

# CCTA 斑块特征联合冠周脂肪衰减指数与 FFR<sub>CT</sub> 预测急性冠脉综合症的临床价值

廖熙妍, 邹佳妮, 孙茹, 潘晶晶, 吴倩, 付婷婷, 黄文才

**【摘要】 目的:**探讨冠状动脉周围脂肪衰减指数(FAI)、无创血流储备分数(FFR<sub>CT</sub>)与冠状动脉CT血管成像(CCTA)斑块特征预测5年内发生急性冠状动脉综合征(ACS)的临床价值。**方法:**回顾性纳入ACS发生前2个月至5年内行CCTA检查的ACS患者(n=46),另选取同期接受检查CCTA检查的患者作为对照组(n=55),对比两组患者的临床资料及影像学参数,在血管水平分析相关参数对ACS的预测价值,并建立Logistic回归预测模型。**结果:**ACS组(n=60)的近端周围FAI、脂质斑块体积、狭窄率较对照组明显升高,点状钙化和FFR<sub>CT</sub>阳性的频率更高(均P<0.05)。单因素和多因素分析显示,近端周围FAI、狭窄率、点状钙化、脂质斑块体积及FFR<sub>CT</sub>阳性是预测ACS的独立危险因素。与其他模型相比,结合斑块特征、近端周围FAI和FFR<sub>CT</sub>阳性的联合模型预测效能最高(AUC=0.87, P<0.05)。**结论:**斑块特征、FFR<sub>CT</sub>和FAI联合应用可有效提高未来发生ACS的预测能力,有助于指导患者的风险分层及临床决策。

**【关键词】** 斑块; 冠状动脉; 脂肪组织; 脂质沉积指数; 血流储备分数; 计算机体层摄影血管造影术

**【中图分类号】** R446.8; R445.3; R329; R331.37; R194.3; R322.12; R814.4

**【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2024)10-1355-06

DOI: 10.13609/j.cnki.1000-0313.2024.10.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**The clinical value of plaque characteristics of CCTA combined with pericoronary fat attenuation index and FFR<sub>CT</sub> in predicting acute coronary syndrome** LIAO Xi-yan, ZOU Jia-ni, SUN Ru, et al. The First School of Clinical Medicine, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China

**【Abstract】 Objective:** To investigate the clinical value of pericoronary fat attenuation index (FAI), non-invasive fractional flow reserve (FFR<sub>CT</sub>) and coronary CT angiography (CCTA) plaque characteristics in predicting the occurrence of acute coronary syndrome (ACS) within 5 years. **Methods:** ACS patients (n=46) who underwent CCTA examination 2 months to 5 years before the occurrence of ACS were retrospectively included, and patients who underwent CCTA examination in the same period were selected as the control group (n=55). Clinical data and imaging parameters of the two groups were compared, and the predictive value of related parameters on ACS was analyzed at the vascular level, and a Logistic regression prediction model was established. **Results:** In ACS group (n=60), proximal FAI, lipid plaque volume and stenosis rate were significantly higher than those in control group, The incidences of spotty calcification and positive FFR<sub>CT</sub> were higher in ACS group than in control group (all P<0.05). Univariate and multivariate analysis showed that proximal FAI, stenosis rate, spotty calcification, lipid plaque volume and positive FFR<sub>CT</sub> were independent risk factors for predicting ACS. Compared with other models, the combined model combining with plaque characteristics, proximal FAI and positive FFR<sub>CT</sub> had the highest prediction efficiency (AUC=0.87, P<0.05). **Conclusion:** The combination of plaque characteristics, FFR<sub>CT</sub> and FAI can effectively improve the predictive ability of future ACS, which is helpful to guide the risk stratification and clinical decision-making of patients.

作者单位: 510515 广州, 南方医科大学第一临床医学院(廖熙妍、孙茹、黄文才); 430070 武汉, 中国人民解放军中部战区总医院放射科(邹佳妮、吴倩、付婷婷、黄文才); 430081 武汉, 武汉科技大学(潘晶晶)

作者简介: 廖熙妍(1998-), 女, 广西防城港人, 硕士研究生, 住院医师, 主要从事心血管影像诊断工作。

通讯作者: 黄文才, E-mail: Dr\_hwang@163.com

基金项目: 医院育英计划立项项目(ZZYFH202101)

