

SPECT稳定性检测的实践探索

郑晓斌, 关邵翔, 逯召凯, 张伟光, 周超
中山大学肿瘤防治中心核医学科, 广东 广州 510060

【摘要】目的:探讨单光子发射计算机断层成像设备(SPECT)稳定性检测的实施策略。**方法:**综合参考《伽玛照相机、单光子发射断层成像设备质量控制检测规范》(WS 523-2019)、设备用户手册及配套附件,选取适宜的方法对Siemens Symbia Intevo 16双探头SPECT/CT的固有均匀性、固有空间分辨力、固有空间线性、固有最大计数率和系统平面灵敏度进行检测。**结果:**固有均匀性通过设备自带的质控程序检测,两探头有效视野、中心视野的积分均匀性分别为1.79%、1.26%和1.89%、1.36%,微分均匀性分别为1.27%、0.79%和1.52%、1.18%;固有空间分辨力和固有空间线性选择四象限铅栅法检测,两探头的分辨力均为4.375 mm且线性无畸变;固有最大计数率依据WS 523-2019方法检测,两探头分别为 $386 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 、 $394 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$;系统平面灵敏度采用简易模体结合WS 523-2019方法检测,两探头分别为 $98.58 \text{ s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ 、 $96.41 \text{ s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ 。所有项目的检测结果均符合WS 523-2019标准要求。**结论:**定期执行SPECT稳定性检测能够保障临床图像质量,但部分项目需依赖特定模体才能完成,设备使用单位应根据实际情况,选择由自身或委托有检测能力的机构进行。

【关键词】单光子发射计算机断层成像设备;质量控制;稳定性检测

【中图分类号】R318.6;R817

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2025)12-1632-07

Practical exploration of SPECT equipment stability testing

ZHENG Xiaobin, GUAN Shaoxiang, LU Zhaokai, ZHANG Weiguang, ZHOU Chao

Department of Nuclear Medicine, Sun Yat-sen University Cancer Center, Guangzhou 510060, China

Abstract: Objective To explore the implementation strategies for stability testing of single photon emission computed tomography (SPECT) equipment. **Methods** With comprehensive reference to the "Specification for testing of quality control in gamma cameras and single photon emission computed tomograph" (WS 523-2019), equipment user manual, and supporting accessories, appropriate methods were adopted to test the intrinsic uniformity, intrinsic spatial resolution, intrinsic spatial linearity, intrinsic maximum count rate, and system planar sensitivity of the Siemens Symbia Intevo 16 dual-probe SPECT/CT. **Results** Intrinsic uniformity was tested using the equipment's built-in quality control program. For the 2 detectors, the integral uniformity of the useful field of view was 1.79% and 1.89%, and that of the central field of view was 1.26% and 1.36%; and the differential uniformity of the useful field of view was 1.27% and 1.52%, and that of the central field of view was 0.79% and 1.18%, respectively. Intrinsic spatial resolution and intrinsic spatial linearity were evaluated using the quadrant bar phantom method. Both detectors achieved a resolution of 4.375 mm, with no visible linear distortion. Intrinsic maximum count rate was measured in accordance with WS 523-2019, yielding $386 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ and $394 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ for the 2 detectors, respectively. System planar sensitivity was tested using a simplified phantom combined with the method specified in WS 523-2019, resulting in $98.58 \text{ s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ and $96.41 \text{ s}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1}$ for the 2 detectors. All test results met the requirements of WS 523-2019. **Conclusion** Regular stability testing of SPECT equipment is essential for maintaining clinical image quality. However, certain tests can only be completed with the specific phantoms. Equipment-using departments should either conduct these tests independently or commission them to qualified testing institutions based on the specific circumstances.

Keywords: single photon emission computed tomography equipment; quality control; stability testing

前言

单光子发射计算机断层成像设备(Single Photon Emission Computed Tomograph, SPECT)是核医学临床中应用最多、最普及的成像设备^[1-3]。质量控制对保证SPECT的性能和成像质量尤为重要^[4-10]。2019年1月国家卫生健康委发布《伽玛照相机、单光子发

【收稿日期】2025-07-18

【基金项目】广东省自然科学基金(2022A1515012327)

【作者简介】郑晓斌, 技师, 研究方向: 核医学设备质控, E-mail: zhengxb@systucc.org.cn

【通信作者】周超, 主管技师, 研究方向: 核医学设备质控, E-mail: zhouchao@systucc.org.cn

射断层成像设备(SPECT)质量控制检测规范》(WS 523-2019),对使用中的伽玛照相机、SPECT及其配套设备明确提出稳定性检测的要求。SPECT稳定性检测的项目包括固有均匀性、固有空间分辨力、固有空间线性、固有最大计数率和系统平面灵敏度共5项,由使用单位自身或委托有检测能力的机构进行^[11]。虽然WS 523-2019标准第4章(推荐性条款)中给出了稳定性检测项目的检测方法,但部分项目的方法需要用到特定的模体或者可能需要购置额外的计算软件^[11-12]。另外,多个省份的设备质控现状分析显示,规范开展稳定性检测工作的医疗机构并不多,除了设备使用单位不够重视外,也有设备使用人员技术水平不够的缘由^[5-10]。因此,本研究旨在通过具体的SPECT设备,结合标准第4章的方法和设备用户手册及配套附件,探讨如何更有效地完成相应的质量控制,为SPECT稳定性检测工作的开展提供参考。

