

射血分数保留性心力衰竭左心室心肌力学变化及评估的研究进展

卢甜甜 张轶

(湖南师范大学附属第一医院 湖南省人民医院超声科, 湖南 长沙 410011)

【摘要】 射血分数保留性心力衰竭(HFpEF)是一组以心肌顺应性减低、心室主动舒张和被动充盈功能障碍、左心室充盈压增高为特征的临床综合征,约占心力衰竭总数的 50%。近年来 HFpEF 的发病率和病死率逐年上升,其心肌力学的改变和评估是心血管研究热点之一,早期诊断对该病的治疗和预后极为关键。现就 HFpEF 患者心肌力学的改变以及对其心脏功能评估的研究进展做一综述。

【关键词】 射血分数保留性心力衰竭;心肌力学;超声心动图

【DOI】10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2022.04.011

Changes and Evaluation of Left Ventricular Myocardial Mechanical in Heart Failure with Preserved Ejection Fraction

LU Tiantian, ZHANG Yi

(Department of Ultrasound, The People's Hospital of Hunan Province, The First Affiliated Hospital of Hunan Normal University, Changsha 410011, Hunan, China)

【Abstract】 Heart failure with preserved ejection fraction (HFpEF) is a group of clinical syndromes characterized by decreased myocardial compliance, dysfunction of ventricular active diastolic and passive filling, and increased left ventricular filling pressure, accounting for about 50% of the total heart failure. In recent years, the incidence rate and mortality of HFpEF have increased year by year. The changes and evaluation of myocardial mechanics is one of the hot topics in cardiovascular research. Early diagnosis is very critical for the treatment and prognosis of this disease. This article reviews the changes of left ventricular myocardial mechanics and the evaluation of cardiac function in HFpEF patients.

【Key words】 Heart failure with preserved ejection fraction; Myocardial mechanics; Echocardiography

射血分数保留性心力衰竭(heart failure with preserved ejection fraction, HFpEF)是一组以心肌顺应性减低、心室主动舒张和被动充盈功能障碍、左心室充盈压增高为特征的临床综合征^[1]。随着中国人口老龄化加重,与高血压、冠心病及高龄等相关的 HFpEF 发病率逐年升高,早期诊断和对其心功能的评估是目前心血管研究关注的热点之一^[2]。

1 HFpEF 的临床及病理特点

HFpEF 是多种病理生理亚型组成的一种异质性总体,所有可导致左心室舒张功能障碍的因素均可引发该病^[3],好发于老年肥胖者,女性多于男性^[4],与女性对 HFpEF 的血流动力学改变和炎症应激的反应表现更明显相关^[5]。临床症状表现为胸闷、胸痛、呼吸困难,水钠潴留,听诊可闻及肺部湿啰音等^[3]。美国

超声心动图学会和欧洲心脏病学会(European Society of Cardiology, ESC)提出诊断 HFpEF 需符合以下条件:(1)存在充血性心力衰竭(心衰)症状和体征;(2)左心室收缩功能正常或轻度受损(左室射血分数 $\geq 50\%$);(3)具有舒张功能不全的证据;(4)排除瓣膜病、心包疾病及非心脏疾病^[6-7]。

HFpEF 的发病机制目前尚未十分明确,可能与 HFpEF 并发症引起系统性炎症反应和内皮功能障碍、血流动力学变化、心肌异常、心室-血管耦合(ventricular-vascular coupling, VVC)受损等因素相关^[8]。病理生理改变主要为心肌肥厚、心肌纤维化、心肌缺血和心肌浸润性等,这种变化相对独立,而非射血分数降低性心力衰竭(heart failure with reduced preserved ejection fraction, HFrEF)进程的一部分,二者

基金项目:湖南省卫生健康委科研课题(202209023265)

通信作者:张轶, E-mail: drzhangyi@163.com

的左心室重塑存在根本的差异^[9]。由于 HFpEF 发病原因更多样,且症状和体征缺乏特异性,故早期诊断率低,年死亡率为 10%~30%,其预后同 HFrEF 一样不容乐观,甚至发生猝死的风险更大^[10]。

