

## · 心血管影像学 ·

## 基于冠状动脉 CT 血管成像的血流储备分数及阻塞性病变预测疑似冠心病患者不良结局的价值

董衍彤, 李逸雯, 贾崇富, 杨志强, 王照谦

**【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)和阻塞性病变对疑似冠状动脉病变(CAD)患者主要不良心血管事件(MACE)的预测价值。方法:回顾分析 2019 年 4 月—2023 年 6 月因疑似 CAD 而接受 CCTA 检查的患者。按冠状动脉病变-报告和数据系统(CAD-RADS)对 CAD 进行分级,CAD-RADS  $\geq 3$  提示存在血管阻塞性病变。基于 CCTA 图像数据,使用机器学习 CT-FFR 软件计算 CT-FFR 值,CT-FFR  $\leq 0.8$  提示血管狭窄病变具有血流动力学意义。随访并记录患者的 MACE。Cox 回归分析用于评估心血管危险因素、阻塞性病变以及 CT-FFR(+)与 MACE 的关系,受试者工作特征(ROC)曲线用于评估不同模型预测 MACE 的性能。结果:最终纳入患者 203 例,中位随访时间 27 个月,其中 34 例(16.7%)患者发生 MACE。与非 MACE 组相比,MACE 组的阻塞性病变( $P=0.005$ )及 CT-FFR(+)患者比例( $P<0.001$ )更高。多因素 Cox 回归分析显示,CT-FFR(+) ( $HR=12.76, 95\% CI: 2.68 \sim 60.66$ )是疑似 CAD 患者发生 MACE 的较强独立预测因子( $P<0.05$ )。基于心血管危险因素+阻塞性病变+CT-FFR(+)的模型( $AUC=0.80, 95\% CI: 0.74 \sim 0.85$ )对 MACE 的预测性能优于基于心血管危险因素的模型( $AUC=0.69, 95\% CI: 0.62 \sim 0.75$ ) ( $P<0.05$ )和基于心血管危险因素+阻塞性病变的模型( $AUC=0.73, 95\% CI: 0.66 \sim 0.79$ ) ( $P<0.05$ )。结论:CT-FFR 是疑似 CAD 患者发生 MACE 的较强独立预测因子。与基于传统心血管危险因素的预测模型相比,联合 CT-FFR 和阻塞性病变的模型能显著提升疑似 CAD 患者 MACE 的预测性能。

**【关键词】** 冠状动脉;体层摄影术,X 线计算机;冠状动脉疾病;预后**【中图分类号】** R322.12;R814.4;R541.4;R543.3;R449 **【文献标志码】** A**【文章编号】** 1000-0313(2026)02-0175-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2026.02.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**Value of fractional flow reserve and obstructive lesion from CCTA in predicting adverse outcomes in patients with suspected coronary artery disease** DONG Yan-tong, LI Yi-wen, JIA Chong-fu, et al. Department of Cardiovascular Radiology, the First Affiliated Hospital of Dalian Medical University, Dalian 116011, China

**【Abstract】** **Objective:** To investigate the value of coronary CT angiography (CCTA)-derived fractional flow reserve (CT-FFR) and obstructive lesions in predicting major adverse cardiovascular events (MACE) in patients with suspected coronary artery disease (CAD). **Methods:** Clinical data of patients with suspected CAD who underwent CCTA from April 2019 to June 2023 were retrospectively analyzed. CAD was classified according to the CAD-reporting and data system (CAD-RADS), with CAD-RADS  $\geq 3$  (50% stenosis) defined as obstructive lesions. CT-FFR values were computed via machine learning-based CT-FFR software, and CT-FFR  $\leq 0.8$  (+) was defined as hemodynamically significant stenosis. Patients were followed up and the occurrence of MACE was recorded. Cox regression analyses were used to evaluate associations of cardiovascular risk factors, obstructive lesions, and CT-FFR (+) with MACE. Receiver operating characteristic (ROC) curves were used to assess the predictive performance of different models for MACE. **Results:** A total of 203 patients were enrolled, with 34 (16.7%) experiencing MACE during a median follow-up of 27 months. Compared with the non-MACE

