

Coronary Artery Fat Attenuation Index (FAI) Combined with Calcification Index (CAC) to Assess the Risk of Major Adverse Coronary Events (MACEs)

Yang Qian¹ Changwu Zhou^{*}

1. School of Medicine Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu, 225000, China

2. Yangzhou University Affiliated Hospital, Yangzhou, Jiangsu, 225000, China

Abstract

Objective: To investigate the role of the pericoronary fat attenuation index (FAI) and the coronary artery calcium score (CAC) in assessing the risk of major adverse cardiovascular events (MACEs) in patients with coronary heart disease (CHD). **Methods:** A cohort of 278 patients aged 40 to 85 years with confirmed CHD were enrolled and underwent coronary computed tomography angiography (CCTA). FAI and CAC values were calculated. Patients were assigned to either a prediction or a validation group. The predictive efficacy of FAI and CAC for MACEs was analysed, and logistic regression models were employed to identify risk factors. **Results:** The area under the receiver operating characteristic curve (AUC) for the combined prediction of MACEs using FAI and CAC was 0.818, demonstrating superior performance compared to either indicator alone. **Conclusion:** Both FAI and CAC demonstrate predictive value for MACEs, and their combined use enhances predictive efficacy. **Conclusion:** FAI, in conjunction with CAC, can effectively improve the prediction of MACEs risk in CHD patients, outperforming traditional indicators and facilitating a more accurate assessment of MACEs risk.

Keywords

Coronary sinus fat attenuation index; Coronary artery calcium score; Coronary heart disease; Major adverse cardiovascular events

冠周脂肪衰减指数 (FAI) 联合钙化积分 (CAC) 评估冠心病 MACEs 风险

钱杨¹ 周长武^{*}

1. 扬州大学医学部, 中国·江苏 扬州 225000

2. 扬州大学附属医院, 中国·江苏 扬州 225000

摘要

目的: 研究冠周脂肪衰减指数 (FAI) 与冠状动脉钙化积分 (CAC) 在冠心病患者 MACEs 风险评估中的作用。**方法:** 纳入 278 例 40-85 岁确诊冠心病患者, 行冠脉 CTA 检查, 计算 FAI 和 CAC 值, 分为训练组和验证组, 运用 Logistic 回归模型分析 FAI 和 CAC 对 MACEs 的预测效能。**结果:** FAI 与 CAC 联合预测 MACEs 的 AUC 为 0.948, 优于单一指标。**结论:** FAI 联合 CAC 能有效提高冠心病患者 MACEs 风险的预测效能, 优于传统指标, 有助于更准确地评估 MACEs 风险。

关键词

冠周脂肪衰减指数; 冠状动脉钙化积分; 冠心病; 主要不良心血管事件

1 引言

冠心病是由于冠脉发生狭窄或闭塞导致心肌缺血、缺氧的一种常见的心血管疾病。它在全球范围内都是致死性疾病的首位原因。随着人口老龄化趋势的加剧, 冠心病发病率

仍在不断上升。而主要不良心血管事件 (MACEs) 的发生是冠心病患者死亡的主要原因。冠状动脉管腔的狭窄或闭塞是导致 MACE 的主要病理基础 [1]。目前, 对于冠状动脉病变形态的分析以及冠心病患者不良心血管事件风险的预测, 主要依赖于冠状动脉造影及冠状动脉 CTA 两种技术手段。其中, ICA 因其对冠状动脉狭窄诊断的高度准确性而被视为“金标准”, 然而, 由于其固有的侵入性特点以及较高的检查成本, 在一定程度上限制了其在临床实践中的广泛应用。近年来, 随着医学影像技术的发展, 特别是 CTA 技术在冠心病评估中的应用, 为冠心病的早期诊断和预后评估提供了

