

·综述·

右心室功能影像学技术评价的进展

张磊 武志芳 薛及弟 卫华

山西医科大学第一医院核医学科，太原 030001

通信作者：卫华，Email: jennyhua1981@sina.com

【摘要】右心血流动力学的重要性已得到广泛认可，其在循环系统中的作用非常重要，生化指标和临床试验只能间接评价右心室功能，而超声心动图、核素心血池显像和心脏磁共振成像等影像学技术使得右心室功能的评价更加全面、客观、准确。为了对评价右心室功能的技术有更全面的了解，笔者就上述影像学方法在右心室功能评价方面的应用予以综述。

【关键词】心室功能，右；超声心动扫描术；核素心血池显像；心脏磁共振成像

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202003043-00043](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202003043-00043)

Advances in the research on the evaluation methods for the right ventricular function

Zhang Lei, Wu Zhifang, Xue Jidi, Wei Hua

Department of Nuclear Medicine, the First Hospital of Shanxi Medical University, Taiyuan 030001, China

Corresponding author: Wei Hua, Email: jennyhua1981@sina.com

【Abstract】 Right heart hemodynamics play a crucial role in the circulatory system. Biochemical indicators and clinical trials can only evaluate the right ventricular function indirectly. Imaging techniques, such as echocardiography, nuclide blood pool imaging, and cardiac magnetic resonance imaging, increase the objectivity, accuracy, and comprehensiveness of the evaluation of the right ventricular function. To obtain a comprehensive understanding of the technology for evaluating the right ventricular function, the author reviews the application of the abovementioned inspection methods in such evaluations.

【Key words】 Ventricular function, right; Echocardiography; Nuclear blood pool imaging; Cardiac magnetic resonance imaging

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202003043-00043](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202003043-00043)

右心功能管理在心肺疾病患者的监测、评估和治疗中均是关键环节^[1]，《重症右心功能管理专家共识》中指出，右心功能的管理已受到临床医师的广泛关注^[2]，随着医学影像学技术的发展，右心室功能的评价技术也不断取得进展，我们就影像学方法在右心室功能评价中的应用进行综述。

1 超声心动图

超声心动图因操作简单、便携简捷并可同时获得右心室解剖、功能信息而被广泛应用于右心室疾病的筛查和监测^[3]，是目前临床首选的方法。

1.1 二维超声心动图

二维超声心动图对右心室功能的评价完全模拟了左心室的方法，将心室假设为某种几何形状，

计算得到右心室容积及射血分数(right ventricular ejection fraction, RVEF)，RVEF<45% 表示收缩功能异常^[4]。但由于右心室大部分被胸骨遮挡且受限于不规则的几何形状，使其实际情况与几何假设有一定误差，因此不推荐使用此方法测定右心室容积和 RVEF^[5]。

1.2 脉冲多普勒(pulse-wave doppler, PW)

PW 通过评估瓣膜口与右心室有关的血流参数，从血流动力学方面对右心室的功能进行评价，不受其形态不规则的影响，但心脏前负荷的影响不容忽视。其所测的三尖瓣口舒张早期 E 波峰值流速、晚期 A 波峰值流速及其比值被用于评价右心室的舒张功能，美国超声心动图学会建议以 E/A 值<0.8 或>2.0 作为评定右心室舒张功能障碍的

指标^[4]。

1.3 组织多普勒成像(tissue doppler imaging, TDI)

TDI 通过改变多普勒滤波系统，去除心腔内血流产生的频移信号，保留心肌运动产生的频移信号，可以实时评价整个心动周期中室壁的运动。

1.4 实时三维超声心动图(real time three-dimensional echocardiography, RT-3DE)

RT-3DE 采用超矩阵探头、高通量数据处理系统和三维空间定位技术对心脏成像，可同时获得动态、三维的心脏解剖信息，直观地显示与周围血管的关系并得到右心室容积和 RVEF 等参数。多项研究已证实，RT-3DE 与心脏磁共振成像(cardiac magnetic resonance imaging, CMRI)和核素心血池显像对于 RVEF 的测定有良好的相关性^[6-7]。但在成年人中，RT-3DE 对右心室容积和 RVEF 可能会有一定的低估，且右心室容积越大低估越显著^[8]。RT-3DE 也具有一定的局限性，包括容易被受检者的呼吸影响、图像分辨率低、可重复性差等。

