

# 基于CT-FFR联合临床指标对疑似冠心病胸痛患者18个月MACE的预测价值研究

张燕, 梁有峰\*

安徽医科大学第一附属医院心血管内科, 安徽 合肥

收稿日期: 2026年4月14日; 录用日期: 2026年5月8日; 发布日期: 2026年5月18日

## 摘要

目的: 评估基于冠状动脉CT血管成像的血流储备分数(Computed Tomography-Derived Fractional Flow Reserve, CT-FFR)对疑似冠心病胸痛患者18个月主要不良心血管事件(Major Adverse Cardiovascular Event, MACE)的预测价值, 并探索其与临床指标联合的增量效能。方法: 连续纳入196例因胸痛就诊并完成CCTA的疑似冠心病患者, 根据CT-FFR值分为阳性组( $\leq 0.80$ ,  $n = 93$ )和阴性组( $> 0.80$ ,  $n = 103$ )。收集基线临床资料、实验室指标及诊疗路径信息。主要终点为18个月MACE事件。采用Kaplan-Meier生存分析、多因素Logistic回归及受试者工作特征(ROC)曲线评估CT-FFR的预测价值。结果: 随访期间, CT-FFR阳性组MACE发生率显著高于阴性组(31.18% vs. 8.74%,  $P < 0.001$ )。多因素Logistic回归显示, CT-FFR阳性是MACE的独立预测因子(OR = 5.461, 95% CI: 2.253~13.236,  $P < 0.001$ )。单独CT-FFR预测MACE的AUC为0.679, 联合年龄、BNP、血肌酐(Cr)的模型B的AUC提升至0.752 ( $P = 0.035$ )。结论: CT-FFR  $\leq 0.80$ 是疑似冠心病患者18个月MACE的强独立预测因子。联合CT-FFR与BNP、Cr等临床指标可显著提高风险分层效能。

## 关键词

计算机断层血流储备分数, 冠心病, 临床决策, 主要不良心血管事件

## Predictive Value of CT-FFR Combined with Clinical Indicators for 18-Month MACE in Patients with Chest Pain Suspected of Coronary Artery Disease

Yan Zhang, Youfeng Liang\*

Department of Cardiology, The First Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei Anhui

\*通讯作者。

文章引用: 张燕, 梁有峰. 基于 CT-FFR 联合临床指标对疑似冠心病胸痛患者 18 个月 MACE 的预测价值研究[J]. 临床医学进展, 2026, 16(5): 1301-1309. DOI: 10.12677/acm.2026.1651931

## Abstract

**Objective:** This study aimed to evaluate the predictive value of computed tomography-derived fractional flow reserve (CT-FFR) for 18-month major adverse cardiovascular events (MACE) in patients with chest pain suspected of coronary artery disease (CAD), and to explore the incremental efficacy when combined with clinical indicators. **Methods:** A total of 196 consecutive patients with suspected CAD who presented with chest pain and underwent coronary computed tomography angiography (CCTA) were enrolled. They were divided into a positive group (CT-FFR  $\leq 0.80$ ,  $n = 93$ ) and a negative group (CT-FFR  $> 0.80$ ,  $n = 103$ ) based on CT-FFR values. Baseline clinical data, laboratory indicators, and diagnostic/therapeutic pathways were collected. The primary endpoint was MACE at 18 months. Kaplan-Meier survival analysis, multivariate logistic regression, and receiver operating characteristic (ROC) curves were used to assess the predictive value of CT-FFR. **Results:** During follow-up, the MACE rate in the CT-FFR positive group was significantly higher than that in the negative group (31.18% vs. 8.74%,  $P < 0.001$ ). Multivariate logistic regression showed that positive CT-FFR was an independent predictor of MACE (OR = 5.461, 95% CI: 2.253~13.236,  $P < 0.001$ ). The area under the ROC curve (AUC) for CT-FFR alone in predicting MACE was 0.679, while the AUC of Model B, which combined CT-FFR with age, BNP, and serum creatinine (Cr), increased to 0.752 ( $P = 0.035$ ). **Conclusion:** CT-FFR  $\leq 0.80$  is a strong independent predictor of 18-month MACE in patients with suspected CAD. Combining CT-FFR with clinical indicators such as BNP and Cr significantly improves risk stratification performance.

