

·综述·

IQ·SPECT、碲锌镉探测器 SPECT 和传统 SPECT 在心肌灌注显像中的应用分析

靳潇潇 武志芳 胡光 卫华

030001 太原, 山西医科大学第一医院核医学科

通信作者: 卫华, Email: jennyhua1981@sina.com

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2017.02.013

【摘要】 IQ·SPECT 与碲锌镉(CZT)探测器 SPECT 是心肌灌注显像新技术, 与传统 SPECT 相比, 具有灵敏度和空间分辨率高、采集时间短、注射显像剂剂量少及辐射剂量低等优点。与传统 SPECT 不同(低能高分辨率平行孔准直器), IQ·SPECT 使用 SMART-ROOM 准直器及心脏为焦点的采集模式, 提高了灵敏度; CZT 探测器 SPECT 的探测器为半导体, 取代了传统 NaI 晶体探测器, 提高了能量分辨率、空间分辨率、灵敏度及信噪比等, 并可定量分析心肌血流储备。笔者主要对三者的成像原理、性能参数及临床应用进行综述。

【关键词】 体层摄影术, 发射型计算机, 单光子; 心肌灌注显像

IQ·SPECT, Cadmium-Zinc-Telluride SPECT, and conventional SPECT application in myocardial perfusion imaging Jin Xiaoxiao, Wu Zhifang, Hu Guang, 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】 Cadmium-Zinc-Telluride (CZT) SPECT and IQ·SPECT are new technologies used in myocardial perfusion imaging and are important in the development of nuclear cardiology. These technologies exhibit higher sensitivity and spatial resolution, shorter acquisition time, and lower injection and radiation doses than conventional SPECT. In contrast to the conventional SPECT system equipped with standard low-energy high-resolution collimators, IQ·SPECT adopts SMART-ROOM collimators and cardiac-centric acquisition to improve detection sensitivity. The detectors of CZT SPECT consist of semiconductor materials, instead of conventional sodium iodide(NaI) crystals, to improve energy resolution, spatial resolution, sensitivity, and signal-to-noise ratio. These detectors can also quantitatively analyze myocardial flow reserve. This paper reviews the imaging principle, performance parameters, and clinical application of three SPECT systems.

【Key words】 Tomography, emission-computed, single-photon; Myocardial perfusion imaging

目前, 心肌灌注显像(myocardial perfusion imaging, MPI)使用的 SPECT 主要有 3 种探头: 基于 Anger 型 γ 照相机的 SPECT 探头, 基于晶体和光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)基础上的数字化技术 SPECT 探头(常用), 基于半导体探测器成像技术的 SPECT 探头。常用的传统 SPECT 由平行孔准直器、晶体和 PMT 组成, 但随着影像技术的不断发展, 它已经不能满足我们对降低辐射剂量、提高图像质量和成像速度、以及定量分析的需求。IQ·SPECT 在传统 NaI 晶体探测器的基础上改进了准直器, 使用 SMART-ROOM 锥形孔准直器,

以心脏为焦点的采集模式, 主要提高了灵敏度^[1]; 碲锌镉(Cadmium Zinc Telluride, CZT)探测器 SPECT 则基于半导体探测器成像技术。目前市场上主要有两种 CZT 探测器: Spectrum Dynamics D-SPECT 与 GE 公司的 Health Discovery NM 系列(DNM)。CZT 半导体探测器与传统 NaI 晶体探测器相比, 有效地提高了空间分辨率、能量分辨率、灵敏度并可进行无创定量心肌血流分析^[2]。IQ·SPECT 与 CZT 探测器 SPECT 均可缩短采集时间、减少显像剂注射剂量、降低辐射剂量, 在心脏核医学技术应用上取得了新进展。

1 成像原理

传统 SPECT 探头由低能高分辨率平行孔准直器、NaI 晶体及 PMT 等组成, IQ·SPECT 探头由 SMART-ROOM 准直器(锥形孔)、NaI 晶体及 PMT 等组成。二者成像原理均为 NaI 晶体将探测到的 γ 射线转化为光信号,通过 PMT 将光信号转化为电信号并进行放大。CZT 探测器 SPECT 的优势是使用半导体固态探测器,在常温下直接将 γ 射线转化为电信号。 γ 射线投射到 CZT 晶体产生电子和空穴对, CZT 晶体表面是金属电极,电极在偏压作用下,在晶体内部产生电场,带负电的电子和带正电的空穴朝不同的电极运动,最终形成的电荷脉冲信号经过后续电子线路放大并处理进而成像^[3]。

