

不同注射剂量方案 CZT-SPECT 心肌灌注显像快速采集时间的优化

薛冰冰 李剑明

泰达国际心血管病医院、天津医科大学心血管病临床学院核医学科 300457

通信作者:李剑明, Email: ichlijm@163.com

【摘要】 目的 探讨行一日法静息/负荷铯铊心脏专用 SPECT (CZT-SPECT) 心肌灌注显像 (MPI) 时使用高、低剂量方案的最优快速采集时间和临床实用性。**方法** 回顾性分析 101 例可疑或确诊冠状动脉粥样硬化性心脏病患者的 CZT-SPECT 一日法门控 MPI 图像资料, 其中 2017 年 11 月至 12 月间的高剂量组 51 例 [男 22 例, 女 29 例, 年龄 (55.4±8.5) 岁], 2018 年 7 月至 10 月间的低剂量组 50 例 [男 27 例, 女 23 例, 年龄 (59.1±12.8) 岁]。高剂量组静息显像⁹⁹Tc^m-甲氧基异丁基异腈 (MIBI) 注射剂量为 296~370 MBq, 低剂量组为 111~222 MBq; 负荷显像剂量为静息时的 3 倍。高剂量组静息/负荷采集总时间为 6 min/4 min, 低剂量组为 8 min/6 min。使用 lister 软件调用患者 MPI 原始表 (list) 文件, 分别重建采集时间为 1 min、2 min……至最长采集时间的 MPI 数据, 对不同采集时间的 MPI 结果进行图像质量评价、半定量分析及左心室射血分数 (LVEF) 测定。采用配对 *t* 检验或 Wilcoxon 符号秩检验、Pearson 相关分析及 Bland-Altman 分析对不同采集时间定量参数进行统计学分析。**结果** 高剂量组静息/负荷显像分别采集 3 min/2 min 及以上时, 低剂量组分别采集 4 min/3 min 及以上时, 图像质量评价均为好或优秀 [100% (51/51) 与 100% (50/50)]; 高剂量组静息/负荷显像采集时间 3 min/2 min 与 6 min/4 min, 低剂量组静息/负荷显像采集时间 4 min/3 min 与 8 min/6 min 的灌注参数 [静息总积分 (SRS) 或负荷总积分 (SSS)、总灌注缺损 (TPD)] 及 LVEF 比较, 差异均无统计学意义 (*t* 值: -1.196~1.597, *z* 值: -1.963~1.945, 均 *P*>0.05), 且具有强相关性 (均 *r*>0.700, 均 *P*<0.001), Bland-Altman 分析也显示定量结果一致性较好。**结论** CZT-SPECT 一日法静息/负荷 MPI 高剂量方案最优采集时间为 3 min/2 min, 低剂量为 4 min/3 min, 通过优化快速采集时间进一步缩短了显像时间, 在保证图像质量的前提下获得可靠的灌注参数与 LVEF, 具有较好的临床实用性。

【关键词】 冠状动脉疾病; 心肌灌注显像; 铯; 铊; 铊; 体层摄影术, 发射型计算机, 单光子; 时间安排; ^{99m}Tc 甲氧基异丁基异腈

基金项目: 天津市滨海新区卫生和计划生育委员会科技项目 (2017BWKY025)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2019.10.008

Study on optimizing rapid acquisition time of CZT-SPECT myocardial perfusion imaging using different injection doses

Xue Bingbing, Li Jianming

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

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

【Abstract】 Objective To explore the optimal and rapid imaging acquisition time and clinical applicability when using high- and low-dose one day rest/stress myocardial perfusion imaging (MPI) with cadmium-zinc-telluride heart dedicated SPECT (CZT-SPECT). **Methods** The MPI data with high-dose rest/stress protocol in 51 patients (22 males, 29 females, age: (55.4±8.5) years) between November 2017 and December 2017 and those with low-dose protocol in 50 patients (27 males, 23 females, age: (59.1±12.8) years) between July 2018 and October 2018 were retrospectively analyzed. The MPI was performed with CZT-SPECT. Each patient received 296–370 MBq rest dose of ⁹⁹Tc^m-methoxyisobutylisonitrile (MIBI) for high-dose protocol, 111–222 MBq rest dose of ⁹⁹Tc^m-MIBI for low-dose protocol. Stress dose was 3 times of the corresponding rest dose. Rest and stress scans were acquired 6 min and 4 min for high-dose protocol, while 8 min and 6 min for low-dose protocol in total. All rest or stress imaging data were reconstructed from list-mode raw data to obtain scan durations of 1 min, 2 min, etc., up to the maximum of acquisition time. Image quality at different acquisition times were evaluated, and myocardial perfusion and function parameters were compared. Paired *t* test, Wilcoxon signed rank test, Pearson correlation and Bland-Altman analyses

