

# 超声心动图研究新视角:无创左室压力-应变环\*

薛婷<sup>1</sup> 张鹏英<sup>1</sup> 陈允安<sup>2</sup> 任斐<sup>3</sup> 张洁<sup>2</sup>

**[摘要]** 无创左室压力-应变环(PSL)是一种定量评价心肌做功的新方法,基于二维斑点追踪技术(2D-STI),将无创测得的左室压力和斑点追踪成像的应变进行拟合,从而构建 PSL。与传统的左室射血分数(LVEF)和整体纵向应变(GLS)相比,PSL 具有潜在应用价值,是临床评价左室收缩功能的有益补充。本文主要对左室 PSL 的原理及潜在的临床应用进行综述。

**[关键词]** 压力-应变环;心肌做功;二维斑点追踪技术;左室;功能

**DOI:**10.13201/j.issn.1001-1439.2021.06.003

**[中图分类号]** R445.1 **[文献标志码]** A

## A new perspective of echocardiography: non-invasive left ventricular pressure-strain loop

XUE Ting<sup>1</sup> ZHANG Pengying<sup>1</sup> CHEN Yun'an<sup>2</sup> REN Fei<sup>3</sup> ZHANG Jie<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Xuzhou Medical University Affiliated Lianyungang Hospital, Lianyungang, Jiangsu, 222002, China;<sup>2</sup>Department of Ultrasound,<sup>3</sup>Department of Cardiology, Lianyungang First People's Hospital)

Corresponding author: ZHANG Jie, E-mail: zj6100@163.com

**Summary** Non-invasive left ventricular pressure-strain loop(PSL) is a new method for the quantitative evaluation of myocardial work, which is developed on the basis of speckle tracking imaging. It is necessary to fit the non-invasive left ventricular pressure and the strain by speckle tracking imaging to construct a PSL. Compared with traditional left ventricular ejection fraction(LVEF) and global longitudinal strain(GLS). PSL has potential application value and is a useful supplement for clinical evaluation of left ventricular systolic function. This article reviews the principle and potential clinical application of the left ventricular PSL.

**Key words** pressure-strain loop; myocardial work; two-dimensional speckle tracking imaging; left ventricle; function

近年来,二维斑点追踪技术(two-dimensional speckle tracking imaging, 2D-STI)已成为评价左

室收缩功能的热点技术,整体纵向应变(global longitudinal strain, GLS)与传统评价左室收缩功能的左室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)、多普勒应变相比,具有很大的优势。2D-STI 与组织多普勒频移无关,不受声束与室壁运动方向间夹角的影响,且不受检查者主观因素及周围邻近组织牵拉的影响,能准确定量检测心肌形变、

\*基金项目:连云港市卫生计生科技项目(No:201805);连云港市第一人民医院医疗技术扶持项目

<sup>1</sup>徐州医科大学附属连云港医院(江苏连云港,222002)

<sup>2</sup>连云港市第一人民医院超声科

<sup>3</sup>连云港市第一人民医院心血管内科

通信作者:张洁, E-mail: zj6100@163.com

[37] Lemor A, Hosseini Dehkordi SH, Basir MB, et al. Impella Versus extracorporeal membrane oxygenation for acute myocardial infarction cardiogenic shock[J]. Cardiovasc Revasc Med, 2020, 21(12):1465-1471.

[38] Pozzi M, Banfi C, Grinberg D, et al. Venous-arterial extracorporeal membrane oxygenation for cardiogenic shock due to myocarditis in adult patients[J]. J Thorac Dis, 2016, 8(7):E495-502.

[39] Mohite PN, Sabashnikov A, Patil NP, et al. Short-term ventricular assist device in post-cardiotomy cardiogenic shock: factors influencing survival[J]. J Artif Organs, 2014, 17(3):228-235.

[40] Takayama H, Truby L, Takeda K, et al. Short-term ventricular assist devices (implantable and percutaneous)[J]. Curr Surg Rep, 2014, 2(6):58.

