

超声心动图在经导管主动脉瓣置换术前筛查中的应用及进展

余蕾 刘先宝 范嘉祺 王建安



王建安



余蕾

● 引言

经导管主动脉瓣置换术 (transcatheter aortic valve replacement, TAVR) 已成为一种可接受的外科手术的替代方法, 可用于外科手术禁忌或高危的有症状的重度主动脉瓣狭窄 (aortic stenosis, AS) 患者^[1]。随着 TAVR 手术指征扩展到中、低危患者^[2-3], 心血管并发症和手术风险可能会减轻, 但术前仍需要对心脏变化进行全面的解剖学结构和功能评估, 因此超声心动图仍将在疾病诊断和患者管理中继续发挥着重要的作用。在本文中, 我们将阐述超声心动图在 TAVR 术前筛查中的应用。

TAVR 术前超声心动图综合评估内容

一、主动脉瓣及根部

1. 主动脉瓣形态
 - (1) 确认病因
 - (2) 瓣叶数目 (二叶瓣 / 三叶瓣)
 - (3) 钙化的程度及分布
2. 主动脉瓣瓣环测量
 - (1) 主动脉瓣环内径
 - (2) 主动脉窦内径
 - (3) 主动脉窦管交界内径
 - (4) 主动脉瓣瓣环距冠状动脉的高度
3. 主动脉瓣血流动力学
 - (1) 主动脉瓣峰值流速, 峰值 / 平均跨瓣压差, 瓣口面积
 - (2) 无量纲指数
 - (3) 每搏量 (stroke volume, SV) / 每搏量指数 (stroke volume index, SVI)
 - (4) 主动脉瓣反流的评估
4. 左心室流出道
 - (1) 左心室流出道内径
 - (2) 钙化分布

二、二尖瓣

1. 二尖瓣反流的机制及程度
2. 二尖瓣狭窄的存在及程度
3. 瓣环及瓣叶钙化情况

三、左心室

1. 排除心腔内血栓
2. 室壁运动的评估
3. 射血分数 (ejection fraction, EF)
4. SV、SVI、心输出量 (cardiac output, CO)

四、右心室

1. 右心室大小和功能
2. 三尖瓣形态和功能
3. 肺动脉压力评估

五、心包积液

作者单位: 浙江大学医学院附属第二医院心内科, 杭州 310009

通信作者: 王建安, Email:wangjianan111@zju.edu.cn

基金项目: 浙江省科学技术厅重大科技专项重大社会发展项目 (2015C03028)

引用格式: 余蕾, 刘先宝, 范嘉祺, 等. 超声心动图在经导管主动脉瓣置换术前筛查中的应用及进展 [J/OL]. 中华心血管病杂志 (网络版), 2019, 2: e1000028 (2019-12-06). http://www.cvjc.org.cn/index.php/Column/columncon/article_id/194. DOI:10.3760/cma.j.issn.2096-1588.2019.1000028.

本文编辑: 史红

收稿日期: 2019-06-05

录用日期: 2019-07-03

DOI: 10.3760/cma.j.issn.2096-1588.2019.1000028

● 主动脉瓣形态结构及 AS 严重程度评估

一、主动脉瓣形态结构评估

AS 最常见的病因是主动脉瓣钙化性狭窄以及风湿性病变，在 TAVR 术前主动脉瓣形态结构评估的内容主要包括瓣叶数目、厚度、钙化程度及分布部位，超声心动图有着非常重要的作用及价值。尽管多种影像学方法均可以评估主动脉瓣和根部的形态结构，但主动脉瓣瓣叶数目的诊断仍主要采用超声心动图（图 1）。

主动脉瓣的解剖学评估是基于短轴和长轴的图像综合判断瓣叶数目，并描述其移动度、厚度和钙化情况。二叶主动脉瓣收缩期瓣膜开放的短轴视图应该表现出典型“鱼嘴”外观，而从长轴观看则常常表现为“圆顶样”隆起。对于没有致密钙化的优质经胸图像的患者，二叶主动脉瓣的诊断敏感度和特异度分别 > 70% 和 > 90%^[4]。然而，部分患者瓣叶严重钙化而导致无法确定瓣叶数目时，彩色多普勒可能有助于二叶瓣和三叶瓣的鉴别。另外，对于图像质量不清晰的患者，经食道超声也有助于鉴别诊断。

此外，钙化的部位与严重程度也是瓣叶形态学评估的重要方面。通过评估钙化部位可以预测瓣周漏的位置。左心室流出道的钙化也可以预测瓣周漏的发生^[5]。部分患者由于严重的钙化可能导致术中瓣膜置入过程中瓣叶上的钙化移位而堵塞冠状动脉开口。此外，在低流量、低跨瓣压差的患者中，钙化的程度也有助于区分真性重度 AS 患者和假性重度 AS 患者^[6]。

以往多采用多探测器计算机体层扫描（multidetector computed tomography, MDCT）评估主动脉瓣钙化程度（aortic valve calcification, AVC）。由于 MDCT 评估需要转诊且耗时长，且对患有肾功能不全的患者不适用，因此近年来提出了一种基于三维经胸超声心动图（three dimensional transthoracic echocardiography, 3D-TTE）的新方法来评估 AVC。该方法与 MDCT 类似，通过使用专用软件自动计算图像处理，从 3D-TTE 收缩期主动脉瓣区域的全容积数据集中，对主动脉瓣环区进行半自动勾画后，通过应用区域生长算法自动识别出高信号结构，并使用所提供的主动脉瓣钙体积分化的二元变换图像计算 AVC 评分，即三维经胸超声心动图主动脉瓣钙化评估（three dimensional transthoracic echocardiographic aortic valve calcification, AVC-3DEcho）。AVC-3DEcho 计算的 AVC 评分与钙重量和 MDCT 钙化评分显示出良好的相关性。这表明三维超声心动图可能作为 MDCT 的替代方案，以识别具有严重 AS 的患者^[7]。

