

多模态影像学评估心房颤动的最新研究进展

牟芝全, 方正*

重庆医科大学附属第二医院放射科, 重庆

收稿日期: 2026年1月1日; 录用日期: 2026年1月26日; 发布日期: 2026年2月4日

摘要

心房颤动(AF)是全球发病率持续攀升的常见心律失常类疾病, 其病理机制复杂, 涉及电、结构及功能重构。目前传统单一成像技术已难以满足精准评估需求, 多模态影像学正通过整合不同影像模态的优势, 成为AF精准管理的核心支撑。本文系统性综述了心脏磁共振成像(CMR)、心脏计算机断层扫描(CCT)、超声心动图(Echo)及核素显像(NI)在AF评估中的最新研究进展并展望了多模态影像与人工智能技术结合之后的发展方向。以期推动AF管理转型, 并为AF的风险分层、治疗指导及预后评估提供更全面的影像学支撑。

关键词

心房颤动, 多模态影像学, 心律失常复发

Multimodal Imaging Evaluation of Atrial Fibrillation: Latest Research Progress

Zhiquan Mou, Zheng Fang*

Department of Radiology, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: January 1, 2026; accepted: January 26, 2026; published: February 4, 2026

Abstract

Atrial fibrillation (AF) is a common arrhythmia with a continuously rising global incidence. Its pathological mechanism involves the complex interaction of electrical, structural, and functional remodeling. Traditional single imaging techniques can no longer meet the needs of precise assessment. Multimodal imaging, by integrating the advantages of different imaging modalities, has become the core support for the precise management of AF. This article systematically reviews the latest research progress of

*通讯作者。

cardiac magnetic resonance imaging (CMR), cardiac computed tomography (CCT), echocardiography (Echo), and radionuclide imaging (NI) in AF assessment, and prospects the development direction of the combination of multimodal imaging and artificial intelligence technology. It is expected to promote the transformation of AF management and provide more comprehensive imaging support for risk stratification, treatment guidance, and prognosis evaluation of AF.

Keywords

Atrial Fibrillation, Multimodal Imaging, Recurrence of Arrhythmia

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

心房颤动(Atrial Fibrillation, AF)作为目前临床最为常见的心律失常疾病,其全球发病率在过去三十年中持续攀升。据最近研究报道,亚太地区 2023 年约有 8000 万 AF 患者,且患病人数仍在不断增加。中国目前作为亚太地区患病率最高的国家之一,其患者基数庞大且死亡率居高不下,这表明 AF 所带来的卒中及心力衰竭等并发症风险在全球范围内仍是一个日益严峻的公共卫生问题[1]。其病理机制涉及电重构(离子通道异常)、结构重构(心房纤维化/脂肪浸润)及功能重构(自主神经失衡)的复杂交互作用[2]。随着影像技术及医疗水平的不断进步,人们已经意识到传统的单一成像方法在 AF 评估中已存在明显局限:心电图无法显示结构性改变,常规超声受限于几何假设和操作者依赖,而单一放射学检查难以捕捉动态功能变化,多模态影像评估亟待成为房颤精准管理的关键支撑。

欧洲心血管影像协会(EACVI)共识强调,多模态成像是解决房颤异质性本质的关键——约 35%的患者表现为纤维化主导型心房心肌病,而 20%属于代谢-炎症亚型(心外膜脂肪放射组学特征阳性)[3]。因此,本综述将从多个角度系统性阐述多模态影像学在房颤评估中的最新进展。

2. 心脏磁共振成像(Cardiac Magnetic Resonance, CMR)

CMR 具有良好的准确性和可重复性,已被公认为评估房颤患者心脏功能及结构的最佳影像学方法。目前已有多种方法测量左心房容积(Left Atrial Volume, LAV)。Simpson 双平面法被视为比较标准的测量方法,然而其操作过于繁琐,最近已有学者提出可用双平面面积长度法(Biplane Area-Length Method, BAL)取代。然而,Maroun 等人[4]对比了 BAL 法和两种新兴的三维 MRI 技术:延迟钆增强(Late Gadolinium Enhancement, LGE-MRI)以及对比增强血管成像(Contrast-Enhanced Magnetic Resonance Angiography, CE-MRA)在测量 LAV 时的差异。结果显示,尽管 BAL 操作简便,但其原理仍然基于 LA 椭圆体形态假设,并不适用于所有房颤患者(尤其是发生结构重构导致左房不规则扩大者),甚至可能影响风险分层,而 LGE-MRI 和 CE-MRA 则能提供更准确的 LAV 评估,且观察者组间差异更低($p = 0.87$)。

近年来,左心房纤维化(Left Atrial Fibrosis, LAF)被认为是 AF 的结果并可反过来促进其发展,因此,准确识别 LAF 对 AF 患者的治疗决策及预后评估具有重要意义。LGE-MRI 技术目前已成为评估左房纤维化的金标准手段。DECAAF I 研究已证实,借助该技术所识别的 LAF 是 AF 患者消融术后复发的独立预测因子(纤维化越重,复发率越高)[5]。而其后续开展的 DECAAF II 研究则引发了更深一步的思考。该研究结果表明:CMR 引导下的肺静脉隔离(PVI)与单纯 PVI 术后比较,两组间患者的复发率并没有显著差异($p = 0.63$)。

