



心外膜脂肪组织的影像学研究进展

张宇, 林祥玲, 聂佩

Advances in Imaging Studies for Assessing Epicardial Adipose Tissue

ZHANG Yu, LIN Xiangling, and NIE Pei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15953/j.ctta.2024.196>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于CCTA的冠状动脉周围脂肪组织影像组学研究进展

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

CT理论与应用研究. 2024, 33(4): 531–538

心外膜脂肪组织体积和定量CT腰椎骨密度及其下腰痛相关性研究

Study on the Correlation between the Volume of Epicardial Adipose Tissue and Lumbar Bone Mineral Density

CT理论与应用研究. 2021, 30(1): 131–138

单位体表面积心外膜脂肪容积与房颤的相关性研究

The Correlation between Epicardial Adipose Tissue Volume Indexed to Body Surface Area and Atrial Fibrillation

CT理论与应用研究. 2020, 29(6): 702–710

心脏CT平扫与CTA定量分析心外膜脂肪体积对比研究

A Comparative Study of Non-contrast Cardiac CT and Coronary CT Angiography in Quantitative Analysis of Epicardial Fat Volume

CT理论与应用研究. 2019, 28(5): 585–591

探讨CT扫描剂量对人工智能检测肺结节效能的影响

To Explore the Effect of CT Scan Dose on the Efficacy of Artificial Intelligence in Detecting Lung Nodules

CT理论与应用研究. 2021, 30(4): 455–465

基于CT和MRI的影像组学在缺血性脑卒中的研究进展

Research Progress in Imaging Radiomics Based on Computed Tomography and Magnetic Resonance in Ischemic Stroke

CT理论与应用研究. 2024, 33(1): 83–89



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张宇, 林祥玲, 聂佩. 心外膜脂肪组织的影像学研究进展[J]. CT 理论与应用研究 (中英文), 2025, 34(1): 1-7. DOI:10.15953/j.ctta.2024.196.
ZHANG Y, LIN X L, NIE P. Advances in Imaging Studies for Assessing Epicardial Adipose Tissue[J]. CT Theory and Applications, 2025, 34(1): 1-7.
DOI:10.15953/j.ctta.2024.196. (in Chinese).

心外膜脂肪组织的影像学研究进展

张宇¹, 林祥玲², 聂佩^{1,2,3✉}

1. 青岛大学医学部, 山东 青岛 266011
2. 日照市中心医院影像科, 山东 日照 276800
3. 青岛大学附属医院放射科, 山东 青岛 266011

摘要: 心外膜脂肪组织 (EAT) 紧邻心肌和冠状动脉, 与冠状动脉疾病、房颤、心衰等多种心血管疾病的发生、发展密切相关。超声、CT、MR、人工智能实现了 EAT 的定量评估, 辅助心血管疾病精准诊断和风险分层。本文主要从 EAT 的解剖和生理功能、与心血管疾病的相关性、多模态影像学研究方面进行综述, 以期为更深入的 EAT 影像和临床研究提供参考。

关键词: 人工智能; 影像; 心外膜脂肪组织; 心血管疾病

DOI:10.15953/j.ctta.2024.196 中图分类号: R 542.1; R 814.42 文献标识码: A

Advances in Imaging Studies for Assessing Epicardial Adipose Tissue

ZHANG Yu¹, LIN Xiangling², NIE Pei^{1,2,3✉}

1. School of Medicine, Qingdao University, Qingdao 266011, China
2. Department of Radiology, Rizhao Central Hospital, Rizhao 276800, China
3. Department of Radiology, The Affiliated Hospital of Qingdao University, Qingdao 266011, China

Abstract: Epicardial adipose tissue (EAT) is situated adjacent to the myocardium and coronary arteries and closely associated with the occurrence and progression of various cardiovascular diseases, including coronary artery disease (CAD), atrial fibrillation (AFib), and heart failure (HF). Ultrasound, computed tomography (CT), magnetic resonance (MR), and artificial intelligence (AI) have enabled the quantitative assessment of EAT, thus aiding in the precision diagnosis and risk stratification of cardiovascular diseases. This review discusses the anatomy and physiological functions of EAT, its correlation with cardiovascular diseases, and current multimodality imaging research with the aim of providing references for further in-depth imaging and future clinical studies of EAT.

