

320排容积CT冠状动脉减影技术在临床应用中的影响因素分析

黄超, 万维佳, 姚宇环, 夏黎明, 黄文华

华中科技大学同济医学院附属同济医院 放射科, 湖北 武汉 430030

[摘要] 目的 探讨320排CT冠状动脉减影技术, 在冠状动脉钙化狭窄患者扫描过程中图像质量影响因素分析。方法 回顾性分析2019年1月至8月在我院进行冠状动脉CT血管成像(Coronary Computed Tomography Angiography, CTA)检查的患者586例, 进行冠状动脉减影。由两名具有丰富诊断经验的影像学医师对减影的图像质量从1分(效果最差)到6分(效果最好)进行主观评分, 并记录患者基础特征、心率、心脏解剖结构等参数。采用Spearman秩相关分析各因素与冠状动脉减影图像质量评分之间的相关性, 对具有相关性的因素采用二元Logistics回归法进行分析。结果 Logistics回归分析显示获得高质量减影图像的影响因素是一致的。BMI (OR1=0.76, 95%CI: 0.61-0.95; OR2=0.71, 95%CI: 0.57-0.89) 是获得高质量冠状动脉减影图像的独立保护因素患者; 平均心率 (OR1=1.14, 95%CI: 1.05-1.24; OR2=1.22, 95%CI: 1.13-1.32)、双期心率差 (OR1=1.54, 95%CI: 1.11-2.12; OR2=1.43, 95%CI: 1.18-1.73) 是其独立危险因素。结论 平均心率越低、双期扫描心率差越小, 有利于获得高质量的冠状动脉减影图像; 而身高体重指数越大的患者有利于获得高质量冠状动脉减影图像, 为冠状动脉减影技术临床应用提高参考。

[关键词] 冠状动脉钙化狭窄; 冠状动脉CTA; 冠状动脉减影; 图像质量

The Influencing Factors Analysis for the Application of Coronary Subtraction Technology in 320-Row CT

HUANG Chao, WAN Weijia, YAO Yuhuan, XIA Liming, HUANG Wenhua

Department of Radiology, Tongji Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430030, China

Abstract: Objective To explore the 320-row CT coronary subtraction technique and analyze the factors affecting the image quality during the scanning process of patients with coronary artery calcification and stenosis. **Methods** From January to August 2019, 586 patients who underwent coronary artery CTA examination in our hospital were analyzed retrospectively, and performed with coronary artery subtraction. Two imaging physician with rich diagnostic experience subjectively scored the image quality of subtraction from 1 (the worst effect) to 6 (the best effect), and recorded the patient's basic characteristics, heart rate, cardiac anatomy and other parameters. Spearman rank correlation was used to analyze the correlation between each factor and the coronary artery subtraction image quality score, and the correlated factors were analyzed by binary Logistics regression. **Results** Binary logistics regression indicated that the influencing factors of both two group were the same. Among those, BMI (OR1=0.76, 95%CI: 0.61-0.95; OR2=0.71, 95%CI: 0.57-0.89) was independent protective factor of coronary artery subtraction, and average heart rate (OR1=1.14, 95%CI: 1.05-1.24; OR2=1.22, 95%CI: 1.13-1.32) and double phase heart rate difference (OR1=1.54, 95%CI: 1.11-2.12; OR2=1.43, 95%CI: 1.18-1.73) were independent risk factors. **Conclusion** For all patients, the lower average heart heart rate, the smaller difference between two scan phase and greater BMI were beneficial to obtain high-quality coronary artery subtraction. These results will be helpful for the clinical application of coronary artery subtraction technology.

Key words: coronary artery calcification and stenosis; coronary computed tomography angiography; coronary artery subtraction; image quality

[中图分类号] R541.4

doi: 10.3969/j.issn.1674-1633.2020.10.028

[文献标识码] A

[文章编号] 1674-1633(2020)10-0126-05

引言

随着社会的不断发展, 人口老龄化的问题日渐凸显, 心血管疾病的发病率和死亡率也逐渐升高。在全球范围内,

心血管疾病成为人类健康的主要威胁之一^[1-2]。冠状动脉疾病是一种常见的以冠状动脉粥样硬化引起血管腔狭窄导致心肌缺血、坏死为特征的心血管疾病, 其突发死亡率高, 是威胁人类健康的几大疾病之一^[3]。因此早发现、早治疗对于冠状动脉疾病的治疗及预后尤为关键。

