

· 心血管影像学 ·

冠状动脉周围脂肪衰减指数联合斑块特征预测稳定型心绞痛进展风险

祝婷婷,管汉雄,李茜,李德福

【摘要】目的:探讨冠状动脉周围脂肪衰减指数(FAI)联合斑块特征在预测稳定型心绞痛发生重大不良心脏事件(MACE)风险中的应用价值。**方法:**回顾性分析 2020 年 1 月—2022 年 12 月在本院首次确诊的 274 例稳定型心绞痛患者的冠状动脉 CTA 资料。分析冠状动脉三大主支(右冠状动脉、左前降支和左旋支)近段的管腔狭窄程度和斑块特征(包括每支血管斑块内的脂类、纤维脂类、纤维和钙化成分体积及占比)及其周围的 FAI。根据随访期间是否发生 MACE,将患者分为进展组和稳定组。采用受试者工作特征(ROC)曲线评估 FAI 联合斑块特征对稳定型心绞痛发生 MACE 的预测效能。**结果:**中位随访时间 12(7,28)月后,274 例中 63 例发生 MACE。与稳定组相比,进展组的 FAI 值显著较高($P=0.001$),重度狭窄($\geq 70\%$)占比较大($P<0.001$),脂类成分体积明显较大($P<0.001$)。FAI 联合斑块的脂类成分体积及管腔狭窄程度构建的联合模型,预测稳定型心绞痛发生 MACE 的效能明显优于仅采用斑块特征和狭窄程度的模型(AUC 分别为 0.713 和 0.644, $P=0.006$)。**结论:**FAI 联合斑块的脂类成分体积及管腔狭窄程度可以较准确地预测稳定型心绞痛患者发生 MACE 的风险,为临床识别高危稳定型心绞痛患者提供帮助。

【关键词】 心绞痛; 动脉粥样硬化; 体层摄影术,X 线计算机; 脂肪衰减指数

【中图分类号】 R814.42;R543.3;R541.4 **【文献标识码】** A

【文章编号】 1000-0313(2024)08-1045-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2024.08.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The value of pericoronary fat attenuation index combined with plaque characteristics for predicting the risk of progression in stable angina pectoris ZHU Ting-ting, GUAN Han-xiong, LI Qian, et al. Department of Radiology, Tongji Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430030, China

【Abstract】 Objective: The purpose of this study was to investigate the application value of pericoronary fat attenuation index (FAI) in predicting the risk of major adverse cardiac events (MACE) in stable angina pectoris. **Methods:** Coronary CTA data of 274 patients with stable angina pectoris diagnosed for the first time between January 2020 and December 2022 in our hospital were retrospectively analyzed. Proximal peripheral FAI, degree of luminal stenosis, and plaque characteristics of the three main coronary arteries (right coronary artery, left anterior descending branch, and left circumflex branch) were analyzed. Plaque characteristics included the volume and percentage of lipid, fibrolipid, fibrous and calcified components within the plaque of each vessel. Patients were categorized into progression and stable groups based on whether MACE occurred during the follow-up period. The predictive efficacy of FAI combined with plaque characterization for the development of MACE in patients with stable angina was assessed using the receiver operating characteristic (ROC) curve. **Results:** After a median follow-up time of 12 (7,28) months, MACE occurred in 63 of 274 cases. Compared with the stable group, the progression group had a significantly higher FAI values ($P=0.001$), a greater proportion of severe stenosis ($\geq 70\%$, $P<0.001$), and a significantly larger volume of lipid component

作者单位:430030 湖北武汉,华中科技大学同济医学院附属同济医院放射科(祝婷婷、管汉雄、李茜、李德福);518103 广东深圳,深圳市宝安区福永人民医院放射科(李德福)

作者简介:祝婷婷(1984—),女,湖北钟祥人,博士,副主任医师,主要从事心胸影像诊断和研究。

通讯作者:李德福,E-mail:13510625212@163.com

基金项目:湖北省自然科学基金面上项目(2022CFB210)

