

超声心动图在冠心病诊疗中的应用现状及研究进展

陈茜茜 冉红

(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】 冠心病作为一种常见的心血管疾病,其患病率及死亡率逐年上升,发病年龄趋于年轻化,严重威胁人类生命安全,给社会带来巨大压力。超声心动图作为一线影像技术,能从心脏结构及功能、心肌运动及灌注、应变特性及储备等多角度定性并定量地反映心脏变化,在冠心病的诊断、治疗和预后评估中发挥至关重要的作用。现对超声心动图在冠心病诊疗中的应用现状及研究进展进行综述。

【关键词】 超声心动图;冠心病;斑点追踪成像;心肌做功

【DOI】 10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2024.09.004

Current Application and Research Progress of Echocardiography on Diagnosis and Treatment of Coronary Heart Disease

CHEN Xixi, RAN Hong

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

【Abstract】 As a common cardiovascular disease, the prevalence and mortality rate of coronary heart disease are increasing year by year, and the onset age tends to be younger, which is a serious threat to the safety of human life and brings great pressure to the society. As a first-line imaging technology, echocardiography can qualitatively and quantitatively reflect cardiac changes from multiple respects, such as cardiac structure and function, myocardial motion and perfusion, strain characteristic and reserve, and plays a crucial role in the diagnosis, treatment and prognosis assessment of coronary heart disease. This article reviews the current application and research progress of echocardiography on the diagnosis and treatment of coronary heart disease.

【Keywords】 Echocardiography; Coronary heart disease; Speckle tracking imaging; Myocardial work

冠心病,全称冠状动脉粥样硬化性心脏病,是指冠状动脉粥样斑块形成引起血管腔狭窄或闭塞,导致心肌血液灌注减少而引发的心脏疾病。《中国心血管健康与疾病报告 2022 概要》^[1]推算中国冠心病现患人数 1 139 万,近十年来冠心病死亡率呈逐年上升趋势。对冠心病患者进行早期且准确的评估和诊断能实现疾病早发现、早干预、早治疗的可能,达到有效提高患者生存质量的目标。现阶段超声心动图具有简便、无创、快捷、价廉且重复性高等优势,已广泛应用于临床冠心病诊疗中。现对超声心动图在冠心病诊疗中的应用现状及研究进展进行分析和探讨。

1 超声心动图在冠心病诊疗中的应用现状

1.1 常规二维超声心动图对心脏结构及功能的评估

冠状动脉供应心肌组织的正常血供时,其在生理解剖走行方面表现出显著的节段性分布。冠心病患者冠状动脉狭窄,心肌细胞出现缺血缺氧,心脏收缩

功能减弱,常规二维超声心动图表现为节段性室壁运动异常(regional wall motion abnormality, RWMA)。有经验的医生可对室壁运动作出定性评价,采用左心室壁 17 节段分段法大致判断冠状动脉病变部位、范围及程度^[2]。通常情况下,前室间隔、左心室前壁与左心室心尖部心肌主要由左前降支供血,左心室侧壁与左心室后壁主要由左回旋支供血,后室间隔与左心室下壁主要由右冠状动脉供血。根据室壁运动异常程度进行半定量评价,即肉眼观察静息状态下收缩期内膜向心腔方向运动幅度及室壁增厚率,分别予以计分:运动正常(1 分)、运动减弱(2 分)、运动消失(3 分)、矛盾运动(4 分)和室壁瘤形成(5 分)。计算室壁运动积分指数(wall motion score index, WMSI), $WMSI = \text{各节段计分之和} / \text{计分节段数}$ 。WMSI 正常值为 1,指数越高心室功能越差,预后也越差。随着冠状动脉狭窄程度加重,心肌细胞出现缺氧坏死,除存在

RWMA 外, 梗死部位心肌还表现为室壁变薄, 心内膜回声增强, 严重者出现室壁瘤形成甚至穿孔。

然而, 除冠状动脉疾病, RWMA 也可能发生在其他情况下, 如心肌炎、结节病和应激性心肌病等。室间隔运动异常可出现在术后或左束支传导阻滞, 以及右心室压力或容量过大引起的右心室功能障碍^[2]。对于冠心病诊断, 肉眼观察会受到医生主观性的影响, 易导致假阴性和假阳性^[3]。

