

DOI:10.16781/j.CN31-2187/R.20210855

· 论 著 ·

320排CT超低管电压在体重指数 $\leq 30 \text{ kg/m}^2$ 患者冠状动脉血管成像中的应用

贾紫珺, 尹伟, 胡信心, 李佳余, 陆建平, 王敏杰*

海军军医大学(第二军医大学)第一附属医院放射诊断科, 上海 200433

[摘要] **目的** 探讨在320排CT上应用70 kV管电压、低造影剂用量、低造影剂流速的扫描方案对BMI $\leq 30 \text{ kg/m}^2$ 患者行冠状动脉CT血管成像检查的可行性。**方法** 连续纳入我院2021年1—4月BMI $\leq 30 \text{ kg/m}^2$ 、拟诊或确诊冠状动脉疾病的患者52例,均通过宽体探测器CT前瞻性心电门控轴位扫描模式采集数据。将52例患者随机分为两组:70 kV组(采用70 kV管电压及低造影剂用量和流速)和120 kV组(采用120 kV管电压及常规造影剂用量和流速)。两组均采用混合迭代算法重建图像。统计分析患者的年龄、体重、BMI、心率、造影剂用量及造影剂流速等,评估冠状动脉各节段血管的客观和主观图像质量,并分析比较两组的辐射剂量。**结果** 70 kV组患者造影剂用量及流速均低于120 kV组[(27.15 $\pm$ 3.70) mL vs (48.92 $\pm$ 5.08) mL、(2.71 $\pm$ 0.37) mL/s vs (4.50 $\pm$ 0.35) mL/s, P 均 <0.001]。两组患者的客观图像质量指标中冠状动脉平均CT值、信噪比及对比噪声比差异均无统计意义(P 均 >0.05),而70 kV组的图像噪声高于120 kV组[(31.50 $\pm$ 5.74) HU vs (28.26 $\pm$ 5.17) HU, $P=0.037$]。共770个冠状动脉节段纳入主观评估,2名观察者之间的图像主观评分一致性较好($Kappa$ 值=0.772);70 kV组与120 kV组冠状动脉平均评分及优良率差异均无统计学意义[(1.17 $\pm$ 0.38)分 vs (1.21 $\pm$ 0.43)分、100.00% (384/384) vs 98.96% (382/386), P 均 >0.05]。70 kV组有效辐射剂量、CT容积剂量指数与辐射剂量长度乘积均低于120 kV组[(0.80 $\pm$ 0.16) mSv vs (3.13 $\pm$ 0.67) mSv、(4.51 $\pm$ 0.98) mGy vs (17.36 $\pm$ 3.19) mGy、(57.32 $\pm$ 11.32) mGy·cm vs (223.61 $\pm$ 47.64) mGy·cm, P 均 <0.001]。**结论** 在320排CT上采用70 kV管电压对BMI $\leq 30 \text{ kg/m}^2$ 患者行冠状动脉血管成像检查是可行的,在亚毫希沃特条件下可获得满足临床诊断的图像,且较常规扫描方案降低了碘造影剂用量和流速。

[关键词] 冠状动脉疾病;冠状动脉计算机断层扫描血管成像;宽体探测器;造影剂;低管电压**[中图分类号]** R 543.3; R 816.2**[文献标志码]** A**[文章编号]** 2097-1338(2022)03-0246-06

Application of 320-slice CT ultra-low tube voltage in coronary angiography patients with body mass index $\leq 30 \text{ kg/m}^2$

JIA Zi-jun, YIN Wei, HU Xin-xin, LI Jia-yu, LU Jian-ping, WANG Min-jie*

Department of Radiology, The First Affiliated Hospital of Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200433, China

