

右心室应变影像评估技术在肺动脉高压中的研究进展

廖满珍^{1,2} 综述 肖云彬² 审校

(1. 南华大学儿科学院 (湖南省儿童医院), 湖南长沙 410007;

2. 湖南省儿童医院心血管内科, 湖南长沙 410007)

[摘要] 肺动脉高压 (pulmonary arterial hypertension, PAH) 起病隐匿, 进展迅速, 病死率高, 影像评估是 PAH 患者的重要诊断和随访方法。右心室 (right ventricular, RV) 应变评估可识别 RV 功能障碍的早期变化及预测患者预后。目前临床中可通过组织多普勒成像技术、速度向量成像技术、斑点追踪成像技术以及心脏磁共振技术等多种方法对 PAH 患者 RV 应变进行评估。该文旨在总结 PAH 患者 RV 应变影像评估技术的研究进展, 从而为临床诊断和随访 PAH 患者提供依据。

[中国当代儿科杂志, 2024, 26 (8): 887-892]

[关键词] 肺动脉高压; 右心室应变; 影像技术

Research progress of right ventricular strain imaging evaluation technology in pulmonary arterial hypertension

LIAO Man-Zhen, XIAO Yun-Bin. Department of Cardiology, Hunan Children's Hospital, Changsha 410007, China (Xiao Y-B, Email: xiaoyunbinrui@126.com)

Abstract: Pulmonary arterial hypertension (PAH) has a subtle onset, rapid progression, and high mortality rate. Imaging evaluation is an important diagnostic and follow-up method for PAH patients. Right ventricular (RV) strain evaluation can identify early changes in RV function and predict the prognosis. Currently, various methods such as tissue Doppler imaging, velocity vector imaging, speckle tracking imaging, and cardiac magnetic resonance imaging can be used to evaluate RV strain in PAH patients. This article aims to summarize the research progress of RV strain imaging evaluation technology in PAH patients, in order to provide a basis for clinical diagnosis and follow-up of PAH patients.

[Chinese Journal of Contemporary Pediatrics, 2024, 26(8): 887-892]

Key words: Pulmonary arterial hypertension; Right ventricular strain; Imaging technology

肺动脉高压 (pulmonary arterial hypertension, PAH) 是一种严重致命性疾病, 其特征是肺动脉压力 (pulmonary artery pressure, PAP) 升高、肺血管阻力 (pulmonary vascular resistance, PVR) 进行性增加, 最终导致患者右心室 (right ventricular, RV) 衰竭和死亡^[1-4]。因此 RV 功能评估在 PAH 患者的诊断和随访中占据重要地位。RV 应变是指 RV 心肌在受到张力作用下发生形变的能力^[4]。在 PAH 中, RV 应变随着 PAP、PVR 的增加而减少^[5]。RV

应变分析是一种简单、无创的 RV 功能评估方法, 可评估 RV 整体和局部功能^[6]。目前, 评估 PAH 患者 RV 应变的影像技术主要包括组织多普勒成像技术 (tissue Doppler imaging, TDI)、速度向量成像技术 (velocity vector imaging, VVI)、斑点追踪成像技术 (speckle tracking imaging, STI)、心脏磁共振技术 (cardiac magnetic resonance, CMR) 等, 本文旨在总结 PAH 患者 RV 应变影像评估技术的研究进展, 为临床诊断和随访 PAH 患者提供最新依据。

[收稿日期] 2024-03-20; [接受日期] 2024-06-18

[基金项目] 国家自然科学基金 (81500041); 湖南省自然科学基金项目 (2024JJ9340); 长沙市自然科学基金 (kq2208088); 湖南省科技创新计划 (2023RC4012)。

