

# 心脏磁共振特征追踪技术在射血分数保留性心力衰竭相关疾病中的研究

梁士楚, 马敏, 贺勇

**【摘要】** 心力衰竭(心衰)是多种心血管疾病的终末期阶段,是最常见、致残和致命的疾病之一。射血分数保留性心力衰竭(HFpEF)占总心衰人数的 50%,其治疗较为特殊,早期诊断、早期干预尤为重要。心脏磁共振特征追踪技术(CMR-FT)可以提供心肌的力学信息,在 HFpEF 相关疾病的功能评价、早期诊断、鉴别诊断以及预后判断中具有重要的优势,本文综述了 CMR-FT 在 HFpEF 相关疾病中的研究进展。

**【关键词】** 心脏; 磁共振成像; 心力衰竭; 研究

**【中图分类号】** R322.11; R445.2; R541.62; R-05 **【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1000-0313(2022)10-1313-05

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2022.10.022



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

心力衰竭(心衰)是多种心血管疾病的终末阶段,是最常见、致残和致命的疾病之一。据统计,我国 3.30 亿心血管病人群中心衰患者占 890 万<sup>[1]</sup>。心力衰竭根据左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)可分为射血分数降低性心衰(heart failure with reduced ejection fraction, HFrEF)、射血分数中间值心衰(heart failure with mid-range ejection fraction, HFmrEF)和射血分数保留性心力衰竭(heart failure with preserved ejection fraction, HFpEF),其 LVEF 值依次为 < 40%、40% ~ 49% 和 ≥ 50%<sup>[2]</sup>。HFpEF 正逐渐成为最重要的一种表型,约占总心衰人数的 50%<sup>[3]</sup>,其早期诊断、早期干预尤为重要<sup>[4]</sup>。

HFpEF 按照病因学分型可分为 5 型(表 1)<sup>[5]</sup>,常见于高血压病、肥厚型心肌病(hypertrophic cardiomyopathy, HCM)、限制性心肌病(restrictive cardiomyopathy, RCM)等疾病,常存在左室肥厚或左房增大等充盈压增高,表现为舒张功能受损。磁共振具有无创、无辐射、分辨率高、重复性好等优势,而且心脏磁共振特征追踪技术(cardiovascular magnetic resonance feature tracking, CMR-FT)可进一步提供心肌的力学信息,在 HFpEF 相关疾病的功能评价、早期诊断、早

期鉴别诊断以及预后判断中具有重要优势。

表 1 HFpEF 的病因学分型<sup>[5]</sup>

| 分类      | 命名               | 相关疾病                                                |
|---------|------------------|-----------------------------------------------------|
| HFpEF-1 | 血管疾病相关 HFpEF     | 高血压病、冠状动脉疾病、冠状动脉微循环障碍相关 HFpEF                       |
| HFpEF-2 | 心肌病相关 HFpEF      | 肥厚型心肌病、浸润性心肌病(淀粉样变、Fabry 病等)引起的 HFpEF               |
| HFpEF-3 | 右心和肺动脉疾病相关 HFpEF | 常指肺动脉高压伴或不伴右心功能障碍                                   |
| HFpEF-4 | 瓣膜和心律失常相关 HFpEF  | 瓣膜疾病和房颤导致的 HFpEF                                    |
| HFpEF-5 | 心脏外疾病相关 HFpEF    | 代谢性疾病:糖尿病、肥胖等高输出量相关疾病;贫血、肝病、甲亢、动静脉瘘;其他:慢性肾脏病、肿瘤放疗术后 |

## CMR-FT 概述

心脏磁共振(cardiovascular magnetic resonance, CMR)技术是一项是无创、无辐射,评估心室容积、功能、心肌灌注以及组织特征的准确方法,可通过多序列成像技术提供媲美病理检查的心肌组织异常信息<sup>[6]</sup>。现有指南 CMR 可测定 HFpEF 的代谢因子和纤维化因子<sup>[7]</sup>。CMR-FT 可进一步提供心肌的力学信息,定量分析室壁力学改变,显示心肌病变严重程度,更为精确地反映心脏局部或/和整体功能及运动状态<sup>[8-9]</sup>。CMR-FT 的常用参数包括:心肌应变(strain)、应变率(strain rate, SR)、整体纵向应变(global longitudinal strain, GLS)、整体径向应变(global radial strain, GRS)和整体环向应变(global circumferential strain, GCS)。

