

超声无创评价肺动脉高压患者右心室功能的研究新进展

汪瑶 张平洋

(南京医科大学附属南京医院 南京市第一医院心血管超声科, 江苏 南京 210006)

【摘要】 肺动脉高压(PH)是一种涉及多种临床症状,并可能与多种心血管和呼吸系统疾病相关的病理生理综合征。PH患者多因右心衰竭而死亡,因此准确地评估PH患者的右心室功能可为临床患者提供病情严重程度、对治疗的反应性以及预后等有效信息。超声心动图是临床最常用的检查方法,可评价PH患者右心室收缩功能和估计肺动脉压。随着新技术的发展,评价右心室功能的新思路和新指标的出现成为必然,现对超声无创评价PH患者右心室收缩功能的研究新进展进行综述。

【关键词】 肺动脉高压;右心室功能;超声心动图

【DOI】10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2024.07.004

Ultrasound Noninvasive Evaluation of Right Ventricular Function in Patients with Pulmonary Hypertension

WANG Yao, ZHANG Pingyang

(Department of Cardiovascular Ultrasound, Nanjing First Hospital, Nanjing Medical University, Nanjing 210006, Jiangsu, China)

【Abstract】 Pulmonary hypertension(PH) is a pathophysiological syndrome that involves a variety of clinical symptoms and may be associated with a variety of cardiovascular and respiratory diseases. Patients with PH most often die of right heart failure, so accurate evaluation of right ventricular function in patients with PH can provide effective clinical information about the severity of the condition, responsiveness to treatment, and prognosis. Echocardiography is the most commonly used clinical examination method to evaluate right ventricular systolic function and estimate pulmonary artery pressure in patients with PH. With the development of new technologies, the emergence of new ideas and indicators for evaluating right ventricular function has become inevitable. New progress in the study of ultrasound noninvasive evaluation of right ventricular systolic function in patients with PH is reviewed in this article.

【Keywords】 Pulmonary hypertension; Right ventricular function; Echocardiography

根据 2022 年的肺动脉高压(pulmonary hypertension, PH)诊断和治疗指南^[1],对 PH 的定义为通过右心导管检查显示肺动脉平均压 > 20 mm Hg (1 mm Hg = $0.133\ 3$ kPa)。PH 临床分类分为 5 类,即动脉性肺动脉高压(pulmonary arterial hypertension, PAH)、左心疾病相关性 PH、肺部疾病和/或低氧相关性 PH、肺动脉阻塞相关性 PH 及不明原因和/或多因素相关性 PH^[1]。

毫无疑问,超声心动图是临床上评价肺循环血流动力学参数(肺动脉压)最便捷且广为运用的无创手段。已有研究表明 PH 患者病情的严重程度、对治疗的反应性及预后不仅与肺循环阻力密切相关^[2],而且与基于肺动脉后负荷增加的右心室(right ventricle, RV)收缩功能状态高度关联^[3]。因此,准确评价 PH

患者的 RV 收缩功能具有极其重要的意义。传统视角下,超声对 PH 患者 RV 收缩功能评价往往集中在 RV 心肌收缩能力上。近年来,人们意识到将 RV 心肌收缩能力与肺动脉压相结合,综合对 RV 收缩功能进行整体评价是更全面真实的。现对超声无创评价 PH 患者 RV 收缩功能的研究新进展进行综述。

1 RV 心肌收缩能力

1.1 三尖瓣环收缩期位移

三尖瓣环收缩期位移(tricuspid annular plane systolic excursion, TAPSE) < 18 mm 与 PAH 患者的不良预后和较高的死亡率相关,在随访中 TAPSE ≥ 20 mm 是 PAH 患者的预后标志物和治疗目标^[4]。TAPSE 测量操作简单,可重复性高。然而, TAPSE 具有角度依赖性,且可能具有负荷依赖性^[5],即该值受

基金项目:江苏省卫生健康委科学卫生立项项目(ZD2021048)

