

CT-FFR及FAI在冠心病中的应用进展

刘葑菁¹, 闫文¹, 陈博¹, 李飞^{2*}

¹延安大学医学院, 陕西 延安

²延安大学附属医院心血管内科三病区, 陕西 延安

收稿日期: 2026年3月21日; 录用日期: 2026年4月16日; 发布日期: 2026年4月21日

摘要

冠心病是(CHD)临床上最常见的心血管疾病,其发病率仍不断上升。传统冠状动脉CT血管成像(CCTA)在评估冠状动脉狭窄方面具有较高的灵敏度与阴性预测价值,但无法反映血流动力学变化。CT血流储备分数(CT-FFR)可通过模拟冠脉血流动力学,实现“一站式”无创评估,区分解剖狭窄与功能缺血,指导精准干预,避免过度治疗。冠状动脉周围脂肪衰减指数(FAI)作为新型生物标志物,可评估血管炎症状态、识别易损斑块和高危血管段,用于疗效监测和长期心脏事件风险预测。本文对CT-FFR及FAI在冠心病中的应用进展进行综述。

关键词

CT血流储备分数, 脂肪衰减指数, 冠心病

Application Progress of CT-FFR and FAI in Coronary Heart Disease

Fengjing Liu¹, Wen Yan¹, Bo Chen¹, Fei Li^{2*}

¹Medical College of Yan'an University, Yan'an Shaanxi

²Ward III, Department of Cardiovascular Medicine, Yan'an University Affiliated Hospital, Yan'an Shaanxi

Received: March 21, 2026; accepted: April 16, 2026; published: April 21, 2026

Abstract

Coronary heart disease (CHD) remains the most common clinical cardiovascular disease, with its incidence continuing to rise. Traditional coronary computed tomography angiography (CCTA) demonstrates high sensitivity and negative predictive value in assessing coronary stenosis but fails to reflect hemodynamic changes. Computed tomography-derived fractional flow reserve (CT-FFR) enables a “one-
*通讯作者。

stop” noninvasive evaluation by simulating coronary hemodynamics, distinguishing anatomical stenosis from functional ischemia, thus guiding precise intervention and avoiding overtreatment. The perivascular fat attenuation index (FAI), as a novel biomarker, can assess vascular inflammatory status, identify vulnerable plaques and high-risk vessel segments, and be utilized for therapeutic monitoring and long-term cardiac event risk prediction. This article reviews the application progress of CT-FFR and FAI in coronary heart disease.

Keywords

CT-FFR, FAI, Coronary Heart Disease

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

冠心病(Coronary heart disease, CHD)已成为中国居民死亡的首位原因。冠心病在全球范围内,尤其是中国,呈现高患病率和高死亡率的特点。最新数据显示,中国冠心病患者总数已达1139万,且死亡率呈持续上升[1][2]。冠状动脉造影(Coronary Angiography, CAG)长期被视为诊断冠心病的“金标准”[3],主要用于精确评估血管腔狭窄程度及即时进行介入治疗。随着影像技术的进步,冠状动脉CT血管造影(Coronary computed tomographic angiography, CCTA)由于其无创性、高分辨率及斑块成分分析的独特优势,已成为冠心病排除和初步诊断的“守门员”。近年来,基于CCTA的多模态评估体系,通过整合解剖学、功能学及组织学多维度参数,包括斑块定量参数、CT血流储备分数(CT-fractional flow reserve, CT-FFR)、冠状动脉周围脂肪组织(Pericoronary adipose tissue, PCAT)、冠状动脉周围脂肪衰减指数(Fat attenuation index, FAI)、管腔内密度衰减梯度(Transluminal attenuation gradient, TAG)等,结合人工智能辅助分析,能够提高临床诊疗效率,为制定个体化血运重建策略及预判主要不良心血管事件(Major adverse cardiovascular events, MACE)风险提供循证依据。

