

冠状动脉周围脂肪衰减指数最新研究进展

朱清坦^{1,2}, 王 敏^{2*}

¹济宁医学院临床医学院, 山东 济宁

²济宁市第一人民医院放射科, 山东 济宁

收稿日期: 2025年3月14日; 录用日期: 2025年4月7日; 发布日期: 2025年4月16日

摘 要

冠状动脉周围脂肪衰减指数(Fat Attenuation Index, FAI)是一种从冠状动脉计算机断层扫描血管造影(coronary computed tomography angiography, CCTA)中提取的新型生物标志物, 用于通过识别冠状动脉周围脂肪组织(pericoronary adipose tissue, PCAT)的衰减梯度来检测血管炎症, 近年来在心血管医学领域引起了广泛的关注。FAI通过分析冠状动脉周围脂肪组织的衰减特征, 为心血管疾病的筛查和风险评估提供了新的思路。本文将对FAI的定义、测量方法以及其在临床中的潜在价值进行综述, 重点分析近年来相关研究的最新进展及其在心血管疾病的相关性及对疾病预后的预测价值。最后, 本文旨在为未来的研究提供方向和建议, 推动PFAI在心血管疾病管理中的应用。

关键词

冠状动脉周围脂肪组织, 冠状动脉计算机断层扫描血管造影, 脂肪衰减指数, 冠状动脉疾病

Recent Advances in Coronary Perivascular Fat Attenuation Index

Qingtian Zhu^{1,2}, Min Wang^{2*}

¹Clinical Medical School, Jining Medical University, Jining Shandong

²Department of Radiology, Jining No. 1 People's Hospital, Jining Shandong

Received: Mar. 14th, 2025; accepted: Apr. 7th, 2025; published: Apr. 16th, 2025

Abstract

The coronary perivascular fat attenuation index (FAI), a novel biomarker derived from coronary computed tomography angiography (CCTA), has garnered significant attention in cardiovascular

*通讯作者。

文章引用: 朱清坦, 王敏. 冠状动脉周围脂肪衰减指数最新研究进展[J]. 医学诊断, 2025, 15(2): 178-184.
DOI: 10.12677/md.2025.152024

medicine in recent years. FAI detects vascular inflammation by identifying attenuation gradients in pericoronary adipose tissue (PCAT), offering innovative insights for cardiovascular disease screening and risk stratification. This review delineates the definition, measurement methodologies, and clinical implications of FAI, with a focus on recent advancements in its correlation with coronary artery disease (CAD) and its prognostic value. Furthermore, we discuss emerging applications of FAI in clinical practice and highlight future research directions to optimize its integration into cardiovascular disease management.

Keywords

Pericoronary Adipose Tissue, Coronary Computed Tomography Angiography, Fat Attenuation Index, Coronary Artery Disease

Copyright © 2025 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

心血管疾病是严重威胁全世界人民健康的常见病、多发病。尽管一、二级预防治疗措施不断完善, 但我国心血管疾病的患病率及病死率仍在逐年增加[1]。CCTA 已成为冠状动脉疾病(CAD)研究中至关重要的一线影像学手段[2]。传统而言, CCTA 对 CAD 的诊断主要基于解剖学评估, 以此识别严重的管腔狭窄[3]。然而, 在接受 CCTA 检查的患者中, 仅不到 50%可观察到这种严重管腔狭窄的情况[4]。因此, 结合其它指标评估心血管疾病, 已成为预测主要不良心血管事件的重要策略。冠状动脉周围脂肪衰减指数(FAI)是一种从 CCTA 中提取的新型生物标志物, 用于通过识别心周脂肪组织(PCAT)的衰减梯度来检测血管炎症[5]。最近研究表明 CAD 是一种慢性炎症性疾病, 炎症在动脉粥样硬化中起关键作用, 这一影像学生物标志物得到了广泛关注[6]-[8]。多项研究证明 PFAI 与 MACE 事件显著相关。本文将对 PFAI 技术及临床潜在价值的最新研究动态予以综述。

