

动态 CZT SPECT 对肺动脉高压患者右心室心肌血流量的定量评估

王歆惠¹ 汪蕾² 方纬² 闫朝武¹

¹中国医学科学院、北京协和医学院阜外医院结构性心脏病中心 100037; ²中国医学科学院、北京协和医学院阜外医院核医学科 100037

通信作者: 闫朝武, Email: chaowuyan@163.com

【摘要】 目的 建立利用 SPECT 定量评估肺动脉高压患者右心室心肌血流量(MBF)的方法,并探讨右心室 MBF 与血流动力学的关系。**方法** 回顾性分析 2018 年 1 月至 2019 年 6 月期间于阜外医院诊断为先天性心脏病相关肺动脉高压的患者 14 例[女 13 例,男 1 例,年龄(30.9±13.5)岁],患者均无右心功能不全表现。所有患者均行动态 SPECT 心肌灌注显像,采用碲锌镭(CZT)心脏专用 SPECT 仪进行图像采集,并进行图像重建和物理校正;采用单组织双腔室模型进行动力学建模,并考虑右心血池对右心室心肌的溢出效应,从而获得患者右心室和左心室的 MBF。所有患者在显像后 1 周内接受右心导管检查,测定血流动力学参数;行经胸超声心动图测右心室舒张末期内径。采用 Pearson 相关分析 MBF 与其他参数间的相关性。**结果** 患者右心室 MBF 为(0.70±0.19) ml·min⁻¹·g⁻¹,平均肺动脉压为(68.64±18.18) mmHg(1 mmHg=0.133 kPa),两者间存在相关性($r=0.716, P<0.05$)。右心室 MBF 与肺血管阻力[(14.10±7.81) Wood 单位]呈正相关($r=0.768, P<0.05$),与右心室舒张末期内径[(32.00±7.75) mm]呈负相关($r=-0.624, P<0.05$)。而左心室 MBF 与血流动力学指标均无相关性(r 值:-0.350~0.310,均 $P>0.05$)。**结论** 初步建立了利用 SPECT 定量评估肺动脉高压患者右心室 MBF 的方法。对于右心功能代偿的先天性心脏病相关肺动脉高压患者,右心室 MBF 随肺动脉压和肺血管阻力的升高而增加。

【关键词】 高血压,肺性;心肌灌注显像;体层摄影术,发射型计算机,单光子;碲;锌;镭

基金项目: 国家自然科学基金(81670283, 81801733)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20191022-00229

Quantitative evaluation of right ventricular myocardial blood flow using dynamic CZT SPECT imaging in patients with pulmonary arterial hypertension

Wang Xinhui¹, Wang Lei², Fang Wei², Yan Chaowu¹

¹Department of Structural Heart Disease, Fuwai Hospital, Peking Union Medical College and Chinese Academy of Medical Sciences, Beijing 100037, China; ²Department of Nuclear Medicine, Fuwai Hospital, Peking Union Medical College and Chinese Academy of Medical Sciences, Beijing 100037, China

Corresponding author: Yan Chaowu, Email: chaowuyan@163.com

【Abstract】 Objective To establish SPECT quantitative method for assessment of right ventricular myocardial blood flow (MBF) and investigate the relationship between right ventricular MBF and pulmonary hemodynamics in patients with pulmonary arterial hypertension. **Methods** From January 2018 to June 2019, 14 patients (13 females, 1 male; age: (30.9±13.5) years) in Fuwai Hospital with pulmonary arterial hypertension related to congenital heart disease (PAH-CHD), whose right ventricular function were preserved, were retrospectively analyzed in this study. All subjects underwent dynamic SPECT myocardial perfusion imaging using cadmium-zinc-telluride (CZT) SPECT. Full physical correction was applied for imaging reconstruction. One-tissue two compartmental model was used for kinetic analysis and the spill-over effect from right ventricular blood pool to right ventricular myocardium was considered into the correction, thus right ventricular MBF and left ventricular MBF was calculated. Right heart catheterization was performed within one week after SPECT imaging to evaluate the pulmonary hemodynamic parameters, and the right ventricular end-diastolic dimension (EDD) was measured by transthoracic echocardiography. Correlations between the MBF and other parameters were analyzed with Pearson correlation analysis. **Results** The right ventricular MBF was (0.70±0.19) ml·min⁻¹·g⁻¹, which was significantly correlated with mean pulmonary artery pressure ((68.64±18.18) mmHg (1 mmHg=0.133 kPa); $r=0.716, P<0.05$) and pulmonary vascular resistance ((14.10±7.81) Wood units; $r=0.768, P<0.05$). The right ventricular MBF was also significantly correlated with right ventricular EDD ((32.00±7.75) mm; $r=-0.624, P<0.05$). Meanwhile,

