

- [28] Nakada Y, Thet S, Abdisolaam S, et al. Hypoxia induces heart regeneration in adult mice[J]. *Nature*, 2017, 541(7636):222-227.
- [29] Schreiber T, Salhofer L, Quinting T, et al. Things get broken; the hypoxia-inducible factor prolyl hydroxylases in ischemic heart disease[J]. *Basic Res Cardiol*, 2019, 114(3):16-33.
- [30] Wang S, Ye L, Li M, et al. GSK-3 $\beta$  inhibitor CHIR-99021 promotes proliferation through upregulating beta-catenin in neonatal atrial human cardiomyocytes[J]. *J Cardiovasc Pharmacol*, 2016, 68(6):425-432.
- [31] Samse K, Hariharan N, Sussman MA. Personalizing cardiac regenerative therapy: at the heart of Pim1 kinase[J]. *Pharmacol Res*, 2016, 103(3):13-16.
- [32] Polizzotti D, Ganapathy B, Walsh S, et al. Neuregulin stimulation of cardiomyocyte regeneration in mice and human myocardium reveals a therapeutic window[J]. *Sci Transl Med*, 2015, 7(281):281-326.
- [33] Natarajan N, Abbas Y, Sharpe M, et al. Complement receptor C5aR1 plays an evolutionarily conserved role in successful cardiac regeneration[J]. *Circulation*, 2018, 137(20):2152-2165.
- [34] Hirose K, Cutie S, Hoang A, et al. Evidence for hormonal control of heart regenerative capacity during endothermy acquisition[J]. *Science*, 2019, 364(6436):184-188.

收稿时间:2019-09-25

## 心肌应变成像在心脏再同步化治疗评估中的研究进展

熊倩<sup>1</sup> 俞杉<sup>2</sup>

(1. 贵州医科大学研究生院, 贵州 贵阳 550000; 2. 贵州省人民医院心内科, 贵州 贵阳 550000)

**【摘要】**心脏再同步化治疗已成为慢性心力衰竭患者非药物治疗的首选方式。传统上将 QRS 波群宽度作为心脏再同步化手术评估指标存在一定局限性, 导致心脏再同步化术后无反应。术前评估心肌的机械运动不同步尤为重要, 利用超声、MRI 和 CT 等多种影像学检查检测心肌应变参数绘制牛眼图, 可准确挑选合适患者, 判断术中电极植入位置, 预测心脏再同步化术后反应性。现将针对不同检查的应用及各自特点做一综述。

**【关键词】**心脏再同步化治疗; 牛眼图; 心肌应变

**【DOI】** 10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2020.04.018

## Myocardial Strain Imaging in Cardiac Resynchronization Therapy Assessment

XIONG Qian<sup>1</sup>, YU Shan<sup>2</sup>(1. *Guizhou Medical University Graduate School, Guiyang 550000, Guizhou, China*; 2. *Department of Cardiology, Guizhou Provincial People's Hospital, Guiyang 550000, Guizhou, China*)

**【Abstract】** Cardiac resynchronization therapy has become the preferred non-drug treatment for patients with chronic heart failure. Traditionally, QRS wave group width has limitation as an evaluation index of cardiac resynchronization therapy, which leads to no response after cardiac resynchronization therapy. Therefore, preoperative assessment of mechanical un-synchronization of myocardium is particularly important. Using ultrasound, MRI, CT and other imaging examinations to detect myocardial strain parameters to draw bull's eye plot can accurately select suitable patients, determine the location of intraoperative electrode implantation, and predict the post-cardiac resynchronization therapy reactivity. This article will review the application and characteristics of different examinations.