2 HFpEF 的心肌力学改变

2.1 HFpEF 并发症引起系统性炎症反应和内皮功能障碍

HFpEF 常并发于高血压、糖尿病、心房颤动和肾功能不全,这些疾病可引起系统性炎症反应和内皮功能障碍,使心肌细胞肥大僵硬、微血管闭塞,胶原纤维及基质堆积,导致心脏病理性重构、心室顺应性降低和心肌细胞结构改变,诱发心室舒张功能障碍^[11]。心脏炎症反应通过细胞外基质影响 HFpEF 患者的舒张功能,也可引起细胞内皮功能异常。有研究表明内皮功能障碍已被确认为是 HFpEF 患者未来心血管事件的独立预测因子之一^[12]。心室病理性重塑包括心室形状的改变和心肌功能的改变,HFpEF 的重塑呈向心性肥大,这与 HFrEF 呈离心性肥大的几何改变不一;HFpEF 患者心肌的结构、功能和心肌细胞内信号传导发生特异性改变,导致左心室重塑的同时伴有舒张能力的下降^[13]。

2.2 钙超载导致心肌僵硬增加

心肌细胞内钙循环的异常与 HFpEF 的发生有密切关系,钙超载可导致左心室主动松弛受损和心肌僵硬增加。心肌细胞肌质网钙回摄的两个关键因素是肌质网钙离子 ATP 酶 2a 和受磷蛋白(phospholamban, PLB)。正常情况下心肌细胞肌质网钙离子 ATP 酶 2a 将心肌细胞胞浆内的 Ca^{2+} 重新摄回肌质网内,以保证下一次兴奋-收缩耦联时肌质网内 Ca^{2+} 量^[14-15]。PLB 是一个位于肌质网上的小分子跨膜磷蛋白,通过控制 Ca^{2+} 从胞浆摄入肌质网来维持心肌细胞胞浆内 Ca^{2+} 浓度的动态平衡。HFpEF 患者 PLB 去磷酸化增强,导致磷酸化的 PLB 表达水平降低,肌质网钙回摄减少,心肌收缩力减弱,从而导致左心室等容舒张期延长、充盈缓慢、射血阻力增加和左心室舒张末压(left ventricular end-diastolic pressure, LVEDP)增高^[16]。

2.3 VVC 受损

VVC 受损是 HFpEF 发病的独特机制之一。VVC 是心血管功能的基本标志,指伴随着心输出量的变化,为避免血压的广泛波动导致血管和终末器官损害而产生的一种左心室和动脉系统之间的相互作用的顺应性关系^[17]。高龄、肥胖、糖代谢异常和脏器衰竭等因素均会导致血管耦合受损。HFpEF 患者的心脏射血时,主动脉阻力增加,使心脏的收缩过程较正常

健康状态者的僵硬程度增加、收缩储备功能下降。此外, HFpEF 的心室顺应性下降可引起心室充盈受损,使 LVEDP 增高,导致肺淤血和每搏输出量减少,使得 HFpEF 病程进一步恶化^[18]。

3 HFpEF 的心功能评估

HFpEF 的准确诊断主要根据患者临床表现(心衰症状和体征)和影像学检查(无创性检查主要为超声心动图评估)进行综合判断。实验室检测脑钠肽(brain natriuretic peptide, BNP)或 N 末端脑钠肽前体(N-terminal pro-brain natriuretic peptide, NT-proBNP)及有创性介入检查也为诊断 HFpEF 提供支撑,尽管有创性评价指标——心导管测量 LVEDP 被作为“金标准”,但因其有创伤性、操作复杂及价格不菲,在临床工作中难以普遍展开^[19]。ESC 专家共识建议的诊断方法包括运用超声心动图评价心脏舒张功能障碍以及测定血浆 BNP 浓度^[20]。

3.1 超声心动图指标

超声心动图因无创、便捷、准确和可重复性好等优势,成为心脏舒张功能的非侵入性评估和定量分析的主要方法。

3.1.1 结构性指标

结构性指标包括左心房容积指数(left atrial volume index, LAVI)、左心室质量指数(left ventricular mass index, LVMI)、左心室壁相对厚度(relative wall thickness, RWT)等。