收稿日期: 2020-07-24
作者邮箱: 492705943@qq.com

因冠状动脉 CT 血管成像 (Coronary Computed Tomography Angiography, CTA) 具有良好的密度和空间分辨率、安全无创、快捷方便以及三维成像等优势, 已成为临床上冠状动脉疾病的常规检查手段^[4]。然而, 在存在严重钙化斑块时, 由于钙化斑块在扫描过程中产生的菜花状伪影往往影响诊断医师的判断, 从而高估了冠状动脉血管腔的狭窄程度, 导致出现假阳性, 降低了冠状动脉 CTA 诊断的准确性^[5-6]。据国外研究报道, 冠状动脉 CT 检查中有 38.7% 的重度钙化斑块由于钙化伪影导致无法诊断狭窄程度^[7]。冠状动脉减影技术是将增强的冠状动脉 CTA 与平扫的钙化积分数据, 进行整体基于像素网格图模型的可变形对位和局部钙化的刚性对位算法进行配准, 然后再相减的一种后处理技术。通过两次扫描数据相减消除增强相中的钙化斑块和伪影, 然后通过曲面重建对钙化狭窄进行更加精确的评估^[8]。根据国内外文献报道, 320 排 CT 的冠状动脉减影技术能够有效克服此类钙化/硬化伪影, 提高诊断的准确性^[9]。想要获得高质量的减影图像, 增强期冠状动脉 CTA 与平扫期钙化积分数据进行精准的对位、配准是关键。因此, Yoshioka 等^[10]通过将冠状动脉平扫期扫描置于增强扫描之后, 缩短了整体扫描时间, 患者一次憋气扫描完成, 然而这种方法的缺点在于残留的碘对比剂导致平扫期无法准确计算钙化积分。Kidoh 等^[11]研究使用小剂量测试法, 将两次扫描时间缩短在 20 s 以内, 患者一次憋气扫描完成; 但是小剂量测试法增加了对比剂注射量。因此, 传统的“两次憋气”扫描方式极大降低了患者长时间憋气扫描的要求, 具有最大化的应用价值。由于个体化差异, “两次憋气”扫描获得的冠状动脉减影图像质量受到诸多因素的影响^[10]。本研究主要分析患者体型 (身高、体重、BMI)、心率 (平均心率、心率波动范围、双期心率差)、心脏解剖结构 (心影左横径、心影右横径、心胸比率) 等因素对冠状动脉减影图像质量的影响, 为临床工作提供参考意见。

1 资料与方法

1.1 病例资料

连续收集了 2018 年 1 月至 6 月在本院佳能 320 排 CT 行冠状动脉 CTA 检查的患者 586 例, 男性 350 例 (59.72%), 女性 236 例 (40.27%), 平均年龄 (57.90 ± 12.34) 岁。纳入标准: 临床诊断或疑似冠心病患者。排除标准: ① 肾功能异常 (血清肌酐清除率 $<60 \mu\text{mol/L}$); ② 对碘对比剂过敏或有其他严重过敏史; ③ 呼吸无法自主配合检查的患者和妊娠期妇女。本研究经院伦理委员会批准。

1.2 CT 扫描及冠状动脉减影方法

采用佳能 320 排 CT, $0.5 \text{ mm} \times 320$ 排宽体探测器, 前瞻性心电门控监测方式进行扫描。扫描过程包括钙化积分平扫和冠状动脉 CTA 扫描, 分别两次屏气完成。冠状动脉

CTA 扫描时, 经肘正中静脉注射非离子型碘对比剂, 采用手动触发方式进行扫描, 对比剂的注射剂量根据患者的身高、体重, 通过公式: $\text{对比剂体积} = \frac{\text{身高} + \text{体重} - 100}{2} \times \text{系数}$ 计算得到。选用典迈伦 (400 mg/ml) 对比剂, 系数为 0.7, 对比剂流速为 $S=V/10 \text{ ml/s}$ ^[12]。采用佳能 (AIDR 3D) 迭代重建技术, 重建容积数据图像层厚 0.5 mm, 重建间隔 0.25 mm, 软组织重建使用心脏 CTA 的重建函数 FC43。使用佳能公司研发的基于像素网格图模型的可变形对位和局部钙化的刚性对位算法, 将挑选出来的冠状动脉 CTA 特定时相的容积数据和钙化积分特定时相的容积数据进行配准, 再由后处理软件进行减影, 保存减影后的容积数据, 从而将钙化斑块从增强期图像中减去, 获得减影后图像 (图 1)。