2. 冠状动脉周围脂肪衰减指数的概念、测量方法及影响因素

2.1. 基本概念

冠状动脉周围脂肪组织(pericoronary adipose tissue, PCAT)指围绕冠状动脉的脂肪组织, 是心外膜脂肪组织的组成部分[9]。PCAT 可分泌多种生物活性分子, 与邻近的冠状动脉进行双向通讯, 调节局部冠状动脉炎症水平, 参与冠状动脉粥样硬化斑块的形成和发展[10]。尽管没有统一的方法来测量心周脂肪衰减, 但大多数研究采用了 Antonopoulos 等人在 2017 年描述并验证的技术[11], 脂肪组织定义为 CT 上衰减在-190 至-130 Hounsfield 单位(HU)之间的所有体素。炎症动脉的 PCAT 表现出形态学改变, 其特征是脂质含量低且组织中水脂比增加, 由于脂肪组织通常在 CT 上的衰减范围在-190 至-30 Hounsfield 单位(HU), 炎症冠状动脉周围脂肪 CT 值增高[12]。CT 上的 PCAT 衰减常用来表示 PCAT 密度, 但由于 PCAT 衰减测量值受多种因素影响, 存在一定误差, 由此衍生出冠状动脉周围脂肪衰减指数(fat attenuation index, FAI), 即校正和加权后的 PCAT 平均 CT 衰减, 该参数通过量化 PCAT 衰减梯度差值来评估冠状动脉周围炎症[10]。

2.2. 测量方法

在评估冠状动脉周围脂肪衰减指数(FAI)时, 根据测量位置的不同, 可将其分为血管水平和病变水平

两种分析方式,在血管水平分析中,为避免主动脉壁的干扰,通常选择右冠状动脉(RCA)近端 10~50 mm 区域的周围脂肪进行分析,而左回旋支(LCX)和左前降支(LAD)则采用近端 40 mm 的血管[13]。鉴于 RCA 近端的 FAI 与 LAD 和 LCX 近端的 FAI 密切相关,且 RCA 分支较少、周围脂肪组织丰富、测量较为方便,目前多数研究倾向于采用 RCA 周围的 FAI 进行分析[14]。对于病变部位的测量,通常测量病变所在的所有区域,但是由于病变范围不同,无法进行直接有效的对比,于是研究者固定采取以病变中心为参照,长度为 10 mm 范围进行测量,这种方法虽然统一了测量长度,但对于长度超过 10 mm 的病变,可能无法全面反映病变的真实情况[15]。冠状动脉周围 FAI 绝对值的测量受设备扫描条件、管电压、冠状动脉解剖因素等的影响,故需要对冠状动脉周围 FAI 进行标准化校正,不同厂家后处理软件应该应统一测量标准及测量参数,以实现结果的可比性。

2.3. 影响因素

冠状动脉周围脂肪衰减指数(FAI)的测量值受多种因素影响,包括 CT 扫描仪类型、扫描条件、重建算法、扫描参数及采集方案等[16]。例如,Etter 等[17]对 12 只离体猪心进行研究,分别采用 80、100、120 和 140 kVp 的管电压采集冠状动脉 CT 血管造影(CCTA)图像,并使用滤波反投影和迭代重建算法进行图像重建,研究发现,随着管电压的升高,FAI 值逐渐增加。这表明 FAI 的测量结果可能因扫描参数的不同而存在显著差异。此外,个体解剖差异、年龄、性别和肥胖等因素也会影响 FAI 的测量值[18][19]。例如,肥胖患者的脂肪组织成分和分布可能与非肥胖患者不同,从而影响 FAI 的测量结果。

