

基于冠脉 CTA 减影质量与斑块定量参数的相关性研究

乔金晗, 祝婷婷, 万维佳, 宋志成, 夏黎明

【摘要】 目的:应用基于冠脉 CT 血管成像(CCTA)的减影技术和斑块定量分析技术,分析冠脉减影质量与斑块特性之间的关系。**方法:**前瞻性收集 2021 年 1 月 1 日—2021 年 3 月 1 日在本院行 CCTA 检查的患者 34 例。共纳入减影后图像质量可用于评估狭窄程度的斑块 164 个。根据减影前后冠脉斑块的狭窄程度分级(CAD-RADS)有无变化分为 RADS 降低组($n=88$)和不变组($n=76$)。使用工作站进行图像后处理,记录斑块是否位于血管近端,是否位于血管开口处,定量测量斑块的钙化积分、长度和宽度,并应用半自动化斑块分析软件测量斑块负荷、斑块成分等指标。比较上述指标在两组之间的差异。运用 χ^2 检验、 t 检验、Mann-Whitney U 非参数检验进行统计学分析。最后采用受试者操作特征(ROC)曲线下面积(AUC)评估相关指标在预测冠脉减影质量方面的价值。**结果:**在斑块位置方面,RADS 降低组和不变组所包含的位于近端血管的斑块数目分别为 68(54.4%)和 57 个(45.6%),差异无统计学意义($P>0.05$)。而在斑块大小方面,RADS 降低组斑块的宽度、长度和钙化积分分别为 2.5(2.1,2.9)mm、4.0(2.9,7.0)mm、61(30,136),RADS 不变组的相应指标分别为 1.8(1.6,2.1)mm、2.8(2.3,3.5)mm、24(12,37),差异具有统计学意义($Z=-2.59, P<0.01; Z=-5.50, P<0.01; Z=-6.46, P<0.01$)。在斑块成分定量指标方面,RADS 降低组的斑块负荷(PB)、斑块总体积(TPV)分别为 $63.8\% \pm 10.9\%$ 、 $78.0(48.0, 140.0) \text{ mm}^3$, RADS 不变组的相应指标分别为 $53.3\% \pm 11.3\%$ 、 $54.0(34.6, 77.5) \text{ mm}^3$,差异具有统计学意义($t=-6.02, P<0.01; Z=-4.18, P<0.01$)。在 ROC 曲线中,斑块的钙化积分、宽度、平均密度的 AUC 分别为 0.79、0.78、0.78,差异具有统计学意义($P<0.05$),其截断值分别为 28, 2.1 mm, 200 HU。**结论:**在斑块特性分析中,斑块的钙化积分、斑块宽度、斑块平均密度等是影响减影后的 RADS 分级的主要因素。

【关键词】 冠状动脉粥样硬化; 减影技术; 体层摄影术, X 线计算机

【中图分类号】 R814.42; R541.4 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2022)11-1374-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2022.11.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Correlation study based on the quality of coronary CT angiography subtraction and quantitative plaque parameters QIAO Jin-han, ZHU Ting-ting, WAN Wei-jia, et al. Department of Radiology, Tongji Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430030, China

【Abstractive】 Objective: To analyze the relationship between coronary subtraction quality and plaque features based on coronary CT angiography (CCTA) subtraction techniques and quantitative plaque analysis techniques. **Methods:** 34 patients who underwent CCTA in our hospital from January 1, 2021, to March 1, 2021, were prospectively enrolled. A total of 164 calcified plaques that could be used to evaluate the degree of stenosis after subtraction were included. The coronary plaques were divided into the RADS reduced group ($n=88$) and RADS preserved group ($n=76$) according to whether there was a change in stenosis grading (CAD-RADS) pre- and post-subtraction. Imaging post-processing was performed using a workstation to record whether the plaque was located proximal to the vessel and whether it was located at the vessel opening, to quantitatively measure the calcification score, length, and width of the plaque, and to apply semi-automated plaque analysis software to measure plaque bur-

作者单位: 430030 武汉, 华中科技大学同济医学院附属同济医院放射科(乔金晗、祝婷婷、万维佳、夏黎明); 430056 武汉, 江汉大学医学院(宋志成)

