

综述

心脏磁共振评估左心室机械不同步的研究进展

董建勋, 魏 莱, 何 杰, 孔令瓏, 葛 恒, 卜 军

上海交通大学医学院附属仁济医院心内科, 上海 200127

[摘要] 左心室机械不同步 (left ventricular mechanical dyssynchrony, LVMD) 是左心室运动异常的表现之一, 而 LVMD 的相关测量指标是左心室应变的衍生指标, 能够预测急性心肌梗死患者的预后和心脏再同步治疗的应答率。诊断 LVMD 的前提是精确测量左心室各节段的应变值, 心脏磁共振 (cardiac magnetic resonance, CMR) 作为一项新兴的心脏影像学检查手段, 能够准确测量左心室各节段的应变值。有很大的临床和科研价值。该文对 LVMD 的发生机制、CMR 对 LVMD 指标的测量以及 CMR 所测量的 LVMD 指标在心脏疾病诊疗中的临床应用做一综述。

[关键词] 左心室机械不同步; 心脏磁共振; 急性心肌梗死; 心脏再同步治疗

[DOI] 10.3969/j.issn.1674-8115.2021.12.022 **[中图分类号]** R541 **[文献标志码]** A

Progress of cardiac magnetic resonance in assessment of left ventricular mechanical dyssynchrony

DONG Jian-xun, WEI Lai, HE Jie, KONG Ling-cong, GE Heng, PU Jun

Department of Cardiology, Renji Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200127, China

[Abstract] Left ventricular mechanical dyssynchrony (LVMD) is one of the manifestations of abnormal left ventricular motion. And the measured indexes related to LVMD are the indexes derived from left ventricular strain, which can predict the response to cardiac resynchronization therapy and the prognosis of the patients with acute myocardial infarction. The premise of LVMD diagnosis is to measure segmental strains of left ventricle accurately. As an emerging cardiac imaging technology, cardiac magnetic resonance (CMR) can accurately measure the strain of each left ventricle segment, which makes it valuable in both clinic and scientific research. In this article, the mechanism of LVMD, the measurement by CMR and its clinical application to heart diseases are reviewed.

[Key words] left ventricular mechanical dyssynchrony (LVMD); cardiac magnetic resonance (CMR); acute myocardial infarction (AMI); cardiac resynchronization therapy (CRT)

良好的心脏泵血功能需要正常的心肌收缩力, 而各部分心肌收缩的同步性也非常重要。多种原因可导致心肌机械不同步, 主要包括心肌梗死^[1]、心肌病^[2]、肺动脉高压^[3]、先天性畸形^[4]以及慢性心力衰竭 (心衰) 等; 心室的机械不同步包括心室间不同步和心室内不同步。有关左心室机械不同步 (left ventricular mechanical dyssynchrony, LVMD) 的研究较多; 但是既往研究对心室机械不同步的定义并不相同, 使用的评估指标及具体计算方法各异, 测量技术也多种多样。常用的有单光子发射计算机断层成像术 (single-photon emission computed tomography, SPECT)^[5] 和心脏彩超, 近年来心脏磁共振 (cardiac magnetic resonance, CMR)

在这一领域展现了独特优势。因此, 本文就 CMR 在测量 LVMD 中的临床应用和研究进展做一综述。

1 LVMD 的发生机制

在大多数情况下, LVMD 是由部分心肌电传导速率减慢所导致的。心肌坏死、心室重构以及神经体液异常是诱导和加重心肌电传导异常的主要原因。

心电传导的同步性是机械活动同步性的先决条件。正常的心电传导系统需要窦房结、房室结、房室束及浦肯野纤维的共同作用, 使得心肌可以在极短的时间内被同时激活并同步收缩。当正常心电传导系统无法正常起

[基金项目] 国家杰出青年科学基金 (81625002); 国家自然科学基金面上项目 (81770238); 上海市优秀学术带头人计划 (18XD1402400); 上海交通大学医学院多中心临床研究项目 (DLY201804); 上海市教育委员会高峰高原学科建设计划 (20152209)。