**【Key words】** Cardiac resynchronization therapy; Bull's eye plot; Myocardial strain

慢性心力衰竭(chronic heart failure, CHF)是各种心血管疾病发展的最终阶段,表现为心脏电-机械收缩的不同步,是心脏不良事件发生的独立危险因素<sup>[1]</sup>。心脏再同步化治疗(cardiac resynchronization therapy,

CRT)可通过多部位起搏协调心室激动顺序,纠正电传导延迟,恢复心脏电-机械同步性<sup>[2]</sup>。MADIT-CRT、REVERSE 和 RAFT 等几项大规模研究已证实, CRT 可延缓心室重塑,改善心室收缩功能,减少 CHF 患者再

住院率及死亡率<sup>[3-5]</sup>。国内外指南已将 CRT 列为 CHF 非药物治疗的 I 类适应证<sup>[6]</sup>。目前临床上判断心脏同步性的指标主要根据 QRS 波群的宽度,但 QRS 波群宽度仅体现了心肌电活动的不同步,不能完全代表机械运动的不同步性,因而仍有 40%~50% 患者 CRT 术后疗效不佳<sup>[6]</sup>。新近研究发现,约 27% QRS 波群不宽的 CHF 患者存在心室收缩不同步,并同样可从 CRT 中受益<sup>[7]</sup>。因此,术前综合评估患者心肌运动的同步性,对准确挑选合适患者、了解术后疗效及判断预后具有重要的指导意义。

心肌纤维的三维立体结构较为复杂,且心肌存在强大的代偿、储备能力,传统的反映心功能参数(如左室射血分数、主动脉前向血流积分和二尖瓣前向血流等)仅能在整体层面评估心肌收缩及舒张功能,且对心脏收缩功能的细微变化不敏感,并不能反映早期及局部的心肌不同步病变<sup>[8]</sup>。心肌应变是由心肌在心动周期中某方向上的长度变化值与原长度的比值而计算得来。近年来研究表明,心肌应变可在传统指标尚在正常范围时测量心肌的形变程度,识别心室功能的早期改变,精准、定量的反应心肌功能及心肌同步性等<sup>[8]</sup>。如左心室纵向峰值应变受损发生率在射血分数正常的心力衰竭患者中明显升高,提示此类患者左心室收缩功能已受损;对疾病后期预测有重要价值。圆周峰值应变受损的患者常伴有心力衰竭和心肌梗死等病史,提示其与左室构型改变及心肌损伤严重程度相关。为了对心肌局部结构、形态、功能及血供进行直观的表述,将左心室划分为 17 个节段进行受累心肌分析,制成一种以同心圆方式排列、放射性分布的心肌断层图像,称为牛眼图(Bull's eye plot)<sup>[9]</sup>。根据每一心肌节段应变参数梯度由高到低的变化,牛眼图不同区域的颜色由深红-粉-白-深蓝色差转变。其中深红色节段表示纵向峰值应变(longitudinal peak systolic strain, LPSS)平均值较高,细胞应变能力良好,应变值正常,提示为正常心肌;深蓝色节段区域表示 LPSS 平均值极低,细胞应变能力严重下降消失,视为死亡心肌;介于红蓝两色之间浅红色至浅蓝色的节段区域,则表示 LPSS 平均值不同程度减低,细胞应变能力呈轻度、中度、重度下降,视为不同程度受损心肌<sup>[9]</sup>。牛眼图在不同层、面、节段上定量分析受累心肌,简便、直观的评价左心室收缩同步运动情况,已成为评估 CRT 疗效及预后的重要手段。有学者提出心肌应变成像有望成为日后指导 CRT 治疗的应用指南<sup>[10]</sup>。

凡能进行心肌断层图像检测的影像学技术均可

测定心肌应变参数绘制牛眼图来评价心脏机械同步性,包括:超声心动图、核磁共振、CT 和放射性核素心肌显像等。现将分别阐述各项技术绘制牛眼图在 CRT 的应用及特点,总结见(表 1)。

## 1 超声心动图

### 1.1 实时三维超声心电图

实时三维超声心电图(real-time three-dimensional echocardiography, RT-3DE)技术采用超矩阵探头探查心肌,并按相控阵方式分别将发射的声束沿 X、Y、Z 轴扫描,利用高通量数据处理系统及三维空间定位系统形成三维图像<sup>[11]</sup>。RT-3DE 通过计算 QRS 波群起点至左心室收缩期最小容积的时间标准差,可精准评估左心室失同步程度;且当>10%时,预测 CRT 术后反应性的精准度最高<sup>[12]</sup>。也有研究将 RT-3DE 联合组织多普勒技术更精准预测左室重构逆转<sup>[13]</sup>。