were used for data analysis. **Results** The image quality was rated as excellent/good in all patients (100%, 51/51) when acquisition time ≥ 3 min and ≥ 2 min respectively for rest and stress imaging with high-dose protocol, the similar results was obtained (100%, 50/50) when acquisition time ≥ 4 min and ≥ 3 min respectively for rest and stress imaging with low-dose protocol. The quantitative perfusion parameters (summed rest scores, summed stress scores, total perfusion deficit) and left ventricle ejection fraction (LVEF) at shorter acquisition times (3 min/2 min, 4 min/3 min) were not significantly different from the results at the longer acquisition times (6 min/4 min, 8 min/6 min; t values: from -1.196 to 1.597, z values: from -1.963 to 1.945, all $P > 0.05$). Those parameters at shorter and longer acquisition times showed strong correlations (all $r > 0.700$, all $P < 0.001$), and Bland-Altman analysis revealed good agreement between them. **Conclusion** The optimal acquisition time is 3 min/2 min for high-dose one-day rest/stress CZT-SPECT MPI, and 4 min/3 min for low-dose protocol, which can significantly shorten the MPI acquisition time, then reliable perfusion parameters and LVEF can be obtained under the premise of ensuring image quality, making it the better clinical applicability.

【Key words】 Coronary disease; Myocardial perfusion imaging; Cadmium; Zinc; Tellurium; Tomography, emission-computed, single-photon; Time management; Technetium Tc 99m sestamibi

Fund program: Science and Technology Fund of Tianjin Binhai New Area Health and Family Planning Commission (2017BWKY025)

DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2019.10.008

镉锌镅心脏专用 SPECT (cadmium-zinc-telluride-SPECT, CZT-SPECT) 是近年来核医学单光子设备发展过程中的重大进展。CZT-SPECT 使用 CZT 固态半导体材料作为探测器,同时取消了光电倍增管,改进了准直器设计,与 Anger 型 SPECT (传统 SPECT) 相比不仅具有小巧的外观,而且有更高的探测效率及空间分辨率^[1]。国外研究表明 CZT-SPECT 心肌灌注显像 (myocardial perfusion imaging, MPI) 能在保证图像质量的前提下明显缩短显像时间,减少⁹⁹Tc^m 标记显像剂的使用量,同时不影响诊断效能^[2-3]。由于不同人种、与心肌内显像剂活性分布相关的体型、体质量指数等方面的差异^[4],国内应用该类设备进行 MPI 的最优快速采集时间可能与国外有所差异,而在不同注射剂量下针对国人的优化快速采集时间的研究鲜有报道。为此,笔者探讨了一日法 CZT-SPECT MPI 在高、低剂量方案时的最优采集时间,为国内该类设备的临床应用提供初步实践参考。

资料与方法

1. 研究对象。回顾性分析 2017 年 11 月至 12 月及 2018 年 7 月至 10 月来本院行一日法静息/负荷 CZT-SPECT MPI 的患者资料,2 个时间段的显像剂使用剂量不同,分为高、低剂量组 (依据指南^[5],前者静息/负荷显像剂注射剂量为 296~370 MBq/888~1 110 MBq,后者为 111~222 MBq/333~666 MBq;负荷显像剂量为静息显像的 3 倍)。纳入标准:18~80 岁可疑或确诊冠状动脉粥样硬化性心脏病 (简称冠心病) 患者,行一日法静息/负荷 MPI,无负荷显像禁忌证^[6]且顺利完成检查。排除标准:静息或负荷显像时心外显像剂放射性过高并遮盖下壁心肌而严重影响图像质量;②严重心律不齐导致门控采集心率被拒绝

1/3 以上;采集过程中患者移动。本研究经本院伦理委员会批准 (批件号:临研审[2018]-0929-4)。

2. 患者准备与图像采集。(1) 患者准备。运动负荷试验检查前停用 β 受体阻滞剂、硝酸酯类、钙拮抗剂等药物 24 h 以上;ATP 负荷试验前停用双嘧达莫和茶碱类药物,检查当天忌服茶、咖啡、含咖啡因类饮料。

