本文引用格式：黄昌海，吴强. 心脏磁共振在肥厚型心肌病诊断及治疗评估中的应用进展[J]. 安徽医学，2026，47(7)：920-925. **DOI：10.3969/j.issn.1000-0399.2026.07.019**

· 综述 ·

心脏磁共振在肥厚型心肌病诊断及治疗评估中的应用进展

黄昌海 吴 强

[**摘 要**] 肥厚型心肌病是(HCM)一种相对普遍的遗传性心脏病，严重时可能引发心力衰竭和心源性猝死。心脏磁共振(CMR)凭借其高分辨率、多模态成像能力的优势，已成为HCM诊断、风险评估及治疗管理的重要影像学工具之一。本文系统地阐述了近年来CMR在HCM患者的心肌纤维化检测、心功能评估及预后预测等方面的最新研究进展。

[**关键词**]肥厚型心肌病；心脏磁共振；预后评估

doi:10. 3969/j. issn. 1000-0399. 2026. 07. 019

最新的流行病学调查显示，肥厚型心肌病(hypertrophic cardiomyopathy，HCM)的发病率高达 1/500~1/200[1]。HCM 的特征是左心室非对称性肥厚，且常累及室间隔，可导致心肌纤维化、心律失常及心力衰竭等[2]。HCM 的临床表现各异，其中大部分患者的临床症状不典型，部分患者可出现呼吸困难、胸痛、晕厥、心律不齐，甚至发生心源性猝死(sudden cardiac death，SCD)[3]。HCM 的病理学改变包括心肌细胞排列紊乱、心肌纤维化、一些小血管发生病变、左心室流出道梗阻(left ventricular outflow tract obstruction，LVOTO)等[4]。

心脏磁共振(cardiac magnetic resonance，CMR)是一种高分辨率的无创影像学诊断技术，在心血管疾病诊断、鉴别、预后评估及治疗决策中发挥着重要的作用[5]。与超声心动图和计算机断层扫描相比，CMR 不仅能够精确地评估心脏结构、容积和功能，还能提供心肌组织学特征，例如心肌水肿、纤维化、瘢痕和微血管障碍等[6]，对 HCM 患者危险分层和预后评估具有重要意义[7]。同时，CMR 的心肌应变力分析技术能够早期评估心肌运动功能，为 HCM 的早期诊断和后期治疗效果评估提供了新途径[8]。

1 CMR 在诊断及鉴别诊断的作用

在 CMR 检查中，HCM 最典型的病理改变是非对称性室间隔增厚，部分患者还可表现为心尖部肥厚、左心室弥漫性肥厚或右心室肥厚[5]。与传统超声心动图相比，CMR 不仅能够准确地测量心肌厚度，也可以精确显示出患者心肌纤维化、瘢痕及血流动力学变化，为 HCM 诊断提供了优越的软组织对比度、多平面成像和精准的量化分析能力，还能够精准测量室壁的厚度，并通过三维重建评估心肌肥厚的范围和程度[9]。一般当不对称性室间隔肥厚患者的舒张末期最大室壁厚度≥15 mm 时，就可考虑存在 HCM；对于有家族史或携带相关突变基因的个体，若壁厚≥13 mm，亦可诊断为 HCM[2]。

准确的影像学评估对于疾病早期诊断、危险分层及治疗决策具有重要指导意义。其中 T_1 Mapping 定量成像技术对心肌水肿、脂质沉积、铁及淀粉样物质的沉积等识别性能较高，能够对心肌淀粉样变、法布雷病的心肌疾病进行有效鉴别。即使在影像学上未见明显肥厚，亦可提示心肌组织学异常，为早期识别高危个体提供了一种新的诊断方法[10]。T_1 Mapping 和细胞外容积分数(extracellular volume，ECV)的升高可作为可靠的生物标志物，提高 HCM 早期诊断准确性。研究显示，HCM 患者的 T_1 Mapping、ECV、左心室质量指数和左心室壁最大厚度均高于高血压性心脏病患者，而收缩末期容积指数和舒张末期容积指数相对较低[11]。有研究发现，左心系统造影联合 CMR 在 HCM 诊断中的曲线下面积(area under the curve，AUC)可达到 0.996，灵敏度、特异度、准确性均显著提高，表明多种影像手段联合应用，可提升 HCM 诊断率，为未来临床实践提供了新的方法[12]。