3. 冠状动脉周围脂肪衰减指数的应用价值

3.1. 与心血管疾病的关联性

冠状动脉内皮的炎症反应是驱动斑块不稳定性及破裂的关键因素[20]。具体而言,炎症细胞在冠状动脉斑块内积聚,并与病变内皮细胞协同释放细胞因子,进而改变斑块的结构特征。这一过程导致富含脂质的坏死核心体积增大,同时纤维帽变薄,这种病理改变被称为“不良斑块重塑”。在此过程中,原本相对稳定的斑块(较少引发心肌梗死)逐渐转变为不稳定的易损斑块,其更易发生侵蚀或破裂,从而显著增加心肌梗死的风险[21]。尽管血管内超声(IVUS)和光学相干断层扫描(OCT)等冠状动脉内成像技术能够检测与斑块不稳定性相关的特征,但这些方法具有侵入性且难以广泛推广。因此,开发非侵入性的斑块不稳定性标志物一直是临床研究的重要方向。冠状动脉周围脂肪衰减指数(FAI)为此提供了潜在的解决方案。冠状动脉内皮和斑块的代谢活动会在邻近脂肪组织中留下可检测的代谢痕迹,导致斑块不稳定的炎症过程不仅会改变斑块的结构,还会通过旁分泌作用影响周围脂肪组织的成分,使其水含量增加、脂质含量减少,这种改变为非侵入性评估斑块不稳定性提供了新的视角,这些释放的炎症细胞因子促进脂肪组织内脂肪沉积的脂解并促进水储存[11]。Sagris 等学者于 2022 年发表的荟萃分析显示,FAI 升高与主要不良心血管事件(MACE)显著相关($HR = 3.29$; 95% CI: 1.88~5.76),且不稳定斑块的平均 FAI 显著高于稳定斑块(平均差异为 4.50; 95% CI: 1.10~7.89) [12]。迄今为止,规模最大的 FAI 预后价值评估队列研究于 2024 年发表,研究发现 FAI 与心脏死亡率及 MACE 事件密切相关,无论是否存在阻塞性冠状动脉疾病(CAD) [22]。这一发现尤为重要,因为尽管非阻塞性斑块可能引发急性冠脉综合征,但目前缺乏有效的风险评估工具。在同一研究中,结合 FAI、冠状动脉斑块特征及临床风险因素的人工智能算法显著改变了 45% 患者的管理建议,包括调整他汀类药物剂量以及使用其他治疗方案(如阿司匹林、Icosapent ethyl 和秋水仙碱) [22]。

3.2. 对心血管疾病预后评估的价值

多项研究发现,基于病变水平的冠状动脉周围脂肪衰减指数(FAI)能够有效预测冠状动脉支架置入术

后患者发生支架相关事件的风险。研究表明, 动脉粥样硬化斑块周围的冠状动脉周围脂肪组织(PCAT)平均 CT 密度显著升高, 与基于血管水平的 FAI 相比, 病变水平的 FAI 能够更精准地反映病变局部的炎症水平, 从而弥补血管水平 FAI 的不足[23]。例如, Nogić 等[24]纳入了 151 例接受冠状动脉 CT 血管造影(CCTA)检查并在 60 天内接受冠状动脉支架置入术的患者, 结果显示高水平的基线病变周围 FAI 与支架内狭窄 > 50%或支架内血栓形成显著相关($OR = 1.06, P = 0.035$)。此外, 其他研究也发现, 对于冠状动脉支架置入术后的患者, 支架周围的 FAI 对靶血管再次血运重建具有预测价值[25], 目前基于病变水平的 FAI 多用于预测冠状动脉支架置入术后患者的心血管不良事件, 对于未接受血运重建治疗的患者仍需更多的研究探索其预测作用。在一项大型前瞻性研究中, Oikonomou 等[5]发现, 右冠状动脉(RCA)近端的高 FAI 值与全因死亡率和心源性死亡率显著相关。该研究通过冠状动脉 CT 血管造影(CCTA)量化冠状动脉周围的脂肪衰减, 揭示了 FAI 作为冠状动脉炎症的影像学标志物的潜力。研究结果表明, FAI 值 ≥ -70.1 HU 的患者心源性死亡风险显著增加(派生队列 $HR = 9.04, P < 0.0001$; 验证队列 $HR = 5.62, P < 0.0001$), 全因死亡率也显著升高(派生队列 $HR = 2.55, P < 0.0001$; 验证队列 $HR = 3.69, P < 0.0001$)。该研究结果揭示了 FAI 在心血管风险评估中的独特价值。它不仅能精准识别残余炎症风险, 还能在心脏风险预测和患者分层方面提供显著优势, 从而突破了传统心血管风险评估方法的局限。但研究中报告的心脏死亡事件(如验证队列中仅 48 例)和总死亡事件相对较少, 可能影响亚组分析的统计效力, 尤其是在探索不同患者群体(如不同治疗组)的风险差异时。