## Keywords

Computed Tomography Fractional Flow Reserve, Coronary Artery Disease, Clinical Decision-Making, Major Adverse Cardiovascular Events

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

冠状动脉粥样硬化性心脏病(冠心病)是全球范围内致死致残的主要病因之一。根据《中国心血管健康与疾病报告 2023》,我国心血管病现患人数约 3.3 亿,其中冠心病患者约 1139 万,且死亡率仍呈上升趋势。对于因胸痛就诊的疑似冠心病患者,如何精准识别高危人群并预测远期心血管事件,是临床决策的核心挑战。冠状动脉 CT 血管成像(CCTA)作为无创解剖成像的首选手段,虽具有高达 95% 以上的阴性预测值,能够有效排除低危患者、避免不必要的侵入性检查,但其难以评估狭窄是否真正导致功能性心肌缺血[1][2]。临床实践中普遍发现,解剖学狭窄程度与心肌缺血之间存在明显的不一致性,约 40% 的严重狭窄并不引起显著缺血,而部分轻度狭窄却可能导致血流动力学障碍。

血流储备分数(FFR)是目前判断冠脉狭窄是否引起缺血的金标准,FFR  $\leq 0.80$  指导的经皮冠状动脉介入治疗(PCI)可显著改善患者预后并减少不必要的支架植入。然而,FFR 的有创性、高成本(压力导丝约 1 万元/条)、药物负荷及操作复杂性限制了其在临床的广泛应用[3]。基于 CCTA 的血流储备分数(CT-FFR)结合计算流体力学与人工智能技术,可在一次无创扫描中同时提供冠状动脉的解剖形态与功能学信息[4][5]。多项国内外研究已证实,CT-FFR 不仅与有创 FFR 具有良好的诊断一致性,而且对主要不良心血管

事件(MACE)具有独立的预测价值[6]-[8]。然而, 目前关于 CT-FFR 与常规临床指标(如年龄、BNP、血肌酐)联合应用的增量预测价值研究仍较有限, 尤其在人群中的验证尚不充分。

BNP 作为心室壁应力增高的敏感标志物, 可反映心脏泵血功能状态; 血肌酐是评估肾功能的核心指标, 体现了心肾交互机制在心血管预后中的重要作用。理论上, 将 CT-FFR 所反映的冠脉供血能力与 BNP 所反映的心肌负荷状态及血肌酐所反映的靶器官储备功能相结合, 可从多维度更全面地评估患者的整体风险。基于此, 本研究旨在真实世界队列中评估 CT-FFR 对疑似冠心病患者 18 个月 MACE 的预测价值, 并探索其与年龄、BNP、血肌酐联合的增量效能, 以期为临床个体化风险分层与治疗决策提供循证依据。

## 2. 对象和方法

### 2.1. 研究对象

连续纳入 2022 年 3 月至 2023 年 5 月于安徽医科大学第一附属医院因胸闷胸痛就诊的疑似冠心病患者 200 例。所有患者均完成 CCTA 检查, 经严格筛选图像质量, 排除严重钙化、伪影等影响评估因素后, 最终 196 例符合条件入组。纳入标准: ① 18~85 岁; ② 因胸闷胸痛就诊的疑似冠心病患者; ③ 已完成 CCTA 检查; ④ 临床资料完整; ⑤ 签署知情同意书。排除标准: ① 急性冠脉综合征或不稳定症状; ② 既往确诊冠心病(心肌梗死、PCI 或 CABG 史); ③ 无法完成 CCTA; ④ 严重肝肾功能不全( $eGFR < 30 \text{ mL/min/1.73m}^2$ ); ⑤ CCTA 图像质量不佳无法计算 CT-FFR; ⑥  $LVEF < 30\%$ ; ⑦ 显著瓣膜病变、起搏器术后; ⑧ 恶性肿瘤; ⑨ 临床失访。

### 2.2. CT-FFR 测定

采用西门子第二代双源 CT (Definition Flash, Siemens Healthcare)采集 CCTA 图像。扫描参数: 管电压 100~120 kV, 管电流根据体重指数调节, 对比剂注射速率 5.0~6.0 mL/s。图像质量要求: 冠状动脉主要节段显示完整, 无严重钙化或运动伪影。由商业软件公司专业技术人员进行 CT-FFR 分析, 采用基于深度学习的算法计算每支血管的 CT-FFR 值, 记录病变远端 2~3 cm 处的数值。以 0.80 为阈值, 将患者分为 CT-FFR 阳性组( $\leq 0.80, n = 93$ )与阴性组( $> 0.80, n = 103$ )。