[6]。这可能提示在 CMR 引导下针对 LAF 区域进行额外消融, 并不能进一步降低持续性 AF 患者的术后复发概率。这恰恰凸显了当前将 LGE-MRI 应用于临床决策的复杂性: 首先, LGE-MRI 图像质量受多种因素影响, 包括磁场强度、钆对比剂剂量及注射方案、图像采集参数以及后处理中纤维化信号阈值设定缺乏金标准(如全宽半高法 vs. 图像强度比法)等, 这些因素会导致纤维化定量的可重复性和跨中心可比性受限, 并可能影响 DECAAF II 研究中靶点定位的一致性与消融效果; 其次, 纤维化程度的量化方法尚未完全标准化, 目前常用的半定量评估(如犹他分级 I~IV 级)和定量分析(如纤维化容积百分比)均存在一定局限性, 半定量评估过分依赖观察者主观判断并且缺乏标准化图像处理与量化方法, 而定量分析则受分割算法、感兴趣区定义等因素影响, 不同软件的分析结果可能存在偏差; 此外, AF 患者的心房结构重构(如左房扩大、球形化)会导致对比剂分布不均, 从而造成纤维化区域的误判或漏判。最后, LAF 的病理生理复杂性也可能影响 LGE-MRI 的评估效能, 例如纤维化区域分布、纤维化程度与电生理异常的匹配度等, 均可能影响靶向消融的效果, 而目前 LGE-MRI 尚难以精准捕捉这些与临床预后直接相关的细节信息。

心外膜脂肪组织(Epicardial Adipose Tissue, EAT)也可以影响 AF 患者的复发。Chahine 等人[7]搜集了 101 例尚未接受消融术的 AF 患者, 并利用 LGE-MRI、3D Dixon (Three-Dimensional Dixon Technique)及特征追踪技术(Feature Tracking Technique, FT)评估左房纤维化、EAT 及左房应变(左房各应变及应变率参数见表 1)¹: 储库期应变(LASr)、传导期应变(LAScd)、收缩期应变(LASct)。该实验发现左房纤维化与所有应变组分均呈负相关(GLRS: $R = -0.35$; GLCdS: $R = -0.24$; GLCtS: $R = -0.2$), EAT 体积则与传导应变(GLCdS)呈显著负相关($R = -0.453$)并与左心房扩大呈正相关($R = 0.38$), 这一结果提示左房纤维化全面影响储库、传导及收缩功能; 而 EAT 则主要损害传导功能。

如上所述, 传统 MRI 序列已能准确评估 AF 患者的心脏情况, 并用于 AF 的发生、发展、维持及预后等各个方面。近年来, 新兴 CMR 技术进一步拓展了应用场景: 4D Flow MRI 成像技术的出现不仅可以为临床提供更加丰富的血流动力学参数的定量评估, 还可以对房颤患者进行卒中风险分层及治疗后监测[8]。Garcia 等人[9]发现阵发性 AF (Paroxysmal Atrial Fibrillation, PAF)患者左房内的涡流大小受肺静脉流速(负相关)和左房重构(正相关)影响, 这意味着更大的涡流可能更容易发生 LA 内血液淤滞; 同时, Demirkiran 等人[10]研究了血液动能(KE)在反应血流动力学方面的作用, 他们定义了一个新的指标: KE 密度, 即 KE (血液动能)与最大 LA 容积之间的比值, 并认为其可能较单纯 KE 在反映血流动力学损伤方面更为敏感。而在卒中风险分层方面, 一系列研究[9][11]-[13]提示 4D Flow MRI 所提供的左心房(LA)及左心耳(LAA)的血流动力学参数, 如低流速、长 RTDTC (Real-Time Temperature-Controlled Radiofrequency Catheter)、大涡流、低 KE 密度等, 与 CHA2DS2-VASc 评分中度相关。除了 4D Flow MRI 之外, Pezel 等人[14]的研究表明, 在 AF 患者中, 血管舒张剂负荷灌注联合 CMR 是可行的, 且具有良好的区分预后价值, 并且他们利用此技术发现诱导性缺血或 LGE MRI 阳性者发生主要心血管事件(MACE)的风险显著升高($HR = 5.98$ 与 2.61), 阴性患者则预后良好(年事件率 $< 1.2\%$)。

3. 心脏计算机断层扫描(Cardiac Computed Tomography, CCT)