[作者简介] 董建勋 (1995—), 男, 博士生; 电子信箱: 18317005950@163.com。

[通信作者] 卜 军, 电子信箱: pujun310@hotmail.com。

[Funding Information] National Science Fund for Distinguished Young Scholars (81625002); National Natural Science Foundation of China (81770238); Shanghai Outstanding Academic Leaders Program (18XD1402400); Multicenter Clinical Research Program of Shanghai Jiao Tong University School of Medicine (DLY201804); Shanghai Municipal Education Commission—Gaofeng Clinical Medicine Grant Support (20152209)。

[Corresponding Author] PU Jun, E-mail: pujun310@hotmail.com。

[网络首发] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.2045.R.20210918.1709.002.html> (2021/9/22 15:20:13)。

效时,由于电信号在心肌中的冲动传导远慢于浦肯野纤维,因此各部位心肌无法在短时间内同时被激活,即无法达到电活动的同步性,LVMD由此产生。常见的心电传导系统失效的原因包括损伤和旁路传导导致的短路,两者在心电图上的表现分别为左束支传导阻滞(left bundle branch block, LBBB)和心室起搏。心脏电活动延迟和机械收缩的延迟存在显著的相关性。电生理检查中发现,有91%的患者心电激活最晚的部位和心肌收缩最晚的部位相同^[6],证明大多数患者的心肌收缩不同步是由电活动不同步导致的。而另一部分患者出现LVMD的原因是由心肌活性的改变造成的,如心肌瘢痕和水肿,这些异常可以诱发心肌结构改变或局部的收缩功能受损^[7-8],从而使得左心室各节段收缩的时间和强度产生差异,各节段无法在同一时间开始收缩或出现不同强度的收缩活动,LVMD由此产生。

LVMD会导致心脏有效做功明显减少,存在LBBB的心肌病患者左心室收缩末期血液动能相较于没有LBBB的患者显著降低^[9]。降低的心脏做功效率使左心室的舒张末容积增大,室壁张力增高,左心室负荷较前进一步升高^[10],而升高的负荷会激活神经体液系统,如肾上腺素、肾素-血管紧张素-醛固酮系统等,诱发左心室的不良重构^[11]。另一方面,LVMD造成心室各部分心肌张力不同,也会造成心室的不对称性肥厚和细胞外胶原的沉积^[12],这样的病理改变会进一步影响心脏传导系统的传导速率和局部收缩功能,加重原有的LVMD。

2 LVMD的测量

2.1 LVMD的测量技术

LVMD的相关测量指标是心肌应变的衍生指标,由对心肌应变数值的进一步计算得出,因此想要得到准确的LVMD指标就必须精确地测量心肌应变。心肌应变的传统测量方法主要是超声斑点追踪技术(speckle tracking),但是较低的空间和组织分辨率,以及高操作者依赖性,限制了其在临床尤其是科研中的使用。

CMR可有效避免上述缺陷,其优秀的空间和时间分辨率,使其对LVMD的测量更为精准。同时,得益于CMR对心肌活性的检测能力,它也可有效地鉴别LVMD的成因。CMR测定心肌应变主要有心肌标记技术(CMR-tagging)和特征追踪技术(feature-tracking, CMR-FT)2种方法;其中tagging技术是CMR测量心肌应变的金标准^[13],但是tagging技术需要专门的扫描序列,后处理时间冗长;因此,近年来不需要额外后处理

的CMR-FT技术备受关注。其处理原理与超声斑点追踪技术相似,通过光流法识别图像的各项特征,在动态图像上追踪这些特征,然后计算心肌的容积和应变。CMR-FT和心脏彩超对左心室应变的检测具有较强的相关性^[14],而在测量心肌容积和功能时,CMR-FT的准确度则较超声斑点追踪技术更高^[15]。在测量LVMD程度方面,尽管心脏彩超和CMR所测量的应变数值差异不大,但两者所得出的LVMD测量结果却相差甚远,有时差值可达到1倍以上^[16]。但是,CMR-FT所检测的左心室应变和机械不同步与tagging技术具有高度一致性,这个结论已经在健康人、心肌梗死患者、心衰患者以及心肌病患者中被验证^[17-19]。

2.2 LVMD的评价指标

常用的基于CMR的机械不同步评价指标和计算方法如下。

2.2.1 传统指标 早年的研究中更多使用类似节段收缩峰值应变的标准差、各节段达峰时间的标准差以及各节段达到最大应变的最大时间差的指标,它们主要反映各节段收缩活动在时间和空间上的离散度,测量和计算都比较简单,CMR和心脏彩超的测量和计算方法类似。

