

本文引用: 余莹, 邓佳, 陈彧, 等. 心脏磁共振评估冠状动脉疾病的研究进展[J]. 中国动脉硬化杂志, 2024, 32(12): 1089-1096. DOI: 10.20039/j.cnki.1007-3949.2024.12.011.

[文章编号] 1007-3949(2024)32-12-1089-08

· 文献综述 ·

心脏磁共振评估冠状动脉疾病的研究进展

余莹^{1,2,3}, 邓佳^{1,2,3}, 陈彧⁴, 唐惠芳^{1,2,3}, 田进伟⁴

1. 南华大学衡阳医学院附属第一医院心内科, 2. 湖南省心肌损伤临床医学研究中心,
3. 南华大学衡阳医学院附属第一医院心血管疾病研究所, 湖南省衡阳市 421001;
4. 哈尔滨医科大学附属第二医院心内科, 黑龙江省哈尔滨市 150001

[摘要] 心脏磁共振具有无辐射、多参数、多序列、多平面等优点, 能够实现对冠状动脉疾病患者心脏运动及形态功能、血流和灌注等一站式评估。本文将简要介绍心脏磁共振的常见影像学指标, 并重点介绍各个参数在冠状动脉疾病的诊断、治疗和预后评估等方面的应用。

[关键词] 心脏磁共振; 冠状动脉疾病; 心肌应变; 高分辨率纵向弛豫时间定量成像

[中图分类号] R5

[文献标识码] A

The research progress of cardiac magnetic resonance for the assessment of coronary artery disease

YU Ying^{1,2,3}, DENG Jia^{1,2,3}, CHEN Yu⁴, TANG Huifang^{1,2,3}, TIAN Jinwei⁴

1. Department of Cardiology, the First Affiliated Hospital, Hengyang Medical School, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. Clinical Research Center for Myocardial Injury in Hunan Province, Hengyang, Hunan 421001, China; 3. Institute of Cardiovascular Disease, the First Affiliated Hospital, Hengyang Medical School, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 4. Department of Cardiology, the Second Affiliated Hospital of Harbin Medical University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

[ABSTRACT] Cardiac magnetic resonance (CMR) has the advantages of being radiation-free, multi-parameter, multi-sequence, and multi-planar, enabling one-stop assessment of cardiac motion and morphologic function, blood flow and perfusion in patients with coronary artery disease. This article briefly introduces the typical imaging indicators of CMR and highlights the application in the diagnosis, treatment and prognostic assessment of coronary artery disease.

[KEY WORDS] cardiac magnetic resonance; coronary artery disease; myocardial strain; T1 mapping

冠状动脉疾病 (coronary artery disease, CAD) 是由脂质代谢紊乱引起, 导致心脏供血不足、心肌缺血缺氧甚至坏死的一类常见且多发的心血管疾病^[1-2], 其主要病理生理机制为动脉粥样硬化^[3], 以粥样斑块在动脉壁堆积进而造成动脉狭窄为主要病理过程^[4]。临床常表现为稳定型心绞痛、不稳定型心绞痛、心肌梗死及心源性猝死等。由于其高居不下的发病率和死亡率及逐渐年轻化趋势, CAD 已

成为中国城乡居民生命健康的最大威胁^[5]。心脏磁共振 (cardiac magnetic resonance, CMR) 具有较高的时间和空间分辨力、良好的血池和心肌对比度^[6], 图像后处理简便, 对各类心脏疾病, 尤其是 CAD 的早期诊断和预后评估具有重要意义^[7]。因此, 本文对 CMR 的常见影像学指标在 CAD 中的应用及前景予以综述。

[收稿日期] 2023-12-22

[修回日期] 2024-04-17

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目 (82370343); 湖南省卫健委重点指导课题 (20201920); 湖南省科技创新重点工程 (2020SK1013); 湖南创新型省份建设专项经费 (2020SK4008); 南华大学附属第一医院 4310 计划 (20214310NHCCG03)

[作者简介] 余莹, 硕士研究生, 研究方向为心脏磁共振, E-mail: yuying990515@163.com。通信作者田进伟, 博士, 主任医师, 博士研究生导师, 研究方向为动脉粥样硬化的分子机制, E-mail: tianjinweidr2009@163.com。

1 概述

CMR 成像具有多参数、多序列、多平面、无辐射等优点,可一站式评估心脏形态学、功能及结构、心肌灌注与分子成像,在各类心血管疾病的诊断和预后评估中具有重要价值^[8]。CMR 由于其无创、无辐射和可重复性高等,现已成为评估 CAD 患者心脏形态及心肌组织特征、量化整体或局部心肌功能的金标准。

2 CMR 常规序列及后处理模块

CMR 基础序列包括平衡稳态自由进动序列 (balanced steady state free precession, bSSFP)、相位

敏感反转恢复序列 (phase-sensitive inversion-recovery, PSIR)、改进 Look-Locker 反转恢复序列 (modified Look-Locker inversion recovery, MOLLI)、心肌灌注成像等。bSSFP 序列是心脏成像和评价心脏结构功能最基础的序列,其对比度与组织的 T2/T1 比值有关,能够很好地区分肌肉、血液和脂肪。目前使用 Cvi42、Medis、Tomtec 等后处理软件可对心脏的形态功能、心肌应变、高分辨率纵向弛豫时间定量成像 (T1 mapping)、心脏脂肪、心肌灌注及延迟强化等方面进行定量定性评估 (表 1)。CMR 的不同技术提供了对心血管解剖和功能等详细信息的提供 (图 1),涵盖了心脏大小及功能、心肌运动、心肌缺血、水肿和心肌纤维化等^[9]。

