

心脏磁共振特征追踪技术评估心脏功能的应用价值

甘宏博 高电萨 左中

(重庆医科大学附属第一医院心血管内科, 重庆 400016)

【摘要】 心脏磁共振特征追踪 (CMR-FT) 技术是在心脏磁共振电影序列图像基础上, 无创测量心肌应变参数的一种新技术。CMR-FT 技术通过定量评估心肌局部和整体的功能, 能在亚临床水平发现心肌受损, 为疾病早期诊断、风险分层及预后判断提供新途径。目前 CMR-FT 技术在心肌应变方向的研究发展迅速, 已成为心脏磁共振技术中的研究热点。现就 CMR-FT 技术在评估心脏功能方面的应用价值进行综述。

【关键词】 心脏功能; 磁共振成像; 心肌应变; 特征追踪; 心血管疾病

【DOI】 10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2022.04.010

The Value of Cardiac Magnetic Resonance Feature Tracing in Evaluating Cardiac Function

GAN Hongbo, GAO Diansa, ZUO Zhong

(Department of Cardiology, The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400016, China)

【Abstract】 Cardiac magnetic resonance feature tracking (CMR-FT) is a new noninvasive method to measure myocardial strain parameters based on cardiac magnetic resonance cine sequence images. By quantitatively evaluating the segmental and global function of the myocardium, CMR-FT can detect myocardial damage at the subclinical level, which provides a new way for early diagnosis, risk stratification and prognosis judgment of the disease. At present, CMR-FT develops rapidly in the research of myocardial strain, and has become a research hotspot in cardiac magnetic resonance technology. This paper reviews the application value of CMR-FT in the evaluation of cardiac function.

【Key words】 Cardiac function; Magnetic resonance imaging; Myocardial strain; Feature tracking; Cardiovascular disease

随着社会老龄化, 心血管疾病发病率逐年增高, 居疾病死亡首位。心血管疾病发病的复杂化、年轻化, 对心脏疾病早期诊断、预后风险评估提出了更高的要求。心脏磁共振 (cardiac magnetic resonance, CMR) 作为一项非侵入性检查, 能“一站式”完成对心脏结构和功能的评估, 具有空间和时间分辨率高、软组织对比度优越和多参数多层成像等优点, 已成为量化心腔容积和评估功能的金标准^[1]。心脏磁共振特征追踪 (cardiac magnetic resonance feature tracking, CMR-FT) 技术基于 CMR 能无创测量心肌应变参数, 操作简便, 在心血管疾病的诊断和预后评估等应用价值日益凸显。现对 CMR-FT 技术在心脏疾病中心功能评估的应用及研究进展进行综述。

1 心肌应变和 CMR-FT 技术

1.1 心肌应变

心肌应变是指心肌纤维从舒张末期的初始长度

到收缩末期的最大长度的变形程度, 以百分数表示, 单位时间内的应变称为应变率。相对于临床常用的心功能评价指标, 心肌应变参数更为敏感, 能在疾病亚临床期发现心肌受损。越来越多证据表明, 通过应变分析研究心脏功能, 可准确地在亚临床水平检测心脏疾病, 评估心脏疾病患者的风险, 并可能预测治疗效果^[2]。

1.2 CMR-FT 技术

CMR-FT 技术是一种基于 CMR 定量评估心功能的新型技术。使用心脏相控阵接收线圈, 在采用回顾性心电门控获得 CMR 电影序列图像的基础上, 通过专用软件定位心内外膜边界, 计算得到心动周期中心肌变形的程度, 从而定量评价心脏整体和局部功能。CMR-FT 技术通过测量心肌应变来判断心功能, 常规参数包括: 纵向应变 (longitudinal strain, LS)、纵向应变率 (longitudinal strain rate, LSR); 径向应变 (radial