RT-3DE 不依赖几何假设,成像速度快,可快速、实时地显示心脏三维结构<sup>[12-13]</sup>。但对图像质量要求高,在应用过程中心率和呼吸可影响三维图像的获取;图像视野局限,扩大的心室难以完全显示<sup>[12]</sup>。

### 1.2 斑点追踪成像

#### 1.2.1 二维斑点追踪成像技术

二维斑点追踪成像技术(two-dimensional speckle tracking imaging, 2D-STI)以二维图像为基础,利用斑点追踪技术,选择并自动追踪感兴趣区域心肌的运动轨迹,运用分析软件测定整体及节段心肌应变参数<sup>[14]</sup>。START 研究<sup>[15]</sup>发现,左室短轴的径向应变和心尖切面的横向应变与术后左室射血分数增加和预后相关,而 CRT 术前径向或横向应变的低基线水平和严重不良事件有关。有研究以径向非同步的临界值 $\geq 130$  ms 来预测 CRT 治疗的反应性,敏感性为 83%,特异性为 80%<sup>[16]</sup>。同时有研究把左室 12 个心肌节段收缩达峰时间的标准差(Ts-SD)定义为左室不同步指数,用于评价左室收缩的同步性。当 Ts-SD>32.5 ms 提示存在左室收缩的不同步。Ts-SD 目前已被公认为是反映心室机械不同步性的一个良好指标,其离散度越大,心室机械收缩的不同步性就越明显<sup>[14]</sup>。

2D-STI 规避了评估室壁运动及容积变化,通过测定心肌形变能更加准确评估心肌收缩功能。采用 B 型超声信号强度,不受声束方向与室壁运动方向间夹角的影响,克服了角度依赖性<sup>[14-16]</sup>。但 2D-STI 对心肌的观察仅局限于单一心动周期及切面的心肌运动,无法达到追踪效果。同时,2D-STI 对被检查者要求较严格,需屏住呼吸配合减少呼吸运动的干扰,且心律整齐,故合并有慢性阻塞性肺气肿、心律失常或心率快、

波动较大的患者均无法追踪到清晰的心肌斑点<sup>[16]</sup>。

### 1.2.2 三维斑点追踪成像技术

三维斑点追踪成像技术(three-dimensional speckle tracking imaging, 3D-STI)利用三维超声心动图技术获取连续心脏全容积图像,采用软件自动追踪心肌斑点的三维空间运动轨迹,准确定位心脏空间结构,并进行心肌应变成像,定量分析心肌伸缩、增窄、扭转的三维运动<sup>[17]</sup>。3D-STI 可通过评估并量化单个节段的心肌应变参数,得到相应节段的时间-应变曲线,识别最佳的左心室机械激活位点,精准定位 CRT 导线位置及预测 CRT 术后反应<sup>[17]</sup>。Tatsumi 等<sup>[18]</sup>运用 3D-STI 计算左心室峰值收缩期应变和舒张末期应变差值的平均值,定义为左心室面积应变不同步指数,对 14 例进行 CRT 治疗的 CHF 患者在术前、术后 6 个月分别进行检查。结果显示面积应变不同步指数 $\geq 3.8\%$ 时可有效预测左心室舒张末容积减少,敏感性为 78%,特异性为 100%。同时,应用应变率分散指数,即纵向、环向及径向节段收缩期峰值应变率均值减去整体收缩期峰值应变率,用以表示左心室机械不同步所致的收缩性丢失,作为 CRT 左室重塑逆转与远期心血管不良事件的预测因子<sup>[17-18]</sup>。

3D-STI 可分析患者左心室总体应变、扭转和拧转等心肌力学参数及三者间关系,孟庆国等<sup>[19]</sup>认为心肌扭转角度(以左心室长轴为中心,从心底至心尖旋转角度的梯度,单位:度/cm)可直观反映左心室机械收缩的同步性,评估植入起搏器对左心室整体功能的影响。研究发现以右心室间隔部起搏的患者左心室心肌扭转角度明显减低,提示间隔起搏更符合正常生理性传导顺序,可最大程度地使心室肌细胞顺序收缩,改善心室内、心室间电-机械活动的不同步性。同时, CRT 术后左心室扭转运动的增强能反应 CRT 术后左心室收缩功能的改善,可作为 CRT 术后评估心功能的重要参数<sup>[20]</sup>。