表 1. 心脏磁共振衍生的常见影像学指标及其优缺点

Table 1. Typical imaging indicators derived from cardiac magnetic resonance and their advantages and disadvantages

常用后处理模块	主要评估参数	优点	缺点
心肌应变	GLS、GCS、GRS 及对应的应变率	亚临床左心室功能障碍的标志物之一; 基于常规电影序列进行后处理,无需额外序列	后处理耗时长; 结果受图像质量影响较大
T1 mapping	初始 T1 值、ECV	不依赖于纤维化心肌与正常心肌信号强度的对比; 为弥漫性间质纤维化的程度提供了一种新的、可量化的标志物	易受水肿、炎症和胶原沉积等因素影响,不具有特异性; 易受场强、型号等因素影响
心脏脂肪定量	EAT 体积、PCAT 厚度	具有良好的空间分辨率; CMR 被认为是目前测量心外膜脂肪的标准方法	后处理难度高,可重复性欠佳
晚期钆增强	LGE 面积及质量	评估心肌活性的无创参考标准; 评价心肌缺血敏感度高,有效预测预后及风险分层	后处理耗时长,结果受图像质量影响较大; 需要注射钆造影剂
心肌灌注	MBF、MPR、MPRI	反映冠状动脉储备功能和心肌血流灌注状态; 显著提高冠心病心肌缺血诊断的灵敏度和特异度	在极个别情况下,心肌负荷灌注可能导致患者出现严重心律失常甚至心脏骤停,因此需要一定的安全防护措施; 后处理时间长,缺乏统一的后处理及量化解读方法
磁共振冠状动脉成像	CDI	实现了冠状动脉扩张程度的量化评估; 能够有效识别冠状动脉狭窄、高风险斑块特征及微血管病变等	扫描时间较长、图像质量欠佳; 对于支架的可视性较差; 不能显示钙化程度

注:GLS:整体纵向应变(global longitudinal strain); GCS:整体周向应变(global circumferential strain); GRS:整体径向应变(global radial strain); ECV:细胞外间质容积分数(extracellular volume fraction); EAT:心外膜脂肪组织(epicardial adipose tissue); PCAT:冠状动脉周围脂肪组织(pericoronary adipose tissue); LGE:晚期钆增强(late gadolinium enhancement); MBF:静息时心肌血流量(myocardial blood flow); MPR:心肌灌注储备(myocardial perfusion reserve); MPRI:心肌灌注储备指数(myocardial perfusion reserve index); CDI:冠状动脉扩张指数(coronary distensibility index)。

2.1 心肌应变

CMR 心肌应变成像技术包括特征追踪技术 (feature tracking, FT) 及组织标记技术 (tissue tagging, TT)。其中 CMR-FT 基于常规电影序列对图

像进行心肌定量分析,评估其应变相关衍生参数及扭转参数,可以发现心肌运动和形变的早期异常^[10],现已证明可以检测许多心血管疾病的早期舒张功能障碍。

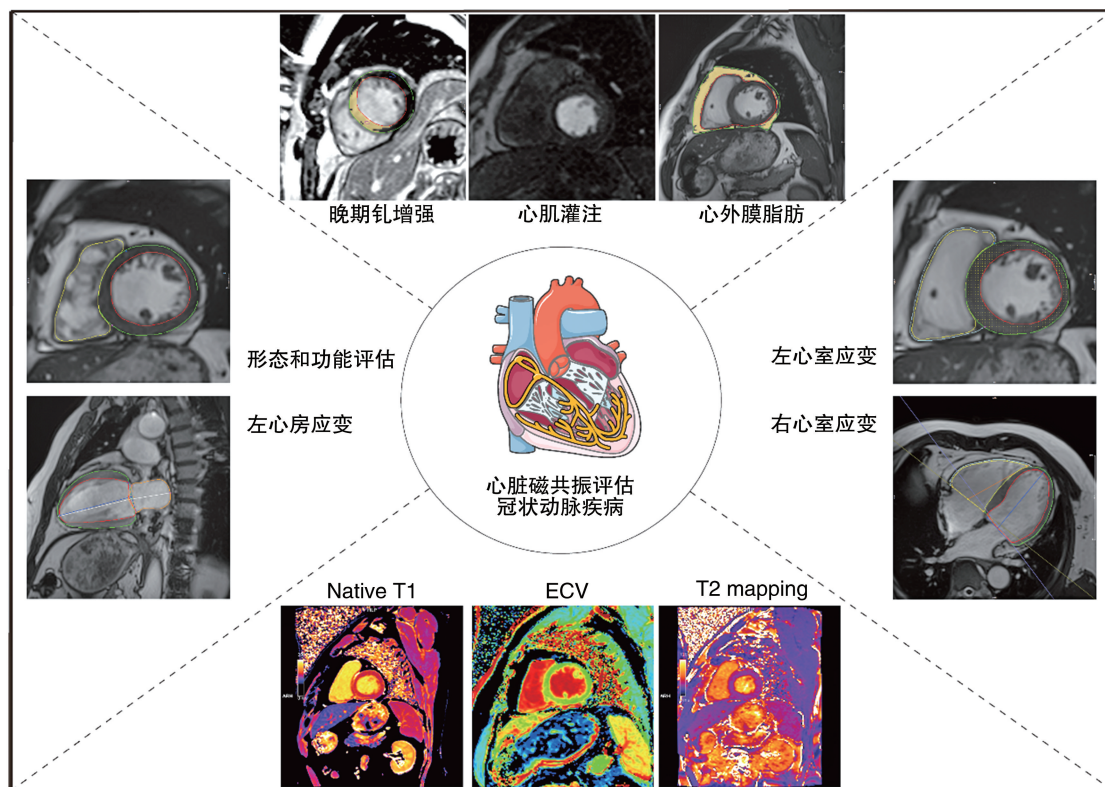


图 1. 心脏磁共振常规序列及后处理模块

Figure 1. Cardiac magnetic resonance frequency sequence and postprocessing module