strain, RS)、径向应变率(radial strain rate, RSR)及圆周应变(circumferential strain, CS)、圆周应变率(circumferential strain rate, CSR),分别检测心肌纵向运动(心脏长轴方向运动)、径向运动(心脏短轴方向心肌厚度的变化)和圆周运动(心脏短轴方向的环形运动)。不同于 CMR 心肌标记技术需通过网格标记技术识别心肌组织结构,导致心房、右心室因壁薄无法较好地标记,CMR-FT 技术无需额外添加标记线,且扫描序列简单,花费时间少;相比于超声斑点追踪(speckle tracking echocardiography, STE)技术十分依赖于图像质量,使其在窄声窗、伪影、超声衰减和混响等情况下很难做到精准测量,CMR-FT 技术则拥有更好的视野和图像质量,且不受声窗影响,并具有更佳信噪比。在时间分辨率上,STE 优于 CMR-FT(STE 帧频为 80 Hz, CMR-FT 为 35 Hz),可获得更准确的收缩期峰值应变;CMR-FT 则拥有更高的空间分辨率及组织对比度,有利于心内膜和心外膜边界的描绘。尽管 CMR-FT 技术在多个方面优于 STE 技术,为分析心肌应变的首选检查手段,但往往因为设备昂贵、检查时间较长且花费较高,导致其临床应用受限^[2-3]。

2 CMR-FT 技术对心室功能评估及临床应用

左心室功能的评估是心脏影像学研究的重要组成部分,左室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)是临床用来评估心脏功能的重要指标,并能提供预后信息。然而 LVEF 作为对左心室功能的整体评估,无足够的灵敏度来检测其细微变化。有研究表明在 LVEF $\geq 50\%$ 的情况下,有可能已出现了明显的心肌形变受损,并与不良预后有关^[4]。在 LVEF 明显改变之前,及早发现心功能受损并予以保护性治疗,有助于患者的整体预后。心肌应变能定量评估心肌局部和整体的功能,有利于在疾病亚临床期发现心肌受损。

2.1 CMR-FT 技术对缺血性心肌病的评估

在冠状动脉粥样硬化性心脏病患者中, Schneeweis 等^[5]利用 CMR-FT 技术行大剂量[40 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{min})$]多巴酚丁胺负荷试验,在试验期间密切监测患者血压、心率以及胸痛等症状。研究发现冠状动脉狭窄节段、狭窄节段远端和正常节段的心肌 CS 值有明显差异(P 均 <0.001),结果表明在多巴酚丁胺负荷灌注联合 CMR 技术上,可通过 CS 来区分冠状动脉狭窄段和正常段[截断值 $= -33.2\%$,受试者操作特征曲线下面积(area under curve, AUC) $=0.7$,敏感性为 75%,特异性为 67%],进一步提高对缺血性心肌病的诊断。尽管急性心肌梗死患者的住院死亡率显著降低,急性期存活下来的患者的心血管不良事件发病率和死亡

率仍可高出一般人群 1.5 ~ 15.0 倍^[6],如何早期评估患者不良预后有利于后续治疗管理。在发生过心肌梗死的患者中,有研究表明整体纵向应变(global longitudinal strain, GLS)下降与心肌梗死后左心室不良重塑的发生显著相关,且在预测全因死亡率上明显优于 LVEF 和梗死面积^[7]。由于心肌 LS 值主要与心内膜下心肌纤维相关,心肌 CS 值与心外膜下心肌纤维有关,故可通过 CS 值区分出透壁性心肌梗死患者。有研究表明整体圆周应变(global circumferential strain, GCS)在评估首发心肌梗死患者的长期预后上优于 LVEF 和梗死面积,与复合终点事件(心血管死亡、心脏性猝死未遂和心力衰竭住院)显著独立相关($HR=1.16$, 95% CI 1.07 ~ 1.25, $P<0.001$)^[6]。相比于心脏超声,CMR-FT 技术对缺血性心肌病的诊断,以及心肌梗死患者长期预后提供了更精准更有效的评估手段。