(2) 负荷方案。负荷试验于静息显像完成至少 3 h 后进行。运动负荷试验采用改良 Bruce 试验方案,达到运动终止指标时 (负荷峰) 于静脉注入显像剂,注射完成后继续运动 1 min。ATP 负荷时 ATP 剂量为 $0.14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (国药集团容生制药有限公司,焦作),持续微量泵注入 5 min,于第 3 分钟静脉注射显像剂。负荷试验全程监测记录血压、心率及心电图。

(3) 设备与图像采集。设备为美国 GE Discovery NM 530c (简称 NM530c),采用 19 针孔钨准直器 (每个准直器有效孔径为 5.1 mm),并且以 108° 的半环形围绕于心脏周围,每个准直器均与 1 个 $8 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$ 的 CZT 探测器相连,显像时探测器保持静止且有 19 个视野对准心脏进行同时成像^[7]。均先行静息后行负荷显像,显像剂为⁹⁹Tc^m-甲氧基异丁基异腈 (methoxyisobutylisonitrile, MIBI);⁹⁹Tc^m 液由北京原子高科股份有限公司或北京森科医药有限公司提供,MIBI 由江苏省原子医学研究所提供,放化纯 $> 90\%$)。依据相关指南^[5],在注射显像剂后 30~60 min 行常规仰卧位采集,显像时手臂置于头顶。射线能峰设置为 140 keV,能量窗宽为 $\pm 10\%$;均为心电图门控采集 (心率窗位 $\pm 15\%$),每个心动周期采集 8 帧图像,心率窗宽 $\pm 20\%$;均采用表模式 (list mode) 采集,低、高剂量组静息/负荷显像采集时间分别共计为 8 min/6 min、

6 min/4 min, 采集数据以原始表文件传送并存储于 Xelersi 3.1 工作站。

3. 图像处理。在 Xelersi 3.1 工作站上使用 lister 工具调用原始表(list)文件, 分别重建 1 min、2 min、3 min、4 min……最长采集时间的图像数据, 之后用定量软件包[定量门控 SPECT(quantitative gated SPECT, QGS)+定量灌注 SPECT(quantitative perfusion SPECT, QPS); 美国 Cedars-Sinai 公司]分别对各个显像时间图像数据迭代重建, 获取灌注及功能参数, 断层图像以短轴、垂直长轴及水平长轴显示。

4. 图像分析。(1) 质量评价。综合考虑心肌计数密度及均匀性、心内外膜边缘界定及心外放射性活性等因素, 使用 4 分法对图像质量进行视觉评估: 1 分为差, 2 分为合格, 3 分为好, 4 分为优秀^[2-3]。由 2 位有经验的核医学科医师完成, 意见不一致时协商达成一致。

(2) 心肌灌注及心功能参数测定。灌注半定量参数包括静息总积分(summed rest scores, SRS)、负荷总积分(summed stress scores, SSS)和总灌注缺损(total perfusion deficit, TPD)。SRS 及 SSS 的计算基于美国心脏病学会的 17 节段模型^[8], 采用 5 分法: 0 分为灌注正常, 1 分灌注轻度减低, 2 分为灌注中度减低, 3 分为灌注重度减低, 4 分为灌注缺损; 17 个节段得分总和即 SRS 或 SSS。TPD 以占左心室心肌百分比表示, 其反映心肌总的灌注缺损范围及程度^[9]。左心室功能参数包括左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)、左心室舒张末期容积(left ventricular end-diastolic volume, LVEDV)、左心室收缩末期容积(left ventricular end-systolic volume, LVESV)。定量参数通过 QGS+QPS 软件包自动计数得出, 勾画心内膜和心外膜边界, 必要时予以手动调节, 由 1 位有经验的核医学科医师完成。

5. 统计学处理。采用 IBM SPSS 22.0 软件, 符合正态分布的计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 非正态分布计量

资料以 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示, 计数资料以频数(百分比)表示。相同剂量组不同采集时间的图像定量参数差异比较采用配对 t 检验或 Wilcoxon 符号秩检验; 计数资料的比较采用 χ^2 检验。定量参数间的相关性、一致性评价采用 Pearson 相关及 Bland-Altman 分析。 $P < 0.05$ 为差异或相关性有统计学意义。