1.2 实时三维超声心动图对心脏结构及功能的评估

实时三维超声心动图 (real-time three-dimensional echocardiography, RT-3DE) 获取心脏立体信息并对获得的三维图像进行任意角度的切面提取, 无需几何形态的假设, 在评价左心室质量、射血分数以及容积方面与心脏磁共振测值一致性较好^[4]。RT-3DE 可直接计算左心室质量 (left ventricular mass, LVM) 和左心室质量指数 (left ventricular mass index, LVMI)。一项前瞻性研究^[5]对 4 988 例左心室肥厚的患者进行为期 15 年以上的随访, 发现左心室肥厚与冠心病预后事件 (心肌梗死和死亡) 的高风险相关。因此 LVM/LVMI 升高与冠心病不良预后密切相关, 且为独立风险因素。

RT-3DE 显示左心室 17 节段容积-时间曲线 (volume-time curves, VTC) 反映左心室容积随时间的动态变化, 测量左心室各节段之间到达最小容积的时间差异, 对 RWMA 的检出非常敏感^[6], 可用于评价左心室壁局部运动与左心室收缩期非同步运动。冠心病患者的 VTC 分散、紊乱且不规则, 缺血心肌运动幅度较正常心肌小, 梗死心肌呈反向运动, 收缩期达到最小容积时间滞后, 同时左心室收缩同步性发生不协调性改变。收缩期非同步化指数 (systolic dyssynchrony index, SDI) 是评价左心室不同步性的重要参数, 以心动周期的百分比表示, 消除心率对心动周期长短的影响^[7]。Marsan 等^[8]运用 RT-3DE 对接受心脏再同步化治疗 (cardiac resynchronization therapy, CRT) 的心力衰竭患者进行左心室收缩期不同步性评估, 结果发现当 SDI 截止值为 5.6% 时对定义左心室收缩期不同步具有临床指导意义。

2 超声心动图在冠心病诊疗中的研究进展

2.1 负荷超声心动图对心肌运动及灌注的评估

负荷超声心动图通过运动或药物诱发心肌缺血。运动负荷超声心动图是最符合人体生理状态的心脏负荷形式, 但存在图像采集时间严格, 易出现假阴性结果, 且患有运动系统、呼吸系统或全身性疾病的患者不能应用的缺点。对于可运动的患者, 运动负荷超声心动图被认为优于药物负荷的评估, 因为它保留了心肌正常的电机械反应^[9], 能提供患者心脏功能、心

力储备和心律失常的信息^[10]。

药物负荷超声心动图常用药物包括多巴酚丁胺、腺苷等。多巴酚丁胺负荷超声心动图 (dobutamine stress echocardiography, DSE) 可用于检查冠心病心肌梗死患者心肌存活性, 包括冬眠心肌和顿抑心肌^[11]。冬眠心肌在低剂量多巴酚丁胺作用下收缩功能增强, 随着药物剂量逐渐增加, 出现动力不足或无动力的“双相反应”表明心肌有活力, 其他反应则表明心肌收缩功能改善较小^[12]。顿抑心肌随着药物剂量的增加, 收缩功能持续改善。临床进行 DSE 时, 可能会引起头晕、血压升高等不良反应, 甚至诱发室性心律失常。腺苷是一种安全、有效的扩血管药物, 静脉泵入低剂量腺苷可增加冠状动脉血流速度, 高剂量腺苷可诱发“窃血现象”从而诊断心肌缺血^[11]。对于大多数患者首选药物是多巴酚丁胺而不是腺苷, 因为 DSE 诊断缺血心肌的敏感性更高^[13]。

冠状动脉血流储备 (coronary flow reserve, CFR) 指冠状动脉血管最大扩张的能力, 以充血血流量和静息血流量的比值表示。CFR < 2 的患者心血管不良事件发生率随着 CFR 的降低而急剧增加^[14]。应用脉冲波多普勒超声测量冠状动脉血流速度, 在腺苷输注后, 冠状动脉直径平均增加 30%, 但准确的计算方法应测量血流率, 即速度时间积分和横截面积的乘积^[15]。由于血流速度加快与血流量增加成正比, 测量冠状动脉血流速度储备 (coronary flow velocity reserve, CFVR) 可用于评估 CFR^[16]。在冠状动脉重度狭窄的患者中, CFVR < 2.2 时诊断具有高敏感性和高特异性^[17], CFVR > 2 时随访 15 个月期间预后良好^[18]。因此, 解释 CFVR 值最好是比较事件或治疗干预前后的 CFVR, 或与对照组进行比较, 而不是使用预定义的截止值。

