

右心室-肺动脉耦合在心血管疾病中的临床应用进展

王燧 陈建淑 张小卫

(兰州大学第二医院心血管内科, 甘肃 兰州 730030)

【摘要】 右心室-肺动脉耦合是指右心室与肺动脉之间相互作用的关系, 由右心室收缩功能参数与肺动脉弹性参数的比率来定义, 在心血管疾病的临床应用中具有重要的参考价值。目前可通过有创性检测和无创性检查两种方法来评估右心室-肺动脉耦合。现就近年来右心室-肺动脉耦合在心血管疾病中的临床应用进展做一综述。

【关键词】 右心室-肺动脉耦合; 肺动脉高压; 肺血栓栓塞症; 法洛四联症; 左心室辅助装置; 心肌淀粉样变性; 主动脉瓣狭窄

【DOI】 10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2024.09.002

Clinical Application of Right Ventricular-Pulmonary Arterial Coupling in Cardiovascular Disease

WANG Yi, CHEN Jianshu, ZHANG Xiaowei

(Department of Cardiology, Lanzhou University Second Hospital, Lanzhou 730030, Gansu, China)

【Abstract】 Right ventricular-pulmonary arterial coupling refers to the interaction between the right ventricle and pulmonary artery, defined by the ratio of right ventricular systolic function parameters to pulmonary artery elasticity parameters. It has important reference value in the clinical application of cardiovascular disease. Currently, there are two methods for evaluating right ventricular-pulmonary arterial coupling: invasive testing and non-invasive examination. This article reviews the clinical application progress of right ventricular-pulmonary arterial coupling in cardiovascular disease in recent years.

【Keywords】 Right ventricular-pulmonary arterial coupling; Pulmonary hypertension; Pulmonary thromboembolism; Tetralogy of Fallot; Left ventricular assist devices; Cardiac amyloidosis; Aortic stenosis

右心室-肺动脉耦合在心血管疾病中的临床应用及研究得到了越来越多的关注, 良好的右心室-肺动脉耦合能很好地反映右心室功能和肺动脉压力之间的关系。因此利用右心室-肺动脉耦合来评估右心室功能状态, 为临床治疗决策及预后判断提供参考依据。现就右心室-肺动脉耦合在心血管疾病中的临床应用进行综述。

1 右心室-肺动脉耦合的原理和定义

在生理状态下, 右心室具有很好的容量负荷耐受性, 但对后负荷的增加相对敏感, 当后负荷增加时, 右心室收缩力增强, 右心室和肺动脉之间保持动态的匹配关系。右心室的功能不仅依赖于后负荷状态, 也受体循环充盈及左、右心室间相互作用的影响, 因此现有的常用评估右心室功能的参数具有一定局限性^[1-2]。基于上述原理及近年的研究结果, 提出了“右心室-肺动脉耦合”指标, 即指右心室收缩力和右心室后负荷之间相互作用的关系, 在生理状态下二者之间

能动态调节, 保持着最佳的耦合状态。病理状态下, 如肺动脉高压 (pulmonary hypertension, PH) 时会出现右心室重塑及肺血管重构, 导致右心室-肺动脉无法达到最佳的耦合关系, 即右心室-肺动脉失耦合^[3]。值得注意的是, 右心室-肺动脉失耦合并非是一个不可逆状态, 通过降低肺动脉压, 减轻右心室后负荷, 能促使右心室与肺循环恢复正常的耦合状态^[4-5]。右心室-肺动脉耦合强调二者为一个整体互相影响, 具有重要的临床意义。因此, 现就近年来右心室-肺动脉耦合在心血管疾病中的临床研究进行了总结, 见表 1^[4, 6-15]。

2 右心室-肺动脉耦合的评估

右心室-肺动脉耦合的评估需分别检测右心室收缩功能与右心室后负荷两个重要指标, 检测的方法有右心导管检查、超声心动图、心脏磁共振等。经右心导管检查计算的心室弹性 [心室收缩末期弹性 (end-systolic elastance, Ees)] 和心室后负荷参数 [有效动脉弹性 (effective arterial elastance, Ea)] 比值, 即 Ees/Ea

基金项目: 国家自然科学基金 (82060080)

通信作者: 张小卫, E-mail: xwzhang@lzu.edu.cn

比值,是右心室-肺动脉耦合“金标准”。正常情况下右心室-肺动脉耦合参数 Ees/Ea 比值保持在 1.5 ~ 2.0 时,右心室-肺动脉耦合状态最好^[16-17]。Ees/Ea 比值是右心系统功能异常及呼吸循环系统疾病预后的独立预测因子,PH 患者的 Ees/Ea 比值普遍降低,与右心室后负荷升高及功能障碍有关^[18-20]。然而,右心导管检查作为一项有创性的检测方法在临床应用中有一定的局限性。心脏磁共振是测量右心室容积最准确的检测方法^[21],但心脏磁共振却无法直接测量心室压