Keywords: artificial intelligence (AI); imaging; epicardial adipose tissue; cardiovascular disease

几十年来, 心血管疾病一直是全球死亡的主要原因, 每年影响数百万人。根据《中国心血管健康与疾病报告 2023》的数据, 中国心血管疾病的患病率持续上升, 现患病人数达到 3.3 亿。作为重要的内脏脂肪组织, 心外膜脂肪组织 (epicardial adipose tissue, EAT) 因独特的解剖和生理特征促进了心血管疾病的发生进展, 受到研究者的广泛关注。准确量化 EAT 可以辅助心血管疾病的精准诊断和风险分层, 从而改善患者预后。

影像学在 EAT 定量中发挥重要作用, 本文就 EAT 的解剖和生理功能、与心血管疾病的相关性、多模态影像学研究方面予以综述。

1 心外膜脂肪组织的解剖和生理功能

1.1 解剖特点

心脏相关脂肪组织包括真正的心包脂肪和心包旁脂肪。前者是由位于心肌外壁和心包浆膜脏层之间的 EAT 和位于心包浆膜层的脏层和壁层之间^[1-2]

收稿日期: 2024-09-08。

第一作者: 张宇, 女, 医学影像学专业本科生, E-mail: zy2744209336@163.com。

通信作者: 聂佩[✉], 女, 博士, 副主任医师, 主要从事心血管影像学研究, E-mail: niepei@qdu.edu.cn。

的心包脂肪组成,后者则是位于壁层心包外表面的脂肪。在解剖上 EAT 与心肌和冠状动脉相邻,直接接受冠脉血供,是心脏真正的内脏脂肪组织。

EAT 质量约占心脏总质量的 15%~20%,重约 50g,平均体积约为 55cm³[3],其中直接围绕冠状动脉的 EAT 被称为冠状动脉周围脂肪组织,它与血管壁有复杂的双向相互作用。EAT 在心脏周围的分布不均匀,其中大部分位于心脏基部、心尖、心沟和冠状动脉周围,并且右心室周围比左心室周围厚。

1.2 生理功能

EAT 是位于心肌和内脏心包之间的异位脂肪库[4]。在生理情况下,EAT 发挥以下生理功能。

(1) 机械保护功能。虽然 EAT 在全身脂肪总量的占比不足 1%,与腹部脂肪含量相差甚远,但仍发挥着机械作用,保护冠状动脉免受动脉搏动和心脏收缩引起的扭转[4]。

(2) 产热功能。在新生儿和生命早期,EAT 在形态和功能上与棕色脂肪组织相似,并在 mRNA 和蛋白水平表达解偶联蛋白 1[4],该物质通过破坏线粒体内膜中的质子梯度阻碍 ATP 合成,将势能以热的形式释放出来,因此 EAT 可作为体温过低时的产热源[5],保护心脏及冠状动脉免受低温损伤。

(3) 代谢功能。与其他内脏脂肪组织相比,EAT 具有更强的释放和摄取游离脂肪酸的能力以及更低的葡萄糖利用率。EAT 作为游离脂肪酸的主要来源,能满足心肌的能量需求;还能对抗冠状循环中高水平的游离脂肪酸,保护心肌细胞和血管内皮细胞免受心肌脂肪毒性,从而维持脂肪酸的稳定性。

(4) 分泌功能。EAT 不是惰性组织,EAT 被认为是许多生物活性分子的来源,能够分泌具有抗炎作用的脂联素、IL-10、肾上腺髓质素及网膜素等,这些活性分子通过外分泌和旁分泌作用来调节心肌和冠状动脉的内稳态[4]。

2 心外膜脂肪组织与心血管疾病的相关性

2.1 EAT 与冠状动脉疾病

EAT 在冠状动脉疾病 (coronary artery disease, CAD) 中的作用机制主要包括炎症反应和氧化应激。一方面,EAT 通过参与炎症反应导致 CAD 的发生,包括巨噬细胞、肥大细胞等炎症细胞的浸润以及各

种促炎细胞因子分泌的上调[6]。另一方面,与皮下脂肪组织相比,EAT 可以产生更多的活性氧,较高的氧化应激水平也是 CAD 形成的重要原因。

事实上,这两种机制不是完全独立,而是相互影响的,活性氧水平的增加和抗氧化酶表达的减少也触发了炎症机制的启动。

2.2 EAT 与房颤

EAT 促进房颤发生的机制涉及脂肪浸润、促纤维化和炎症反应等。① 脂肪浸润。EAT 本身可以作为邻近心房脂质渗入的来源,游离脂肪酸也可以从 EAT 转运至心肌导致心肌细胞间连接丧失,导致传导减慢,延迟和折返[6]。② 心房纤维化。被认为是导致房颤的核心机制[7]。EAT 分泌的脂肪因子可以促进心房重构,从而促进心房纤维化,改变了去极化波的传播顺序,最终导致传导异常[4]。③ 炎症反应。EAT 和心肌之间缺乏相应的肌肉筋膜阻隔,这种解剖特点促进了心房壁的炎性浸润;白细胞介素和 TNF 等促纤维化和促炎细胞因子引起传导异质性和心肌电生理改变,影响了离子电流和心肌代谢,进而促进心律失常的发生[8]。

