

二叶式主动脉瓣的超声心动图评估现状及进展

王代娇 宋宏宁 陈金玲

(武汉大学人民医院超声影像科,湖北 武汉 430060)

【摘要】 二叶式主动脉瓣(BAV)是一种先天性心脏瓣膜疾病,大多数早期常无明显症状,难以及时被诊断和干预,晚期易并发主动脉瓣狭窄或反流等瓣膜功能障碍,甚至导致主动脉病变。因此,早期准确评估 BAV 形态及功能从而对其进行及时有效干预是临床诊治的重点。且随着经导管主动脉瓣植入术在 BAV 中应用增加,充分评估其主动脉根部结构对指导手术及术后评估尤为重要。现综述超声心动图在 BAV 患者评估中的应用,以期对 BAV 的早期筛查、诊断、手术时机的选择及术后随访提供依据。

【关键词】 主动脉瓣畸形;二叶式主动脉瓣;超声心动图

【DOI】10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2023.10.008

Current Situation and Progress of Echocardiography in Evaluation of Bicuspid Aortic Valve

WANG Daijiao, SONG Hongning, CHEN Jinling

(Department of Ultrasound, Renmin Hospital of Wuhan University, Wuhan 430060, Hubei, China)

【Abstract】 Bicuspid aortic valve (BAV) is a congenital heart valvular disease. In the early stage, most patients often have no obvious symptoms, so it is difficult to make diagnosis and intervention timely. And in the late stage, it is easy to be complicated with valvular dysfunction such as aortic stenosis or regurgitation, and even lead to aortic disease. Therefore, it is very important to assess the BAV morphology or function early and accurately for effectively intervention, which is the key point of clinical diagnosis and treatment. With the increasing application of transcatheter aortic valve implantation in patients with BAV, it is particularly important to fully evaluate the structure of aortic root for operation guidance and postoperative evaluation. This article reviews the application of echocardiography for patients with BAV, in order to provide basis for early screening, diagnosis, operation and postoperative follow-up of BAV.

【Key words】 Aortic valve malformation; Bicuspid aortic valve; Echocardiography

二叶式主动脉瓣(bicuspid aortic valve, BAV)是最常见的先天性心脏瓣膜疾病,患病率为 1% ~ 2%, 男性发病率几乎是女性的 3 倍^[1-2]。BAV 可影响瓣膜功能,从无功能障碍到严重的主动脉瓣狭窄(aortic stenosis, AS)或主动脉瓣反流(aortic regurgitation, AR)。此外,BAV 还可伴有主动脉病变、感染性心内膜炎、心肌病或其他先天性疾病^[3]。因此,早期准确评估 BAV 形态及功能对临床上制定干预策略和预防各种并发症至关重要。超声心动图在临床实践中是用于全面评估 BAV 的一线成像技术^[2]。现分别从 BAV 形态学、并发症、相关主动脉病变及临床干预的超声心动图评估等方面进行综述,并对未来评估方向予以展望,为 BAV 患者个体化诊疗提供依据。

1 BAV 发病机制及分型

正常主动脉瓣由 3 个半月瓣组成,称三叶式主动

脉瓣(tricuspid aortic valve, TAV),根据瓣膜位置及冠状动脉开口可将其分为左、右和无冠状动脉瓣^[4]。而 BAV 因主动脉瓣发育异常导致相邻两个半月瓣形成融合瓣,较大的融合瓣上可见融合嵴,使瓣叶不对称^[5]。胚胎学研究^[1]发现,基因突变导致的神经嵴细胞迁移是 BAV 融合嵴形成的主要原因。另有研究^[6]称多个等位基因相互作用导致了 BAV,遗传率为 90%。因此,《2020 ACC/AHA 心脏瓣膜病管理指南》^[7]建议对 BAV 患者一级家庭成员有必要进行超声心动图筛查。

从外科角度来看, Sievers 分型^[8]广泛应用于临床,根据融合嵴的数量将 BAV 分为 3 型:Type 0 型(无嵴)、Type I 型(1 个嵴)和 Type II 型(2 个嵴),其中最常见的是 Type I 型,约占 90%。根据嵴的空间位置又分为左右冠窦融合型(RL 型)、右无冠窦融合型(RN

