

冠心病多维度风险评估：CT-FFR，CACs与FAI联合预测MACE的整合价值

李庆雪*, 杨 全#

重庆医科大学附属永川医院放射科, 重庆

收稿日期: 2026年5月29日; 录用日期: 2026年6月23日; 发布日期: 2026年7月1日

摘 要

冠心病(coronary artery disease, CAD)风险评估正由传统临床模型向整合影像与功能学的多维度模式演进。冠状动脉CT血流储备分数(computed tomography fractional flow reserve, CT-FFR)通过无创血流动力学评估, 对主要心血管不良事件(major adverse cardiovascular events, MACE)具独立预测价值, 联合高危斑块特征时风险分层能力显著提升(HR = 6.06)。冠状动脉钙化积分(coronary artery calcium score, CACS)作为动脉粥样硬化负荷的量化指标, 虽为指南推荐工具, 但对非钙化斑块及易损性评估存在局限。冠周脂肪衰减指数(FAI)及其动态变化(Δ FAI)作为新兴炎症生物标志物, 是MACE的强效预测因子(OR = 16.725)。单一指标难以全面涵盖CAD的解剖、功能与炎症病理生理维度。整合CT-FFR、CACS与FAI的多模态评估框架, 通过优势互补可实现精准个体化风险分层, 优化血运重建与强化药物治疗等临床决策, 改善患者预后。未来需开发人工智能驱动的自动化整合算法, 并通过大规模前瞻性研究验证其临床效用与卫生经济学价值。

关键词

冠心病, 血流储备分数, 冠状动脉钙化积分, 冠周脂肪衰减指数, 主要心血管不良事件

Multidimensional Risk Assessment of Coronary Heart Disease: The Integrated Value of CT-FFR, CACS, and FAI in Jointly Predicting MACE

Qingxue Li*, Quan Yang#

Department of Radiology, The Affiliated Yongchuan Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 李庆雪, 杨全. 冠心病多维度风险评估: CT-FFR, CACS 与 FAI 联合预测 MACE 的整合价值[J]. 临床医学进展, 2026, 16(7): 181-190. DOI: 10.12677/acm.2026.1672512

Abstract

The risk assessment of coronary artery disease (CAD) is evolving from traditional clinical models to a multi-dimensional model integrating imaging and functional studies. Coronary computed tomography fractional flow reserve (CT-FFR) has independent predictive value for major adverse cardiovascular events (MACE) through non-invasive hemodynamic assessment, and its risk stratification ability is significantly improved when combined with high-risk plaque characteristics (HR = 6.06). Coronary artery calcium score (CACS), as a quantitative indicator of atherosclerotic burden, is a guideline-recommended tool, but it has limitations in the assessment of non-calcified plaques and vulnerability. Pericoronary fat attenuation index (FAI) and its dynamic changes (Δ FAI), as emerging inflammatory biomarkers, are strong predictors of MACE (OR = 16.725). A single indicator is difficult to fully cover the anatomical, functional, and inflammatory pathophysiological dimensions of CAD. The multimodal assessment framework integrating CT-FFR, CACS, and FAI can achieve precise individualized risk stratification through complementary advantages, optimize clinical decisions such as revascularization and intensive drug therapy, and improve patient prognosis. In the future, it is necessary to develop artificial intelligence-driven automated integration algorithms and verify their clinical utility and health economic value through large-scale prospective studies.

Keywords

Coronary Artery Disease, Fractional Flow Reserve, Coronary Artery Calcium Score, Pericoronary Fat Attenuation Index, 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

冠状动脉疾病(CAD)是导致死亡和残疾的主要原因之一, 准确的风险评估对制定预防策略、优化治疗决策至关重要。近年来, 冠状动脉 CT 血管成像(CCTA)衍生的多参数影像生物标志物为风险分层提供了新维度: CT 血流储备分数(CT-FFR)可无创评估血流动力学意义[1]; 冠状动脉钙化积分(CACS)能量化动脉粥样硬化总负荷[2]; 冠周脂肪衰减指数(FAI)及其动态变化则是反映血管炎症的强效 MACE 预测因子[3]。相比之下, 传统临床风险评分(如 Framingham 评分、Pooled Cohort Equations)和功能性缺血检测在识别 MACE 高危个体方面仍存在缺陷, 例如临床评分可能高估或低估风险[4], 且传统功能学检查无法直接揭示斑块易损性。

