

DOI: 10.16781/j.0258-879x.2019.03.0238

• 专题报道 •

心脏磁共振成像评价心功能的现状与进展

张宁男楠, 张璋*, 杨帆, 任雯, 李东
天津医科大学总医院放射科, 天津 300052

[摘要] 临床心功能评价常规且重要, 心脏磁共振 (CMR) 电影序列可获得心脏全心动周期的动态图像。从借鉴超声心动图检查的基础上不断发展, CMR 已建立了一套评估心功能的扫描序列和评价指标系统, 包括射血分数、心室质量指数、应变、室间隔曲率比、右房室瓣环收缩期位移、血管顺应性等。认识和掌握这些指标的原理、意义及适应证有助于优化扫描序列和及时有效做出诊断, 对临床治疗和预后评估有重要意义。本文就 CMR 评价心功能技术、指标的临床应用现状和进展进行综述。

[关键词] 磁共振成像; 电影磁共振成像; 心脏功能; 心脏病

[中图分类号] R 541 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2019)03-0238-05

Cardiac magnetic resonance in evaluating cardiac function: the status and advance

ZHANG Ning-nan-nan, ZHANG Zhang*, YANG Fan, REN Wen, LI Dong
Department of Radiology, Tianjin Medical University General Hospital, Tianjin 300052, China

[Abstract] Clinical evaluation of cardiac function is routine and important. Cardiac magnetic resonance (CMR) cine sequence can obtain dynamic images of the whole cardiac cycle. Based on echocardiographic techniques, CMR has been used to establish a set of scanning sequences and an evaluation index system to evaluate cardiac function, including ejection fraction, ventricular mass index, strain, interventricular septum curvature ratio, tricuspid annular plane systolic excursion and vascular compliance. Understanding the principles, significance and indications of these indicators is helpful to optimize the scanning sequence and make timely and effective diagnosis, which is of great significance for clinical treatment and prognosis evaluation. This review sums up the status and progress of clinical application of CMR in evaluation of cardiac function.

[Key words] magnetic resonance imaging; cine magnetic resonance imaging; heart function; heart diseases

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2019, 40(3): 238-242]

整体心功能评估是临床中常规且重要的项目和环节, 对每例患者都应进行心功能评估以掌握患者的基础状况, 从而指导临床制定干预策略及评估预后。目前临床上公认的评价心功能状态的常用指标有射血分数 (ejection fraction, EF)、B 型钠尿肽、N 末端 B 型利尿钠肽原、六分钟步行试验、美国纽约心脏协会心功能分级等^[1]。经胸部超声心动图 (transthoracic echocardiogram, TTE) 测量的 EF 是反映心脏收缩射血功能最直接和最主要的指标, 因此 TTE 成为评估心功能的常规方法。TTE 虽然操作简单、便捷且常作为首选方法, 但其图像

分辨率低、可重复性较差。而心脏磁共振 (cardiac magnetic resonance, CMR) 具有可重复性强、多参数成像等特点, 其高质量图像能提供心室多方向功能的、详细的形态学和功能学信息, 但 CMR 由于操作复杂、对技师的要求较高、需要患者配合多次屏气以及耐受力较差者检查成功率低等, 在临床推广受限。随着影像学技术的不断发展, CMR 的检查序列和方法从借鉴 TTE 评价方法的基础上不断更新, 衍生出 CMR 特有的心功能评价指标^[2]。本文综述了 CMR 评价心功能技术、指标的临床应用现状和进展。

[收稿日期] 2018-12-23 **[接受日期]** 2019-02-22

[基金项目] 国家自然科学基金青年科学基金(81301217), 科技部“十三五”国家重点研发计划(2016YFC1300402), 天津市应用基础与前沿技术研究计划(14JCZDJC57000, 18JCYBJC25100). Supported by Young Science Fund of National Natural Science Foundation of China (81301217), “13th Five-Year” National Key Research and Development Plan of Ministry of Science and Technology of China (2016YFC1300402), and Tianjin Applied Foundation and Frontier Technology Research Program (14JCZDJC57000, 18JCYBJC25100).