there was no significant relationship between left ventricular MBF and hemodynamic parameters (r values: from -0.350 to 0.310 , all $P > 0.05$). **Conclusions** A method using SPECT to quantitatively measure right ventricular MBF in patients with PAH-CHD is preliminarily established. Right ventricular MBF is increased with the increased pulmonary arterial pressure and pulmonary vascular resistance in patients with PAH-CHD.

【Key words】 Hypertension, pulmonary; Myocardial perfusion imaging; Tomography, emission-computed, single-photon; Tellurium; Zine; Cadmium

Fund program: National Natural Science Foundation of China (81670283, 81801733)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20191022-00229

肺动脉高压的主要病理特征是进行性加重的肺血管重构,肺血管阻力不断增加,使右心负荷逐步加重,最终导致右心功能不全。右心功能是影响肺动脉高压患者预后的主要因素。右心功能一般经历从代偿期到失代偿期的变化过程,右心室心肌血流灌注被认为是这一过程中重要的影响因素,心肌微循环障碍引起的血流储备降低是导致右心室舒张功能异常和右心功能失代偿的重要机制之一^[1]。因此,右心室心肌血流灌注测定对于右心功能评估有重要价值。心肌血流灌注评价包含负荷心肌血流量(myocardial blood flow, MBF)和静息 MBF 两方面,由于负荷试验对于肺动脉高压患者存在一定的风险,静息 MBF 的评价更具临床可行性。目前,公认的能够绝对定量评价 MBF 的影像学方法是 PET 显像,但因 PET 显像药物制备成本较高,其临床应用较难。近年来,随着设备性能的提高和物理校正技术的完善,较为普及的 SPECT 也能够实现 MBF 的绝对定量评估^[2-3],但是这一技术主要用于左心室 MBF 评估,鲜见用于评价右心室 MBF 的研究报道^[4]。本研究的目的在于建立利用 SPECT 定量评估肺动脉高压患者右心室 MBF 的方法,并初步探讨右心室功能代偿期 MBF 与肺循环血流动力学参数之间的关系。

资料与方法

1. 研究对象。回顾性分析 2018 年 1 月至 2019 年 6 月期间本院诊断为先天性心脏病相关肺动脉高压的患者 14 例[女 13 例,男 1 例;年龄(30.9±13.5)岁],所有患者均无明显的右心功能不全表现(纽约心功能分级为 I 或 II 级)。所有患者均行 SPECT 动态心肌灌注显像定量评估 MBF,行右心导管检查以测定血流动力学参数,并常规行超声心动图检查,检查前未接受治疗。肺动脉高压的诊断标准为:经右心导管检查,静息状态下平均肺动脉压(mean pulmonary artery pressure, mPAP)≥25 mmHg(1 mmHg=0.133 kPa)^[5]。排除标准:合并心肌病、心脏瓣膜病、冠状动脉粥样硬化性心脏病(简称冠心病)。所有患者均于检查前

签署知情同意书,研究得到本单位伦理委员会的批准(批件号:NCT03554330)。

2. SPECT 动态心肌灌注显像。(1) SPECT 动态显像和图像重建。采用碲锌镉晶体(cadmium-zinc-telluride, CZT)心脏专用 SPECT 仪(NM530c 型,美国 GE 公司);显像剂为^{99m}Tc-甲氧基异丁基异腈(methoxyisobutylisonitrile, MIBI),由北京原子高科股份有限公司提供。显像前患者饮水 350~500 ml,以减少肝及胃肠道放射性的影响。进行预注射,确定心脏位于探头中央。采用列表模式采集,启动动态采集程序,10 s 后快速静脉注射^{99m}Tc-MIBI 740~925 MBq,持续采集,采集过程共 10 min。能窗设置:^{99m}Tc 主能峰为 131.6~148.4 keV,散射峰为 118.4~131.5 keV。共生成 18 帧图像:10 s×10, 20 s×5, 60 s×2 和 280 s×1。图像重建采用有序子集最大期望值迭代法,32 次迭代,2 个子集。