**作者单位:** 610041 成都,四川大学华西医院心脏内科(梁士楚、马敏、贺勇); 610051 成都,成都市第六人民医院心血管内科(马敏)

**作者简介:** 梁士楚(1998-),男,四川成都人,硕士研究生,主要从事冠心病诊疗、心血管影像诊断研究。

**通讯作者:** 贺勇; E-mail: heyong\_huaxi@163.com; 马敏; E-mail: found\_hope@163.com

**基金项目:** 四川省科技厅应用基础重点项目(NO. 2017JY0026); 中国博士后科学基金第 68 批面上资助(NO. 2020M683325); 四川大学华西医院专职博士后研发基金(NO. 2020HXBH048); 2020 年四川省医学(青年创新)科研课题(NO. Q20061)

通过平衡稳态自由进动电影序列成像可以获得心肌应变以及 SR,具有良好的观察者内和观察者间一致性和高度的可重复性<sup>[10]</sup>。心肌应变为正值表示心肌组织的伸长或增厚,为负值表示心肌组织缩短或变薄。与应变对应,SR 包括整体纵向应变率(global longitudinal strain, GLSR)、整体径向应变率(global radial strain, GRSR)和整体环向应变率(global circumferential strain, GCSR)。

## CMR-FT 与功能评价

无论 LVEF 如何,心室收缩和舒张功能障碍有可能共存于同一例心衰患者,并导致心房功能障碍<sup>[11]</sup>。CMR-FT 能通过评价舒张和收缩功能对 HFpEF 及相关疾病做出早期诊断和预后判断。

### 1. 舒张功能

舒张功能障碍是 HFpEF 临床表现和病理生理学进展的主要原因,评估 HFpEF 的舒张功能对其病情评估有重要意义<sup>[12]</sup>。

左室 GLS 异常在识别心血管事件高发的 HFpEF 患者中有重要意义<sup>[13]</sup>。Ito 等<sup>[14]</sup>纳入了 18 例 HFpEF 患者和 18 例健康对照进行 CMR-FT 检查,并检测 HFpEF 组的左心室的舒张特性。研究发现 HFpEF 组的细胞外容积分数(extracellular volume fraction, ECV)显著增高。ECV 是细胞外间质容积占整个心肌容积的百分比是心肌组织硬度的一项重要指标<sup>[15]</sup>, HFpEF 患者 ECV 较正常人高,ECV 越高的 HFpEF 患者其发病率与死亡率也越高<sup>[16]</sup>。此外,研究还发现 GLS 是左室主动舒张的时间常数(Tau)改变的唯一独立预测因子,联合左室 GLS 和 ECV 或更能评估 HFpEF 患者舒张功能障碍的程度。

### 2. 收缩功能

高血压心脏病(hypertensive heart disease, HHD)是引起 HFpEF 的原因之一,尽管 HHD 和肥厚性心肌病(hypertrophic cardiomyopathy, HCM)表现出类似的收缩功能障碍,但通过 CMR-FT 测定 GLS 可以区分 HHD 和 HCM,且其效能与左室肥厚和纤维化标志物类似<sup>[17]</sup>。动物试验也得出相似结论,即 CMR-FT 所测得的 SR 较 LVEF 能更敏感地评估高血压引起的早期心脏功能受损程度,并且这一改变与心脏细胞外间质纤维化增多有关<sup>[18]</sup>。

Kowallick 等<sup>[19]</sup>各纳入 10 例 HCM 患者、HFpEF 患者和健康对照,发现 HCM 和 HFpEF 的左房储备功能和左房导管功能下降,被动应变和峰值早期负应变率下降,表明其左室顺应性下降<sup>[20]</sup>。主动应变和峰值晚期负应变率是心脏收缩泵功能的参数,两者在 HCM 组中上升,而在 HFpEF 组中降低,表明 HFpEF

患者存在收缩功能障碍。

即使 HFpEF 患者 LVEF 变化不明显,其收缩功能也可能存在不同程度的损害,在舒张功能障碍基础上常合并左室收缩功能不全和不同步<sup>[21]</sup>。GLS 可评估心肌细微运动变化,在 LVEF 降低前提示 HFpEF 患者心肌运动减低,能更早的反映出收缩功能的降低<sup>[22]</sup>,这对于制定和指导临床诊疗方案具有重要的价值。

