

肥厚型心肌病心脏磁共振成像诊断新进展

邓景, 刘紫薇, 李嘉帅, 朱忠祥^{*}
武汉市普仁医院, 湖北 武汉 430012
DOI:10.61369/MRP.2026090024

摘要 : 肥厚型心肌病是以左心室心肌非对称性肥厚为典型特征的常见遗传性心肌病, 也是青少年及运动员心源性猝死的重要原因, 而心脏磁共振成像由于具有极佳的软组织分辨力及多参数成像能力, 故已被公认为肥厚型心肌病 (HCM) 诊断、鉴别诊断及危险分层的重要检查工具。本文总结了近年来心脏磁共振 (CMR) 在肥厚型心肌病诊疗中的最新进展, 讨论晚期钆增强、T1 mapping 及细胞外容积分数等 (ECV) 定量技术在心肌纤维化定量、疾病亚型细分及心源性猝死风险预测诸方面的关键作用, 最后分析 HCM 人工智能辅助诊断的前沿方向。

关键词 : 肥厚型心肌病; 心脏磁共振; 晚期钆增强; T1 mapping; 心肌纤维化; 危险分层

New Progress in Cardiac Magnetic Resonance Imaging Diagnosis of Hypertrophic Cardiomyopathy

Deng Jing, Liu Ziwei, Li Jiashuai, Zhu Zhongxiang^{*}
Wuhan Puren Hospital, Wuhan, Hubei 430012

Abstract : Hypertrophic cardiomyopathy is a common genetic cardiomyopathy characterized by asymmetric hypertrophy of the left ventricular myocardium, and is also an important cause of sudden cardiac death in adolescents and athletes. Cardiac magnetic resonance imaging, due to its excellent soft tissue resolution and multi parameter imaging ability, has been recognized as an important diagnostic tool for hypertrophic cardiomyopathy (HCM), differential diagnosis, and risk stratification. This article summarizes the latest developments in the diagnosis and treatment of hypertrophic cardiomyopathy using cardiac magnetic resonance imaging (CMR) in recent years. It discusses the key roles of quantitative techniques such as late gadolinium enhancement, T1 mapping, and extracellular volume fraction (ECV) in quantifying myocardial fibrosis, subdividing disease subtypes, and predicting the risk of sudden cardiac death. Finally, it analyzes the cutting-edge directions of HCM artificial intelligence assisted diagnosis.

Keywords : hypertrophic cardiomyopathy; cardiac magnetic resonance imaging; late gadolinium enhancement; T1 mapping; myocardial fibrosis; risk stratification

前言

肥厚型心肌病 (hypertrophic cardiomyopathy, HCM) 是以心肌肌小节蛋白编码基因突变为根本病因的常染色体显性遗传病, 其病理生理学的核心改变为心肌细胞排列异常、间质纤维化及微血管功能障碍^[1], 因此临床上表现特异性不强, 从无症状的心室壁增厚到严重左心室流出道梗阻, 乃至心源性猝死都可见到^[2]。传统的诊断方法主要依靠超声心动图对心肌肥厚程度及梗阻情况予以评价, 但该方法存在明确局限性^{[3][4]}。心脏磁共振 (cardiac magnetic resonance, CMR) 技术近年来取得了长足进步, CMR 可对心肌肥厚程度进行极可靠的量化评估, 且能直接、清晰地显示心肌纤维化区域^[5]; 延迟钆增强技术可检测局灶性纤维化, 而 T1mapping 技术可对弥漫性间质纤维化进行精确的定量分析^{[6][7]}。更重要的是, 在 HCM 患者中, 初始 T1 值及细胞外容积 (Extracellular Volume, ECV) 分数都明显升高, 二者均为疾病明确诊断、亚型分类及鉴别诊断中极其重要的生物标志物^{[8][9]}。CMR 在猝死风险评估中已有明确、突出的地位: 广泛的心肌纤维化是预测心源性猝死、心力衰竭进展等不良临床结局的独立危险因素^{[10][7]}。与此形成极好补充的是, CMR 还能对左心房及右心室的结构及功能进行全面评估, 而这两者也与患者的临床预后直接而明确的关系^{[11][12]}。而 CMR 通过将形态学、功能学、组织学诸种信息自然、合理地结合, 正逐步构建起全面且先进的诊断与风险分层评估体系。因此, 本文拟对 CMR 在诊断 HCM 方面的最新进展做系统、严谨的综述, 以期对临床实践有切实指导意义^[13]。

