

## 综 述

## 基于电子计算机断层扫描的冠状动脉周围脂肪评估斑块的研究进展

薛丹丹, 万 兵, 徐敬星综述, 李 红审校

**[摘要]** 动脉粥样硬化斑块引发的心血管事件是全球范围内主要死因之一。冠状动脉周围脂肪(PCAT)可对斑块从形成、发展到治疗的各个阶段进行评估,这对于预测冠状动脉粥样硬化性心脏病及心血管事件的风险、评估药物疗效具有重要的临床价值。文章主要对基于电子计算机断层扫描的PCAT在评估斑块方面的研究进行综述。

**[关键词]** 电子计算机断层扫描;心血管事件;动脉粥样硬化;斑块;冠状动脉周围脂肪

**[中图分类号]** R445.3

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 2097-2768(2025)01-0102-06

**[DOI]** 10.16571/j.cnki.2097-2768.2025.01.017

## Research progress on assessing atherosclerotic plaques using computed tomography-based evaluation of pericoronary adipose tissue

XUE Dandan, WAN Bing, XU Jingxing reviewing, LI Hong checking

(Department of Radiology, Second Clinical Medical College of China Three Gorges University, Yichang 443000, Hubei, China)

**[Abstract]** Cardiovascular events triggered by atherosclerotic plaques are one of the leading cause of mortality globally. Pericoronary adipose tissue (PCAT) can evaluate various stages from plaque formation to progression and treatment, which is of significant clinical value in predicting the risk of coronary atherosclerotic heart disease and cardiovascular events, as well as in assessing the effectiveness of drug treatments. This article mainly reviews the research of PCAT based on computed tomography in the evaluation of plaque.

**[Key words]** computed tomography; cardiovascular events; atherosclerosis; plaque; pericoronary adipose tissue

## 0 引 言

冠状动脉粥样硬化斑块是导致全球心血管事件的主要原因之一<sup>[1]</sup>。在动脉粥样硬化(atherosclerosis, AS)演变的过程中,血管炎症不仅是斑块形成、

发展的关键因素,也是斑块破裂的驱动因素<sup>[2]</sup>。抗炎治疗已被证实能够有效阻止斑块进展并降低其破裂风险<sup>[3]</sup>。因此,量化冠状动脉炎症有助于评估斑块状况,对心血管事件的预防有重要意义。近年来,冠状动脉周围脂肪(pericoronary adipose tissue, PCAT)作为一种新型生物影像标记物,已被用于量化冠状动脉炎症<sup>[4]</sup>。在PCAT的检查方法中,冠状动脉CT成像因其较少的伪影和高分辨率被广泛使用<sup>[5]</sup>。本文主要对基于电子计算机断层扫描(computed tomography, CT)的PCAT在评估斑块方面的研究作一综述,旨在为冠状动脉粥样硬化性心脏病(coronary atherosclerotic heart disease, CAD)患者的心血管风险

基金项目:湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(B2022032);宜昌市指导性科技计划项目(B24-2-004)

作者单位:443000 宜昌,三峡大学第二临床医学院放射科(薛丹丹、万 兵、徐敬星、李 红)

通信作者:李 红, E-mail:1741433022@qq.com

评估及治疗提供新的视角。

## 1 病理生理

**1.1 血管炎症与斑块** 血管炎症在 AS 过程的几乎每个阶段都起着关键作用,从早期斑块形成到斑块发展、破裂,乃至心血管事件的发生<sup>[6]</sup>。炎症通过多种途径参与斑块形成,包括引起血管内膜下脂质的沉积、泡沫细胞的形成和血管平滑肌细胞的迁移等,这些都是斑块形成过程中的核心因素<sup>[7]</sup>。若炎症持续增加,将导致斑块内纤维帽变薄和脂质核增大,从而使斑块不稳定并增加破裂风险,可能最终触发心血管事件<sup>[8]</sup>。综上所述,血管炎症参与并促进斑块的发生、发展,是斑块形成和破裂的重要条件和驱动因素,且血管炎症的程度与斑块失稳密切相关。因此,血管炎症的检测和量化对于评估斑块形成、进展至关重要,血管炎症程度是评估斑块状况的重要指标。

