

心脏磁共振特征跟踪技术评估心肌应变的临床应用及研究进展

周慧慧 许楠 席芊

(同济大学附属东方医院医学影像科, 上海 200092)

【摘要】 特征跟踪技术是一种新兴组织跟踪技术,在标准心脏磁共振电影稳态自由进动序列的基础上获取心脏整体及局部多种应变参数,用于定量评估心肌运动和形变。心脏磁共振特征跟踪技术可测量所有心腔,包括自动勾画左心室壁、手动勾画相对较薄的心房壁及游离右心室壁,从而对心肌形变进行直接评价,客观量化心肌损伤,并以一种新型方式表达心肌功能,为多种心肌疾病的早期诊断、预后判断及临床诊疗提供更多信息。

【关键词】 心血管疾病;心脏磁共振;特征跟踪;心肌应变

【DOI】 10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2023.10.007

State-of-the-Art Myocardial Strain by CMR Feature Tracking and Its Clinical Application and Research Progress

ZHOU Huihui, XU Nan, XI Qian

(Department of Radiology, Shanghai East Hospital, School of Medicine, Tongji University, Shanghai 200092, China)

【Abstract】 Based on standard cardiac magnetic resonance (CMR) cine steady-state free precession sequences, feature tracking (FT) is an emerging tissue tracking technique that evaluates myocardial motion and deformation quantitatively by a variety of global and segmental strain parameters. CMR-FT facilitates the measurement of all cardiac chambers, including the automatic outlining of the left ventricle wall, the manual outlining of the relatively thin atrial wall, and the free right ventricular wall. CMR-FT objectively quantifies cardiovascular impairment and characterizes myocardial function in a novel way through direct assessment of myocardial deformation, providing more information for early diagnosis, prognostic and clinical diagnosis, and treatment of various myocardial diseases.

【Key words】 Cardiovascular disease; Cardiac magnetic resonance; Feature tracking; Myocardial strain

心脏疾病在过去 20 年来,一直是全球首要死亡原因。心脏磁共振(cardiac magnetic resonance, CMR)以其高空间、高软组织分辨率成为评价心肌结构和功能的金标准^[1]。目前,基于 CMR 的特征跟踪(feature tracking, FT)技术提供快速采集及后处理,受到放射科、心内科和心外科重视。此前,部分研究应用 CMR-FT 技术观察正常心肌应变及应变率(strain rate, SR)显示出极好的重复性^[2]。近年来,该技术已能提供对左心室(left ventricle, LV)相对准确的评估,但由于心房及游离右心室(right ventricle, RV)壁相对较薄,CMR-FT 技术尚不能提供统一参考标准^[3]。心室传统结构和功能参数包括心室舒张末期容积、心室收缩末期容积、射血分数以及 LV 心肌质量等,其中左室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)最常用于危险分层并广泛应用于临床实践中,但其不能提供区域心功能信息,而 CMR-FT 技术通过心肌应变分析可

能会提供除传统指标以外的区域心功能信息。因此,为进一步促进 CMR-FT 技术研究,现就 CMR-FT 技术评价心肌应变在多种心脏疾病的临床应用及进展进行综述。

1 心肌应变参数及其意义

心肌应变参数包括心肌应变及 SR。心肌应变是指张力作用下心肌发生形变的程度,通常由以下公式定义: $(L_1 - L_0)/L_0$,其中 L_1 代表心动周期中(通常是收缩末期)心肌节段长度, L_0 代表该节段初始长度(通常是舒张末期)^[4]。当应变为正值时,表示心肌组织的伸长、增厚或松弛;当应变为负值时,表示心肌组织缩短、变薄或收缩。在心动周期中从舒张末期到收缩末期,根据心肌形变的不同方向,CMR-FT 技术可计算得到纵向应变(longitudinal strain, LS)、周向应变(circumferential strain, CS)和径向应变(radial strain, RS);其中,每个心肌应变参数又分为整体应变及节段