心脏 CT 由于其较高的空间分辨率, 同样能对 AF 患者的心脏结构进行准确评估。在对 AF 患者进行消融术之前, 了解左心房及肺静脉的解剖结构对术中及术后预测复发至关重要。爱媛大学团队[15]首次系统验证 CCT 评估 LA 应变的可行性, 发现 CT LAS (左心房应变)在 98 例 AF 患者中分析成功率达 100%, 显著高于超声心动图(54%), 并且其测量的 GLRS 及 GLCdS 与超声结果高度一致($r = 0.82 \sim 0.88$), 并且其可重复性更佳。此外, 李彩英等人[16]的研究证实肺静脉(Pulmonary Vein, PV)容积量是 AF 复发的独立预

¹左心房应变及应变率参数。

测因子: 当 PVImax (最大 PV 容积指数) > 7.13 ml/m² 时, 复发风险显著增加(OR = 1.244), 尤其在左心房直径(Left Atrial Diameter, LAD)正常的患者中(女性 ≤ 38 mm, 男性 ≤ 40 mm), 其预测价值优于 LA 容积。

左心耳(LAA)的评估在 AF 的诊疗及管理中也尤为关键, 这是由于左心耳血栓的高发生率对 AF 患者的预后造成了极大的威胁。目前的左心耳分类系统(cLAA-CS)将其分成鸡翅型、仙人掌型、花椰菜型和风车型四种类型[17], 但考虑到不同研究对鸡翅型(CW)的定义(如弯曲角度)存在差异, Yaghi 等人[18]尝试了一种新的分类方法(LAA-H/L): 这是一种简化的二分类系统, 将左心耳主叶近端或中段存在锐角折角(<90°)的形态定义为低血栓风险型(LAA-L), 其余形态则定义为高风险型(LAA-H), 与传统分类方法相比, 该方法更简单、更可靠, 且与心源性卒中(OR = 5.4)和不明来源栓塞性卒中风险(OR = 2.8)的相关性更加显著。目前, 传统经食道超声心动图(TEE)仍是评价左心房血栓的金标准, 但其半侵入性限制了临床应用。近年来新兴的 CT 扫描技术, 如延迟增强 CCT (Delayed Enhancement Coronary Computed Tomography, DE-CT)可显著提升

Table 1. Left atrial strain and strain rate parameters
表 1. 左心房应变及应变率参数

参数	英文全称	英文缩写
基本应变参数(左心房三个功能时相)		
左心房储库期应变	Left Atrial Reservoir Strain	LASr
左心房传导期应变	Left Atrial Conduit Strain	LAScd
左心房收缩期应变	Left Atrial Contractile Strain	LASct
左心房周向储库期应变	Left Atrial Circumferential Reservoir Strain	LASrc
左心房周向传导期应变	Left Atrial Circumferential Conduit Strain	LAScdc
左心房周向收缩期应变	Left Atrial Circumferential Contractile Strain	LASctc
基本应变率参数(左心房三个功能时相)		
左心房储库期应变率	Left Atrial Reservoir Strain Rate	SRs/LASRr
左心房传导期应变率	Left Atrial Conduit Strain Rate	SRe/LASRcd
左心房收缩期应变率	Left Atrial Contractile Strain Rate	SRa/LASRct
整体应变参数(Global Strain)		
左心房整体纵向应变	Left Atrial Global Longitudinal Strain	LA-GLS/GLS
左心房整体圆周应变	Left Atrial Global Circumferential Strain	LA-GCS/GCS
左心房整体径向应变	Left Atrial Global Radial Strain	LA-GRS/GRS
三维超声心动图(3D-STI)特有应变参数		
左心房三维整体纵向应变	3D Left Atrial Global Longitudinal Strain	3D-LA-GLS
左心房三维整体圆周应变	3D Left Atrial Global Circumferential Strain	3D-LA-GCS
左心房三维整体径向应变	3D Left Atrial Global Radial Strain	3D-LA-GRS
左心房三维节段性应变	3D Left Atrial Segmental Strain	3D-LA-SS
心脏磁共振(CMR)特有应变参数		
左心房总应变	Left Atrial Total Strain	Es
左心房被动应变	Left Atrial Passive Strain	Ee
左心房主动应变	Left Atrial Active Strain	Ea

对左心耳血栓的诊断效能, 魏凯等人认为[19]: 采用增强联合延迟扫描可将总体特异度从 75.6%提升至 93.9%, 尤其在持续性房颤(Persistent Atrial Fibrillation, PEAf)患者中此效应更为显著(61.4%~93.2%)。同时, Spagnolo 等人[20]则采用 6 分钟延迟扫描, 使阳性预测值从 16%跃升至 100%, 辐射剂量仅增加 $0.45 \text{ mSv} \pm 0.23 \text{ mSv}$ 。更重要的是, CCT 关于心外膜脂肪组织(EAT)的研究目前也有了一定的进展, 一系列研究[21]-[23]已经证实 EAT 体积(V-EAT)的增加及 EAT 在 CT 上衰减值的降低与 AF 复发显著相关。

4. 超声心动图(Echocardiography)