2.2 CMR-FT 技术对扩张型心肌病的评估

扩张型心肌病(dilated cardiomyopathy, DCM)是一类以左心室或双心室扩大为主,心肌壁普遍变薄伴收缩功能障碍为特征的心肌病。一项多中心观察性研究^[8]纳入 507 例 DCM 患者并随访 4 年,研究发现在调整年龄、糖尿病等临床因素后, GLS 与 DCM 患者的全因死亡率仍显著独立相关($HR=2.101$, 95% CI 1.546 ~ 2.854, $P<0.001$);且 GLS 每受损 1%,总死亡率增加 89%($HR=1.891$, 95% CI 1.546 ~ 2.313, $P<0.001$)。有研究^[9]也得出类似的结论,左心室 GLS 值在 DCM 风险分层上优于 N 末端脑钠肽前体和 LVEF,并与心血管事件的发生率独立相关(截断值 $= -12.5\%$, $P<0.02$)。

2.3 CMR-FT 技术对肥厚型心肌病的评估

肥厚型心肌病(hypertrophic cardiomyopathy, HCM)是一种遗传性心肌病,以心室非对称性肥厚为解剖特点。Vigneault 等^[10]认为 HCM 患者由于心肌纤维化和室壁增厚等,其心内膜与心外膜的 CS 值可能存在显著的差异。研究利用 CMR-FT 技术测量 99 例研究对象的 CS 值(23 例正常对照, 34 例肌节基因突变阳性不合并左心室肥厚, 42 例肌节基因突变阳性合并左心室肥厚),发现心内膜与心外膜 CS 的差值分别是 $(14 \pm 4)\%$ 、 $(17 \pm 4)\%$ 及 $(22 \pm 7)\%$, $P<0.01$ 。在未出现左心室肥厚的肌节基因突变携带患者中心肌应变明显受损。该研究表明,CMR-FT 技术能在左心室壁厚度处于正常的情况下发现 HCM 患者心肌功能异常,为 HCM 的早期诊断提供简单高效的途径。

2.4 CMR-FT 技术对左心室心肌致密化不全心肌病的评估

左心室心肌致密化不全心肌病(left ventricular

noncompaction cardiomyopathy, LVNC) 是一种罕见且未分类的心肌病,以左心室粗大的肌小梁和深隐窝为特征,可导致心力衰竭、心律失常和栓塞事件^[11]。目前对于 LVNC 的诊断,无论是心脏超声或 CMR 检查,均基于心肌形态学改变,从而存在对部分健康人群的误诊,临床使用有显著的局限性^[12]。一项回顾性研究^[13]纳入 59 例 LVNC 患者以及 36 例既往无心脏病史的健康志愿者,发现 53% 的对照组符合至少一项 CMR 对 LVNC 诊断标准。研究利用 CMR-FT 技术测量其心肌应变,发现与符合 LVNC 诊断标准的健康人群相比, LVNC 患者存在显著的 GCS 及整体径向应变 (global radial strain, GRS) 受损 (GCS: -16.5% vs -20.0% , GRS: 31.2% vs 35.8% , P 均 <0.05), 因此 CMR-FT 技术可能有助于鉴别 LVNC 患者与健康人群。LVNC 患者往往只在成年后出现 LVEF 显著降低,一项纳入 20 例 LVNC 患者的研究^[14]发现 GLS 在 LVEF 正常时已出现受损,利用 CMR-FT 技术能及早评估 LVNC 患者心肌受损情况。

2.5 CMR-FT 技术对致心律失常型右心室心肌病的评估

致心律失常型右心室心肌病 (arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy, ARVC) 是一种遗传性心肌病,其病理特征是心肌逐渐纤维脂肪化,临床表现为明显的室性心律失常、室性收缩功能受损以及心源性猝死。利用 CMR-FT 技术可发现 ARVC 患者整体和节段应变均受损,在右心室功能异常及右心室扩大之前,ARVC 患者右心室应变已出现受损,右心室 GLS $> -23.2\%$ 诊断 ARVC 的敏感性为 91%, 特异性为 75%^[15]。