弥散张量成像技术(diffusion tensor imaging，DTI)能够无创地评估心肌的微观结构，并量化心肌纤维的弥散特性。该技术能够提供多个参数，包括平均扩散系数、各向异性分数(fractional anisotropy，FA)、螺旋角以及二级特征向量角，这些参数共同反映了心肌细胞的排列情况[13]。研究发现，即使在无明显心肌肥厚的 HCM 患者中，其心肌平均扩散系数及二级特征向量角也显示出了异常，提示心肌细胞排列紊乱可能是 HCM 最早期的病理特征，这为 HCM 的早期诊断及鉴别诊断提供了一定的价值[14]。

不过，在解读 FA 的临床意义时必须格外注意。目前临床常用的 DTI 序列，其体素分辨率一般在 2.5~3.0 mm^3左右，而一个心肌细胞的尺寸仅在微米级别。这意味着，每个体素捕获的信号，实质上是众多心肌细胞与其周围间质的平均值[15]。因此，很难通过 FA 的降低来判断这是由于心肌细胞本身的排列紊乱(比如细胞发生横向滑移、定向变得散乱)，还是由于细胞外的间质发生了改变。这两种病理改变对 FA 的影响是相反的，细胞结构混乱会减弱扩散的方向性，使 FA 下降；而间质扩张可为水分子

作者单位：550002 贵州贵阳 贵州医科大学研究生院(黄昌海，吴强)
550002 贵州贵阳 贵州省人民医院心内科(吴强)
通信作者：吴强，gzgywq@126.com

扩散提供更多空间，反而可能使 FA 升高[15]。因此，观测到的 FA 下降，很可能是多种微观结构变化相互叠加后的综合表现。如果简单地将其等同于心肌细胞排列紊乱，并直接推断为心律失常风险增高，就容易过度简化其背后的具体机制。目前，支持 FA 与室性心律失常相关的研究大多样本量有限[16]，未来还需要通过更大规模的前瞻性临床研究对其相关性进行进一步研究。

随着人工智能（artificial intelligence，AI）技术的进步，影像学分析会逐渐向智能化、标准化发展。研究表明，利用 MRI 短轴视图的电影图像进行深度学习训练的 AI 模型，在区分 HCM 和法布里病方面有较高的准确率。有研究表明，其准确率达到了 0.909，AUC 则达到 0.914，在外部测试中，AUC 亦达到了 0.918[17]。这一成果显示基于 AI 的影像分析可以为 HCM 等左心室肥厚疾病的诊断提供可靠帮助。

2 CMR 对 HCM 的功能评估

CMR 可以从左心室功能测量、心肌应激分析和血流动力学评估等多方面对 HCM 进行精准评估。在左心室功能评估方面，CMR 特征追踪（CMR feature tracking，CMR-FT）技术可量化描述心肌收缩与舒张功能，即使在射血分数正常的 HCM 患者中，也能识别潜在性功能障碍[18]。CMR-FT 技术在心肌应变分析中得到广泛应用。因其无需额外序列采集，并能够基于常规心脏电影序列后处理而获得心肌径向、周向、纵向应变及应变率，在临床应用上更具优势。研究发现，在尚未出现心室壁肥厚的 HCM 突变基因携带者中，FT 分析的应变参数显示出差异，提示心肌功能受损可能先于解剖学异常的发生[19]。CMR 应变分析可用于早期识别 HCM 患者的心肌功能异常，并在疾病进展评估及预后判断中具有重要价值[20]。此外，CMR-FT 在 HCM 患者的心肌应变评估中也表现出较高的敏感性，不仅可量化心肌形变能力，并可间接反映心肌纤维化程度[21]。

CMR 还可通过心肌灌注成像技术来评估冠状动脉微血管功能障碍（coronary microvascular dysfunction，CMD）。研究表明，CMR 灌注成像在静息及负荷状态下均可识别灌注受限区域，为 HCM 患者的风险分层及治疗策略提供重要信息[22]。

对于肾功不全的患者，传统钆对比剂增强成像在应用上受到了一定限制，而新兴体素内不相干运动技术（intravoxel incoherent motion，IVIM）则不需要对比剂，可通过真实扩散系数（true diffusion coefficient，D）及微循环灌注分数（perfusion fraction，f）来量化显示心肌微循环灌注能力。研究显示，梗阻性 HCM 患者的 D 值及 f 值低于非梗阻性 HCM 患者，且与心肌纤维化程度呈负相关，提示梗阻性 HCM 患者发生心肌缺血的风险更高[23]。而 CMR 运动负荷试验和低剂量多巴酚丁胺应激试验则可用于评估 HCM 患者的心脏储备功能和潜在的缺血风险。