因此,本文旨在对CT-FFR与FAI在冠心病中的研究进展进行综述,为冠心病患者的精准诊断及预后评估提供理论支持和实践依据。

2. CT-FFR

2.1. 概述

冠状动脉血流储备分数(FFR)是评估冠状动脉狭窄对心肌供血影响的重要指标。FFR定义为心肌最大充血状态下的狭窄远端冠状动脉内平均压与冠状动脉口部主动脉平均压的比值,其理论正常值为1.0。数值越低,说明狭窄对血流的限制越严重。冠状动脉狭窄可能导致心肌缺血,但狭窄程度与心肌缺血程度并不完全一致。研究表明,超过一半的冠状动脉狭窄可能不会引起心肌缺血,而非梗阻性病变也可能导致心肌缺血[4]。近年冠状动脉的CT-FFR因可以在单次检查中同时提供冠脉的解剖和生理学信息,且不需要使用药物辅助、不增加辐射剂量等特点而受到广泛关注。CT-FFR是一项无创的图像后处理技术,基于冠状动脉CT血管造影图像,通过计算流体动力学(CFD)及深度学习等方法,模拟计算冠状动脉在最大充血状态下的血流与压力[5]。在提供冠脉解剖狭窄信息的同时,评估该狭窄是否导致了有临床意义的心肌缺血,从而帮助制定治疗决策。通常认为CT-FFR值 ≤ 0.80 提示狭窄可能引发缺血;0.75~0.80为需综

合判断的“灰区”； ≥ 0.80 则缺血可能性低[6]。

2.2. CT-FFR 在 CHD 中的应用

多项研究证实, CT-FFR 在提升冠心病诊断特异性、预测心血管事件风险和优化临床决策方面具有重要价值。一项针对 463 例疑似冠心病患者的研究显示, 以有创 FFR 为金标准, CT-FFR 在患者水平诊断功能性心肌缺血的灵敏度为 84%, 特异度为 81%, 准确度达 82% [7]。

另一项针对 3392 例 2 型糖尿病合并不稳定心绞痛患者的大规模研究也证实, CT-FFR 的诊断准确度、灵敏度和特异度均在 84% 左右[8]。最新的全自动化 CT-FFR 软件可将分析时间缩短至 4 分钟以内, 显著提升了其临床应用的可行性[7]。众多临床试验表明, 加入 CT-FFR 后冠状动脉 CTA 的诊断准确性提升, 主要因其特异性优于单纯冠状动脉 CTA [9]-[11]。CCTA 阳性预测值较低, 导致许多并不存在心肌缺血的检查者因为 CCTA 的阳性结果而进行 ICA 检查, 而 CT-FFR 的应用有望减少胸痛患者对侵入性冠状动脉造影(ICA)的必要性[12]。Mark Rabbat 等[13]研究显示对于阻塞性冠心病患者, ICA 使用率从 80% 降至 45%, 最终接受 ICA 的患者中, 62% 进行了血运重建。提示 CT-FFR 减少了 ICA 的使用, 同时提高了 ICA 的效率。血流储备分数(FFR)虽是诊断冠状动脉狭窄造成心肌缺血的金标准, 但其在临床应用中常存在一定限制[14], 作为一项侵入性冠状动脉造影(ICA)下的操作, 压力导丝及腺苷等药物的使用, 增加了患者的不良反应和额外的费用。这使其无法作为一线筛查工具, 通常仅用于已接受 ICA 且存在中度狭窄的患者。同时有研究证实 CT-FFR 和冠状动脉造影方法计算的 FFR 具有高度的一致性[15][16]。因此, 在进行 ICA 前, CCTA、CT-FFR 是一个有必要的选择。一项针对 2566 名冠心病患者的长期随访(中位时间约 6 年)的汇总分析显示, CT-FFR ≤ 0.80 是主要不良心血管事件的强预测因子(风险比为 5.05)。这一研究中构建了三个模型(模型 1, 使用临床变量构建; 模型 2, 模型 1 + 冠状动脉断层扫描血管造影衍生解剖参数; 模型 3, 模型 2 + CT-FFR)对结局的预测能力进行比较。模型 2 的判别能力高于模型 1 (Harrell's C-statistics, 0.79 versus 0.64; $P < 0.001$), 通过在模型 3 中加入 CT-FFR 得到进一步提升(Harrell's C-statistics, 0.83 versus 0.79; $P < 0.001$)。此外, 与模型 2 相比, 模型 3 也表现出改进(净重新分类改善 = 0.085; $P = 0.001$)。至于预测死亡或非致死性心肌梗死, 仅将 CT-FFR 纳入模型 3 显示出更好的重新分类效果(净重新分类改善 = 0.131; $P = 0.021$)。这一结果提示了在包含临床和 CTA 解剖信息的预测模型中加入 CT-FFR 数据后, 模型的预测区分能力得到显著提升[17]。有助于 CAD 患者的风险分层和决策。作为指导治疗决策的重要工具, CT-FFR 在预后评估方面发挥着重要作用。在一项回顾性研究中纳入 3392 名 2 型糖尿病(T2DM)合并不稳定心绞痛(UA)的患者, 且 CTA 影像检测到至少一个可见钙化部位。其中, 心血管专家推荐 1091 名患者和 1372 条血管, 并完成了 ICA 和 FFR 以及 CT-FFR 测量, 根据 CT-FFR 数值分为两组: 一组 CT-FFR > 0.80 , 另一组 CT-FFR ≤ 0.80 。结果表明 CT-FFR ≤ 0.80 的患者在 3 年随访期内发生主要不良心脑血管事件的风险显著更高(14.17% versus 6.06%; $P < 0.001$), 且 CT-FFR 是此类事件的独立预测因子[8]。但该研究由于回顾性分析的特性, 可能存在一定偏倚。