超声心动图检查是每位 AF 患者的首选影像学检查, 用以基础评估心脏结构及功能, 并且其对患者左心房结构重构程度(特别是 LAV)的评价尤为重要。然而, 传统二维超声心动图(Two-Dimensional Echocardiography, 2-DE)在评估非对称性 LA 时存在几何学假设的局限性, 难以全面反映 LA 的复杂重构过程。因此, 以实时三维超声心动图(Real-Time Three-Dimensional Echocardiography, RT-3DE)、斑点追踪成像(Speckle Tracking Imaging, STE)、心内超声心动图(Intracardiac Echocardiography, ICE)等为代表的新技术, 已经成为时下的研究热点和临床应用的突破方向。

4.1. 实时三维超声心动图(RT-3DE)

RT-3DE 通过多平面重建技术实现全容积成像, 无需几何学假设, 可动态获取左心房的最大 LA 容积(LAVmax)、最小 LA 容积(LAVmin)和收缩前 LA 容积(LAVpre)等参数, 并且其测量结果与 CMR 的相关性显著优于传统 2DE, 大大提高了准确性和可重复性。杨珍妮等人[24]进行了一项基于 215 例首次接受 PVI 术的早期 PEAf 患者(持续 7 天~3 个月)的前瞻性研究, 并结合 RT-3DE 的 LA 功能参数(如 LAVmin 等)和 B 型利钠肽(BNP)水平, 构建了预测早期 PAF 消融术后复发的模型(AUC = 0.814, 敏感度 81.8%, 特异度 55.0%, 准确率 77.6%)。此外, RT-3DE 还可基于 LA 容积变化提供其排空功能的定量分析: 左心房总射血分数(LATEF, 反映储库功能)、被动射血分数(LAPEF, 反映管道功能)和主动射血分数(LAAEF, 反映辅泵功能), 且其评估的左心房排空分数(LAEF)在预测 AF 消融术后复发方面具有重要价值。

4.2. 斑点追踪成像(2D/3D-STE)

STE 通过逐帧追踪心肌声学斑点的运动, 无角度依赖性, 可定量评估心肌应变及应变率。根据追踪维度的不同, STE 又可分为二维(2D-STE)和三维(3D-STE)技术。目前, 2D-STE 技术已趋于成熟, 并被广泛用于收集左心房的 LASr、LAScd 及 LASct 等应变参数, Khan 等人[25]的研究发现消融术后 LASct 是 AF 复发的唯一独立预测因子(HR = 0.69, 95% CI: 0.49~0.98), 并且当 LASct $\leq 7.7\%$ 时, 其预测效能最佳(AUC = 0.83, 敏感性 62%, 特异性 85%)。然而, 2D-STE 局限于在二维平面内进行测量、评估, 主要反映的是心肌纤维的纵向应变(Longitudinal Strain)。3D-STE 则是一种融合了三维超声心动图的新技术, 在 2D-STE 基础上, 增加了对周向应变(Circumferential Strain)、区域应变(Area Strain)和三维空间运动的追踪, 能提供更加全面的 LA 形变信息。Bao 等人[26]发现通过 3D-STE 所获得的参数(如 LAVmin、LAEF、主动 LAEF、LASrc、LASctc)能较准确识别 PAF 患者, 并且 LA 周向应变(LASrc, LAScdc, LASctc)分别与对应的功能容积参数(总 LAEF、主动 LAEF 及被动 LAEF)之间存在显著的相关性且该相关性强于纵向应变($r = 0.947$ vs. 0.891), 这表明 LA 的周向形变可能对其整体血流动力学的功能影响更大。此外, 一项队列研究还发现: LA 的应变参数, 包括峰值左心房纵向应变(LA Strain)、左心房收缩期应变率(LA SRs)、左心房舒张早期应变率(LA SRe), 是 AF 患者发生缺血性卒中的强有力的独立预测因子并能提供显著的增量预测价值[27]。

5. 核素显像(Nuclear Imaging)

核素显像通过分子探针可无创评估心肌代谢、炎症和神经支配状态, 为房颤的病理生理机制提供独

特视角。

5.1. 代谢显像(¹⁸F-FDG PET/CT)

一项 Meta 分析显示[28]: 在不符合心脏结节病(Cardiac Sarcoidosis, CS)诊断标准的患者中, 左、右心房 FDG 的摄取与 AF 的发生显著相关。这种关联提示心房代谢异常或炎症参与 AF 的发展并可能成为 AF 风险评估的新指标。Marchandise 等人[29]也支持这一观点, 他们的一项对比研究显示: 相比健康人群, PAF 患者的 LA 和 LAA 的 FDG 摄取显著增高(LAA SUV 均值: 3.5 ± 1.1 vs. 2.5 ± 0.4), 且复律后, LA 和 LAA 的 FDG 摄取显著降低(LA SUV 均值下降 20.4%, LAA 下降 34.1%), 并且此变化独立于左心室代谢, 从而进一步支持了 AF 导致心房代谢需求增加或效率降低的假说。

