

基于冠脉CTA的多模态特征(解剖学与血流动力学)与阻塞性冠心病的相关性及诊断预测价值研究

毛小龙¹, 杜学松², 宫希军^{2*}

¹安徽医科大学第二临床医学院, 安徽 合肥

²安徽医科大学第二附属医院放射科, 安徽 合肥

收稿日期: 2026年7月14日; 录用日期: 2026年8月8日; 发布日期: 2026年8月18日

摘要

目的: 探讨基于冠状动脉CT血管造影(coronary computed tomography angiography, CCTA)提取的高级多模态衍生指标(血流动力学、局部炎症及解剖形态), 对传统解剖学定义的中重度阻塞性冠心病(狭窄 $\geq 50\%$)的综合评估与识别价值。方法: 回顾性纳入疑似冠状动脉粥样硬化性心脏病(coronary atherosclerotic heart disease, CAD)并接受CCTA检查的患者, 依据冠脉任何一支主支狭窄是否 $\geq 50\%$ 分为阻塞性CAD组与非阻塞性CAD组。利用后处理工作站提取目标病变的心外膜脂肪组织(EAT)形态学指标、血管周围脂肪衰减指数(FAI)、冠脉钙化总积分(总CACS)、斑块负荷(Plaque burden)以及无创血流储备分数(CT-FFR)。采用独立样本t检验、Mann-Whitney U检验和卡方检验比较两组临床与影像基线差异, 构建向后逐步多因素Logistic回归模型分析独立关联因子, 并通过受试者工作特征(ROC)曲线比较不同联合模型的诊断效能。结果: 最终纳入有效样本77例(非阻塞性CAD组16例, 阻塞性CAD组61例)。结果显示, 两组在性别比例、血压、心率、EAT收缩期体积(收缩期EAT体积)、FAI平均值(平均FAI)及对数斑块体积(对数斑块体积)上均无显著统计学差异(均 $P > 0.05$)。然而, 阻塞性组的平均年龄显著偏高(65.75 ± 10.37 岁), 且高血压、糖尿病患病率及基础服用他汀(93.4%)和阿司匹林(83.6%)的比例极显著升高。在影像学指标上, 两组在总CACS、CT-FFR及斑块负荷上存在极显著差异(均 $P \leq 0.005$)。多因素向后逐步Logistic回归分析表明, CT-FFR是识别阻塞性CAD的强独立关联因素($OR = 0.187, P = 0.007$)。ROC曲线分析显示, 单纯包含局部脂肪、早期形态及功能学指标(收缩期EAT体积、平均FAI、对数斑块体积、CT-FFR)的基础模型A AUC为0.807; 在此基础上引入常规斑块负荷的模型C未见显著诊断增益($AUC = 0.804$); 而引入总CACS构建的联合模型B诊断效能达到最优, AUC跃升至0.891 (95% CI: 0.822~0.970, $P < 0.001$)。结论: 在评估中晚期阻塞性冠心病时, 单独的局部脂肪形态与炎症指标(EAT/FAI)诊断价值有限。将反映血流动力学损害的FFR与反映解剖学硬化终态的CACS相联合, 实现了多维度的正交互补, 可显著提升阻塞性CAD的综合识别效能, 为临床无创危险分层提供了更优的影像学策略。

关键词

冠状动脉疾病, 体层摄影术, X线计算机, 无创血流储备分数, 冠脉钙化积分, 血管周围脂肪衰减指数

*通讯作者。

Correlation and Diagnostic Predictive Value of Multimodal Features (Anatomical and Hemodynamic) Derived from Coronary CTA in Obstructive Coronary Artery Disease

Xiaolong Mao¹, Xuesong Du², Xijun Gong^{2*}

¹The Second Clinical Medical College, Anhui Medical University, Hefei Anhui

²Department of Radiology, The Second Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei Anhui

