



## 基于CCTA的冠状动脉周围脂肪组织影像组学研究进展

闫昕, 赵建华

### Research Progress of Pericoronary Adipose Tissue Radiomics Based on Coronary Computed Tomography Angiography

YAN Xin and ZHAO Jianhua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2023.179>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 糖尿病患者冠状动脉粥样硬化的CTA特征分析

Analysis of CTA Characterisation of Coronary Atherosclerosis with Diabetes Mellitus

CT理论与应用研究. 2020, 29(3): 347-354

#### CTA评估颈动脉与冠状动脉粥样硬化斑块临床关联的回顾性研究

Relationship of Atherosclerosis between Carotid Arteries and Coronary Arteries by CTA Evaluation:A Retrospective Study

CT理论与应用研究. 2017, 26(4): 497-504

#### 血流储备分数CT成像对冠状动脉旁路移植术后的影像学评价

CT Imaging Evaluation of Fractional Flow Reserve Score after Coronary Artery Bypass Grafting

CT理论与应用研究. 2021, 30(3): 361-369

#### 心外膜及心周脂肪体积与颈动脉粥样斑块的关系

Correlation of Epicardial Adipose Tissue and Pericardial Adipose Tissue with Carotid Artery Plaque

CT理论与应用研究. 2017, 26(6): 761-768

#### CT冠状动脉造影应用于急性胸痛临床实践研究进展

Clinical Practice of CT Coronary Angiography in Acute Chest Pain: A Review

CT理论与应用研究. 2019, 28(6): 747-752

#### 冠状动脉CTA在冠状动脉-肺动脉瘘中诊断价值的回顾性研究

Coronary Artery CT Angiography in Coronary-pulmonary Fistula:A Retrospective Study

CT理论与应用研究. 2017, 26(4): 519-524



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

闫昕, 赵建华. 基于 CCTA 的冠状动脉周围脂肪组织影像组学研究进展[J]. CT 理论与应用研究(中英文), 2024, 33(4): 531-538. DOI:10.15953/j.ctta.2023.179.

YAN X, ZHAO J H. Research Progress of Pericoronary Adipose Tissue Radiomics Based on Coronary Computed Tomography Angiography[J]. CT Theory and Applications, 2024, 33(4): 531-538. DOI:10.15953/j.ctta.2023.179. (in Chinese).

# 基于 CCTA 的冠状动脉周围脂肪组织影像组学研究进展

闫昕<sup>1</sup>, 赵建华<sup>2✉</sup>

1. 内蒙古医科大学研究生院, 呼和浩特 010110

2. 内蒙古自治区人民医院影像医学科, 呼和浩特 010017

**摘要:** 冠状动脉周围脂肪组织 (PCAT) 是一种紧密包绕在冠状动脉外膜的特殊脂肪组织, 与冠状动脉管壁存在双向通讯作用机制, 在血管炎症时促进冠状动脉粥样硬化的发生发展。基于冠状动脉 CT 血管成像 (CCTA) 的冠状动脉周围脂肪组织影像组学可以高通量从图像中挖掘定量特征, 在冠状动脉粥样硬化中分析斑块组成和识别易损斑块、预测冠状动脉狭窄及血流动力学狭窄程度、识别和预测急性冠脉综合征等方面表现出更好的诊断效能。本文就基于 CCTA 的冠状动脉周围脂肪组织影像组学研究进展进行综述。

**关键词:** 体层摄影术; X 线计算机; 冠状动脉粥样硬化; 冠状动脉周围脂肪组织; 影像组学

DOI:10.15953/j.ctta.2023.179

中图分类号: R814

文献标识码: A

近年来, 中国冠状动脉粥样硬化性心脏病 (coronary artery disease, CAD) 患病率及死亡率均处于持续上升阶段<sup>[1]</sup>。早发现、早诊断、早治疗冠状动脉粥样硬化 (coronary atherosclerosis) 有望降低 CAD 的病死率, 改善预后。目前大量研究表明冠状动脉周围脂肪组织 (pericoronary adipose tissue, PCAT) 是一类围绕冠状动脉并与其外膜紧密相邻的脂肪组织, 与管壁存在双向通讯作用机制, 在冠脉粥样硬化斑块的发生发展中起着至关重要的作用。冠状动脉 CT 血管成像 (coronary CT angiography, CCTA) 广泛用于评估冠状动脉粥样硬化斑块范围、密度、大小及管腔狭窄等情况, 是 CAD 无创影像检查的一线手段<sup>[2-3]</sup>。

2012 年, 影像组学 (Radiomics) 这一概念首次由 Lambin 等<sup>[4]</sup>学者提出, 它是一种可以对定量图像特征进行高通量挖掘的技术, 从诸如 CT、MR 或 PET 等医学图像中提取并筛选定量的数据特征, 用于疾病定性诊断、预后评价等方面, 已成为医学影像和个体化医疗之间的桥梁<sup>[5]</sup>。影像组学不仅在癌症研究等方面的应用越来越广泛, 也逐步应用于 CAD 的研究中, 基于 CCTA 的冠状动脉周围脂肪组织影像组学成为当前研究的热点, 能够通过 CCTA 分析斑块成分和识别易损斑块、预测冠状动脉狭窄及血流动力学狭窄程度、识别和预测急性冠脉综合征等, 为冠状动脉粥样硬化的深入研究拓展了新的视野。本文就基于 CCTA 的冠状动脉周围脂肪组织影像组学研究进展进行综述。