**1.2 PCAT 与血管炎症** PCAT 是心外膜脂肪组织中包绕冠状动脉的部分,与心外膜脂肪组织无明确界限,定义为与冠状动脉外壁的径向距离等于动脉直径范围内的脂肪组织<sup>[9]</sup>。PCAT 与冠状动脉之间无筋膜相隔,两者共享微环境,存在双向通讯作用。具体而言,PCAT 不仅能够向冠状动脉管壁分泌生物活性因子,还能接收来自血管壁的炎症信号<sup>[10]</sup>。在肥胖症、糖尿病等病理状态下,PCAT 发生功能失调,触发 AS<sup>[11-13]</sup>。一方面,功能失调的 PCAT 通过旁分泌和血管内分泌途径将促进 AS 的生物活性因子“由外向内”扩散到血管壁,诱导并促进血管炎症,增加斑块形成、发展的风险<sup>[14-15]</sup>。另一方面,处于炎症状态的血管壁释放促炎因子“由内向外”作用于 PCAT,使其表型发生转变,导致 PCAT 下调抗 AS 的生物活性因子的释放,上调促炎因子的释放。这些促炎因子再“由外向内”扩散至血管壁,进一步加剧血管炎症的程度,从而促进斑块的形成、发展<sup>[14-15]</sup>。

综上所述,AS 始于功能失调的 PCAT,炎症信号从 PCAT“由外向内”触发血管壁炎症,再从血管壁“由内向外”促使 PCAT 表型转变、释放更多的促炎因子,促炎因子再经过“由外向内”的路径,进一步加剧血管壁炎症。由此可见,PCAT 与血管壁之间的双向通讯机制是一个复杂的、循环往复的动态过程。在此过程中,血管壁炎症逐渐加剧,驱动并促进斑块的形成、发展,且随着血管炎症的持续增加,斑块逐渐失稳,最终可能导致斑块破裂,甚至引发心血管事件。

## 2 PCAT 测量分析与成像

**2.1 测量分析方法** 血管壁的炎症信号导致 PCAT 的脂肪细胞体积变小和脂质含量减少,在宏观上表现为 PCAT 体积和水、脂含量变化。PCAT 体积因测量存在争议,因此很少使用。PCAT 水、脂含量的变化在 CT 图像上表现为 PCAT 的 CT 值从血管壁向外逐步呈梯度衰减——PCAT CT 衰减。研究发现,PCAT 的水、脂含量会随着血管炎症状态的变化发生动态变化,这种动态变化可由脂肪衰减指数(fat attenuation index, FAI)捕捉到<sup>[16]</sup>。FAI 是校正和加权后的标准化 PCAT 平均 CT 衰减<sup>[17]</sup>。FAI 可检测并量化 PCAT 炎症,是目前使用最广泛的 PCAT 测量方法<sup>[18]</sup>。FAI 值受 CT 成像参数、临床因素等影响,计算 FAI 时需将其考虑在内。近年来,人工智能技术的发展显著改善了 FAI 的影响因素,使其测量 PCAT 的准确性和可靠性得以提升<sup>[19]</sup>。总体而言,FAI 可检测并量化 PCAT 炎症,并以此来动态评估血管炎症,计算时需考虑其影响因素。

血管炎症导致 PCAT 发生的主要变化为炎症、纤维化及微血管重塑<sup>[20-21]</sup>,这些变化需用影像组学检测。影像组学是一种通过从医学影像图像中高通量提取定量特征的方法<sup>[22]</sup>。在 PCAT 影像组学中,FAI 是用于评估 PCAT 炎症的一个重要特征。Oikonomou 等<sup>[23]</sup>利用人工智能将基因与 PCAT 影像组学特征相关联,得到了脂肪影像组学特征(fat radiomic profile, FRP)。该研究发现,FRP 不仅能反映血管炎症状态,还能预测主要不良心血管事件(major adverse cardiovascular events, MACE),其预测能力超过了冠状动脉钙化积分、斑块易损特性等传统风险分层方法。由此可见,PCAT 影像组学的功能较 FAI 更为强大,不仅能够检测血管炎症,还能预测心血管事件。

