

# 移动校正对 CZT SPECT 心肌血流定量显像影响的初步研究

庞泽堃 汪娇 陈越 王小杰 李帅 李剑明

天津医科大学心血管病临床学院、泰达国际心血管病医院核医学科,天津 300457

通信作者:李剑明, Email: ichlijm@163.com

**【摘要】** 目的 探讨移动校正(MC)对铯铊 SPECT(CZT SPECT)心肌血流(MBF)和心肌血流储备(MFR)计算值的影响。方法 回顾性收集 2019 年 6 月至 2019 年 8 月于泰达国际心血管病医院行动态 CZT SPECT 心肌灌注显像(MPI)的可疑或确诊冠状动脉粥样硬化性心脏病(简称冠心病)患者 28 例[男 10 例,女 18 例,年龄(60.75±11.62)岁]。经定量分析获得静息、负荷显像的 MBF 和 MFR 值,应用 Corridor 4DM 软件计算 MC 前后冠状动脉各分支区域及左心室(LV)整体的负荷 sMBF(sMBF)和 MFR,对数据进行配对 *t* 检验和 Pearson 相关分析。结果 MC 前患者 LV 整体的 sMBF 和 MFR 分别为(0.82±0.49) ml·min<sup>-1</sup>·g<sup>-1</sup>和 1.69±0.68,而 MC 后这 2 个指标计算值增加,分别为(1.05±0.64) ml·min<sup>-1</sup>·g<sup>-1</sup>和 2.12±0.77(*t* 值:-4.87,-6.01,均 *P*<0.001)。MC 前与 MC 后患者左前降支(LAD)、左回旋支(LCX)、右冠状动脉(RCA)区域及 LV 整体的 sMBF、MFR 均有较佳的相关性(*r* 值:0.69~0.96,均 *P*<0.001)。若以 MFR<2.0 作为血流储备受损参考标准,28 例中有 19 例(67.9%)MC 前存在 MFR 受损,而 MC 后有 13 例(46.4%)存在此情况。结论 在 CZT SPECT MPI 定量显像中,MC 后 sMBF 及 MFR 计算值较 MC 前提高,MC 有助于减少心脏“爬升”效应可能导致的假阳性。

**【关键词】** 心肌灌注显像;体层摄影术,发射型计算机,单光子;铯;铊;镉;图像处理,计算机辅助  
基金项目:天津市滨海新区卫生健康委员会科技项目(2017BWKY025)

DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20201101-00398

## Primary study of motion correction effect on myocardial blood flow quantitative imaging with CZT SPECT

Pang Zekun, Wang Jiao, Chen Yue, Wang Xiaojie, Li Shuai, Li Jianming

Department of Nuclear Medicine, TEDA International Cardiovascular Hospital and Tianjin Medical University Clinical Cardiovascular Institute, Tianjin 300457, China

Corresponding author: Li Jianming, Email: ichlijm@163.com

**【Abstract】** **Objective** To investigate the effect of motion correction (MC) on the calculated values of myocardial blood flow (MBF) and myocardial flow reserve (MFR) based on cadmium-zinc-telluride SPECT (CZT SPECT) images. **Methods** Twenty-eight consecutive patients (10 males, 18 females, age: (60.75±11.62) years) with suspected or known coronary artery disease who underwent myocardial perfusion imaging (MPI) with dynamic CZT SPECT between June 2019 and August 2019 in TEDA International Cardiovascular Hospital were retrospectively analyzed. The MBF and MFR during rest imaging and stress imaging were quantitatively analyzed. Corridor 4DM software was used to calculate the stress MBF (sMBF) and MFR of the coronary artery branches and left ventricular (LV) before and after MC. The paired *t* test and Pearson correlation were used for data analysis. **Results** The sMBF and MFR of LV before MC were (0.82±0.49) ml·min<sup>-1</sup>·g<sup>-1</sup> and 1.69±0.68 respectively. After MC the two parameters increased to (1.05±0.64) ml·min<sup>-1</sup>·g<sup>-1</sup> and 2.12±0.77 respectively (*t* values: -4.87, -6.01, both *P*<0.001). The sMBF and MFR in left anterior descending (LAD), left circumflex (LCX), right coronary artery (RCA) and LV before MC were correlated with those after MC (*r* values: 0.69-0.96, all *P*<0.001). If MFR <2.0 was used as the reference of impaired MFR, data before MC showed 19 patients (67.9%, 19/28) had impaired MFR, while 13 patients (46.4%, 13/28) had impaired MFR based on MFR values after MC. **Conclusion** For MPI quantitative imaging with CZT SPECT, the calculated values of sMBF and MFR after MC is higher than those before MC, suggesting that MC is helpful to reduce the false positive results which may be caused by the "creep" effect of the heart.

