

心脏磁共振相关参数在AMI-PCI术后MACE风险评估中的研究进展

谢根源^{1,2}, 谭晓丽², 刘向阳², 杨礼^{2*}

¹吉首大学株洲临床学院, 湖南 吉首

²株洲市中心医院心血管内科, 湖南 株洲

收稿日期: 2026年4月9日; 录用日期: 2026年5月2日; 发布日期: 2026年5月9日

摘要

急性心肌梗死(Acute Myocardial Infarction, AMI)是我国乃至全世界主要的致死性疾病, 具有发病急、进展快、死亡率高等特点。急诊经皮冠状动脉介入治疗(Percutaneous Coronary Intervention, PCI)能及时恢复血运, 但部分患者术后仍发生主要不良心血管事件(Major Adverse Cardiovascular Event, MACE), 精准的风险分层已成为临床管理的核心难题。心脏磁共振(Cardiac Magnetic Resonance, CMR)作为一种多参数、多序列的无创成像技术, 在术后的风险分层中扮演着关键角色。除左心室射血分数等传统心脏结构与功能参数外, CMR的心肌组织特征、心肌应变、灌注及血流动力学等参数被逐步发现可通过反映微循环障碍、心肌损伤及组织重构等机制参与MACE的预测过程。本文重点总结CMR各参数在MACE风险评估中的研究进展, 旨在为探索除传统射血分数之外的精准风险分层策略提供新的思路。

关键词

心脏磁共振, 急性心肌梗死, 经皮冠状动脉介入治疗, 主要不良心血管事件, 风险分层

Research Advances in Cardiac Magnetic Resonance Parameters for Risk Assessment of Major Adverse Cardiovascular Events Following Acute Myocardial Infarction Treated with Percutaneous Coronary Intervention

Genyuan Xie^{1,2}, Xiaoli Tan², Xiangyang Liu², Li Yang^{2*}

*通讯作者。

文章引用: 谢根源, 谭晓丽, 刘向阳, 杨礼. 心脏磁共振相关参数在AMI-PCI术后MACE风险评估中的研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(5): 630-642. DOI: 10.12677/acm.2026.1651855

¹Zhuzhou Clinical College, Jishou University, Jishou Hunan

²Department of Cardiology, Zhuzhou Central Hospital, Zhuzhou Hunan

Received: April 9, 2026; accepted: May 2, 2026; published: May 9, 2026

Abstract

Acute myocardial infarction (AMI) is a leading cause of death in China and worldwide, characterized by sudden onset, rapid progression, and high mortality. Emergency percutaneous coronary intervention (PCI) can promptly restore blood flow; however, some patients still experience major adverse cardiovascular events (MACE) post-procedure, making accurate risk stratification a core challenge in clinical management. Cardiac magnetic resonance (CMR), as a non-invasive imaging technique with multiple parameters and sequences, plays a pivotal role in post-procedural risk stratification. Beyond traditional cardiac structural and functional parameters such as left ventricular ejection fraction, CMR derived parameters including myocardial tissue characterization, myocardial strain, perfusion, and hemodynamics have been increasingly recognized for their role in predicting MACE. These parameters reflect underlying mechanisms such as microcirculatory dysfunction, myocardial injury, and tissue remodeling. This article focuses on summarizing the research progress regarding various CMR parameters in MACE risk assessment, aiming to provide new insights for exploring precise risk stratification strategies beyond traditional ejection fraction.

Keywords

Cardiac Magnetic Resonance, Acute Myocardial Infarction, Percutaneous Coronary Intervention, Major Adverse Cardiovascular Events, Risk Stratification

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

AMI 是全球范围内致死和致残的主要原因之一。PCI 的普及显著降低了 AMI 患者的急性期死亡率，但仍有相当比例的患者在术后发生 MACE，包括心力衰竭、再发心肌梗死和心源性死亡等[1][2]。如何在急性心肌梗死经皮冠状动脉介入治疗(Acute Myocardial Infarction-Percutaneous Coronary Intervention, AMI-PCI)后早期识别高危人群并实施精准干预，已成为心血管领域亟待解决的核心问题。

临床常用的风险评估工具如 TIMI 评分、GRACE 评分，其构成基于临床特征、心电图和酶学等指标，对心肌梗死后的微观病理生理改变、代谢异常及亚临床心功能损害评估有限。在此背景下，CMR 凭借其无创、无电离辐射、高软组织分辨率及多参数成像能力，已成为评估心肌结构与功能的“金标准”。其中，CMR 电影序列有着高重复性、高准确性和高分辨率，心肌和血池的界限清晰，不像超声心动图需要应用几何假设[3]。随着近年来磁共振成像技术的不断发展，从电影序列到特征追踪技术，从延迟强化到 mapping 技术，证实 CMR 在 AMI 后风险分层中的价值正从功能评估向组织定量不断深化。本文旨在系统综述 CMR 各参数在 AMI-PCI 术后 MACE 风险评估中的研究进展，从心脏结构与功能参数、心肌组织特征参数、血流动力学与应变参数以及灌注参数等层面进行逻辑分层，以期为临床实践和未来研究提供参考。

2. 心脏结构与功能参数

2.1. 左心室功能参数

左心室射血分数(Left Ventricular Ejection Fraction, LVEF)是临床评估左心室收缩功能最常用的指标。CMR 电影序列凭借高空间分辨率和清晰的血液 - 心肌对比, 被视为 LVEF 测量的参考标准。多项研究证实 LVEF 降低与 AMI 后 MACE 风险增加密切相关。Hombach 等人发现, 存在微循环阻塞(Microvascular Obstruction, MVO)的患者 MACE 和心室重构的发生率、死亡率均显著高于无 MVO 的患者, 其中, 左心室舒张末期容积、LVEF 和持续性微血管梗阻是 MACE 发生的重要预测因子[4]。另一项研究也得出类似结论: 存在 MVO 的患者更容易出现左心室不良重构和心血管不良事件, 其心功能恢复水平较差[5]。然而, LVEF 的局限性日益受到关注。LVEF 反映的是整体心室收缩功能, 难以识别局部心肌功能异常及弥漫性心肌损伤, 且在射血分数保留的患者中仍存在不可忽视的残余风险。最新的一项纳入 100 例 ST 段抬高型心肌梗死(ST-Segment Elevation Myocardial Infarction, STEMI)患者的研究显示, 事件组(发生 MACE)的 LVEF、每搏输出量及心输出量水平均显著低于非事件组, 但多因素分析中 LVEF 并非最强的独立预测因子[6]。这表明, 在 LVEF 保留的患者中仍有相当比例发生不良心血管事件, 单纯依赖 LVEF 进行风险分层存在盲区。因此, 在 AMI 后的风险评估中, 亟需引入更为敏感的组织学定量参数, 以弥补传统功能指标的不足。