力及肺动脉压。超声心动图是目前评估右心室-肺动脉耦合最常用的检查方法,见图 1。斑点追踪超声心动图的应用使得心肌应变性测量成为评估右心室收缩功能的新指标,通过斑点位置的变化来测算心肌的运动状态及形变,为右心室室壁运动及整体收缩功能提供了更多信息。三维斑点追踪超声心动图能更精确地量化评估右心室的结构及功能,因此三维斑点追踪超声心动图是评估右心室收缩功能的可靠方法。

表 1 右心室-肺动脉耦合相关研究

作者及年份	人数/例	右心室-肺动脉耦合参数	主要研究结果
Alwan 等 ^[4] (2023)	n = 404 (TAVI)	TAPSE/PASP	AS 患者普遍存在右心室-肺动脉失耦合,TAVI 后部分患者的 TAPSE/PASP 能得到显著改善
Grignola 等 ^[6] (2021)	n = 20 (PH) n = 10 (对照)	TAPSE/sPAP	PH 患者普遍存在肺动脉血管重构,与正常对照组相比,PH 患者的 TAPSE/sPAP 明显降低
Simon 等 ^[7] (2011)	n = 32 (PH)	Ees/Ea	发生死亡或接受肺移植的 PH 患者 Ees/Ea 显著降低,相对于心指数及右心房压,Ees/Ea 是 PH 患者预后的独立预测因子
Tello 等 ^[8] (2019)	n = 52 (PH 及 CTEPH)	Ees/Ea、 TAPSE/sPAP	仅 TAPSE/sPAP 与 Ees/Ea 具有相关性,TAPSE/sPAP < 0.31 mm/mmHg 的患者远期预后更差
Duan 等 ^[9] (2022)	n = 205 (CTEPH)	TAPSE/sPAP	TAPSE/sPAP 的降低与病情严重程度及远期不良预后显著相关
Cheng 等 ^[10] (2022)	n = 60 (TOF) n = 60 (对照)	RVAC/RVESA、 S'/RVESA	与对照组相比,TOF 患者的 RVAC/RVESA、S'/RVESA 明显降低,与 PR 和 TR 的严重程度相关
Stăpór 等 ^[11] (2024)	n = 72 (LVAD)	RVFWS/RVSP	有 26.4% 的研究对象存在右心室-肺动脉失耦合,RVFWS/RVSP 是 LVAD 术后患者远期不良预后的独立预测因子
Palmiero 等 ^[12] (2023)	n = 92 (CA)	TAPSE/PASP	以 0.31 mm/mmHg 为右心室-肺动脉失耦合界值时,有 35% 的研究对象存在右心室-肺动脉失耦合,随访中 28% 的研究对象发生心血管死亡,1 年期的生存率明显降低
Jentzer 等 ^[13] (2021)	n = 4 259 (CICU)	TASV/RVSP	TASV/RVSP 的降低与 CICU 急危重症患者的死亡率升高及不良预后显著相关
Bok 等 ^[14] (2023)	n = 1 147 (AHF)	TAPSE/PASP	TAPSE/PASP < 0.33 mm/mmHg 是 AHF 患者远期全因死亡率高的独立预测因素
Adamo 等 ^[15] (2022)	n = 501 (TEER)	TAPSE/PASP	相较于术前,TEER 后患者的 TAPSE/PASP 得到显著改善,与远期的良好预后显著相关