型)、左无冠窦融合型(LN型),其中RL型最常见,约占80%^[8]。而最新国际共识^[3]认为仅基于外科角度的Sievers分型仍有局限性,因此新的分型为:融合型、双窦型和部分融合型。其中融合型最常见,占90%~95%,相当于Type I型。双窦型BAV并不常见,占5%~7%,由大小、形状大致相同的两个瓣叶构成,分前对后表型和侧对侧表型。部分融合型的流行率尚不清楚,表现为典型的三叶瓣膜,但在连合底部可见<50%的瓣尖融合。至于Sievers分型中的Type II型,共识认为称单叶瓣较为合适。

2 BAV 超声心动图评估现状及进展

2.1 形态学

经胸超声心动图(transthoracic echocardiography, TTE)在临床实践中是用作诊断BAV及瓣膜表型的一线成像方法^[2,9]。TTE基于胸骨旁左心室长轴和大动脉短轴切面能准确诊断80%~90%的BAV^[9]。在长轴切面可见融合瓣叶收缩期隆起及瓣叶舒张期偏心闭合线;短轴切面显示舒张期有两个瓣叶,有时可见融合嵴,收缩期瓣叶明显分离,可见典型主动脉瓣“鱼嘴样”瓣口及瓣叶连合线^[9]。

但TTE分辨率有限,特别是当瓣叶增粗钙化、合并炎症时,极易将其误诊为退行性瓣膜病或风湿性瓣膜病^[2]。经食管超声心动图(transesophageal echocardiography, TEE)以更好的分辨率提高了BAV诊断的准确性,准确率为90.1%,且在区分BAV表型上比TTE更有优势,因为TEE可清楚显示融合嵴存在与否、瓣叶融合情况、连合线和冠状动脉开口位置^[10]。

Yakar等^[10]研究了二维(2-dimensional, 2D)-TTE、2D-TEE和三维(3-dimensional, 3D)-TEE诊断BAV表型的准确性,认为TEE在鉴别BAV表型方面有很好的诊断价值,且3D-TEE较2D-TEE可立体观察主动脉瓣的形态、数目、瓣口上下结构全貌及钙化等解剖细节。Levack等^[11]在此基础上对BAV和TAV人群使用定制图像分析软件评估发现,基于单模态3D-TEE的建模可定量描述主动脉瓣和主动脉根部的几何形状。Yeats等^[12]更是将3D打印和计算机建模结合起来作为BAV患者新的术前筛查技术,以模拟装置的启闭来评估压力梯度和流体滞留区,尤其是在接受经导管主动脉瓣植入(transcatheter aortic valve implantation, TAVI)评估的年轻BAV患者中,通过提供装置功能及耐久性等相关信息预测术中和术后风险,来评估患者是否适合手术。

2.2 瓣膜钙化

有研究^[13]表明瓣膜变形是临床评价瓣膜功能的重要参数,因为异常主动脉瓣瓣叶变形会导致瓣膜间质细胞信号改变,进而导致钙化的发生和进展,而

BAV由于其瓣叶形态异常会更易发生钙化。Rego等^[13]开发了一种基于临床成像模式的计算建模管道,利用TAV和BAV人群实时3D-TEE数据,分别生成瓣叶局部变形信息,这种变形分析首次量化了TAV与BAV瓣叶在人体内功能性变形之间的差异,且预测了主动脉瓣钙化的发生和进展。

TTE评估BAV瓣膜钙化同样基于胸骨旁左心室长轴和大动脉短轴切面,特点是瓣叶增厚、回声增强,并根据钙化程度对其进行半定量评估,其中有按瓣叶钙化厚度进行评分:0分(正常)、1分(<2 mm)、2分(2~4 mm)、3分(>4 mm)和4分(>6 mm)^[14]。但当钙化程度为中度以上时,形成的声影可能会模糊瓣环边界,掩盖潜在瓣叶结构,TTE及TEE诊断BAV的敏感性和特异性都会降低,且TEE还是一种半侵入性检查^[10]。考虑到上述局限性,其他成像技术,如CT和心脏磁共振可提供很大帮助,且心脏磁共振与TEE在评估BAV表型上无明显差异^[9]。虽然主动脉瓣钙化的超声心动图半定量评分已得到验证,但在对钙化精准的定位和量化上CT明显优于超声心动图^[2]。通过CT计算可得到主动脉瓣钙化评分,根据其分值高低评估瓣膜钙化严重程度。近期研究^[15]显示,伴有重度AS的BAV患者主动脉瓣钙化评分明显升高。然而,考虑到CT不可避免的辐射暴露风险,目前许多研究更倾向使用TEE来诊断BAV^[10]。