[Abstract] **Objective** To explore the feasibility of coronary artery computed tomography (CT) angiography in patients with body mass index (BMI) $\leq 30 \text{ kg/m}^2$ using 320-slice CT with 70 kV tube voltage and low contrast agent dose and flow rate. **Methods** Fifty-two consecutive patients with BMI $\leq 30 \text{ kg/m}^2$ and suspected or diagnosed coronary artery diseases were enrolled in our hospital from Jan. to Apr. 2021. The data were collected by wide detector CT prospective electrocardiographically-gated axial scan mode. All the patients were randomly divided into 2 groups: 70 kV group (using 70 kV tube voltage and low contrast agent dose and flow rate) and 120 kV group (using 120 kV tube voltage and conventional contrast agent dose and flow rate). In both groups, images were reconstructed using a hybrid iterative algorithm. Patients' age, weight, BMI, heart rate, amount of contrast agent and flow rate were statistically analyzed to evaluate the objective and subjective image quality of the vessels in each segment of the coronary arteries, and radiation doses of the 2 groups were analyzed and compared. **Results** The contrast agent dose and flow rate in the 70 kV group were significantly lower than those in the 120 kV group [(27.15 $\pm$ 3.70) mL vs (48.92 $\pm$ 5.08) mL, (2.71 $\pm$ 0.37) mL/s vs (4.50 $\pm$ 0.35) mL/s, both

[收稿日期] 2021-08-30**[接受日期]** 2022-01-06**[基金项目]** 国家重点研发计划(2016YFC0104610). Supported by National Key Research and Development Plan of China (2016YFC0104610).**[作者简介]** 贾紫珺, 初级技师. E-mail: 18703317079@163.com

*通信作者(Corresponding author). Tel: 021-31162157, E-mail: cjr.wangminjie@vip.163.com

$P < 0.001$). There were no significant differences in coronary mean CT values, signal to noise ratio or contrast to noise ratio between the 2 groups of patients in objective image quality measures (all $P > 0.05$), while the image noise of the 70 kV group was significantly higher than that of the 120 kV group ($[31.50 \pm 5.74] \text{ HU}$ vs $[28.26 \pm 5.17] \text{ HU}$, $P = 0.037$). A total of 770 coronary artery segments were included for the subjective assessment, and the image subjective rating agreement between the 2 observers was good ($Kappa = 0.772$). There were no significant differences in coronary artery subjective quality average score or excellent and good rate between 70 and 120 kV groups (1.71 ± 0.38 vs 1.21 ± 0.43 , 100.00% $[384/384]$ vs 98.96% $[382/386]$, both $P > 0.05$). The effective dose, CT volume dose index and dose-length product were significantly lower in the 70 kV group than those in the 120 kV group ($[0.80 \pm 0.16] \text{ mSv}$ vs $[3.13 \pm 0.67] \text{ mSv}$, $[4.51 \pm 0.98] \text{ mGy}$ vs $[17.36 \pm 3.19] \text{ mGy}$, $[57.32 \pm 11.32] \text{ mGy} \cdot \text{cm}$ vs $[223.61 \pm 47.64] \text{ mGy} \cdot \text{cm}$, all $P < 0.001$). **Conclusion** It is feasible to use 320-slice CT with 70 kV tube voltage for coronary angiography in patients with normal BMI. Under the condition of sub-mSv, images meeting the clinical diagnosis can be obtained, and the dose and flow rate of iodine contrast agent are greatly reduced compared with the conventional scan mode.

[**Key words**] coronary artery diseases; coronary computed tomography angiography; wide detector; contrast agents; low tube voltage

[Acad J Naval Med Univ, 2022, 43(3): 246-251]