基金项目:上海市浦东新区卫生系统领先人才培养计划资助(PWRI2022-05)

通信作者:席芊, E-mail: 96125007@sina.com

应变^[3]。SR 代表心肌发生形变的速率,包括收缩期 SR、舒张早期及舒张晚期 SR,分别表示心脏收缩及舒张功能。

1.1 心室应变分析

通过后处理工作站多平面功能模块在心室收缩末期和舒张末期自动追踪心内、外膜轮廓(其中 LV 腔包括 LV 流出道),自动计算 LVEF、左心室舒张末期容积、左心室收缩末期容积等心室功能传统评估指标。应用 FT 模块在心室长轴及短轴 CMR 电影序列自动识别心室舒张末期及收缩末期心内、外膜轮廓,在整个心动周期中自动计算心室容积/时间曲线、整体和节段应变及 SR。

1.2 心房应变分析

左心房(left atrium, LA)的主要作用是通过 3 个基本功能来调节 LV 充盈和心血管性能,包括储存功能、通道功能和收缩功能^[5]:(1)储存功能(总应变),当心室处于收缩期时,LA 接受来自肺静脉的血流量达到最大容量;(2)通道功能(被动应变),当心室处于舒张早期时,房室瓣打开,使 LA 成为血液从心房流向心室的管道;(3)收缩功能(主动应变),当进入舒张晚期时,LA 积极收缩以完成心室充盈。右心房(right atrium, RA)功能与 LA 相似,也包括 3 个基本功能:(1)储存功能(总应变),代表心室收缩期静脉回流收集;(2)通道功能(被动应变),代表心室舒张早期,RA 被动将静脉血液运输至 RV;(3)收缩功能(主动应变),代表心室舒张晚期即心房收缩期,RA 主动收缩使 RV 进一步充盈。CMR-FT 技术通过对心房应变和 SR 分析,提供了心房生理学 3 个基本方面的准确量化^[6]。

应用后处理工作站 FT 模块在 CMR 电影序列 LA 或 RA 四腔和两腔视图中手动勾画心房心内、外膜轮廓,在分别处于心房储存期、通道期及收缩期时测量 LA 储存期、通道期及收缩期整体或节段应变及 SR。对于心房应变测量,LA 心肌轮廓不包括肺静脉和左心耳,RA 心肌轮廓不包括腔静脉和右心耳。

2 缺血性心肌病

缺血性心肌病(ischemic cardiomyopathy, ICM)是指基于阻塞性冠状动脉疾病的收缩性 LV 功能障碍,可引起心肌缺血、心脏重构及心脏扩大,其发病率逐年增加,是最常见的心力衰竭(heart failure, HF)原因之一。CMR-FT 技术通过应变分析可在射血分数降低之前检测到细微的心肌损伤,对于有缺血但无阻塞性冠状动脉疾病的女性来说,其 LV-CS 降低,但这类患者伴有冠状动脉微血管功能障碍时,LV-CS 及 LV-SR 反而增加,预示 LV-CS 的增加与冠状动脉微血管功能障碍的发生呈相关关系^[7];目前预防心源性猝死指南

建议将 LVEF \leq 35% 的 ICM 患者进行植入型心律转复除颤器治疗作为首要预防措施,而对于 LVEF 降低但 >35% 的 ICM 患者,研究表明 LV-整体纵向应变(global longitudinal strain, GLS)($\geq -8.2\%$)和 RV-整体径向应变(global radial strain, GRS)($\leq 12.0\%$)联合应用对适当的植入型心律转复除颤器治疗具有较高的预测价值,敏感性为 85%,特异性为 76%^[8]。Viethier 等^[9]研究发现在 LVEF 与心室表型相似的 ICM 与扩张型心肌病(dilated cardiomyopathy, DCM)患者中,DCM 患者整体周向应变(global circumferential strain, GCS)和 GRS 显著降低。此外,有研究表明慢性心肌缺血性患者应变参数 GCS 及 GRS 降低,且与 LVEF 具有良好相关性,LVEF 越低,其应变值越低;其中非存活心肌 CS 及 RS 明显受损,从而有效区分由延迟钆增强定义的存活心肌和非存活心肌^[10],为 ICM 患者风险分层提供一个更客观的度量指标。