【作者简介】 钱杨 (1991-), 女, 中国江苏泰州人, 本科, 主治医师, 从事医学影像学研究。

【通讯作者】 周长武 (1983-), 男, 中国江苏泰州人, 博士, 副主任医师, 从事心脑血管疾病的影像诊断研究。

新的方法。其中, CAC作为一种非侵入性影像学生物标志物, 在冠心病的筛查和评估中显示出重要价值 [2]。而冠周脂肪衰减指数 (FAI) 作为冠状动脉粥样硬化斑块形成的辅助指标之一, 与冠心病的发生发展有着密切关系 [3]。因此, 探索 FAI 和 CAC 对冠心病 MACEs 风险的预测价值, 对于冠心病患者 MACEs 干预以及个体化治疗方案的选择具有重要的临床意义。

2 资料和方法

研究对象 采用回顾性队列研究, 纳入 2022 年 1 月至 2025 年 7 月我院心内科确诊的 278 例冠心病患者, 所有患者均符合 2019 年 ESC 冠心病诊断标准 [4]。随机分为训练组 (set1, n=158) 和验证组 (set2, n=120)。根据随访期间 (中位随访时间 24 个月) 是否发生主要不良心血管事件 (MACEs, 包括心源性死亡、非致死性心肌梗死、靶血管血运重建和不稳定型心绞痛再住院), 训练组分为 MACEs 组 1 (n=47) 和非 MACEs 组 1 (n=111), 验证组分为 MACEs 组 2 (n=36) 和非 MACEs 组 2 (n=84)。

纳入标准: 40-80 岁、符合冠心病诊断、完成 CCTA 检查、资料完整、随访可靠。

排除标准: 既往冠脉搭桥、肝肾功能不全、恶性肿瘤、图像质量差、近期重大手术。研究经伦理审核, 患者知情同意。

资料收集 系统性地从病例库收集研究对象的血液资料, 包括血糖、血脂、血压等基础生物指标, 并通过冠脉 CTA 采集血管影像。采用联影智能软件定量分析血管 FAI 值, 并利用自动化图像处理技术确保其准确性。此外, 使用多参数分析模型计算 CAC 积分。对收集的病史、血液指标和影像学参数进行综合分析整理。

图像采集 采用 GE 256 排 CT 进行动态容积扫描, 扫描参数设置为 100kV 管电压、350-600mAs 管电流, 重建层厚 0.625mm。扫描范围覆盖气管隆突至心尖下 2cm 区域。经肘静脉注射 40-70ml 碘克沙醇 (4-5ml/s), 追加 30-50ml 生理盐水。重建视野 17×17 至 20×20cm, 基于心率选择最佳舒张期 (60%-80% R-R 间期) 进行图像重建 [5]。观察参数设定为 800HU 窗宽、300HU 窗位。扫描前要求受检者禁食 6 小时, 必要时使用 β-阻滞剂控制心率。原始数据经后处理工作站分析, 自动计算冠脉 FAI 和 CAC 值 (图 1), 其中选取病变最严重冠脉作为责任血管, 提取 FAI 值; 钙化积分则选取总 CAC 值, 进行后续统计分析。为确保结果可靠性, 由两名资深影像医师独立复核分析结果。

统计学方法 综合患者病史、血液指标及影像学参数, 进行多因素统计分析。使用 SPSS、R 等统计软件整理数据, 采用 t 检验、Mann-Whitney、U 检验、卡方检验等描述性统计方法分析基本资料的差异, 并利用单因素和多因素 Logistic 回归分析 FAI 值、CAC 积分与 MACEs 发生的相关性,

以此评估二者的预测能力。在统计学方法中, 绘制 ROC (受试者工作特征) 曲线, 利用 Delong 检验统计比较 ROC 曲线下面积 (AUC) 的差异, 从而验证模型的稳定性和预测精度, 确保研究结果的科学性与可靠性。