LAVI 是用体表面积校正后的左心房容积,消除了身高、体重等方面的差异,能较准确地反映左心室舒张功能不全程度。HFpEF 患者左心室僵硬程度增高和顺应性的下降导致 LVEDP 上升,压力随舒张期二尖瓣的开放由心室向心房传递,使左心房增大及主动收缩射血的能力下降,进一步造成左心房压力增加、容积增大的恶性循环^[21]。LAVI 在窦性心律与心房颤动患者中区别较大,永久性心房颤动患者即使未出现左心室舒张功能障碍, LAVI 测值也较大。此外,二尖瓣本身的病变对心房与心室血流动力学、压力变化会产生影响,此时 LAVI 不能完全反映左心房、左心室的心肌力学变化。因此,患者有无心房颤动或瓣膜病变,诊断参考值并不一致。在无房颤或心脏瓣膜疾病的患者中, LAVI $> 34 \text{ mL/m}^2$ 可独立预测死亡、心衰和缺血性卒中^[22-23]。

LVMI 是左心室重塑的主要表现形式、独立影响因素之一,也是可靠的反映指标,可用于评价左心室肥厚的严重程度。LVMI 升高是心脏功能状况和死亡的独立预测因素。超声心动图分别测量左心室舒张末内径(left ventricular end-diastolic internal diameter,

LVEDD)、舒张末期左心室后壁厚度(left ventricular wall thickness at end-diastole, LVPWd)和舒张末期室间隔厚度(interventricular septum thickness at end-diastole, IVSd), LVMI 可通过左心室质量(left ventricular mass, LVM)/体表面积计算,其中 $LVM = 0.8 \times 1.04 \times [(LVEDD + IVSd + LVPWd)^3 - LVEDD^3] + 0.6$, 体表面积 = 身高^{0.725} × 体重^{0.425} × 0.007 184^[24]。LVMI 可真实地反映心室重塑患者的左心室容积以及质量,但需注意的是,超声心动图上未显示左心室壁厚并不能排除 HFpEF 诊断。

RWT 通过左心室壁厚度与心腔内径的比值反映左心室重塑的特点,通常与 LVMI 一起描述左心室的几何形状。 $RWT = (IVSd + LVPWd)/LVEDD$ 。当 LVMI 正常时, $RWT \leq 0.42$ 属于正常范围, $RWT > 0.42$ 为向心性重构;当 LVMI 升高时, $RWT > 0.42$ 为向心性肥大, $RWT \leq 0.42$ 为离心性肥大^[25]。HFpEF 患者左心室多以向心性重构和向心性肥大表现为主。

3.1.2 功能性指标

功能性指标包括二尖瓣口舒张早期与晚期峰值血流速度之比(E/A)、二尖瓣口舒张早期血流峰值与组织多普勒二尖瓣环舒张早期峰值速度之比(E/e')、三尖瓣反流速度(tricuspid regurgitation velocity, TRV)、左心室整体长轴收缩应变(global longitudinal strain, GLS)和左心室短轴扭转功能等。

E/A 常用于反映左心室舒张功能受损的程度^[26],当左心室舒张功能早期受损时,左心室充盈能力下降表现为 E 峰值降低,但此时心房的代偿机制使舒张晚期 A 峰不减反增,此时可出现 $E/A < 1$;而当左心室舒张功能进一步降低时,左心房压力增高使舒张早期房室间压力阶差增大,可使 $E/A > 1$ 甚至 > 2 ,呈“假性正常化”。因此单凭 E/A 比值难以判别是否存在左心室舒张功能的异常或“假性正常化”。此外,E/A 的测量易受心率、心肌舒缩状态和瓣膜反流等因素的影响,需结合其他指标才能做出准确判别。

E/e' 不受心脏前后负荷、心率及其他血流动力学变化的影响,是目前超声心动图对左心室舒张功能不全具有价值的评估指标之一^[27]。E/e' 通过反映二尖瓣环运动的变化对左心室舒张功能进行评估,主要反映左心室心肌纤维长轴方位的变化,与 LVEDP 具有较强的关联性。但 E/e' 并不适用于所有心脏病患者的舒张功能评估,如二尖瓣严重病变以及限制型心肌病^[28]。