[41] Loforte A, Marinelli G, Musumeci F, et al. Extracorporeal membrane oxygenation support in refractory cardiogenic shock: treatment strategies and analysis of risk factors[J]. Artif Organs, 2014, 38(7):E129-141.

[42] John R, Long JW, Massey HT, et al. Outcomes of a multicenter trial of the Levitronix CentriMag ventricular assist system for short-term circulatory support[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2011, 141(4):932-939.

[43] Sung SY, Hsu PS, Chen JL, et al. Prolonged use of levitronix left ventricular assist device as a bridge to heart transplantation[J]. Acta Cardiol Sin, 2015, 31(3):249-252.

(收稿日期:2021-02-22)

旋转与扭转程度,同时较LVEF可重复性好。但其负荷依赖性降低了心肌功能评价的准确性<sup>[1-2]</sup>。有研究表明,当血压升高时,2D-STI获取的应变值降低<sup>[3]</sup>。最近,有学者发现可通过左室压力-应变环(pressure-strain loops, PSL)无创评价心肌做功,同时考虑心肌形变和左室压力,可避免负荷依赖对心肌收缩功能的影响<sup>[4-5]</sup>。本文主要对PSL的原理及潜在的临床应用进行综述。

## 1 无创左室 PSL 的原理

### 1.1 左室压力及应变的获取

PSL同时考虑左室压力动力学与心肌形变,最初通过有创的方法获取左室压力,限制了其在临床的应用<sup>[6]</sup>。Russell等<sup>[4-5]</sup>首次提出无创获取左室压力的方法,在麻醉犬的动物实验中证实左室PSL面积与微压力计和超声显微测量的环面积之间相关性好( $r=0.96$ ),同时在临床研究中也证实无创获取与有创获得的左室压力存在明显相关性( $r=0.99$ )。Hubert等<sup>[1]</sup>也证实了这一观点。假定收缩期左室峰值压力与用袖带血压计测量的动脉峰值压力相等,可直接用袖带血压计测得的肱动脉压代替左室压力<sup>[4]</sup>。

应变参数直接由2D-STI获取。根据最新的超声心动图指南<sup>[7]</sup>采集标准的心尖三腔心、四腔心、两腔心图像(3~5个心动周期,帧频 $>50$ 帧/s)。拷贝原始图像于EchoPAC工作站进行图像处理,通过二尖瓣及主动脉瓣的启闭时间,确定等容收缩期及射血期。自动描记感兴趣区域(左室心内膜边界),不满意的地方手动微调。自动处理后即可获得整体及节段应变。在心肌做功中输入血压,得到17节段心肌做功牛眼图及左室PSL。

### 1.2 PSL 评价左室收缩功能

Suga等<sup>[8]</sup>首次提出左室压力-容积环(pressure-volume loop, PVL)的概念。研究表明,PVL的面积与心肌耗氧量呈线性相关,代表左室总机械能<sup>[9]</sup>。理想情况下,PVL是矩形或梯形的,描述心动周期的4个阶段,即等容收缩期、射血期、等容舒张期、充盈期。将横坐标用GLS替代,即可获得PSL,其面积代表心肌做功,是将节段应变(%)微分后乘以左室瞬时压力(mmHg)。

LVEF是评价左室收缩功能的常规指标,但LVEF是整体参数,不能体现局部心肌功能<sup>[3]</sup>,同时受前负荷(舒张期)和后负荷(收缩期)的影响<sup>[10]</sup>。2D-STI评价心肌形变,既可以反映心肌整体应变,也可以评价局部功能,是心血管事件的一个重要预后因子,优于LVEF<sup>[11]</sup>。但2D-STI也存在负荷依赖性<sup>[1]</sup>,后负荷增加会导致左室舒张末期压力升高,从而使心肌应变降低。PSL可在一定程度上降低后负荷的影响,无创评价左室收缩功能,同时,该方法简便、经济、可操作性强、重复性好,在