**【Key words】** Plaque; Coronary arteries; Adipose tissue; Lipid accumulation product; Fractional flow reserve; Computed tomography angiography

冠心病的人群患病率逐年攀升,仍是目前国人心血管疾病死亡的主要原因<sup>[1]</sup>,而急性冠脉综合征(acute coronary syndrome, ACS)是其常见的首表现。ACS 的早期诊断主要依靠临床表现、心电图、血清学标志物及影像学方法,但除影像学方法外,其余检查手段都只适用于 ACS 发生之后。冠状动脉 CT 血管成像(coronary CT angiography, CCTA)作为一种无创解剖成像方法,能够准确识别冠脉狭窄,评估斑块特征,目前已广泛应用于 ACS 的早期预防。人工智能(artificial intelligence, AI)是目前影像研究的热门话题。无创血流储备分数(non-invasive fractional flow reserve with CCTA, FFR<sub>CT</sub>)是一种评估冠状动脉血流动力学的无创新型技术,通过 AI 算法处理,FFR<sub>CT</sub>能在短时间内同时提供解剖学和功能学信息,实现对冠状动脉狭窄和缺血病变的早期识别,弥补了传统 CCTA 无法提供功能学信息的缺陷,减少了不必要的有创手段,并与有创 FFR 具有良好的一致性<sup>[2-4]</sup>。

冠状动脉周围脂肪(pericoronary adipose tissue, PCAT)通过“双重信号”方式参与冠状动脉代谢,病理条件下 PCAT 会释放炎症因子,抑制血管周围脂肪组织的形成,发挥促炎、促动脉粥样硬化作用。基于此,Antonopoulos 等<sup>[5]</sup>将 PCAT 与 AI 算法结合,开发了脂肪衰减指数(fat attenuation index, FAI)——一种基于 CCTA 的新型无创检测技术,它能够准确捕捉冠脉炎症状态导致的 PCAT 表型改变。FAI 通过调整影响 PCAT 密度的技术、生物和解剖因素,使 PCAT 的微观生理改变在宏观观察中得到更精准的显示。已有临床研究表明 FFR<sub>CT</sub> 和 FAI 对于冠心病的风险预测、预后指导具有重要的临床价值<sup>[6-9]</sup>。目前的研究多集中于对 ACS 的短期预测,或只是运用单一的影像特征进行预测分析,因此,本研究旨在探究 FAI、FFR<sub>CT</sub> 与基于 CCTA 的斑块特征指标与 ACS 发生之间的关系,并建立 ACS 中期风险预测模型,为临床预测 ACS 的发生提供无创、有效的评估方法。

## 材料与方法

### 1. 一般资料

回顾性搜集 2011 年 1 月—2021 年 12 月在本院诊断为 ACS,且在发病前 2 个月至 5 年内过接受 CCTA 检查的患者的临床资料和影像资料,另选取同期接受检查 CCTA 检查的患者作为对照组。ACS 组纳入标准:①临床相关资料完整,且具有完整的随访记录;②CCTA 检查显示冠状动脉狭窄程度 $\geq 25\%$ ;③

接受 CCTA 检查前无已知的急性冠状动脉事件、支架置入及搭桥术史;④发病前 2 个月至 5 年内在本院接受 CCTA 检查,且发病后 1 个月内行有创性冠状动脉造影(invasive coronary angiography, ICA)。对照组纳入标准:①临床相关资料完整,且具有完整的随访记录;②接受 CCTA 检查前无已知的急性冠状动脉事件、支架置入及搭桥术史,且接受 CCTA 检查后 5 年里未发生急性冠状动脉事件;③CCTA 检查显示冠状动脉狭窄程度 $\geq 25\%$ 。排除标准:①CCTA 图像质量不符合要求,无法用于分析;②严重心律失常、严重心功能不全或左心室功能不全;③复杂先天性心脏病或冠脉发育异常;④既往有支架植入术或搭桥术史;⑤影像学或临床资料缺失;⑥CCTA 检查显示冠状动脉完全闭塞。

### 2. 设备与方法

采用 Toshiba Aquilion ONE 320 排动态容积 CT 进行扫描。采用前瞻性心电门控容积扫描模式,扫描范围为气管分叉下 1 cm 至心脏膈面水平,应用对比剂追踪触发技术,监测层设定为四腔心层面,兴趣区为同层面主动脉处,阈值 200 HU。采用双筒高压注射器注入碘克沙醇(320 mg/mL)0.7 mL/kg 及 30 mL 生理盐水,注射流率 5 mL/s。扫描参数:管电压 100 kV,使用自动管电流调制技术,探测器 0.5 mm $\times$ 320,球管转速 0.35 s/圈。重建层厚 0.5 mm,层间距 0.5 mm。

