

DOI: 10.3969/j.issn.2096-6113.2024.03.002

引用格式:邓京,刘芸.超声心动图评估肺高压的研究进展[J].巴楚医学,2024,7(3):10-18.

邓京教授,武汉医学院医学系 1984 届医学学士、同济医学院 1989 届心血管硕士、伦敦大学学院临床系 2004 届博士。曾任同济医学院研究生会主席,海外校友总会副主席、董事会成员,英国校友会主席。现任职伦敦芭慈医院集团超声心动图科副主任、中国联络官,伦敦大学学院博硕临床导师,国际妇产超声学会专家教授团成员(2016—2018 年兼三维工作组主席、2016—2020 年兼顾问委员),英国重症重点超声导师,并在欧洲和国际讲台上主持和传授三维和四维超声的技巧。1994 年赴英,于伦敦大学学院研制心脏的四维(动态三维)成像,研究成果被众多高端超声仪采用。2004 年获皇家医学委员会专家主治认可,2005 年获英医疗委员会全面注册,并担任科研主治、英医学研究会临床科学家及影像公司临床顾问,以多维显像对心脏、唇舌及生殖器等生理病理的动态解剖进行研究。除在杂志上发表许多前沿性论文外,还参与了多维成像之欧洲及世界临床规范、妇产超声安全的学会立场声明以及专著、教程等撰写。其论文曾在《Lancet》上发表,其科研成果广为世界各大媒体(BBC、路透社、泰晤士报、纽约时报等)报道,并在英国国会和博物馆展示。除为 15 家专业杂志审稿外,他还是英国、加拿大、荷兰、新加坡等国的科研委员会基金评审专家。



超声心动图评估肺高压的研究进展

邓京¹ 刘芸²

(1. 伦敦芭慈医院心脏中心 超声心动图科; 2. 三峡大学第一临床医学院[宜昌市中心人民医院] 超声科, 湖北宜昌 443003)

摘要:肺高压(PH)是一种以肺动脉压持续异常升高为特征的血流动力学疾病,PH 患者的临床表现与右心室功能异常程度及右心衰竭有关。超声心动图检查具有方便和无创等优点,可用来评估心脏结构及功能,以及估测肺动脉压力,目前已成为 PH 的首选检查方法。随着超声心动图技术不断发展,实时三维超声心动图、三维斑点追踪技术及声学造影等均在 PH 的诊断中发挥着重要作用。超声心动图结合其他辅助检查方法,在 PH 患者检查过程中可获得更多有效信息,为 PH 患者的诊断、治疗、疗效评估及预后等多方面内容提供评价依据。

关键词:肺高压; 超声心动图; 实时三维超声心动图; 三维斑点追踪技术; 声学造影
中图分类号: R543.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6113(2024)03-0010-09

Research Progress in Echocardiography Evaluation of Pulmonary Hypertension

Deng Jing¹ Liu Yun²

(1. Department of Echocardiography, Heart Center of St Barts Hospital, London; 2. Department of Ultrasound, Yichang Central People's Hospital, The First College of Clinical Medical Science, China Three Gorges University, Yichang 443003, China)

Abstract Pulmonary hypertension (PH) is a hemodynamic disease characterized by persistently elevated pulmonary artery pressure. The clinical manifestations of PH patients are related to the severity of abnormal

作者简介:邓京,男,博士,教授,主要从事心血管疾病的超声诊断。E-mail: Jing.Deng@nhs.net

right ventricular function and right heart failure. Echocardiography has the advantages of convenience and non-invasiveness, and can be used to evaluate cardiac structure and function, and measure pulmonary artery pressure. It has become the preferred examination method for PH. With the continuous development of echocardiography technology, real-time three-dimensional echocardiography, three-dimensional speckle tracking technology, and echocardiography contrast have all played important roles in the diagnosis of PH. Echocardiography combined with other auxiliary examination methods can obtain more effective information in the examination of PH patients, providing evaluation basis for the diagnosis, treatment, curative effect evaluation and prognosis of PH patients.

Keywords pulmonary hypertension (PH); echocardiography; real-time three-dimensional echocardiography (RT-3DE); three-dimensional speckle tracking technology (3D-STE); echocardiography contrast

肺高压(pulmonary hypertension, PH)是一种病理性血流动力学状态,是由不同类型疾病引起肺血管结构或功能改变,继而导致肺血管阻力增加和肺动脉压力升高的临床综合征^[1]。在静息状态下,经右心导管测得平均肺动脉压(mean pulmonary arterial pressure, PAPm) >20 mmHg即可诊断为PH。结合肺毛细血管楔压(pulmonary arterial wedge pressure, PAWP)及肺毛细血管阻力(pulmonary vascular resistance, PVR)可将PH具体分为:毛细血管前PH(PAPm >20 mmHg、PAWP ≤ 15 mmHg、PVR ≥ 3 Wood units)、孤立性毛细血管后PH(PAPm >20 mmHg、PAWP >15 mmHg、PVR <3 Wood units)、混合性毛细血管前/后PH(PAPm >20 mmHg、PAWP >15 mmHg、PVR ≥ 3 Wood units)^[2-3]。超声心动图是诊断PH的首选筛查方式,对于PH患者的早期准确诊断至关重要。