通信作者:张平洋, E-mail: zhy28@126.com

RV 前、后负荷影响会产生变化。

1.2 组织多普勒三尖瓣环收缩期速度

组织多普勒三尖瓣环收缩期速度 (S') < 10 cm/s 表明 RV 收缩功能减低, PH 患者的 S' 值显著降低。该指标的局限性与 TAPSE 类似, 临床上不应单独用于评估 RV 功能。

1.3 RV 面积变化分数

RV 面积变化分数 (fractional area change, FAC) 正常值应 $> 35\%$, 较低值提示 RV 收缩功能障碍。FAC 也存在局限性: 一是负荷依赖性, 二是要保证心内膜描记的准确性, 对操作者及图像质量要求较高。

1.4 RV 心肌做功指数

RV 心肌做功指数 (myocardial performance index, MPI) 即 Tei 指数。最常使用的方法是多普勒组织成像, 该方法测出的 MPI 值应 < 0.54 。Tei 指数对预测 PAH 的疾病严重程度和确定患者血流动力学变化具有重要的临床意义^[6]。该参数的局限性是无法区分收缩和舒张功能障碍, 且可重复性较差。

1.5 右室射血分数

由于 RV 复杂的空间结构, 二维技术测量右室射血分数 (right ventricular ejection fraction, RVEF) 在日常实践中并不适用。最新的建议^[7]是使用三维技术评估 RVEF。三维技术所测 RVEF $< 45\%$ 提示 RV 收缩功能障碍。研究^[8]证明 RVEF 与不良心血管疾病预后显著相关, 因此在临床实践中使用三维技术测得的 RVEF 值可预测 PAH 患者预后。三维技术评估 RVEF 比标准的二维评估可能会获得更好的评估结果, 但报道^[9]显示存在容积和射血分数低估的问题。

1.6 应变

心肌收缩能力的视觉评估是主观的, 而新技术的发展为更客观地评估 RV 收缩功能提供了可能。应变是指在收缩期某一节段发生心肌变形的大小。目前使用较多的方法是二维斑点追踪成像 (two-dimensional speckle tracking imaging, 2D-STI) 技术。Li 等^[10]研究证实二维及三维应变与心脏磁共振具有良好的相关性, 并发现 PAH 患者的应变值均下降, 且其能预测药物治疗后的临床改善情况。Wang 等^[11]在一项回顾性研究中, 对 74 例 PH 患者进行 2D-STI 分析, 发现右心室游离壁纵向应变 (right ventricular free wall longitudinal strain, RVFWLS) 可用于早期检测 RV 收缩功能的变化, 其灵敏度高于 TAPSE、 S' 和 FAC。相似的是, Liu 等^[12]研究表明 RV 纵向应变是评估 PH 患儿 RV 功能的可靠指标。Badagliacca 等^[13]应用 2D-STI 检测 108 例特发性 PH 患者的 RV 收缩后应变, 结果表明可识别 3 种表型不同、可重复、有临床意义的

RV 应变衍生的收缩后模式。各模式通过应变衍生曲线即应变-时间曲线区分, 模式 1 对应曲线于收缩期应变峰值后迅速向基线正向移动, 随后到舒张末期几乎是直线; 模式 2 对应曲线于收缩期应变峰值后到舒张早期以稳定负值下降, 随后到舒张末期向基线正向移动; 模式 3 对应曲线于收缩应变峰值后向基线正向缓慢而稳定地渐进移动。每种模式与不同的临床表现、血流动力学状态和 RV 对后负荷增加的适应性相关, 并具有独立的预后相关性。其中模式 1 与轻~中度 PH、低右心房压力和心脏指数保留有关。多数患者属于世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) II 级, 运动受限程度较轻, 最可能出现轻度 RV 扩张和左心室受压; 模式 2 与重度 PH 有关, 右心房压力和心脏指数保持不变。其中半数患者属于 WHO III 级, 运动受限程度较明显, RV 扩张明显且左心室受压增加; 模式 3 最为严重, 患者 WHO 分级高、运动能力极差, RV 重塑明显, RV 严重扩张, 伴有明显左心室受压, 其中有高比例患者出现中~重度三尖瓣反流和心包积液。以上体现出 2D-STI 所得到参数对 PH 患者的 RV 收缩功能评估准确性及灵敏度高, 并且在提示患者临床预后方面具有重要价值。

