

CT-FFR 及斑块定量分析预测 非阻塞性冠心病不良结局的价值

刘军¹ 吴勇² 黄虹² 王鹏² 吴清华² 乔红艳²

¹江南大学附属医院急诊医学科,江苏无锡 214122; ²江南大学附属医院医学影像科,江苏无锡 214122

通信作者: 乔红艳, Email: xiaoqiao986308@163.com

【摘要】 **目的** 探讨基于冠状动脉 CT 血管成像 (CCTA) 的血流储备分数 (CT-FFR) 和斑块定量分析预测非阻塞性冠心病 (CAD) 患者不良结局的价值。**方法** 回顾分析 2014 年 3 月至 2018 年 3 月在江南大学附属医院行 CCTA 检查的非阻塞性 CAD 患者的临床资料并对其进行随访,记录主要不良心血管事件 (MACE) 的发生情况。根据 MACE 发生情况将患者分为 MACE 组和非 MACE 组,比较两组间的临床资料、CCTA 斑块定量分析指标,即斑块长度、狭窄程度、最小管腔面积、斑块总体积、非钙化斑块体积、钙化斑块体积、斑块负荷 (PB) 和重塑指数 (RI) 及 CT-FFR。利用多因素 Cox 回归模型分析临床因素、CCTA 各参数与 MACE 之间的关系;采用受试者工作特征曲线 (ROC 曲线) 评估基于 CCTA 不同参数建立的不良结局预测模型的预测效能。**结果** 最终纳入 217 例患者,其中 43 例 (19.8%) 发生 MACE, 174 例 (80.2%) 未发生 MACE;中位随访问隔为 24 (16, 30) 个月。CCTA 显示,与非 MACE 组比较, MACE 组患者的狭窄程度更重 [(44.3 ± 3.8)% 比 (39.5 ± 2.5)%], 斑块总体积和非钙化斑块体积更大 [斑块总体积 (mm³): 275.1 (197.1, 376.9), 非钙化斑块体积 (mm³): 161.5 (114.5, 307.8) 比 117.9 (77.7, 185.5)], PB 和 RI 更大 [PB: 50.2% (42.1%, 54.8%) 比 45.1% (38.2%, 51.7%), RI: 1.19 (0.93, 1.29) 比 1.03 (0.90, 1.22)], CT-FFR 值更低 [0.85 (0.80, 0.88) 比 0.92 (0.87, 0.97)], 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.05$)。多因素 Cox 回归分析显示,非钙化斑块体积 [风险比 (HR) = 1.005, 95% 可信区间 (95%CI) 为 1.025 ~ 4.866]、PB ≥ 50% (HR = 3.146, 95%CI 为 1.443 ~ 6.906)、RI ≥ 1.10 (HR = 2.223, 95%CI 为 1.002 ~ 1.009) 和 CT-FFR ≤ 0.87 (HR = 2.615, 95%CI 为 1.016 ~ 6.732) 是发生 MACE 的独立预测因素 (均 $P < 0.05$)。基于 CCTA 狭窄程度 + CT-FFR + 定量斑块特征 (非钙化斑块体积、RI、PB) 建立的模型 [ROC 曲线下面积 (AUC) = 0.91, 95%CI 为 0.87 ~ 0.95] 对不良结局的预测效能明显优于基于 CCTA 狭窄程度建立的模型 (AUC = 0.63, 95%CI 为 0.54 ~ 0.71) 和基于 CCTA 狭窄程度 + CT-FFR 建立的模型 (AUC = 0.71, 95%CI 为 0.63 ~ 0.79; 均 $P < 0.01$)。**结论** 基于 CT-FFR 和斑块定量分析有助于预测非阻塞性 CAD 患者的不良结局。非钙化斑块体积、RI、PB 及 CT-FFR 是 MACE 发生的重要预测因素。与依靠狭窄程度及 CT-FFR 的预测模型相比,联合斑块定量分析指标可显著提高非阻塞性 CAD 患者不良结局的预测效能。

【关键词】 非阻塞性冠心病; 体层摄影术; 斑块定量分析; 血流储备分数; 主要不良心血管事件

基金项目: 江苏省自然科学基金 (BK20221203); 江苏省无锡市科技局科技攻关项目 (Y20222013); 江苏省无锡市卫生健康委科研项目 (M202226)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20230215-00092

Value of fractional flow reserve derived from coronary computed tomographic angiography and plaque quantitative analysis in predicting adverse outcomes of non-obstructive coronary heart disease