欧洲心脏病学会(European Society of Cardiology, ESC)发布的最新版《肺动脉高压诊断和治疗指南》将PH分为五大类——肺动脉高压(pulmonary arterial hypertension, PAH)、左心性疾病、肺组织低氧、血栓栓塞、不明原因的或者是多种原因引起的PH^[4]。其中PAH是PH最常见的一种病理类型^[5],即肺毛细血管前的PH,以肺血管收缩、血管重构和血管间质增生为特征的一系列严重病理改变^[6],继而促使肺血管内原位血栓形成,最终导致肺动脉压升高,甚至右心衰竭或死亡^[7]。

PH可发生在任何年龄阶段,且病因复杂。近年来,随着超声心动图检查的普及,PH在孕产期妇女中的检出率也逐年提高^[8]。妊娠期母体血容量会增加30%~50%,心输出量增加高达50%,导致心脏前负荷显著增加;在分娩过程中,子宫收缩、激烈疼痛以及焦虑会刺激产妇心率增快,母体心排量增加;胎儿娩出后,产妇产腔静脉受压解除会导致回心血量进一步增加^[9]。随着孕产妇心脏前负荷及回心血流量

的增加,肺动脉压力会显著升高,进而诱发PAH危象及心力衰竭等,严重者甚至会危及产妇和胎儿的生命安全^[10]。研究表明^[11],妊娠合并PH患者的死亡率约30%~56%,胎儿死亡率约11%~28%,产妇死亡原因多为PH引起的右心衰竭。

1 超声检查在肺高压中的应用

PH,尤其是PAH具有潜在致命性危害^[12]。因此,PH诊疗策略强调早期诊断,如能在症状尚不明显的早期明确诊断,并及时采取有效的干预治疗,便可有效改善患者预后。超声心动图检查是PH患者筛查的首选方式,在PH紧急筛查、病因探查和定期随访中也发挥着重要作用^[13]。然而,超声在诊断PH时也会出现假阳性及假阴性,例如因孕期心输出量显著增加而导致的肺动脉压轻度增高,便易出现假阳性^[14]。虽然超声心动图与右心导管测量的PAH高度一致,但在超声心动图检查怀疑PAH的情况下,仍有约30%患者需经右心导管测量以明确诊断^[15]。因此,超声只能作为PAH的筛查手段,而经右心导管测量则为PAH诊断的金标准。

2 超声心动图评估肺高压常用指标

2.1 三尖瓣返流峰值流速

超声心动图估算肺动脉收缩压(pulmonary arterial systolic pressure, PASP)主要通过三尖瓣返流峰值流速(tricuspid regurgitation velocity, TRV)来计算。PAH $=4 \times (\text{TRV})^2 +$ 右心房压,超声心动图评估PH的第一步是测量TRV。当TRV ≤ 2.8 m/s或PASP <36 mmHg时,PH诊断的可能性为低度,应结合其他超声心动图指标(如是否合并右心室肥厚、右心室扩大、肺动脉瓣返流速度增快或内径增宽

等)判断是否存在PH;若TRV峰值 ≤ 2.8 m/s且合并其它异常指标,或者TRV峰值为 $2.9\sim 3.4$ m/s且没有合并到其它异常指标,PH诊断的可能性为中度;若TRV峰值为 $2.9\sim 3.4$ m/s且合并其它异常指标,或者TRV峰值 >3.4 m/s,PH诊断的可能性为高度^[16],见表1。

表1 TRV筛查PH的阈值

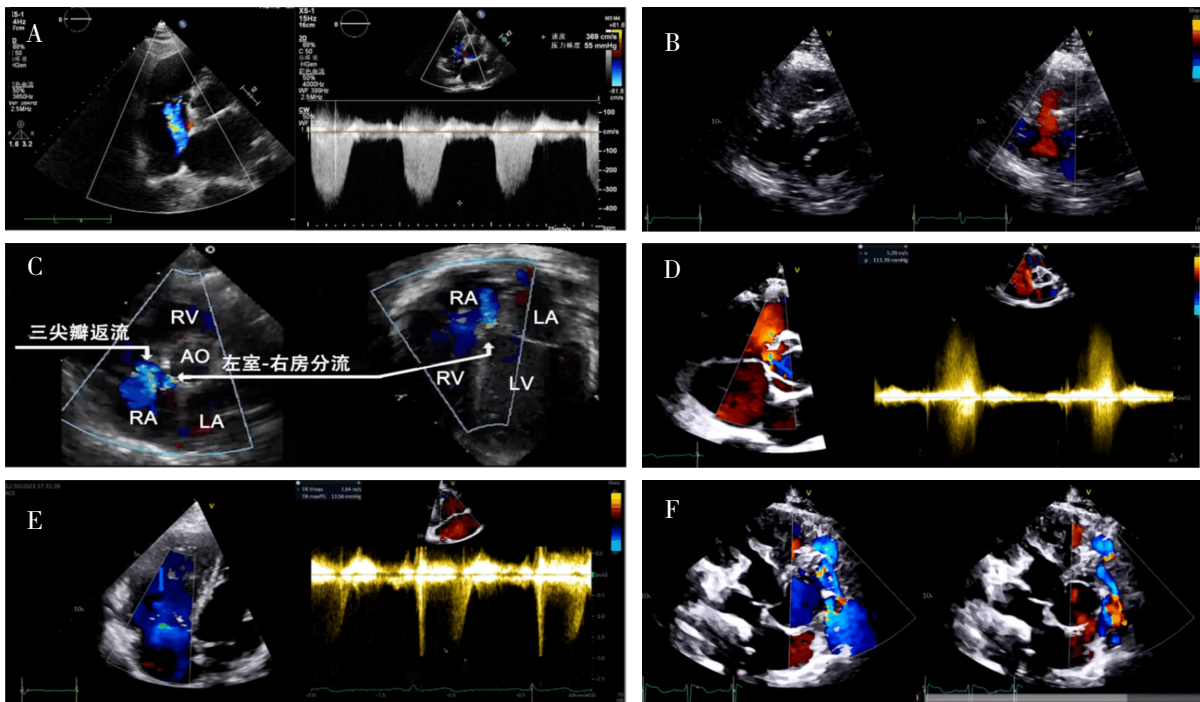
TRV(m/s)	存在其他支持PH诊断的超声声像图特征	PH可能性
≤ 2.8 或无法测出	无	低度
≤ 2.8 或无法测出	有	中度
$2.9\sim 3.4$	无	中度
$2.9\sim 3.4$	有	高度
>3.4	不需要	高度