(2) 衰减校正采集。动态 SPECT 采集完成后,使用 SPECT/CT 仪(SymbiaT16 型,德国 Siemens 公司)进行低剂量 CT 扫描(120 kV, 30 mA),并将 CT 图像用于 SPECT 动态图像数据的组织衰减校正。CT 采集体位尽可能和动态 SPECT 采集体位一致。

(3) 物理校正。①核素物理衰变校正:根据动态 SPECT 采集的开始时间点、采集的时间长度和^{99m}Tc 核素的半衰期,计算各个动态时间点的核素衰减校正系数,从而重新校正原始投影图像中应具备的放射性计数。②移动校正:根据各个动态时间点的动态 SPECT 图像,以心脏中心为原点,经由坐标转换、线追踪和几何形状近似找出血池与心肌的边界,利用最大关联性获得校正移动的向量,校正扫描中的移动。③散射校正:利用散射能窗对图像中的散射分量进行计算,并减去散射分量图像而得到散射校正图像。④组织衰减校正:根据 CT 图像创建 1 个组织衰减矩阵,并在迭代重建中使用该矩阵校正组织衰减造成的心脏对于药物摄取及心脏外其他部位活度的低估。⑤图像空间分辨率恢复:通过移动点源和改变点源与准直器之间的距离,测量点扩散函数,并建立点扩散函数矩阵,将该矩阵用于迭代图像

重建以重新恢复空间分辨率。⑥噪声去除:将重建后的图像通过噪声分析滤波器或泊松分布模拟器,用于迭代图像重建,以去除图像中的噪声。⑦几何扭曲校正:根据针孔与探头对应重建图像中心的几何位置,在迭代重建中经由前投射与反投射步骤,对 2 种正向射线进行平移与坐标转换运算,以确立斜向射线在探头与重建图像中的正确位置,从而校正斜向射线所致重建图像的几何扭曲。⑧数据截断补偿:在迭代图像重建过程中,通过重建图像的视野范围扩大与投射步骤估算原始投射图像的被截断区域,并以重建图像所投射图像中的截断区域计数对接原始图像,以扩充原始图像的视野范围;以扩充视野范围的原始图像为输入,扩大重建图像的范围,达到收敛,从而补偿数据截断所导致的伪影。

经过以上物理校正,可以获得准确的像素值与绝对 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 活度浓度之间的线性关系,进而转换像素值为具有物理意义的单位(Bq/ml),获得定量 SPECT 图像。

(4)右心室和左心室 MBF 的计算。将所有动态 SPECT 横断面图像旋转至短轴图,以此产生血池和心肌的时间-活度曲线。采用双矩形盒(长 4 cm,宽 1 cm,高 1 cm)进行右心与左心的血池采样,以产生左心与右心的时间-活度曲线。左心的矩形盒置于左心室 1/3 及左心房 2/3 的区域,右心的矩形盒完全置于右心室内。采用稳定的心肌摄取图像(取于动态 SPECT 末帧图像)进行心肌边界的测定,并将边界应用于每帧动态 SPECT 图像(图 1A),生成心肌的时间-活度曲线。

采用单组织双腔室模型进行动力学建模,左心室 MBF 的计算方法参考文献[6],右心室 MBF 的计算则需考虑右心血池对右心室心肌的溢出效应,模型如下: $C_{\text{myo,RV}}(t) = \text{FBV} \cdot C_{\text{a,RV}}(t) + (1 - \text{FBV}) \cdot [K_1 \cdot e^{-K_2 \cdot t} \oplus C_{\text{a,LV}}(t)]$,其中 $K_1(\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1})$ 和 $K_2(\text{min}^{-1})$ 分别代表 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ -MIBI 从血液进入心肌组织的速率及从心肌组织洗脱的速率; $C_{\text{myo,RV}}(t)$ 为经动态 SPECT 图像测量获得的右心室心肌放射性浓度; $C_{\text{a,LV}}(t)$ 为左心的时间-活度曲线,由左心的血池采样获得,作为动脉血的输入项; $C_{\text{a,RV}}(t)$ 为右心的时间-活度曲线,作为估算右心血池对右心室心肌溢出效应估算的输入项;FBV(fraction of blood volume)是右心血池到右心室心肌的溢出分数。动态 SPECT 测量的右心室心肌摄取中,一部分来自于右心血池的溢出效应,另一部分来自于右心室心肌真实的摄取;上