[作者简介] 廖满珍, 女, 硕士研究生。

[通信作者] 肖云彬, 女, 主任医师。Email: xiaoyunbinrui@126.com。

1 PAH中RV收缩、舒张功能的改变

RV具有复杂的几何形态,呈不规则新月形结构,室腔分为流入道和流出道两部分;RV心肌由纵行心肌和环形心肌构成,前者在RV收缩和舒张过程中发挥主要作用^[7-8]。RV收缩是一种复杂的蠕动运动,通常认为纵向缩短是射血的主要决定因素^[9-10]。PAH早期阶段RV后负荷略有增加,心肌通过增加收缩力以维持RV-肺动脉(pulmonary artery, PA)耦联;当后负荷急剧增加时,会导致RV明显扩张、心肌发生形变,并导致RV心肌应变降低及收缩功能减弱;长期处于压力过载状态的RV无法持续增加收缩力,导致RV心肌肥大、纤维化和舒张僵硬增加,使RV顺应性下降、舒张功能减弱,进而引起RV功能障碍和衰竭^[4, 11-12]。目前,关于RV功能障碍和衰竭的机制尚不清楚。根据Frank-Starling机制,PAH早期时RV舒张末期容积的增加可以改善心输出量;然而,长期增加的RV舒张末期容积会引发神经激素和体液因子发生适应性改变,诱发RV功能障碍,并对左心室(left ventricular, LV)产生机械性影响^[9, 13]。

2 PAH中RV-PA耦联与解耦联

RV-PA耦联定义为收缩末期弹性(end-systolic elastance, Ees)与动脉弹性(arterial elastance, Ea)的比值,即Ees/Ea;其正常范围为1.5~2.0^[4, 14-16]。然而,在临床研究中,Ees/Ea正常值界限尚未确定。通过计算Ees/Ea可判断PAH患者RV衰竭程度和预测预后,其预后评估的临界值为0.65~0.8^[14, 16-17]。Richter等^[14]指出Ees/Ea<0.7是PAH患者临床恶化的独立预测因子。在PAH早期阶段,初始Ees/Ea处于正常,RV通过增加收缩力以维持RV-PA耦联;随着PAH进展,Ees/Ea基本保持正常或略微降低,随着PAP和PVR增加,RV扩张,收缩力进一步增加以维持心输出量,导致RV与PA之间处于轻度或中度解耦联状态;而在PAH晚期阶段,RV收缩力的增加不足以克服后负荷的增加,心输出量减少,Ees/Ea明显降低,RV-PA解耦联程度加重,进而导致RV功能障碍和衰竭^[4, 14, 16]。Tello等^[4]研究表明,当PAH患者Ees/Ea由正常值1.5~2.0降至0.8以下时,RV-PA重度解耦联,随之发生RV功能障碍和衰竭。Rako等^[18]研究纳入53例PAH患者,根据Tello等^[4]研究将

RV-PA重度解耦联定义为Ees/Ea<0.8,其中23例为RV-PA无或轻度解耦联,Ees/Ea≥1.3;24例为RV-PA中度解耦联,Ees/Ea为0.8~1.29;6例为RV-PA重度解耦联,Ees/Ea<0.8;这些数据为PAH病情进展过程中RV-PA耦联与解耦联的量化值Ees/Ea的变化提供了重要参考。

3 PAH中RV应变和应变率

RV应变根据心肌的运动方向分为纵向应变(longitudinal strain, LS)、环向应变(circumferential strain, CS)和径向应变(radial strain, RS)^[4]。RV应变率(strain rate, SR)是指RV心肌发生形变的速度^[19-20]。目前,RV应变参数证明是比RV射血分数更具有预测心肌功能障碍的价值,并广泛应用于PAH的预后评估^[21-24]。RV常用的应变参数主要包括LS、CS、RS,以及相应的SR。RV纵向心肌的收缩运动是RV收缩的主要动力源,所以目前RV研究的较多参数是RV LS,这一参数能够有效反映RV局部功能的变化^[7-8, 10]。Caivano等^[19]在PAH犬模型中的研究表明,随着PAH恶化,RV应变和SR均降低。