2.2. 左心室容积与质量参数

左心室舒张末期容积(Left Ventricular End-Diastolic Volume, LVEDV)、左心室收缩末期容积(Left Ventricular End-Systolic Volume, LVESV)及左心室心肌质量(Left Ventricular Mass, LVM)是评估左心室重构的核心结构参数。为消除体表面积差异的影响, 常采用指数化处理, 即左心室舒张末期容积指数(Left Ventricular End-Diastolic Volume Index, LVEDVi)、收缩末期容积指数(Left Ventricular End-Systolic Volume Index, LVESVi)及左心室质量指数(Left Ventricular Mass Index, LVMi)。多项研究证实上述参数在 AMI-PCI 术后风险分层中具有重要价值。一方面, MVO 的存在与心室容积改变及功能下降密切相关。研究显示, MVO 阳性组的 LVESV 显著高于 MVO 阴性组, 且 LVEF 显著降低[7]。另一方面, 容积参数的升高直接提示心室不良重构, 与 MACE 风险增加相关。LVEDV 与 LVESV 的增加已被证实与再发心肌梗死、心力衰竭住院等终点事件密切相关[6]。此外, 张静等人发现 LVMi、LVESV、LVEDV、左室收缩末内径(Left Ventricular End-Diastolic Diameter, LVESD)、左室舒张末内径(Left Ventricular End-Systolic Diameter, LVEDD)均是 AMI 患者 PCI 术后并发心力衰竭的影响因素[8]。综上, 左心室容积与质量参数从结构层面反映了 AMI 后心室重构的程度, 是对 LVEF 的重要补充。然而, 上述参数主要反映心室整体结构改变, 难以识别早期、局灶性或弥漫性心肌损伤, 在 LVEF 保留的患者中存在盲区。

3. 心肌组织特征参数

3.1. 延迟强化与梗死面积

延迟强化(Late Gadolinium Enhancement, LGE)是目前评估心肌梗死面积(Infarct Size, IS)和心肌瘢痕的参考标准。其成像原理基于钆对比剂在细胞外间隙的分布动力学: 在不可逆损伤的心肌区域, 心肌细胞膜完整性破坏, 对比剂可进入细胞内间隙, 加之局部微循环障碍导致对比剂清除延迟, 从而在 T1 加权图像上呈现高信号, 形成正常心肌(低信号)与梗死心肌(高信号)的鲜明对比。LGE 所显示的梗死面积通常量化为梗死心肌占左心室体积或者质量的百分比, 是 AMI 预后的重要指标[9]。研究表明, LGE 不仅可用于评估梗死范围, 还可以对 MVO 和心肌内出血(Intramyocardial Hemorrhage, IMH)的检测提供价值, 再通

成功长期的缺血会导致远侧心肌再灌注损伤。在 LGE 图像上, MVO 表现为高强化梗死区域内持续存在的低信号区, 若该低信号区在 T2WI 上亦呈低信号, 则提示 IMH [10]。多项研究证实 IS 与 MACE 风险显著相关。一项纳入 207 例 STEMI 患者的研究显示, IS 预测 PCI 术后 24 个月 MACE 的 ROC 曲线下面积为 0.71, 多因素 Cox 回归显示 IS 是心源性死亡的独立预测因素[2]。另一项研究也显示, 事件组的 IS 值显著增高, IS 预测 12 个月 MACE 的 ROC 曲线下面积为 0.67, 最佳截断值为 14.40%。将 IS 与整体纵向应变(Global Longitudinal Strain, GLS)联合后预测效能进一步提升: 高 IS 合并低 GLS 组的 MACE 事件发生率显著高于其他组别[6]。在冠状动脉非阻塞性心肌梗死(Myocardial Infarction With Non-Obstructive Coronary Arteries, MINOCA)患者中, LGE 的预后价值同样得到证实。多变量 Cox 回归分析显示, LGE 百分比同样被证实是 MACE 的独立预测因子。这一发现进一步拓展了 LGE 在 AMI 不同亚型中预后价值的证据[11]。

3.2. 微循环阻塞

MVO 是指 PCI 术后, 尽管心外膜大血管再通, 但心肌微循环水平仍无复流的现象。欧洲心脏病学会工作组的相关文件指出, MVO 的特征是心肌微血管受损和功能障碍, 其动态演变贯穿心肌梗死发病到修复的全过程[12]。MVO 在 AMI 中的发生机制涉及远端栓塞、缺血相关损伤、再灌注相关损伤和个体易感性四个方面[13]。CMR 是目前评估 MVO 最准确的无创手段。在 LGE 图像上, MVO 表现为高强化梗死区域内持续存在的低信号区。大量循证医学证据证实, MVO 与主要不良心血管事件(MACE)风险显著相关。荟萃分析显示 MVO 是 AMI 患者发生 MACE 的独立预测因素[14]。多项研究进一步证实此结论: 一项前瞻性队列研究的 Cox 回归分析显示 MVO 与 PCI 术后 2 年的 MACE 风险独立相关[7]。另一项小样本量的研究也表明 MVO 是 STEMI 患者 PCI 术后发生不良事件的独立预测因子[15]。值得注意的是, 持续性 MVO 的预后价值更为显著。一项纳入 344 例 STEMI 患者的前瞻性研究发现, 持续性 MVO 是 MACE 的独立强预测因子, 持续性 MVO (6 个月时仍存在)患者的 5 年 MACE 发生率显著高于无 MVO 或仅 1 周存在 MVO 的患者(分别为 66.0% vs 18.8% 和 27.6%), 这一发现提示, MVO 的持续时间可能比其是否存在更为重要, 对临床风险分层具有增量价值[16]。此外, MVO 与左心室收缩和舒张功能不良有关, 进而可导致左心室不良重构, 最终增加 MACE 事件的发生风险[17] [18]。

综上所述, MVO 不仅是 AMI 后微循环损伤的直接体现, 更是预测远期 MACE 和心室重构的强有力独立因子。CMR 对 MVO 的精准识别和动态评估, 为 AMI-PCI 术后患者的早期风险分层和个体化干预提供了关键依据。

3.3. 心肌内出血

IMH 是微循环阻塞的严重形式, 反映了更为广泛和不可逆的微血管损伤。在 CMR 中, IMH 在 LGE 图像上表现为高强化梗死区域内持续存在的低信号区, 若在 T2WI 上亦呈低信号则明确提示 IMH, IMH 的发生与再灌注损伤密切相关, 反映了更严重的心肌微血管损伤[10]。关于 IMH 的危险因素, 研究发现肌酸激酶(Creatine Kinase, CK)、N 末端前脑钠肽(N-terminal pro-brain natriuretic peptide, NT-proBNP)是发生 IMH 的影响因素, 急诊 PCI 术后高 CK、NT-proBNP 峰值对 IMH 病变有预测意义[19]。

大量研究表明, IMH 是 AMI 患者 MACE 的独立危险因素。一项回顾性分析显示, Killip 心功能分级、PCI 前 TIMI 等级、梗死面积、微血管阻塞和心肌内出血为 STEMI 患者出院后 1 年内发生 MACE 的独立危险因素。IMH 组 MACE 发生率为 30.8%, 显著高于无 IMH 组的 12.2%; 全因死亡率分别为 19.1% vs 6.1% [20]。另一项前瞻性研究进一步证实了 IMH 的不良预后价值。在 STEMI 患者中, IMH 组的心肌梗死体积显著高于非 IMH 组, LVEF 显著低于非 IMH 组; 随访至心肌梗死后第 12 个月, IMH 组 MACE