## 1 PCAT 的生物学功能及影像学定义

动脉粥样硬化的形成被认为是一种血管炎症, 与冠状动脉粥样硬化的发生、冠状动脉狭窄程度、斑块稳定性等密切相关。冠状动脉周围脂肪是指紧密包绕在冠状动脉外膜的特殊脂肪组织, 主要由脂肪细胞、肥大细胞及成纤维细胞等组成, 与冠状动脉共处微环境, 既是其结构支持组织, 也是人体组织代谢活跃的内分泌器官。与冠脉管壁进行双向通讯作用, 并以旁分泌及滋养血管分泌等方式

收稿日期: 2023-09-12。

基金项目: 内蒙古自治区人民医院院内基金 (基于深度学习的病毒性肺炎不同临床转归胸部 CT 评价 (2020YN08)); 包头医学院研究生教育教学改革项目 (人工智能在放射影像学专业学位研究生教学中的初步应用 (B-YJSJG202303)); 内蒙古医科大学高等教育教学改革研究项目 (“人工智能+教学”模式在医学影像专业教学中的应用探索 (NYJXGG2023139)); 内蒙古医科大学联合项目 (基于深度学习和影像组学预测急性缺血性脑卒中发病时间的研究 (YKD2023LH088))。

发挥作用,产生脂肪因子、血管生成因子及炎症因子等,参与冠脉斑块形成及演变过程<sup>[6-7]</sup>。

生理状态下,PCAT 分泌以脂联素为代表的血管保护性脂肪因子,发挥促进血管扩张、抗炎、抗纤维化和抗氧化作用;病理状态下,PCAT 作为冠状动脉炎症的传感器,功能障碍时促炎因子释放增加,直接激活免疫应答,并且抑制血管保护性脂肪因子的分泌,间接促进炎症的发生,由此引发血管周围炎症活动,促进冠状动脉粥样硬化的发展<sup>[8]</sup>。

PCAT 被定义为 CT 衰减在  $-190 \sim -30$  HU 之间、距离冠状动脉管壁与其直径相等的径向距离的脂肪组织,并引入一种新型无创影像标志物——血管周围脂肪衰减指数 (fat attenuation index, FAI),即通过 PCAT 的 CT 衰减间接反映由血管炎症引起 PCAT 组成成分的改变。FAI 已被证实在识别高危斑块、监测治疗疗效、预测斑块进展及主要心血管事件 (major adverse cardiac events, MACE) 方面具有潜在的应用价值,为基于 CCTA 的冠状动脉周围脂肪影像学检测冠脉粥样硬化斑块成分和斑块的稳定性等提供了理论基础<sup>[9-11]</sup>。

## 2 影像组学概述

影像组学作为一种新兴的医学和工科交叉研究的产物,融合了数字影像信息、机器学习 (machine learning, ML)、深度学习 (deep learning, DL) 及统计学等方法,以非侵入方式充分挖掘图像中肉眼无法观察到的隐匿信息。其主要工作流程如下。

(1) 目标图像的获取:目前影像图像采集主要通过 CT、MRI、PET/CT 和超声等扫描方式来实现,其中影像组学最早是基于 CT 图像提出的<sup>[4]</sup>,在目前的 research 中也最常用。扫描参数的规范化和标准化有利于目标图像获取的准确性、可重复性,是影像组学广泛应用于临床的前提之一。

(2) 图像分割及感兴趣区 (region of interest, ROI) 勾画:图像分割方法包括手动分割、半自动分割和自动分割,在病灶边缘绘制 ROI 实现病灶与正常组织的分离;分割的准确程度将直接影响影像组学分析的准确性。

(3) 特征提取:高通量特征提取是影像组学的核心步骤,其中常用的影像组学特征包括形态学特征、一阶灰度直方图特征、二阶和高阶纹理特征及基于滤波和变换特征<sup>[12-13]</sup>。

(4) 特征筛选:影像组学特征经常显示高度的相关性,表明数据冗余<sup>[14]</sup>。因此必须通过降维对特征进行筛选,以防出现模型的过拟合。

(5) 建立预测模型:筛选出的特征可与临床数据结合建立预测模型,常用模型有随机森林 (random forest)、支持向量机 (support vector machine, SVM)、logistic 回归模型、最大相关最小冗余 (maximum relevance and minimum redundancy, mRMR)、最小绝对值收敛与选择算子 (least absolute shrinkage and selection operator, LASSO)、人工神经网络 (artificial neural networks, ANNs) 等。