注:TRV:三尖瓣返流峰值流速;PH:肺高压

一般情况下,TRV取三尖瓣切面测得的最大值(图1A);当呼吸影响较大或心律不齐时,取3~10个波峰的平均值。通过TRV估算肺动脉压的适用条件包括:无明显右心室功能障碍,无右心室或肺动脉

狭窄,无房室间、心室间或更远端的分流,无重度三尖瓣返流(房室压力平衡)。若发现室间隔缺损修补后,右心室内出现狭窄的双腔(图1B),此时应称为右心房收缩压差,而非PASP。当存在室间隔缺损分流流束或左心室到右心房分流型,应仔细鉴别分流束与反流束,因为左室-右房分流束所测得的压差即为体循环与右心房的压差(图1C~1E),此时需要警惕返流被分流掺和或错把分流当返流。除较常见的体-肺循环分流,还要警惕罕见的分流,如窦状冠脉-右心室分流(图1F),此时反映的是体循环和肺循环的分流^[17]。

压差这一相对概念,不仅在于计算肺血管收缩压、平均压和舒张末期压时,都需要加上右心房压;更在于分析压力高低时,要权衡导致压差上下游的关系。比如,右心衰时,输注肺循环的流量减少,会出现肺动脉压减低,但实为恶化的征象;左心衰时,会导致分流减少和体循环的血压降低;体-肺循环压差减低,会导致肺动脉压降低;重度三尖瓣反流时,返流束会出现自由落体,或返流太轻,无法被超声多普勒捕捉时,也会出现肺动脉压虚低的情况。



注:A:三尖瓣切面测量三尖瓣返流频谱;B:当右心室出现狭窄的双腔时,此时测得的压差为右心房收缩压差;C:当存在左室-右房分流时,需仔细辨别分流血流束与三尖瓣返流束;D:通过左室-右房分流束测得的压差为体循环与右心房的压差;E:通过三尖瓣返流流束测得的即为三尖瓣返流压差;F:窦状冠脉-右心室分流;TRV:三尖瓣返流峰值流速;LA:左心房;RA:右心房;LV:左心室;RV:右心室;AO:升主动脉