**【Key words】** Myocardial perfusion imaging; Tomography, emission-computed, single-photon; Tellurium; Zine; Cadmium; Image processing, computer-assisted

**Fund program:** Tianjin Binhai Health Commission Science and Technology Project (2017BWKY025)

DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20201101-00398

SPECT 心肌灌注显像(myocardial perfusion imaging, MPI)是用于冠状动脉粥样硬化性心脏病(简称冠心病)诊断、危险度分层、预后和疗效评估的重要无创性影像方法。与传统半定量 MPI 相比,定量心肌血流(myocardial blood flow, MBF)和心肌血流储备(myocardial flow reserve, MFR)的诊断和预后价值更高<sup>[1-2]</sup>。PET MPI 被认为是 MBF 无创性测定的“金标准”,但因受限于设备普及率、药物来源等因素,该方法尚未在临床广泛应用。SPECT 的临床应用较 PET 广泛,占 MPI 的 95% 以上<sup>[3]</sup>。碲镉锌(cadmium-zinc-telluride, CZT)SPECT 的出现极大地提高了 SPECT 设备的探测灵敏度和时间分辨率,其测定 MBF 和 MFR 的可行性和准确性已在动物实验中得到证实<sup>[4]</sup>。MPI 药物(血管扩张剂)负荷过程中会引起膈肌呼吸水平的改变,继而使心脏位置发生移动,这一现象被称为心脏的“爬升”效应<sup>[5-6]</sup>。这种移动可能对 MBF 测定结果产生一定的影响,有必要在图像后处理过程中进行相关的校正。目前,移动校正(motion correction, MC)对 MBF 定量测定影响的研究有限。本研究拟探讨 MC 对 CZT SPECT MPI 测定 MBF 和 MFR 的影响。

## 资料与方法

1. 研究对象。回顾性收集 2019 年 6 月至 2019 年 8 月于泰达国际心血管病医院核医学科行 CZT SPECT MPI 定量显像的可疑或确诊冠心病连续性患者,排除标准:高度不稳定性心绞痛、Ⅱ度及以上房室传导阻滞、病态窦房结综合征、慢性阻塞性肺疾病、严重低血压[收缩压<90 mmHg(1 mmHg=0.133 kPa)]、严重二尖瓣或主动脉瓣疾病、心肌病(扩张型、肥厚性心肌病等)及动态显像阶段心脏与肝脏显像剂分界不清等影响下壁测量者。本研究符合《赫尔辛基宣言》的原则。

共纳入 28 例患者,其中男 10 例,女 18 例,年龄(60.75±11.62)岁,体质指数(body mass index, BMI)为(25.12±3.69) kg/m<sup>2</sup>。28 例中高血压 18 例,高脂血症 14 例,糖尿病史 9 例,吸烟史 7 例,冠心病家族史 14 例,无心肌梗死病史、支架治疗史、冠状动脉旁路移植术史患者。

2. 显像仪器和方法。设备为心脏专用 CZT SPECT 仪(Discovery NM530c, 美国 GE 公司)。显像剂为<sup>99m</sup>Tc-甲氧基异丁基异腈(methoxyisobutylisonitrile, MIBI), 钨液由北京森科医药有限公司或原子高科天津医药有限公司提供, MIBI 由江苏原子