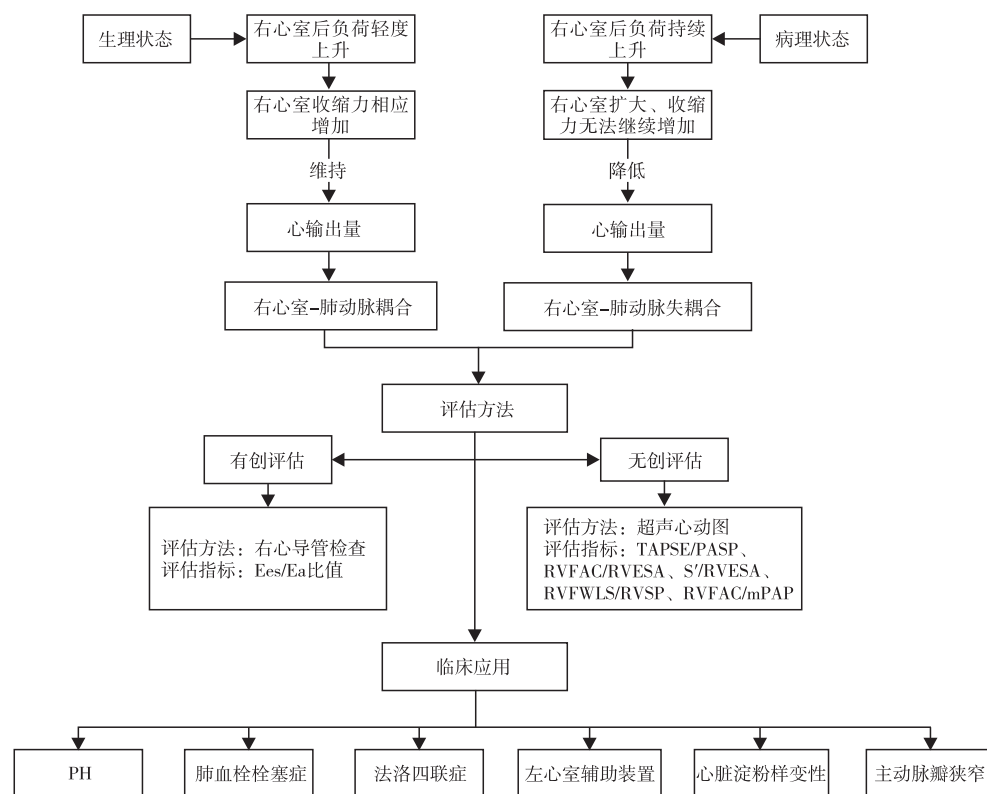
注:TAVI,经导管主动脉瓣置入术;TAPSE,三尖瓣环收缩期位移;PASP,肺动脉收缩压;sPAP,收缩期肺动脉压;CTEPH,慢性血栓栓塞性肺动脉高压;TOF,法洛四联症;RVAC,右心室面积变化;RVESA,右心室收缩末期面积;S',三尖瓣环收缩期速度;PR,肺动脉瓣反流;TR,三尖瓣反流;LVAD,左心室辅助装置;RVFWS,右心室游离壁应变;RVSP,右心室收缩压;CA,心肌淀粉样变性;CICU,心血管重症监护病房;TASV,三尖瓣环收缩期峰值运动速度;AHF,急性心力衰竭;TEER,经导管二尖瓣缘对缘修复术。

3 右心室-肺动脉耦合在心血管疾病中的临床应用

3.1 右心室-肺动脉耦合与 PH 及肺血栓栓塞症

PH 引起右心室后负荷持续升高,导致右心室-肺动脉失耦合,继而发展成为右心衰竭甚至死亡^[22-24]。在 Grignola 等^[6]的研究中,通过右心导管检查和血管内超声分别测量肺动脉相关指标,结果提示反映肺血管重构的指标均与右心室-肺动脉耦合存在一致的相关性($r = 0.60 \sim 0.76$)。Simon 等^[7]纳入 32 例 PH 患者为研究对象,以临床死亡或接受肺移植术作为终点事件,在为期 (796 ± 751) d 的随访观察中发现,有

12 例研究对象出现了临床死亡或接受了肺移植术,此类 PH 患者的 Ees/Ea 比值相较于其他研究对象显著降低(0.31 ± 0.15 vs 0.80 ± 0.45 , $P < 0.001$),多元回归分析显示 Ees/Ea 比值是 PH 患者远期不良预后的独立预测因子($HR = 0.016$, 95% CI 0.001 ~ 0.047, $P = 0.02$)。Vanderpool 等^[25]对 52 例 PH 患者给予降肺动脉压治疗后,观察到在治疗有效组的患者中 Ees/Ea 比值得到了明显的改善。因此临床估测右心室-肺动脉耦合对于 PH 患者的病情评估、临床预后判断及治疗决策方面具有重要的临床意义。



注: TAPSE, 三尖瓣环收缩期位移; PASP, 肺动脉收缩压; RVFAC, 右心室面积变化分数; RVESA, 右心室收缩末期面积; S', 三尖瓣环收缩期速度; RVFWLS, 右心室游离壁纵向应变; RVSP, 右心室收缩压; mPAP, 平均肺动脉压。