1.5 评价右心室功能常用指标

1.5.1 心肌做功指数(myocardial performance index, MPI)

MPI 即心室等容收缩时间与等容舒张时间之和与心室射血时间的比值，可利用 PW 和 TDI 得到，通常 $\text{MPI} > 0.43$ (PW) 或 >0.54 (TDI) 提示右心室功能不全^[5]，可全面、简单地评价受检者右心室的舒缩功能。但由于 PW 和 MPI 的测定涉及多个心动周期 RR 间期的匹配，故需要确保 RR 间期在不连续的心动周期中相似，而 TDI 则不受影响。有研究结果显示，MPI 对于肺动脉高压(pulmonary arterial hypertension, PAH) 的诊断及严重程度的预测均有重大意义^[9]。

1.5.2 三尖瓣环的运动

尽管在右心室的结构中三尖瓣环占比很小，但是其运动对右心室功能的评价有重要作用。三尖瓣环收缩期位移(tricuspid annular plane systolic excursion, TAPSE)即三尖瓣环从舒张末期至收缩末期的位移，是用于评价右心室收缩功能的灵敏指标，常采用 M 型超声测量， $\text{TAPSE} < 17 \text{ mm}$ 提示右心室收缩功能障碍^[4]。Guazzi 等^[10]对心衰患者的 TAPSE 与肺动脉收缩压(pulmonary arterial systolic pressure, PASP)之间的关系进行研究，结果显示，TAPSE 与 PASP 比值是心衰患者不良结局的独立

预测指标，与核素心血池显像所得的 RVEF 相关。三尖瓣环收缩期峰值速度(S'波)也可用于评价右心室的收缩功能，利用 PW 即可获得， $S' < 9.5 \text{ cm/s}$ 提示右心室的收缩功能下降^[4]。

1.5.3 面积变化分数(fractional area change, FAC)

FAC 能同时从长轴和短轴反映右心室的收缩能力，即(舒张末面积-收缩末面积)/舒张末面积 $\times 100\%$ ， $\text{FAC} < 35\%$ 为右心室收缩功能不全^[4]。Egbe 等^[11]将 209 例先天性心脏病患者的 FAC 和 TAPSE 与 CMRI 测得的 RVEF 进行比较，结果发现两者相关。但心尖部肌小梁使右心室面积的勾画准确率降低。

1.5.4 PASP

PASP 与右心室的功能紧密关联，公式为： $\text{PASP} = 4 \times \text{三尖瓣最大反流速度}^2 + \text{右心房压}$ ，但该公式使用的前提是三尖瓣反流，故未合并三尖瓣反流者可通过测定三尖瓣分流频谱的收缩期最大分流速度计算得到。Sohrabi 等^[12]研究表明，利用超声心动图所得的 PASP 值与右心室导管检查所得 PASP 值相关性良好，但部分研究结果显示，超声心动图测得的 PASP 准确率不高^[13]。

2 核素显像

2.1 核素心血池显像

核素心血池显像通过探测心血池内放射性核素的分布显像，相较于超声心动图准确率更高、重复性更好且不受右心室形态不规则的限制，其相位分析对室壁运动协调性的判断准确、方便。

2.1.1 首次通过法

首次通过法是静脉弹丸式注射显像剂后，获得显像剂首次通过左右心室的系列影像，并得到左右心室功能及血流动力学的定量参数，可以用来测定 RVEF。首次通过法的优点是可以从时间上将各室腔短暂分开，避免室腔重叠误差，对 RVEF 的评估准确。但其获取的信息量有限且临床认知少，故应用有限。

2.1.2 平衡法门控心血池平面显像(gated blood pool imaging, GBPI)

GBPI 将一个心动周期分为多个阶段，利用 R 波触发显像，系统处理后可得到 RVEF、高峰充盈率和高峰射血率等反映右心室舒缩功能的指标。相位分析技术的准确率高、可重复性好，被广泛应