## 3 基于 CCTA 的冠状动脉周围脂肪组织影像组学研究进展

### 3.1 识别和分析斑块成分及易损斑块

冠状动脉粥样硬化斑块形成是 CAD 发生的病理基础,贯穿于疾病发生发展的始终。冠状动脉斑块中的易损斑块主要包含脂质、陈旧性出血和炎症细胞等,这些易损斑块因破裂糜烂或继发血栓形成而导致冠状动脉疾病的发展,继而可能导致急性冠状动脉综合征 (acute coronary syndrome, ACS) 的发生。因此,早期准确识别和分析斑块成分、发现易损斑块可降低主要心血管不良事件 (MACE) 的发生率,对于改善患者预后具有重要意义。

研究表明<sup>[15]</sup>CCTA 图像上显示的易损斑块的特征——正向重构、低密度斑块、“餐巾环征 (Napkin-ring sign, SNR)”及点状钙化与 MACE 有关,但是 CCTA 主要通过医生主观视觉评估,准确性有限。同时,虽然此前已有研究<sup>[16]</sup>证实通过 CCTA 测量 PCAT 的 FAI 值对于识别冠状动脉粥样硬化易损斑块

具有重要意义, 可通过 FAI 值表征局部冠状动脉周围脂肪之间的差异, 但其仅能反映感兴趣区内脂肪组织的平均衰减值, 不能显示内部精细结构的变化与联系。

基于 CCTA 的 PCAT 影像组学可以弥补上述检查手段的不足, 通过揭示冠周脂肪内肉眼无法识别的细微结构变化, 更加精准地识别和分析斑块成分及易损斑块, 对目前改善 CAD 风险评估预警体系有所裨益。

有学者<sup>[17]</sup>分析了 200 例行 CCTA 检查的 CAD 患者的临床及影像资料, 并分别对钙化斑块和非钙化斑块进行 PCAT 影像组学特征提取和筛选, 使用不同的机器学习方法构建模型, 并运用单因素 Logistic 回归分析筛选临床危险因素, 结果显示随机森林是最佳的 PCAT 影像组学模型, 与钙化斑块鉴别密切相关的临床因素是年龄。随后将影像组学模型与临床危险因素建立联合影像组学模型, 并在验证组中进行验证, 采用受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic, ROC)评价模型的疗效, 训练组和验证组曲线下面积(area under curve, AUC)分别为 0.98 和 0.97, 灵敏度分别为 0.92 和 0.86, 特异性分别为 0.99 和 1。结果显示基于 CCTA 的 PCAT 影像组学特征与年龄建立的联合影像组学模型对识别冠状动脉钙化斑块具有较高的价值, 可为临床决策提供参考, 也提示临床应重视老年患者的冠状动脉检查。

Kim 等<sup>[18]</sup>为探讨 CCTA 图像中提取的 PCAT 影像组学特征与血管内光学相干断层成像(intravascular optical coherence tomography, IVOCT)识别的易损斑块特征(例如微通道(microchannels, MC)和薄纤维帽粥样硬化斑块(thin-cap fibroatheroma, TCFA))是否相关, 对 25 例 CAD 患者 30 个病灶的 CCTA 和 IVOCT 图像进行配准, 随后从感兴趣的病变区域(PCAT-LOI)和整个血管(PCAT-Vessel)的 CCTA 图像中提取了 1356 个 PCAT 影像组学特征, 并进行特征筛选及模型构建。结果显示, 在 TCFA 病变的识别中, PCAT-LOI 和 PCAT-Vessel 影像组学模型的表现相当(AUC ± 标准差: 0.78 ± 0.13, 0.77 ± 0.14); 对于 MC 病变的识别, PCAT-Vessel 影像组学模型(0.89 ± 0.09)比 PCAT-LOI 模型(0.83 ± 0.12)有更好的相关性。这表明基于 CCTA 的 PCAT 影像组学的应用可以识别由 IVOCT 确定的冠状动脉易损斑块特征如 MC 和 TCFA。虽然既往研究证明了冠状动脉斑块影像组学分析在识别易损斑块特征方面的可行性, 但它们往往忽视了 PCAT 在动脉粥样硬化中的潜在作用及其与 TCFA 和 MC 的可能关联。Kim 等<sup>[18]</sup>的研究成果证实基于 CCTA 的 PCAT 影像组学特征在预测 IVOCT 识别的易损斑块特征方面表现出良好的准确性, 对于易损斑块的早期识别和风险评估中的应用具有重要意义。

在最近的研究中, Chen 等<sup>[19]</sup>在一项纳入 299 例 CAD 患者的回顾性分析中开发了一种基于冠状动脉 CTA 识别血管内超声确定的易损斑块的影像组学评分(rad-score, RS), 结果表明 RS 具有中等至良好的诊断性能(AUC ≥ 0.75), RS 对比传统斑块特征识别易损斑块能够提供增量价值(AUC 分别为 0.80 vs 0.73;  $P < 0.001$ ); 同时该研究在前瞻性队列中纳入 708 例可疑 CAD 患者, 进一步评估了 RS 的预后价值, 表明构建的 RS 与主要心脏事件风险增加相关(每 0.01 增量的校正后风险比, 2.0;  $P = 0.005$ ), RS 叠加传统心血管危险因素和 CT 解剖学特征对预后评估具有增量价值(C 指数分别为 0.72 vs 0.69;  $P = 0.009$ )。该研究表明联合 CCTA 传统特征和影像组学标签的综合性斑块分析可提高对易损斑块的检测, 构建的 RS 对不良结局的预测具有增量价值, 并可在未来的临床实践中作为一种更有前景的无创影像学标志物进行风险分层。