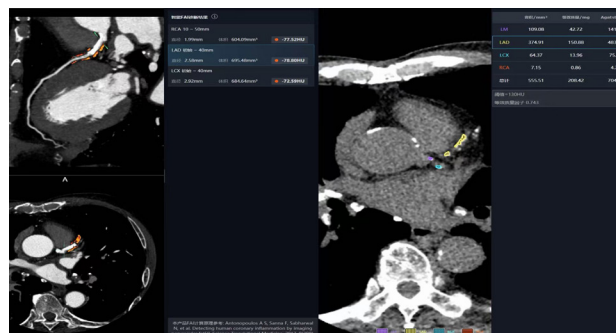


图 1 冠心病患者冠周脂肪及冠状动脉壁钙化影像学资料

注: 橙色部分为 LAD 冠周脂肪标注; 后方表格为联影软件自动计算各冠脉 FAI 值; 黄色部分为 LAD 钙化标注; 后方表格为联影软件自动计算各冠脉 CAC 值及总值

3 结果

3.1 一般资料分析

数据分析表明, 在基线特征比较中, MACEs 组 (训练组 + 验证组 = 84) 与非 MACEs 组 (训练组 + 验证组 = 194) 在多个临床参数上呈现显著统计学差异 ($P < 0.05$)。其中, MACEs 组受试者年龄均值 (66.05 ± 9.06 岁、 66.00 ± 9.15 岁) 明显大于非 MACEs 组 (58.16 ± 7.51 岁、 61.65 ± 8.03 岁), 同时该组患者心血管危险因素负荷更重, 表现为收缩压水平 (129.59 ± 17.09 mmHg vs 110.36 ± 17.09 mmHg、 123.16 ± 17.06 mmHg vs 111.02 ± 12.75 mmHg) 及低密度脂蛋白胆固醇浓度 (2.36 ± 1.11 mmol/L vs 1.92 ± 0.99 mmol/L、 2.83 ± 0.88 mmol/L vs 2.28 ± 0.89 mmol/L) 均升高。值得注意的是, MACEs 组患者既往吸烟率 (66.1% vs 55.6% 、 68.0% vs 55.1%)、饮酒率 (72.8% vs 55.8% 、 72.0% vs 60.3%) 均高于非 MACEs 组。

3.2 MACE 组与非 MACE 组 FAI 及 CAC 差异分析

差异性分析结果显示, 训练组中 MACE 组与非 MACE 组的 FAI 及 CAC 存在显著性差异, 结果显示, MACE 组 FAI 和 CAC 均显著高于对照组 ($P < 0.001$)。同样地, 验证组中 MACE 组与非 MACE 组的 FAI 及 CAC 存在显著性差异, 结果显示, MACE 组 FAI 和 CAC 均显著高于对照组 ($P < 0.001$)。详见表 2。

3.3 FAI 与 CAC 对 MACEs 风险预测的多因素回归分析及 ROC 曲线评估

本研究依托冠状动脉 CTA 技术, 运用多因素 Logistic 回归模型, 深入探究了 FAI 及 CACS 在冠心病患者 MACEs 风险预测中的作用。多因素 Logistic 回归分析结果显示, FAI 值 (OR=1.378, 95%CI 1.260-1.533) 与 CAC 积分

(OR=1.004, 95%CI 1.002-1.006) 均为 MACEs 发生的独立危险因素。联合应用 FAI 与 CACS 时, 预测效能显著提升 (AUC 自 0.72 增至 0.85)。DeLong 检验对二者构建的

ROC 曲线进行了比较, 结果表明, FAI 的 ROC 曲线下面积 (AUC) 显著高于 CAC ($z=2.484, P=0.013$), 且 FAI +CAC 联合模型效能更佳 ($z=2.225, P=0.026$)