Liu Jun¹, Wu Yong², Huang Hong², Wang Peng², Wu Qinghua², Qiao Hongyan²

¹Department of Emergency Medicine, Affiliated Hospital of Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China;

²Department of Medical Imaging, Affiliated Hospital of Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China

Corresponding author: Qiao Hongyan, Email: xiaoqiao986308@163.com

【Abstract】 **Objective** To investigate the value of coronary computed tomographic angiography (CCTA)-based fractional flow reserve (CT-FFR) and plaque quantitative analysis in predicting adverse outcomes in patients with non-obstructive coronary heart disease (CAD). **Methods** Clinical data of patients with non-obstructive CAD who underwent CCTA at the Affiliated Hospital of Jiangnan University from March 2014 to March 2018 were retrospectively analyzed and followed up, and the occurrence of major adverse cardiovascular event (MACE) was recorded. The patients were divided into MACE and non-MACE groups according to the occurrence of MACE. The clinical data, CCTA plaque characteristics including plaque length, stenosis degree, minimum lumen area, total plaque volume, non-calcified plaque volume, calcified plaque volume, plaque burden (PB) and remodelling index (RI), and CT-FFR were compared between the two groups. Multivariate Cox proportional risk model was used to evaluate the relationship between clinical factors, CCTA parameters and MACE. The receiver operator characteristic curve (ROC curve) was used to assess the predictive power of outcome prediction model based on different CCTA parameters. **Results** Finally 217 patients were included, of which 43 (19.8%) had MACE and 174 (80.2%) did not. The median follow-up interval was 24 (16, 30)

months. The CCTA showed that patients in the MACE group had more severe stenosis than that in the non-MACE group [(44.3 ± 3.8)% vs. (39.5 ± 2.5)%], larger total plaque volume and non-calcified plaque volume [total plaque volume (mm³): 275.1 (197.1, 376.9), non-calcified plaque volume (mm³): 161.5 (114.5, 307.8) vs. 117.9 (77.7, 185.5)], PB and RI were larger [PB: 50.2% (42.1%, 54.8%) vs. 45.1% (38.2%, 51.7%), RI: 1.19 (0.93, 1.29) vs. 1.03 (0.90, 1.22)], CT-FFR value was lower [0.85 (0.80, 0.88) vs. 0.92 (0.87, 0.97)], and the differences were statistically significant (all $P < 0.05$). Cox regression analysis showed that non-calcified plaques volume [hazard ratio (HR) = 1.005, 95% confidence interval (95% CI) was 1.025–4.866], PB $\geq 50\%$ (HR = 3.146, 95% CI was 1.443–6.906), RI ≥ 1.10 (HR = 2.223, 95% CI was 1.002–1.009) and CT-FFR ≤ 0.87 (HR = 2.615, 95% CI was 1.016–6.732) were independent predictors of MACE (all $P < 0.05$). The model based on CCTA stenosis degree+CT-FFR+quantitative plaque characteristics (including non-calcified plaque volume, RI, PB) [area under the ROC curve (AUC) = 0.91, 95% CI was 0.87–0.95] had significantly better predictive efficacy for adverse outcomes than the model based on CCTA stenosis degree (AUC = 0.63, 95% CI was 0.54–0.71) and the model based on CCTA stenosis degree+CT-FFR (AUC = 0.71, 95% CI was 0.63–0.79; both $P < 0.01$).

Conclusions CT-FFR and plaque quantitative analysis based on CCTA are helpful in predicting adverse outcomes in patients with non-obstructive CAD. Non-calcified plaque volume, RI, PB and CT-FFR are important predictors of MACE. Compared with the prediction model based on stenosis degree and CT-FFR, the combined plaque quantitative index can significantly improve the prediction efficiency of adverse outcomes in patients with non-obstructive CAD.

【Key words】 Non-obstructive coronary heart disease; Tomography; Plaque quantitative analysis; Fractional flow reserve; Major adverse cardiovascular event

Fund program: Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20221203); Foundation of Wuxi Science and Technology Bureau (Y20222013); Project of Wuxi Municipal Health Commission (M202226)