此外, FDG 摄取的局部增高还可能反映 AF 相关的炎症反应或氧化应激状态, 国际上已认同 ¹⁸F-FDG PET/CT 发现 EAT 的炎症活性与 AF 复发呈正相关。王冰等人[30]开展的一项国内研究进一步佐证了这一观点, 他们发现左心房 EAT 的 FDG SUV_{max} 是 AF 复发的独立危险因素(OR = 2.982, 95% CI: 1.122~7.926), 并整合 V-EAT、LAD 及 LVEF, 构建出预测 AF 复发的多因素模型。

5.2. 交感神经显像(¹²³I-MIBG SPECT/CT)

心脏神经节丛(Cardiac Ganglion Plexus, GP)的异常重构是 AF 发生与维持的关键机制。传统高频刺激(High-Frequency Stimulation, HFS)定位 GP 侵入性强且耗时, 而¹²³I-MIBG SPECT/CT 显像可通过无创方式精确定位 GP。Stirrup 等人[31]的研究表明, ¹²³I-MIBG 显像识别出的左心房离散摄取区(Discrete Uptake Area, DUA)与 HFS 验证的 GP 位置高度一致(81%吻合), 且联合心脏呼吸门控技术后, GP 定位准确性从 49% 提升至 76% (K 值从 0.53 升至 0.64), 显著提高消融效率。此外, ¹²³I-MIBG 洗脱率(Washout Rate, WR)升高是 AF 复发的独立预测因子, 有助于患者危险分层(WR > 25.11, 灵敏度 70.6%, 特异性 70.83%, AUC = 0.712) [32]。

6. 人工智能(AI)结合多模态影像学在房颤评估中的应用

随着多模态影像技术的快速发展, AF 评估已积累了海量的影像数据及临床信息, 传统的单纯人工分析方法难以充分挖掘数据中的潜在价值且可能遗留关键、细节的诊断信息。AI 技术, 尤其是机器学习(ML)和深度学习(DL), 凭借其强大的数据处理和模式识别能力, 已在 AF 影像分析中展现出了巨大的应用潜力, 并正成为推进 AF 精准影像评估转型的关键驱动力[33]。其应用主要聚焦于以下三个方面。

6.1. 基于机器学习的左心房自动分割与参数量化

LA 容积、功能及形态的精准评估是 AF 管理的基石。基于深度学习(特别是 U-Net 及其变体)的自动分割模型, 已在 CMR 和 CCT 两种影像成像技术中展现出了卓越性能。Xiong 等人[34]开发的双全卷积神经网络模型能够通过 LGE-MRI 实现全自动、高精度的 LA、LAA 分割, 并自动导出 LAV、LAEF 及应变等关键参数。这不仅大幅提升了分析效率与标准化程度, 也为后续的高阶分析(如纤维化定量、血流动力学模拟)提供了可靠的解剖基础。Chen 等人[35]开发了一种结合 ResNet50 (用于图像分类)和 U-Net (用于图像分割)的深度学习模型, 用于从二维 CT 图像中自动检测和分割左心房, 并重建三维几何模型。

6.2. 利用影像组学特征预测消融复发

影像组学通过从医学影像中提取高通量的定量特征, 能够全面反映组织的微观结构和病理生理变化。目前影像组学特征结合 ML 算法, 已能够用于构建预测 AF 导管消融术后复发的模型。Hu 等人[36]从自动分割的 EAT 区域中提取了 113 个影像组学特征, 通过随机森林算法筛选出最具预测价值的特征子集,

并构建了逻辑回归、随机森林和支持向量机三种预测模型。此外, 他们还将 EAT 影像组学特征与临床风险因素(年龄、BNP/pro-BNP)及 V-EAT 进行整合构建了联合模型, 在外部验证中取得了较高的预测效能(AUC = 0.790), 并通过 DCA 曲线证实了其临床实用性。

6.3. 多模态数据融合模型的构建

由于 AF 复杂的病理生理机制, 单一模态影像难以全面捕捉 LA 变化, AI 模型正朝着深度融合多模态数据的方向发展。此类模型不仅整合来自多模态影像的组学特征, 还能融合心电图(ECG)、生物标志物(如 BNP/pro-BNP)、基因组学及临床数据等, 以实现更精准的风险分层、消融策略规划和预后预测。Qiu 等人[37]开发了一种基于 Transformer 架构的端到端深度学习框架, 融合了 CCT、MRI、ECG 和临床特征来预测 AF 消融后复发, 研究结果显示, 融合了多模态影像学与临床特征(如 LAD、AF 类型、BMI 等)的模型性能显著提升(AUC = 0.899)。