2.2.2 CMR上使用的指标 在CMR上使用的指标是CURE(circumferential uniformity ratio estimate)和RURE(radial uniformity ratio estimate)。CURE在2002年由Leclercq等^[20]在动物模型中首次提出,其计算方法为:首先测得一个左心室短轴层面每个节段在同一个时相上的周向应变值,以节段位置和应变值为坐标在坐标轴绘制曲线,然后对曲线进行傅里叶变换,将所得到的常数项 A_0 和第一项的系数 A_1 按照如下公式计算:

$$CURE = \sqrt{\sum_{T=0}^{HR} \sum_{S=Base}^{Apex} \frac{A_0^2(T.S)}{A_0^2(T.S) + 2A_1^2(T.S)}}$$

其中 $T=timephase$,表示时相,时相数根据各中心的检查流程而定; $S=slice$,代表左心短轴切面,从心底(Base)到心尖(Apex),切面层数一般为9~11层。

RURE的计算方法与CURE相同,但使用径向应变代替周向应变。CURE和RURE都是介于0~1的无单位标准化系数。CURE=0时代表左心室在圆周方向收缩的绝对不同步,即无效收缩,而CURE=1则代表各节段的收缩完全同步,心肌的做功没有任何浪费,是一种理想化的左心室各节段同步运动的状态。

基于CMR-FT技术计算的CURE和RURE具有良好的可重复性^[21]。由于这2个指标的测量需要左心室各节段在每个时相的应变值,对时间和空间分辨率的要求较高,

因此只能通过CMR来测量。

3 CMR测量LVMD的临床意义

3.1 LVMD指标在非缺血性心脏病中的应用

LVMD常出现在心衰和心肌病的患者中,其严重程度和QRS波宽度具有较强的相关性($P<0.001$)^[22];但是在窄QRS波患者中, LVMD也时有出现。即使QRS波宽度小于120 ms, 仍有29.5%的心衰患者出现了明显的LVMD^[23], 这提示即使在非缺血性心脏病中, LVMD也不是完全由电活动不同步所导致的, 原发的心肌结构改变和收缩功能受损也是其重要原因。此外, LVMD对心衰患者的预后也有预测价值^[24]。而在扩张性心肌病中, LVMD的出现甚至还要早于电活动不同步^[25], 因此LVMD的测量或许有助于心肌病的早期诊断。

不过, 在既往的研究中LVMD指标还是更多地被应用在心脏再同步治疗(cardiac resynchronization therapy, CRT)的评估中。对于心衰患者而言, CRT是一个重要的治疗手段, 而即使严格遵守起搏器植入指征, 仍会有30%~40%的患者在植入后没有获益。2013年欧洲心律学会/欧洲心脏病学会并没有在公布的《心脏起搏器和心脏再同步治疗指南》中将出现LVMD列为CRT的指征, 这或许是因为既往的多中心研究中, 心脏彩超所测得的LVMD指标预测CRT应答率的灵敏度和准确度都较低^[26];但是现有的研究已经证明, CMR测得的基线LVMD指标可以用来预测患者对CRT的应答率。多因素Logistic回归分析得出: CURE每下降0.1, 患者对CRT的应答率升高至原来的2.59倍^[27]。

我们已经知道, 有LVMD的患者更适合接受CRT; 而从另一个角度来看, 在术前的CMR评估中没有显著LVMD的患者, CRT的收益更小, 甚至会出现负向收益。2012年发表在*European Heart Journal*上的一篇临床研究^[28]指出, 术前CMR未检测出明显LVMD的患者, 在接受CRT后48 h内反而出现了明显的LVMD, 且长期预后也更差, 这表明在CRT前对左心室机械同步性的精确评估也是非常重要的。

但通过检测LVMD来预测CRT的预后也有其局限性, 并非所有存在LVMD的心衰患者都能从CRT中获益。2013年发表在*New England Journal of Medicine*的一项临床研究^[29]发现, 对于在心脏超声中观察到LVMD的窄QRS波患者, CRT并不能使其获益。通过对809例该类患者的随机对照试验发现, CRT组和对照组在平均19.4个月的随访期间死亡和心衰再入院的发生率没有显著差异,