2.6 CMR-FT 技术对先天性心脏病的评估

在法洛四联症 (tetralogy of Fallot, TOF) 患者中,外科修复手术改善了 TOF 患者的预后,但严重的晚期并发症仍值得关注。修复术后发生过不良事件的 TOF 患者的应变参数相比于未发生不良事件的 TOF 患者均出现受损。右心室 LS ($OR = 1.6$, 95% CI $1.2 \sim 2.3$, $P < 0.001$) 和左心室 LS ($OR = 1.4$, 95% CI $1.0 \sim 2.0$, $P = 0.03$) 跟术后不良事件明显相关^[16]。另一项研究则表明左心室 CS ($HR = 0.86$, 95% CI $0.79 \sim 0.94$, $P < 0.001$) 和右心室 LS ($HR = 0.78$, 95% CI $0.67 \sim 0.91$, $P = 0.002$) 能独立预测 TOF 修复术后终点事件,有利于对患者进行风险分层^[17]。CMR-FT 技术对 TOF 术后患者心肌功能受损的早期发现有利于减少患者晚期不良心血管事件发生。

功能性单心室 (functional single ventricle, FSV) 是一种罕见的复杂先天性心脏病,Fontan 手术作为治疗

FSV 的一种姑息手术,心室功能障碍是术后患者死亡的重要原因,监测心室功能是否异常是十分必要的。有研究^[18]纳入 51 例 Fontan 术后患者并随访 2 年,观察到 GLS (-17.3% vs -15.9% , $P = 0.041$) 和 GCS (-17.7% vs -16.1% , $P = 0.047$) 在 2 年后出现受损,而此时患者无心力衰竭症状,LVEF 和心脏指数无下降。GLS 可独立预测 Fontan 术后主要不良心血管事件的发生,GLS $< -11.8\%$ 的患者的不良心血管事件发生率明显增高^[19]。CMR-FT 技术为单心室术后患者早期心室功能障碍提供了更敏锐的定量评估。

2.7 CMR-FT 技术对肺动脉高压相关心功能的评估

在肺动脉高压 (pulmonary hypertension, PH) 患者中,右心室功能很大程度上决定了 PH 患者的预后,右心衰竭是 PH 患者死亡的主要原因。在出现临床症状及右室射血分数降低之前,右心室 LS 已出现明显受损,表明其可作为 PH 右心室收缩功能障碍的早期指标^[20]。de Siqueira 等^[21]的研究也发现在右室射血分数均正常的情况下,与非 PH 患者相比,PH 患者的整体圆周应变率明显受损 (-1.12 s^{-1} vs -0.92 s^{-1} , $P < 0.001$), 并与死亡、肺移植和心力衰竭等终点事件独立相关。

2.8 CMR-FT 技术对肿瘤治疗相关心功能不全的评估

有研究^[22]报道在乳腺癌、肺癌等癌症治疗过程中,死于心血管疾病的患者超过癌症本身。癌症幸存者患心血管疾病的风险也显著增加,与癌症治疗相关心脏毒性有关。由于绝大多数患者早期无明显症状,如何及时发现其亚临床心脏损伤对降低其心血管死亡率意义重大。有研究^[23]利用 CMR-FT 技术对 41 例尚未出现明显心脏毒性的乳腺癌靶向治疗患者进行随访,在随访的第 6 个月、12 个月中,GLS 和 GCS 出现明显受损。在评估使用阿霉素化疗的癌症患者心脏功能的研究^[24]中发现,与化疗前和对照组相比,化疗后患者 GLS 和 GCS 均明显受损,证实 CMR-FT 技术能发现癌症化疗早期心脏结构和功能的变化。一项回顾性研究^[25]纳入 20 例行免疫检查点抑制剂 (immune checkpoint inhibitors, ICIs) 治疗的患者,患者均临床诊断合并 ICIs 相关心脏毒性,其中 ICIs 主要包括帕博利珠单抗、伊匹单抗和纳武利尤单抗等。研究发现在 LVEF 正常 ($LVEF \geq 53\%$) 的患者中 GLS 出现明显受损,显著低于正常参考值范围。CMR-FT 技术通过测量应变,可能有助于早期 ICIs 相关心脏毒性的识别。