DOI: 10.3760/cma.j.cn121430-20230215-00092

冠心病 (coronary artery disease, CAD) 是中国人 群的主要死亡原因之一^[1]。临床上对于 CAD 患者 的评估和治疗一直侧重于阻塞性病变^[2]。然而,研 究证实 CAD 患者在发生主要不良心血管事件 (major adverse cardiovascular event, MACE) 之前常无症状, 且罪犯血管通常为非阻塞性狭窄病变^[3-5]。指南推 荐冠状动脉 (冠脉) CT 血管成像 (coronary computed tomographic angiography, CCTA) 作为中低心血管风 险患者的一线检查手段,可以准确判断冠脉狭窄程 度^[6]。有研究显示,约 2/3 的患者因可疑 CAD 行 CCTA 检查为非阻塞病变^[7],这些患者通常存在多 种心血管危险因素,有发生 MACE 的风险。另一项 大型前瞻性试验对可疑 CAD 患者行 CCTA 检查后 进行随访,亦证实大多数心血管事件发生在非阻塞 性 CAD 患者中^[8]。多项研究表明,CCTA 对阻塞性 CAD 患者预后较好的预测价值^[9-11],但其对非阻 塞性 CAD 患者预后的预测价值尚不明确。

已证实基于 CCTA 的定量斑块测定可提供多种 参数,与血管内超声 (intravenous ultrasound, IVUS) 有较高的一致性和相关性^[12]。基于 CCTA 的血流 储备分数 (CT derived fractional flow reserve, CT-FFR) 的无创功能评估可准确评估稳定 CAD 患者狭窄病 变的血流动力学改变^[13-14],并有研究证实 CT-FFR 和斑块负荷 (plaque burden, PB) 等特征与 CAD 患者 后续 MACE 的发生密切相关^[15]。但目前将 CCTA 的斑块定量分析及 CT-FFR 用于预测非阻塞性 CAD 患者预后的研究较少,故本研究拟探讨二者联合预

测非阻塞性 CAD 患者发生不良结局的风险。

1 资料与方法

1.1 研究对象: 连续性纳入 2014 年 3 月至 2018 年 3 月因可疑 CAD 在本院行 CCTA 的 298 例患者。 纳入标准: CCTA 显示为单支非阻塞性病变 (冠脉 狭窄程度为 1%~49%) 的患者^[6]。排除标准: 图 像质量无法满足诊断需求 (13 例)、临床资料不全及 失访 (32 例)、既往行血运重建术 (11 例)、急性冠脉 综合征 (9 例)、斑块定量分析及 CT-FFR 分析失败 (16 例)。本研究得到医院伦理委员会同意 (审批号: LS2020041)。通过电子病历收集患者的临床危险因 素、人口学特征等。

1.2 CCTA 扫描及斑块定量分析: 所有患者均采 用 Brilliance 256 层螺旋 CT 机行前瞻性心电门控 CCTA 检查。采用人工智能触发扫描确定延迟时间, 主肺动脉窗水平的升主动脉设为监测区,CT 值达到 100 HU 后延迟 6 s 自动触发扫描。采用半自动软件 对所有患者图像进行斑块定量分析,2 名医生在双 盲情况下进行,每项指标测 2 次,取平均值。确定斑 块两端后,软件自动提取冠脉束分析病变血管,自动 识别中心线及管腔内外径^[16]。设定斑块各成分 CT 阈值: 脂质斑块 CT 值为 -100~30 HU,纤维斑块 CT 值为 30~150 HU,钙化斑块 CT 值为 150~350 HU。 斑块定量分析指标包括斑块长度、狭窄程度、最小 管腔面积、斑块总体积、非钙化斑块体积、钙化斑块 体积、PB、重塑指数 (remodeling index, RI)。狭窄程 度为面积狭窄率,定义为最窄处管腔横截面积/参

考管腔面积 × 100%。最小管腔面积即斑块所在位置引起冠腔最狭窄处的横截面积。非钙化斑块体积 = 纤维斑块体积 + 脂质斑块体积。PB = 斑块总体积 / 血管体积 × 100%。RI = 冠脉最狭窄处的管腔横截面积 / 参考血管面积。

1.3 CT-FFR分析:采用原形软件cFFR进行CT-FFR分析。此软件采用深度学习模式预测冠脉的FFR值,该模型训练集根据 Navier-Stokes 方程计算流体力学特征而来^[17]。将患者的CCTA数据导入软件后,会自动识别冠脉中心线和管腔,可进行手工修改,然后生成伪彩色的冠脉树,不同颜色代表不同阈值的CT-FFR值。由2名医生对CT-FFR进行分析,选择在斑块远端直径4 cm的位置测量。

1.4 随访与结局:通过医疗病历、门诊记录和电话随访患者。研究的主要终点是评价斑块定量参数、CT-FFR与发生MACE的关系。由事件委员会根据标准定义独立评判MACE,包括全因死亡、心肌梗死、紧急血运重建及因不稳定性胸痛入院^[18]。根据随访结果将患者分为MACE组和非MACE组。