应变(strain, ε)又称应力或应变力,是指物体在外力作用下相对于其初始形态的形变能力^[11]。心肌应变即心肌在心动周期中产生的形变百分比,能够反映心肌的伸长或缩短,增厚或变薄。其计算公式为: $\varepsilon = (L - L_0) / L_0$;其中, ε 为应变, L_0 为初始形态下的长度值, L 为测量时的长度。应变率(strain rate, SR)是指心肌在单位时间内的形变速度(单位为 s^{-1})。

左心室应变常规参数包括整体纵向应变(global longitudinal strain, GLS)、整体周向应变(global circumferential strain, GCS)、整体径向应变(global radial strain, GRS)三个方向的应变及应变率^[12]。右心室应变由于室壁较薄、肌小梁发达等复杂解剖结构和功能形态,使其难以进行评估。目前,CMR已成为评估右心室应变的“金标准”,常规参数包括GLS、GCS、GRS及右心室游离壁纵向应变(right ventricular free wall longitudinal strain, RVFWLS)。心房功能被认为是评估许多心脏疾病的重要因素,它由三部分组成:储存功能(从肺静脉收集血液)、导管功能(将血液导入左心室)和收缩泵功能(舒张后期心房收缩)。因此,左心房应变主要测量左心房纵向应变及应变率^[13],主要包括储存期总应变

(reservoir strain, ε_s)、导管期被动应变(conduit strain, ε_e)和收缩泵期主动应变(booster strain, ε_a)及对应的峰值应变率。

2.2 T1 mapping

T1 mapping序列基于MOLLI序列,根据注入造影剂前后分为初始T1和增强后T1。细胞外容积分数(extracellular volume fraction, ECV)即细胞外间质容积占整个心肌容积的百分比,是客观反映细胞外基质扩张程度的一项指标,它根据扫描获得的初始T1和增强后T1值进行计算,并通过血细胞比容(hematocrit, Hct)校正后获得。其计算公式^[14]为: $ECV = (1 - Hct) \times [\Delta(1/T1_{\text{心肌}}) / \Delta(1/T1_{\text{血池}})]$,其中 $T1_{\text{心肌}}$ 是左心室心肌的T1时间, $T1_{\text{血池}}$ 是血池的T1时间, Δ 代表注射造影剂前后T1的差值。

影响ECV和T1值的病理因素包括:心肌水肿、纤维化等导致其增高,细胞内脂质沉积及铁过载等导致其减低。心肌纤维化、脂质沉积等在晚期钆增强(late gadolinium enhancement, LGE)上的影像表现相似,但T1值却明显不同,因此T1 mapping成像可对其进行有效鉴别。其中心肌纤维化可分为局限性和弥漫性纤维化,局限性纤维化常见于心肌梗死,而弥漫性纤维化可见于原发性心血管疾病或系统

性疾病累及心脏时^[15]。心肌组织中心肌纤维化程度越高,初始 T1 值及 ECV 则越高。

2.3 心脏脂肪定量

心包脂肪(pericardial fat, PCT)是包裹心脏和冠状动脉的内脏脂肪组织的一部分,包括心包脂肪组织(pericardial adipose tissue, PAT)、心外膜脂肪组织(epicardial adipose tissue, EAT)和冠状动脉周围脂肪组织(pericoronary adipose tissue, PCAT)^[16]。PAT 位于心包壁层,EAT 则是介于心肌和脏层心包之间的脂肪层,其主要分布在心底部、房室沟、室间沟、心房、右心室游离壁和左心室心尖部,包绕着冠状动脉的主要分支,与心肌及血管之间并无明显的解剖界限^[17]。EAT 是嵌入在心肌中具有代谢活性的内脏脂肪组织,由于与心肌和冠状动脉紧密接触,其分泌的脂肪因子和炎性介质等可以通过炎症、氧化应激、内皮损伤等各种机制直接或间接地作用于心肌细胞或冠状动脉^[18],介导各种心血管疾病的发生发展^[19]。基于 bSSFP 序列,对获得的图像进行后处理,评估 EAT 体积、PCAT 厚度等参数,可以实现心包脂肪的无创量化^[20]。

2.4 晚期钆增强

LGE 脉冲序列的基本原理是基于注射钆造影剂后延迟 10 ~ 15 min 后的 PSIR 序列,来自正常心肌的信号强度被反转恢复脉冲特异性地抑制,因此正常心肌显示为低信号,而含有高浓度钆造影剂、细胞膜破裂的梗死心肌显示为高信号或强化^[21]。LGE 的高分辨率和高对比度使 CMR 已成为识别心肌瘢痕和局限性心肌纤维化的金标准^[21-22]。利用后处理软件对 LGE 图像进行梗死区域、面积及微循环障碍的定量、定性评估,对预测 CAD 患者的预后和早期风险分层具有潜在应用价值。