二、AS 严重程度的评估

超声心动图是评估 AS 严重程度的主要工具。根据 2017 年欧洲心血管影像学会与美国超声心动图学会更新的关于超声心动图评估 AS 的建议^[8]，这些参数可以被分为依赖于流量的测量值和独立于流量的测量值（表 1）。指南中 I 级推荐（适用于所有 AS 的患者）用于临床评估 AS 严重程度的主要血流动力学参数是：

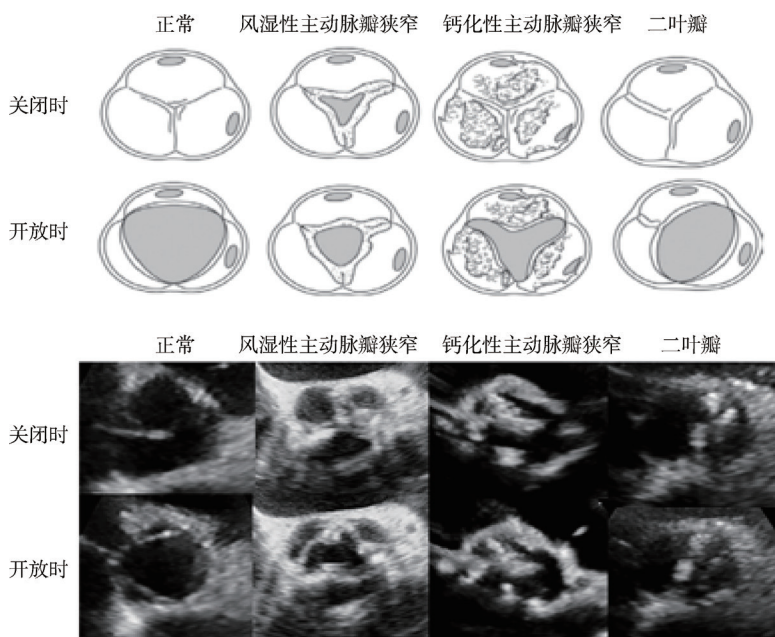


图 1 正常、风湿性主动脉瓣狭窄、钙化性主动脉瓣狭窄及二叶瓣的解剖结构图和超声下形态图。解剖结构图摘自参考文献 [8]

表1 主动脉瓣狭窄程度的分级标准

参数	主动脉瓣狭窄程度		
	轻度	中度	重度
定量参数（独立于流量）			
峰值流速（m/s）	2.0~2.9	3.0~3.9	≥ 4.0
平均压差（mmHg）	< 20	20~39	≥ 40
定量参数（依赖于流量）			
主动脉瓣口面积（cm ² ）	> 1.5	1.1~1.5	≤ 1.0
主动脉瓣口面积指数（cm ² /m ² ）	> 0.85	0.61~0.85	≤ 0.6
速度比值	> 0.5	0.26~0.50	≤ 0.25

注：1 mmHg=0.133 kPa

- (1) 主动脉瓣射流速度；(2) 主动脉瓣平均跨瓣压差；
(3) 主动脉瓣瓣口面积（aortic valve area, AVA）。

由于钙化灶的影响，主动脉瓣射流的方向往往不可预知，而且多普勒测速对声束与血流方向夹角的要求较高，因此需要耐心仔细地调整探头位置及角度，并从多个切面进行测量，以便获得最高速度信号。应该以记录到一个外缘浓密、清晰平稳的最大速度曲线为准（图2）。通过勾勒以及连续方程式可以得到速度-时间积分（velocity time integral, VTI）和平均跨瓣压差。

在主动脉瓣口面积的测量中，左心室流出道（left ventricular outflow tract, LVOT）的测量误差是最容易导致瓣口面积出现误差的原因。LVOT直径测量需要在胸骨旁长轴主动脉根部放大切面进行，于收缩中期测量从室间隔内侧缘至二尖瓣前叶内侧缘，并与主

动脉瓣环水平平行。如果LVOT有钙化灶，则需要避开钙化的部位进行测量。为了使测量值更为精确，需要使用聚焦（ZOOM）模式。由于LVOT这部分区域呈矩形并且缺乏伸展性和收缩性，因此一般情况下在距主动脉瓣环下方至1.0 cm区域测量可获得相同的结果（图3）。而对于室间隔基底段心肌增厚并突向LVOT的患者，通常在主动脉瓣环下方测量则更为精确。LVOT流速的测量应在心尖五腔心切面或心尖三腔心切面进行，用脉冲多普勒使取样点放置在左心室侧接近血流加速区的位置，VTI通过描记速度频谱来测量（图4）。

由于LVOT直径的测量在AVA的计算中是平方值，因此这种测量的不准确性可能导致误差。无量纲指数不依赖于LVOT直径的测量。使用 V_{LVOT}/V_{AV} 比值或 VTI_{LVOT}/VTI_{AV} 比值可以很好地反映AVA。多普勒速度指数≤0.25提示瓣口重度狭窄。研究表明，常规捕获的主动脉瓣峰值速度、平均跨瓣压差和无量纲指数数据在评估严重AS时比AVA更准确^[9]。