结 果

1. 共 101 例患者纳入研究, 其中高、低剂量组分别为 51、50 例。2 组患者基本资料见表 1。

2. 图像质量。(1) 高剂量组。静息显像采集 1 min、2 min、3 min 的图像质量为好或优秀者分别占 25.5% (13/51)、84.3% (43/51)、100% (51/51), 4~6 min 图像质量均为好及以上; 负荷显像采集 1 min、2 min 的图像质量为好或优秀者分别占 96.1% (49/51)、100% (51/51), 3~4 min 图像质量均为好及以上。静息/负荷显像采集 3 min/2 min 与 6 min/4 min 的典型图像见图 1A。

(2) 低剂量组。静息显像采集 1 min、2 min、3 min、4 min 图像质量为好或优秀分别占 6.0% (3/50)、38.0% (19/50)、88.0% (44/50)、100% (50/50), 5~8 min 图像质量均为好及以上; 负荷显像 1 min、2 min、3 min 图像质量为好或优秀分别占 74.0% (37/50)、98.0% (49/50)、100% (50/50), 4~6 min 图像质量均为好及以上。静息/负荷显像采集 4 min/3 min 与 8 min/6 min 典型图像见图 1B。

3. 定量参数的比较及相关分析。分别比较高剂量组静息采集 3 min 与 6 min、负荷采集 2 min 与 4 min, 低剂量组静息采集 4 min 与 8 min、负荷采集 3 min 与 6 min 的灌注及心功能定量数据, 结果示部分 LVEDV 差异有统计学意义(均 $P < 0.05$), 其余灌注及左心功能参数差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$), 不同时间采集的参数间具有强相关性(均 $r > 0.700$, 均 $P < 0.001$), 具体见表 2, 3。

表 1 行一日法静息/负荷显像的 2 组可疑或确诊冠心病患者的基本资料

组别	例数	年龄 (岁; $\bar{x} \pm s$)	性别[例(%)]		体质量 (kg; $\bar{x} \pm s$)	BMI (kg/m ² ; $\bar{x} \pm s$)	危险因素[例(%)]			
			男	女			高血压	糖尿病	高脂血症	吸烟
高剂量组	51	55.4±8.5	22(43.1%)	29(56.9%)	74.2±14.4	26.2±3.6	22(43.1%)	6(11.8%)	22(43.1%)	16(31.4%)
低剂量组	50	59.1±12.8	27(54.0%)	23(46.0%)	67.1±9.8	24.1±3.1	27(54.0%)	5(10.0%)	12(24.0%)	16(32.0%)

组别	例数	PCI 术后 [例(%)]	CABG [例(%)]	心肌梗死史 [例(%)]	负荷诱导方式[例(%)]		显像剂剂量(MBq; $\bar{x} \pm s$)	
					运动	ATP	静息显像	负荷显像
高剂量组	51	8(15.7%)	1(2.0%)	3(5.9%)	51(100%)	0	303.7±16.3	914.1±55.5
低剂量组	50	8(16.0%)	3(6.0%)	2(4.0%)	49(98.0%)	1(2.0%)	175.3±33.2	535.4±95.6