**2.2 CT 成像技术** PCAT 通常采用冠状动脉的成像方法。目前,PCAT 研究中最常用的成像方法是冠状动脉 CT 血管造影(coronary computed tomography angiography, CCTA)。在改良 CCTA 的研究中,重点主要集中在造影剂和辐射剂量两方面。一方面,为避免造影剂带来的潜在风险及其对 PCAT CT 衰减值的影响,有学者探索用冠状动脉钙化积分(coronary artery calcium score, CACS)序列扫描 PCAT,发现该序列更适合用于 PCAT 体积而非 PCAT CT 衰减分析,而 PCAT 体积目前已很少使用<sup>[24]</sup>。另一方面,为减少 CT 的辐射剂量,有学者探索用低管电压 CT 和光谱 CT,发现低管电压条件下得到的 PCAT CT

衰减值明显降低,但是光谱 CT 通过其特有的虚拟单能量成像技术和材料分解技术,能够减少低管电压对 PCAT CT 衰减值的影响,确保测量结果的准确性<sup>[25-26]</sup>。综上所述,在 PCAT 的各种成像方法中,CCTA 检查应用最广;凭借强大的性能,光谱 CT 在减少辐射剂量时仍能保障 PCAT CT 衰减值测量的准确性;CACS 序列和低管电压 CT 则有待进一步优化以提高 PCAT 测量的准确性。

### 3 PCAT 评估斑块

**3.1 PCAT 评估斑块与预测心血管事件** 动脉粥样硬化斑块是心血管疾病的主要病理基础,能够引发多种心血管事件。在斑块形成、发展的过程中,随着炎症持续,斑块特征逐渐变得复杂。Kwiecinski 等<sup>[27]</sup>根据基本病理和最新临床试验数据提出,心肌梗死(myocardial infarction, MI)等心血管事件的主要风险因素是斑块负荷、高危斑块、斑块活性和斑块内血栓形成。除斑块内血栓形成以外,其余三项 CT 成像均可显示。基于 CT 成像的 PCAT 通过检测血管炎症程度的方法可间接评估斑块状况。需要注意的是,不同位置的 PCAT 反映内容略有不同,三支主要冠状动脉近端 PCAT(PCAT<sub>RCA</sub>、PCAT<sub>LAD</sub> 和 PCAT<sub>LCX</sub>) CT 衰减反映冠状动脉树的炎症;单支冠状动脉近端 PCAT(PCAT<sub>RCA</sub> 或 PCAT<sub>LAD</sub> 或 PCAT<sub>LCX</sub>) CT 衰减反映整条血管的炎症;斑块周围 PCAT CT 衰减则反映斑块这一段血管的炎症<sup>[28]</sup>。

**3.1.1 评估斑块负荷与预测心血管事件** 斑块负荷是指斑块体积在血管中所占的比例,是斑块的定量分析指标之一。在慢性冠状动脉综合征患者的研究中,发现三支主要冠状动脉近端 PCAT CT 衰减与非钙化斑块负荷相关<sup>[29]</sup>。这表明,PCAT CT 衰减可用于评估非钙化斑块负荷。Goeller 等<sup>[30]</sup>用 PCAT CT 衰减评估斑块负荷,发现 PCAT<sub>RCA</sub> CT 衰减值的增长与非钙化斑块负荷的增加相关。这表明,PCAT CT 衰减的动态变化与非钙化斑块负荷的进展相关。由此可见,PCAT 可用于评估非钙化斑块负荷的进展,作为监测斑块负荷的生物影像标记物。

斑块负荷是心血管事件的独立预测因子<sup>[31]</sup>。因此,评估斑块负荷进展对预防心血管事件有重要价值。Chen 等<sup>[32]</sup>用影像组学分析斑块周围 PCAT,发现斑块周围 PCAT CT 衰减可以独立预测非钙化斑块负荷的进展。这表明,PCAT CT 衰减通过评估非钙化斑块负荷的进展,可能成为心血管事件风险的预测指标。进一步的研究证实了这一潜在关联。Tzolos 等<sup>[33]</sup>在多中心 SCOT-HEART 的随访研究中,发现