冠状动脉计算机断层扫描血管成像(CCTA)的出现发展了冠心病的无创解剖评估。在此基础上, 衍生出的多参数影像生物标志物为风险分层提供了新的维度。其中, CT 血流储备分数(CT-FFR)在现有 CCTA 影像资料上可以无创评估狭窄病变的血流动力学意义, 不需要再进行额外扫描; 冠状动脉钙化积分(CACS)可以反映出动脉粥样硬化斑块的总负荷; 冠周脂肪衰减指数(FAI)则通过量化冠脉周围脂肪组织的 CT 值衰减变化, 间接反映血管壁的炎症状态。此外, CCTA 的出现还优化了冠心病患者预防性治疗的后续处方以及冠状动脉血运重建手术的应用, 这使得致命性和非致命性心肌梗死的发生率明显减半[5]。

近年来, 这些指标分别从功能影响、解剖负荷和局部炎症活动等不同但又相互关联的病理生理层面

展现了良好的临床价值, 并逐渐引起重视。然而, 在临床实践中它们常被孤立地看待和应用。

2. CT-FFR, CACS 及 FAI 的临床价值

2.1. CT 血流储备分数: 功能缺血的精准评估及其预后价值

CT-FFR 是通过使用计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)和计算机算法来模拟传统冠状动脉造影, 进而量化冠状动脉狭窄导致的功能性缺血(正常值 > 0.80) [6]。

2.1.1. 临床适应症与优缺点

适用于疑似冠心病(CAD)患者, 尤其是 CCTA 显示中度狭窄(30%~90%)但功能意义不明者[6]。用于指导是否需侵入性冠脉造影或血运重建, 避免不必要的有创检查。典型应用于无症状或低危症状患者 CCTA 后功能评估; 高危患者术前风险分层。优势在于: 无创性, 基于 CCTA 数据计算, 避免过度辐射暴露(相比侵入性冠脉造影); 评估血流动力学意义, 优于单纯解剖学狭窄程度; 降低医疗成本(避免 30%~40% 不必要的侵入性检查) [7]。局限性在于: 依赖高质量 CTA 图像(运动伪影、钙化重叠影响准确性); 需额外计算软件(如 HeartFlow FFR 等), 成本较高; CT-FFR 不适用于弥漫性钙化病变的冠状动脉测量, 且无法直接反映炎症或斑块易损性(仅评估血流)。

2.1.2. 诊断性能、预后验证及技术进展

大量研究证实了 CT-FFR 优异的诊断准确性。一项针对新诊断慢性冠脉综合征(CCS)患者的前瞻性队列研究显示, CT-FFR ≤ 0.80 是 MACE 的独立预测因子(HR: 2.62) [1]。对于不稳定型心绞痛合并临界病变的患者, CT-FFR 也是预测 MACE 的独立危险因素之一[8]。CT-FFR 还可以提高慢性冠脉综合征的诊断准确性, 尤其是冠状动脉存在钙化的情况下[9]。另外, 还有研究发现, CT-FFR 的预后意义除了由其数值所体现, 其动态变化(Δ CT-FFR)也具有一定的价值: 一项纳入 252 例患者的连续 CCTA 研究显示, 发生 MACE 的患者较 MACE 阴性者 CT-FFR 值低, 且在随访期间 CT-FFR 下降更明显(Δ CT-FFR 更高) [3]。近年来, 深度学习等 AI 技术也使 CT-FFR 的测量结果越来越准确: 一项研究对比了传统算法与深度学习驱动中心线提取算法得出的血流储备分数, 发现后者与有创血流储备分数的相关性更高, 在诊断“灰区”(0.70~0.80)的血流动力学异常时, 诊断准确率也有所提高[10]; 这有助于减少临床不确定性, 进而为患者制定更优良的个体化治疗方式。以下为近几年 CT-FFR 应用于评估临床疾病的一些相关研究示例:

① 病变血管 CT-FFR、 Δ CT-FFR 等其他指标是冠心病合并高脂血症患者发生 MACE 的独立危险因素[11]。

② CT-FFR 与斑块形态学特征的结合可一定程度上提升风险分层能力: CT-FFR ≤ 0.80 的血管中, 存在高危斑块可能性增加。当 CT-FFR 异常与高危斑块特征同时存在时, 患者发生 MACE 的风险也提高[1]。

③ CT-FFR 对冠心病患者行妇科手术的术前评估研究中表明: CT-FFR 可识别冠脉特异性缺血, 一定程度上能降低有创性冠脉造影的发生。并且 CT-FFR 对妇科手术术前冠脉评估决策具有重要影响[12]。

④ “血流储备分数与血管造影用于多支血管评估”研究显示, CT-FFR 指导的血运重建策略可减少不必要的介入治疗, 并降低术后 MACE 发生率[13]。

2.2. 冠状动脉钙化积分: 动脉粥样硬化负荷的量化指标

冠状动脉钙化积分通过心脏 CT 平扫定量评估冠状动脉钙化斑块负荷。

2.2.1. 临床适应症与优缺点

适用于无症状人群风险筛查及低危患者初步分层。用于排除冠心病(CACS = 0)或进行高风险分层(CACS > 400) [14]。典型场景应用于健康体检人群心血管风险评估; 糖尿病或高血压患者基线筛查。优势

