

超声心动图评价慢性肺源性心脏病患者右心功能的研究进展

赵丽玮¹, 马淑梅^{2*}

¹青海大学研究生院, 青海 西宁

²青海大学附属医院超声科, 青海 西宁

收稿日期: 2023年5月7日; 录用日期: 2023年5月31日; 发布日期: 2023年6月9日

摘要

慢性肺源性心脏病(Chronic pulmonary heart disease, CPHD)是指由肺、胸廓、肺动脉或呼吸调节功能的病变引起的肺循环阻力增高, 导致肺动脉高压和右心室肥大的一类疾病。右心功能的损害程度往往影响着CPHD患者的预后。准确评估右心室结构和功能在CPHD患者的诊断、治疗及预后中均有重要作用。本文就超声心动图评价慢性肺源性心脏病患者右心功能的研究进展进行综述。

关键词

超声心动图, 肺动脉高压, 右心功能

Research Progress of Echocardiographic Evaluation of Right Heart Function in Patients with Chronic Pulmonary Heart Disease

Liwei Zhao¹, Shumei Ma^{2*}

¹Graduate School of Qinghai University, Xining Qinghai

²Ultrasound Department, Affiliated Hospital of Qinghai University, Xining Qinghai

Received: May 7th, 2023; accepted: May 31st, 2023; published: Jun. 9th, 2023

Abstract

Chronic pulmonary heart disease refers to a kind of diseases caused by increased pulmonary cir-

*通讯作者。

culuation resistance of lesions in the lung, chest, pulmonary artery or respiratory regulatory function, leading to pulmonary artery hypertension and right ventricular hypertrophy. The degree of impairment of right heart function often affects the prognosis of patients with CPHD. Accurate assessment of right ventricular structure and function plays an important role in the diagnosis, treatment and prognosis of patients with chronic pulmonary heart disease. This review summarizes the progress of echocardiographic evaluation of right heart function in patients with chronic pulmonary heart disease.

Keywords

Echocardiography, Pulmonary Hypertension, Right Heart Function

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

慢性肺源性心脏病(Chronic pulmonary heart disease, CPHD)简称肺心病, 是一种由呼吸系统疾病引发的心血管疾病, 其发病率和病死率在心血管疾病中居于前列[1]。其病理过程是缺氧可引起肺小动脉持续收缩, 从而使肺血管口径缩小, 肺血管阻力增加, 导致肺动脉高压, 右心室负荷增大, 右心扩大及右心结构改变, 最终引发右心衰竭。由于右心室功能不全与各种心肺疾病患者的发病率和死亡率增加有关, 因此准确测定右心室功能在临床中越来越重要。本文就超声心动图在评价慢性肺源性心脏病患者右心功能中的应用进展进行综述。

2. 右心的解剖结构和生理功能

右心房是心的四腔之一, 是心腔中最靠右的部分。右心房分为前、后两部分, 前部分称固有右心房; 后部为腔静脉窦, 静脉窦内壁光滑, 上下分别有上腔静脉口和下腔静脉口。固有心房的前上部有一耳状的突出, 叫右心耳, 固有心房内壁表面不平滑, 当心功能发生障碍, 血流缓慢时, 易在此形成血栓。右心房的前下方有右房室口, 通入右心室。

右心室在形态和功能上与左心室不同。右心室的肌小梁粗大, 房室三尖瓣向心尖移位, 有多个乳头肌。然而, 右心室与左心室通过室间隔在功能上密切相关, 它们具有共同的心包间隙和心外膜周围肌细胞, 导致收缩和舒张相互依赖。在结构上, 右心室的心肌细胞比左心室的心肌细胞小 15%, 因此右心室的胶原蛋白更多。右心室和左心室的基因表达和蛋白质组成相似, 但由于新陈代谢不同, 右心室抵抗缺血的能力更强。它的促进因素包括氧化代谢比厌氧糖酵解更多, 氧摄取比左心室更高。另外, 右心室在舒张期和收缩期均有冠脉血流。