临床实践中存在巨大的发展潜能。

### 1.3 心肌做功参数

物理学上,功表示力对物体作用空间累积的量,其大小等于力与其作用点位移的乘积。心肌做功作为一种新型参数,为左室收缩功能的评价提供了越来越多潜在应用价值。其指标主要包括整体做功指数(global work index, GWI)、整体做功效率(global work efficiency, GWE)、整体有用功(global constructive work, GCW)及整体无用功(global wasted work, GWW)。GWI是指左室PSL的面积,即从二尖瓣关闭到二尖瓣开心肌做功的总和。GCW是心肌在收缩期缩短或等容舒张期拉长所做的功,有助于左室射血。相反,GWW是心肌在收缩期拉长或在等容舒张期缩短时做的功,阻碍左室射血。GWE是GCW占GCW与GWW之和的百分比,反映机械能在整个心动周期中做功的效率。显然,无用功的增加会降低心脏的射血功能,使心肌做功的效率降低,最终导致心力衰竭,甚至死亡。

## 2 PSL 的临床应用新进展

### 2.1 健康人的心肌做功参数

所有疾病的诊断和治疗均建立于正常参考值之上。Manganaro等<sup>[12]</sup>进行的欧洲心血管影像学会(European Association of Cardiovascular Imaging, EACVI)认证的第1个大规模多中心研究,获得了226名健康志愿者的心肌做功正常参考值范围:男性GWI、GCW、GWE的最小值分别为1270 mmHg%、1650 mmHg%、90%,GWW的最大值为238 mmHg%;女性GWI、GCW、GWE的最小值分别为1310 mmHg%、1554 mmHg%、91%,GWW的最大值为239 mmHg%。男性的GWE高于女性,而女性的GWI和GCW随年龄显著增加。Galli等<sup>[13]</sup>对健康人的心肌做功参数的初步研究显示,左室基底段WI、CW和WE均低于心尖段,而基底段WW高于心尖段。林静茹<sup>[14]</sup>等对正常成年人静息及负荷状态下心肌做功分析,发现负荷状态下GWI、GCW、GWW显著大于静息状态,GWE小于静息状态(均 $P<0.05$ ),这一研究对中国成年人的心肌做功正常参考值提供了一定参考价值,但样本量较小,仍需进一步获取多中心研究下健康人的心肌做功参考值。

### 2.2 高血压和糖尿病患者的心肌做功

Chan等<sup>[3]</sup>的一项单中心研究发现,与健康对照者相比,高血压患者的LVEF和GLS并无明显差异,但GWI在中至重度高血压患者(收缩压 $>160$  mmHg)中显著升高( $P=0.004$ ),作为一种代偿机制,以保护左室收缩性和功能,防止后负荷增加。血压升高的早期阶段,一些患者常表现为室间隔基底段肥厚<sup>[15]</sup>。有研究表明,早期肥厚节段的

心肌做功已经受损<sup>[16]</sup>,而此时,LVEF与GLS并没有明显改变。此外,高血压并非心肌受损的唯一因素,Tadic等<sup>[17]</sup>进一步研究糖尿病对高血压患者心肌做功的影响,发现糖尿病患者的心肌做功减低对高血压患者的左室收缩功能有额外的负面影响。王一洒等<sup>[18]</sup>也对2型糖尿病患者的心肌做功进行单独分析,发现即使LVEF在正常范围内,糖尿病患者的GLS、GWI及GCW均低于健康对照者。

综上所述,高血压和糖尿病作为心血管疾病的重要危险因素,心肌做功技术有助于早期发现心肌损伤,及时且准确地预防心血管疾病的发生。其他危险因素如血脂异常及吸烟等对心肌做功的影响也应在之后的研究中继续探索。