4 TDI

TDI不受RV几何形态影响,可重复性良好,时间分辨率较高,可显示RV局部心肌组织运动的速度,并测量RV局部心肌应变及SR^[25-26]。李玉曼等^[26]采用TDI和超声二维应变技术对42例PAH患者进行应变及SR分析,结果显示TDI测得PAH患者右心室游离壁(right ventricular free wall, RVFW)中间段LS及SR明显低于对照组,但RVFW基底段和心尖段LS及SR无明显降低;而超声二维应变技术测得RVFW各节段LS及SR均低于对照组,表明PAH患者RV纵向收缩功能减弱,TDI测量基底段和心尖段应变及SR受声速夹角的影响较大,而二维应变相对于TDI更能准确地评估RV纵向收缩功能。近年来,TDI在PAH RV应变分析中受到角度依赖性、有限的空间分辨率以及仅能进行一维估测等局限性的影响,未能广泛应用于临床实践中。

5 VVI

VVI是一种不受角度影响、无创性定量评价心肌功能的超声新技术,主要采用组织灰阶优化技

术成像,可显示心室的各个节段在径向与纵向方面的力学行为;该技术具有数据采集方便、简单、可重复等优点,可测量RV各个节段应变和SR^[27]。Meng等^[27]利用VVI进行有关RV应变及SR研究,结果发现与对照组相比,PAH患者RVFW和室间隔各个节段收缩和舒张早期应变及SR均降低,表明VVI测量的应变和SR可以反映PAH患者RV收缩和舒张功能障碍的早期变化^[27]。然而,VVI技术存在一定局限性,如不能准确测量心律不齐受试者的数值,低帧频时容易丢失瞬时信息,且对图像清晰度要求高;因此其临床应用时间不长。

6 STI

STI是一种相对较新的RV应变无创评估方法,可定量测量RV心肌运动速度、应变、SR等,并评价RV整体和局部的功能^[28]。STI根据测量维度的不同分为二维斑点追踪超声心动图(two-dimensional speckle-tracking echocardiography, 2D-STE)和三维斑点追踪超声心动图(three-dimensional speckle-tracking echocardiography, 3D-STE)。

2D-STE利用高帧频二维灰阶图像来追踪心肌内回声斑点的运动轨迹,从而定量评估RV心肌运动速度、应变及SR;该技术不受角度和RV几何形态影响,能准确评估RV整体和局部心肌的应变情况^[19]。2D-STE是目前临床上广泛应用于衡量心肌应变和SR的技术之一。Liu等^[29]对58例PAH患儿[平均年龄(6±3)岁]进行研究,结果显示这些患儿RVLS和右心室游离壁应变(right ventricular free wall strain, RVFWS)绝对值均降低,表明RV收缩功能减弱;为验证RV应变与RV功能评估的可靠性,该研究对PAH患儿RV应变与右心导管(right heart catheterization, RHC)数据进行相关性分析,结果显示RVLS、RVFWS与肺动脉平均压(mean pulmonary artery pressure, mPAP)、PVR密切相关;此外,该研究发现2例PAH晚期阶段运动受限的患儿,虽然PAP轻度升高,但RV应变绝对值明显下降,说明RV应变对评价RV功能减弱的敏感性较高。2D-STE主要受二维影像的质量和帧频等因素影响。2D-STE只能评估二维平面内心肌的形变,而心肌运动是三维的,因此对其他方向的形变测量存在一定的局限性。