1 材料与方法

1.1 仪器设备

本研究使用德国Siemens Symbia Intevo 16双探头SPECT/CT进行SPECT部分的稳定性检测;活度计使用美国Capintec, Inc.生产的CRC-25R型;表面污染检测仪使用美国International Medcom, Inc.生产的Inspector Alert型。

1.2 放射源

本研究使用的^{99m}Tc溶液,通过放射性药物生产企业订购,根据不同的检测项目制作为符合要求的放射源。

1.3 固有均匀性

WS 523-2019标准的固有均匀性检测方法中,在采集完图像后需要对图像数据进行一系列的处理,这要求技术人员具备一定的计算机编程能力才有可能实现,或者是额外购置类似功能的计算软件^[11-12];而设备用户手册的方法,只需按要求准备好放射源,启动固有均匀性检测程序,图像采集完成后自动处理数据并生成检测结果,方便快捷。因此,本研究采纳用户手册的方法进行固有均匀性检测,具体如下:卸下准直器,打开固有均匀性检测程序,点击准备按钮使机架运动至预设位置(检查床升至最高位,两探头水平相对、移至最外侧),从检查床尾侧拉出放射源支架,将放射源(^{99m}Tc溶液,活度约35 μ Ci,体积尽量小,盛入配套的放射源容器中,见图1)固定在支架上,采集总计数 5.0×10^7 ,点击开始按钮开始采集图像,采集完成后自动分析数据得到固有均匀性检测结果,包括有效视野(UFOV)、中心视野(CFOV)的积分均匀性和微分均匀性共4项。

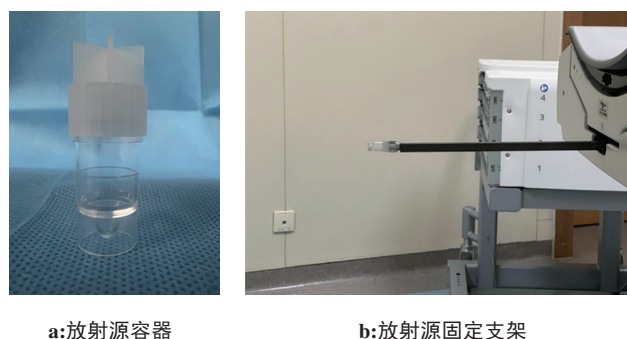


图1 固有均匀性放射源容器及固定支架

Figure 1 Radiation source container and the holder for intrinsic uniformity

1.4 固有空间分辨力和固有空间线性

WS 523-2019标准对固有空间分辨力和固有空间线性的检测方法有狭缝铅栅法和四象限铅栅法两种,分别需要用到狭缝铅栅模体或四象限铅栅模体,一次采集的数据可同时用于两个项目的检测分析^[11-12]。本研究使用的SPECT配套四象限铅栅模体(图2),铅栅线宽分别为2.0、2.5、3.0、3.5 mm,因为能获取的只有这一种模体,所以本研究选择四象限铅栅法进行固有空间分辨力和固有空间线性检测。但是,模体使用说明书中仅简单描述放射源活度信息、采集参数等,未明确具体的采集分析步骤。经过多次尝试及与厂家工程师、模体生产商工作人员沟通,该四象限铅栅使用方法与标准中的方法类似,具体如下:卸下准直器,探头设置为L模式,使待检测探头水平朝上,把四象限铅栅模体放置在探头表面,使模体的栅缝分别平行于探头的X轴和Y轴;将准备好的放射源(^{99m}Tc溶液,活度约1 mCi,盛入合适容器中,如注射器针帽等)置于垂直距离探头视野中心不小于1.5 m处;打开静态采集程序,采集矩阵 1024×1024 ,采集总计数 1.0×10^7 ;待采集结束,旋转铅栅 90° 、 180° 、 270° ,再将铅栅翻转,重复采集不同角度4幅图像,共采集8幅图像。采集完成后目视判定图像是否有线性畸变,无畸变则表明固有空间线性良好,而固有空间分辨力则以半高宽值表示,分辨力半高宽为目视能分辨到的最小铅栅尺寸乘以1.75,计算X方向与Y方向的平均值^[11-12]。