对于体重偏小或偏大的患者，美国超声心动图学会建议采用瓣口面积与体表面积（body surface area, BSA）的比值进行校正，特别是患者身高<135 cm，BSA<1.5 m²或体重指数<22 kg/m²者。美国心脏病学院（American College of Cardiology, ACC）指南将≤0.6 cm²/m²的AVA定义为重度狭窄。然而，BSA可能不适用于肥胖患者真实的瓣口面积。

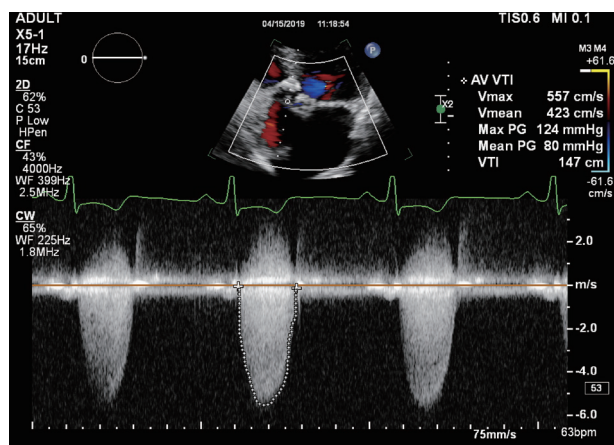


图2 连续多普勒测量主动脉瓣狭窄的最大流速（Vmax）和平均跨瓣压差（mean pressure gradient, PG）

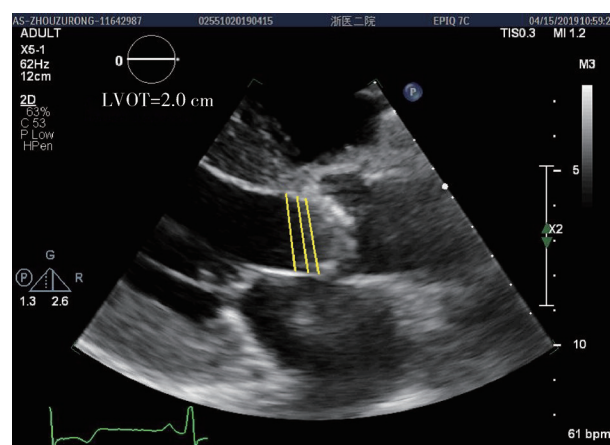


图3 左心室流出道内径的测量。左心室流出道测量可于收缩中期主动脉瓣环下方0.3~1.0 cm之间测量室间隔内侧缘至二尖瓣前叶之间的距离，患者在黄线所测量的区域均可获得相同的结果

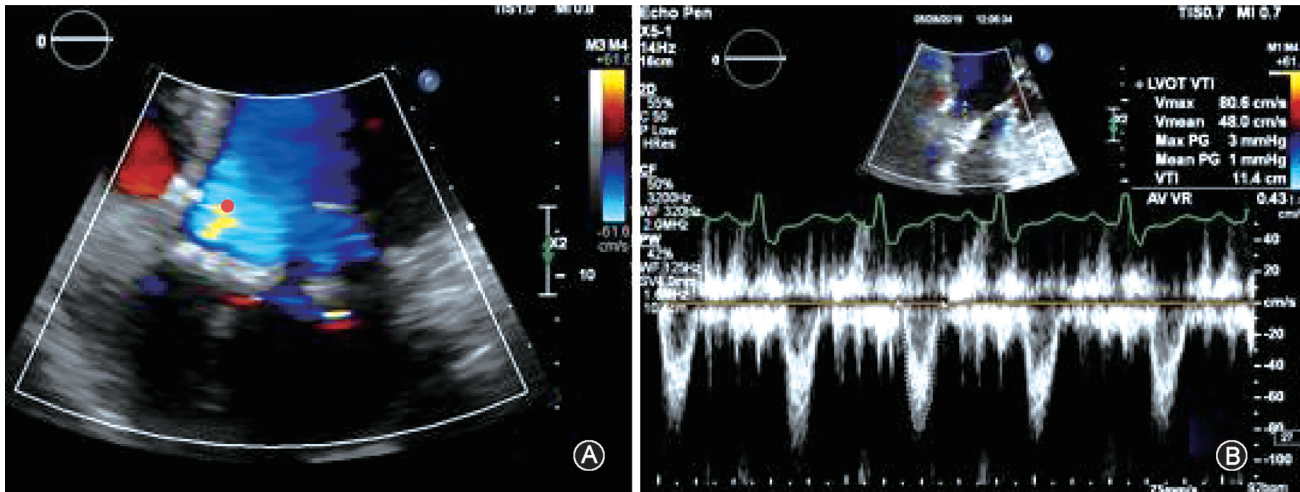


图4 左心室流出道速度频谱的测量。A 图示脉冲多普勒 (pulsed wave Doppler, PW) 于左心室流出道近血流汇聚区左室面红点位置测量; B 图示勾勒左心室流出道血流频谱可获得前向血流速度和速度 - 时间积分 (velocity time integral, VTI)

三、低流量低跨瓣压差的重度 AS 评估

一部分患者其 AVA < 1.0 cm², 但峰值流速 < 4 m/s, 平均跨瓣压差 < 40 mmHg。这其中有小部分患者血流量较低, 每搏量指数 (stroke volume index, SVI) < 35 ml/m², 这给我们的诊断工作带来了挑战。目前, AHA/ACC 指南将严重的、有症状的 AS 患者 (D 期) 细分为 3 期: 高跨瓣压差 AS (D1 期); 左心室射血分数 (left ventricular ejection fraction, LVEF) 减低的低流量低跨瓣压差 (D2 期); LVEF 正常的低流量低跨瓣压差 (D3 期)。