研究所江原制药厂提供。采用“一日法”显像,先行静息显像,预注射显像剂 18.5~37.0 MBq(用于心脏定位),嘱患者上检查床前饮水 300~500 ml,启动动态采集 5~10 s 后注射显像剂 185~296 MBq,动态采集(表模式,10 min)结束后 60~90 min 行常规静息门控断层显像;间隔 1~4 h 后行 ATP 药物负荷显像,心脏预定位后开始药物负荷,负荷方法参见文献[7],在 ATP 负荷高峰(第 3 分钟)时注射 3 倍静息显像剂量的显像剂,表模式连续采集 10 min 后,间隔 45~60 min 行常规负荷门控断层显像。门控采集参数:8 帧/心动周期,心率窗宽±15%,能峰为 140 keV,窗宽±10%,静息和负荷门控显像分别采集 6 和 4 min。所有患者 SPECT 显像前均采集 CT 衰减校正数据,设备为 Discovery Elite PET/CT 仪(Discovery NM690, 美国 GE 公司),电压为 120 kV,电流为 20 mA,扫描范围为肺尖至肝脏中下部。

3. 图像后处理。由 2 位有经验的核医学科医师对采集的数据进行后处理。将所有动态表模式数据传输到美国 GE Xeleris 4DR 工作站,使用美国 INVIA Corridor 4DM 软件处理。首先将动态数据重分为系列动态图像:10 s/帧×10 帧+20 s/帧×5 帧+60 s/帧×2 帧+280 s/帧×1 帧;然后调用 CT 衰减校正数据进行完整的 CT 与 SPECT 图像融合对位、轴位调整、衰减和散射校正;自动或手动调整心血池曲线输入函数的 ROI 和心肌基底部位置,获得左心室(left ventricle, LV)心血池、心肌的动态曲线和拟合曲线,行负荷显像剂残留量校正、调用软件内置 Net 模型<sup>[8]</sup>自动计算 LV 及 3 支冠状动脉血管区域的静息 MBF(rest MBF, rMBF)、负荷 MBF(stress MBF, sMBF)和 MFR;再对负荷动态断层图像进行 MC,最终获得每个病例 MC 前后的 sMBF 及 MFR。

4. 统计学处理。采用 IBM SPSS 17.0 软件进行数据处理,符合正态分布的定量资料用  $\bar{x} \pm s$  表示。采用配对 *t* 检验和 Pearson 相关分析 MC 前后左前降支(left anterior descending, LAD)、左回旋支(left circumflex, LCX)、右冠状动脉(right coronary artery, RCA)及 LV 整体的 sMBF 和 MFR 差异和相关性。*P*<0.05 为差异或相关性具有统计学意义。

## 结 果

患者<sup>99m</sup>Tc<sup>m</sup>-MIBI SPECT MPI MC 处理图见图 1。MC 前后 LV 整体及 LAD、LCX、RCA 区域 sMBF 和 MFR 比较结果见表 1。MC 后 LV 整体的 sMBF 和 MFR 较 MC 前增加,差异有统计学意义(*t*值:-4.87、

-6.01, 均  $P < 0.001$ )。MC 前与 MC 后 LAD、LCX、RCA 和 LV 整体的 sMBF 的相关性良好( $r$  值: 0.84、0.91、0.96、0.94, 均  $P < 0.001$ ); 各区域 MC 前与 MC 后 MFR 也均有良好的相关性( $r$  值: 0.69、0.84、0.93、0.87, 均  $P < 0.001$ )。此外, 由于静息动态采集过程中无心脏位置移动影响因素, 无需调整左室壁心肌的 ROI, 故未进行 MC 处理, LV 整体的 rMBF 为

( $0.49 \pm 0.20$ )  $\text{ml} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

若以  $\text{MFR} < 2.0$  作为血流储备受损的参考标准<sup>[9]</sup>, 则 MC 前有 19 例(67.9%, 19/28)、MC 后有 13 例(46.4%, 13/28) 被判断为血流储备受损。MC 后 6 例(21.4%, 6/28) LV 整体 MFR 值增加到正常范围。对于 LV 局部区域 MFR 使用相同的参考标准, MC 后 LAD、LCX、RCA 的 MFR 分别有 7、7、4 例患者较