1.5 固有最大计数率

固有最大计数率的检测方法相对简单,卸下准直器,使探头表面与地面垂直,放射源(^{99m}Tc溶液,活度约1 mCi,盛入1 mL注射器)置于距离探头表面中心2 m以上距离,将设备设置为静态采集模式,采集矩阵大小不限。开始采集后从机架显示屏上观察放射源计数率,当放射源垂直于探头表面中心从距离远的位置逐渐向探头移动时计数率会发生变化,先变大再变小,记录最大的计数率值,该值即为固有最大计数率^[11]。

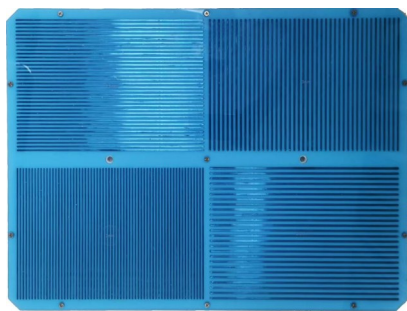


图2 四象限铅栅模体
Figure 2 Quadrant bar phantom

1.6 系统平面灵敏度

WS 523-2019标准中系统平面灵敏度的检测方法直接明了,只需将记录的数值代入公式计算即可得到检测结果,而平面灵敏度模体可通过尺寸大致相同的平底圆盘(图3)替代。本研究采用该方法进行系统平面灵敏度检测,具体如下:用注射器抽取约40 MBq的^{99m}Tc溶液,用活度计精确测量活度A,并记下测量活度时间 $t_{活度}$,将精确测量的^{99m}Tc溶液放入圆盘中,并加至2~3 mm高的水;探头安装低能高分辨准直器,使两个探头水平相对并移动靠近至合适距离,在下方的探头表面垫上防水布、吸水纸(避免圆盘中液体溢出污染准直器)并小心放置圆盘(下方用有一定厚度、坚固平整的材料垫高)于视野中心,调整上方的探头表面至圆盘中液面的距离约10 cm;打开静态采集程序,关闭均匀性校准功能,采集矩阵256×256,采集时长 $t_{采集}$ 为5 min,精确记录开始采集的时刻 $t_{采集}$ 及图像总计数N,重复采集3次;小心移开圆盘及其它物品,双探头旋转180°,重复以上步骤,即可得到另一探头的采集数据。将记录数据代入标准中给出的公式就可以计算出结果S,同一探头的最终结果为3次采集的平均值^[11]。

2 结果

2.1 固有均匀性

放射源活度30 μCi,固有均匀性图像见图4,其检测结果及判定见表1。



图3 平底圆盘
Figure 3 Flat round tray

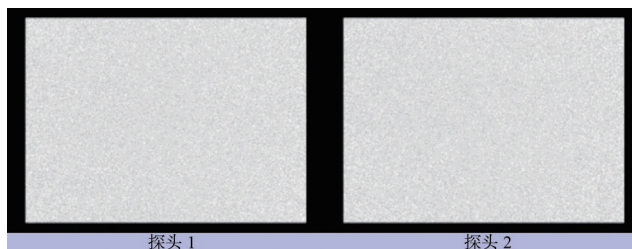


图4 固有均匀性图像
Figure 4 Intrinsic uniformity images

表1 固有均匀性检测结果及判定

Table 1 Intrinsic uniformity test results and assessments

检测项目	检测结果/%		标准要求/%	结果判定	
	探头1	探头2			
积分均匀性	有效视野	1.79	1.89	≤5.5	符合
	中心视野	1.26	1.36	≤4.5	符合
微分均匀性	有效视野	1.27	1.52	≤3.5	符合
	中心视野	0.79	1.18	≤3.0	符合

2.2 固有空间分辨力和固有空间线性

放射源活度1.07 mCi,固有空间分辨力和固有空间线性采集图像见图5、图6,目视均无线性畸变,固有空间线性良好,而目视能分辨的X方向和Y方向最小铅栅尺寸均为2.5 mm,固有空间分辨力=1.75×2.5 mm=4.375 mm,检测结果及判定见表2。

2.3 固有最大计数率

放射源活度0.99 mCi,固有最大计数率检测结果及判定见表3。

2.4 系统平面灵敏度

放射源活度46.2 MBq(约1.25 mCi),系统平面灵敏度采集图像见图7(仅显示其中一次采集),其检测结果及判定见表4。

3 讨论

本研究使用的放射性核素为^{99m}Tc,能峰140 keV,检测前通过采集程序自带能峰检测功能检测,能峰偏差均在±3 keV以内,能窗设置除了固有均匀性检测程序默认是15%外,其余检测项目均为20%。本研究进行的稳定性检测结果均符合WS 523-2019标准的要求。需要指出的是,WS 523-2019标准中对检测前带准直器情况下的本底计数率要求不大于 $2.0 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ ^[11],但是,本研究在检测前通过多角度空采1 min的方式记录的实际本底计数率在 $(2.0 \sim 3.0) \times 10^3 \text{ min}^{-1}$ 之间,略大于标准要求,而通过手持表面污染检测仪仔细监测机房环境,都表明无放射性污染,不排除是机房建筑材料本身所含轻微放射性