注: BMI 为体质量指数, CABG 为冠状动脉旁路移植术, PCI 为经皮冠状动脉介入治疗; 冠心病为冠状动脉粥样硬化性心脏病的简称

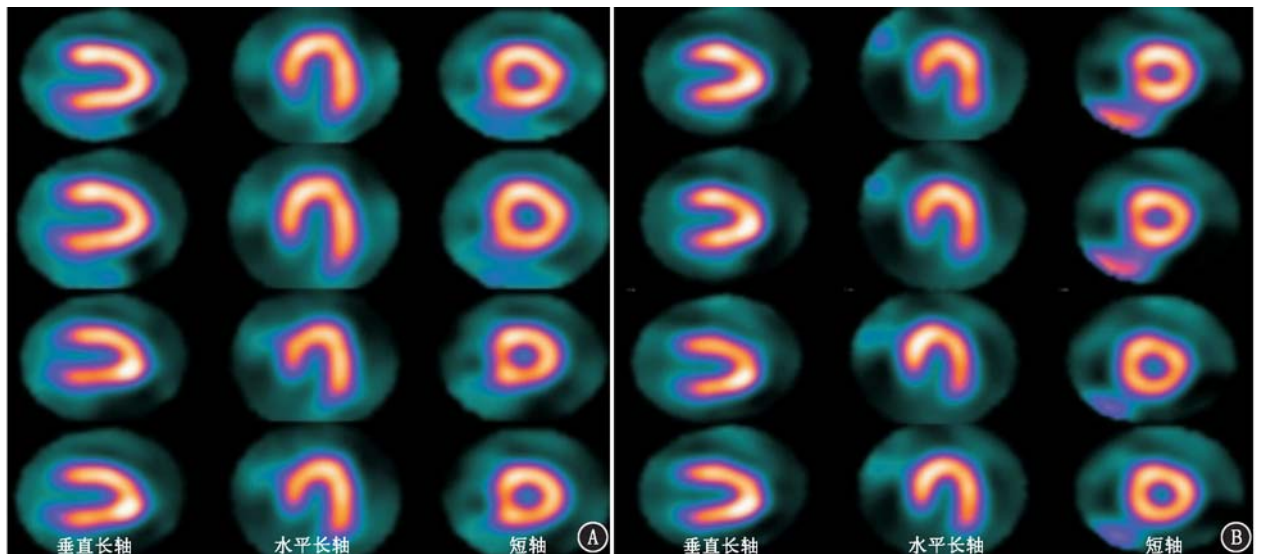


图 1 一日法静息/负荷⁹⁹Tc^m-甲氧基异丁基异脒(MIBI) 碲锌镉 SPECT(CZT-SPECT) 心肌灌注显像(MPI) 典型图像(每个切面取 1 帧)。A. 高剂量组患者(女,63 岁) 3 min(第 1 排)与 6 min(第 2 排)静息显像与 2 min(第 3 排)、4 min(第 4 排)负荷显像示灌注正常,注射剂量为静息 296 MBq,负荷 888 MBq,图像质量评价均为优秀;B. 低剂量组患者(女,78 岁) 4 min(第 1 排)与 8 min(第 2 排)静息显像与 3 min(第 3 排)、6 min(第 4 排)负荷显像示灌注正常,注射剂量为静息 155 MBq,负荷 481 MBq

表 2 高剂量组 51 例可疑或确诊冠心病患者碲锌镉 SPECT 显像不同采集时间的参数比较[$\bar{x} \pm s$ 或 $M(P_{25}, P_{75})$]

采集时间	心肌灌注参数			左心功能参数		
	SRS(分)	SSS(分)	TPD(%)	LVEDV(ml)	LVESV(ml)	LVEF(%)
静息 3 min	1(0,2)	-	1(0,2)	74.3±26.1	22.0(15.0,32.0)	67.0(62.0,72.0)
静息 6 min	0(0,2)	-	1(0,2)	72.2±24.3	21.0(14.0,35.0)	68.0(63.0,73.0)
负荷 2 min	-	3(0,4)	2(0,4)	70.3±27.3	19.0(12.0,30.0)	70.2±11.7
负荷 4 min	-	3(0,4)	2(0,4)	71.7±25.9	19.0(12.0,30.0)	70.9±9.9
<i>t</i> 或 <i>z</i> 值	1.787	1.945	-1.137 ^a 、1.789 ^b	2.857 ^a 、-2.581 ^b	-0.372 ^a 、-1.294 ^b	-0.896 ^a 、-0.624 ^b
<i>P</i> 值	0.083	0.058	0.261 ^a 、0.081 ^b	0.006 ^a 、0.013 ^b	0.710 ^a 、0.202 ^b	0.370 ^a 、0.535 ^b
<i>r</i> 值	0.962	0.981	0.977 ^a 、0.988 ^b	0.980 ^a 、0.990 ^b	0.981 ^a 、0.993 ^b	0.929 ^a 、0.776 ^b

注:“-”为无数据;^a 静息 2 个采集时间点的参数比较,^b 负荷 2 个采集时间点的参数比较,相关分析均 $P < 0.05$;LVEDV 为左心室舒张末期容积,LVEF 为左心室射血分数,LVESV 为左心室收缩末期容积,SRS 为静息总积分,SSS 为负荷总积分,TPD 为总灌注缺损;冠心病为冠状动脉粥样硬化性心脏病的简称

表 3 低剂量组 50 例可疑或确诊冠心病患者碲锌镉 SPECT 显像不同采集时间的参数比较[$\bar{x} \pm s$ 或 $M(P_{25}, P_{75})$]