作者简介: 乔金晗(1994—), 女, 河南商丘人, 博士研究生, 主要从事心血管影像学研究。

通讯作者: 宋志成, E-mail: 527778510@qq.com; 夏黎明, E-mail: xialiming2017@outlook.com

基金项目: 国家自然科学基金(81873889)

den and composition. Statistical analyses were performed by using the χ^2 test, t -tests, and Mann-Whitney U nonparametric tests. Finally, the area under the receiver operating characteristics (AUC) was used to assess the diagnostical value of the relevant indexes in predicting the quality of coronary subtraction. **Results:** The number of plaque located in proximal vessels included in the RADS-reduced and the preserved group was 68 (54.4%) and 57 (45.6%), respectively, without statistical significance ($P>0.05$). As for plaque size, the width, length, and calcification score in the RADS-reduced group was 2.5 (2.1, 2.9) mm, 4.0 (2.9, 7.0) mm, 61 (30, 136), respectively, and the corresponding indexes in the RADS-preserved group were 1.8 (1.6, 2.1) mm, 2.8 (2.3, 3.5) mm, 24 (12, 37), respectively, with statistically significant differences ($Z=-2.59, P<0.01; Z=-5.50, P<0.01; Z=-6.46, P<0.01; t=-6.02, P<0.01; Z=-4.18, P<0.01$, respectively). The AUC of calcification score, width, and mean density of plaque were 0.79, 0.78, and 0.78, respectively, with statistically significant differences ($P<0.05$) and the cutoff values of which were 28 mm, 2.1 mm, and 200 HU, respectively. **Conclusion:** The calcification score, width, and mean density of plaque are the main factors affecting the RADS classification after subtraction in the plaque characterization.

[Key words] Coronary atheroscleroses; Subtraction; Tomography, X-ray computed

冠状动脉 CT 血管成像 (coronary computed tomography angiography, CCTA) 作为临床常用的冠脉无创性检查手段, 对于冠脉疾病的临床诊断、决策及随访都具有重要的价值^[1]。CCTA 在排除无明显冠状动脉狭窄方面的阴性预测值高达 98%^[2], 但其阳性预测值及其准确性仍有一定限度^[3]。冠状动脉严重的钙化斑块以及金属支架产生的放射状及射线硬化束伪影, 影响冠状动脉管腔的真实显示, 常导致管腔狭窄程度的高估甚至无法评估^[4-5]。随着计算机对 CT 采集的心脏原始容积数据的数据处理能力不断提高, Yoshio-ka 等^[6]于 2012 年首次提出了冠脉减影技术在 320 排 CT 上应用, 冠脉减影可消除硬化伪影的影响, 减少斑块狭窄程度的高估, 从而降低常规 CCTA 的假阳性率。此后, 有多项研究证实相较于常规 CCTA, 减影 CCTA 可提高冠脉狭窄的诊断准确性^[7-8]。但目前尚无研究总结斑块的哪些特性可影响减影 CCTA 图像冠脉狭窄程度分级。故本研究选择减影图像质量良好的斑块, 采用冠状动脉疾病报告和数据系统 (coronary artery disease-reporting and data system, CAD-RADS) 比较减影前后冠脉狭窄程度变化组和不变组的斑块特性, 为减影 CCTA 的应用范围提供依据。

材料与方法

1. 一般资料

前瞻性收集 2021 年 1 月 1 日—2021 年 3 月 1 日临床怀疑心血管疾病而在华中科技大学同济医学院附属同济医院行 CCTA 检查的患者。纳入标准: ① CAD-RADS>0。② 心率<75 次/分。排除标准: ① 无钙化斑块者 (12 例); ② 减影图像质量差 (4 例); ③ 常规检查禁忌症, 如碘对比剂过敏者或心、肾功能不全者 (血肌

酐>13.6 mg/L) 等。最终纳入 34 例患者, 平均年龄 63 ± 11 岁, 其中男 24 例 (70.6%)。通过电子病历查询患者的临床资料。该研究通过伦理审查委员会审查, 所有患者均签署知情同意书。