作者单位:116011 辽宁,大连医科大学附属第一医院心血管放射科

作者简介:董衍彤(1998—),女,辽宁辽阳人,硕士,主要从事心血管放射学研究。

通讯作者:王照谦, E-mail: wangzq2000@hotmail.com

基金项目:辽宁省应用基础研究计划项目(2023JH2/101300081)

group, the MACE group had significantly higher proportions of obstructive lesions ( $P=0.005$ ) and CT-FFR (+) ( $P<0.001$ ). Multivariate Cox regression showed that CT-FFR (+) ( $HR=12.76, 95\% CI: 2.68\sim 60.66, P<0.05$ ) was an independent predictor of MACE. The model based on cardiovascular risk factors+obstructive lesions+CT-FFR (+) ( $AUC=0.80, 95\% CI: 0.74\sim 0.85$ ) had significantly better predictive efficacy for MACE than the model based on cardiovascular risk factors ( $AUC=0.69, 95\% CI: 0.62\sim 0.75, P<0.05$ ) and the model based on cardiovascular risk factors+obstructive lesions ( $AUC=0.73, 95\% CI: 0.66\sim 0.79, P<0.05$ ). **Conclusion:** CT-FFR is a strong independent predictor of MACE in patients with suspected CAD. Compared with the model based on cardiovascular risk factors, the model combining CT-FFR and obstructive lesions can significantly improve the predictive performance for MACE in this population.

**【Key words】** Coronary arteries; Tomography, X-ray computed; Coronary artery disease; Prognosis

冠状动脉 CT 血管成像 (coronary CT angiography, CCTA) 作为非侵入性方法能提供血管狭窄和粥样硬化斑块的解剖学信息, 有助于冠状动脉病变 (coronary artery disease, CAD) 患者临床管理策略的制定, 而且基于 CCTA 的 CAD-报告和数据库系统 (CAD-reporting and data system, CAD-RADS) 已被用于临床实践。目前, CCTA 已被指南作为低-中危稳定性胸痛患者的 Ia 类推荐<sup>[1]</sup>。

众所周知, 确定冠状动脉狭窄是否具有血流动力学意义是后续临床决策的关键因素之一。尽管 CCTA 能有效检出血管狭窄尤其  $\geq 50\%$  狭窄 (阻塞性病变或 CAD-RADS  $\geq 3$  级), 但以其预测血管狭窄特异性缺血的特异度很低, 通常还需进一步功能学评估如核素显像、磁共振心肌灌注成像或侵入性血流储备分数 (fraction flow reserve, FFR) 测量。

近十余年来, 基于 CCTA 图像数据并应用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 的血流储备分数 (CT-derived flow reserve fraction, CT-FFR) 计算作为冠状动脉功能学评估的一项新兴技术取得进展。研究<sup>[2-6]</sup>证实 CT-FFR 对稳定性 CAD 患者血管狭窄特异性缺血的检出具有较高准确度。

临床实践中因胸痛等疑似 CAD 患者的风险分层备受关注。研究<sup>[7]</sup>证实传统心血管风险因素和阻塞性病变在疑似 CAD 患者风险分层中具有一定价值。随着 CT-FFR 研究的逐步深入, 基于 CFD 的 CT-FFR 用于疑似 CAD 患者预后评估的研究初步证实, 与阻塞性病变相比, CT-FFR 对其发生主要不良心血管事件 (major adverse cardiovascular event, MACE) 的预测能力更优越<sup>[4,8-10]</sup>。但目前将 CT-FFR 和阻塞性病变联合用于疑似 CAD 患者预后评估的循证证据尚匮乏, 故本研究的目的是探讨 CT-FFR 及阻塞性病变对疑似 CAD 患者 MACE 的预测性能评估。