作者简介: 邓景 (1994.11-), 男, 汉族, 湖北孝感人, 住院医师, 学士, 心胸影像诊断, 邮箱: 1224782171@qq.com
通讯作者: 朱忠祥 (1984.06-), 男, 汉族, 湖北鄂州人, 主治医师, 硕士, 心胸影像诊断, 邮箱: 575801829@qq.com

一、CMR 在 HCM 形态与功能评估中的精准化应用

（一）心肌肥厚定量与表型分型的精细化

CMR 有良好的空间分辨率，故已被公认为评估 HCM 形态学的金标准，其电影序列可提供全心脏动态图像，因而能对左心室各节段室壁厚度作毫米级精确测量，对 HCM（室壁厚度 $\geq 15\text{mm}$ ）及其非对称性分布特征的诊断有直接重大意义^[14]。CMR 对超声心动图检查盲区即心尖部及左心室侧壁有极好的覆盖，因此能更完整、可靠地描绘心肌肥厚的范围及空间分布^[15]。在识别特殊临床表型方面，CMR 有突出的优势：对于心尖肥厚型心肌病，长轴及心尖短轴视图可非常清楚地显示其特征性的“铲形”形态改变，亦有利于准确识别伴发的心尖室壁瘤^[16]。对于以心肌致密化不全样形态表现的肥厚，CMR 可直接、客观地测量非致密化心肌与致密化心肌的厚度比值，从而做出明确而有依据的鉴别诊断^[17]。除此之外，CMR 也是评估 HCM 患者右心室是否受累及右心室功能状态的首选方法。有研究表明，在右心室射血分数尚处于正常范围的 HCM 患者中，右心室心肌的形变能力已有亚临床异常，其异常程度与右心室肥厚及是否存在晚期钆增强呈明确相关性^[18]。因此，对右心室的系统、定量评估对厘清 HCM 完整疾病谱、预测其远期预后都具有极其重要的价值^[19]。

（二）左心室流出道梗阻与血流动力学的综合评估

CMR 是评价左心室流出道梗阻及有关血流动力学参数的更加有力的工具：稳态自由进动电影序列能清楚、直接地显示收缩期二尖瓣前叶前向运动及室间隔的接触，因此能明确梗阻部位及梗阻机制^[20]。其可配合相位对比血流序列定量测定梗阻部位血流速度及相应的压力阶差，由此评估梗阻的严重程度^[21]。CMR 可在药物负荷状态下（如应用多巴酚丁胺）进行扫描，诱发潜在的或隐匿性流出道梗阻，因而对不明原因晕厥患者有极高的临床价值^[3]。在心肌收缩功能的评估方面，CMR 特征追踪技术已充分证明其相较传统射血分数指标有更大的敏感性，能可靠、定量地分析心肌整体纵向、圆周及径向应变，故而有利于早期发现亚临床状态下的心肌收缩功能损害及不同步性^[22]。现有文献已经表明了梗阻性 HCM 与非梗阻性 HCM 患者心肌应变模式的差异：梗阻性 HCM 患者左心室心尖部、前壁及前间隔中段的应变参数普遍升高^[22]。因此，CMR 对心肌力学功能的精细化评估为厘清 HCM 的病理生理机制、完善 HCM 风险分层体系提供了前所未有的新视角^[23]。