### 2.3 冠心病患者的心肌做功

冠心病指冠状动脉发生粥样硬化,使冠状动脉狭窄或闭塞,导致心肌缺血、缺氧或坏死。近年来,冠心病的发生日益增多并趋于年轻化。冠心病的早期诊断及术后评价极其重要。

研究证实,左室PSL可早期定量分析冠心病患者的心肌做功异常,预测冠状动脉狭窄,以及早对冠心病患者进行干预,预防不良心血管事件的发生<sup>[19]</sup>。Edwards等<sup>[20]</sup>对无节段性室壁运动异常且LVEF保留的患者进行心肌做功评价,发现GWI<1810 mmHg%可以有效诊断冠心病(至少1支冠状动脉狭窄 $\geq 70\%$ )(敏感度92%,特异度52%)。同样在一项LVEF保留且无明显节段性室壁运动异常的非ST段抬高型急性冠状动脉综合征(non-ST-segment elevation acute coronary syndrome, NSTEMI-ACS)患者心肌做功的研究中,发现GWE<96%(敏感度74%,特异度81%)可以预测NSTEMI-ACS冠状动脉严重狭窄(冠状动脉直径狭窄 $\geq 70\%$ ),且预测价值优于GLS和GWI<sup>[21]</sup>。急性冠状动脉闭塞(acute coronary artery occlusion, ACO)发生在30%的NSTEMI-ACS患者中。Eke等<sup>[22]</sup>将功能风险区域(functional risk area, FRA)定义为心肌收缩功能不全的节段。Boe等<sup>[23]</sup>对126例NSTEMI-ACS患者建立左室PSL,发现FRA $\geq 4$ 个时的节段心肌做功指数<1700 mmHg%识别ACO优于节段应变和EF(敏感度81%,特异度82%)。早期识别急性ST段抬高型心肌梗死(ST-segment elevation myocardial infarction, STEMI)后左室恢复及急性并发症的发生也具有挑战性和重要性,Meimoun等<sup>[24]</sup>对92例经PCI治疗的前壁STEMI患者在术后24~48h和中位数为92d的随访期进行超声心动图检查,发现有用功是预测节段性和整体性左室恢复的最佳指标,且具有独立相关性。此外,在有住院并发症的患者中,GCW受损更严重。

因此,左室整体及节段心肌做功异常在临床实

践中为冠心病患者的早期诊断、治疗及预后提供了新方向。

### 2.4 心肌病患者的心肌做功

扩张型心肌病(dilated cardiomyopathy, DCM)是指左室或双心室的扩张,并伴有室收缩功能障碍,同时伴或不伴充血性心力衰竭。DCM患者的左室明显扩张,虽LVEF降低,但其心输出量仍在正常范围内。Chan等<sup>[25]</sup>使用左室PSL评价DCM患者左室收缩功能,发现该类患者的GWI、GCW及GWE明显降低,GWW明显升高。Cui等<sup>[26]</sup>同样发现DCM患者左室心肌做功普遍受损,GWI可作为评价治疗效果的指标。此外,Schrub等<sup>[27]</sup>证实,心肌做功是DCM患者运动耐受性的预测指标。对于DCM患者来说,左室非同步性运动与GWW的显著增加、GWE的降低以及心肌做功的不均匀分布密切相关,室间隔的做功效率是该类患者运动能力最好的预测指标。

肥厚型心肌病(hypertrophic cardiomyopathy, HCM)主要表现为室壁心肌的不对称性增厚,是运动性猝死的常见原因之一。张苗等<sup>[28]</sup>证明HCM患者心肌功能受损,GWI、GWE及GCW降低,GWW增加。这与赵庆庆等<sup>[29]</sup>的研究结果基本一致。Galli等<sup>[30]</sup>认为HCM患者的GCW与运动能力有关。研究结果发现,与健康对照组相比,HCM患者GWW和LVEF差异无统计学意义,而非梗阻性HCM的GCW显著降低,说明GCW是左室心肌纤维化唯一的预测因子,GCW以1623 mmHg%为截断值能够很好地预测心肌纤维化(敏感度82%,特异度67%)。左室PSL也可以用来预测HCM患者的预后情况,Hiemstra等<sup>[31]</sup>对110例非梗阻性HCM患者长期随访,发现GCW>1730 mmHg%的HCM患者5年无事件生存率更高。这为及早识别心肌功能受损的HCM患者提供了新方法。