## CMR-FT 与早期诊断及鉴别诊断

### 1. 高血压导致的 HFpEF

PINNACLE 等研究<sup>[23]</sup>发现 HFpEF 患者的年龄偏大,且主要为女性和高血压(hypertension, HTN)。HTN 是最常引起 HFpEF 的疾病,约 60%~89% HFpEF 患者伴 HTN<sup>[24]</sup>,基于 CMR-FT 检测心肌应变可早期发现 HHD,对患者亚临床心功能障碍做到早期干预<sup>[25-26]</sup>。

He 等<sup>[27]</sup>通过对比 84 例 HFpEF 伴 HTN(HFpEF-HTN)患者、72 例 HTN 患者和 70 例健康对照发现,收缩早期整体纵向峰值应变率(global peak systolic longitudinal SR, sGLSR)敏感度 85.7%,特异度 52.8%,对区分 HFpEF-HTN 和 HTN 患者的诊断价值最高。舒张早期整体纵向峰值应变率(global peak early diastolic longitudinal SR, eGLSR)与 HFpEF-HTN 的诊断独立相关,sGLSR 和 eGLSR 对于区分 HTN 和 HFpEF-HTN 以及评估 HTN 到 HFpEF-HTN 的进展有潜在价值。

CMR-FT 可在左心室肥厚之前发现左心房储备、导管功能异常。Li 等<sup>[28]</sup>入组 73 例 HTN 患者(29 例左心室肥厚和 44 例非左心室肥厚)和 29 例健康对照发现,无论左心室肥厚与否,与健康对照组相比,HTN 患者左房储备功能和导管功能均严重受损,而心房收缩泵功能在非左心室肥厚者中得以保留,此结果与 Kowallick 等<sup>[19]</sup>类似。在鉴别诊断方面,两项研究<sup>[19,28]</sup>认为被动应变对于区分 HTN 和健康对照的诊断价值最高,而主动应变和峰值晚期负应变率在 HCM 中上升,在 HFpEF 中下降,也可用于区分 HCM 与 HFpEF。

### 2. 限制性心肌病(RCM)导致的 HFpEF

心肌淀粉样变性(cardiac amyloidosis, CA)是最常引起 RCM 的原因之一,目前研究支持 CMR 作为 RCM 诊断的进一步依据<sup>[29]</sup>,其中 CMR-FT 所得的径向应变在区分患者是否为 CA 的诊断价值较高<sup>[30]</sup>。

CMR-FT 可在整体和在心内、外膜两个层面上共同评估心肌功能,早期发现心肌损害,做到早期干预。整体层面上 CMR-FT 可监测异常左室心肌变形。Li

等<sup>[31]</sup>纳入 42 例免疫球蛋白轻链型心肌淀粉样 (immunoglobulin light chain cardiac amyloidosis, AL-CA) 患者 (26 例 LVEF 正常, 16 例 LVEF 受损) 和 35 例健康对照发现, LVEF 正常 AL-CA 患者的纵向峰值应变在心尖部保持不变, 中、基底节段明显降低。心肌内、外膜层面上王哲涛等<sup>[32]</sup>发现随 LVEF 降低, 心肌内、外膜应变绝对值依次降低 (表明随心肌组织受蛋白质浸润不断加重其变形能力逐渐减小), 且心内膜、心外膜应变改变早于 LVEF 改变。

### 3. 急性心肌炎 (ACM) 导致的 HFpEF

急性心肌炎 (acute myocarditis, ACM) 常与病毒感染有关, 若治疗不当导致心肌炎症持续存在, 或可发展为扩张性心肌病。通过 CMR-FT 测得的左心室应变能早期发现 ACM 所导致的心肌损害。André 等<sup>[33]</sup>和吕桑英<sup>[34]</sup>运用 CMR-FT 对比 LVEF 正常的 ACM 患者与健康对照发现, ACM 患者 GRS 显著下降, 其灵敏度和准确度最高; GCS 的阴性预测值最高; GCSR 的阳性预测值和特异度最高。ACM 患者左室收缩功能较舒张功能受损明显, 但受损程度通常较轻, 通常 LVEF 未见明显降低<sup>[34]</sup>。