## 材料与方法

### 1. 研究人群

回顾性连续纳入 2019 年 4 月至 2023 年 6 月期间因疑似 CAD 就诊并接受 CCTA 检查的患者。纳入标准: ① 年龄  $\geq 18$  岁; ② CCTA 图像质量满足 CAD-RADS 分级。排除标准: ① 既往存在心肌梗死或血运重建 (经皮冠状动脉介入治疗、冠状动脉旁路移植术) 病史; ② 严重心脏瓣膜病、心肌病等心脏器质性疾病; ③ 冠状动脉畸形、动脉瘤; ④ 早期 (基线 CCTA 采集后 90 天内) 血运重建; ⑤ CCTA 图像不满足 CT-FFR 计算; ⑥ 临床基线特征信息缺失或失访。本研究获得医院伦理委员会批准 (审批号: PJ-KS-KY-2024-345)。

查阅医院电子病历系统和电话回访患者及家属, 记录患者的临床基线特征, 评估患者 MACE 的发生并记录基线 CCTA 至 MACE 发生的时间。MACE 包括心源性死亡、非致命性心肌梗死 (ST 段抬高和非 ST 段抬高心肌梗死)、不稳定性心绞痛、晚期 (基线 CCTA 检查后 90 d 以上) 血运重建以及因心衰住院。

### 2. CCTA 图像采集及 CAD-RADS 分级

心率  $> 80$  次/分的患者在检查前 1 h 左右口服美托洛尔 (Metoprolol, 阿斯利康制药有限公司) 47.5 mg 或 95 mg。检查前 3~5 min 舌下含服硝酸甘油 (nitroglycerin, 北京益民药业有限公司) 0.25 mg。使用第二代双源 CT (Somatom Flash) 或第三代双源 CT (Somatom Force) (Siemens Healthineers, Germany), 采用前瞻性心电触发序列扫描模式采集 CCTA 数据<sup>[11]</sup>。

两名医师 (均有 3 年以上 CCTA 诊断工作经历) 按 CAD-RADS 对 CAD 进行分级<sup>[12]</sup>, 当评估意见出现分歧时经协商达成一致。CAD-RADS  $\geq 3$  提示存在血管阻塞性病变。

### 3. CT-FFR 测量和分析方法

基于 CCTA 图像数据, 使用机器学习 CT-FFR 软

件 (syngo. CT computed Fractional Flow Reserve VA10, Siemens Healthineers, Germany) 计算 CT-FFR 值。两名医师(均有 3 年以上 CCTA 诊断工作经历)独立测量患者冠状动脉(左前降支、左回旋支及右冠状动脉)狭窄病变(30%~90%)远端 2 cm 处 CT-FFR 值(1 支血管存在多处狭窄时,选取狭窄最严重病变测量 CT-FFR 值),取两者的平均值。CT-FFR  $\leq$  0.8 提示狭窄病变具有血流动力学意义,标注 CT-FFR (+)。当冠状动脉存在  $>90\%$  狭窄或闭塞时,直接标注 CT-FFR (+);当 1 支冠状动脉无狭窄或仅存在  $<30\%$  狭窄时,直接标注 CT-FFR (-)。患者 3 支冠状动脉中的 CT-FFR 最低值被用于患者预后分析。

#### 4. 统计学分析

采用 SPSS 22.0 和 Medcalc 20.0 软件进行统计学分析。符合正态分布的连续性变量表示为  $\bar{x} \pm s$ , 采用独立样本  $t$  检验;不符合正态分布的连续变量表示为中位数及四分位间距,采用 Mann-Whitney  $U$  检验;分类变量以百分比表示,采用  $\chi^2$  检验。组内一致性相关系数(ICC)用于评估观察者间的一致性。COX 回归分析用于评价心血管风险因素、阻塞性病变和 CT-FFR (+) 与 MACE 的关系。绘制受试者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线并计算曲线下面积(area under curve, AUC)以便评估不同模型对 MACE 的预测性能,采用 DeLong 检验比较模型间预测性能差异。模型区分度的改进通过计算的整体卡方检验和 Harrell's C 指数。 $P < 0.05$  为差异具有统计学意义。

## 结果

### 1. 基线临床特征及临床结局

在连续搜集的 386 例患者中,183 例被排除(CCTA 图像质量不满足 CT-FFR 计算 56 例,早期血运重建 112 例,失访 15 例)。最终被纳入研究的患者 203 例,年龄 61.0(57.0, 67.0)岁,男 154 例(75.9%);