此外,EAT 还通过神经遗传因素、机械作用、氧化应激和心房电生理的重构等病理生理机制参与房颤的发生发展。

值得一提的是,区域 EAT 已成为心房颤动的重要因素。心房周围 EAT 因独特的转录组和分泌组具有不同于其他 EAT 储存库的潜在致心律失常特性[6,9]。

2.3 EAT 与心衰

EAT 通过以下机制参与心衰的发病过程。

① 机械效应。EAT 体积增大时,通过空间挤压效应造成左室舒张功能减退及充盈障碍,引起射血分数保留性心衰。② 神经激素调节。EAT 含有内源性的肾上腺素能和胆碱能神经,是儿茶酚胺的重要来源(包括去甲肾上腺素和肾上腺素),通过过度激活交感神经而引发心衰。在心力衰竭患者中,EAT 中的去甲肾上腺素水平比皮下脂肪组织高 5.6 倍[6]。③ 脂质浸润。过量的 EAT 释放的脂肪酸可能被心肌细胞摄取,引起心肌内异位脂肪沉积,导致心肌细胞结构紊乱、功能受损和细胞凋亡,从而促进心衰的发生发展。④ 细胞因子的分泌。研究[10]发现,EAT 通过分泌补体因子 D 激活聚腺苷二磷酸核糖聚合酶-1 来促进心肌梗死后的心肌细胞凋亡,导致心衰的发生。

3 心外膜脂肪组织的多模态影像学研究

目前 EAT 的成像方法主要包括超声心动图 (echocardiography)、计算机断层扫描 (computed tomography, CT)、磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 等传统成像技术和影像人工智能等新型成像技术, 通过测量 EAT 的厚度、体积和密度等参数实现 EAT 的定量, 辅助心血管疾病的诊断和预后评价。

以上 3 种传统 EAT 成像技术在不同方面上的对比详见表 1。

3.1 超声心动图

超声心动图是一种使用高频声波来评估心脏结构和功能的无创性医学检查技术, 具有低成本、易获取、无辐射及可多次测量等优点, 是测量 EAT 厚度的常用影像学检查方法。通常采用二维经胸超声心动图对舒张末期或收缩末期的右心室游离壁 EAT 厚度进行测量, 在标准胸骨旁左室长轴切面探测心肌和脏层心包之间低回声区得到 EAT 厚度, 参考值约为 5 mm^[3]。

此外, Parisi 等^[11]提出了在 Rindfleisch 褶皱(心包后隐窝)水平处测量 EAT 厚度的新方法, 此方法的优点在于这个区域的壁层心包不直接压迫脂肪组织。另外, 他们在 70 位患者中探究了超声心动图测量的 EAT 厚度与心脏磁共振成像(cardiac magnetic resonance imaging, CMR)评估的 EAT 体积和厚度之间的相关性, 结果显示: 超声心动图测量的 EAT 厚度与 CMR 评估的 EAT 体积之间存在显著的正相关, 相关系数为 0.61(95% CI 0.44 ~ 0.74); 在 Rindfleisch 褶皱处, 两者测量所得 EAT 厚度的一致性相关系数为 0.71(95% CI 0.54 ~ 0.82)。

Chin 等^[12]纳入了 182 例患者, 经胸骨旁长轴切面心脏超声来测量 EAT 厚度, 发现 EAT 厚度增加与左心室舒张末期和左心房容积指数减小相关, 提示 EAT 厚度可能作为肥胖患者心脏功能不全的早

期诊断参数。Verma 等^[13]纳入 500 名患者, 根据冠状动脉造影结果分为 CAD 组和非 CAD 组, 通过超声心动图测量收缩期和舒张期 EAT 厚度, 发现 CAD 组平均收缩期和舒张期 EAT 厚度显著高于非 CAD 组; 此外, 以 5 mm 作为收缩期 EAT 厚度的截断值预测 CAD 的敏感度和特异度分别为 85% 和 70%, 以 4 mm 作为舒张期 EAT 厚度截断值预测 CAD 的敏感度和特异度分别为 83% 和 72%, 提示 CAD 患者中收缩期和舒张期 EAT 厚度均有增加, 收缩期和舒张期 EAT 厚度可作为 CAD 的独立预测因子。Yamaguchi 等^[14]纳入了 202 例同时行经胸和经食管超声心动图检查的患者, 通过经胸超声心动图测量右心室游离壁周围 EAT 厚度, 经食管超声评估左心耳的功能, 包括左心耳排空流速和左心耳口面积, 发现 EAT 增厚与左心耳排空血流速度低有关, 提示 EAT 厚度增加提高了房颤时左心耳血栓的风险, 且当 EAT 厚度 > 5.1 mm 时需要进一步评估患者左心耳功能。