3D-STE利用三维空间追踪心肌内回声斑点的

运动轨迹,具有无声波角度依赖性和更高的心肌应变评估准确性,能够同时提供LS、CS和RS的定量评价^[24]。该技术是基于三维超声心动图发展而来,可将RV分为间隔壁和游离壁,并进一步分为入口、出口、体部和心尖部,用以研究RV的局部和整体的面积应变^[30]。Jone等^[30]研究发现,当RV衰竭时,心尖部首先受累,RVFW心尖部面积应变为了解PAH患者RV功能障碍的机制提供线索,局部应变可能成为未来广泛应用的RV功能评估方法。Li等^[24]研究对54例PAH患者进行RV应变分析,结果表明轻度PAH患者的2D-STE和3D-STE RVLS降低;中、重度PAH患者2D-STE和3D-STE RVLS、CS、RS均降低,其中3D-STE RVLS比2D-STE RVLS更低,因此2D-STE RVLS和3D-STE RVLS是PAH严重程度和预测预后的重要参数^[24]。然而,3D-STE的时间和空间分辨率较低,对图像质量依赖性高。由于RV结构的复杂性,3D-STE更适用于研究RV应变,但目前关于3D-STE在PAH RV应变方面的研究还较少,临床上2D-STE的应用价值更大,需要更多的临床研究来确认3D-STE的有效性。

7 CMR

CMR具有比超声更高的组织分辨率。CMR测量的RV应变证明是RV收缩功能障碍较为敏感和较早的标志物^[6, 31]。Tello等^[4]利用CMR对38例PAH患者进行RV应变分析,以评估RV-PA耦联和RV舒张功能;研究显示,长期RV压力超负荷时,RV长轴RS比LS下降更明显,这可能与RV-PA解耦联相关;此外,长轴RVLS与RV舒张僵硬增加相关;在CMR RV应变与RHC数据相关性分析中发现,长轴RVLS与mPAP和PVR相关,而短轴RVCS和长轴RVRS与PVR相关;因此,CMR RV应变分析可能是评估RV-PA解耦联的有前景指标,并拓展了CMR在PAH患者随访中评估RV功能的潜在应用范围^[4]。

心脏磁共振组织追踪(cardiac magnetic resonance-tissue tracking, CMR-TT)技术对常规CMR数据进行后处理,获得心肌应变参数;CMR-TT无需额外的序列或图像,且重复性良好^[6]。Cao等^[6]利用CMR-TT对47例PAH患者进行双室心肌应变分析,研究结果显示,除LV整体RS外,PAH患者的双心室整体RS、CS、LS均显著低于健康对

照组；对于RV功能保留的PAH患者，除RV基底段整体CS外，RV整体和节段RS、CS和LS均显著低于健康对照组；这表明在RV射血分数明显下降之前，使用CMR-TT检测已知PAH患者的RV功能障碍是可行的。

心脏磁共振特征追踪 (cardiac magnetic resonance-feature tracking, CMR-FT) 技术可以定量评估心肌形变，从而反映收缩和舒张功能^[31-33]。目前，CMR-FT技术在临床应用中最为广泛。Lindholm等^[34]使用CMR-FT对伴有和不伴有PAH的系统性硬化症 (systemic sclerosis, SSc) 患者进行双心室应变分析，研究对象包括57例SSc患者，其中38例无PAH，19例合并PAH；研究结果显示，合并PAH的SSc患者LV和RVFW整体纵向应变 (global longitudinal strain, GLS) 低于无PAH SSc组和健康对照组，LV和RVFW GLS随着mPAP和PVR的增加而下降；表明GLS降低主要由PAP升高所致，而非SSc本身；RVFWS与RHC测得数据mPAP、PVR、PA收缩压和PA舒张压均相关。一项关于应用CMR-FT评估毛细血管前PAH患者心肌应变的研究显示，毛细血管前PAH患者RV GLS明显受损，RV GLS降低的程度与RV衰竭显著相关，表明RV GLS可能是预测毛细血管前PAH患者不良预后的可靠指标^[35]。Wessels等^[36]的研究表明RV舒张僵硬度高的PAH患者的RV GLS降低；RV舒张僵硬度增加的患者中RV GLS下降幅度最大；表明严重的RV舒张僵硬与RV充盈减少和腔静脉回流增加有关。尽管CMR-FT技术在临床应用中存在一些限制，如操作时间长、图像后处理软件繁多且价格昂贵，但随着应变技术的发展，仍有望成为心肌应变分析的首选方法。