[作者简介] 张宁男楠, 博士, 副主任医师. E-mail: znnn2010@sina.com

*通信作者(Corresponding author). Tel: 022-60814133, E-mail: filea1249@sina.com

1 CMR 成像序列

1.1 心脏电影成像 心脏电影成像使 CMR 第一次真正获得跳动心脏的系列图像, 对于评价左心房、右心房、左心室、右心室的形态及功能具有重要意义。一般选择平衡稳态自由进动 (balanced steady-state free precession, bSSFP) 序列, 在心电门控下采集具有完整心动周期的图像, 如德国西门子医疗系统有限公司的真实稳态自由进动 (true fast imaging with steady precession, true-FISP) 序列、美国 GE 公司的快速稳态进动采集 (fast-imaging employing steady-state acquisition, FIESTA) 序列等^[3]。bSSFP 序列采用较短的重复时间 (repetition time, TR)、回波时间 (echo time, TE) 及较大的翻转角 (40~80°), 平衡梯度场并重新磁化射频脉冲, 提高了血池与心肌的对比度。网格标记成像 (Tagging) 技术是由 Zerhouni 于 1988 年首先应用于 CMR, 在电影序列前加入一组垂直方向的预饱和脉冲序列, 形成 CMR 图像上的小网格线影, 可通过观察小网格和方格的形变评估心肌运动功能减弱的区域^[4]。

扫描时多嘱患者体位偏右, 磁场中心、线圈对准心脏。评价左心室的常用扫描体位包括左心室两腔心、四腔心和短轴位等, 其中短轴位也经常被用作测量心功能指标的标准体位。另外还有用于评价右心室功能的右心室两腔心位, 用于观察流出道情况的左心室和右心室流出道、双口位等。左心房和右心房由于其形态不规则, 一般基于四腔心或两腔心图像计算左心房和右心房的最大、最小容积, 但精确测量需要借助特征追踪 (feature tracking, FT) 技术^[2-3]。

1.2 压缩感知 (compressed sensing, CS) 序列 受 Nyquist 采样定理的限制, bSSFP 序列成像速度慢, 使很多心功能不全患者无法耐受检查或检查失败。Candès 在 2006 年提出了 CS 理论, 克服了 Nyquist 采样定理的限制, 对 k-空间进行稀疏采样。研究证实, CS 序列与 bSSFP 序列在评价心功能方面有较好的一致性^[5]。但单次激发的 CS 电影序列可能降低心肌与周围组织的对比度, 使获得的心功能指标不准确; 而多次激发 CS 序列可通过增加激发次数降低采样不足造成的稀疏性, 另外也可以更好地显示房室瓣反流。

1.3 相位对比 (contrast-phase, PC) 序列 PC 序列是利用液体流动产生的相位变化测量流体流动速度的 CMR 技术。PC 序列具有更高的信噪比且几乎没有图像形变, 其中基于梯度回波的 PC 序列应用较广泛。PC 序列可得到两组相位图, 即流动补偿 (flow compensate, FC) 和流动编码 (flow encoding, FE), 二者相减得到的相位差图像包含了流体速度的数据信息。最常用的方法是, 扫描目标血管的短轴位图像并放置感兴趣区 (region of interest, ROI), 以获得心动周期不同时相通过目标血管的血流速度, 并绘制“时间-速度”曲线^[6]。

近年来随着 PC 技术的快速发展, 出现了四维血流 (4D-Flow) 技术, 该技术可同时对 3 个相互垂直的维度进行速度编码, 同时显示心脏、大血管的血流情况并获得部分血流动力学指标。2015 年发表于 *J Cardiovasc Magn Reson* 的专家共识推荐将 4D-Flow 技术用于临床多种疾病, 包括瓣膜性心脏病、房间隔缺损、室间隔缺损、动脉导管未闭、复杂先天性心脏病及主动脉病变等^[7]。

2 心脏形态学的评价指标

2.1 经典心功能指标 通过使用后处理软件, 在短轴位电影序列舒张末期与收缩末期图像上自动或半自动勾画左心室、右心室心内膜与心外膜的轮廓获得经典心功能指标。在勾画过程中, 一般将乳头肌和肌小梁作为心室腔的一部分。收缩末期容积 (end-systolic volume, ESV)、舒张末期容积 (end-diastolic volume, EDV)、心室面积变化百分比 (percentage of ventricular area change, %VAC) 可被直接测量, 然后计算获得每搏输出量 (stroke volume, SV)、心输出量 (cardiac output, CO) 及 EF。心功能评价中的非比值指标均应除以体表面积 (body surface area, BSA) 进行校正, $BSA (m^2) = 0.006 1 \times \text{身高} (cm) + 0.012 8 \times \text{体质量} (kg) - 0.152 9$ 。使用心内膜和心外膜的轮廓数据可进一步评估舒张末期心肌质量 (myocardial mass, MM) 和心室心肌质量指数 (ventricular mass index, VMI)。