上述研究证实了基于 CCTA 的 PCAT 影像组学运用于识别和分析斑块成分及易损斑块的可行性, 扩展了冠状动脉粥样硬化易损斑块的评估范畴, 使得冠状动脉粥样硬化斑块的非侵入性分析逐步成为可能, 且研究 PCAT 影像组学特征与易损斑块特征之间的关系, 可能为动脉粥样硬化的潜在生物学机制提供新的见解。

### 3.2 预测冠状动脉狭窄及血流动力学狭窄程度

冠状动脉发生动脉粥样硬化疾病时会引起管腔狭窄或阻塞, 尤其是当狭窄程度达 70%~75% 时, 冠状动脉血液供应与心肌耗氧之间严重失衡, 影响心脏功能和冠状动脉血流储备, 从而引发心肌缺

血的临床症状。

CCTA 是目前诊断冠状动脉狭窄常用的非侵袭性检查,在诊断和排除解剖性冠脉狭窄方面具有较好的性能。但是由于钙化斑块的影响,通常会高估钙化斑块所致的狭窄程度,且 CCTA 的冠状动脉狭窄程度与心肌缺血之间的关系不可靠<sup>[20]</sup>。因此需要一种有效的检查手段从功能学来评估冠状动脉狭窄的意义,其中血流动力学因素可能在 CAD 的进展中发挥重要的作用,基于有创冠状动脉造影的血流储备分数(fraction flow reserve, FFR)指标目前已成为评估冠状动脉疾病血流动力学严重程度的参考标准<sup>[21-22]</sup>,代表了在冠状动脉狭窄的情况下所能达到的正常最大心肌血流量的比例。但由于 FFR 的侵入性及高昂的费用,广泛使用仍然受到一定限制,基于 CCTA 的 PCAT 影像组学有助于改善传统影像学检查对冠状动脉狭窄及血流动力学狭窄预测的局限性。

近期有研究<sup>[23]</sup>回顾性分析了 319 例接受 CCTA 检查者的临床、影像资料,分为正常组、轻中度组和重度组,于左前降支(left anterior descending artery, LAD)及右冠状动脉(right coronary artery, RCA)最狭窄处的斑块周围勾画、分割 PCAT 的 ROI 并提取影像组学特征。采用逻辑回归以及最小绝对收缩与选择算子(LASSO)进行特征筛选并建立影像组学模型,使用受试者工作曲线(ROC)评估正常-病变组及轻中度狭窄组-重度狭窄组之间的诊断效能,发现构建的两个影像组学模型分别得出 16 个和 9 个最优特征参数,其中 LogarithmGLCM\_logarithm\_ClusterShade 为两者共有。结果表明基于 CCTA 图像的影像组学在鉴别冠状动脉狭窄组与正常组之间有较好的诊断效能( $AUC > 0.9$ ),而影像组学诊断轻中度狭窄组与重度狭窄组的鉴别能力则较低( $AUC < 0.7$ ),也说明了 PCAT 所反映的冠脉炎症与冠脉斑块狭窄率之间的相关性不强。

徐子良等<sup>[24]</sup>回顾性分析了行冠状动脉 CT 血管成像及有创冠状动脉造影的血流储备分数(FFR)测量的 92 例冠状动脉疾病患者共 122 支冠状动脉血管的 CCTA 数据,依据 FFR 值将冠脉血管分为狭窄组( $FFR \leq 0.8$ )和非狭窄组( $FFR > 0.8$ ),选取冠状动脉周围脂肪组织(PCAT)区域的 468 个影像组学进行特征分析,构建了包括神经网络模型、传统统计学模型和 LASSO 模型 3 种冠状动脉狭窄预测模型。结果显示,神经网络模型的预测效能更高,明显优于传统统计学模型和 LASSO 模型。

Wen 等<sup>[25]</sup>探讨基于 CCTA 的 PCAT 影像组学特征来识别由 FFR 确定的有血流动力学意义的冠状动脉狭窄的诊断价值,发现基于决策树的影像组学模型具有最佳的诊断性能。此外,将 PCAT 影像组学特征添加到 CCTA 中构建的联合模型的诊断效果( $AUC = 0.812$ )明显高于单独使用 CCTA ( $AUC = 0.599$ ,  $P = 0.015$ ),在识别血流动力学显著的冠状动脉狭窄方面有很大改善。

Yu 等<sup>[26]</sup>回顾性分析了 146 例冠状动脉疾病患者的 180 个病灶,评估 PCAT 影像组学模型、基于 CCTA 的无创血流储备分数(CT derived fractional flow reserve, CT-FFR)和联合模型检测功能显著冠状动脉狭窄的诊断性能。结果显示 PCAT 影像组学模型对缺血性冠脉狭窄的诊断性能与 CT-FFR 相当,而 PCAT 放射组学特征联合 CT-FFR 模型在鉴别血流受限病变与非血流受限病变方面具有递增价值,训练队列 AUC 达到 0.900,验证队列 AUC 达到 0.875,显著高于 CT-FFR 和影像组学模型单独 AUC。这表明了 PCAT 影像组学特征可提高 CT-FFR 在预测血流动力学显著冠状动脉狭窄方面的性能,其工作模式简单,医疗费用低,辐射暴露小,是一种很有前景的无创综合评估冠状动脉狭窄血流动力学意义的方法。