($P<0.001$)。The area under the ROC curve (AUC) of FAI combined with the volume of lipid component of plaque and severe luminal stenosis to diagnose progression of MACE in patients with stable angina was significantly better than that predicted by the model using only plaque characteristics and the degree of stenosis (AUC: 0.713 vs. 0.644, $P=0.006$)。Conclusion: FAI combined with the volume of the lipid component of the plaque and the degree of luminal stenosis can more accurately predict the risk of MACE in patients with stable angina pectoris, and may provide clinical assistance in identifying patients with high-risk stable angina pectoris。

【Key words】 Angina pectoris; Atherosclerosis; Tomography, X-ray computed; Fat attenuation index

冠心病是因心肌供血动脉变窄或堵塞，导致流向心肌的血液减少所致的疾病，可发生重大不良心脏事件(major adverse cardiac event, MACE)，是致死率最高的疾病之一。稳定型心绞痛是冠心病的常见症状，部分患者在药物治疗过程中仍可发生 MACE^[1]。

冠状动脉粥样硬斑块破裂是 MACE 的最主要发病机制，早期识别斑块破裂风险和积极开展临床干预是预防 MACE 的关键。容易发生破裂的斑块称为易损斑块，在斑块的不稳定化进程中，斑块成分和血管炎症是主要的影响因素^[2]。冠状动脉 CTA 检查为无创性早期识别冠状动脉易损斑块提供了有效手段。易损斑块的 CT 特征性表现为斑块内低密度、点状钙化、餐巾环征及冠状动脉正性重构^[3-5]。但 CT 显示的这些高危征象主要为视觉影像信息^[6-7]，易受观察者主观因素的影响^[8]，且不足以区分非钙化斑块的亚型^[9]，也无法显示斑块内炎性细胞浸润及新生血管增生。因此，CT 预测 MACE 的准确性较低。以往研究显示，人工智能技术可以额外增加冠状动脉 CTA 对心血管疾病的诊断价值，促进更快、更准确的诊断和决策^[4,10,11]。

脂肪衰减指数(fat attenuation index, FAI)的定义为冠状动脉周围脂肪(pericoronary adipose tissue, PCAT)衰减的平均 CT 值，可反映血管的炎症状态，捕捉经组织活检证实的炎症细胞浸润^[12-13]。近年来，FAI 作为一种新的炎症指标已成为心血管领域的研究热点^[14-16]。

本研究初步探讨了 FAI 联合人工智能斑块特征定量分析技术对稳定型心绞痛患者发生 MACE 的预测效能，旨在为预防高风险稳定型心绞痛患者发生 MACE 提供一种有效识别手段。

材料与方法

1. 病例资料

回顾性分析 2020 年 1 月—2022 年 12 月在本院行冠状动脉 CTA 检查的稳定型心绞痛患者的病例资料。通过查阅首次确诊稳定型心绞痛时门诊或住院电

子病历，搜集患者的基线临床资料。纳入标准：①年龄 ≥ 16 岁；②无碘对比剂过敏史；③CCTA 检查序列完整，图像质量良好；④肾功能正常；⑤无心律失常。排除标准：①图像质量差，不能用于诊断；②行 CCTA 检查前有心肌梗死、冠状动脉内支架植入术或血管搭桥术病史；③有冠状动脉畸形或心肌桥。

本研究获我院伦理委员会批准(编号：2020-S336)并免除患者知情同意。

2. CCTA 扫描

使用 GE Revolution 256 排($n=131$)或佳能 Aquilion Vision320 排($n=143$)CT 扫描仪，前瞻性或回顾性心电门控扫描模式，扫描参数：智能 mA，100 kV, $0.5 \text{ mm} \times 320\text{i}$ ，层厚 0.5 mm，螺距 1.0 mm，扫描范围自气管分叉下 1 cm 至心尖水平，曝光范围 70%~80%，迭代重建算法采用自适应迭代降噪(adaptive iterative dose reduction, AIDR)-3D-Enhance。