这些经典的心功能指标应用广泛, 例如肺动脉高压患者的右心室扩张, 右心室 EDV、ESV 均增高; 右心室收缩功能受损使反映射血功能的指标 (右心室 SV、CO 及 EF) 均下降; 由于肺循环

阻力增加、右心室 CO 减少导致左心室回心血量减少,最终造成左心室 EDV 和 ESV 下降; VMI=0.6 作为截断值诊断肺动脉高压的灵敏度和特异度分别为 84% 和 71%, VMI>0.7 的肺动脉高压患者 2 年生存率明显降低^[8]。另外扩张型心肌病患者的左心室存在不同程度的心室重构、心肌收缩及舒张功能降低,导致左心室明显增大(左心室 EDV、ESV 及 VMI 升高,SV 和 EF 降低)^[9]。CMR 对多种原发性心肌病的鉴别诊断具有一定价值,另外常规 CMR 获得的形态学指标结合钆造影剂延迟增强等序列获得的组织学指标有助于原发性心肌病合并冠状动脉粥样硬化性心脏病的诊断^[10]。

心房指标的测量和评估是近期的研究热点,经典的心房指标主要是指心房容积,包括最大、最小心房容积及收缩前心房容积等。目前使用 TTE、计算机断层扫描(computed tomography, CT)及 CMR 都可实现对这些经典指标的测量,而 CMR 的优势在于无电离辐射且能提供较高的空间和时间分辨率,并可以在一次检查中获得结构和功能学信息。研究认为左心房容积与心力衰竭有关,其中左心房最小容积是心力衰竭发生风险的独立预测因素^[11]。CMR 测量的左心房容积与肺毛细血管楔压(pulmonary capillary wedge pressure, PCWP)密切相关,PCWP 计算公式: $PCWP = 6.43 \times \text{左心房容积} \times 0.22$,故可使用左心房容积替代 PCWP 进行无创影像学评估肺动脉微循环状态^[12]。

关于右心房容积的临床和预后特征的数据有限,但有研究表明左心房、右心房重构与复律后复发性心房颤动具有同等的相关性,双心房扩大可能比单心房扩大能更准确地预测复发性心房颤动,右心房重构可能为收缩性心力衰竭和肺动脉高压患者提供预后信息^[13]。最新的美国超声心动图学会指南指出^[14],由于缺乏 TTE 的标准化右心房容积数据,目前不推荐常规的右心房容积测量。另外一项 4D-Flow 技术的研究将右心房血流模式分为旋涡型、螺旋型、螺旋-旋涡型及多旋涡型,并比较了腔静脉和肺静脉的解剖学特征及其在收缩期、舒张期的峰值血流,结果显示右心房血流模式与腔静脉空间位置、卵圆孔通畅性有关,提示 4D-Flow 技术或许可以作为研究心脏解剖学形态与血流模式之间复杂的相互作用的一种方法^[15]。

2.2 FT 技术与应变 FT 技术是近年来应用于

CMR 的一种后处理技术,可更准确地评价心功能、侦测整个心动周期中心肌长度的变化,并通过计算获得应变和应变率。应变是指物体受到外力作用时产生形变的程度。应变率是指材料相对于时间的发生应变的变化,通常被定义为应变相对于时间的导数。心脏应变指标按照运动方向被划分为短轴径向应变、周向应变、长轴纵向应变及相应的应变率^[16]。

心肌应变被认为是反映心功能早期损害的一项灵敏的指标,能够补充单一使用 EF 评估的不足且可重复性强。近年来,多项研究通过对 CMR 电影序列中应变的分析评价心肌局部功能。首先,在评价急性心肌梗死后的心肌损伤程度方面,应变分析优于心室壁增厚程度分析,其中周向应变是评价心肌局部功能较准确的指标^[17]。其次,近年开始用 FT 测量左心房应变。既往认为,左心房功能异常继发于左心室功能异常,但研究表明左心室 EDV、ESV、EF 与左心房 EF、应变、应变率之间无明显相关性^[18],提示左心房与左心室的功能可能相对独立。换言之,在某些疾病中即使左心室和左心房都受损,但左心房功能的改变可能仅由自身的异常引起。最后,左心房应变指标将有助于定量左心房在预测心力衰竭中的独立效能。一项无症状心血管疾病人群的研究发现,使用 CMR 测量的总体左心房纵向应变与心力衰竭之间存在独立负相关^[11]。但 FT 技术也有局限性,如依赖 FT 后处理软件和数学建模算法、计算时间较长,尤其是对于心房的 FT 数据亟需参考标准和精确解读。