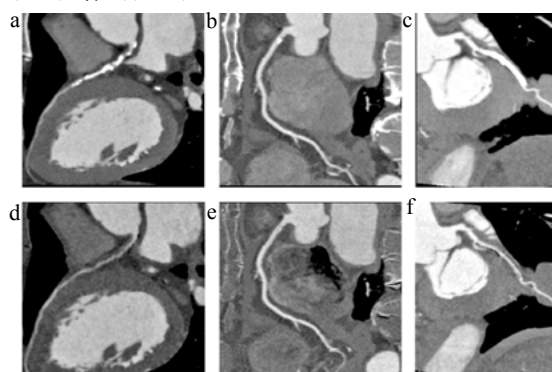


图1 冠状动脉血管成像及其减影曲面重建图

注: a. 左前降支 CT 血管成像; b. 左前降支冠脉减影, 评分 6 分; c. 右主干 CT 血管成像; d. 右主干冠脉减影, 评分 6 分; e. 左旋支 CT 血管成像; f. 左旋支冠脉减影, 评分 6 分。

1.3 图像质量评价

长期以来, 数字减影技术 (Digital Subtraction Angiography, DSA) 一直是冠状动脉血管诊治的金标准。随着宽体探测器 CT 的出现及软件的进步, 根据冠状动脉减影技术对位、配准的原理, 在一定条件下, 能完全满足血管内狭窄的精准诊断 (图 2)。根据冠状动脉减影技术对位、配准的原理, 设计 6 分法评分标准 (表 1), 由 2 名有 10 年工作经验的放射科医师对冠状动脉 CTA 减影后图像以盲法进行评分, 通过心电门控监测系统动态记录患者扫描过程中的心率值^[13]。其中平均心率是指整个检查过程中的平均心率, 心率波动范围是指整个扫描过程中的心率波动最大值, 双期心率差是指平扫期和增强期扫描过程中平均心率差值的绝对值。利用定量测量工具在冠状平面定位像测定心脏解剖结构相关参数, 包括心影做横径、心影右横径、胸廓最大直径、心胸比率。其中心影左横径是指心影左缘最突出点至胸廓中线的垂直距离, 心影右横径是指心影右缘最突出点至胸廓中线的垂直距离, 心影最大径是指心影左横径与心影右横径之和, 心胸比率是心影最大径与胸廓最大径之比。

1.4 统计学分析

利用 SPSS 21.0 软件进行统计学分析。采用 Kappa 一

表1 减影图像质量评分标准(6分法)

评分	评分标准
1	扫描范围内:胸椎椎体、肋骨及软组织、心肌组织及各腔室、胸主动脉、二尖瓣、三尖瓣、肺动脉瓣、主动脉瓣、冠状动脉主干、右冠主干及其分支、前降支及其分支、旋支及其分支,减影效果差。
2	扫描范围内:胸椎椎体、肋骨及软组织可减影;心肌组织及各腔室、胸主动脉、二尖瓣、三尖瓣、肺动脉瓣、主动脉瓣、冠状动脉主干、右冠主干及其分支、前降支及其分支、旋支及其分支,减影效果差。
3	扫描范围内:胸椎椎体、肋骨及软组织可减影;心肌组织及各腔室、胸主动脉、二尖瓣、三尖瓣、肺动脉瓣、主动脉瓣减影效果好;冠状动脉主干、右冠主干及其分支、前降支及其分支、旋支及其分支,减影效果差。
4	扫描范围内:胸椎椎体、肋骨及软组织减影效果好;心肌组织及各腔室、胸主动脉、二尖瓣、三尖瓣、肺动脉瓣、主动脉瓣减影效果好;冠状动脉主干减影效果好;右冠主干及其分支、前降支及其分支、旋支及其分支,其中仅一支血管减影效果好。
5	扫描范围内:胸椎椎体、肋骨及软组织减影效果好;心肌组织及各腔室、胸主动脉、二尖瓣、三尖瓣、肺动脉瓣、主动脉瓣减影效果好;冠状动脉主干减影效果好;右冠主干及其分支、前降支及其分支、旋支及其分支,其中任意两支血管减影效果好。
6	扫描范围内:胸椎椎体、肋骨及软组织减影效果好;心肌组织及各腔室、胸主动脉、二尖瓣、三尖瓣、肺动脉瓣、主动脉瓣减影效果好;冠状动脉主干减影效果好;右冠主干及其分支、前降支及其分支、旋支及其分支,各支血管减影效果均好。