3 CMR-FT 技术对心房功能评估及临床应用

心房功能在判断不同疾病的预后和风险分层中

起着重要的作用,与简单的整体测量指标如心房容积、心房射血分数相比,心房应变可准确地评估心房功能^[26]。CMR-FT 技术可对心房 3 个功能时期的应变和应变率进行定量评估。心房分 3 个功能期:储存期、导管期(传导功能期)和泵血期。储存期指数:总应变和总应变率;导管期指数:被动应变及被动应变率;泵血期指数:主动应变及主动应变率。

国内外已有研究^[27-30]利用 CMR-FT 技术对健康成年人左心房心肌应变值进行测量,得到的正常参考值范围相差较大。除外研究之间样本量、扫描机型和分析软件的不同,种族不同可能是差异的重要因素。有研究纳入 112 例健康人,中位年龄 42(17~79)岁,发现左心房泵血功能随年龄逐渐增强($P < 0.001$),传导功能则逐渐下降($P = 0.02$)^[27]。左心房功能则在性别上无统计学差异^[27,29]。

利用 CMR-FT 技术,大量研究证实在评估心房功能上左心房应变较于传统测量指标的优势。在 HCM 患者^[30-31]中,左心房应变对左心房改变的敏感度高于左心房容积。在高血压患者^[32]中,左心房总应变和被动应变明显受损,其中导管期的被动应变在区分高血压患者与健康人群上价值最高(AUC = 0.82,敏感性为 80.82%,特异性为 72.41%),研究发现通过 CMR-FT 技术可能在高血压患者出现左心室肥厚之前,早期发现左心房功能障碍。在 Takotsubo 综合征患者中,左心房总应变可独立预测该类患者死亡风险($HR = 1.10$, 95% CI 1.01~1.20, $P = 0.037$),诊断价值优于 LVEF 和左心房容积(AUC:0.69 vs 0.58 vs 0.62)^[33]。有研究^[34]表明心房颤动患者的左心房应变参数较正常组明显受损(P 均 < 0.001),并在持续性心房颤动中受损程度明显高于阵发性心房颤动(P 均 < 0.001),利用 CMR-FT 技术可对心房颤动患者的左心房功能进一步评估。在心力衰竭患者^[35]中,左心房应变可独立预测入院和死亡事件,为心力衰竭和非心力衰竭患者的风险分层提供预后信息。

4 展望

CMR-FT 技术通过直接评估心肌形变和速度来定量评价心肌局部和整体功能,已成为一种精确的心脏功能评估技术。CMR-FT 技术临床的广泛应用需要心肌应变的正常参考值标准,目前对各个腔室尚未有公认的参考标准,有待更大样本大范围的研究;不同厂商 CMR-FT 后处理软件及计算方法也需进一步标准化,在节段心肌分析中重复性较差以及 CMR-FT 技术的价格昂贵等问题也限制了其临床应用。CMR-FT 作为一种临床价值巨大的新型无创无辐射检查技术,经过不断的完善后,相信在不久的将来,将会在心血管