采集时间	心肌灌注参数			左心功能参数		
	SRS(分)	SSS(分)	TPD(%)	LVEDV(ml)	LVESV(ml)	LVEF(%)
静息 4 min	2(1,3)	-	1(0,4)	76.7±23.7	29.3±17.3	64.6±11.7
静息 8 min	2(1,3)	-	1(0,3)	75.0±23.4	29.1±16.9	63.8±11.3
负荷 3 min	-	2(1,5)	2(1,4)	72.8±20.6	26.0(13.8,32.3)	68.4±11.6
负荷 6 min	-	2(0,3)	2(0,3)	73.5±21.4	25.5(13.0,33.0)	68.8±11.9
<i>t</i> 或 <i>z</i> 值	-1.730	-1.963	-1.617 ^a 、-1.644 ^b	2.655 ^a 、-1.805 ^b	0.500 ^a 、0.680 ^b	1.597 ^a 、-1.196 ^b
<i>P</i> 值	0.084	0.055	0.106 ^a 、0.107 ^b	0.011 ^a 、0.077 ^b	0.619 ^a 、0.500 ^b	0.117 ^a 、0.237 ^b
<i>r</i> 值	0.919	0.962	0.959 ^a 、0.976 ^b	0.982 ^a 、0.991 ^b	0.984 ^a 、0.990 ^b	0.963 ^a 、0.980 ^b

注:“-”为无数据;^a 静息 2 个采集时间点的参数比较,^b 负荷 2 个采集时间点的参数比较,相关分析均 $P < 0.001$

4. 定量参数的一致性分析。Bland-Altman 分析高剂量组静息显像采集 3 min 与 6 min、负荷显像 2 min 与 4 min,低剂量组静息显像采集 4 min 与 8 min、负荷显像 3 min 与 6 min 所测得的 SRS 或 SSS、TPD 及 LVEF 位于一致性界限外的点均 $< 5\%$, 提示一致

性较好(图 2,3)。

讨 论

SPECT MPI 是一种无创心脏影像检查技术,同时结合心电门控技术,可一站式获取心肌灌注功能

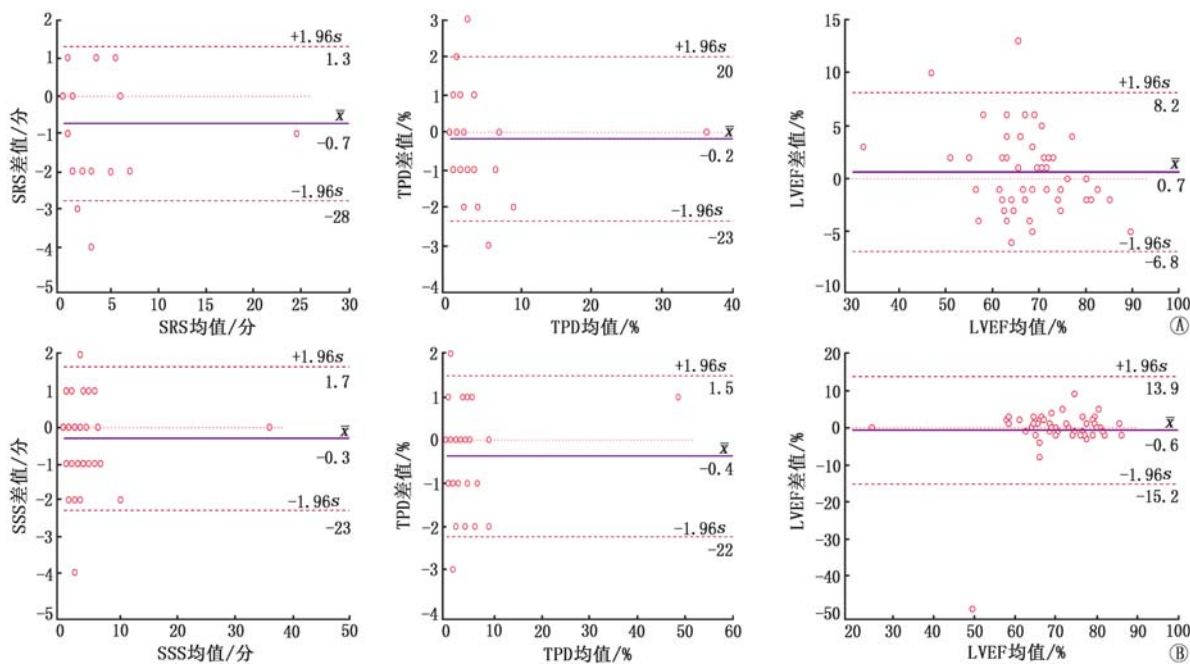


图 2 高剂量组 51 例可疑或确诊冠状动脉粥样硬化性心脏病(简称冠心病)患者铯铊 SPECT 显像定量参数的 Bland-Altman 一致性分析图。A.静息显像;B.负荷显像;LVEF 为左心室射血分数, SRS 为静息总积分, SSS 为负荷总积分, TPD 为总灌注缺损