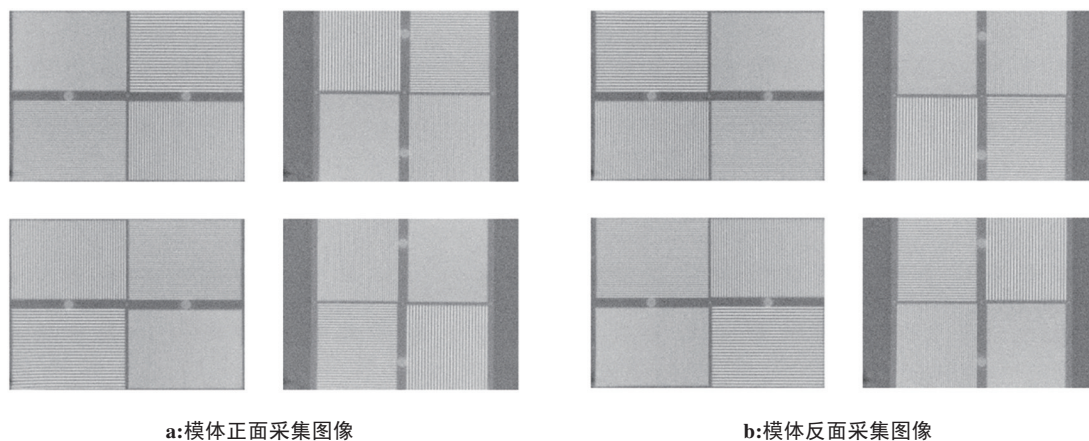


图5 探头1的固有空间分辨力和固有空间线性图像

Figure 5 Intrinsic spatial resolution and intrinsic spatial linearity images of detector 1

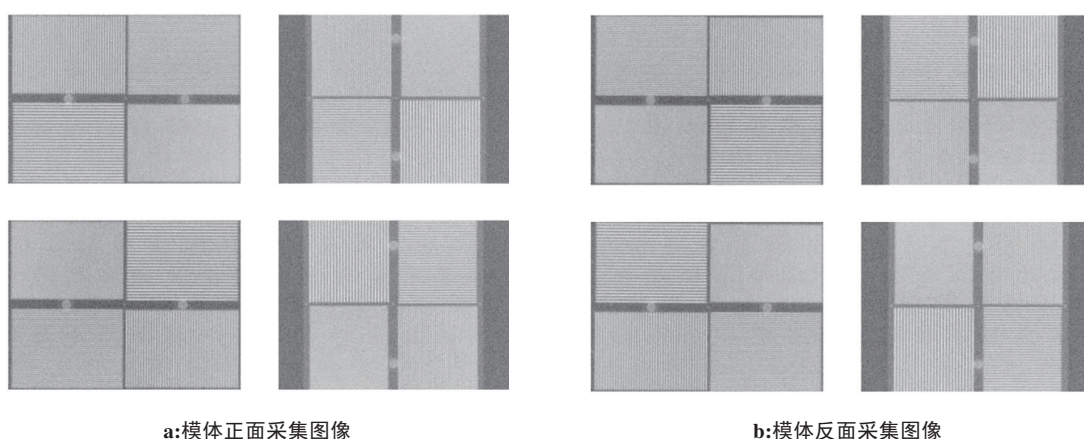


图6 探头2的固有空间分辨力和固有空间线性图像

Figure 6 Intrinsic spatial resolution and intrinsic spatial linearity images of detector 2

表2 固有空间分辨力和固有空间线性检测结果及判定

Table 2 Intrinsic spatial resolution and intrinsic spatial linearity test results and assessments

检测项目	检测结果		标准要求	结果判定
	探头1	探头2		
固有空间分辨力	4.375 mm	4.375 mm	≤5.4 mm	符合
固有空间线性	无畸变	无畸变	不适用	符合

表3 固有最大计数率检测结果及判定

Table 3 Intrinsic maximum count rate test results and assessments

探头序号	检测结果/s ⁻¹	标准要求/s ⁻¹	结果判定
探头1	386×10 ³	≥67×10 ³	符合
探头2	394×10 ³	≥67×10 ³	符合

导致此种情况。何正中^[13]在无放射性污染的情况下观测到的最低本底计数率也大于 $2.0 \times 10^3 \text{ min}^{-1}$,而

闫鹏慧等^[14]则指出若SPECT探头测量的本底计数率偏大且上下探头误差大,说明探头表面或者地面受到放射性污染,应待放射性污染清理或衰变殆尽后再行检测。故此,虽然实际本底计数率略大于标准要求,但在确保机房环境无放射性污染的情况下,本研究仍进行了稳定性检测。