在于：操作简单、成本低；无创、辐射剂量较低。局限性在于：仅反映钙化负荷，不能评估功能意义(如狭窄是否致血流受限)；钙化程度与斑块炎症/易损性相关性弱；低钙化患者(CACS = 0)仍不能完全排除存在易损的非钙化斑块(尤其在年轻、吸烟或血脂异常者中)，可能有 MACE 风险(假阴性率 15%) [15]。

2.2.2. 诊断性能及相关研究证据

冠状动脉钙化积分在一级预防中的价值已被数十年的大型人群队列研究(如 MESA、HNR)反复验证。钙化负荷在一定程度可反映动脉粥样硬化程度，与未来冠脉事件风险呈对数线性关系，CACS = 0 提示近期风险极低，这一阴性预测价值极高；而随着分值升高(特别是 >100 或 >400)，提示动脉粥样硬化进展越快及心血管事件风险越高[2]。尽管钙化程度与管腔狭窄无直接关联，但高积分(如 >400)常反映弥漫性斑块沉积，是 MACE (如心肌梗死)的独立预测因子[16]。2018 年美国心脏病学院(American College of Cardiology, ACC)/美国心脏协会(American Heart Association, AHA)和 2021 年欧洲心脏病学会(European Society of Cardiology, ESC)/欧洲动脉粥样硬化学会(European Atherosclerosis Society, EAS)血脂管理指南均推荐将 CACS 作为中危或临界风险患者风险精细化的工具[2]。以下为近几年 CACS 应用于评估临床疾病的一些相关研究示例：

① 通过 10 年间冠状动脉钙化的四种独特轨迹研究表明：与冠状动脉钙化积分低稳定组参与者相比，处于低增长、中度增长和高增长轨迹的参与者发生严重心血管疾病和冠心病的风险显著增加。并且在不同年龄、性别和种族亚组中，无论是否患有高血压或糖尿病，均观察到与严重心血管疾病的分级正相关[17]。

② 在研究 CACS 与冠心病介入术后预后相关性研究中表明：CACS 是冠心病患者介入术后近期预后不佳的独立危险因素，同时是潜在评估 MACE 的临床指标[18]。

③ 在 CACS 与肝移植方面研究中显示：接受肝移植的患者中，CACS ≥ 400 是心血管事件发生的独立相关因子之一[19]。

2.3. 冠状动脉周围脂肪衰减指数(FAI)：血管炎症的无创标志物

FAI 是一项无创的用来检测冠状动脉炎症的影像学生物标志物之一，在 2017 年首次被 Antonopoulos 等提出[20]，它被定义为即冠状动脉周围脂肪组织(PCAT) 的 CT 测量值，可反映冠状动脉周围脂肪与水相之间的平衡[21]。

2.3.1. 临床适应症与优缺点

适用于炎症相关风险评估(如糖尿病、肥胖患者)，作为新兴生物标志物用于早期识别高炎症性斑块，还可应用于代谢综合征患者冠脉风险补充评估；优势在于：无创、基于常规 CT 图像(无需额外扫描)；可反映冠脉周围脂肪炎症。局限性在于：由于 FAI 作为一项新兴生物标志物，其标准化不足(不同 CT 设备/参数影响结果)；更全面的临床价值仍有待补充。

2.3.2. 诊断性能及预后价值

近年来，随着 FAI 与 CAD 相关性的研究越来越多，其临床应用价值逐渐显现。里程碑式的 CRISP-CT 研究首次证实，升高的 FAI 与患者死亡和 MACE 风险独立相关，且能识别出传统风险因素和 CACS 之外仍存在“残余炎症风险”的个体[22]；另外，连续测量 FAI 动态变化(Δ FAI)的对于 MACE 具有更强的预后意义，多因素分析显示， Δ FAI 是预测 MACE 的最强独立因素，其比值比(OR)高达 16.725，显著高于管腔狭窄程度和斑块体积[3]，这表明血管炎症的活动性进展是比静态的炎症水平更危险的风险信号。FAI 的动态性还使其有望成为监测治疗反应的生物标志物：在肿瘤心脏病学领域，研究观察到肺癌患者接受放疗后 FAI 升高，且治疗前的 FAI 与后续 MACE 相关[23]，提示 FAI 可用于监测癌症治疗相关的