中位随访时间 27(19.2, 40.7)个月;34 例(16.7%)患者在随访期内发生 MACE,其中心源性死亡 3 例(8.8%),非致命性心肌梗死 2 例(5.9%),晚期血运重建 3 例(8.8%),不稳定性心绞痛 26 例(76.5%);使用第二代和第三代双源 CT 扫描仪采集 CCTA 图像分别为 43 例(21.2%)和 160 例(78.8%);CCTA 采集的有效辐射剂量( $4.8 \pm 0.5$ ) mSv。与非 MACE 组相比, MACE 组糖尿病(47.1% vs. 26.6%,  $P < 0.05$ )和血脂异常(79.4% vs. 53.8%,  $P < 0.01$ )患者的比例更高(表 1)。

### 2. 阻塞性病变和 CT-FFR

203 例患者中阻塞性病变(CAD-RADS  $\geq 3$ )和非阻塞性病变(CAD-RADS  $< 3$ )患者分别为 117 例(57.6%)和 86 例(42.4%),MACE 组的阻塞性病变患者的比例显著高于非 MACE 组( $P = 0.005$ );CT-FFR (+)和 CT-FFR (-)患者分别为 97 例(47.8%)和 106 例(52.2%),MACE 组的 CT-FFR (+)患者比例显著高于非 MACE 组( $P < 0.001$ ),见表 1。在 CT-FFR 评估中,两名分析者间的一致性高(ICC 值 = 0.847)。

### 3. COX 回归分析及 MACE 预测模型性能

单因素 COX 回归分析显示血脂异常(HR: 2.93; 95% CI: 1.28~6.74,  $P = 0.01$ )、糖尿病(HR: 2.21; 95% CI: 1.13~4.33,  $P = 0.02$ )、阻塞性病变(HR: 2.47; 95% CI: 1.07~5.69,  $P = 0.03$ )和 CT-FFR (+)(HR: 4.90; 95% CI: 2.03~11.85,  $P = 0.00$ )是 MACE 的预测因子(表 2)。

多因素 COX 回归分析显示,在模型 1(基于心血管风险因素),糖尿病(HR: 2.51; 95% CI: 1.27~4.94,  $P = 0.01$ )和血脂异常(HR: 3.27; 95% CI: 1.42~7.55,  $P = 0.01$ )是 MACE 的独立预测因子;在模型 2(基于心血管风险因素 + 阻塞性病变),糖尿病(HR: 2.52; 95% CI: 1.28~4.98,  $P = 0.01$ )和血脂异常(HR: 3.10; 95% CI: 1.34~7.18,  $P = 0.01$ )仍是 MACE 的独立预

表 1 基线临床特征、阻塞性病变及 CT-FFR

特征	MACE 组(n=34)	非 MACE 组(n=169)	统计值	P
年龄(岁)	60.5(58.0, 68.3)	61.0(56.5, 67.0)	-0.548 <sup>b</sup>	0.584
男性(n (%))	26(76.5%)	128(75.7%)	0.008 <sup>a</sup>	0.928
BMI(kg/m <sup>2</sup> )	24.9(22.4, 26.1)	24.7 (23.1, 26.3)	-0.280 <sup>b</sup>	0.780
心血管风险因素 n(%)				
高血压	26(76.5%)	99(58.6%)	3.829 <sup>a</sup>	0.050
糖尿病	16(47.1%)	45(26.6%)	5.621 <sup>a</sup>	0.018
血脂异常	27(79.4%)	91(53.8%)	7.601 <sup>a</sup>	0.006
吸烟史	18(52.9%)	73(43.2%)	1.087 <sup>a</sup>	0.297
CAD 家族史	11(32.4%)	31(18.3%)	3.386 <sup>a</sup>	0.066
阻塞性病变及 CT-FFR n(%)				
阻塞性病变(CAD-RADS $\geq 3$ )	27(79.4%)	90(53.3%)	7.932 <sup>a</sup>	0.005
CT-FFR(+)	28(82.4%)	69(40.8%)	19.561 <sup>a</sup>	0.001