图1 通过测量TRV评估肺动脉压

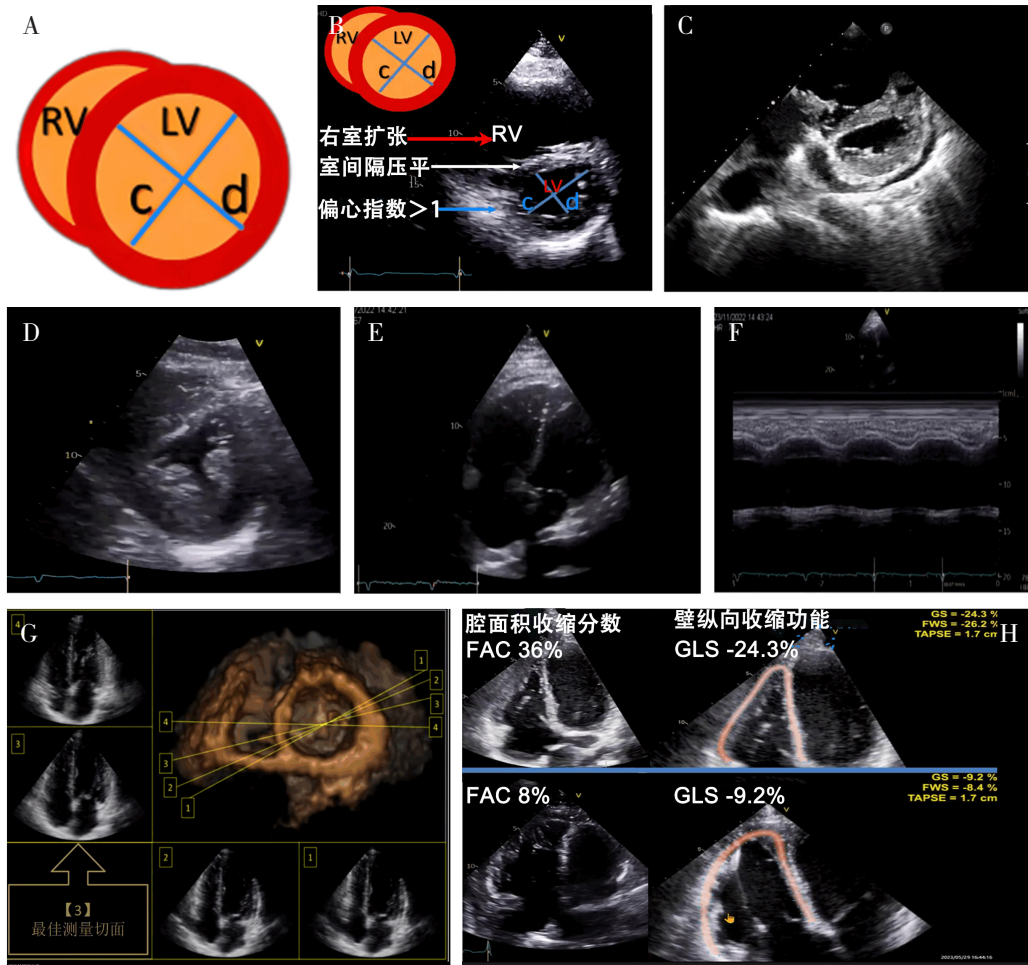
2.2 心室相关指标

右心室压力和容量负荷增大可导致室间隔的形状和功能异常,导致左室扁平。右心室容量负荷过大,仅在舒张期引起左心室偏心;右心室压力过大也

会导致收缩期偏心。心室指标主要为右心室与左心室基底部的直径之比(图2A)和左心室偏心指数。右心室/左心室基底直径比选择心尖四腔心(4V)切面测量,两者比值正常值为 $0.6\sim 1$,若比值 >1 ,则证明

右室增大。心室偏心指数选择在胸骨旁短轴切面，乳头肌平面测量，分别在收缩末期和舒张末期测量短轴直径的比率(c/d)， c = 垂直于室间隔的左心室直径； d = 平行于室间隔的左心室直径(图 2B)。当偏心指数 >1.0 时被认为是异常，此时双心室切面表现为右心室明显扩大，室间隔扁平，左室形态呈“D”字型(图 2C)，此即为 PH 心室特征性改变。但若存在右室肥厚或扩大时，心室偏心指数则不能很好地反映右室压力情况，因为当右室肥厚或扩大时，右心室呈半月形包绕在左心室周围，此时测量心室偏心指数常存

在较大误差(图 2D)。其中，还存在一种特殊的右室运动改变，即在肺动脉栓塞的情况下，PAH 突然出现，但右室功能正常。此时，为克服 PAH，右室心肌部运动增强，而右室侧壁及三尖瓣环运动幅度明显减弱，通过 M 型测量，可显示出右室心尖部运动曲线波动幅度较大，而三尖瓣运动曲线呈平直状态，此现象即称为“McConnel”征(图 2E、F)。在肺动脉压力的影响下右心室的心功能会受损，因此在这种情况下，可以选择四维彩超(图 2G)及心脏轴向/纵向功能检测右心室容积及功能变化(图 2H)。



注：A：右心室与左心室基底部的直径之比；B：左心室偏心指数测量示意图；C：PH 时，右心室明显扩大，室间隔扁平，左室形态呈“D”字型；D：当右心室肥厚或扩大时，右心室呈半月形包绕在左心室周围；E~F：在肺动脉栓塞时，尖瓣环运动幅度明显减弱，三尖瓣运动曲线呈平直状态；G：四维彩超测量右心室容积；H：通过心脏轴向及纵向功能检测来了解右心室受 PAH 的影响；RV：右心室；LV：左心室；FAC：腔面积收缩分数；GLS：壁纵向收缩功能

图 2 肺高压时右心室的改变

2.3 肺动脉相关指标

右心室流出道和肺动脉瓣收缩期频谱在不合并三尖瓣反流时具有特殊的诊断价值。严重 PAH 患者可出现肺动脉瓣收缩期频谱，包括肺动脉瓣血流的加速时间缩短(<105 ms)、整个射血期的速度时间积分明显减低及肺动脉瓣收缩期频谱出现“凹陷”，即肺动脉瓣收缩期频谱出现“短、低、凹”的改变。可通过

肺动脉返流波形计算肺动脉舒张早期压力和肺动脉舒张末期压力，当舒张早期肺动脉瓣反流速度 > 2.2 m/s，舒张末期的压力超过 15 mmHg 时即提示 PAH。

还有部分肺动脉内径增宽及肺动脉血容量增多的特殊情况，比如肺动脉栓塞可引起 PAH；“主-肺动脉窗”形成时，因体循环和肺循环间的显著压差，可导

致由主动脉至肺动脉的大量、高速的血液分流;还有一部分为原发性的肺动脉扩张及原发性的 PAH, 该类患者多表现为肺动脉主干及分支内径显著增宽。

2.4 下腔静脉+右房

右房压是 PH 诊断中的一个重要超声心动图参数,即通过下腔静脉(inferior vena cava, IVC)内径及其塌陷率估算右房压力^[18](表 2)。IVC 内径测量一般选在剑突下切面、呼气末、距离右心房开口 1~2 cm 处,且垂直于 IVC 长轴测量。安静吸气时,IVC 直径>2.1 cm 或吸气 IVC 塌陷率<50% 被认为异常。右房面积测量应选择心室收缩末期四腔心切面测量,当心室收缩末期右房面积>18 cm² 或体表面积>11 cm²/m²,则认为右房增大。下腔静脉增宽并塌陷率减低、右房增大为支持 PH 的指征。若患者声像图差,无法观察到下腔静脉的宽度或变化,则可以直接假设右房压力为 8 mmHg 进行估算。右房压的评估也存在特殊情况,比如当右肺静脉异常引流至下腔静脉,即“弯刀综合征”时,此时测得的肺静脉压即为右房压。