2.3 室间隔形态学评估 TTE 较早地发现了室间隔形变可提示心功能改变,并先后提出了一些评估室间隔形变的指标,包括室间隔至游离壁距离(septum to free wall distance, SFD)、SFD 变化分数(fractional-SFD, f-SFD)、收缩期偏心指数(systolic eccentricity index, sEI)、舒张期偏心指数(diastolic eccentricity index, dEI)及室间隔曲率(interventricular septum curvature, C_{IVS})。CMR 通过借鉴 TTE 测得这些指标的数据并将其在 CMR 图像上进行完善,选择左心室短轴位心脏中间层面,分别在收缩末期和舒张末期图像上测量室间隔插入部两点跨心腔内直径除以心腔的垂直直径得到 sEI 和 dEI。在左心室舒张末期以室间隔插入部两点及室间隔中点为三点作圆,此圆的半径倒数即为 C_{IVS} ,同理可得到左心室游离壁曲率(free

wall curvature, C_{FW}), C_{IVS} 与 C_{FW} 的比值即为曲率比。研究指出, 在肺动脉高压患者右心室即将出现严重功能不全时, 推荐使用 SFD 预测终末期肺动脉高压患者的右心室功能; 另外曲率比与平均肺动脉压有较好的相关性, 能够更好地反映左心室收缩压的降低^[19]。

2.4 右房室瓣环收缩期位移 (tricuspid annular plane systolic excursion, TAPSE) TAPSE 也是 CMR 借鉴 TTE 获得的指标, CMR 图像因具有较高的空间分辨率提高了 TAPSE 测量的可重复性。TAPSE 主要用于评估右心室长轴运动功能, 与右心室 EF 有较好的相关性。TAPSE 能反映右心室收缩功能及后负荷且与患者预后有关。当 TAPSE ≤ 18 mm 时右心室收缩功能差, 患者死亡风险是 TAPSE > 18 mm 时的 5.7 倍, TAPSE 每缩短 1 mm 患者死亡风险增加 17%, TAPSE < 15.65 mm 可能是肺动脉高压患者发生不良心血管事件的独立预测因素^[20]。

2.5 动脉管径及血管顺应性 动脉管径测量是简便、易行的评估左心室、右心室压力的影像学方法。例如临床上通过 CT 测量的肺动脉干 (正常值上限为 29 mm)、升主动脉 (正常值上限为 42 mm)、降主动脉 (正常值上限为 38 mm) 横径及肺动脉干与升主动脉横径比值 (正常值上限为 1.0) 评估左心室和右心室的状态。CMR 除了可通过横轴位图像测量动脉管径外, 还可在电影序列和 PC 序列图像上测量和计算不同心动周期动脉血管的多种径线, 如血管横径、纵径、最大平均直径、最小平均直径、横径变化分数、纵径变化分数、顺应性等指标。顺应性 = (最大横截面积 - 最小横截面积) / 最小横截面积 $\times 100\%$ 。在肺动脉高压患者中, 肺血管阻力增加使肺动脉最大和最小横截面积增大、肺动脉顺应性降低, 提示血管壁胶原纤维减少和管壁僵硬。4D-Flow 序列还可计算刚度、血管壁剪切应力、血流能量、脉冲流速、湍流动能等新指标。研究发现, 这些指标与动脉压、血管阻力有关, 提示血流动力学改变可能早于左心室和右心室重构, 甚至有可能是心功能不全的病理生理学机制^[21]。