尽管目前的研究仍处于探索阶段,但是初步证实了基于 CCTA 的 PCAT 影像组学在识别冠状动脉管腔狭窄及血流动力学狭窄的分析准确度更高,具有进一步临床应用的潜力。

### 3.3 识别和预测急性冠状动脉综合征

急性冠脉综合征(ACS)是指冠状动脉内不稳定的粥样斑块破裂或糜烂引起血栓形成所导致的心脏急性缺血综合征,涵盖了 ST 段抬高型心肌梗死(ST-segment elevation myocardial infarction, STEMI)、非 ST 段抬高型心肌梗死(non-ST-segment elevation myocardial infarction, NSTEMI)和不稳定性心绞痛(unstable angina, UA)<sup>[27]</sup>。ACS 可导致心律失常、心力衰竭、甚至猝死,严重影

响患者的生活质量和寿命。因此及时识别、预测 ACS 可引导临床医生采取恰当的治疗策略,降低病死率、减少并发症,改善预后。

Oikonomou 等<sup>[28]</sup>采集 167 例接受心脏手术患者的冠状动脉周围脂肪组织病理活检,运用影像转录组学方法对 PCAT 影像组学特征与脂肪组织炎症、纤维化和微血管重塑的基因表达间的关联性进行分析,结果表明 FAI 是检测脂肪组织炎症的最佳影像组学特征,而脂肪组织的结构表型为检测纤维化和脂肪组织微血管重塑提供了一种非侵入性手段。该研究进一步对 101 例 5 年内发生 MACE 患者和 101 例健康者行对照分析,建立了一种新的基于 AI 的脂肪影像组学特征 (fat radiomic profile, FRP),随后在 SCOT-HEART 试验中进行性能测试,发现 FRP 在改善冠心病患者 MACE 的风险预测的能力上超过了包括危险因素、冠状动脉钙化积分、冠状动脉狭窄和高危斑块特征的传统心血管危险分层。

陶青等<sup>[29]</sup>回顾性分析了 93 例行 CCTA 检查患者的临床及影像资料,对冠状动脉周围脂肪组织行直方图分析,发现基于 CCTA 的 PCAT 直方图参数在鉴别 ACS 及稳定型 CAD 方面具有较高的价值。

一项前瞻性病例对照研究<sup>[30]</sup>分别对 60 例心肌梗死患者、CAD 稳定的患者和无 CAD 者行 CCTA 检查,提取并分析了基于 CCTA 的 PCAT 影像组学特征,结果显示 20.3% 的心肌梗死患者与对照组之间存在显著差异,16.5% 的心肌梗死患者与稳定的 CAD 患者之间存在显著差异,而稳定的 CAD 患者和对照组之间没有差异,其中最能区分患者存在急性心肌梗死的影像组学特征是纹理和几何结构。这证实了 PCAT 影像组学模型在鉴别急性心肌梗死患者与稳定型 CAD 患者或无 CAD 的对照组方面具有良好的诊断价值,且该研究运用了机器学习的方法,在准确识别急性心肌梗死方面优于血管周围脂肪密度指数 (FAI) 模型。

Shang 等<sup>[31]</sup>对 90 例急性冠脉综合征患者与 1496 例无心脏事件的患者进行 3 年随访,分析了 107 个影像组学特征和 14 个常规斑块特征,分别计算影像组学评分、斑块评分和综合评分,结果表明基于 CCTA 的 PCAT 影像组学特征可为 ACS 事件的发生提供更多的预测信息,在识别未来 3 年内的急性冠脉综合征方面显著优于斑块评分。

刘羽遥等<sup>[32]</sup>回顾性分析 187 例心绞痛患者的临床影像资料 (稳定性心绞痛 (SA) 患者 92 例、不稳定性心绞痛 (UA) 患者 95 例),通过提取并筛选 RCA 及 LAD 近端 PCAT 影像组学特征,且量化 RCA 近端 FAI,建立 FAI 模型、RCA 模型、LAD 模型、RCA 联合 LAD 模型及运用多因素 Logistic 回归筛选临床影像资料并结合影像组学评分 (Rad-score) 建立的综合模型共 5 种模型,然后采用逻辑回归 (LR) 及随机森林 (RF) 两种分类器分别构建上述 5 种模型。结果表明,联合模型 Rad-score、糖化血红蛋白 (HbA1c) 及冠状动脉树中是否存在高危斑块为诊断 SA 及 UA 的独立危险因素。与 LR 模型相比,RF 模型鉴别性能更高且于验证组中具有统计学意义 ( $P < 0.05$ );在 RF 模型中,综合模型的诊断效能最佳。这项研究表明基于 CCTA 的 PCAT 影像组学模型诊断 UA 的准确性得到验证,将 PCAT 影像组学与临床及影像特征相结合,可进一步提高 UA 的诊断能力。