图1 右心室-肺动脉耦合原理、评估及临床应用

肺栓塞后导致血管狭窄, 肺血管阻力增加, 肺动脉压进行性升高, 导致右心室扩大及右心衰竭^[26]。在慢性血栓栓塞性肺动脉高压 (chronic thromboembolic pulmonary hypertension, CTEPH) 患者病程中, 当后负荷的增加超过了右心室收缩力的代偿能力后, 右心室-肺动脉便无法维持正常的耦合^[27]。在对 CTEPH 患者的研究中将三尖瓣环收缩期位移 (tricuspid annular plane systolic excursion, TAPSE)/肺动脉收缩压 (pulmonary artery systolic pressure, PASP) 比值为 0.31 mm/mmHg 作为右心室-肺动脉失耦合的界值, 随访结果显示 TAPSE/PASP 比值 < 0.31 mm/mmHg 的患者出现运动耐量降低、心功能恶化及死亡等临床不良事件的比例更高^[8]。在一项纳入 205 例 CTEPH 患者的回顾性研究^[9]中发现, TAPSE/PASP 比值与血流动力学参数存在显著相关性, 为期 1 年的随访结果显示 TAPSE/PASP 比值与临床不良事件显著相关。对于 CTEPH 患者, TAPSE/PASP 比值与临床疾病的严重程度及远期不良预后显著相关, 因此右心室-肺动脉耦合在 CTEPH 的诊治过程中可用来进行病情的危险分层及远期预后判断。

3.2 右心室-肺动脉耦合与法洛四联症

法洛四联症 (tetralogy of Fallot, TOF) 是临床上一

种复杂性先天性心脏病, 其临床表现主要由右心室流出道梗阻所致。Latus 等^[28]在对接受手术治疗的 TOF 患者研究中发现, TOF 术后患者普遍存在右心室-肺动脉失耦合, 多与右心室功能障碍及 TOF 术式相关, 研究者利用 Ea/Ees 比值作为右心室-肺动脉耦合参数, 评估 24 例伴有右心室扩大 TOF 术后患者的右心室-肺动脉耦合, 结果显示在给予多巴酚丁胺负荷后, Ees 由静息状态下的 $(0.24 \pm 0.18) \text{ mmHg}/(\text{mL} \cdot \text{m}^2)$ 增加至 $(0.47 \pm 0.39) \text{ mmHg}/(\text{mL} \cdot \text{m}^2)$ ($P < 0.01$), Ea 由静息状态下的 $(0.50 \pm 0.28) \text{ mmHg}/(\text{mL} \cdot \text{m}^2)$ 增加至 $(0.72 \pm 0.48) \text{ mmHg}/(\text{mL} \cdot \text{m}^2)$ ($P < 0.01$)。但值得注意的是 Ea/Ees 比值并未显著降低, 上述研究结果提示 TOF 术后患者的右心室-肺动脉失耦合状态并未得到明显改善, 在 TOF 术后患者远期不良预后判断方面具有一定的临床价值。另外, TOF 中不同手术方式选择对右心室-肺动脉耦合也存在影响。在接受经三尖瓣环切口修补术式的 TOF 患者中呈现出显著的右心室-肺动脉失耦合 (Ea/Ees 比值由 2.0 ± 0.8 上升至 3.7 ± 4.1)。在接受经心房切口修补术式的 TOF 患者中, 其右心室-肺动脉失耦合状态则明显改善 (Ea/Ees 比值由 1.6 ± 1.0 下降至 0.9 ± 0.6 , $P = 0.04$)。Cheng 等^[10]将右心室面积变化分数 (right ventricular fractional area

change, RVFAC)/右心室收缩末期面积(right ventricular end systolic area, RVESA)及三尖瓣环收缩期峰值运动速度(peak tricuspid annular systolic velocity, S')/RVESA 作为右心室-肺动脉耦合参数进行观察研究,TOF 术后患者 RVFAC/RVESA 及 S'/RVESA 均明显降低,提示此类患者存在明显的右心室-肺动脉失耦合现象。鉴于三维超声心动图及三维斑点追踪超声心动图能更精准地量化评估右心室-肺动脉耦合,Vitarelli 等^[29]在研究中发现,TOF 术后患者的三维右心室射血分数及三维右心室面积应变(three-dimensional right ventricular area strain, 3D-RVAS)与正常对照组相比明显下降,ROC 分析结果显示当 3D-RVAS/RVSP、3D-RVLS(三维右心室纵向应变)/RVESA 和 3D-RVAS/RVESV 的界值分别为 0.31%/mmHg、0.57%/mmHg 和 0.86%/mmHg 时,其判别 TOF 患者术后运动耐量受损的敏感性分别为 91%、88% 和 88%,特异性分别为 81%、81% 和 79%。