3 序列比较和优化扫描

用于评价心脏功能的完整扫描序列应包括定位像、心脏形态扫描 (黑血成像和心脏电影成

像) 及 PC 序列, 如果怀疑血管病变可行冠状动脉或肺动脉磁共振血管造影, 另外还可以增加评价心肌组织学的序列如心肌灌注、钆造影剂延迟增强、mapping 序列、磁共振波谱、弥散加权成像等。在心脏电影成像中, bSSFP 序列的使用比较成熟, 也是临床常规 CMR 检查的重要部分, 可以直观地观察心肌各节段的运动及心腔的收缩、舒张情况。最近迅速发展的 CS 序列可明显缩短扫描时间以较准确地评价心功能, 成为有潜力的代替 bSSFP 序列的新方法。经典心功能指标如 ESV、EDV、%VAC、SV、CO、EF 及 VMI 等应基于电影序列图像使用后处理软件计算获得, 重要的心功能指标应体现在影像学诊断报告中以供临床医师参考。FT 技术衍生的应变和应变率需要根据实际软件和硬件设备及临床需求进行计算, 对于心肌梗死或心脏顺应性降低的患者有一定临床意义。对于怀疑发生心室重构或心力衰竭的患者, 建议测量其室间隔形变指标和 TAPSE 等, 特别是重度肺动脉高压患者。PC 和 4D-Flow 序列可提供血流速度、顺应性、血管壁剪切应力等血流动力学指标, 对评估肺动脉高压、预警主动脉夹层等疾病有一定价值。总之, 在常规 CMR 扫描基础上, 影像科技师、诊断医师应根据患者的基础疾病、个体状况优化扫描序列实施个性化扫描方案并进行相应的后处理, 最后计算获得心功能指标以满足临床实际需要。

4 小结

综上所述, CMR 图像凭借其高分辨率的特点, 借鉴并发展了 TTE 的技术和指标, 形成了基于电影序列评价心功能的一系列经典和特殊指标。系统学习和掌握不同心功能指标的原理、方法及应用范围有助于影像科医师合理选择、优化扫描序列和后处理方法, 及时发现早期心功能异常、准确评估心功能状态, 从而为临床医师提供有价值的疾病诊断和预后评估信息。

[参考文献]

- [1] ROMANO S, JUDD R M, KIM R J, KIM H W, KLEM I, HEITNER J F, et al. Left ventricular long-axis function assessed with cardiac cine MR imaging is an independent predictor of all-cause mortality in patients with reduced ejection fraction: a multicenter study[J]. Radiology, 2018, 286: 452-460.
- [2] HOLST K, UGANDER M, SIGFRIDSSON A. Respiratory variation in left ventricular cardiac function with 3D double