致性检验评估两位医师评分的一致性。Kappa 值小于 0.4 表示一致性差, 0.4~0.75 表示一致性较好, 大于 0.75 表示一致性好。最终的减影效果评分为两位医师评分的算术平均值。Kolmogorov-Smirnov 检验计量资料是否符合正态分布, 正态分布资料采用均数 \pm 标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示。计数变量(性别)以构成比表示。使用 Spearman 相关系数进行相关性分析, 具有相关性的因素采用二元非条件 Logistics 回归的逐步引入-剔除法进行影响因素分析(结果用风险比 OR 和 95%CI 表示)。高质量图像(评分=6 分)赋值为 0, 评分 < 6 分赋值为 1。Hosmer and Lemeshow Test 检验 Logistics 回归模型的拟合度。评分 $P < 0.05$ 被认为具有统计学差异。

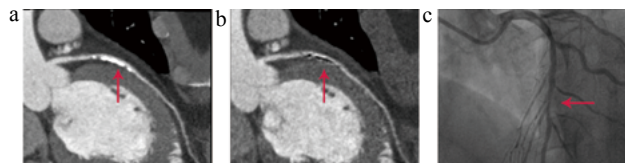


图2 冠状动脉血管减影前后与DSA(金标准)对照

注: a. 冠状动脉血管钙化狭窄曲面重建图; b. 冠状动脉血管钙化狭窄减影曲面重建图; c. 冠状动脉血管钙化狭窄诊断金标准 DSA。

2 结果

2.1 基本情况

586 例患者在我院成功完成冠状动脉 CTA 检查, 完成三维重建和冠状动脉减影。其中男性 350 例(59.73%)、女性 236 例(40.27%), 年龄(57.90 ± 12.34)岁, BMI 为(23.40 ± 3.61) kg/m^2 , 心率(67.24 ± 12.60)次/min, 心率波动范围(12.89 ± 10.27)次/分, 心影左横径(93.04 ± 24.80) mm, 心影右横径(43.43 ± 11.67) mm, 胸廓最大横径(259.82 ± 39.11) mm, 心胸比率(0.55 ± 0.12), 总有效辐射剂量(4.10 ± 1.10) mSV。两位医师对减影质量评

分的一致性较好, Kappa=0.71。

2.2 影响因素与冠状动脉减影图像质量评分相关性分析

Spearman 秩相关分析各因素与冠状动脉减影后的图像质量评分之间的相关性。整体而言, 体重、BMI、心率波动范围、平均心率、双期心率差、心影左横径、心胸比率等因素均与冠状动脉减影图像质量评分具有相关性(表3)。其中心率范围($r=-0.52, P < 0.001$)、平均心率($r=-0.55, P < 0.001$)、双期心率差($r=-0.32, P < 0.001$)与减影图像质量评分呈明显的负相关, 统计学差异显著; 体重($r=0.19, P < 0.001$)、BMI($r=0.14, P < 0.001$)、心影左横径大小($r=0.20, P < 0.001$)、心胸比率($r=0.13, P=0.02$)与减影图像质量评分呈正相关。

根据患者钙化积分, 将患者分为轻度钙化组(钙化积分 < 300)和重度钙化(钙化积分 ≥ 300), 分析在轻度钙化和重度钙化患者中, 各因素与冠状动脉减影图像质量评分之间的相关性(表2)。轻度钙化组($n=208$), 男性比率为 41.83% ($n=87$), 女性 58.17% ($n=121$), 评分(3.90 ± 1.90); 重度钙化组($n=378$), 男性比率为 40.21% ($n=152$), 女性 59.79% ($n=226$), 评分(4.13 ± 1.73)。轻度钙化患者中, 体重($r=0.25, P < 0.001$)、BMI($r=0.24, P < 0.001$)、心率范围($r=-0.51, P < 0.001$)、平均心率($r=-0.53, P < 0.001$)、双期心率差($r=-0.39, P < 0.001$)、心影左横径($r=0.28, P < 0.001$)、心胸比率($r=0.22, P < 0.001$)等因素与冠状动脉减影图像质量评分之间具有相关性; 重度钙化患者中体重($r=0.13, P=0.01$)、心率范围($r=-0.51, P < 0.001$)、平均心率($r=-0.55, P < 0.001$)、双期心率差($r=-0.29, P < 0.001$)、心影左横径($r=0.16, P < 0.001$)等因素与冠状动脉减影图像质量评分具有相关性。