3.3 右心室-肺动脉耦合与左心室辅助装置

左心室辅助装置(left ventricular assist devices, LVAD)是目前用来治疗终末期心力衰竭的有效措施^[30]。有研究^[31]显示,在植入 LVAD 患者中右心衰竭的发生率明显升高,右心衰竭也是导致该类患者死亡的首要原因之一。大部分植入 LVAD 的患者术前常合并多种可导致右心室功能受损的疾病^[32-33]。基于此,术前利用右心室-肺动脉耦合来评估此类患者右心功能以改善患者远期预后就具有重要临床意义。TAPSE 等右心功能指标虽能用来评估 LVAD 术后患者早期的临床预后及急性右心衰竭的发生风险,但对于远期的预后却无临床价值^[32,34]。Stapór 等^[11]在对 LVAD 术后患者进行的随访中观察到,通过右心室游离壁纵向应变(right ventricular free wall longitudinal strain, RVFWLS)/右心室收缩压(right ventricular systolic pressure, RVSP)预测 LVAD 术后患者复合终点事件的临床价值要远远高于其他单一指标评估右心室功能的参数。亚组分析结果显示 RVFWLS/RVSP ≤ 0.28%/mmHg 患者在 1 年内其全因死亡率、右心衰竭发生率及右心室-肺动脉失耦合较 RVFWLS/RVSP > 0.28%/mmHg 的患者明显升高。因此,右心室-肺动脉耦合在 LVAD 的术前评估、术后远期预后判断及术后的干预治疗方面具有重要的临床参考价值。

3.4 右心室-肺动脉耦合与心脏淀粉样变性

心脏淀粉样变性(cardiac amyloidosis, CA)是一种严重的进展性浸润性心肌疾病,是由不溶性淀粉样纤维蛋白在心肌细胞外沉积所致。淀粉样物质浸润心肌引起心室壁增厚,导致心室壁顺应性降低,收缩能

力下降,最终导致充血性心力衰竭^[35]。CA 中右心室结构重塑和功能受损较为常见^[36]。CA 患者往往存在右心室-肺动脉失耦合现象。TAPSE/PASP 作为评估右心室-肺动脉耦合的指标之一,目前已在临床中得到广泛应用^[8,37],Palmiero 等^[12]在对 CA 患者的随访观察研究中发现,以 TAPSE/PASP < 0.31 mm/mmHg 作为右心室-肺动脉失耦合状态的界值时,35% 的 CA 患者存在右心室-肺动脉失耦合现象。相较于 TAPSE/PASP ≥ 0.31 mm/mmHg 的患者,右心室-肺动脉失耦合的 CA 患者收缩压和舒张压降低、N 末端脑钠肽前体升高和左右心室功能明显降低,其他能反映右心室收缩功能的参数,如 TAPSE、RVFAC 等也出现明显降低。右心室-肺动脉失耦合患者的 1 年期生存率明显降低。早期识别 CA 高危患者对于改善患者远期预后具有重要意义。基于目前的临床研究结果,右心室-肺动脉耦合能用来评估 CA 患者心肺循环系统的功能状态,是 CA 患者心血管疾病死亡率的独立预测因子,可用来识别 CA 的高危患者和 CA 患者病情的监测。

3.5 右心室-肺动脉耦合与主动脉瓣狭窄

主动脉瓣狭窄(aortic stenosis, AS)是老年人群常见的心脏瓣膜病之一。经导管主动脉瓣置入术(transcatheter aortic valve implantation, TAVI)的临床应用使得 AS 治疗进入了新时代。AS 可使增加的左心室系统压力逐级向后传递,导致左心房及二尖瓣的结构和功能受损,最终的结果是右心室功能受损、右心室-肺动脉失耦合^[38]。对于重度 AS 患者,TAVI 后可解除左心室流出道机械性梗阻。右心室-肺动脉失耦合预示着 AS 病情的不断进展和远期的不良预后^[39-40]。目前越来越多的临床研究结果也显示,右心室-肺动脉失耦合与 TAVI 后的全因死亡率相关^[39,41]。Alwan 等^[4]研究发现,AS 患者 TAVI 前已存在右心室-肺动脉失耦合的,其在术后 1 年心血管疾病死亡率更高(调整后 $HR = 2.06$, 95% CI 0.97 ~ 4.37, $P = 0.060$)。对 TAVI 后患者进行为期 1 年的随访结果显示,发生心血管疾病死亡的人群中有 20.7% 患者存在右心室-肺动脉失耦合。值得注意的是,部分患者右心室-肺动脉耦合状态在 TAVI 后发生改变。有 35.1% 的右心室-肺动脉失耦合患者在 TAVI 术后呈现为右心室-肺动脉耦合状态。上述研究结果提示重度 AS 患者的右心室功能障碍在 TAVI 术后能得到一定程度的改善。Eleid 等^[5]的研究也证实,在重度 AS 患者 TAVI 前后即刻进行超声心动检查和有创血流动力学检测,结果显示在 TAVI 后随着左心室后负荷的减轻,右心室功能障碍及右心室-肺动脉失耦合现象得到改善,如右室每搏功升高[由 (16 ± 7) mmHg·mL 上升至 (18 ± 7) mmHg·mL,