有研究显示，采用 CMR 评估的心肌纤维化程度和由心肺运动测试所获得的运动能力信息是 HCM 患者综合临床结局的重要预测因素之一[24]。研究发现，峰值 VO_2（peak oxygen consumption，Peak VO_2）是 HCM 患者预后的独立预测因素，并且在风险评估中具有一定价值，是评估患者心肺功能、预测不良事件的核心指标之一[25]，若其数值降低，则提示心脏储备功能受损。HCM 患者之所以表现出运动耐量下降，主要与舒张充盈受限，从而使左心室收缩储备不足及血流动力学异常相关。另外，心肌延迟强化（late gadolinium enhancement，LGE）的存在与 HCM 患者总体死亡率及恶性心律失常的发生风险密切相关。运动能力下降，则反映出心肌纤维化所致的舒张功能障碍和血流动力学改变[25-26]。

4D Flow CMR（four-dimensional flow magnetic resonance imaging，4D Flow MRI）技术可动态评估 LVOTO 及其对血流的影响[27]。研究显示，4D Flow MRI 能够实现 HCM 患者左心室舒张功能的精细可视化，并通过定量分析二尖瓣区域的血流动力学特征，进一步评估心脏舒张功能状态，为手术或介入治疗前后的疗效评估提供了依据[28]。对于梗阻性 HCM，CMR 结合 4D Flow 技术不仅可以动态评估左心室流出道的血流动力学特征，并能精准测量流出道狭窄的程度、血流速度和压力阶差[29]。相位对比成像则能够明确左心室流出道是否存在梗阻，并可对梗阻程度进行评估。但是，目前该技术仍受限于较长的图像采集时间和复杂的后处理流程，要想应用于临床，仍需进一步优化。

3 CMR 在治疗指导和疗效评估中的作用

CMR 通过多模态成像技术，强化了 HCM 个体化治疗决策的能力。它不仅能够对药物治疗进行动态监测，还能为外科干预提供精准的导航，并且在新型室间隔减容技术研发方面展现了其不可替代的临床价值。

在药物治疗领域，CMR 可突破传统影像学的局限性，通过左心室质量指数动态追踪与 LGE 定量分析，敏感捕捉肌球蛋白抑制剂（如 Aficamten）对心肌重构和纤维化进程的调控效应。CMR 能精准评估非对称性肥厚患者对药物的逆向重构响应，而 T1 mapping 衍生的 ECV 则能早期识别间质纤维化的改善趋势，为剂量调整提供客观依据[30]。

对于需侵入性干预的梗阻性 HCM 患者，CMR 在室间隔减容术中实现了从解剖定位到功能验证的革新。外科手术治疗指导上，CMR 三维稳态自由进动序列可清晰界定肥厚心肌的解剖边界，结合 LGE 成像区分纤维化与存活心肌，优化切除范围选择[31]。对于非对称性室间隔肥厚或心尖肥厚型 HCM 患者，CMR 的全心肌覆盖特性显著优于超声心动图，避免因声窗限制导致的误判[32]。在酒精消融术治疗指导上，CMR 首过灌注成像联合 LGE 分布特征，可识别缺血易损心肌区域，有助于降低非靶区心肌损伤风险，避免医源性室间隔穿孔或广泛坏死[32-33]。

在经皮心肌内射频消融术和心内膜射频消融术的治疗指导中，CMR 在介入术前通过立体呈现肥厚心肌的解剖分布，尤其对心尖或弥漫性肥厚等复杂变异型 HCM 的识别具有显著优势[34]。结合 LGE 技术，CMR 可明确纤维化核心区与存活心肌的界限，辅助筛选适合射频消融的靶区域，避免消融后无效或过度损伤[35]。CMR-FT 可量化局部收缩异常区域，能帮助确定射频针的最佳穿刺路径，减少对传导系统的潜在风险。

在术后治疗效果评估方面，通过 T_1 mapping 与 ECV 技术，CMR 可早期发现消融区域的弥漫性纤维化进展，预测术后微循环障碍及心力衰竭风险[33]。CMR 能动态监测消融瘢痕的透壁性演变，结合 4D Flow MRI 技术评估 LVOTO 改善程度，为二次干预提供依据[36]。4D Flow MRI 可用于无创评估梗阻性 HCM 患者在接受酒精消融术后的血流动力学变化，术后左心室内压力阶差及能量损失均显著减小，进一步证明该技术可作为 HCM