3D-STI 与 2D-STI 相比,可实时追踪心肌斑点运动并明确其立体空间的位置<sup>[17,20]</sup>。但与二维图像相比,三维图像帧频低,对图像的时间、空间分辨力相对较差,在辨别室壁心内膜、心外膜边界方面存在一定困难,且容易遗漏快速运动条件下的形变心肌,常影响应变测量的准确性<sup>[19-20]</sup>。同时,分析图像要求手动修正边界,可重复性低,需依赖操作者丰富的经验。全容积图像的组成需多个心动周期的采集,应用三维扫描的角度有限,限制了其在心室腔显著扩大或心尖部存在室壁瘤等疾病中的应用。与 2D-STI 类似,3D-STI 至少需采取连续 4 个稳定心动周期图像,且对图

像采集的质量要求更高,故不适用于呼吸、心率无法配合的患者。

## 2 心脏磁共振成像

心脏磁共振成像(cardiac magnetic resonance imaging, CMR)通过“一站式”无创检查一次性评估心脏结构及功能,包括血流灌注、室壁运动和心肌活性的检测等。CMR 已成为评估心肌功能的金标准,也是评估 CHF 患者心脏同步性必不可少的诊断工具<sup>[21]</sup>。心脏磁共振特征追踪技术(CMR-feature tracking, CMR-FT)通过追踪 CMR 稳态自由旋转扫描得到电影序列,使用心脏标准长、短轴位,通过后处理软件勾画出图像上的心内膜、心外膜,并通过计算得到整体及局部心肌应变参数<sup>[22]</sup>。Habibi 等<sup>[23]</sup>用 CMR-FT 和左心房容积指数评估 CHF 患者的心房体积及功能,在临床症状出现前,左心房整体径向峰值应变值降低,左心房最小容积指数升高;故 CMR-FT 左心房整体纵向峰值应变降低可提示早期心力衰竭的发生。近年来,也有研究显示心血管磁共振-组织同步指数为 CRT 术后评估并发症发生率及死亡率独立预测因子<sup>[24]</sup>。

CMR 具有更高的组织对比度和图像分辨率,不受解剖结构、声窗、角度和操作者主观影响的限制,相较于 STI,具有更高的准确性和重复性<sup>[22]</sup>。CMR-FT/心脏磁共振组织追踪技术(CMR-TT)无需特殊的扫描序列检测,仅利用常规 CMR 电影序列评估心肌运动情况,图像采集和分析耗时少<sup>[22,24]</sup>;无需注射对比剂,不存在对肝肾功能不全患者及对对比剂过敏患者的禁忌。但 CMR 检查耗时长,不适于无法搬动的危重患者;费用相对较高,故无法成为最常用的检查方法;重复性低,特别是植入 CRT/CRT 联合植入式心脏复律除颤器(CRT-D)的患者目前均为核磁兼容,无法在术后评估该类患者的室壁同步性和心功能。

现有技术算法的局限性,主要在于无法完全克服相邻帧间心肌组织由于运动发生形变而难以准确描记,甚至因无法追踪而信息丢失<sup>[25]</sup>。心脏形变技术是基于 CMR 传统序列的新兴技术,运用持续反图像变形配准算法恢复心肌因运动产生的形态学变化<sup>[25]</sup>。对比 CMR-FT,心脏形变技术能可视化分析室壁运动及定量分析心肌力学的变化。此方法可缩短后处理时间,消除对操作者的依赖性,具有高度的稳定性。

## 3 心脏 CT

### 3.1 SPECT/CT 门控断层心肌灌注显像

单光子发射计算机断层扫描(single photon emission computed tomography, SPECT)/计算机断层扫描(computed tomography, CT)门控心肌灌注显像利用