3.2 CT

心脏计算机断层扫描 (computed tomography, CT) 是目前评估 EAT 的主要方法, CT 的优点在于能探测到超声心动图无法探测的深部 EAT, 但存在辐射风险。CT 定量评价 EAT 的主要参数是体积和密度, 其密度阈值通常在 -190 ~ -30 HU 之间。CT 定量评价 EAT 体积方法包括手动、半自动和自动测量, 目前基于 CT 阈值的三维半自动化方法是最常用的方法。

具体方法: ① 确定感兴趣区; ② 在二维的心脏短轴图像上, 机器根据感兴趣区域的 CT 阈值自动将脂肪组织从其他结构中区分出来; ③ 对二维勾画的 EAT 轮廓或者三维图像轮廓进行人工手动校正; ④ 软件将脂肪阈值内的连续体素相加获得总的 EAT 体积。

Oka 等^[15]纳入行心脏 CT 检查的 357 位患者, 以 100 mL 作为 EAT 体积的临界值分为两组, 评估

表 1 3 种 EAT 成像技术的比较
Table 1 Comparison of Three Imaging Techniques for Assessing Epicardial Adipose Tissue (EAT)

项目	超声心动图	CT	MRI
价格	经济	适中	昂贵
EAT 体积测量	否	是	是
局部 EAT 测量	否	是	是
分辨率	中等	高	高
辐射暴露	否	是	否
图像影响因素	操作人员技术	受心率失常、心动过速和钙化影响	心包脂肪干扰
禁忌症	否	否	金属植入物, 肥胖或幽闭恐惧症等禁作

自动计算的 EAT 体积与冠状动脉易损斑块的相关性,发现与 $EAT \leq 100\text{mL}$ 组相比, $EAT > 100\text{mL}$ 组冠状动脉易损斑块发生率高 (59% vs. 74%),提示高 EAT 体积是冠状动脉易损斑块的独立预测因子。Brandt 等^[16]回顾性纳入 128 名疑似 CAD 患者,使用半自动软件定量 EAT 体积,发现 EAT 体积对于病变特异性缺血具有预测价值 (OR: 2.93),EAT 体积可作为 CAD 风险分层的潜在影像标志物,辅助个体化治疗。Stojanovska 等^[17]分析 169 例房颤患者和 62 例对照组的心脏 CT 图像,通过半自动分割脂肪分析软件量化 EAT,发现 EAT 体积与房颤的存在 (OR: 1.01 (95% CI 1.003 ~ 1.03))、房颤的持续性 (OR: 1.008 (95% CI 1.001 ~ 1.020)) 及射频消融术后房颤复发 (OR: 1.009 (95% CI 1.001 ~ 1.01)) 显著相关,提示基于 CT 的 EAT 体积定量可以作为评估房颤患者病情严重程度和预测射频消融治疗效果的独立指标。Yang 等^[18]回顾性纳入 506 例房颤复发患者和 174 例房颤未复发患者,发现左房周围 EAT 密度与房颤复发显著相关 (OR: 1.12 (95% CI 1.02 ~ 1.22)),相关性优于左房周围 EAT 体积,预测的最佳截断值是 -78.45HU ,提示左房周围 EAT 密度是预测房颤消融术后复发的重要因素。

射血分数改善的心力衰竭 (heart failure with improved ejection fraction, HFimpEF) 是一种独特的心衰亚型,其特征是左心室逆向重构和心肌功能恢复。Yang 等^[19]纳入 402 例射血分数降低型心力衰竭患者,通过半自动软件在非增强冠状动脉 CT 造影扫描上量化 EAT 的体积和密度,中位随访 8.6 个月后结果显示:较低的 EAT 体积 (OR: 0.885 (95% CI 0.822 ~ 0.947)) 和较高密度 (OR: 1.845 (95% CI 1.023 ~ 3.437)) 均与 HFimpEF 的发生独立相关,提示针对 EAT 的治疗策略可能对心衰患者心肌恢复产生有益影响。

3.3 MRI

与 CT 类似,CMR 无创并可对 EAT 进行三维测量,被认为是 EAT 定量的金标准^[20]。多种 MRI 序列可用于测量 EAT,包括 T1WI 黑血序列、电影序列、稳态自由进动成像序列等^[21]。此外,研究发现,3D-Dixon 序列通过 MR 同反相位图像之间的体素强度差异来分离脂肪和水信号,是一种可靠的 EAT 定量方法^[22]。

EAT 是位于心肌与脏层心包之间的脂肪信号区域,包括心房周围 EAT 和心室周围 EAT。CMR

的 EAT 定量通常在心脏舒张末期,自心脏基底部至心尖部短轴图像上逐层勾画 EAT 轮廓,获得每个层面的 EAT 面积及厚度,两者相乘得到每层 EAT 体积,进而获得 EAT 总体积及总厚度。此外,将 EAT 体积与脂肪密度相乘可进一步估算 EAT 质量^[23]。