2 性能参数

2.1 分辨率和灵敏度

传统 SPECT 能量分辨率、空间分辨率及灵敏度较低,主要受限于准直器孔数、孔径、孔长、孔间壁厚度、晶体厚度及 PMT 的数量。传统 SPECT 使用平行孔准直器,经准直器后绝大部分入射光子(>99.9%)发生衰减,使其灵敏度降低;准直器的几何特征与 PMT 的数量又限制了空间分辨率^[4]。一般薄晶体接受的能量偏低,厚晶体接受的能量偏高,厚度增加可提高探测灵敏度,但是同时增加了散射的概率,降低了空间分辨率。由于 NaI 晶体的物理特性和 PMT 的限制,其能量分辨率、空间分辨率及灵敏度低。

IQ·SPECT 有先进的探头、采集方式和重建方法。专用 SMART-ROOM 准直器为多焦准直器(锥形孔),视野中央为扇形,而边缘为平行孔,放大视野中心的心脏区域;采用心脏为中心的采集方式,心脏始终处于准直器的最敏感区域,可以在保证图像质量的情况下提高计数率,进而提高灵敏度^[1];采用有序子集最大期望值重建方法,相比滤波反投影法提高了图像质量,应用分辨率恢复,提高了空间分辨率并降低了噪声。

D-SPECT 为 CZT 探测器 SPECT,探头由钨准直器和 CZT 固态探测器组成,钨准直器与传统铅准直器相比,孔径面积大而孔长短,提高了图像固有的空间分辨率;CZT 半导体取代了 NaI 晶体及 PMT,提高了能量分辨率、探测效率、空间分

率、计数率等,且缩小了探头的体积。采用“区域为中心”的数据采集方式(探测器随着中心轴旋转,主要从预先选定的含心脏区域采集数据,最大化地从该区域获得计数,称为“区域为中心”的扫描方式)可智能探测到心脏,进行动态聚焦采集,进一步提高了探测效率及计数率^[2]。采用 Broadview™ 重建算法及分辨率恢复,同样提高图像质量、空间分辨率并降低了噪声。DNM 为另一种 CZT 探测器 SPECT,探头由多针孔准直器和 CZT 固态探测器组成。与 D-SPECT 固定角探头不同, DNM 双探头为可变角,但开始图像采集时,所有准直器同时对准心脏进行数据采集,探测器或准直器是不移动的。此外, DNM 可进行 CT 衰减校正。

Imbert 等^[5]对传统 SPECT、IQ·SPECT 和 D-SPECT 及 DNM 性能参数进行比较,结果:传统 SPECT 的计数率为 130 计数·s⁻¹·MBq⁻¹, IQ·SPECT 的计数率为 390 计数·s⁻¹·MBq⁻¹(提高了 2 倍), D-SPECT 的计数率为 850 计数·s⁻¹·MBq⁻¹(提高了 5.5 倍), DNM 为 460 计数·s⁻¹·MBq⁻¹(提高了 2.5 倍);传统 SPECT 空间分辨率为 15.3 mm, IQ·SPECT 为 15 mm, D-SPECT 为 8.6 mm, DNM 为 6.7 mm(提高了约 1 倍);传统 SPECT 信噪比为 3.5:1, IQ·SPECT 为 3.9:1, D-SPECT 为 4.1:1, DNM 为 4.6:1。D-SPECT、DNM 和 IQ·SPECT 的 3 个参数均优于传统 SPECT。Erlandsson 等^[2]的研究结果也表明 D-SPECT 的参数均优于传统 SPECT,其中能量分辨率和计数率显著提高。

2.2 采集速度

与传统 SPECT 相比, IQ·SPECT 明显提高了采集速度,缩短了采集时间。Caobelli 等^[6]研究发现,以心脏模型测得的结果为对照组,在保证诊断准确率的条件下, IQ·SPECT MPI 在注射剂量为 185 MBq 时,采集速度可缩短到 12 s/帧,采集时间约 6 min;注射剂量为 740 MBq 时,采集速度可缩短到 6 s/帧,采集时间约 3 min。另有研究表明, IQ·SPECT 采集时间可缩短到 4~5 min^[7]。而传统 SPECT 的采集时间通常需要 20 min 左右。