用于右心室运动不同步性的评价，主要指标有右心室位相角平均数和相位标准差。陈雨等^[14]的研究结果显示，右心功能受损的受检者的右心室位相角平均数和相位标准差均明显增大，且与右心室功能显著相关。早在 1991 年，GBPI 的地位即得到了认可^[15]，彭鸣亚等^[16]研究结果显示，GBPI 与 CMRI 的 RVEF 有良好的相关性，其至今依然是测定右心室心功能参数的可靠方法。GBPI 对心脏早期结构的重塑也有显著优势且可用于 CMRI 禁忌证的患者。但 GBPI 的平面采集方式无法避免心脏解剖结构重叠，右心室的时间-放射性曲线中包括了部分右心房的信息，造成 RVEF 低估，从而降低了准确率。

2.1.3 平衡法门控心血池断层显像(gated blood pool tomography, GBPT)

为改进 GBPI 平面采集模式的缺陷，GBPT 随之产生，180°的门控断层采集模式可得到心血池的三维图像，避免了各房室间的重叠干扰，使得其精确度得到了进一步提升。通过量化心血池 SPECT 定量分析软件可同时获得左右心室容积、左右心室射血分数、高峰射血率和高峰充盈率等心功能参数，谢博洽^[17]研究发现，GBPT 对于左右心室功能的评价与 CMRI 均有良好的相关性，其相位分析技术可提供相位直方图带宽、相位标准差和相位峰值等室壁运动同步性指标，Link 等^[18]证实 GBPT 能准确评估心脏运动的同步性。GBPT 在理论上实现了全自动数据采集，避免了人为误差，有良好的发展前景。GBPT 和 GBPI 采集时要求保持相对稳定的心率，故不适用于心律明显失常的患者。

2.2 ¹⁸F-FDG 心肌代谢显像

¹⁸F-FDG 心肌代谢显像可同时对右心室功能和心肌葡萄糖代谢情况进行评估，其对于右心室功能的评价被证明与 CMRI 有良好的相关性^[19]。PAH 患者常常伴有右心室¹⁸F-FDG 摄取的增加，其原因可能为：右心室为克服升高的肺动脉压保证射血，右心室做功增加且葡萄糖转运蛋白-1 通道表达增加；右心室心肌肥厚时能量代谢由脂肪酸代谢向无氧糖酵解转换。多项研究结果表明，右心室与左心室摄取比值与 RVEF 呈负相关^[20]，与 PASP 呈正相关^[21]，Tatebe 等^[22]对 27 例 PAH 患者的研究结果显示，右心室游离壁的 SUV 与 PAH 患者的预后相关，当 SUV≥8.3 时，患者生存率降低。另有研究证明，右心室和左心室摄取的比值可作为特发性

PAH 患者长期预后的独立预测指标^[23]。同时，何嘉等^[24]的研究结果证实，¹⁸F-FDG 心肌代谢显像对于药物疗效的判断同样具有重要意义，其相位分析技术同样也可用于 PAH 患者右心室收缩不同步性的评估^[25]。

2.3 肺灌注显像(pulmonary perfusion imaging, PPI)

PPI 通过检测双肺血流灌注的变化提示 PAH 的存在和病情的严重程度，是较早应用于 PAH 的影像学方法之一。有学者提出了 PPI 针对 PAH 的定量评价指标，如上下肺野放射性计数比、全肺灌注缺损百分数和肺血流灌注分布指数(P 指数)等^[26]。有研究结果显示，上下肺野放射性计数比与肺动脉压呈显著正相关^[27]。刘辰等^[28]应用 P 指数对 30 例特发性 PAH 患者进行研究，结果发现 P 指数与右心导管测得的平均肺动脉压和全肺阻力均有显著相关性。但 PAH 不同时期肺血流灌注损伤程度的变化使上述指标的应用受限，且常规 PPI 的处理较为复杂。

有学者在 2001 年应用首次通过法 PPI^[29]，根据⁹⁹Tc^m-聚合白蛋白在肺内达到平衡的时间(lung equilibrium time, LET)与肺动脉压成正比的原理，利用 LET 提示 PAH 的存在及其程度，其采用的“弹丸”式注射方法相较于常规注射方法可以反映⁹⁹Tc^m-聚合白蛋白在肺循环中的实际时间。王雪梅等^[30]采用首次通过法 PPI 联合 PPI 对 31 例急性肺栓塞合并 PAH 的患者进行评估和危险度分层，结果发现，相较于健康志愿者，急性肺栓塞合并 PAH 患者的 LET 明显延长，且 LET 与全肺灌注缺损百分数和 Aujesky 法进行的危险度评分显著相关。有学者对特发性 PAH 患者的研究结果也显示其 LET 较正常对照者明显延长，且与右心导管检查测得的平均肺动脉压和全肺阻力相关^[31]。