心血管疾病是全球最常见的致残和死亡原因之一。冠状动脉计算机断层扫描血管成像(coronary computed tomography angiography, CCTA)作为一种非侵入性工具,可提供与有创冠状动脉造影相媲美的冠状动脉解剖、冠状动脉疾病分类和严重程度的高分辨率成像^[1]。随着CT设备硬件及软件的不更新,CT扫描技术也得到飞速发展。目前,CCTA成像不仅是诊断冠状动脉疾病的首选方案,也被越来越多的高端体检筛查纳入^[2]。如何进一步降低CCTA的X线辐射剂量及碘造影剂注射剂量是临床医师和患者最为关心的问题,也是目前医学影像技术研究的热点。在以往的70 kV管电压CCTA成像研究中,常采用双源CT^[3-5]进行扫描,而较少使用16 cm宽体探测器CT。本研究采用宽体探测器CT进行70 kV管电压CCTA成像,探讨BMI $\leq 30 \text{ kg/m}^2$ 患者采用“三低”扫描方案的可行性与临床价值。

1 资料和方法

1.1 研究对象 连续选择我院2021年1—4月拟诊或确诊冠状动脉疾病的患者。纳入标准: BMI $\leq 30 \text{ kg/m}^2$ 、年龄 ≥ 18 岁。排除标准: 冠状动脉严重钙化、冠状动脉支架植入或搭桥手术史、妊娠期或哺乳期、已知碘造影剂过敏、严重肝肾功能不全。采取简单随机分组的方式将52例患者分为70 kV组和120 kV组。依现行冠状动脉造影专家共识,入组患者检查前均监测心率,对心率较高者进行心率调控。本研究通过我院医学伦理委员会审

批(CHEC2020-164)。

1.2 仪器与方法 所有检查均在上海联影医疗科技股份有限公司宽体探测器CT扫描仪(型号: uCT960+)上完成,采用前瞻性心电门控轴位扫描模式,检查前于患者右肘正中静脉埋置20 G留置针,无硝酸甘油禁忌证者扫描前舌下含服硝酸甘油0.5 mg,患者取仰卧位,足先进,连接心电导联。依据心脏大小,选择合适的探测器宽度进行扫描,机架转速为0.25秒/圈。重建层厚为0.5 mm,层间距为0.25 mm。70 kV组采用70 kV管电压、240 mA管电流扫描,滤波函数采用Karl level 8,造影剂注射量(以含碘量计)为 $16 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{s})$; 120 kV组采用120 kV管电压、120 mA管电流扫描,滤波函数采用Karl level 7,造影剂注射量(以含碘量计)为 $25 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{s})$ 。造影剂注射时间均为10 s。碘造影剂选用碘帕醇注射液(含碘370 mg/mL,意大利Bracco公司)。采用造影剂团注追踪技术(bolus tracking technique)进行延迟扫描。通过联合使用冠状动脉最佳期相技术(Ephase)和冠状动脉运动伪影校正算法(CardioCapture)重建冠状动脉图像。对获得的图像进行容积重建、最大密度投影及曲面重建后处理。

1.3 图像分析 将所有数据传入R005版UWS后处理工作站(上海联影医疗科技股份有限公司),分析客观和主观图像质量。(1)临床图像客观评估指标。测量冠状动脉主要分支CT值和标准差(standard deviation, SD; 噪声)值,以及同一层面胸壁脂肪组织CT值与SD值,计算

冠状动脉信噪比与对比噪声比 (contrast to noise ratio, CNR)。信噪比 = $\text{CT}_{\text{冠状动脉}} / \text{SD}_{\text{冠状动脉}}$; $\text{CNR} = |\text{CT}_{\text{冠状动脉}} - \text{CT}_{\text{胸壁}}| / \text{SD}_{\text{冠状动脉}}$ [6]。(2) 临床图像主观评估指标。根据美国心脏病学会制定的冠状动脉分段标准 [7] 将冠状动脉分为 15 段: 右冠状动脉为 1~4 段, 左冠状动脉主干为第 5 段, 左冠状动脉前降支为 6~10 段, 左冠状动脉回旋支为 11~15 段。采用四分法对每例患者的冠状动脉分支进行质量评分: 1 分为血管显示良好, 边界清晰, 无搏动伪影或血管中断; 2 分为血管有轻度搏动伪影; 3 分为血管有中度搏动伪影; 4 分为血管显示不清, 或有严重搏动伪影。质量评分为 1~3 分的血管为可评价血管, 质量评分为 4 分的血管为不可评价血管 [8]。由 2 名高年资医师分别阅片, 结果不一致时通过协商讨论至达成一致意见。优良率定义为主观评分为 1 分与 2 分的患者占总体的百分比。