治疗效果评估的重要工具[18]。然而,这项技术仍然存在一些挑战,包括时间分辨率的不足、影像采集时间的漫长以及后处理流程的复杂性,这些问题限制了其在临床实践中的广泛应用。

4 CMR对预后的风险评估

心肌纤维化是HCM的核心病理特征之一,并且与HCM并发的心律失常、心力衰竭以及猝死风险紧密相关[37]。当CMR中的LGE技术显示室间隔及左心室壁心内膜下区域的异常信号增强时,则提示局灶性纤维化存在[38],并且LGE范围越广,患者发生恶性心律失常和SCD的风险就越高。因此,LGE已被列为HCM危险分层的重要指标[39]。一项大规模、多中心研究证明左心室LGE占比超过15%的患者发生SCD的风险增加至2倍[40];一个荟萃分析项目也进一步验证了LGE的存在不仅与心源性死亡和全因死亡风险增加相关,还可提高SCD的发生率[41]。目前普遍采用埋藏式心律转复除颤器(implantable cardioverter defibrillator,ICD)来预防HCM中的SCD发生。鉴于CMR中的LGE技术能够精确地显示心肌纤维化的范围及其严重程度,其被列入了HCM患者植入ICD的评估准则,为ICD的植入治疗提供了指导[42]。2020年美国心脏学会(American Heart Association,AHA)和2023年欧洲心脏病学会(European Society of Cardiology,ESC)发布的肥厚型心肌病诊治指南均指出,对于HCM患者,若广泛存在LGE,被视为ICD植入风险评估的标准[43-44]。

尽管LGE能够精准评估局灶性纤维化,但是其对弥漫性纤维化的检测能力有限。T_1 Mapping及ECV则可以弥补这一不足,即使在LGE阴性的HCM患者中,T_1 Mapping值及ECV升高,仍可能提示早期心肌纤维化,因此,T_1 Mapping可帮助识别高危患者[45]。T_1 Mapping和ECV技术在SCD风险预测中的价值则逐渐受到了人们的广泛关注。有研究者对ECV与LGE在预测HCM患者突发SCD的风险能力进行了比较分析,发现相较于LGE,ECV在识别高风险患者方面具有更高的准确性,特别是在LGE检测结果为阴性的HCM患者中,T_1 Mapping值升高以及ECV增加均能够指示潜在性SCD发生风险[46]。此外,结合使用ECV和HCM Risk-SCD评分,可以提升对SCD及非持续性室性心动过速患者的识别精确度[47]。因此,T_1 Mapping技术和ECV技术则可能会做为未来SCD风险预测的补充参数。此外,一项关于DTI技术的研究表明各向异性分数降低不仅与心肌纤维化相关,还与室性心律失常的发生存在一定联系,这说明DTI技术在HCM风险评估及早期病变监测中有一定的潜在应用价值[48]。

需要注意的是,ECV值并非一个绝对客观的数值,其数值会受到成像方案的影响,产生系统偏倚。在HCM患者中,使用SASHA序列所测得的ECV通常会明显高于MOLLI序列得到的结果。研究表明,这种因序列不同而产生的系统性偏差,可能导致T_1值差异达几十毫秒,ECV值波动几个百分点[49-50]。这是由于MOLLI序列的测量结果容易受到患者心率和心肌T_2值的影响,对T_1值存在低估倾向;而SASHA序列虽然在理论上更接近真实值,但其图像噪声相对较大,可能影响测量的稳定性[51]。

除了成像序列,磁场强度以及不同设备的图像后处理算法,也会给ECV结果发生偏倚。磁场强度是影响T_1弛豫时间的基础物理因素。在3.0 T下,由于场强更高,组织的T_1值通常比1.5 T下更长。ECV虽然进行了校正,理论上对场强的依赖性降低,但并非完全消除。不同场强下测得的ECV正常范围可能存在系统性偏移[49]。此外,研究表明,即使是同一组患者的同一批图像,使用不同的后处理软件进行分析,得出的ECV值也可能存在显著差别[52]。专家共识也建议,在报告和解读ECV数值时,必须同步注明其获取的技术条件细节,包括磁场强度、序列名称、对比剂使用方案等。因此,对于HCM这类需要依据精准风险分层来指导重要临床决策的疾病,在使用ECV进行风险分层时,需兼顾具体的设备型号、处理算法及成像序列,以求对患者进行更合理的临床决策。