与传统 SPECT 相比, CZT 探测器 SPECT 同样缩短了采集时间^[8-10]。Sharir 等^[9]对 238 例患者行 D-SPECT 和传统 SPECT MPI 的研究,结果发现传统 SPECT 负荷、静息 MPI 采集时间分别为 20 min 和 15 min, D-SPECT 的负荷、静息 MPI 采集时间分别

为 4 min 和 2 min, 两种 SPECT 的负荷($r=0.95$)、静息($r=0.97$)结果呈高度相关性。D-SPECT 在保证诊断准确率的条件下, 可明显缩短扫描时间。另一项研究证明, DNM 在进行 ^{99m}Tc -替曲林腺苷负荷和(或)静息 MPI 时, 扫描时间同样可缩短到 4 min 和 2 min^[7]。

2.3 注射剂量和辐射剂量

IQ·SPECT 和 CZT 探测器 SPECT 减少了显像剂的注射剂量和辐射剂量。Lyon 等^[11]研究低剂量 IQ·SPECT MPI 的可行性, 比较 IQ·SPECT 与传统 SPECT 测定 ^{99m}Tc -甲氧基异丁基异腈负荷心肌血流灌注缺损有无差异及血流灌注缺损总积分(total perfusion deficit, TPD)的定量分析。传统 SPECT 采集时间为 13 min, 剂量为 925~1100 MBq(25~30 mCi), IQ·SPECT 分为 3 组, 采集时间均为 7 min, 剂量分别为 462.5~555 MBq(12.5~15 mCi)、231.3~277.5 MBq(6.25~7.5 mCi)、115.6~138.8 MBq(3.125~3.75 mCi), 在所有剂量段 IQ·SPECT 与传统 SPECT 测定的 TPD 均有很好的相关性($r \geq 0.93$), 当 IQ·SPECT 剂量减少到 462.5~555 MBq(12.5~15 mCi)时, 两种检查的 TPD 差异无统计学意义, 但当 IQ·SPECT MPI 为 231.3~277.5 MBq(6.25~7.5 mCi)、115.6~138.8 MBq(3.125~3.75 mCi)时, 二种检查测得的结果差异有统计学意义。

多个研究结果表明, CZT 探测器 SPECT 可减少注射剂量^[12-13]。Nakazato 等^[12]对 79 例患者(试验组)行 CZT 探测器 SPECT 负荷 ^{99m}Tc -MIBI MPI, 研究 CZT 探测器 SPECT MPI 的最低剂量, 对照组的负荷剂量为(803±200) MBq[(21.7±5.4)mCi], 采集时间为 14 min。以对照组的 TPD 及心功能为参考值, 当试验组的采集时间为 14 min 时, 平均注射剂量可减少至 92.5 MBq(2.5 mCi), 平均辐射剂量降低至 0.71 mSv; 当采集时间为 10 min 时, 平均注射剂量可减少至 125.8 MBq(3.4 mCi), 平均辐射剂量降低至 0.99 mSv。

2.4 图像质量

在 MPI 中, 常会因伪影、组织衰减、肥胖等因素影响图像质量而降低诊断的准确率。伪影可由示踪剂、患者、软件和硬件相关因素引起, 运动伪影是常见伪影。IQ·SPECT、CZT 探测器 SPECT 与传统 SPECT 比较, 明显缩短了采集时间, 减少了运动伪影。此外, IQ·SPECT 准直器与患者距离增

大, D-SPECT 在图像采集时可采用坐位、俯卧位、仰卧位等多种体位, 两者均可通过增加患者的舒适度来减少运动伪影。

组织衰减常见于乳腺和膈肌衰减, 衰减校正和改变患者位置可改善图像质量。Matsuo 等^[14]比较 40 名正常体检者的 IQ·SPECT 和传统 SPECT 的 ^{201}Tl MPI, IQ·SPECT 在短时间内可获得与传统 SPECT 相近的图像质量, 并可通过 CT 衰减对伪影进行校正。DNM 同样可进行 CT 衰减校正。另外, Allie 等^[15]证实 D-SPECT MPI 通过改变患者体位(仰卧位和半直立位)可解决乳腺和膈肌衰减伪影。