2.3 高质量减影图像影响因素Logistics回归分析

高质量影像是精确诊断的基础。将相关分析中具有统计学意义的因素纳入 Logistics 回归模型, 采用逐步向前法分析获得高质量(评分为 6 分)的减影图像的影响因素(表3)。

Omnibus 系数检验显示,轻度钙化组($\chi^2=33.33$, $P<0.001$)和重度钙化组($\chi^2=76.14$, $P<0.001$)模型检验均有统计学意义。Hosmer and Lemeshow Test 检验显示:轻度钙化组($\chi^2=3.49$, $P=0.90$)和重度钙化组($\chi^2=2.84$, $P=0.94$)均没有统计学差异,提示模型拟合良好。结果显示,轻度钙化组和重度钙化组高质量冠状动脉减影图像质量影响因素是一致的。BMI (OR1=0.76, 95%CI:0.61-0.95; OR2=0.71, 95%CI:0.57-0.89)是获得高质量冠状动脉减影图像的独立保护因素;平均心率 (OR1=1.14, 95%CI: 1.05-1.24; OR2=1.22, 95%CI: 1.13-1.32)、双期心率差 (OR1=1.54, 95%CI: 1.11-2.12; OR2=1.43, 95%CI: 1.18-1.73)是获得高质量减影图像的独立危险因素。

表 2 影响因素与图像质量评分相关性分析

影响因素	总体		钙化积分 < 300		钙化积分 \geq 300	
	相关系数	P 值	相关系数	P 值	相关系数	P 值
年龄	0.01	0.81	0.06	0.43	-0.03	0.58
身高	0.09	0.05	0.09	0.21	0.10	0.06
体重	0.17	0.00 ^b	0.25	0.00 ^b	0.13	0.01 ^a
BMI	0.14	0.00 ^b	0.24	0.00 ^b	0.08	0.14
心率	-0.52	0.00 ^b	-0.51	0.00 ^b	-0.51	0.00 ^b
平均	-0.55	0.00 ^b	-0.53	0.00 ^b	-0.55	0.00 ^b
双期	-0.32	0.00 ^b	-0.39	0.00 ^b	-0.29	0.00 ^b
心影	0.06	0.18	0.07	0.44	0.07	0.24
心影	0.20	0.00 ^b	0.28	0.00 ^b	0.16	0.00 ^b
心胸	0.13	0.02 ^a	0.22	0.02 ^a	0.08	0.22

注: ^a $P < 0.05$ 差异显著; ^b $P < 0.01$ 差异极显著。

3 讨论

近年来,冠心病的发病率越来越高,严重影响了人民的身体健康和生活质量,甚至对患者的生命安全造成了极大的威胁。随着 CT 技术的不断发展,冠状动脉 CTA 因其无创、快捷方便、特异性高等优势而得到广泛应用。但是在“精准医学,影像先行”的时代背景下,CT 扫描伪影一直是冠状动脉检查过程中不可忽视的问题。存在钙化斑块时,钙化斑块产生的菜花状伪影常常影响影像医师对血管狭窄的精准判断,导致出现高估了冠状动脉血管狭窄程度的情况^[14]。容积 CT 数字减影技术是一种将常规冠状动脉