3. 肺源性心脏病患者右心功能的变化

与高原的低氧环境有关, 高原的特点就是低气压和低氧分压, 就容易出现呼吸困难, 导致肺部疾病的出现。在海拔 3000 米以上的健康个体中迅速发生肺水肿, 肺水肿形成前, 肺动脉压力的过度升高是重要的病理生理因素[2]。从低氧对肺血管的影响这个角度进行研究, 通过各种各样的实验方法, 研究一系列哺乳动物的呼吸气体对肺血管的影响[3], 低氧导致肺小血管的痉挛, 对肺动脉高压的形成是有一定影响的。

为适应肺血管阻力的增加、肺动脉压力上升, 右心室会代偿性的肥厚、增大, 并逐步进展为肺心病[4]。此过程右心室舒张末期容积(right ventricular end-diastolic volume, RVEDV)逐步增加。为了维持正常的每搏输出量(stroke volume, SV), 右心室 EF 会降低。但早期右心的收缩力并未发生明显改变, 因为研究表明, 稳定期 COPD 患者右心室运动仍在正常右心室 Frank-Starling 功能曲线的延伸线上。国外学者 Macnee W 在 2010 年认为即使在 PH 值较低的情况下, COPD 患者的 RV 收缩功能通常保持良好。除了用超声心动图评价右心室功能外, 心电图判断房室肥厚方向的标准具有较好的特异性, 但对房室肥厚的敏感性仅为 25%~40% [5]。

肺动脉压力升高, 造成心脏泵血困难, 导致右心室增大, 右心功能衰竭, 准确估测肺动脉压力对于评价右心系统非常重要, 学者 Quentin P. P. Croft, Federico Formenti 等人对估测肺动脉收缩压的方法进行了研究, 他们认为在大约 70% 的健康志愿者中, 可以用多普勒超声测到心室收缩期从右心室到右心房的反流。测量反流的峰值速度(v)以估算右心室(压力接近肺动脉收缩压)和右心房压之间的收缩压差 DPmax。同理我们可以用此方法估测肺心病肺动脉高压的数值[6]。

在重度右心室肥厚的肺气肿患者中, LVEF 是得以保留的[7]。在 COPD 急性加重时, 右心室可能出现心力衰竭, 表现为右心室的舒张末期压力和容量升高、右心室 EF 降低, 导致外周的充血水肿。慢性阻塞性肺疾病患者的肺高压变化较慢, 对右心室结构和功能的影响可能不同于急性阻塞性肺疾病(例如大面积肺栓塞), 因为在慢性阻塞性肺疾病患者中, 右心室有更多的时间适应慢性阻塞性肺疾病患者的压力负荷。COPD 患者右心衰发展的观点是, 肺高压增加了右心室所做的机械功, 导致右心的肥厚和扩张, 房室功能发生障碍。在肺高压值较低的情况下, COPD 患者的 RV 收缩功能通常保持良好, 但合并重度肺高压的慢阻肺患者预后极差。

4. 超声心动图评价不同类型肺源性心脏病患者右心功能

急性肺心病最常见的病因是急性肺栓塞, 而慢性肺心病通常由慢性阻塞性肺疾病引起, 其次是特发性肺纤维化(Idiopathic pulmonary fibrosis)和慢性血栓栓塞性肺动脉高压(chronic thromboembolic pulmonary hypertension) [8]。一些标准的右心室功能超声心动图参数, 如 TAPSE 和三尖瓣 s 速度, 在急性肺心病患者中敏感性和特异性较低, 有时是正常的。事实上, 它们的减少可能只出现在有显著血流动力学损害的病例中[9]。例如肺动脉高压的患者同时并发急性深静脉血栓形成, 急性呼吸衰竭的发生率更高, TAPSE 和三尖瓣 s 速度这些超声心动图的参数也更容易出现异常[10]。