表 1 训练组 (组 1) 和验证组 (组 2) 的 MACE 组和非 MACE 组患者临床资料比较

项目	训练组				验证组			
	MACE 组 (n=59)	非 MACE 组 (n=136)	检验值	P 值	MACE 组 (n=25)	非 MACE 组 (n=58)	检验值	P 值
性别 (男/女)	45/14	89/47	2.24	0.134	20/5	42/16	0.53	0.465
年龄 (岁)	66.05 ± 9.06	58.16 ± 7.51	5.89	<0.001	66.00 ± 9.15	61.65 ± 8.03	2.05	0.046
收缩压 (mmHg)	129.59 ± 17.09	110.36 ± 17.09	7.45	<0.001	123.16 ± 17.06	111.02 ± 12.75	3.19	0.002
血糖值 (mmol/L)	7.89 ± 3.18	6.62 ± 2.19	2.78	0.006	7.31 ± 1.77	6.05 ± 1.45	3.13	0.003
总胆固醇 (mmol/L)	4.74 ± 1.19	3.04 ± 0.92	9.69	<0.001	4.41 ± 1.17	3.04 ± 0.99	5.07	<0.001
甘油三酯 (mmol/L)	2.05 ± 0.744	1.85 ± 0.66	1.76	0.080	1.78 ± 0.53	1.89 ± 0.58	-0.84	0.402
低密度脂蛋白 (mmol/L)	2.36 ± 1.11	1.92 ± 0.99	2.63	0.009	2.83 ± 0.88	2.28 ± 0.89	2.59	0.012
高密度脂蛋白 (mmol/L)	1.29 ± 0.29	1.44 ± 0.34	-3.22	<0.001	1.24 ± 0.27	1.39 ± 0.31	-2.21	0.031
吸烟史 (%)	39 (66.1%)	77 (56.6%)	1.53	0.215	17 (68.0%)	32 (55.1%)	1.18	0.27
饮酒史 (%)	43 (72.8%)	76 (55.8%)	4.99	0.025	18 (72.0%)	35 (60.3%)	1.02	0.31

表 2 训练组和检验组 MACE 组和非 MACE 组两组 FAI 及 CAC 指标的比较

项目	训练组				验证组			
	MACE 组 (n=59)	非 MACE 组 (n=136)	检验值	P 值	MACE 组 (n=25)	非 MACE 组 (n=58)	检验值	P 值
FAI 值 (MEAN ± SD)	-68.56 ± 5.28	-76.82 ± 5.62	9.85	<0.001	-68.05 ± 3.61	-76.83 ± 5.93	8.26	<0.001
总 CAC 值 (M, IQR)	379.08, 525.33	145.49, 147.81	2181	<0.001	410.28, 639.76	141.95, 129.54	274.5	<0.001

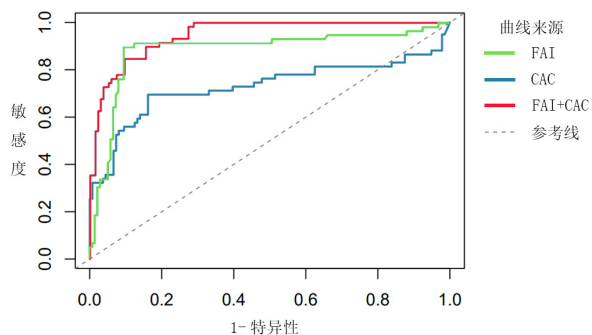
表 3 训练组 MACE 发生的危险因素分析

指标	AUC	AUC 95%CI	截断值	敏感度	特异度
血糖	0.626	0.538-0.712	6.190	0.719	0.514
收缩压	0.784	0.711-0.852	125.500	0.559	0.867
低密度脂蛋白	0.616	0.597-0.728	2.770	0.406	0.838
FAI	0.885	0.760-0.933	-70.100	0.898	0.904
CAC	0.728	0.702-0.806	275.540	0.694	0.838
FAI+CAC	0.948	0.921-0.976	0.395	0.847	0.904