7. 总结与展望

近年来, 多模态影像学技术在房颤评估领域取得了显著进展。超声心动图(尤其是 2D/3D-STI)和 CMR (LGE-MRI)在评估心房结构和功能以及量化左房纤维化方面持续发挥核心作用, CT 在解剖成像基础上, 通过 LE-CT 拓展了其对心脏组织的表征能力, 而核素显像(^{18}F -FDG PET/CT 和 ^{123}I -MIBG SPECT/CT)从新的视角提供了左心房的代谢、炎症和神经支配信息, 尤其在评估 EAT 炎症活性和交感神经功能方面具有不可替代的价值。未来应进一步验证和优化各项新兴的影像技术(如 LE-CT 及各种核素显像)在房颤评估中的临床应用价值, 并联合人工智能(AI)技术进一步深化影像组学的应用以提升影像分析的自动化、标准化和精准度, 达到能基于多模态影像标志物构建更精准的房颤风险分层和预后复发的预测模型。推动 AF 管理从“经验驱动”转向“数据驱动”, 并最终走向“AI 驱动”的完美转型。

参考文献

- [1] Wong, C.X., Tse, H.F., Choi, E., Chao, T., Inoue, K., Poppe, K., *et al.* (2024) The Burden of Atrial Fibrillation in the Asia-Pacific Region. *Nature Reviews Cardiology*, **21**, 841-843. <https://doi.org/10.1038/s41569-024-01091-1>
- [2] Sade, L.E., Faletra, F.F., Pontone, G., Gerber, B.L.M., Muraru, D., Edvardsen, T., *et al.* (2025) The Role of Multi-Modality Imaging for the Assessment of Left Atrium and Left Atrial Appendage: A Clinical Consensus Statement of the European Association of Cardiovascular Imaging (EACVI), European Heart Rhythm Association (EHRA) of the European Society of Cardiology (ESC). *European Heart Journal—Cardiovascular Imaging*, **26**, 385-413. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jeaf014>
- [3] Donal, E., Lip, G.Y.H., Galderisi, M., Goette, A., Shah, D., Marwan, M., *et al.* (2016) EACVI/EHRA Expert Consensus Document on the Role of Multi-Modality Imaging for the Evaluation of Patients with Atrial Fibrillation. *European Heart Journal—Cardiovascular Imaging*, **17**, 355-383. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jev354>
- [4] Maroun, A., Baraboo, J.J., Gunasekaran, S., Hwang, J.M., Liu, S.Z., Passman, R.S., *et al.* (2023) Comparison of Biplane Area-Length Method and 3D Volume Quantification by Using Cardiac MRI for Assessment of Left Atrial Volume in Atrial Fibrillation. *Radiology: Cardiothoracic Imaging*, **5**, e220133. <https://doi.org/10.1148/ryct.220133>
- [5] Floria, M., Radu, S., Gosav, E.M., Cozma, D., Mitu, O., Ouatu, A., *et al.* (2020) Left Atrial Structural Remodelling in Non-Valvular Atrial Fibrillation: What Have We Learnt from CMR? *Diagnostics*, **10**, Article 137. <https://doi.org/10.3390/diagnostics10030137>
- [6] Marrouche, N.F., Wazni, O., McGann, C., Greene, T., Dean, J.M., Dagher, L., *et al.* (2022) Effect of MRI-Guided Fibrosis Ablation vs Conventional Catheter Ablation on Atrial Arrhythmia Recurrence in Patients with Persistent Atrial Fibrillation: The DECAAF II Randomized Clinical Trial. *JAMA*, **327**, 2296-2305. <https://doi.org/10.1001/jama.2022.8831>
- [7] Chahine, Y., Chamoun, N., Kassab, A., Bockus, L., Macheret, F. and Akoum, N. (2024) Atrial Fibrillation Substrate and Impaired Left Atrial Function: A Cardiac MRI Study. *Europace*, **26**, euae258. <https://doi.org/10.1093/europace/euae258>
- [8] Liao, J., Sun, H., Chen, X., Jiang, Q., Cheng, Y. and Xiao, Y. (2025) Advance in the Application of 4-Dimensional Flow MRI in Atrial Fibrillation. *Magnetic Resonance Imaging*, **115**, Article 110254. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2024.110254>