通常, 这些疾病会引起慢性低氧血症或肺循环的重构, 右心室为了适应这种现象, 将血液泵入肺部, 增加了所需的机械功。超声心动图的评价是这些患者的诊断和预后分层的基石。本综述指出了几种功能和形态超声心动图右心室参数, 尤其是来自新技术的参数, 为临床医生提供有价值且易于获得的工具, 以评估肺心病患者的右心室功能, 并定期评估功能稳定性、随时间推移的恶化或改善。

5. 评价慢性阻塞性肺疾病相关肺动脉高压患者的右心功能

尽管超声心动图总能提供额外的信息, 有时也能发挥重要作用。然而, 有两种情况可能很难区分, 即肺栓塞和慢性血栓栓塞性肺动脉高压。单纯的超声心动图较难区分这两者。事实上, 目前的证据很少, 有时还相互矛盾。肺高压是导致慢性肺心病的所有疾病的共同特征。国内学者顾晴, 何建国等人对肺动脉高压的标准进行了界定。除了单纯的超声心动图, 一些新技术的引入解决了这些难题。3DE 已成为 RV 量化的有效替代方法, 因为它克服了 2DE 的一些缺点, 如前景缩短和几何假设。事实上, 许多研究已经通过心脏磁共振测量[11], 特别是右心室容积和射血分数, 验证了该技术在肺高压患者中的额外预后价值。例如, 在慢性肺高压中, 与传统的 RV 指标相比, 3D、2D-STE 和 3D-STE 参数是全球和区域 RV

功能障碍的更好指标[12]。由于右心室解剖结构复杂, 确定右心室(RV)功能具有挑战性。三维超声心动图估测右心室功能的效果更好, 常规二维超声心动图对右心室的评估在技术上仍然具有挑战性。国外的学者认为三维引导程序已被证明可以增加二维(2D)左心室容积计算的再现性[13]。

从国外的发展趋势和研究现状看, 发达国家对于右心室功能不全的评估相对比较成熟, 已经有多个领域成功实施的案例, 临床医生很大程度上依赖于无创成像方法来评估右心室功能。二维超声心动图是分析右心室功能的主要技术, 但最近提出了其他技术, 包括组织多普勒成像(TDI)技术, 三维超声心动图, 磁共振成像(MRI), 甚至有创的压力容积环评估。目前的文献中提供了这些评估右心室功能的成像模式的概述[14]。在四腔心切面上追踪右心室, 并结合胸骨旁短轴切面, 评估右心室大小及功能变化[15] [16] [17] [18]。右心室大小(收缩期末和舒张期末)和心脏周期内的大小变化(右心室功能)也可以通过示踪右心室内膜边界或测量右心室尺寸来定量评估。然而, 这通常是繁琐的, 并且观察者之间的可变性很高[19]-[30]。另一个原因, 右心室是不规则的几何体, 尽管近年以来组织多普勒应变、应变率及二维斑点追踪技术广泛应用于右室功能的研究, 尤其二维斑点追踪技术既无角度依赖性, 亦可客观定量分析心肌局部及二维层面整体的功能, 但二维斑点追踪技术要求声学斑点在固定的二维平面内运动, 这会导致追踪结果的相对不准确, 其并不能对心肌实时三维结构进行分析。有些研究采用的三维斑点追踪成像技术具备无“跨平面失追踪”的特点, 能同步呈现心脏功能的大量信息等优点, 能客观、敏感、全面、准确地评价心脏功能情况。