美国心脏病协会 (American Heart Association, AHA) /ACC 指南中的经典的低流量、低跨瓣压差的重度 AS [平均跨瓣压差 < 40 mmHg (1 mmHg = 0.133 kPa), AVA < 1.0 cm², LVEF < 50%; D2 期] 常伴有冠状动脉疾病或狭窄程度与心肌储备失衡导致的后负荷不匹配^[10]。由于瓣口面积与流量相关, 指南建议低剂量的多巴酚丁胺负荷超声心动图可以帮助增加跨瓣血流量, 同时避免心肌缺血。美国超声心动图协会更新指南详细描述了该操作流程^[8] (图 5)。

射血分数保留的低流量、低跨瓣压差的重度 AS (平均跨瓣压差 < 40 mmHg, AVA < 1.0 cm², LVEF ≥ 50%; D3 期) 又称为“矛盾的”低流量、低跨瓣压差重度 AS。由于速度和梯度依赖于流量, 在正常 LVEF 值下, 许多情况均可导致低流量, 如心动过速、心动过缓、高血压、小左室腔 (SVI < 35 ml/m²)、

多巴酚丁胺初始剂量为 2.5~5.0 μg · (kg·min)⁻¹

↓ 每 3~5 分钟增加剂量 2.5~5.0 μg·(kg·min)⁻¹

多巴酚丁胺最大剂量为 20 μg · (kg·min)⁻¹

同时记录:

1. 左室流出道流速及速度时间积分 (VTI);
2. 主动脉瓣峰值流速及平均跨瓣压差;
3. 计算每搏量及每搏指数。

当出现以下情况时应停止注射:

1. 多巴酚丁胺达到最大剂量 20 μg·(kg·min)⁻¹;
2. 得到阳性结果;
3. 心率增加超过 10~20 次 /min 或绝对心率超过 100 次 /min;
4. 出现临床症状、血压下降或严重的心律失常。

图5 低剂量多巴酚丁胺负荷超声心动图流程

严重的舒张功能障碍、严重的二尖瓣或三尖瓣疾病、肺动脉高压或右室功能不全^[11-13]。研究表明, 低流量与 TAVR 术后死亡率和心力衰竭的再入院率增加相关, 并且是较低跨瓣压差或 LVEF 降低更强的独立预测因子^[14]。对于这一类型患者, AHA/ACC 不建议使用低剂量多巴酚丁胺负荷超声心动图^[8,15]。近期研究表明, CT 的瓣膜钙化评分对确定是否为真性重度 AS 是有价值的^[16]。然而, 只有较高的钙化评分才能确定重度 AS, 而低钙化评分仍然无法诊断重度 AS (表 2)。对于这部分患者, 美国超声心动图协会更新指南推荐应用逐步综合分级流程来进行评估^[8]。

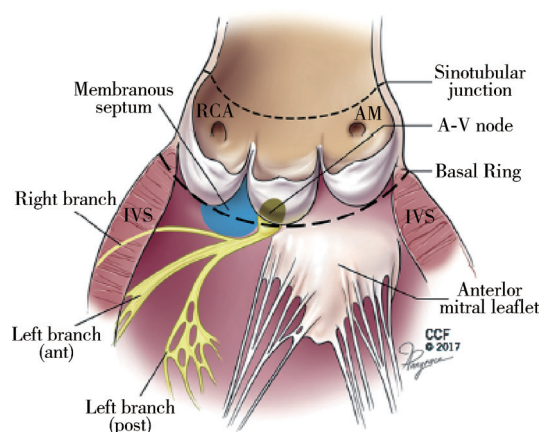
表2 对于主动脉瓣口面积 <math> < 1.0 \text{ cm}^2 </math> 和平均压差 <math> < 40 \text{ mmHg}</math> 患者，增加诊断重度主动脉瓣狭窄可能性的标准

判断指标	判断标准
临床标准	物理检查符合重度主动脉瓣狭窄 不可用其他疾病解释的典型症状 老年患者 (> 70 岁)
图像定性指标	左心室肥厚 (应考虑高血压病史) 不可用其他疾病解释的左心室长轴功能减低
图像定量指标	平均压差 30~40 mmHg ^a AVA $\leq 0.8 \text{ cm}^2$ 采用其他手段证实的低血流状态 (SVI <math> < 35 \text{ ml/m}^2 </math>) 多普勒技术 (三维超声心动图或 MSCT、CMR、心导管检查测量 LVOT) 利用 MSCT 进行钙化评分 ^b 可能为重度主动脉瓣狭窄: 男性 ≥ 2000 ; 女性 ≥ 1200 很可能为重度主动脉瓣狭窄: 男性 ≥ 3000 ; 女性 ≥ 1600 不可能为重度主动脉瓣狭窄: 男性 <math> < 1600</math>; 女性 <math> < 800</math>

注: AVA: 主动脉瓣口面积; CMR: 心脏磁共振成像; LVOT: 左心室流出道; MSCT: 多层螺旋体层扫描术; SVI: 每搏量指数。^a患者血压正常时进行血流动力学测量; ^b使用 Agatston 方法人为给出估测值对瓣膜钙化进行定量评估; 1 mmHg=0.133 kPa

● 主动脉根部及升主动脉解剖结构的评估和测量

在为患者选择最佳的人工瓣膜时，要考虑主动脉环和几何形状、主动脉根部和 LVOT 解剖、主动脉



注: RCA: 右冠状动脉开口; Membranous septum: 膜部室间隔; IVS: 室间隔; Right branch: 右束支; Left branch (ant): 左束支 (前支); Left branch (post): 左束支 (后支); Sinotubular junction: 窦管交界; LM: 左主冠状动脉; A-V node: 房室结; Basal ring: 瓣环; Anterior mitral leaflet: 二尖瓣前叶 (图片摘自参考文献 [18])