D-SPECT 还可提高肥胖患者的 MPI 图像质量, Elnstein 等^[13]研究分析 118 例肥胖患者(BMI=35~79.7 kg/m²)的 MPI, 其中 111 例患者行 ^{99m}Tc -MIBI 负荷+静息 MPI, 7 例患者行 $^{201}\text{Tl}/^{99m}\text{Tc}$ -MIBI 双核素负荷+静息 MPI, 与冠状动脉造影相比, D-SPECT 采用仰俯位联合直立位可获得较高的图像质量并提高冠心病的诊断准确性。

3 IQ·SPECT、CZT 探测器 SPECT 和传统 SPECT 在 MPI 中的应用

3.1 诊断冠心病

IQ·SPECT、CZT 探测器 SPECT 和传统 SPECT 均可用于诊断冠心病。以冠状动脉造影为“金标准”, IQ·SPECT 和传统 SPECT 在诊断冠心病时有很高的准确率。Pirich 等^[17]研究表明, 以冠状动脉造影和临床随访为诊断标准, 传统 SPECT 和 IQ·SPECT 负荷 MPI 经衰减校正后诊断准确率均为 97%, 静息 MPI 诊断准确率分别为 96%和 91%, 传统 SPECT 和 IQ·SPECT 的诊断准确率差异无统计学意义。但另一项研究比较均未经衰减校正的传统 SPECT MPI 与 IQ·SPECT MPI 发现, IQ·SPECT 组的心肌血流灌注指标负荷总积分、静息总积分、差值总积分显著高于传统 SPECT^[11]。另有文献报道, IQ·SPECT 在室壁基底部相比传统 SPECT 更容易造成组织衰减^[18]。因此, 组织衰减是二者结果有差异的原因之一。

CZT 探测器 SPECT 和传统 SPECT 在诊断冠心病时有较高的一致性与相关性。Oldan 等^[19]研究证实, CZT 探测器 SPECT(DNM)和传统 SPECT 对心肌缺血及心脏死亡事件有相似的预测价值。Sharir 等^[9]研究表明, D-SPECT 与传统 SPECT 在诊断负荷

心肌异常灌注时有较高的一致性, TPD 值一致性为83.6%; 两种方法的负荷 MPI 的 TPD 差异无统计学意义; 静息 MPI 的 TPD 差异有统计学意义, D-SPECT 探测到的可逆性心肌缺血范围更大。此外, D-SPECT 可通过改变体位提高诊断灵敏度、特异度与准确率。Nakazato 等^[20]将 142 例患者 D-SPECT 直立位、仰卧位和直立联合仰卧位的负荷 MPI 与冠状动脉造影结果进行比较, 结果显示, 直立位 D-SPECT 诊断冠心病的灵敏度为 91%、特异度为 59%; 仰卧位的灵敏度为 88%、特异度为 73%; 直立联合仰卧位的灵敏度为 94%、特异度为 86%。该研究结果表明, 直立位联合仰卧位 D-SPECT 具有更高的诊断准确率。

3.2 评价左心室功能

IQ·SPECT 和传统 SPECT 门控技术定量分析心肌功能时有所差异。Pirich 等^[17]比较 IQ·SPECT 和传统 SPECT MPI 评价心肌功能的准确率, 结果: 80 例可疑或确诊冠心病患者的 IQ·SPECT 测得的左室射血分数值低于传统 SPECT, 其中负荷 MPI 低于 8%, 静息 MPI 低于 9%。另外一项关于 IQ·SPECT 和传统 SPECT MPI 的研究得到同样的结果, 在负荷和静息 MPI 时, IQ·SPECT 的舒张末期容积、收缩末期容积均高于传统 SPECT, 而左室射血分数均低于传统 SPECT^[1]。其原因可能为 IQ·SPECT 经过散射校正后, 勾画的室壁较薄, 会使左室容积较大, 左室射血分数较低。

D-SPECT 和传统 SPECT 负荷 MPI 在评价心肌功能时有很好的相关性, 同时存在一定的差异。Sharir 等^[9]研究表明, D-SPECT 和传统 SPECT 负荷 MPI 在评价心肌功能时, 二者舒张末期容积相关性为 96%, 左室射血分数相关性为 89%。当两种方法的左室射血分数均大于 50%时, 两种方法在负荷 MPI 下测得的左室射血分数有较大差异, 但对临床治疗无影响。DNM 与传统 SPECT 评价心肌功能同样有较高的相关性, 二者静息、负荷 MPI 的左室射血分数相关性分别为 93%和 91%^[7]。