6. 评价急性阻塞性肺疾病相关肺动脉高压患者的右心功能

急性肺栓塞的快速诊断很重要, 因为治疗时间影响其预后。根据最新的欧洲心脏病学会指南关于肺栓塞的诊断和管理, 超声心动图在评估血流动力学和肺栓塞的患者中起着关键作用。近几年超声心动图技术的进步(如 3DE 和 STE)使得在良好声窗的患者中, 可以更准确地评估局部和整体右心室几何形状、尺寸和收缩功能, 从而克服了许多 2D 评估的限制[31]。两种新的右心室函数参数, 特别是右心室 Tei 指数和 STE 测定的右心室游离壁应变, 与死亡率独立相关, 而这种相关性尚未在任何右心室直径、TAPSE 或 RVFAC 中得到证实。此外, 这些指标也显示出与肺栓塞严重程度相关, 这表明它们可能降低死亡风险[32]。

除了诊断技术的提高, 诊断的指标也相应完善起来, 例如右心房压力是反映肺高压患者右心室负荷过重的指标, 是患者死亡的独立预测因子。同时, 右心房的大小也可预测肺动脉高压患者出现心力衰竭等不良心血管事件的发生。右心衰竭是一种由多种原因引起的复杂的临床综合征。对于较多疾病, 研究工作过多地集中在衰竭的左心室, 但我们认识到需要对右心室解剖、生理学、病理生理学和治疗方法有更全面的了解, 才能较好评估病人的心功能状况。在压力负荷过重或容量负荷过重的情况下, 右心室的力学和功能都会发生改变。衰竭也可由缺血、心肌病或心律失常引起的心肌收缩力的降低引起。功能障碍导致右心室充盈受损和右心房压升高。

国外对于慢性肺源性心脏病的研究相对比较完善, 许多学者对肺动脉高压所致慢性肺源性心脏病心功能的改变进行了深入的研究, 慢性肺源性心脏病发展过程一般比较缓慢, 多年无法确定。肺动脉高压影响右心功能的过程可分为无症状期和症状期。对慢性肺源性心脏病右心功能的评估, 特别是无症状期, 实施超声心动图检查是非常有必要的。

7. 局限性

本综述主要应用常规超声技术对肺心病右室壁的心肌运动进行分析, 但从本综述目前搜集到的文献来看, 虽然众多学者对慢性肺源性心脏病右心功能的评估进行了多方面的研究, 但是这些研究中也存在

欠缺和不足之处,而且目前应用的常规超声技术在本课题应用过程中还存在以下局限性:1) 角度依赖性;2) 噪音的影响;3) 重复性略差;4) 切面图像,切面是否标准,二维图像是否清晰,对测值结果有明显影响,尤其是肺气体的干扰。

8. 展望

肺心病病人的临床表现较不同,针对其不同的病因需要个体化治疗,随着超声仪的改进,将有助于改进图像质量各种自动的定量分析技术的进一步完善,包括从一维到二维到动态三维显示方法将有助于改善常规超声的角度信赖性,提高测量的准确性和重复性,对肺心病的心肌运动分析将会更加透彻,三维也可帮助临床医生制定针对肺心病患者的个体化方案,使疾病的发展得到及时有效的控制。