2.5 心肌灌注

心肌灌注成像是一种无创、无辐射的影像学检查方法,是在注入对比剂后,观察对比剂通过心肌和心室腔过程中的信号变化,用于评价心肌的血流供应。在正常心肌被灌注时可呈现出信号增强,而缺血心肌呈现出低信号区域,又称为灌注缺损区。心肌灌注成像可以在静息和负荷两种状态下评估心肌血流量,静息灌注成像是患者在静息状态下进行扫描,操作安全、扫描时间短,但其指导诊断的准确性欠佳。负荷灌注成像(stress CMR, S-CMR)通过腺苷、多巴酚丁胺等药物或运动的方式诱导冠状动脉扩张,当正常血管处于最大扩张状态时,病变血管再扩张的能力下降、通过的血流减少,从而呈现灌注减低信号区,表现为心肌缺血,以准确识别

供血功能障碍,可以有效评估心肌缺血和冠状动脉微循环病变情况^[23]。目前心肌灌注成像在临床上多用于定性评估,随着技术的不断发展,心肌灌注成像将实现从定性到半定量、全定量的跨越。

心肌灌注储备(myocardial perfusion reserve, MPR)即负荷与静息时心肌血流量(myocardial blood flow, MBF)的比值,被用来评估冠状动脉内皮血管反应活性。MPR 值降低是缺血的标志之一。而 CMR 心肌灌注成像衍生的心肌灌注储备指数(myocardial perfusion reserve index, MPRI)能够半定量评估小血管的舒张能力、更全面地反映心肌灌注情况。近年来,S-CMR 衍生的参数已经越来越多地应用于 CAD 的诊断和预后评估。

2.6 磁共振冠状动脉成像

磁共振冠状动脉成像可分为冠状动脉磁共振血管成像(magnetic resonance angiography, MRA)和冠状动脉管壁斑块成像。冠状动脉 MRA 是指在不电离辐射、无造影剂和自由呼吸的前提下评估冠状动脉血管功能和形态的一项技术,能够实现对冠状动脉狭窄、扩张及斑块特征、微血管病变等的有效评估^[24]。Lu 等^[25]发现 3.0T 非对比增强冠状动脉 MRA 能够有效诊断显著冠状动脉狭窄,并实现冠状动脉扩张指数(coronary distensibility index, CDI)的无创测量。

而冠状动脉管壁斑块成像则多基于非对比增强 T1 加权反转恢复序列(T1-weighted inversion-recovery, T1WI),是一种在不依赖对比剂的前提下,利用出血、血栓和脂质核心等斑块内特征的 T1 缩短作用来识别高危斑块的无创成像技术^[26]。Kawasaki 等^[27]将 1.5T 非对比增强 T1WI 与多层计算机断层扫描、血管内超声进行了对比,发现高信号斑块(hyperintense plaque, HIP)与超声波衰减、正性重塑、计算机断层扫描低密度以及慢血流现象发生率高度相关。CMR 成像中的非对比 T1WI 可能有助于评估 CAD 患者的冠状动脉斑块特征。而 Sato 等^[28]发现,与血管内超声对比,稳定性 CAD 患者中,非对比 T1WI 定义的高信号斑块主要由斑块内出血组成,而不是脂质。

由于磁共振冠状动脉成像技术存在空间和时间分辨率较低、扫描时间长、图像质量欠佳等因素的限制,在临床上的应用常受限。随着扫描技术的发展、呼吸运动矫正和以低信噪比为特征的深度学习技术的应用,图像质量将获得显著提高,在未来越来越多地应用于 CAD 及先天性冠状动脉异常患

者的临床评估^[29]。

3 CMR 在 CAD 中的应用

3.1 心肌应变在 CAD 中的应用

目前临床上应用于个体患者治疗分层的标准风险评估仍基于左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF), LVEF 能够同时反映心功能和心室重塑程度,被广泛认为是一种有价值的诊断和预后指标^[30]。然而,这种方法存在着一定的局限性,LVEF 由于其几何学特性,易受到生理解剖结构、扫描技术和临床因素的影响;LVEF 既不能检测心肌收缩能力的节段性变化,也不能识别细微但重要的收缩异常^[31]。Yu 等^[32]研究发现,在 LVEF 正常的 ST 段抬高型心肌梗死(ST-segment elevation myocardial infarction, STEMI)患者中, GLS、GCS 和 GRS 已经出现了下降。在心肌梗死患者中,应变在早期诊断舒张功能障碍和预测患者不良预后中的作用已超越 LVEF 等传统影像学指标。此外, Taha 等^[33]对确诊为 STEMI 并行经皮冠状动脉介入治疗的患者心肌应变与梗死面积之间的关系进行了评估,发现 GLS、GCS 和 GRS 均能反映急性心肌损伤的程度,并在对患者的不良预后进行预测时表现出了较高的准确性。在急性或陈旧性心肌梗死患者中, GLS 均显著受损^[34];距离心肌梗死位置越近,节段应变的受损程度则越高^[32]。基于 CMR-FT 的心肌应变不仅可以发现左心室整体和节段性早期心肌受损,也能对右心室、左心房的形变程度进行准确评估。Lai 等^[35]的研究对 STEMI 患者的左心室整体应变和右心室整体应变进行了分析,发现左心室应变是 STEMI 患者预后的关键决定因素,急性期左心室 GCS > -11.20% 是长期主要不良心脑血管事件(major adverse cardio-cerebrovascular event, MACCE)的独立预测因子,而右心室 GRS 和左心室 GCS 同时受损会导致患者预后恶化。van Veelen 等^[36]的研究也发现,右心室游离壁纵向应变能够区分 STEMI 患者的急性缺血和非缺血心肌,右心室应变是 4 个月随访时心功能分级的额外预测因子。此外,一项包含 257 例接受 CMR 的心肌梗死(myocardial infarction, MI)患者的研究表明^[37], CMR 量化的心肌梗死大小与受损的心房峰值纵向应变(peak atrial longitudinal strain, PALS)密切相关,其病理生理机制可能是心肌细胞坏死导致左心室僵硬、后负荷增加,从而阻碍了左心房收缩。Leng 等^[38]在一项纳入了 PCI 术后 321 例心肌梗死人群的多中心、前瞻