2.3 瓣膜功能障碍

在BAV成年患者中,最常见的并发症是瓣膜功能障碍,即AS和/或AR,大多数情况下需进行主动脉瓣置换(aortic valve replacement, AVR)或修复术^[2]。BAV患者表型、融合嵴及一些心血管危险因素的存在与AS的发生有关,性别和瓣膜脱垂则与AR的发生有关^[16]。TTE是以血流动力学评估和量化主动脉瓣功能障碍的最佳方法^[2-3]。

TTE评估BAV-AS程度分级基于TAV相同参数,主要是主动脉峰值流速、平均跨瓣压差以及主动脉瓣口面积缩小程度,利用连续多普勒在心尖五腔心切面将取样容积置于主动脉瓣口即可获得^[2,17]。TTE同样可评估BAV-AR严重程度,在胸骨旁左心室长轴切面可见主动脉反流束进入左心室,但由于BAV形态异质性常形成明显的偏心射流,建议使用缩流颈宽度、有效反流口面积以及反流容积来进行分级^[17]。虽然缩流颈宽度可应用于BAV偏心反流束的评估,但可行性有限,建议使用3D-TEE改善有效反流口面积及反流容积的量化以评估AR^[17]。当偏心射流难以量化时,心脏磁共振可发挥更好的作用,特别是当降主动脉内出现全舒张期逆行血流时,说明存在显著AR,且随着四维血流MRI技术的发展,其在评估AR方面将

会越来越精确^[2]。

2.4 相关主动脉病变

研究^[18]发现 >50% 的 BAV 患者伴有主动脉病变。其中以升主动脉扩张最常见,扩张也可累及主动脉根部或主动脉弓,分为上升型、根型和扩展型^[1,3]。因此,BAV 发生胸主动脉瘤的风险至少比 TAV 早 10 ~ 15 年,发生主动脉夹层的概率是 TAV 的 5 ~ 10 倍^[19]。导致 BAV 升主动脉扩张的病因和发病机制仍是一个有争议的话题^[1]。有研究^[19]称 BAV 长期瓣膜畸形导致血流动力学异常,使主动脉壁剪切力增加,继发一系列病变。另有研究^[6]表明,除了孤立的血流动力学因素外,内在病理似乎也是导致主动脉扩张的重要因素。因此,BAV 相关的主动脉病变可归因于多种因素^[1,6]。

主动脉直径是主动脉夹层的良好预测指标,因此,准确测量其直径对主动脉根部及升主动脉扩张预防性手术的判断、随访和时机选择至关重要^[5]。超声心动图是临床上测量胸主动脉及评估主动脉其他并发症的一线成像方法^[2]。Parker 等^[20]就利用超声心动图对 589 例 BAV 患者主动脉扩张模式进行了回顾性研究,证实 RN 型与升主动脉扩张进展相关。然而 Choi 等^[21]利用 TTE 和 CT 评估 BAV 形态及瓣膜功能以探究与主动脉病变之间的关系,研究显示 BAV 形态特征不是主动脉扩张的决定因素,年龄、性别和 AS 严重程度才是主动脉病变的预测因素。

与传统参数主动脉直径相比,有研究^[1,19]指出 BAV 早期主动脉壁弹性受损是主动脉病变的病理生理机制之一,能更早地反映主动脉病变。Longobardo 等^[19]利用超声斑点追踪技术评估 BAV 主动脉壁弹性发现主动脉壁纵向应变绝对值较低,这与行主动脉预防性手术和其进行性扩张显著相关,有助于识别主动脉直径在正常范围内但需密切随访的高危患者。Carlos 等^[22]同样利用斑点追踪技术发现 BAV 主动脉整体纵向应变与 AR 显著相关。