3 CMRI

CMRI 可多角度、多参数成像，心腔结构形态显示清晰，其采用门控采集技术，可在心动周期内完成多组采集，得到右心室容积、RVEF、右心室 FAC 和心肌质量等指标。CMRI 对右心室容积和 RVEF 的评估精准，被公认为无创检查中评价心室功能的“金标准”^[32]。CMRI 电影成像技术最为常用，其中稳态自由进动序列是电影技术的突破，图像对比度只依靠组织的 T1、T2 比值，故

可在心动周期中始终保持高对比度。有研究结果显示, 稳态自由进动序列是测定心室容积重复性最好、准确率最高的扫描序列, 可有效避免右心室形态不规则所致的误差, 故可得到准确的心室容积^[33]。

CMRI 针对右心室采用的传统分割方法由于右心室心肌薄及心尖部不规则肌小梁的分布而准确率欠佳。近几年, 有学者设计了一些简便、自动的分割方法, 如: 多图谱分割方法和基于神经网络的完全卷积神经网络, 且其相应的研究结果表明, 上述方法使右心室的分割更加简便且精确度高, 有望应用于临床^[34]。

但 CMRI 对心律要求高, 检查费用昂贵, 成像过程需要患者配合(如长时间屏气等), 可能致部分患者不耐受, 且其对于体内植入金属物或者心脏辅助器械的患者是禁忌证, 故 CMRI 目前还不能作为评价右心室功能的首选方法, 但随着技术的不断更新和操作处理的不断简化, 我们相信 CMRI 在评价右心室功能方面具有广阔的应用前景。

4 多层螺旋 CT (multislice spiral CT, MSCT)

MSCT 具有良好的时间、空间及对比分辨率, 可快速得到高清晰图像, 薄层扫描及三维重建使其在获得心脏功能参数的同时可直观地观察室壁运动、心腔结构形态、瓣膜运动及反流状况, 其采用门控技术采集。随着各种新型 CT 的相继问世, 其时间、空间分辨率及 Z 轴覆盖范围进一步得到优化。Sieslack 等^[35]发现 MSCT 与 CMR 在右心室功能参数上有良好的相关性。

CT 肺动脉造影同样可用于 PAH 的诊断及右心室功能状态的评估, 其常用指标为在 CT 图像上测定的右心室短轴最大直径、左心室短轴最大直径、右心室短轴与左心室短轴最大直径比率、主肺动脉直径、升主动脉直径和主肺动脉直径与升主动脉直径比值等。有研究结果显示, 以升主动脉直径 > 29 mm 为 PAH 的诊断标准, 其灵敏度和特异度分别为 89% 和 83%, 以升主动脉直径比值 > 1 为标准, 其灵敏度为 89%, 特异度为 82%^[36]。杨冀萍等^[37]研究结果得出, 应用 CT 肺动脉造影得到的右心室短轴最大直径、左心室短轴最大直径、右心室短轴与左心室短轴最大直径比率、升主动脉直径等参数是评价急性肺动脉栓塞患者右心室功能十分有

力的工具。

但 MSCT 具有电离辐射、需要注射对比剂、对于部分右心室显像较差的患者耗时比 CMR 更长等缺点使其不能成为评价右心室功能的常规手段。

5 右心导管检查

右心导管检查直接利用特制导管对目标部位进行压力测定, 是诊断 PAH 的“金标准”。注射造影剂后的右心导管检查可清晰直观地观察到心内的解剖结构和血流方向, 可以判断心脏瓣膜功能并得到右心室容积、RVEF 和心输出量等血流动力学指标, 是评价右心室舒缩功能的“金标准”, 然而, 因其有创性及较高的电离辐射使其应用受限, 但仍有很多学者在评价右心室功能的新技术时, 将其与 X 射线右心室造影做对比研究。