心血管毒性。以下为近几年 FAI 应用于评估临床疾病的一些相关研究示例：

- ① 非 ST 段抬高型心肌梗死患者中冠状动脉周围脂肪衰减指数和血小板淋巴细胞比率水平升高[24]，表现出脂肪组织炎症与冠心病进展中血栓的形成具有一定的相关性。
- ② 基于 CCTA 得出的 FAI 影像组学模型对于预测 MACE 风险具有极高价值[25]。
- ③ 在非阻塞性冠心病患者中，FAI 与不良预后呈正相关，且其预测价值要高于临床变量和基础的 CCTA 特征[26]。
- ④ 基于非脂肪阈值限制的新型冠状动脉周围脂肪组织平均衰减测量方法具有良好的可行性和可重复性。在评估早期冠状动脉炎症导致的冠状动脉周围脂肪密度变化方面，这种测量方法可能比 FAI 更为敏感，但它与斑块类型无关[27]。

3. CT-FFR，CACS 及 FAI 联合应用的必要性及相关诊断价值

应用上述单一指标评估冠脉疾病均存在一定的局限性，例如：CT-FFR 可能会忽略一些非血流限制性但易损的病变；CACS 可能忽略“软斑块”的风险；而 FAI 单独使用缺乏基础的解剖和功能背景。因此，通过整合以上三项指标构建多维度评估框架是有必要的。近年来，针对上述参数的相关性以及其联合应用的临床价值的相关研究也逐渐有所发展。表 1 为 CT-FFR、CACS 与 FAI 的多维度风险评估比较。

Table 1. Comparative multi-dimensional risk assessment of three indicators
表 1. 三项指标多维度风险评估比较

评估维度	CT-FFR	CACS	FAI
核心信息	病变的血流动力学影响(功能)	冠状动脉钙化斑块总负荷(解剖)	冠周脂肪组织炎症活性(炎症)
主要技术方法	基于 CCTA 的 AI 模拟分析等	非增强 CT，Agatston 积分法	CCTA 图像，血管周围脂肪 CT 值测量
关键预后价值	<0.8 需临床干预，预防心血管不良事件；指导血运重建；	长期风险评估，极低分值的强阴性预测价值	识别残余炎症风险，动态变化提示 MACE
主要局限性	依赖高质量的 CCTA 图像；对微血管疾病评估有限	无法评估非钙化斑块和斑块易损性；	标准化测量方案待统一；受全身代谢状态影响；

3.1. CT 血流储备分数联合冠状动脉钙化积分的相关性及诊断价值

既往研究显示，无论冠脉狭窄水平如何，冠脉钙化积分和 FFRct 之间呈现负性相关[9]。在涵盖 CT-FFR 的冠心病报告和数据系统(即 Coronary Artery Disease Reporting and Data System, CAD-RADS)中，还为冠状动脉钙化积分增加了额外的预后价值，且在所有冠状动脉钙化积分分层中，这种额外增加的价值均持续存在[28]。CT-FFR 在诊断轻、重度钙化冠心病患者心肌缺血的一致性较好，对轻度钙化冠心病患者心肌缺血的诊断灵敏度高[29]；另外，CT-FFR 可筛选出冠状动脉钙化高积分但无功能性缺血的患者，以避免过度干预。但是在近几年研究中显示，二者联合应用与单独 CT 血流储备分数相比，对稳定性冠心病患者 MACE 发生的预后价值无明显提升[30]。

3.2. CT 血流储备分数与冠周脂肪衰减指数的相关性及相关诊断价值

关于针对 CT-FFR 与 FAI 二者的相关性研究目前有待补充。而在临床评估应用中，FAI 可以识别炎

症活跃区域, CT-FFR 可以评估其血流动力学影响, 二者联合能够共同优化风险分层[31] [32]。例如, 有研究显示, CT 血流储备分数(CT-FFR) ≤ 0.80 与两性的 MACE 均显著相关, 左前降支的脂肪衰减指数(FAI [LAD])和左旋支的脂肪衰减指数(FAI [LCX]) ≥ 70.1 仅与女性的 MACE 显著相关, 而将 FAI [LCX]纳入 CT-FFR 和临床危险因素的风险预测模型中, 则具有额外的增量预后价值[33]。另外, 冠脉狭窄率联合 FAI 可预测血流动力学异常(如 FFR ≤ 0.80), 提升对非钙化斑块导致 MACE 的预警能力[31] [33]。

3.3. 冠状动脉钙化积分与冠周脂肪衰减指数的相关性及其诊断价值

目前针对二者相关性及其联合应用预测 MACE 的研究证据较少, 但是基于二者独自已被证实研究成果可以表明: 在临床预防中, CACS = 0 但 FAI 升高的个体, 可能提示早期、活跃的炎症性动脉粥样硬化[3], 需要更积极的危险因素管理。