$P=0.04$], TAPSE 增加[由 (9.5 ± 2.0) cm/s 增加至 (10.4 ± 3.5) cm/s, $P=0.01$], 肺血管阻力降低 $[(194 \pm 113)$ dyn·s/cm⁵, $P=0.03$]。

4 总结与展望

在临床实践中,右心室-肺动脉失耦合意味着心血管疾病已处于终末期阶段。因此早期准确地评估右心室-肺动脉耦合对于改善心血管疾病患者的预后具有重要的临床意义,可指导临床医生及早识别高危患者、延缓疾病的进展、指导临床治疗及改善远期预后。右心导管检查是评估右心室-肺动脉耦合的金标准,但因其有创性操作在临床应用中有一定局限性。超声心动图等无创检查指标目前已得到广泛应用,但在今后的研究中仍需进一步确定在心血管疾病发展过程中,与不同阶段病情相一致的右心室-肺动脉耦合理想参数,探索具有实际临床参考价值的右心室-肺动脉耦合受损界值,以期精细化指导临床治疗决策。

参考文献

- [1] Mercer-Rosa L, Yang W, Kutty S, et al. Quantifying pulmonary regurgitation and right ventricular function in surgically repaired tetralogy of Fallot: a comparative analysis of echocardiography and magnetic resonance imaging [J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2012, 5(5): 637-643.
- [2] Mitchell JR, Whitelaw WA, Sas R, et al. RV filling modulates LV function by direct ventricular interaction during mechanical ventilation [J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2005, 289(2): H549-H557.
- [3] Boulate D, Mercier O, Guihaire J, et al. Pulmonary hypertension: basic science to clinical medicine [M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2015.
- [4] Alwan L, Tomii D, Heg D, et al. Impact of right ventricular-pulmonary arterial coupling on clinical outcomes in patients undergoing transcatheter aortic valve implantation [J]. *Cardiovasc Revasc Med*, 2023, 56: 27-34.
- [5] Eleid MF, Padang R, Pislaru SV, et al. Effect of transcatheter aortic valve replacement on right ventricular-pulmonary artery coupling [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2019, 12(21): 2145-2154.
- [6] Grignola JC, Domingo E, López-Meseguer M, et al. Pulmonary arterial remodeling is related to the risk stratification and right ventricular-pulmonary arterial coupling in patients with pulmonary arterial hypertension [J]. *Front Physiol*, 2021, 12: 631326.
- [7] Simon MA, Kosaraju V, Deible C, et al. 16 Right ventricular-pulmonary arterial coupling is an independent predictor of outcomes in pulmonary hypertension [J]. *J Heart Lung Transplant*, 2011, 30(4): S13.
- [8] Tello K, Wan J, Dalmer A, et al. 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(9): 009047.
- [9] Duan AQ, Li X, Jin Q, et al. Prognostic implication of noninvasive right ventricle-to-pulmonary artery coupling in chronic thromboembolic pulmonary hypertension [J]. *Ther Adv Chronic Dis*, 2022, 13: 20406223221102803.
- [10] Cheng S, Li VW, SO EK, et al. Right ventricular-pulmonary arterial coupling in repaired tetralogy of Fallot [J]. *Pediatr Cardiol*, 2022, 43(1): 207-217.
- [11] Stapor M, Sobczyk D, Wasilewski G, et al. Right ventricular-pulmonary arterial coupling in patients with implanted left ventricular assist devices [J]. *Hellenic J Cardiol*, 2024, 77: 44-53.
- [12] Palmiero G, Monda E, Verrillo F, et al. Prevalence and clinical significance of right ventricular pulmonary arterial uncoupling in cardiac amyloidosis [J]. *Int J Cardiol*, 2023, 388: 131147.
- [13] Jentzer JC, Anavekar NS, Reddy YNV, et al. Right ventricular pulmonary artery coupling and mortality in cardiac intensive care unit patients [J]. *J Am Heart Assoc*, 2021, 10(7): e019015.
- [14] Bok Y, Kim JY, Park JH. Prognostic role of right ventricular-pulmonary artery coupling assessed by TAPSE/PASP ratio in patients with acute heart failure [J]. *J Cardiovasc Imaging*, 2023, 31(4): 200-206.
- [15] Adamo M, Inciardi RM, Tomasoni D, et al. Changes in right ventricular-to-pulmonary artery coupling after transcatheter edge-to-edge repair in secondary mitral regurgitation [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2022, 15(12): 2038-2047.
- [16] Vonk-Noordegraaf A, Haddad F, Chin KM, et al. Right heart adaptation to pulmonary arterial hypertension: physiology and pathobiology [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2013, 62(25 suppl): D22-D33.
- [17] Lahm T, Douglas IS, Archer SL, et al. Assessment of right ventricular function in the research setting: knowledge gaps and pathways forward. An official American Thoracic Society research statement [J]. *Am J Respir Crit Care Med*, 2018, 198(4): e15-e43.
- [18] 余洁, 宋来春, 颜梦欢, 等. 右心室-肺动脉耦合对肺动脉高压患者生存预后的价值研究 [J]. *中国实用内科杂志*, 2019, 39(1): 62-65.
- [19] Kubba S, Davila CD, Forfia PR. Methods for evaluating right ventricular function and ventricular-arterial coupling [J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 2016, 59(1): 42-51.
- [20] McCabe C, White PA, Hoole SP, et al. Right ventricular dysfunction in chronic thromboembolic obstruction of the pulmonary artery: a pressure-volume study using the conductance catheter [J]. *J Appl Physiol (1985)*, 2014, 116(4): 355-363.
- [21] van Wolferen SA, Marcus JT, Westerhof N, et al. Right coronary artery flow impairment in patients with pulmonary hypertension [J]. *Eur Heart J*, 2008, 29(1): 120-127.
- [22] 段安琪, 罗勤, 赵智慧, 等. 右心室-肺动脉耦合在肺动脉高压中的应用进展 [J]. *协和医学杂志*, 2022, 13(6): 1051-1056.
- [23] 中华医学会呼吸病学分会肺栓塞与肺血管病学组, 中国医师协会呼吸医师分会肺栓塞与肺血管病工作委员会, 全国肺栓塞与肺血管病防治协作组, 等. 中国肺动脉高压诊断与治疗指南(2021 版) [J]. *中华医学杂志*, 2021, 101(1): 11-51.
- [24] Leurent G, Auffret V, Donal E. Right ventricular-pulmonary artery coupling: a simple marker to guide complex clinical decisions? [J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2022, 15(18): 1834-1836.
- [25] Vanderpool RR, Hunter KS, Insel M, et al. The right ventricular-pulmonary arterial coupling and diastolic function response to therapy in pulmonary arterial hypertension [J]. *Chest*, 2022, 161(4): 1048-1059.
- [26] 中华医学会呼吸病学分会肺栓塞与肺血管病学组, 中国医师协会呼吸医师分会肺栓塞与肺血管病工作委员会, 全国肺栓塞与肺血管病防治协作组. 肺血栓栓塞症诊治与预防指南 [J]. *中华医学杂志*, 2018, 98(14): 1060-1087.
- [27] Bartnik A, Pepke-Zaba J, Hoole SP, et al. Right ventricular-pulmonary artery coupling in chronic thromboembolic pulmonary hypertension [J]. *Heart*, 2023, 109(12): 898-904.
- [28] Latus H, Binder W, Kerst G, et al. Right ventricular-pulmonary arterial coupling in patients after repair of tetralogy of Fallot [J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2013, 146(6): 1366-1372.
- [29] Vitarelli A, Miraldi F, Capotosto L, et al. Comprehensive echocardiographic assessment of right ventricular function, pulmonary arterial elastic properties and ventricular-vascular coupling in adult patients with repaired tetralogy of Fallot: clinical significance of 3D derived indices [J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2023, 39(9): 1631-1641.