Received: July 14, 2026; accepted: August 8, 2026; published: August 18, 2026

Abstract

Objective: To evaluate the comprehensive diagnostic and identification value of advanced multimodal derived parameters (hemodynamics, local inflammation, and anatomical morphology) extracted from coronary computed tomography angiography (CCTA) for anatomically defined moderate-to-severe obstructive coronary artery disease (stenosis $\geq 50\%$). **Methods:** Patients with suspected coronary atherosclerotic heart disease (CAD) who underwent CCTA were retrospectively enrolled. Based on whether the stenosis of any major coronary branch was $\geq 50\%$, patients were divided into an obstructive CAD group and a non-obstructive CAD group. Morphological metrics of epicardial adipose tissue (EAT), perivascular fat attenuation index (FAI), total coronary artery calcium score (CACS), plaque burden, and non-invasive fractional flow reserve (CT-FFR) of the target lesions were extracted. Independent associated factors were analyzed using a backward stepwise multivariate logistic regression model, and the diagnostic efficacies of different combined models were compared using receiver operating characteristic (ROC) curves. **Results:** A total of 77 valid samples were included (16 in the non-obstructive CAD group and 61 in the obstructive CAD group). There were no significant statistical differences in sex, blood pressure, heart rate, EAT systolic volume, mean FAI, and log-transformed plaque volume between the two groups (all $P > 0.05$). However, the obstructive group showed a significantly older mean age, higher prevalence of hypertension and diabetes, and significantly higher proportions of baseline statin (93.4%) and aspirin (83.6%) usage. Radiologically, highly significant differences were observed in total CACS, CT-FFR, and plaque burden between the two groups (all $P \leq 0.005$). Multivariate logistic regression indicated that CT-FFR was a strong independent associated factor for identifying obstructive CAD (OR = 0.187, $P = 0.007$). ROC curve analysis showed that the basic Model A (incorporating EAT volume, mean FAI, log-plaque volume, and CT-FFR) yielded an AUC of 0.807. The introduction of conventional plaque burden (Model C) provided no significant diagnostic increment (AUC = 0.804). In contrast, the combined Model B, which incorporated total CACS into Model A, demonstrated the optimal diagnostic efficacy, with the AUC significantly increasing to 0.891 (95% CI: 0.822~0.970, $P < 0.001$). **Conclusion:** In the assessment of moderate-to-advanced obstructive CAD, the diagnostic value of isolated local fat morphology and inflammation indices (EAT/FAI) is limited. The combination of CT-FFR (reflecting hemodynamic impairment) and CACS (reflecting the anatomical end-stage of sclerosis) achieves multi-dimensional orthogonal complementarity. This combination significantly enhances the comprehensive identification efficacy of obstructive CAD, providing an optimal non-invasive imaging strategy for clinical risk stratification.

Keywords

Coronary Artery Disease, Tomography, X-Ray Computed, Non-Invasive Fractional Flow Reserve,

Coronary Artery Calcium Score, Perivascular Fat Attenuation Index

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. 研究背景

冠状动脉粥样硬化性心脏病(CHD)是全球范围内导致心血管死亡的主要原因之一[1]。随着 CT 硬件与后处理技术的飞速发展,冠状动脉 CT 血管造影(CCTA)已成为筛查和诊断冠心病的首选无创影像学手段[2]。传统上,CCTA 主要通过直观评估管腔狭窄程度和斑块负荷来进行危险分层。然而,越来越多的临床证据表明,单纯的解剖学狭窄与下游心肌的“功能性缺血”之间常常存在错位。

近年来,“心血管周围脂肪致病假说”备受关注。心外膜脂肪组织(EAT)和血管周围脂肪衰减指数(FAI)作为反映局部血管炎症活跃度的影像学生物标志物,被认为在早期动脉粥样硬化的发生和斑块易损演变中发挥了重要作用[3][4]。然而,对于已经发展至重度钙化或造成明确管腔阻塞的中晚期病变,这些早期炎症指标的独立识别价值尚存争议。与此同时,基于 CCTA 提取的无创血流储备分数(FFR)实现了从单纯“看结构”到“评估血流动力学功能”的跨越,而冠脉钙化积分(CACS)则是反映整体动脉硬化病变终态负荷的经典指标[5]。

目前,鲜有研究在同一队列中综合对比局部脂肪炎症(EAT/FAI)、解剖学斑块特征(斑块负荷/CACS)与血流功能(FFR)在筛查与识别阻塞性冠心病中的优劣。目前临床常以 CCTA 评估的解剖学狭窄($\geq 50\%$)作为评估阻塞性 CAD 的一线参考标准[6]。鉴于此,本研究旨在通过全面提取 CCTA 的高级多模态衍生参数,系统分析其与传统解剖学阻塞病变的关联强度,并着重探讨“结构-功能-炎症”多维网络在无创识别高危病变中的综合评估与增益价值,以期临床更精准地制定转诊与血运重建策略提供科学依据。

