

# 不同准直器的SPECT设备在心肌成像中的应用及进展

王国玉<sup>1</sup>,王雪梅<sup>2</sup>

(1.内蒙古医科大学,内蒙古 呼和浩特 010059;

2.内蒙古医科大学附属医院核医学科,内蒙古自治区分子成像重点实验室,)

**摘要:** SPECT是核医学显像中的一种重要成像仪器。常规的平行孔准直器-SPECT设备通过旋转双探头以实现断层成像功能,由于其灵敏度低、空间分辨率低以及采集时间长,致使图像质量大幅度降低。近年来,IQ-SPECT以及采用固态碲-锌-镉(CZT)晶体作为探测器的新型心脏专用SPECT已应用于临床,其灵敏度、特异性和准确性均优于平行孔准直器-SPECT,但CZT-SPECT成本太高。新型多针孔准直器(MPH)不仅可以搭载在普通SPECT机上,还能够在达到心脏专用CZT-SPECT性能的同时明显降低成本。本文将对不同准直器的SPECT设备在心肌成像中的应用及进展进行综述。

**关键词:** 单光子发射计算机断层扫描(SPECT);多针孔;准直器;心脏

中图分类号: R445.2

文献标识码: A

文章编号: 2095-512X(2021)05-0547-04

## APPLICATION AND PROGRESS OF SPECT EQUIPMENT WITH DIFFERENT COLLIMATORS IN MYOCARDIAL IMAGING

WANG Guo-yu, WANG Xue-mei

(Inner Mongolia Medical University, Huhhot 010059 China)

**Abstract:** SPECT is an important imaging instrument in nuclear medicine imaging. The conventional parallel-hole collimator-SPECT device realizes tomographic imaging function by rotating dual probes. Due to its low sensitivity, low spatial resolution and long acquisition time, the image quality is greatly reduced. In recent years, IQ-SPECT and a new type of cardiac-specific SPECT using solid-state tellurium-zinc-cadmium (CZT) crystals as detectors have been used in clinical practice, and its sensitivity, specificity and accuracy are better than parallel hole collimator-SPECT. But the cost of CZT-SPECT is too high. The new multi-pinhole collimator (MPH) can not only be mounted on an ordinary SPECT machine, but also can achieve the performance of the heart-specific CZT-SPECT while significantly reducing costs. This article will review the application and progress of SPECT equipment with different collimators in myocardial imaging.

**Key words:** single photon emission computed tomography (SPECT); multiple pinholes; collimator; heart

目前,单光子发射型计算机断层扫描(single-photon emission computed tomography, SPECT)是临床上用于心肌成像的重要仪器<sup>[1]</sup>,能够评估心脏血流灌注情况和左心室的功能,在冠心病的早期诊断、危险程度分级、临床治疗方案的选择和判断预后等方面发挥着关键的作用<sup>[2]</sup>。SPECT是基于对分布在患者体内的放射性示踪剂发出的 $\gamma$ 射线进行检测而

实现成像的。在这一过程中,通过使用准直器来确定 $\gamma$ 光子在探测器上的入射角是至关重要的<sup>[3]</sup>。准直器是SPECT成像系统的核心部件,SPECT机的性能主要是由准直器的性能来决定的,其设计的重点主要是在于对准直器的设计,这就需要考虑分辨率、灵敏度和成像视野大小等多方面的影响<sup>[4]</sup>,例如孔的大小、材料、整体几何形状等,决定了SPECT系

收稿日期: 2021-07-04; 修回日期: 2021-08-31

基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项课题(2017NMGKJZDZX)