3.3 冠状动脉血流储备(coronary blood flow reserve, CFR)的应用

1993 年荷兰科学家 Nico pijls 提出了冠状动脉血流储备分数(fractional flow reserve, FFR)^[21]。FFR 通过测定狭窄冠状动脉压力反映血流量的变化, 是评价冠脉功能性狭窄的“金标准”。在 FFR 与冠状动

脉造影对多支血管病变评价比较研究中, FFR 指导稳定性冠心病患者行经皮冠状动脉介入术治疗效果优于冠状动脉造影^[22]。但是, FFR 为有创检查、辐射剂量大、费用昂贵且反映的是直径大于 400 μm 血管的血流情况。

CFR 是最大扩张时冠状动脉血流量与静息血流量的比值, 相比 FFR 有更大的优势。CFR 可衡量冠脉循环最大供血能力, 反映直径 400 μm 以内的微血管的血流情况。随着对冠脉微血管病变的认识, CFR 的价值也越来越受到临床的重视。SPECT MPI 通过定量分析心肌血流量(myocardial blood flow, MBF) 和 CFR 能更准确地评估冠心病, 提高心脏死亡事件的风险评估和预测能力^[23-24], 解决传统 MPI 易低估三支病变冠心病程度的问题。

CZT 探测器 SPECT 计数率高、能进行动态断层采集, 可定量分析 CFR。Bailing 等^[25]研究 CZT 探测器 SPECT 测量 MBF 和 CFR 的准确性, 对 12 名健康体检者和 16 例冠心病患者行 $^{99\text{Tc}}\text{m}$ -MIBI SPECT 和 ^{13}N - NH_3 PET MPI, 两种检查的所有结果高度相关(整体相关性: MBF 为 0.92, CFR 为 0.78; 局部相关性: MBF 为 0.88, CFR 为 0.71)。同时 Nkoulou 等^[26]评价 CZT SPECT 与 PET 的绝对 MBF 和 CFR 指数, 对 28 例患者行 $^{99\text{Tc}}\text{m}$ -替曲林腺苷负荷/静息 CZT 探测器 SPECT 与 ^{13}N - NH_3 PET MPI, 在静息 MPI 时, 两种检查测得的 MBF 差异无统计学意义, 但在负荷 MPI 时, CZT 探测器 SPECT 测得的 MBF 显著低于 PET, 因此, CZT 探测器 SPECT 相比 PET 会低估 MFR。根据工作者特征曲线, CZT 探测器 SPECT 在 MFR 低于 1.26 时, 诊断心肌血流储备减低的准确率为 75%。另有研究表明, 以 CZT 探测器 SPECT 结果为参考, 传统 SPECT 在探头快速旋转时测量 MBF、CFR 是可行的^[27], 但尚需进一步研究。

综上所述, IQ·SPECT 及 CZT 探测器 SPECT 在空间分辨率、能量分辨率、灵敏度等参数上较传统 SPECT 有了长足的进步, 减少了显像剂注射剂量、辐射剂量、缩短扫描时间等。CZT 探测器 SPECT 更可“一站式”评估心肌功能、MBF 及 CFR 等。但 CZT 探测器 SPECT 价格昂贵, 尚未在临床普及。