3. CCTA 图像分析

利用冠状动脉人工智能辅助诊断系统(数坤临床决策支持平台 V1.0)自动分析和计算冠状动脉主要分支的管腔狭窄程度、斑块特征和冠状动脉周围 FAI 值(图 1~2)，包括左冠状动脉的左旋支(left circumflex artery, LCX)、左前降支(left anterior descending, LAD)以及右冠状动脉(right coronary artery, RCA)；然后，以血管为单位对各指标进行汇总，计算总斑块体积、斑块内脂类、纤维脂类、纤维、钙化成分的总体积及占比。管腔狭窄程度分为轻中度(狭窄率 < 70%)和重度狭窄(狭窄率 $\geq 70\%$)。斑块特征包括斑块内的脂类、纤维脂类、纤维和钙化成分的体积及占比。成分的定义为斑块内 CT 值的所有体素，脂类、纤维脂类、纤维和钙化成分的定义分别为斑块内 CT 值 < 30 、 $30 \sim 129$ 、 $130 \sim 349$ 和 ≥ 350 HU 的所有体素。FAI 的测量选取的是 LAD、LCX、RCA 三支血管近端距开口处约 10 mm 起始、长约 40 mm 范围的一段血管(图 2)。PCAT 的定义为血管周围环形区域内(内外环之间的宽度与血管管径相等)CT 值在 $-190 \sim -30$ HU 范围内的脂肪组织^[17]。三支冠脉血管的 FAI 测量及其斑

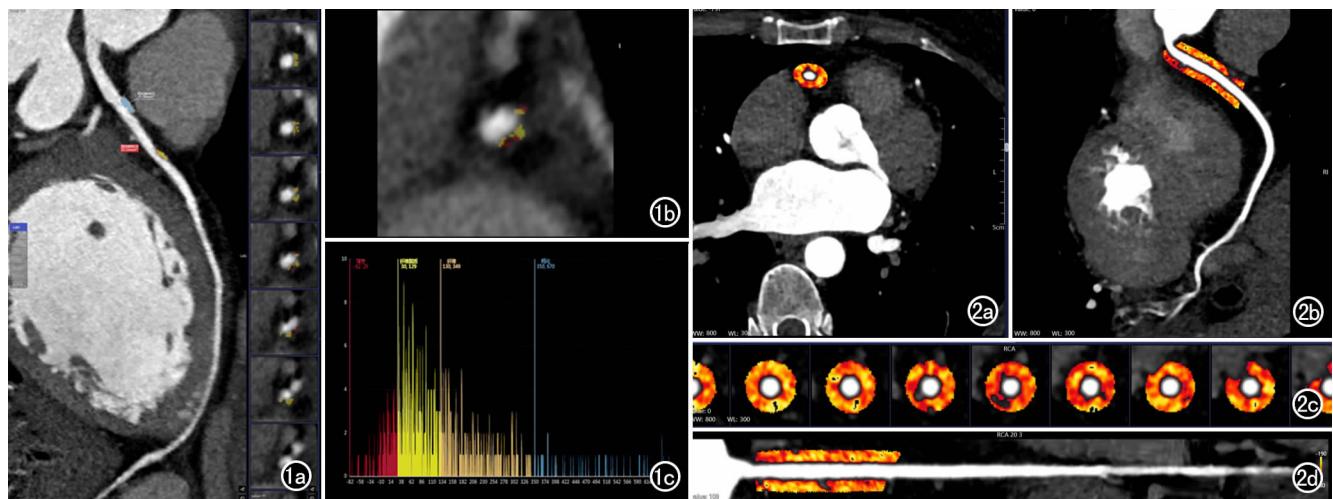


图 1 斑块成分测量方法示意图。a) 左侧为曲面重组图像, 显示左前降支近中段有两处斑块, 近段为钙化斑块, 中段为混合斑块(红色标记字段为正在评估的目标斑块), 右图为冠状动脉管腔横截面图像, 中心白色为冠状动脉管腔, 周围不同颜色表示不同性质的斑块; b) 冠状动脉管腔横截面放大图像, 中心白色区域为血管管腔, 周围红、黄、蓝色区域分别代表脂类、纤维脂类及钙化斑块; c) 目标斑块内所有体素的 CT 值分布直方图, 红、黄、橘和蓝色分别代表脂类、纤维脂类、纤维和钙化四种成分。图 2 右冠状动脉近段脂肪衰减指数测量示意图, 图中伪彩区域为 FAI 的测量范围, FAI 为该区域的所有脂肪组织的平均 CT 值。a) 冠状动脉 CTA 横轴面图像; b) 曲面重组图像; c) 冠状动脉管腔横截面图像; d) 冠状动脉曲面重组后拉直图像。