## CMR-FT 与预后判断

CMR-FT 不仅能够评估 HFpEF 患者的左、右心功能, 还能评估由肺动脉高压 (pulmonary hypertension, PH)、主动脉瓣狭窄 (aortic stenosis, AS)、RCM、急性心肌梗死 (acute myocardial infarction, AMI) 等疾病所致 HFpEF 的预后。由 CMR-FT 获得的 GLS 是 HFpEF 患者死亡率的一个强有力的独立预测因子, GLS 每恶化 1%, 死亡风险增加 22.8%<sup>[35]</sup>。

### 1. 肺动脉高压 (PH)

右心功能在 HFpEF 预后价值中有重要作用, PH 的预后与右室功能有关, 用 CMR-FT 定量测定的右室应变与 PH 的严重程度和不良预后相关。de Siqueira 等<sup>[36]</sup>回顾性评估了 116 例行右心导管术后 1 个月内的 PH 患者, 发现 PH 合并右心室射血分数 (right ventricle ejection fraction, RVEF) 异常患者较 RVEF 正常者和无 PH 者所有应变和 SR 均降低, PH 者的 GCSR 又较无 PH 者显著降低。GLS、GLSR 和 GCSR 与复合终点独立相关, 其中 GCSR 能够明确区分有无不良事件的患者。

### 2. 主动脉瓣狭窄 (AS)

Kim 等<sup>[37]</sup>纳入了 123 例中重度的 AS 患者和 32 例健康对照, 发现 AS 患者与健康对照组之间、中度与重度 AS 患者之间的整体峰值应变存在明显差异。在 67 例无症状且射血分数保留的 AS 患者中有 22 例患者发生心血管事件, 其二维整体纵向峰值应变 (global

longitudinal peak strain, GLPS) 受损者预后较差, 表明 GLPS 在预测无症状且射血分数保留 AS 患者的预后中具有价值。

此外, 重度 AS 患者左室舒张末期容积越大, 左室 GLS 受损越严重, 左室纤维化程度越大, PH 发生可能性越大<sup>[38]</sup>。

### 3. 限制性心肌病 (RCM)

心脏受累是 AL-CA 死亡率的主要决定因素, CMR-FT 所测得应变与 AL-CA 患者全因死亡率相关。Illman 等<sup>[39]</sup>运用 CMR-FT 回顾性分析 75 例新诊断的 AL-CA 患者, 其中死亡患者共 52 例, 存活患者的平均随访时间为 1.7 年, LVEF 为  $58 \pm 13\%$ 。单因素分析中整体径向 ( $HR = 0.95, P < 0.01$ )、周向 ( $HR = 1.09, P < 0.01$ ) 和纵向 ( $HR = 1.08, P < 0.01$ ) 均与全因死亡率相关。多因素模型中径向应变 ( $HR = 0.96, P = 0.02$ )、环向应变 ( $HR = 1.09, P = 0.03$ ) 和纵向应变 ( $HR = 1.07, P = 0.04$ ) 与生物标志物 3 期 ( $cT-nT \geq 0.035 \text{ mg/L}$  且  $NT-proBNP \geq 332 \text{ ng/L}$ ) 相结合仍有较好的预后价值。

### 4. 急性心肌梗死 (AMI)

CMR-FT 能为 LVEF 维持或仅中度降低的患者的预后提供独立的预后信息。周向、径向均匀性比估计值是所有时间点、所有可获得节段应变空间均匀性的体现, 由 CMR-FT 获得的应变不同步性可区分心肌病患者和健康人群, 且不需要特定的 CMR 序列, 在临床测量机械不同步性中具有较大潜力<sup>[40]</sup>。Stiermaier 等<sup>[41]</sup>纳入了 1082 例 AMI 患者, 在 AMI 3d 后行 CMR-FT 检查, 临床终点为 12 个月内主要不良心脏事件发生率 (全因死亡、再梗死和新发充血性心力衰竭)。结果发现有严重心脏不良事件的患者与无事件组比较, 其周向、径向均匀性比估计值均较低。尽管均匀度比估计值不能提供整个队列中独立的预后信息, 但在  $LVEF > 35\%$  ( $n = 959$ ) 的 AMI 患者中, 周向均匀度比估计值是预后的独立预测因子, 而 LVEF 与 AMI 患者的不良事件无关。