1.5 统计学方法:采用SPSS 25.0和MedCalc 14.0软件进行统计分析。呈正态分布的连续性变量以均数 ± 标准差($\bar{x} \pm s$)表示,采用t检验;呈非正态分布的连续性变量以中位数(四分位数)[$M(Q_L, Q_U)$]表示,采用U检验。分类变量以例或百分比表示,采用 χ^2 检验。采用Cox回归模型分析临床危险因素及CCTA各参数与MACE的关系。将单因素分析中 $P \leq 0.05$ 的危险因素纳入多因素分析。绘制受试者工作特征曲线(receiver operator characteristic curve, ROC曲线)并计算曲线下面积(area under the curve, AUC),评估不同CCTA参数建立的模型对MACE的预测效能,并用Delong法比较3种预测模型的差异。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组临床资料及斑块定量参数和CT-FFR比较(表1):最终纳入217例行CCTA的CAD患者,中位随访问隔为24(16, 30)个月。43例(19.8%)患者发生MACE,其中58%(25/43)是由于不稳定性胸痛入院;174例(80.2%)未发生MACE。与非MACE组比较,MACE组患者的年龄更大,糖尿病比例更高(均 $P < 0.05$);其他临床资料在两组间差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$)。CCTA显示,与非MACE组相比,MACE组患者血管狭窄程度更重,斑块总体积和非钙化斑块体积更大,PB和RI更大,CT-FFR

值更低(均 $P < 0.05$);而两组斑块长度、最小管腔面积、钙化斑块体积比较差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$)。2例典型病例的CCTA检查图像见图1。

表1 行CCTA检查后是否发生MACE两组非阻塞性CAD患者的临床资料及CCTA斑块特征和CT-FFR比较

指标	MACE组 (n=43)	非MACE组 (n=174)	t/ χ^2 / U值	P值
年龄(岁, $\bar{x} \pm s$)	69.5 ± 6.4	65.9 ± 8.6	2.605	0.010
男性[例(%)]	23(53.5)	36(51.4)	0.076	0.782
BMI(kg/m ² , $\bar{x} \pm s$)	26.3 ± 2.8	26.2 ± 2.6	-0.351	0.601
高血压[例(%)]	22(51.2)	76(43.7)	0.780	0.377
高血脂[例(%)]	15(34.9)	44(25.3)	1.604	0.205
糖尿病[例(%)]	14(32.6)	32(18.4)	4.413	0.042
吸烟史[例(%)]	13(30.2)	40(23.0)	0.980	0.322
家族史[例(%)]	14(32.6)	48(27.6)	0.418	0.518
斑块长度[mm, $M(Q_L, Q_U)$]	32.2 (22.1, 46.8)	29.5 (22.3, 40.3)	-1.499	0.291
狭窄程度(% $\bar{x} \pm s$)	44.3 ± 3.8	39.5 ± 2.5	2.297	0.039
最小管腔面积[mm ² , $M(Q_L, Q_U)$]	5.1 (3.1, 7.4)	6.5 (4.1, 8.8)	-2.006	0.184
斑块总体积[mm ³ , $M(Q_L, Q_U)$]	275.1 (197.1, 376.9)	208.2 (134.4, 308.6)	-2.947	0.016
钙化斑块体积[mm ³ , $M(Q_L, Q_U)$]	85.6 (63.2, 114.8)	75.5 (42.2, 130.0)	-1.606	0.291
非钙化斑块体积 [mm ³ , $M(Q_L, Q_U)$]	161.5 (114.5, 307.8)	117.9 (77.7, 185.5)	-2.887	0.038
RI [$M(Q_L, Q_U)$]	1.19(0.93, 1.29)	1.03(0.90, 1.22)	-2.458	0.016
PB [% $\bar{x} \pm s$, $M(Q_L, Q_U)$]	50.2(42.1, 54.8)	45.1(38.2, 51.7)	-3.123	0.038
CT-FFR [$M(Q_L, Q_U)$]	0.85(0.80, 0.88)	0.92(0.87, 0.97)	-7.570	0.001

注:CCTA为冠状动脉CT血管成像,MACE为主要不良心血管事件,CAD为冠心病,CT-FFR为基于CCTA的血流储备分数,BMI为体质质量指数,RI为重塑指数,PB为斑块负荷