块的特征由两位具有 5 年以上心血管影像诊断经验的放射科医师进行评估, 意见不一致时经讨论达成一致意见。

4. 随访

根据患者随访期间是否发生 MACE, 将患者分为进展组和稳定组。MACE 的定义为发生心源性死亡(因致命性心肌梗死、心力衰竭或心律失常所致)、非致命性心肌梗死、不稳定心绞痛或接受血运重建术(冠状动脉内支架植入术或血管搭桥术)^[18]。随访期间失访及中途退出者均未被纳入此项研究。由心血管内科专家根据患者的有创冠状动脉造影术、心电图及超声心动图对发生 MACE 的罪犯血管进行认定^[19]。

5. 统计分析

所有统计分析使用 SPSS 26.0 或 Medcalc 20.0 统计软件。计量资料根据是否符合正态分布分别以平均值±标准差或中位数(四分位距)表示, 并采用独立样本 t 检验或 Mann-Whitney U 检验; 计数资料以例数(百分比)表示, 组间比较采用卡方检验。采用多因素二元 Logistic 回归分析对 FAI、狭窄程度和斑块特征进行筛选, 将分析后 $P < 0.05$ 的变量及临床重要变量用于预测模型构建。采用 ROC 曲线分析斑块特征和 FAI 对稳定型心绞痛发生 MACE 的预测效能, 计算 ROC 曲线下面积(AUC)、敏感度和特异度; 采用 DeLong 检验分析各模型之间 AUC 的差异。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

1. 临床资料

共有 274 例稳定型心绞痛患者(467 支病变血管)纳入此研究, 男 167 例(60.9%), 年龄 68(59, 74)岁, 确诊后 1 周内所有患者进行了冠脉 CTA 检查。随访时间 12(7, 28)个月, 随访期间共 63 例(85 支罪犯血管)发生 MACE, 其中行血运重建术者 29 例, 发生非致命性心肌梗死 15 例、不稳定型心绞痛 19 例, 随访期间未发现心源性死亡事件; 211 例(382 支病变血管)为稳定组。

两组患者临床资料的比较结果详见表 1。进展组中男性、吸烟史及合并糖尿病的比例明显高于稳定组, 差异均有统计学意义($P < 0.05$)。而高血压和高脂血症患者占比、发病年龄及体质指数等在两组间的差异均无统计学意义($P > 0.05$)。

2. FAI 及斑块特征的比较

两组之间 FAI 值及斑块特征的比较结果见表 2。进展组的 FAI 值和重度狭窄($\geq 70\%$)者占比均显著高于稳定组($P < 0.001$); 钙化成分体积、纤维成分占比在进展组和稳定组之间的差异均无统计学意义($P > 0.05$); 进展组钙化成分占比明显低于稳定组($P = 0.001$), 其它斑块内成分的体积及占比均为进展组显著高于稳定组($P < 0.05$)。