而CRT组的死亡率甚至还要高于对照组; 提示单独在影像学检查中发现的LVMD不能作为CRT的应用指征。在使用CMR的影像学研究中, 对于存在LVMD的心衰患者, 宽QRS波的患者在CMR上的瘢痕面积要小于窄QRS波的患者, 这提示了对于窄QRS波的心衰患者, 射血分数下降和LVMD更多是由于心肌瘢痕组织而非电活动不同步^[30], 这或许可以部分解释存在LVMD的窄QRS波心衰患者无法从CRT中获益的原因。因为CRT只能改善电活动的同步性, 而瘢痕组织既没有电传导, 其本身也会使收缩功能受损, 所以即便应用了CRT, 患者的机械不同步也无法被改善。另一项研究^[31]指出, 在非缺血性心肌病的患者中, 对CRT有应答的患者在CMR上显示的瘢痕面积显著小于无应答者[左心室: $(8\pm14)\%$ vs $(23\pm23)\%$, $P=0.01$ 。右心室: $(24\pm30)\%$ vs $(40\pm32)\%$, $P=0.04$]; 同时, 双室都没有瘢痕的患者对CRT的应答率为81%, 右心室有瘢痕、左心室有瘢痕以及双室都有的患者对CRT的应答率依次降低, 分别为55%、25%和0。这也证明了CRT主要的作用是改善电活动的同步性, 对于瘢痕导致的LVMD并没有有效的改善作用。因此, CMR在CRT筛选中的作用不仅在于其可以更精确地测量患者的LVMD情况, 并且在于其具备对心肌活性的检测能力, 也能鉴别LVMD的原因; 对于主要由心肌瘢痕造成的LVMD, 以改善心电同步性、同步起搏作为治疗原理的CRT的疗效有限。

3.2 LVMD指标在缺血性心脏病中的应用

LVMD不仅出现在心衰和心肌病的患者中, 在缺血性心脏病的患者中也同样会出现, 而这时, LVMD与QRS波宽度没有明显的相关性^[22]。

对于急性心肌梗死患者, 在心脏超声上检测出LVMD患者的死亡率和心衰发病率都显著高于未检出LVMD的患者^[32]。研究^[33]提示, 心脏超声检测发现的LVMD是急性心肌梗死长期预后不良的独立危险因素; 但也有研究^[34]在加入应变等因素校正后, 发现LVMD不是急性心肌梗死后心衰的独立危险因素。这样矛盾的结论可能是心脏超声测量心肌应变和检测LVMD的局限性造成的。由于CMR兼具对心肌活性和心脏形态学的检测能力, 一些研究^[35]将心肌活性和LVMD检测相结合, 发现急性心肌梗死患者的LVMD程度与急性期CMR上的水肿和梗死面积相关, 梗死和水肿面积更大的患者急性期的LVMD更严重; 而在随访期, 他们的机械同步性也更难恢复。另一方面, CMR测得的LVMD指标也同样能预测心肌梗死患者的预后情况。在急性心肌梗死患者中,

使用CMR测得的CURE小于平均值是术后1年内发生不良事件的独立危险因素;更进一步的分析发现,在基线左室射血分数大于35%的患者中,CURE小于平均值依然是不良事件的独立危险因素,提示CURE在心功能保留的急性心肌梗死患者中也具有独立的危险分层能力^[1]。不仅如此,LVMD对于急性心肌梗死后的左心室不良重构也具有预测价值。2009年的一项研究^[13]发现,在透壁性心肌梗死患者中,基线CMR上存在LVMD的患者在术后半年的不良心室重构更加严重。因此,LVMD指标不仅能对急性心肌梗死患者的不良事件进行危险分层,对心功能和心室重构的也同样具有预测价值。

不仅如此,CMR所测得的LVMD指标在冠状动脉粥样硬化性心脏病(冠心病)无症状患者中也具有临床预测价值。Sharma等^[36]对无症状冠心病患者进行了平均8.3年的随访,发现使用tagging技术所测得的基线LVMD指标是女性患者发生不良事件的危险因素,同时对所有患者的心室重构程度也有一定的预测价值。CMR作为一种比心脏彩超测量精度更高、功能更强的技术手段,能够同时评估急性心肌梗死患者的LVMD和梗死情况,在缺血性心脏病患者的评估中效率更高,应用范围也更广。