二、CMR 组织特征成像在识别心肌纤维化与风险分层中的核心作用

（一）晚期钆增强在瘢痕检测与预后预测中的基石地位

晚期钆延迟强化（Late Gadolinium Enhancement, LGE）是 CMR 评价 HCM 心肌纤维化时最可靠、最成熟的技术，其典型表现模式、定量方法及鉴别诊断价值已得到充分证实：HCM 的 LGE 最常见于右心室插入点及心肌中层，呈片状或斑片状强化，且与心肌纤维化区域的解剖位置高度一致^[24]。更为重要的是，LGE 的存在及其范围本身就是独立于传统危险因素、可直

接预测心源性猝死及心力衰竭事件的极强指标^[25]。具体而言，多项研究已经证明，LGE 负荷超过 15% 与猝死风险明显相关，故目前已被纳入若干临床指南中作为植入式心脏复律除颤器（ICD）决策的重要参考依据^[26]。除预测价值外，LGE 的分布特征对鉴别诊断有极其重要的意义：心脏淀粉样变性多表现为弥漫性透壁或心内膜下强化，而 HCM 的 LGE 通常位于心肌中层或右心室插入点，由此与法布里病、高血压性心脏病等其他引起左心室肥厚的疾病加以区分^[27]。不同分布亚型的 LGE 具有不同的临床意义，即局限于左心室壁内的 LGE（肌壁内型 LGE）与更严重的 HCM 表型直接相关，包括更大的左心室质量、更厚的室壁、更差的左心室射血分数及更明显的心肌应变异常^[28]。因此，LGE 绝非仅用于检测心肌瘢痕的技术手段，更应作为 HCM 患者风险分层中至关重要的核心参数。

（二）T1 mapping 与细胞外容积分数对弥漫性纤维化的定量评估

T1 mapping 与细胞外容积分数技术很好地补充、完善了 LGE 在评价弥漫性心肌纤维化时的不足，即 LGE 对局灶性、对比清楚的纤维化病变最敏感，但对弥漫性间质纤维化敏感性极低^[24]。原生 T1 值及细胞外容积（Extracellular Volume, ECV）均可直接定量反映心肌组织的整体特性：原生 T1 值可以在不注射对比剂的情况下获得，而注射对比剂之后即可准确计算 ECV^[29]。因此，在基因携带者但尚未出现明显左心室肥厚的“临床前”或“表型前”阶段，就可通过检测升高的 T1 值或 ECV 早期、无创地识别弥漫性纤维化或细胞外基质扩张^[29]。已有研究在无 LGE 表现的 HCM 患者中发现了升高的原生 T1、ECV 及 T2 值，由此自然、有力地提示心肌间质纤维化及细胞水肿可能在 HCM 疾病早期就已经发生^[29]。更重要的是，ECV 的升高与心功能恶化、心律失常事件及死亡风险都呈明确的独立相关性^[7]。最近一项针对 HCM 患者的前瞻性研究对此做了验证：ECV 是预测不良临床结局的最优影像学标志物，其预测能力甚至优于 LGE，且即便在 LGE 呈阳性的患者亚组中，ECV 对不良事件仍有独立的、可量化的预测价值^[7]。因此，将 ECV 与 LGE 负荷联合评估，能更充分、更准确地量化心肌纤维化负荷，也因而自然地优化 HCM 患者的风险分层体系^[24]。

三、新兴 CMR 技术与未来发展方向

（一）人工智能与机器学习在 CMR 图像分析中的应用

人工智能及机器学习技术正在重塑心脏磁共振成像在肥厚型心肌病领域的应用。首先，机器学习模型在自动化、标准化分析方面已有十分扎实而优雅的尝试：即从常规电影序列中提取影像组学特征，由此实现无需对比剂的心肌纤维化筛查。具体而言，已有研究构建了一种基于 XGBoost 算法的机器学习模型，将室壁厚度、室壁增厚率及从电影序列中提取的心肌信号强度、纹理、大小、形状诸种影像组学特征予以综合分析，用于识别可能无需接受钆对比剂延迟增强扫描的 HCM 患者^[30]。该模型在独立验证队列中表现极好，受试者工作特征曲线下面积为 0.83，因此预计可避免约三分之一患者接受不必要的钆剂注射。与此形成极佳补