既往研究表明,GLS有助于心肌淀粉样变性(cardiac amyloidosis, CA)患者的诊断和危险分层<sup>[32]</sup>,但受负荷依赖的影响,应变值降低。Clemmensen等<sup>[33]</sup>探讨了CA患者在静息状态和运动状态下的心肌做功,与健康对照者相比,静息状态下CA患者的GWI降低,在运动状态下这种差异更加明显。尽管在运动时CA患者的GWI升高,但GWE降低,说明该类患者利用心肌能量的能力降低。心肌做功参数作为GLS的补充,为临床诊断与决策提供了新的方向和思路。

### 2.5 心脏再同步化治疗患者的心肌做功

心脏再同步化治疗(cardiac resynchronization therapy, CRT)在心力衰竭和宽QRS波综合征患者的管理中起着关键作用。可通过双心室起搏恢复左室心肌的同步化收缩,改善患者的左室收缩功

能。然而,这种治疗被许多无反应者困扰,识别CRT反应者便成为当务之急。

已有研究表明心肌有用功和无用功可以有效预测CRT治疗效果<sup>[33-35]</sup>。GCW>1057 mmHg%和GWW>384 mmHg%(特异度100%,阳性预测值100%)联合诊断可以提高对CRT阳性反应的准确性,尽管敏感度和阴性预测值较低(敏感度22%,阴性预测值41%)<sup>[34]</sup>,左室PSL在对CRT反应者的识别上仍存在重要价值。相反,GCW<1057 mmHg%可以识别出85%的CRT无反应者(阳性预测值88%)<sup>[33]</sup>。

PSL也可以用来早期评价CRT预后,及时有效地预防不良心血管事件的发生。正如Wang等<sup>[36]</sup>证实,在射血分数降低型心力衰竭患者中,心肌做功比LVEF和GLS为CRT术后的全因死亡和心力衰竭住院风险提供了更多预测价值。Hedwig等<sup>[37]</sup>也发现GWI<500 mmHg%与LVEF严重受损、心肌运动能力减低、N末端脑钠肽前体(NT-pro-BNP)升高显著相关,提示心力衰竭患者预后不良。同样,Galli等<sup>[38]</sup>也认为GCW可以有效预测CRT患者心脏预后,为临床降低心源性死亡风险提供早期干预。

由此可见,左室PSL不仅为识别CRT反应者提供了新方法,也可以早期预测CRT患者的不良预后,可以更好地理解心脏收缩不同步的机制,及早发现,合理治疗。

### 3 不足与展望

无创PSL在临床实践上的应用是超声心动图发展的进步,克服了后负荷降低应变的影响,提高了心肌做功对心脏功能和预后评价的应用价值,为预防和治疗心血管疾病提供了更多有价值的影像学资料。虽然无创评价左室压力的可行性已经得到证实,但无创PSL评价心肌做功相对于有创测量而言,其精确性和应用前景还需更多的临床研究进一步探索和验证。尽管PSL仍处于探索阶段,相信随着超声心动图技术的不断完善和成熟,无创PSL评价心肌做功将为左室功能评价提供更详尽的诊断信息。