三维斑点追踪成像技术是基于三维超声技术及 2D-STI 发展起来的更新和更精确的技术。Jones 等^[14]的一项研究共纳入 47 例先天性心脏病相关性 PH 患儿、45 例特发性 PH 患儿和 48 例对照组, 应用三维斑点追踪成像技术分析发现, RV 心尖段面积应变值变化有助于了解 PH 患儿 RV 功能障碍的机制。RV 基底部心肌壁光滑, 而 RV 心尖部心肌壁较薄且肌小梁化更明显, 随着高后负荷造成的室壁应力增加, 心尖成为被动结构, 影响最大, 其收缩功能最先下降且衰竭程度比基底部更严重, 其应变值变化可为阐述障碍机制提供支持。Moceri 等^[15]研究发现 RV 整体面积应变在 6 个月内增加 3.5% 的患者, 其死亡或移植风险增加 3.7 倍。RV 整体面积应变、WHO 心功能分级及脑钠肽 3 个参数的组合对于识别高风险患者有重要意义。尽管该技术正在深入开发中, 但目前研究可证明该方法能帮助了解功能障碍机制, 并且在评估预后方面具有很高的效力^[10]。

虽然 RV 纵向应变等先进参数被证明具有较高的准确性, 但受软件及图像限制, 在临床上常规应用仍充满挑战^[16]。

2 综合评价

2.1 RV 心肌做功

近年来, Russell 等^[17]提出一种通过无创心室压力-应变环 (pressure-strain loop, PSL) 量化心肌做功来

评估心室收缩功能的新型非侵入性方法。该方法将估测的心室压力曲线与斑点追踪成像技术获得的应变数据相结合,其摆脱了应变存在负荷依赖性的限制,同时可反映心肌代谢的状态,相比传统超声心动图及斑点追踪成像技术,能更好地反映心室功能。然而以往该研究主要针对的是左心室功能的评估。而最新评估 RV 的方法是通过聚焦 RV 的心尖四腔视图来评估 RV 整体纵向应变(包括 RV 游离壁和室间隔),并测量肺动脉收缩压(pulmonary artery systolic pressure, PASP)和肺动脉舒张压,然后通过心动周期计时(由肺动脉瓣和三尖瓣事件确定)同步,以产生 RV 的无创 PSL,从而得到 RV 心肌做功相关参数,已有研究^[18]表明该方法的可行性和准确性。

Wu 等^[19-20]对健康人的研究表明 RV 心肌做功指标与 RV 心肌收缩功能具有良好的相关性,多变量分析显示,右心室整体做功指数(right ventricular global work index, RVGWI)、右心室整体有用功(right ventricular global constructive work, RVGCW)和右心室整体无用功(right ventricular global wasted work, RVGWW)随着 PASP 的升高而增加。Wang 等^[21]通过无创 PSL 获得 RV 的心肌做功参数,探讨该参数对 PH 患者心脏功能及临床预后的评估价值。其前瞻性纳入 52 例 PH 患者[PASP 值为(74.0 ± 27.4) mm Hg]和 27 例健康对照者[PASP 值为(25.2 ± 2.6) mm Hg],分析显示 PH 病例组 RVGWI、RVGCW 和 RVGWW 均显著高于对照组[RVGWI(mm Hg %):571.5(373.5 ~ 796.0) vs 352.0(314.0 ~ 412.0);RVGCW(mm Hg %):793.5(624.5 ~ 1173.0) vs 474.0(435.0 ~ 526.0);RVGWW(mm Hg %):151.5(60.5 ~ 223.0) vs 38.0(23.0 ~ 57.0)],右心室整体做功效率(right ventricular global work efficiency, RVGWE)低于对照组[85.0%(76.3% ~ 92.5%) vs 92.0%(90.0% ~ 95.0%)],且 *P* 值均 < 0.01。而且心肌做功参数与临床指标和其他常规超声心动图评估指标具有良好的相关性,说明其可作为新兴的心功能标志物,同时分析得出 RVGWE 联合 PASP 是预测临床结局的最佳模型和预测不良事件的最佳指标。Butcher 等^[22]对 51 例 PAH 或肺动脉阻塞相关性 PH 患者进行 RV 心肌做功的无创分析,发现 RV 心肌做功参数与右心导管检查得到的参数相关性较常规参数更密切;RVGCW 和 RVGWI 值的降低与全因死亡率相关,而常规参数无此表现。