1.4 辐射剂量 记录计算机断层扫描容积剂量指数 (computed tomography volume dose index, CTDI_{vol}) 和辐射剂量长度乘积 (dose-length product, DLP)。计算有效辐射剂量 (effective dose, ED): $\text{ED} = \text{DLP} \times k$, 其中转换系数 k 为 0.014 [9]。

1.5 统计学处理 采用 SPSS 19.0 软件进行数据分析。正态性检验采用 Kolmogorov-Smirnov 检验, 方差齐性检验采用 Levene 检验, 对符合正态分布且方差齐的计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 组间比较采用独立样本 t 检验。计数资料以例数和百分数表示, 组间比较采用 χ^2 检验或 Fisher 确切概率法。图像质量主观评分的一致性评估采用 Kappa 检验: Kappa 值 ≥ 0.80 为一致性良好, $0.40 \sim < 0.80$ 为一致性较好, $0.20 \sim < 0.40$ 为一致性一般, < 0.20 为一致性较差。检验水准 (α) 为 0.05。

2 结果

2.1 组间一般资料及客观图像指标比较 共纳入 52 例冠状动脉疾病患者, 其中男 30 例、女 22 例, 年龄为 32~75 (59 ± 11) 岁, 70 kV 组与 120 kV 组各 26 例。两组间造影剂用量和流速差异均有统计学意义 (P 均 < 0.001), 70 kV 组造影剂用量较 120 kV 组减少了 44.50%、造影剂流速下降了 39.78%。70 kV 组的图像噪声高于 120 kV 组 ($P = 0.037$)。两组患者在年龄、体重、BMI、心率、冠状动脉平均 CT 值、信噪比及 CNR 等方面差异均无统计意义 (P 均 > 0.05)。见表 1。

表 1 两组患者一般资料及客观图像指标比较

Tab 1 Comparison of general data and objective image indexes between 2 groups

Index	70 kV group	120 kV group	t value	$n=26, \bar{x} \pm s$	
				t value	P value
Age/year	58.31 ± 11.06	59.46 ± 11.47	-0.369		0.713
Body weight/kg	69.04 ± 9.83	67.75 ± 10.89	0.448		0.656
Body mass index/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	24.58 ± 2.48	24.29 ± 2.73	0.400		0.691
Heart rate/ min^{-1}	62.38 ± 7.13	63.35 ± 8.09	0.455		0.651
Contrast agent dosage/mL	27.15 ± 3.70	48.92 ± 5.08	-17.664		< 0.001
Contrast agent flow rate/($\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.71 ± 0.37	4.50 ± 0.35	-17.851		< 0.001
Mean CT value of coronary artery/HU	409.24 ± 75.47	406.66 ± 56.33	0.140		0.890
Image noise (standard deviation)/HU	31.50 ± 5.74	28.26 ± 5.17	2.142		0.037
Signal to noise ratio	13.38 ± 3.43	14.93 ± 4.06	-1.484		0.144
Contrast to noise ratio	18.14 ± 4.07	19.28 ± 4.99	-0.900		0.372
CT volume dose index/mGy	4.51 ± 0.98	17.36 ± 3.19	-19.641		< 0.001
Dose-length product/($\text{mGy} \cdot \text{cm}$)	57.32 ± 11.32	223.61 ± 47.64	-17.315		< 0.001
Effective dose/mSv	0.80 ± 0.16	3.13 ± 0.67	-17.282		< 0.001

CT: Computed tomography; HU: Hounsfield unit.