TRV 可反映肺动脉的压力情况,而肺动脉压力升高和右心功能降低是 HFpEF 死亡率的重要预测指标^[29]。临床多以肺动脉收缩压作为肺动脉高压筛查

的主要手段,肺动脉收缩压 = $4 \times$ 三尖瓣反流峰值速度² + 右心房压。目前,指南更推荐使用 TRV 作为超声心动图评价肺动脉高压的主要指标,而非肺动脉收缩压^[30],可降低估算法存在的假阳性率的发生概率。

最新的指南建议将斑点追踪技术测量的 GLS 纳入 HFpEF 评估指标中,GLS 受损对预测 HFpEF 患者因心衰再住院、心血管死亡或心搏骤停等事件具有重要意义^[31]。GLS 降低代表的亚临床功能障碍和细胞外体积增加所预示的结构改变是临床心衰发展的前兆^[7]。在 HFpEF 中,GLS 受损对预测心衰再住院、心血管死亡或心搏骤停等事件具有重要意义^[17]。

左心室短轴扭转运动是心尖相对心底沿左心室短轴所做的拧转样运动,包括收缩期的旋转和舒张期的解旋,占左心室做功的 70% 以上,能敏感、准确地反映心肌功能的变化^[32]。使用斑点追踪技术评估左心室扭转功能的研究^[33]显示 HFpEF 患者舒张期左心室解旋参数降低,表现为舒张期解旋速度下降和时间延后(即应在等容舒张期完成的解旋百分比下降),这可能是由于 HFpEF 患者左心室心肌细胞 Ca^{2+} 转运异常、心肌细胞舒张期恢复原有长度的能力下降所致。

3.2 实验室指标

实验室主要指标是 NT-proBNP,用于 HFpEF 的筛查、诊断、疗效评估和预后判断评估。NT-proBNP 是 BNP 的氨基端残端,主要由左心室分泌,比 BNP 半衰期更长、稳定性更强。血浆 NT-proBNP 浓度与舒张末期心室壁张力和左心室舒张充盈压呈正相关,浓度升高提示心脏血流动力学紊乱,可作为左心室舒张功能评估的敏感指标,且有研究^[34]表明其对心衰药物治疗调整有指导作用。目前 NT-proBNP 是诊断 HFpEF 最为重要的生化检测指标,能敏感反映左心室松弛能力轻微受损、僵硬及左心室重塑等早期病理生理学改变,且其浓度变化与 HFpEF 严重程度呈正相关。2021 年 ESC 关于急性和慢性心力衰竭的诊断和治疗指南指出^[6]:血清学(NT-proBNP)异常与左心室舒张功能障碍/左心室充盈压力升高相一致,诊断阈值为 NT-proBNP > 125 pg/mL(窦性心律)或 > 365 pg/mL(心房颤动)/BNP > 35 pg/mL(窦性心律)或 > 105 pg/mL(心房颤动),然而 20% 的患者经侵入性检查证实测量结果低于该值,尤其在肥胖情况下。NT-proBNP 受很多因素及疾病的影响,包括年龄、性别、肺部疾病、肾功能不全和肝硬化等,因此特异性并不高。国外有研究^[35]显示当 NT-proBNP 的临界值取 90 pg/mL 时,对 HFpEF 具有较高的阴性预测值(92.7%)。

4 HFpEF 的评估流程

2019 年欧洲心力衰竭协会/欧洲心脏病学会射血

分数保留性心力衰竭诊断共识(HFA-PEFF)更新为以下四个评估流程步骤^[1]。

4.1 初始评估

对可疑患者进行初步筛查,包括症状、体征、心电图、一般实验室指标及基本超声心动图检查等。

4.2 HFA-PEFF 评分

通过超声心动图扫描和评估心脏结构和功能指标的变化及 NT-proBNP 水平,进行系统全面的评分。超声心动图的具体测量指标包括 E/e'、TRV、GLS、LAVI、LVMI 和 RWT 等。通过系统的评分和加权,得到患者的 HFA-PEFF 分数。HFA-PEFF 评分 ≥ 5 分则可诊断为 HFpEF;HFA-PEFF 评分 ≤ 1 分,HFpEF 可能性极低,需考虑其他致呼吸困难的心脏或非心脏原因;HFA-PEFF 评分 2~4 分,则需进一步进行舒张负荷试验或有创血流动力学检查进一步评估。