事件发生率显著高于非IMH组[21]。值得注意的是,即使未接受再灌注治疗的STEMI患者也可出现IMH,且发生率与接受再灌注治疗者相当,这一发现提示IMH不仅是再灌注损伤的直接后果,也可能源于心肌梗死自然病程中的自发性再灌注,进一步拓宽了对其病理机制的认识[22]。综上所述,IMH作为MVO的严重亚型,与更差的临床预后及更高的MACE风险紧密相关。CMR对IMH的无创识别,为AMI-PCI术后患者的精准风险分层提供了重要影像学依据。

3.4. CMR 定量成像技术

定量 Mapping 技术通过对心肌组织中不同弛豫时间进行精确量化,实现了对组织特征的客观评估,包括 T1mapping、T2mapping 及 T2*mapping、细胞外容积(Extracellular Volume, ECV)等,这些定量参数能够反映心肌水肿、纤维化、铁沉积等多种病理改变,为心肌梗死后组织损伤程度的精准评估提供了重要手段。

3.4.1. T1mapping 与细胞外容积

T1mapping 在检测 AMI 再灌注后的心肌水肿和纤维化方面表现优异,能在心肌梗死后区分可逆性与不可逆性心肌损伤[23]。其中,初始 T1 值反映细胞内容积和细胞外基质的复合信号,是指未给予对比剂情况下的组织纵向弛豫 T1 值。其升高主要见于心肌水肿、间质增加、纤维化及淀粉样沉积等病理状态。增强后 T1 值则主要反映细胞外间隙的变化,钆对比剂的注入可显著缩短 T1 弛豫时间。而 ECV 是通过测量对比剂注射前后心肌与血液的 T1 值,并结合血细胞比容计算得出的参数,代表心肌细胞外间质占整体心肌组织的容积比值,现已成为评估心肌纤维化的重要定量指标。Yang 等研究表明,ECV 与 AMI 再灌注 3 个月后患者的左室重塑独立相关,优于 T1mapping 测量的初始 T1 值[24]。MVO 是心肌再灌注损伤的一个重要并发症,存在 MVO 的患者 MACE 的发生率显著升高。研究证实,梗死区域的 ECV 水平是 MVO 的独立危险因素。一项与 STEMI 患者的研究显示,TIMI 血流分级、NT-proBNP 峰值、LVEF 及心肌梗死部位 ECV 等是 MVO 的独立危险因素。其中 ECV 预测 MVO 的 ROC 曲线下面积为 0.687 [25]。在预后评估方面,AMI 患者中较高的梗死区域 ECV 可独立预测 MACE 的发生,整体 ECV 同样具有预测价值[26]。此外,ECV 的预后价值已拓展至特殊类型的 AMI 人群。在 MINOCA 中,CMR 衍生的 ECV 同样具有预后价值。“真性”MINOCA 患者的 ECV 水平高于其他病因,校正后的 Cox 模型显示 ECV 是 MACE 的独立预测因子,以 ECV > 28.94%为界值,该类患者的 MACE 风险显著升高[27]。

3.4.2. T2mapping 与 T2*成像

T2mapping 能够对面肌水肿程度进行定量评估。在 MINOCA 患者中,T2mapping 值的异常被确定为 MACE 的独立预测因子[11]。T2*成像主要用于评价组织中的铁沉积,对心肌内出血敏感,在 IMH 区域呈现特征性低信号,可用于评价 PCI 术后再灌注 IMH [21]。在临床应用方面,多项参数的综合评估正日益受到重视。单一参数的评估虽各有价值,但难以全面反映 MVO 的复杂病理生理过程。国外一项关于无对比增强多参数 CMR 的研究,综合评估了 T2mapping、T2*mapping、周向应变、左心室舒张末期容积指数和 LVEF 这五个参数与冠状动脉微血管障碍(Coronary Microvascular Obstruction, CMVO)的相关性,结果提示这五个 CMR 参数的组合能够以高准确性诊断 CMVO。进一步的研究表明,基于这五个 CMR 参数的诊断模型在 CMVO 检测中的 AUC 高达 1.00,显著优于临床参数组合和传统左心室容积与结构参数 [28],这一发现为非增强 CMR 的临床应用提供了有力支持,有望成为风险分层、患者管理和治疗决策的重要工具,同时避免了对比剂相关的肾脏负担,尤其适用于肾功能不全患者。

综上所述,CMR 定量成像技术通过 T1mapping、ECV、T2mapping 等多参数体系,为 AMI-PCI 术后 MACE 的风险评估提供了从组织学到功能学的全面视角。

4. 应变参数与血流动力学参数

4.1. 左心室心肌应变

心肌应变是指心肌在心动周期中的形变能力,包括整体纵向应变、整体周向应变(Global Circumferential Strain, GCS)和整体径向应变(Global Radial Strain, GRS)。心脏磁共振特征追踪技术(Cardiac Magnetic Resonance Feature Tracking, CMR-FT)和心脏磁共振组织追踪技术(Cardiac Magnetic Resonance Tissue Tracking, CMR-TT)均可计算心肌应变参数,前者通过勾画心内膜和心外膜边界以跟踪室壁运动,后者通过建立心肌中层的曲线坐标系来跟踪心肌形变[29]。CMR-FT 基于常规电影序列即可计算应变参数,无需额外扫描,已成为临床应用的主流选择。

GLS 是目前研究最充分、预后价值最明确的应变参数。一项多中心研究发现 GLS 是 AMI 介入术后院内 MACE 的独立预测因子,诊断效能最佳,临界值为-11.9%,当 GLS < -11.9%时 MACE 发生率明显增加,敏感度为 89%,特异度为 82% [30]。另一项有关 STEMI 患者的研究显示,左室整体径向应变峰值、整体环向应变峰值、整体纵向应变峰值均与术后 12 个月 MACE 事件有关,其中 GLS 的曲线下面积最大,诊断价值最高;低 GLS 组的心血管事件发生率显著高于高 GLS 组[6]。Eitel 等人在一项多中心研究进一步证实 GLS 是预测未来心血管事件最强的 CMR-FT 参数,并在校正既定预后标志物后仍是心肌梗死后不良预后的独立预测因子[31]。研究还表明, GLS 的预后价值优于 LVEF 和反映梗死严重程度的 CMR 标志物(IS 和 MVO),并具有增量价值[32]。在 LVEF 保留的患者中,基于 CMR 评估 MVO 和 GLS 的风险预测方法提供了强大的预后价值[33]。有趣的是, GLS 的预后价值在非糖尿病与糖尿病患者中存在差异:在非糖尿病患者中, LVEF 和左心房储存期应变是 MACE 的独立预测因子;而在糖尿病患者中, GLS 是独立预测因子[34]。