2.2 组间主观图像指标比较 70 kV 组与 120 kV 组不同主观评分的典型图像见图 1。52 例患者均完成 CCTA 检查, 血管变异及冠状动脉优势类型不

同, 部分患者因冠状动脉分支过于纤细或消失而不纳入研究, 最终共 770 个冠状动脉节段纳入主观评估。2 名观察者之间的图像主观评分一致性较好

($Kappa$ 值=0.772)。70 kV 组右冠状动脉主干的主观质量评分低于 120 kV 组 ($P=0.024$)，而两

组左冠状动脉前降支、左冠状动脉回旋支的主观质量评分及优良率均相近 (P 均 >0.05)。见表 2。

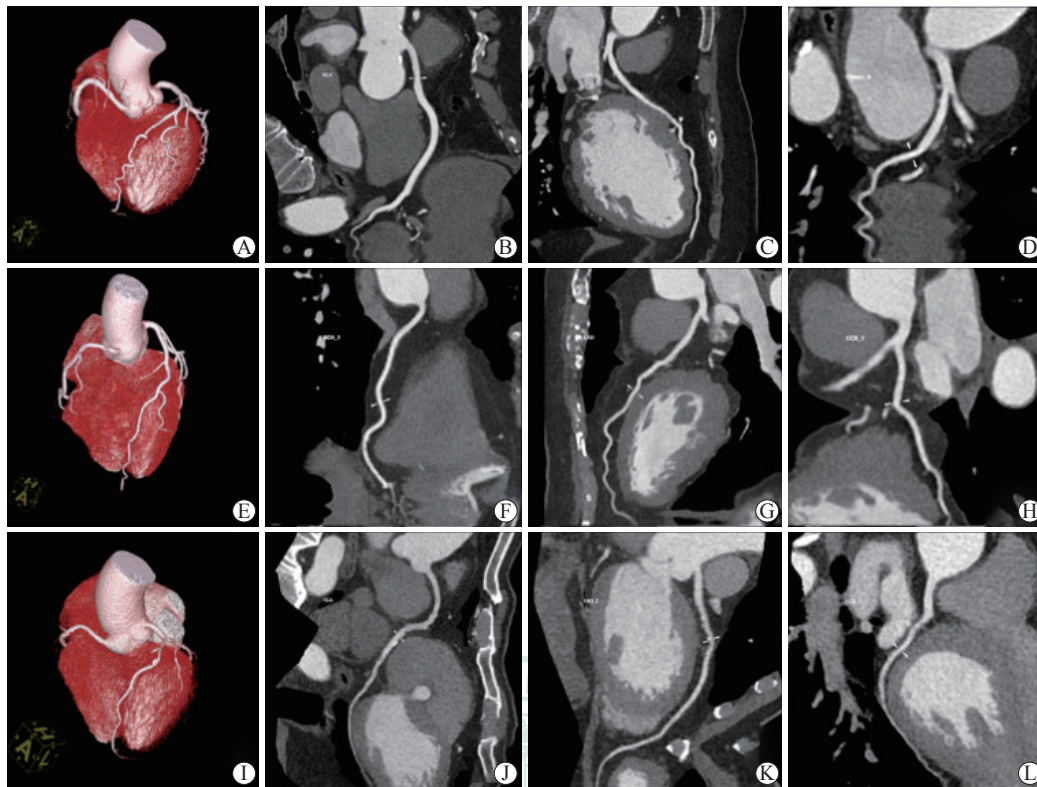


图1 CCTA 容积再现图像与 RCA、LAD 和 LCX 曲面重建图像

Fig 1 Volume rendering images of CCTA and curved planar reformation images of RCA, LAD and LCX

A-D: Female, 68 years old, 56 kg, BMI=22.43 kg/m^2 , 70 kV imaging, coronary artery branch boundary is clear, no motion artifacts, the score is 1. E-H: Female, 55 years old, 64 kg, BMI=22.15 kg/m^2 , 120 kV imaging, coronary artery branch boundary is clear, no motion artifacts, the score is 1. I-L: Male, 65 years old, 80 kg, BMI=26.12 kg/m^2 , 70 kV imaging, coronary artery branch boundary is clear, no motion artifacts, the score is 1. A, E, I: Volume rendering image; B-D, F-H, J-L: Curved planar reformation images in different directions. CCTA: Coronary computed tomography angiography; RCA: Right coronary artery; LAD: Left anterior descending branch; LCX: Left circumflex branch; BMI: Body mass index.