2.3. CT-FFR 的局限性

CT-FFR 的准确性高度依赖于 CCTA 的图像质量。如果 CCTA 图像存在伪影、噪声或断层等问题, 尤其是冠脉钙化、心率过快或心律不齐等情况, 会导致 CT-FFR 的计算结果出现偏差[18]。

一项 meta 分析显示, CT-FFR 在评估 FFR 值处于临界区间(如 0.7~0.8)的病变时, 诊断准确性仅为 46%, 可能无法提供可靠的评估结果[19]。由于 CT-FFR 主要通过冠状动脉的几何形态(如狭窄程度、长度)来计算压力下降。然而, FFR 值处于 0.7~0.8 的病变, 其形态与功能的对应关系并不直接, 单纯依靠几何信息无法准确判断其是否真正引起缺血, 导致计算结果与实际测量值容易出现偏差。其次, 微循环的实

际反应也存在着个体差异(如受血管位置、性别、心率等影响),这种差异在临界病变评估时对结果影响显著,也会导致计算误差。

CT-FFR 主要适用于疑似冠心病且病情稳定的患者,而对于既往接受过冠状动脉旁路移植术、怀疑支架内再狭窄或近期发生急性心肌梗死的患者,其应用范围受到限制[20]。也有不同观点,Onuma 等[21]研究中证实了 PCI 术后,CT-FFR 的可行性;另一研究显示,CT-FFR 可无创评估支架后再狭窄患者的血流动力学[22]。

3. FAI

3.1. 基本概念

冠状动脉周围脂肪衰减指数(FAI)是一种基于 CCTA 的新型影像学生物标志物,可以用于无创量化冠状动脉炎症。它通过测量冠状动脉周围特定范围内脂肪组织的平均 CT 值(通常在-190 至-30 HU 之间),可以反映局部炎症活动[23]。FAI 测量的目标是冠状动脉周围脂肪组织(PCAT),这是心外膜脂肪中紧邻冠状动脉血管壁的特殊部分。PCAT 与血管壁无解剖屏障,能直接感知并反映血管壁的炎症状态[24]。为标准化,通常对不同血管分段测量:右冠状动脉:在距离起始端 10~50 mm 处测量;左冠状动脉系统:在前降支和回旋支的近端 40 mm 处测量。

3.2. 病理生理学

PCAT 是紧贴冠状动脉的活性脂肪器官,在健康状态下,通过分泌脂联素等因子发挥抗炎和保护血管的作用[25]。但在病理状态下,它会转化为促炎表型,大量分泌肿瘤坏死因子- α 、白细胞介素-6 等炎症介质。这些介质直接作用于血管壁,加剧局部炎症、损伤内皮功能,从而驱动动脉粥样硬化的发生与发展[26][27]。当冠脉血管壁存在炎症时,炎症信号会改变周围脂肪的构成,使其脂质减少、水分和纤维组织增加。由于水分在 CT 影像上密度更高,因此发炎的 PCAT 其平均 CT 值(即衰减)会升高[28]。测量该值即得到 FAI,FAI 值越高,直接提示局部冠状动脉炎症越活跃,与斑块易损性及未来心血管事件风险密切相关。