2. 研究方法

CCTA 成像方案: 采用佳能 320 排 CT 机 (Aquilion Vision, Canon Medical Systems, Otawara, Japan) 前瞻性心电门控监测方式进行扫描。检查前对每名患者进行呼吸训练以减少呼吸伪影。采用双筒高压注射器以 4.0~5.0 mL/s 的流率注射非离子型碘对比剂碘代沙醇 (320 mg I/mL, GE 公司) 30~50 mL, 然后以相同流率注射 30 mL 生理盐水。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。采用人工智能触发扫描法, 于主动脉根部选择感兴趣区监测 CT 衰减值, 待 CT 衰减值达 100 HU 时延迟 5 s 自动触发扫描。扫描范围为气管分叉下 1 cm 至心尖。扫描参数: 准直器 320×0.500 mm, 球管转速 0.275 s, 管电压 100 kV, 智能 mA 控制, 层厚 0.5 mm。迭代算法采用 AIDR 3D Enhance, 软组织重建使用心脏 CTA 的重建函数 FC43。

冠脉减影处理: 冠脉减影采用佳能自动配准减影软件 (Volumetric CT Digital Subtraction Angiography, Canon Medical Systems), 选择对位良好的增强扫描和蒙片时的两组图像, 将增强扫描的原始容积数据减去蒙片的原始容积数据, 得到去除钙化斑块的冠脉减影图像。该冠脉减影软件会对两组图像进行严格匹配以消除失配准伪影。所有图像均传输至后处理工作站进行后续分析。

3. CCTA 图像分析

图像质量评估: 对冠脉减影前后的图像使用佳能

工作站进行后处理(Vitreia 6.7.2, Canon),包括容积再现(volume rendering, VR)、曲面重组(curved planar reconstruction, CPR)等。由两名 3 年以上诊断经验的放射科医师对 CCTA 图像进行双盲评估。在减影后的 CCTA 图像上,对钙化斑块按照 4 分法进行图像质量评分^[9]。4 分法图像质量评分:1 分,图像伪影严重,完全不能用于评估管腔;2 分,图像伪影稍差,评价管腔狭窄具有较低的诊断信心;3 分,图像伪影较轻,病变节段管腔可用于测量,评价管腔狭窄程度具有中等程度的诊断信心;4 分,图像质量良好,无伪影干扰,具有较高的诊断信心。

斑块特性分析:对于图像质量评分为 3 分或 4 分的斑块可进行血管狭窄程度的评估,其 CAD-RADS 分级为 1~5 级^[10-11]:1-轻微狭窄:有斑块,1%~24% 狭窄;2-轻度狭窄:25%~49% 狭窄;3-中度狭窄:50%~69% 狭窄;4-重度狭窄:70%~99% 狭窄;5-闭塞。评估冠脉减影前后的 CAD-RADS 分级(图 1、2),依据减影后 CAD-RADS 评分是否较减影前变化,分为减影后 RADS 降低组、不变组和升高组。但减影后没有 CAD-RADS 评分升高的斑块,故分为 RADS 降低组和 RADS 不变组。结论不一致时,由另一名 20 年以上诊断经验的放射科医师评估。

记录斑块的位置信息:根据美国心血管计算机断层扫描学会(society of cardiovascular computed tomography, SCCT)指南,将冠状动脉分为 18 个节段^[12]。记录斑块是否位于血管近端^[13],其中近端血管包含左主干、左前降支近段和中段、右冠状动脉近段和中段以及左旋支近段,其他节段则为远端血管。并记录斑块是否位于血管开口处。