### 2.3. 随访与终点事件

通过电话随访每 3 个月一次, 共 18 个月, 随访率为 100%。主要终点为 MACE, 定义为心源性死亡、非致死性心肌梗死及计划外血运重建的复合终点。所有终点事件由独立的临床终点事件裁定委员会(3 名高年资心血管专家, 对 CT-FFR 结果不知情)进行盲法裁定。计划外血运重建定义为在完成基线 CCTA 检查 1 个月后因症状恶化或事件驱动的血运重建。

### 2.4. 统计学方法

采用 SPSS 27.0 进行分析。组间比较采用 t 检验、Mann-Whitney U 检验或  $\chi^2$  检验。Kaplan-Meier 法绘制生存曲线, Log-rank 检验比较组间差异。多因素 Logistic 回归(纳入年龄、BNP、Cr、CT-FFR)分析独立预测因子。ROC 曲线评估预测效能, DeLong 检验比较 AUC。P < 0.05 为差异有统计学意义。

## 3. 结果

### 3.1. 研究人群基线特征

共纳入 196 例患者, 平均年龄  $64.09 \pm 12.33$  岁, 男性 118 例(60.2%)。CT-FFR 阳性组 93 例(47.4%), 阴性组 103 例(52.6%)。如表 1 所示, CT-FFR 阳性组男性比例(68.82% vs. 52.43%,  $P = 0.028$ )、糖尿病患病

率(29.03% vs. 12.62%,  $P = 0.008$ )、空腹血糖(5.64 vs. 5.38 mmol/L,  $P = 0.008$ )、血肌酐(75.60 vs. 68.80  $\mu\text{mol/L}$ ,  $P = 0.043$ )及脂蛋白(a) ( $314.95 \pm 377.45$  vs.  $216.11 \pm 235.76$  mg/L,  $P = 0.028$ )均显著高于阴性组。两组在年龄、高血压、血脂(TC、LDL-C)及LVEF 方面差异无统计学意义( $P > 0.05$ )。

**Table 1.** Comparison of baseline characteristics between patients with CT-FFR  $\leq 0.80$  (positive group) and CT-FFR  $> 0.80$  (negative group)

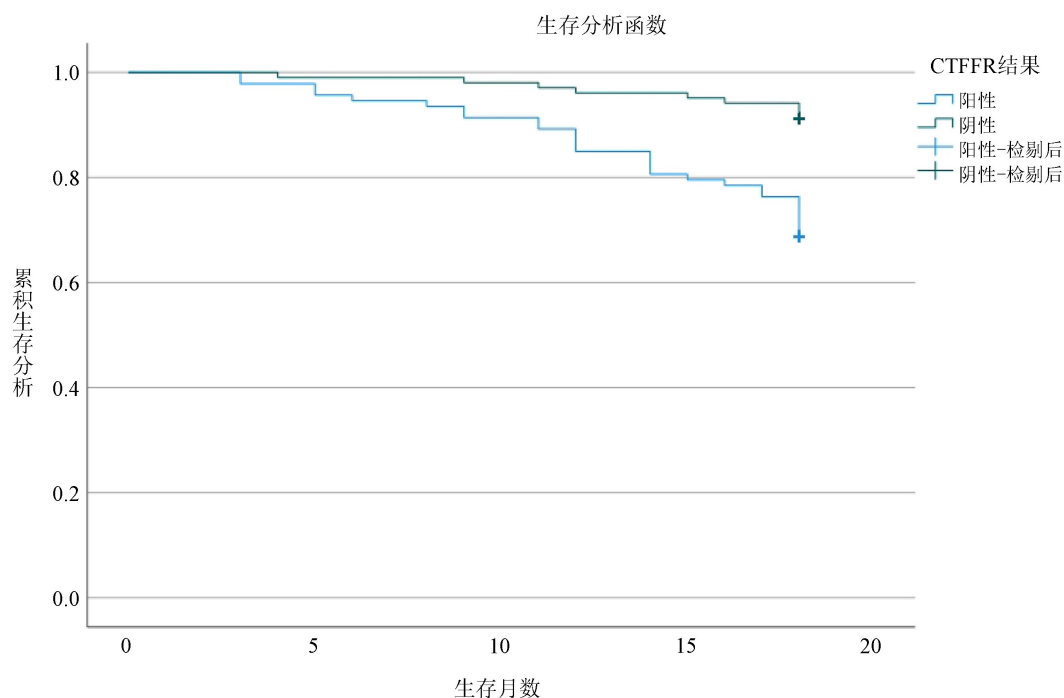
**表 1.** CT-FFR  $\leq 0.80$  阳性组与 CT-FFR  $> 0.80$  阴性组患者基线特征比较