3.3 LVMD指标在先天性心脏病中的应用

除了上述的心脏疾病,CMR在小儿心脏病的诊断和治疗中也有广泛的应用前景。受限于小儿生长发育未完全等原因,多数情况下无法在小儿中应用经皮冠状动脉造影等有创性检查技术,而作为首选的心脏彩超又存在分辨率低等缺陷;因此CMR作为一个能对心脏多切面成像,无创且无放射的检查技术,在近些年也越来越多地应用在小儿心脏病,其中也有一些关于LVMD的研究。

有研究^[37]发现,在法洛四联症患者的CMR图像上出现了明显的LVMD;而在法洛四联症修补术后,Kalaitzidis等^[38]在4.7年的随访中发现,CMR测得的机械不同步指标(包括左心室和右心室)对术后的心功能和运动能力有预测价值($P=0.02$),然而这个结论却与另外一个研究相冲突。Jing等^[39]发现,CMR测得的LVMD指标对法洛四联症修补术后心室容积和射血分数的变化没有预测价值,同时LVMD严重程度与术后的心源性死亡、室性心动过速也没有显著的相关性($P>0.05$)^[38]。另

外,Steinmetz等^[4]发现,埃布斯坦综合征患者的CMR图像上也出现了明显的LVMD,且LVMD的严重程度对患者的心功能恶化具有预测价值。这些研究结果提示,CMR对于LVMD的检测在先天性心脏病中或许也有一定的临床价值,但其是否能在临床得到应用仍有待进一步的探索。

4 CMR测量LVMD指标的局限性

尽管CMR能力强大,但也存在一定的局限性。首先由于不同中心检查所用仪器及参数设置不同,对图像后处理和软件及方法不同,CMR的定量分析结果不能在不同中心间通用,对心肌应变的测量和机械不同步的计算也没有标准参考值,单一中心的研究结论不能推广。同时,由于LVMD指标的计算需要对心肌应变的精确测量,而CMR的定量分析耗时耗力,这也阻碍了它的广泛临床应用。

5 展望

目前而言,制约CMR广泛应用的原因之一就是冗长的后处理分析。但是近年来由于人工智能的快速发展,深度学习算法在CMR的图像识别领域也有越来越多的应用。在CMR图像分析的各个阶段,从节段分割到心肌内外膜的识别、应变和容积指标的计算,以及对图像分析结果的自动质控,都有不同的文献报道^[40-41];这使得CMR的自动定量分析得以实现,极大地减少了CMR检查后处理分析的人力时间成本。此外,近期也有对患者LVMD情况进行人工智能自动分析的影像学研究^[42]出现;这项技术一旦成熟,研究者可以更加快捷地计算LVMD相关指标,且CMR所测量的LVMD指标也有望加入CRT的标准评估流程中。同时,LVMD指标在缺血性心脏病和先天性心脏病中的应用仍有待进一步的开发;在大样本的临床研究证实后,同样有机会成为危险分层的依据之一。总之,CMR和LVMD的临床和科研应用前景广阔,将在心血管疾病的诊疗中占据越来越重要的位置。

参·考·文·献

[1] 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.