正常心肌细胞对放射性药物的摄取量与冠状动脉血流量成正比原理,观察放射性药物的分布以评价心肌血流灌注状况。采用门控采集技术,通过心电图作为门控信号,按照每个心动周期采集,并获得心肌应变参数<sup>[26]</sup>。SPECT/CT 门控心肌灌注显像能准确定量心脏收缩同步性的程度,门控采集能同时观察室壁运动情况、获得心功能参数,因此,具有“一站式”获得多项信息的独特优势。王蔚等<sup>[27]</sup>运用 SPECT/CT 检测发现 CRT 无反应组患者心肌瘢痕负荷明显高于 CRT 有反应组。故 CRT 术前可行 SPECT/CT 门控心肌灌注显像评价 CHF 患者心肌应变和瘢痕部位,指导术中左室导线植入位置,提高 CRT 反应性。另外,建议此类合并严重冠状动脉狭窄的患者行 CRT 前行冠状动脉介入手术,心肌得到再灌注后则可能减少心肌瘢痕负荷。同时,研究发现 CRT 有反应组患者的左心室同步性指标(包括峰相位、收缩期相位时间差和带宽等)较无反应组减小,提示 CRT 有反应组患者在左心室同步性方面得到改善,无反应组仍呈不同步化状态<sup>[26]</sup>。

SPECT/CT 门控心肌灌注显像无需任何附加采集,仅通过计算机软件自动处理即可进行心脏时相分析,定量心脏机械收缩同步性,采用全自动软件处理数据,减少人为因素的影响。

### 3.2 心脏 CT 成像分析

心脏 CT 成像分析是指利用多模态组织追踪算法运用逐帧自动模块匹配技术追踪选定区域目标组织

的运动轨迹,定量测量左心室心肌应变参数<sup>[28]</sup>。Busse 等<sup>[29]</sup>利用心脏 CT 成像分析评估 CHF 患者 CRT 治疗效果,每个节段心肌应变峰值可用于预测术后发生室性心律失常等心血管事件的风险。

心脏 CT 具有高空间分辨力和信噪比等特点,清晰的显示心脏结构,快速采集并精确定位心内外膜边界。心脏 CT 软件自动化操作简单、耗时少、实用性强,并且可用于左心房、右心室等几何形态相对不规整的心腔<sup>[28-29]</sup>。在检查禁忌症方面优于 MR,对存在金属植入物患者无明显禁忌。但心脏 CT 同样存在对比剂过敏等风险,且存在一定的电离辐射。

### 3.3 宝石能谱成像

宝石能谱成像(gemstone spectral imaging, GSI)是近年来出现的新型 CT 成像技术,不但可常规分析冠状动脉的形态及其狭窄程度,还可通过碘基物质密度图像定量分析缺血心肌,结合单光子能量图像更高效地找出心肌缺血区域<sup>[30]</sup>。在结合心功能评估软件绘制心功能牛眼图,得到心肌灌注稀释区、正常区域平均室壁运动度和室壁增厚率的定量数据,以评估心肌不同步性。卜玉莲等<sup>[30]</sup>运用 GSI 高分辨率 CT 扫描模式和 GSI 扫描模式结合后处理工作站评价局部心肌功能,研究发现 GSI 评估的缺血心肌定量结果与心肌 MRI 结果吻合。GSI 能明显提高图像质量,提高缺血心肌的检测效率,今后将有望广泛应用于 CRT 手术评估中。