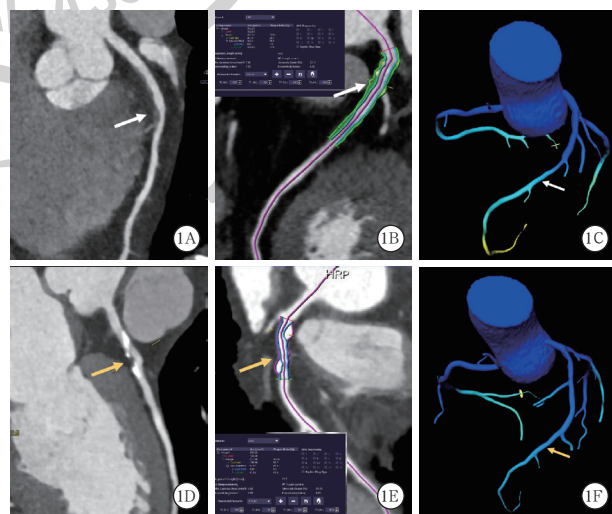


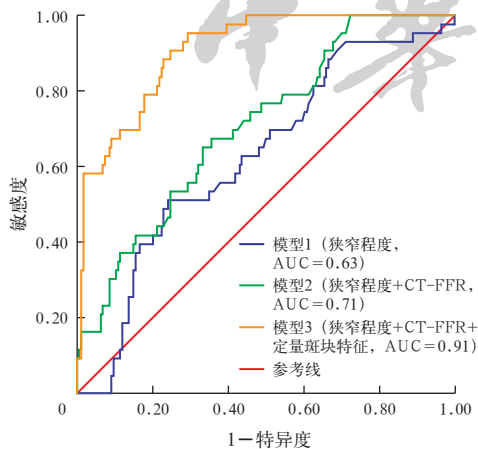
图1 2例非阻塞性冠心病(CAD)患者的冠状动脉CT血管成像(CCTA)检查图像 1例65岁女性患者冠状动脉曲面重建图像示左冠状动脉前降支近段混合化斑块(A,箭头所示),斑块定量分析(B,箭头所示测量位置),斑块远端的基于CCTA的血流储备分数(CT-FFR)值为0.87(C,箭头所示测量位置),经24个月随访,发生主要不良心血管事件(MACE);1例58岁女性患者冠状动脉曲面重建图像示左冠状动脉前降支近段混合斑块(D,箭头所示),斑块定量分析(E,箭头所示测量位置),斑块远端CT-FFR值为0.96(F,箭头所示测量位置),随访期间未发生MACE

2.2 Cox 回归分析发生不良结局的预测因素(表 2): Cox 单因素分析显示,年龄、糖尿病、狭窄程度、非钙化斑块体积、RI、PB 和 CT-FFR 是 MACE 发生的预测因素(均 $P < 0.05$)。多因素分析显示,非钙化斑块体积、 $RI \geq 1.10$ 、 $PB \geq 50\%$ 和 $CT-FFR \leq 0.87$ 是 MACE 发生的独立预测因素(均 $P < 0.05$)。

指标	单因素分析			多因素分析		
	HR	95%CI	P 值	HR	95%CI	P 值
年龄	1.064	1.014 ~ 1.116	0.011	1.051	0.995 ~ 1.111	0.076
糖尿病	2.142	1.018 ~ 4.509	0.045	2.309	0.953 ~ 5.591	0.064
狭窄程度	1.031	1.004 ~ 1.059	0.024	1.017	0.986 ~ 1.049	0.287
非钙化斑块体积	1.005	1.002 ~ 1.008	<0.001	1.005	1.025 ~ 4.886	0.003
$RI \geq 1.10^a$	3.078	1.519 ~ 6.236	0.002	2.223	1.002 ~ 4.866	0.043
$PB \geq 50\%^a$	3.259	1.639 ~ 6.479	0.001	3.146	1.443 ~ 6.906	0.004
$CT-FFR \leq 0.87^a$	3.355	1.469 ~ 7.662	0.004	2.615	1.016 ~ 6.732	0.046

注:CCTA 为冠状动脉 CT 血管成像, CAD 为冠心病, MACE 为主要不良心血管事件, RI 为重塑指数, PB 为斑块负荷, CT-FFR 为基于 CCTA 的血流储备分数, HR 为风险比, 95%CI 为 95% 可信区间; a 为通过约登指数来确定 RI、PB、CT-FFR 的最佳截断值