3.3. 检测治疗价值的价值

冠状动脉周围脂肪衰减指数可作为潜在的影像学标志物, 用于识别冠状动脉炎症水平较高的个体。FAI 通过对血管周围炎症的评估, 可以检测及评估某些药物的治疗效果。在一项前瞻性队列研究中, Elnabawi 等[26]对 134 例中重度银屑病病患者进行了研究, 通过测量冠状动脉周围脂肪衰减指数(FAI), 研究团队发现, 接受生物治疗的患者在治疗后 FAI 值显著降低, 而未接受治疗的患者 FAI 值则无明显变化, 这一结果表明, FAI 不仅能有效反映冠状动脉炎症的动态变化, 还可作为评估抗炎治疗效果的潜在影像学标志物。此外, Elnabawi [26]等的研究进一步证实, FAI 值的变化与冠状动脉炎症的改善密切相关, 提示其在监测冠状动脉疾病干预措施的疗效方面具有重要价值。在一项前瞻性队列研究中, Ichikawa 等[27]纳入了 333 例接受冠状动脉 CT 血管造影(CCTA)检查的 2 型糖尿病(T2DM)患者, 研究结果显示, 高 LAD-FAI 值与心血管事件的发生显著相关, 并在降低 T2DM 患者心血管事件风险方面具有重要的预测价值。Dai 等[28]对 108 例疑似冠心病(CAD)患者进行了前瞻性研究, 这些患者在接受他汀类药物药物治疗前后均接受了冠状动脉周围脂肪衰减指数(FAI)的评估, 结果表明, 他汀类药物治疗后, 非钙化斑块和混合斑块周围的炎症反应显著减轻。FAI 的变动或许相较传统斑块特征呈现出更高的敏感性, 可更为迅速地体现冠状动脉粥样硬化疾病活动程度的改变, 进而为监测药物治疗成效提供了一个具备潜力的影像学标志物。

4. 冠状动脉周围脂肪衰减指数未来研究方向

近年来, 人工智能(artificial intelligence, AI)技术快速发展, 得益于其强大的图像后处理及信息整合能力, AI 正逐步应用于心血管 CT 成像的各个流程, 如图像采集与重建、感兴趣区自动识别与分割、病变定量及定性分析、预后判断等[29]。通过机器学习、影像组学和深度学习技术, 可以提升 FAI 分析的自动化程度和预测精度[30]。冠状动脉周围脂肪衰减指数结合临床及其它影像学技术及参数构建的模型, 能明显提升心血管不良事件的预测能力及指导临床管理。结合冠状动脉周围脂肪衰减指数(FAI)、冠状动脉斑块特征以及传统临床风险因素的人工智能算法, 已被证实能够显著优化心血管疾病患者的管理策略[22], 在一项前瞻性研究中, 对 744 名患者进行评估后, 临床护理团队根据该算法的分类结果调整了 45%患者

的管理建议。这种调整不仅包括药物治疗方案的优化(如他汀类药物剂量的调整),还涉及对高危患者更积极的干预措施(如生活方式干预或进一步的诊断检查)。多项研究已将冠状动脉周围脂肪衰减指数(FAI)与通过侵入性血流储备分数(FFR)测量的冠状动脉血流动力学联系起来,结果表明 FAI 可能有助于非侵入性地评估病变的血流动力学意义[31]。Yu 等[32]的研究发现,有创 FFR ≤ 0.80 的病变组 FAI 值显著高于 FFR > 0.80 的病变组,提示 FAI 可能是反映冠状动脉狭窄血流动力学变化的新指标。此外,另一项研究[33]也显示,FAI 与冠状动脉血流动力学显著相关,且联合 FAI 与直径狭窄程度(DS)可有效提高对病变特异性缺血的诊断效能,但研究仅评估了左前降支(LAD)和左回旋支(LCX)近端 40 毫米、右冠状动脉(RCA)近端 10~50 毫米的范围,未涵盖远端血管或斑块局部区域。全局评估与斑块特异性局部评估的临床价值差异仍需进一步探讨。这些研究结果表明,FAI 不仅与冠状动脉狭窄程度相关,还为临床诊断和治疗决策提供了新的依据。