2. 临床资料和方法

2.1. 研究对象

回顾性连续入选于我院心内科行冠脉 CTA 检查的疑似 CHD 患者。纳入标准:(1) 年龄 > 18 岁;(2) 顺利完成 CCTA 检查且图像质量满足多模态后处理要求。排除标准:既往有经皮冠状动脉介入治疗(PCI)或冠脉旁路移植术(CABG)病史;图像存在严重伪影无法进行斑块或血流动力学定量分析。依据 CCTA 显示的血管狭窄程度,将任何一支主要冠状动脉血管直径狭窄率 $\geq 50\%$ 的患者定义为阻塞性 CAD 组(obstruct = 1),狭窄率 $< 50\%$ 的患者定义为非阻塞性 CAD 组(obstruct = 0)。

2.2. 临床资料收集

通过查阅病历系统收集患者的临床基本资料,包括年龄、性别、收缩压、舒张压与静息心率。收集高血压病、2 型糖尿病等心血管基础危险因素及既往吸烟史。采集实验室生化指标,包括低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)及空腹血糖(FPG)水平。同时详细登记患者检查前的基线心血管药物使用情况,包括他汀类药物和抗血小板药物(阿司匹林或氯吡格雷)的日常服用史。

2.3. 冠脉 CTA 检查流程与图像后处理

所有纳入人群均接受多排螺旋 CT 进行冠脉 CTA 扫描[7]。图像后处理由具有丰富心血管影像分析经

验的医师完成：

形态学与炎症指标：标测并计算收缩期心外膜脂肪组织体积(收缩期 EAT 体积)；同时测量目标病变周围的血管周围脂肪衰减指数平均值(平均 FAI) [8] [9]。

钙化与斑块负荷：采用标准 Agatston 积分法测算患者的总冠脉钙化积分(总 CACS)；精确量化病变区域的斑块负荷(斑块负荷)以及斑块体积(对数转换后记为对数斑块体积) [10] [11]。

血流动力学指标：基于 CCTA 图像提取无创血流储备分数(CT-FFR)，记录病变血管远端的最小 FFR 值(CT-FFR) [12]。

2.4. 统计学分析

数据分析采用 SPSS 26.0 软件进行。符合正态分布的连续变量以均数 ± 标准差表示，组间比较采用独立样本 t 检验；非正态分布的连续变量以秩平均值(或中位数)表示，组间比较采用 Mann-Whitney U 检验。分类变量采用频数及百分比表示，组间比较采用卡方(χ^2)检验。采用多因素 Logistic 回归模型分析阻塞性 CAD 的独立预测因子。采用受试者工作特征(ROC)曲线评估诊断效能并计算曲线下面积(AUC)。双侧检验 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。构建多因素 Logistic 回归模型时，将单因素分析中 $P < 0.05$ 的临床与影像学变量纳入，采用向后逐步回归法(Backward: Wald)筛选独立预测因子。

3. 结果

3.1. 临床与影像学基线特征对比

本研究最终共纳入有效样本 77 例(非阻塞性 CAD 组 16 例，阻塞性 CAD 组 61 例)。结果显示，两组患者在性别比例、基础心率及收缩压/舒张压水平上均无显著统计学差异(均 $P > 0.05$)。然而，阻塞性 CAD 组的平均年龄显著高于非阻塞性组(65.75 ± 10.37 岁 vs. 57.38 ± 12.51 岁, $P = 0.008$)；其高血压患病率(72.1% vs. 50.0%)与血清低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)水平(2.88 ± 0.89 mmol/L vs. 2.45 ± 0.72 mmol/L)也呈现出明显的升高趋势。值得注意的是，阻塞性组患者在检查前基础服用他汀类药物(93.4% vs. 62.5% , $P = 0.002$)及抗血小板药物阿司匹林(83.6% vs. 50.0% , $P = 0.004$)的比例极显著高于非阻塞性组。在影像学多模态特征方面，代表局部早期血管炎症的形态学指标——血管周围脂肪衰减指数(平均 FAI)、收缩期心外膜脂肪体积(EAT 体积)以及对数转换后的斑块体积(斑块体积对数)在组间差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$)。然而，代表解剖学硬化终态的总冠脉钙化积分(CACS, 秩均值 44.98 vs. 16.19)以及代表病变狭窄严重程度的斑块负荷(斑块负荷, 秩均值 44.78 vs. 26.76)，在阻塞性 CAD 组中均呈现出极显著的升高趋势($P < 0.001$ 及 $P = 0.005$)。详见表 1 及图 1。