Leng等^[22]采用CMR进行快速RV应变评估，对PAH患者进行研究，结果显示RV功能失代偿的PAH患者RV快速GLS和SR显著降低。RV快速应变参数可以有效识别PAH患者的RV功能异常。此外，PAH患者的RV快速GLS与RHC测得数据PVR和mPAP呈负相关。与CMR-FT相比，CMR快速RV应变评估法测得RV快速GLS对RV几何形状的依赖性较小，速度更快，且具有更好的可重复性。

心脏磁共振形变配准算法 (deformable registration algorithms, DRA) 技术既可以评估LV心肌应变又可以评估RV心肌应变^[32, 37]。Song等^[32]进行DRA和CMR-FT的对比研究，发现前者在评估PAH患者RV整体和节段应变时具有更好的重复

性和精准性。研究结果显示，对PAH患者，两种方法测量的RV整体和游离壁LS均显著降低，表明DRA比CMR-FT更敏感于识别RV纵向功能障碍。因此，DRA被认为更适合于临床应用。当前的研究数据有限，需要进一步大规模研究来验证这一观点。

压缩感知实时成像结合回顾性运动校正电影序列 (cardiac cine with compressed sensing real-time imaging and retrospective fully automated non-rigid motion correction, cine MoCo) 是一种新的结合压缩感知、高速实时成像、回顾性非刚性运动校正、自由呼吸心脏磁共振电影序列^[38-39]。2022年的一项采用cine MoCo对PAH患者RV应变进行研究，结果显示cine MoCo测量的RV GLS、RS、CS均低于标准电影序列，能够准确评估严重PAH患者的RV应变；这表明cine MoCo可以在缩短图像采集时间的同时保持良好的图像质量，对PAH患者RV功能和应变进行评估具有较高的准确性^[38]。另外，Takakado等^[39]对35例受试者进行研究，结果显示，相较于常规屏气电影序列，cine MoCo能够在保证图像质量和准确评估双心室容积的同时显著缩短图像采集时间。尽管CMR具有良好的临床应用前景，但也存在一些局限性，如检查耗时长、图像质量受呼吸和心率影响较大，以及部分特殊患者群体的适用性有限。cine MoCo在临床应用中发展潜力巨大，但仍需克服一些技术难题和限制。

8 结论与展望

综上所述，TDI、VVI、STI、CMR等影像技术在评估PAH患者RV功能和应变方面发挥着重要作用。其中，CMR评估RV功能和心肌形变的价值更高，与金标准RHC测量数据相关。随着影像技术的飞速进展，PAH RV应变的影像学研究不断增加，RV应变影像评估对于判断PAH病情的准确性和预测患者预后方面起着关键作用。综合应用传统和新型影像新技术进行综合化分析评价PAH患者RV应变将为评估PAH患者病情和预后提供更可靠的依据。

作者贡献声明：廖满珍负责查阅文献、撰写文章；肖云彬负责文章修改、审阅。

利益冲突声明：所有作者声明无利益冲突。

[参 考 文 献]