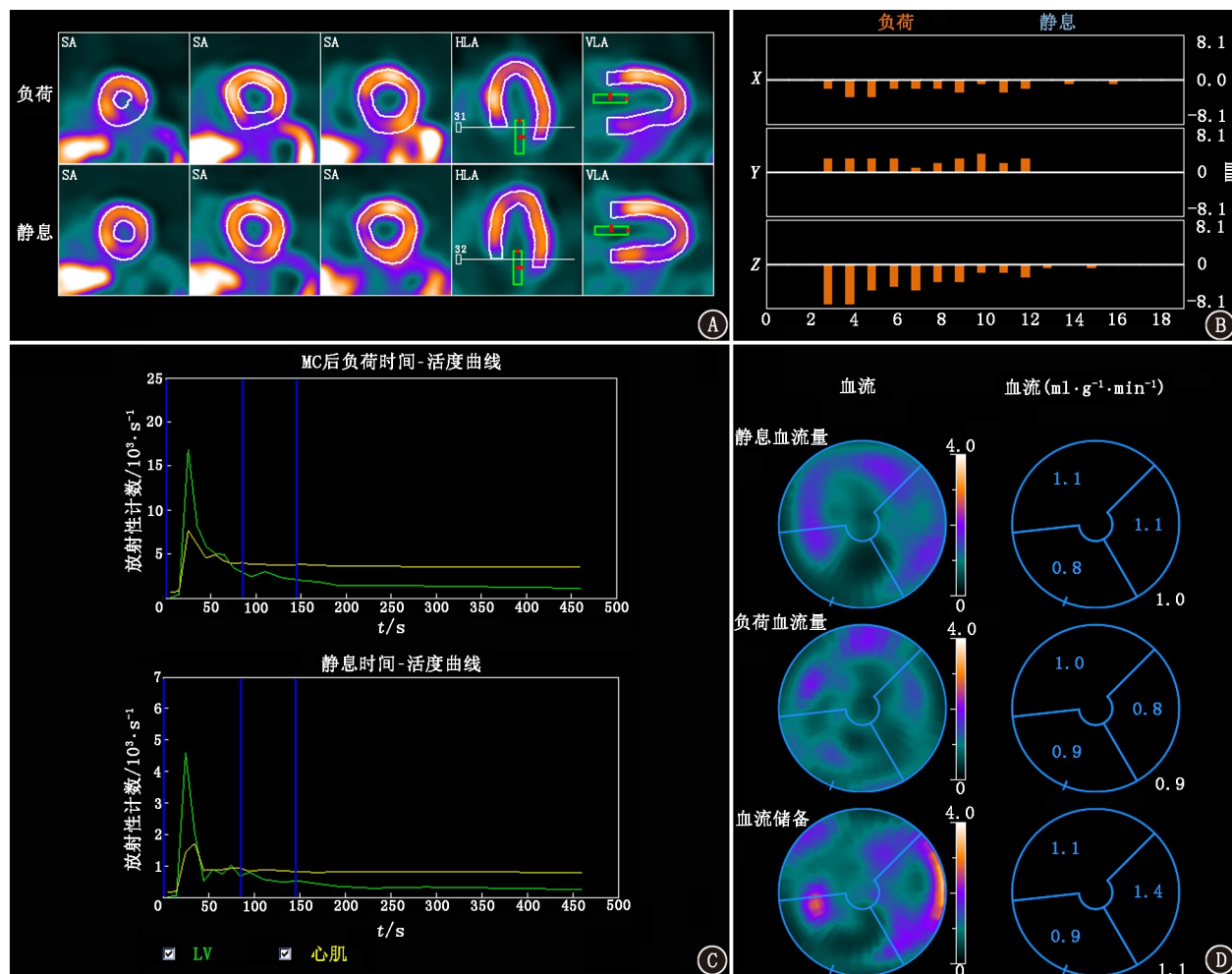


图 1 冠状动脉粥样硬化性心脏病患者(女, 68 岁)<sup>99</sup>Tc<sup>m</sup>-甲氧基异丁基异腓(MIBI) SPECT MPI 移动校正(MC)处理图。A. 左心室(LV)心肌、心血池 ROI 勾画(HLA 代表水平长轴, SA 代表短轴, VLA 代表垂直长轴); B. X、Y、Z 轴移动情况标注, 其中横坐标数值代表帧数; C. LV 心血池及心肌整体 ROI 的时间-活度曲线; D. 冠状动脉三分区 LV 靶心图及负荷心肌血流(sMBF)、静息心肌血流(rMBF)和心肌血流储备(MFR)测量值