4.3 功能性测定

针对 HFA-PEFF 评分为 2~4 分的患者,可先行静息有创血流动力学检查或运动压力超声心动图进行进一步确诊。若静息有创检查得到休息时左心室充盈压较高,LVEDP ≥ 16 mm Hg(1 mm Hg=0.133 3 kPa),肺毛细血管楔压 ≥ 15 mm Hg,可确诊 HFpEF,但 LVEDP 和肺毛细血管楔压测定在正常范围者并不能完全排除 HFpEF,此时可进行无创运动压力超声心动图检查或进一步有创血流动力学评估。

4.4 病因学诊断

影像学检查,如心脏磁共振、核素显像/计算机断层扫描/正电子发射计算机断层显像;实验室检查,如心肌活检、(99m)Tc-DPD 闪烁显像、基因测定以及其他特殊检查等,以明确 HFpEF 是否与一些特殊病因相关。

5 总结与展望

HFpEF 是一个全球性的重大公共卫生问题,其准确诊断和心脏功能评估仍存在挑战和争论,需建立在超声心动图及临床综合分析的基础上。国内外各种指南的相继发表推动临床对 HFpEF 的诊断和治疗不断向前发展,随着人工智能和三维定量超声心动图技术的完善,三维全自动左心容积定量技术(Heart-Model)也逐渐应用于临床心功能评估,左心房与左心室的三维立体空间的容积和功能的评估也许能更加全面、立体、准确地评价 HFpEF 的心肌力学改变,加之临床指标的不断更新和评估手段的不断增多,将在今后进一步推动 HFpEF 快速和精准的诊疗。

参考文献

[1] Huis In't Veld AE, de Man FS, van Rossum AC, et al. How to diagnose heart

- failure with preserved ejection fraction; the value of invasive stress testing[J]. *Neth Heart J*, 2016, 24(4): 244-251.
- [2] Lam CSP, Arnott C, Beale AL, et al. Sex differences in heart failure[J]. *Eur Heart J*, 2019, 40(47): 3859-3868c.
- [3] Morishita T, Takeishi N, Li S, et al. Effects of left ventricular hypertrophy and myocardial stiffness on myocardial strain under preserved ejection fraction[J]. *Ann Biomed Eng*, 2021, 49(7): 1670-1687.
- [4] Ponikowski P, Voors AA, Anker SD, et al. 2016 ESC Guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure: The Task Force for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure of the European Society of Cardiology (ESC). Developed with the special contribution of the Heart Failure Association (HFA) of the ESC[J]. *Eur J Heart Fail*, 2016, 18(8): 891-975.
- [5] Sun J, Tai S, Guo Y, et al. Sex differences in characteristics and outcomes in elderly heart failure patients with preserved ejection fraction: a Post-hoc analysis from TOPCAT[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2021, 8: 721850.
- [6] McDonagh TA, Metra M, Adamo M, et al. 2021 ESC Guidelines for the diagnosis and treatment of acute and chronic heart failure[J]. *Eur Heart J*, 2021, 42(36): 3599-3726.
- [7] Nagueh SF, Smiseth OA, Appleton CP, et al. Recommendations for the evaluation of left ventricular diastolic function by echocardiography: an update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2016, 17: 1321-1360.
- [8] van Heerebeek L, Paulus WJ. Understanding heart failure with preserved ejection fraction: where are we today[J]. *Neth Heart J*, 2016, 24(4): 227-236.
- [9] Pieske B, Tschöpe C, de Boer RA, et al. How to diagnose heart failure with preserved ejection fraction: the HFA-PEFF diagnostic algorithm: a consensus recommendation from the Heart Failure Association (HFA) of the European Society of Cardiology (ESC)[J]. *Eur Heart J*, 2020, 22(3): 391-412.
- [10] van Riet EE, Hoes AW, Wagenaar KP, et al. Epidemiology of heart failure: the prevalence of heart failure and ventricular dysfunction in older adults over time. A systematic review[J]. *Eur J Heart Fail*, 2016, 18(3): 242-252.
- [11] Heinzel FR, Hohendanner F, Jin G, et al. Myocardial hypertrophy and its role in heart failure with preserved ejection fraction[J]. *Appl Physiol*, 2015, 119(10): 1233-1242.
- [12] 周福亮, 贾大林. 射血分数保留性心力衰竭与内皮功能障碍[J]. *中国老年学杂志*, 2018, 38(19): 4852-4855.
- [13] González-López E, Gallego-Delgado M, Guzzo-Merello G, et al. Wild-type transthyretin amyloidosis as a cause of heart failure with preserved ejection fraction[J]. *Eur Heart J*, 2015, 36(38): 2585-2594.
- [14] Frisk M, Le C, Shen X, et al. Etiology-dependent impairment of diastolic cardiomyocyte calcium homeostasis in heart failure with preserved ejection fraction[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2021, 77(4): 405-419.
- [15] Mishra S, Kass DA. Cellular and molecular pathobiology of heart failure with preserved ejection fraction[J]. *Nat Rev Cardiol*, 2021, 18(6): 400-423.
- [16] Shi H, Han Q, Xu J, et al. Urotensin II induction of neonatal cardiomyocyte hypertrophy involves the CaMK II/PLN/SERCA 2a signaling pathway[J]. *Gene*, 2016, 583(1): 8-14.
- [17] Baral R, Loudon B, Frenneaux MP, et al. Ventricular-vascular coupling in heart failure with preserved ejection fraction: a systematic review and meta-analysis[J]. *Heart Lung*, 2021, 50(1): 121-128.
- [18] Shah AM, Claggett B, Sweitzer NK, et al. Prognostic importance of impaired systolic function in heart failure with preserved ejection fraction and the impact of spironolactone[J]. *Circulation*, 2015, 132(5): 402-414.
- [19] Miljkovic LV, Spiroska V. Heart failure with preserved ejection fraction—Concept, pathophysiology, diagnosis and challenges for treatment[J]. *Open Access Maced J Med Sci*, 2015, 3(3): 521-527.