表 1 各影像学技术在 CRT 应用中的特点比较

手段	应用范围	优缺点
RT-3DE	评估左心室失同步程度及 CRT 术后反应性	优点:不依赖几何假设,成像速度快 缺点:受心率、呼吸影响;图像视野局限
2D-STI	评价左心室收缩同步性;预测 CRT 治疗反应性	优点:克服角度依赖性 缺点:局限于二维平面,受心率、呼吸影响
3D-STI	更早、更客观评价左心室受损情况;识别最佳左心室机械激活位点,定位 CRT 导线位置;预测 CRT 术后左心室重塑及远期心血管不良事件	优点:实时追踪心肌斑点运动 缺点:对时间、空间分辨力较差;可重复性差,依赖操作者经验;对图像质量高
CMR	评估心肌功能“金标准”,评估心脏同步性;预测 CRT 术后并发症发生率及预测死亡率	优点:准确性及可重复性高 缺点:检查耗时长,费用高;且不适于无法搬动的危重患者
SPECT/CT 门控心肌灌注显像	“一站式”获得心功能参数;指导左室导线植入位置;减少因心肌瘢痕引起的 CRT 无反应	优点:定量分析;不受人为因素影响 缺点:受肝肾功能影响
心脏 CT 成像	评估 CRT 治疗效果;预测术后心血管事件风险	优点:空间分辨力及信噪比高;操作简单,耗时少 缺点:存在对比剂过敏风险
GSI	高效找出心肌缺血区域,评估心肌不同步性	优点:图像质量高,缺血心肌检测效率高 缺点:存在对比剂过敏风险

#### 4 小结

综上所述,现有多种影像学方法均可通过绘制牛眼图检测心肌应变参数,用以评估 CRT 术前适应证、判断术中电极植入的位置、预测术后效果及患者预后情况等。但每种影像学方法均有各自的优势及不足,仍需更深入研究探索敏感性高、重复性好和操作简便的无创评价心肌同步性及功能的方法以提高 CRT 成功率和患者生存率。