Table 1. Comparison of clinical and multimodal imaging characteristics between patients with obstructive and non-obstructive CAD

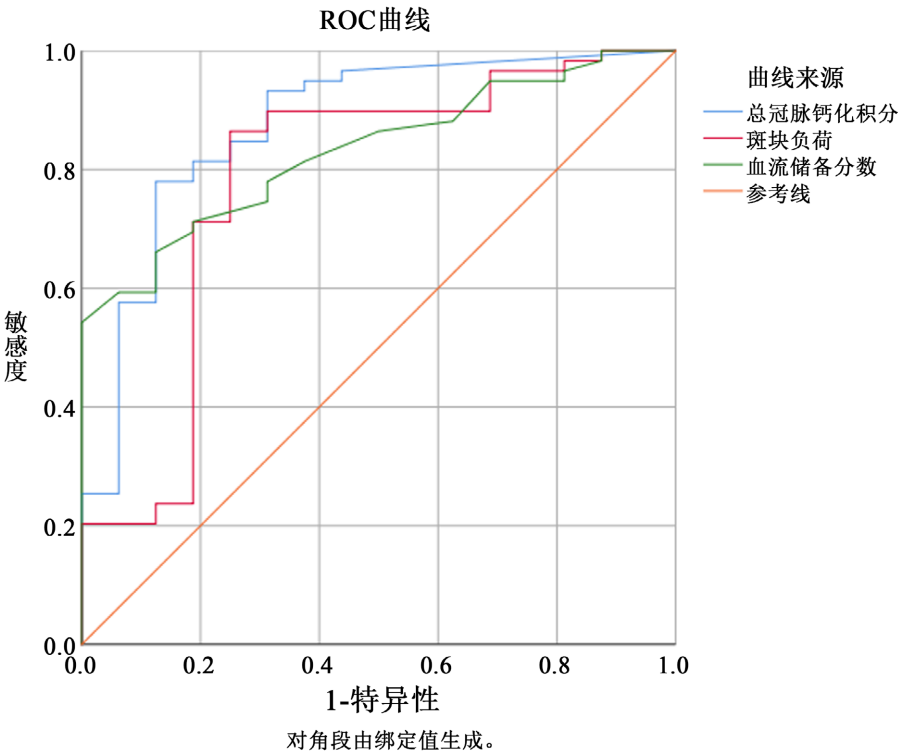
表 1. 阻塞性与非阻塞性 CAD 患者临床及多模态影像学特征比较

变量指标	非阻塞性 CAD 组(n = 16)	阻塞性 CAD 组(n = 61)	统计量	P 值
年龄(岁)	57.38 ± 12.51	65.75 ± 10.37	-2.715 ^a	0.008
男性[n (%)]	8 (50.0%)	29 (47.5%)	0.032 ^c	0.859
收缩压(mmHg)	129.56 ± 17.65	132.88 ± 16.94	-0.697 ^a	0.488
舒张压(mmHg)	75.13 ± 11.02	74.92 ± 10.88	0.069 ^a	0.945
心率(bpm)	74.19 ± 10.56	73.85 ± 9.47	0.125 ^a	0.901
高血压[n (%)]	8 (50.0%)	44 (72.1%)	2.894 ^c	0.089

续表

糖尿病[n (%)]	3 (18.8%)	21 (34.4%)	1.458 ^c	0.227
基础服用他汀[n (%)]	10 (62.5%)	57 (93.4%)	9.948 ^c	0.002
基础服用阿司匹林[n (%)]	8 (50.0%)	51 (83.6%)	8.352 ^c	0.004
LDL-C (mmol/L)	2.45 ± 0.72	2.88 ± 0.89	-1.782 ^a	0.079
空腹血糖(mmol/L)	5.15 ± 0.68	5.58 ± 1.12	-1.454 ^a	0.150
平均 FAI (HU)	-72.36 ± 7.38	-73.71 ± 6.62	0.730 ^a	0.468
EAT 体积(cm ³)	55.99 ± 15.28	57.55 ± 16.03	-0.425 ^a	0.672
斑块体积对数	5.30 ± 1.00	5.35 ± 0.80	-0.246 ^a	0.806
斑块负荷(秩均值)	26.76	44.78	-2.807 ^b	0.005
CACS (秩均值)	16.19	44.98	-4.589 ^b	< 0.001
CT-FFR (秩均值)	59.82	36.00	-3.714 ^b	< 0.001