固有均匀性是不带准直器时SPECT探头对放射性点源均匀照射的响应,表现为采集的图像中计数密度的均匀程度,是直接反映图像质量的指标^[12, 15-17]。耿建华等^[12]认为可以采用SPECT自带的固有均匀性检测程序进行检测,这种方法是核医学行业惯用的方法,简单易实现,可以保障临床应用图像质量要求,但部分机型可能只给出其中两个结果。刘杰等^[18-20]研究中均采用此种方法进行固有均匀性检测。作为如此简单易实现又能直接反映图像质量的指标,国内外相关标准指南建议固有均匀性的检测周期为每周^[11, 15],甚至是每日^[17, 21]。

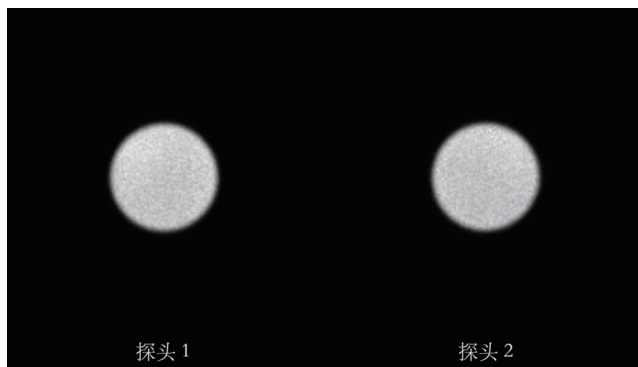


图7 系统平面灵敏度图像

Figure 7 System planar sensitivity images

表4 系统平面灵敏度检测结果及判定

Table 4 System planar sensitivity test results and assessments

探头序号	检测结果/ $s^{-1} \cdot MBq^{-1}$			平均值/ $s^{-1} \cdot MBq^{-1}$	标准要求/ $s^{-1} \cdot MBq^{-1}$	结果判定
	第1次	第2次	第3次			
探头1	98.48	98.61	98.66	98.58	≥ 60	符合
探头2	96.28	96.45	96.51	96.41	≥ 60	符合

于四象限铅栅法(有1台不合格),考虑是四象限铅栅缝宽度的影响,建议使用栅缝较细(2.0 mm/2.5 mm/3.0 mm/3.5 mm)的四象限铅栅,检测合格值放宽5%,两种方法结果能保证一致;其进一步对40台设备使用不同规格的四象限铅栅进行检测,结果显示使用规格为2.0 mm/2.5 mm/3.0 mm/3.5 mm的四象限铅栅检测的25台设备,无论是否允许5%偏差,其检测结果是否合格的结论是一致的^[23]。另外,为提高四象限铅栅法的可行性,建议将标准中每个位置的采集总计数(6×10^4)增加一个数量级^[24],以上研究中针对铅栅不能覆盖探头表面时均使用铅衣或铅皮进行遮挡,可使计数更集中于铅栅覆盖区域,有利于栅缝的分辨。本研究使用的四象限铅栅的规格即是2.0 mm/2.5 mm/3.0 mm/3.5 mm,材料主要为有机玻璃,栅缝使用铅条填充,尺寸刚好能覆盖探头视野(约53.8 cm \times 38.7 cm),每幅图像的采集总计数也远大于标准给出的采集总计数,遗憾的是,在出现铅栅不能覆盖探头视野时没有使用铅衣或铅皮进行遮挡,此种情况采集的图像略微模糊。总之,四象限铅栅法可操作性强,简单实用,在有相应模体的情况下,设备使用单位完全可以自主检测固有空间分辨力和固有空间线性,如无合适模体可供使用,建议委托有检测能力的机构进行,如设备维修保养公司等。对于检测结果的判定,虽然WS 523-2019标准附录A的技术要求是从UFOV和CFOV的角度以定量的方式给出,但是这种定量要求应是针对使用狭缝铅栅法提出的,特别

固有空间分辨力和固有空间线性的检测必须依赖狭缝铅栅模体或者四象限铅栅模体才能完成^[11, 15-17]。在WS 523-2019标准中,关于检测方法的选择建议是,稳定性检测可使用四象限铅栅法,宜使用狭缝铅栅法^[11]。狭缝铅栅模体通常需要使用单位额外购入,成本较高,而四象限铅栅模体多数会随SPECT设备附带^[12, 18],建议在设备购买合同中增加相应条款,避免出现不附带情况。洪浩等^[22]针对两种方法的比较研究显示,固有空间线性检测结果相同,而固有空间分辨力检测使用狭缝铅栅法的结果略优

是固有空间线性检测。使用四象限铅栅法时,可按标准中的方法描述进行判定。

固有最大计数率反映的是不带准直器的情况下,对相邻时刻闪烁事件的时间分辨能力,其值越大时间分辨能力越好。当固有最大计数率偏低时,高计数率条件下采集时容易出现计数丢失或漏计现象^[18-19, 25-26]。固有最大计数率的检测最简单,卸下准直器,设置好采集程序,手持放射源在探头中心前方前后移动,观察机架显示屏的计数率变化,记录最大值。施笑蕊等^[26]将放射源固定在移动支架上,能减少操作人员所受辐射。为了使结果更准确,可以多次测量取平均值,还可在对数坐标纸上记录距离与计数率以绘制计数率特性曲线。