表 1 28 例可疑或确诊冠心病患者<sup>99</sup>Tc<sup>m</sup>-MIBI SPECT MPI MC 前后 sMBF 和 MFR 比较( $\bar{x} \pm s$ )

| 组别    | sMBF( $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ) |           |           |           | MFR       |           |           |           |
|-------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|       | LV  | LAD       | LCX       | RCA       | LV        | LAD       | LCX       | RCA       |
| MC 前  | 0.82±0.49   | 0.74±0.44 | 0.92±0.46 | 1.15±0.69 | 1.69±0.68 | 1.43±0.64 | 1.69±0.68 | 2.11±0.91 |
| MC 后  | 1.05±0.64   | 1.04±0.61 | 1.22±0.70 | 1.16±0.67 | 2.12±0.77 | 2.01±0.91 | 2.19±1.04 | 2.14±0.88 |
| $t$ 值 | -4.87   | -4.68     | -4.59     | -0.35     | -6.01     | -4.68     | -4.47     | -0.58     |
| $P$ 值 | <0.001  | <0.001    | <0.001    | 0.733     | <0.001    | <0.001    | <0.001    | 0.568     |

注: 冠心病为冠状动脉粥样硬化性心脏病的简称, LAD 为左前降支, LCX 为左回旋支, LV 为左心室, MC 为移动校正, MFR 为心肌血流储备, MIBI 为甲氧基异丁基异腓, MPI 为心肌灌注显像, RCA 为右冠状动脉, sMBF 为负荷心肌血流



MC 前呈不同程度的增加。

## 讨 论

MFR 是心血管死亡率的有力预测因子,比 sMBF 预测能力更强,但其会受到负荷和静息血流值的影响。研究表明,基于 sMBF 和 MFR 的冠状动脉循环功能综合评估明显提高了诊断性能,并且能够诊断冠状动脉造影无法识别的微血管疾病<sup>[10-12]</sup>,而测定的指标数值正常与否与对疾病进展程度的认知以及后续的治疗密切相关。因此,对 MBF 和 MFR 的准确定量十分重要。传统观点认为,SPECT MPI 受软组织衰减会导致伪影,如女性致密和(或)较大乳腺,以及男性膈肌的衰减伪影,这些伪影会造成诊断假阳性,也是导致传统 SPECT MPI 诊断特异性欠佳的主要原因<sup>[13-14]</sup>,而衰减校正会改善诊断的特异性<sup>[15]</sup>。最近的研究表明,除软组织衰减伪影外,还有心脏“爬升”效应<sup>[5-6]</sup>产生的运动伪影,运动伪影可能会对药物负荷阶段动态采集测定的 sMBF 产生影响,进而影响 MFR 的数值。

Otaki 等<sup>[16]</sup>发现经过 MC 后,CZT SPECT 获得的 MBF、MFR 与 PET 结果相比一致性良好。与该研究方向不同,本研究重点评价和比较图像 MC 前后 sMBF 及 MFR 的差异及可能由此造成的诊断结果的差异。本研究结果示,虽然 MC 前与 MC 后各冠状动脉分支及 LV 整体的 sMBF 均具有良好的相关性,但在 MC 后,除 RCA 区域外的其他冠状动脉区域及 LV 整体的 sMBF 和 MFR 均增高(均  $P < 0.001$ )。

为了不引入额外的偏差,本研究 MC 处理在完成衰减和散射物理校正的基础上进行,并且在分析前对所有病例数据进行了严格的筛选,以保证采集数据的质量;在动态早期进行每帧图像的调整,以实现从血池到心肌的放射性溢出最小化,在中后期保证心肌实际显影位置与心肌 ROI 对齐,并实现最小化心肌不同部分之间与 ROI 之间的位置偏差,以使 ROI 计数准确。本研究发现,在校正过程中心脏移动的程度与给药时间有关。在 ATP 泵入早期,心脏的移动相对较明显,而随着药物的不断泵入及停止,心脏运动逐渐趋于稳定。

目前,MC 仅可校正每帧图像之间的运动,而帧内运动(例如呼吸和心脏收缩)会在每帧持续时间上被平均,并且由于运动模糊而导致部分容积损失。对后一种情况的 MC 可能会进一步改善图像质量,但仍有待研究<sup>[17]</sup>。von Felten 等<sup>[18]</sup>的研究发现,在使用腺苷负荷过程中,心脏“爬升”现象十分常见,