注：计量资料呈正态分布采用独立样本 *t* 检验(以 a 标注，代表 *t* 值)；呈非正态分布采用 Mann-Whitney U 检验(以 b 标注，代表 *Z* 值)；计数资料采用卡方检验(以 c 标注，代表 χ^2 值)。LDL-C：低密度脂蛋白胆固醇；FAI：血管周围脂肪衰减指数；EAT：心外膜脂肪组织；CACS：总冠脉钙化积分；CT-FFR：无创血流储备分数。



图注：展示了各单一影像学指标在筛查阻塞性病变时的独立效能。可见单一指标的曲线下面积(AUC)存在不同程度的临床局限性，提示多因素多模态联合诊断网络的必要性。

Figure 1. Univariate ROC curve analysis of multimodal imaging features for predicting obstructive CAD

图 1. 多模态影像特征预测阻塞性 CAD 的单因素 ROC 曲线分析

3.2. 阻塞性 CAD 的多因素回归分析与预测因子筛选

将单因素分析中存在统计学差异($P < 0.05$)的临床与多模态影像学变量纳入多因素 Logistic 回归模型。

为排除共线性混杂因素，采用向后逐步回归法(Backward: Wald)进行变量筛选。

结果提示，在校正了年龄、基础用药(他汀/阿司匹林)及斑块负荷等混杂因素后，最小血流储备分数(CT-FFR)被证实为识别阻塞性 CAD 的强独立关联因素(OR = 0.187, 95% CI: 0.056~0.626, P = 0.007)。此外，代表解剖硬化终态的总冠脉钙化积分(CACS)入模后的比值比(OR)为 1.008 (95% CI: 0.998~1.018, P = 0.109)。尽管其 P 值在逐步剔除过程中略高于常规显著性阈值，但考虑到其在动脉粥样硬化病程中不可替代的核心病理意义，将其保留并用于后续的联合模型构建，以评估其在多维网络中的增益价值。详见表 2。

Table 2. Multivariate logistic regression analysis for identifying obstructive CAD

表 2. 识别阻塞性 CAD 的多因素 Logistic 回归分析

变量	OR 值	95% CI (下限 - 上限)	P 值
最小血流储备分数(CT-FFR)	0.187	0.056~0.626	0.007
总冠脉钙化积分(CACS)	1.008	0.998~1.018	0.109

注：多因素 Logistic 回归模型(向后逐步法)已对年龄、基础用药(他汀/阿司匹林)及常规斑块负荷等表 1 中显著的临床混杂因素进行了筛选与校正，表格仅展示最终保留的核心多模态影像学因子。

3.3. 多模态联合模型识别效能的 ROC 曲线分析

本研究构建了三个层级的多模态联合识别模型，并通过 ROC 曲线比较其曲线下面积(AUC)。

模型 A (基础模型)：联合了局部炎症(收缩期 EAT 体积、平均 FAI)、早期软斑块形态(对数斑块体积)及血流动力学(CT-FFR)，其综合识别阻塞性 CAD 的 AUC 为 0.807 (95% CI: 0.693~0.915, P < 0.001)。

模型 C (形态学叠加模型)：在模型 A 的基础上强行引入传统的斑块负荷(斑块负荷)，其 AUC 变为 0.804 (95% CI: 0.684~0.922, P < 0.001)。这提示在拥有 FFR 强效指标后，单纯叠加同质化的常规形态学信息未能产生额外的诊断增益。

模型 B (多维正交最优模型)：相比之下，在模型 A 的基础上引入总冠脉钙化积分(总 CACS)构建模型 B 时，联合模型展现出最优的识别效能，AUC 显著跃升至 0.891 (95% CI: 0.822~0.970, P < 0.001)。详见表 3。