### 3. 图像后处理与分析

斑块特征分析:使用 Vitrea 后处理工作站对直径 $\geq 2$  mm 的 3 支主支血管(左前降支冠状动脉、左回旋支冠状动脉、右冠状动脉)进行后处理分析。由 2 名具有 5 年 CCTA 诊断经验的高年资主治医师进行高危斑块(high risk plaque, HRP)特征分析,包括低密度斑块、正性重构、餐巾环征和点状钙化。低密度斑块定义为斑块内有 $>1$  mm<sup>2</sup>的区域 CT 值 $<30$  HU,正性重构为重塑指数 $\geq 1.1$ ,点状钙化为非钙化斑块内存在长度 $<3$  mm 且 CT 值 $>130$  HU 的钙化斑块,餐巾环征为存在一环状高密度晕环围绕着冠状动脉粥样硬化斑块(晕环 CT 值高于斑块但 $\leq 130$  HU)。具有 2 个及以上特征的斑块定义为 HRP。斑块定量参数由工作站自动生成,包括狭窄率、斑块长度、斑块体积(斑块总体积、钙化斑块体积、脂质斑块体积、脂质-纤维斑块体积、纤维斑块体积)、重塑指数、斑块负荷和非钙化斑块体积百分比。其中非钙化斑块体积百分比定义为非钙化斑块体积占总斑块体积的比值。意见存在分歧时由两人共同协商得出最终结论。

FAI:采用数坤科技 FAI 智能分析软件对原图像进行分析,设定阈值范围为 $-190\sim-30$  HU,提取近端周围 FAI 和斑块周围 FAI。近端周围 FAI:设定左前降支及左回旋支测量范围为开口处至远端 40 mm 处,右冠状动脉测量范围为开口 10 mm 至远端 50 mm 处,外扩距离为 4 mm 进行分割。斑块周围 FAI:以斑块长度作为纵向测量范围,相应血管直径为径向测量范围,从血管外壁径向向外扩展对区域脂肪进行分割。

FFR<sub>CT</sub>:通过数坤科技智能分析软件自动测量斑块远端 1~3 cm 处的 FFR<sub>CT</sub> 值。依据《冠状动脉 CT 血流储备分数应用临床路径中国专家共识》<sup>[10]</sup>,本研究将 FFR<sub>CT</sub> 血流动力学异常的阈值设为 0.80,即 FFR<sub>CT</sub> ≤ 0.80 定义为 FFR<sub>CT</sub> 阳性。

#### 4. 肇事血管的确定

ACS 组的肇事血管由 ICA 及心电图裁定,将 ICA 检查中血管狭窄程度 > 70% 或进行介入治疗,且相应导联心电图呈缺血性或梗死改变的冠状动脉定义为肇事血管。利用病变与冠状动脉开口或分支的距离等标志,将肇事病变与基线 CCTA 上的肇事病变前体进行匹配。

#### 5. 统计学方法

使用 SPSS 26.0 和 Medcalc 22.0 统计软件进行分析。符合正态分布的计量资料以均数 ± 标准差表示,组间差异的比较采用 *t* 检验,不符合正态分布的计量资料以中位数(上、下四分位数)表示,组间差异的比较采用 Mann-Whitney *U* 检验。计数资料以样本量(百分比)表示,组间差异的比较采用交叉表卡方检验,期望频数不满足要求时采用 Fisher 确切概率法。采用单因素 Logistic 回归分析对有统计学差异的参数进行分析,筛选与 ACS 发生相关的危险因素。以 5 年内发生 ACS 作为因变量,将单因素分析中  $P < 0.05$  的指标纳入 Logistic 多因素回归,建立不同的预测模型,以受试者操作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线评价不同模型预测 5 年内发生 ACS 的诊断效能,并计算模型的灵敏度、特异度、准确度和 ROC 曲线下面积(area under the curve, AUC)。采用 De-Long 检验比较不同模型之间的差异。 $P < 0.05$  为差