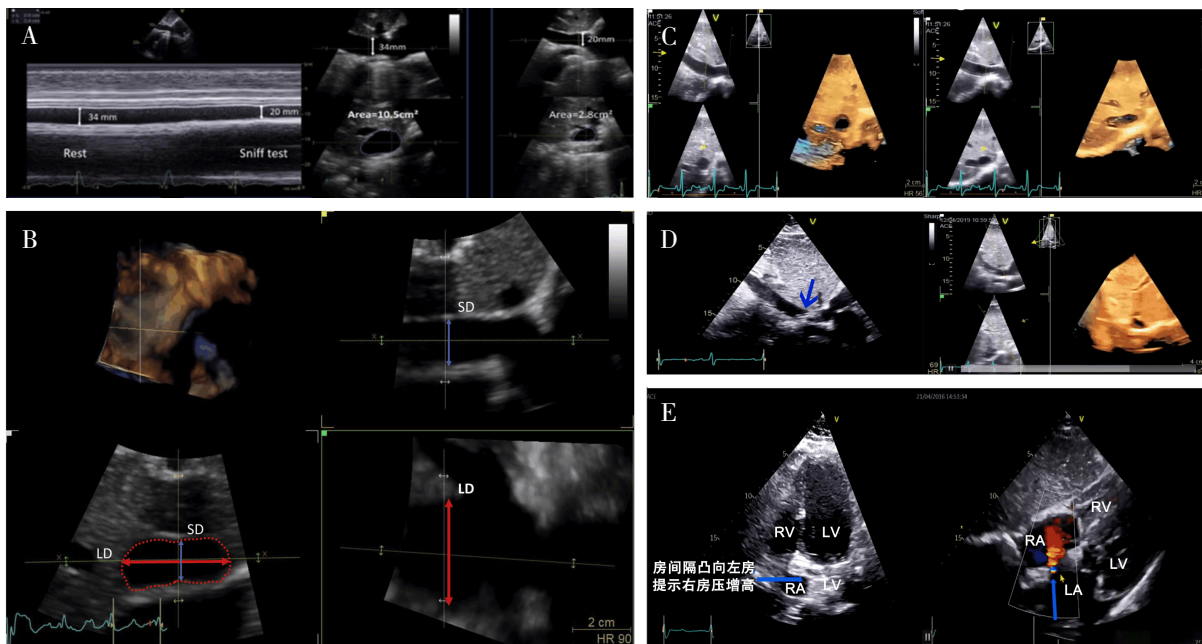
表 2 右房压估算

右房压 (mmHg)	下腔静脉内径 (cm)	下腔静脉塌陷率 (%)
3(0~5)	<2.1	>50
8(5~10)	<2.1	<50
8(5~10)	>2.1	>50
15(10~20)	>2.1	<50

二维超声中通过下腔静脉评估右心房压力是一项较为成熟的技术,其具备操作简单、非侵入性等优点,临床认可度高^[19]。但该方法评估右房压的准确性不高,例如,IVC 在一天内不同时段存在差异;在妊娠中晚期及术后患者中,右心房压力变化小;患者体态或体位改变也会影响右心房压力。尤其是在下腔静脉的移动不在超声切面内时,则更是无法显示其真实变化。为克服上述问题,近年来,学者开始针对下腔静脉进行三维超声成像,以实现通过下腔静脉内径及容积的变化预测右房压力。

最早开展三维超声工作的是法国学者 Huguet 等^[20],他们在心源性休克患者中对比研究了三维超声与心导管测值,并进一步比较二维和三维测量的准确度,但该研究仅仅是通过下腔静脉截面积的变化进行比较(图 3A~3B),此时如果是下腔静脉远端出现压缩变形则不易被发现。本研究中心通过四维动态超声测定了下腔静脉整个容积的变化(图 3C~3D),并可通过相关软件的应用实现下腔静脉分离,直接观察 PAH 患者下腔静脉容积变化率的改变。

除根据右房大小判断,还可根据房间隔的凸向和分流方向来判断右房及肺动脉的压力情况,如可见由左向右的分流说明右心房的压力不高,但若房间隔凸向左房时,则提示右房压力增高(图 3E)。当存在房间隔活跃,二维超声评价存在一定困难时,则可通过右心造影观察微泡的运动方向来判断是房间隔缺损的分流还是下腔静脉瓣残瓣血流冲击房间隔导致的。



注:A~B:三维超声评估下腔静脉截面积变化情况;C~D:四维超声动态观察下腔静脉容积变化;E:当房间隔由右房凸向左房时,提示右房压力增高;但若房间隔分流由左至右分流时,提示右房压力并不大;RV:右心室;LV:左心室;RA:右心房;LA:左心房

图 3 通过下腔静脉及右心房评估肺高压

3 肺高压诊断的超声序列检测

超声是一种常用的PH筛查方法,三尖瓣返流峰值为主要指标,其他指标包括心室、肺动脉、下腔静脉和右心房等。进行PH筛查的最佳超声序列检测为“下腔静脉—右心房—三尖瓣—右心室—肺动脉瓣—肺动脉—肺脏—左心房”。此检查序列可有序且全面地针对PH患者心脏及大血管的情况进行详细评估。

4 超声新技术在评估肺高压中的应用价值

4.1 实时三维超声心动图技术

实时三维超声心动图(real-time three-dimensional echocardiography, RT-3DE)可通过全容积图像的获取,对右心室形态进行三维立体成像,实现复杂形态右心室的高度还原,在评估PH患者右心室重构中具有重要意义^[21]。研究发现^[22],RT-3DE对右心室舒张末期和收缩期容积的评估更准确,且测量重复性更佳。Lattanzio等^[23]研究表明,RT-3DE在PAH患者右室功能和容量评估中,与心脏磁共振成像结果具有较高一致性。Ostenfeld等^[24]研究表明,通过RT-3DE测得的右心室射血分数(right ventricular ejection fraction, RVEF)与PASP及肺血管阻力呈负相关,且通过RT-3DE获得的右室相关数据更能反映患者真实血流动力学状态,也能更准确地预测PH患者的死亡风险。然而,RT-3DE也具有一定局限性,例如其在右心室内膜显示方面不及二维超声心动图,在评估右心室功能方面存在一定局限性^[25]。