以上固有性能指标检测时均须卸下准直器,此时探测晶体完全裸露,鉴于晶体质脆,虽然表面有轻薄的塑料壳保护,但其防护能力远远不够,如有配套的保护板应安装好,探头操作过程中须小心谨慎,避免磕碰撞击,在检测完成后及时将准直器装上以保护晶体。

系统平面灵敏度检测时使用的放射源为平面灵敏度模体注入精确测量活度的^{99m}Tc溶液和适量水混匀后制成的平面源。对于检测所需的平面灵敏度模体,闫鹏慧等都采用平底培养皿或塑料圆盘替代^[14, 19, 26-28];惠金子等^[27]还将此种简易模体与标准模体进行对比研究,结果显示两种模体测得的结果差异无统计学意义;张青菊等^[28]研究发现标准条件(面

源活度 111 MBq,直径 15 cm,距离准直器表面中心 10 cm)下,单一改变源距(5~20 cm)、面源直径(3.5~20.0 cm)或活度(18.5~222.0 MBq)时的检测结果与标准条件的检测结果均无显著差异。上述研究表明,类似的平底圆盘完全可以替代标准模体进行系统平面灵敏度检测,对多探头 SPECT 而言,区别仅仅是需要对每个探头进行单独采集、耗时较长而已。如有厚度合适、对 γ 射线衰减较小的材料作为垫子,也可实现双探头同时采集。本研究采用平底圆盘替代标准模体,圆盘底下垫子为稍坚固的类海绵材质,厚度约 10 cm 且对 γ 射线衰减较小,实际操作时同时采集双探头图像。值得一提的是,WS 523-2019 标准及耿建华等的研究均未提及是否需要测量注射器残留活度^[11-12, 14, 18-19, 25-27],仅张青菊等^[28]指出需详细记录空针活度,其必要性有待进一步研究讨论。理论上,平面源的实际活度应为时间归一化后注射器抽取的放射性溶液活度减去注射器残留活度的差值。本研究在实际制作平面源时,提前在平底圆盘中加入适量水,注入放射性溶液后,注射器抽取盘中适量水再回推,反复几次,以清洗注射器中残留溶液,并用注射器针头轻轻搅拌圆盘中液体使放射性溶液混匀,平面源制作完成。按前述操作后,测得残留活度仅为 0.3 MBq,远小于抽取的活度 46.6 MBq,因两次测量间隔时间约 2 h,经过时间归一化处理后,实际活度约 46.2 MBq。如测量间隔短,可考虑直接以两个活度的差值作为实际活度。系统平面灵敏度检测过程中,务必记录好测量的活度、测量时刻、采集时刻和采集总计数等数据,采集次数不少于 3 次,计算时可使用 Excel 等工具编辑好标准中给出的公式,代入相应数据就可以得到结果,最终结果为多次计算结果的平均值。需要注意的是,WS 523-2019 标准系统平面灵敏度计算公式中活度 A 的单位是兆贝可(MBq)而非常用单位毫居里(mCi),使用活度计时将测量单位切换为 Bq,可以减少后续计算时单位换算的麻烦。该项检测的关键是活度的精确测量,这由活度计决定,应确保其检测间隔不超过 2 年^[29]。

稳定性检测需要制作不同要求的放射源用于不同的检测项目,在制作使用放射源的过程中要做好个人防护,避免不必要的辐射。

4 结语

持续全面的质量控制是核医学科维持图像质量的关键,国内外的标准指南均建议对 SPECT 进行常规维护和定期检测^[4, 11, 15, 17, 21],既可以让使用科室及时掌握设备工作状态,也可保证设备成像质量,满足临床诊断需求。在 WS 523-2019 标准中,除了固有均匀性

的检测周期是每周外,其余项目的检测周期都是半年,而各个项目的检测也难易不一,建议设备使用单位在力所能及的情况下,应当考虑由自身完成周质控项目,针对半年质控项目,可结合实际,自主完成或委托有检测能力的机构进行。随着 WS 523-2019 标准的发布,SPECT 稳定性检测从设备使用单位的自律行为上升为卫生行业要求,也为卫生监督提供了执法依据,有望能大幅促进 SPECT 的质量控制。设备使用单位在落实稳定性检测工作的同时,也应做好检测数据的记录和保存。