综合来看 RV 心肌做功作为评价 RV 收缩功能的新指标,具有准确性与先进性,与常规超声指标、临床指标及右心导管检查的参数都有良好的相关性,其在

预测临床不良结局方面表现优越,但实际运用于临床仍需进一步研究。

2.2 RV-肺动脉耦联

RV 功能状态基于 RV 心肌收缩能力和肺血管后负荷之间复杂的相互作用,而反映 RV 功能的指标如 RVEF 在疾病晚期才会出现明显改变^[23],因此仅通过独立评估并不能为临床精准化治疗提供足够依据,于是人们认识到 RV 与肺动脉循环耦联的重要性。RV-肺动脉耦联是指 RV 心肌收缩能力与肺血管阻力的关系,只有二者适当匹配时才能维持正常耦联;当前者无法增加从而匹配后者时,会出现解耦联,导致 RV 功能障碍。该指标可反映 RV 心肌收缩能力适应不同压力负荷时的早期变化,且已被证实具有准确性^[24]。评估 RV-肺动脉耦联状况的金标准是电导管压力-容积环法,得到心室收缩末期弹性与心室后负荷参数动脉弹性的比值,正常值为 1.5 ~ 2.0^[25]。有研究^[26]指出可将超声心动图作为无创评估的方法,通常将反映 RV 心肌收缩能力的 TAPSE 和 FAC 等指标与反映肺血管阻力的 RV 收缩压和 PASP 等指标的比值作为 RV-肺动脉耦联的重要指标。

2.2.1 TAPSE/PASP

TAPSE/PASP 与心室收缩末期弹性/心室后负荷参数动脉弹性独立相关^[27],重要的是, TAPSE/PASP 似乎比 TAPSE、S' 和 MPI 具有更强的不良事件预测能力。Fauvel 等^[28]的一项回顾性研究发现, TAPSE/PASP > 0.33 mm/mm Hg 可在随访中识别低风险 PAH 患者。Guo 等^[29]研究表明 TAPSE/PASP 与 6 分钟步行试验相结合可识别预后不良、风险高的 PH 患者。Tello 等^[30]分析 290 例 PAH 患者的 TAPSE/PASP,发现如果将 TAPSE/PASP 进行分层(低层: < 0.19 mm/mm Hg;中层: 0.19 ~ 0.32 mm/mm Hg;高层: > 0.32 mm/mm Hg),低层患者的血流动力学及 RV 收缩功能状况将明显受损。

2.2.2 TAPSE/RV 收缩压

Huston 等^[31]的一项纳入 47 784 例患者的大型研究中明确超声心动图估计的轻度 PH 与 RV 功能下降和死亡风险增加有关。轻度 PH 定义为 RV 收缩压为 33 ~ 39 mm Hg,使用 TAPSE/RV 收缩压定义 RV-肺动脉耦联,他们发现轻度 PH 患者的 TAPSE/RV 收缩压较对照组降低,提示 RV 功能下降,并可预测患者的临床预后情况。

2.2.3 右心室每搏输出量/右心室收缩末期容积

Kanemaru 等^[32]在研究中基于三维超声心动图测出右心室每搏输出量(right ventricular stroke volume, RVSV)及右心室收缩末期容积(right ventricular end-

systolic volume, RVESV), 并使用 RVSV 与 RVESV 的比值定义 RV-肺动脉耦联, 对 33 例因左心疾病而行心脏手术的患者进行评估, 发现因左心疾病继发 PH 的患者相比于未继发 PH 的患者, RVSV/RVESV 显著降低, 提示其 RV 功能明显受损。