异具有统计学意义。使用 R12.0 软件绘制列线图对联合预测模型可视化。通过 AUC 值来评估列线图模型的预测能力,曲线下面积 > 0.70 说明模型预测能力较好。采用 Hosmer-Lemeshow 拟合优度检验衡量列线图模型拟合效果, $P > 0.05$  为模型拟合效果良好。

## 结果

### 1. 临床基线特征的比较

经筛选后本研究最终纳入 ACS 组 46 例患者,60 支血管,对照组 55 例患者,123 支血管。其中 ACS 组中 30 例为不稳定心绞痛,16 例为急性心肌梗死。结果显示两组间的临床基线特征均不具有统计学差异( $P > 0.05$ ,表 1)。

### 2. 影像学参数的比较

血管水平上 ACS 组患者表现出更高的近端周围 FAI、狭窄率、斑块体积、斑块长度、斑块负荷和重塑指数,FFR<sub>CT</sub> 阳性、HRP、餐巾环征、点状钙化的频率更高,组间比较差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。而低密度斑块、正性重构、斑块周围 FAI、非钙化斑块体积百分比在两组间不具有统计学差异(表 2)。

### 3. 危险因素分析

将有意义的参数(近端周围 FAI、狭窄率、斑块总体积、钙化斑块体积、脂质斑块体积、脂质纤维斑块体积、纤维斑块体积、斑块长度、斑块负荷、重塑指数、FFR<sub>CT</sub> 阳性、HRP、餐巾环征、点状钙化)纳入单因素和多因素 logistic 分析,以 5 年内发生 ACS 作为因变量,结果显示近端周围 FAI、狭窄率、点状钙化、脂质斑块体积及 FFR<sub>CT</sub> 阳性是 ACS 发生的独立预测因素(表 3)。

### 4. ACS 预测模型的诊断效能评价

将近端周围 FAI、狭窄率、点状钙化、脂质斑块体积及 FFR<sub>CT</sub> 阳性纳入预测模型构建,根据类别建立不同的预测模型:模型 1(联合模型,即模型 2+模型 3+模型 4),模型 2(近端周围 FAI),模型 3(FFR<sub>CT</sub> 阳性),模型 4(CCTA 斑块特征,即狭窄率+点状钙化+脂质斑块体积)。ROC 曲线显示(图 1),模型 1 具有最高的预测效能(AUC=0.87,95%CI:0.817~0.918,灵敏

表 1 ACS 组与对照组组间患者临床基线特征的比较

临床特征	ACS 组 (n=46)	对照组 (n=55)	<i>t</i> / <i>Z</i> / $\chi^2$	<i>P</i>
年龄/岁	64.98±1.60	66.78±1.28	0.890	0.376
BMI/kg/m <sup>2</sup>	24.50±0.46	24.29±0.42	-0.332	0.740
性别(男/%)	35(76.09)	32(58.18)	3.596	0.058
高血压/%	27(58.70)	40(72.73)	2.209	0.137
血脂异常/%	22(47.83)	23(41.82)	0.366	0.55
糖尿病/%	12(26.09)	18(32.73)	0.529	0.467
吸烟史/%	11(23.92)	8(14.55)	1.439	0.230

表 2 ACS 组与对照组之间影像学参数的比较

参数	ACS 组 (n=60)	对照组 (n=123)	t/Z/ $\chi^2$	P
近端周围 FAI/HU	-71.60±0.94	-76.24±0.77	-3.611	<0.001
斑块周围 FAI/HU	-77.00(-81.75, -68.25)	-77.00(-82.00, -70.00)	0.373	0.709
高危斑块/%	30(50.00)	35(28.46)	8.173	0.004
点状钙化	49(81.67)	76(61.79)	7.361	0.007
低密度斑块	4(6.67)	1(0.81)	3.230	0.072
正性重构	30(50.00)	44(35.77)	3.389	0.066
餐巾环征	8(13.33)	1(0.81)	10.974	0.001
狭窄率/%	61.00(52.00,73.75)	46.00(38.00,58.00)	5.672	<0.001
斑块长度/mm	41.55(31.03,54.95)	30.90(17.70,42.00)	3.988	<0.001
斑块体积/mm <sup>3</sup>				
斑块总体积	472.50(292.50,725.75)	297.00(157.00,478.00)	4.007	<0.001
钙化斑块体积	30.90(6.63,72.28)	13.00(0.00,64.00)	2.412	0.016
脂质斑块体积	70.30(44.10,115.48)	46.00(26.60,72.20)	3.943	<0.001
脂质-纤维斑块体积	194.75(113.65,297.13)	136.90(195.70,75.30)	3.692	<0.001
纤维斑块体积	131.20(66.02,199.45)	74.70(37.50,139.70)	3.159	0.002
非钙化斑块体积百分比/%	0.92(0.83,0.98)	0.94(0.85,1.00)	-1.288	0.198
重塑指数/%	106.00(87.25,133.75)	99.00(83.00,115.00)	2.139	0.032
斑块负荷	65.26±1.24	59.45±0.77	-4.160	<0.001
FFR <sub>CT</sub> 阳性/%	43(71.67)	25(20.33)	45.524	<0.001