6 小结与展望

随着影像学技术的不断发展, 越来越多的评估右心室功能的方法及技术进入我们的视野, 临床医师不仅可以利用多种医学影像学方法直接获得准确、全面、客观的右心室功能评价指标, 也可以参考并结合脑钠肽、氨基末端脑钠肽前体、生长分化因子 15、6 min 步行试验、心肺运动试验等生化指标或临床试验间接了解受检者的心室功能, 从而对受检者的右心室功能做出更准确地评价。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展, 不涉及任何利益冲突。

作者贡献声明 张磊负责文献的检索、整理及综述的撰写; 武志芳负责综述的审阅; 薛及弟负责综述的修改; 卫华负责综述的修改及审阅。

参 考 文 献

- [1] Konstam MA, Kiernan MS, Bernstein D, et al. Evaluation and Management of Right-Sided Heart Failure: A Scientific Statement From the American Heart Association [J]. *Circulation*, 2018, 137(20): e578–e622. DOI: [10.1161/CIR.0000000000000560](https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000560).
- [2] 王小亭, 刘大为, 张宏民, 等. 重症右心功能管理专家共识 [J]. *中华内科杂志*, 2017, 56(12): 962–973. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0578-1426.2017.12.019](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0578-1426.2017.12.019). Wang XT, Liu DW, Zhang HM, et al. Experts consensus on the management of the right heart function in critically ill patients [J]. *Chin J Intern Med*, 2017, 56(12): 962–973. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0578-1426.2017.12.019](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0578-1426.2017.12.019).