性研究中发现, ϵ_s 和 ϵ_e 受损的患者发生主要不良心血管事件(major adverse cardiovascular event, MACE)的风险明显增高,相较于传统的预后预测因子提供了更大的预测价值。左心房应变损伤先于心肌的几何重塑,是心肌梗死后发生舒张功能障碍的标志物。

随着 CMR 技术的发展,通过常规电影序列和 CMR-FT 对图像进行应变分析已经越来越多地被用于检测包括心肌梗死在内的各种心血管疾病中细微和局部的心肌功能障碍^[39]。CMR-FT 可以准确评估心室和心房整体心肌的运动形变,同时也能够反映局部梗死心肌的运动减低。与传统的 LVEF 相比,心肌应变能够更早地发现左心舒张功能不全,为 CAD 患者的早期预后和风险分层提供了增量价值。

3.2 T1 mapping 在 CAD 中的应用

Puntmann 等^[40]的研究探讨了冠心病患者非梗死心肌初始 T1 的预后意义,死亡患者非梗死心肌的初始 T1 和 ECV 显著高于生存组,初始 T1 是冠心病患者全因死亡率和 MACCE 的独立预测指标,优于左心功能和 LGE 等传统标志物。但 Kaolawanich 等^[41]发现,初始 T1 主要是通过检测瘢痕脂肪化生引起的脂肪浸润范围来评估心肌纤维化,与 LGE 相比明显低估了陈旧性心肌梗死的范围。心肌纤维化区别于心肌梗死引起的局灶性替代性纤维化和弥漫性间质纤维化,其特征是心肌间质组织中胶原的积聚。LGE 的存在是局灶性替代性纤维化的替代标志物;而初始 T1 和/或 ECV 增加是弥漫性间质纤维化的替代标志物。一项冠状动脉粥样硬化的多种族研究发现^[42], ECV 不依赖于心肌信号强度的变化,在识别弥漫性心肌纤维化上具有重要预后价值, ECV > 30% 与全因死亡、动脉粥样硬化性心血管事件和突发心力衰竭独立相关。此外, Kidambi 等^[43]对急性心肌梗死(acute myocardial infarction, AMI)患者的 LVEF 预测和功能恢复方面进行了评估,与 LGE 相比, CMR 得出的 ECV 估计值更加准确。初始 T1 和 ECV 能够更好地描述弥漫性和局限性纤维化过程;与 LGE 所示的局限性心肌异常相比,初始 T1 及 ECV 是评估心肌纤维化更为有效的工具,能更好地预测事件的发生、改善 AMI 患者的早期特征和预后。

3.3 心脏脂肪定量在 CAD 中的应用

CMR 由于其良好的可视化、清晰的图像和便捷的图像处理等优点,使心包脂肪的评估和体积量化

变得简便、精确。Zhu 等^[44]对已知 CAD 患者的 EAT 与左心室应变的关系进行了研究,与健康对照组相比,已知冠心病患者的 EAT 体积显著增加;该研究表明,在射血分数保留的 CAD 患者中,三个方向的应变都与 EAT 独立相关,EAT 使 GLS、GCS 和 GLS 的受损程度进一步加重,证实了 EAT 体积的增加与亚临床心功能不全的发生、发展有关。作为炎症细胞因子来源的 EAT 体积、厚度均与 CAD 的严重程度有关。近期研究表明^[45],STEMI 患者所有部位的 PCAT 都增厚,MACE 患者上室间沟处的局部 PCTA 增厚更为显著。上室间沟 PCAT 厚度指数(superior interventricular groove PCAT thickness index, SIVGi)是 STEMI 血运重建患者发生不良心血管事件的一个强有力的独立预测因子,对其预后预测具有一定的增量价值。经由 CMR 评估的 EAT、PCAT 正在成为冠状动脉粥样硬化的独立风险生物标志物,在指导冠心病一级和二级预防措施方面起到了重要的作用。

3.4 晚期钆增强在 CAD 中的应用

在一项大型 STEMI 患者血运重建队列研究^[46]中发现,LGE 评估的微血管阻塞(microvascular obstruction, MVO),即梗死心肌内的低增强区域,是校正其他重要临床、血管造影和 CMR 参数后所有死亡和因心衰住院等综合终点的强大独立预测因子,MVO 范围 $\geq 2.6\%$ 提供了增量预后价值,能够改善 STEMI 患者的长期风险分层。Chen 等^[47]探讨了多参数 CMR 对首次经皮冠状动脉介入治疗再灌注 AMI 患者 6 个月后发生左心室重塑发展的预测性能,发生不良左心室重塑的 AMI 患者心肌水肿和梗死面积更大,通过 LGE 量化的梗死面积是 AMI 患者左心室重塑的最佳预测指标之一。Lintingre 等^[48]评估了高分辨率(high resolution, HR) LGE 成像对冠状动脉非阻塞性心肌梗死(myocardial infarction with nonobstructed coronary arteries, MINOCA)患者诊断的必要性,研究发现高分辨率 LGE 成像可提高心肌 LGE 的诊断率,降低透壁性 LGE 的不确定率。Bergamaschi 等^[49]在一项大型 MINOCA 患者队列研究中发现,LGE 在随访 3 年时被确定为 MACE 的独立预测因子,可被视为 MINOCA 的高风险标志物。透壁性 LGE 也被发现是 MINOCA 再住院、心力衰竭和 AMI 复发的独立预测因素^[50]。LGE 能够提供关于梗死心肌的定量多参数表征,并能够早期识别冠状动脉造影结果 $<50\%$ 的 MINOCA 患者,通过 CMR 确认或排除心肌梗死有助于调整药物治疗,使得其已