4. 不足与展望

4.1. 现有证据的局限性与争议

冠心病多维度风险评估模型的完善需要更多、更全面的研究。在现有 CT-FFR、CACS 与 FAI 联合预测 MACE 的研究中, 仍然存在一定的方法学局限与结果分歧, 需辩证看待。

4.1.1. 标准化阈值方面

不同设备及算法可能导致 CT-FFR 和 FAI 的测量值不同, 国外研究多采用 CT-FFR ≤ 0.80 为临界值, 而国内研究可能会结合亚洲人群特征调整。在报告标准上也存在一定的不同, 进而导致结果也有所差异[34]。

4.1.2. 严重钙化对 CT-FFR 测量结果的干扰

一项系统评价显示, 尽管 CT-FFR 的整体诊断准确性优于 CCTA, 但 CACS ≥ 400 时假阳性率会有所升高, 重度钙化导致的“开花伪影”可造成大概 20%~30%的血管被高估狭窄程度, 有病例报告显示 CACS 极度升高的患者 CT-FFR 提示严重三支病变, 但是其侵入性造影显示仅为轻度非阻塞性狭窄[35] [36]。

4.1.3. CACS = 0 并非绝对安全的问题

一项纳入无症状者的 Meta 分析发现, 大约 10%的 CACS = 0 患者的 CCTA 检出非钙化斑块, 部分还发现存在阻塞性病变, 高血压、糖尿病和男性为显著预测因素, 提示单纯依赖 CACS 可能遗漏早期非钙化表现的活动性病变[37]。

4.1.4. FAI 测量的高异质性

一项纳入 17 项研究的 Meta 分析显示, FAI 每升高 5 HU, MACE 风险增加 29%, 但研究之间的异质性高达 84%, 提示 CT 扫描参数、测量方法及阈值选择的差异显著影响效应估计[38]。

4.1.5. 与主流观点不符的“阴性”结果

值得注意的是, 一项针对 260 例无传统危险因素疑似 CAD 患者的回顾性分析表明, FAI 和 CT-FFR 各自相对于斑块负荷均未提供额外的增量预后价值, 仅二者联合时才呈现改善[39]。另有研究发现在经导管主动脉瓣置换术队列中, CACS ≥ 1000 AU 对 MACE 的预测未呈现出统计学意义, 且部分患者因既往介入治疗或图像质量原因不适宜基于 CT 的血流动力学评估, 揭示该模式在特定临床场景下的适用范围局限[40]。

4.1.6. 技术整合与验证不足

多数研究为单中心、回顾性设计, 且联合模型的构建多停留在统计关联层面, 缺乏在多中心、大规

模队列的验证, 也缺少与传统风险评分的比较研究[41]。此外, 斑块形态与功能评估之间的失配现象提示炎症、血流动力学与解剖负荷三者并非线性叠加关系, 如何识别三者一致的高危表型仍需深入探索[42]。

4.2. 多维度评估框架的实践障碍

将 CT-FFR、CACS 与 FAI 从研究证据转化为常规临床应用, 尚需克服多重障碍。

4.2.1. 技术标准化方面

CACS 的 Agatston 评分方法已相对成熟, 但 CT-FFR 依赖设备、扫描方案和计算软件的差异导致临界值的通用性存在一定的不确定性。FAI 的测量则对 CT 管电压、重建算法和感兴趣区定位是非常敏感的, 不同后处理软件计算 FAI 的有一定差异, 加上观察者间变异也是影响因素之一。

4.2.2. 人才培养及报告体系方面

除 CACS 外, CT-FFR 的解读涉及对伪影来源和计算模型局限性的判断, FAI 的定量分析则需熟悉冠周脂肪解剖边界, 多数放射科医师尚缺乏系统培训。

现有冠状动脉疾病报告和数据系统主要整合 CACS 与狭窄程度评估, 尚未纳入 FAI 参数, 缺乏统一的报告模板。

4.2.3. 成本效益方面

CT-FFR 依赖商业软件来测量计算的成本是不小的, 而 FAI 分析还需额外后处理时间。联合模型如何具体改变临床诊治流程、对患者远期预后的影响, 以及其增加的成本是否具有效益, 目前均缺乏一定的实证研究[9] [32] [34]。在中国医疗支付的体系下, 增加上述参数所需的开支是否值得临床作为常规项目开展, 仍然缺乏一定的卫生经济学证据。

4.3. 未来研究展望

4.3.1. 推进以上参数结果的标准化

需要建立统一的图像采集、分析流程和诊断标准, 再利用较先进的人工智能技术实现参数的自动化, 以促进临床推广。

4.3.2. 探索参数的动态评估价值

越来越多的研究显示, Δ CT-FFR、 Δ FAI 等动态指标可以展现出一定的临床价值。因此, 未来应倾向于研究联合指标的动态变化对风险再分层和治疗效果的评估意义。