作者简介: 王国玉(1995-),女,内蒙古医科大学2019级在读硕士研究生。

通讯作者: 王雪梅,主任医师,博士研究生,E-mail: wangxuemei201010@163.com 内蒙古医科大学附属医院核医学科,010050

统的空间分辨率和灵敏度。临床上越来越需要高性能的心脏成像专用诊断系统,导致了SPECT系统的开发<sup>[5-7]</sup>。目前,在临床上应用最广泛的是平行孔准直器,新型心脏专用的基于碲-锌-镉(cadmium-zinc-telluride, CZT)晶体的探测器也逐渐应用于临床,然而由于CZT-SPECT系统的成本太高,不利于在临床上普及,所以现在针对多针孔准直器(multi-pinhole, MPH)的研究也越来越多。接下来将对上述所提到的几种准直器来展开论述。

## 1 平行孔准直器-SPECT

在临床上,用于SPECT显像中的最常见的一款准直器就是平行孔准直器。它起初是在1964年由Anger所提出来的<sup>[8]</sup>,通过对单光子放射性核素的分布来进行平面显像。平行孔准直器所成图像具有与物体等大、同向的特点。不同参数的平行孔准直器往往具有不同的分辨率和灵敏度组合。临床上的平行孔准直器一般根据所适应的 $\gamma$ 光子能量和性能划分为低能高灵敏度、低能高分辨率、低能通用型、中能通用型以及长孔平行束等多种类型的准直器等<sup>[9]</sup>,其中低能高分辨率准直器在临床上多用于心肌显像。

传统的平行孔准直器-SPECT在采集的过程中通过旋转双探头以达到断层成像。在采集的过程中,为了避免采集到的计数过低、重建图像的量子噪声过大,保持一定的分辨率,临床上采用延长采集时间的方法来增加图像的采集计数,约从十几分钟到几十分钟。由于采集时间太长致使受检者在整个采集过程中因为身体移动、呼吸、内脏运动等因素导致心脏发生移动,使得重建出来的图像中出现移动伪影,从而大幅度降低重建图像的质量<sup>[9]</sup>。

## 2 IQ-SPECT

IQ-SPECT心肌成像技术是2010年后新开发的技术,应用心脏专用的汇聚型准直器即SMART-ZOOM准直器,使得在采集的过程中做到以心脏为中心。IQ-SPECT心肌成像的采集时间为6 min,而平行孔准直器-SPECT心肌成像则需要22 min,可见IQ-SPECT明显缩短了采集时间,从而提高了采集效率<sup>[10,11]</sup>。IQ-SPECT心肌成像对冠心病诊断的灵敏度和准确率均高于平行孔准直器-SPECT心肌成像,研究结果显示二者对冠心病的诊断价值具有较

好的一致性<sup>[2]</sup>。研究表明,与传统的平行孔准直器-SPECT相比,IQ-SPECT在室壁基底部更容易造成组织衰减<sup>[12]</sup>。同时,IQ-SPECT高度依赖于探测器的校准,需要严格的验收测试,以确保足够的性能。与未校正的平行孔准直器-SPECT图像相比,非校正IQ-SPECT图像的伪影位置和严重性存在显著差异<sup>[13]</sup>。

## 3 基于碲-锌-镉晶体的SPECT

近年来,新型心脏专用半导体晶体SPECT技术也得到了发展<sup>[14]</sup>。该设备采用固态碲-锌-镉(CZT)晶体作为探测器,与传统的平行孔准直器-SPECT相比, $\gamma$ 光子的探测灵敏度明显提高,在相同注射剂量下所采集得到的心肌放射性计数、空间分辨率以及能量分辨率依次分别是平行孔准直器-SPECT的5倍、2倍以及1.65倍<sup>[15]</sup>,可得到较传统平行孔准直器-SPECT更高的图像质量。在实际临床应用中,在保持诊断准确性的前提下,由于CZT-SPECT无需旋转探测器即可实现快速动态扫描,显著提高了时间分辨率,为心肌血流量的定量测量提供了方便,提高工作效率<sup>[16,17]</sup>,同时还减少显像药物的单次使用剂量,从而降低了患者的辐射剂量<sup>[18,19]</sup>。CZT-SPECT心肌灌注显像诊断冠状动脉疾病所需要的放射性核素用量更低,与传统的平行孔准直器-SPECT相比较可以显示出更多的缺损节段,且诊断结果明显优于后者<sup>[11,20]</sup>。以冠状动脉造影中显示狭窄>50%冠状动脉为标准,利用2种SPECT来进行心肌灌注显像,研究结果表明<sup>[21]</sup>,CZT-SPECT的灵敏度、特异性和准确性均优于传统平行孔准直器-SPECT,在评价心功能、双核素显像、心肌血流量及神经受体显像等方面都有良好的应用前景。