随访中发生 MI 患者的 PCAT<sub>RCA</sub> CT 衰减值显著增加,低衰减非钙化斑块的负荷也显著进展。这表明,在低衰减非钙化斑块负荷的进展过程中,PCAT<sub>RCA</sub> CT 衰减值与 MI 风险均随之增加。因此,PCAT 可通过评估斑块负荷进展的方法来预估 MI 风险。该研究提出,PCAT<sub>RCA</sub> CT 衰减和低衰减非钙化斑块负荷的进展均能预测 MI,两者组合的预测效能最高。这表明,PCAT 不仅可通过评估非钙化斑块负荷的进展来预测 MI 的风险,还可通过影像组学方法与非钙化斑块负荷相结合,提高 PCAT 的预测效能。综上所述,从斑块负荷这一风险因素来看,PCAT 能够预测心血管事件的风险。

**3.1.2 评估高危斑块与预测心血管事件** 高危斑块是指那些具有较高破裂风险,并可能导致急性心血管事件的斑块。高危斑块又称为易损斑块,评估高危斑块的目的在于识别斑块的易损性。目前,光学相干断层成像(optical coherence tomography, OCT)是识别高危斑块最准确的在体手段,能够准确反映斑块的真实病理特征,与组织学检查结果高度一致<sup>[34]</sup>。OCT 通过薄帽纤维粥样斑块、微通道、斑块破裂等高危斑块特征来识别高危斑块<sup>[34]</sup>。Sugiyama 等<sup>[35]</sup>发现,薄帽纤维粥样斑块、斑块破裂这两种高危斑块特征的存在与三支主要冠状动脉近端 PCAT CT 衰减值的增长相关。更进一步的研究发现,PCAT 影像组学能够识别薄帽纤维粥样斑块和微通道这两种高危斑块特征,且识别结果与 OCT 基本一致<sup>[36]</sup>。上述研究表明,PCAT 与高危斑块特征之间存在相关性,即 PCAT 与斑块易损性相关。这意味着,PCAT 可评估斑块易损性。Zhang 等<sup>[37]</sup>用 PCAT 评估斑块易损性,发现三支主要冠状动脉近端 PCAT FAI 值增加与斑块易损性的进展相关。这表明,PCAT 的动态变化可评估斑块易损性的进展。此外,该研究在随访中还发现,发生 MACE 患者的 FAI 值显著增加,斑块易损性也显著进展。这表明,在斑块易损性进展的过程中,FAI 与 MACE 风险均随之增加。因此,PCAT 可通过评估斑块易损性进展的方法来预估心血管事件的风险。该研究提出,FAI 和斑块易损性的进展均能独立预测 MACE,两者组合的预测效能最高。这表明,PCAT 不仅可通过评估斑块易损性的进展来预测心血管事件的风险,还可通过影像组学方法与高危斑块特征相结合,提高 PCAT 的预测效能。综上所述,从高危斑块这一风险因素来看,PCAT 能够有效预测心血管事件的风险。

**3.1.3 评估斑块活性与预测心血管事件** 患有多支血管冠状动脉疾病或既往有经皮冠状动脉介入



治疗、冠状动脉旁路移植术、MI 病史的患者,大多数已有高危斑块和很高的斑块负荷。因此,对于这些已确诊的晚期冠状动脉疾病患者来说,斑块负荷和高危斑块的评估作用不大,而评估斑块活性更有价值<sup>[38-39]</sup>。活体内的斑块活性可通过<sup>18</sup>F-NaF PET 检查直接检测。Kwiecinski 等<sup>[40]</sup>发现,斑块周围 PCAT CT 衰减与斑块摄取的<sup>18</sup>F-NaF 有关,而 PCAT<sub>RCA</sub> CT 衰减与斑块摄取的<sup>18</sup>F-NaF 无关。这表明,斑块周围 PCAT 可评估斑块活性,而其他位置的 PCAT 则不具备这一功能。