CMR-FT 测得的 GCS 对 AMI 患者左室功能的预测具有独立价值, 评估左室 GCS 可预测首次 AMI 患者的长期预后, 且左室 GCS 的预测能力相对于其他临床和 CMR 指标相对递增<sup>[42]</sup>。与钆对比剂延迟增强 (late gadolinium enhancement, LGE) 相比, 用 CMR-FT 估计周向应变可客观评估梗死范围而不需使用对比剂, 准确识别梗死合并为微循环障碍的心肌, 评估心肌功能恢复情况<sup>[43-44]</sup>。

综上所述, CMR-FT 由于成像便捷、图像空间分辨率高、参数测量灵活等优点, 在 HTN、HCM、CA、AS 以及 AMI 等疾病均有临床应用, 而此类疾病均可

能导致 HFpEF。在针对 HFpEF 的功能评价、早期诊断和预后判断中,CMR-FT 可以提供心肌收缩的形态学特征、心脏舒缩功能,甚至是心脏病理学等几乎所有分支的心室功能和组织改变,为临床医生的判断以及诊疗方案的制定提供有力依据。与二维斑点追踪超声心动图相比,CMR-FT 在正常和疾病人群中的可重复性更高<sup>[45-46]</sup>。后续研究可通过 CMR-FT 研究不同病种导致 HFpEF 的原因及早期变化。

应用 CMR-FT 评价 HFpEF 具有较高的可行性,但 CMR-FT 目前相关疾病存在一定局限性:①CMR-FT 厂家较多,其软件和算法尚缺乏统一标准,不同厂家 CMR-FT 值不能通用<sup>[47]</sup>;②CMR-FT 基于二维平面成像,其测量值可能受到三维跨平面运动干扰;③目前研究样本量较小,且部分研究方向尚存在空白,有待未来开展。未来,CMR-FT 可与人工智能、影像组学等技术结合,建立从数据到临床结果的数学关系模式<sup>[48-49]</sup>,提高对于 HFpEF 相关疾病诊断的准确性,更合理、更优化地指导临床应用。