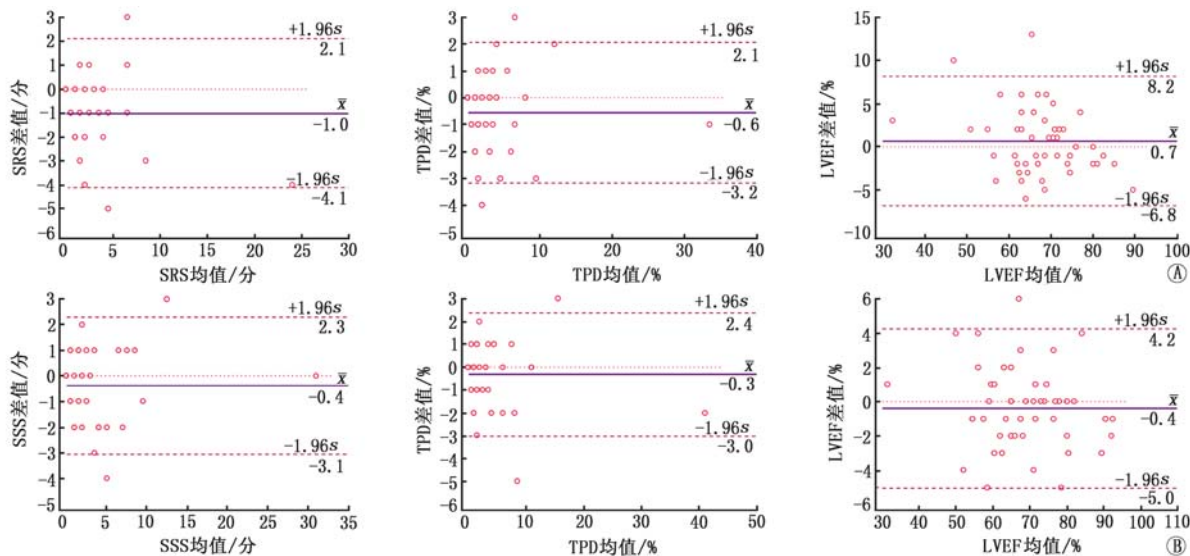


图 3 低剂量组 50 例可疑或确诊冠心病患者铯铊 SPECT 显像定量参数的 Bland-Altman 一致性分析图。A.静息显像;B.负荷显像

情况及左心室功能数据^[10],在冠心病的诊断、危险分层及预后评估等方面具有重要作用^[11]。目前国内大多数医院配备的传统 SPECT 以碘化钠晶体材料作为探测器,由于其光子敏感性低等固有特性,行 MPI 时需要较长的时间(15~20 min)及较高的显像剂剂量才能获得满足诊断要求的图像。如何以较低的显像剂剂量快速、准确地完成 MPI 是亟需解决的问题。CZT-SPECT 的出现与临床应用为上述问题的解决带来了希望。CZT-SPECT 的能量分辨率、光

子敏感性、空间分辨率分别为传统 SPECT 的 1.65 倍、3~5 倍、1.7~2.5 倍^[12],并且 CZT 探测器较高的计数率使得相同剂量条件下获取相同计数的时间可明显缩短,并能保持图像诊断质量^[13]。

目前,CZT-SPECT 设备厂商推荐的采集时间主要来自国外的实践经验。国外相关研究示,保持图像质量的高、低剂量方案静息/负荷 MPI 最短/优采集时间可低至 2 min/3 min^[2]、3 min/5 min^[3]。本研究结果表明:CZT-SPECT MPI 一日法高剂量方案

下,静息/负荷显像最优采集时间分别为 3 min/2 min,低剂量方案为 4 min/3 min,此采集时间对应的灌注参数(灌注积分、TPD)及 LVEF 与最长采集时间的参数差异并无统计学意义(均 $P>0.05$),结果间的相关性和一致性好,采用此采集时间方案能进一步缩短总显像时间,在保证图像质量的同时,保持 MPI 定量参数的一致性和准确性,本研究结果与国外类似研究结果基本相似^[3]。虽然本研究部分不同采集时间下 LVEDV 的测定结果差异有统计学意义,但 LVEF 差异并无统计学意义,这可能与心内膜边界的识别勾画有关,笔者认为这些差异没有实际的临床意义。

