 10.1161/CIRCOUTCOMES.113.000690.
- [23] 鲁锦国, 吕滨, 唐翔, 等. 不同形态冠状动脉钙化与冠状动脉狭窄的多层螺旋 CT 相关性研究[J]. *实用放射学杂志*, 2010, 26(4): 485-491. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1671.2010.04.008.
- [24] ALLURI K, JOSHI P H, HENRY T S, et al. Scoring of coronary artery calcium scans: history, assumptions, current limitations, and future directions[J]. *Atherosclerosis*, 2015, 239(1): 109-117. DOI: 10.1016/j.atherosclerosis.2014.12.040.
- [25] TOTA-MAHARAJ R, JOSHI P H, BUDOFF M J, et al. Usefulness of regional distribution of coronary artery calcium to improve the prediction of all-cause mortality[J]. *Am J Cardiol*, 2015, 115(9): 1229-1234. DOI: 10.1016/j.amjcard.2015.01.555.
- [26] BLAHA M J, BUDOFF M J, TOTA-MAHARAJ R, et al. Improving the CAC score by addition of regional measures of calcium distribution: multi-ethnic study of atherosclerosis[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2016, 9(12): 1407-1416. DOI: 10.1016/j.jcmg.2016.03.001.
- [27] SILVERMAN M G, HARKNESS J R, BLANKSTEIN R, et al. Baseline subclinical atherosclerosis burden and distribution are associated with frequency and mode of future coronary revascularization: multi-ethnic study of atherosclerosis[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2014, 7(5): 476-486. DOI: 10.1016/j.jcmg.2014.03.005.
- [28] TOTA-MAHARAJ R, AL-MALLAH M H, NASIR K, et al. Improving the relationship between coronary artery calcium score and coronary plaque burden: addition of regional measures of coronary artery calcium distribution[J]. *Atherosclerosis*, 2015, 238(1): 126-131. DOI: 10.1016/j.atherosclerosis.2014.11.008.
- [29] ABEDIN M, TINTUT Y, DEMER L L. Vascular calcification: mechanisms and clinical ramifications[J]. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 2004, 24(7): 1161-1170. DOI: 10.1161/01.ATV.0000133194.94939.42.
- [30] BROWN E R, KRONMAL R A, BLUEMKE D A, et al. Coronary calcium coverage score: determination, correlates, and predictive accuracy in the multi-ethnic study of Atherosclerosis[J]. *Radiology*, 2008, 247(3): 669-675. DOI: 10.1148/radiol.2473071469

(收稿日期: 2018-03-26; 修回日期: 2018-04-08)

(上接第 650 页)

参考文献:

- [1] DALEN J E, ALPERT J S, GOLDBERG R J, et al. The epidemic of the 20 (th) century: coronary heart disease[J]. *Am J Med*, 2014, 127(9): 807-812. DOI: 10.1016/j.amjmed.2014.04.015.
- [2] 于雪芳, 张璋, 陈俊. 冠状动脉狭窄的 CT 功能评价技术进展[J]. *中华放射学杂志*, 2017, 51(4): 314-316. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2017.04.018.
- [3] 李震南, 吕滨, 王志强, 等. 冠状动脉 CT 造影对冠心病预防策略的影响[J]. *中华医学杂志*, 2015, 95(33): 2664-2667. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2015.33.003.
- [4] SONG F X, ZHOU J, ZHOU J J, et al. The diagnosis of coronary plaque stability by multi-slice computed tomography coronary angiography[J]. *J Thorac Dis*, 2018, 10(4): 2365-2376. DOI: 10.21037/jtd.2018.04.43.
- [5] 吕蓉, 王迪, 韩宇欣, 等. 双源 CT 锐利卷积核重建诊断钙化性冠状动脉狭窄的价值[J]. *实用放射学杂志*, 2017, 33(9): 1412-1415. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1671.2017.09.023.
- [6] MILLER J M, ROCHITTE C E, DEWEY M, et al. Diagnostic performance of coronary angiography by 64-row CT[J]. *N Engl J Med*, 2008, 359(22): 2324-2336. DOI: 10.1056/NEJMoa0806576.
- [7] 潘存雪, 古丽娜·阿扎提, 邢艳, 等. 冠状动脉 CT 单能量成像改善心肌射线硬化伪影的价值[J]. *中华放射学杂志*, 2015, 49(9): 679-684. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2015.09.009.
- [8] 赵艳红, 张晓文, 郝万庆, 等. 70 kV 管电压联合低剂量及低浓度对比剂 CCTA 中的应用研究[J]. *实用放射学杂志*, 2018, 34(3): 431-434. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1671.2018.03.028.
- [9] BEHRENDT F F, SCHMIDT B, PLUMHANS C, et al. Image fusion in dual energy computed tomography: effect on contrast enhancement, signal-to-noise ratio and image quality in computed tomography angiography[J]. *Invest Radiol*, 2009, 44(1): 1-6. DOI: 10.1097/RLI.0b013e31818c3d4b.
- [10] KROFT L J, DE R00S A, GELEIJNS J. Artifacts in ECG-synchronized MDCT coronary angiography[J]. *AJR*, 2007, 189(3): 581-591. DOI: 10.2214/AJR.07.2138.
- [11] YU L, LENG S, MCCOLLOUGH C H. Dual-energy CT-based monochromatic imaging[J]. *AJR*, 2012, 199(5 Suppl): S9-S15. DOI: 10.2214/AJR.12.9121.
- [12] PESSIS E, CAMPAGNA R, SVERZUT J M, et al. Virtual monochromatic spectral imaging with fast kilovoltage switching: reduction of metal artifacts at CT[J]. *Radiographics*, 2013, 33(2): 573-583. DOI: 10.1148/rg.332125124.
- [13] KUCHENBECKER S, FABY S, SAWALL S, et al. Dual energy CT: how well can pseudo-monochromatic imaging reduce metal artifacts? [J]. *Med Phys*, 2015, 42(2): 1023-1036. DOI: 10.1118/1.4905106.
- [14] SCHEFFEL H, STOLZMANN P, SCHLETT C L, et al. Coronary artery plaques: cardiac CT with model-based and adaptive-statistical iterative reconstruction technique[J]. *Eur J Radiol*, 2012, 81(3): e363-e369. DOI: 10.1016/j.ejrad.2011.11.051.
- [15] 王会霞, 吕培杰, 岳松伟, 等. 宽体探测器联合全模型实时迭代重建技术在腹部低辐射剂量扫描中的临床应用[J]. *中华医学杂志*, 2017, 97(45): 3567-3572. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2017.45.011.

(收稿日期: 2018-07-26; 修回日期: 2018-10-29)