疾病早期诊断、预后评估和风险分层等方面发挥独特的优势。

利益冲突 所有作者均申明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Arnold JR, McCann GP. Cardiovascular magnetic resonance: applications and practical considerations for the general cardiologist [J]. *Heart*, 2020, 106(3): 174-181.
- [2] Schuster A, Hor KN, Kowallick JT, et al. Cardiovascular magnetic resonance myocardial feature tracking: concepts and clinical applications [J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2016, 9(4): e004077.
- [3] Claus P, Omar AMS, Pedrizzetti G, et al. Tissue tracking technology for assessing cardiac mechanics: principles, normal values, and clinical applications [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2015, 8(12): 1444-1460.
- [4] Cikes M, Solomon SD. Beyond ejection fraction: an integrative approach for assessment of cardiac structure and function in heart failure [J]. *Eur Heart J*, 2016, 37(21): 1642-1650.
- [5] Schneeweis C, Qiu J, Schnackenburg B, et al. Value of additional strain analysis with feature tracking in dobutamine stress cardiovascular magnetic resonance for detecting coronary artery disease [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2014, 16(1): 72.
- [6] 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: 387-391.
- [7] Eitel I, Stiermaier T, Lange T, et al. Cardiac magnetic resonance myocardial feature tracking for optimized prediction of cardiovascular events following myocardial infarction [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2018, 11(10): 1433-1444.
- [8] Romano S, Judd RM, Kim RJ, et al. Feature-tracking global longitudinal strain predicts death in a multicenter population of patients with ischemic and nonischemic dilated cardiomyopathy incremental to ejection fraction and late gadolinium enhancement [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2018, 11(10): 1419-1429.
- [9] Buss SJ, Breuninger K, Lehrke S, et al. Assessment of myocardial deformation with cardiac magnetic resonance strain imaging improves risk stratification in patients with dilated cardiomyopathy [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2015, 16(3): 307-315.
- [10] Vignea DM, Yang E, Jensen PJ, et al. Left ventricular strain is abnormal in preclinical and overt hypertrophic cardiomyopathy: cardiac MR feature tracking [J]. *Radiology*, 2019, 290(3): 640-648.
- [11] Srivastava S, Yavari M, Al-Abcha A, et al. Ventricular non-compaction review [J]. *Heart Fail Rev*, 2021 Jul 7. DOI: 10.1007/s10741-021-10128-3. Online ahead of print.
- [12] Weir-McCall JR, Yeap PM, Papagiorcopulo C, et al. Left ventricular noncompaction: anatomical phenotype or distinct cardiomyopathy? [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2016, 68(20): 2157-2165.
- [13] Dreisbach JG, Mathur S, Houbois CP, et al. Cardiovascular magnetic resonance based diagnosis of left ventricular non-compaction cardiomyopathy: impact of cine bSSFP strain analysis [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2020, 22(1): 9.
- [14] Gastl M, Gotschy A, Polacin M, et al. Determinants of myocardial function characterized by CMR-derived strain parameters in left ventricular non-compaction cardiomyopathy [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 15882.
- [15] 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.
- [16] Moon TJ, Choueiri N, Geva T, et al. Relation of biventricular strain and dyssynchrony in repaired tetralogy of fallot measured by cardiac magnetic resonance to death and sustained ventricular tachycardia[J]. *Am J Cardiol*, 2015, 115(5):676-680.
- [17] Orwat S, Diller GP, Kempny A, et al. Myocardial deformation parameters predict outcome in patients with repaired tetralogy of Fallot[J]. *Heart*, 2016, 102(3):209-215.
- [18] Meyer SL, Ridderbos FS, Wolff D, et al. Serial cardiovascular magnetic resonance feature tracking indicates early worsening of cardiac function in Fontan patients[J]. *Int J Cardiol*, 2020, 303:23-29.
- [19] Ishizaki U, Nagao M, Shiina Y, et al. Global strain and dyssynchrony of the single ventricle predict adverse cardiac events after the Fontan procedure: analysis using feature-tracking cine magnetic resonance imaging[J]. *J Cardiol*, 2019, 73(2):163-170.
- [20] Lin ACW, Seale H, Hamilton-Craig C, et al. Quantification of biventricular strain and assessment of ventriculo-ventricular interaction in pulmonary arterial hypertension using exercise cardiac magnetic resonance imaging and myocardial feature tracking[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2019, 49(5):1427-1436.
- [21] 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.
- [22] Sturgeon KM, Deng L, Bluethmann SM, et al. A population-based study of cardiovascular disease mortality risk in US cancer patients[J]. *Eur Heart J*, 2019, 40(48):3889-3897.
- [23] Gong IY, Ong G, Brezden-Masley C, et al. Early diastolic strain rate measurements by cardiac MRI in breast cancer patients treated with trastuzumab: a longitudinal study[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2019, 35(4):653-662.
- [24] Lunning MA, Kutty S, Rome ET, et al. Cardiac magnetic resonance imaging for the assessment of the myocardium after doxorubicin-based chemotherapy[J]. *Am J Clin Oncol*, 2015, 38(4):377-381.
- [25] Higgins AY, Arbune A, Soufer A, et al. Left ventricular myocardial strain and tissue characterization by cardiac magnetic resonance imaging in immune checkpoint inhibitor associated cardiotoxicity [J]. *PLoS One*, 2021, 16(2):e0246764.
- [26] Evin M, Cluzel P, Lamy J, et al. Assessment of left atrial function by MRI myocardial feature tracking[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2015, 42(2):379-389.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 杨映霞, 汪芳, 尹刚, 等. 基于心脏磁共振特征追踪技术的中国正常人左心房功能的定量研究[J]. *第二军医大学学报*, 2019, 40(3):250-256.
- [30] 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.
- [31] Hinojar R, Zamorano JL, Fernández-Méndez M, et al. Prognostic value of left atrial function by cardiovascular magnetic resonance feature tracking in hypertrophic cardiomyopathy [J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2019, 35(6):1055-1065.
- [32] 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.
- [33] Backhaus SJ, Stiermaier T, Lange T, et al. Atrial mechanics and their prognostic impact in Takotsubo syndrome: a cardiovascular magnetic resonance imaging study[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2019, 20(9):1059-1069.
- [34] 李志伟, 丛利芙, 马晓海, 等. MR 特征追踪技术评价心房颤动患者左心房功能的初步研究[J]. *中华放射学杂志*, 2017, 51(9):682-688.
- [35] Chirinos JA, Sardana M, Ansari B, et al. Left atrial phasic function by cardiac magnetic resonance feature tracking is a strong predictor of incident cardiovascular events[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2018, 11(12):e007512.