注:<sup>a</sup>为卡方检验  $\chi^2$  值,<sup>b</sup>为 Mann-Whitney 检验 Z 值

测因子,阻塞性病变(HR:2.26;95%CI:0.98~5.21, $P=0.06$ )不是 MACE 的独立预测因子;在模型 3(基于心血管危险因素+阻塞性病变+CT-FFR),糖尿病(HR:2.19;95%CI:1.11~4.31, $P=0.02$ )和血脂异常(HR:2.80;95%CI:1.21~6.50, $P=0.02$ )仍是 MACE 的独立预测因子,CT-FFR(+)是 MACE 的较强独立预测因子(HR:12.76;95%CI:2.68~60.66, $P<0.001$ ,表 3)。

3 个模型预测性能:模型 1 的 AUC 值为 0.69(95%CI:0.62~0.75);模型 2 的 AUC 值 0.73(95%CI:0.66~0.79, $P=0.03$ );模型 3 的 AUC 值 0.80(95%CI:0.74~0.85, $P=0.02$ ),且模型之间存在显著性差异( $P<0.05$ ,图 1)。

不同模型间的预后价值增量评估显示,模型 2 相较于模型 1 的卡方评分由 14.40 升至 18.62,相应的 C-指数由 0.66 升至 0.71;模型 3 相较于模型 2 的卡方评分由 18.62 升至 30.53,相应的 C-指数由 0.71 升至 0.76(表 4)。

表 2 单因素 COX 回归分析

指标	HR 值	95% CI for Exp(B)	P
年龄	1.00	0.96~1.04	1.00
性别	1.19	0.54~2.65	0.67
BMI	1.01	0.90~1.13	0.89
高血压	2.14	0.97~4.72	0.06
血脂异常	2.93	1.28~6.74	0.01
糖尿病	2.21	1.13~4.33	0.02
吸烟史	1.31	0.67~2.57	0.43
CAD 家族史	1.94	0.95~4.00	0.07
阻塞性病变 (CAD-RADS $\geq 3$ )	2.47	1.07~5.69	0.03
CT-FFR(+)	4.90	2.03~11.85	0.00

表 3 多因素 COX 回归分析

指标	模型 1		模型 2		模型 3	
	心血管危险因素	P	心血管危险因素 +阻塞性病变	P	心血管危险因素 +阻塞性病变+ CT-FFR(+)	P
糖尿病	2.51(1.27~4.94)	0.01	2.52(1.28~4.98)	0.01	2.19(1.11~4.31)	0.02
血脂异常	3.27(1.42~7.55)	0.01	3.10(1.34~7.18)	0.01	2.80(1.21~6.50)	0.02
阻塞性病变			2.26(0.98~5.21)	0.06	0.27(0.06~1.56)	0.08
CT-FFR(+)					12.76(2.68~60.66)	0.00

表 4 三个模型的预测效能

	$\chi^2$ 值	一致性分析	P
模型 1	14.40	0.66(0.57~0.75)	0.0007
模型 2	18.62	0.71(0.62~0.79)	0.0003
模型 3	30.53	0.76(0.69~0.83)	<0.0001

## 讨论

通过对 203 例疑似 CAD 患者心血管危险因素、阻塞性病变和 CT-FFR 分析以及 27 个月的随访,我们发现 CT-FFR(+)是疑似 CAD 患者发生 MACE 的较强独立预测因子,与基于心血管危险因素预测模型