成为 CAD 患者的首选成像方式。

3.5 心肌灌注在 CAD 中的应用

Greenwood 等^[51]以冠状动脉造影为金标准,探究多参数 CMR 对疑似冠心病患者的诊断准确性,并将 S-CMR 与单光子发射计算机断层扫描(single-photon emission computed tomography, SPECT)进行比较,发现 S-CMR 诊断冠心病的灵敏度和特异度均高于 SPECT。此外,Heitner 等^[52]在一项大型多中心研究中对 9 151 例已知或疑似 CAD 的患者进行了 S-CMR 定性评估,其检查结果异常与 CAD 患者死亡率的增加显著相关。随着技术的发展,S-CMR 从单一的定性评估逐渐发展为定量评估,通过评估心肌灌注和 MPR,不仅能够有效检测缺血性病变的存在,并能早期发现并诊断隐匿性心肌缺血的发生,在 CAD 的早期诊断和精准治疗中发挥重要作用。Knott 等^[53]发现在胸痛患者中 S-CMR 衍生的心内膜下 MBF 和 MPR 诊断发生冠状动脉狭窄的灵敏度和特异度均 $>70\%$,对于临床早期管理 CAD 患者具有指导意义。此外,Zhou 等^[54]对无心外膜 CAD 或心肌疾病的胸痛患者进行多中心 S-CMR,发现 MPRI 是 MACE 的独立预测因子,与 MPRI >1.47 的患者相比,MPRI ≤ 1.47 的患者发生 MACE 的风险增加了 3 倍。但由于该研究样本量较小,因此未来需要大型队列研究来进一步评估 MBF 及 MPRI 在 CAD 患者中的风险分层和预后价值。

4 小结与展望

综上所述,多参数 CMR 能够全方位评估心脏的形态结构、功能和组织特征,经由临床验证,已经被认为是诊断 CAD 的一个无创、准确的工具。更多的新技术将继续扩大 CMR 在心血管疾病中的应用,如 T2* 评估细胞铁沉积、T1 ρ mapping 进一步评估心肌水肿及纤维化、4D 血流技术评估瓣膜病变^[55]。这些新兴技术衍生的新参数被纳入到传统模型中能够为 CAD 提供新的见解,提供更精准的风险分层和预后评估。

[参考文献]

- [1] KNUUTH J, WIJNS W, SARASTE A, et al. 2019 ESC guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes [J]. Eur Heart J, 2020, 41(3): 407-477.
- [2] 区景松. 冠状血管的解剖意义及动脉粥样硬化的治疗[J]. 中国动脉硬化杂志, 2023, 31(10): 829-832.
QU J S. Anatomic significance of coronary vessels and treatment of atherosclerosis [J]. Chin J Arterioscler, 2023, 31(10): 829-832.