2.2.4 RVFWLS/PASP

Ünlü 等^[33]使用 PAH 患者的 RVFWLS/PASP 评估 RV-肺动脉耦联, 并研究该新参数相对于其他超声心动图参数的预后价值。该研究表明 RVFWLS/PASP 在毛细血管前 PH 患者中能显著预测全因死亡率和心肺移植, 并且比其他已确立的参数更为优越。因此 Ünlü 等^[33]建议将 RVFWLS/PASP 作为一种新的评估预后的标志物。

无创评估 RV-肺动脉耦联可提示 RV 功能受损, 并在预测临床不良结局方面有着卓越的表现。不过将传统指标 TAPSE 等与反映肺血管阻力的指标进行匹配定义时, 其局限性仍存在, 而用新技术衍生的参数定义时可摆脱部分限制, 但其准确性有待与金标准验证。

3 小结与展望

综上所述, 超声指标在评估 PH 患者的 RV 功能状况及临床预后方面具有重要意义, 传统评价指标已在临床上广泛应用, 但局限性仍存在。新技术的发展有望摆脱传统限制, 成为更全面、更准确地评价 PH 患者 RV 收缩功能的切入点。RV 心肌做功及 RV-肺动脉耦联作为综合评估方法, 能为临床提供更真实的信息, 应得到更多的重视, 但各种新技术衍生新指标的准确性、可行性以及临床价值有待进一步研究。