变量	CT-FFR $\leq 0.80$ 阳性组(n = 93)	CT-FFR $> 0.80$ 阴性组(n = 103)	统计量	P 值
人口学特征				
年龄(岁)	65.69 $\pm$ 12.23	62.64 $\pm$ 12.29	t = 1.737	0.084
男性	64 (68.82)	54 (52.43)	$\chi^2 = 4.817$	0.028*
生活方式				
抽烟	33 (35.48)	23 (22.33)	$\chi^2 = 3.524$	0.060
既往史				
糖尿病	27 (29.03)	13 (12.62)	$\chi^2 = 7.124$	0.008**
高血压	52 (55.91)	64 (62.14)	$\chi^2 = 0.547$	0.460
血压				
SBP (mmHg)	132.17 $\pm$ 20.41	133.24 $\pm$ 19.94	t = -0.371	0.711
DBP (mmHg)	77.67 $\pm$ 12.64	76.55 $\pm$ 12.61	t = 0.616	0.538
血脂				
TC (mmol/L)	4.10 $\pm$ 1.03	4.19 $\pm$ 1.07	t = -0.609	0.543
HDL-C (mmol/L)	1.13 $\pm$ 0.24	1.20 $\pm$ 0.27	t = -1.946	0.053
LDL-C (mmol/L)	2.49 $\pm$ 0.83	2.53 $\pm$ 0.86	t = -0.386	0.700
Non-HDL-C (mmol/L)	2.93 $\pm$ 1.01	2.87 $\pm$ 1.06	t = 0.367	0.020*
Lp(a) (mg/L)	314.95 $\pm$ 377.45	216.11 $\pm$ 235.76	t = 2.221	0.028*
代谢/肾功				
Glu (mmol/L)	5.64 (4.96, 7.26)	5.38 (4.81, 6.05)	U = 5847.5	0.008**
Cr ( $\mu\text{mol/L}$ )	75.60 (63.60, 86.90)	68.80 (55.65, 80.50)	U = 5591.5	0.043*
UA ( $\mu\text{mol/L}$ )	336.47 $\pm$ 86.09	340.75 $\pm$ 110.46	t = -0.300	0.765
心脏标志物				
BNP (pg/mL)	62.50 (22.57, 199.26)	41.87 (14.92, 130.52)	U = 5499.5	0.074
血常规				
WBC ( $\times 10^9/L$ )	6.38 $\pm$ 1.72	6.25 $\pm$ 1.93	t = 0.504	0.615
RBC ( $\times 10^{12}/L$ )	4.24 $\pm$ 0.57	4.30 $\pm$ 0.66	t = -0.730	0.466
PLT ( $\times 10^9/L$ )	212.19 $\pm$ 60.58	200.12 $\pm$ 54.74	t = 1.466	0.144
心脏彩超				
LA (cm)	3.94 $\pm$ 0.50	4.09 $\pm$ 0.85	t = -1.502	0.135
LVDD (cm)	5.10 $\pm$ 0.64	5.14 $\pm$ 0.86	t = -0.340	0.734
LVEF (%)	56.69 $\pm$ 7.83	58.04 $\pm$ 6.75	t = -1.297	0.196

注: \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ 。

### 3.2. CT-FFR 与 MACE 的关系

18 个月随访期间, 共发生 MACE 38 例。CT-FFR 阳性组 MACE 发生率显著高于阴性组(31.18% vs. 8.74%,  $P < 0.001$ )。Kaplan-Meier 生存曲线显示两组自随访初期即显著分离(Log-rank  $\chi^2 = 15.993$ ,  $P < 0.001$ , 图 1)。



**Figure 1.** MACE-free survival curves of the CT-FFR positive group and negative group  
**图 1.** CT-FFR 阳性组与阴性组的无 MACE 生存曲线

### 3.3. 多因素 Logistic 回归分析

单因素分析显示, CT-FFR 阳性( $P < 0.001$ )、血肌酐( $P = 0.001$ )、LVEF ( $P = 0.027$ )与 MACE 相关。校正年龄、BNP、血肌酐后, CT-FFR 阳性仍是 MACE 的最强独立预测因子(OR = 5.461, 95% CI: 2.253~13.236,  $P < 0.001$ )。BNP 亦为独立预测因子(OR = 1.001, 95% CI: 1.000~1.002,  $P = 0.004$ , 表 2)。共线性诊断显示 VIF 均  $< 2$ , 无明显多重共线性。