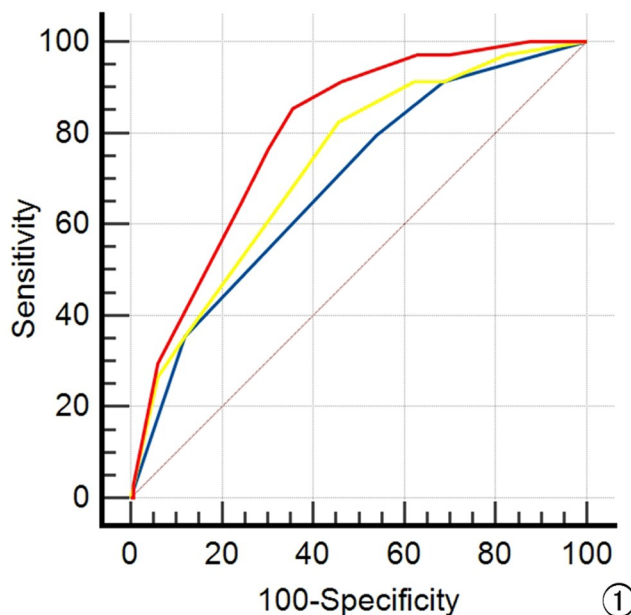


图 1 三个模型预测疑似 CAD 患者 MACE 的 ROC 曲线

相比,联合 CT-FFR(+)和阻塞性病变能显著提升对疑似 CAD 患者 MACE 的预测性能。

CCTA 作为非侵入性技术检出血管  $\geq 50\%$  狭窄(阻塞性病变)的敏感度和阴性预测值很高<sup>[13]</sup>。研究<sup>[14,15]</sup>证实基于 CCTA 的阻塞性病变是疑似 CAD 患者发生 MACE 的预测因子,而且对传统心血管危险因素具有增量价值。鉴于单纯 CCTA 的局限性(仅提供解剖学信息),有必要在疑似 CAD 患者预后评估中添加血管狭窄病变的功能学信息以便实施精准的风险分层。

CT-FFR 用于血管狭窄(30%~90%)病变血流动力学评估的价值已在多项研究中得到验证<sup>[16-21]</sup>,其作为 CCTA 的下游功能学评估方法在疑似 CAD 患者的临床管理决策和预后评估中具有潜在的临床应用价值。一项多中心前瞻性研究<sup>[9]</sup>发现,基于 CT-FFR(一)而取消侵入性冠状动脉造影(invasive coronary angiography, ICA)的患者在 90 d 内未发生 MACE,而且在计划 ICA 队列的 1 年随访期内,基于 CCTA/CT-FFR 指导的患者 MACE 发生率与直接 ICA 队列无统计学差异。ADVANCE 注册系列研究<sup>[22,23]</sup>显示在 90

d 随访期内,CT-FFR(-)患者中无心源性死亡/心肌梗死发生,而 CT-FFR(+)患者中发生 19 例(0.6%) MACE 和 14 例(0.3%)死亡/心肌梗死,提示 CT-FFR(-)与良好的短期预后相关;另外,CT-FFR(+)患者在 1 年随访期内的 MACE 发生率和血运重建率与 CT-FFR(-)患者相比更高。

CT-FFR 有潜力为疑似 CAD 患者提供预后信息<sup>[9,10]</sup>。本研究发现与非 MACE 组相比,MACE 组 CT-FFR(+)患者的比例更高,而且 CT-FFR(+)是疑似 CAD 患者发生 MACE 的较强独立预测因子。一项荟萃分析<sup>[24]</sup>结果显示在稳定性 CAD 患者中,CT-FFR(+)患者与 1 年随访期内 MACE 发生率较高有关。本研究发现在 27 个月随访期内,CT-FFR(+)患者未来发生 MACE 的风险与 CT-FFR(-)患者相比更高;而且对于疑似 CAD 患者的 MACE 预测而言,阻塞性病变和 CT-FFR(+)对心血管风险因素具有显著增量价值。Wada 等<sup>[7]</sup>的研究也证实 CT-FFR(+),阻塞性病变与心血管风险因素联合应用能更准确预测疑似 CAD 患者的 MACE。NXT 研究<sup>[25]</sup>证实 CT-FFR(+)是疑似 CAD 患者 5 年随访期内主要复合终点死亡、非致命性心肌梗死和血运重建的重要预测因子。此外,CT-FFR(+)也是非计划血运重建驱动 MACE 的预测因子,CT-FFR(+)患者的 MACE 包括心源性死亡、心肌梗死和血运重建发生率显著高于 CT-FFR(-)患者,而 CT-FFR(-)患者未发生心源性死亡或心肌梗死,提示 CT-FFR(-)患者的长期安全性。

本研究表明在心血管风险因素基础上,联合 CT-FFR 和阻塞性病变的综合预测模型对疑似 CAD 患者的 MACE 具有更优越的预测能力,提示在临床实践中应将 CT-FFR 计算技术常规纳入基于 CCTA 血管狭窄评估的临床管理决策流程当中,这不仅有助于改善疑似 CAD 患者的风险分层,而且还能指导临床管理决策并改善患者的临床结局。