充血性心力衰竭是HCM中最常见的不良后果之一,其病理发展过程相对隐蔽。即便在左心室射血分数(ventricular ejection fraction,LVEF)未显著降低的早期阶段,患者仍可能因舒张功能受损而出现射血分数保留性心力衰竭。随着病情的进一步发展,一些患者可能会演变为终末期HCM[53]。研究发现,LGE所反映的纤维化程度与LVEF降低呈负相关,并与HCM患者因心力衰竭住院、死亡及纽约心功能分级进展风险密切相关[54]。有研究揭示,相较于无纤维化的HCM患者,LGE的存在及其累积程度与心力衰竭相关事件的发生率之间存在显著的相关性[55]。因此,LGE范围的变化可以作为预测疾病进展的指标,能协助判定患者是否有可能进展为终末期HCM。另有研究指出,CMR-FT评估显示的左心室应变异常与HCM患者的不良心血管事件(例如心力衰竭和心血管疾病导致的死亡)紧密相关,为风险分层提供了新的影像学证据[56]。

4D Flow MRI技术能够在三维空间内采集相位编码的血流数据,并通过后期处理提取包括流量、流速、壁面剪切力以及压力阶差等血流动力学参数。该技术已在主动脉和脑血管疾病的诊断与研究中得到了广泛的应用。相较于传统的2D Flow技术,4D Flow MRI能够更直观地展示心腔内复杂的血流变化情况[57]。一项研究则利用4D Flow MRI对HCM患者左心室舒张期的血流模式进行了分类,发现HCM患者心室血流容量储备减少,提示其有发生不良心血管事件的潜在风险[58]。

在将4D Flow MRI技术应用于HCM评估时,血流动力学参数会受到种族、年龄和性别的影响。因此,建立中国人群的正常值范围至关重要,一项针对中国健康人群的4D Flow CMR研究为此提供了参考[59]。该研究确立了健康中国成人左、右心室血流成分及动能参数的正常范围。该研究还发现,中国女性相较于男性,右心室直接血流比例更高,而双心室残余容积更低。随着年龄增长,双心室舒张早期动能显著下降,而舒张晚期动能显著上升,这一趋势在解读病理状态时,为区分生理性老化与病理性改变提供了关键依据。

然而,4D Flow CMR在临床实际应用中尚存在一定限制。该序列扫描时间通常较长,需8~12 min,要求患者在该过程中多次屏气,对于部分HCM患者、心功能不全者或老年人来说,可能因呼吸控制困难而导致图像伪影甚至扫描失败,影响参数的可靠性与重复性[57]。因此,在实际临床应用中,还需综合考虑患者的耐受能力与检查成功率。

5 未来展望

综上所述，CMR 凭借其高分辨率、多模态成像能力等优势，已成为 HCM 诊断、治疗评估和风险分层的重要检测手段，可以为 HCM 患者的预后预测提供关键性参考。CMR 结合 4D Flow MRI、DTI 等新兴影像技术进一步提高了对 LVOTO、心肌微观结构及血流动力学异常的评估能力，为精准医学提供了有力支持。随着 AI 和大数据快速发展，影像分析自动化和智能化已成为未来发展趋势，其中 AI 深度学习模型在区分 HCM 和法布里病方面已取得了高准确率，为影像诊断的标准化和客观性提供了新思路。然而，目前 CMR 影像数据的标准化、影像参数的异质性以及高昂的成本和复杂的后处理流程，仍然是限制其广泛应用的主要障碍。未来研究应解决这些问题，提高 CMR 的可及性和实用性。

参考文献

[1] 国家心血管病专家委员会心力衰竭专业委员会，中国医师协会心力衰竭专业委员会，中华医学会心血管分会心力衰竭学组，等. 中国肥厚型心肌病指南 2022[J]. 中华心力衰竭和心肌病杂志，2022,6(2): 80-105.

[2] 国家心血管病中心心肌病专科联盟，中国医疗保健国际交流促进会心血管病精准医学分会“中国成人肥厚型心肌病诊断与治疗指南 2023”专家组. 中国成人肥厚型心肌病诊断与治疗指南 2023[J]. 中国分子心脏病学杂志，2023,23(1): 5115-5149.

[3] 赵晓莹，金富伟. 心脏 MR 评估肥厚型心肌病患者心源性猝死风险的研究进展[J]. 实用放射学杂志，2023,39(3): 493-497.

[4] 牛俊颖，孙静. 心率变异性与扩张型心肌病患者预后的关系[J]. 江苏医药，2023,49(12): 1233-1237.

[5] Leo I, Nakou E, De Marvao A, et al. Imaging in women with heart failure: sex-specific characteristics and current challenges[J]. Card Fail Rev, 2022,8: e29.