表2 两组患者图像的主观评分比较

Tab 2 Comparison of subjective scores of images between 2 groups

Index	Score	70 kV group	120 kV group	Statistic	P value
Right coronary artery, % (n/N)	1	92.31 (96/104)	80.77 (84/104)	$\chi^2=5.943$	0.024
	2	7.69 (8/104)	17.31 (18/104)		
	3	0	1.92 (2/104)		
	4	0	0		
Left anterior descending branch, % (n/N)	1	81.17 (125/154)	81.29 (126/155)	$\chi^2=0.001$	1.000
	2	18.83 (29/154)	17.42 (27/155)		
	3	0	1.29 (2/155)		
	4	0	0		
Left circumflex branch, % (n/N)	1	76.98 (97/126)	78.74 (100/127)	$\chi^2=0.113$	0.764
	2	23.02 (29/126)	21.26 (27/127)		
	3	0	0		
	4	0	0		
Average score, $\bar{x} \pm s$ (n)		1.17 $\pm$ 0.38 (384)	1.21 $\pm$ 0.43 (386)	$t=-1.212$	0.226
Excellent and good rate, % (n/N)	1+2	100.00 (384/384)	98.96 (382/386)	Fisher exact test	0.124

2.3 组间辐射剂量比较 两组间ED差异有统计学意义($P<0.001$), 70 kV组ED较120 kV组减少了74.44%。70 kV组CTDI_{vol}与DLP均低于120 kV组, 差异均有统计学意义(P 均 <0.001)。见表1。

3 讨论

本研究采用宽体探测器CT对BMI ≤ 30 kg/m²的受检者进行70 kV管电压CCTA检查, 与常规120 kV管电压相比, 70 kV管电压检查在满足诊断要求的前提下, 可降低ED、造影剂用量及造影剂流速。采用70 kV条件实现了CCTA“三低”成像, 对冠心病的筛查、诊断、治疗和随访有重要意义。

CT“三低”扫描技术指在扫描过程中采用低辐射剂量、低造影剂用量及低造影剂流速的方案^[10]。近年来, 随着X线辐射剂量的规范使用与管理, 如何优化辐射剂量一直是医疗行业管理机构与医学影像相关研究者的研究重点^[11]。目前常用降低CCTA辐射剂量的方案有缩短扫描长度、降低管电压、降低管电流和采用基于管电流调制技术的回顾性心电门控扫描技术、前瞻性心电门控轴位扫描技术或大螺距扫描技术、迭代重建技术、运动矫正算法^[6,12-16]。其中, 最有效的方案是降低管电压及采用前瞻性心电门控扫描技术或大螺距扫描技术。降低CT管电压可增加组织CT值与图像噪声, 选择合适的重建参数、适当的造影剂量及注射速度均可适当改善图像质量。在Chen等^[17]的研究中, 采用16 cm宽体探测器CT联合高级迭代算法对BMI ≤ 23 kg/m²的患者进行了70 kV管电压CCTA检查, 获得满意图像, 与100 kV扫描方案相比, 辐射剂量 $[(0.43\pm 0.20)$ mSv]降低了75.3%, 造影剂剂量 $[(22.46\pm 2.94)$ mL]减少了42.4%。本研究ED为 (0.80 ± 0.16) mSv, 主要原因是纳入检查的患者BMI较之前的研究高。梁蓉等^[18]在第3代双源CT上将“三低”技术应用于BMI ≤ 30 kg/m²的CCTA检查, 获得了较好的图像质量, 本研究结果与之相似。但该研究中的扫描方案及造影剂注射方案只适用于前瞻性心电门控大螺距扫描模式, 对心率的要求较高(心率 <75 min⁻¹)。梁俊福等^[15]采用宽体探测器CT使用0.28秒/圈的转速可实现高心率(≥ 80 min⁻¹)患者单心电周期前瞻性心电门控CCTA检查, 其在降低辐射剂量的同时能保证图像质量。本研究中采用的是640层高端CT, 探测