**Table 2.** Multivariate Logistic regression analysis for MACE (parsimonious model)

**表 2.** MACE 发生的多因素 Logistic 回归分析(简约模型)

变量	回归系数(B)	标准误(S.E.)	Wald $\chi^2$	P 值	OR 值	OR 值 95% CI
CT-FFR 结果(CT-FFR $\leq 0.80$ 阳性 vs. CT-FFR $> 0.80$ 阴性)	1.698	0.452	14.125	0.000	5.461	2.253~13.236
BNP (每升高 1 pg/mL)	0.001	0.000	8.292	0.004	1.001	1.000~1.002
年龄(岁)	0.016	0.016	0.914	0.339	1.016	0.984~1.049
血肌酐( $\mu\text{mol/L}$ )	-0.003	0.005	0.467	0.494	0.997	0.987~1.006
常量	-3.557	1.140	9.732	0.002	0.029	-

注: 模型整体检验: 似然比  $\chi^2 = 28.56$ ,  $P < 0.001$ ; Nagelkerke  $R^2 = 0.217$ 。

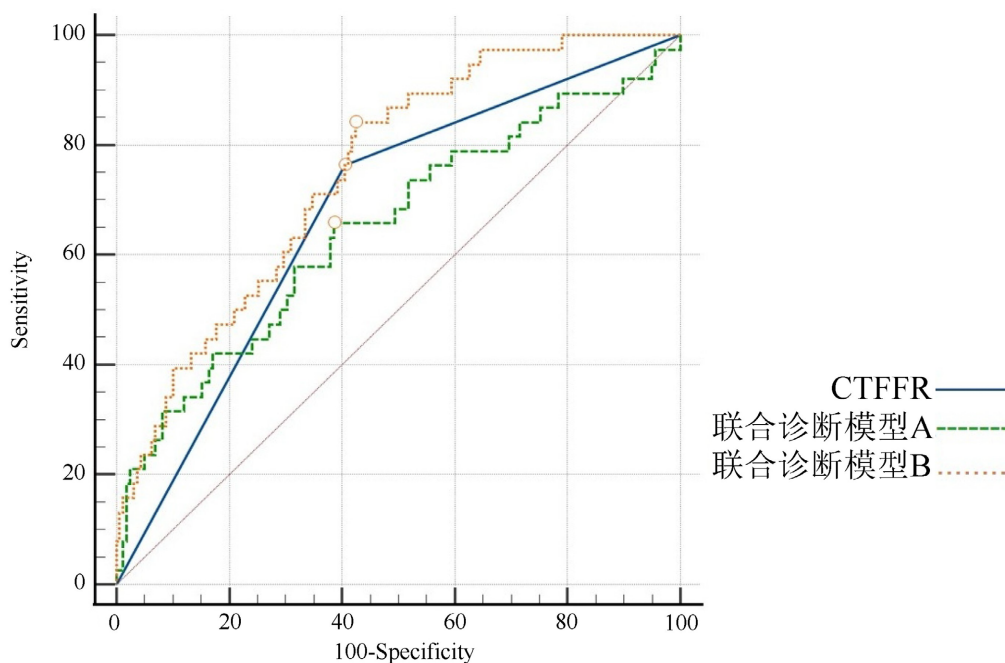
### 3.4. ROC 曲线分析

单独 CT-FFR 预测 MACE 的 AUC 为 0.679 (95% CI: 0.578~0.780,  $P < 0.001$ ), 敏感度 76.3%, 特异度 59.5%。联合诊断模型 A (年龄 + BNP + Cr) 的 AUC 为 0.649 (95% CI: 0.546~0.725,  $P = 0.004$ )。联合诊断模型 B (年龄 + CT-FFR + BNP + Cr) 的 AUC 显著提升至 0.752 (95% CI: 0.685~0.811,  $P < 0.001$ ), 敏感度 84.2%, 特异度 57.0%, 约登指数 0.412。DeLong 检验显示, 模型 B 的 AUC 显著高于单独 CT-FFR (差值 = 0.073,  $P = 0.035$ ) 及模型 A (差值 = 0.103,  $P = 0.028$ , 表 3, 图 2)。