[6] Dweck M R, Williams M C, Moss A J, et al. Computed tomography and cardiac magnetic resonance in ischemic heart disease[J]. J Am Coll Cardiol, 2016,68(20): 2201-2216.

[7] Elliott P M, Anastasakis A, Borger M A, et al. 2014 ESC Guidelines on diagnosis and management of hypertrophic cardiomyopathy[J]. Kardiol Pol, 2014,72(11): 1054-1126.

[8] Maron B J, Desai M Y, Nishimura R A, et al. Diagnosis and Evaluation of hypertrophic cardiomyopathy: JACC state-of-the-art review[J]. J Am Coll Cardiol, 2022,79(4): 372-389.

[9] 郑月，马运婷，沙立辉，等. CMR 参数及相关纹理分析预测肥厚型心肌病患者主要心脏不良事件研究进展[J]. 放射学实践，2024,39(3): 410-415.

[10] Sipola P, Magga J, Husso M, et al. Cardiac MRI assessed left ventricular hypertrophy in differentiating hypertensive heart disease from hypertrophic cardiomyopathy attributable to a sarcomeric gene mutation[J]. Eur Radiol, 2011,21(7): 1383-1389.

[11] Zhao Q, Chen Z, Qi C, et al. Cardiac magnetic resonance imaging for discrimination of hypertensive heart disease and hypertrophic cardiomyopathy: a systematic review and meta-analysis[J]. Front Cardiovasc Med, 2024,11: 1421013.

[12] 郭小青，蔡亚飞，李班班. 左心系统造影联合心脏磁共振成像对肥厚型心肌病的诊断价值[J]. 山西医药杂志，2025,54(2): 111-114.

[13] Dong Z, Tang Y, Sun P, et al. Early Identification of myocardial microstructural alterations in hypertrophic cardiomyopathy with in vivo cardiac diffusion-tensor imaging[J]. Radiol Cardiothorac Imaging, 2025,7(1): e240009.

[14] Das A, Kelly C, Teh I, et al. Phenotyping hypertrophic cardiomyopathy using cardiac diffusion magnetic resonance imaging: the relationship between microvascular dysfunction and microstructural changes[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2022,23(3): 352-362.

[15] Counseller Q, Aboelkassem Y. Recent technologies in cardiac imaging [J]. Front Med Technol, 2022, 4: 984492.

[16] Ariga R, Tunnicliffe E M, Manohar S G, et al. Identification of myocardial disarray in patients with hypertrophic cardiomyopathy and ventricular arrhythmias [J]. J Am Coll Cardiol, 2019, 73(20): 2493-2502.

[17] Chen W, Kuo L, Lin Y, et al. A deep learning approach to classify fabry cardiomyopathy from hypertrophic cardiomyopathy using cine imaging on cardiac magnetic resonance[J]. Int J Biomed Imaging, 2024,2024: 6114826.

[18] Dai Z, Iguchi N, Takamisawa I, et al. Alcohol septal ablation markedly reduces energy loss in hypertrophic cardiomyopathy with left ventricular outflow tract obstruction: a four-dimensional flow cardiac magnetic resonance study[J]. Int J Cardiol Heart Vasc, 2021,37: 100886.

[19] Schuster A, Hor K N, Kowallick J T, et al. Cardiovascular magnetic resonance myocardial feature tracking: concepts and clinical applications[J]. Circ Cardiovasc Imaging, 2016,9(4): e004077.

[20] 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.

[21] Cavus E, Muellerleile K, Schellert S, et al. CMR feature tracking strain patterns and their association with circulating cardiac biomarkers in patients with hypertrophic cardiomyopathy [J]. Clin Res Cardiol, 2021, 110(11): 1757-1769.

[22] Bogarapu S, Puchalski M D, Everitt M D, et al. Novel Cardiac Magnetic Resonance Feature Tracking (CMR-FT) analysis for detection of myocardial fibrosis in pediatric hypertrophic cardiomyopathy[J]. Pediatr Cardiol, 2016, 37(4):

663-673.

[23] 陈梓娴, 张莉, 南江, 等. 心脏磁共振评估肥厚型心肌病微循环障碍的研究进展[J]. 中国医学影像学杂志, 2023,31(2): 180-184.

[24] 杨文静, 赵世华, 陆敏杰. 心血管扩散加权成像:技术及临床应用进展[J]. 中国医学影像学杂志, 2022,30(1): 82-86.