[2] Xu Y, He S, Li W, et al. Quantitative mechanical dyssynchrony in dilated

- cardiomyopathy measured by deformable registration algorithm[J]. *Eur Radiol*, 2020, 30(4): 2010-2020.
- [3] Schäfer M, Collins KK, Browne LP, et al. Effect of electrical dyssynchrony on left and right ventricular mechanics in children with pulmonary arterial hypertension[J]. *J Heart Lung Transplant*, 2018, 37(7): 870-878.
- [4] Steinmetz M, Usenbenz S, Kowallick JT, et al. Left ventricular synchrony, torsion, and recoil mechanics in Ebstein's anomaly: insights from cardiovascular magnetic resonance[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2017, 19(1): 101.
- [5] Chen J, Garcia EV, Folks RD, et al. Onset of left ventricular mechanical contraction as determined by phase analysis of ECG-gated myocardial perfusion SPECT imaging: development of a diagnostic tool for assessment of cardiac mechanical dyssynchrony[J]. *J Nucl Cardiol*, 2005, 12(6): 687-695.
- [6] Suever JD, Hartlage GR, Magrath RP, et al. Relationship between mechanical dyssynchrony and intra-operative electrical delay times in patients undergoing cardiac resynchronization therapy[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2014, 16: 4.
- [7] Zhang F, Yang W, Wang Y, et al. Is there an association between hibernating myocardium and left ventricular mechanical dyssynchrony in patients with myocardial infarction? [J]. *Hell J Nucl Med*, 2018, 21(1): 28-34.
- [8] Richardson WJ, Clarke SA, Quinn TA, et al. Physiological implications of myocardial scar structure[J]. *Compr Physiol*, 2015, 5(4): 1877-1909.
- [9] Zajac J, Eriksson J, Alehagen U, et al. Mechanical dyssynchrony alters left ventricular flow energetics in failing hearts with LBBB: a 4D flow CMR pilot study[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2018, 34(4): 587-596.
- [10] Voigt JU, Cvijic M. 2- and 3-dimensional myocardial strain in cardiac health and disease[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2019, 12(9): 1849-1863.
- [11] van Berlo JH, Maillet M, Molkenin JD. Signaling effectors underlying pathologic growth and remodeling of the heart[J]. *J Clin Invest*, 2013, 123(1): 37-45.
- [12] van Oosterhout MF, Prinzen FW, Arts T, et al. Asynchronous electrical activation induces asymmetrical hypertrophy of the left ventricular wall[J]. *Circulation*, 1998, 98(6): 588-595.
- [13] Chang SA, Chang HJ, Choi SI, et al. Usefulness of left ventricular dyssynchrony after acute myocardial infarction, assessed by a tagging magnetic resonance image derived metric, as a determinant of ventricular remodeling[J]. *Am J Cardiol*, 2009, 104(1): 19-23.
- [14] Obokata M, Nagata Y, Wu VC, et al. Direct comparison of cardiac magnetic resonance feature tracking and 2D/3D echocardiography speckle tracking for evaluation of global left ventricular strain[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2016, 17(5): 525-532.
- [15] 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.
- [16] Onishi T, Saha SK, Ludwig DR, et al. Feature tracking measurement of dyssynchrony from cardiovascular magnetic resonance cine acquisitions: comparison with echocardiographic speckle tracking[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2013, 15: 95.
- [17] Khan JN, Singh A, Nazir SA, et al. Comparison of cardiovascular magnetic resonance feature tracking and tagging for the assessment of left ventricular systolic strain in acute myocardial infarction[J]. *Eur J Radiol*, 2015, 84(5): 840-848.
- [18] Backhaus SJ, Metschies G, Zieschang V, et al. Head-to-head comparison of cardiovascular MR feature tracking cine *versus* acquisition-based deformation strain imaging using myocardial tagging and strain encoding[J]. *Magn Reson Med*, 2021, 85(1): 357-368.
- [19] 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.
- [20] Leclercq C, Faris O, Tunin R, et al. Systolic improvement and mechanical resynchronization does not require electrical synchrony in the dilated failing heart with left bundle-branch block[J]. *Circulation*, 2002, 106(14): 1760-1763.
- [21] Kowallick JT, Morton G, Lamata P, et al. Quantitative assessment of left ventricular mechanical dyssynchrony using cine cardiovascular magnetic resonance imaging: inter-study reproducibility[J]. *JRSM Cardiovasc Dis*, 2017, 6: 2048004017710142.
- [22] Tournoux F, Donal E, Leclercq C, et al. Concordance between mechanical and electrical dyssynchrony in heart failure patients: a function of the underlying cardiomyopathy? [J]. *J Cardiovasc Electrophysiol*, 2007, 18(10): 1022-1027.