充的是另一研究,将深度学习与影像组学方法有机结合,开发了基于平衡稳态自由进动电影序列的人工智能筛查模型,专门用来识别无心肌瘢痕的HCM患者,其联合模型在内部及外部数据集上的诊断效能都优于单一模型,是AI提高分析效率、保证结果可重复性的示范^[31]。现有技术在挖掘深层影像组学特征方面有十分明确的优势:能提取人眼难以察觉的纹理、形状等细节特征,因而能构建更强大、更可靠的诊断及鉴别诊断模型。例如,一项基于T2WI图像的纹理分析模型已被很好地用来区分心脏淀粉样变性与肥厚型心肌病,在测试集上达到79.2%的诊断准确率,与延迟增强成像的量化诊断能力相当^[32]。从电影序列及延迟增强图像中提取的影像组学特征,若能与常规的多参数CMR指标结合,便能构建出性能极佳的鉴别诊断模型,用于区分高血压性心脏病与HCM,其在验证组中所得的曲线下面积已达0.981^{[33][34]}。AI技术在整合风险预测模型方面已有清晰路径:即利用AI整合多模态数据以实现个体化精准评估。具体而言,深度学习算法可以从非增强的心脏水平长轴电影图像中提取特征来预测HCM患者的基因突变状态,而当该算法与传统的多伦多评分系统相结合时,对阳性基因型的预测性能得到提高^[35]。同样,机器学习方法可自动、客观地评估左心室流出道梗阻风险,从三腔心电影图像自动提取若干解剖学参数并据此构建多元模型,其对梗阻的预测能力已经十分优秀^[36]。而所有这些进展都指向一个明确、必然的未来趋势:AI将整合CMR参数及临床、遗传学数据,真正建立起有利于临床决策的个体化风险预测体系。

（二）心肌灌注与微血管功能障碍评估

心肌灌注及微血管功能障碍的评估是目前理解HCM病理生理机制、预测其预后是十分活跃且极其重要的新领域。负荷心肌灌注CMR,尤其是腺苷负荷灌注成像,是评价HCM患者中常见心肌微血管功能障碍的直接手段。HCM患者中由腺苷负荷诱发的心肌灌注缺损非常常见,发生率超过40%^[37],其典型表现是多发性、斑片状或同心圆状的心内膜下分布模式,且与若干不良临床指标高度相关,包括非持续性室性心动过速、较高的左心室质量指数以及左心室心尖部室壁瘤的存在^{[37][38]}。微血管功能障碍在HCM中极为普遍,一篇针对非缺血性心肌病的系统综述已明确总结了这一点:约40–80%的HCM患者存在不同程度的微血管功能障碍,而该功能障碍本身就是驱动不良临床结局的独立危险因素^[39]。此种功能障碍甚至在尚无明显左心室肥厚的基因携带者亚临床阶段就已经存在,且与心肌纤维化的程度呈直接关联^[40]。在无需外源性对比剂的评估技术方面,以血氧水平依赖成像为代表的工具已开辟出极具前景的研究方向。虽然本文就不具体成像参数加以讨论,但值得指出的是,冠状动脉窦血流的相位对比CMR已被成功应用于冠状动脉血流储备的评估,且现有荟萃分析结果十分明确:HCM患者的冠状动脉血流储备显著降低,因此可合理地认为其存在广泛的冠状动脉微循环功能障碍^[41]。与此形成极好补充的是新兴的运动负荷CMR技术,它能提供更贴近生理状态的心肌灌注评估,初步研究结果已经十分漂亮地揭示了HCM患者运动负荷下的心肌血流量及心肌灌注储备都明显低于射血分数保留的心力衰竭患者及非心源性呼吸困难患者,且其心肌灌注