3.3. FAI 在 CHD 中的应用

一项前瞻性研究结果显示坏死核心体积增加(Pearson's $r = 0.324, P < 0.001$)和纤维脂肪体积(Pearson's $r = 0.270, P < 0.001$)与冠状动脉周围 FAI 呈正相关,纤维体积(Pearson's $r = -0.333, P < 0.001$)呈负相关[29]。一项荟萃分析,对 8396 名患者进行了定量分析,均为稳定 CAD,结果表明右冠状动脉(RCA)PCAT 衰减升高与 MACE 相关(HR: 1.22, 95% CI 1.08~1.38, $P = 0.001$) [30]。Lu 等[31]研究发现,同时具有 HRP (高风险斑块)特征和高 FAI 的患者(HRP+与 HRP+),调整后的 MACE 风险比无此特征者(HRP-/FAI-)高出 6.3 倍($P < 0.001$)。此外,无 HRP 特征但 FAI 较高的患者(HRP-/FAI+)的 MACE 调整风险高出参考组(HRP-/FAI-) 4.9 倍($P < 0.001$)。然而,在 FAI 低患者中,HRP+与 HRP-患者间 MACE 的前瞻性风险无显著差异($P = 0.87$)。FAI 与有无高危斑块患者不良事件风险增加相关,凸显出冠状动脉炎症是斑块脆弱性的主要决定因素,独立于不良斑块形态。利用 CCTA 衍生的 FAI 对冠状动脉炎症进行无创评估,可以通过在传统的冠状动脉血管解剖评估中补充疾病活动的功能标志物,从而改善风险分层。多项研究已证实,RCA 周围 FAI 对冠心病的预后有一定预测价值。CRISP-CT 研究验证了 FAI 提高了全因死亡和心源性死亡的风险辨别能力,RCA 周围 FAI 这一指标的预测价值优于传统冠心病危险因素[32]。通过量化残留炎症风险,FAI 可用于初级和次级预防的风险再分层,将风险预测与冠脉狭窄的解剖严重程度区分开来。FAI 不仅可用于事后识别已破裂的罪犯病变,还能前瞻性地预测风险。研究表明,对于稳定型心绞痛

患者, FAI > -88 HU 是未来发生 ACS 的独立危险因素[33]。另一项研究也证实, 高 PCAT 衰减人群的急性冠脉综合征(ACS)事件累积发生率显著更高[34]。

4. CT-FFR 联合 FAI 在 CHD 中的应用

4.1. 病理生理学逻辑

血管壁的炎症驱动了斑块的不稳定性和进展, 斑块向内生长或发生破裂, 导致管腔狭窄、血流阻力增加, 从而导致心肌缺血, 最终触发 CT-FFR 的显著下降。而 CT-FFR 下降时会发生血流动力学异常, 激活促炎基因的表达, 进一步加剧血管壁的炎症反映, 反馈性地导致 FAI 升高, 加速斑块向高危表型进展, 形成恶性循环。在多项研究中显示, FAI 值在血流动力学显著病变时(即 FFR < 0.80)升高[35] [36]。CT-FFR 数值减低是表示心肌缺血的功能性结果, 而 FAI 升高提示了导致斑块进展和不稳定的炎症性病因。二者结合, 可同时从“血流障碍”和“炎症活性”两方面提供互补信息, 从而评估血管情况。CT-FFR 反映的是斑块对血流的物理阻碍。其数值下降通常与管腔最小面积、斑块负荷及心肌质量相关。如果斑块向外重构(正性重构), 即便斑块体积很大、炎症很重, 管腔可能无明显狭窄, CT-FFR 可表现为正常。FAI 反映的是血管壁及周围脂肪组织的炎症活性。炎症是斑块易损性的核心驱动因素。FAI 升高意味着斑块处于不稳定状态, 容易发生急性冠脉综合征, 即便它尚未造成严重的血流障碍。这种“功能 - 分离”现象打破了传统“狭窄 = 缺血 = 风险”的线性思维, 揭示了缺血并非评估心血管风险的唯一维度。CT-FFR 与 FAI 联合有助于识别高危非梗阻性患者, 例如部分急性冠脉综合征患者无严重狭窄, 但 FAI 升高提示斑块不稳定, 而单纯依靠 CT-FFR 会低估其风险。另外, 二者的联合应用可以指导治疗决策, 对于 CT-FFR 正常但 FAI 升高者, 应优先考虑强化药物治疗(他汀、抗炎)以稳定斑块, 而非血运重建; 反之, 低 FAI 伴 CT-FFR 降低者, 血运重建可优先改善症状。同时这也解释了临床上“影像 - 功能”不匹配的原因: 在严重钙化或正性重构等情况下, CT-FFR 可能失真, 此时 FAI 可作为补充, 提高风险评估的准确性。