图6 主动脉瓣根部解剖结构图

的角度 (主动脉心室角度)、冠状动脉高度、钙化的数量和分布 (图6) [17-18]。人工瓣尺寸的选择关系到术后瓣周漏、冠状动脉开口堵塞以及传导异常等的发生。主动脉根部的评估从主动脉瓣环的测量开始。由于主动脉瓣环不是规则的圆形，常常表现为椭圆形，而传统的经胸超声心动图测量主动脉瓣环时通常于胸骨旁左室长轴切面，往往测量的不是主动脉瓣环的最大直径，而可能是最小径线，因此会存在一定的误差。三维经食管超声心动图 (three-dimensional transesophageal echocardiography, 3D-TEE) 测量则可以克服二维成像的局限性 (图7)。研究表明，通过三维重建采集的数据集进行的测量与使用 CT 测量的结果相当 [19]。除此之外，我们还需要测量主动脉窦部、窦管交界、冠状动脉距主动脉瓣环距离、升主动脉直径。二维经食管超声能够测定右侧冠状动脉的开口至瓣环距离，而测量左冠状动脉主干开口至瓣环的距离必须要应用 3D-TEE，因为左冠状动脉开口在冠状平面上，标准二维切面图像不能显示。而应用主动脉瓣三维全容积采集和多平面重建可以在术中快速获得用以测量瓣环-左冠状动脉主干距离和显示左冠瓣叶长度的冠状平面 (图8)。来自 TAVR 后冠状动脉阻塞大型多中心登记的数据显示，发生症状性的

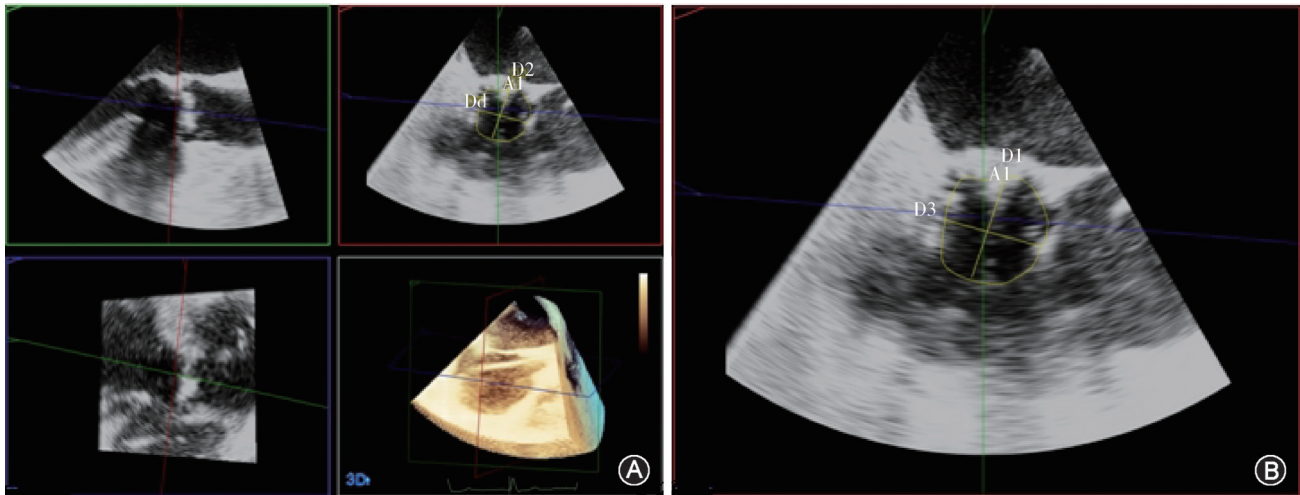


图7 三维经食管超声心动图测量主动脉瓣环内径及周长。A图通过对准左心室长轴平面（绿色框）和冠状平面（蓝色框）的多平面重建获得的虚拟环形平面（红色框）和三维立体成像（白框）；B图为于红色框内显示的平面直接测量主动脉瓣环直径及周长