(下转第 340 页)

- myocardial infarction on nonenhanced cardiac cine MRI[J]. *Radiology*, 2019, 291(3):606-617.
- [30] Shibutani T, Nakajima K, Wakabayashi H, et al. Accuracy of an artificial neural network for detecting a regional abnormality in myocardial perfusion SPECT[J]. *Ann Nucl Med*, 2019, 33(2):86-92.
- [31] Kaplan Berkaya S, Ak Sivriköz I, Gunal S. Classification models for SPECT myocardial perfusion imaging[J]. *Comput Biol Med*, 2020, 123:103893.
- [32] Betancur J, Commandeur F, Motlagh M, et al. Deep learning for prediction of obstructive disease from fast myocardial perfusion SPECT: a multicenter study[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2018, 11(11):1654-1663.
- [33] Betancur J, Hu LH, Commandeur F, et al. Deep learning analysis of upright-supine high-efficiency SPECT myocardial perfusion imaging for prediction of obstructive coronary artery disease: a multicenter study[J]. *J Nucl Med*, 2019, 60(5):664-670.
- [34] Otaki Y, Singh A, Kavanagh P, et al. Clinical deployment of explainable artificial intelligence of SPECT for diagnosis of coronary artery disease[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2021, S1936-878X(21)00438-1.
- [35] Liu H, Wu J, Miller EJ, et al. Diagnostic accuracy of stress-only myocardial perfusion SPECT improved by deep learning[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2021, 48(9):2793-2800.
- [36] Gessert N, Lutz M, Heyder M, et al. Automatic plaque detection in IVOCT pullbacks using convolutional neural networks[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2019, 38(2):426-434.
- [37] Gharaibeh Y, Prabhu DS, Kolluru C, et al. Coronary calcification segmentation in intravascular OCT images using deep learning: application to calcification scoring[J]. *J Med Imaging (Bellingham)*, 2019, 6(4):045002.
- [38] Liu X, Du J, Yang J, et al. Coronary artery fibrous plaque detection based on multi-scale convolutional neural networks[J]. *J Sign Process Syst*, 2020, 92(3):325-333.
- [39] Kusunose K, Abe T, Haga A, et al. A deep learning approach for assessment of regional wall motion abnormality from echocardiographic images[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2020, 13(2 Pt 1):374-381.
- [40] Ouyang D, He B, Ghorbani A, et al. Video-based AI for beat-to-beat assessment of cardiac function[J]. *Nature*, 2020, 580(7802):252-256.
- [41] Huang MS, Wang CS, Chiang JH, et al. Automated recognition of regional wall motion abnormalities through deep neural network interpretation of transthoracic echocardiography[J]. *Circulation*, 2020, 142(16):1510-1520.