### 参考文献

- [1] Hubert A, Le Rolle V, Leclercq C, et al. Estimation of myocardial work from pressure-strain loops analysis: an experimental evaluation[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2018, 19(12):1372-1379.
- [2] 王洁, 孙婷婷, 齐丽彤, 等. 左心室整体纵向应变对慢性心力衰竭患者预后的预测价值[J]. *临床心血管病杂志*, 2019, 35(10):912-916.
- [3] Chan J, Edwards NFA, Khandheria BK, et al. A new approach to assess myocardial work by non-invasive left ventricular pressure-strain relations in hypertension and dilated cardiomyopathy[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2019, 20(1):31-39.
- [4] Russell K, Eriksen M, Aaberge L, et al. A novel clinical method for quantification of regional left ventricular pressure-strain loop area: a non-invasive index of myocardial work[J]. *Eur Heart J*, 2012, 33(6):724-733.
- [5] Russell K, Eriksen M, Aaberge L, et al. Assessment of wasted myocardial work: a novel method to quantify energy loss due to uncoordinated left ventricular contractions[J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2013, 305(7):H996-1003.
- [6] Delhaas T, Arts T, Prinzen FW, et al. Regional fibre stress-fibre strain area as an estimate of regional blood flow and oxygen demand in the canine heart[J]. *J Physiol*, 1994, 477(Pt 3):481-496.
- [7] Lang RM, Badano LP, Mor-Avi V, et al. Recommendations for cardiac chamber quantification by echocardiography in adults: an update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2015, 28(1):1-39. e14.
- [8] Suga H, Sagawa K. Instantaneous pressure-volume relationships and their ratio in the excised, supported canine left ventricle[J]. *Circ Res*, 1974, 35(1):117-126.
- [9] Takaoka H, Takeuchi M, Odake M, et al. Assessment of myocardial oxygen consumption (Vo<sub>2</sub>) and systolic pressure-volume area (PVA) in human hearts[J]. *Eur Heart J*, 1992, 13 Suppl E:85-90.
- [10] Konstam MA, Abboud FM. Ejection fraction: misunderstood and overrated (changing the paradigm in categorizing heart failure)[J]. *Circulation*, 2017, 135(8):717-719.
- [11] Chan J, Shiino K, Obonyo NG, et al. Left ventricular global strain analysis by two-dimensional speckle-tracking echocardiography: the learning curve[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2017, 30(11):1081-1090.
- [12] Manganaro R, Marchetta S, Dulgheru R, et al. Echocardiographic reference ranges for normal non-invasive myocardial work indices: results from the EACVI NORRE study[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2019, 20(5):582-590.
- [13] Galli E, John-Matthews B, Rousseau C, et al. Echocardiographic reference ranges for myocardial work in healthy subjects: A preliminary study[J]. *Echocardiography*, 2019, 36(10):1814-1824.
- [14] 林静茹, 刘梦怡, 李晓宁, 等. 正常成年人静息及负荷状态下采用超声心动图无创评估心肌做功参数初步探究[J]. *中国循环杂志*, 2020, 35(12):1216-1222.
- [15] Diaz T, Pencina MJ, Benjamin EJ, et al. Prevalence, clinical correlates, and prognosis of discrete upper septal thickening on echocardiography: the Framingham Heart Study[J]. *Echocardiography*, 2009, 26(3):247-253.