4.2 三维斑点追踪超声心动图

心脏射血分数(ejection fraction, EF)高度依赖于前负荷和心率,不能作为单纯评估心室收缩功能的指标^[26]。尤其是在高血压、肥胖、糖尿病、肾功能不全等引起的肥厚性心肌病患者中,常表现为EF值保留的心功能减低^[27]。相反,EF值减低也并不一定表明心功能恶化,因为心脏可以在病理和生理上重塑以增加心脏前负荷^[28]。近年来,随着超声斑点追踪(speckle-tracking echocardiography, STE)技术的发展,STE能准确分析心脏整体及局部心肌运动功能,且对心脏功能的评估优于EF^[29]。STE是指通过逐帧追踪心肌运动的斑点并进行定量分析,对心肌形变进行非多普勒、非角度依赖的客观分析,最后得到应变及应变率等参数,该类型参数可量化心肌形变程度以及评估心脏旋转动力学改变^[30]。由于该技术不依

赖多普勒成像,不受成像角度和心脏平面内运动伪影的影响^[31]。因此,STE能准确、有效评估心肌功能状态,以便更早识别出无显著临床症状的心肌损伤人群^[32]。PH患者心室收缩期心肌运动速度、应变和应变率常出现降低,尤其以右心室基底游离壁改变最为显著,因此,STE相关检测指标可用于区分PH患者和正常人群^[33]。

三维斑点追踪技术(three-dimensional speckle-tracking echocardiography, 3D-STE)同时于3个正交平面进行数据获取,测量参数包括纵向应变(longitudinal strain, LS)、径向应变(radial strain, RS)、周向应变(circumferential strain, CS)及面积应变(area strain, AS)等,相关参数较二维斑点追踪超声心动图参数更为客观全面,能为心室功能异常及心室重构提供更多重要信息^[34]。研究发现^[35],AS、LS和CS的降低与死亡风险的增加相关,应变值下降较多的PH患者预后较差。新的AS测量方法与RVEF有很强相关性,这表明3D衍生的AS可能是评估右心室收缩功能预测结果的一个重要附加指标。Lee等^[36]研究结果显示,在轻度PAH患者中二维和三维LS显著降低,而中重度PAH患者CS和RS也出现明显降低,且右心室三维LS降低与6分钟步行试验(6 minutes walk distance, 6MWD)阳性相关性高于二维LS。目前有关3D-STE参数在评估PH患者右心室功能及预后方面的证据尚不充足,对于3D-STE是否较2D-STE更具优势,也存在一定争议^[37]。心肌各类应变指标也存在互补作用,比如,LS对心肌收缩射血的评估具有重要作用,但当右心室功能出现障碍时,环形应变可产生一定的代偿作用,此时包含上述两组应变指标的AS可为右心室功能改变提供更多的参考信息^[38]。Molnár等^[39]发现,受损的右心室三维AS、LS及环形应变均与PH患者死亡高风险相关,3D-STE的应用有助于提高PH患者右心室重构评估的准确性,值得给予更高的关注度。

4.3 右心声学造影技术

超声造影是一项无创检查方法,主要用于检测心内分流情况。但也有学者提出^[40],右心声学造影不仅可以检出彩色多普勒超声难以发现的小卵圆孔未闭或缺损,在评估PH患者右心室损伤方面也具有重要作用。右心声学造影在PAH的鉴别诊断中具有重要作用,通过静脉注入造影剂,可在胸骨旁大动脉短轴切面观察到肺动脉内呈负性显影,或在右心显影的同时腹主动脉内出现微泡,以上征象均有助于确诊大动脉水平右向左分流,明确PAH的病因^[41]。一般情况下,左向右分流可经二维超声或彩色多普勒识

别,但在动脉导管未闭或者存在主-肺动脉窗合并重度 PAH 出现双向分流,甚至完全右向左分流时易误诊为 PH^[42]。

5 心脏磁共振与超声心动图在 PH 诊断中的对比

心脏磁共振(cardiac magnetic resonance imaging, CMR)成像因其高空间分辨率、高灵敏度和可重复性强而成为临床测量右心室功能的常用检查方法^[43]。欧洲心脏病学会和欧洲呼吸病学会也推荐 CMR 可用于 PH 的辅助评估诊断^[44]。常规 CMR 可连续获得整个心动周期的图像数据,从而评估 PH 患者心功能状态、心室容积及肺动脉分支形态等。研究显示^[44],在 PAH 患者右心室功能评价中,CMR 的效果优于经胸三维超声检查,其主要原因为当 PAH 患者右心室处于扩张状态时,心脏超声在常规切面下较难对右心室最大面积进行测定,因此极易低估右心室扩张程度,而 CMR 成像不受患者体位和心脏位移的影响,能更准确地评估右心室容积与功能。

CMR 特征追踪技术可定量分析心室整体及局部心肌运动功能,并可在右心室功能发生明显恶化之前检测出心室局部改变^[45]。李颜玉等^[46]研究发现,压缩感知实时成像结合回顾性运动校正 CMR 电影序列,可显著缩短图像采集时间,并获得与 2D 分段采集结合回顾性心电门控相似甚至更优的图像质量,在 PAH 患者右心室功能及应变定量评价中具有高度准确性。