**Table 3.** ROC curve analysis results of individual variables and combined diagnostic models for predicting MACE

**表 3.** 各变量及联合诊断模型预测 MACE 的 ROC 曲线分析结果

预测指标	AUC (95% CI)	P 值	最佳界值	敏感度(%)	特异度(%)	约登指数
CT-FFR 结果 (CT-FFR $\leq 0.80$ 阳性 vs. CT-FFR $> 0.80$ 阴性)	0.679 (0.578~0.780)	<0.001	1.0000	76.3	59.5	0.358
BNP (每升高 1 pg/mL)	0.585 (0.481~0.689)	0.109	193.93 pg/mL	42.1	82.3	0.244
年龄(岁)	0.603 (0.499~0.707)	0.053	75 岁	36.8	84.2	0.210
Cr ( $\mu\text{mol/L}$ )	0.667 (0.565~0.769)	0.001	75.6 $\mu\text{mol/L}$	68.4	65.8	0.342
联合诊断模型 A	0.649 (0.546~0.725)	0.004	0.1788	65.8	61.4	0.272
联合诊断模型 B	0.752 (0.685~0.811)	<0.001	0.1645	84.2	57.0	0.412



**Figure 2.** Results of ROC curve analysis for each prediction model

**图 2.** 各预测模型的 ROC 曲线分析结果

## 4. 讨论

### 4.1. CT-FFR 是 MACE 的独立预测因子

本研究发现, CT-FFR  $\leq 0.80$  是 18 个月 MACE 发生的强独立预测因子(OR = 5.461), 阳性组 MACE

发生率高达 31.18%，而阴性组仅 8.74%。这一效应量与国内外最新研究高度一致。Li 等[9]对 2566 例冠心病患者长达 5 年随访显示，CT-FFR  $\leq 0.80$  预测 MACE 的 HR = 5.05。Alabdullah 等[10]的荟萃分析(13,224 例)显示 CT-FFR 阳性组 MACE 风险显著升高(OR = 3.62)。ADVANCE 研究[4]也发现，CT-FFR 阴性患者在 90 天随访中未发生 MACE，而阳性组发生 19 例不良事件。值得注意的是，本研究在较短随访期内即观察到显著差异，提示 CT-FFR 所表征的功能性缺血风险可能早期快速显现。

CT-FFR 之所以能独立预测 MACE，根本原因在于其评估的是功能学缺血状态而非单纯解剖狭窄[11]。临床实践中，解剖狭窄与心肌缺血之间存在明显不一致性[12]。CT-FFR 通过计算流体力学模拟狭窄对血流的实际影响，能准确识别“解剖轻但功能重”的高危病变[13]。此外，CT-FFR 间接反映斑块负荷与易损特征，低 CT-FFR 值常伴随正性重构、低衰减斑块等高危特征[14]。

## 4.2. 联合模型的增量预测价值

本研究发现，联合模型 B (CT-FFR + 年龄 + BNP + Cr)的 AUC (0.752)显著高于单独 CT-FFR (0.679)及不含 CT-FFR 的临床模型 A (0.649)。这一结果证实多维度联合策略可显著提升预测效能。

本研究中，BNP 和 CT-FFR 的联合预测价值在统计学上得到证实。一个合理的推测是，BNP 所反映的心室壁应力(心肌负荷)与 CT-FFR 所表征的冠脉供血能力之间可能存在“供血 - 负荷”失衡的机制性关联[15][16]。然而，需要强调的是，本研究作为一项临床预后观察性研究，其设计本身无法证实这一推测背后的分子或病理生理机制。两者之间的相互作用(例如，慢性缺血是否直接导致 BNP 升高，或 BNP 升高是否反向加剧微血管功能障碍)仍有待基础或转化医学研究进一步阐明。因此，本研究的主要贡献在于提出并初步验证了这一多维指标的联合预测效能，而非揭示其内在的生物学通路。既往研究证实，BNP 水平升高与 FFR  $\leq 0.80$  显著相关，两者联合对 MACE 的预测价值优于单一指标[17]。本研究进一步验证了这一机制互补关系。肾功能指标血肌酐的加入则体现了心肾交互在预后中的重要性[18]。

本研究结果与国际最新研究一致。Li 等[9]证实，在传统危险因素基础上加入 CT-FFR 可显著改善风险分层。Zhang 等[19]证实 CT-FFR 联合高风险斑块特征可显著提升预测效能，同时携带 CT-FFR  $\leq 0.8$  和 HRPC  $\geq 2$  的患者，MACE 风险比对照组高出 6.06 倍。郭杨等[20]发现联合 XGBoost 算法能显著提高 MACE 诊断准确率。这些研究共同表明，多维度联合策略是提升心血管风险预测效能的有效途径。