反应模式具有HCM的特征性^[42]。故而诸种技术彼此衔接、互为补充,真正从机制上加深了对HCM心肌缺血及能量代谢异常的理解,也由此引出了新的影像学生物标志物,对风险分层及个体化管理具有重要的临床意义。

（三）影像基因组学的关联探索

影像基因组学以建立影像表型与基因型之间精确、量化的关系为基础,因此是研究肥厚型心肌病(HCM)疾病异质性更加有力的工具。具体而言,CMR在建立表型–基因型关联时有无可替代的优势:其高空间分辨率及对组织特征极好的可视化能力,使其能可靠地识别不同基因突变所对应的不同心肌形态及纤维化分布模式。已有明确的证据表明,某些基因突变会导致特征性的心肌肥厚模式。家族筛查中曾发现大量携带致病基因变异但胸超声心动图显示室壁厚度正常的个体,CMR检查后被正确诊断为HCM,其诊断差异的根本原因正是超声难以充分显示的钩状前基底段心肌肥厚^[43]。因此得出结论:CMR能更敏感地检测早期或位于特殊解剖部位的心肌肥厚表型。与此形成极好补充的是,深度学习模型可以从常规电影图像中自动、客观地提取与基因型相关的深层特征,已有研究开发了基于心脏水平长轴电影图像的深度学习算法来预测HCM的基因突变状态,其性能已经优于传统临床评分系统,当该算法与多伦多评分结合时,对阳性基因型的识别能力得到极大提高^[35]。更重要的是,特定的基因型可能对应不同的电生理基质,近期一项结合CMR引导的心电成像的研究给出了良好的结果:在已有临床症状的HCM患者中,基因检测阳性者较基因阴性者更常出现明显的心电信号碎裂现象,由此直接且严谨地提示,基因状态确实会影响心肌结构及电生理特性^[44]。因此,影像基因组学的发现在临床转化上有着十分明确、直接的价值:由于特定基因突变常伴随特征性的CMR表现,故可将此类影像特征作为先证者家属筛查及风险评估的重要线索。对于基因阳性但表型尚未外显的家族成员,CMR能比常规心电图及超声心动图更早、更准确地识别早期心肌肥厚或结构异常,因而能实现更精准、更及时的家族管理及风险干预^{[43][45]}。具体而言,CMR对左心室心尖部室壁瘤的检测具有极高的敏感性,而该征象本身就是重要的不良预后标志物,因此其识别对预防性植入式心律转复除颤器(ICD)的决策有直接而重大的临床意义^[25]。若能将遗传信息与CMR所获的精细表型(包括心肌肥厚的具体模式、纤维化分布特征)自然、合理地整合,便有可能真正建立起完整、强大、可应用的基因型–表型–预后链条,也由此把HCM的个体化诊疗及家族管理推向新的时代。

四、结论

心脏磁共振成像在肥厚型心肌病诊疗中的发展是心血管影像学向精准医学的演进,故而CMR现已具备从宏观结构到微观组织特征的完整评估能力,其在疾病确诊、风险预测、个体化临床管理诸方面都已有十分突出的临床价值。因此,应该客观评价不同成像技术的优劣,合理建立适合临床应用的评估框架。晚期钆增强技术是目前识别局灶性替代性纤维化最可靠、最成熟的方法,

因而也是当前危险分层的重要工具，但其对弥漫性间质性病变的敏感性有限。因此 T1 mapping 及 ECV 技术补充了 LGE 的不足，二者形成功能上互补的局面，可准确、客观地量化弥漫性纤维化负荷，故而心肌评估已从定性描述真正迈入精确量化的新阶段。临床专家宜把 LGE 所见的局灶性瘢痕与 T1 mapping/ECV 所测的弥漫性改变结合起来：前者与心律失常基质关系更直接，后者更早、更充分地反映全心病理进展及心功能下降趋势，两者合用方能勾勒出完整、可靠的心肌病理图谱。由于人工智能多组学整合是今后发展的一个十分重要的突破点，故而人工智能技术对心