Antonopoulos 等^[24]分析 40 名健康志愿者的心脏脂肪组织和心肌功能的相关性,通过采用 T1WI 黑血序列定量 EAT 总体积,发现心脏脂肪组织 (尤其是 EAT) 的体积与心肌纤维化程度呈正相关,且 EAT 体积指数、心肌纤维化程度与左心室收缩功能减低呈正相关。

Zhao 等^[25]纳入 129 例 ST 段抬高型心肌梗死患者,依次采用多体位自旋回波序列和平衡涡轮场回波电影序列扫描获得 EAT 体积,结果显示发生微血管阻塞的患者的 EAT 体积 ($69.95 \pm 15.42\text{mL}$ vs. $55.10 \pm 10.73\text{mL}$) 和左心室 EAT 体积 ($48.53 \pm 9.920\text{mL}$ vs. $37.20 \pm 7.704\text{mL}$) 均显著大于未发生微血管阻塞患者,初步证明二者存在相关性。而后通过小鼠模型和共培养试验证明 EAT 的过量积累与 ST 段抬高心肌梗死患者微血管阻塞形成独立相关,机制可能是过度积累的 EAT 通过促进心脏巨噬细胞向炎症表型的极化状态加速了微血管阻塞的形成。

Nakamori 等^[26]前瞻性纳入 53 例房颤和 52 例非房颤患者,采用 3D 多回波 Dixon 脂肪-水分离技术测量左房周围 EAT 体积,发现房颤患者左房周围 EAT 体积 (平均 $(28.9 \pm 12.3)\text{mL}$) 显著高于无房颤患者 (平均 $(14.2 \pm 7.3)\text{mL}$),且左房周围 EAT 体积每增加 1mL ,房颤发生几率增加 42% (OR: 1.42 (95% CI 1.23 ~ 1.62)),提示与单纯左房重构相比,基于三维 Dixon 技术的左房周围 EAT 定量对房颤诊断具有增益价值。Van Woerden 等^[27]前瞻性纳入了 105 名心衰患者,采用回顾性门控电影稳态自由进动序列 CMR 成像量化 EAT 体积,发现 EAT 增加与射血分数中间值心衰和射血分数保留心衰患者的不良预后相关。

3.4 影像人工智能

随着人工智能 (artificial intelligence, AI) 技术的快速发展,一些研究者致力于采用深度卷积神经网络对 EAT 进行自动分割和定量。基于 AI 的 EAT 全自动分割方法耗时更短、图像分割更精准。

2018 年,Commandeur 等^[28]提出了一种包含两个多任务卷积神经网络的全新自动化深度学习架构,

基于冠状动脉钙化积分平扫 CT 量化 EAT, 在 250 名无症状患者中自动分割 EAT 的 Dice 指数为 0.823, 相关性为 0.924, 且自动分割 EAT 仅需 26s, 远快于手动分割 (10~11min)。Molnar 等^[29]提出了由两个卷积神经网络组成的用于 CT 平扫的 EAT 自动分割模型, 发现该模型分割 EAT 的平均 Dice 指数为 0.9, 准确度超过 95%。在纳入了 5000 名亚洲混血患者的多中心研究^[30-31]中, 基于 UNet 的 AI EAT 工具在自动量化非对比 CT 中的 EAT 体积上显示出高效率 (每个受试者低于 20s) 和良好的准确性, 其预测 EAT 体积与临床真实值存在强一致性 ($r = 0.99$)。

Rämö 等^[32]纳入了 44725 名参与者进行队列研究, 使用基于 UNet 的深度学习模型在四腔磁共振图像中自动量化 EAT 和心包脂肪的面积, 结果显示心外膜和心包脂肪组织与心力衰竭 (HR: 1.29 (95% CI 1.17~1.43))、2 型糖尿病 (HR: 1.63 (95% CI 1.51~1.76)) 和冠状动脉疾病 (HR: 1.19 (95% CI 1.11~1.28)) 的风险独立相关。但这种关联在考虑到腹部脂肪组织时不再显著, 提示心外膜和心包脂肪组织不仅通过局部或旁分泌途径影响心血管疾病, 而且作为一种不健康的脂肪表型影响全身代谢状态, 参与心血管疾病的发生。

West 等^[33]开发了用于自动量化冠状动脉计算机断层扫描 (coronary computed tomography angiography, CCTA) 中的 EAT 体积的深度学习网络, 在 3720 个 CCTA 扫描中验证的一致性相关系数为 0.970。自动量化的 EAT 体积与冠心病 (OR: 1.13 (95% CI 1.04~1.30)) 和房颤 (OR: 1.25 (95% CI 1.08~1.40)) 相关。此外, 以 169.9cm^3 作为 EAT 体积的截断值, 研究发现高 EAT 体积 ($\geq 169.9\text{cm}^3$) 与较高的前瞻性心肌梗死风险相关 (HR: 1.93 (95% CI: 1.31~4.01)); 以 198.7cm^3 作为 EAT 体积的截断值, 研究发现高 EAT 体积 ($\geq 198.7\text{cm}^3$) 与心脏手术后住院期间房颤的风险增加 (HR: 2.67 (95% CI 1.26~3.73)) 和长期房颤的风险增加 (HR: 2.14 (95% CI 1.19~2.97)) 有关。