GCS 同样与 MACE 密切相关,心肌梗死节段周向应变是 STEMI 患者 PCI 术后出现 MVO 的独立危险因素[35]。与多数研究不同,我国刘丹等人早期研究提示 GCS 预测 STEMI 患者急诊血运重建后心功能改善的敏感性为 76%,特异性为 85%,优于 GLS [36]。最近的多中心研究表明 GCS 是 AMI 介入术后院内 MACE 的独立预测因子,诊断效能次之,敏感度为 78%,特异度为 65% [30]。首次 STEMI 患者中,左心室 GCS 可预测更差的长远期预后,在包含临床、无对比剂及晚期钆增强变量的模型的基础上加入 GCS 具有显著的增量价值[37]。

GRS 的预后价值。一项纳入 309 例 STEMI 患者的研究显示, MVO 组、高 MVO 组的 GLS、GRS、GCS 绝对值分别小于无 MVO 组、低 MVO 组[7]。进一步研究发现,微循环障碍组梗死节段径向应变、梗死节段周向应变及整体周向应变功能均低于无 MVO 组,提示应变参数异常是 STEMI 患者经皮冠状动脉介入治疗术后出现 MVO 的独立危险因素[35]。在长期预后评估方面,也表明 GRS 和 GCS 均对不良预后具有显著预测价值[38]。但相对与 GLS, GRS 的预测效能相对较弱,其独立预后价值及临床实用性仍需更多前瞻性研究加以验证[6]。

综上,现有相关研究均表明心肌应变参数在 PCI 术后的预后评估中占据重要地位,但由于所使用的后处理软件不同,三者对预后的预测价值可能存在差异,此外,不同人群的选择及样本量的差异也可能对结果产生影响。未来需要更大规模、多中心的前瞻性研究来进一步验证和标准化各应变参数的临床应用价值。

4.2. 左心房应变

近年来,左心房功能的预后价值日益受到关注。左心房应变通过 CMR-FT 或 CMR-TT 技术评估,包括储备期应变、管道期应变和助力泵期应变。在 STEMI 患者,校正标准风险指标后,CMR 衍生的左心

房储备应变可独立预测术后的 MACE [39]。一项前瞻性多中心研究结果显示储备应变 $\leq 22\%$ 及管道应变 $\leq 10\%$ 的患者 MACE 风险显著升高；储备应变和管道应变在校正已知危险因素后均为 MACE 的独立预测因子，并在传统结局预测因子基础上提供了递增的预后价值[40]。Min Zhang 等人的研究进一步证实，左心房和左心室纵向应变可显著改善 STEMI 患者的预后分层[41]。在 MINOCA 这类特殊患者中，整体纵向应变和左心房储存期应变仍是 MACE 风险的独立预测因子[42]。上述证据表明，左心房应变参数，尤其是储备期应变，在 AMI 患者预后评估中具有重要价值，可作为左心室参数的补充指标。

4.3. 右心室心肌应变

传统上，AMI 术后风险的研究多聚焦于左心室，然而右心室功能同样具有独立的预后价值。Radwan 等发现右心室应变在预测急性前壁心肌梗死患者预后方面具有一定价值[43]。Antoni 进一步证实右心室面积变化分数和右心室应变与 AMI 患者 2 年内发生全因死亡、再梗死或因心力衰竭再住院等不良事件独立相关[44]。我国的一项研究亦显示，左心室圆周应变联合右心室径向应变能同时降低的患者，其心血管死亡、非致死性心肌梗死、心力衰竭和脑卒中等不良心血管事件的发生率明显高于仅左心室圆周应变降低的患者[45]。上述发现提示，评估 AMI 后右心室功能可为风险分层提供重要的补充信息。值得注意的是，AMI 患者在接受直接 PCI 术后，右心室功能并非稳定不变，多数研究并未动态测量 AMI 患者的右心室心肌应变，对于右心室功能在术后不同时间点的演变规律及其与临床预后的关系，仍缺乏系统性的纵向研究证据。

4.4. 血流定量：4D Flow

目前该技术在 AMI 后风险评估中的直接证据有限，但其在评估心肌梗死以及心衰患者的心室功能和血流动力学方面的潜力值得关注。左心室不良重构是 MACE (心力衰竭、心源性死亡等)的重要替代终点[46][47]。Kamani 等的研究进一步发现，直接血流和梗死面积是 12 个月不良重构的独立预测因子，且其预测效能优于 LVEF 和每搏输出量[48]。然而，目前 4D Flow 在 AMI 预后评估中仍存在明显局限。首先是样本量普遍较小，缺乏大样本、多中心的外部验证；其次是扫描时间较长(8~15 分钟)，对于 AMI 急性期患者耐受性差；第三是后处理复杂、耗时，依赖操作者经验，尚不具备临床常规应用的条件；第四是多数研究以心室重构为终点而非硬终点(心血管死亡、再发心梗等)，4D Flow 参数与硬终点的直接关联证据仍然缺乏。

5. 灌注参数与心外膜脂肪组织

5.1. 磁共振心肌灌注成像

磁共振心肌灌注成像(Magnetic Resonance Myocardial Perfusion Imaging, MRMPI)是一种无创检查技术，可对心肌血流灌注和存活性进行定性和定量评估。基本原理：注射造影剂后，正常心肌组织在首过灌注时现均匀强化，而冠状动脉狭窄或阻塞导致的微循环功能障碍区域则表现为相对低信号(暗区)，从而有助于发现缺血心肌以及提示冠状动脉病变[49]。在预后评估方面，Bethke 等人招募了 198 例接受 MRMPI 的 STEMI 患者，发现早期心脏磁共振首过灌注参数与术后四个月左心室整体功能预后相关，提示 MRMPI 可用于评估 STEMI 患者的远期预后风险[50]。然而，目前 MRMPI 在 AMI 后风险评估中的应用仍面临挑战：一方面，半定量和定量灌注参数的分析尚缺乏标准化流程；另一方面，负荷灌注成像在急性期患者中的安全性及可行性仍需进一步验证。