优化采集时间方案,对于患者而言,能有效提高舒适度、减少移动的可能;对核医学科而言,可提高科室患者流通量,提高设备使用率。同时,低剂量方案可一定程度上节约核素用量,降低辐射剂量。有研究表明 CZT-SPECT MPI 若采用单负荷(stress-only)方法,则有效剂量可降低至 0.99 mSv^[14]。本研究也存在局限性;因病例数量有限,并未依据体质量或体质量指数进行分组探讨;因入组患者冠状动脉造影数据不全,并未对不同采集时间 MPI 诊断的准确性进行比较,这些方面需更进一步研究。

总之,对于 NM530c 机型 MPI 而言,一日法低剂量、高剂量方案静息/负荷显像的采集时间至少为 4 min/3 min 和 3 min/2 min,即可获得满意的图像质量、准确的半定量数据,具有较好的临床实用价值。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

[1] Ben-Haim S, Kennedy J, Keidar Z. Novel cadmium zinc telluride devices for myocardial perfusion imaging-technological aspects and clinical applications[J]. *Semin Nucl Med*, 2016, 46(4): 273-285. DOI:10.1053/j.semnuclmed.2016.01.002.

[2] 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. DOI:10.2967/jnumed.109.065532.

[3] Duvall WL, Croft LB, Ginsberg ES, et al. Reduced isotope dose and imaging time with a high-efficiency CZT SPECT camera[J]. *J Nucl Cardiol*, 2011, 18(5): 847-857. DOI:10.1007/s12350-011-9379-7.

[4] Verger A, Imbert L, Yagdigul Y, et al. Factors affecting the myocardial activity acquired during exercise SPECT with a high-sensi-

tivity cardiac CZT camera as compared with conventional Anger camera[J]. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*, 2014, 41(3): 522-528. DOI:10.1007/s00259-013-2617-2.

[5] Dorbala S, Ananthasubramaniam K, Armstrong IS, et al. Single photon emission computed tomography (SPECT) myocardial perfusion imaging guidelines: instrumentation, acquisition, processing, and interpretation[J]. *J Nucl Cardiol*, 2018, 25(5): 1784-1846. DOI:10.1007/s12350-018-1283-y.

[6] Henzlva MJ, Duvall WL, Einstein AJ, et al. ASNC imaging guidelines for SPECT nuclear cardiology procedures: stress, protocols, and tracers[J]. *J Nucl Cardiol*, 2016, 23(3): 606-639. DOI:10.1007/s12350-015-0387-x.

[7] 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.

[8] Cerqueira MD, Weissman NJ, Dilsizian V, et al. Standardized myocardial segmentation and nomenclature for tomographic imaging of the heart. A statement for healthcare professionals from the Cardiac Imaging Committee of the Council on Clinical Cardiology of the American Heart Association[J]. *J Nucl Cardiol*, 2002, 9(2): 240-245.

[9] Germano G, Kavanagh PB, Slomka PJ, et al. Quantitation in gated perfusion SPECT imaging: the Cedars-Sinai approach[J]. *J Nucl Cardiol*, 2007, 14(4): 433-454. DOI:10.1016/j.nuclcard.2007.06.008.

[10] Daou D, Sabbah R, Coaguila C, et al. A new era in gated myocardial perfusion imaging: feasibility of data-driven cardiac contraction gating with multiple pinhole CZT SPECT[J]. *J Nucl Cardiol*, 2018, 25(1): 257-268. DOI:10.1007/s12350-017-1010-0.

[11] Berman DS, Hachamovitch R, Shaw LJ, et al. Roles of nuclear cardiology, cardiac computed tomography, and cardiac magnetic resonance: noninvasive risk stratification and a conceptual framework for the selection of noninvasive imaging tests in patients with known or suspected coronary artery disease [J]. *J Nucl Med*, 2006, 47(7): 1107-1118.

[12] 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.

[13] 吴大勇,汪蕾,马荣政,等.心脏专用碲-锌-镉 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.

[14] Einstein AJ, Johnson LL, DeLuca AJ, et al. Radiation dose and prognosis of ultra-low-dose stress-first myocardial perfusion SPECT in patients with chest pain using a high-efficiency camera[J]. *J Nucl Med*, 2015, 56(4): 545-551. DOI:10.2967/jnumed.114.150664.

(收稿日期:2019-06-20)