- [27] 汤乔颖,邓又斌. 超声斑点追踪技术评价左心室局部功能的进展[J]. 中华超声影像学杂志,2012,21(2):171-174.
- [28] 刘家佳,张璐,张艳,等. 斑点追踪分层应变技术评估急性冠状动脉综合征合并糖尿病患者左室心肌分层应变及其与甘油三酯葡萄糖指数的相关性[J]. 临床超声医学杂志,2023,25(6):423-429.
- [29] Ancedy Y, Ederhy S, Jean ML, et al. Does layer-specific strain using speckle tracking echocardiography improve the assessment of left ventricular myocardial deformation? A review[J]. Arch Cardiovasc Dis,2020,113(11):721-735.
- [30] Ran H, Yao Y, Wan L, et al. Characterizing stenosis severity of coronary heart disease by myocardial work measurement in patients with preserved ejection fraction[J]. Quant Imaging Med Surg,2023,13(8):5022-5033.
- [31] Tagliamonte E, Sperlongano S, Montuori C, et al. Coronary microvascular dysfunction affects left ventricular global longitudinal strain response to dipyridamole stress echocardiography: a pilot study[J]. Heart Vessels,2023,38(4):470-477.
- [32] Ran H, Zhang PY, Zhang YX, et al. Assessment of left ventricular myocardial viability by 3-dimensional speckle-tracking echocardiography in patients with myocardial infarction[J]. J Ultrasound Med,2016,35(8):1631-1638.
- [33] Ran H, Zhang PY, Fang LL, et al. Clinic value of two-dimensional speckle tracking combined with adenosine stress echocardiography for assessment of myocardial viability[J]. Echocardiography,2012,29(6):688-694.
- [34] Tschöpe C, Senni M. Usefulness and clinical relevance of left ventricular global longitudinal systolic strain in patients with heart failure with preserved ejection fraction[J]. Heart Fail Rev,2020,25(1):67-73.
- [35] Onishi T, Saha SK, Delgado-Montero A, et al. Global longitudinal strain and global circumferential strain by speckle-tracking echocardiography and feature-tracking cardiac magnetic resonance imaging: comparison with left ventricular ejection fraction[J]. J Am Soc Echocardiogr,2015,28(5):587-596.
- [36] Roemer S, Jaglan A, Santos D, et al. The utility of myocardial work in clinical practice[J]. J Am Soc Echocardiogr,2021,34(8):807-818.
- [37] Mutluer FO, Bowen DJ, van Grootel RWJ, et al. Left ventricular strain values using 3D speckle-tracking echocardiography in healthy adults aged 20 to 72 years[J]. Int J Cardiovasc Imaging,2021,37(4):1189-1201.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 王岩,鲁洪涛,尹璐瑶,等. 超声心肌做功技术对左前降支狭窄患者左心室收缩功能的诊断价值[J]. 中国医学影像学杂志,2023,31(4):349-355.
- [41] van der Bijl P, Vo NM, Kostyukevich MV, et al. Prognostic implications of global, left ventricular myocardial work efficiency before cardiac resynchronization therapy[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging,2019,20(12):1388-1394.
- [42] 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.