5.2. 心外膜脂肪组织

心外膜脂肪组织(Epicardial Adipose Tissue, EAT)因其独特的解剖位置：位于心肌表面与脏层心包之

间,与心肌和冠状动脉共享同一微循环,以及活跃的内分泌代谢功能,正逐渐成为冠状动脉疾病风险分层的新靶点。在病理生理上,EAT参与AMI后心肌重塑和微循环障碍的分子机制日益明晰。Hao等的研究揭示,EAT分泌产物通过miR-134-5p/KAT7/MnSOD/过氧化氢酶轴升高细胞内活性氧(Reactive Oxygen Species, ROS)水平,诱发心肌梗死后不良心肌重塑[51],进一步研究发现EAT还通过分泌补体因子D调节多聚腺苷二磷酸核糖聚合酶1(Poly(ADP-ribose) polymerase 1, PARP-1)活性,介导心肌梗死后心肌细胞凋亡[52]。在微循环层面,EAT的过度积累通过促进心脏巨噬细胞向炎症性表型极化,促进MVO的形成。值得关注的是,GLP-1/GLP-2受体双重激动剂可通过靶向EAT预防心肌缺血/再灌注损伤后的MVO,展示了EAT作为治疗靶点的潜力[53]。在临床预后价值上,EAT厚度与AMI患者长期预后密切相关。研究表明EAT>4 mm是5年随访MACE的独立预测因子。EAT厚度作为一种可行、无创、低成本的影像学参数,可为心肌梗死后心肌慢性炎症过程提供重要信息[54]。Toya等利用CMR测量房室间沟冠状动脉周围脂肪组织厚度,显示SIVG对STEMI患者发生MACE有较好的预测能力[55]。我国最新研究证实,室间隔间沟心外膜脂肪指数(Superior Interventricular Groove Epicardial Fat Index, SIVGi)和LVEF是STEMI患者发生MACE的独立预测指标。通过CMR测算SIVGi、LVEF,能够发现MACE高危人群,进而强化干预措施以改善预后[56]。然而EAT的预后价值仍存在争议,Zencirci等发现右心室游离壁脂肪厚度与PCI术后临床预后无关[57]。这一矛盾结果可能源于以下因素:研究人群样本量较小且仅纳入STEMI患者、EAT测量部位不一致、随访时间差异以及不同研究中MACE定义的异质性。此外,EAT厚度测量方法尚缺乏统一标准,不同研究采用舒张末期测量、收缩末期测量或平均值的差异也可能影响结果的可比性。

6. 多参数联合模型与临床风险评分

尽管单一CMR参数(如IS、GLS等)在AMI-PCI术后MACE风险评估中展现出独立预测价值,但其预测效能普遍有限,难以全面反映心肌损伤的复杂性及患者的个体化风险。近年来,研究者开始尝试整合多个CMR参数及临床指标,构建多参数联合模型或风险评分系统,以期实现更精准的风险分层。

一项基于多中心的前瞻性研究构建了列线图模型。该模型整合了LVGLS、左心房主动应变(Left Atrial Active Strain, LAAS)、IS及MVO四个独立预测因子,在训练集与验证集AUC分别为0.90和0.88,显示出良好的区分度与校准度[58]。该研究不仅验证了多参数联合建模的可行性,也提示左心房功能的评估在重构风险预测中具有增量价值。

此外,一项多中心前瞻性注册研究基于再灌注时间、GRACE风险评分、CMR的左心室射血分数及MVO节段数构建了一个简易风险评分系统。该评分将患者分为三组:低风险组(0~2分)MACE发生率为1.96/100人年,中风险组(3~5分)为5.44/100人年,高风险组(6~8分)高达19.7/100人年,实现了对STEMI术后早期MACE风险的有效分层[59]。该评分的优势在于其变量易于获取、计算简便,具有较强的临床可操作性,但其推广仍需外部验证。

随着时代的进步,近年来机器学习(Machine Learning, ML)和深度学习(Deep Learning, DL)模型的引入,进一步提升了多参数整合的预测效能。一项多中心研究发现,整合67个临床及CMR变量的ML模型在外部测试集中预测MACE的AUC达0.91,显著优于传统GRACE评分和TIMI评分[60]。另一项基于多序列CMR的端到端深度学习系统DeepSTEMI,在外部验证中AUC达0.894,识别高危患者的能力远超传统模型[61]。这些研究表明,人工智能方法有望突破传统评分系统的局限,实现自动化的精准分层。

综上,多参数联合模型(包括列线图、风险评分及机器学习模型)在AMI-PCI术后MACE风险评估中展现出显著优于单一参数的预测性能。未来研究应致力于模型的标准化、外部验证及临床转化,以推动个体化治疗及预后评估。

7. 结语与展望

综合现有文献, 心脏磁共振在 AMI-PCI 术后 MACE 风险评估中的价值已得到广泛验证。传统结构功能参数如 LVEF 仍是基础, 但单独使用存在局限, 尤其在梗死后早期可能因代偿而低估风险。心肌组织特征参数(梗死面积、微循环阻塞、心肌内出血)是目前证据最强的预后指标, 其中 MVO 的预测价值尤为突出。心肌应变参数中, GLS 不仅在多中心研究中也证实为独立预测因子, 还提供了超越 LVEF 的预后信息, 且在 LVEF 保留的患者中同样有效。ECV 和 EAT 等新兴指标虽有增量价值, 但证据尚需积累。多参数联合模型和临床风险评分正在提升风险分层的精准度。

当前研究仍存在单中心、回顾性设计居多、参数截断值不统一、后处理方法各异等局限, 且证据多集中于 STEMI 患者。为推动 CMR 从影像诊断工具向临床常规风险分层手段转化, 未来多中心前瞻性研究的开展需从以下维度进行顶层设计以确保数据的可比性与可靠性。第一, 采集协议的标准化。应依据国际心血管磁共振学会指南制定统一的“最小序列采集”(例如必须包含电影序列、T2mapping 或 T2 加权像、LGE 及初始 T1mapping), 并明确关键扫描参数(如层厚、空间分辨率), 尽可能减少不同设备厂商及场强带来的成像偏倚[62]。第二, 建立核心实验室分析机制。所有入组患者的图像数据应交由独立的第三方核心实验室, 采用统一的半自动或全自动后处理软件进行分析, 规避各分中心主观手动勾画导致的观察者差异, 从而确立真正有临床指导意义的截断值。第三, 引入质控与可重复性验证。在正式入组前对分中心图像进行严格质控, 并预设亚组对核心参数(如 GLS、ECV)进行观察者内及观察者间一致性检验。

此外, 未来研究还应关注人工智能技术在 CMR 图像自动分割与特征提取中的应用, 这将极大缩短后处理时间, 解决临床推广的效率瓶颈[61][63]。同时, 将研究对象进一步拓展至 NSTEMI、MINOCA 以及合并糖尿病的特殊人群, 验证现有 CMR 参数的普适性同样至关重要。总体而言, CMR 在 AMI 术后风险评估中已展现出不可替代的独特价值, 随着成像技术的规范化和智能化发展, 其有望实现基于心肌组织特征的个体化精准干预与预后管理。