5. 冠状动脉周围脂肪衰减指数面临的技术挑战

冠状动脉周围脂肪衰减指数(FAI)的临床应用面临着一系列技术挑战,这些因素限制了其有效性和准确性。首先,目前不同 CT 设备制造商采用的成像协议(如管电压、层厚、重建算法)对脂肪衰减的定量影响尚未完全阐明。这种研究空白导致了测量结果的显著变异性,可能引发不一致或不准确的测量值。目前,越来越多的研究开始关注非对比增强 CT 扫描中 PFAI 的评估,相关研究正在进行中,以确定其准确性和临床应用潜力[34]。其次,当前大多数评估 PFAI 的解决方案仅限于测量每个血管近端 40 毫米范围内的脂肪衰减。这一限制意味着测量结果可能无法全面反映整个血管段的脂肪分布特征,从而影响整体评估的准确性。PFAI 测量的精度高度依赖于血管周围是否存在显著的脂肪组织,而这一条件在不同患者之间存在显著差异。此外,药物治疗对 PFAI 的影响仍在研究中。目前尚未明确重复测量的最佳时机,以准确评估治疗引起的动态变化。这种不确定性对 PFAI 的有效监测和管理提出了挑战,因为它直接影响临床决策和患者的治疗结果。目前采用 -190 HU 至 -30 HU 作为脂肪阈值,但此范围是否适用于所有人群(如肥胖患者或合并代谢疾病者)仍需验证。目前研究多关注近端冠状动脉(如左前降支近端 40 毫米),但远端血管或斑块周围局部 FAI 的临床意义尚未明确,全局与局部测量的选择缺乏共识。依赖半自动化软件可能导致操作者间差异,需开发全自动算法以提高可重复性。

6. 小结

冠状动脉周围脂肪衰减指数是冠状动脉炎症的新型标志物,具有许多潜在应用,从预测动脉粥样硬化斑块的发展或破裂,到监测炎症性疾病的治疗反应。然而,在确定该标志物的临床益处之前,还需要更多的前瞻性研究以及在研究设计、方法学和临床验证等方面进行深入探索。通过多中心合作和跨学科研究,将推动 FAI 在心血管领域的进一步发展,为改善心血管疾病的预防和治疗提供全新的视角和工具。我们期待在未来的研究中,能够更全面、深入地揭示冠状动脉周围脂肪衰减指数的潜力,从而为患者带来更好的健康管理方案。

参考文献

- [1] 国家心血管病中心,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 2023 概要[J].中国循环杂志,2024,39(7): 625-660.
- [2] The DISCHARGE Trial Group (2022) CT or Invasive Coronary Angiography in Stable Chest Pain. *New England Journal of Medicine*, **386**, 1591-1602. <https://doi.org/10.1056/nejmoa2200963>
- [3] Lee, S., Sung, J.M., Andreini, D., Al-Mallah, M.H., Budoff, M.J., Cademartiri, F., et al. (2020) Differences in Progression to Obstructive Lesions per High-Risk Plaque Features and Plaque Volumes with CCTA. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **13**, 1409-1417. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2019.09.011>