由此可见,基于 CCTA 的 PCAT 影像组学在识别和预测急性冠脉综合征的作用不容忽视。未来随着影像组学技术的发展成熟,可进一步将脂肪影像组学与冠状动脉病变进展的潜在分子生物学机制联系起来,建立更加精准和个体化的 ACS 事件预测模型,对于辅助临床医生尽快做出合理的决策有重要意义。

## 4 小结与展望

综上所述,将基于 CCTA 的 PCAT 影像组学整合到传统影像学检查方法中,从感兴趣区内提取特征,并综合运用机器学习、深度学习等方式,对于斑块的检测、管腔狭窄及血流动力学狭窄、识别和预测急性冠脉综合征等方面均有更好的诊断效能,有助于更精准地无创识别冠状动脉粥样硬化,是一种更客观、更少依赖观察者经验的方法,对未来指导临床对冠状动脉粥样硬化疾病及早预防和制定完备诊疗方案极具价值,逐渐受到国内外研究者的重视。但是基于 CCTA 的 PCAT 影像组学尚未在临床工作中广泛运用,是由于目前的研究大多以单中心的回顾性研究为主,且现阶段的研究方法

尚无统一量化的评估标准,加之相较于目前研究较多的肿瘤影像组学,冠状动脉斑块及冠周脂肪体积小,与周围组织界限模糊,ROI的勾画及特征提取存在一定困难,重复性欠佳,给相关研究造成阻碍,如果这些问题不能被克服,那么影像组学广泛应用于临床诊疗中只能是纸上谈兵。因此亟待专家达成统一共识,建立一套规范和标准的影像组学分析流程,并且需要更大样本量的基于CCTA的PCAT影像组学的冠状动脉粥样硬化多中心前瞻性研究。

未来随着影像组学更加规范化标准化,同时伴随着机器学习和深度学习技术的进步,将指引影像组学为冠状动脉粥样硬化性疾病诊疗的应用提供更多支持。

## 参考文献

- [1] 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 2021 概要[J]. *中国循环杂志*, 2022, 37(6): 553-578. DOI:10.3969/j.issn.1000-3614.2022.06.001.  
The Writing Committee of the Report on Cardiovascular Health and Diseases in China. Report on cardiovascular health and diseases in China 2021: An updated summary[J]. *Chinese Circulation Journal*, 2022, 37(6): 553-578. DOI:10.3969/j.issn.1000-3614.2022.06.001. (in Chinese).
- [2] SCHMERMUND A, ECKERT J, SCHMIDT M, et al. Coronary computed tomography angiography: A method coming of age[J]. *Clinical Research in Cardiology*, 2018, 107(S2): 40-48. DOI:10.1007/s00392-018-1320-5.
- [3] CHEN Y D, FANG W Y, CHEN J Y, et al. Chinese expert consensus on the non-invasive imaging examination pathways of stable coronary artery disease[J]. *Journal of Geriatric Cardiology*, 2018, 15(1): 30-40. DOI:10.11909/j.issn.1671-5411.2018.01.012.
- [4] LAMBIN P, RIOS-VELAZQUEZ E, LEIJENAAR R, et al. Radiomics: Extracting more information from medical images using advanced feature analysis[J]. *European Journal of Cancer*, 2012, 48(4): 441-446. DOI:10.1016/j.ejca.2011.11.036.
- [5] LAMBIN P, LEIJENAAR R T H, DEIST T M, et al. Radiomics: The bridge between medical imaging and personalized medicine[J]. *Nature Reviews Clinical Oncology*, 2017, 14(12): 749-762. DOI:10.1038/nrclinonc.2017.141.
- [6] 黄晶, 罗倩, 乔瑾, 等. 冠状动脉周围脂肪组织影像学及临床研究进展[J]. *中国医学影像学杂志*, 2022, 30(11): 1192-1196. DOI:10.3969/j.issn.1005-5185.2022.11.022.  
HUANG J, LUO Q, QIAO J, et al. Imaging and clinical research advances of pericoronary adipose tissue[J]. *Chinese Journal of Medical Imaging*, 2022, 30(11): 1192-1196. DOI:10.3969/j.issn.1005-5185.2022.11.022. (in Chinese).
- [7] ANTONIADES C, ANTONOPOULOS A S, DEANFIELD J. Imaging residual inflammatory cardiovascular risk[J]. *European Heart Journal*, 2020, 41(6): 748-758. DOI:10.1093/eurheartj/ehz474.
- [8] LIN A, DEY D, WONG D T L, et al. Perivascular adipose tissue and coronary atherosclerosis: From biology to imaging phenotyping[J]. *Current Atherosclerosis Reports*, 2019, 21(12): 47. DOI:10.1007/s11883-019-0817-3.
- [9] ANTONOPOULOS A S, SANNA F, SABHARWAL N, et al. Detecting human coronary inflammation by imaging perivascular fat[J]. *Science Translational Medicine*, 2017, 9: 2658. DOI:10.1126/scitranslmed.aal2658.
- [10] GOELLER M, ACHENBACH S, CADET S, et al. Pericoronary adipose tissue computed tomography attenuation and high-risk plaque characteristics in acute coronary syndrome compared with stable coronary artery disease[J]. *JAMA Cardiology*, 2018, 3(9): 858-863. DOI:10.1001/jamacardio.2018.1997.
- [11] OIKONOMOU E K, MARWAN M, DESAI M Y, 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: 929-939. DOI:10.1016/S0140-6736(18)31114-0.
- [12] 李双双, 侯震, 刘娟, 等. 影像组学分析与建模工具综述[J]. *中国医学物理学杂志*, 2018, 35(9): 1043-1049. DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2018.09.010.  
LI S S, HOU Z, LIU J, et al. Review of radiomic analysis and modeling tools[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2018, 35(9): 1043-1049. DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2018.09.010. (in Chinese).
- [13] 谢凯, 孙鸿飞, 林涛, 等. 影像组学中特征提取研究进展[J]. *中国医学影像技术*, 2017, 33(12): 1792-1796. DOI:10.13929/j.1003-3289.201707022.  
XIE K, SUN H F, LIN T, et al. Research progresses in feature extraction of radiomics[J]. *Chinese Journal of Medical Imaging Technology*, 2017, 33(12): 1792-1796. DOI:10.13929/j.1003-3289.201707022. (in Chinese).
- [14] MAYERHOEFER M E, MATERKA A, LANGS G, et al. Introduction to radiomics[J]. *Journal of Nuclear*