基金项目

湖南省自然科学基金项目: 2023JJ50220。

参考文献

- [1] Giustino, G., Mehran, R., Dangas, G.D., Kirtane, A.J., Redfors, B., Généreux, P., *et al.* (2017) Characterization of the Average Daily Ischemic and Bleeding Risk after Primary PCI for STEMI. *Journal of the American College of Cardiology*, **70**, 1846-1857. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.08.018>
- [2] 张宝山, 张海军, 陈会校, 等. 心脏磁共振评估急诊经皮冠状动脉介入术后心肌梗死面积对急性 ST 段抬高型心肌梗死患者预后的预测价值[J]. 中国心血管杂志, 2022, 27(6): 531-536.
- [3] Grothues, F., Moon, J.C., Bellenger, N.G., Smith, G.S., Klein, H.U. and Pennell, D.J. (2004) Interstudy Reproducibility of Right Ventricular Volumes, Function, and Mass with Cardiovascular Magnetic Resonance. *American Heart Journal*, **147**, 218-223. <https://doi.org/10.1016/j.ahj.2003.10.005>
- [4] Hombach, V., Grebe, O., Merkle, N., Waldenmaier, S., Höher, M., Kochs, M., *et al.* (2005) Sequelae of Acute Myocardial Infarction Regarding Cardiac Structure and Function and Their Prognostic Significance as Assessed by Magnetic Resonance Imaging. *European Heart Journal*, **26**, 549-557. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehi147>
- [5] Bogaert, J., Kalantzi, M., Rademakers, F.E., Dymarkowski, S. and Janssens, S. (2007) Determinants and Impact of Microvascular Obstruction in Successfully Reperfused ST-Segment Elevation Myocardial Infarction. Assessment by Magnetic Resonance Imaging. *European Radiology*, **17**, 2572-2580. <https://doi.org/10.1007/s00330-007-0627-9>
- [6] 张琳. 心脏磁共振在急性 ST 段抬高型心肌梗死 PCI 术后患者预后评估中的应用价值[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2024.
- [7] 苗浩, 段洋, 裴思雨, 等. 心脏磁共振成像特征追踪获取的心肌应变参数对 ST 段抬高型心肌梗死患者微循环梗

- 阻的预测价值[J]. 中国循环杂志, 2023, 38(7): 734-741.
- [8] 张静, 苏淑红. 心脏 MRI 参数与急性心肌梗死患者 PCI 术后并发心力衰竭的关系分析[J]. 临床医学工程, 2025, 32(2): 195-199.
- [9] Reindl, M., Holzknrecht, M., Tiller, C., Lechner, I., Schiestl, M., Simma, F., *et al.* (2020) Impact of Infarct Location and Size on Clinical Outcome after St-Elevation Myocardial Infarction Treated by Primary Percutaneous Coronary Intervention. *International Journal of Cardiology*, **301**, 14-20. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2019.11.123>
- [10] Ibanez, B., Aletras, A.H., Arai, A.E., Arheden, H., Bax, J., Berry, C., *et al.* (2019) Cardiac MRI Endpoints in Myocardial Infarction Experimental and Clinical Trials: JACC Scientific Expert Panel. *Journal of the American College of Cardiology*, **74**, 238-256. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2019.05.024>
- [11] Bergamaschi, L., Foà, A., Paolisso, P., Renzulli, M., Angeli, F., Fabrizio, M., *et al.* (2024) Prognostic Role of Early Cardiac Magnetic Resonance in Myocardial Infarction with Nonobstructive Coronary Arteries. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **17**, 149-161. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2023.05.016>
- [12] Padro, T., Manfrini, O., Bugiardini, R., Cauty, J., Cenko, E., De Luca, G., *et al.* (2020) ESC Working Group on Coronary Pathophysiology and Microcirculation Position Paper on 'Coronary Microvascular Dysfunction in Cardiovascular Disease'. *Cardiovascular Research*, **116**, 741-755. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvaa003>
- [13] Liu, T., Wang, C., Wang, L., Shi, X., Li, X., Chen, J., *et al.* (2022) Development and Validation of a Clinical and Laboratory-Based Nomogram for Predicting Coronary Microvascular Obstruction in NSTEMI Patients after Primary PCI. *Therapeutics and Clinical Risk Management*, **18**, 155-169. <https://doi.org/10.2147/tcrm.s353199>
- [14] van Kranenburg, M., Magro, M., Thiele, H., de Waha, S., Eitel, I., Cochet, A., *et al.* (2014) Prognostic Value of Microvascular Obstruction and Infarct Size, as Measured by CMR in STEMI Patients. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **7**, 930-939. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2014.05.010>
- [15] 张慧, 王黎, 上官海娟, 等. 基于心脏磁共振评估的冠状动脉微血管阻塞对急性 ST 段抬高型心肌梗死患者急诊经皮冠状动脉介入治疗术后预后的临床研究[J]. 中国介入心脏病学杂志, 2025, 33(6): 327-333.
- [16] Qian, G., Zhang, Y., Ma, Z., Yang, R., A, X., Tian, J., *et al.* (2025) Long-Term Prognostic Role of Persistent Microvascular Obstruction Determined by Cardiac Magnetic Resonance for ST-Segment Elevation Myocardial Infarction. *American Heart Journal*, **290**, 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.ahj.2025.05.016>
- [17] Lombardo, A., Niccoli, G., Natale, L., Bernardini, A., Cosentino, N., Bonomo, L., *et al.* (2012) Impact of Microvascular Obstruction and Infarct Size on Left Ventricular Remodeling in Reperfused Myocardial Infarction: A Contrast-Enhanced Cardiac Magnetic Resonance Imaging Study. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*, **28**, 835-842. <https://doi.org/10.1007/s10554-011-9901-7>
- [18] Bodi, V., Monmeneu, J.V., Ortiz-Perez, J.T., Lopez-Lereu, M.P., Bonanad, C., Husser, O., *et al.* (2016) Prediction of Reverse Remodeling at Cardiac MR Imaging Soon after First ST-Segment-Elevation Myocardial Infarction: Results of a Large Prospective Registry. *Radiology*, **278**, 54-63. <https://doi.org/10.1148/radiol.2015142674>
- [19] 李浩然, 陈雪瑾, 祁春梅. 急性心肌梗死病人经急诊 PCI 治疗后发生心肌内出血的危险因素[J]. 中西医结合心脑血管病杂志, 2022, 20(14): 2623-2627.
- [20] 赵世明, 范蒙蒙. 急诊经皮冠脉介入术后心肌内出血对 ST 段抬高型心肌梗死预后的影响[J]. 安徽医药, 2022, 26(6): 1218-1221.
- [21] 吴志坚. 急性心肌梗死后心肌内出血的危险因素及预后研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2024.
- [22] Li, M., Wu, Z., Tudahun, I. and Zhang, K. (2025) Intramyocardial Hemorrhage in Patients with Acute Myocardial Infarction without Reperfusion Therapy: A Prospective Study. *International Journal of General Medicine*, **18**, 1393-1401. <https://doi.org/10.2147/ijgm.s501504>
- [23] Liu, D., Borlotti, A., Viliiani, D., Jerosch-Herold, M., Alkhalil, M., De Maria, G.L., *et al.* (2017) CMR Native T1 Mapping Allows Differentiation of Reversible versus Irreversible Myocardial Damage in ST-Segment-Elevation Myocardial Infarction: An OxAMI Study (Oxford Acute Myocardial Infarction). *Circulation: Cardiovascular Imaging*, **10**, e005986. <https://doi.org/10.1161/circimaging.116.005986>
- [24] Yang, M., He, Y., Ma, M., Zhao, Q., Xu, H., Xia, C., *et al.* (2021) Characterization of Infarcted Myocardium by T1-Mapping and Its Association with Left Ventricular Remodeling. *European Journal of Radiology*, **137**, Article 109590. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2021.109590>
- [25] 张泽青, 陈晴, 赵新亮, 等. 心脏磁共振获取的细胞外容积(ECV)与微循环障碍(MVO)有关[J]. 中国循证心血管医学杂志, 2024, 16(9): 1075-1079.
- [26] Ishiyama, M., Kurita, T., Nakamura, S., Omori, T., Nakamori, S., Ishida, M., *et al.* (2021) Prognostic Importance of Acute Phase Extracellular Volume Evaluated by Cardiac Magnetic Resonance Imaging for Patients with Acute Myocardial Infarction. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*, **37**, 3285-3297. <https://doi.org/10.1007/s10554-021-02321-0>