2.3 基于 CCTA 建立不良结局预测模型的预测价值(图 2): 基于 CCTA 不同参数建立 3 个预测 MACE 的模型, 其中基于 CCTA 狭窄程度建立模型 1 的 $AUC = 0.63$, 95%CI 为 0.54 ~ 0.71; 基于 CCTA 狭窄程度 + CT-FFR 建立模型 2 的 $AUC = 0.71$, 95%CI 为 0.63 ~ 0.79; 基于 CCTA 狭窄程度 + CT-FFR + 定量斑块特征(包括非钙化斑块体积、RI、PB)建立模型 3 的 $AUC = 0.91$, 95%CI 为 0.87 ~ 0.95。模型 3 的 AUC 明显高于模型 1 和模型 2(均 $P < 0.01$), 但模型 1 与模型 2 间的 AUC 无明显差异($P = 0.150$)。



注:CCTA 为冠状动脉 CT 血管成像, CAD 为冠心病, MACE 为主要不良心血管事件, CT-FFR 为基于 CCTA 的血流储备分数, ROC 曲线为受试者工作特征曲线, AUC 为 ROC 曲线下面积

图 2 基于 CCTA 不同参数建立 3 种模型预测非阻塞性 CAD 患者发生 MACE 的受试者工作特征曲线

3 讨论

本研究对 217 例非阻塞性 CAD 患者进行中位时间约 2 年的随访, 结果显示, 近 20% 的患者出现 MACE。基于 CT-FFR 和 CCTA 斑块定量分析有助于预测非阻塞性 CAD 患者不良结局的发生, 非钙化斑块体积、RI、PB 和 CT-FFR 是 MACE 发生的独立预测因素; 与依靠狭窄程度及 CT-FFR 建立的预测模型相比, 联合斑块定量分析可以显著提高非阻塞性 CAD 患者不良结局的预测价值。

CCTA 不仅可评估病灶的狭窄程度, 还可无创提供血流动力学信息。最近基于深度机器学习的 CT-FFR 计算方便快捷, 与有创 FFR 相比有较高的准确性和特异性^[19]。基于 CT-FFR 功能策略指导的 CAD 患者 90 d 和 1 年的 MACE 发生率较低, 可改善患者的临床结局^[20-21]。而本研究是前期研究的延伸, 探索 CT-FFR 与非阻塞性 CAD 患者不良结局的关系, 结果显示, MACE 组 CT-FFR 值更低, CT-FFR 是 MACE 的独立预测因素, 其可能机制是 CT-FFR 值降低, 会改变狭窄病变周围微环境及应力, 斑块侵蚀、破裂, 引起 MACE 的发生。本研究还显示, 与仅依靠狭窄程度建立的预测模型相比, 加入 CT-FFR 后预测模型的 AUC 并未显著提高, 可能原因是纳入人群为非阻塞性 CAD 患者, 狭窄程度均较低($< 50\%$), CT-FFR 值均较高, 对于临床危险分层的区分度有限, 预测不良结局的效能中等, 因此需探究斑块定量特征等其他影响因素。

CCTA 不仅可评估冠脉狭窄程度, 还可评估斑块的成分、性质, 提供斑块体积、PB、RI 等定性及定量参数, 已被证实与其他腔内成像技术有较高的一致性和可重复性^[12, 22]。既往研究证实, 与 CCTA 正常患者相比, 非阻塞性 CAD 患者狭窄程度更重且存在更多的恶性斑块征象(如正性重塑、低密度斑块及高 PB), 更倾向于破裂、不稳定, 具有更高的心血管风险^[7, 23-25]。基于 CCTA 的斑块信息既与心肌缺血密切相关, 又可提供不良结局的预后信息^[26-28]。本研究亦证实, PB、RI、非钙化斑块体积等高危斑块信息是 MACE 强有力的预测因素, 最强的是 PB, 预测能力优于 CT-FFR, 可能机制是这些低密度斑块有薄的纤维帽、较大的坏死核心及 PB, 较钙化斑块更容易破裂。本研究的优势在于建立由狭窄程度、CT-FFR 及斑块特征组成的综合预测模型对于不良结局预测有明显的增量价值。这提示应该将斑块特征及 CT-FFR 纳入 CCTA 的临床诊疗常规中, 可进

一步优化非阻塞性 CAD 的危险分层,指导后续药物的合理使用,改善患者临床结局。

本研究有以下不足:无 IVUS、光学相干断层成像技术及有创 FFR 等金标准检查作为对照,但关于 CT-FFR 和基于 CCTA 斑块定量软件已被证实有较高的准确性^[12-13]。未分析血清学指标、症状及药物治疗等临床参数对 MACE 发生的影响。某些已知危险因素(性别、糖尿病、高血脂等)未纳入风险模型,可能原因是本研究纳入的为中低风险人群,临床危险因素在两组间区分度有限。