述模型中 $[K_1 \cdot e^{-K_2 \cdot t} \oplus C_{\text{a,LV}}(t)]$ 为右心室心肌真实的摄取,(1-FBV)为右心室心肌真实摄取的分率,同时满足放射性守恒的要求。由显像药物的心肌提取率对 K_1 进行转换,即可获得心肌的绝对血流量(图 1B)。

3.右心导管检查及超声心动图检查。动态 SPECT 心肌灌注显像后 1 周内,所有患者均行右心导管检查。测定的血流动力学参数包括 mPAP、收缩期肺动脉压力(systolic pulmonary artery pressure, SPAP)和舒张期肺动脉压力(diastolic pulmonary artery pressure, DPAP)。根据 Fick 法计算肺循环血流量(pulmonary blood flow, Q_p)、体循环血流量(systemic blood flow, Q_s)、 Q_p/Q_s 和肺血管阻力(pulmonary vascular resistance, PVR)。显像后 1 周内对患者常规行经胸超声心动图检查,以明确先天性心脏病的类型,测量心室舒张末期内径(end-diastolic dimension, EDD)。

4.统计学处理。采用 IBM SPSS 22.0 软件进行数据处理与分析。符合正态分布的定量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,采用 Pearson 相关分析 MBF 与其他参数间的相关性。 $P < 0.05$ 为相关性有统计学意义。

结 果

14 例患者的先天性心脏病类型如下:房间隔缺损 9 例,室间隔缺损 4 例,动脉导管未闭 1 例;纽约心功能分级:I 级 3 例、II 级 11 例。患者左心室射血分数为 $(61.07 \pm 5.22)\%$, mPAP 为 (68.64 ± 18.18) mmHg, PVR 为 (14.10 ± 7.81) Wood 单位,右心室 EDD 为 (32.00 ± 7.75) mm,左心室 EDD 为 (41.36 ± 8.77) mm,右心室 MBF 为 (0.70 ± 0.19) $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$;左心室 MBF 为 (1.00 ± 0.15) $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

右心室 MBF 与 mPAP、PVR 均呈正相关(r 值:0.716、0.768,均 $P < 0.05$),右心室 MBF 与右心室 EDD 呈负相关($r = -0.624, P < 0.05$;图 2);左心室 MBF 则与 mPAP、PVR、左心室 EDD、右心室 EDD 均无明显的线性相关(r 值:0.251、0.087、0.310、-0.350,均 $P > 0.05$)。

讨 论

SPECT 心肌灌注显像是临床诊断心肌缺血的常用方法,该方法成本低廉,利于临床推广。由于以往 SPECT 性能和物理校正技术的限制,仅能进行定性诊断。近年来,SPECT 灵敏度和快速采集性能的不提高,特别是物理校正技术的进步,使 SPECT