- [1] Ruopp NF, Cockrill BA. Diagnosis and treatment of pulmonary arterial hypertension: a review[J]. JAMA, 2022, 327(14): 1379-1391. PMID: 35412560. DOI: 10.1001/jama.2022.4402.
- [2] Vonk Noordegraaf A, Channick R, Cottreel E, et al. The REPAIR study: effects of macitentan on RV structure and function in pulmonary arterial hypertension[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2022, 15(2): 240-253. PMID: 34801462. DOI: 10.1016/j.jcmg.2021.07.027.
- [3] Humbert M, Kovacs G, Hoeper MM, et al. 2022 ESC/ERS guidelines for the diagnosis and treatment of pulmonary hypertension[J]. Eur Heart J, 2022, 43(38): 3618-3731. PMID: 36017548. DOI: 10.1093/eurheartj/ehac237.
- [4] Tello K, Dalmer A, Vanderpool R, et al. Cardiac magnetic resonance imaging-based right ventricular strain analysis for assessment of coupling and diastolic function in pulmonary hypertension[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2019, 12(11 Pt 1): 2155-2164. PMID: 30878422. DOI: 10.1016/j.jcmg.2018.12.032.
- [5] Zhong L, Leng S, Alabed S, et al. Pulmonary artery strain predicts prognosis in pulmonary arterial hypertension[J]. JACC Cardiovasc Imaging, 2023, 16(8): 1022-1034. PMID: 37052561. DOI: 10.1016/j.jcmg.2023.02.007.
- [6] Cao J, Li S, Cui L, et al. Biventricular myocardial strain analysis in patients with pulmonary arterial hypertension using cardiac magnetic resonance tissue-tracking technology[J]. J Clin Med, 2022, 11(8): 2230. PMID: 35456323. PMCID: PMC9025312. DOI: 10.3390/jcm11082230.
- [7] Cittar M, Cipriani A, Merlo M, et al. Prognostic significance of feature-tracking right ventricular global longitudinal strain in non-ischemic dilated cardiomyopathy[J]. Front Cardiovasc Med, 2021, 8: 765274. PMID: 34917664. PMCID: PMC8669391. DOI: 10.3389/fcvm.2021.765274.
- [8] Houston BA, Brittain EL, Tedford RJ. Right ventricular failure [J]. N Engl J Med, 2023, 388(12): 1111-1125. PMID: 36947468. DOI: 10.1056/NEJMra2207410.
- [9] Asakage A, Bækgaard J, Mebazaa A, et al. Management of acute right ventricular failure[J]. Curr Heart Fail Rep, 2023, 20(3): 218-229. PMID: 37155123. DOI: 10.1007/s11897-023-00601-5.
- [10] Crossman LM, Rajaram P, Hart CM, et al. Evaluation of right ventricular strain in two separate cohorts with precapillary pulmonary hypertension[J]. Pulm Circ, 2023, 13(1): e12204. PMID: 36883189. PMCID: PMC9985931. DOI: 10.1002/pul2.12204.
- [11] Vang A, da Silva Gonçalves Bos D, Fernandez-Nicolas A, et al. α 7 Nicotinic acetylcholine receptor mediates right ventricular fibrosis and diastolic dysfunction in pulmonary hypertension[J]. JCI insight, 2021, 6(12): e142945. PMID: 33974567. PMCID: PMC8262476. DOI: 10.1172/jci.insight.142945.
- [12] Kocken JMM, da Costa Martins PA. Epigenetic regulation of pulmonary arterial hypertension-induced vascular and right ventricular remodeling: new opportunities? [J]. Int J Mol Sci, 2020, 21(23): 8901. PMID: 33255338. PMCID: PMC7727715. DOI: 10.3390/ijms21238901.