脏磁共振分析中所涉及的复杂、耗时、结果不一致诸问题有很好的解决潜力，可以自动、可靠地挖掘影像深层模式，由此自然地推进新型预后标志物的发现。

总而言之，由于心脏磁共振在肥厚型心肌病的应用已经进入多维整合、量化深入、智能化驱动的新阶段，因此，未来核心研究方向可聚焦于将多技术维度的影像信息、分子生物学特征及临床转归数据进行有机融合，建立动态、个体化的风险预测模型，方能从精准影像评估做到真正的精准临床决策。

参考文献

- [1] Ramchand J, Fava AM, Chetrit M, et al. Advanced imaging for risk stratification of sudden death in hypertrophic cardiomyopathy[J]. *Heart*. 2020;106(11):793–801.
- [2] Files Flores R, Man é F, Antunes N, et al. Apical hypertrophic cardiomyopathy, are low-risk patients really at low risk? A case report[J]. *Eur Heart J Case Rep*. 2020;4(5):1–4. Published 2020 Oct.
- [3] Ito T, Suwa M. Echocardiographic tissue imaging evaluation of myocardial characteristics and function in cardiomyopathies[J]. *Heart Fail Rev*. 2021;26(4):813–828.
- [4] Lewicka-Potocka Z, Dąbrowska-Kugacka A, Lewicka E, et al. The “athlete” s heart” features in amateur male marathon runners[J]. *Cardiol J*. 2021;28(5):707–715.
- [5] 李志明, 韩丹, 杞天付, 等. 心脏磁共振 T1mapping 技术评估肥厚型心肌病心肌纤维化 [J]. *中国医学影像学杂志*, 2022,30(4):341–347.
- [6] 姚岗, 卢嘉翰, 张强. 心脏 MR T1 mapping 技术对肥厚型心肌病心肌纤维化的诊断价值 [J]. *川北医学院学报*, 2023,38(9):1232–1235.
- [7] Li Y, Liu X, Yang F, et al. Prognostic value of myocardial extracellular volume fraction evaluation based on cardiac magnetic resonance T1 mapping with T1 long and short in hypertrophic cardiomyopathy[J]. *Eur Radiol*. 2021;31(7):4557–4567.
- [8] 梁学恒, 高世平, 石思玮. 心脏 MR T1 mapping 技术在肥厚型心肌病与高血压性心脏病的诊断价值 [J]. *实用放射学杂志*, 2023,39(4):566–570.
- [9] Shi RY, Wu R, An DL, et al. Texture analysis applied in T1 maps and extracellular volume obtained using cardiac MRI in the diagnosis of hypertrophic cardiomyopathy and hypertensive heart disease compared with normal controls[J]. *Clin Radiol*. 2021;76(3):236.e9–236.e19.
- [10] Greulich S, Seitz A, Herter D, et al. Long-term risk of sudden cardiac death in hypertrophic cardiomyopathy: a cardiac magnetic resonance outcome study[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2021;22(7):732–741.
- [11] Yang Y, Yin G, Jiang Y, et al. Quantification of left atrial function in patients with non-obstructive hypertrophic cardiomyopathy by cardiovascular magnetic resonance feature tracking imaging: a feasibility and reproducibility study[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2020;22(1):1.
- [12] Śpiewak M, Kłopotowski M, Mazurkiewicz Ł, et al. Predictors of right ventricular function and size in patients with hypertrophic cardiomyopathy[J]. *Sci Rep*. 2020;10(1):21054.