测量斑块的定量特性:在平扫图像上测量斑块的钙化积分(>130 HU 认为是钙化)。在曲面重组的血管图中将血管拉直,在血管长轴面上测量斑块沿血管走向的长度和垂直于血管走向的宽度(图 3、4)。标记斑块的起始位置,软件可以自动识别管腔内外径,在识别错误时手工予以矫正。由软件自动分析斑块的重塑指数(remodeling index, RI)、斑块负荷(plaque

burden, PB)、以及斑块的组成成分等,RI 及 PB 算法见公式(1)和(2):

$$RI = \frac{\text{病变处血管的横截面面积}}{\text{近远端参考血管面积的平均值}^{[14]}} \quad (1)$$

$$PB = \frac{\text{斑块体积}}{\text{血管体积}^{[15]}} \quad (2)$$

斑块组成成分分析时,认为钙化成分 CT 值为 350~1300 HU,对比剂 CT 值为 150~349 HU,纤维成分 CT 值为 50~149 HU,脂质成分 CT 值为 -100~49 HU(图 5)^[16]。

4. 统计学方法

采用 SPSS 21.0 和 MedCalc 15.0 软件进行统计学分析。计数资料以频数和率表示,组间比较采用 χ^2 检验。计量资料采用 Shapiro-Wilk 检验是否符合正态分布,符合正态分布的变量表示为 $\bar{x} \pm s$,组间比较采用 t 检验;偏态分布的变量表示为中位数(上、下四分位数),组间比较采用 Mann-Whitney U 非参数检验。采用 Kappa 系数来评价 2 名医师对斑块图像质量和 CAD-RADS 评分的一致性,采用组内相关系数

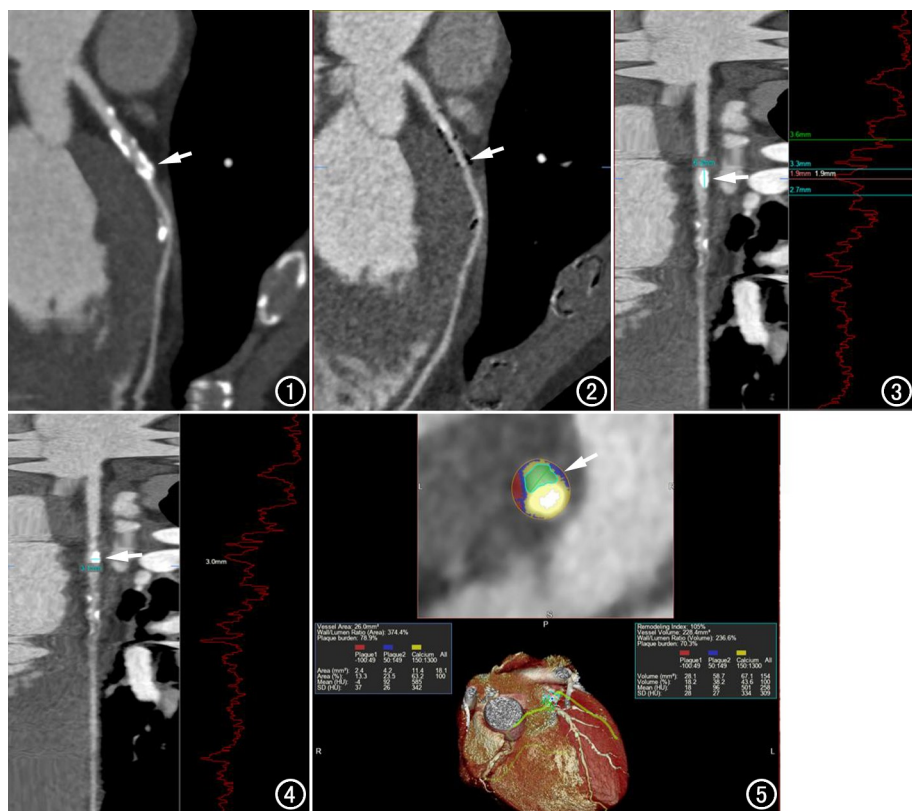


图 1~5 半自动化斑块定量分析软件对冠状动脉 CT 血管成像(CCTA)进行定量分析。图 1 常规 CCTA 图像观察到的前降支近中段多发钙化斑块,导致部分管腔显示不清(箭)。图 2 冠脉减影 CCTA 图像上相同位置的管腔狭窄程度(箭)比常规 CCTA 图像(图 1)上轻。图 3 血管重建图上斑块长度的测量方法(箭)。图 4 血管重建图上斑块宽度的测量方法(箭)。图 5 左旋支横截面,红色代表脂质成分,蓝色代表纤维成分,黄色代表钙化成分,绿色代表管腔(箭)。