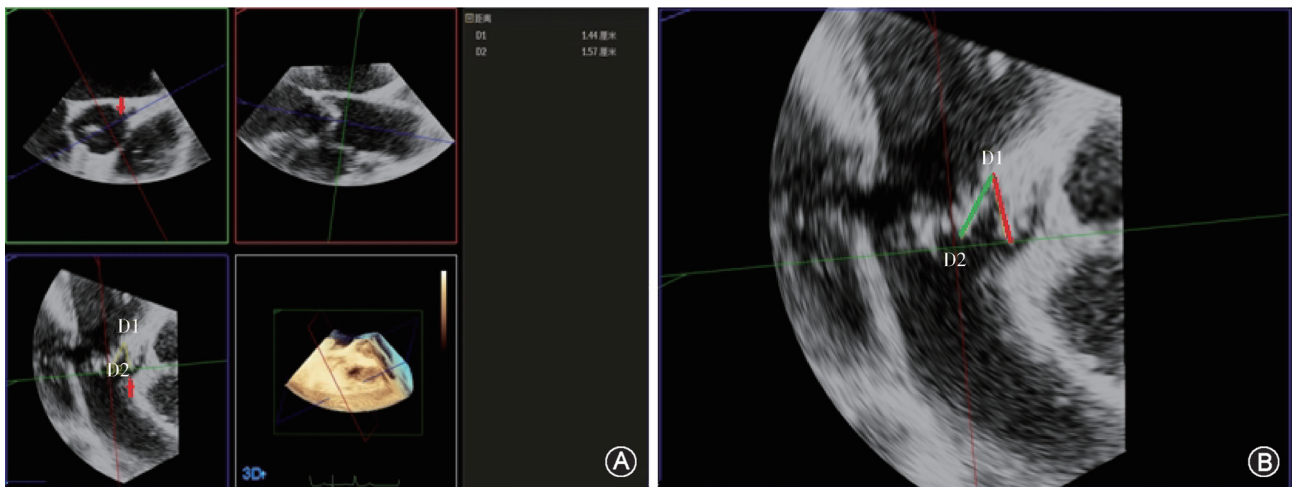


图8 三维经食管超声心动图测量左冠状动脉高度及瓣叶长度。A图在多平面重建中，蓝色框首先从矢状面（红色框）沿主动脉的长轴确定。横断面（绿色框）使蓝色片面与左冠状动脉（红色箭头）保持平行，冠状面（蓝色框）即是左冠状动脉的平面（红色箭头）；B图为用蓝色框测量从左冠状动脉瓣尖的铰链点到左冠状动脉口（红线）的距离以及左冠状动脉瓣叶的长度（绿线）

冠状动脉阻塞的发生率约 0.66%，而左冠状动脉发生冠状动脉阻塞的风险更高（88.6%），左侧冠状动脉开口高度和冠状动脉窦的直径低于对照组 [(10.7 ± 0.4) mm vs. (13.3 ± 0.3) mm, OR 2.17, 95%CI 1.62~2.90; (28.3 ± 0.8) mm vs. (31.3 ± 0.6) mm, OR 1.37, 95%CI 1.13~1.66]，结果表明 TAVI 后出现症状的冠状动脉阻塞是一种罕见但危及生命的并发症。低位冠状动脉开口和较小的冠状动脉窦直径是相关的解剖因素，急性和晚期死亡率很高，这突出了术前预测和预防该并发症的重要性^[20]。

● 评估心室功能及伴随的瓣膜疾病

一、评估左心室舒张功能及收缩功能

Généreux 等^[21]使用来自大型 PARTNER 2 试验的数据表明，在控制 STS-PROM 评分、衰弱程度、冠状动脉疾病、肾脏疾病或氧依赖型慢性阻塞性肺疾病等重要指标后，所提出的分期系统是主动脉瓣置换术后 1 年死亡率最强的独立预后工具之一。重要的是，通过回顾超声心动图和临床数据可以很容易地进行分期。分期如下：第 1 阶段，左心室改变 - 左心室质量指数增加，早期二尖瓣流入舒张早期二尖瓣环速度

(E/e') > 14, LVEF < 50%; 第2阶段左心房或二尖瓣改变 - 左心房容积指数 > 34 ml/m², 中度至重度二尖瓣关闭不全, 以及心房颤动; 第3阶段, 肺动脉或三尖瓣改变 - 肺动脉收缩压 > 60 mmHg, 中度至严重的三尖瓣关闭不全; 第4阶段, 右心室改变 - 中度至重度右心室功能障碍。

在慢性 AS 中, 随着压力负荷的增加, 左心室壁厚度的增加保持了正常的壁应力和射血分数 (ejection fraction, EF)。但是这些变化会导致左心室顺应性降低, 逐渐使每搏量减少和充盈压力增加, 最终引起 LVEF 保留的心力衰竭。因此, 应变成像和舒张功能的参数是反映左心室功能异常的早期标志。在 EF 正常的情况下, AS 严重程度的增加与整体纵向应变 (global longitudinal strain, GLS) 的降低相关。GLS 被认为是全因死亡率的预测指标, 与标准预测因子如风险评分、LVEF 相比, GLS 还是指导手术患者转归的最佳预测指标^[22]。左心室舒张功能对 AS 结局的影响存在争议。在伴随左心室收缩功能障碍 (LVEF ≤ 50%) 的有症状的严重 AS 患者或保存左心室收缩功能 (LVEF > 50%) 的无症状的严重 AS 患者中, E/e' 比率 < 15 的无症状和有症状患者的 1 年生存率均比 E/e' 比率 ≥ 15 的无症状和有症状患者显著提高^[23]。其他研究显示, 介入治疗后舒张功能参数有明显改善, 但未能显示基线舒张功能与预后之间的关系^[24]。

长期严重的压力超负荷, 特别是在伴随高血压的情况下, 常导致 LVEF 和心输出量降低。许多研究已经证明, 无论对主动脉瓣进行何种干预, 严重的症状性 AS 患者中, LVEF 降低导致死亡率增加以及肾功能不良^[25]。

二、评估二尖瓣反流

TAVR 术后二尖瓣反流 (mitral regurgitation, MR) 病情恶化的情况并不常见。研究发现在接受 TAVR 的患者中 MR 普遍存在, 并且在 TAVR 后早期大部分患者得到改善^[26-28], 并且此后 MR 严重程度的改善仍在继续, 特别是在有效逆行心脏重构的患者中, 另外还发现 TAVR 后 30 d 的严重 MR 是长期心血管死亡率和住院率增加的一个强大而独立的危险因素^[29]。有研究发现, TAVR 术后 MR 能否改善与二尖瓣叶隆起高度及其隆起区域、二尖瓣环钙化程度独立相

关。MR 改善明显的患者具有更大二尖瓣叶隆起高度及其隆起区域面积, 而 MR 无改善的患者瓣环钙化程度明显增高, 这可能有助于对伴随 MR 的 TAVR 候选者的临床预后做出判断^[30]。