研究发现,在患有多支血管冠状动脉疾病并且近期发生 MI 的患者中,斑块活性增加导致 MI 风险增加 1 倍<sup>[41]</sup>。因此,评估斑块活性对预测心血管事件风险有重要价值。Chen 等<sup>[42]</sup>用影像组学分析 PCAT,发现斑块周围 PCAT 比 PCAT<sub>RCA</sub> 和 PCAT<sub>LAD</sub> 更能有效预测 MACE。分析其原因,可能是斑块周围 PCAT 比 PCAT<sub>RCA</sub>、PCAT<sub>LAD</sub> 能够反映更多斑块状况的信息(包括斑块活性)。进一步的研究证实了这一推测。Liu 等<sup>[43]</sup>在对 2 型糖尿病(type 2 diabetes mellitus, T2DM)患者的随访研究中发现,发生 MACE 患者的斑块周围 PCAT FAI 值显著高于未发生者,而 PCAT<sub>RCA</sub> FAI 值没有显著差异。这表明,在逐步发展为 MACE 的过程中,斑块周围 PCAT 比 PCAT<sub>RCA</sub> 能够反映更多斑块状况的信息(包括斑块活性)。该研究提出,斑块周围 PCAT FAI 升高是 T2DM 患者(包括中度至重度冠状动脉钙化的 T2DM 患者)发生 MACE 的独立预测因素。这表明,对于 T2DM 合并晚期冠状动脉疾病的患者来说,斑块周围 PCAT 可通过评估斑块活性来预测心血管事件的风险。综上所述,从斑块活性这一风险因素来看,斑块周围 PCAT 能够有效预测心血管事件的风险。

**3.2 预测斑块形成** 斑块在冠状动脉管壁内积聚可引起 CAD。因此,预测斑块形成对预防 CAD 有重要价值。Zou 等<sup>[44]</sup>发现,CAD 患者的三支主要冠状动脉近端 PCAT FAI 值高于非 CAD 患者。这表明,PCAT FAI 与斑块形成相关,监测 PCAT 的动态变化有可能预测斑块形成。进一步的研究证实了这一假设。Cheng 等<sup>[45]</sup>对左前降支心肌桥患者进行随访研究,发现心肌桥附近血管上斑块的形成风险与该段血管 PCAT FAI 的动态变化显著相关。这表明,PCAT 的动态变化与斑块的形成风险相关。该研究提出,FAI 可预测 3 年内左前降支心肌桥附近斑块形成的概率。这表明,PCAT 可预测斑块形成的风险。综上所述,监测 PCAT 可预测斑块形成的风险,以便早期发现亚临床 CAD、识别无 CAD 的高危人群。

**3.3 监测斑块变化与评估药效** 斑块进展导致未来发生心血管事件的风险增加,而斑块消退则会降低心血管事件的风险<sup>[46-47]</sup>。因此,监测斑块的动态变化对于早期临床干预以降低心血管事件风险具有重要意义。研究发现,斑块进展与冠状动脉近端 PCAT CT 衰减值增加相关,反之,斑块消退与冠状动脉近端 PCAT CT 衰减值减少相关<sup>[10]</sup>。这表明,PCAT 可监测斑块的动态变化。总体而言,PCAT 可作为监测斑块动态变化的生物影像标记物。

他汀类药物是 CAD 的常用药物,通过减少低密度脂蛋白胆固醇,帮助稳定斑块、减少斑块破裂,从而降低心血管事件的发生率。在他汀类药物治疗的随访研究中,发现非钙化和混合斑块的体积随之减小,斑块周围 PCAT FAI 值也随之降低<sup>[48]</sup>。这表明,PCAT 可通过监测斑块消退的方法来评估 CAD 药物的抗炎疗效。Mátyás 等<sup>[49]</sup>使用斑块周围 PCAT 评估长期大剂量他汀类药物治疗 CAD 的疗效,提出长期大剂量他汀类药物治疗可显著降低 CAD 炎症和斑块易损性。综上所述,从监测斑块变化的角度来说,PCAT 可用于评估 CAD 药物的抗炎疗效。

## 4 结语与展望

随着 CCTA 从解剖学迈入功能诊断的新时代,PCAT 在心血管疾病的研究中受到广泛关注。PCAT 通过量化血管炎症程度,提供了一种全新的斑块评估方法,该方法适用于从斑块形成、发展到治疗的各个阶段。在斑块出现之前,PCAT 能够预测其形成的风险。在 CAD 早期和中期,PCAT 通过评估斑块负荷进展和斑块易损性进展的方法来预测心血管事件的风险。在 CAD 晚期,PCAT 通过评估斑块活性来预测未来再发心血管事件的风险。上述这些预测,其目的是筛查高危患者,为临床医师实施个性化预防和干预措施提供客观依据。不仅如此,PCAT 还能够监测斑块变化,为观察和追踪 CAD 患者的病情变化及药物治疗效果提供客观的量化指标。综上所述,PCAT 评估斑块的能力,对于将靶向治疗定位到适当的患者身上并选择治疗时机至关重要,这可能为心血管疾病的预防和治疗带来革命性的变化。