3. 冠状动脉周围 FAI 和斑块特征对稳定型心绞

表 1 进展组和稳定组患者临床资料的比较

指标	稳定组 (n=211)	进展组 (n=63)	统计量	P 值
男性/例	118(55.9%)	49(77.8%)	9.730 ^a	0.002
年龄/岁	68(58,72)	69(61,73)	-1.591 ^b	0.112
体质指数/kg/m ²	24.3±3.3	24.6±3.0	-0.601 ^c	0.549
吸烟史/例	58(27.5%)	27(42.9%)	5.355 ^a	0.021
饮酒史/例	35(16.6%)	15(23.8%)	1.696 ^a	0.193
高血压/例	84(39.8%)	27(42.9%)	0.187 ^a	0.666
糖尿病/例	53(25.1%)	30(47.6%)	11.632 ^a	0.001
高脂血症/例	35(16.6%)	12(19.0%)	0.207 ^a	0.649
低密度脂蛋白/mmol/L	2.6±0.8	2.7±0.9	-0.611 ^c	0.542
高密度脂蛋白/mmol/L	1.0(0.8,1.2)	1.0(0.8,1.2)	-0.751 ^b	0.453
甘油三酯/mmol/L	1.5(0.9,2.3)	1.3(1.0,1.8)	-0.820 ^b	0.412
总胆固醇/mmol/L	4.1±1.0	4.3±1.2	-0.947 ^c	0.344
葡萄糖/mmol/L	5.6(4.9,6.8)	5.5(4.8,6.4)	-0.473 ^b	0.636
肌红蛋白/pg/mL	36.1(29.0,46.0)	43.0(29.0,54.0)	-1.987 ^b	0.047
高敏心肌肌钙蛋白 I/pg/mL	3.1(1.8,9.1)	4.0(2.6,14.7)	-2.565 ^b	0.010
肌酸激酶 MB 型同工酶/pg/mL	0.9(0.6,1.4)	0.7(0.5,1.7)	-0.691 ^b	0.489

注:^a 为 χ^2 值; ^b 为 Z 值(Mann-Whitney U 检验); ^c 为 t 值。

表 2 进展组和稳定组 FAI 值及斑块特征的比较

指标	稳定组	进展组	统计量	P 值
脂肪衰减指数/HU	-86.5±8.8	-83.1±8.1	-3.338 ^a	0.001
脂类成分体积/mm ³	0.9(0.4,2)	3.5(0.3,9.5)	-3.708 ^b	<0.001
纤维脂类成分体积/mm ³	6.7(0.1,19.7)	16.0(3.1,38.5)	-3.566 ^b	<0.001
纤维成分体积/mm ³	9.5(2.2,23.9)	16.2(4.8,32.7)	-2.093 ^b	0.036
钙化成分体积/mm ³	22.9(2.3,83.7)	31.4(0.5,148.5)	-0.639 ^b	0.523
脂类成分占比/%	1.2(0.5,8)	3.0(0.3,8.2)	-2.801 ^b	0.005
纤维脂类成分占比/%	9.1(0.1,33.5)	19.3(3.8,39.1)	-2.279 ^b	0.023
纤维成分占比/%	18.2(8.6,31.1)	18.2(7.0,27.1)	-0.935 ^b	0.350
钙化成分占比/%	66.5(16.1,87.3)	43.3(3.4,70.2)	-3.285 ^b	0.001
狭窄程度≥70% /例	94(24.6%)	48(56.5%)	33.359 ^c	<0.001

注:^a 为 t 值; ^b 为 Z 值(Mann-Whitney U 检验); ^c 为 χ^2 值。

痛发生 MACE 的诊断效能分析

多因素二元 logistic 回归分析结果显示,管腔狭窄程度和 FAI 是预测稳定型心绞痛发生 MACE 的高危因素($P<0.05$)。将管腔狭窄程度(管腔狭窄程度 $\geq 70\%$ 赋值 1, $<70\%$ 赋值为 0)和反映易损斑块 CT 特征的斑块内低密度的脂类成分的体积作为临床重要变量用于构建预测模型 1,以模型 1 的变量加入 FAI 用于构建模型 2,采用 ROC 曲线对 2 个模型预测稳定型心绞痛发生 MACE 的效能进行分析(图 3)。模型 1 和模型 2 诊断稳定型心绞痛发生 MACE 的 AUC 分别为 0.644 和 0.713,敏感度分别为 56.5% 和 76.7%,特异度分别为 71.8% 和 65.7%。Delong 检验结果显示模型 2 的诊断效能优于模型 1($P=0.006$)。

讨 论

缺血性心脏病患者的死亡率在过去几十年中有所下降,但 2020 年全球仍有近 900 万患者死于缺血性心脏病,而且急性冠脉综合征的发生率并无明显变化^[20-21]。因此,有必要在稳定型心绞痛患者中早期识别易发生 MACE 的高危人群,以降低发病率和经济负担。