## 4.3. 临床意义与局限性

本研究的临床意义在于：第一，CT-FFR 阴性患者 18 个月 MACE 发生率仅 8.74%，提示保守治疗安全可行，可避免不必要的 ICA [21]；第二，CT-FFR 阳性患者即使解剖狭窄不重，也应强化随访与综合管理；第三，联合模型的高敏感度(84.2%)有助于最大限度减少高危患者漏诊，推荐将预测概率  $> 0.1645$  作为高危人群识别阈值。

本研究存在以下局限性，需审慎解读研究结果：(1) 样本量与事件数限制：本研究为单中心、小样本 ( $n = 196$ )探索性分析，随访期间仅发生 38 例 MACE。有限的事件数导致多因素回归模型中无法纳入过多自变量(通常要求每个自变量对应至少 10~15 个事件)，可能存在模型过拟合风险。因此，本研究的发现应被视为初步证据或探索性结论，而非确证性结果。(2) 缺乏外部验证：所有数据来自同一中心，联合模型 (AUC = 0.752)的效能可能存在乐观估计。该模型在独立外部队列中的泛化能力尚不明确。(3) 其他局限性：CT-FFR 由单一软件计算，结果外推需谨慎；随访仅 18 个月，硬终点事件较少；未对所有患者进行有创 FFR 验证，无法计算诊断准确性指标。

## 5. 结论

CT-FFR  $\leq 0.80$  是疑似冠心病胸痛患者 18 个月 MACE 的强独立预测因子。将 CT-FFR 与 BNP、血肌

酞等临床指标联合, 可显著提高远期心血管事件的风险分层效能, 为临床个体化管理提供依据。

## 声明

本研究获医院伦理委员会批准, 所有受试者均签署知情同意书。

## 基金项目

安徽省高等学校自然科学研究项目重大项目(编号: KJ2012ZD0026)。

## 参考文献

- [1] Nørgaard, B.L., Leipsic, J., Gaur, S., Seneviratne, S., Ko, B.S., Ito, H., *et al.* (2014) 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). *Journal of the American College of Cardiology*, **63**, 1145-1155. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2013.11.043>
- [2] Koo, B., Erglis, A., Doh, J., Daniels, D.V., Jegere, S., Kim, H., *et al.* (2011) Diagnosis of Ischemia-Causing Coronary Stenoses by Noninvasive Fractional Flow Reserve Computed from Coronary Computed Tomographic Angiograms: Results from the Prospective Multicenter DISCOV-ER-FLOW (Diagnosis of Ischemia-Causing Stenoses Obtained Via Noninvasive Fractional Flow Reserve) Study. *Journal of the American College of Cardiology*, **58**, 1989-1997. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2011.06.066>
- [3] Tonino, P.A.L., De Bruyne, B., Pijls, N.H.J., Siebert, U., Ikeno, F., van't Veer, M., *et al.* (2009) Fractional Flow Reserve versus Angiography for Guiding Percutaneous Coronary Intervention. *New England Journal of Medicine*, **360**, 213-224. <https://doi.org/10.1056/nejmoa0807611>
- [4] Fairbairn, T.A., Nieman, K., Akasaka, T., Nørgaard, B.L., Berman, D.S., Raff, G., *et al.* (2018) Real-World Clinical Utility and Impact on Clinical Decision-Making of Coronary Computed Tomography Angiography-Derived Fractional Flow Reserve: Lessons from the ADVANCE Registry. *European Heart Journal*, **39**, 3701-3711. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehy530>
- [5] Patel, M.R., Nørgaard, B.L., Fairbairn, T.A., *et al.* (2020) 1-Year Impact on Medical Practice and Clinical Outcomes of FFR<sub>CT</sub>: The ADVANCE Registry. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **13**, 97-105. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2019.03.003>
- [6] Lu, M.T., Ferencik, M., Roberts, R.S., Lee, K.L., Ivanov, A., Adami, E., *et al.* (2017) Noninvasive FFR Derived from Coronary CT Angiography: Management and Outcomes in the PROMISE Trial. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **10**, 1350-1358. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2016.11.024>
- [7] Guo, B., Jiang, M., Guo, X., Tang, C., Zhong, J., Lu, M., *et al.* (2024) Diagnostic and Prognostic Performance of Artificial Intelligence-Based Fully-Automated On-Site CT-FFR in Patients with Cad. *Science Bulletin*, **69**, 1472-1485. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2024.03.053>
- [8] 中国医师协会心血管内科医师分会. 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.
- [9] Li, Z., Xu, T., Wang, Z., *et al.* (2025) Prognostic Significance of Computed Tomography-Derived Fractional Flow Reserve for Long-Term Outcomes in Individuals with Coronary Artery Disease. *Journal of the American Heart Association*, **14**, e037988. <https://doi.org/10.1161/JAHA.124.037988>
- [10] Alabdullah, A.A., Marey, A., Li, Y., Jha, S., Rogers, C., Abdulla, J., *et al.* (2026) Clinical Value and Cost Effectiveness of FFR-CT in Guiding Revascularization and Predicting Major Adverse Cardiac Events: A Meta-Analysis. *Clinical Imaging*, **129**, Article ID: 110659. <https://doi.org/10.1016/j.clinimag.2025.110659>
- [11] Johnson, N.P. and Gould, K.L. (2017) Physiological Basis for Angina and ST-Segment Change: Coronary Physiology and Molecular Mechanisms. *Circulation*, **136**, 299-314.
- [12] Patel, M.R., Peterson, E.D., Dai, D., Brennan, J.M., Redberg, R.F., Anderson, H.V., *et al.* (2010) Low Diagnostic Yield of Elective Coronary Angiography. *New England Journal of Medicine*, **362**, 886-895. <https://doi.org/10.1056/nejmoa0907272>
- [13] 周帆, 张闰秋, 郭翔, 等. 冠状动脉钙化积分与 CT 血流储备分数对稳定性冠状动脉疾病患者的预后评估[J]. 中华医学杂志, 2024, 104(22): 2051-2058.
- [14] Motoyama, S., Ito, H., Sarai, M., Kondo, T., Kawai, H., Nagahara, Y., *et al.* (2015) Plaque Characterization by Coronary Computed Tomography Angiography and the Likelihood of Acute Coronary Events in Mid-Term Follow-up. *Journal of the American College of Cardiology*, **66**, 337-346. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2015.05.069>