- [13] Wang Z, Patel JR, Schreier DA, et al. Organ-level right ventricular dysfunction with preserved Frank-Starling mechanism in a mouse model of pulmonary arterial hypertension[J]. J Appl Physiol (1985), 2018, 124(5): 1244-1253. PMID: 29369739. PMCID: PMC6008075. DOI: 10.1152/jappphysiol.00725.2017.
- [14] Richter MJ, Peters D, Ghofrani HA, et al. Evaluation and prognostic relevance of right ventricular-arterial coupling in pulmonary hypertension[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2020, 201(1): 116-119. PMID: 31539478. DOI: 10.1164/rccm.201906-1195LE.
- [15] Singh I, Oliveira RKF, Heerdt PM, et al. Sex-related differences in dynamic right ventricular-pulmonary vascular coupling in heart failure with preserved ejection fraction[J]. Chest, 2021, 159(6): 2402-2416. PMID: 33388286. DOI: 10.1016/j.chest.2020.12.028.
- [16] Kremer N, Rako Z, Douschan P, et al. Unmasking right ventricular-arterial uncoupling during fluid challenge in pulmonary hypertension[J]. J Heart Lung Transplant, 2022, 41(3): 345-355. PMID: 34972609. DOI: 10.1016/j.healun.2021.11.019.
- [17] Hsu S, Simpson CE, Houston BA, et al. Multi-beat right ventricular-arterial coupling predicts clinical worsening in pulmonary arterial hypertension[J]. J Am Heart Assoc, 2020, 9(10): e016031. PMID: 32384024. PMCID: PMC7660856. DOI: 10.1161/JAHA.119.016031.
- [18] Rako ZA, Yogeswaran A, Lakatos BK, et al. Clinical and functional relevance of right ventricular contraction patterns in pulmonary hypertension[J]. J Heart Lung Transplant, 2023, 42(11): 1518-1528. PMID: 37451352. DOI: 10.1016/j.healun.2023.07.004.
- [19] Caivano D, Rishniw M, Biretoni F, et al. Transverse right ventricle strain and strain rate assessed by 2-dimensional speckle tracking echocardiography in dogs with pulmonary hypertension [J]. Vet Sci, 2020, 7(1): 19. PMID: 32046130. PMCID: PMC7157588. DOI: 10.3390/vetsci7010019.
- [20] 李瑞, 黄钰迅, 陈梓娴, 等. 心脏磁共振特征追踪技术评估右室心肌应变的研究进展[J]. 磁共振成像, 2021, 12(10): 98-100. DOI: 10.12015/issn.1674-8034.2021.10.025.
- [21] Li X, Shi K, Yang ZG, et al. Assessing right ventricular deformation in hypertrophic cardiomyopathy patients with preserved right ventricular ejection fraction: a 3.0-T cardiovascular magnetic resonance study[J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 1967. PMID: 32029853. PMCID: PMC7004999. DOI: 10.1038/s41598-020-58775-0.
- [22] Leng S, Tan RS, Guo J, et al. Cardiovascular magnetic resonance-assessed fast global longitudinal strain parameters add diagnostic and prognostic insights in right ventricular volume and pressure loading disease conditions[J]. J Cardiovasc Magn Reson, 2021, 23(1): 38. PMID: 33789701. PMCID: PMC8015087. DOI: 10.1186/s12968-021-00724-5.
- [23] Li Z, Liang Y, Cheng S, et al. Evaluation of right ventricular myocardial strain in pulmonary arterial hypertension associated