参考文献

- [1] Humbert M, Kovacs G, Hoeper MM, et al. 2022 ESC/ERS Guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension[J]. *Eur Respir J*, 2023, 61(1): 2200879.
- [2] Ruigrok D, Handoko ML, Meijboom LJ, et al. Noninvasive follow-up strategy after pulmonary endarterectomy for chronic thromboembolic pulmonary hypertension[J]. *ERJ Open Res*, 2022, 8(2): 00564-02021.
- [3] Marchetta S, Verbelen T, Claessen G, et al. A comprehensive assessment of right ventricular function in chronic thromboembolic pulmonary hypertension[J]. *J Clin Med*, 2022, 12(1): 47.
- [4] Mazurek JA, Vaidya A, Mathai SC, et al. Follow-up tricuspid annular plane systolic excursion predicts survival in pulmonary arterial hypertension[J]. *Pulm Circ*, 2017, 7(2): 361-371.
- [5] Dandel M, Hetzer R. Evaluation of the right ventricle by echocardiography: particularities and major challenges[J]. *Expert Rev Cardiovasc Ther*, 2018, 16(4): 259-275.
- [6] Ogihara Y, Yamada N, Dohi K, et al. Utility of right ventricular Tei-index for assessing disease severity and determining response to treatment in patients with pulmonary arterial hypertension[J]. *J Cardiol*, 2014, 63(2): 149-153.
- [7] Zaidi A, Knight DS, Augustine DX, et al. Echocardiographic assessment of the right heart in adults: a practical guideline from the British Society of Echocardiography[J]. *Echo Res Pract*, 2020, 7(1): G19-G41.
- [8] Kitano T, Nabeshima Y, Nagata Y, et al. Prognostic value of the right ventricular ejection fraction using three-dimensional echocardiography: systematic review and meta-analysis[J]. *PLoS One*, 2023, 18(7): e0287924.
- [9] Badano LP, Addetia K, Pontone G, et al. Advanced imaging of right ventricular anatomy and function[J]. *Heart*, 2020, 106(19): 1469-1476.
- [10] Li Y, Wang T, Haines P, et al. Prognostic value of right ventricular two-dimensional and three-dimensional speckle-tracking strain in pulmonary arterial hypertension: superiority of longitudinal strain over circumferential and radial strain[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2020, 33(8): 985-994. e1.
- [11] Wang Z, Su L, Li S, et al. Evaluation of right heart function changes in patients with pulmonary hypertension via two-dimensional speckle tracking imaging: a retrospective study[J]. *Ann Med*, 2023, 55(2): 2272711.
- [12] Liu Q, Hu Y, Chen W, et al. Evaluation of right ventricular longitudinal strain in pediatric patients with pulmonary hypertension by two-dimensional speckle-tracking echocardiography[J]. *Front Pediatr*, 2023, 11: 1189373.
- [13] Badagliacca R, Pezzuto B, Papa S, et al. Right ventricular strain curve morphology and outcome in idiopathic pulmonary arterial hypertension[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2021, 14(1): 162-172.
- [14] Jone PN, Duchateau N, Pan Z, et al. Right ventricular area strain from 3-dimensional echocardiography: mechanistic insight of right ventricular dysfunction in pediatric pulmonary hypertension[J]. *J Heart Lung Transplant*, 2021, 40(2): 138-148.
- [15] Mocerì P, Duchateau N, Baudouy D, et al. Additional prognostic value of echocardiographic follow-up in pulmonary hypertension—Role of 3D right ventricular area strain[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2022, 23(11): 1562-1572.
- [16] Schneider M, Aschauer S, Mascherbauer J, et al. Echocardiographic assessment of right ventricular function: current clinical practice[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2019, 35(1): 49-56.
- [17] 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.
- [18] Butcher SC, Fortuni F, Montero-Cabezas JM, et al. Right ventricular myocardial work: proof-of-concept for non-invasive assessment of right ventricular function[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2021, 22(2): 142-152.
- [19] Wu J, Huang X, Huang K, et al. Correlations among noninvasive right ventricular myocardial work indices and the main parameters of systolic and diastolic functions[J]. *J Clin Ultrasound*, 2022, 50(7): 873-884.
- [20] Wu J, Huang X, Huang K, et al. The non-invasive echocardiographic assessment of right ventricular myocardial work in a healthy population[J]. *Acta Cardiol*, 2023, 78(4): 423-432.
- [21] Wang J, Ni C, Yang M, et al. Apply pressure-strain loop to quantify myocardial work in pulmonary hypertension: a prospective cohort study[J]. *Front Cardiovasc Med*, 2022, 9: 1022987.
- [22] Butcher SC, Feloukidis C, Kamperidis V, et al. Right ventricular myocardial work characterization in patients with pulmonary hypertension and relation to invasive hemodynamic parameters and outcomes[J]. *Am J Cardiol*, 2022, 177: 151-161.
- [23] Hsu S, Simpson CE, Houston BA, et al. Multi-beat right ventricular-arterial coupling predicts clinical worsening in pulmonary arterial hypertension[J]. *J Am Heart Assoc*, 2020, 9(10): e016031.
- [24] Vonk Noordegraaf A, Westerhof BE, Westerhof N. The relationship between the right ventricle and its load in pulmonary hypertension[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2017, 69(2): 236-243.
- [25] Tello K, Seeger W, Naeije R, et al. Right heart failure in pulmonary hypertension: diagnosis and new perspectives on vascular and direct right ventricular treatment[J]. *Br J Pharmacol*, 2021, 178(1): 90-107.
- [26] Bashline MJ, Simon MA. Use of tricuspid annular plane systolic excursion/pulmonary artery systolic pressure as a non-invasive method to assess right ventricular-PA coupling in patients with pulmonary hypertension[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2019, 12(9): e009648.
- [27] Mehmood M. Letter by Mehmood regarding article, "Validation of the tricuspid annular plane systolic excursion/systolic pulmonary artery pressure ratio for the assessment of right ventricular-arterial coupling in severe pulmonary hypertension"[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2019, 12(11): e010002.
- [28] Fauvel C, Raitiere O, Boucly A, et al. Interest of TAPSE/sPAP ratio for

noninvasive pulmonary arterial hypertension risk assessment[J]. *J Heart Lung Transplant*, 2022, 41(12):1761-1772.