冠状动脉硬化早期,血浆内低密度脂蛋白颗粒在内膜氧化^[17],并通过与巨噬细胞结合转化为泡沫细胞(即充满脂质的巨噬细胞)^[22]。泡沫细胞分泌促炎症

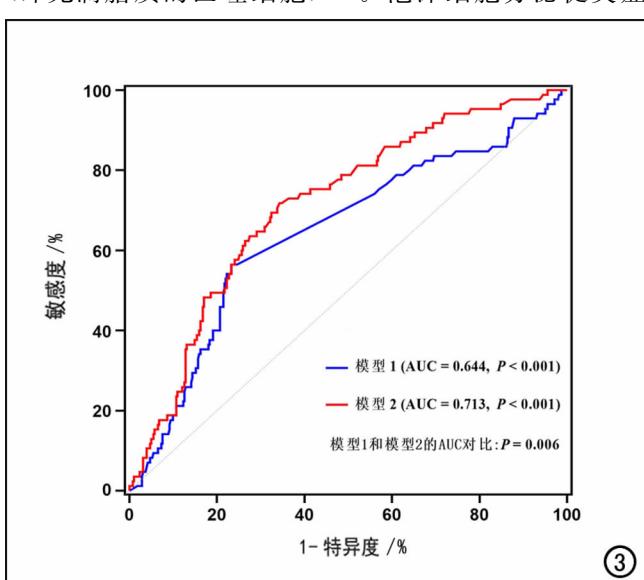


图 3 模型 1 和模型 2 诊断稳定型心绞痛患者发生 MACE 的 ROC 曲线,模型 2 的诊断效能明显好于模型 1(AUC:0.713 vs. 0.644, $P=0.006$)。

因子加速炎症过程并加重炎症程度,引发钙化级联反应形成微钙化和斑点状钙化^[20,23]。随着动脉粥样硬化的发展,泡沫细胞继续吸收过量的低密度脂蛋白后发生坏死或凋亡而形成富含脂质的核心,并导致胆固醇结晶的形成^[22]。易损斑块由大而富含脂质的核心和薄的纤维帽组成,其正性重构、点状钙化及低密度斑块的高风险特征及斑块内出血、新血管形成和管壁炎症增加了发生不良心血管事件的风险^[20]。这在本研究中得到印证,本研究结果显示进展组的脂类成分(代表易损斑块的低密度斑块)体积明显大于稳定组。易损斑块的破裂促使血管收缩、凝血增加及急性血栓形成,致使冠状动脉血流突发性显著减少甚至中断,心肌急性缺血而发生 MACE^[20]。易损斑块的主要诊断依据还包括活动性炎症,次要标准包括管腔狭窄 $\geq 90\%$ (因为其快速进展也会导致不良临床事件)^[24]。在本研究中,进展组管腔狭窄 $\geq 70\%$ 的血管数量较稳定组明显增多,这预示着当稳定型心绞痛患者管腔狭窄 $\geq 70\%$ 的病变快速进展时,更易导致 MACE 的发生。

我们的研究还发现,反映血管炎症的指标即 FAI 的测量值在进展组明显高于稳定组。FAI 值的升高说明在 MACE 高风险的稳定型心绞痛群体中,冠状动脉炎症更活跃,发生 MACE 的可能性更大。另外,FAI 在急性冠脉综合征及发生心血管事件的 2 型糖尿病患者中也被发现可以很好地反映罪犯血管的炎症活动情况^[4,25]。FAI 作为一种新的炎症指标,可以根据 PCAT 的 CT 值变化来反映血管周围的炎症程度,PCAT 主要分布在冠状动脉三大主支的外膜周围,是心外膜脂肪的一部分,可能参与心脏代谢的调节^[26-28]。在正常情况下,PCAT 分泌促进血管舒张、抗炎和抗氧化特性的血管保护类因子^[29]。而一旦冠状动脉斑块形成,PCAT 的表型则从保护型改变为炎症型^[30],反过来影响血管壁,加速冠状动脉斑块的发展并加剧其不稳定性^[12]。