(intraclass correlation coefficient, ICC)来评价 2 名医师斑块定量分析结果的一致性。采用 ROC 曲线评估斑块特性相关指标在诊断冠脉减影质量方面的价值。采用 DeLong 检验比较 ROC 曲线下面积(area under curve, AUC)。以 $P<0.05$ 认为差异有统计学意义。

结 果

1.临床基本资料

患者的一般资料(年龄、性别、体重、吸烟史、饮酒史)及病史资料(高血压、高血脂和糖尿病情况)见表 1。

表 1 患者基本临床资料

指标	患者(n=34)
年龄(岁)	63±11
心率(次/分)	61±7
男性(n,%)	24(70.6%)
身高(cm)	166±8
体重(kg)	64.1±8.7
BMI(kg/m ²)	22.9±2.4
eGFR(mL/min/1.73m ²)	87.4±18.5
有吸烟史(n,%)	14(41.2%)
有饮酒史(n,%)	8(23.5%)
高血压(n,%)	22(64.7%)
糖尿病(n,%)	9(26.5%)
脂质异常(n,%)	3(8.8%)
慢性肾功能不全(n,%)	3(8.8%)

纳入的斑块一共 164 个,其中 RADS 分级不变的斑块有 76 个(RADS 不变组),RADS 分级下降的斑块有 88 个(RADS 降低组)。2 名医生对于减影后斑块的图像质量和 CAD-RADS 评分一致性均较高,Kappa 值分别为 0.83(95%CI:0.72~0.94, $P<0.001$)和 0.85(95%CI:0.71~0.99, $P<0.001$)。RADS 降低组斑

块在常规 CCTA 图像上的的 CAD-RADS 评分高于 RADS 不变组,差异具有统计学意义($P<0.05$,表 2)。

2.斑块特性与冠脉减影质量的相关性

2 名医生对斑块的定量分析可重复性好, ICC 为 0.78~0.99($P<0.001$)。RADS 降低组的斑块更长、更宽,其钙化积分、斑块负荷、斑块总体积和斑块平均密度都更高($P<0.05$)。但 RADS 降低组的斑块在位置分布上差异无统计学意义。两组间重塑指数的差异也无统计学意义(表 2)。

但进一步分析斑块的组成成分,RADS 降低组斑块的脂质成分比例更低,而钙化成分的体积、比例和钙化成分的平均密度值更高(表 2)。

3.斑块特性指标对预测冠脉减影质量的价值

在各项斑块特性的定量指标中,斑块的钙化积分、宽度、平均 CT 值、钙化成分的平均 CT 值、斑块长度、斑块负荷的 AUC 更大,差异均有统计学意义(P 均 <0.05 ,表 3)。

表 3 各指标对于减影后 CAD-RADS 评分降低的诊断价值

检验结果变量	阈值	敏感度	特异度	AUC	P 值
钙化积分	28	0.81	0.63	0.79	0.001
宽度	2.1mm	0.76	0.72	0.78	0.001
斑块平均密度	200HU	0.57	0.88	0.78	0.001
钙化成分平均密度	422HU	0.66	0.80	0.77	0.001
长度	3.6mm	0.64	0.79	0.75	0.001
斑块负荷	52.9%	0.83	0.53	0.75	0.001
钙化成分比例	39.5%	0.56	0.85	0.71	0.001
钙化成分体积	26.9mm ³	0.55	0.84	0.71	0.001
斑块总体积	86mm ³	0.48	0.85	0.69	0.001
脂质成分体积	21.7mm ³	0.49	0.80	0.65	0.001
纤维成分体积	36.9mm ³	0.38	0.88	0.63	0.004
长宽比	2.3	0.27	0.95	0.63	0.006