- Medicine*, 2020, 61(4): 488–495. DOI:10.2967/jnumed.118.222893.
- [15] MAUROVICH H P, FERENCIK M, VOROS S, et al. Comprehensive plaque assessment by coronary CT angiography[J]. *Nature Reviews Cardiology*, 2014, 11(7): 390–402. DOI:10.1038/nrcardio.2014.60.
- [16] SAGRIS M, ANTONOPOULOS A S, SIMANTIRIS S, et al. Pericoronary fat attenuation index—a new imaging biomarker and its diagnostic and prognostic utility: A systematic review and meta-analysis[J]. *European Heart Journal Cardiovascular Imaging*, 2022, 23(12): e526–e536. DOI:10.1093/ehjci/jeac174.
- [17] HU G Q, GE Y Q, HU X K, et al. Predicting coronary artery calcified plaques using perivascular fat CT radiomics features and clinical risk factors[J]. *BMC Medical Imaging*, 2022, 22(1): 134. DOI:10.1186/s12880-022-00858-7.
- [18] KIM J N, GOMEZ-PEREZ L, ZIMIN V N, et al. Pericoronary adipose tissue radiomics from coronary computed tomography angiography identifies vulnerable plaques[J]. *Bioengineering (Basel)*, 2023, 10(3). DOI:10.3390/bioengineering10030360.
- [19] CHEN Q, PAN T, WANG Y N, et al. A coronary CT angiography radiomics model to identify vulnerable plaque and predict cardiovascular events[J]. *Radiology*, 2023, 307(2): e221693. DOI:10.1148/radiol.221693.
- [20] MEIJBOOM W B, Van MIEGHEM C A, van PELT N, et al. Comprehensive assessment of coronary artery stenoses: Computed tomography coronary angiography versus conventional coronary angiography and correlation with fractional flow reserve in patients with stable angina[J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2008, 52(8): 636–643. DOI:10.1016/j.jacc.2008.05.024.
- [21] PIJLS N H, de BRUYNE B, PEELS K, et al. Measurement of fractional flow reserve to assess the functional severity of coronary-artery stenoses[J]. *The New England Journal of Medicine*, 1996, 334(26): 1703–1708. DOI:10.1056/NEJM199606273342604.
- [22] PIJLS N H, TANAKA N, FEARON W F. Functional assessment of coronary stenoses: Can we live without it?[J]. *European Heart Journal*, 2013, 34(18): 1335–1344. DOI:10.1093/eurheartj/ehs436.
- [23] 查昕仪, 陶青, 胡粟, 等. 冠周脂肪影像组学鉴别冠状动脉狭窄程度初探[J]. *影像诊断与介入放射学*, 2022, 31(1): 20–25. DOI:10.3969/j.issn.1005-8001.2022.01.004.  
ZHA X Y, TAO Q, HU S, et al. Preliminary study of pericoronary adipose tissue based on radiomic model in coronary artery stenosis[J]. *Diagnostic Imaging & Interventional Radiology*, 2022, 31(1): 20–25. DOI:10.3969/j.issn.1005-8001.2022.01.004. (in Chinese).
- [24] 徐子良, 文娣娣, 赵宏亮, 等. 基于冠状动脉周围脂肪组织影像组学特征及神经网络模型预测冠状动脉狭窄血流动力学严重程度[J]. *国际医学放射学杂志*, 2021, 44(5): 511–515. DOI:10.19300/j.2021.L19147.  
XU Z L, WEN D D, ZHAO H L, et al. Predict hemodynamic severity of coronary artery stenosis with pericoronary adipose tissue based radiomics and neural network model[J]. *International Journal of Medical Radiology*, 2021, 44(5): 511–515. DOI:10.19300/j.2021.L19147. (in Chinese).
- [25] WEN D, XU Z, AN R, et al. Predicting haemodynamic significance of coronary stenosis with radiomics-based pericoronary adipose tissue characteristics[J]. *Clinical Radiology*, 2022, 77(2): e154–e161. DOI:10.1016/j.crad.2021.10.019.
- [26] YU L, CHEN X, LING R, et al. Radiomics features of pericoronary adipose tissue improve CT-FFR performance in predicting hemodynamically significant coronary artery stenosis[J]. *European Radiology*, 2023, 33: 2004–2014. DOI:10.1007/s00330-022-09175-7.
- [27] 中国医师协会急诊医师分会, 中华医学会心血管病学分会, 中华医学会检验医学分会. 急性冠脉综合征急诊快速诊疗指南[J]. *中华危重症医学杂志(电子版)*, 2016, 9(2): 73–80. DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-6880.2016.02.001.  
Emergency Physician Branch of Chinese Medical Doctor Association, Cardiovascular Branch of Chinese Medical Association, Laboratory Medicine Branch of Chinese Medical Association. Guidelines for rapid emergency diagnosis and treatment of acute coronary syndrome[J]. *Chinese Journal of Critical Care Medicine*, 2016, 9(2): 73–80. DOI:10.3877/cma.j.issn.1674-6880.2016.02.001. (in Chinese).
- [28] OIKONOMOU E K, WILLIAMS M C, KOTANIDIS C P, et al. A novel machine learning-derived radiotranscriptomic signature of perivascular fat improves cardiac risk prediction using coronary CT angiography[J]. *European Heart Journal*, 2019, 40(43): 3529–3543. DOI:10.1093/eurheartj/ehz592.
- [29] 陶青, 邹伟婕, 范艳芬, 等. 冠状动脉周围脂肪直方图参数鉴别急性冠状动脉综合征及稳定性冠心病的价值初探[J]. *中华放射学杂志*, 2020, (3): 192–197. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2020.03.004.  
TAO Q, ZOU W J, FAN Y F, et al. Preliminary study on the value of pericoronary adipose tissue histogram parameters for the differentiation of acute coronary syndrome and stable coronary artery disease[J]. *Chinese Journal of Radiology*, 2020, (3): 192–197. DOI:10.3760/cma.j.issn.1005-1201.2020.03.004. (in Chinese).