Table 3. ROC curve analysis of different multimodal combined models for identifying obstructive CAD

表 3. 不同多模态联合模型识别阻塞性 CAD 的 ROC 曲线分析

模型	包含变量	曲线下面积(AUC)	95% CI (下限 - 上限)	P 值
模型 A (基础模型)	收缩期 EAT 体积 + 平均 FAI + 对数斑块体积 + CT-FFR	0.807	0.693~0.915	<0.001
模型 C (形态学叠加)	模型 A + 斑块负荷	0.804	0.684~0.922	<0.001
模型 B (最优联合)	模型 A + 总 CACS	0.891	0.822~0.970	<0.001

注：AUC：曲线下面积；CI：置信区间；EAT：心外膜脂肪组织；FAI：血管周围脂肪衰减指数；CT-FFR：无创血流储备分数；CACS：总冠脉钙化积分。

4. 讨论

4.1. 解剖结构与血流动力学功能的多维正交互补优势

既往在评估冠脉病变严重程度时，临床与研究常局限于斑块负荷或管腔狭窄率的单一形态学测算。

然而, 本研究的模型对比深刻揭示: 在涵盖局部炎症与功能学的基础模型上, 单纯叠加常规斑块负荷(模型 C)并未带来识别效能的实质性增益。相反, 当引入总冠脉钙化积分(CACS)构建多维网络时(模型 B), 联合诊断的 AUC 跃升至本研究的最优值 0.891 [13]。

这一现象的病理生理学机制在于, 单纯的非钙化斑块体积负荷难以全面反映血管顺应性的退变程度及真实的下游缺血效应, 而 CT-FFR 的引入精准弥补了传统形态学在“功能性缺血”评估上的短板[14]。同时, CACS 作为动脉粥样硬化炎症后期的核心影像标志物, 代表了局部组织深度机化与修复的硬化终态。重度钙化往往伴随血管壁僵硬度的显著增加与内皮舒缩功能的丧失, 从而进一步削弱微循环的血流动力学代偿能力。

因此, “CACS (反映长期时序性的解剖硬化终态)”与“CT-FFR (反映即刻真实存在的血流功能受损)”的联合, 并非影像学变量的简单叠加, 而是实现了空间结构与生理功能的正交互补。这种联合策略构建了一个全面覆盖器质性重塑与功能性衰竭的双重诊断网络, 展现了超越单一评估维度的高阶临床识别价值。

4.2. EAT/FAI 相关指标不显著的临床与用药机制探讨

在局部分析中, 反映 EAT 和血管局部炎症的指标(收缩期 EAT 体积、平均 FAI)在阻塞组与非阻塞组间的差异均未达到统计学显著水平。我们推测这除了与疾病的病理阶段有关外(缺血多发生在重度狭窄和重度钙化的中晚期病变中, 此时斑块已高度机化, 早期的局部血管炎症已消退), 他汀类及抗血小板等药物的系统干预是不可忽视的关键原因。

数据表明, 阻塞性 CAD 组患者确诊前基础服用他汀类药物(93.4%)和阿司匹林(83.6%)的比例极显著高于非阻塞性组。他汀类药物具备强大的多效性抗炎作用(Pleiotropic effects), 能够有效抑制局部巨噬细胞浸润并逆转血管周围脂肪的炎性渗出, 这一药理机制在影像学上直接表现为血管周围脂肪衰减指数(FAI)的“降温”与掩盖。这一机制也得到了近期 Yamaura 等人[15] (2025)发表在《European Heart Journal - Imaging Methods and Practice》上的多模态队列研究的印证, 即系统性的他汀干预能显著降低 EAT 体积并逆转 FAI 所反映的局部炎症。

与此同时, 长期的强化他汀治疗可通过诱导血管平滑肌细胞发生“成骨样转分化(Osteogenic transdifferentiation)”并促进巨噬细胞凋亡, 从而加速易损斑块的维稳过程, 最终驱动坏死脂质核心向宏观巨钙化(Macrocalcification)演变[16]。这种“脂质抽提与钙盐沉积”的药理修复机制完美印证了本研究中阻塞组“低炎症(FAI 不显著)与高钙化(CACS 极高)”并存的表型。这进一步凸显出: 尽管 CACS 标志着斑块的解剖学硬化终态, 但若精准筛查真正导致缺血的病变, 基于 CT-FFR 的血流动力学功能评估依然是不可替代的基石。