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 靳潇潇负责论文撰写; 卫华、武志芳负责校审; 胡

光负责 SPECT 技术指导; 卫华负责命题的提出及设计。

参 考 文 献

- [1] Havel M, Kolacek M, Kaminek M, et al. Myocardial perfusion imaging parameters:IQ-SPECT and conventional SPET system comparison[J]. *Hell J Nucl Med*, 2014, 17(3): 200–203.
- [2] Erlandsson K, Kacperski K, Van Gramberg D, et al. Performance evaluation of D-SPECT: a novel SPECT system for nuclear cardiology [J]. *Phys Med Biol*, 2009, 54(9): 2635–2649. DOI: 10.1088/0031-9155/54/9/003.
- [3] Khoshkhalagh M, Islamian JP, Abedi SM, et al. Development of Scintillators in Nuclear Medicine[J]. *World J Nucl Med*, 2015, 14(3): 156–159. DOI:10.4103/1450-1147.163241.
- [4] Sharir T, Slomka PJ, Berman DS. Solid-state SPECT technology:fast and furious[J]. *J Nucl Cardiol*, 2010, 17(5): 890–896. DOI: 10.1007/s12350-010-9284-5.
- [5] Imbert L, Poussier S, Franken PR, et al. Compared performance of high-sensitivity cameras dedicated to myocardial perfusion SPECT: a comprehensive analysis of phantom and human images[J]. *J Nucl Med*, 2012, 53(12): 1897–1903. DOI: 10.2967/jnumed.112.107417.
- [6] Caobelli F, Kaiser SR, Thackeray JT, et al. IQ SPECT allows a significant reduction in administered dose and acquisition time for myocardial perfusion imaging:evidence from a phantom study[J]. *J Nucl Med*, 2014, 55(12): 2064–2070. DOI: 10.2967/jnumed.114.143560.
- [7] Caobelli F, Pizzocaro C, Paghera B, et al. Evaluation of patients with coronary artery disease. IQ-SPECT protocol in myocardial perfusion imaging:Preliminary results[J]. *Nuklearmedizin*, 2013, 52(5): 178–185. DOI: 10.3413/Nukmed-0570-13-03.
- [8] Garcia EV, Faber TL, Esteves FP. Cardiac dedicated ultrafast SPECT cameras:new designs and clinical implications[J]. *J Nucl Med*, 2011, 52(2): 210–217. DOI: 10.2967/jnumed.110.081323.
- [9] Sharir T, Slomka PJ, Hayes SW, et al. Multicenter trial of high-speed versus conventional single-photon emission computed tomography imaging:quantitative results of myocardial perfusion and left ventricular function[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2010, 55(18): 1965–1974. DOI: 10.1016/j.jacc.2010.01.028.
- [10] Esteves FP, Raggi P, Folks RD, et al. Novel solid-state-detector dedicated cardiac camera for fast myocardial perfusion imaging: multicenter comparison with standard dual detector cameras[J]. *J Nucl Cardiol*, 2009, 16(6): 927–934.
- [11] Lyon MC, Foster C, Ding XH, et al. Dose reduction in half-time myocardial perfusion SPECT-CT with multifocal collimation[J]. *J Nucl Cardiol*, 2016, 23(4): 657–667. DOI: 10.1007/s12350-016-0471-x.
- [12] Nakazato R, Berman DS, Hayes SW, et al. Myocardial perfusion imaging with a solid-state camera:simulation of a very low dose imaging protocol[J]. *J Nucl Med*, 2013, 54(3): 373–379. DOI: 10.2967/jnumed.112.110601.
- [13] Einstein AJ, Blankstein R, Andrews H, et al. Comparison of image quality, myocardial perfusion, and left ventricular function between standard imaging and single-injection ultra-low-dose imaging using a high-efficiency SPECT camera:the MILLISIEVERT study[J]. *J Nucl Med*, 2014, 55(9): 1430–1437. DOI: 10.2967/jnumed.114.138222.
- [14] Matsuo S, Nakajima K, Onoguchi M, et al. Nuclear myocardial perfusion imaging using thallium-201 with a novel multifocal collimator SPECT/CT:IQ-SPECT versus conventional protocols in normal subjects[J]. *Ann Nucl Med*, 2015, 29(5): 452–459. DOI: 10.1007/s12149-015-0965-7.
- [15] Allie R, Hutton BF, Prvulovich E, et al. Pitfalls and artifacts using the D-SPECT dedicated cardiac camera[J]. *J Nucl Cardiol*, 2016, 23(2): 301–310. DOI: 10.1007/s12350-015-0277-2.
- [16] Nakazato R, Slomka PJ, Fish M, et al. Quantitative high-efficiency cadmium-zinc-telluride SPECT with dedicated parallel-hole collimation system in obese patients:results of a multi-center study[J]. *J Nucl Cardiol*, 2015, 22(2): 266–275. DOI: 10.1007/s12350-014-9984-3.
- [17] Pirich C, Keinrath P, Barth G, et al. Diagnostic accuracy and functional parameters of myocardial perfusion scintigraphy using accelerated cardiac acquisition with IQ-SPECT technique in comparison to conventional imaging[J]. *Q J Nucl Med Mol Imaging*, 2017, 61(1): 102–107. DOI: 10.23736/S1824-4785.16.02703-5.
- [18] Gremillet E, Agostini D. How to use cardiac IQ-SPECT routinely an overview of tips and tricks from practical experience to the literature[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2016, 43(4): 707–710. DOI: 10.1007/s00259-015-3269-1.
- [19] Oldan JD, Shaw LK, Hofmann P. et al. Prognostic value of the cadmium-zinc-telluride camera:A comparison with a conventional (Anger) camera[J]. *J Nucl Cardiol*, 2016, 23: 1280–1287. DOI:10.1007/s12350-015-0181-9.
- [20] Nakazato R, Tamarappoo BK, Kang X, et al. Quantitative upright-supine high-speed SPECT myocardial perfusion imaging for detection of coronary artery disease: correlation with invasive coronary angiography[J]. *J Nucl Med*, 2010, 51(11): 1724–1731. DOI: 10.2967/jnumed.110.078782.
- [21] Pijls NH, van Son JA, Kirkeeide RL, et al. Experimental basis of determining maximum coronary, myocardial, and collateral blood flow by pressure measurements for assessing functional stenosis severity before and after percutaneous transluminal coronary angioplasty[J]. *Circulation*, 1993, 87(4): 1354–1367.
- [22] Tonino PA, De Bruyne B, Pijls NH, et al. Fractional flow reserve versus angiography for guiding percutaneous coronary intervention [J]. *N Engl J Med*, 2009, 360(3): 213–224. DOI: 10.1056/NEJMoa0807611.
- [23] Murthy VL, Naya M, Foster CR, et al. Improved cardiac risk assessment with noninvasive measures of coronary flow reserve [J]. *Circulation*, 2011, 124(20): 2215–2224. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.111.050427.
- [24] Naya M, Murthy VL, Taqueti VR, et al. Preserved coronary flow