另外,关于 BAV 主动脉内血流模式异常的研究,新的四维血流 MRI 技术是一强大工具。有研究^[23]通过其获取的速度、涡量、壁剪切力等参数发现 BAV 患者主动脉内血流不对称并伴有涡流形成,进而导致主动脉扩张,且表型、血流模式不同。

2.5 超声心动图在 BAV 临床干预中的评估价值

超声心动图准确评估 BAV 形态及功能对临床干预必要性及策略制定至关重要。《2020 ACC/AHA 心脏瓣膜病管理指南》^[7]指出,无论症状如何,主动脉窦部或升主动脉直径 ≥ 5.5 cm 的 BAV 患者均建议手术干预,且一旦通过 TTE 等成像技术检测到主动脉根部或升主动脉 ≥ 4.0 cm,建议进行终身连续评估。有研究^[4]通过 TTE 测量升主动脉直径来评估 BAV 和 TAV

行 AVR 后的中期疗效及相关危险因素,指出与 TAV 人群相比,BAV 患者术后升主动脉更易继续扩张,且 BAV-Type I 型、年龄 ≥ 40 岁、AR 与术后升主动脉持续扩张呈独立正相关。

BAV 伴瓣膜功能障碍的手术治疗指征依赖于 TTE^[2]。建议对 TTE 测得左心室收缩末期内径 ≥ 50 mm 或该内径与体表面积之比 > 25 mm/m²、左室射血分数 $\leq 50\%$ 的无症状患者行 AVR^[2]。研究^[24]显示 AS 继发的慢性压力超载和 AR 继发的容量超载损害了左心室功能,与 TAV 对照组相比,BAV 左心室心肌力学显著受损,且与患者出现症状和需 AVR 的风险增加相关。Kong 等^[24]基于超声二维斑点追踪技术发现尽管 BAV 患者左室射血分数正常,其纵向应变值仍显著降低, $\leq 13.6\%$ 提示左心室收缩功能障碍,且与联合终点风险(如达到手术指征、行 AVR、死亡)增加独立相关。

指南^[25]建议对有症状的 BAV 重度 AS 患者进行干预,通常在临床上选择 AVR 或 TAVI。对于低压差-低流速伴左心室功能障碍的 AS 患者,行静息和低剂量多巴胺负荷超声心动图有助于鉴别真性与假性重度 AS,且需着重评估左心室收缩储备(左室射血分数或整体纵向应变值的变化、每搏输出量增加 $\geq 20\%$ 及跨瓣压差和瓣口面积的变化),储备不足会增加不良事件的风险,若负荷超声心动图下无左心室收缩储备,TAVI 可成为良好的手术替代方案^[26]。目前的研究^[12,18]发现,TAVI 对 BAV 与 TAV 人群疗效相同,但 BAV 患者更易发生瓣周漏、瓣膜移位等并发症,因此,精准的术前评估、合适的人工瓣膜选择对计划和成功实施 TAVI 至关重要。长期以来,CT 是 TAVI 术前评估及指导瓣膜型号选择的首选方法,但因 CT 有辐射暴露等风险,3D-TEE 成为重要的替代检查方法,不仅可在术前评估主动脉瓣叶形态和功能,测量主动脉根部结构相关参数,还可用于术中连续监测以实时指导 TAVI 术中人工瓣膜释放及术后即刻瓣膜功能评估,缺点在于需全身麻醉及探头可能阻挡透视野^[17]。有研究^[27]对拟行 TAVI 的 BAV 患者术前进行 3D-TEE 和 CT 检查,将所测得主动脉瓣环相关参数进行分析发现,二者的测量值有较好的一致性,且所预测的瓣膜型号无显著性差异,因此认为在患者肾功能不全或对比剂过敏等特殊情况下,3D-TEE 可作为 CT 的替代手段,为 TAVI 提供瓣膜型号选择。

与 AVR 相比,保留瓣膜的修复术已日益演变成可替代的治疗手段^[28]。TEE 对确定 BAV-AR 的可修复性方面起着关键作用,且有研究^[29]指出 BAV 修复成功率高于 TAV。de Kerchove 等^[29]就在术前用 TEE 测量非融合瓣叶的连合角度以判断瓣叶的对称性,这有助于临床医生提出有针对性的修复方案,连合角度越