- [9] Garcia, J., Sheitt, H., Bristow, M.S., Lydell, C., Howarth, A.G., Heydari, B., *et al.* (2019) Left Atrial Vortex Size and Velocity Distributions by 4D Flow MRI in Patients with Paroxysmal Atrial Fibrillation: Associations with Age and CHA₂DS₂-VAsC Risk Score. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, **51**, 871-884. <https://doi.org/10.1002/jmri.26876>
- [10] Demirkiran, A., Amier, R.P., Hofman, M.B.M., van der Geest, R.J., Robbers, L.F.H.J., Hopman, L.H.G.A., *et al.* (2021) Altered Left Atrial 4D Flow Characteristics in Patients with Paroxysmal Atrial Fibrillation in the Absence of Apparent Remodeling. *Scientific Reports*, **11**, Article No. 5965. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85176-8>
- [11] Lee, D.C., Markl, M., Ng, J., Carr, M., Benefield, B., Carr, J.C., *et al.* (2016) Three-Dimensional Left Atrial Blood Flow Characteristics in Patients with Atrial Fibrillation Assessed by 4D Flow CMR. *European Heart Journal—Cardiovascular Imaging*, **17**, 1259-1268. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jev304>
- [12] Costello, B.T., Voskoboinik, A., Qadri, A.M., Rudman, M., Thompson, M.C., Touma, F., *et al.* (2020) Measuring Atrial Stasis during Sinus Rhythm in Patients with Paroxysmal Atrial Fibrillation Using 4 Dimensional Flow Imaging: 4D Flow Imaging of Atrial Stasis. *International Journal of Cardiology*, **315**, 45-50. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2020.05.012>
- [13] Spartera, M., Stracquadanio, A., Pessoa-Amorim, G., Von Ende, A., Fletcher, A., Manley, P., *et al.* (2021) The Impact of Atrial Fibrillation and Stroke Risk Factors on Left Atrial Blood Flow Characteristics. *European Heart Journal—Cardiovascular Imaging*, **23**, 115-123. <https://doi.org/10.1093/ehjci/jeab213>
- [14] Pezel, T., Sanguineti, F., Kinnel, M., Landon, V., Toupin, S., Untersee, T., *et al.* (2021) Feasibility and Prognostic Value of Vasodilator Stress Perfusion CMR in Patients with Atrial Fibrillation. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **14**, 379-389. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2020.07.041>
- [15] Hosokawa, T., Kawakami, H., Tanabe, Y., Yoshida, K., Endo, Y., Tamai, F., *et al.* (2024) Feasibility of Left Atrial Strain Assessment Using Cardiac Computed Tomography in Patients with Paroxysmal Atrial Fibrillation. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*, **40**, 1725-1734. <https://doi.org/10.1007/s10554-024-03162-3>
- [16] Guo, F., Zheng, T., Kou, C. and Li, C. (2024) Cardiac Computed Tomography Angiography-Derived Pulmonary Vein Volumetry as a Predictor for Atrial Fibrillation Recurrence after Catheter Ablation. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, **14**, 2213-2224. <https://doi.org/10.21037/qims-23-1302>
- [17] Di Biase, L., Santangeli, P., Anselmino, M., Mohanty, P., Salvetti, I., Gili, S., *et al.* (2012) Does the Left Atrial Appendage Morphology Correlate with the Risk of Stroke in Patients with Atrial Fibrillation? *Journal of the American College of Cardiology*, **60**, 531-538. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2012.04.032>
- [18] Yaghi, S., Chang, A.D., Akiki, R., Collins, S., Novack, T., Hemendinger, M., *et al.* (2020) The Left Atrial Appendage Morphology Is Associated with Embolic Stroke Subtypes Using a Simple Classification System: A Proof of Concept Study. *Journal of Cardiovascular Computed Tomography*, **14**, 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.jcct.2019.04.005>
- [19] 魏凯, 何柏, 王玺, 等. 冠状动脉 CTA 延迟扫描对心房颤动患者左心耳封堵术前血栓评估的临床价值研究[J]. 中国循证心血管医学杂志, 2023, 15(4): 428-431, 435.
- [20] Spagnolo, P., Giglio, M., Di Marco, D., Cannaò, P.M., Agricola, E., Della Bella, P.E., *et al.* (2020) Diagnosis of Left Atrial Appendage Thrombus in Patients with Atrial Fibrillation: Delayed Contrast-Enhanced Cardiac CT. *European Radiology*, **31**, 1236-1244. <https://doi.org/10.1007/s00330-020-07172-2>
- [21] Hammache, N., Pegorer-Sfes, H., Benali, K., Magnin Poull, I., Olivier, A., Echivard, M., *et al.* (2021) Is There an Association between Epicardial Adipose Tissue and Outcomes after Paroxysmal Atrial Fibrillation Catheter Ablation? *Journal of Clinical Medicine*, **10**, Article 3037. <https://doi.org/10.3390/jcm10143037>
- [22] Momot, K., Krauz, K., Pruc, M., Szarpak, L., Rodkiewicz, D. and Mamcarz, A. (2025) Association between Left Atrial Epicardial Adipose Tissue Attenuation Assessed by Cardiac Computed Tomography and Atrial Fibrillation Recurrence Following Catheter Ablation: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Clinical Medicine*, **14**, Article 4771. <https://doi.org/10.3390/jcm14134771>
- [23] 杨新梅, 景梦园, 张宏瑜, 等. 左心房心外膜脂肪组织体积及 CT 衰减值在房颤射频消融术后复发的预测价值[J]. 中国 CT 和 MRI 杂志, 2025, 23(1): 78-81.
- [24] Yang, Z., Xu, M., Zhang, C., Liu, H., Shao, X., Wang, Y., *et al.* (2021) A Predictive Model Using Left Atrial Function and B-Type Natriuretic Peptide Level in Predicting the Recurrence of Early Persistent Atrial Fibrillation after Radiofrequency Ablation. *Clinical Cardiology*, **44**, 407-414. <https://doi.org/10.1002/clc.23557>
- [25] Khan, H.R., Yakupoglu, H.Y., Kralj-Hans, I., Haldar, S., Bahrami, T., Clague, J., *et al.* (2023) Left Atrial Function Predicts Atrial Arrhythmia Recurrence Following Ablation of Long-Standing Persistent Atrial Fibrillation. *Circulation: Cardiovascular Imaging*, **16**, e015352. <https://doi.org/10.1161/circimaging.123.015352>
- [26] Bao, L., Cheng, L., Gao, X., Yan, F., Fan, H., Shan, Y., *et al.* (2022) Left Atrial Morpho-Functional Remodeling in Atrial Fibrillation Assessed by Three Dimensional Speckle Tracking Echocardiography and Its Value in Atrial Fibrillation Screening. *Cardiovascular Ultrasound*, **20**, Article No. 13. <https://doi.org/10.1186/s12947-022-00282-5>
- [27] Liao, J., Chao, T., Kuo, J., Sung, K., Tsai, J., Lo, C., *et al.* (2020) Global Left Atrial Longitudinal Strain Using 3-Beat Method Improves Risk Prediction of Stroke over Conventional Echocardiography in Atrial Fibrillation. *Circulation: Cardiovascular*