- [4] Douglas, P.S., Hoffmann, U., Patel, M.R., Mark, D.B., Al-Khalidi, H.R., Cavanaugh, B., *et al.* (2015) Outcomes of Anatomical versus Functional Testing for Coronary Artery Disease. *New England Journal of Medicine*, **372**, 1291-1300. <https://doi.org/10.1056/nejmoa1415516>
- [5] 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)
- [6] Ross, R. (1999) Atherosclerosis—An Inflammatory Disease. *New England Journal of Medicine*, **340**, 115-126. <https://doi.org/10.1056/nejm199901143400207>
- [7] Mazurek, T., Zhang, L., Zalewski, A., Mannion, J.D., Diehl, J.T., Arafat, H., *et al.* (2003) Human Epicardial Adipose Tissue Is a Source of Inflammatory Mediators. *Circulation*, **108**, 2460-2466. <https://doi.org/10.1161/01.cir.0000099542.57313.c5>
- [8] Mancio, J., Oikonomou, E.K. and Antoniades, C. (2018) Perivascular Adipose Tissue and Coronary Atherosclerosis. *Heart*, **104**, 1654-1662. <https://doi.org/10.1136/heartjnl-2017-312324>
- [9] Antoniades, C., Antonopoulos, A.S. and Deanfield, J. (2019) Imaging Residual Inflammatory Cardiovascular Risk. *European Heart Journal*, **41**, 748-758. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz474>
- [10] Antoniades, 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>
- [11] 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**, Article No. 2658. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aal2658>
- [12] Sagris, M., Antonopoulos, A.S., Simantiris, S., Oikonomou, E., Siasos, G., Tsioufs, K., *et al.* (2022) Pericoronary Fat Attenuation Index—A New Imaging Biomarker and Its Diagnostic and Prognostic Utility: A Systematic Review and Meta-Analysis. *European Heart Journal—Cardiovascular Imaging*, **23**, e526-e536.
- [13] Lin, A., Nerlekar, N., Yuvaraj, J., *et al.* (2021) Pericoronary Adipose Tissue Computed Tomography Attenuation Distinguishes Different Stages of Coronary Artery Disease: A Cross-Sectional Study. *European Heart Journal - Cardiovascular Imaging*, **22**, 298-306. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jeaa224>
- [14] Yu, Y.N., Liu, Y.Q. and Chen, Y.D. (2021) Research Progress of Perivascular Adipose Tissue and Vascular Inflammation in Coronary Heart Disease. *Chin J Cardiovasc Med*, **26**, 294-298.
- [15] Ma, R., van Assen, M., Ties, D., Pelgrim, G.J., van Dijk, R., Sidorenkov, G., *et al.* (2021) Focal Pericoronary Adipose Tissue Attenuation Is Related to Plaque Presence, Plaque Type, and Stenosis Severity in Coronary CTA. *European Radiology*, **31**, 7251-7261. <https://doi.org/10.1007/s00330-021-07882-1>
- [16] Oikonomou, E.K., Siddique, M. and Antoniades, C. (2020) Artificial Intelligence in Medical Imaging: A Radiomic Guide to Precision Phenotyping of Cardiovascular Disease. *Cardiovascular Research*, **116**, 2040-2054. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvaa021>
- [17] Etter, D., Warnock, G., Koszarski, F., Niemann, T., Mikail, N., Bengs, S., *et al.* (2022) Towards Universal Comparability of Pericoronary Adipose Tissue Attenuation: A Coronary Computed Tomography Angiography Phantom Study. *European Radiology*, **33**, 2324-2330. <https://doi.org/10.1007/s00330-022-09274-5>
- [18] van Rosendaal, S.E., Kuneman, J.H., van den Hoogen, I.J., Kitslaar, P.H., van Rosendaal, A.R., van der Bijl, P., *et al.* (2022) Vessel and Sex Differences in Pericoronary Adipose Tissue Attenuation Obtained with Coronary CT in Individuals without Coronary Atherosclerosis. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*, **38**, 2781-2789. <https://doi.org/10.1007/s10554-022-02716-7>
- [19] Goeller, M., Achenbach, S., Cadet, S., Kwan, A.C., Commandeur, F., Slomka, P.J., *et al.* (2018) Pericoronary Adipose Tissue Computed Tomography Attenuation and High-Risk Plaque Characteristics in Acute Coronary Syndrome Compared with Stable Coronary Artery Disease. *JAMA Cardiology*, **3**, Article No. 858. <https://doi.org/10.1001/jamacardio.2018.1997>
- [20] Wang, K., Balmforth, C., Meah, M.N., Daghem, M., Moss, A.J., Tzolos, E., *et al.* (2024) Coronary Atherosclerotic Plaque Activity and Risk of Myocardial Infarction. *Journal of the American College of Cardiology*, **83**, 2135-2144. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2024.03.419>
- [21] Maurovich-Horvat, P., Ferencik, M., Voros, S., Merkely, B. and Hoffmann, U. (2014) Comprehensive Plaque Assessment by Coronary CT Angiography. *Nature Reviews Cardiology*, **11**, 390-402. <https://doi.org/10.1038/nrcardio.2014.60>
- [22] Chan, K., Wahome, E., Tsiachristas, A., Antonopoulos, A.S., Patel, P., Lyasheva, M., *et al.* (2024) Inflammatory Risk and Cardiovascular Events in Patients without Obstructive Coronary Artery Disease: The ORFAN Multicentre, Longitudinal