- with atrial septal defect by cardiac magnetic resonance feature tracking[J]. *Int J Cardiovasc Imaging*, 2022, 38(9): 2035-2045. PMID: 37726610. DOI: 10.1007/s10554-022-02591-2.
- [24] Li Y, 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. PMID: 32532643. DOI: 10.1016/j.echo.2020.03.015.
- [25] You XD, Pu ZX, Peng XJ, et al. Tissue Doppler imaging study of right ventricular myocardial systolic activation in subjects with pulmonary arterial hypertension[J]. *Chin Med J (Engl)*, 2007, 120(13): 1172-1175. PMID: 17637247.
- [26] 李玉曼, 谢明星, 吕清, 等. 超声二维应变成像与组织多普勒技术评价右心室纵向收缩功能的对比研究[J]. *中华超声影像学杂志*, 2009, 18(5): 397-400. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4477.2009.05.011.
- [27] Meng H, Chandrasekaran K, Villarraga HR, et al. Right and left ventricular interaction in pulmonary hypertension: insight from velocity vector imaging[J]. *Echocardiography*, 2019, 36(5): 877-887. PMID: 30985965. DOI: 10.1111/echo.14328.
- [28] Badagliacca R, Pezzuto B, Papa S, et al. Right ventricular strain curve morphology and outcome in idiopathic pulmonary arterial hypertension[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2021, 14(1): 162-172. PMID: 33129726. DOI: 10.1016/j.jcmg.2020.08.017.
- [29] Liu Q, Hu Y, Chen W, et al. Evaluation of right ventricular longitudinal strain in pediatric patients with pulmonary hypertension by two-dimensional speckle-tracking echocardiography[J]. *Front Pediatr*, 2023, 11: 1189373. PMID: 37780047. PMCID: PMC10540637. DOI: 10.3389/fped.2023.1189373.
- [30] Jone PN, Duchateau N, Pan Z, et al. Right ventricular area strain from 3-dimensional echocardiography: mechanistic insight of right ventricular dysfunction in pediatric pulmonary hypertension [J]. *J Heart Lung Transplant*, 2021, 40(2): 138-148. PMID: 33268039. DOI: 10.1016/j.healun.2020.11.005.
- [31] Lin ACW, Seale H, Hamilton-Craig C, et al. Quantification of biventricular strain and assessment of ventriculo-ventricular interaction in pulmonary arterial hypertension using exercise cardiac magnetic resonance imaging and myocardial feature tracking[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2019, 49(5): 1427-1436. PMID: 30353959. DOI: 10.1002/jmri.26517.
- [32] Song J, Chen Y, Cui Y, et al. Evaluation and comparison of quantitative right ventricular strain assessment by cardiac magnetic resonance in pulmonary hypertension using feature tracking and deformable registration algorithms[J]. *Acad Radiol*, 2021, 28(10): e306-e313. PMID: 32624401. DOI: 10.1016/j.acra.2020.06.015.
- [33] Padervinskienė L, Krivickienė A, Hoppenot D, et al. Prognostic value of left ventricular function and mechanics in pulmonary hypertension: a pilot cardiovascular magnetic resonance feature tracking study[J]. *Medicina (Kaunas)*, 2019, 55(3): 73. PMID: 30897834. PMCID: PMC6473343. DOI: 10.3390/medicina55030073.
- [34] Lindholm A, Hesselstrand R, Rådegran G, et al. Decreased biventricular longitudinal strain in patients with systemic sclerosis is mainly caused by pulmonary hypertension and not by systemic sclerosis per se[J]. *Clin Physiol Funct Imaging*, 2019, 39(3): 215-225. PMID: 30597705. PMCID: PMC6850088. DOI: 10.1111/cpf.12561.
- [35] Kallifatidis A, Mouratoglou SA, Giannakoulas G, et al. Myocardial deformation assessment in patients with precapillary pulmonary hypertension: a cardiac magnetic resonance study[J]. *Diagn Interv Imaging*, 2021, 102(3): 153-161. PMID: 32917553. DOI: 10.1016/j.diii.2020.08.001.
- [36] Wessels JN, Mouratoglou SA, van Wezenbeek J, et al. Right atrial function is associated with right ventricular diastolic stiffness: RA-RV interaction in pulmonary arterial hypertension [J]. *Eur Respir J*, 2022, 59(6): 2101454. PMID: 34764180. PMCID: PMC9218241. DOI: 10.1183/13993003.01454-2021.
- [37] Lamacie MM, Thavendiranathan P, Hanneman K, et al. Quantification of global myocardial function by cine MRI deformable registration-based analysis: comparison with MR feature tracking and speckle-tracking echocardiography[J]. *Eur Radiol*, 2017, 27(4): 1404-1415. PMID: 27491873. DOI: 10.1007/s00330-016-4514-0.
- [38] 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. DOI: 10.12015/issn.1674-8034.2022.10.017.
- [39] Takakado M, Kido T, Ogawa R, et al. Free-breathing cardiovascular cine magnetic resonance imaging using compressed-sensing and retrospective motion correction: accurate assessment of biventricular volume at 3T[J]. *Jpn J Radiol*, 2023, 41(2): 142-152. PMID: 36227459. PMCID: PMC9889435. DOI: 10.1007/s11604-022-01344-4.

(本文编辑: 王颖)

(版权所有©2024 中国当代儿科杂志)