本研究存在一些局限性:①作为单中心、回顾性研究,被纳入研究的疑似 CAD 患者数量偏少且随访时间相对较短,研究结果也许存在偏倚;②未考虑冠状动脉钙化(尽管本队列中总钙化积分>400 患者的比例仅为 14.3%)对 CT-FFR 计算结果的影响;③本研究属于观察性研究而非干预性研究,也许存在潜在的研究偏倚。

总之,CT-FFR 是疑似 CAD 患者发生 MACE 的较强独立预测因子。与基于传统心血管风险因素的预测模型相比,联合 CT-FFR 和阻塞性病变能显著提升疑似 CAD 患者 MACE 的预测性能。

#### 参考文献:

[1] Maroules CD, Rajiah P, Bhasin M, et al. Current evidence in cardio-

thoracic imaging: growing evidence for coronary computed tomography angiography as a first-line test in stable chest pain[J]. J Thoracic Imaging, 2019, 34(1): 4-11.

- [2] 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 College of Cardiology, 2019, 73(2): 161-173.
- [3] Koo BK, Erglis A, Doh JH, et al. Diagnosis of ischemia-causing coronary stenoses by noninvasive fractional flow reserve computed from coronary computed tomographic angiograms. Results from the prospective multicenter DISCOVER-FLOW (diagnosis of ischemia-causing stenoses obtained via noninvasive fractional flow reserve) study[J]. J Am College of Cardiology, 2011, 58(19): 1989-1997.
- [4] Nakazato R, Park HB, Berman DS, et al. Noninvasive fractional flow reserve derived from computed tomography angiography for coronary lesions of intermediate stenosis severity: results from the DeFACTO study[J]. Circulation Cardiovascular Imaging, 2013, 6(6): 881-889.
- [5] Nørgaard BL, Leipsic J, Gaur S, et al. Diagnostic performance of noninvasive fractional flow reserve derived from coronary computed tomography angiography in suspected coronary artery disease: the NXT trial (analysis of coronary blood flow using CT angiography: next steps)[J]. J Am College of Cardiology, 2014, 63(12): 1145-1155.
- [6] 凡子榕, 刘庆爽, 王照谦, 等. 基于机器学习方法心室舒张期和收缩期 CT 血流储备分数评估狭窄冠状动脉血流动力学[J]. 放射学实践, 2025, 40(4): 478-484.
- [7] Wada S, Iwanaga Y, Nakai M, et al. Combination of coronary CT angiography, FFRCT, and risk factors in the prediction of major adverse cardiovascular events in patients suspected CAD[J]. Clinical Cardiology, 2023, 46(5): 494-501.
- [8] Neumann FJ, Sousa-Uva M, Ahlsson A, et al. 2018 ESC/EACTS Guidelines on myocardial revascularization[J]. Eur Heart J, 2019, 40(2): 87-165.
- [9] Douglas PS, De Bruyne B, Pontone G, et al. 1-year outcomes of FFRCT-guided care in patients with suspected coronary disease: the PLATFORM study[J]. J Am College of Cardiology, 2016, 68(5): 435-445.
- [10] Nørgaard BL, Terkelsen CJ, Mathiassen ON, et al. Coronary CT angiographic and flow reserve-guided management of patients with stable ischemic heart disease[J]. J Am College of Cardiology, 2018, 72(18): 2123-2134.
- [11] 刘庆爽, 杨志强, 贾崇富, 等. 负荷动态 CT 心肌灌注成像对疑似冠心病患者的预后价值[J]. 放射学实践, 2025, 40(3): 356-361.
- [12] Cury RC, Leipsic J, Abbara S, et al. CAD-RADSTM 2.0-2022 coronary artery disease-reporting and data system: an expert consensus document of the society of cardiovascular computed tomography (SCCT), the American college of cardiology (ACC), the American college of radiology (ACR), and the North America Society of Cardiovascular Imaging (NASCI)[J]. J Cardiovascular Computed Tomography, 2022, 16(6): 536-557.
- [13] Knuuti J, Wijns W, Saraste A, et al. 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes[J]. Eur Heart J, 2020, 41(3): 407-477.