- [23] Ghio S, Constantin C, Klersy C, et al. Interventricular and intraventricular dyssynchrony are common in heart failure patients, regardless of QRS duration[J]. *Eur Heart J*, 2004, 25(7): 571-578.
- [24] Zhou Y, He Z, Liao S, et al. Prognostic value of integrative analysis of electrical and mechanical dyssynchrony in patients with acute heart failure[J]. *J Nucl Cardiol*, 2021, 28(1): 140-149.
- [25] Yamada S, Arrell DK, Kane GC, et al. Mechanical dyssynchrony precedes QRS widening in ATP-sensitive K⁺ channel-deficient dilated cardiomyopathy[J]. *J Am Heart Assoc*, 2013, 2(6): e000410.
- [26] Chung ES, Leon AR, Tavazzi L, et al. Results of the predictors of response to CRT (PROSPECT) trial[J]. *Circulation*, 2008, 117(20): 2608-2616.
- [27] Bilchick KC, Kuruvilla S, Hamirani YS, et al. Impact of mechanical activation, scar, and electrical timing on cardiac resynchronization therapy response and clinical outcomes[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2014, 63(16): 1657-1666.
- [28] Auger D, Bleeker GB, Bertini M, et al. Effect of cardiac resynchronization therapy in patients without left intraventricular dyssynchrony[J]. *Eur Heart J*, 2012, 33(7): 913-920.
- [29] Ruschitzka F, Abraham WT, Singh JP, et al. Cardiac-resynchronization therapy in heart failure with a narrow QRS complex[J]. *N Engl J Med*, 2013, 369(15): 1395-1405.
- [30] Jackson T, Amraoui S, Sohal M, et al. The interaction of QRS duration with cardiac magnetic resonance derived scar and mechanical dyssynchrony in systolic heart failure: implications for cardiac resynchronization therapy[J]. *Int J Cardiol Heart Vasc*, 2018, 18: 81-85.
- [31] Wong JA, Yee R, Stirrat J, et al. Influence of pacing site characteristics on response to cardiac resynchronization therapy[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2013, 6(4): 542-550.
- [32] Shin SH, Hung CL, Uno H, et al. Mechanical dyssynchrony after myocardial infarction in patients with left ventricular dysfunction, heart failure, or both[J]. *Circulation*. 2010, 121(9): 1096-1103.
- [33] Antoni ML, Boden H, Hoogslag GE, et al. Prevalence of dyssynchrony and relation with long-term outcome in patients after acute myocardial infarction[J]. *Am J Cardiol*, 2011, 108(12): 1689-1696.
- [34] Noringriis I, Modin D, Pedersen SH, et al. Prognostic importance of mechanical dyssynchrony in predicting heart failure development after ST-segment elevation myocardial infarction[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2019, 35(1): 87-97.
- [35] Manka R, Kozerke S, Rutz AK, et al. A CMR study of the effects of tissue edema and necrosis on left ventricular dyssynchrony in acute myocardial infarction: implications for cardiac resynchronization therapy[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2012, 14: 47.
- [36] Sharma RK, Volpe G, Rosen BD, et al. Prognostic implications of left ventricular dyssynchrony for major adverse cardiovascular events in asymptomatic women and men: the Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis[J]. *J Am Heart Assoc*, 2014, 3(4): e000975.
- [37] Schäfer M, Barker AJ, Morgan GJ, et al. Increased systolic vorticity in the left ventricular outflow tract is associated with abnormal aortic flow formations in tetralogy of Fallot[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2020, 36(4): 691-700.
- [38] Kalaitzidis P, Orwat S, Kempny A, et al. Biventricular dyssynchrony on cardiac magnetic resonance imaging and its correlation with myocardial deformation, ventricular function and objective exercise capacity in patients with repaired tetralogy of Fallot[J]. *Int J Cardiol*, 2018, 264: 53-57.
- [39] Jing L, Wehner GJ, Suever JD, et al. Left and right ventricular dyssynchrony and strains from cardiovascular magnetic resonance feature tracking do not predict deterioration of ventricular function in patients with repaired tetralogy of Fallot[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2016, 18(1): 49.
- [40] Ruijsink B, Puyol-Anton E, Oksuz I, et al. Fully automated, quality-controlled cardiac analysis from CMR: validation and large-scale application to characterize cardiac function[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(3): 684-695.
- [41] Bai WJ, Sinclair M, Tarroni G, et al. Automated cardiovascular magnetic resonance image analysis with fully convolutional networks[J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2018, 20(1): 65.
- [42] Wang Z. Robust and automatic diagnosis of the intraventricular mechanical dyssynchrony for the left ventricle in cardiac magnetic resonance images[J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2017, 12(9): 1471-1480.

[收稿日期] 2021-05-19

[本文编辑] 瞿麟平