- [3] 中华医学会心血管病学分会, 中华心血管病杂志编辑委员会. 右心衰竭诊断和治疗中国专家共识[J]. *中华心血管病杂志*, 2012, 40(6): 449–461. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0253-3758.2012.06.001](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0253-3758.2012.06.001).
- Chinese Society of Cardiology, Editorial Board of Chinese Journal of Cardiovascular Disease. Chinese expert consensus on diagnosis and treatment of right heart failure[J]. *Chin J Cardiol*, 2012, 40(6): 449–461. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0253-3758.2012.06.001](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0253-3758.2012.06.001).
- [4] Lang RM, Badano LP, 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]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2015, 16(3): 233–271. DOI: [10.1093/eihci/jev014](https://doi.org/10.1093/eihci/jev014).
- [5] 马士红. 三维超声心动图对右心室功能评价的研究进展[J]. *西部医学*, 2017, 29(8): 1173–1175, 1179. DOI: [10.3969/j.issn.1672-3511.2017.08.034](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-3511.2017.08.034).
- Ma SH. Evaluation of right ventricular function by three dimensional echocardiography[J]. *Med J West China*, 2017, 29(8): 1173–1175, 1179. DOI: [10.3969/j.issn.1672-3511.2017.08.034](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-3511.2017.08.034).
- [6] Di Franco A, Kim J, Rodriguez-Diego S, et al. Multiplanar strain quantification for assessment of right ventricular dysfunction and non-ischemic fibrosis among patients with ischemic mitral regurgitation[J/OL]. PLoS One, 2017, 12(9): e0185657[2020-03-29]. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0185657>. DOI: [10.1371/journal.pone.0185657](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185657).
- [7] Squeri A, Censi S, Reverberi C, et al. Three-dimensional echocardiography in various types of heart disease: a comparison study of magnetic resonance imaging and 64-slice computed tomography in a real-world population[J]. *J Echocardiogr*, 2017, 15(1): 18–26. DOI: [10.1007/s12574-016-0315-3](https://doi.org/10.1007/s12574-016-0315-3).
- [8] 周玉良, 张少卿. 三维超声心动图测量正常人右室容积和功能准确性的Meta分析[J]. *中国药业*, 2015, 24(S2): S192–194.
- Zhou YL, Zhang SQ. Meta analysis of right ventricular volume and functional accuracy in three-dimensional echocardiography [J]. *China Pharm*, 2015, 24(S2): S192–194.
- [9] Ogihara Y, Yamada N, Dohi K, et al. Utility of right ventricular Tei-index for assessing disease severity and determining response to treatment in patients with pulmonary arterial hypertension[J]. *J Cardiol*, 2014, 63(2): 149–153. DOI: [10.1016/j.jcc.2013.07.002](https://doi.org/10.1016/j.jcc.2013.07.002).
- [10] Guazzi M, Dixon D, Labate V, et al. RV Contractile Function and its Coupling to Pulmonary Circulation in Heart Failure With Preserved Ejection Fraction: Stratification of Clinical Phenotypes and Outcomes[J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2017, 10(10): 1211–1221. DOI: [10.1016/j.jcmg.2016.12.024](https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2016.12.024).
- [11] Egbe AC, Pislaru SV, Kothapalli S, et al. The role of echocardiography for quantitative assessment of right ventricular size and function in adults with repaired tetralogy of Fallot[J]. *Congenit Heart Dis*, 2019, 14(5): 700–705. DOI: [10.1111/chd.12783](https://doi.org/10.1111/chd.12783).
- [12] Sohrabi B, Kazemi B, Mehryar A, et al. Correlation Between Pulmonary Artery Pressure Measured by Echocardiography and Right Heart Catheterization in Patients with Rheumatic Mitral Valve Stenosis (A Prospective Study)[J]. *Echocardiography*, 2016, 33(1): 7–13. DOI: [10.1111/echo.13000](https://doi.org/10.1111/echo.13000).
- [13] Ahmed I, Nuri MMH, Zakariyya AN, et al. Correlation Between Doppler Echocardiography and Right Heart Catheterization Derived Pulmonary Artery Pressures: Impact of Right Atrial Pressures[J]. *J Coll Physicians Surg Pak*, 2016, 26(4): 255–259.
- [14] 陈雨, 谷阳, 林振宇, 等. 核素心血池显像评价肺动脉高压患者右心室不同步性的研究[J]. *中国临床医学影像杂志*, 2019, 30(1): 4–7.
- Chen Y, Gu Y, Lin ZY, et al. Assessment of right ventricular dyssynchrony in patients with pulmonary hypertension using equilibrium radionuclide angiography[J]. *J China Clin Med Imaging*, 2019, 30(1): 4–7.
- [15] Felipe RF, Prpic H, Arndt JW, et al. Role of radionuclide ventriculography in evaluating cardiac function[J]. *Eur J Radiol*, 1991, 12(1): 20–29. DOI: [10.1016/0720-048X\(91\)90127-H](https://doi.org/10.1016/0720-048X(91)90127-H).
- [16] 彭鸣亚, 栾玉芬, 薄静莉, 等. 平衡法核素心血池显像测定右心室射血分数的应用价值[J]. *江苏医药*, 2015, 41(7): 813–815. DOI: [10.19460/j.cnki.0253-3685.2015.07.027](https://doi.org/10.19460/j.cnki.0253-3685.2015.07.027).
- Peng MY, Luan YF, Bo JL, et al. Application value of equilibrium radionuclide angiography in measuring right ventricular ejection fraction[J]. *Jiangsu Med J*, 2015, 41(7): 813–815. DOI: [10.19460/j.cnki.0253-3685.2015.07.027](https://doi.org/10.19460/j.cnki.0253-3685.2015.07.027).
- [17] 谢博洽. 放射性核素显像在心血管疾病的临床应用研究[D]. 北京: 北京协和医学院, 2012.
- Xie BQ. Clinical application of radionuclide imaging in cardiovascular diseases[D]. Beijing: Peking Union Medical College, 2012.
- [18] Link CB, Nayak A, Soman P, et al. Analysis of Right Ventricular (RV) Regional and Global Systolic Function by Gated Blood Pool SPECT (GBPS) in Patients Undergoing Left Ventricular Assist Device (LVAD) Implantation[J]. *J Heart Lung Transplant*, 2017, 36(4): S59–S60. DOI: [10.1016/j.healun.2017.01.143](https://doi.org/10.1016/j.healun.2017.01.143).
- [19] Wang L, Zhang Y, Yan CW, et al. Evaluation of right ventricular volume and ejection fraction by gated ¹⁸F-FDG PET in patients with pulmonary hypertension: Comparison with cardiac MRI and CT[J]. *J Nucl Cardiol*, 2013, 20(2): 242–252. DOI: [10.1007/s12350-013-9672-8](https://doi.org/10.1007/s12350-013-9672-8).
- [20] Yang T, Wang L, Xiong CM, et al. The Ratio of ¹⁸F-FDG Activity Uptake Between the Right and Left Ventricle in Patients With Pulmonary Hypertension Correlates With the Right Ventricular Function[J]. *Clin Nucl Med*, 2014, 39(5): 426–430. DOI: [10.1097/RNU.0000000000000422](https://doi.org/10.1097/RNU.0000000000000422).
- [21] Bokhari S, Raina A, Rosenweig EB, et al. PET Imaging May Provide a Novel Biomarker and Understanding of Right Ventricular Dysfunction in Patients With Idiopathic Pulmonary Arterial Hypertension[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2011, 4(6):