- [13] 李雪菲, 焦凤辉, 王桂东, 等. 心脏磁共振成像在 HCM 诊断及预后评估中的应用 [J]. *中国 CT 和 MRI 杂志*, 2025,23(1):89–91.
- [14] 苏瑾, 朱永胜, 罗秀霞, 等. 心脏磁共振和超声诊断肥厚型心肌病的价值 [J]. *影像诊断与介入放射学*, 2020,29(3):167–170.
- [15] Grant MD, Mann RD, Kristenson SD, et al. Transthoracic Echocardiography: Beginner’ s Guide with Emphasis on Blind Spots as Identified with CT and MRI[J]. *Radiographics*. 2021 Jul–Aug;41(4):1022–1042.
- [16] 王晓璇, 肖华, 郭久红, 等. 磁共振成像在心尖肥厚型心肌病中的诊断价值 [J]. *分子影像学杂志*, 2019,42(1):1–4.
- [17] 卢拥华, 徐细平, 曾知恒. 心肌致密化不全的诊断与鉴别诊断 [J]. *右江民族医学院学报*, 2010,32(6):853–855.
- [18] Li X, Shi K, Yang ZG, et al. Assessing right ventricular deformation in hypertrophic cardiomyopathy patients with preserved right ventricular ejection fraction: a 3.0-T cardiovascular magnetic resonance study[J]. *Sci Rep*. 2020;10(1):1967.
- [19] Ding W, Bhushan S, Ma C, et al. Right Ventricle Involvement in Hypertrophic Cardiomyopathy and Role of Cardiac Magnetic Resonance in Hypertrophic Cardiomyopathy: Review Article[J]. *Heart Surg Forum*. 2021;24(4):E746–E750.
- [20] 于建才, 刘永兴, 袁永刚, 等. 心脏磁共振诊断梗阻性肥厚型心肌病 1 例 [J]. *医学影像学杂志*, 2019,29(4):536,552.
- [21] 和燕麦, 葛红, 杨瑞, 等. 心脏磁共振对梗阻性肥厚型心肌病化学消融术后的随访价值 [J]. *河南医学高等专科学校学报*, 2022,34(4):416–420.
- [22] Palmisano V, Cossa S, Esposito A, et al. Obstructive and Nonobstructive Hypertrophic Cardiomyopathy: Differences in Global and Segmental Myocardial Strain by Cardiac Magnetic Resonance Feature Tracking[J]. *J Thorac Imaging*. 2022;37(1):49–57.
- [23] Farrag NA, Lochbihler A, White JA, et al. Evaluation of fully automated myocardial segmentation techniques in native and contrast-enhanced T1-mapping cardiovascular magnetic resonance images using fully convolutional neural networks[J]. *Med Phys*. 2021;48(1):215–226.
- [24] Vanmali A, Alhumaid W, White JA. Cardiovascular Magnetic Resonance–Based Tissue Characterization in Patients With Hypertrophic Cardiomyopathy[J]. *Can J Cardiol*. 2024;40(5):887–898.
- [25] Rowin EJ, Schulz A. Role of cardiac magnetic resonance imaging in the management of hypertrophic cardiomyopathy[J]. *Indian J Thorac Cardiovasc Surg*. 2026;42(2):168–180.
- [26] Nakamori S, Rowin EJ, Rodriguez J, et al. Accelerated myocardial fibrosis in young to middle-aged patients with hypertrophic cardiomyopathy[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2024;26(2):101072.
- [27] Markousis-Mavrogenis G, Giannakopoulou A, Belegirinos A, et al. Cardiovascular Magnetic Resonance Imaging Patterns in Rare Cardiovascular Diseases[J]. *J Clin Med*. 2022;11(21).