器宽度达到16 cm, 机架最快转速可达0.25秒/圈, 单扇区时间分辨率进一步提高, 在高心率及心律不齐患者的检查中更具优势。

碘造影剂的使用是CCTA检查中最关键的环节之一, 在常规120 kV管电压条件下, 造影剂注射速率较高(可达5.0 mL/s), 对于血管条件较差的患者存在造影剂外渗风险。此外, 造影剂可导致造影剂肾病, 降低造影剂用量也可使患者受益^[19]。联合低管电压技术优化造影剂注射方案是降低造影剂用量及流速的有效方法, 但在造影剂的使用中差异较大。如曹剑等^[14]采用4.0 mL/s的流速注射32 mL碘造影剂(含碘370 mg/mL)进行70 kV管电压CCTA检查, 其冠状动脉开口处CT值达700 HU; 而梁蓉等^[18]采用3.0 mL/s的流速注射20 mL碘造影剂(含碘370 mg/mL)进行70 kV管电压CCTA检查, 其冠状动脉开口处CT值约为430 HU。该方案适用范围较窄。本研究采用基于体重的造影剂量率[以含碘量计, 16 mg/(kg·s)]的个体化注射方案, 持续注射10 s碘造影剂^[17], 在降低造影剂用量的同时也避免了患者的个体差异, 用药更合理。

综上所述, 对于BMI ≤ 30 kg/m²的冠状动脉疾病患者, 在宽体探测器CT上使用70 kV管电压行CCTA检查时可采用低造影剂用量、低造影剂流速的方案。通过此方法获得的图像质量与常规120 kV管电压相近。

本研究存在以下不足之处: 在造影剂用量的计算中主要参考患者体重, 一些矮胖型患者冠状动脉CT值会偏低, 而瘦高型患者冠状动脉CT值会偏高。下一步工作将进一步优化造影剂用量的计算方案。由于采用了低管电压进行成像, X射线能量较低, 不适宜肥胖患者、冠状动脉严重钙化及冠状动脉支架植入术后患者的成像。

[参考文献]

- [1] SHUAI T, DENG L, PAN Y, LI W, LIAO K, LI J, et al. Free-breathing coronary CT angiography using 16-cm wide-detector for challenging patients: comparison with invasive coronary angiography[J/OL]. Clin Radiol, 2018, 73: 986.e1-986986.e6. DOI: 10.1016/j.crad.2018.06.023.
- [2] SLIM A M, EMILIO F, CHEEZUM M K, PARSONS I T, CHRISTOPHER M, BILLY C, et al. The role of cardiovascular CT in occupational health assessment for coronary heart disease: an expert consensus