然而,目前 PCAT 在斑块评估方面还存在一些局限性,限制了其在临床中的应用与普及。首先,FAI 作为 PCAT 重要的密度参数,受到多种因素的影响,其测量值存在一定误差。这种误差使得 FAI 在不同临床环境中评估斑块状况存在不稳定性,导致在多样化临床场景下对斑块状况的评估效果难以进行可靠的比较。虽然人工智能技术在一定程度上

改善了 FAI 的影响因素,但与应用于临床工作尚有一段距离。因此,进一步改善 FAI 影响因素仍然是该领域的重要发展方向。其次,影像组学是 PCAT 的重要测量方法,但不同影像组学模型在评估斑块状况和预测心血管事件的效能方面存在显著差异。这些差异导致了不同研究结果之间的可比性较差,也制约了 PCAT 影像组学在临床中的广泛应用。因此,亟需制定统一的技术标准,以确保各模型在不同平台上的稳定性和适用性。未来,比较并优化各种 PCAT 影像组学模型的性能,仍是该领域的重要研究方向。

未来随着人工智能技术的不断进步和 PCAT 研究的深入,FAI 的影响因素将逐步减少,影像组学的标准化也将得以实现。届时,PCAT 有望广泛应用于冠心病的早期筛查、预防和诊疗工作,推动心血管诊疗的革命性突破,迈入人工智能诊疗的新时代。