收稿日期:2021-07-15

(上接第 334 页)

- [20] Yancy CW, Jessup M, Bozkurt B, et al. 2013 ACCF/AHA guideline for the management of heart failure: a report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2013, 62(16):e147-e239.
- [21] Ye Z, Miranda WR, Yeung DF, et al. Left atrial strain in evaluation of heart failure with preserved ejection fraction[J]. *Am Soc Echocardiogr*, 2020, 33(12):1490-1499.
- [22] Melenovsky V, Hwang SJ, Redfield MM, et al. Left atrial remodeling and function in advanced heart failure with preserved or reduced ejection fraction[J]. *Circ Heart Fail*, 2015, 8(2):295-303.
- [23] Almeida P, Rodrigues J, Lourenço P, et al. Left atrial volume index is critical for the diagnosis of heart failure with preserved ejection fraction[J]. *J Cardiovasc Med (Hagerstown)*, 2018, 19(6):304-309.
- [24] 李娟, 张勇, 王健. 肥胖和阻塞性睡眠呼吸暂停综合征对左室质量及左室几何构型的影响[J]. *中西医结合心脑血管病杂志*, 2021, 19(1):133-138.
- [25] D'Andrea A, Radmilovic J, Ballo P, et al. Left ventricular hypertrophy or storage disease? the incremental value of speckle tracking strain bull's-eye[J]. *Echocardiography*, 2017, 34(5):746-759.
- [26] Ran H, Schneider M, Pistrutto AM, et al. Echocardiographic evaluation of left ventricular filling pressures in patients with pulmonary hypertension[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2019, 35(5):861-868.
- [27] Narang A, Mor-Avi V, Prado A, et al. Machine learning based automated dynamic quantification of left heart chamber volumes[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2019, 20(5):541-549.
- [28] Sharifov OF, Schiros CG, Aban I, et al. Diagnostic accuracy of tissue Doppler index E/e' for evaluating left ventricular filling pressure and diastolic dysfunction/heart failure with preserved ejection fraction: a systematic review and meta-analysis[J]. *Am Heart Assoc*, 2016, 5(1):e002530.
- [29] Koestenberger M, Friedberg MK, Nestaas E, et al. Transthoracic echocardiography in the evaluation of pediatric pulmonary hypertension and ventricular dysfunction[J]. *Pulm Circ*, 2016, 6(1):15-29.
- [30] 孙丹丹, 侯颖, 侯传举, 等. 应用三尖瓣血流速度图评估肺动脉高压的研究[J]. *中国医学影像学杂志*, 2017, 25(1):13-16.
- [31] Dzioeva O, Belyavskiy E. Diagnosis and management of patients with heart failure with preserved ejection fraction (HFpEF): current perspectives and recommendations[J]. *Ther Clin Risk Manag*, 2020, 16:769-785.
- [32] Notomi Y, Isomura T, Kanai S, et al. Pre-operative left ventricular torsion, QRS width/CRT, and post-mitral surgery outcomes in patients with nonischemic, chronic, severe secondary mitral regurgitation[J]. *JACC Basic Transl Sci*, 2016, 1(4):193-202.
- [33] Zhang Y, Li SY, Xie JJ, et al. Twist/untwist parameters are promising evaluators of myocardial mechanic changes in heart failure patients with preserved ejection fraction[J]. *Clin Cardiol*, 2020, 43(6):587-593.
- [34] Sakane K, Kanzaki Y, Tsuda K, et al. Disproportionately low BNP levels in patients of acute heart failure with preserved vs reduced ejection fraction[J]. *Int J Cardiol*, 2021, 327(5):105-110.
- [35] Carubelli V, Lombardi C, Lazzarini V, et al. N-terminal pro-B-type natriuretic peptide-guided therapy in patients hospitalized for acute heart failure[J]. *J Cardiovasc Med (Hagerstown)*, 2016, 17(11):828-839.

收稿日期:2021-09-02