表 3 ACS 风险预测的 Logistic 回归分析结果

参数	单因素分析		多因素分析	
	OR(95%CI)	P	OR(95%CI)	P
近端周围 FAI	1.074(1.031~1.119)	0.001	1.111(1.039~1.187)	0.002
高危斑块	2.514(1.326~4.768)	0.005	0.806(0.215~3.025)	0.750
点状钙化	2.755(1.304~5.822)	0.008	5.386(1.513~19.176)	0.009
餐巾环征	18.769(2.289~153.894)	0.006	12.033(1.005~144.074)	0.050
狭窄率	1.066(1.041~1.092)	<0.001	1.050(1.010~1.091)	0.015
斑块长度	1.033(1.015~1.051)	<0.001	1.011(0.957~1.067)	0.704
斑块体积				
斑块总体积	1.002(1.001~1.003)	0.001	0.988(0.972~1.004)	0.137
钙化斑块体积	1.004(1.001~1.008)	0.023	1.007(0.990~1.024)	0.425
脂质斑块体积	1.015(1.007~1.022)	<0.001	1.033(1.002~1.065)	0.038
脂质-纤维斑块体积	1.003(1.001~1.006)	0.005	1.002(0.985~1.019)	0.799
纤维斑块体积	1.005(1.001~1.008)	0.005	1.018(0.999~1.038)	0.067
重塑指数	1.016(1.004~1.028)	0.007	0.990(0.966~1.016)	0.454
斑块负荷	1.075(1.036~1.116)	<0.001	1.000(0.934~1.071)	0.989
FFR <sub>CT</sub> 阳性	9.915(4.861~20.225)	<0.001	9.608(3.644~25.331)	<0.001

性 80.00%，特异性 82.93%，其次为模型 4 (AUC = 0.78, 95%CI: 0.716~0.840, 灵敏度 71.67%，特异性 75.61%) 和模型 3 (AUC = 0.76, 95%CI: 0.688~0.817, 灵敏度 71.67%，特异性 79.67%)，模型 2 最差 (AUC = 0.65, 95%CI: 0.577~0.719, 灵敏度 53.33%，特异性 68.29%)。模型 1 与另外 3 个模型差异具有统计学意义 ( $P < 0.05$ )。综合上述因素，模型 1 总体预测性能最佳。

### 5. 列线图预测模型的构建与评价

使用列线图对模型 1 进行可视化(图 2)。列线图模型 AUC 为 0.87(0.823~0.925)，有着较好的区分度。内部验证显示模型的拟合优度  $\chi^2 = 4.613$ ,  $P = 0.798$ ，表明模型的拟合效果良好。

## 讨论

当前国内外学者普遍认为 ACS 是稳定的动脉粥

样硬化斑块进展成不稳定高危斑块、并发生破裂或侵蚀的结果，其肇事血管具有特定的组织病理学和血流动力学特征<sup>[11]</sup>。既往病理研究<sup>[12]</sup>已证实发生 ACS 的斑块普遍体积较大，含有大的坏死核心，并覆盖一层薄纤维帽。Motoyama 等<sup>[13]</sup>发现 CCTA 显示具有正性重构且有低密度斑块的患者发生 ACS 的风险高于无这些特征的患者。Halon 等<sup>[14]</sup>回顾性分析了 630 名无症状 2 型糖尿病患者的斑块特征，发现富含脂质的低密度斑块体积是晚期发生 ACS 的独立预测因素。本研究中观察到的 CCTA 斑块特征也反映了类似的结果：ACS 组的斑块总体积和脂质斑块体积明显高于对照组，且脂质斑块体积是 5 年内发生 ACS 的独立危险因素。考虑原因一是富含脂质的粥样斑块的不稳定性和易损性增加，更易发生破裂；二是脂质斑块可能诱导局部氧化应激、炎症，引起内皮功能障碍导致下游心肌灌注异常，ACS 发生风险增高。另外本研究还发现