- [29] Guo X, Lai J, Wang H, et al. Predictive value of non-invasive right ventricle to pulmonary circulation coupling in systemic lupus erythematosus patients with pulmonary arterial hypertension[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2021, 22(1):111-118.
- [30] Tello K, Axmann J, Ghofrani HA, et al. Relevance of the TAPSE/PASP ratio in pulmonary arterial hypertension[J]. *Int J Cardiol*, 2018, 266:229-235.
- [31] Huston JH, Maron BA, French J, et al. Association of mild echocardiographic pulmonary hypertension with mortality and right ventricular function[J]. *JAMA*

Cardiol, 2019, 4(11):1112-1121.

- [32] Kanemaru E, Yoshitani K, Kato S, et al. Comparison of right ventricular function between patients with and without pulmonary hypertension owing to left-sided heart disease: assessment based on right ventricular pressure-volume curves[J]. *J Cardiothorac Vasc Anesth*, 2020, 34(1):143-150.
- [33] Ünlü S, Bézy S, Cvijic M, et al. Right ventricular strain related to pulmonary artery pressure predicts clinical outcome in patients with pulmonary arterial hypertension[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2023, 24(5):635-642.

收稿日期:2023-11-07

(上接第 584 页)

- [33] 中华医学会心血管病学分会, 中华心血管病杂志编辑委员会. 光学相干断层成像技术在冠心病介入诊疗中应用的中国专家共识[J]. *中华心血管病杂志*, 2023, 51(2):109-124.
- [34] Ann SH, Lim KH, de Jin C, et al. Multi-modality imaging for stent edge assessment[J]. *Heart Vessels*, 2015, 30(2):162-168.
- [35] Chamié D, Bezerra HG, Attizzani GF, et al. Incidence, predictors, morphological characteristics, and clinical outcomes of stent edge dissections detected by optical coherence tomography[J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2013, 6(8):800-813.
- [36] Bouki KP, Sakali E, Toutouzas K, et al. Impact of coronary artery stent edge dissections on long-term clinical outcome in patients with acute coronary syndrome: an optical coherence tomography study[J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2015, 86(2):237-246.
- [37] Palmerini T, Benedetto U, Biondi-Zoccai G, et al. Long-term safety of drug-eluting and bare-metal stents: evidence from a comprehensive network meta-analysis[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2015, 65(23):2496-2507.
- [38] Jimnouchi H, Sakakura K, Yanase T, et al. Impact of stent edge dissection detected by optical coherence tomography after current-generation drug-eluting stent implantation[J]. *PLoS One*, 2021, 16(11):e0259693.
- [39] Stone GW, Rizvi A, Newman W, et al. Everolimus-eluting versus paclitaxel-eluting stents in coronary artery disease[J]. *N Engl J Med*, 2010, 362(18):1663-1674.

- [40] Kobayashi N, Mintz GS, Witenbichler B, et al. Prevalence, features, and prognostic importance of edge dissection after drug-eluting stent implantation: an ADAPT-DES intravascular ultrasound substudy[J]. *Circ Cardiovasc Interv*, 2016, 9(7):e003553.
- [41] Prati F, Romagnoli E, Gatto L, et al. Clinical impact of suboptimal stenting and residual intrastent plaque/thrombus protrusion in patients with acute coronary syndrome: the CLI-OPCI ACS Substudy (Centro per la Lotta Contro L' Infarto-Optimization of Percutaneous Coronary Intervention in acute coronary syndrome)[J]. *Circ Cardiovasc Interv*, 2016, 9(12):e003726.
- [42] Radu MD, Räber L, Heo J, et al. Natural history of optical coherence tomography-detected non-flow-limiting edge dissections following drug-eluting stent implantation[J]. *EuroIntervention*, 2014, 9(9):1085-1094.
- [43] Prati F, Romagnoli E, Biccirè FG, et al. Clinical outcomes of suboptimal stent deployment as assessed by optical coherence tomography: long-term results of the CLI-OPCI registry[J]. *EuroIntervention*, 2022, 18(2):e150-e157.
- [44] Ali ZA, Landmesser U, Maehara A, et al. Optical coherence tomography-guided versus angiography-guided PCI[J]. *N Engl J Med*, 2023, 389(16):1466-1476.
- [45] van Zandvoort LJC, Tomaniak M, Tovar Forero MN, et al. Predictors for clinical outcome of untreated stent edge dissections as detected by optical coherence tomography[J]. *Circ Cardiovasc Interv*, 2020, 13(3):e008685.