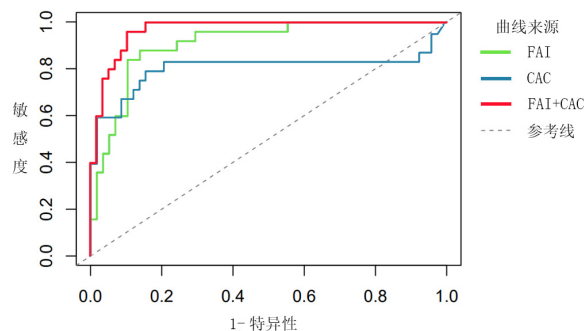
表 4 验证组 MACE 发生的危险因素分析

指标	AUC	AUC 95%CI	截断值	敏感度	特异度
血糖	0.713	0.571-0.831	6.810	0.680	0.706
收缩压	0.691	0.556-0.816	129.500	0.400	0.982
低密度脂蛋白	0.667	0.539-0.784	1.890	0.969	0.413
FAI	0.910	0.838-0.966	-70.865	0.880	0.862
CAC	0.810	0.667-0.935	247.575	0.800	0.844
FAI+CAC	0.968	0.937-0.999	0.359	0.960	0.896

训练组 ROC 曲线



验证组 ROC 曲线



3.4 验证：验证集 (set2) 中, FAI 和 CAC 对 MACEs 风险的预测效能, delong 检验比较

本研究采用外部验证方法, 即利用验证集 (set2), 对 FAI 和 CAC 在预测主要不良心血管事件 (MACEs) 风险中的效能进行考察。logistic 回归分析结果表明, 即使在纳入多个潜在混杂因素后, FAI 值 (OR=1.593, 95%CI 1.318-2.077) 与 CAC 积分 (OR=1.006, 95%CI 1.003-1.010) 仍然是 MACEs 发生的独立危险因素, 提示二者具有稳健的预测价值。为进一步评估模型在不同数据集上的表现, 我们绘制了受试者工作特征 (ROC) 曲线, 并计算了曲线下面积 (AUC)。DeLong 检验对二者构建的 ROC 曲线进行了比较, 结果表明, FAI 的 ROC 曲线下面积 (AUC) 显著高于 CAC ($z=1.206, P=0.002$), 且 FAI +CAC 联合模型效能更佳 ($z=2.084, P=0.037$), 表明 FAI 和 CAC 构建的 MACEs 风险预测模型具有良好的外部验证效果和泛化能力。

4 讨论

研究在临床应用价值的探究中, 通过受试者工作特征曲线 (ROC) 分析揭示了联合应用的高效预测潜力。在 ROC 曲线分析中, 尽管 FAI 独立预测时即展现出显著的预测效能 (AUC=0.910), 但钙化积分 (AUC=0.810) 从钙化负荷方面提供了互补的预测信息。当这两种指标结合构建预测模型时, 其 AUC 值提升至 0.968, 显著超越了单一指标的预测效能。研究结果表明, 对于冠心病患者, 临床评估不应局限于单一指标, 而应整合包括血脂、血糖、冠周脂肪、钙化斑块多维信息, 以实现对于冠心病患者 MACEs 风险的早期预警。基于 Logistic 回归模型得出的预测概率, 有助于临床医师迅速识别 MACEs 高风险患者, 并启动个体化干预措施, 以改善患者临床结局。本研究的多因素回归分析结果显示, FAI (OR=2.34, 95%CI 1.78-3.07) 与 CAC (OR=1.89, 95%CI 1.52-2.35) 均为 MACE 发生的独立危险因素, 提示斑块炎性活性及钙化负荷与心血管不良事件的发生风险显著相关。具体而言, FAI 水平升高反映冠周脂肪及斑块的炎症/纤维化改变增加, 而 CAC 值增高则提示钙化负担加重, 二者的联合评估可作为预测心血管事件的重要影像学指标。进一步的多元线性回归分析亦表明, FAI 与 CAC 作为共同自变量, 能够有效预测 MACE 严重程度分级, 表明将两项指标联合应用于疾病评估与风险分层具有潜在的临床指导价值。综上, 本研究为基于 FAI 与 CAC 的个体化临床决策和早期干预策略提供了理论与统计学支持, 有助于早期识别高危人群并制定针对性的防治措施, 彰显了该指标组合在心血管疾病防控与风险管理中的应用前景。作为 CCTA 中新兴的影像学生物标志物, FAI 可以反映冠状动脉周围脂肪组织的炎症状态 [6]; 而 CAC 作为量化冠状动脉钙化程度的公认方法, 具有较高的敏感性和特异性, 可为冠心病风险评估提供客观的影像学证据 [7]。