- Cohort Study. *The Lancet*, **403**, 2606-2618. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(24\)00596-8](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(24)00596-8)
- [23] Zhang, W., Li, P., Chen, X., He, L., Zhang, Q. and Yu, J. (2023) The Association of Coronary Fat Attenuation Index Quantified by Automated Software on Coronary Computed Tomography Angiography with Adverse Events in Patients with Less than Moderate Coronary Artery Stenosis. *Diagnostics*, **13**, Article No. 2136. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13132136>
- [24] Nagic, J., Kim, J., Layland, J., Cheng, K., Dey, D., Wong, D.T., *et al.* (2023) Peri-Coronary Adipose Tissue Is a Predictor of Stent Failure in Patients Undergoing Percutaneous Coronary Intervention. *Cardiovascular Revascularization Medicine*, **53**, 61-66. <https://doi.org/10.1016/j.carrev.2023.02.022>
- [25] Lu, Z., Yin, W., Schoepf, U.J., Abrol, S., Ma, J., Zhao, L., *et al.* (2024) Prediction Value of Pericoronary Fat Attenuation Index for Coronary In-Stent Restenosis. *European Radiology*, **34**, 4950-4959. <https://doi.org/10.1007/s00330-023-10527-0>
- [26] Elnabawi, Y.A., Oikonomou, E.K., Dey, A.K., Mancio, J., Rodante, J.A., Aksentijevich, M., *et al.* (2019) Association of Biologic Therapy with Coronary Inflammation in Patients with Psoriasis as Assessed by Perivascular Fat Attenuation Index. *JAMA Cardiology*, **4**, Article No. 885. <https://doi.org/10.1001/jamacardio.2019.2589>
- [27] Ichikawa, K., Miyoshi, T., Osawa, K., Nakashima, M., Miki, T., Nishihara, T., *et al.* (2022) High Pericoronary Adipose Tissue Attenuation on Computed Tomography Angiography Predicts Cardiovascular Events in Patients with Type 2 Diabetes Mellitus: Post-Hoc Analysis from a Prospective Cohort Study. *Cardiovascular Diabetology*, **21**, Article No. 44. <https://doi.org/10.1186/s12933-022-01478-9>
- [28] Dai, X., Yu, L., Lu, Z., Shen, C., Tao, X. and Zhang, J. (2020) Serial Change of Perivascular Fat Attenuation Index after Statin Treatment: Insights from a Coronary CT Angiography Follow-Up Study. *International Journal of Cardiology*, **319**, 144-149. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2020.06.008>
- [29] Xu, P., Liu, T., Zhou, F., Chen, Q., Rowe, J., Tesche, C., *et al.* (2024) Artificial Intelligence in Coronary Computed Tomography Angiography. *Medicine Plus*, **1**, Article ID: 100001. <https://doi.org/10.1016/j.medp.2023.100001>
- [30] 肖华伟, 王相权, 杨盼峰, 等. 深度学习图像重建算法对冠状动脉周围脂肪组织评估的影响[J]. 中华放射学杂志, 2025, 59(1): 91-94.
- [31] Hoshino, M., Yang, S., Sugiyama, T., Zhang, J., Kanaji, Y., Yamaguchi, M., *et al.* (2020) Peri-Coronary Inflammation Is Associated with Findings on Coronary Computed Tomography Angiography and Fractional Flow Reserve. *Journal of Cardiovascular Computed Tomography*, **14**, 483-489. <https://doi.org/10.1016/j.jcct.2020.02.002>
- [32] Yu, M., Dai, X., Deng, J., Lu, Z., Shen, C. and Zhang, J. (2019) Diagnostic Performance of Perivascular Fat Attenuation Index to Predict Hemodynamic Significance of Coronary Stenosis: A Preliminary Coronary Computed Tomography Angiography Study. *European Radiology*, **30**, 673-681. <https://doi.org/10.1007/s00330-019-06400-8>
- [33] Wen, D., Li, J., Ren, J., Zhao, H., Li, J. and Zheng, M. (2021) Pericoronary Adipose Tissue CT Attenuation and Volume: Diagnostic Performance for Hemodynamically Significant Stenosis in Patients with Suspected Coronary Artery Disease. *European Journal of Radiology*, **140**, Article ID: 109740. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2021.109740>
- [34] Nayfeh, M., Ahmed, A.I., Alahdab, F., Al Rifai, M. and Al-Mallah, M. (2023) No Contrast? No Problem! Value in Assessing Pericoronary Fat in Non-Contrast Studies. *Atherosclerosis*, **370**, 3-4. <https://doi.org/10.1016/j.atherosclerosis.2023.03.002>