- [16] Loncaric F, Marciniak M, Nunno L, et al. Distribution of myocardial work in arterial hypertension: insights from non-invasive left ventricular pressure-strain relations[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2021, 37(1): 145-154.
- [17] Tadic M, Cuspidi C, Pencic B, et al. Myocardial work in hypertensive patients with and without diabetes: An echocardiographic study[J]. *J Clin Hypertens (Greenwich)*, 2020, 22(11): 2121-2127.
- [18] 王一洒,袁建军,朱好辉,等. 压力-应变环评价 2 型糖尿病患者左心室心肌做功改变[J]. *中国医学影像学杂志*, 2020, 28(12): 934-937.
- [19] 唐莎,李华,牛铭,等. 左室压力-应变环对冠心病患者心肌做功评价的初步研究[J]. *心脏杂志*, 2020, 32(2): 172-175.
- [20] Edwards NFA, Scalia GM, Shiino K, et al. Global myocardial work is superior to global longitudinal strain to predict significant coronary artery disease in patients with normal left ventricular function and wall motion[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2019, 32(8): 947-957.
- [21] 秦芸芸,李一丹,吴小鹏,等. 左心室压力-应变环对非 ST 段抬高型急性冠脉综合征的诊断价值[J]. *中华超声影像学杂志*, 2020, 29(11): 927-933.
- [22] Eek C, Grenne B, Brunvand H, et al. Strain echocardiography predicts acute coronary occlusion in patients with non-ST-segment elevation acute coronary syndrome[J]. *Eur J Echocardiogr*, 2010, 11(6): 501-508.
- [23] Boe E, Russell K, Eek C, et al. Non-invasive myocardial work index identifies acute coronary occlusion in patients with non-ST-segment elevation-acute coronary syndrome[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2015, 16(11): 1247-1255.
- [24] Meimoun P, Abdani S, Stracchi V, et al. Usefulness of noninvasive myocardial work to predict left ventricular recovery and acute complications after acute anterior myocardial infarction treated by percutaneous coronary intervention [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2020, 33(10): 1180-1190.
- [25] Cui C, Liu L, Li Y, et al. Left ventricular pressure-strain loop-based quantitative examination of the global and regional myocardial work of patients with dilated cardiomyopathy[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2020, 46(10): 2834-2845.
- [26] Schrub F, Schnell F, Donal E, et al. Myocardial work is a predictor of exercise tolerance in patients with dilated cardiomyopathy and left ventricular dyssynchrony[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2020, 36(1): 45-53.
- [27] 张苗,袁建军,王一洒,等. 压力-应变环在评价肥厚型心肌病左室心肌做功中的应用[J]. *中华超声影像学杂志*, 2020, 29(7): 576-580.
- [28] 赵庆庆,刘琳,崔存英,等. 左室压力-应变环对非梗阻型肥厚型心肌病患者整体心肌做功的定量研究[J]. *中国超声医学杂志*, 2020, 36(9): 795-798.
- [29] Galli E, Vitel E, Schnell F, et al. Myocardial constructive work is impaired in hypertrophic cardiomyopathy and predicts left ventricular fibrosis[J]. *Echocardiography*, 2019, 36(1): 74-82.
- [30] Hiemstra YL, van der Bijl P, El Mahdiui M, et al. Myocardial work in nonobstructive hypertrophic cardiomyopathy: implications for outcome[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2020, 33(10): 1201-1208.
- [31] Ternacle J, Bodez D, Guellich A, et al. Causes and consequences of longitudinal LV dysfunction assessed by 2D strain echocardiography in cardiac amyloidosis[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2016, 9(2): 126-138.
- [32] Clemmensen TS, Eiskjær H, Mikkelsen F, et al. Left ventricular pressure-strain-derived myocardial work at rest and during exercise in patients with cardiac amyloidosis[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2020, 33(5): 573-582.
- [33] Galli E, Leclercq C, Hubert A, et al. Role of myocardial constructive work in the identification of responders to CRT[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2018, 19(9): 1010-1018.
- [34] Galli E, Leclercq C, Fournet M, et al. Value of myocardial work estimation in the prediction of response to cardiac resynchronization therapy [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2018, 31(2): 220-230.
- [35] Vecera J, Penicka M, Eriksen M, et al. Wasted septal work in left ventricular dyssynchrony: a novel principle to predict response to cardiac resynchronization therapy[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2016, 17(6): 624-632.
- [36] Wang CL, Chan YH, Wu VC, et al. Incremental prognostic value of global myocardial work over ejection fraction and global longitudinal strain in patients with heart failure and reduced ejection fraction [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2021, 22(3): 348-356.
- [37] Hedwig F, Soltani S, Stein J, et al. Global work index correlates with established prognostic parameters of heart failure[J]. *Echocardiography*, 2020, 37(3): 412-420.
- [38] Galli E, Hubert A, Le Rolle V, et al. Myocardial constructive work and cardiac mortality in resynchronization therapy candidates[J]. *Am Heart J*, 2019, 212: 53-63.

(收稿日期:2020-10-23)