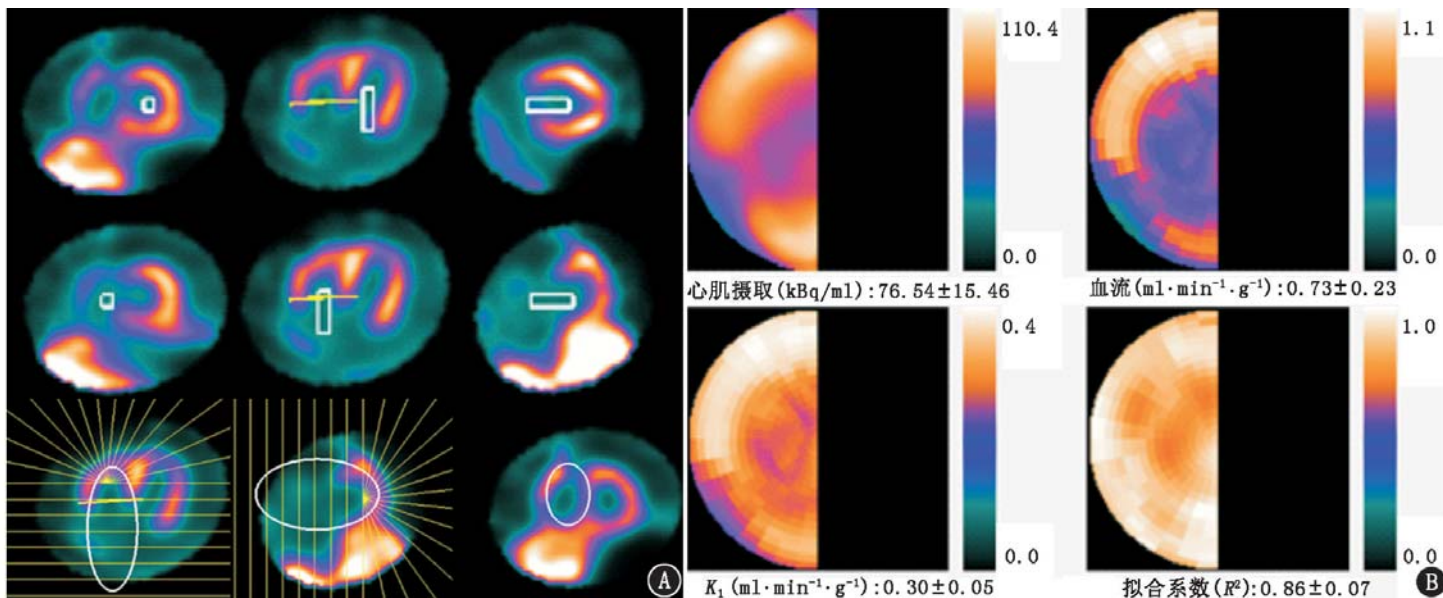


图 1 先天性心脏病相关肺动脉高压患者⁹⁹Tc^m-甲氧基异丁基异腓 (MIBI) SPECT 显像右心室心肌血流定量测定示意图。A. 血池及心肌采样图 (图中方框代表心血池采样, 椭圆代表右心室心肌采样); B. 计算、转换所得右心室绝对心肌血流量 (MBF) 的靶心图 (K_1 代表⁹⁹Tc^m-MIBI 从血液进入心肌组织的速率)

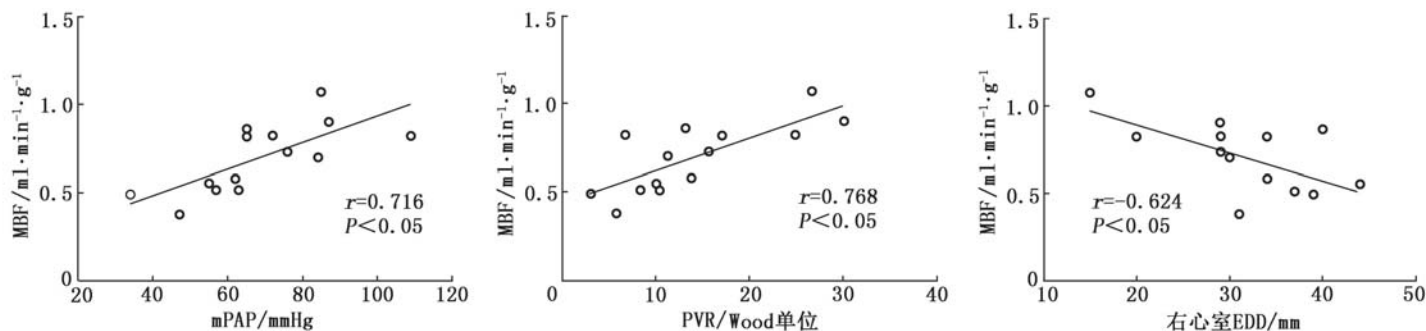


图 2 14 例先天性心脏病相关肺动脉高压患者右心室 MBF 与平均肺动脉压 (mPAP)、肺血管阻力 (PVR)、右心室舒张末期内径 (EDD) 的相关分析图。1 mmHg=0.133 kPa