表 2 两组斑块管腔狭窄、位置、斑块特征定量指标比较

定量指标	RADS 不变组 (n=76)	RADS 降低组 (n=88)	统计值	P 值
常规 CCTA 图像上 CAD-RADS 评分	1(1,1)	2(2,3)	-10.38	0.001
近端(n,%)	57 (45.6%)	68(54.4%)	0.12	0.733
血管开口处(n,%)	36(51.4%)	34(48.6%)	1.27	0.260
长度(mm)	2.8(2.3,3.5)	4.0(2.9,7.0)	-5.50	0.001
宽度(mm)	1.8(1.6,2.1)	2.5(2.1,2.9)	-6.15	0.001
长宽比	1.5(1.3,1.8)	1.7(1.4,2.5)	-2.78	0.005
钙化积分	24(12,37)	61(30,136)	-6.46	0.001
重塑指数(%)	89.5(72.8,111.8)	96.5(77.0,112.5)	-0.63	0.529
斑块负荷(%)	53.3±11.3	63.8±10.9	6.02*	0.001
斑块总体积(mm ³)	54.0(34.6,77.5)	78.0(48.0,140.0)	-4.18	0.001
斑块平均密度(HU)	137(95,179)	216(149,279)	-6.07	0.001
脂质成分体积(mm ³)	14.7(10.7,20.4)	21.2(12.0,28.9)	-3.27	0.001
脂质成分比例(%)	28.2(24.5,31.7)	24.1(17.8,30.6)	-3.22	0.001
脂质成分平均密度(HU)	11(3,16)	8(1,13)	-1.74	0.082
纤维成分体积(mm ³)	22.4(16.5,32.5)	31.0(19.7,43.9)	-2.88	0.004
纤维成分比例(%)	44.0±9.1	36.5±9.6	5.09*	0.001
纤维成分平均密度(HU)	97(95,100)	97(94,99)	-0.19	0.850
钙化成分体积(mm ³)	18.8±17.6	49.3±55.8	-4.61	0.001
钙化成分比例(%)	28.1(17.0,36.2)	41.4(26.3,51.5)	-4.95*	0.001
钙化成分平均密度(HU)	324(222,414)	461(366,529)	-6.03	0.001

注: * 为 t 值,其余统计值为 Z 值

其中,钙化积分的阈值为 28,长轴截面上斑块宽度的阈值为 2.1 mm,斑块平均 CT 值的阈值为 200 HU,斑块中钙化成分的平均 CT 值的阈值为 422 HU,长轴截面上斑块长度的阈值为 3.6 mm,斑块负荷的阈值为 53%。

讨 论

本研究以斑块为研究对象,分析了斑块自身特性对减影质量的影响。结果显示,斑块位于血管近端还是远端、是否位于血管开口处以及斑块的重塑指数对于减影质量无明显影响,钙化积分更高、直径更宽和平均密度更高的斑块更易在减影后出现 CAD-RADS 评分的降低。斑块成分分析时显示,钙化成分的平均 CT 值更高、钙化、纤维和脂质成分的体积更大时更易出现 CAD-RADS 分级的降低。由 ROC 曲线分析可知,对于钙化积分 >28 、宽度 >2.1 mm、平均 CT 值 >200 HU 的斑块可考虑结合减影 CCTA 评估其狭窄程度。

CAD-RADS 评分是评估冠脉管腔狭窄程度的指标,相较于钙化积分,它对稳定性心绞痛患者的预后有着更高的价值^[17],RADS 分级在 3 级及以上的患者行有创性冠脉造影——数字减影血管造影(digital subtraction angiography,DSA)检查的比率明显高于 1 和 2 级的患者^[18],因此准确评估斑块的 RADS 分级对患者的临床决策和预后有着重要意义。但 CAD-RADS 分级常常受钙化的部分容积效应和硬化伪影的影响而出现高估,冠脉减影技术是基于常规 CCTA 基础上的一种后处理方法,无创且无需额外费用,这种方法可消除硬化伪影^[19],减轻冠脉狭窄程度的高估,所以冠脉减影之后可出现 RADS 分级的降低^[13,20]。