无论与传统平行孔准直器-SPECT相比较,还是以冠状动脉造影为标准来进行验证,利用心脏专用CZT-SPECT机进行采集时尽管可以有效提高患者的舒适度、降低剂量以及减少伪影,获得高质量的重建图像<sup>[22,23]</sup>,但是仍有一些不足之处会影响其在临床中的应用。首先,商业化的心脏专用SPECT系统通过使用昂贵的探测器(CZT),虽然大大提高了灵敏度,具备了动态SPECT的能力,但价格昂贵,难以在临床上普及。其次,当被检者为心脏明显扩大或者是病态肥胖时,由于CZT-SPECT的采集视野小,使得心脏很有可能会超出视野,导致出现削切伪影<sup>[24]</sup>。最后,CZT-SPECT容易受心脏以外浓聚的显像剂干扰而且有些机型尚无CT衰减校正。由于

射线衰减,使得容易被其他脏器所遮挡的左心室下壁及下侧壁出现缺损假象,因此CZT-SPECT系统依然需要进行CT衰减校正<sup>[25]</sup>。

#### 4 多针孔准直器-SPECT

针孔准直器的基本成像原理是小孔成像。心脏专用多针孔准直器是多针孔准直器-SPECT(MPH-SPECT)成像系统的核心部件。为了能够最大化的利用准直器的视野,需要通过多个针孔来对心脏投影,同时选择适当的针孔放大倍数和孔径,既可以保证不降低空间分辨率又可以提高灵敏度,从而提高探测效率,有效缩短成像时间,减少重建伪影和注射剂量。

Funk 等人提出了一种用于心肌灌注显像的 MPH-SPECT 系统,他们在标准  $\gamma$  相机(飞利浦 Argus)上安装了一个9针孔准直器,并将9个同时投射的心肌投影到探测器的 50 cm  $\times$  38 cm 的活动区。与使用平行孔准直器的传统旋转 SPECT 系统相比,该系统可以在保持相同图像质量的情况下将灵敏度提高5倍。Si 等人为临床 SPECT 扫描仪设计了一种14针孔心脏准直器,目标分辨率为1 cm,视野为20 cm,采用H型旋转采集法,最大限度地提高了灵敏度。

一款新型的国产24针孔准直器<sup>[9]</sup>,安装在可变角双探头 SPECT 上,不需要旋转双探头就可以进行断层显像。研究表明,MPH-SPECT 的灵敏度和空间分辨率均明显优于常规平行孔准直器-SPECT,且显著缩短了采集时间,从而减少了受检者注射显像剂的剂量,改善了患者的舒适度,能够更加清楚地显示缺血心肌的部位,显著地提高诊断的准确性,从而减少误诊的发生。MPH-SPECT 成像系统对于心肌血流灌注模型上冷区的分辨率以及对志愿者静息心肌灌注重建图像质量与 CZT-SPECT 相当<sup>[9]</sup>,但在达到心脏专用 CZT-SPECT 性能的同时可以降低成本,除此之外 MPH 还可以搭载在普通的 SPECT 机上而无需使用心脏专用的 SPECT 机,在临床应用上可作为后者的低成本替代品,有助于心肌灌注显像在临床上的普及。但目前 MPH-SPECT 尚处于研究阶段,期待早日应用于临床。