心肌灌注显像通过动态采集技术实现绝对定量评估 MBF 成为可能。临床研究表明,应用 SPECT 动态显像定量分析获得的 MBF,与 PET 及有创性方法测量的结果均具有良好的一致性^[7-10]。SPECT 动态显像定量分析中物理校正尤为重要。以往有研究探讨了不同水平的物理校正对于 SPECT 心肌血流定量分析结果的影响,发现非完整物理校正明显影响定量结果的准确性,从而证实完整物理校正正在 SPECT 心肌血流定量分析中的必要性^[11]。最近的 1 项临床研究将基于完整物理校正的动态 SPECT 心肌血流定量技术与¹³N-NH₃ PET 显像进行了对比,结果表明 2 种方法计算所得的 MBF、整体和局部心肌血流储备具有高度的一致性^[12]。

由于正常右心室壁较薄,放射性摄取较低,易受部分容积效应的影响,因此很难进行定量评价。但在肺动脉高压的情况下,右心室心肌明显增厚,显影清晰,部分容积效应影响相对较小,因此进行右心室心肌血流定量分析具有可行性。但将左心血流绝对

定量技术应用于右心时,还需要考虑右心的结构及血流动力学特点^[13]。在以往的肺动脉高压右心血流定量分析研究中,有学者尝试应用磁共振心肌灌注成像技术或¹³N-NH₃ PET 心肌灌注显像评估肺动脉高压的右心静息 MBF^[14]。而采用 SPECT 心肌灌注显像进行右心室 MBF 定量评价的研究鲜见。本研究建立了利用 SPECT 定量评估肺动脉高压患者右心室 MBF 的新方法,所采用的腔室模型充分考虑了右心血池对心肌的扩散效应以及左心室摄取对右心室的溢出效应,避免了部分容积效应对右心室心肌的影响,使右心血流定量测量更加准确。本研究结果提示,SPECT 具有定量评估肺动脉高压患者右心室 MBF 的潜力。

本研究结果显示,右心室 MBF 与 mPAP、PVR 均呈正相关(r 值:0.716、0.768,均 $P<0.05$),而与右心室 EDD 呈负相关($r=-0.624, P<0.05$),表明处于右心功能代偿期的肺动脉高压患者,由于右心负荷加重,静息状态下的右心室 MBF 随之增加,以满足心

肌组织对能量的需求。右心室静息 MBF 的增高,很可能也是右心室心肌血流储备降低的重要原因之一。腺苷类负荷药物具有收缩支气管的作用,有可能会加重患者缺氧症状,因此,对于肺动脉高压患者可否进行药物负荷试验还有争议^[15-16],而单纯评价右心室静息 MBF 则具有较高的安全性。虽然目前的研究结果提示肺动脉高压可以导致右心血流储备降低,但还需要进一步研究,以明确右心室负荷 MBF 和静息 MBF 之间的关系。

由于本研究为初步探索性研究,因此存在一些不足之处。首先,虽然建立了评价右心室 MBF 的新方法,但这一技术还需要与 PET 显像或微球实验等“金标准”进行对比。其次,样本量相对较少,主要限于先天性心脏病相关肺动脉高压患者。再次,本研究缺少对照组,因为正常右心室室壁较薄,SPECT 心肌灌注显像存在一定局限性。

总之,本研究发现在肺动脉高压患者中,SPECT 能够定量评估右心室静息 MBF,且右心室 MBF 与 mPAP 和 PVR 等血流动力学参数呈正相关。下一步的研究需要明确负荷条件下以及右心功能失代偿期右心室 MBF 的改变及其相关临床意义。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

[1] Voelkel NF, Quaife RA, Leinwand LA, et al. Right ventricular function and failure: report of a National Heart, Lung, and Blood Institute Working Group on cellular and molecular mechanisms of right heart failure[J]. *Circulation*, 2006, 114(17): 1883-1891. DOI:10.1161/CIRCULATIONAHA.106.632208.

[2] Klein R, Hung GU, Wu TC, et al. Feasibility and operator variability of myocardial blood flow and reserve measurements with ⁹⁹Tc^m-sestamibi quantitative dynamic SPECT/CT imaging[J]. *J Nucl Cardiol*, 2014, 21(6): 1075-1088. DOI:10.1007/s12350-014-9971-8.