有研究报道远端血管减影后图像质量较差,减影成功率较低^[21],这可能是因为远端血管的运动幅度更大,更易出现增强前后对位不良,故减影成功率较低,而本研究中远端血管和近端血管的图像质量差异无统计学意义,这可能是因为本研究侧重于探究减影前后 CAD-RADS 分级与斑块特性的关系,因此人为地排除了不能用于评估狭窄程度的斑块,仅纳入了图像质量良好的斑块,故两组间差异无统计学意义。此外,该研究发现斑块位置对减影前后 CAD-RADS 分级的判断无影响,这可能是因为虽然远端血管直径较小^[22],但钙化斑块体积也常常较小,所产生的硬化伪影对狭窄程度评估的影响也较轻,这可能与近端血管中的大斑块所产生的明显硬化伪影在狭窄程度评估上的影响相似,这尚需进一步的研究证实。此外,本研究中,重塑指数在两组之间的差异也无统计学意义,这可能是因为较大的重塑指数在病理上反应为较大的脂质池和坏

死核心,而硬化伪影主要是由钙化成分引起,因此反应脂质坏死成分的重塑指数在两组之间无显著差异^[23]。

根据 ROC 曲线分析结果,钙化积分在预测减影后 CAD-RADS 是否降低的效能最大,可能是因为钙化积分(Agatston 积分)的计算同时考虑到钙化密度和面积^[24]。它是先根据病变的 CT 值进行赋分,130~199 为 1 分、200~299 为 2 分、300~399 为 3 分、400 以上为 4 分,然后乘以钙化面积而得。钙化积分越高的斑块,其硬化伪影和部分容积效应越重,因此钙化积分越高的斑块在使用减影技术后越易消除因为伪影造成的狭窄程度的高估^[13]。斑块成分分析可知钙化密度以及各成分体积对狭窄程度的影响较大。其中,脂质体积增加也可引起 CAD-RADS 分级的下降,结合重塑指数在两组之间的差异无统计学意义,考虑可能是因为本研究中纳入的研究对象均为钙化斑块,一般脂质体积大,其斑块的总体积、钙化体积、钙化密度等一般也较高,故易出现减影后 CAD-RADS 分级的下降。

在本研究中,认为对于钙化积分 >28 、长轴截面上宽度 >2.1 mm、平均 CT 值 >200 HU 的斑块可考虑结合减影 CCTA 评估其狭窄程度。这些斑块特征大致相当于本研究中 CAD-RADS 分级为 3 级的斑块的平均水平,故在实际中对于严重钙化的斑块应考虑结合减影技术判断狭窄程度^[7]。

本研究还存在一些不足。首先,本研究侧重的是斑块特性对减影前后狭窄程度的影响,未分析 DSA 结果,结合以往文献,认为减影 CCTA 可消除斑块的硬化伪影,提高诊断敏感度和特异度^[8,13],有关减影后狭窄程度的准确性有待进一步研究。其次,本研究中纳入的斑块其 CAD-RADS 评分在 3 级及以上的较少,本研究中斑块 CAD-RADS 评分在 3 分及以上的有 40 个,占总斑块数量的 24.4%,在未来的研究中应纳入更多 CAD-RADS 分级在 3 分及以上的斑块,以探究这部分斑块的特性对于冠脉减影后 CAD-RADS 分级的影响。

本研究发现钙化斑块的位置和重塑指数对于冠脉减影前后的狭窄程度评估没有影响。而钙化斑块的长度、宽度、体积、钙化积分、平均 CT 值以及钙化成分的比例可造成常规 CCTA 图像上斑块狭窄程度的高估。对于钙化积分 >28 、长轴截面上宽度 >2.1 mm、长度 >3.6 mm、平均 CT 值 >200 HU 的钙化斑块可考虑结合减影 CCTA 评估其狭窄程度。

参考文献:

- [1] Chow ALS, Alhassani SD, Crean AM, et al. Coronary CT angiography guided medical therapy in subclinical atherosclerosis[J]. J Clin Med, 2021, 10(4): 625.