扫描过程中的增强相与钙化积分相进行配准、CT 值相减的一种后处理技术,可以消除增强相图像中的钙化斑块及其伪影,从而重建出没有钙化伪影的三维血管图像,准确的评估血管狭窄程度。根据国内外文献报道,冠状动脉容积 CT 数字减影技术可以克服钙化伪影,有效降低钙化伪影导致的假阳性,明显提高诊断的准确性^[15]。然而,对于传统的钙化积分期和增强期“两次憋气”扫描方式,两期相精准的配位、完全消除钙化斑块及其伪影,是获得高质量的冠状动脉减影图像从而提高诊断准确性的关键。据文献报道,“两次憋气”扫描方式获得的冠状动脉数据进行减影错配率高达 53%^[8]。冠状动脉 CTA 除了受机器自身时间分辨率影响之外,由于冠状动脉检查的特殊性,患者体型、呼吸运动及其节律、心脏自主搏动、心脏及其周围解剖结构等因素也会影响冠脉检查图像质量,从而影响图像后处理,影响冠状动脉减影图像质量^[16]。

冠状动脉图像配准算法的原理是:首先利用基于像素可变形网格模型进行宏观的整体配准,以消除患者扫描过程中呼吸运动及心脏搏动的影响;然后进行局部的刚性对位配准。在本研究中,我们基于配准原理设计了根据从宏观到微观配准效果的 6 分法评分标准。利用此评分标准,我们探讨性研究了患者基础人群特征(性别、年龄、身高、体重、BMI)、心率(平均心率、心率波动范围、双期心率差)、患者体型特征(心影右横径、心影左横径、心胸大小、心胸比率)等三方面的因素对“两次憋气”扫描方式冠状动脉减影图像质量的影响^[15, 17-19]。通过相关性分析,我们发现总体来看体重越大、BMI 值越高,患者的冠状动脉减影图像质量越好。进一步 Logistics 回归分析也显示患者 BMI 是获得高质量冠状动脉减影图像的保护因素,可能与肥胖患者心包脂肪垫含量高抑制了扫描过程中的心脏旋转运动幅度,产生的心脏搏动伪影小有关。

心率是冠状动脉 CTA 检查的关键影响因素^[19]。本研究我们探讨了平均心率、心率波动、双期心率差等因素对冠状动脉减影后处理技术的影响。其中,平均心率、心率波动范围、双期心率差都与减影图像质量评分成明显的负相关。Logistics 回归显示患者平均心率和双期心率差越小,获得高质量冠状动脉减影图像质量的概率越大,而心率波动范围对减影图像质量的影响并没有统计学意义。因此,与常规冠状动脉 CTA 相同的是,患者平均心率越低,CTA 图

表 3 高质量减影图像影响因素 Logistics 回归分析

影响因素	钙化积分 < 300				钙化积分 \geq 300			
	β_1	P 值	OR ₁ 值	95% CI	β_2	P 值	OR ₂ 值	95% CI
BMI	-0.28	0.01	0.76	(0.61,0.95)	-0.34	0.00	0.71	(0.57,0.89)
平均心率	0.13	0.00	1.14	(1.05,1.24)	0.20	0.00	1.22	(1.13,1.32)
双期心率差	0.43	0.01	1.54	(1.11,2.12)	0.36	0.00	1.43	(1.18,1.73)

像质量及减影图像质量越高。然而不同于常规冠状动脉CTA,两次扫描过程中心率一致性影响减影图像质量,而心率波动范围对减影图像质量没有影响。因此,在常规扫描之前,除了需要降低高心率患者的平均心率之外,嘱咐患者不要紧张,保持两次扫描之间心率稳定也很重要。

在心脏结构方面,心脏大小、心脏轴向等因素都会影响冠状动脉CTA的图像质量^[19-21]。在本次研究中,相关性分析显示,心脏扩大,尤其是心影左横径、心胸比率增大与冠状动脉减影质量评分呈正相关,但是进一步Logistics回归分析显示心脏解剖结构对减影图像质量的影响并没有统计学意义。

综上所述,在本次研究中我们首次探讨了冠状动脉减影这种新技术的影响因素。研究了患者体重、BMI、平均心率、心率波动、双期心率差、心影左横径、心胸比率与冠状动脉数字减影技术图像质量之间的关系。分析了实现高质量冠状动脉减影图像的影响因素,为临床工作中获得最佳图像质量提供参考。

[参考文献]