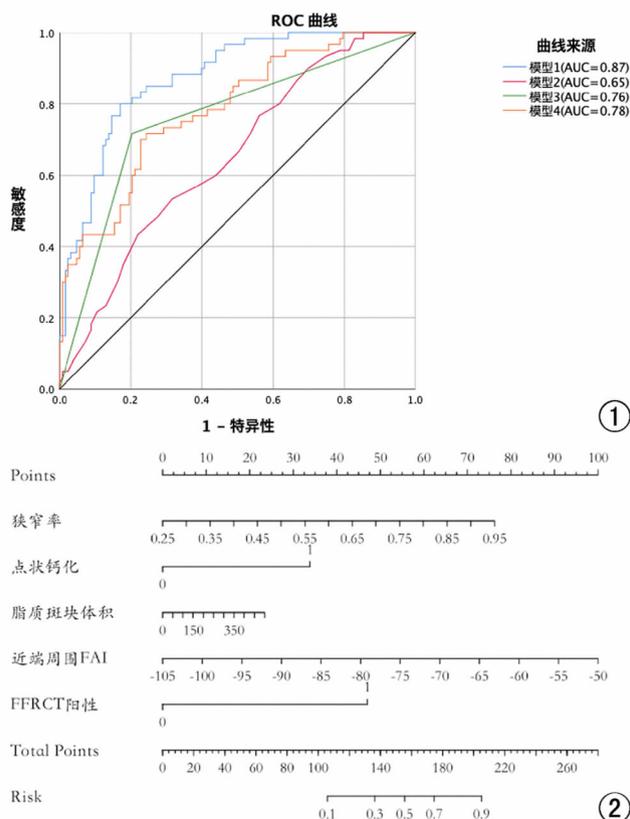


图 1 不同参数预测 ACS 的模型效能的 ROC 曲线。

图 2 预测 5 年内发生 ACS 的联合预测模型列线图。

含有点状钙化的斑块有着更高的 ACS 发生风险,点状钙化往往提示局部炎症活动,点状钙化和局部炎症对纤维帽的机械刺激可能导致斑块发生破裂,从而诱发 ACS 的发生<sup>[15]</sup>。以往研究<sup>[16,17]</sup>认为 CCTA 观察到 HRP 的存在是 ACS 发生的独立预测中期指标。本研究虽然 HRP 在两组间存在差异,但 HRP 的存在并不是 ACS 的独立预测指标,这可能是因为在本研究中搜集到 HRP 的斑块数量较少,另外 HRP 仅代表动脉粥样硬化过程中的某一时期,可随患者病情变化或应用药物治疗出现进展或消退<sup>[18]</sup>。由此可以推断并非所有的 HRP 都会引起 ACS,但对具有 HRP 的患者也要给予重视以防止斑块进展和破裂。

当斑块内部应力超过其强度时就会发生斑块破裂,但斑块破裂是由斑块成分、外力及血流动力学等多种因素共同作用的复杂生物力学过程,因此尽管斑块具有同样的易损特性,若受到的流体力学作用不同,其发生破裂的风险也会不同<sup>[15]</sup>。由此可见,除了斑块特征,准确评估斑块血流动力学对于预测 ACS 风险也至关重要。FFR<sub>CT</sub>反映了管腔狭窄的引起血流动力学改变,可作为动脉粥样硬化进展和 ACS 发生的功能学预测指标<sup>[19]</sup>。2023 年专家共识<sup>[10]</sup>表明当 FFR<sub>CT</sub>>0.80 时,血管可能不存在缺血,0.70~0.80 为“灰区”,应进

行综合判断。Huang 等<sup>[20]</sup>研究中患者肇事血管的 FFR<sub>CT</sub>值显著低于非肇事血管,最佳截断值为 0.795,且肇事血管 FFR<sub>CT</sub>≤0.795 的频率更高,展现出仅次于联合模型的预测效能(AUC=0.849),表明了 FFR<sub>CT</sub>预测 ACS 发生风险的潜在价值。在本研究中,FFR<sub>CT</sub>阳性是预测 ACS 发生最显著的独立危险因素(OR=9.608),明显高于狭窄率(OR=1.050),表明比起管腔狭窄,冠脉血流动力学改变作为病变特征对后续 ACS 预测可能有更高的临床价值。