综上,本研究显示, CCTA 可以提供血流动力学信息和 PB、RI 等斑块定量参数,有助于识别非阻塞性 CAD 患者发生不良结局的风险,以指导临床及时展开有效的预防治疗手段。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 中国心血管健康与疾病报告编写组. 中国心血管健康与疾病报告 2021 概要 [J]. 中国循环杂志, 2022, 37 (6): 553-578. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3614.2022.06.001.
- [2] 苏彤, 邵小南, 杨玲, 等. 循环微小 RNA-1 对稳定性冠心病患者发生冠状动脉斑块破裂的早期诊断价值 [J]. 中华危重病急救医学, 2021, 33 (5): 568-572. DOI: 10.3760/ema.j.cn121430-20200907-00614.
- [3] Emami H, Takx RAP, Mayrhofer T, et al. Nonobstructive coronary artery disease by coronary CT angiography improves risk stratification and allocation of statin therapy [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2017, 10 (9): 1031-1038. DOI: 10.1016/j.jcmg.2016.10.022.
- [4] Piña P, Lorenzatti D, Paula R, et al. Imaging subclinical coronary atherosclerosis to guide lipid management, are we there yet? [J]. Am J Prev Cardiol, 2022, 13: 100451. DOI: 10.1016/j.ajpc.2022.100451.
- [5] Ferencik M, Mayrhofer T, Bittner DO, et al. Use of high-risk coronary atherosclerotic plaque detection for risk stratification of patients with stable chest pain: a secondary analysis of the PROMISE randomized clinical trial [J]. JAMA Cardiol, 2018, 3 (2): 144-152. DOI: 10.1001/jamacardio.2017.4973.
- [6] 高扬, 吕滨. 冠状动脉 CT 血管成像最新临床应用推荐及诊断规范 [J]. 中华放射学杂志, 2022, 56 (10): 1160-1164. DOI: 10.3760/ema.j.cn12149-20220630-00555.
- [7] van Rosendaal AR, Bax AM, Smit JM, et al. Clinical risk factors and atherosclerotic plaque extent to define risk for major events in patients without obstructive coronary artery disease: the long-term coronary computed tomography angiography CONFIRM registry [J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2020, 21 (5): 479-488. DOI: 10.1093/ehjci/jez322.
- [8] Hoffmann U, Ferencik M, Udelson JE, et al. Prognostic value of noninvasive cardiovascular testing in patients with stable chest pain: insights from the PROMISE trial (prospective multicenter imaging study for evaluation of chest pain) [J]. Circulation, 2017, 135 (24): 2320-2332. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.116.024360.
- [9] Cho I, Al'Aref SJ, Berger A, et al. Prognostic value of coronary computed tomographic angiography findings in asymptomatic individuals: a 6-year follow-up from the prospective multicenter international CONFIRM study [J]. Eur Heart J, 2018, 39 (11): 934-941. DOI: 10.1093/eurheartj/ehx774.
- [10] Ghorashi SM, Fazeli A, Hedayat B, et al. Comparison of conventional scoring systems to machine learning models for the prediction of major adverse cardiovascular events in patients undergoing coronary computed tomography angiography [J]. Front Cardiovasc Med, 2022, 9: 994483. DOI: 10.3389/fcvm.2022.994483.
- [11] van Rosendaal AR, Shaw LJ, Xie JX, et al. Superior risk stratification with coronary computed tomography angiography using a comprehensive atherosclerotic risk score [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2019, 12 (10): 1987-1997. DOI: 10.1016/j.jcmg.2018.10.024.
- [12] Matsumoto H, Watanabe S, Kyo E, et al. Standardized volumetric

plaque quantification and characterization from coronary CT angiography: a head-to-head comparison with invasive intravascular ultrasound [J]. Eur Radiol, 2019, 29 (11): 6129-6139. DOI: 10.1007/s00330-019-06219-3.