【参考文献】

- [1] 中华医学会核医学分会. 2024 年全国核医学现状普查结果简报[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2024, 44(10): 617-618. Chinese Society of Nuclear Medicine. A brief report on the results of the national survey of nuclear medicine in 2024[J]. Chinese Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 2024, 44(10): 617-618.
- [2] 中华医学会核医学分会. 2020 年全国核医学现状普查结果简报[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2020, 40(12): 747-749. Chinese Society of Nuclear Medicine. A brief report on the results of the national survey of nuclear medicine in 2020[J]. Chinese Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 2020, 40(12): 747-749.
- [3] 中华医学会核医学分会. 2018 年全国核医学现状普查结果简报[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2018, 38(12): 813-814. Chinese Society of Nuclear Medicine. A brief report on the results of the national survey of nuclear medicine in 2018[J]. Chinese Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 2018, 38(12): 813-814.
- [4] 刘兴党, 顾兆祥. 核医学质量控制与管理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2018: 1-29. Liu XD, Gu ZX. Nuclear medicine quality control and management [M]. Shanghai: Fudan University Press, 2018: 1-29.
- [5] 邹天禄, 郭进瑞, 刘盼, 等. 福建省部分核医学 SPECT 设备质量控制检测结果[J]. 河南预防医学杂志, 2022, 33(11): 881-884. Zou TL, Guo JR, Liu P, et al. Quality control test results of partial nuclear medicine SPECT equipment in Fujian[J]. Henan Journal of Preventive Medicine, 2022, 33(11): 881-884.
- [6] 王贇, 邹家龙, 张涵宇, 等. 2019 年甘肃省部分放射诊疗设备质控及防护检测与分析[J]. 中国辐射卫生, 2022, 31(1): 23-26. Wang Y, Wu JL, Zhang HY, et al. Quality control and protection test and analysis of some radio diagnostic equipment in Gansu Province, China[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2022, 31(1): 23-26.
- [7] 马磊, 马庆录, 马宏宏, 等. 青海省核医学影像设备性能检测及现状分析[J]. 中国辐射卫生, 2021, 30(6): 697-700. Ma L, Ma QL, Ma HH, et al. Performance testing and status analysis of nuclear medicine imaging device in Qinghai Province[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2021, 30(6): 697-700.
- [8] 张岭, 何丽娟, 何廷贵, 等. 安徽省 16 台 SPECT 设备质控现状分析[J]. 安徽预防医学杂志, 2021, 27(4): 323-326. Zhang L, He LJ, He TG, et al. Analysis of quality control status of 16 SPECT equipment in Anhui Province[J]. Anhui Journal of Preventive Medicine, 2021, 27(4): 323-326.
- [9] 胡波, 廖向东, 李长虹, 等. SPECT 设备性能质量控制检测及结果分析[J]. 中国辐射卫生, 2018, 27(3): 237-239. Hu B, Liao XD, Li CH, et al. Performance quality control detection and result analysis of SPECT equipment[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2018, 27(3): 237-239.
- [10] 谭展, 马睿, 谭光享, 等. 广东省 21 台 SPECT 机性能检测结果分析[J]. 中国辐射卫生, 2017, 26(6): 665-667. Tan Z, Ma R, Tan GX, et al. The analysis of the 21 SPECT equipment's performance test results in Guangdong Province[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2017, 26(6): 665-667.
- [11] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 伽玛照相机、单光子发射断层成像设备(SPECT)质量控制检测规范: WS 523-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.