#### 参考文献

- [1] 邱英茹,张瑞英. 心肌代谢重构在慢性心力衰竭进展中的作用[J]. 心血管病学进展,2018,39(2):205-209.
- [2] O'Brien T, Park MS, Youn JC, et al. The past, present and future of cardiac resynchronization therapy[J]. Korean Circ J, 2019, 49(5):384-399.
- [3] Zeidler EP, Friedman DJ, Daubert JP, et al. Multiple comorbidities and response to cardiac resynchronization therapy: MADIT-CRT long-term follow-up[J]. J Am Coll Cardiol, 2017, 69(19):2369-2379.
- [4] Gold MR, Daubert C, Abraham WT, et al. The effect of reverse remodeling on long-term survival in mildly symptomatic patients with heart failure receiving cardiac resynchronization therapy: results of the REVERSE study[J]. Heart Rhythm, 2015, 12(3):524-530.
- [5] Osmanska J, Hawkins NM, Toma M, et al. Eligibility for cardiac resynchronization therapy in patients hospitalized with heart failure[J]. ESC Heart Fail, 2018, 5(4):668-674.
- [6] Yancy CW, Jessup M, Bozkurt B, et al. 2017 ACC/AHA/HFSA focused update of the 2013 ACCF/AHA guideline for the management of heart failure: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Clinical Practice Guidelines and the Heart Failure Society of America[J]. J Card Fail, 2017, 23(8):628-651.
- [7] 任小田,孙磊. 射血分数保留的心力衰竭的研究进展[J]. 心血管病学进展,2018,39(6):987-990.
- [8] Amzulescu MS, de Craene M, Langet H, et al. Myocardial strain imaging: review of general principles, validation, and sources of discrepancies[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging, 2019, 20(6):605-619.
- [9] Smiseth OA, Torp H, Opdahl A, et al. Myocardial strain imaging: how useful is it in clinical decision making? [J]. Eur Heart J, 2016, 37(15):1196-1207.
- [10] Khan SG, Klettas D, Kapetanakis S, et al. Clinical utility of speckle-tracking echocardiography in cardiac resynchronisation therapy [J]. Echo Res Pract, 2016, 3(1):1-11.
- [11] Spartalis M, Tzatzaki E, Spartalis E, et al. The role of echocardiography in the optimization of cardiac resynchronization therapy: current evidence and future perspectives[J]. Open Cardiovasc Med J, 2017, 11:133-145.
- [12] Zhang Q, Wang JF, Dong QQ, et al. Evaluation of left atrial volume and function using single-beat real-time three-dimensional echocardiography in atrial fibrillation patients[J]. BMC Med Imaging, 2017, 17(1):44.
- [13] Huang X, Yue Y, Wang Y, et al. Assessment of left ventricular systolic and diastolic abnormalities in patients with hypertrophic cardiomyopathy using real-time three-dimensional echocardiography and two-dimensional speckle tracking imaging[J]. Cardiovasc Ultrasound, 2018, 16(1):23.
- [14] Muraru D, Niero A, Rodriguez-Zanella H, et al. Three-dimensional speckle-tracking echocardiography: benefits and limitations of integrating myocardial mechanics with three-dimensional imaging[J]. Cardiovasc Diagn Ther, 2018, 8(1):101-117.
- [15] Maruo T, Seo Y, Yamada S, et al. The Speckle Tracking Imaging for the Assessment of Cardiac Resynchronization Therapy (START) study[J]. Circ J, 2015, 79(3):613-622.
- [16] Jeng GS, Zontak M, Parajuli N, et al. Efficient two-pass 3-D speckle tracking for ultrasound imaging[J]. IEEE Access, 2018, 6:17415-17428.
- [17] Casas-Rojo E, Fernandez-Golfin C, Moya-Mur JL, et al. Area strain from 3D speckle-tracking echocardiography as an independent predictor of early symptoms or ventricular dysfunction in asymptomatic severe mitral regurgitation with preserved ejection fraction[J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2016, 32(8):1189-1198.
- [18] Tatsumi K, Tanaka H, Tsuji T, et al. Strain dyssynchrony index determined by three-dimensional speckle area tracking can predict response to cardiac resynchronization therapy[J]. Cardiovasc Ultrasound, 2011, 9:11.
- [19] 孟庆国,徐芸,吴志霞,等. 三维斑点追踪成像技术评估右心双腔间隔起搏对左心室功能的影响[J]. 中国医学影像技术, 2018, 34(7):1019-1023.
- [20] 江佩,张平洋,吴文芳,等. 三维斑点追踪技术评价心脏再同步化治疗患者左心室心肌力学初步改变[J]. 生物医学工程与临床, 2017, 21(2):165-170.
- [21] Obeng-Gyimah E, Nazarian S. Cardiac magnetic resonance as a tool to assess dyssynchrony[J]. Card Electrophysiol Clin, 2019, 11(1):49-53.
- [22] Muser D, Castro SA, Santangeli P, et al. Clinical applications of feature-tracking cardiac magnetic resonance imaging [J]. World J Cardiol, 2018, 10(11):210-221.
- [23] Habibi M, Chahal H, Opdahl A, et al. Association of CMR-measured LA function with heart failure development: results from the MESA study[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2014, 7(6):570-579.
- [24] Morais P, Marchi A, Bogaert JA, et al. Cardiovascular magnetic resonance myocardial feature tracking using a non-rigid, elastic image registration algorithm: assessment of variability in a real-life clinical setting [J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2017, 19(1):24.
- [25] Lin K, Meng L, Collins JD, et al. Heart deformation analysis: the distribution of regional myocardial motion patterns at left ventricle [J]. Int J Cardiovasc Imaging, 2017, 33(3):351-359.
- [26] Mukherjee A, Patel CD, Naik N, et al. Quantitative assessment of cardiac mechanical dyssynchrony and prediction of response to cardiac resynchronization therapy in patients with nonischemic dilated cardiomyopathy using gated myocardial perfusion SPECT[J]. Nucl Med Commun, 2015, 36(5):494-501.
- [27] 王蔚,杨希立,李健民,等. SPECT/CT 门控心肌显像相位分析对慢性心力衰竭患者心脏再同步治疗的疗效评价[J]. 中国现代医学杂志, 2016, 26(7):69-73.
- [28] Mor-Avi V, Patel MB, Maffessanti F, et al. Fusion of three-dimensional echocardiographic regional myocardial strain with cardiac computed tomography for non-invasive evaluation of the hemodynamic impact of coronary stenosis in patients with chest pain[J]. J Am Soc Echocardiogr, 2018, 31(6):664-673.
- [29] Busse A, Cantré D, Beller E, et al. Cardiac CT: why, when, and how: update 2019[J]. Radiologe, 2019, 59(suppl 1):1-9.
- [30] 卜玉莲,张欢,潘自来,等. 能谱 CT 在局部心肌活性检测中的临床应用探讨[J]. CT 理论与应用研究, 2018, 27(5):593-599.

收稿日期:2019-07-02