参考文献

- [1] 杨瑞红, 何权瀛. 慢性肺源性心脏病的病因与发病机制[J]. 新医学, 2005, 36(9): 502-503.
- [2] Bärtsch, P., Mairbäurl, H., Maggiorini, M. and Swenson, E.R. (2005) Physiological Aspects of High-Altitude Pulmonary Edema. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, **98**, 1101-1110. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01167.2004>
- [3] Dorrington, K.L. and Talbot, N.P. (2004) Human Pulmonary Vascular Responses to Hypoxia and Hypercapnia. *Pflugers Archiv: European Journal of Physiology*, **449**, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s00424-004-1296-z>
- [4] 高杨, 李菲, 朱晨曦, 朱光发, 陈如冲. 慢性阻塞性肺疾病合并右心功能不全的研究进展[J]. 心肺血管病杂志, 2020, 39(5): 617-621.
- [5] Macnee, W. (2010) Right Heart Function in COPD. *Seminars in Respiratory and Critical Care Medicine*, **31**, 295-312. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1254070>
- [6] Croft, Q.P., Formenti, F., Talbot, N.P., Lunn, D., Robbins, P.A. and Dorrington, K.L. (2013) Variations in Alveolar Partial Pressure for Carbon Dioxide and Oxygen Have Additive Not Synergistic Acute Effects on Human Pulmonary Vasoconstriction. *PLOS ONE*, **8**, e67886. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067886>
- [7] Vonk Noordegraaf, A., Marcus, J.T., Roseboom, B., Postmus, P.E., Faes, T.J. and de Vries, P.M. (1997) The Effect of Right Ventricular Hypertrophy on Left Ventricular Ejection Fraction in Pulmonary Emphysema. *Chest*, **112**, 640-645. <https://doi.org/10.1378/chest.112.3.640>
- [8] Mandoli, G.E., Sciacaluga, C., Bandera, F., Cameli, P., Esposito, R., D'Andrea, A., Evola, V., Sorrentino, R., Malagoli, A., Sisti, N., Nistor, D., Santoro, C., Bargagli, E., Mondillo, S., Galderisi, M., Cameli, M. and Working Group of Echocardiography of Italian Society of Cardiology (SIC) (2021) Cor Pulmonale: The Role of Traditional and Advanced Echocardiography in the Acute and Chronic Settings. *Heart Failure Reviews*, **26**, 263-275. <https://doi.org/10.1007/s10741-020-10014-4>
- [9] Chung, T., Emmett, L., Mansberg, R., Peters, M. and Kritharides, L. (2007) Natural History of Right Ventricular Dysfunction after Acute Pulmonary Embolism. *Journal of the American Society of Echocardiography: Official Publication of the American Society of Echocardiography*, **20**, 885-894. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2006.12.005>
- [10] Patel, B., Shah, M., Garg, L., Agarwal, M., Martinez, M. and Dusaj, R. (2018) Trends in the Use of Echocardiography in Pulmonary Embolism. *Medicine*, **97**, e12104. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000012104>
- [11] Shimada, Y.J., Shiota, M., Siegel, R.J. and Shiota, T. (2010) Accuracy of Right Ventricular Volumes and Function Determined by Three-Dimensional Echocardiography in Comparison with Magnetic Resonance Imaging: A Meta-Analysis Study. *Journal of the American Society of Echocardiography: Official Publication of the American Society of Echocardiography*, **23**, 943-953. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2010.06.029>
- [12] Vitarelli, A., Mangieri, E., Terzano, C., Gaudio, C., Salsano, F., Rosato, E., Capotosto, L., D'Orazio, S., Azzano, A., Trusculli, G., Cocco, N. and Ashurov, R. (2015) Three-Dimensional Echocardiography and 2D-3D Speckle-Tracking Imaging in Chronic Pulmonary Hypertension: Diagnostic Accuracy in Detecting Hemodynamic Signs of Right Ventricular (RV) Failure. *Journal of the American Heart Association*, **4**, e001584. <https://doi.org/10.1161/JAHA.114.001584>
- [13] Dorosz, J.L., Bolson, E.L., Waiss, M.S. and Sheehan, F.H. (2003) Three-Dimensional Visual Guidance Improves the Accuracy of Calculating Right Ventricular Volume with Two-Dimensional Echocardiography. *Journal of the American Society of Echocardiography: Official Publication of the American Society of Echocardiography*, **16**, 675-681. [https://doi.org/10.1016/S0894-7317\(03\)00226-8](https://doi.org/10.1016/S0894-7317(03)00226-8)
- [14] Bleeker, G.B., Steendijk, P., Holman, E.R., Yu, C.M., Breithardt, O.A., Kaandorp, T.A., Schali, M.J., van der Wall,