血管炎症是造成粥样硬化斑块不稳定的重要原因,它可以加速斑块病变进展,甚至引起斑块破裂,诱导 ACS 的发生<sup>[21]</sup>。FAI 作为反映血管炎症状态的新型影像学指标,其升高与 ACS 的发生密切相关<sup>[20]</sup>。本研究将近端周围 FAI 和斑块周围 FAI 进行了比较,结果显示,近端周围 FAI 在两组间具有统计学差异,且单因素及多因素分析均表明近端周围 FAI 是 ACS 发生的独立危险因素,表明了 FAI 与 ACS 的发生存在一定关系。Li 等<sup>[7]</sup>的研究认为近端周围 FAI 和斑块周围 FAI 均是患者继发 ACS 的危险因素,且斑块周围 FAI 预测 ACS 的价值更高(OR=1.07, P<0.001),与本研究的结论有所出入。笔者推测原因是因为 Li 等的研究为 ACS 的短期预测,而本研究针对的为 5 年内发生 ACS 的肇事血管。另外当斑块发生炎症时,由于旁分泌的作用,与斑块毗邻的 PCAT 往往最先发生表型改变,进而反馈到其他部位的 PCAT,由于炎症的动态变化,因而当观察到近端周围 FAI 升高时,有可能斑块周围 FAI 已恢复正常,这也反映了斑块周围 FAI 或许更适用于监测粥样硬化斑块周围炎症的短期变化。

最后本研究基于 Logistic 回归建立不同的预测模型,ROC 曲线分析显示 FAI、FFR<sub>CT</sub>阳性、斑块特征及三者联合预测 ACS 发生的 AUC 依次为 0.65、0.76、0.78、0.87,联合模型展现出明显优于其他模型的预测效能(灵敏性 80.00%,特异性 82.93%),表明了将解剖学和功能学联合构建预测模型可以有效提高对易破裂的肇事斑块的识别。本研究中 FFR<sub>CT</sub>阳性模型预测效能略低于斑块特征模型,原因可能是斑块特征模型中纳入的参数较多,但两个模型间统计学差异不显著(P=0.56),这也反映了血流动力学评估相较于单一的斑块解剖特征评估有着独特优势。而近端周围 FAI 模型效能一般,提示虽然 FAI 能够为病变提供更全面的炎症信息,但其稳定性不足,目前临床应用有限。

ACS 的发生是由多种因素共同推动的复杂过程,因此单一的影像学评估缺乏对病变的全面认知,难以准确指导临床决策。本研究结果表明斑块特征、血流动力学参数和 FAI 均能反映病变特征,且均为无创参

数,易于获得,将其综合应用可以为临床早期识别高风险斑块提供有效的筛查方法,提升经济效益。AI 的辅助使用也为斑块特征、FFR<sub>CT</sub> 和 FAI 的测量节省了时间、人力成本,可以为未来的急性冠状动脉事件提供个性化的风险评估,并进一步指导临床决策。

本研究也存在着局限性:①本研究为回顾性研究,阳性样本量少,可能存在选择偏倚;②未对纳入人群的后续治疗进行追踪,这可能会影响分析结果;③本研究是基于发病前的单次 CCTA 图像进行分析,最近有研究<sup>[22]</sup>认为 CCTA 影像特征的连续变化更有利于预测 ACS 的发生;④本研究只纳入了可以识别出肇事血管的患者,然而未发现肇事血管的 ACS 患者的影像学特征也可能会影响对 ACS 的风险预测。

综上,近端周围 FAI 和 FFR<sub>CT</sub> 阳性以及基于 CCTA 的狭窄率、点状钙化、脂质斑块体积是预测 ACS 发生的独立危险因素,将解剖学指标和功能学指标相结合建立联合预测模型可提高对患者未来发生 ACS 的预测能力,有助于指导患者的风险分层及临床预后。

#### 参考文献:

[1] 中国心血管健康与疾病报告 2022 概要[J]. 中国循环杂志, 2023, 38(6):583-612.

[2] 邓欣,沈雳,王瑞,等. 基于冠状动脉 CT 的血流储备分数在心肌缺血中的诊断应用价值:一项单中心前瞻性研究[J]. 中国介入心脏病学杂志, 2021, 29(3):138-142.