三、评估三尖瓣反流、右心室功能

大量的三尖瓣反流 (tricuspid regurgitation, TR) 也可能影响预后结果。PARTNER II B 队列研究的患者中, 在基线时有 26.6% 的患者存在中度或重度 TR。与少于中度 TR 的患者相比, 这些患者的 LVEF 和 SVI 较低, 左心房较大, 中度或重度 MR 患病率较高。此外, 这些患者右心房和右心室较大, 右心室功能较差, 右心室收缩压较高^[31]。研究表明, 右心室大小也被评估为 TAVR 术后结果的独立预测因子之一^[32-33]。最近的研究也表明, 患有晚期肺动脉高压和 / 或显著的三尖瓣关闭不全 (第3阶段) 的患者在长达 2 年的心脏和非心脏病原因后具有更高的 TAVR 再入院率^[34]。McCarthy 等^[35] 最近的报告使用了美国胸外科医师协会 (Society of Thoracic Surgeons, STS) / AHA 经导管瓣膜治疗登记处的数据, 并证明 TAVR 后 1 年心力衰竭住院与基线存在严重的肺动脉高压和严重的三尖瓣关闭不全独立相关。

● 小结

目前, TAVR 已成为外科手术禁忌、有症状的高危重度 AS 患者的标准替代方案, 随着技术的日臻完善, 中、低危组的有症状的重度 AS 患者也被逐渐纳入其中。超声技术为我们理解心脏解剖变异以及血流动力学变化起到了积极重要的作用, 详细综合的术前评估对于候选者临床决策起到非常重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Nishimura RA, Otto CM, Bonow RO, et al. 2017 AHA/ACC focused update of the 2014 AHA/ACC guideline for the management of patients with valvular heart disease: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Clinical Practice Guidelines[J]. J Am Coll Cardiol, 2017,70(2):252-289. DOI: 10.1016/j.jacc.2017.03.011.
- [2] Thourani VH, Kodali S, Makkar RR, et al. Transcatheter aortic valve replacement versus surgical valve replacement in intermediate-risk patients: a propensity score analysis[J]. Lancet, 2016,387(10034):2218-2225. DOI: 10.1016/S0140-6736(16)30073-3.
- [3] Werner N, Zahn R, Beckmann A, et al. Patients at intermediate surgical risk undergoing isolated interventional or surgical aortic