- E.E., Nihoyannopoulos, P. and Bax, J.J. (2006) Assessing Right Ventricular Function: The Role of Echocardiography and Complementary Technologies. *Heart (British Cardiac Society)*, **92**, i19-i26. <https://doi.org/10.1136/hrt.2005.082503>
- [15] Helbing, W.A., Bosch, H.G., Maliepaard, C., Rebergen, S.A., van der Geest, R.J., Hansen, B., Ottenkamp, J., Reiber, J.H. and de Roos, A. (1995) Comparison of Echocardiographic Methods with Magnetic Resonance Imaging for Assessment of Right Ventricular Function in Children. *The American Journal of Cardiology*, **76**, 589-594. [https://doi.org/10.1016/S0002-9149\(99\)80161-1](https://doi.org/10.1016/S0002-9149(99)80161-1)
- [16] Denslow, S. and Wiles, H.B. (1998) Right Ventricular Volumes Revisited: A Simple Model and Simple Formula for Echocardiographic Determination. *Journal of the American Society of Echocardiography: Official Publication of the American Society of Echocardiography*, **11**, 864-873. [https://doi.org/10.1016/S0894-7317\(98\)70006-9](https://doi.org/10.1016/S0894-7317(98)70006-9)
- [17] Levine, R.A., Gibson, T.C., Aretz, T., Gillam, L.D., Guyer, D.E., King, M.E. and Weyman, A.E. (1984) Echocardiographic Measurement of Right Ventricular Volume. *Circulation*, **69**, 497-505. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.69.3.497>
- [18] Kovalova, S., Necas, J., Cerbak, R., Malik, P. and Vespalec, J. (2005) Echocardiographic Volumetry of the Right Ventricle. *European Journal of Echocardiography: The Journal of the Working Group on Echocardiography of the European Society of Cardiology*, **6**, 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.euje.2004.04.009>
- [19] Foale, R., Nihoyannopoulos, P., McKenna, W., Kleinebenne, A., Nadazdin, A., Rowland, E. and Smith, G. (1986) Echocardiographic Measurement of the Normal Adult Right Ventricle. *British Heart Journal*, **56**, 33-44. <https://doi.org/10.1136/hrt.56.1.33>
- [20] Berger, M., Haimowitz, A., Van Tosh, A., Berdoff, R.L. and Goldberg, E. (1985) Quantitative Assessment of Pulmonary Hypertension in Patients with Tricuspid Regurgitation Using Continuous Wave Doppler Ultrasound. *Journal of the American College of Cardiology*, **6**, 359-365. [https://doi.org/10.1016/S0735-1097\(85\)80172-8](https://doi.org/10.1016/S0735-1097(85)80172-8)
- [21] Kaul, S., Tei, C., Hopkins, J.M. and Shah, P.M. (1984) Assessment of Right Ventricular Function Using Two-Dimensional Echocardiography. *American Heart Journal*, **107**, 526-531. [https://doi.org/10.1016/0002-8703\(84\)90095-4](https://doi.org/10.1016/0002-8703(84)90095-4)
- [22] Starling, M.R., Crawford, M.H., Sorensen, S.G. and O'Rourke, R.A. (1982) A New Two-Dimensional Echocardiographic Technique for Evaluating Right Ventricular Size and Performance in Patients with Obstructive Lung Disease. *Circulation*, **66**, 612-620. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.66.3.612>
- [23] Ghio, S., Recusani, F., Klersy, C., Sebastiani, R., Laudisa, M.L., Campana, C., Gavazzi, A. and Tavazzi, L. (2000) Prognostic Usefulness of the Tricuspid Annular Plane Systolic Excursion in Patients with Congestive Heart Failure Secondary to Idiopathic or Ischemic Dilated Cardiomyopathy. *The American Journal of Cardiology*, **85**, 837-842. [https://doi.org/10.1016/S0002-9149\(99\)00877-2](https://doi.org/10.1016/S0002-9149(99)00877-2)