4.3.3. 构建多维度整合的智能模型

针对以上三项参数同步自动提取的开发方向, 应尽可能地构建能够实现“一键式”端到端分析的 AI 一体化算法, 直接从 CCTA 原始图像中自动分割冠脉树、计算各指标并输出风险概率评分。近期已有研究联合 CT-FFR 与 FAI 构建预测支架内再狭窄的多模态模型并取得良好区分度, 提示整合多个影像指标的可行性已获初步验证[43], 但该研究的样本量较少, 仍有一定的局限性。

建议后续逐渐地开展多中心前瞻性队列研究, 需重点关注主要终点(如复合 MACE)的定义, 预设亚组分析(如糖尿病患者、慢性肾病患者、临界狭窄病变等), 明确多维联合模型优于传统评分(如 Framingham 评分、PREVENT 方程等)的净重分类改善指数阈值。此外, 需填补成本效益分析空白, 通过决策树或马尔可夫模型模拟在中国不同等级医院的医保支付场景下, 联合评估相较单一指标是否具备经济可及性。

5. 结论

基于冠状动脉 CT 血管成像衍生的 CT 血流储备分数、冠状动脉钙化积分及冠状动脉周围脂肪衰减指

数分别从功能、结构与炎症三个角度提供冠状动脉相关信息, 并可以起到一定的互补作用, 有望提升 MACE 预测的准确性, 进而实现从“解剖-功能-炎症”的多维风险分层, 为临床决策提供更全面的依据。然而, 其标准化流程及临床长期获益仍需更多未来国内外研究的支持。

参考文献

- [1] 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>
- [2] Pavlović, J., Bos, D., Ikram, M.K., Ikram, M.A., Kavousi, M. and Leening, M.J.G. (2025) Guideline-Directed Application of Coronary Artery Calcium Scores for Primary Prevention of Atherosclerotic Cardiovascular Disease. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **18**, 465-475. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2024.12.008>
- [3] Sun, X., Zhu, Y., Zhang, N., Yuan, K., Ling, J. and Ye, J. (2024) Prognostic Value of Serial Coronary Computed Tomography Angiography-Derived Perivascular Fat-Attenuation Index and Plaque Volume in Patients with Suspected Coronary Artery Disease. *Clinical Radiology*, **79**, 599-607. <https://doi.org/10.1016/j.crad.2024.04.007>
- [4] Selvam, P.V., Sharma, R., Ganz, P., Blumenthal, R.S. and Gulati, M. (2025) Cardiovascular Disease Risk Estimates Using the New PREVENT Equation: The Good, Bad, and the Ugly. *American Journal of Preventive Cardiology*, **24**, Article ID: 101288. <https://doi.org/10.1016/j.ajpc.2025.101288>
- [5] Williams, M.C., Hunter, A., Shah, A.S.V., Assi, V., Lewis, S., Smith, J., *et al.* (2016) Use of Coronary Computed Tomographic Angiography to Guide Management of Patients with Coronary Disease. *Journal of the American College of Cardiology*, **67**, 1759-1768. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2016.02.026>
- [6] 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.
- [7] Soschynski, M., Storelli, R., Birkemeyer, C., Hagar, M.T., Faby, S., Schwemmer, C., *et al.* (2024) CT Myocardial Perfusion and CT-FFR versus Invasive FFR for Hemodynamic Relevance of Coronary Artery Disease. *Radiology*, **312**, e233234. <https://doi.org/10.1148/radiol.233234>
- [8] 李辉, 李尧, 姚卓亚, 等. 冠状动脉 CT 血管成像的无创血流动力学指标对不稳定型心绞痛合并临界病变患者的临床结局具有预测价值[J]. 分子影像学杂志, 2025, 48(1): 10-16.
- [9] Nørgaard, B.L., Mortensen, M.B., Parner, E., Leipsic, J., Steffensen, F.H., Grove, E.L., *et al.* (2020) Clinical Outcomes Following Real-World Computed Tomography Angiography-Derived Fractional Flow Reserve Testing in Chronic Coronary Syndrome Patients with Calcification. *European Heart Journal—Cardiovascular Imaging*, **22**, 1182-1189. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jeaa173>
- [10] 郭自强, 王玺, 刘子暖, 丁熠璞, 辛然, 单冬凯, 郭军, 陈韵岱, 杨俊杰, 等. 深度学习驱动的中心线提取算法对无创冠状动脉血流储备分数“灰区”诊断的优化价值研究[J]. 中国介入心脏病学杂志, 2025, 33(6): 312-318.
- [11] 欧阳丽娜, 王晶晶, 张怀榕, 等. 基于 CT 血流储备分数评估冠心病合并高脂血症患者预后的研究[J]. 中国临床医学影像杂志, 2025, 36(4): 245-249, 255.
- [12] 唐丽, 包照亮, 赵赫, 等. CT 血流储备分数对行妇科手术冠心病患者术前冠脉评估决策的影响[J]. 中国实用妇科与产科杂志, 2025, 41(3): 369-372.
- [13] 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. *Journal of the American College of Cardiology*, **58**, 1989-1997. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2011.06.066>
- [14] Xue, R.J., Liu, J.L., Wang, H.Y., *et al.* (2025) Sex-Specific Prognostic Differences between CACS and Lp(a) in Atherosclerotic Cardiovascular Disease Events: The MESA Study. *Circulation: Cardiovascular Imaging*, **18**, e018413.
- [15] Gómez-Díaz, D., Díez-Villanueva, P., López-Melgar, B., Flores, L., De Toffol, G., Ramos, A., *et al.* (2025) Role of Coronary Artery Calcium Score CT in Risk Stratification of Asymptomatic Individuals. *Journal of Cardiovascular Development and Disease*, **12**, Article 442. <https://doi.org/10.3390/jcdd12110442>
- [16] 涂小良. 冠状动脉钙化积分在心血管风险评估中的应用[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2017.
- [17] Xie, C., Luo, D., Liu, G., Chen, J. and Huang, H. (2024) Ten-Year Trajectory of Coronary Artery Calcification and Risk of Cardiovascular Outcomes: The Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, **11**, Article 1406216. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2024.1406216>
- [18] 张宏伟, 李新国. 冠状动脉钙化积分与冠心病介入术后近期预后的相关性[J]. 医学临床研究, 2024, 41(1): 51-53, 57.