#### 【参考文献】

- [1] Nowbar AN, Gitto M, Howard JP, *et al.* Mortality from Ischemic Heart Disease[J]. *Circ Cardiovasc Qual Outcomes*, 2019, 12(6): e005375.
- [2] Oikonomou EK, Desai MY, Marwan M, *et al.* Perivascular Fat Attenuation Index Stratifies Cardiac Risk Associated with High-Risk Plaques in the CRISP-CT Study [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2020, 76(6): 755-757.
- [3] Gao M, Tang M, Ho W, *et al.* Modulating plaque inflammation via targeted mRNA nanoparticles for the treatment of atherosclerosis [J]. *ACS Nano*, 2023, 17(18): 17721-17739.
- [4] 刘晓滢,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.
- [5] 张龙江,乔红艳.冠状动脉 CT——从解剖学迈入功能学的新时代[J]. *医学研究生学报*, 2019, 32(3): 225-229.
- [6] Yu X, Botezatu S, Tzolos E, *et al.* Pericoronary adipose tissue CT attenuation in coronary artery plaque inflammation [J]. *Heart*, 2023, 109(6): 485-493.
- [7] Ajoolabady A, Pratico D, Vinciguerra M, *et al.* Inflammaging: Mechanisms and role in the cardiac and vasculature [J]. *Trends Endocrinol Metab*, 2023, 34(6): 373-387.
- [8] Kinoshita D, Suzuki K, Yuki H, *et al.* Sex-specific association between perivascular inflammation and plaque vulnerability [J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2024, 17(2): e016178.
- [9] Antonopoulos AS, Sanna F, Sabharwal N, *et al.* Detecting Human Coronary Inflammation by Imaging Perivascular Fat [J]. *Sci Transl Med*, 2017, 9(398): eal2658.
- [10] Honold S, Wildauer M, Beyer C, *et al.* Reciprocal communication of pericoronary adipose tissue and coronary atherogenesis [J]. *Eur J Radiol*, 2021, 136: 109531.
- [11] Corvera S, Solivan-Rivera J, Yang Loureiro Z. Angiogenesis in adipose tissue and obesity [J]. *Angiogenesis*, 2022, 25(4): 439-453.
- [12] Marketou M, Lazopoulos G, Kontaraki J, *et al.* PPAR- $\gamma$  gene expression in pericoronary adipose tissue: A focus on obesity [J]. *Hellenic J Cardiol*, 2023, 69: 67-68.
- [13] 庄微,孔娜娜,刘挺松,等.晚期糖基化终末产物受体在波动性高糖致人冠状动脉内皮细胞凋亡中的作用[J]. *医学研究与战创伤救治*, 2024, 37(5): 482-487.
- [14] Goeller M, Achenbach S, Duncker H, *et al.* Imaging of the Pericoronary Adipose Tissue (PCAT) Using Cardiac Computed Tomography: Modern Clinical Implications [J]. *J Thorac Imaging*, 2021, 36(3): 149-161.
- [15] Hillock-Watling C, Gotlieb AI. The pathobiology of perivascular adipose tissue (PVAT), the fourth layer of the blood vessel wall [J]. *Cardiovasc Pathol*, 2022, 61: 107459.
- [16] Xie Y, Jin H, Zeng M, *et al.* Coronary Artery Plaque Imaging [J]. *Curr Atheroscler Rep*, 2017, 19(9): 37.
- [17] 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.
- [18] 周茜洋,唐春香,张龙江,等.残余炎性心血管风险的研究进展[J]. *医学研究生学报*, 2020, 33(7): 760-764.
- [19] Kurata A. Deep learning-based CT noise reduction for perivascular adipose tissue evaluation [J]. *Acad Radiol*, 2024, 31(2): 446-447.
- [20] Crewe C, An YA, Scherer PE. The ominous triad of adipose tissue dysfunction: Inflammation, fibrosis, and impaired angiogenesis [J]. *J Clin Invest*, 2017, 127(1): 74-82.
- [21] Adachi Y, Ueda K, Nomura S, *et al.* Beiging of perivascular adipose tissue regulates its inflammation and vascular remodeling [J]. *Nat Commun*, 2022, 13(1): 5117.
- [22] 王芳,夏雨薇,柴象飞,等.影像组学分析流程及临床应用的研究进展[J]. *中华解剖与临床杂志*, 2021, 26(2): 236-241.
- [23] Oikonomou EK, Williams MC, Kotanidis CP, *et al.* A Novel Machine Learning-Derived Radiotranscriptomic Signature of Perivascular Fat Improves Cardiac Risk Prediction Using Coronary CT angiography [J]. *Eur Heart J*, 2019, 40(43): 3529-3543.
- [24] Almeida S, Pelter M, Shaikh K, *et al.* Feasibility of Measuring Pericoronary Fat from Precontrast Scans: Effect of Iodinated Contrast on Pericoronary Fat Attenuation [J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2020, 14(6): 490-494.
- [25] Chen XJ, Dang YX, Hu H, *et al.* Pericoronary Adipose Tissue Attenuation Assessed by Dual-Layer Spectral Detector Computed Tomography Is a Sensitive Imaging Marker of High-Risk Plaques [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2021, 11(5): 2093-2103.
- [26] Ma R, Ties D, van Assen M, *et al.* Towards reference values of pericoronary adipose tissue attenuation: Impact of coronary artery and tube voltage in coronary computed tomography angiography [J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(12): 6838-6846.
- [27] Kwiecinski J, Tzolos E, Williams MC, *et al.* Noninvasive Coronary Atherosclerotic Plaque Imaging [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2023, 16(12): 1608-1622.
- [28] Tan N, Dey D, Marwick TH, *et al.* Pericoronary Adipose Tissue as a Marker of Cardiovascular Risk: JACC Review Topic of the