并且在相当大比例的患者中导致图像对位不齐而产生伪影,而在手动对位调整后可以明显减少灌注缺损。本研究中 RCA 区域 sMBF 和 MFR 在 MC 前后无明显差异,原因可能是负荷阶段心脏“爬升”现象使得下壁心肌真实影像部分偏离预先选定的心肌 ROI,由于 MIBI 的代谢特性,此时有部分血池和邻近下壁的心外组织放射性(主要是左半肝)进入下壁心肌 ROI,贡献了部分放射性计数;当进行 MC 时,ROI 向上移动,使包括下壁心肌在内的 LV 各壁心肌与 ROI 进行吻合,原 ROI 下壁处虽脱离了部分心血池及心外“本底”(左半肝)放射性的贡献,但同时部分下壁心肌回归 ROI 内,进行了放射性补偿,导致下壁 RCA 区域计数变化差异不大,最终 MC 前后的 sMBF 没有明显差异。

在以往文献报道中,MFR  $\geq 2.0$  被认为是正常标准,MFR 正常者的心脏事件发生率较低<sup>[10]</sup>。本研究以 MFR  $< 2.0$  作为血流储备受损的参考标准,发现 MC 后 LV 整体的 sMBF 和 MFR 较 MC 前增加,有 21.4% 的患者 LV 整体 MFR 值由异常恢复到正常范围,这一结果提示心脏“爬升”产生的伪影可能会造成对 MFR 数值的低估,表明 MC 会对定量诊断结果产生影响。原因可能是 MC 后 LV 血池向心肌溢出效应所产生的影响较前减弱,使心肌放射性总计数增加,从而使 sMBF 和 MFR 数值提高。此外,由于心脏“爬升”现象通常在负荷药物泵入早期相对明显,故对<sup>15</sup>O-H<sub>2</sub>O、<sup>82</sup>Rb 等 PET/CT 即时显像剂及 SPECT MFR 动态采集会产生影响,而对常规门控及非门控采集影响不大。

目前,CZT SPECT MBF 定量技术尚未形成统一的方法学标准,如何更加准确地测定真实的 MBF 是当前研究的“热点”。本研究对 MC 所产生的影响进行了初步探索,但仍存在一些局限性:(1) 研究样本量相对较小;(2) 受临床上技术可及性的限制,未能对心脏“爬升”进行三维定量测量及分析;(3) 未能同时分析呼吸运动的影响;(4) 未对不同程度冠状动脉狭窄的患者进行分类对比分析;(5) 纳入的冠心病种类尚不全。

本研究结果表明,在 CZT SPECT MPI 中应用 MC,对 sMBF 和 MFR 定量值会产生一定影响,可能会减少因心脏“爬升”效应导致的假阳性结果,对于是否有助于提高检测的准确性仍需进一步研究。