[3] Shrestha U, Sciammarella M, Alhassen F, et al. Measurement of absolute myocardial blood flow in humans using dynamic cardiac SPECT and ⁹⁹Tc^m-tetrofosmin: method and validation[J]. *J Nucl Cardiol*, 2017, 24(1): 268-277. DOI:10.1007/s12350-015-0320-3.

[4] 张宗耀,吴大勇,郭风,等.应用新型半导体 SPECT 检测心力衰竭患者左心室容积和射血分数:与常规 SPECT 和心脏磁共振成像对比[J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2017, 37(5): 269-273. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2017.05.004. Zhang ZY, Wu DY, Guo F, et al. Myocardial perfusion imaging evaluation of left ventricular volume and ejection fraction using a novel semi-conductor SPECT: comparison to conventional SPECT and cardiac MRI[J]. *Chin J Nucl Med Mol Imaging*, 2017, 37(5): 269-273. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2017.05.004.

[5] Galie N, Humbert M, Vachiery JL, 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 Hy-

per-tension 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. DOI:10.1093/eurheartj/ehv317.

[6] Hsu B, Chen FC, Wu TC, et al. Quantitation of myocardial blood flow and myocardial flow reserve with ⁹⁹Tc^m-sestamibi dynamic SPECT/CT to enhance detection of coronary artery disease[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2014, 41(12): 2294-2306. DOI:10.1007/s00259-014-2881-9.

[7] Nkoulou R, Fuchs TA, Pazhenkottil AP, et al. Absolute myocardial blood flow and flow reserve assessed by gated SPECT with cadmium-zinc-telluride detectors using ⁹⁹Tc^m-tetrofosmin: head-to-head comparison with ¹³N-ammonia PET[J]. *J Nucl Med*, 2016, 57(12): 1887-1892. DOI:10.2967/jnumed.115.165498.

[8] Wells RG, Marvin B, Poirier M, et al. Optimization of SPECT measurement of myocardial blood flow with corrections for attenuation, motion, and blood binding compared with PET[J]. *J Nucl Med*, 2017, 58(12): 2013-2019. DOI:10.2967/jnumed.117.191049.

[9] Petretta M, Storto G, Pellegrino T, et al. Quantitative assessment of myocardial blood flow with SPECT[J]. *Prog Cardiovasc Dis*, 2015, 57(6): 607-614. DOI:10.1016/j.pcad.2014.12.007.

[10] 吴大勇,汪蕾,马荣政,等.心脏专用铊-铟-镅 SPECT 仪的技术优势及临床应用进展[J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2018, 38(8): 564-567. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2018.08.011. Wu DY, Wang L, Ma RZ, et al. Technological advances and clinical application progress of the dedicated cardiac cadmium-zinc-telluride SPECT[J]. *Chin J Nucl Med Mol Imaging*, 2018, 38(8): 564-567. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2018.08.011.

[11] Wang L, Wu DY, Yang Y, et al. Avoiding full corrections in dynamic SPECT images impacts the performance of SPECT myocardial blood flow quantitation[J]. *J Nucl Cardiol*, 2017, 24(4): 1332-1346. DOI:10.1007/s12350-016-0513-4.

[12] Hsu B, Hu LH, Yang BH, et al. SPECT myocardial blood flow quantitation toward clinical use: a comparative study with ¹³N-ammonia PET myocardial blood flow quantitation[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2017, 44(1): 117-128. DOI:10.1007/s00259-016-3491-5.

[13] Sheehan F, Redington A. The right ventricle: anatomy, physiology and clinical imaging[J]. *Heart*, 2008, 94(11): 1510-1515. DOI:10.1136/hrt.2007.132779.

[14] 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.

[15] Moles VM, Cascino T, Saleh A, et al. Safety of regadenoson stress testing in patients with pulmonary hypertension[J]. *J Nucl Cardiol*, 2018, 25(3): 820-827. DOI:10.1007/s12350-016-0734-6.

[16] Van Tosh A, Nichols KJ. Pharmacologic stress myocardial perfusion imaging in patients with pulmonary hypertension: what do we know, and what remains to be learned? [J]. *J Nucl Cardiol*, 2018, 25(3): 828-832. DOI:10.1007/s12350-016-0771-1.

(收稿日期:2019-10-22)