收稿日期:2023-10-20

(上接第 587 页)

- [2] Semsarian C, Ingles J, Maron MS, et al. New perspectives on the prevalence of hypertrophic cardiomyopathy[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2015, 65(12):1249-1254.
- [3] Geisterfer-Lowrance AA, Kass S, Tanigawa G, et al. A molecular basis for familial hypertrophic cardiomyopathy: a beta cardiac myosin heavy chain gene missense mutation[J]. *Cell*, 1990, 62(5):999-1006.
- [4] Spudich JA. Three perspectives on the molecular basis of hypercontractility caused by hypertrophic cardiomyopathy mutations[J]. *Pflugers Arch*, 2019, 471(5):701-717.
- [5] Sebastian SA, Panthangi V, Singh K, et al. Hypertrophic cardiomyopathy: current treatment and future options[J]. *Curr Probl Cardiol*, 2023, 48(4):101552.
- [6] Ommen SR, Mital S, Burke MA, et al. 2020 AHA/ACC Guideline for the diagnosis and treatment of patients with hypertrophic cardiomyopathy: executive summary: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on Clinical Practice Guidelines[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2020, 76(25):3022-3055.
- [7] Daniels MJ, Fusi L, Semsarian C, et al. Myosin modulation in hypertrophic cardiomyopathy and systolic heart failure: getting inside the engine[J]. *Circulation*, 2021, 144(10):759-762.
- [8] Day SM, Tardiff JC, Ostap EM. Myosin modulators: emerging approaches for the treatment of cardiomyopathies and heart failure[J]. *J Clin Invest*, 2022, 132(5):e148557.
- [9] Nag S, Gollapudi SK, del Rio CL, et al. Mavacamten, a precision medicine for hypertrophic cardiomyopathy: from a motor protein to patients[J]. *Sci Adv*,

2023, 9(30):eabo7622.

- [10] Malik FI, Robertson LA, Armas DR, et al. A phase 1 dose-escalation study of the cardiac myosin inhibitor aficamten in healthy participants[J]. *JACC Basic Transl Sci*, 2022, 7(8):763-775.
- [11] Maron MS, Masri A, Choudhury L, et al. Phase 2 study of aficamten in patients with obstructive hypertrophic cardiomyopathy[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2023, 81(1):34-45.
- [12] 美通社. 箕星宣布 aficamten 在中国获得 3 期临床试验申请批准[EB/OL]. (2022-07-06) [2022-10-30]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1737553375253566846&wfr=spider&for=pc>.
- [13] Tsukamoto O. Direct sarcomere modulators are promising new treatments for cardiomyopathies[J]. *Int J Mol Sci*, 2019, 21(1):226.
- [14] Desai MY, Owens A, Geske JB, et al. Myosin inhibition in patients with obstructive hypertrophic cardiomyopathy referred for septal reduction therapy[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2022, 80(2):95-108.
- [15] Kean SJ. Mavacamten: first approval[J]. *Drugs*, 2022, 82(10):1127-1135.
- [16] Grillo MP, Erve JCL, Dick R, et al. In vitro and in vivo pharmacokinetic characterization of mavacamten, a first-in-class small molecule allosteric modulator of beta cardiac myosin[J]. *Xenobiotica*, 2019, 49(6):718-733.
- [17] Wang A, Spertus JA, Wojdyla DM, et al. Mavacamten for obstructive hypertrophic cardiomyopathy with or without hypertension: post-hoc analysis of the EXPLORER-HCM trial[J]. *JACC Heart Fail*, 2024, 12(3):567-579.

收稿日期:2023-09-10