4.2. CT-FFR 联合 FAI 对 CHD 的诊断及预后预测价值

在临床应用方面, CT-FFR 联合 FAI 模型为疾病诊断及风险预测提供了循证依据。在严重钙化病变中, CT-FFR 的诊断准确性可能下降[37]。研究发现, 此时联合 FAI 能提供互补信息, 提升对重度钙化血管病变的整体诊断效能[37] [38]。联合 CT-FFR、斑块特征和 FAI 的模型, 可用于鉴别稳定型与不稳定型心绞痛, 其效能(AUC = 0.698)显著高于使用任一单一指标($P < 0.001$) [39]。在 Dong J.等[40]研究中纳入了 95 名接受 CCTA 后接受 ICA 的已知或疑似 ACS 患者, 将 FAI 和 CT-FFR 纳入标准 CCTA 分析, AUC 达: 0.918 (95% CI, 0.884~0.951), 显著优于单独其他模型, 提示 CT-FFR 联合 FAI 提高了对未来血运重建的预测。Yu Y 等[41]研究显示在无 SMuRFs (吸烟、高血压、糖尿病和高脂血症)的疑似 CAD 患者中, 单一生物学标志物无法提供足够预后信息。然而, FAI 与 CT-FFR 的结合为其提供了增量预后价值并且改善了心血管风险分层。

5. 结语

综上所述, CT-FFR 与 FAI 代表了冠心病诊疗从单纯形态学评估向整合“功能 - 结构 - 炎症”多维度精准评估的重要进步。CT-FFR 能无创地提供关键的血流动力学信息, 有效识别导致心肌缺血的病变, 而 FAI 则可量化冠状动脉周围的炎症活动, 为评估斑块易损性和心血管风险提供了新的影像学生物标志物。两者结合, 能显著提高对冠状动脉疾病的诊断与 MACE 风险的预测能力。未来, 有望通过更多前瞻性研究、大规模临床验证等进一步明确其临床价值, 为优化临床决策路径提供新思路 and 可靠依据。