- [30] LIN A, KOLOSSVÁRY M, YUVARAJ J, et al. Myocardial infarction associates with a distinct pericoronary adipose tissue radiomic phenotype: A prospective case-control study[J]. *JACC Cardiovascular Imaging*, 2020, 13(11): 2371-2383. DOI:10.1016/j.jcmg.2020.06.033.
- [31] SHANG J, MA S, GUO Y, et al. Prediction of acute coronary syndrome within 3 years using radiomics signature of pericoronary adipose tissue based on coronary computed tomography angiography[J]. *European Radiology*, 2022, 32(2): 1256-1266. DOI:10.1007/s00330-021-08109-z.
- [32] 刘羽遥, 刘丹, 戴佳霖, 等. 基于 CCTA 的冠状动脉周围脂肪组织影像组学诊断不稳定型心绞痛[J]. *临床心血管病杂志*, 2023, 39(8): 624-631. DOI:10.13201/j.issn.1001-1439.2023.08.011.
- LIU Y Y, LIU D, DAI J L, et al. Diagnosis of unstable angina pectoris based on CCTA radiomic of pericoronary adipose tissue[J]. *Journal of Clinical Cardiology*, 2023, 39(8): 624-631. DOI:10.13201/j.issn.1001-1439.2023.08.011. (in Chinese).

## Research Progress of Pericoronary Adipose Tissue Radiomics Based on Coronary Computed Tomography Angiography

YAN Xin<sup>1</sup>, ZHAO Jianhua<sup>2✉</sup>

1. Graduate School of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010110, China
2. Department of Imaging Medical, Inner Mongolia Autonomous Region People's Hospital, Hohhot 010017, China

**Abstract:** Pericoronary adipose tissue (PCAT) is a type of adipose tissue tightly wrapped in the adventitia of the coronary artery, which communicates bidirectionally with the coronary artery wall and promotes the development of coronary atherosclerosis during vascular inflammation. PCAT based on coronary computed tomography angiography can extract quantitative features from images with high throughput, hence has better diagnostic efficacy for analyzing plaque composition and identifying vulnerable plaques, predicting coronary artery and hemodynamic stenosis, and identifying and predicting acute coronary syndrome. This paper reviewed the research progress of PCAT based on CCTA in coronary atherosclerosis.

**Keywords:** tomography; X-ray computed; coronary atherosclerosis; pericoronary adipose tissue; radiomics



**作者简介:** 闫昕, 女, 内蒙古医科大学放射影像学专业在读研究生, 主要从事影像组学在冠心病中的研究, E-mail: 1971554233@qq.com; 赵建华<sup>✉</sup>, 男, 内蒙古自治区人民医院影像医学科副主任医师、硕士研究生导师, 主要从事影像诊断工作, E-mail: zjh2822yyjh@163.com。