3 非缺血性心肌病

非缺血性心肌病是指除 ICM 以外的心肌疾病,包括 DCM、肥厚型心肌病(hypertrophic cardiomyopathy, HCM)、限制型心肌病及致心律失常性右室心肌病(arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy, ARVC)等。

DCM 是一种以 LV 或双心室扩张和收缩功能障碍为主的心肌疾病。有学者发现 LV-GLS 与 DCM 预后具有明显相关关系^[11],LV-GLS 是 DCM 患者不良结局的重要独立预测因子^[12]。Mazurkiewicz 等^[13]研究发现 CMR-FT 应变分析对 DCM 患者纤维化程度具有显著评估能力,CS 和径向 SR 分别是 LV 和 RV 严重心肌纤维化(myocardial fibrosis, MF)的独立预测指标。此外,RV-GLS 与主要不良心血管事件(major adverse cardiovascular event, MACE)密切相关,RV-GLS 可预测 LVEF >35% 的患者心律失常和 HF 相关事件以及 LVEF <35% 的患者 HF 相关事件^[14]。

HCM 是一种以心室肥厚为特征的常见心脏疾病,属于遗传性心肌病,目前病因不明,是年轻人猝死最常见的原因之一^[15]。CMR-FT 技术是一种无创、定量评估 HCM 患者整体及节段心肌形变的新型方法^[16]。HCM 和高血压心脏病由于心肌肥厚表型相似而难以区分,研究^[17]发现 HCM 患者 LV-GRS、LV-GCS 明显增加,并与 LVEF、LV 心肌质量及最大室间隔厚度存在相关性,因此,应变分析有助于分辨 HCM 及高血压心脏病从而指导临床对症治疗。另有研究^[18]表明对于 LVEF 正常的 HCM 患者,LV 整体及节段应变参数均显著降低,并与 N 末端脑钠肽前体(N-terminal pro-brain natriuretic peptide, NT-proBNP)水平升高及心肌

肌钙蛋白异常呈相关关系,其中 LV-RS 相关性最好,因此应变分析可能有助于无创预测 NT-proBNP 及心肌肌钙蛋白异常。此外,HCM 患者发生 MF 时整体应变及 SR 均降低,其中 LV-GCS 是 LV 纤维化最佳预测因子^[19]。在梗阻性 HCM 患者中,间隔 LS 与 MF 及室性心律失常显著相关,可作为评估梗阻性 HCM 患者心律失常的风险分层指标^[20]。

限制型心肌病以单或双心室充盈受限、舒张期容积缩小为特征,但其心室收缩功能及室壁厚度正常或接近正常的心肌病。限制型心肌病患者心肌细胞间质失去正常弹性及间质纤维化改变导致心肌细胞凋亡、变性及 LV 僵硬^[21],心室舒张功能受损,LV 从舒张早期到舒张晚期心肌应变逐渐降低^[22]。此外,限制型心肌病患者 LA 储存应变降低,并与总死亡率和 MACE 独立相关^[23]。

ARVC 是一种以 RV 心肌被进行性纤维脂肪组织替代为特征的心脏疾病,属于遗传性心肌病,具有较高室性心律失常和心源性猝死风险。Vigneault 等^[24]在 110 例 ARVC 患者中研究发现,CMR-FT 技术与斑点跟踪超声心动图视觉评估相比具有更高的敏感性和特异性。CMR-FT 技术能客观量化 ARVC 患者心室整体和局部功能障碍及非同步性^[25],表现为持续性室性心律失常的 ARVC 患者 RV-LS 和 LV-CS 均有所降低。Heermann 等^[26]研究发现 ARVC 患者 RV-LS、RV-RS、LV-RS、LV-径向 SR 均显著降低。另一项研究^[27]表明 LV 整体及节段性 LS 较 LVEF 更早发现早期 LV 受累,补充了常规指标对 ARVC 评价的不足。此外,最新一项研究^[28]表明即使在 RA 容量正常的情况下,ARVC 患者也可表现出 RA 应力受损,并与 MACE 相关。