- [19] Pagano, G., Sastre, L., Blasi, A., Brugaletta, S., Mestres, J., Martinez-Ocon, J., *et al.* (2024) CACS, CCTA and MCAD-LT Score in the Pre-Transplant Assessment of Coronary Artery Disease and the Prediction of Post-Transplant Cardiovascular Events. *Liver International*, **44**, 1912-1923. <https://doi.org/10.1111/liv.15926>
- [20] 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>
- [21] 沈旨艳, 夏坤, 幸志洋, 等. 冠周脂肪衰减指数评估冠心病研究进展[J]. 中国医学影像技术, 2023, 39(4): 614-617.
- [22] 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)
- [23] Xie, Y., Shen, H., Xu, Q., Tu, C., Yang, R., Liu, T., *et al.* (2024) Evaluating Coronary Arteries and Predicting Maces Using CCTA in Lung Cancer Patients Receiving Chemotherapy or Chemoradiotherapy. *Radiotherapy and Oncology*, **200**, Article ID: 110498. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2024.110498>
- [24] Li, Y., Wang, C., Wang, Q., Li, S., Yang, J., Pan, H., *et al.* (2025) Predictive Value of Peri-Coronary Fat Attenuation Index in Elderly Non-ST-Elevation Myocardial Infarction and Its Correlation with Platelet to Lymphocyte Ratio. *BMC Cardiovascular Disorders*, **25**, Article No. 298. <https://doi.org/10.1186/s12872-025-04730-8>
- [25] Wu, Y., Qi, H., Zhang, X. and Xing, Y. (2025) Predictive Value of CCTA-Based Pericoronary Adipose Tissue Imaging for Major Adverse Cardiovascular Events. *Academic Radiology*, **32**, 91-101. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2024.08.022>
- [26] Zheng, N., Liu, Z., Ding, Y., Wang, X., Li, J., Dou, G., *et al.* (2025) Incremental Prognostic Value of Pericoronary Adipose Tissue Attenuation Beyond Conventional Features in Patients with Nonobstructive Coronary Artery Disease. *Atherosclerosis*, **402**, Article ID: 119075. <https://doi.org/10.1016/j.atherosclerosis.2024.119075>
- [27] Li, Q., Lin, M., Fan, H., Liao, C., Liu, X., Zhao, Y., *et al.* (2025) Diagnostic Potential of Pericoronary Adipose Tissue Mean Attenuation for Coronary Atherosclerotic Heart Disease: A Comparative Analysis with the Fat Attenuation Index. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **15**, 3148-3160. <https://doi.org/10.21037/qims-24-828>
- [28] Bittner, D.O., Mayrhofer, T., Budoff, M., Szilveszter, B., Foldyna, B., Hallett, T.R., *et al.* (2020) Prognostic Value of Coronary CTA in Stable Chest Pain. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **13**, 1534-1545. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2019.09.012>
- [29] 杨威, 李慧萍, 郭权, 等. CT 血流储备分数诊断冠状动脉不同钙化程度冠心病患者心肌缺血的价值[J]. 中华实用诊断与治疗杂志, 2022, 36(9): 947-950.
- [30] 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.
- [31] 刘美鞠. 病变特异性冠周脂肪衰减指数对 2 型糖尿病患者不良心血管事件的预测价值[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 中国医科大学, 2024.
- [32] Yu, Y., Kou, J., Guo, F., Zhang, D., Pan, T., Chen, Y., *et al.* (2023) Prognostic Value of CT-Derived Fractional Flow Reserve and Fat Attenuation Index in Patients with Suspected Coronary Artery Disease: A Sex-Disaggregated Analyses. *BMC Cardiovascular Disorders*, **23**, Article No. 612. <https://doi.org/10.1186/s12872-023-03650-9>
- [33] 姜利伶, 蒋超, 熊华. 冠状动脉 CT 血管成像衍生参数在冠状动脉疾病中的应用进展[J]. 国际医学放射学杂志, 2025, 48(2): 186-190.
- [34] Bianchini, E., Alqahtani, F., Alsubai, S., del Sole, P.A., Elzomor, H., Sharif, R., *et al.* (2025) Advanced Analyses of Coronary Computed Tomography Angiography to Predict Future Cardiac Events: A Meta-Analysis. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **18**, 1220-1231. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2025.05.017>
- [35] Ma, Z., Tu, C., Zhang, B., Zhang, D., Song, X. and Zhang, H. (2024) A Meta-Analysis Comparing the Diagnostic Performance of Computed Tomography-Derived Fractional Flow Reserve and Coronary Computed Tomography Angiography at Different Levels of Coronary Artery Calcium Score. *European Radiology*, **34**, 5621-5632. <https://doi.org/10.1007/s00330-024-10591-0>
- [36] Robinson, C.A., Tso, J., Rivera, L., Ghasemiesfe, A. and Schaefer, S. (2025) Can Fractional Flow Reserve-Computed Tomography (FFR-CT) Overestimate the Severity of Coronary Stenoses in the Presence of High Calcium Burden? *Cureus*, **17**, e94826. <https://doi.org/10.7759/cureus.94826>
- [37] Sama, C., Abdelhaleem, A., Velu, D., Ditah Chobufo, M., Fongwen, N.T., Budoff, M.J., *et al.* (2024) Non-Calcified Plaque in Asymptomatic Patients with Zero Coronary Artery Calcium Score: A Systematic Review and Meta-analysis. *Journal of Cardiovascular Computed Tomography*, **18**, 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.jcct.2023.10.002>
- [38] Sagoo, N.S., Sagoo, R., LeGate, J. and Sathyamoorthy, M. (2026) Pericoronary Adipose Tissue Attenuation on CCTA as a Marker of Cardiovascular Risk: A Systematic Review and Meta-Analysis. *European Journal of Radiology*, **195**,