参考文献

- [1] 刘明波, 何新叶, 杨晓红, 等. 《中国心血管健康与疾病报告 2023》要点解读[J]. 中国全科医学, 2025, 28(1): 20-38.
- [2] 刘明波, 王增武. 《中国心血管健康与疾病报告 2024》概要(心血管疾病流行及介入诊疗状况) [J]. 中国介入心脏病学杂志, 2025, 33(12): 687-695.
- [3] 江时森, 黄浙勇, 汤沂. 冠状动脉造影金标准与临床诊断冠心病的比较研究[J]. 中华心血管病杂志, 2004, 32(z1): 316.
- [4] 王建安. 透过现象看本质: 从冠状动脉狭窄与心肌缺血的辩证关系说起[J]. 中华心血管病杂志, 2018, 46(9): 671-671.
- [5] 田洋, 刘晓林. FFR、CT-FFR 及 QFR 在冠心病中的应用进展[J]. 中国医疗设备, 2025, 40(3): 164-168.
- [6] 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.
- [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] Zhao, Q., Liu, L., Xian, H., Luo, X., Zhang, D., Hou, S., et al. (2024) Prognostic Value of Computed Tomography-Derived Fractional Flow Reserve in Patients with Diabetes Mellitus and Unstable Angina. *Cardiovascular Diabetology*, **23**, Article No. 404. <https://doi.org/10.1186/s12933-024-02493-8>
- [9] Gentile, F., Greenwood, J.P., Hess, E.P., Ross, M.A. and Shaw, L.J. (2021) 2021 AHA/ACC/AASE/CHEST/SAEM/SCCT/SCMR Guideline for the Evaluation and Diagnosis of Chest Pain: A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on Clinical Practice Guidelines. *Circulation*, **144**, e368-e454.
- [10] Timmis, A. and Roobottom, C.A. (2017) National Institute for Health and Care Excellence Updates the Stable Chest Pain Guideline with Radical Changes to the Diagnostic Paradigm. *Heart*, **103**, 982-986. <https://doi.org/10.1136/heartjnl-2015-308341>
- [11] Kelion, A.D. and Nicol, E.D. (2018) The Rationale for the Primacy of Coronary CT Angiography in the National Institute for Health and Care Excellence (NICE) Guideline (CG95) for the Investigation of Chest Pain of Recent Onset. *Journal of Cardiovascular Computed Tomography*, **12**, 516-522. <https://doi.org/10.1016/j.jcct.2018.09.001>
- [12] Douglas, P.S., De Bruyne, B., Pontone, G., Patel, M.R., Nørgaard, B.L., Byrne, R.A., et al. (2016) 1-Year Outcomes of FFRCT-Guided Care in Patients with Suspected Coronary Disease: The PLATFORM Study. *Journal of the American College of Cardiology*, **68**, 435-445. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2016.05.057>
- [13] Rabbat, M., Leipsic, J., Bax, J., Kauh, B., Verma, R., Doukas, D., et al. (2020) Fractional Flow Reserve Derived from Coronary Computed Tomography Angiography Safely Defers Invasive Coronary Angiography in Patients with Stable Coronary Artery Disease. *Journal of Clinical Medicine*, **9**, Article No. 604. <https://doi.org/10.3390/jcm9020604>
- [14] Härle, T., Zeymer, U., Hochadel, M., Zahn, R., Kerber, S., Zrenner, B., et al. (2016) Real-World Use of Fractional Flow Reserve in Germany: Results of the Prospective ALKK Coronary Angiography and PCI Registry. *Clinical Research in Cardiology*, **106**, 140-150. <https://doi.org/10.1007/s00392-016-1034-5>
- [15] 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>
- [16] 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>
- [17] Li, Z., Xu, T., Wang, Z., Ding, Y., Zhang, Y., Lin, L., 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>
- [18] 中国医师协会心血管内科医师分会超声心动图和影像学组, 《中国介入心脏病学杂志》编辑委员会. 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.
- [19] Cook, C.M., Petraco, R., Shun-Shin, M.J., Ahmad, Y., Nijjer, S., Al-Lamee, R., et al. (2017) Diagnostic Accuracy of Computed Tomography-Derived Fractional Flow Reserve: A Systematic Review. *JAMA Cardiology*, **2**, 803-810. <https://doi.org/10.1001/jamacardio.2017.1314>
- [20] 徐少坤, 韩战营. 血流储备分数 CT 成像的最新进展及应用前景[J]. 中国医学影像学杂志, 2015, 23(5): 394-396+400.