另外,Porcari 等^[29]研究表明 CMR-FT 技术可为可疑心肌炎患者提供更全面和互补的应变评估,LV-GCS 和 RV-GCS 在 20% 的心肌炎患者中显著降低,提示存在潜在功能障碍。

4 HF

HF 是多种原因导致的心脏结构和功能的异常改变,使心室收缩和/或舒张功能发生障碍,是心血管疾病最主要的死亡原因。根据最新《心力衰竭通用定义和分类》^[30],将 HF 分为 4 个类型。其中,CMR-FT 技术在射血分数保留的心力衰竭 (heart failure with preserved ejection fraction, HFpEF) 患者中价值最高。研究^[31]表明 LV-GLS 是 HFpEF 死亡率独立预测因子, LV-GLS > -20% (中位数) 的 HFpEF 患者无事件生存率显著降低。另一项研究^[32]表明,整体纵向应变 SR 可识别早期舒张功能障碍,并与 HFpEF 患者不良结局

独立相关;而 Xu 等^[33]研究发现心外膜 LV-GLS 和 LV-GRS 对收缩功能障碍敏感,并与 HF 患者 5 年全因死亡率显著相关。在 HFpEF 伴原发性高血压患者中, LV 应变参数明显受损,收缩期 LV 整体周向 SR 对于该患者与普通高血压患者具有潜在的鉴别诊断价值^[34]。此外,除心室受损以外,心房也会出现相关变化。研究^[35]发现 RA 通道功能和储存功能是全因死亡率独立预测因素。

5 房性心肌病

目前 CMR-FT 技术正逐步用于心房功能研究,部分研究发现应变分析能反映心房功能早期变化,其可能是比 LVEF 更敏感的标志物。有研究^[36]表明 CMR-FT 技术可在早期识别 LA 功能障碍和形变,在 LA 扩大之前即可显示 LA 储存及导管功能障碍。在过去的 20 年里,临床迫切需要研究房性心肌病机制,部分学者发现房性心肌病与多种心源性或非心源性疾病均密切相关,均可导致心房基质受损。其心房电生理和结构发生变化,进而引起 MF,从而导致心房结构重塑即能诱发心房颤动 (atrial fibrillation, AF) 并促使 AF 进展,相反,AF 也能通过心房结构重塑促进房性心肌病进展,二者共同存在且相互影响^[37]。2016 年房性心肌病专家共识^[38]中,将房性心肌病定义为“心房的结构、收缩功能或电生理特征发生改变,并导致心房重塑、传导异常等相关临床表现的一种疾病”。根据共识定义,房性心肌病在临床上也可定义为 LA 功能三个阶段中任何一个阶段异常。因此,心房应变或 SR 可能作为一种心房成像生物标志物,在房性心肌病如 AF 的预测、诊断和预后评估中至关重要。

研究^[39]表明,LA 应变是进展为持续性 AF 最强独立预测因子。LA 容积和功能特征与 AF 发生独立相关,Wang 等^[40]研究发现 AF 患者左右心房储存期 GLS 明显低于正常对照组,其中,LA 储存期各节段 LS 均明显低于正常对照组。另一项研究表明 AF 患者 LA 储存、通道及收缩应变均降低,并与 MF 负相关^[41],且广泛心房心肌纤维化 AF 患者 LA 储存和通道应变明显降低。AF 不仅可引起左心功能不全,同时会影响右心功能。研究发现 AF 患者 RA 储存及收缩应变明显降低^[42],通过 CMR-FT 技术定量评估 RA 应变发现 RA 功能障碍是 MACE 独立危险因素;而在阵发性 AF 患者中,RA 应变可能是 AF 复发的已知预测因子^[43]。因此,应用 CMR-FT 技术对心房功能进行全面评估可提供关于心房更全面的信息,并对 AF 等心房疾病的预测、诊断、预后及临床治疗具有指导意义。