6 结语

PH 患者高危诊断指标包括心功能分级、6MWD、氨基末端脑钠肽前体(amino-terminal pro-brain natriuretic peptide, NT-proBNP)血清水平及影像学检查(超声心动图、CMR)。其中超声心动图作为 PH 的首选筛查手段,可通过序列检测,评估 PH 存在的可能性并探查病因。近年来随着超声新技术的发展,尤其是 3D-STE,超声心动图可为 PH 的诊断提供更多有效信息,以便于临床能更有效地干预和遏制 PH 患者的病情进展,提高患者生存率。

参考文献:

- [1] Maron B A, Brittain E L, Choudhary G, et al. Redefining pulmonary hypertension[J]. *Lancet Respir Med*, 2018, 6(3): 168-170.
- [2] Simonneau G, Montani D, Celermajer D S, et al. Haemodynamic definitions and updated clinical classification of pulmonary hypertension[J]. *Eur Respir J*, 2019, 53(1): 1801913.
- [3] Brugger N, Lichtblau M, Maeder M, et al. Two-dimensional transthoracic echocardiography at rest for the diagnosis, screening and management of pulmonary hypertension[J]. *Swiss Med Wkly*, 2021, 151: w20486.
- [4] Humbert M, Kovacs G, Hoeper M M, et al. 2022 ESC/ERS Guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension[J]. *Eur Heart J*, 2022, 43(38): 3618-3731.
- [5] Ruopp N F, Cockrill B A. Diagnosis and treatment of pulmonary arterial hypertension: a review[J]. *JAMA*, 2022, 327(14): 1379-1391.
- [6] Hassoun P M. Pulmonary arterial hypertension[J]. *N Engl J Med*, 2021, 385(25): 2361-2376.
- [7] Kylhammar D, Hesselstrand R, Nielsen S, et al. Angiogenic and inflammatory biomarkers for screening and follow-up in patients with pulmonary arterial hypertension[J]. *Scand J Rheumatol*, 2018, 47(4): 319-324.
- [8] Kariyawasam S, Brown J. Pulmonary arterial hypertension in pregnancy[J]. *BJA Educ*, 2023, 23(1): 24-31.
- [9] Kiely D G, Condliffe R, Webster V, et al. Improved survival in pregnancy and pulmonary hypertension using a multiprofessional approach[J]. *BJOG*, 2010, 117(5): 565-574.
- [10] Zhou Q, Peng P, Liu X Y, et al. Evaluation of maternal and fetal outcomes in pregnancy complicated with pulmonary arterial hypertension[J]. *Ann Palliat Med*, 2021, 10(2): 1404-1410.
- [11] Regitz-Zagrosek V, Roos-Hesselink J W, Bauersachs J, et al. 2018 ESC Guidelines for the management of cardiovascular diseases during pregnancy[J]. *Eur Heart J*, 2018, 39(34): 3165-3241.
- [12] Revuz S, Decullier E, Ginon I, et al. Pulmonary hypertension subtypes associated with hereditary haemorrhagic telangiectasia: Haemodynamic profiles and survival probability[J]. *PLoS One*, 2017, 12(10): e0184227.
- [13] Meinel K, Koestenberger M, Sallmon H, et al. Echocardiography for the assessment of pulmonary hypertension and congenital heart disease in the young[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2020, 11(1): 49.
- [14] Lowe S A, Steinweg K E. Review article: Management of hyperemesis gravidarum and nausea and vomiting in pregnancy[J]. *Emerg Med Australas*, 2022, 34(1): 9-15.