- 
- [15] Hamaya, R., Yonetsu, T., Kanaji, Y., Usui, E., Hoshino, M., Hada, M., *et al.* (2019) Interrelationship in the Prognostic Efficacy of Regional Coronary Flow Reserve, Fractional Flow Reserve, High-Sensitivity Cardiac Troponin-I and NT-proBNP in Patients with Stable Coronary Artery Disease. *Heart and Vessels*, **34**, 410-418. <https://doi.org/10.1007/s00380-018-1260-z>
- [16] 李冰, 黄桂锋, 陈泽海. FFR 联合 HbA1c、BNP 水平对冠心病患者冠脉病变严重程度及预后的预测价值[J]. 广州医科大学学报, 2023, 51(4): 22-27.
- [17] Palazzuoli, A., Maisel, A., Caputo, M., *et al.* (2011) B-Type Natriuretic Peptide Levels Predict Extent and Severity of Coronary Disease in Non-ST Elevation Coronary Syndromes and Normal Left Ventricular Systolic Function. *Regulatory Peptides*, **167**, 129-33. <https://doi.org/10.1016/j.regpep.2010.12.011>
- [18] Ronco, C., Bellasi, A. and Di Lullo, L. (2018) Cardiorenal Syndrome: An Overview. *Advances in Chronic Kidney Disease*, **25**, 382-390. <https://doi.org/10.1053/j.ackd.2018.08.004>
- [19] Zhang, R., Fu, W., Xu, J., He, H., Guan, X., You, Y., *et al.* (2025) Combined Prognostic Value of AI-Derived CT-FFR and High-Risk Plaque Characteristics in Patients with Newly Diagnosed Chronic Coronary Syndrome: A Prospective Cohort Study. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, **12**, Article 1674126. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2025.1674126>
- [20] 郭杨, 吴方锦, 高丽珊, 等. 基于人工智能平台的 CT 冠状动脉血流储备分数联合机器学习算法诊断 MACE[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2026, 24(2): 80-83.
- [21] Henderson, J., Sinha, A., Bularga, A., *et al.* (2025) 14 the Impact of Non-Invasive Fractional Flow Reserve (CTFFR) on Clinical Decision-Making and Cost Savings in the Investigation of Coronary Artery Disease: A 15-Month Audit at Borders General Hospital. *Heart*, **111**, A5. [https://heart.bmj.com/content/111/Suppl\\_1/A5.2](https://heart.bmj.com/content/111/Suppl_1/A5.2)