- golden-angle whole-heart cine imaging[J]. *Magn Reson Med*, 2018, 79: 2693-2701.
- [3] JING L, PULENTHIRAN A, NEVIUS C D, MEJIA-SPIEGELER A, SUEVER J D, WEHNER G J, et al. Impaired right ventricular contractile function in childhood obesity and its association with right and left ventricular changes: a cine DENSE cardiac magnetic resonance study[J/OL]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2017, 19: 49. doi: 10.1186/s12968-017-0363-5.
- [4] ZERHOUNI E A, PARISH D M, ROGERS W J, YANG A, SHAPIRO E P. Human heart: tagging with MR imaging—a method for noninvasive assessment of myocardial motion[J]. *Radiology*, 1988, 169: 59-63.
- [5] HUBER A T, LAMY J, RAHHAL A, EVIN M, ATASSI F, DEFRANCE C, et al. Cardiac MR strain: a noninvasive biomarker of fibrofatty remodeling of the left atrial myocardium[J]. *Radiology*, 2018, 286: 83-92.
- [6] DELLEGROT TAGLIE S, PERRONE-FILARDI P, GARCÍA-ALVAREZ A, MORAL S, STEVENS G R, FUSTER V, et al. Serial phase-contrast MRI for prediction of pulmonary hemodynamic changes in patients with pulmonary arterial hypertension[J]. *Int J Cardiol*, 2012, 157: 140-142.
- [7] DYVERFELDT P, BISSELL M, BARKER A J, BOLGER A F, CARLHÄLL C J, EBBERS T, et al. 4D flow cardiovascular magnetic resonance consensus statement[J/OL]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2015, 17: 72. doi: 10.1186/s12968-015-0174-5.
- [8] CORONA-VILLALOBOS C P, KAMEL I R, RASTEGAR N, DAMICO R, KOLB T M, BOYCE D M, et al. Bidimensional measurements of right ventricular function for prediction of survival in patients with pulmonary hypertension: comparison of reproducibility and time of analysis with volumetric cardiac magnetic resonance imaging analysis[J]. *Pulm Circ*, 2015, 5: 527-537.
- [9] ZHANG Z, WANG M, YANG Z, YANG F, LI D, YU T, et al. Noninvasive prediction of pulmonary artery pressure and vascular resistance by using cardiac magnetic resonance indices[J]. *Int J Cardiol*, 2017, 227: 915-922.
- [10] AMANO Y, KITAMURA M, TAKANO H, YANAGISAWA F, TACHI M, SUZUKI Y, et al. Cardiac MR imaging of hypertrophic cardiomyopathy: techniques, findings, and clinical relevance[J]. *Magn Reson Med Sci*, 2018, 17: 120-131.
- [11] HABIBI M, CHAHAL H, OPDAHL A, GJESDAL O, HELLE-VALLE T M, HECKBERT S R, et al. Association of CMR-measured LA function with heart failure development: results from the MESA study[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2014, 7: 570-579.
- [12] SWIFT A J, RAJARAM S, HURDMAN J, HILL C, DAVIES C, SPROSON T W, et al. Noninvasive estimation of PA pressure, flow, and resistance with CMR imaging: derivation and prospective validation study from the ASPIRE registry[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2013, 6: 1036-1047.
- [13] MALIK S B, KWAN D, SHAH A B, HSU J Y. The right atrium: gateway to the heart—atomic and pathologic imaging findings[J]. *Radiographics*, 2015, 35: 14-31.
- [14] RUDSKI L G, LAI W W, AFILALO J, HUA L, HANDSCHUMACHER M D, CHANDRASEKARAN K, et al. Guidelines for the echocardiographic assessment of the right heart in adults: a report from the American Society of Echocardiography endorsed by the European Association of Echocardiography, a registered branch of the European Society of Cardiology, and the Canadian Society of Echocardiography[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2010, 23: 685-713; quiz 786-788.
- [15] PARIKH J D, KAKARLA J, KEAVNEY B, O'SULLIVAN J J, FORD G A, BLAMIRE A M, et al. 4D flow MRI assessment of right atrial flow patterns in the normal heart—influence of caval vein arrangement and implications for the patent foramen ovale[J/OL]. *PLoS One*, 2017, 12: e0173046. doi: 10.1371/journal.pone.0173046.
- [16] VIGNEAULT D M, YANG E, JENSEN P J, TEE M W, FARHAD H, CHU L, et al. Left ventricular strain is abnormal in preclinical and overt hypertrophic cardiomyopathy: cardiac MR feature tracking[J]. *Radiology*, 2019, 290: 640-648.
- [17] EVERAARS H, ROBBERS L F H J, GÖTTE M, CROISILLE P, HIRSCH A, TEUNISSEN P F A, et al. Strain analysis is superior to wall thickening in discriminating between infarcted myocardium with and without microvascular obstruction[J]. *Eur Radiol*, 2018, 28: 5171-5181.
- [18] DILLER G P, RADOJEVIC J, KEMPNY A, ALONSO-GONZALEZ R, EMMANOUIL L, ORWAT S, et al. Systemic right ventricular longitudinal strain is reduced in adults with transposition of the great arteries, relates to subpulmonary ventricular function, and predicts adverse clinical outcome[J]. *Am Heart J*, 2012, 163: 859-866.
- [19] PANDYA B, QUAIL M A, STEEDEN J A, MCKEE A, ODILLE F, TAYLOR A M, et al. Real-time magnetic resonance assessment of septal curvature accurately tracks acute hemodynamic changes in pediatric pulmonary hypertension[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2014, 7: 706-713.
- [20] OSTERESCH R, DIEHL K, KÜHL M, FIEHN E, SCHMUCKER J, BACKHAUS T, et al. Impact of right heart function on outcome in patients with functional mitral regurgitation and chronic heart failure undergoing percutaneous edge-to-edge-repair[J]. *J Interv Cardiol*, 2018, 31: 916-924.
- [21] TRUONG U, FONSECA B, DUNNING J, BURGETT S, LANNING C, IVY D D, et al. Wall shear stress measured by phase contrast cardiovascular magnetic resonance in children and adolescents with pulmonary arterial hypertension[J/OL]. *J Cardiovasc Magn Reson*, 2013, 15: 81. doi: 10.1186/1532-429X-15-81.