6 局限性

CMR-FT 应变分析是利用 CMR 标准稳态自由进

动电影序列来定量评估心肌形变的新型技术,目前应变正常值的研究尚不完善,区分病变心肌和健康心肌(尤其是CS)的最佳阈值尚未确定;其次,人为勾画薄壁心肌轮廓和复杂解剖结构使RV和心房应变测量更加困难且可能存在误差^[44];最后,CMR-FT技术获得的心肌应变参数值在不同供应商软件之间存在一定差异性^[45],因此,达成一致协议是不同软件供应商努力的目标,以确保不同研究基础之间具有可比性。

综上所述,CMR-FT技术在多种心血管疾病的临床适用性已得到初步证实。首先,应变分析已被应用于LV整体和节段功能障碍定量评估,并作为一个独立预后预测指标在ICM患者预后中具有重要价值。其次,对于非缺血性心肌病患者而言,评估心脏结构和功能甚至心肌微形变尤为重要,突出了CMR-FT技术在多种疾病中各阶段的意义。此外,在HFpEF患者中,CMR-FT技术强调能早期发现舒张功能障碍,尤其以LV舒张功能障碍为著。最后,该技术评估心房应变在房性心肌病预测、诊断、预后及临床治疗中具有一定指导意义。然而,现有的研究表明CMR-FT技术评估尚存在局限性,期待在今后的研究中,基于更大样本量,CMR-FT技术评估心肌应变能为多种心肌疾病发生和发展、诊断或预测、预后及临床治疗提供更有意义的影像标志。