Eisenberg 等^[34]纳入了 2068 名无症状受试者, 通过深度学习算法从平扫 CT 中自动测量 EAT 的体积和密度, 发现 EAT 体积与主要不良心血管事件风险增加相关 (HR: 1.35 (95% CI 1.07~1.68)), EAT 密度与其呈负相关 (HR: 0.83 (95% CI 0.72~0.96)), EAT 体积 $\geq 113\text{cm}^3$ 和 EAT 密度 $\leq -77.0\text{HU}$ 是主要不良心血管事件的独立预测因子。Miller 等^[35]纳入了 8781 名来自 4 个中心的患者, 运用改进的基

于深度学习的模型自动从非门控 CT 中自动分割 EAT, 观察 EAT 体积和密度与患者死亡或心肌梗死事件的关系。以 144mL 为 EAT 体积截断值, EAT 体积 $> 144\text{mL}$ 患者死亡或心肌梗死风险更高 (内部测试: (HR: 1.40 (95% CI 1.01~1.94)); 外部测试: (HR: 1.54 (95% CI 1.18~2.00))); 以 -64HU 为 EAT 衰减的截断值, EAT 衰减 $> -64\text{HU}$ 的患者死亡或心肌梗死的风险更高 (内部测试: (HR: 1.61 (95% CI 1.19~2.16)); 外部测试: (HR: 1.37 (95% CI 1.06~1.77)))。AI 在 EAT 自动分割和定量方面展现出强大的潜力和优势。

此外, 通过 AI 方法, 将测量的 EAT 与其他参数相结合 (包括冠状动脉狭窄程度、斑块特征、CT 血流储备分数和冠状动脉周围脂肪组织衰减) 可能改善冠状动脉计算机断层扫描血管造影对心血管风险的整体评估^[9]。但也存在一定的局限性:

① 数据集的来源局限, 导致训练数据的参考标准缺乏多样性和普遍性, 未来可通过多中心、多样化的数据集进行模型训练 (如纳入存在解剖变异的病例), 来提高 AI 模型的泛化性和临床适用性; ② EAT 在自动分割和定量方面的准确率随着体积的增加而降低; ③ 在低剂量扫描中, CT 图像噪声可能影响 EAT 的自动分割和量化的准确性; ④ 尽管深度学习技术在 EAT 量化上取得了进展, 但在某些挑战场景 (如近期心脏手术、冠状动脉重度钙化和成像伪影) 下的性能仍需进一步验证。

4 小结与展望

EAT 与心肌组织及冠状动脉紧密相邻, 与多种心血管疾病的发生和发展密切相关。超声、CT、MR 为 EAT 定量提供了可靠方法。影像 AI 为 EAT 高效、准确评估带来机遇。基于多模态影像的 EAT 定量评估有助于多种心血管疾病的精准诊断和风险分层。然而, 目前影像学评估 EAT 方法的选择和 EAT 体积正常范围尚未达成共识, 影像 AI 模型的可靠性和泛化性不足, 还需进一步探索。

未来可能通过多种影像学技术早期识别 EAT 的变化, 为心血管疾病提供预警, 并开发针对 EAT 的靶点药物和治疗策略, 减缓或逆转心血管疾病的进展, 从而进一步助力患者的个体化医疗。EAT 评估有望成为指导临床决策的重要工具。