- document from the Society of Cardiovascular Computed Tomography (SCCT)[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2021, 15: 290-303.
- [3] 向春林, 骆磊, 胡珊, 邹乾, 舒红格, 胡军武, 等. 第三代双源CT冠状动脉、头颈动脉一站式CT血管成像: 低剂量技术的应用价值[J]. *放射学实践*, 2020, 35: 1610-1617.
- [4] 徐向阳, 乔英, 姚楠. Force CT 70 kV联合 270 mg I/mL 低浓度碘克沙醇对比剂在冠状动脉CT造影检查中的初步应用[J]. *实用医学影像杂志*, 2019, 20: 352-355.
- [5] 曹希明, 郑君惠, 张静, 王振邦. 双源CT大螺距、70 kV管电压结合迭代算法低辐射低对比剂CCTA研究[J]. *医学影像学杂志*, 2019, 29: 1694-1699.
- [6] 易妍, 曹剑, 林路, 孔令燕, 江舒, 李潇, 等. 第3代双源CT 70 kV大螺距扫描冠状动脉CT血管成像在不同体质量指数患者中的应用[J]. *中国医学科学院学报*, 2017, 39: 42-48.
- [7] AUSTEN W G, EDWARDS J E, FRYE R L, GENSINI G G, GOTT V L, GRIFFITH L S, et al. A reporting system on patients evaluated for coronary artery disease. Report of the Ad Hoc Committee for Grading of Coronary Artery Disease, Council on Cardiovascular Surgery, American Heart Association[J]. *Circulation*, 1975, 51(4 Suppl): 5-40.
- [8] 刘卓, 王征, 洪楠, 张卓璐. 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[J]. *放射学实践*, 2019, 34: 984-988.
- [9] ANDREINI D, PONTONE G, MUSHTAQ S, MANCINI M E, CONTE E, GUGLIELMO M, et al. Image quality and radiation dose of coronary CT angiography performed with whole-heart coverage CT scanner with intra-cycle motion correction algorithm in patients with atrial fibrillation[J]. *Eur Radiol*, 2018, 28: 1383-1392.
- [10] 李万江, 袁元, 李真林, 余建群. “三低”剂量与图像重建算法在CT血管成像应用中的研究进展[J]. *中国医疗设备*, 2020, 35: 82-86.
- [11] 王森, 肖志清, 王艳强, 郭晗, 冀书颖, 余建明. 合理应用X射线检查 优化辐射剂量[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2019, 39: 1-5.
- [12] 中华医学会放射学分会心胸学组.《中华放射学杂志》心脏冠状动脉多排CT临床应用指南写作专家组. 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: 732-743.
- [13] 尹伟, 王铁功, 许兵, 叶风平, 王敏杰. 回顾性心电门控螺旋CT扫描模式下单扇区重建对图像质量的改善作用[J]. *第二军医大学学报*, 2018, 39: 499-503.
- YIN W, WANG T G, XU B, YE F P, WANG M J. Single cycle reconstruction technique improves image quality with retrospectively electrocardiogram-gated spiral acquisition mode[J]. *Acad J Sec Mil Med Univ*, 2018, 39: 499-503.
- [14] 曹剑, 易妍, 王怡宁, 林路, 王明, 孔令燕, 等. 70 kV超低管电压低对比剂用量冠状动脉CTA研究[J]. *放射学实践*, 2014, 29: 589-592.
- [15] 梁俊福, 王辉, 徐磊, 范占明, 晏子旭, 杨琳. 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: 108-113.
- [16] TAN S K, YEONG C H, RAJA AMAN R R A, NG K H, ABDUL AZIZ Y F, CHEE K H, et al. Low tube voltage prospectively ECG-triggered coronary CT angiography: a systematic review of image quality and radiation dose[J]. *Br J Radiol*, 2018, 91: 20170874. DOI: 10.1259/bjr.20170874.
- [17] CHEN Y H, LIU Z T, LI M, YU Y, JIA Y J, MA G M, et al. Reducing both radiation and contrast doses in coronary CT angiography in lean patients on a 16-cm wide-detector CT using 70 kVp and ASiR-V algorithm, in comparison with the conventional 100-kVp protocol[J]. *Eur Radiol*, 2019, 29: 3036-3043.
- [18] 梁蓉, 张璋, 李锋坦, 姜英健, 华明辉, 张泽伟, 等. 第三代双源CT冠状动脉成像三低扫描方案的初步经验[J]. *放射学实践*, 2017, 32: 378-382.
- [19] NIV G, COSTA M, KICAK P, RICHMAN K. Vascular extravasation of contrast medium in radiological examinations: university of California San Diego Health System Experience[J]. *J Patient Saf*, 2014, 10: 105-110.
- [本文编辑] 杨亚红