4.3. 局限性

本研究是一项探索性的概念验证(Proof-of-concept)研究, 存在一定的局限性。首先, 单中心、回顾性分析且组间样本量存在一定不平衡, 可能对模型的泛化能力产生一定影响。其次, 本研究以 CCTA 评估的解剖学狭窄($\geq 50\%$)作为阻塞性 CAD 的分组参考标准, 主要探讨了高级后处理衍生指标对常规形态学诊断的综合识别价值。尽管缺乏侵入性生理学金标准(如 ICA 或有创 FFR), 但近期发表的国际心血管顶刊文献亦采用该无创界值进行冠脉粥样硬化风险分层, 证明其在真实世界无创研究中具有高度的临床可行性。同时, 结合多模态心脏磁共振(CMR)在非阻塞性心肌梗死及心肌应变层面的深度联合应用趋势, 无创多模态成像网络在心血管高危风险预警中的广阔前景已初见端倪[17] [18], 未来期待开展多中心、大样本, 并以侵入性生理学指标为金标准的前瞻性队列研究, 以进一步确证该多模态网络在真实血流动力学

层面的精准诊断转化价值。

综上所述,在基于冠脉 CTA 的多模态无创评估中,传统的局部脂肪形态与早期炎症指标(EAT/FAI)对识别中晚期重度阻塞性冠心病的独立价值有限。相比之下,将反映长期解剖硬化终态的冠脉钙化积分(CACS)与反映即刻真实血流动力学受损的最小血流储备分数(CT-FFR)相联合,能够实现空间结构与生理功能的多维正交互补,进而跨越式地提升高危阻塞性病变的综合识别效能。

本研究不仅为“结构-功能”多维网络在冠心病精准评估中的增益价值提供了初步的概念验证(Proof-of-concept),更提示在未来的真实世界临床实践中,该多模态联合策略有望成为甄别真正缺血病变、优化侵入性冠脉造影(ICA)转诊路径的优质无创“守门人(Gatekeeper)”[19]。

然而,本研究仍存在一定的局限性。首先,本研究为单中心回顾性研究,且样本量较小,这不可避免地存在一定的选择偏倚,也在一定程度上限制了复杂多因素模型的统计效能,研究结果可能无法直接广泛推广至至所有人群。

其次,在参考标准的界定上,本研究采用 CCTA 评估的解剖学管腔狭窄程度作为阻塞性病变的参考标准,而非临床确诊的金标准(如侵入性冠脉造影 ICA 或有创 FFR)。这一设计虽然贴近无创筛查的初步评估,但在一定程度上限制了充分评估 CT-FFR 等多模态指标预测“真实功能性缺血”的确切能力。因此,本研究的结论仅限于无创解剖学阻塞风险的预警,不应过度外推至直接指导临床最终的血运重建策略。

未来需要开展大规模、多中心的前瞻性研究。特别是在后续的研究设计中,应采用侵入性检查(例如以有创 FFR ≤ 0.80 为功能性缺血的判断标准)作为真正的临床金标准,以进一步验证 CCTA 多模态指标(特别是 CT-FFR)在预测冠脉功能性缺血中的真实效能,从而提升该诊断策略的临床应用价值与科学严谨性。