2.2 心肌声学造影对心肌运动及灌注的评估

心肌声学造影 (myocardial contrast echocardiography, MCE) 具有良好的诊断性能^[19], 能有效反映心肌灌注情况, 评估心肌微循环状态。冠状动脉狭窄时, 微循环血流减少会导致超声增强剂充填时间延长^[20], 表现为灌注减低或缺损, 同时通过定量 MCE 指标来评估, 表现为心肌血容量、心肌血流量和心肌血流速度减少^[21]。Hickman 等^[22]在静息和负荷状态下进行 MCE 获得心肌血流量, 发现存在明显梗死心肌的患者 CFR 严重降低。既往研究^[23]对 10 例至少有 2 条冠状动脉造影正常的患者同时进行冠状动脉造影和 MCE, 发现 MCE 测得的心肌灌注储备与冠状动脉造影测得的 CFR 具有良好的相关性。临床上对冠心病患者应用经皮冠状动脉介入治疗, 部分患者在干预术后仍未实

现明显的心肌再灌注^[24]。若能在经皮冠状动脉介入治疗后早期对心肌灌注情况再评估,则能及时采取有效措施提高治疗效果并改善疾病预后。

目前,基于 MCE 的冠心病诊断尚无统一标准。在某些情况下,只是以二元“是或否”的方式评估心肌灌注情况^[24]。其次,高机械指数脉冲能量可破坏微循环中的造影微泡,微泡再入微血管的速率反映心肌血流量,需连续输注微泡、使用少量高机械指数脉冲以保持微循环中微泡的稳定浓度^[25]。显像时存在心尖及基底段心肌对比度降低、心腔增强剂过量造成基底段或中间段阴影等问题^[26],可通过专业人员的规范操作来校正。

2.3 斑点追踪成像对应变特性及储备的评估

运用斑点追踪成像(speckle tracking imaging, STI)能测量心室各节段心肌的应变及应变率,心肌应变是指心肌的形变程度,反映心肌特性及潜在的储备功能,包括:二维斑点追踪成像(2D-STI)和三维斑点追踪成像(3D-STI)。

左心室心肌分为呈纵向斜形走行的心内膜下心肌层、心外膜下心肌层及环向排列的中层心肌,由此 2D-STI 获取的心肌应变包括:心室长轴上的纵向应变、心室短轴上的圆周应变及径向应变^[27]。刘家佳等^[28]研究显示急性冠脉综合征患者的分层应变参数从心内膜至心外膜层呈梯度递减,这与心肌血管分布及形变特点有关^[29]。心内膜下心肌层的血管一般为终末血管,收缩期心内膜下心肌层形变(增厚和缩短)比心外膜下心肌层更大,故心肌缺血首先影响心内膜下心肌层,逐渐向心外膜下心肌层发展。对于左室射血分数保留的冠心病患者,无 RWMA 但存在冠状动脉狭窄,可通过左心室整体纵向应变(global longitudinal strain, GLS)发现缺血心肌^[30]。另外,负荷状态下测量 CFR < 2 和 CFR ≥ 2 的无阻塞性冠状动脉疾病患者的 GLS,发现在 CFR ≥ 2 患者中明显增加,在 CFR < 2 患者中明显降低,CFR 和整体纵向应变差值(ΔGLS)之间存在显著的负相关^[31]。这证实了 GLS 能反映亚临床期左心室收缩功能障碍和由于潜在心肌缺血导致的左心室收缩储备不足。

3D-STI 在 2D-STI 的基础上量化来自实时三维的应变数据,获得新的三维指标:评估心内膜面积变化的面积应变。本课题组前期研究^[32]发现,面积应变在区分运动异常的心肌节段与正常节段上具有高敏感性和高特异性,但 2D-STI 和 3D-STI 的圆周应变参数相关性不高,表明上述技术不可互换。

STI 通过应变分析在左心室节段和整体功能评估上广泛应用^[28,33-34],与特征追踪心脏磁共振应变密切

相关^[35],能检测各种心脏病于早期心肌缺血、亚临床期心肌损伤的功能异常,但其有负荷依赖性^[36]。与 2D-STI 相比,3D-STI 时间分辨率和空间分辨率相对较低,图像处理算法的标准化尚未建立^[37]。因此,在未来还需多中心大样本研究来验证 3D-STI 的预测能力,同时建立数据标准并实现将三维应变参数作为一个更有效的预测指标。

2.4 超声心肌做功对应变特性及储备的评估

针对 STI 的负荷依赖性,有学者^[38]在应变的基础上结合后负荷,提出压力-应变环的概念,获得心肌做功(myocardial work, MW)参数:整体做功指数(global work index, GWI)、整体有效做功(global constructive work, GCW)、整体无效做功(global wasted work, GWW)、整体做功效率(global work efficiency, GWE)。并且通过动物实验和临床研究证实无创和有创获得左心室峰值压力均具有良好的正相关性,故以肱动脉收缩压代替左心室峰值压力。