- [27] Chen, L., Ge, L., Abdu, F.A., Du, X., Liu, J., Chen, W., *et al.* (2025) Prognostic Value of CMR-Derived Extracellular Volume in Myocardial Infarction with Non-Obstructive Coronary Arteries. *International Journal of Cardiology*, **437**, Article 133528. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2025.133528>
- [28] Arai, H., Kawakubo, M., Triadyaksa, P., Wibowo, A., Sanui, K., Nishimura, H., *et al.* (2025) Non-Contrast-Enhanced Multiparametric Cardiac Magnetic Resonance Reveals Coronary Microvascular Functional and Structural Obstruction after Percutaneous Coronary Intervention. *European Radiology*, **35**, 5581-5593. <https://doi.org/10.1007/s00330-025-11496-2>
- [29] Nazir, S.A., Shetye, A.M., Khan, J.N., Singh, A., Arnold, J.R., Squire, I., *et al.* (2020) Inter-Study Repeatability of Circumferential Strain and Diastolic Strain Rate by CMR Tagging, Feature Tracking and Tissue Tracking in ST-Segment Elevation Myocardial Infarction. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*, **36**, 1133-1146. <https://doi.org/10.1007/s10554-020-01806-8>
- [30] 张宇, 卢璐, 徐俊伟, 等. 心脏磁共振特征追踪技术对急性心肌梗死介入术后院内 MACE 预后价值的多中心研究[J]. 磁共振成像, 2023, 14(5): 123-131.
- [31] Eitel, I., Stiermaier, T., Lange, T., Rommel, K., Koschalka, A., Kowallick, J.T., *et al.* (2018) Cardiac Magnetic Resonance Myocardial Feature Tracking for Optimized Prediction of Cardiovascular Events Following Myocardial Infarction. *JACC: Cardiovascular Imaging*, **11**, 1433-1444. <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2017.11.034>
- [32] Reindl, M., Tiller, C., Holzknicht, M., Lechner, I., Beck, A., Plappert, D., *et al.* (2019) Prognostic Implications of Global Longitudinal Strain by Feature-Tracking Cardiac Magnetic Resonance in ST-Elevation Myocardial Infarction. *Circulation: Cardiovascular Imaging*, **12**, e009404. <https://doi.org/10.1161/circimaging.119.009404>
- [33] Reindl, M., Stiermaier, T., Lechner, I., Tiller, C., Holzknicht, M., Mayr, A., *et al.* (2021) Cardiac Magnetic Resonance Imaging Improves Prognostic Stratification of Patients with ST-Elevation Myocardial Infarction and Preserved Ejection Fraction. *European Heart Journal Open*, **1**, oeab033. <https://doi.org/10.1093/ehjopen/oeab033>
- [34] Backhaus, S.J., Kowallick, J.T., Stiermaier, T., Lange, T., Navarra, J., Koschalka, A., *et al.* (2020) Cardiac Magnetic Resonance Myocardial Feature Tracking for Optimized Risk Assessment after Acute Myocardial Infarction in Patients with Type 2 Diabetes. *Diabetes*, **69**, 1540-1548. <https://doi.org/10.2337/db20-0001>
- [35] 丁丝雨, 丁斌, 宋禧龙, 等. 微循环障碍与急性心肌梗死患者梗死面积、心肌应变及临床预后的相关性分析[J]. 分子影像学杂志, 2023, 46(6): 1001-1008.
- [36] 刘丹, 顾佳宁, 韩凯月, 等. 心脏核磁共振参数预测 ST 段抬高型心肌梗死患者急诊血运重建后心功能改善的价值[J]. 国际心血管病杂志, 2021, 48(3): 184-188.
- [37] Nucifora, G., Muser, D., Tioni, C., Shah, R. and Selvanayagam, J.B. (2018) Prognostic Value of Myocardial Deformation Imaging by Cardiac Magnetic Resonance Feature-Tracking in Patients with a First ST-Segment Elevation Myocardial Infarction. *International Journal of Cardiology*, **271**, 387-391. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2018.05.082>
- [38] 王仁学, 杨永强, 马振岩, 等. 基于心脏磁共振成像的整体纵向应变对急性 ST 段抬高型心肌梗死后长期预后的预测价值[J]. 临床心血管病杂志, 2025, 41(7): 541-547.
- [39] Nayyar, D., Nguyen, T., Pathan, F., Vo, G., Richards, D., Thomas, L., *et al.* (2021) Cardiac Magnetic Resonance Derived Left Atrial Strain after ST-Elevation Myocardial Infarction: An Independent Prognostic Indicator. *Cardiovascular Diagnosis and Therapy*, **11**, 383-393. <https://doi.org/10.21037/cdt-20-879>
- [40] Leng, S., Ge, H., He, J., Kong, L., Yang, Y., Yan, F., *et al.* (2020) Long-Term Prognostic Value of Cardiac MRI Left Atrial Strain in ST-Segment Elevation Myocardial Infarction. *Radiology*, **296**, 299-309. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020200176>
- [41] Zhang, M., Li, Z., Wang, Y., Chen, L., Ren, Y., Wu, Y., *et al.* (2024) Left Atrial and Ventricular Longitudinal Strain by Cardiac Magnetic Resonance Feature Tracking Improves Prognostic Stratification of Patients with ST-Segment Elevation Myocardial Infarction. *The International Journal of Cardiovascular Imaging*, **40**, 1881-1890. <https://doi.org/10.1007/s10554-024-03174-z>
- [42] Chen, L., Qiu, B., Abdu, F.A., Liu, L., Zhang, W., Wang, C., *et al.* (2025) Prognostic Value of Strain by Tissue Tracking Cardiac Magnetic Resonance in Myocardial Infarction with Nonobstructive Coronary Arteries. *Journal of the American Heart Association*, **14**, e039395. <https://doi.org/10.1161/jaha.124.039395>
- [43] Radwan, H., Hussein, E.M. and Refaat, H. (2021) Short- and Long-Term Prognostic Value of Right Ventricular Function in Patients with First Acute ST Elevation Myocardial Infarction Treated by Primary Angioplasty. *Echocardiography*, **38**, 249-260. <https://doi.org/10.1111/echo.14974>
- [44] Antoni, M.L., Scherptong, R.W.C., Atary, J.Z., Boersma, E., Holman, E.R., van der Wall, E.E., *et al.* (2010) Prognostic Value of Right Ventricular Function in Patients after Acute Myocardial Infarction Treated with Primary Percutaneous Coronary Intervention. *Circulation: Cardiovascular Imaging*, **3**, 264-271. <https://doi.org/10.1161/circimaging.109.914366>