- National Health Commission of the People's Republic of China. Specification for testing of quality control in gamma cameras and single photon emission computed tomograph (SPECT): WS 523-2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [12] 耿建华, 陈英茂, 陈盛祖, 等. SPECT质量控制标准WS523-2019解读及其检测方法探讨[J]. 中国医学装备, 2020, 17(7): 7-12.
Geng JH, Chen YM, Chen SZ, et al. Interpretation of SPECT quality control standard (WS 523-2019) and exploration of its test method[J]. China Medical Equipment, 2020, 17(7): 7-12.
- [13] 何正中, 廖光星, 李宁, 等. 西门子Symbia T16 SPECT/CT核医学探头质量控制探讨[J]. 中国医疗设备, 2018, 33(10): 45-48.
He ZZ, Liao GX, Li N, et al. Quality control of siemens Symbia T16 SPECT/CT detectors[J]. China Medical Devices, 2018, 33(10): 45-48.
- [14] 闫鹏慧, 白侠, 包宝亮. 单光子发射断层扫描仪稳定性检测方法探讨[J]. 内蒙古医科大学学报, 2020, 42(S1): 13-15.
Yan PH, Bai X, Bao BL. Discussion on the stability testing method of single photon emission computed tomograph[J]. Journal of Inner Mongolia Medical University, 2020, 42(S1): 13-15.
- [15] International Atomic Energy Agency. IAEA human health series NO. 6: quality assurance for SPECT systems[EB/OL]. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1394_web.pdf.
- [16] National Electrical Manufacturers Association. Performance measurements of Gamma cameras: NU 1-2018[S]. Rosslyn, VA, USA: National Electrical Manufacturers Association, 2018.
- [17] American Association of Physicists in Medicine. Acceptance testing and annual physics survey recommendations for gamma camera, SPECT, and SPECT/CT systems: the report of AAPM task group 177 [EB/OL]. (2019-02). <https://www.aapm.org/pubs/reports/detail.asp?docid=184>.
- [18] 刘杰, 李红磊, 刘鹏, 等. SPECT稳定性检测及探讨[C]//中国医学装备大会暨2024医学装备展览会. 北京: 中国医学装备协会, 2024: 38-43.
Liu J, Li HL, Liu P, et al. Detection and discussion on the stability of SPECT[C]//China Medical Equipment Conference and 2024 Medical Equipment Exhibition. Beijing: China Association of Medical Equipment, 2024: 38-43.
- [19] 刘鹏, 刘杰, 李红磊, 等. 单光子发射断层成像设备(SPECT)质量控制方法探讨[J]. 中日友好医院学报, 2023, 37(4): 241-244.
Liu P, Liu J, Li HL, et al. Discussion on quality control methods for single photon emission computed tomograph[J]. Journal of China-Japan Friendship Hospital, 2023, 37(4): 241-244.
- [20] 陈兴华, 李亚明, 刁尧, 等. SPECT/CT质量控制常见问题分析与解决方案研究[J]. 中国医学装备, 2020, 17(11): 139-143.
Chen XH, Li YM, Diao Y, et al. Common problems and solutions of routine quality control of SPECT/CT[J]. China Medical Equipment, 2020, 17(11): 139-143.
- [21] EANM Physics Committee, Busemann Sokole E, Płachcińska A, et al. Routine quality control recommendations for nuclear medicine instrumentation[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2010, 37(3): 662-671.
- [22] 洪浩, 耿建华, 郑容, 等. 单光子发射断层成像设备固有空间分辨力和线性稳定性检测的比较研究[J]. 中国医学装备, 2020, 17(9): 10-15.
Hong H, Geng JH, Zheng R, et al. A comparative study on intrinsic spatial resolution and linear stability of SPECT[J]. China Medical Equipment, 2020, 17(9): 10-15.
- [23] 洪浩, 耿建华, 郑容, 等. SPECT四象限铅栅法固有空间分辨力和线性稳定性检测的研究[J]. 中国医学装备, 2021, 18(6): 30-34.
Hong H, Geng JH, Zheng R, et al. A study on the tests of intrinsically spatial resolution and linear stability of intrinsic space of SPECT quadrant bar phantom[J]. China Medical Equipment, 2021, 18(6): 30-34.
- [24] 洪浩, 耿建华, 陈智文, 等. SPECT固有空间分辨力和线性稳定性检测条件探讨[C]//中国医学装备大会暨2024医学装备展览会. 北京: 中国医学装备协会, 2024: 6-11.
Hong H, Geng JH, Chen ZW, et al. Discussion on stability testing conditions for intrinsic spatial resolution and linearity of SPECT[C]//China Medical Equipment Conference and 2024 Medical Equipment Exhibition. Beijing: China Association of Medical Equipment, 2024: 6-11.
- [25] 洪浩, 李静. SPECT性能指标及质量控制[C]//中国医学装备大会暨2024医学装备展览会. 北京: 中国医学装备协会, 2024: 27-34.
Hong H, Li J. SPECT performance indicators and quality control[C]//China Medical Equipment Conference and 2024 Medical Equipment Exhibition. Beijing: China Association of Medical Equipment, 2024: 27-34.
- [26] 施笑蕊, 贺子瑜, 惠金子, 等. SPECT系统空间分辨力、系统平面灵敏度及固有最大计数率的测量分析[J]. 中国医疗设备, 2023, 38(4): 74-77.
Shi XR, He ZC, Hui JZ, et al. Study on measurement and analysis of SPECT system spatial resolution, system plane sensitivity and intrinsic maximum count rate[J]. China Medical Devices, 2023, 38(4): 74-77.
- [27] 惠金子, 许哲祯, 屈阳, 等. 简易模体和标准模体检测SPECT系统性能的对比研究[J]. 中国医疗设备, 2024, 39(11): 7-11.
Hui JZ, Xu ZZ, Qu Y, et al. Comparative study on SPECT system performance parameters measured by simple and standard modules[J]. China Medical Devices, 2024, 39(11): 7-11.
- [28] 张青菊, 惠金子, 许建林, 等. 定量SPECT探头系统平面灵敏度测试影响因素分析[J]. 中国医疗设备, 2023, 38(1): 53-57.
Zhang QJ, Hui JZ, Xu JL, et al. Influencing factors analysis of system planar sensitivity test in quantitative SPECT[J]. China Medical Devices, 2023, 38(1): 53-57.
- [29] 国家市场监督管理总局. 放射性活度计检定规程: JJG 377-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
State Administration for Market Regulation. Radioactivity meters: JJG 377-2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.

(编辑: 黄开颜)