- [15] Sonaglioni A, Cassandro R, Luisi F, et al. Correlation between Doppler echocardiography and right heart catheterisation-derived systolic and mean pulmonary artery pressures: determinants of discrepancies between the two methods[J]. *Heart Lung Circ*, 2021, 30(5): 656-664.
- [16] Galiè N, Humbert M, Vachiery J L, et al. 2015 ESC/ERS Guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension: The Joint Task Force for the Diagnosis and Treatment of Pulmonary Hypertension of the European Society of Cardiology (ESC) and the European Respiratory Society (ERS): Endorsed by: Association for European Paediatric and Congenital Cardiology (AEPC), International Society for Heart and Lung Transplantation (ISHLT)[J]. *Eur Heart J*, 2016, 37(1): 67-119.
- [17] Valente A M, Cook S, Festa P, et al. Multimodality imaging guidelines for patients with repaired tetralogy of fallot: a report from the American Society of Echocardiography: developed in collaboration with the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance and the Society for Pediatric Radiology[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2014, 27(2): 111-141.
- [18] Schneider M, Binder T. Echocardiographic evaluation of the right heart[J]. *Wien Klin Wochenschr*, 2018, 130(13-14): 413-420.
- [19] De Vecchis R, Baldi C, Giandomenico G, et al. Estimating right atrial pressure using ultrasounds; an old issue revisited with new methods[J]. *J Clin Med Res*, 2016, 8(8): 569-574.
- [20] Huguet R, Fard D, d'Humieres T, et al. Three-dimensional inferior vena Cava for assessing central venous pressure in patients with cardiogenic shock[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2018, 31(9): 1034-1043.
- [21] Ahmad A, Li H, Zhang Y T, et al. Three-dimensional echocardiography assessment of right ventricular volumes and function: technological perspective and clinical application[J]. *Diagnostics*, 2022, 12(4): 806.
- [22] Lang R M, Badano L P, 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.
- [23] Lattanzio M, Scelsi L, Golino M, et al. Assessment of right ventricle in pulmonary arterial hypertension with three-dimensional echocardiography and cardiovascular magnetic resonance[J]. *J Cardiovasc Med*, 2021, 22(12): 929-936.
- [24] Ostenfeld E, Werther-Evaldsson A, Engblom H, et al. Discriminatory ability of right atrial volumes with two- and three-dimensional echocardiography to detect elevated right atrial pressure in pulmonary hypertension[J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2018, 38(2): 192-199.
- [25] Otani K, Nabeshima Y, Kitano T, et al. Accuracy of fully automated right ventricular quantification software with 3D echocardiography: direct comparison with cardiac magnetic resonance and semi-automated quantification software[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2020, 21(7): 787-795.
- [26] Kass D A, Maughan W L, Guo Z M, et al. Comparative influence of load versus inotropic states on indexes of ventricular contractility: experimental and theoretical analysis based on pressure-volume relationships[J]. *Circulation*, 1987, 76(6): 1422-1436.
- [27] Hieda M, Sarma S, Hearon C M Jr, et al. Increased myocardial stiffness in patients with high-risk left ventricular hypertrophy: the hallmark of stage-B heart failure with preserved ejection fraction[J]. *Circulation*, 2020, 141(2): 115-123.
- [28] Roof S R, Tang L F, Ostler J E, et al. Neuronal nitric oxide synthase is indispensable for the cardiac adaptive effects of exercise[J]. *Basic Res Cardiol*, 2013, 108(2): 332.
- [29] Pastore M C, Mandoli G E, Contorni F, et al. Speckle tracking echocardiography: early predictor of diagnosis and prognosis in coronary artery disease[J]. *Biomed Res Int*, 2021, 2021: 6685378.
- [30] da Costa Junior A A, Ota-Arakaki J S, Ramos R P, et al. Diagnostic and prognostic value of right ventricular strain in patients with pulmonary arterial hypertension and relatively preserved functional capacity studied with echocardiography and magnetic resonance[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2017, 33(1): 39-46.
- [31] Cameli M, Mondillo S, Galderisi M, et al. Speckle tracking echocardiography: a practical guide[J]. *G Ital Cardiol*, 2017, 18(4): 253-269.
- [32] Gullo A L, Rodríguez-Carrio J, Gallizzi R, et al. Speckle tracking echocardiography as a new diagnostic tool for an assessment of cardiovascular disease in rheumatic patients[J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 2020, 63(3): 327-340.
- [33] Werther Evaldsson A, Ingvarsson A, Smith J G, et al. Echocardiographic right ventricular strain from multiple apical views is superior for assessment of right ventricular systolic function[J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2019, 39(2): 168-176.
- [34] Li Y M, 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.
- [35] Smith B C, Dobson G, Dawson D, et al. Three-dimensional speckle tracking of the right ventricle: toward optimal quantification of right ventricular dysfunction in pulmonary hypertension[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2014, 64(1): 41-51.
- [36] Lee M M Y, Brooksbank K J M, Wetherall K, et al. Effect of empagliflozin on left ventricular volumes in patients with type 2 diabetes, or prediabetes, and heart failure with reduced ejection fraction (SUGAR-DM-HF) [J]. *Circulation*, 2021, 143(6): 516-525.
- [37] 张鑫媛, 李一丹. 超声心动图新技术评估肺动脉高压右心室重构的研究进展[J]. *心肺血管病杂志*, 2021, 40(11): 1179-1182.
- [38] Vijiic A, Onciul S, Guzu C, et al. Forgotten no more—the role of right ventricular dysfunction in heart failure with reduced ejection fraction: an echocardiographic perspective[J]. *Diagnostics*, 2021, 11(3): 548.
- [39] Molnár A á, Sánta A, Merkely B. Echocardiography imaging of the right ventricle: focus on three-dimensional echocardiography[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2023, 13(15): 2470.
- [40] 张奇, 徐薇, 张红, 等. 超声评价肺动脉高压患者右心室功能的研究进展[J]. *影像研究与医学应用*, 2019, 3(23): 10-11.
- [41] 商培力, 计晓娟. 右心声学造影的临床应用进展[J]. *局解手术学杂志*, 2022, 31(5): 452-455.
- [42] Kroon S, Van Thor M C J, Vorselaars V M M, et al. The use of echo density to quantify pulmonary right-to-left shunt in transthoracic contrast echocardiography [J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2021, 22(10): 1190-1196.
- [43] Borgquist R, Haugaa K H, Gilljam T, et al. The diagnostic performance of imaging methods in ARVC using the 2010 Task Force criteria[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2014, 15(11): 1219-1225.
- [44] 王意丹, 彭格红, 杨光旭. 心脏磁共振成像及经胸三维超声对肺动脉高压患者右心室功能的评价效果[J]. *临床和实验医学杂志*, 2021, 20(19): 2113-2116.
- [45] Shehata M L, Harouni A A, Skrok J, et al. Regional and global biventricular function in pulmonary arterial hypertension: a cardiac MR imaging study[J]. *Radiology*, 2013, 266(1): 114-122.
- [46] 李颜玉, 林路, 王健, 等. 压缩感知实时成像结合回顾性运动校正心脏磁共振电影序列对评估肺动脉高压患者右室功能及应变的应用价值[J]. *磁共振成像*, 2022, 13(10): 114-120.

[收稿日期 2024-02-07]