- [3] LIBBY P, THEROUX P. Pathophysiology of coronary artery disease [J]. *Circulation*, 2005, 111(25): 3481-3488.
- [4] 乔莞宁, 陈虹印, 张 扬. 氧化应激与动脉粥样硬化[J]. *中国动脉硬化杂志*, 2023, 31(4): 312-321.
QIAO G N, CHEN H Y, ZHANG Y. Oxidative stress and atherosclerosis[J]. *Chin J Arterioscler*, 2023, 31(4): 312-321.
- [5] 中国心血管健康与疾病报告编写组. 中国心血管健康与疾病报告 2022 概要[J]. *中国循环杂志*, 2023, 38(6): 583-612.
The Writing Committee of the Report on Cardiovascular Health and Diseases in China. Report on cardiovascular health and diseases in China 2022; an updated summary [J]. *Chin Circul J*, 2023, 38(6): 583-612.
- [6] BAESSATO F, GUGLIELMO M, MUSCOGIURI G, et al. Stress CMR in known or suspected CAD: diagnostic and prognostic role [J]. *Biomed Res Int*, 2021, 2021: 6678029.
- [7] DEMIRKIRAN A, EVERAARS H, AMIER R P, et al. Cardiovascular magnetic resonance techniques for tissue characterization after acute myocardial injury[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2019, 20(7): 723-734.
- [8] MCGEE K, MARTINEZ M, WILLIAMSON E. Mayo clinic guide to cardiac magnetic resonance imaging[M]. 2nd ed. Rochester: Mayo Clinic Scientific Press, 2015.
- [9] 王艺宁, 杨文静, 赵世华, 等. 2020 年心脏 MR 研究进展[J]. *中国医学影像技术*, 2021, 37(12): 1898-1901.
WANG Y N, YANG W J, ZHAO S H. Research progresses of cardiac magnetic resonance in 2020[J]. *Chin J Med Imaging Technol*, 2021, 37(12): 1898-1901.
- [10] XU J, YANG W, ZHAO S, et al. State-of-the-art myocardial strain by CMR feature tracking: clinical applications and future perspectives[J]. *Eur Radiol*, 2022, 32(8): 5424-5435.
- [11] 陈晓荣, 潘江峰, 胡红杰, 等. 基于心脏磁共振特征追踪技术的心肌应变的研究进展[J]. *心电与循环*, 2022, 41(3): 303-306, 308.
CHEN X R, PAN J F, HU H J, et al. The advances of myocardial strain based on cardiac magnetic resonance feature tracking technique[J]. *J Electrocardiol Circ*, 2022, 41(3): 303-306, 308.
- [12] CHITIBOI T, AXEL L. Magnetic resonance imaging of myocardial strain: a review of current approaches [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2017, 46(5): 1263-1280.
- [13] ALFUHIED A, MARROW B A, ELFAWAL S, et al. Reproducibility of left atrial function using cardiac magnetic resonance imaging[J]. *Eur Radiol*, 2021, 31(5): 2788-2797.
- [14] KEHR E, SONO M, CHUGH S S, et al. Gadolinium-enhanced magnetic resonance imaging for detection and quantification of fibrosis in human myocardium *in vitro* [J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2008, 24(1): 61-68.
- [15] 刘 茜, 王 珍, 孙应实. T1 mapping 技术用于心脏疾病危险分层及预后评估研究进展[J]. *中国医学影像技术*, 2022, 38(7): 1090-1093.
LIU Q, WANG Z, SUN Y S. Research progresses of T1 mapping for risk stratification and evaluation on prognosis of cardiac diseases [J]. *Chin J Med Imaging Technol*, 2022, 38(7): 1090-1093.
- [16] AL-DIBOUNI A, GASPAR R, ICE S, et al. Unique genetic and histological signatures of mouse pericardial adipose tissue[J]. *Nutrients*, 2020, 12(6): 1855.
- [17] 刘晋星, 刘 妍, 赵迎新. 心外膜脂肪组织及其与冠状动脉粥样硬化关系的研究进展 [J]. *中国医药*, 2021, 16(5): 768-771.
LIU J X, LIU Y, ZHAO Y X. Research progress of epicardial adipose tissue and its relationship with coronary atherosclerosis [J]. *China Med*, 2021, 16(5): 768-771.
- [18] IACOBELLIS G. Epicardial adipose tissue in contemporary cardiology[J]. *Nat Rev Cardiol*, 2022, 19(9): 593-606.
- [19] TALMAN A H, PSALTIS P J, CAMERON J D, et al. Epicardial adipose tissue; far more than a fat depot[J]. *Cardiovasc Diagn Ther*, 2014, 4(6): 416-429.
- [20] MONTI C B, CODARI M, DE CECCO C N, et al. Novel imaging biomarkers: epicardial adipose tissue evaluation[J]. *Br J Radiol*, 2020, 93(1113): 20190770.
- [21] KWONG R Y, FARZANEH-FAR A. Value of late gadolinium enhancement imaging in diagnosis of myocardial infarction and nonobstructed coronary arteries [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(5): 1149-1151.
- [22] MANDAWAT A, CHATTRANUKULCHAI P, MANDAWAT A, et al. Progression of myocardial fibrosis in nonischemic DCM and association with mortality and heart failure outcomes [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2021, 14(7): 1338-1350.
- [23] 孙 毅, 黄海华, 龙江涛. 心脏磁共振心肌灌注成像在冠心病患者冠状动脉病变及微循环梗阻中的临床应用价值[J]. *分子影像学杂志*, 2023, 46(4): 746-750.
SUN Y, HUANG H H, LONG J T. Clinical value of cardiac magnetic resonance myocardial perfusion imaging in coronary artery lesion and microcirculation obstruction in coronary heart disease patients [J]. *J Mol Imaging*, 2023, 46(4): 746-750.
- [24] ZAHERGIVAR A, KOCHER M, WALTZ J, et al. The diagnostic value of non-contrast magnetic resonance coronary angiography in the assessment of coronary artery disease: a systematic review and Meta-analysis[J]. *Heliyon*, 2021, 7(3): e06386.
- [25] LU H F, ZHAO S H, TIAN D, et al. A clinical strategy to improve the diagnostic performance of 3T non-contrast coronary MRA and noninvasively evaluate coronary distensibility: combination of diastole and systole imaging [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2023, 25(1): 67.
- [26] STUBER M. CATCH the wave of coronary atherosclerotic plaque MRI [J]. *Radiology*, 2022, 302(3): 566-567.
- [27] KAWASAKI T, KOGA S, KOGA N, et al. Characterization of hyperintense plaque with noncontrast T1-weighted cardiac magnetic resonance coronary plaque imaging: comparison with multislice computed tomography and intravascular ultrasound [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2009, 2(6): 720-728.
- [28] SATO S, MATSUMOTO H, LI D, et al. Coronary high-intensity plaques at T1-weighted MRI in stable coronary artery disease: comparison with near-infrared spectroscopy intravascular US [J]. *Radiology*, 2022, 302(3): 557-565.
- [29] KATO Y, AMBALE-VENKATESH B, KASSAI Y, et al. Non-contrast coronary magnetic resonance angiography: current frontiers