参考文献

[1] CHHABRA L, GURUKRIPA KOWLGI N. Cardiac adi-

- pose tissue: Distinction between epicardial and pericardial fat remains important[J]. *International Journal of Cardiology*, 2015, 201: 274-275. DOI:10.1016/j.ijcard.2015.08.068.
- [2] LI C, LIU X, ADHIKARI B K, et al. The role of epicardial adipose tissue dysfunction in cardiovascular diseases: An overview of pathophysiology, evaluation, and management[J]. *Frontiers in Endocrinology*, 2023, 14. DOI:10.3389/fendo.2023.1167952.
- [3] MONTI C B, CODARI M, de CECCO C N, et al. Novel imaging biomarkers: Epicardial adipose tissue evaluation[J]. *The British Journal of Radiology*, 2020, 93 (1113). DOI:10.1259/bjr.20190770.
- [4] DOUKBI E, SOGHOMONIAN A, SENGÈS C, et al. Browning epicardial adipose tissue: Friend or foe?[J]. *Cells*, 2022, 11(6). DOI:10.3390/cells11060991.
- [5] MONTI C B, CODARI M, de CECCO C N, et al. Novel imaging biomarkers: Epicardial adipose tissue evaluation[J]. *British Journal of Radiology*, 2020, 93 (1113): 20190770. DOI:10.1259/bjr.20190770.
- [6] IACOBELLIS G. Epicardial adipose tissue in contemporary cardiology[J]. *Nature Reviews Cardiology*, 2022, 19(9): 593-606. DOI:10.1038/s41569-022-00679-9.
- [7] SAWA Y, MATSUSHITA N, SATO S, et al. Chronic HDAC6 activation induces atrial fibrillation through atrial electrical and structural remodeling in transgenic mice[J]. *International Heart Journal*, 2021, 62(3): 616-626. DOI:10.1536/ihj.20-703.
- [8] WANG Q, XI W, YIN L, et al. Human Epicardial adipose tissue cTGF expression is an independent risk factor for atrial fibrillation and highly associated with atrial fibrosis[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1). DOI:10.1038/s41598-018-21911-y.
- [9] BERMAN D S, LIN A. Artificial intelligence for assessment of epicardial adipose tissue on coronary CT angiography[J]. *Journal of the American College of Cardiology: Cardiovascular Imaging*, 2023, 16(6): 817-819. DOI:10.1016/j.jcmg.2022.12.004.
- [10] HAO S, ZHANG J, PEI Y, et al. Complement factor D derived from epicardial adipose tissue participates in cardiomyocyte apoptosis after myocardial infarction by mediating PARP-1 activity[J]. *Cellular Signalling*, 2023, 101. DOI:10.1016/j.cellsig.2022.110518.
- [11] PARISI V, PETRAGLIA L, FORMISANO R, et al. Validation of the echocardiographic assessment of epicardial adipose tissue thickness at the Rindfleisch fold for the prediction of coronary artery disease[J]. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 2020, 30(1): 99-105. DOI:10.1016/j.numecd.2019.08.007.
- [12] CHIN J F, AGA Y S, ABOU KAMAR S, et al. Association between epicardial adipose tissue and cardiac dysfunction in subjects with severe obesity[J]. *European Journal of Heart Failure*, 2023, 25(11): 1936-1943. DOI:10.1002/ehfj.3011.
- [13] VERMA B, KATYAL D, PATEL A, et al. Relation of systolic and diastolic epicardial adipose tissue thickness with presence and severity of coronary artery disease (The EAT CAD study)[J]. *Journal of Family Medicine and Primary Care*, 2019, 8(4). DOI:10.4103/jfmpe.jfmpe_194_19.
- [14] YAMAGUCHI S, OTAKI Y, TAMARAPPOO B, et al. The association between epicardial adipose tissue thickness around the right ventricular free wall evaluated by transthoracic echocardiography and left atrial appendage function[J]. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*, 2020, 36(4): 585-593. DOI:10.1007/s10554-019-01748-w.
- [15] OKA T, YAMAMOTO H, OHASHI N, et al. Association between epicardial adipose tissue volume and characteristics of non-calcified plaques assessed by coronary computed tomographic angiography[J]. *International Journal of Cardiology*, 2012, 161(1): 45-49. DOI:10.1016/j.ijcard.2011.04.021.
- [16] BRANDT V, DECKER J, SCHÖPF U J, et al. Additive value of epicardial adipose tissue quantification to coronary CT angiography-derived plaque characterization and CT fractional flow reserve for the prediction of lesion-specific ischemia[J]. *European Radiology*, 2022, 32(6): 4243-4252. DOI:10.1007/s00330-021-08481-w.
- [17] STOJANOVSKA J, KAZEROONI E A, SINNO M, et al. Increased epicardial fat is independently associated with the presence and chronicity of atrial fibrillation and radiofrequency ablation outcome[J]. *European Society of Radiology*, 2015, 25: 2298-2309. DOI:10.1007/s00330-015-3643-1.
- [18] YANG M, BAO W, XU Z, et al. Association between epicardial adipose tissue and recurrence of atrial fibrillation after ablation: A propensity score-matched analysis[J]. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*, 2022, 38(8): 1865-1872. DOI:10.1007/s10554-022-02557-4.
- [19] YANG C D, QUAN J W, TAY G P, et al. Epicardial adipose tissue volume and density are associated with heart failure with improved ejection fraction[J]. *Cardiovascular Diabetology*, 2024, 23(1). DOI:10.1186/s12933-024-02376-y.
- [20] MADONNA ROSALINDA M, SCODITTI E, PESCE TELLI IRENE, DE CATERINA RAFFAELE. The epicardial adipose tissue and the coronary arteries dangerous liaisons[J]. *Cardiovascular Research*, 2019. DOI:10.1093/cvr/cvz062/5418532.
- [21] 刘静, 彭礼清. 心外膜脂肪组织定量评价的影像学进展[J]. *心血管病学进展*, 2020, 41(9): 922-925. DOI:10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2020.09.009.
- LIU J, PENG L Q. Quantitative evaluation of epicardial adipose tissue measured by different imaging methods[J]. *Advances in Cardiovascular Diseases*, 2020, 41(9): 922-925. DOI:10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2020.09.