- 641–647. DOI: [10.1161/CIRCIMAGING.110.963207](https://doi.org/10.1161/CIRCIMAGING.110.963207).
- [22] Tatebe S, Fukumoto Y, Oikawa-Wakayama M, et al. Enhanced [¹⁸F]fluorodeoxyglucose accumulation in the right ventricular free wall predicts long-term prognosis of patients with pulmonary hypertension: a preliminary observational study[J]. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*, 2014, 15(6): 666–672. DOI: [10.1093/ehjci/jet276](https://doi.org/10.1093/ehjci/jet276).
- [23] Li W, Wang L, Xiong CM, et al. The Prognostic Value of ¹⁸F-FDG Uptake Ratio Between the Right and Left Ventricles in Idiopathic Pulmonary Arterial Hypertension[J]. *Clin Nucl Med*, 2015, 40(11): 859–863. DOI: [10.1097/rnu.00000000000000956](https://doi.org/10.1097/rnu.00000000000000956).
- [24] 何嘉, 方纬, 何建国, 等. 特发性肺动脉高压¹⁸F-FDG 右室心肌SPECT 显像研究[J]. 中华核医学杂志, 2011, 31(6): 400–404. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0253-9780.2011.06.012](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0253-9780.2011.06.012).
He J, Fang W, He JG, et al. ¹⁸F-FDG SPECT myocardial imaging of right ventricle in patients with idiopathic pulmonary hypertension[J]. *Chin J Nucl Med*, 2011, 31(6): 400–404. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0253-9780.2011.06.012](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0253-9780.2011.06.012).
- [25] Wang L, Zhou WH, Liang Y, et al. Right ventricular dyssynchrony in pulmonary hypertension: Phase analysis using FDG-PET imaging[J]. *J Nucl Cardiol*, 2017, 24(1): 69–78. DOI: [10.1007/s12350-015-0341-y](https://doi.org/10.1007/s12350-015-0341-y).
- [26] Fishman AJ, Moser KM, Fedullo PF. Perfusion Lung Scans vs Pulmonary Angiography in Evaluation of Suspected Primary Pulmonary Hypertension[J]. *Chest*, 1983, 84(6): 679–683. DOI: [10.1378/chest.84.6.679](https://doi.org/10.1378/chest.84.6.679).
- [27] 彭爱梅, 蔡海东. 肺灌注显像在肺心病患者肺动脉压测定中的应用[J]. 同济大学学报(医学版), 2006, 27(2): 46–47, 50. DOI: [10.3969/j.issn.1008-0392.2006.02.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-0392.2006.02.012).
Peng AM, Cai HD. The Study of Pulmonary Artery Pressure by Lung Perfusion Imaging in Patients with Cor Pulmonale[J]. *J Tongji Univ (Med Sci)*, 2006, 27(2): 46–47, 50. DOI: [10.3969/j.issn.1008-0392.2006.02.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-0392.2006.02.012).
- [28] 刘辰, 方纬, 何建国, 等. 肺灌注显像定量分析评价特发性肺动脉高压[J]. 中华核医学杂志, 2010, 30(2): 90–93. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0253-9780.2010.02.006](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0253-9780.2010.02.006).
Liu C, Fang W, He JG, et al. Quantitative analysis of lung perfusion in patients with idiopathic pulmonary arterial hypertension[J]. *Chin J Nucl Med Mol Imaging*, 2010, 30(2): 90–93. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0253-9780.2010.02.006](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0253-9780.2010.02.006).
- [29] 潘世伟, 吴清玉, 胡盛寿, 等. 核素肺动态与静态灌注显像对风湿性心脏病合并肺动脉高压的初步分析(摘要)[J]. 中国循环杂志, 2001, 16(6): 464–464. DOI: [10.3321/j.issn:1000-3614.2001.06.024](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-3614.2001.06.024).
- Pan SW, Wu QY, Hu SS, et al. Preliminary analysis of radionuclide pulmonary dynamic and static perfusion imaging in rheumatic heart disease with pulmonary hypertension[J]. *Chin Circ J*, 2001, 16(6): 464–464. DOI: [10.3321/j.issn:1000-3614.2001.06.024](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-3614.2001.06.024).