Article ID: 112607. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2025.112607>

- [39] Yu, Y., Guo, F., Chen, Y., Bao, W. and Li, C. (2024) Added Prognostic Value of Fat Attenuation Index and CT-Derived Fractional Flow Reserve over Plaque Burden in Suspected CAD Patients without Standard Modifiable Risk Factors. *African Health Sciences*, **24**, 444-452. <https://doi.org/10.4314/ahs.v24i3.49>
- [40] Steyer, A., Puntmann, V.O., Nagel, E., Leistner, D.M., Koch, V., Vasa-Nicotera, M., *et al.* (2024) Coronary Artery Disease Assessment via On-Site CT Fractional Flow Reserve in Patients Undergoing Transcatheter Aortic Valve Replacement. *Radiology: Cardiothoracic Imaging*, **6**, e230096. <https://doi.org/10.1148/ryct.230096>
- [41] Luo, W., Li, C., Yan, G., Huang, Z., Yue, Y., Yang, D., *et al.* (2025) Predictive Model Development Combining CT-FFR and SYNTAX Score for Major Adverse Cardiovascular Events in Complex Coronary Artery Disease. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 7152. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91708-3>
- [42] Sgreva, S., Alsubai, S.E., Bianchini, E., Alqahtani, F., Del Sole, P.A., Elzomor, H., *et al.* (2025) Plaques Do Not Act Alone: Time to Redefine Coronary Vulnerability from Lesion to Phenotype. *Journal of Clinical Medicine*, **14**, Article 7568. <https://doi.org/10.3390/jcm14217568>
- [43] Zhao, W., Huang, L., Zhu, M., Li, X., Liu, X., Zhang, W., *et al.* (2025) Integrated CT-Derived Fractional Flow Reserve and Perivascular Fat Attenuation Index: A Multimodal Approach to Predict In-Stent Restenosis. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, **12**, Article 1703044. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2025.1703044>