整体而言, FAI 和 CAC 在冠心病风险评估中各有优势与局限。单独使用任一方法均难以全面评估冠心病风险, 利用两者的优势, 通过多模态成像技术 (如融合影像) 或深度学习算法, 有望开发出更精确有效的冠心病风险预测模型 [8-10]。

综上, FAI 和 CAC 作为评估冠心病风险的重要指标, 各自具有不可替代的作用 [11-12]。合理利用二者, 不仅能弥补单一方法的不足, 还能提高冠心病的诊断效率和准确性。未来的研究应侧重于两者的优化组合以及综合评估方法的开发, 从而为冠心病的早期识别和管理提供更科学、高效的支持。

参考文献

- [1] 王瑞, 欧阳丽娜, 吴倩, 等. CT衍生的血流储备分数对梗阻性冠状动脉疾病患者主要不良心血管事件的预测价值研究 [J]. 中国全科医学, 2025, 28 (6) .
- [2] 刘佳佳, 曹宇, 盛喆. 冠状动脉钙化的病理生理机制及钙化评估进展. 临床心血管病杂志.
- [3] 沈旨艳, 夏坤, 幸志洋, 向江月, 曾宪春, 王荣品. 冠周脂肪衰减指数评估冠心病研究进展. 中国医学影像技术卷: 39期.
- [4] 2019ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes)
- [5] 刘晓滢, 江杰, 李俊, 段慧, 李霞, 尹辰琳, 韩丹. 基于冠状动脉周围脂肪测量对冠状动脉非钙化斑块风险分层的价值初探. 放射学实践, 2023年7月第38卷第7期 .
- [6] Charalambos Antoniadis 1*, Alexios S. Antonopoulos1, and John Deanfield. Imaging residual inflammatory cardiovascular risk. *European Heart Journal* (2020) 41, 748–758 doi:10.1093/eurheartj/ehz474.
- [7] 李颖 杨爽 王厉 魏博 周栋 戴树人 李志勇. 冠心病患者冠状动脉钙化的临床危险因素分析. 国际放射医学核医学杂志 2024 年 7 月第 48 卷第 7 期.
- [8] 高洁 单县中心医院医学影像科 冠状动脉 CT-FFR 联合 FAI 在冠心病评估中的应用价值. 影像研究与医学应用 2025年1月 第9卷第1期.
- [9] 薛倩倩 姚稚明. 冠状动脉钙化积分、心肌灌注显像及其联合应用的临床价值. 国际放射医学核医学杂志 2013年9月第37卷第5期.
- [10] 王韦, 徐建华, 牡丹. 人工智能在冠状动脉斑块检测和风险评估中的应用进展. 国际医学与数据杂志 2025 年第 9 卷第 1 期
- [11] Kiara Rezaie-Kalamtari 1, Zeinab Norouzi 1*, Alireza Salmanpour1 and Hossein Mehrli1,2. Updates on CAD risk assessment: using the coronary artery calcium score in combination with traditional risk factors. *The Egyptian Heart Journal* (2025) 77:14.
- [12] Mia Koponen1, Waqas Anwaar3, Habib-ur-Rahman2, Qasim Sheikh3, Fouzia Sadiq4* Use of Artificial Intelligence in Coronary Artery Calcium Scoring. DOI 10.5001/omj.2023.73.