009. (in Chinese).
- [22] SALARI R, BALLARD D H, HOEGGER M J, et al. Fat-only Dixon: How to use it in body MRI[J]. *Abdominal Radiology*, 2022, 47(7): 2527-2544. DOI:10.1007/s00261-022-03546-w.
- [23] 李雁鸣, 沈成兴, 申锬. 心外膜脂肪组织与心血管疾病的研究进展[J]. *中华心血管病杂志*, 2022, 50(7): 723-727. DOI:10.3760/cma.j.cn112148-20220527-00417. LI Y M, SHEN C X, SHEN E. Research progress on the function of epicardial adipose tissue and the association with cardiovascular diseases[J]. *Chinese Journal of Cardiology*, 2022, 50(7): 723-727. DOI:10.3760/cma.j.cn112148-20220527-00417. (in Chinese).
- [24] ANTONOPOULOS A S, ANTONIADES C. Cardiac magnetic resonance imaging of epicardial and intramyocardial adiposity as an early sign of myocardial disease[J]. *Circulation: Cardiovascular Imaging*, 2018, 11(8). DOI:10.1161/circimaging.118.008083.
- [25] ZHAO J, CHENG W, DAI Y, et al. Excessive accumulation of epicardial adipose tissue promotes microvascular obstruction formation after myocardial ischemia/reperfusion through modulating macrophages polarization[J]. *Cardiovascular Diabetology*, 2024, 23(1). DOI:10.1186/s12933-024-02342-8.
- [26] NAKAMORI S, NEZAFAT M, NGO L H, et al. Left atrial epicardial fat volume is associated with atrial fibrillation: A prospective cardiovascular magnetic resonance 3D dixon study[J]. *Journal of the American Heart Association*, 2018, 7(6). DOI:10.1161/jaha.117.008232.
- [27] Van WOERDEN G, Van VELDHUISEN D J, MANINTVELD O C, et al. Epicardial adipose tissue and outcome in heart failure with mid-range and preserved ejection fraction[J]. *Circulation: Heart Failure*, 2022, 15(3). DOI:10.1161/circheartfailure.121.009238.
- [28] COMMANDEUR F, GOELLER M, BETANCUR J, et al. Deep learning for quantification of epicardial and thoracic adipose tissue from non-contrast CT[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2018, 37(8): 1835-1846. DOI:10.1109/tmi.2018.2804799.
- [29] MOLNAR D, ENQVIST O, ULÉN J, et al. Artificial intelligence based automatic quantification of epicardial adipose tissue suitable for large scale population studies[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1). DOI:10.1038/s41598-021-03150-w.
- [30] CHENG N, TAN E W P, LENG S, et al. Performance of ensemble of UNets for epicardial adipose tissue quantification: A multi-center APOLLO study[J]. *European Heart Journal*, 2023, 44(S2). DOI:10.1093/eurheartj/ehad655.1255.
- [31] CHENG N, TAN E W P, LENG S, et al. Machine learning accurately quantifies epicardial adipose tissue from non-contrast CT images in coronary artery disease[J]. *European Heart Journal*, 2023.
- [32] RÄMÖ J T, KANY S, HOU C R, et al. Cardiovascular significance and genetics of epicardial and pericardial adiposity[J]. *The Journal of the American Medical Association: Cardiology*, 2024, 9(5). DOI:10.1001/jamacardio.2024.0080.
- [33] WEST H W, SIDDIQUE M, WILLIAMS M C, et al. Deep-learning for epicardial adipose tissue assessment with computed tomography[J]. *Journal of the American College of Cardiology: Cardiovascular Imaging*, 2023, 16(6): 800-816. DOI:10.1016/j.jcmg.2022.11.018.
- [34] EISENBERG E, MCELHINNEY P A, COMMANDEUR F, et al. Deep learning-based quantification of epicardial adipose tissue volume and attenuation predicts major adverse cardiovascular events in asymptomatic subjects[J]. *Circulation: Cardiovascular Imaging*, 2020, 13(2). DOI:10.1161/circimaging.119.009829.
- [35] MILLER R J H, SHANBHAG A, KILLEKAR A, et al. AI-derived epicardial fat measurements improve cardiovascular risk prediction from myocardial perfusion imaging[J]. *NPJ Digital Medicine*, 2024, 7(1). DOI:10.1038/s41746-024-01020-z.