**利益冲突** 所有作者声明无利益冲突

**作者贡献声明** 庞泽望:研究实施、论文撰写;汪娇、陈越、王小杰、李帅:统计分析;李剑明:研究指导、论文修改、经费支持

## 参 考 文 献

- [1] Camici PG, Rimoldi OE. The clinical value of myocardial blood flow measurement[J]. *J Nucl Med*, 2009, 50(7): 1076-1087. DOI:10.2967/jnumed.108.054478.
- [2] Herzog BA, Husmann L, Valenta I, et al. Long-term prognostic value of <sup>13</sup>N-ammonia myocardial perfusion positron emission tomography added value of coronary flow reserve[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2009, 54(2): 150-156. DOI:10.1016/j.jacc.2009.02.069.
- [3] Levin DC, Parker L, Halpern EJ, et al. Recent trends in imaging for suspected coronary artery disease: what is the best approach? [J]. *J Am Coll Radiol*, 2016, 13(4): 381-386. DOI:10.1016/j.jacr.2015.11.015.
- [4] Wells RG, Timmins R, Klein R, et al. Dynamic SPECT measurement of absolute myocardial blood flow in a porcine model[J]. *J Nucl Med*, 2014, 55(10): 1685-1691. DOI: 10.2967/jnumed.114.139782.
- [5] Votaw JR, Packard R. Technical aspects of acquiring and measuring myocardial blood flow: method, technique, and QA[J]. *J Nucl Cardiol*, 2018, 25(2): 665-670. DOI: 10.1007/s12350-017-1049-y.
- [6] Koenders SS, van Dijk JD, Jager PL, et al. Impact of regadenoson-induced myocardial creep on dynamic Rubidium-82 PET myocardial blood flow quantification[J]. *J Nucl Cardiol*, 2019, 26(3): 719-728. DOI:10.1007/s12350-019-01649-4.
- [7] Yao Z, Zhu H, Li W, et al. Adenosine triphosphate stress myocardial perfusion imaging for risk stratification of patients aged 70 years and older with suspected coronary artery disease[J]. *J Nucl Cardiol*, 2017, 24(2): 429-433. DOI:10.1007/s12350-015-0355-5.
- [8] Leppo JA, Meerdink DJ. Comparison of the myocardial uptake of a technetium-labeled isonitrile analogue and thallium[J]. *Circ Res*, 1989, 65(3): 632-639. DOI:10.1161/01.res.65.3.632.
- [9] Johnson NP, Gould KL. Integrating noninvasive absolute flow, coronary flow reserve, and ischemic thresholds into a comprehensive map of physiological severity [J]. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2012, 5(4): 430-440. DOI:10.1016/j.jcmg.2011.12.014.
- [10] Gupta A, Taqueti VR, van de Hoef TP, et al. Integrated noninvasive physiological assessment of coronary circulatory function and impact on cardiovascular mortality in patients with stable coronary artery disease [J]. *Circulation*, 2017, 136(24): 2325-2336. DOI:10.1161/CIRCULATIONAHA.117.029992.
- [11] Cho SG, Lee SJ, Na MH, et al. Comparison of diagnostic accuracy of PET-derived myocardial blood flow parameters: a meta-analysis [J]. *J Nucl Cardiol*, 2020, 27(6): 1955-1966. DOI:10.1007/s12350-018-01476-z.
- [12] 覃春霞, 兰晓莉, 汪朝晖, 等. PET 心肌血流绝对定量对冠状动脉微血管疾病的诊断价值[J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2018, 38(7): 460-465. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2018.07.002.
- Qin CX, Lan XL, Wang ZH, et al. The value of PET quantitative analysis of coronary physiology in the coronary microvascular disease [J]. *Chin J Nucl Med Mol Imaging*, 2018, 38(7): 460-465. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2018.07.002.
- [13] Mannarino T, Assante R, Ricciardi C, et al. Head-to-head comparison of diagnostic accuracy of stress-only myocardial perfusion imaging with conventional and cadmium-zinc telluride single-photon emission computed tomography in women with suspected coronary artery disease[J]. *J Nucl Cardiol*, 2019, In press. DOI:10.1007/s12350-019-01789-7.
- [14] Oddstig J, Martinsson E, Jögi J, et al. Differences in attenuation pattern in myocardial SPECT between CZT and conventional gamma cameras[J]. *J Nucl Cardiol*, 2019, 26(6): 1984-1991. DOI:10.1007/s12350-018-1296-6.
- [15] Giubbini R, Bertoli M, Durmo R, et al. Comparison between <sup>13</sup>NH<sub>3</sub>-PET and <sup>99m</sup>Tc-Tetrofosmin-CZT SPECT in the evaluation of absolute myocardial blood flow and flow reserve[J]. *J Nucl Cardiol*, 2019. DOI:10.1007/s12350-019-01939-x.
- [16] Otaki Y, Manabe O, Miller R, et al. Quantification of myocardial blood flow by CZT-SPECT with motion correction and comparison with <sup>15</sup>O-water PET [J]. *J Nucl Cardiol*, 2021, 28(4): 1477-1486. DOI:10.1007/s12350-019-01854-1.
- [17] Wells RG, Marvin B. Measuring SPECT myocardial blood flow at the University of Ottawa Heart Institute[J]. *J Nucl Cardiol*, 2021, 28(4): 1298-1303. DOI:10.1007/s12350-020-02102-7.
- [18] von Felten E, Benetos G, Patriki D, et al. Myocardial creep-induced misalignment artifacts in PET/MR myocardial perfusion imaging[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2021, 48(2): 406-413. DOI:10.1007/s00259-020-04956-y.

(收稿日期:2020-11-01)