[25] Hwang J, Lee S, Kim D, et al. Role of cardiovascular magnetic resonance imaging and cardiopulmonary exercise test in predicting composite clinical outcomes in patients with hypertrophic cardiomyopathy[J]. PLoS One, 2023, 18(5): e0285887.

[26] Kiaos A, Daskalopoulos G N, Kamperidis V, et al. Quantitative late gadolinium enhancement cardiac magnetic resonance and sudden death in hypertrophic cardiomyopathy: a meta-analysis[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2024, 17(5): 489-497.

[27] Sakhi H, Soulat G, Craiem D, et al. Association of impaired left ventricular mitral filling from 4D flow cardiac MRI and prognosis of hypertrophic cardiomyopathy[J]. Radiol Cardiothorac Imaging, 2024,6(2): e230198.

[28] El Mathari S, Van Ooij P, Merton R, et al. Feasibility of 4D-flow CMR for haemodynamic characterization in hypertrophic cardiomyopathy after septal myectomy with and without anterior mitral valve leaflet extension[J]. Interdiscip Cardiovasc Thorac Surg, 2024,40(1):ivae210.

[29] 郑琰, 马丽荣, 郭家璇, 等. 基于4D Flow CMR技术评价心肌纤维化对肥厚型心肌病患者左室舒张功能障碍的影响[J]. 磁共振成像, 2024,15(5): 119-125.

[30] Masri A, Cardoso R N, Abraham T P, et al. Effect of aficamten on cardiac structure and function in obstructive hypertrophic cardiomyopathy: SEQUOIA-HCM CMR substudy[J]. J Am Coll Cardiol, 2024,84(19): 1806-1817.

[31] Patel P, Dhillon A, Popovic Z B, et al. Left ventricular outflow tract obstruction in hypertrophic cardiomyopathy patients without severe septal hypertrophy: implications of mitral valve and papillary muscle abnormalities assessed using cardiac magnetic resonance and echocardiography[J]. Circ Cardiovasc Imaging, 2015,8(7): e003132.

[32] Rowin E J, Maron B J, Maron M S. The Hypertrophic cardiomyopathy phenotype viewed through the prism of multimodality imaging: clinical and etiologic implications[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2020,13(9): 2002-2016.

[33] Chen Y, Zhao X, Yuan J, et al. Sex-related differences in left ventricular remodeling and outcome after alcohol septal ablation in hypertrophic obstructive cardiomyopathy: insights from cardiovascular magnetic resonance imaging[J]. Biol Sex Differ, 2022,13(1): 37.

[34] Dong T, Gilliland Y, Kramer C M, et al. Multimodality imaging of hypertrophic cardiomyopathy[J]. Prog Cardiovasc Dis, 2023,80: 14-24.

[35] Liu Q, Qiu H, Jiang R, et al. Selective interventricular septal radiofrequency ablation in patients with hypertrophic obstructive cardiomyopathy: who can benefit?[J]. Front Cardiovasc Med, 2021,8: 743044.

[36] Song Y, Bi X, Chen L, et al. Reduced myocardial septal function assessed by cardiac magnetic resonance feature tracking in patients with hypertrophic obstructive cardiomyopathy: associated with histological myocardial fibrosis and ventricular arrhythmias[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2022,23(8): 1006-1015.

[37] 崔辰, 赵世华, 陆敏杰. 心脏磁共振在肥厚型心肌病诊治中的应用进展[J]. 心血管病学进展, 2024,45(2): 97-102.

[38] Reiter U, Reiter C, Kräuter C, et al. Cardiac magnetic resonance T1 mapping. Part 2: diagnostic potential and applications[J]. Eur J Radiol, 2018,109: 235-247.

[39] Liu J, Zhao S, Yu S, et al. Patterns of Replacement fibrosis in hypertrophic cardiomyopathy[J]. Radiology, 2022,302(2): 298-306.

[40] Chan R H, Maron B J, Olivotto I, et al. Prognostic value of quantitative contrast-enhanced cardiovascular magnetic resonance for the evaluation of sudden death risk in patients with hypertrophic cardiomyopathy[J]. Circulation, 2014,130(6): 484-495.

[41] Briasoulis A, Mallikethi-reddy S, Palla M, et al. Myocardial fibrosis on cardiac magnetic resonance and cardiac outcomes in hypertrophic cardiomyopathy: a meta-analysis[J]. Heart, 2015,101(17): 1406-1411.

[42] Badr A, Farina J, Arsanjani R, et al. Rethinking risk in hypertrophic cardiomyopathy: assessing the role of myocardial fibrosis and left ventricular hypertrophy in sudden cardiac death[J]. Mayo Clin Proc Innov Qual Outcomes, 2024,8(6): 517-520.