- [13] Qiao HY, Wu Y, Li HC, et al. Role of quantitative plaque analysis and fractional flow reserve derived from coronary computed tomography angiography to assess plaque progression [J]. J Thorac Imaging, 2023, 38 (3): 186-193. DOI: 10.1097/RTI.0000000000000697.
- [14] Qiao HY, Tang CX, Schoepf UJ, et al. One-year outcomes of CCTA alone versus machine learning-based FFR_{CT} for coronary artery disease: a single-center, prospective study [J]. Eur Radiol, 2022, 32 (8): 5179-5188. DOI: 10.1007/s00330-022-08604-x.
- [15] Driessen RS, Danad I, Stuijzand WJ, et al. Comparison of coronary computed tomography angiography, fractional flow reserve, and perfusion imaging for ischemia diagnosis [J]. J Am Coll Cardiol, 2019, 73 (2): 161-173. DOI: 10.1016/j.jacc.2018.10.056.
- [16] 李俊灏, 唐春香, 刘通源, 等. 冠状动脉周围脂肪密度指数与斑块参数及血流储备分数关系分析 [J]. 中华医学杂志, 2021, 101 (39): 3214-3220. DOI: 10.3760/ema.j.cn12137-20210414-00889.
- [17] 乔红艳, 许棚棚, 卢佳庆, 等. 基于冠状动脉 CT 血管成像的斑块定量分析及血流储备分数预测斑块进展的研究 [J]. 中华放射学杂志, 2020, 54 (10): 934-940. DOI: 10.3760/ema.j.cn12149-20191204-00957.
- [18] Hicks KA, Tchong JE, Bozkurt B, et al. 2014 ACC/AHA key data elements and definitions for cardiovascular endpoint events in clinical trials: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Clinical Data Standards (writing Committee to Develop Cardiovascular Endpoints Data Standards) [J]. J Am Coll Cardiol, 2015, 66 (4): 403-469. DOI: 10.1016/j.jacc.2014.12.018.
- [19] Qiao HY, Tang CX, Schoepf UJ, et al. Impact of machine learning-based coronary computed tomography angiography fractional flow reserve on treatment decisions and clinical outcomes in patients with suspected coronary artery disease [J]. Eur Radiol, 2020, 30 (11): 5841-5851. DOI: 10.1007/s00330-020-06964-w.
- [20] Patel MR, Norgaard BL, Fairbairn TA, et al. 1-year impact on medical practice and clinical outcomes of FFR_{CT}: the ADVANCE registry [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2020, 13 (1 Pt 1): 97-105. DOI: 10.1016/j.jcmg.2019.03.003.
- [21] Fairbairn TA, Nieman K, Akasaka T, et al. Real-world clinical utility and impact on clinical decision-making of coronary computed tomography angiography-derived fractional flow reserve: lessons from the ADVANCE Registry [J]. Eur Heart J, 2018, 39 (41): 3701-3711. DOI: 10.1093/eurheartj/ehy530.
- [22] Matsumoto H, Watanabe S, Kyo E, et al. Effect of tube potential and luminal contrast attenuation on atherosclerotic plaque attenuation by coronary CT angiography: *in vivo* comparison with intravascular ultrasound [J]. J Cardiovasc Comput Tomogr, 2019, 13 (4): 219-225. DOI: 10.1016/j.jcct.2019.02.004.
- [23] Zheng JN, Lu B. Current progress of studies of coronary CT for risk prediction of major adverse cardiovascular event (MACE) [J]. J Cardiovasc Imaging, 2021, 29 (4): 301-315. DOI: 10.4250/jevi.2021.0016.
- [24] Taroni J, Foldyna B, Mayrhofer T, et al. Risk stratification with the use of coronary computed tomographic angiography in patients with nonobstructive coronary artery disease [J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2021, 14 (11): 2186-2195. DOI: 10.1016/j.jcmg.2021.03.019.
- [25] Hwang IC, Lee H, Yoon YE, et al. Risk stratification of non-obstructive coronary artery disease for guidance of preventive medical therapy [J]. Atherosclerosis, 2019, 290: 66-73. DOI: 10.1016/j.atherosclerosis.2019.09.018.
- [26] Lee SH, Hong D, Dai N, et al. Anatomic and hemodynamic plaque characteristics for subsequent coronary events [J]. Front Cardiovasc Med, 2022, 9: 871450. DOI: 10.3389/fcvm.2022.871450.
- [27] Williams MC, Kwiecinski J, Doris M, et al. Low-attenuation noncalcified plaque on coronary computed tomography angiography predicts myocardial infarction: results from the multicenter SCOT-HEART trial (Scottish computed tomography of the HEART) [J]. Circulation, 2020, 141 (18): 1452-1462. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.119.044720.
- [28] Munnur RK, Cheng K, Laggoun J, et al. Quantitative plaque characterisation and association with acute coronary syndrome on medium to long term follow up: insights from computed tomography coronary angiography [J]. Cardiovasc Diagn Ther, 2022, 12 (4): 415-425. DOI: 10.21037/cdt-21-763.

(收稿日期: 2023-02-15)