收稿日期:2021-07-01

(上接第 308 页)

- [27] Wu MT, Tseng WY, Su MY, et al. Diffusion tensor magnetic resonance imaging mapping the fiber architecture remodeling in human myocardium after infarction: correlation with viability and wall motion[J]. *Circulation*, 2006, 114(10):1036-1045.
- [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] Mekkaoui C, Jackowski MP, Kostis WJ, et al. Myocardial scar delineation using diffusion tensor magnetic resonance tractography[J]. *J Am Heart Assoc*, 2018, 7(3):e007834.
- [30] Nilles-Vallespin S, Khalique Z, Ferreira PF, et al. Assessment of myocardial microstructural dynamics by in vivo diffusion tensor cardiac magnetic resonance [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2017, 69(6):661-676.
- [31] Gotschy A, von Deuster C, van Gorkum RJH, et al. Characterizing cardiac involvement in amyloidosis using cardiovascular magnetic resonance diffusion tensor imaging[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2019, 21(1):56.
- [32] Khalique Z, Ferreira PF, Scott AD, et al. Diffusion tensor cardiovascular magnetic resonance in cardiac amyloidosis[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(5):e009901.
- [33] Nilles-Vallespin S, Scott A, Ferreira P, et al. Cardiac diffusion: technique and practical applications[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2020, 52(2):348-368.

收稿日期:2021-09-03