- Imaging*, **13**, e010287. <https://doi.org/10.1161/circimaging.119.010287>
- [28] Kassar, A., Chamoun, N., Haykal, R., Chahine, Y., Babb, M., Al Yasiri, H., *et al.* (2025) Atrial FDG Uptake and Atrial Fibrillation: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Heart Rhythm O2*, **6**, 417-423. <https://doi.org/10.1016/j.hroo.2025.01.002>
 - [29] Marchandise, S., Roelants, V., Raoult, T., Garnir, Q., Scavée, C., Varnavas, V., *et al.* (2024) Left Atrial Glucose Metabolism Evaluation by 18F-FDG-PET in Persistent Atrial Fibrillation and in Sinus Rhythm. *JACC: Basic to Translational Science*, **9**, 459-471. <https://doi.org/10.1016/j.jacbts.2023.11.001>
 - [30] 王冰, 徐依多, 邵山, 等. 18F-FDG PET/CT 测量的左心房内膜脂肪炎症活性与心房颤动的相关性[J]. 中华心血管病杂志, 2021, 49(12): 1213-1219.
 - [31] Stirrup, J., Gregg, S., Baavour, R., Roth, N., Breault, C., Agostini, D., *et al.* (2020) Hybrid Solid-State SPECT/CT Left Atrial Innervation Imaging for Identification of Left Atrial Ganglionated Plexi: Technique and Validation in Patients with Atrial Fibrillation. *Journal of Nuclear Cardiology*, **27**, 1939-1950. <https://doi.org/10.1007/s12350-018-01535-5>
 - [32] Sazonova, S.I., Varlamova, J.V., Nikitin, N.A., Minin, S.M., Kisteneva, I.V., Batalov, R.E., *et al.* (2022) Cardiac 123i-Mibg Scintigraphy for Prediction of Catheter Ablation Outcome in Patients with Atrial Fibrillation. *Journal of Nuclear Cardiology*, **29**, 2220-2231. <https://doi.org/10.1007/s12350-021-02658-y>
 - [33] Isaksen, J.L., Baumert, M., Hermans, A.N.L., Maleckar, M. and Linz, D. (2022) Artificial Intelligence for the Detection, Prediction, and Management of Atrial Fibrillation. *Herzschrittmachertherapie + Elektrophysiologie*, **33**, 34-41. <https://doi.org/10.1007/s00399-022-00839-x>
 - [34] Xiong, Z., Fedorov, V.V., Fu, X., Cheng, E., Macleod, R. and Zhao, J. (2019) Fully Automatic Left Atrium Segmentation from Late Gadolinium Enhanced Magnetic Resonance Imaging Using a Dual Fully Convolutional Neural Network. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, **38**, 515-524. <https://doi.org/10.1109/tmi.2018.2866845>
 - [35] Chen, H., Liu, C., Chang, S., Chang, P.Y., Chen, W., Pan, Y., *et al.* (2020) Automated Extraction of Left Atrial Volumes from Two-Dimensional Computer Tomography Images Using a Deep Learning Technique. *International Journal of Cardiology*, **316**, 272-278. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2020.03.075>
 - [36] Hu, Y., Gao, L., Wang, Q., Chen, J., Jiang, S., Zhou, G., *et al.* (2025) Radiomic Features of Peri-Left Atrial Epicardial Adipose Tissue and Atrial Fibrillation Recurrence after Ablation. *Open Heart*, **12**, e003364. <https://doi.org/10.1136/openhrt-2025-003364>
 - [37] Qiu, Y., Guo, H., Wang, S., Yang, S., Peng, X., Xiayao, D., *et al.* (2024) Deep Learning-Based Multimodal Fusion of the Surface ECG and Clinical Features in Prediction of Atrial Fibrillation Recurrence Following Catheter Ablation. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, **24**, Article No. 225. <https://doi.org/10.1186/s12911-024-02616-x>