- and future horizons[J]. *MAGMA*, 2020, 33(5): 591-612.
- [30] WHITE H D, NORRIS R M, BROWN M A, et al. Left ventricular end-systolic volume as the major determinant of survival after recovery from myocardial infarction[J]. *Circulation*, 1987, 76(1): 44-51.
- [31] MARWICK T H. Ejection fraction pros and cons; JACC state-of-the-art review[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2018, 72(19): 2360-2379.
- [32] YU S, ZHOU J, YANG K, et al. Correlation of myocardial strain and late gadolinium enhancement by cardiac magnetic resonance after a first anterior ST-segment elevation myocardial infarction [J]. *Front Cardiovasc Med*, 2021, 8: 705487.
- [33] TAHA M B, JENG E I, SALERNO M, et al. Left ventricular strain is associated with myocardial recovery following ST-elevation myocardial infarction, a prospective longitudinal CMR study[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9: 842619.
- [34] GAVARA J, RODRIGUEZ-PALOMARES J F, VALENTE F, et al. Prognostic value of strain by tissue tracking cardiac magnetic resonance after ST-segment elevation myocardial infarction [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2018, 11(10): 1448-1457.
- [35] LAI W, JIE H, JIAN-XUN D, et al. Impact of concomitant impairments of the left and right ventricular myocardial strain on the prognoses of patients with ST-elevation myocardial infarction[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2021, 8: 659364.
- [36] VAN VEELEN A, ELIAS J, VAN DONGEN I M, et al. Recovery of right ventricular function and strain in patients with ST-segment elevation myocardial infarction and concurrent chronic total occlusion[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2022, 38(3): 631-641.
- [37] KIM J, YUM B, PALUMBO M C, et al. Left atrial strain impairment precedes geometric remodeling as a marker of post-myocardial infarction diastolic dysfunction [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(10): 2099-2113.
- [38] LENG S, GE H, HE J, et al. Long-term prognostic value of cardiac MRI left atrial strain in ST-segment elevation myocardial infarction[J]. *Radiology*, 2020, 296(2): 299-309.
- [39] ELIAS J, VAN DONGEN I M, HOEBERS L P, et al. Recovery and prognostic value of myocardial strain in ST-segment elevation myocardial infarction patients with a concurrent chronic total occlusion[J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(1): 600-608.
- [40] PUNTMANN V O, CARR-WHITE G, JABBOUR A, et al. Native T1 and ECV of noninfarcted myocardium and outcome in patients with coronary artery disease[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2018, 71(7): 766-778.
- [41] KAOLAWANICH Y, AZEVEDO C F, KIM H W, et al. Native T1 mapping for the diagnosis of myocardial fibrosis in patients with chronic myocardial infarction [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2022, 15(12): 2069-2079.
- [42] MARQUES M D, WEINBERG R, KAPOOR S, et al. Myocardial fibrosis by T1 mapping magnetic resonance imaging predicts incident cardiovascular events and all-cause mortality: the multi-ethnic study of atherosclerosis [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2022, 23(10): 1407-1416.
- [43] KIDAMBI A, MOTWANI M, UDDIN A, et al. Myocardial extracellular volume estimation by CMR predicts functional recovery following acute MI[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2017, 10(9): 989-999.
- [44] ZHU J, XIE Z, HUANG H, et al. Association of epicardial adipose tissue with left ventricular strain and MR myocardial perfusion in patients with known coronary artery disease[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2023, 58(5): 1490-1498.
- [45] MA Y, MA Q, WANG X, et al. Incremental prognostic value of pericoronary adipose tissue thickness measured using cardiac magnetic resonance imaging after revascularization in patients with ST-elevation myocardial infarction[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9: 781402.
- [46] SYMONS R, PONTONE G, SCHWITTER J, et al. Long-term incremental prognostic value of cardiovascular magnetic resonance after ST-segment elevation myocardial infarction; a study of the collaborative registry on CMR in STEMI[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2018, 11(6): 813-825.
- [47] CHEN H, ERLEY J, MUELLERLEILE K, et al. Contrast-enhanced cardiac MRI is superior to non-contrast mapping to predict left ventricular remodeling at 6 months after acute myocardial infarction[J]. *Eur Radiol*, 2024, 34(3): 1863-1874.
- [48] LINTINGRE P F, NIVET H, CLÉMENT-GUINAUDEAU S, et al. High-resolution late gadolinium enhancement magnetic resonance for the diagnosis of myocardial infarction with nonobstructed coronary arteries [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(5): 1135-1148.
- [49] BERGAMASCHI L, FOÀ A, PAOLISSO P, et al. Prognostic role of early cardiac magnetic resonance in myocardial infarction with nonobstructive coronary arteries[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2024, 17(2): 149-161.
- [50] BUCCIARELLI V, BIANCO F, FRANCESCO A D, et al. Characteristics and prognosis of a contemporary cohort with myocardial infarction with non-obstructed coronary arteries (MINOCA) presenting different patterns of late gadolinium enhancements in cardiac magnetic resonance imaging[J]. *J Clin Med*, 2023, 12(6): 2266.
- [51] GREENWOOD J P, MAREDA N, YOUNGER J F, et al. Cardiovascular magnetic resonance and single-photon emission computed tomography for diagnosis of coronary heart disease (CE-MARC): a prospective trial[J]. *Lancet*, 2012, 379(9814): 453-460.
- [52] HEITNER J F, KIM R J, KIM H W, et al. Prognostic value of vasodilator stress cardiac magnetic resonance imaging; a multicenter study with 48000 patient-years of follow-up[J]. *JAMA Cardiol*, 2019, 4(3): 256-264.
- [53] KNOTT K D, CAMAIONI C, RAMASAMY A, et al. Quantitative myocardial perfusion in coronary artery disease; a perfusion mapping study[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2019, 50(3): 756-762.
- [54] ZHOU W, LEE J C Y, LEUNG S T, et al. Long-term prognosis of patients with coronary microvascular disease using stress perfusion cardiac magnetic resonance[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2021, 14(3): 602-611.
- [55] RAJIAH P S, FRANÇOIS C J, LEINER T. Cardiac MRI: state of the art[J]. *Radiology*, 2023, 307(3): e223008.