参 考 文 献

- [1] 中华医学会心血管病学分会心血管病影像学组,稳定性冠心病无创影像检查路径的专家共识写作组. 稳定性冠心病无创影像检查路径的专家共识[J]. 中国介入心脏病学杂志,2017,25(10):541-549.
- [2] Truong VT, Palmer C, Wolking S, et al. Normal left atrial strain and strain rate using cardiac magnetic resonance feature tracking in healthy volunteers[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2020, 21(4):446-453.
- [3] 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.
- [4] Flachskampf FA, Blankstein R, Grayburn PA, et al. Global longitudinal shortening: a positive step towards reducing confusion surrounding global longitudinal strain[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2019, 12(8 Pt 1):1566-1567.
- [5] Cau R, Bassareo P, Suri JS, et al. The emerging role of atrial strain assessed by cardiac MRI in different cardiovascular settings, an up-to-date review[J]. Eur Radiol, 2022, 32(7):4384-4394.
- [6] 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.
- [7] Tamarappoo B, Samuel TJ, Elboudwarej O, et al. Left ventricular circumferential strain and coronary microvascular dysfunction: a report from the Women's Ischemia Syndrome Evaluation Coronary Vascular Dysfunction (WISE-CVD) project[J]. Int J Cardiol, 2021, 327:25-30.
- [8] Overhoff D, Ansari U, Hohneck A, et al. Prediction of cardiac events with non-contrast magnetic resonance feature tracking in patients with ischaemic cardiomyopathy[J]. ESC Heart Fail, 2022, 9(1):574-584.
- [9] Vietheer J, Lehmann L, Unbehaun C, et al. CMR-derived myocardial strain analysis differentiates ischemic and dilated cardiomyopathy—A propensity score-matched study[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2022, 38(4):863-872.
- [10] Tantawy SW, Mohammad SA, Osman AM, et al. Strain analysis using feature tracking cardiac magnetic resonance (FT-CMR) in the assessment of myocardial viability in chronic ischemic patients[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2021, 37(2):587-596.
- [11] Ochs A, Riffel J, Ochs MM, et al. Myocardial mechanics in dilated cardiomyopathy: prognostic value of left ventricular torsion and strain[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2021, 23(1):136.
- [12] Tang HS, Kwan CT, He J, et al. Prognostic utility of cardiac MRI myocardial strain parameters in patients with ischemic and nonischemic dilated cardiomyopathy: a multicenter study[J]. AJR Am J Roentgenol, 2023, 220(4):524-538.
- [13] Mazurkiewicz Ł, Petryka J, Spiewak M, et al. Biventricular mechanics in prediction of severe myocardial fibrosis in patients with dilated cardiomyopathy: CMR study[J]. Eur J Radiol, 2017, 91:71-81.
- [14] Cittar M, Cipriani A, Merlo M, et al. Prognostic significance of feature-tracking right ventricular global longitudinal strain in non-ischemic dilated cardiomyopathy[J]. Front Cardiovasc Med, 2021, 8:765274.
- [15] Maron BJ, Desai MY, Nishimura RA, et al. Diagnosis and evaluation of hypertrophic cardiomyopathy: JACC state-of-the-art review[J]. J Am Coll Cardiol, 2022, 79(4):372-389.
- [16] Yang L, Zhang L, Cao S, et al. Advanced myocardial characterization in hypertrophic cardiomyopathy: feasibility of CMR-based feature tracking strain analysis in a case-control study[J]. Eur Radiol, 2020, 30(11):6118-6128.
- [17] Liu S, Li Y, Zhao Y, et al. The combination of feature tracking and late gadolinium enhancement for identification between hypertrophic cardiomyopathy and hypertensive heart disease[J]. Front Cardiovasc Med, 2022, 9:865615.
- [18] Zhang L, Wan Y, He B, et al. Left ventricular strain patterns and their relationships with cardiac biomarkers in hypertrophic cardiomyopathy patients with preserved left ventricular ejection fraction[J]. Front Cardiovasc Med, 2022, 9:963110.
- [19] Rezaeian N, Hosseini L, Omid N, et al. Feature-tracking cardiac magnetic resonance method: a valuable marker of replacement fibrosis in hypertrophic cardiomyopathy[J]. Pol J Radiol, 2022, 87:e263-e270.
- [20] 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.
- [21] Rapezzi C, Aimo A, Barison A, et al. Restrictive cardiomyopathy: definition and diagnosis[J]. Eur Heart J, 2022, 43(45):4679-4693.
- [22] Yang Z, Wang H, Chang S, et al. Left ventricular strain-curve morphology to distinguish between constrictive pericarditis and restrictive cardiomyopathy[J]. ESC Heart Fail, 2021, 8(6):4863-4872.
- [23] Stojanovska J, Topaloglu N, Fujikura K, et al. Decreased left atrial reservoir strain is associated with adverse outcomes in restrictive cardiomyopathy[J]. J Clin Med, 2022, 11(14):4116.
- [24] Vigneault DM, te Riele AS, James CA, et al. Right ventricular strain by MR quantitatively identifies regional dysfunction in patients with arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy[J]. J Magn Reson Imaging, 2016, 43(5):1132-1139.
- [25] Prati G, Vitrella G, Allocca G, et al. Right ventricular strain and dyssynchrony assessment in arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy: cardiac magnetic resonance feature-tracking study[J]. Circ Cardiovasc Imaging, 2015, 8(11):e003647.