- [24] Helbing, W.A., Bosch, H.G., Maliepaard, C., Rebergen, S.A., van der Geest, R.J., Hansen, B., Ottenkamp, J., Reiber, J.H. and de Roos, A. (1995) Comparison of Echocardiographic Methods with Magnetic Resonance Imaging for Assessment of Right Ventricular Function in Children. *The American Journal of Cardiology*, **76**, 589-594. [https://doi.org/10.1016/S0002-9149\(99\)80161-1](https://doi.org/10.1016/S0002-9149(99)80161-1)
- [25] Denslow, S. and Wiles, H.B. (1998) Right Ventricular Volumes Revisited: A Simple Model and Simple Formula for Echocardiographic Determination. *Journal of the American Society of Echocardiography: Official Publication of the American Society of Echocardiography*, **11**, 864-873. [https://doi.org/10.1016/S0894-7317\(98\)70006-9](https://doi.org/10.1016/S0894-7317(98)70006-9)
- [26] Schenk, P., Globits, S., Koller, J., Brunner, C., Artemiou, O., Klepetko, W. and Burghuber, O.C. (2000) Accuracy of Echocardiographic Right Ventricular Parameters in Patients with Different End-Stage Lung Diseases Prior to Lung Transplantation. *The Journal of Heart and Lung Transplantation: The Official Publication of the International Society for Heart Transplantation*, **19**, 145-154. [https://doi.org/10.1016/S1053-2498\(99\)00121-7](https://doi.org/10.1016/S1053-2498(99)00121-7)
- [27] Hinderliter, A.L., Willis, P.W., Long, W.A., Clarke, W.R., Ralph, D., Caldwell, E.J., Williams, W., Ettinger, N.A., Hill, N.S., Summer, W.R., de Boisblanc, B., Koch, G., Li, S., Clayton, L.M., Jöbsis, M.M., Crow, J.W. and PPH Study Group (2003) Frequency and Severity of Tricuspid Regurgitation Determined by Doppler Echocardiography in Primary Pulmonary Hypertension. *The American Journal of Cardiology*, **91**, 1033-1037. [https://doi.org/10.1016/S0002-9149\(03\)00136-X](https://doi.org/10.1016/S0002-9149(03)00136-X)
- [28] Levine, R.A., Gibson, T.C., Aretz, T., Gillam, L.D., Guyer, D.E., King, M.E. and Weyman, A.E. (1984) Echocardiographic Measurement of Right Ventricular Volume. *Circulation*, **69**, 497-505. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.69.3.497>
- [29] Kovalova, S., Necas, J., Cerbak, R., Malik, P. and Vespalec, J. (2005) Echocardiographic Volumetry of the Right Ventricle. *European Journal of Echocardiography: The Journal of the Working Group on Echocardiography of the European Society of Cardiology*, **6**, 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.euje.2004.04.009>
- [30] Aebischer, N., Meuli, R., Jeanrenaud, X., Koerfer, J. and Kappenberger, L. (1998) An Echocardiographic and Magnetic Resonance Imaging Comparative Study of Right Ventricular Volume Determination. *International Journal of Cardiac Imaging*, **14**, 271-278. <https://doi.org/10.1023/A:1006055512362>
- [31] Sciacaluga, C., D'Ascenzi, F., Mandoli, G.E., Rizzo, L., Sisti, N., Carrucola, C., Cameli, P., Bigio, E., Mondillo, S. and Cameli, M. (2020) Traditional and Novel Imaging of Right Ventricular Function in Patients with Heart Failure and

Reduced Ejection Fraction. *Current Heart Failure Reports*, **17**, 28-33. <https://doi.org/10.1007/s11897-020-00455-1>

- [32] Dahhan, T., Siddiqui, I., Tapson, V.F., Velazquez, E.J., Sun, S., Davenport, C.A., Samad, Z. and Rajagopal, S. (2016) Clinical and Echocardiographic Predictors of Mortality in Acute Pulmonary Embolism. *Cardiovascular Ultrasound*, **14**, Article No. 44. <https://doi.org/10.1186/s12947-016-0087-y>