#### 参考文献:

- [1] 中国心血管健康与疾病报告 2020 概要[J].中国循环杂志,2021,36(6):521-545.
- [2] Lekavich CL, Barksdale DJ, Neelon V, Wu JR. Heart failure preserved ejection fraction (HFpEF): an integrated and strategic review[J]. Heart Fail Rev, 2015, 20(6): 643-653.
- [3] 胡鼎耀, 刘芑宸, 杜雅丽, 等. 射血分数保留的心力衰竭危险因素的研究进展[J]. 中华心力衰竭和心肌病杂志, 2019, 3(1): 49-54.
- [4] 韩雅玲. 遵循新指南: 优化心力衰竭患者的诊断、治疗和管理[J]. 中华心血管病杂志, 2018, 46(10): 753-755.
- [5] Ge J. Coding proposal on phenotyping heart failure with preserved ejection fraction: A practical tool for facilitating etiology-oriented therapy[J]. Cardiol J, 2020, 27(1): 97-98.
- [6] Zhao S. Letter to the editor: is it time for imaging to level with pathology? [J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2020, 36(11): 2249-2250.
- [7] 廖玉华, 杨杰孚, 张健, 等. 舒张性心力衰竭诊断和治疗专家共识[J]. 临床心血管病杂志, 2020, 36(1): 1-10.
- [8] 李舒曼, 程敬亮, 张勇, 等. 磁共振心肌组织追踪技术定量评估扩张型心肌病左心室心肌应变力的价值[J]. 放射学实践, 2020, 35(11): 1429-1433.
- [9] 张艳, 赵燕, 吴昆华, 等. 心脏磁共振特征追踪技术在检测成人非梗阻性肥厚型心肌病患者心肌纤维化中的应用[J]. 中华心力衰竭和心肌病杂志, 2021, 5(1): 30-34.
- [10] Kowallick JT, Morton G, Lamata P, et al. Inter-study reproducibility of left ventricular torsion and torsion rate quantification using MR myocardial feature tracking[J]. J Magn Reson Imaging, 2016, 43(1): 128-137.
- [11] 汪朝晖, 廖玉华. 浅谈以左室射血分数分类心力衰竭的局限性[J]. 临床心血管病杂志, 2020, 36(2): 105-106.
- [12] Lam CS, Roger VL, Rodeheffer RJ, et al. Cardiac structure and ventricular-vascular function in persons with heart failure and preserved ejection fraction from olmsted county, minnesota[J]. Circulation, 2007, 115(15): 1982-1990.
- [13] Shah AM, Claggett B, Sweitzer NK, et al. Prognostic importance of impaired systolic function in heart failure with preserved ejection fraction and the impact of spironolactone[J]. Circulation, 2015, 132(5): 402-414.
- [14] Ito H, Ishida M, Makino W, et al. Cardiovascular magnetic resonance feature tracking for characterization of patients with heart failure with preserved ejection fraction: correlation of global longitudinal strain with invasive diastolic functional indices[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2020, 22(1): 42.
- [15] Rommel KP, von Roeder M, Latuscynski K, et al. Extracellular volume fraction for characterization of patients with heart failure and preserved ejection fraction[J]. J Am Coll Cardiol, 2016, 67(15): 1815-1825.
- [16] Roy C, Slimani A, de Meester C, et al. Associations and prognostic significance of diffuse myocardial fibrosis by cardiovascular magnetic resonance in heart failure with preserved ejection fraction[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2018, 20(1): 55.
- [17] Neisius U, Myerson L, Fahmy AS, et al. Cardiovascular magnetic resonance feature tracking strain analysis for discrimination between hypertensive heart disease and hypertrophic cardiomyopathy[J]. PLoS One, 2019, 14(8): e0221061.
- [18] 庄白燕, 崔辰, 何健, 等. 高血压早期心肌应力及细胞外间质容积的动物实验研究[J]. 放射学实践, 2020, 35(7): 865-872.
- [19] Kowallick JT, Kutty S, Edelmann F, et al. Quantification of left atrial strain and strain rate using Cardiovascular Magnetic Resonance myocardial feature tracking: a feasibility study[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2014, 16(1): 60.
- [20] Hoit BD. Left atrial size and function: role in prognosis[J]. J Am Coll Cardiol, 2014, 63(6): 493-505.
- [21] Santos AB, Kraigher-Krainer E, Bello N, et al. Left ventricular dyssynchrony in patients with heart failure and preserved ejection fraction[J]. Eur Heart J, 2014, 35(1): 42-47.
- [22] DeVore AD, McNulty S, Alenezi F, et al. Impaired left ventricular global longitudinal strain in patients with heart failure with preserved ejection fraction: insights from the RELAX trial[J]. Eur J Heart Fail, 2017, 19(7): 893-900.
- [23] Ibrahim NE, Song Y, Cannon CP, et al. Heart failure with mid-range ejection fraction: characterization of patients from the PINNACLE Registry®[J]. ESC Heart Fail, 2019, 6(4): 784-792.
- [24] Bhuiyan T, Maurer MS. Heart failure with preserved ejection fraction: persistent diagnosis, therapeutic enigma[J]. Curr Cardiovasc Risk Rep, 2011, 5(5): 440-449.
- [25] 时园园, 张勇, 程敬亮, 等. 磁共振心肌组织追踪技术定量评估高血压性心脏病左心室心肌应变[J]. 放射学实践, 2020, 35(7): 873-877.
- [26] 杨朝霞, 周宁, 唐大中, 等. 心脏 MR 特征追踪技术早期评价高血压性心脏病左心室亚临床功能障碍的研究[J]. 中华放射学杂志, 2021, 55(3): 257-263.
- [27] He J, Sirajuddin A, Li S, et al. Heart failure with preserved ejection fraction in hypertension patients: a myocardial MR strain study[J]. J Magn Reson Imaging, 2021, 53(2): 527-539.
- [28] Li L, Chen X, Yin G, et al. Early detection of left atrial dysfunction assessed by CMR feature tracking in hypertensive patients[J]. Eur Radiol, 2020, 30(2): 702-711.
- [29] 吴倩芸, 李新立. 限制性心肌病的诊疗进展[J]. 中华心力衰竭和