- [14] 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 multicentre international CONFIRM study[J]. *Eur Heart J*, 2018, 39(11):934-941.
- [15] Andreucci M, Faga T, Serra R, et al. Update on the renal toxicity of iodinated contrast drugs used in clinical medicine[J]. *Drug, Healthcare and Patient Safety*, 2017, 9:25-37.
- [16] Fischer AM, Van Assen M, Schoepf UJ, et al. Non-invasive fractional flow reserve (FFRCT) in the evaluation of acute chest pain-concepts and first experiences[J]. *Eur J Radiology*, 2021, 138:109633.
- [17] Tesche C, De Cecco CN, Albrecht MH, et al. Coronary CT angiography-derived fractional flow reserve[J]. *Radiology*, 2017, 285(1):17-33.
- [18] Coenen A, Kim YH, Kruk M, et al. Diagnostic accuracy of a machine-learning approach to coronary computed tomographic angiography-based fractional flow reserve: result from the MACHINE consortium [J]. *Circulation Cardiovascular Imaging*, 2018, 11(6):e007217.
- [19] Baumann S, Hirt M, Schoepf UJ, et al. Correlation of machine learning computed tomography-based fractional flow reserve with instantaneous wave free ratio to detect hemodynamically significant coronary stenosis[J]. *Clinical Research in Cardiology: Official Journal of the German Cardiac Society*, 2020, 109(6):735-745.
- [20] Lossnitzer D, Klenantz S, Andre F, et al. Stable patients with suspected myocardial ischemia: comparison of machine-learning computed tomography-based fractional flow reserve and stress perfusion cardiovascular magnetic resonance imaging to detect myocardial ischemia[J]. *BMC Cardiovascular Disorders*, 2022, 22(1):34.
- [21] Yu M, Lu Z, Li W, et al. CT morphological index provides incremental value to machine learning based CT-FFR for predicting hemodynamically significant coronary stenosis[J]. *International J Cardiology*, 2018, 265:256-261.
- [22] 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 Journal*, 2018, 39(41):3701-3711.
- [23] Patel MR, Nørgaard BL, Fairbairn TA, et al. 1-year impact on medical practice and clinical outcomes of FFRCT: the ADVANCE registry[J]. *JACC Cardiovascular Imaging*, 2020, 13(1 Pt 1):97-105.
- [24] Nørgaard BL, Gaur S, Fairbairn TA, et al. Prognostic value of coronary computed tomography angiographic derived fractional flow reserve: a systematic review and meta-analysis[J]. *Heart (British Cardiac Society)*, 2022, 108(3):194-202.
- [25] Ihdahid AR, Nørgaard BL, Gaur S, et al. Prognostic value and risk continuum of noninvasive fractional flow reserve derived from coronary CT angiography[J]. *Radiology*, 2019, 292(2):343-351.

(收稿日期:2025-04-27 修回日期:2025-09-30)

## 下期要目

- 基于 CT 血管造影的下肢深静脉血栓与肺栓塞位置相关性分析
- 基于双中心双能 CT 影像组学预测胃癌术前淋巴管侵犯
- 磁共振 T<sub>2</sub>WI 影像组学联合内膜形态学特征对子宫内膜纤维化的分级评估
- 基于 T<sub>1</sub>WI 机器学习模型预测新生儿急性胆红素脑病的价值
- 胸部 X 射线摄影中辐射剂量估算与风险分析
- 基于 Tau PET SUVR 的机器学习和列线图模型在阿尔茨海默病中的预测价值
- 细支气管腺瘤与孤立性肺炎性结节及周围型肺癌的临床及 CT 特征对照分析
- 基于 DCE-MRI 和 DWI 瘤内及瘤周的影像组学预测乳腺 BI-RADS4 类病变良恶性的价值
- 基于并行采集和深度学习技术构建髌关节撞击综合征高效诊断体系及效力评估
- 基于术前<sup>18</sup>F-FDG PET/CT 深度学习的影像组学预测结直肠腺癌淋巴结转移及预后评估