#### 5 总结

SPECT 是评估心肌灌注的成像仪器。为了便于早期诊断和治疗,高分辨率心脏 SPECT 扫描仪的

发展势在必行。这种日益增长的需求导致了市场上越来越多的开发心脏专用 SPECT 扫描仪。MPH 的使用在改善当前 SPECT 性能方面发挥了重要作用,并且在未来新 SPECT 成像系统的开发方面仍将是研究人员以及商业上感兴趣的课题。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

- [1]Shrestha U, Sciammarella M, Alhassen F, et al. Measurement of absolute myocardial blood flow in humans using dynamic cardiac SPECT and Tc-99m-tetrofosmin: Method and validation[J]. J Nucl Cardiol, 2017;24(1):268-277
- [2]周翠红,王猛,金超岭,等.IQ-SPECT 和 LEHR-SPECT 心肌灌注显像对冠心病诊断价值的对比研究[J]. 中国医学装备, 2018;15(06):18-21
- [3]Ozsahin I, Chen L, KÖnik A, et al. The clinical utilities of multi-pinhole single photon emission computed tomography[J]. Quant Imaging Med Surg, 2020;10(10):2006-2029
- [4]李延召.多分辨率多灵敏度单光子发射计算机断层成像平行孔准直器研究[D].湖北:华中科技大学,2016
- [5]Beekman F, Have FVD. The pinhole: gateway to ultra-high-resolution three-dimensional radionuclide imaging[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2007;34(2):151-161
- [6]Furenlid LR, Wilson DW, Chen YC, et al. FastSPECT II: a second-generation high-resolution dynamic SPECT imager[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2004;51(3):631-635
- [7]King MA, Mukherjee JM, Konik A, et al. Design of a multi-pinhole collimator for I-123 DaT scan imaging on dual-headed SPECT systems in combination with a fan-beam collimator. IEEE T rans Nucl Sci, 2016;63(1):90-97
- [8]Anger H O. Scintillation camera with multichannel collimators. Journal of Nuclear Medicine, 1964;5(7): 515-531
- [9]王海鹏,郭峰,王新强,等.心脏专用多针孔 SPECT 的性能评估[J]. 中国医学装备,2018;15(06):15-18
- [10]Laetitia I, Sylvain P, Philippe R, 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
- [11]袁婷婷,王荣福.核素心肌显像技术的研究进展[J]. 中国医学装备,2017;14(4):17-20
- [12]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
- [13]Ivanovic M, Beavers G, Klein J L, et al. Cardiac IQ-SPECT and LEHR-SPECT characteristics and differences[J]. J Nucl Med, 2013,54
- [14]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(05): 269–273
- [15] 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
- [16] Herzog BA, Buechel RR, Katz R, et al. Nuclear myocardial perfusion imaging with a cadmium–zinc–telluride detector technique: optimized protocol for scan time reduction[J]. *J Nucl Med*, 2010; 51(1): 46–51
- [17] van Dijk JD, Jager PL, Ottervanger JP, et al. Minimizing patient-specific tracer dose in myocardial perfusion imaging using CZT SPECT[J]. *J Nucl Med Technol*, 2015; 43(1): 36–40
- [18] Oddstig J, Hedeer F, Jögi J, et al. Reduced administered activity, reduced acquisition time, and preserved image quality for the new CZT camera[J]. *J Nucl Cardiol*, 2013; 20(1): 38–44
- [19] 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
- [20] Gimelli A, Bottai M, Giorgetti A, et al. Comparison between ultrafast and standard single-photon emission CT in patients with coronary artery disease: a pilot study[J]. *Circ Cardiovasc Imaging*, 2011; 4(1): 51–58
- [21] Neill J, Prvulovich EM, Fish MB, et al. Initial multicentre experience of high-speed myocardial perfusion imaging: comparison between high-speed and conventional single-photon emission computed tomography with angiographic validation[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2013; 40(7): 1084–1094
- [22] 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
- [23] Ben–Haim S, Almukhailed O, Neill J, et al. Clinical value of supine and upright myocardial perfusion imaging in obese patients using the D–SPECT camera[J]. *J Nucl Cardiol*, 2014; 21(3): 478–485
- [24] Fiechter M, Gebhard C, Fuchs TA, et al. Cadmium–zinc–telluride myocardial perfusion imaging in obese patients[J]. *J Nucl Med*, 2012; 53(9): 1401–1406
- [25] Takahashi Y, Miyagawa M, Nishiyama Y, et al. Performance of a semiconductor SPECT system: comparison with a conventional angler-type SPECT instrument[J]. *Ann Nucl Med*, 2013; 27(1): 11–16