[43] Ommen S R, Mital S, Burke M A, et al. 2020 AHA/ACC Guideline for the diagnosis and treatment of patients with hypertrophic cardiomyopathy: a report of the american college of cardiology/american heart association joint committee on clinical practice guidelines[J]. Circulation, 2020,142(25): e558-e631.

[44] Arbelo E, Protonotarios A, Gimeno J R, et al. 2023 ESC Guidelines for the management of cardiomyopathies[J]. Eur Heart J, 2023,44(37): 3503-3626.

[45] 罗心仪, 鹿冠玉, 区杰浩, 等. 基于CMR 4D Flow技术探讨梗阻性肥厚型心肌病室间隔心肌切除术前、术后升主动脉血流动力学变化[J]. 中国医师杂志, 2024,26(1): 25-30.

[46] Avanesov M, Münch J, Weinrich J, et al. Prediction of the estimated 5-year risk of sudden cardiac death and syncope or non-sustained ventricular tachycardia in patients with hypertrophic cardiomyopathy using late gadolinium enhancement

and extracellular volume CMR[J]. Eur Radiol, 2017, 27(12): 5136-5145.

[47] Pu L, Li J, Qi W, et al. Current perspectives of sudden cardiac death management in hypertrophic cardiomyopathy[J]. Heart Fail Rev, 2024,29(2): 395-404.

[48] LLaghzali O, Kara D, Chen S, et al. Translational insights into myocardial deformation and fibrosis in hypertrophic cardiomyopathy using diffusion tensor MRI[J]. JACC Adv, 2025, 4(12):102337.

[49] Roujol S, Weingärtner S, Foppa M, et al. Accuracy, precision, and reproducibility of four T1 mapping sequences: a head-to-head comparison of MOLLI, ShMOLLI, SASHA, and SAPPHIRE [J]. Radiology, 2014, 272(3): 683-689.

[50] Haaf P, Garg P, Messroghli D R, et al. Cardiac T1 Mapping and Extracellular Volume (ECV) in clinical practice: a comprehensive review [J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2016, 18 (1): 89.

[51] Messroghli D R, Moon J C, Ferreira V M, et al. Clinical recommendations for cardiovascular magnetic resonance mapping of T1, T2, T2* and extracellular volume: a consensus statement by the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance (SCMR) endorsed by the European Association for Cardiovascular Imaging (EACVI) [J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2017, 19(1): 75.

[52] Liu C Y, Liu Y C, Wu C, et al. Evaluation of age-related interstitial myocardial fibrosis with cardiac magnetic resonance contrast-enhanced T1 mapping: MESA (Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis) [J]. J Am Coll Cardiol, 2013, 62(14): 1280-1287.

[53] Chen Q, Hu J, Hu J, et al. Clinical characteristics and prognosis of patients with hypertrophic cardiomyopathy and heart failure with preserved ejection fraction[J]. Clin Res Cardiol, 2024,113(5): 761-769.

[54] Maron B J, Rowin E J, Udelson J E, et al. Clinical spectrum and management of heart failure in hypertrophic cardiomyopathy[J]. JACC Heart Fail, 2018,6(5): 353-363.

[55] O'hanlon R, Grasso A, Roughton M, et al. Prognostic significance of myocardial fibrosis in hypertrophic cardiomyopathy [J]. J Am Coll Cardiol, 2010,56(11): 867-874.

[56] Hinojar R, Fernández-golfín C, González-gómez A, et al. Prognostic implications of global myocardial mechanics in hypertrophic cardiomyopathy by cardiovascular magnetic resonance feature tracking. Relations to left ventricular hypertrophy and fibrosis[J]. Int J Cardiol, 2017,249: 467-472.

[57] Bissell M M, Raimondi F, Ait Ali L, et al. 4D Flow cardiovascular magnetic resonance consensus statement: 2023 update [J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2023,25(1): 40.

[58] Ashkir Z, Johnson S, Lewandowski A J, et al. Novel insights into diminished cardiac reserve in non-obstructive hypertrophic cardiomyopathy from four-dimensional flow cardiac magnetic resonance component analysis[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2023,24(9): 1192-1200.

[59] Zhao X, Tan R S, Garg P, et al. Age- and sex-specific reference values of biventricular flow components and kinetic energy by 4D flow cardiovascular magnetic resonance in healthy subjects [J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2023, 25 (1): 50.

（2025-07-29收稿）
（本文编校：朱岚）