在本研究中,基于脂类成分体积和管腔狭窄程度构建的模型预测稳定型心绞痛发生 MACE 的效能因 FAI 的加入而明显提高。另外,FAI 还可能对一和二级预防中的风险进行再分级^[31]。因此,FAI 作为一种新的生物诊断标志物,在不同人群中的临床预防策略的制订中具有重要意义。

本研究存在一些局限性:第一,这是一项单中心的回顾性研究,未来可能需要进行多中心的前瞻性研究对本研究结果进行验证。第二,仅有首次就诊时的 CCTA 及 FAI 资料,缺少动态对比,不能全面反映患者治疗前后冠脉周围炎症的变化。

综上所述,FAI 联合斑块特征可以有效识别易发

生 MACE 的高风险稳定型心绞痛患者,为临床积极干预提供参考。

参考文献:

- [1] DeJongste MJ, Tio RA, Foreman RD. Chronic therapeutically refractory angina pectoris[J]. Heart, 2004, 90(2): 225-230.
- [2] Antoniades C, Antonopoulos AS, Deanfield J. Imaging residual inflammatory cardiovascular risk[J]. Eur Heart J, 2020, 41(6): 748-758.
- [3] Yu M, Dai X, Deng J, et al. Diagnostic performance of perivascular fat attenuation index to predict hemodynamic significance of coronary stenosis: a preliminary coronary computed tomography angiography study[J]. Eur Radiol, 2020, 30(2): 673-681.
- [4] Li N, Dong X, Zhu C, et al. Model development and validation of noninvasive parameters based on coronary computed tomography angiography to predict culprit lesions in acute coronary syndromes within 3 years: value of plaque characteristics, hemodynamics and pericoronary adipose tissue[J]. Quant Imaging Med Surg, 2023, 13(7): 4325-4338.
- [5] Andreini D, Magnoni M, Conte E, et al. Coronary plaque features on CTA can identify patients at increased risk of Cardiovascular events[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2020, 13(8): 1704-1717.
- [6] Marwan M, Taher MA, El Meniawy K, et al. In vivo CT detection of lipid-rich coronary artery atherosclerotic plaques using quantitative histogram analysis: a head to head comparison with IVUS [J]. Atherosclerosis, 2011, 215(1): 110-115.
- [7] Feuchtner G, Kerber J, Burghard P, et al. The high-risk criteria low-attenuation plaque $< 60\text{HU}$ and the napkin-ring sign are the most powerful predictors of MACE: a long-term follow-up study [J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2017, 18(7): 772-779.
- [8] Li XN, Yin WH, Sun Y, et al. Identification of pathology-confirmed vulnerable atherosclerotic lesions by coronary computed tomography angiography using radiomics analysis[J]. Eur Radiol, 2022, 32(6): 4003-4013.
- [9] Kristensen TS, Kofoed KF, Kühl JT, et al. Prognostic implications of nonobstructive coronary plaques in patients with non-ST-segment elevation myocardial infarction: a multidetector computed tomography study[J]. J Am Coll Cardiol, 2011, 58(5): 502-509.
- [10] Dey D, Slomka PJ, Leeson P, et al. Artificial intelligence in cardiovascular imaging: JACC state-of-the-art review[J]. J Am Coll Cardiol, 2019, 73(11): 1317-1335.
- [11] 宋瑶,霍怀璧,李晗,等.冠状动脉 CTA 多参数 AI 特征对急性冠脉综合征的诊断价值[J].放射学实践,2023,38(7):873-878.
- [12] Antonopoulos AS, Sanna F, Sabharwal N, et al. Detecting human coronary inflammation by imaging perivascular fat[J/OL]. Sci Transl Med, 2017, 9(398): el2658 [2017 Jul 12]. DOI: 10.1126/scitranslmed.aal2658.
- [13] Cui K, Liang S, Hua M, et al. Diagnostic performance of machine learning-derived radiomics signature of pericoronary adipose tissue in coronary computed tomography angiography for coronary artery in-stent restenosis[J]. Acad Radiol, 2023, 30(12): 2834-2843.
- [14] Queiroz M, Sena CM. Perivascular adipose tissue in age-related vascular disease[J]. Ageing Res Rev, 2020, 59: e101040 [2020 Feb 26]. DOI: 10.1016/j.arr.2020.101040.