- [45] Lai, W., Jie, H., Jian-Xun, D., Ling-Cong, K., Jun-Tong, Z., Bo-Zhong, S., *et al.* (2021) Impact of Concomitant Impairments of the Left and Right Ventricular Myocardial Strain on the Prognoses of Patients with ST-Elevation Myocardial Infarction. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, **8**, Article ID: 659364. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2021.659364>
- [46] Wang, R., Tao, X., Schoepf, U.J., Favre, C.T., Lian, J., Wang, J., *et al.* (2026) Prognostic Value of Intracardiac Blood Kinetic Energy Assessed by Four-Dimensional Flow Cardiac Magnetic Resonance Imaging in Heart Failure with Reduced Ejection Fraction. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, **28**, Article 101986. <https://doi.org/10.1016/j.jocmr.2025.101986>
- [47] Niu, X., Dun, Y., Li, G., Zhang, H., Zhang, B., Pan, Z., *et al.* (2024) Evaluation of Left Ventricular Blood Flow Kinetic Energy in Patients with Acute Myocardial Infarction by 4D Flow MRI: A Preliminary Study. *BMC Medical Imaging*, **24**, Article No. 131. <https://doi.org/10.1186/s12880-024-01310-8>
- [48] Kamani, C.H., Lwin, M., Botis, I., Asad, M., Sharrack, N., Schapira, H., *et al.* (2025) Left Ventricular Flow Kinetics and Myocardial Deformation Following Acute Infarction: Additional Predictive Value of Cardiac Magnetic Resonance Four-Dimensional Flow for Left Ventricular Remodeling Post-ST-Elevation Myocardial Infarction. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, **27**, Article 101905. <https://doi.org/10.1016/j.jocmr.2025.101905>
- [49] 向春林, 李浩杰, 黄璐, 等. 心脏磁共振成像在心肌梗死中的应用进展[J]. 临床放射学杂志, 2022, 41(4): 779-785.
- [50] Bethke, A., Shanmuganathan, L., Andersen, G.Ø., Eritsland, J., Swanson, D., Kløw, N.E., *et al.* (2019) Microvascular Perfusion in Infarcted and Remote Myocardium after Successful Primary PCI: Angiographic and CMR Findings. *European Radiology*, **29**, 941-950. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5588-7>
- [51] Hao, S., Sui, X., Wang, J., Zhang, J., Pei, Y., Guo, L., *et al.* (2021) Secretory Products from Epicardial Adipose Tissue Induce Adverse Myocardial Remodeling after Myocardial Infarction by Promoting Reactive Oxygen Species Accumulation. *Cell Death & Disease*, **12**, Article No. 848. <https://doi.org/10.1038/s41419-021-04111-x>
- [52] Hao, S., Zhang, J., Pei, Y., Guo, L. and Liang, Z. (2023) Complement Factor D Derived from Epicardial Adipose Tissue Participates in Cardiomyocyte Apoptosis after Myocardial Infarction by Mediating PARP-1 Activity. *Cellular Signalling*, **101**, Article 110518. <https://doi.org/10.1016/j.cellsig.2022.110518>
- [53] Zhao, J., Cheng, W., Dai, Y., Li, Y., Feng, Y., Tan, Y., *et al.* (2024) Excessive Accumulation of Epicardial Adipose Tissue Promotes Microvascular Obstruction Formation after Myocardial Ischemia/Reperfusion through Modulating Macrophages Polarization. *Cardiovascular Diabetology*, **23**, Article No. 236. <https://doi.org/10.1186/s12933-024-02342-8>
- [54] Islas, F., Gutiérrez, E., Cachafeiro, V., Martínez-Martínez, E., Marín, G., Olmos, C., *et al.* (2022) Importance of Cardiac Imaging Assessment of Epicardial Adipose Tissue after a First Episode of Myocardial Infarction. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*, **9**, Article ID: 995367. <https://doi.org/10.3389/fcvm.2022.995367>
- [55] Toya, T., Corban, M.T., Imamura, K., Bois, J.P., Gulati, R., Oh, J.K., *et al.* (2020) Coronary Perivascular Epicardial Adipose Tissue and Major Adverse Cardiovascular Events after ST Segment-Elevation Myocardial Infarction. *Atherosclerosis*, **302**, 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.atherosclerosis.2020.04.012>
- [56] 俞江, 申越, 张荣林. 冠状动脉周围脂肪组织厚度对 STEMI 患者 PCI 术后远期预后的影响[J]. 徐州医科大学学报, 2024, 44(5): 350-356.
- [57] Zencirci, A.E., Zencirci, E., Değirmencioglu, A., *et al.* (2015) Predictive Value of the No-Reflow Phenomenon and Epicardial ADI-Pose Tissue for Clinical Outcomes After Primary Percutaneous Coronary Intervention. *Hellenic Journal of Cardiology*, **56**, 311-319.
- [58] 马振岩, 阿鑫, 赵蕾, 等. 急性 ST 段抬高型心肌梗死经皮冠状动脉介入术后左心室不良重构的新型风险预测模型: 基于心脏磁共振的多中心前瞻性研究[J]. 南方医科大学学报, 2025, 45(4): 669-683.
- [59] Marcos-Garcés, V., Perez, N., Gavara, J., Lopez-Lereu, M.P., Monmeneu, J.V., Rios-Navarro, C., *et al.* (2022) Risk Score for Early Risk Prediction by Cardiac Magnetic Resonance after Acute Myocardial Infarction. *International Journal of Cardiology*, **349**, 150-154. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2021.11.050>
- [60] Xie, W., Shi, R., Xiang, J., Chen, B., An, D., Zhou, Y., *et al.* (2026) Machine Learning Using Clinical and Cardiac MRI Features to Predict Long-Term Outcomes in Acute STEMI. *Radiology*, **318**, e251490. <https://doi.org/10.1148/radiol.251490>
- [61] Chen, Y., Jiang, M., Xia, C., Zhao, H., Ke, P., Chen, S., *et al.* (2025) A Novel Deep Learning System for STEMI Prognostic Prediction from Multi-Sequence Cardiac Magnetic Resonance. *Science Bulletin*, **70**, 4241-4252. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2025.11.027>
- [62] Schulz-Menger, J., Bluemke, D.A., Bremerich, J., Flamm, S.D., Fogel, M.A., Friedrich, M.G., *et al.* (2020) Standardized Image Interpretation and Post-Processing in Cardiovascular Magnetic Resonance-2020 Update: Board of Trustees Task Force on Standardized Post-Processing. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, **22**, Article 19. <https://doi.org/10.1186/s12968-020-00610-6>

- [63] Schwab, M., Pamminger, M., Kremser, C., Haltmeier, M. and Mayr, A. (2025) Deep Learning Pipeline for Fully Automated Myocardial Infarct Segmentation from Clinical Cardiac MR Scans. *Radiology Advances*, **2**, umaf023.
<https://doi.org/10.1093/radadv/umaf023>