- reserve effectively excludes high-risk coronary artery disease on angiography[J]. J Nucl Med, 2014, 55(2): 248–255. DOI: 10.2967/jnumed.113.121442.
- [25] 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.
- [26] 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 ^{99m}Tc-Tetrofosmin: Head-to-Head comparison with ¹³N-Ammonia PET[J]. J Nucl Med, 2016, 57(12): 1887–1892. DOI: 10.2967/jnumed.115.165498.
- [27] Klein R, Hung GU, Wu TC, et al. Feasibility and operator variability of myocardial blood flow and reserve measurements with ^{99m}Tc-sestamibi quantitative dynamic SPECT/CT imaging[J]. J Nucl Cardiol, 2014, 21(6): 1075–1088. DOI: 10.1007/s12350-014-9971-8.
- (收稿日期: 2016-12-19)

(上接第 142 页)

- Extensive extra-osseous accumulation of ^{99m}Tc-hydroxymethylene diphosphonate in a patient with unsuspected dermatomyositis: Whole-body scintigraphy and SPECT/CT[J]. Rev Esp Med Nucl Imagen Mol, 2014, 33(4): 255–256. DOI: 10.1016/j.rem.2013.10.004.
- [36] Mochizuki T, Tauxe WN, Perper JA. Technetium-99m MDP scintigraphy of rhabdomyolysis induced by exertional heat stroke: a case report[J]. Ann Nucl Med, 1990, 4(3): 111–113.
- [37] Groell R, Aigner R. Extraosseous uptake of Tc-99m methylene diphosphonate in the pectoralis muscles 8 days after exercise[J]. Clin Nucl Med, 2000, 25(1): 65–66.
- [38] Mackie GC, Avram AM, Park LS, et al. The saddle sign: bilateral thigh adductor compartment uptake of Tc-99m MDP[J]. Clin Nucl Med, 2004, 29(8): 516. DOI: 10.1097/01.rlu.0000132955.22968.92.
- [39] Kulkarni M, Agrawal A, Zade A, et al. Extraosseous accumulation of bone scan tracer ^{99m}Tc-methylene diphosphonate in a phlebolith [J]. Indian J Nucl Med, 2012, 27(1): 42–44. DOI: 10.4103/0972-3919.108857.
- [40] Silberstein EB, Delong S. Femoral artery calcification. Detection by bone scintigraphy[J]. Clin Nucl Med, 1985, 10(10): 738–739.
- [41] Thomas BG, Silverman ED. Focal uptake of Tc-99m MDP in a gossypiboma[J]. Clin Nucl Med, 2008, 33(4): 290–291. DOI: 10.1097/RLU.0b013e3181662b41.
- (收稿日期: 2016-11-19)