- valve implantation for severe symptomatic aortic valve stenosis[J]. *Circulation*, 2018,138(23):2611-2623. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.117.033048.
- [4] Ocak I, Lacomis JM, Deible CR, et al. The aortic root: comparison of measurements from ECG-gated CT angiography with transthoracic echocardiography[J]. *J Thorac Imaging*, 2009,24(3):223-226. DOI: 10.1097/RTI.0b013e31819f9369.
- [5] Khalique OK, Hahn RT, Gada H, et al. Quantity and location of aortic valve complex calcification predicts severity and location of paravalvular regurgitation and frequency of post-dilation after balloon-expandable transcatheter aortic valve replacement[J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2014,7(8):885-894. DOI: 10.1016/j.jcin.2014.03.007.
- [6] Aksoy O, Cam A, Agarwal S, et al. Significance of aortic valve calcification in patients with low-gradient low-flow aortic stenosis[J]. *Clin Cardiol*, 2014,37(1):26-31. DOI: 10.1002/clc.22212.
- [7] dHumières T, Faivre L, Chammous E, et al. A new three-dimensional echocardiography method to quantify aortic valve calcification[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2018,31(10):1073-1079. DOI: 10.1016/j.echo.2018.05.012.
- [8] Baumgartner H, Hung J, Bermejo J, et al. Recommendations on the echocardiographic assessment of aortic valve stenosis: a focused update from the European Association of Cardiovascular Imaging and the American Society of Echocardiography[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2017,30(4):372-392. DOI: 10.1016/j.echo.2017.02.009.
- [9] Bradley SM, Foag K, Monteagudo K, et al. Use of routinely captured echocardiographic data in the diagnosis of severe aortic stenosis[J]. *Heart*, 2019,105(2):112-116. DOI: 10.1136/heartjnl-2018-313269.
- [10] Lancellotti P, Pellikka PA, Budts W, et al. The clinical use of stress echocardiography in non-ischaemic heart disease: recommendations from the European Association of Cardiovascular Imaging and the American Society of Echocardiography[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2017,30(2):101-138. DOI: 10.1016/j.echo.2016.10.016.
- [11] Gotzmann M, Hauptmann S, Hogeweg M, et al. Hemodynamics of paradoxical severe aortic stenosis: insight from a pressure-volume loop analysis[J]. *Clin Res Cardiol*, 2019,108(8):931-939. DOI: 10.1007/s00392-019-01423-z.
- [12] Leong DP, Pizzale S, Haroun MJ, et al. Factors associated with low flow in aortic valve stenosis[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2016,29(2):158-165. DOI: 10.1016/j.echo.2015.10.007.
- [13] Pibarot P, Dumesnil JG. Low-flow, low-gradient aortic stenosis with normal and depressed left ventricular ejection fraction[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2012,60(19):1845-1853. DOI: 10.1016/j.jacc.2012.06.051.
- [14] Carreras ET, Kaneko T, Ramirez-Del Val F, et al. Impact of flow, gradient, and left ventricular function on outcomes after transcatheter aortic valve replacement[J]. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2018,91(4):798-805. DOI: 10.1002/ccd.27347.
- [15] Nishimura RA, Otto CM, Bonow RO, et al. 2014 AHA/ACC guideline for the management of patients with valvular heart disease: executive summary: a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2014,63(22):2438-2488. DOI: 10.1016/j.jacc.2014.02.537.
- [16] Aksoy O, Cam A, Agarwal S, et al. Significance of aortic valve calcification in patients with low-gradient low-flow aortic stenosis[J]. *Clin Cardiol*, 2014,37(1):26-31. DOI: 10.1002/clc.22212.
- [17] Otto CM, Kumbhani DJ, Alexander KP, et al. 2017 ACC expert consensus decision pathway for transcatheter aortic valve replacement in the management of adults with aortic stenosis: a report of the American College of Cardiology Task Force on Clinical Expert Consensus Documents[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2017,69(10):1313-1346. DOI: 10.1016/j.jacc.2016.12.006.
- [18] Hahn RT, Nicoara A, Kapadia S, et al. Echocardiographic imaging for transcatheter aortic valve replacement[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2018,31(4):405-433. DOI: 10.1016/j.echo.2017.10.022.
- [19] Jilaihawi H, Doctor N, Kashif M, et al. Aortic annular sizing for transcatheter aortic valve replacement using cross-sectional 3-dimensional transesophageal echocardiography[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2013,61(9):908-916. DOI: 10.1016/j.jacc.2012.11.055.
- [20] Ribeiro HB, Webb JG, Makkar RR, et al. Predictive factors, management, and clinical outcomes of coronary obstruction following transcatheter aortic valve implantation: insights from a large multicenter registry[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2013,62(17):1552-1562. DOI: 10.1016/j.jacc.2013.07.040.
- [21] 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. DOI: 10.1093/eurheartj/ehx381.
- [22] Vollema EM, Sugimoto T, Shen M, et al. Association of left ventricular global longitudinal strain with asymptomatic severe aortic stenosis: natural course and prognostic value[J]. *JAMA Cardiol*, 2018,3(9):839-847. DOI: 10.1001/jamacardio.2018.2288.
- [23] Biner S, Rafique AM, Goykhman P, et al. Prognostic value of E/E' ratio in patients with unoperated severe aortic stenosis[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2010,3(9):899-907. DOI: 10.1016/j.jcmg.2010.07.005.
- [24] Muratori M, Fusini L, Tamborini G, et al. Sustained favourable haemodynamics 1 year after TAVI: improvement in NYHA functional class related to improvement of left ventricular diastolic function[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2016,17(11):1269-1278. DOI: 10.1093/ehjci/jev306.
- [25] Kang D, Bach DS, Chetcuti S, et al. Mortality predictors in patients referred for but not undergoing transcatheter aortic valve replacement[J]. *Am J Cardiol*, 2015,116(6):919-924. DOI: 10.1016/j.amjcard.2015.06.014.
- [26] Lim DS, Kar S, Spargias K, et al. Transcatheter valve repair for patients with mitral regurgitation: 30-day results of the CLASP Study[J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2019,12(14):1369-1378. DOI: 10.1016/j.jcin.2019.04.034.
- [27] Kiramijyan S, Magalhaes MA, Koifman E, et al. Impact of baseline mitral regurgitation on short- and long-term outcomes following transcatheter aortic valve replacement[J]. *Am Heart J*, 2016,178:19-27. DOI: 10.1016/j.ahj.2016.03.020.
- [28] Cortés C, Amat-Santos IJ, Nombela-Franco L, et al. Mitral regurgitation after transcatheter aortic valve replacement: prognosis, imaging predictors, and potential management[J]. *JACC Cardiovasc Interv*, 2016,9(15):1603-1614. DOI: 10.1016/j.jcin.2016.05.025.
- [29] Abdelghani M, Abdel-Wahab M, Hemetsberger R, et al. Fate and long-term prognostic implications of mitral regurgitation in patients undergoing transcatheter aortic valve replacement[J]. *Int J Cardiol*,

- 2019,288:39-43. DOI: 10.1016/j.ijcard.2019.03.048.
- [30] Chiche O, Rodés-Cabau J, Campelo-Parada F, et al. Significant mitral regurgitation in patients undergoing TAVR: mechanisms and imaging variables associated with improvement[J]. *Echocardiography*, 2019,36(4):722-731. DOI: 10.1111/echo.14303.
- [31] Lindman BR, Maniar HS, Jaber WA, et al. Effect of tricuspid regurgitation and the right heart on survival after transcatheter aortic valve replacement: insights from the placement of aortic transcatheter valves II inoperable cohort[J]. *Circ Cardiovasc Interv*, 2015,8(4): e002073. DOI: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.114.002073.
- [32] Schwartz LA, Rozenbaum Z, Ghantous E, et al. Impact of right ventricular dysfunction and tricuspid regurgitation on outcomes in patients undergoing transcatheter aortic valve replacement[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2017,30(1):36-46. DOI: 10.1016/j.echo.2016.08.016.
- [33] Fan J, Liu X, Yu L, et al. Impact of tricuspid regurgitation and right ventricular dysfunction on outcomes after transcatheter aortic valve replacement: a systematic review and meta-analysis[J]. *Clin Cardiol*, 2019,42(1):206-212. DOI: 10.1002/clc.23126.
- [34] Fukui M, Gupta A, Abdelkarim I, et al. Association of structural and functional cardiac changes with transcatheter aortic valve replacement outcomes in patients with aortic stenosis[J]. *JAMA Cardiol*, 2019,4(3):215-222. DOI: 10.1001/jamacardio.2018.4830.
- [35] McCarthy FH, Vemulapalli S, Li Z, et al. Association of tricuspid regurgitation with transcatheter aortic valve replacement outcomes: a report from the Society of Thoracic Surgeons/American College of Cardiology Transcatheter Valve Therapy Registry[J]. *Ann Thorac Surg*, 2018,105(4):1121-1128. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2017.11.018.