- [2] Fusaro M, Tessarin G. Prevention of coronary artery disease-related heart failure; the role of computed tomography scan[J]. *Heart Fail Clin*, 2021, 17(2): 187-194.
- [3] Haase R, Schlattmann P, Gueret P, et al. Diagnosis of obstructive coronary artery disease using computed tomography angiography in patients with stable chest pain depending on clinical probability and in clinically important subgroups; meta-analysis of individual patient data[J]. *BMJ*, 2019, 365: 11945.
- [4] Kalisz K, Buethe J, Saboo SS, et al. Artifacts at cardiac CT: physics and solutions[J]. *Radiographics*, 2016, 36(7): 2064-2083.
- [5] Kwan AC, Gransar H, Tzolos E, et al. The accuracy of coronary CT angiography in patients with coronary calcium score above 1000 Agatston Units: comparison with quantitative coronary angiography[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2021, 15(5): 412-418.
- [6] Yoshioka K, Tanaka R, Muranaka K. Subtraction coronary CT angiography for calcified lesions[J]. *Cardiol Clin*, 2012, 30(1): 93-102.
- [7] Yoshioka K, Tanaka R, Muranaka K, et al. Subtraction coronary CT angiography using second-generation 320-detector row CT[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2015, 31 Suppl 1: 51-58.
- [8] 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.
- [9] Tanaka R, Yoshioka K, Muranaka K, et al. Improved evaluation of calcified segments on coronary CT angiography: a feasibility study of coronary calcium subtraction[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2013, 29 Suppl 2: 75-81.
- [10] Foldyna B, Szilveszter B, Scholtz JE, et al. CAD-RADS—a new clinical decision support tool for coronary computed tomography angiography[J]. *Eur Radiol*, 2018, 28(4): 1365-1372.
- [11] 张晓浩, 刘军波, 范丽娟. 人工智能技术应用于冠状动脉 CTA 图像后处理的可行性[J]. *放射学实践*, 2021, 36(8): 994-999.
- [12] 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.
- [13] Fuchs A, Kuhl JT, Chen MY, et al. Feasibility of coronary calcium and stent image subtraction using 320-detector row CT angiography[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2015, 9(5): 393-398.
- [14] 顾慧, 高艳, 杨世锋, 等. 基于冠状动脉 CT 血管成像的斑块定量分析及其与心肌缺血损伤的相关性研究[J]. *中华放射学杂志*, 2020, 54(2): 129-135.
- [15] Park HB, Lee BK, Shin S, et al. Clinical feasibility of 3D automated coronary atherosclerotic plaque quantification algorithm on coronary computed tomography angiography: comparison with intravascular ultrasound[J]. *Eur Radiol*, 2015, 25(10): 3073-3083.
- [16] 叶靖, 姚易明, 高慧, 等. 冠状动脉 CT 血管成像斑块主要成分定量分析对斑块类型的鉴别价值[J]. *放射学实践*, 2019, 34(7): 767-773.
- [17] Bittner DO, Mayrhofer T, Budoff M, et al. Prognostic value of coronary CTA in stable chest pain: CAD-RADS, CAC, and cardiovascular events in PROMISE[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(7): 1534-1545.
- [18] Xie JX, Cury RC, Leipsic J, et al. The coronary artery disease-reporting and data system (CAD-RADS): prognostic and clinical implications associated with standardized coronary computed tomography angiography reporting[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2018, 11(1): 78-89.
- [19] 过伟锋. 冠状动脉 CT 成像钙化斑块减影技术的临床应用[J]. *放射学实践*, 2016, 31(10): 1010-1012.
- [20] 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.
- [21] Fuchs A, Kuhl 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.
- [22] Sorensen SK, Kuhl JT, Fuchs A, et al. Volume and dimensions of angiographically normal coronary arteries assessed by multidetector computed tomography[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2017, 11(4): 295-301.
- [23] Rathore S, Terashima M, Matsuo H, et al. Association of coronary plaque composition and arterial remodelling: a optical coherence tomography study[J]. *Atherosclerosis*, 2012, 221(2): 405-415.
- [24] Alluri K, Joshi PH, Henry TS, et al. Scoring of coronary artery calcium scans: history, assumptions, current limitations, and future directions[J]. *Atherosclerosis*, 2015, 239(1): 109-117.

(收稿日期: 2021-11-25 修回日期: 2022-04-13)