-----  
(上接第 548 页)

- [13] YAZDI A, GUARDA G, RITEAU N, et al. Nanoparticles activate the NLR pyrin domain containing 3 (Nlrp3) inflammasome and cause pulmonary inflammation through release of IL-1 $\alpha$  and IL-1 $\beta$ [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010; 107(45): 19449–19454
- [14] ABDEL-WAHAB M, EL-NEKEETY A, MOHAMMED H, et al. Elimination of oxidative stress and genotoxicity of biosynthesized titanium dioxide nanoparticles in rats via supplementation with whey protein-coated thyme essential oil[J]. *Environmental science and pollution research international*, 2021
- [15] CHEN J, DONG X, ZHAO J, et al. In vivo acute toxicity of titanium dioxide nanoparticles to mice after intraperitoneal injection[J]. *Journal of applied toxicology : JAT*, 2009; 29(4): 330–337
- [16] SMALLCOMBE C, HARFORD T, LINFIELD D, et al. Titanium dioxide nanoparticles exaggerate respiratory syncytial virus-induced airway epithelial barrier dysfunction[J]. *American journal of physiology Lung cellular and molecular physiology*, 2020; 319(3): L481–L496
- [17] WANG J, CHEN C, LIU Y, et al. Potential neurological lesion after nasal instillation of TiO<sub>2</sub> nanoparticles in the anatase and rutile crystal phases[J]. *Toxicology letters*, 2008, 183: 72–80
- [18] 韩硕, 陈章健, 周迪. 纳米二氧化钛经口暴露 90 天对大鼠粪便代谢组的影响[J]. *北京大学学报(医学版)*, 2020; 52(03): 457–463
- [19] BRUN E, BARREAU F, VERONESI G, et al. Titanium dioxide nanoparticle impact and translocation through ex vivo, in vivo and in vitro gut epithelia[J]. *Particle and fibre toxicology*, 2014, 11: 13
- [20] KERAMATI KHIARAK B, KARIMIPOUR M, AHMADI A, et al. in vitro Effects of oral administration of titanium dioxide particles on sperm parameters and fertilization potential in mice: A comparison between nano- and fine-sized particles[J]. *Veterinary research forum : an international quarterly journal*, 2020; 11(4): 401–408
- [21] 韩瑜, 尹龙玲, 刘睿, 等. 两种纳米材料在小鼠体内分布及毒性作用[J]. *中国公共卫生*, 2009, 25: 835–836
- [22] HUSSEIN M, GAD E, AHMED M M, et al. Amelioration of titanium dioxide nanoparticle reprotoxicity by the antioxidants morin and rutin[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019
- [23] MOJTABA KARIMIPOUR M Z J, ABBAS AHMADI, ABBAS JAFARI. Oral administration of titanium dioxide nanoparticle through ovarian tissue alterations impairs mice embryonic development[J]. *International Journal of Reproductive Biomedicine*, 2018, 16: 397–404
- [24] QAA B, BYA B, MAMM A, et al. Biochar-mediated transformation of titanium dioxide nanoparticles concerning TiO<sub>2</sub>NPs–biochar interactions, plant traits and tissue accumulation to cell translocation – ScienceDirect[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 270
- [25] KOSE O, TOMATIS M, TURCI F, et al. Short Preirradiation of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles Increases Cytotoxicity on Human Lung Coculture System[J]. *Chemical Research in Toxicology*, 2021