- Week[J].*J Am Coll Cardiol*, 2023, 81(9): 913-923.
- [29] Giesen A, Mouselimis D, Weichsel L, *et al.* Pericoronary Adipose Tissue Attenuation Is Associated with Non-Calcified Plaque Burden in Patients with Chronic Coronary Syndromes [J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2023, 17(6): 384-392.
- [30] Goeller M, Tamarappoo B, Kwan A, *et al.* Increased Pericoronary Adipose Tissue Attenuation Is Related To Progression Of Coronary Plaque Burden Quantified From Coronary Ct Angiography [J]. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, 2019, 13(1): S34.
- [31] Yang S, Hoshino M, Koo BK, *et al.* Relationship of plaque features at coronary CT to coronary hemodynamics and cardiovascular events [J]. *Radiology*, 2022, 305(3): 578-587.
- [32] Chen R, Li X, Jia H, *et al.* Radiomics analysis of pericoronary adipose tissue from baseline coronary computed tomography angiography enables prediction of coronary plaque progression [J]. *J Thorac Imaging*, 2024, 39(6): 359-366.
- [33] Tzolos E, Williams MC, McElhinney P, *et al.* Pericoronary adipose tissue attenuation, low-attenuation plaque burden and 5-year risk of myocardial infarction [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2022, 15(6): 1078-1088.
- [34] Araki M, Di Mario C, Guagliumi G, *et al.* Optical coherence tomography in coronary atherosclerosis assessment and intervention [J]. *Nat Rev Cardiol*, 2022, 19(10): 684-703.
- [35] Sugiyama T, Kanaji Y, Hoshino M, *et al.* Relationship between pericoronary adipose tissue attenuation on computed tomography angiography and coronary plaque characteristics on optical coherence tomography [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2020, 75(11, Supplement 1): 1385.
- [36] Kim JN, Gomez-Perez L, Zimin VN, *et al.* Pericoronary Adipose Tissue Radiomics from Coronary Computed Tomography Angiography Identifies Vulnerable Plaques [J]. *Bioengineering (Basel)*, 2023, 10(3): 360.
- [37] Zhang X, Cao Z, Xu J, *et al.* Peri-coronary fat attenuation index combined with high-risk plaque characteristics quantified from coronary computed tomography angiography for risk stratification in new-onset chest pain individuals without acute myocardial infarction [J]. *PLoS One*, 2024, 19(5): e0304137.
- [38] Kwiecinski J, Tzolos E, Adamson PD, *et al.* Coronary  $^{18}\text{F}$ -sodium fluoride uptake predicts outcomes in patients with coronary artery disease [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2020, 75(24): 3061-3074.
- [39] Kwiecinski J, Tzolos E, Meah MN, *et al.* Machine learning with  $^{18}\text{F}$ -sodium fluoride PET and quantitative plaque analysis on CT angiography for the future risk of myocardial infarction [J]. *J Nucl Med Off Publ Soc Nucl Med*, 2022, 63(1): 158-165.
- [40] Kwiecinski J, Dey D, Cadet S, *et al.* Peri-Coronary Adipose Tissue Density Is Associated With  $^{18}\text{F}$ -Sodium Fluoride Coronary Uptake in Stable Patients With High-Risk Plaques [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2019, 12(10): 2000-2010.
- [41] Wang KL, Balmforth C, Meah MN, *et al.* Coronary atherosclerotic plaque activity and risk of myocardial infarction [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2024, 83(22): 2135-2144.
- [42] Chen M, Hao G, Hu S, *et al.* Lesion-specific pericoronary adipose tissue CT attenuation improves risk prediction of major adverse cardiovascular events in coronary artery disease [J]. *Br J Radiol*, 2024, 97(1153): 258-266.
- [43] Liu M, Zhen Y, Shang J, *et al.* The predictive value of lesion-specific pericoronary fat attenuation index for major adverse cardiovascular events in patients with type 2 diabetes [J]. *Cardiovasc Diabetol*, 2024, 23(1): 191.
- [44] Zou L, Xiao X, Jia Y, *et al.* Predicting coronary atherosclerosis heart disease with pericoronary adipose tissue attenuation parameters based on dual-layer spectral detector computed tomography: A preliminary exploration [J]. *Quant Imaging Med Surg*, 2023, 13(5): 2975-2988.
- [45] Cheng S, Ni J, Deng W, *et al.* Diagnostic ability of perivascular fat attenuation index in predicting atherosclerotic plaque formation proximal to myocardial bridging of the left anterior descending artery within 3 years [J]. *Acad Radiol*, 2023, 30(10): 2234-2242.
- [46] Dawson LP, Lum M, Nerleker N, *et al.* Coronary Atherosclerotic Plaque Regression: JACC State-of-the-Art Review [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2022, 79(1): 66-82.
- [47] Libby P. The Changing Landscape of Atherosclerosis [J]. *Nature*, 2021, 592(7855): 524-533.
- [48] Dai X, Yu L, Lu Z, *et al.* Serial change of perivascular fat attenuation index after statin treatment: Insights from a coronary CT angiography follow-up study [J]. *Int J Cardiol*, 2020, 319: 144-149.
- [49] Mátyás BB, Benedek I, Rat N, *et al.* Assessing the impact of long-term high-dose statin treatment on pericoronary inflammation and plaque distribution-a comprehensive coronary CTA follow-up study [J]. *Int J Mol Sci*, 2024, 25(3): 1700.

(收稿日期: 2024-06-30; 修回日期: 2024-08-14)

(责任编辑: 刘玉巧; 英文编辑: 李 麒)