在正常情况下,心室同步收缩和舒张有利于心室射血,表现出高 GCW、GWE 和低 GWW,且对年龄和性别无很强的依赖性^[39]。当出现心肌缺血、束支传导阻滞等收缩不同步的情况时,心室射血期间心肌收缩时间延长,导致 GWE 减低和 GWW 升高。王岩等^[40]通过研究不同程度冠状动脉左前降支狭窄患者发现,随狭窄程度加重,重度狭窄患者 GWI、GCW 和 GWE 明显减低,GWW 进行性升高。这可能是因为严重缺血心肌丧失部分甚至全部收缩能力,导致收缩期心肌纤维发生被动伸展而非缩短,不利于左心室射血。然而,本课题组前期研究^[30]认为冠状动脉侧支循环的建立和再灌注使长期心肌缺血的冠心病患者在出现 RWMA 和左室射血分数降低的现象前 GCW 反而略有增加。心内膜下心肌更容易受到高负荷状态下血流动力学改变伴随缺血缺氧的影响,因而负荷 MW 可作为一种比 GLS 更敏感的参数用来评估冠心病患者早期左心室收缩功能及储备。另外,有研究^[41]证实接受 CRT 前左心室 GWE 低的患者预后更好,从而提出 GWE 可用来预测冠心病患者接受 CRT 的疗效和预后。

MW 评价冠心病患者心脏功能多应用于左心室,但右心室功能的评估价值也逐渐被重视。与左心室相比,右心室壁更薄,心肌弹性更低。当后负荷发生较大变化时,右心室 GLS 不适合评价右心室功能状态。Butcher 等^[42]评价左室射血分数降低的心力衰竭患者的右心室 MW 情况,发现右心室 GCW 与侵入性心导管检查获得的每搏量和每搏量指数密切相关。

作为评估心脏功能的新技术,MW 可更好地了解

不同病理状态下心室重塑的差异改变,实现节段心肌在心脏泵血作用下有效功和无效功的全程监测,但心血管疾病合并多发心律失常、严重瓣膜反流时会影响 MW 参数评估的准确性。右心室 MW 尚不具有针对特定解剖结构的评估流程,目前研究是基于左心室 MW 的技术衍生。期望伴随着 MW 的研发、更新及应用,该技术可推动临床实现冠心病全心新技术的功能评估和成果转化。