- 心脏病杂志, 2017, 1(2): 119-122.
- [30] Pandey T, Alapati S, Wadhwa V, et al. Evaluation of myocardial strain in patients with amyloidosis using cardiac magnetic resonance feature tracking[J]. *Curr Probl Diagn Radiol*, 2017, 46(4): 288-294.
- [31] Li R, Yang ZG, Xu HY, et al. Myocardial deformation in cardiac amyloid light-chain amyloidosis: assessed with 3T cardiovascular magnetic resonance feature tracking[J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 3794.
- [32] 王哲涛, 王春华, 陈榆舒, 等. MRI 组织追踪技术在心脏淀粉样变性中的应用[J]. *四川大学学报(医学版)*, 2019, 50(4): 466-470.
- [33] André F, Stock FT, Riffel J, et al. Incremental value of cardiac deformation analysis in acute myocarditis: a cardiovascular magnetic resonance imaging study[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2016, 32(7): 1093-1101.
- [34] 吕桑英. 利用心脏磁共振特征追踪技术探究左心室心肌应变参数对急性心肌炎患者的诊断价值[D]. 浙江大学, 2019: 22-26.
- [35] Romano S, Judd RM, Kim RJ, et al. Feature-tracking global longitudinal strain predicts mortality in patients with preserved ejection fraction: a multicenter study[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(4): 940-947.
- [36] de Siqueira ME, Pozo E, Fernandes VR, et al. Characterization and clinical significance of right ventricular mechanics in pulmonary hypertension evaluated with cardiovascular magnetic resonance feature tracking[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2016, 18(1): 39.
- [37] Kim MY, Park EA, Lee W, Lee SP. Cardiac magnetic resonance feature tracking in aortic stenosis: exploration of strain parameters and prognostic value in asymptomatic patients with preserved ejection fraction[J]. *Korean J Radiol*, 2020, 21(3): 268-279.
- [38] Gumauskiene B, Padervinskiene L, Vaskelyte JJ, et al. Left ventricular morphology and function as a determinant of pulmonary hypertension in patients with severe aortic stenosis: cardiovascular magnetic resonance imaging study[J]. *Medicina (Kaunas)*, 2019, 55(10): 711.
- [39] Illman JE, Arunachalam SP, Arani A, et al. MRI feature tracking strain is prognostic for all-cause mortality in AL amyloidosis[J]. *Amyloid*, 2018, 25(2): 101-108.
- [40] Taylor RJ, Umar F, Moody WE, et al. Feature-tracking cardiovascular magnetic resonance as a novel technique for the assessment of mechanical dyssynchrony[J]. *Int J Cardiol*, 2014, 175(1): 120-125. DOI: 10.1016/j.ijcard.2014.04.268
- [41] Stiermaier T, Backhaus SJ, Lange T, et al. Cardiac magnetic resonance left ventricular mechanical uniformity alterations for risk assessment after acute myocardial infarction[J]. *J Am Heart Assoc*, 2019, 8(16): e011576.
- [42] Nucifora G, Muser D, Tioni C, et al. Prognostic value of myocardial deformation imaging by cardiac magnetic resonance feature-tracking in patients with a first ST-segment elevation myocardial infarction[J]. *Int J Cardiol*, 2018, 271(22): 387-391.
- [43] Buss SJ, Krautz B, Hofmann N, et al. Prediction of functional recovery by cardiac magnetic resonance feature tracking imaging in first time ST-elevation myocardial infarction. Comparison to infarct size and transmuralty by late gadolinium enhancement[J]. *Int J Cardiol*, 2015, 183(6): 162-170.
- [44] 晏乘曦, 常莹, 任美吉, 等. 心肌应变力检测急性心肌梗死再灌注术后微循环障碍: 基于特征追踪心脏 MRI[J]. *放射学实践*, 2020, 35(8): 1025-1029.
- [45] Valente F, Gutierrez L, Rodríguez-Eyras L, et al. Cardiac magnetic resonance longitudinal strain analysis in acute ST-segment elevation myocardial infarction: A comparison with speckle-tracking echocardiography[J]. *Int J Cardiol Heart Vasc*, 2020, 29(4): 100560.
- [46] Truong VT, Palmer C, Young M, et al. Right atrial deformation using cardiovascular magnetic resonance myocardial feature tracking compared with two-dimensional speckle tracking echocardiography in healthy volunteers[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 5237.
- [47] 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(24): 467-472.
- [48] 赵世华. 无创性心血管影像: 循证医学证据的总结与探索[J]. *中华心血管病杂志*, 2020, 48(11): 898-900.
- [49] 王家鑫, 赵世华. 人工智能在心血管疾病影像学领域中的应用[J]. *中华心血管病杂志*, 2021, 49(11): 1063-1068.

(收稿日期: 2021-07-27 修回日期: 2021-12-13)