- [28] Yang Z, Yao FY, Long YT, et al. Association between cardiac dysfunction and late gadolinium enhancement confined to the LV intramural region in patients with hypertrophic cardiomyopathy[J]. *Ann Med*. 2025;57(1):2533425.
- [29] Zhi Y, Zhang TY, Gui FD, et al. Myocardial Fibrosis Evaluated by T1 Mapping and Its Relationship to Left Ventricular Hypertrophy, Strain, and T2 Value in Hypertrophic Cardiomyopathy Without Late Gadolinium Enhancement[J]. *J Thorac Imaging*. . Published online Oct 14,2025. doi:10.1097/RTI.0000000000000862.
- [30] Mancio J, Pashakhanloo F, El-Rewaify H, et al. Machine learning phenotyping of scarred myocardium from cine in hypertrophic cardiomyopathy[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2022;23(4):532–542.
- [31] Fahmy AS, Rowin EJ, Arafati A, et al. Radiomics and deep learning for myocardial scar screening in hypertrophic cardiomyopathy[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2022;24(1):40.
- [32] Huang S, Shi K, Zhang Y, et al. Texture analysis of T2-weighted cardiovascular magnetic resonance imaging to discriminate between cardiac amyloidosis and hypertrophic cardiomyopathy[J]. *BMC Cardiovasc Disord*. 2022;22(1):235.
- [33] 官乐, 林辉, 赵振华, 等. 心脏磁共振影像学对肥厚性心脏病的诊断和预测价值 [J]. *全科医学临床与教育*, 2024,22(3):256–259.
- [34] Zhang H, Tian J, Zhang C, et al. Discrimination models with radiomics features derived from cardiovascular magnetic resonance images for distinguishing hypertensive heart disease from hypertrophic cardiomyopathy[J]. *Cardiovasc Diagn Ther*. 2024;14(1):129–142.
- [35] Zhou H, Li L, Liu Z, et al. Deep learning algorithm to improve hypertrophic cardiomyopathy mutation prediction using cardiac cine images[J]. *Eur Radiol*. 2021;31(6):3931–3940.
- [36] Sahota M, Saraskani SR, Xu H, et al. Machine learning evaluation of LV outflow obstruction in hypertrophic cardiomyopathy using three-chamber cardiovascular magnetic resonance[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2022;38(12):2695–2705.
- [37] Kim EK, Lee SC, Chang SA, et al. Prevalence and clinical significance of cardiovascular magnetic resonance adenosine stress-induced myocardial perfusion defect in hypertrophic cardiomyopathy[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2020;22(1):30.
- [38] 喻诗琴, 杨凯, 赵世华. 单纯心尖肥厚型心脏病进展为中部梗阻并室壁瘤形成1例 [J]. *中华心血管病杂志* [J], 2024,52(1):79–81.
- [39] Sharka I, Panichella G, Grigoratos C, et al. Myocardial Perfusion Imaging with Cardiovascular Magnetic Resonance in Nonischemic Cardiomyopathies: An In-Depth Review of Techniques and Clinical Applications[J]. *Medicina (Kaunas)*. 2025;61(5).
- [40] Ku MC, Kober F, Lai YC, et al. Cardiovascular magnetic resonance detects microvascular dysfunction in a mouse model of hypertrophic cardiomyopathy[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2021;23(1):63.
- [41] Tanigaki T, Kato S, Azuma M, Ito M, Horita N, Utsunomiya D. Coronary flow reserve evaluated by phase-contrast cine cardiovascular magnetic resonance imaging of coronary sinus: a meta-analysis[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2023;25(1):11.
- [42] Schulz A, Wallace TE, Chow K, et al. Quantitative myocardial blood flow and perfusion reserve with exercise cardiovascular magnetic resonance[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2025 Winter;27(2):101988.
- [43] Huurman R, van der Velde N, Schinkel AFL, et al. Contemporary family screening in hypertrophic cardiomyopathy: the role of cardiovascular magnetic resonance[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2022;23(9):1144–1154.
- [44] Joy G, Lopes LR, Webber M, et al. Electrophysiological Characterization of Subclinical and Overt Hypertrophic Cardiomyopathy by Magnetic Resonance Imaging-Guided Electrocardiography[J]. *J Am Coll Cardiol*. 2024;83(11):1042–1055.
- [45] 李元程, 王杰, 陈玉成. 肥厚型心脏病基因型与磁共振表型的关联性研究进展 [J]. *心血管病学进展*, 2019,40(2):157–161.