3 总结与展望

超声心动图从心脏结构及功能、心肌运动及灌注、应变特性及储备等方面在冠心病的病情评估、诊断治疗和预后预判中均发挥着重要作用。尽管每一种超声心动图技术都存在一定的局限性,但多数情况下其仍是兼具低成本、低风险且无创伤、无辐射的影像学方法。相信随着心脏超声新技术的研发及应用,超声心动图将有望更普遍、更精准地应用于冠心病的常规评估和全程诊疗中。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] 中国心血管健康与疾病报告编写组,胡盛寿. 中国心血管健康与疾病报告 2022 概要[J]. 中国循环杂志,2023,38(6):583-612.
- [2] 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.
- [3] Stankovic I, Putnikovic B, Cvjetan R, et al. Visual assessment vs. strain imaging for the detection of critical stenosis of the left anterior descending coronary artery in patients without a history of myocardial infarction[J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging,2015,16(4):402-409.
- [4] Velasco O, Beckett MQ, James AW, et al. Real-time three-dimensional echocardiography: characterization of cardiac anatomy and function-current clinical applications and literature review update [J]. Biore Open Access, 2017,6(1):15-18.
- [5] Kawel-Boehm N, Kronmal R, Eng J, et al. Left ventricular mass at MRI and long-term risk of cardiovascular events; the Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis (MESA)[J]. Radiology,2019,293(1):107-114.
- [6] Hadeed K, Hascoet S, Dulac Y, et al. Tethering of tricuspid valve resulting from aberrant tendinous cords mimic ebstein's anomaly, three-dimensional echocardiography approach[J]. Echocardiography,2014,31(4):E136-E137.
- [7] Cai Q, Ahmad M. Left ventricular dyssynchrony by three-dimensional echocardiography: current understanding and potential future clinical applications[J]. Echocardiography,2015,32(8):1299-1306.
- [8] Marsan NA, Bleeker GB, Ypenburg C, et al. Real-time three-dimensional echocardiography permits quantification of left ventricular mechanical dyssynchrony and predicts acute response to cardiac resynchronization therapy [J]. J Cardiovasc Electrophysiol,2008,19(4):392-399.
- [9] Parikh K, Choy-Shan A, Ghesani M, et al. Multimodality imaging of myocardial viability[J]. Curr Cardiol Rep,2021,23(1):5.
- [10] Palermi S, Sperlongano S, Mandoli GE, et al. Exercise stress echocardiography in athletes: applications, methodology, and challenges [J]. J Clin Med,2023,12(24):7678.
- [11] 陈颖,杨盟盟,王岳恒. 影像学评估心肌存活性的研究进展[J]. 中国心血管病研究,2023,21(8):763-768.
- [12] Lin Y, Guan X, Ren K, et al. Low-dose dobutamine stress myocardial contrast echocardiography for the evaluation of myocardial microcirculation and prediction of overall cardiac function recovery [J]. Exp Ther Med,2020,20(2):1315-1320.
- [13] Pellikka PA, Arruda-Olson A, Chaudhry FA, et al. Guidelines for performance, interpretation, and application of stress echocardiography in ischemic heart disease: from the American Society of Echocardiography [J]. J Am Soc Echocardiogr,2020,33(1):1-41.
- [14] Taqueti VR. Coronary flow reserve: a versatile tool for interrogating pathophysiology, and a reliable marker of cardiovascular outcomes and mortality [J]. Eur Heart J,2022,43(16):1594-1596.
- [15] Kiviniemi TO, Toikka JO, Koskenvuo JW, et al. Vasodilation of epicardial coronary artery can be measured with transthoracic echocardiography [J]. Ultrasound Med Biol,2007,33(3):362-370.
- [16] Iliceto S, Marangelli V, Memmola C, et al. Transesophageal Doppler echocardiography evaluation of coronary blood flow velocity in baseline conditions and during dipyridamole-induced coronary vasodilation [J]. Circulation,1991,83(1):61-69.
- [17] Wada T, Hirata K, Shiono Y, et al. Coronary flow velocity reserve in three major coronary arteries by transthoracic echocardiography for the functional assessment of coronary artery disease: a comparison with fractional flow reserve [J]. Eur Heart J Cardiovasc Imaging,2014,15(4):399-408.
- [18] Meimoun P, Benali T, Elmekies F, et al. Prognostic value of transthoracic coronary flow reserve in medically treated patients with proximal left anterior descending artery stenosis of intermediate severity [J]. Eur J Echocardiogr,2009,10(1):127-132.
- [19] Dijkmans PA, Senior R, Becher H, et al. Myocardial contrast echocardiography evolving as a clinically feasible technique for accurate, rapid, and safe assessment of myocardial perfusion; the evidence so far [J]. J Am Coll Cardiol, 2006,48(11):2168-2177.
- [20] Wei K, Ragosta M, Thorpe J, et al. Noninvasive quantification of coronary blood flow reserve in humans using myocardial contrast echocardiography [J]. Circulation,2001,103(21):2560-2565.
- [21] Lyu WY, Qin CY, Wang XT, et al. The application of myocardial contrast echocardiography in assessing microcirculation perfusion in patients with acute myocardial infarction after PCI [J]. BMC Cardiovasc Disord,2022,22(1):233.
- [22] Hickman M, Chelliah R, Burden L, et al. Resting myocardial blood flow, coronary flow reserve and contractile reserve in hibernating myocardium: implications for using resting myocardial contrast echocardiography vs dobutamine echocardiography for the detection of hibernating myocardium [J]. Eur J Echocardiogr,2010,11:756-762.
- [23] Bierig SM, Mikolajczak P, Herrmann SC, et al. Comparison of myocardial contrast echocardiography derived myocardial perfusion reserve with invasive determination of coronary flow reserve [J]. Eur J Echocardiogr,2009,10(2):250-255.
- [24] Ashraf T, Khan MN, Afaq SM, et al. Clinical and procedural predictors and short-term survival of the patients with no reflow phenomenon after primary percutaneous coronary intervention [J]. Int J Cardiol,2019,294:27-31.
- [25] Porter TR, Mulvagh SL, Abdelmoneim SS, et al. Clinical applications of ultrasonic enhancing agents in echocardiography: 2018 American Society of Echocardiography Guidelines Update [J]. J Am Soc Echocardiogr,2018,31(3):241-274.
- [26] 中国超声心动图学会,中华医学会超声医学分会浅表组织和血管学组,中国医药教育学会超声医学专业委员会. 慢性冠状动脉综合征负荷超声心动图检查临床实践指南(2023 版) [J]. 中华超声影像学杂志,2023,32(11):921-945.

- [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] Généreux 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