- [1] 胡盛寿,高润霖,刘力生,等.《中国心血管病报告2018》概要[J].中国循环杂志,2019,34(3):209-220.
- [2] 王媛,曹新西,侯亚冰,等.1990和2017年中国与全球心血管疾病负担研究[J].中国慢性病预防与控制,2020,28(1):10-13.
- [3] Song P,Fang Z,Wang H,*et al*.Global and regional prevalence, burden, and risk factors for carotid atherosclerosis: a systematic review, meta-analysis, and modelling study[J].*Lancet Glob Health*,2020,8(5):721-729.
- [4] Schmermund A,Eckert J,Schmidt M,*et al*.Coronary computed tomography angiography: a method coming of age[J].*Clin Res Cardiol*,2018,107(Suppl 2):40-48.
- [5] Budoff MJ,Dowe D,Jollis JG,*et al*.Diagnostic performance of 64-multidetector row coronary computed tomographic angiography for evaluation of coronary artery stenosis in individuals without known coronary artery disease: results from the prospective multicenter ACCURACY (Assessment by Coronary Computed Tomographic Angiography of Individuals Undergoing Invasive Coronary Angiography) trial[J].*J Am Coll Cardiol*, 2008,52(21):1724-1732.
- [6] 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.
- [7] Amanuma M,Kondo T,Sano T,*et al*.Subtraction coronary computed tomography in patients with severe calcification[J].*Int J Cardiovasc Imaging*,2015,31(8):1635-1642.
- [8] Fuchs A,Kühl JT,Chen MY,*et al*.Subtraction CT angiography improves evaluation of significant coronary artery disease in patients with severe calcifications or stents-the C-Sub 320 multicenter trial[J].*Eur Radiol*,2018,28(10):4077-4085.
- [9] Yamaguchi T,Ichikawa K,Takahashi D,*et al*.A new contrast enhancement protocol for subtraction coronary computed tomography requiring a short breath-holding time[J].*Acad Radiol*,2017,24(1):38-44.
- [10] Yoshioka K,Tanaka R,Nagata K,*et al*.Modified subtraction coronary CT angiography method for patients unable to perform long breath-holds: a preliminary study[J].*Acad Radiol*,2016,23(9):1170-1175.
- [11] Kidoh M,Utsunomiya D,Oda S,*et al*.Optimized subtraction coronary CT angiography protocol for clinical use with short breath-holding time-initial experience[J].*Acad Radiol*,2015,22(1):117-120.
- [12] Sun G, Hou YB, Zhang B,*et al*.Application of low tube voltage coronary CT angiography with low-dose iodine contrast agent in patients with a BMI of 26-30 kg/m²[J].*Clin Radiol*,2015,70(2):138-145.
- [13] 姚宇环,黄文华,黄超,等.基于小剂量测试法单次屏气行冠状动脉减影技术的优势研究[J].临床放射学杂志,2020,39(3):586-591.
- [14] 冉启胜,闫红野,廖春,等.CT冠状动脉成像与冠状动脉导管造影评估冠状动脉钙化所致狭窄程度的一致性[J].中国医学影像技术,2016,32(3):445-448.
- [15] Guo W,Tripathi P,Yang S,*et al*.Modified subtraction coronary CT angiography with a Two-Breathhold technique: image quality and diagnostic accuracy in patients with coronary calcifications[J].*Korean J Radiol*,2019,20(7):1146-1155.
- [16] Sun G,Li M,Jiang XS,*et al*.320 detector row CT coronary angiography: effects of heart rate and heart rate variability on image quality, diagnostic accuracy and radiation exposure[J].*Br J Radiol*,2012,85(1016):e388-e394.
- [17] 武君.冠状动脉CT造影图像中钙化伪影对管腔狭窄评估的影响[J].影像研究与医学应用,2017,1(15):76-77.
- [18] 郑园园,郑晓杰,楚坤义.冠状动脉CT造影图像中钙化伪影对管腔狭窄评估的影响[J].山东医药,2016,56(11):104-105.
- [19] 毛定飏,滑炎卿,王鸣鹏,等.心率及重建相位窗对多层螺旋CT冠状动脉造影图像质量的影响[J].中华放射学杂志,2004,(5):73-76.
- [20] 章黎思,曹森,陈翰.心率对256层CT前瞻性心电门控冠状动脉成像图像质量的影响[J].医疗装备,2019,32(16):37-38.
- [21] 覃群,李志伟,彭兴,等.冠状动脉CT成像中心率波动幅度对SSF算法冠状动脉重建图像质量的影响[J].中国循证心血管医学杂志,2019,11(8):942-944.

本文编辑 王晨晨