- [15] Antoniades C, Kotanidis CP, Berman DS. State-of-the-art review article. Atherosclerosis affecting fat: what can we learn by imaging perivascular adipose tissue[J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2019, 13(5):288-296.
- [16] 刘晓灌,江杰,李俊,等.基于CT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[J].放射学实践,2023,38(7):879-883.
- [17] Lin A, Nerlekar N, Yuvaraj J, et al. Pericoronary adipose tissue computed tomography attenuation distinguishes different stages of coronary artery disease:a cross-sectional study[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2021, 22(3):298-306.
- [18] Nance JW, Schlett CL, Schoepf UJ, et al. Incremental prognostic value of different components of coronary atherosclerotic plaque at cardiac CT angiography beyond coronary calcification in patients with acute chest pain[J]. *Radiology*, 2012, 264(3):679-690.
- [19] Tesche C, Caruso D, De Cecco CN, et al. Coronary computed tomography angiography-derived plaque quantification in patients with acute coronary syndrome[J]. *Am J Cardiol*, 2017, 119(5):712-718.
- [20] van Veelen A, van der Sangen NMR, Delewi R, et al. Detection of vulnerable coronary plaques using invasive and non-invasive imaging modalities[J/OL]. *J Clin Med*, 2022, 11(5):e1361 [2022 Mar 1]. DOI:10.3390/jcm11051361.
- [21] Tsao CW, Aday AW, Almarzooq ZI, et al. Heart disease and stroke statistics—2023 update: a report from the American Heart Association[J]. *Circulation*, 2023, 147(8):93-621.
- [22] Steinberg D, Witztum JL. Lipoproteins and atherogenesis[J]. *Current Concepts Jama*, 1990, 264(23):3047-3052.
- [23] Tintut Y, Patel J, Parhami F, et al. Tumor necrosis factor-alpha promotes in vitro calcification of vascular cells via the cAMP pathway[J]. *Circulation*, 2000, 102(21):2636-2642.
- [24] Naghavi M, Libby P, Falk E, et al. From vulnerable plaque to vulnerable patient;a call for new definitions and risk assessment strategies;Part II[J]. *Circulation*, 2003, 108(15):1772-1778.
- [25] Ichikawa K, Miyoshi T, Osawa K, et al. 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[J/OL]. *Cardiovasc Diabetol*, 2022, 21(1):e44 [2022 Mar 18]. DOI:10.1186/s12933-022-01478-9.
- [26] Zhang W, Li P, Chen X, et al. 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[J/OL]. *Diagnostics (Basel)*, 2023, 13(13):e2136 [2023 Jun 21]. DOI:10.3390/diagnostics13132136.
- [27] Badimon L, Cubedo J. Adipose tissue depots and inflammation: effects on plasticity and resident mesenchymal stem cell function[J]. *Cardiovasc Res*, 2017, 113(9):1064-1073.
- [28] 韩婷婷,穆玥,洪叶,等.冠状动脉周围脂肪组织与动脉粥样硬化的关系:生物学到影像学进展[J].放射学实践,2021,36(5):684-688.
- [29] Akoumianakis I, Antoniades C. The interplay between adipose tissue and the cardiovascular system;is fat always bad[J]. *Cardiovasc Res*, 2017, 113(9):999-1008.
- [30] Elnabawi YA, Oikonomou EK, Dey AK, et al. Association of biologic therapy with coronary inflammation in patients with psoriasis as assessed by perivascular fat attenuation index[J]. *JAMA Cardiol*, 2019, 4(9):885-891.
- [31] Oikonomou EK, Marwan M, Desai MY, et al. 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[J]. *Lancet*, 2018, 392(10151):929-939.

(收稿日期:2023-12-22 修回日期:2024-04-21)