接近 180° 修复成功率越高。另外, Levack 等^[11]提出新指标(吻合口高度、瓣膜上隆起指数、瓣膜下隆起指数)对主动脉根部复合体进行全面、定量的描述,可用于瓣膜可修复性的术前评估以及术后耐久性的监测。

3 展望及小结

TTE 是评估 BAV 瓣膜形态学、血流动力学的一线成像技术^[2-3]。TEE 比 TTE 诊断 BAV 更具优势^[2]。当需要对 BAV 患者瓣膜钙化进行准确的定性、定量评估时,相比于 3D-TEE,更推荐使用 CT。对于 BAV 相关主动脉疾病血流动力学变化的评估,心脏磁共振尤其是四维血流 MRI 技术有望成为研究 BAV 主动脉血流动力学改变的主要手段^[30]。

3D 打印和计算机建模技术可准确构建 BAV 主动脉根部的几何形状,并可通过术前模拟预测术后瓣周漏、冠状动脉阻塞来提供更多关于 BAV 患者是否适合 TAVI 的信息^[12]。近年来,随着 3D-TEE 自动分析软件的推广应用,BAV 相关人工智能分析将成为未来的研究方向^[12]。

总之,超声心动图虽在某些情况下受限于分辨率和主观经验的影响,但仍是一种准确、无创、便捷、价廉和可重复的影像学技术,可作为 BAV 患者早期筛查和诊断的常规方法,建立以超声心动图为主的多模态成像模式对 BAV 患者进行评估,对实现该类患者的个体化诊疗具有重要意义。