- [30] 王雪梅, 王静, 李国华, 等. 肺动态和常规肺灌注显像评估急性肺栓塞合并肺动脉高压及危险度分层[J]. 中华核医学杂志,
- 2010, 30(5): 316–319. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0253-9780.2010.05.010](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0253-9780.2010.05.010).
Wang XM, Wang J, Li GH, et al. Risk stratification of patients with combined acute pulmonary embolism and pulmonary hypertension using dynamic and regular pulmonary perfusion imaging[J]. *Chin J Nucl Med*, 2010, 30(5): 316–319. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0253-9780.2010.05.010](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0253-9780.2010.05.010).
- [31] 王道宇, 方纬, 刘辰, 等. 动态肺灌注显像评价特发性肺动脉高压的临床研究[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2012, 32(2): 123–126. DOI: [10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2012.02.010](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2012.02.010).
Wang DY, Fang W, Liu C, et al. Dynamic pulmonary perfusion imaging in patients with idiopathic pulmonary arterial hypertension[J]. *Chin J Nucl Med Mol Imaging*, 2012, 32(2): 123–126. DOI: [10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2012.02.010](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2012.02.010).
- [32] DeFaria Yeh D, Foster E. Is MRI the Preferred Method for Evaluating Right Ventricular Size and Function in Patients With Congenital Heart Disease? MRI Is Not the Preferred Method for Evaluating Right Ventricular Size and Function in Patients With Congenital Heart Disease[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2014, 7(1): 198–205. DOI: [10.1161/CIRCIMAGING.113.000395](https://doi.org/10.1161/CIRCIMAGING.113.000395).
- [33] Li WH, Wan K, Han YC, et al. Reference value of left and right atrial size and phasic function by SSFP CMR at 3.0 T in healthy Chinese adults[J/OL]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 3196[2020-03-29]. <https://www.nature.com/articles/s41598-017-03377-6>. DOI: [10.1038/s41598-017-03377-6](https://doi.org/10.1038/s41598-017-03377-6).
- [34] 苏新宇, 王丽嘉, 朱艳春. 基于心脏电影磁共振图像的一种新的右心室多图谱分割方法[J]. 物理学报, 2019, 68(19): 190701. DOI: [10.7498/aps.68.20190582](https://doi.org/10.7498/aps.68.20190582).
Su XY, Wang LJ, Zhu YC. A new method of multi-atlas segmentation of right ventricle based on cardiac film magnetic resonance images[J]. *Acta Phys Sin*, 2019, 68(19): 190701. DOI: [10.7498/aps.68.20190582](https://doi.org/10.7498/aps.68.20190582).
- [35] Sieslack AK, Dziallas P, Nolte I, et al. Quantification of right ventricular volume in dogs: a comparative study between three-dimensional echocardiography and computed tomography with the reference method magnetic resonance imaging[J/OL]. *BMC Vet Res*, 2014, 10: 242[2020-03-28]. <https://link.springer.com/article/10.1186/s12917-014-0242-3>. DOI: [10.1186/s12917-014-0242-3](https://doi.org/10.1186/s12917-014-0242-3).
- [36] Shen YC, Wan C, Tian PW, et al. CT-Base Pulmonary Artery Measurement in the Detection of Pulmonary Hypertension: A Meta-Analysis and Systematic Review[J]. *Medicine*, 2014, 93(27): e256. DOI: [10.1097/md.0000000000000256](https://doi.org/10.1097/md.0000000000000256).
- [37] 杨冀萍, 牛彩虹, 齐进冲, 等. 256 层螺旋 CT 肺动脉成像量化评价急性肺动脉栓塞患者右心室功能和肺动脉栓塞程度[J]. 临床荟萃, 2016, 31(4): 407–410.
Yang JP, Niu CH, Qi JC, et al. Qualitative estimation of right ventricular function and pulmonary artery obstruction degree after acute pulmonary embolism with computed tomographic pulmonary angiography[J]. *Clin Focus*, 2016, 31(4): 407–410.

(收稿日期: 2020-03-29)