[3] Liu X, Mo X, Zhang H, et al. A 2-year investigation of the impact of the computed tomography-derived fractional flow reserve calculated using a deep learning algorithm on routine decision-making for coronary artery disease management[J]. *Eur Radiol*, 2021, 31(9):7039-7046.

[4] 宋瑶,霍怀璧,李哈,等. 冠状动脉 CTA 多参数 AI 特征对急性冠脉综合征的诊断价值[J]. 放射学实践, 2023, 38(7):873-878.

[5] Antonopoulos AS, Sanna F, Sabharwal N, et al. Detecting human coronary inflammation by imaging perivascular fat[J]. *Sci Transl Med*, 2017, 9(398):eaal2658.

[6] 马雪妍,侯佳蒙,张永高. 基于 CCTA 的斑块及冠状动脉周围脂肪特征对非梗阻性心肌缺血的诊断价值[J]. 临床放射学杂志, 2023, 42(2):252-257.

[7] Li N, Dong X, Zhu C, et al. Model development and validation of noninvasive parameters based on coronary computed tomography angiography to predict culprit lesions in acute coronary syndromes within 3 years: value of plaque characteristics, hemodynamics and pericoronary adipose tissue[J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2023, 13(7):4325-4338.

[8] Nous FMA, Budde RPJ, Lubbers MM, et al. Impact of machine-learning CT-derived fractional flow reserve for the diagnosis and management of coronary artery disease in the randomized CRES-CENT trials[J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(7):3692-3701.

[9] 韩婷婷,穆玥,洪叶,等. CCTA 定量斑块特征及血管周围脂肪在急性冠脉综合征中的临床价值[J]. 放射学实践, 2021, 36(3):361-

365.

[10] 冠状动脉 CT 血流储备分数应用临床路径中国专家共识[J]. 中国介入心脏病学杂志, 2023, 31(4):241-251.

[11] Ahmadi A, Argulian E, Leipsic J, et al. From subclinical atherosclerosis to plaque progression and acute coronary events: JACC state-of-the-art review[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2019, 74(12):1608-1617.

[12] Narula J, Nakano M, Virmani R, et al. Histopathologic characteristics of atherosclerotic coronary disease and implications of the findings for the invasive and noninvasive detection of vulnerable plaques[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2013, 61(10):1041-1051.

[13] Motoyama S, Sarai M, Harigaya H, et al. Computed tomographic angiography characteristics of atherosclerotic plaques subsequently resulting in acute coronary syndrome[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2009, 54(1):49-57.

[14] Halon DA, Lavi I, Barnett-Griness O, et al. Plaque morphology as predictor of late plaque events in patients with asymptomatic Type 2 diabetes: a long-term observational study[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2019, 12(7 Pt 2):1353-1363.

[15] Lu G, Ye W, Ou J, et al. Coronary computed tomography angiography assessment of high-risk plaques in predicting acute coronary syndrome[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2021, 8:743538.

[16] Munnur RK, Cheng K, Laggoune 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.

[17] Motoyama S, Ito H, Sarai M, et al. Plaque characterization by coronary computed tomography angiography and the likelihood of acute coronary events in mid-term follow-up[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2015, 66(4):337-346.

[18] Lee SE, Sung JM, Andreini D, et al. Differences in progression to obstructive lesions per high-risk plaque features and plaque volumes with CCTA[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(6):1409-1417.

[19] Lee JM, Choi G, Koo BK, et al. Identification of high-risk plaques destined to cause acute coronary syndrome using coronary computed tomographic angiography and computational fluid dynamics[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2019, 12(6):1032-1043.

[20] Huang M, Han T, Nie X, et al. Clinical value of perivascular fat attenuation index and computed tomography derived fractional flow reserve in identification of culprit lesion of subsequent acute coronary syndrome [J]. *Front Cardiovasc Med*, 2023, 10:1090397.

[21] Nakajima A, Sugiyama T, Araki M, et al. Plaque rupture, compared with plaque erosion, is associated with a higher level of pancoronary inflammation[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2022, 15(5):828-839.

[22] Wang Y, Chen H, Sun T, et al. Risk predicting for acute coronary syndrome based on machine learning model with kinetic plaque features from serial coronary computed tomography angiography[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2022, 23(6):800-810.

(收稿日期:2023-11-06 修回日期:2024-04-17)