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 2022 概要[J]. 中国循环杂志, 2023, 38(6): 625-660.
- [2] Knuuti, J., Wijns, W., Saraste, A., Capodanno, D., Barbato, E., Funck-Brentano, C., et al. (2020) 2019 ESC Guidelines for the Diagnosis and Management of Chronic Coronary Syndromes. *European Heart Journal*, **41**, 407-477. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz425>
- [3] Oikonomou, E.K., Marwan, M., Desai, M.Y., Mancio, J., Alashi, A., Hutt Centeno, E., et al. (2018) Non-Invasive Detection of Coronary Inflammation Using Computed Tomography and Prediction of Residual Cardiovascular Risk (The CRISP CT Study): A Post-Hoc Analysis of Prospective Outcome Data. *The Lancet*, **392**, 929-939. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(18\)31114-0](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(18)31114-0)
- [4] Oikonomou, E.K. and Antoniadou, C. (2019) The Role of Adipose Tissue in Cardiovascular Health and Disease. *Nature Reviews Cardiology*, **16**, 83-99. <https://doi.org/10.1038/s41569-018-0097-6>
- [5] 中华医学会放射学分会心胸学组, 中国医师协会放射医师分会心血管学组, 北京医学会放射学分会心血管学组. CT 血流储备分数操作规范及临床应用中国专家共识[J]. 中华放射学杂志, 2023, 57(7): 711-722.
- [6] Cury, R.C., Leipsic, J., Abbara, S., Achenbach, S., Berman, D., Bittencourt, M., et al. (2022) CAD-RADS™ 2.0-2022 Coronary Artery Disease-Reporting and Data System: An Expert Consensus Document. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **15**, 1974-2001. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2022.07.002>
- [7] 中华医学会放射学分会心胸学组, 等. 心脏冠状动脉 CT 血管成像技术规范应用中国指南[J]. 中华放射学杂志, 2017, 51(10): 732-743.
- [8] 单冬凯. 心外膜脂肪组织与冠状动脉粥样硬化病变关联及其诊断预测价值研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国人民解放军医学院, 2018.
- [9] Antonopoulos, A.S., Sanna, F., Sabharwal, N., Thomas, S., Oikonomou, E.K., Herdman, L., et al. (2017) Detecting Human Coronary Inflammation by Imaging Perivascular Fat. *Science Translational Medicine*, **9**, eaal2658. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aal2658>
- [10] 中国医师协会放射医师分会. 冠状动脉 CT 血管成像斑块分析和应用中国专家建议[J]. 中华放射学杂志, 2022, 56(6): 595-607.
- [11] Greenland, P., Blaha, M.J., Budoff, M.J., Erbel, R. and Watson, K.E. (2018) Coronary Calcium Score and Cardiovascular

- Risk. *Journal of the American College of Cardiology*, **72**, 434-447. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2018.05.027>
- [12] 唐阳阳. 基于 CCTA 的冠脉形态学参数联合 CT-FFR 及 FAI 预测冠脉狭窄患者心肌缺血的价值[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2025.
- [13] Tesche, C., Otani, K., De Cecco, C.N., Coenen, A., De Geer, J., Kruk, M., *et al.* (2020) Influence of Coronary Calcium on Diagnostic Performance of Machine Learning CT-FFR. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **13**, 760-770. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2019.06.027>
- [14] Patel, M.R., Nørgaard, B.L., Fairbairn, T.A., Nieman, K., Akasaka, T., Berman, D.S., *et al.* (2020) 1-Year Impact on Medical Practice and Clinical Outcomes of FFRCT: The Advance Registry. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **13**, 97-105. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2019.03.003>
- [15] Yamaura, H., Otsuka, K., Ishikawa, H., Hojo, K., Matsumoto, K., Fujisawa, N., *et al.* (2025) High Levels of Pericoronary Adipose Tissue Inflammation Are Associated with Coronary Atherosclerosis Independent of Epicardial Adipose Tissue Volume in Patients with Chronic Coronary Syndrome. *European Heart Journal-Imaging Methods and Practice*, **3**, qyaf079. <https://doi.org/10.1093/ehjimp/qyaf079>
- [16] Lee, S.E., Chang, H.J., Sung, J.M., Park, H., Heo, R., Rizvi, A., *et al.* (2018) Effects of Statins on Coronary Atherosclerotic Plaques. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **11**, 1475-1484. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2018.04.015>
- [17] 曾道兵, 常婵, 赵新湘. 心脏磁共振在冠状动脉非阻塞性心肌梗死中的应用价值[J]. 放射学实践, 2020, 35(2): 177-181.
- [18] 温晓玲. 心肌梗死伴二尖瓣反流患者心肌应变及房室联动效应的心脏 MRI 研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 四川大学, 2022.
- [19] Douglas, P.S., Pontone, G., Hlatky, M.A., Patel, M.R., Norgaard, B.L., Byrne, R.A., *et al.* (2015) Clinical Outcomes of Fractional Flow Reserve by Computed Tomographic Angiography-Guided Diagnostic Strategies vs. Usual Care in Patients with Suspected Coronary Artery Disease: The Prospective Longitudinal Trial of FFR_{CT}: Outcome and Resource Impacts Study. *European Heart Journal*, **36**, 3359-3367. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehv444>