- [21] Onuma, Y., Collet, C., van Geuns, R., de Bruyne, B., Christiansen, E., Koolen, J., *et al.* (2017) Long-Term Serial Non-Invasive Multislice Computed Tomography Angiography with Functional Evaluation after Coronary Implantation of a Bioresorbable Everolimus-Eluting Scaffold: The ABSORB Cohort B MSCT Substudy. *European Heart Journal—Cardiovascular Imaging*, **18**, 870-879. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jex022>
- [22] Tang, C.X., Guo, B.J., Schoepf, J.U., Bayer, R.R., Liu, C.Y., Qiao, H.Y., *et al.* (2021) Feasibility and Prognostic Role of Machine Learning-Based FFRCT in Patients with Stent Implantation. *European Radiology*, **31**, 6592-6604. <https://doi.org/10.1007/s00330-021-07922-w>
- [23] 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**, eal2658. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aal2658>
- [24] Simantiris, S., Pappa, A., Papastamos, C., Korkonikitas, P., Antoniadis, C., Tsioufis, C., *et al.* (2024) Perivascular Fat: A Novel Risk Factor for Coronary Artery Disease. *Diagnostics*, **14**, Article No. 1830. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14161830>
- [25] Achari, A. and Jain, S. (2017) Adiponectin, a Therapeutic Target for Obesity, Diabetes, and Endothelial Dysfunction. *International Journal of Molecular Sciences*, **18**, Article No. 1321. <https://doi.org/10.3390/ijms18061321>
- [26] Antoniadis, C., Kotanidis, C.P. and Berman, D.S. (2019) State-of-the-Art Review Article. Atherosclerosis Affecting Fat: What Can We Learn by Imaging Perivascular Adipose Tissue? *Journal of Cardiovascular Computed Tomography*, **13**, 288-296. <https://doi.org/10.1016/j.jcct.2019.03.006>
- [27] Yudkin, J.S., Eringa, E. and Stehouwer, C.D. (2005) “Vasocrine” Signalling from Perivascular Fat: A Mechanism Linking Insulin Resistance to Vascular Disease. *The Lancet*, **365**, 1817-1820. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(05\)66585-3](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(05)66585-3)
- [28] 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.
- [29] Sun, J.T., Sheng, X.C., Feng, Q., Yin, Y., Li, Z., Ding, S., *et al.* (2022) Pericoronary Fat Attenuation Index Is Associated with Vulnerable Plaque Components and Local Immune-Inflammatory Activation in Patients with Non-ST Elevation Acute Coronary Syndrome. *Journal of the American Heart Association*, **11**, e022879. <https://doi.org/10.1161/jaha.121.022879>
- [30] Antoniadis, C. and Chan, K. (2025) Pericoronary Adipose Tissue Imaging and the Need for Standardized Measurement of Coronary Inflammation: Translating PCAT Attenuation Gradients into FAI Score for Clinical Use. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **18**, 895-898. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2025.06.012>
- [31] Lu, Y., Liu, H., Zhu, Z., Wang, S., Liu, Q., Qiu, J., *et al.* (2023) Assessment of Myocardial Bridging and the Pericoronary Fat Attenuation Index on Coronary Computed Tomography Angiography: Predicting Coronary Artery Disease Risk. *BMC Cardiovascular Disorders*, **23**, Article No. 145. <https://doi.org/10.1186/s12872-023-03146-6>
- [32] 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)
- [33] Li, D., Wang, Y. and Zhu, T. (2025) Quantitative Plaque Characteristics/Pericoronary Fat Attenuation Index and Acute Coronary Syndrome in Patients with Stable Angina Pectoris. *Journal of Computer Assisted Tomography*, **49**, 587-594. <https://doi.org/10.1097/rct.0000000000001718>
- [34] 陈旭姣. 冠周脂肪衰减与斑块特性的相关性及其临床预测价值[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 中国医科大学, 2021.
- [35] 董思廷, 徐怡, 冯长静, 等. 斑块定量参数及冠周脂肪衰减指数对 FFR-CT 进展的影响[J]. 影像诊断与介入放射学, 2022, 31(1): 26-31.
- [36] Pillitteri, M., *et al.* (2025) Pericoronary Adipose Tissue Attenuation as a Predictor of Functional Severity of Coronary Stenosis.
- [37] 罗焕, 曹成瑛, 高律萍, 等. 基于双源 CT 下人工智能 CT 血流储备分数联合冠状动脉周围脂肪衰减指数对高海拔地区冠状动脉粥样硬化性心脏病的评估及预测[J]. 分子影像学杂志, 2022, 45(2): 284-288.
- [38] 高洁. 冠状动脉 CT-FFR 联合 FAI 在冠心病评估中的应用价值[J]. 影像研究与医学应用, 2025, 9(1): 93-95+98.
- [39] Li, D., Guan, H., Wang, Y. and Zhu, T. (2025) Quantitative Plaque Characterization, Pericoronary Fat Attenuation Index, and Fractional Flow Reserve: A Novel Method for Differentiating between Stable and Unstable Angina Pectoris in a Case-Control Study. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **15**, 1139-1150. <https://doi.org/10.21037/qims-24-1031>
- [40] Dong, J., Yu, J., Zhao, Y. and Fengfeng, Y. (2025) Enhancing Coronary Revascularization Prediction: Insights from Fat Attenuation Index (FAI) of Pericoronary Adipose Tissue and CT-Derived Fractional Flow Reserve (CT-FFR). *Journal of Computer Assisted Tomography*, **49**, 737-744. <https://doi.org/10.1097/rct.0000000000001749>

- [41] 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>