- [26] Heermann P, Fritsch H, Koopmann M, et al. Biventricular myocardial strain analysis using cardiac magnetic resonance feature tracking (CMR-FT) in patients with distinct types of right ventricular diseases comparing arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy (ARVC), right ventricular outflow-tract tachycardia (RVOT-VT), and Brugada syndrome (BrS) [J]. *Clin Res Cardiol*, 2019, 108(10):1147-1162.
- [27] Chen X, Li L, Cheng H, et al. Early left ventricular involvement detected by cardiovascular magnetic resonance feature tracking in arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy: the effects of left ventricular late gadolinium enhancement and right ventricular dysfunction [J]. *J Am Heart Assoc*, 2019, 8(17):e012989.
- [28] Anwer S, Guastafierro F, Erhart L, et al. Right atrial strain and cardiovascular outcome in arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2022, 23(7):970-978.
- [29] Porcari A, Merlo M, Crosera L, et al. Strain analysis reveals subtle systolic dysfunction in confirmed and suspected myocarditis with normal LVEF. A cardiac magnetic resonance study [J]. *Clin Res Cardiol*, 2020, 109(7):869-880.
- [30] Bozkurt B, Coats AJS, Tsutsui H, et al. Universal definition and classification of heart failure: a report of the Heart Failure Society of America, Heart Failure Association of the European Society of Cardiology, Japanese Heart Failure Society and Writing Committee of the Universal Definition of Heart Failure; Endorsed by the Canadian Heart Failure Society, Heart Failure Association of India, Cardiac Society of Australia and New Zealand, and Chinese Heart Failure Association [J]. *Eur J Heart Fail*, 2021, 23(3):352-380.
- [31] 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.
- [32] He J, Yang W, Wu W, et al. Early diastolic longitudinal strain rate at MRI and outcomes in heart failure with preserved ejection fraction [J]. *Radiology*, 2022, 302(1):E5.
- [33] Xu L, Pagano JJ, Haykowsky MJ, et al. Layer-specific strain in patients with heart failure using cardiovascular magnetic resonance; not all layers are the same [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2020, 22(1):81.
- [34] 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.
- [35] Jain S, Kuriakose D, Edelstein I, et al. Right atrial phasic function in heart failure with preserved and reduced ejection fraction [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2019, 12(8 Pt 1):1460-1470.
- [36] 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.
- [37] Sagris M, Vardas EP, Theofilis P, et al. Atrial fibrillation: pathogenesis, predisposing factors, and genetics [J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 23(1):6.
- [38] Goette A, Kalman JM, Aguinaga L, et al. EHRA/HRS/APHRS/SOLAECE expert consensus on atrial cardiomyopathies: definition, characterisation, and clinical implication [J]. *J Arrhythm*, 2016, 32(4):247-278.
- [39] Hou J, Sun Y, Zhang L, et al. Assessing left atrial function in patients with atrial fibrillation and valvular heart disease using cardiovascular magnetic resonance imaging [J]. *Clin Cardiol*, 2022, 45(5):527-535.
- [40] Wang Y, Gao H, Li Y, et al. Estimating bilateral atrial function by cardiovascular magnetic resonance feature tracking in patients with paroxysmal atrial fibrillation [J]. *J Vis Exp*, 2022 Jul 20, (185). DOI: 10.3791/63598.
- [41] Zachos P, Nevras V, Milaras N, et al. The value of myocardial strain imaging in the evaluation of patients with repaired tetralogy of Fallot: a review of the literature [J]. *Heart Fail Rev*, 2023, 28(1):97-112.
- [42] Schuster A, Backhaus SJ, Stiermaier T, et al. Impact of right atrial physiology on heart failure and adverse events after myocardial infarction [J]. *J Clin Med*, 2020, 9(1):210.
- [43] van Mourik MJW, Artola Arita V, Lyon A, et al. Association between comorbidities and left and right atrial dysfunction in patients with paroxysmal atrial fibrillation: analysis of AF-RISK [J]. *Int J Cardiol*, 2022, 360:29-35.
- [44] Cau R, Bassareo P, Caredda G, et al. Atrial strain by feature-tracking cardiac magnetic resonance imaging in Takotsubo cardiomyopathy. Features, feasibility, and reproducibility [J]. *Can Assoc Radiol J*, 2022, 73(3):573-580.
- [45] Dobrovic M, Barreiro-Pérez M, Curione D, et al. Inter-vendor reproducibility and accuracy of segmental left ventricular strain measurements using CMR feature tracking [J]. *Eur Radiol*, 2019, 29(12):6846-6857.

收稿日期:2023-03-20