收稿日期:2024-03-19

(上接第 777 页)

- [30] 卿平,杜娟,周星彤,等. 中国左心室辅助装置候选者术前评估与管理专家共识(2023 年)[J]. 中国循环杂志,2023,38(8):799-814.
- [31] Molina EJ, Shah P, Kiernan MS, et al. The Society of Thoracic Surgeons Intermaacs 2020 Annual Report[J]. Ann Thorac Surg,2021,111(3):778-792.
- [32] Wang TS, Cevasco M, Birati EY, et al. Predicting, recognizing, and treating right heart failure in patients undergoing durable LVAD therapy[J]. J Clin Med,2022,11(11):2984.
- [33] Tran T, Muralidhar A, Hunter K, et al. Right ventricular function and cardiopulmonary performance among patients with heart failure supported by durable mechanical circulatory support devices[J]. J Heart Lung Transplant,2021,40(2):128-137.
- [34] Ruiz-Cano MJ, Morshuis M, Koster A, et al. Risk factors of early right ventricular failure in patients undergoing LVAD implantation with intermediate Intermaacs profile for advanced heart failure[J]. J Card Surg,2020,35(8):1832-1839.
- [35] Garcia-Pavia P, Rapezzi C, Adler Y, et al. Diagnosis and treatment of cardiac amyloidosis: a position statement of the ESC working group on myocardial and pericardial diseases[J]. Eur Heart J,2021,42(16):1554-1568.
- [36] Fagot J, Lavie-Badie Y, Blanchard V, et al. Impact of tricuspid regurgitation on survival in patients with cardiac amyloidosis[J]. ESC Heart Fail,2021,8(1):438-446.
- [37] Kazimierczyk R, Kazimierczyk E, Knapp M, et al. Echocardiographic assessment of right ventricular-arterial coupling in predicting prognosis of pulmonary arterial hypertension patients[J]. J Clin Med,2021,10(13):2995.
- [38] G  n  reux P, Pibarot P, Redfors B, et al. Staging classification of aortic stenosis based on the extent of cardiac damage[J]. Eur Heart J,2017,38(45):3351-3358.
- [39] Asami M, Stortecky S, Praz F, et al. Prognostic value of right ventricular dysfunction on clinical outcomes after transcatheter aortic valve replacement[J]. JACC Cardiovasc Imaging,2019,12(4):577-587.
- [40] Schewel J, Schmidt T, Kuck KH, et al. Impact of pulmonary hypertension hemodynamic status on long-term outcome after transcatheter aortic valve replacement[J]. JACC Cardiovasc Interv,2019,12(21):2155-2168.
- [41] Sultan I, Cardounel A, Abdelkarim I, et al. Right ventricle to pulmonary artery coupling in patients undergoing transcatheter aortic valve implantation[J]. Heart,2019,105(2):117-121.

收稿日期:2023-12-30