参考文献

- [1] Rashed ER, Dembar A, Riasat M, et al. Bicuspid aortic valves: an up-to-date review on genetics, natural history, and management [J]. *Curr Cardiol Rep*, 2022, 24(8):1021-1030.
- [2] Evangelista Masip A, Galian-Gay L, Guala A, et al. Unraveling bicuspid aortic valve enigmas by multimodality imaging: clinical implications [J]. *J Clin Med*, 2022, 11(2):456.
- [3] Michelen HI. Speaking a common language: the international consensus on bicuspid aortic valve nomenclature and classification [J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2022, 11(4):402-417.
- [4] Liu L, Li T, Xu B, et al. Mid-term follow-up of aortic valve replacement for bicuspid aortic valve [J]. *Cardiol Young*, 2021, 31(8):1290-1296.
- [5] Vis JC, Rodríguez-Palomares JF, Teixidó-Tura G, et al. Implications of asymmetry and valvular morphotype on echocardiographic measurements of the aortic root in bicuspid aortic valve [J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2019, 32(1):105-112.
- [6] Bravo-Jaimes K, Prakash SK. Genetics in bicuspid aortic valve disease: where are we? [J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 2020, 63(4):398-406.
- [7] Otto CM, Nishimura RA, Bonow RO, et al. 2020 ACC/AHA Guideline for the Management of Patients With Valvular Heart Disease: Executive Summary: A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on Clinical Practice Guidelines [J]. *Circulation*, 2021, 143(5):e35-e71.
- [8] Sievers HH, Stierle U, Mohamed SA, et al. Toward individualized management of the ascending aorta in bicuspid aortic valve surgery: the role of valve phenotype in 1362 patients [J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2014, 148(5):2072-2080.
- [9] Michelen HI, Chandrasekaran K, Topilsky Y, et al. The bicuspid aortic valve condition: the critical role of echocardiography and the case for a standard nomenclature consensus [J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 2018, 61(5-6):404-415.
- [10] Yakar Tülüce S, Tülüce K, Şimşek EÇ, et al. Assessment of bicuspid aortic valve phenotypes and associated pathologies: a transesophageal echocardiographic study [J]. *Turk Kardiyol Dern Ars*, 2017, 45(8):690-701.
- [11] Levack MM, Mecozzi G, Jainandunsing JS, et al. Quantitative three-dimensional echocardiographic analysis of the bicuspid aortic valve and aortic root: a single modality approach [J]. *J Card Surg*, 2020, 35(2):375-382.
- [12] Yeats BB, Yadav PK, Dasi LP, et al. Transcatheter aortic valve replacement for bicuspid aortic valve disease: does conventional surgery have a future? [J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2022, 11(4):389-401.
- [13] Rego BV, Pouch AM, Gorman JR 3rd, et al. Patient-specific quantification of normal and bicuspid aortic valve leaflet deformations from clinically derived images [J]. *Ann Biomed Eng*, 2022, 50(1):1-15.
- [14] Faggiano A, Santangelo G, Carugo S, et al. Cardiovascular calcification as a marker of increased cardiovascular risk and a surrogate for subclinical atherosclerosis: role of echocardiography [J]. *J Clin Med*, 2021, 10(8):1668.
- [15] Choi BH, Ko SM, Shin JK, et al. Association between aortic valvular calcification and characteristics of the aortic valve in patients with bicuspid aortic valve stenosis [J]. *Acta Radiol*, 2019, 60(4):468-477.
- [16] Shang M, Kahler-Quesada A, Mori M, et al. Progression of aortic stenosis in patients with bicuspid aortic valve [J]. *J Card Surg*, 2021, 36(12):4665-4672.
- [17] Kong WKF, Delgado V, Bax JJ. Bicuspid aortic valve: what to image in patients considered for transcatheter aortic valve replacement? [J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2017, 10(9):e005987.
- [18] Xiong TY, Ali WB, Feng Y, et al. Transcatheter aortic valve implantation in patients with bicuspid valve morphology: a roadmap towards standardization [J]. *Nat Rev Cardiol*, 2023, 20(1):52-67.
- [19] Longobardo L, Carerj S, Bitto A, et al. Bicuspid aortic valve and aortopathy: novel prognostic predictors for the identification of high-risk patients [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2021, 22(7):808-816.
- [20] Parker MW, Muchnik RD, Ogunsa A, et al. Serial echocardiography for valve dysfunction and aortic dilation in bicuspid aortic valves [J]. *Echocardiography*, 2021, 38(3):394-401.
- [21] Choi BH, Ko SM, Shin JK, et al. The association between morphological and functional characteristics of the bicuspid aortic valve and bicuspid aortopathy [J]. *Korean J Radiol*, 2021, 22(6):890-900.
- [22] Carlos T, Freitas AA, Alves PM, et al. Aortic strain in bicuspid aortic valve: an analysis [J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2021, 37(8):2399-2408.
- [23] Rodríguez-Palomares JF, Dux-Santoy L, Guala A, et al. Aortic flow patterns and wall shear stress maps by 4D-flow cardiovascular magnetic resonance in the assessment of aortic dilatation in bicuspid aortic valve disease [J]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2018, 20(1):28.
- [24] Kong WKF, Vollema EM, Prevedello F, et al. Prognostic implications of left ventricular global longitudinal strain in patients with bicuspid aortic valve disease and preserved left ventricular ejection fraction [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2020, 21(7):759-767.
- [25] Vahanian A, Beyersdorf F, Praz F, et al. 2021 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease [J]. *Eur Heart J*, 2022, 43(7):561-632.
- [26] Citro R, Bursi F, Bellino M, et al. The role of stress echocardiography in valvular heart disease [J]. *Curr Cardiol Rep*, 2022, 24(10):1477-1485.
- [27] 孙艳丹, 李昱茜, 孟欣, 等. 三维经食管超声心动图在二叶式主动脉瓣狭窄经导管主动脉瓣置入术中的应用研究 [J]. *临床心血管病杂志*, 2022, 38(5):360-364.
- [28] Ehrlich T, de Kerchove L, Vojacek J, et al. State-of-the art bicuspid aortic valve repair in 2020 [J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 2020, 63(4):457-464.
- [29] de Kerchove L, Mastrobuoni S, Froede L, et al. Variability of repairable bicuspid aortic valve phenotypes: towards an anatomical and repair-oriented classification [J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2019, 56(2):351-359.
- [30] Lee J, El HN, Pathrose A, et al. Bicuspid aortic valve morphology and hemodynamics by same-day echocardiography and cardiac MRI [J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2022, 38(9):2047-2056.

收稿日期:2022-10-31