

IQ-SPECT 与配置低能高分辨准直器 SPECT 的临床应用比较

韩凯 张海龙 张宗耀 孙晓昕 汪蕾 方伟

北京协和医学院、中国医学科学院阜外医院核医学科, 北京 100037

通信作者: 方伟, Email: nuclearfw@126.com

【摘要】 目的 探讨核素心肌灌注显像中,应用 IQ-SPECT 和常规配置低能高分辨 (LEHR) 准直器 SPECT (LEHR-SPECT) 在测定心功能和血流灌注参数方面的差异,以及经过散射校正 (SC) 和 CT 衰减校正 (AC) 后的变化。方法 回顾性分析 2020 年 5 月至 2020 年 9 月期间于阜外医院行 SPECT 心肌灌注显像的患者 80 例 [男 58 例、女 22 例,年龄 (57±10) 岁]。根据二维超声心动图测得的体表面积标准化的左心室舒张末期期内直径将患者分为 2 组: A 组 (34 例), 有明显的左心室增大; B 组 (46 例), 左心室未见明显增大。所有患者均行 LEHR-SPECT 和 IQ-SPECT 门控静息心肌灌注显像, 测定左心室舒张末期容积 (EDV)、收缩末期容积 (ESV)、射血分数 (EF)、静息总积分 (SRS) 和心肌总灌注缺损程度 (TPD), 并比较 2 种方法之间及 SC 和 AC 前后上述参数的变化。采用配对 *t* 检验和 Wilcoxon 符号秩检验分析数据, 采用 Pearson 相关或 Spearman 秩相关分析和 Bland-Altman 评价 2 种方法的相关性和一致性。结果 对于 A 组患者, 经过 SC 和 AC 后, IQ-SPECT 测得的 EDV、EF 和 SRS 显著低于 LEHR-SPECT [EDV: (257±137) 和 (276±154) ml, EF: (21±11)% 和 (26±13)%, SRS: 17(6, 25) 和 18(8, 28); *t* 值: -2.63, -7.46, *z* = -2.14, 均 *P* < 0.05]; 2 种方法测得的各项参数均有较好的相关性 (*r* 值: 0.965, 0.969, 0.967, *r_s* 值: 0.920, 0.960, 均 *P* < 0.001) 和一致性。对于 B 组患者, 经过 SC 和 AC 后, IQ-SPECT 测得的 EDV 和 EF 显著低于 LEHR-SPECT [EDV: (96±40) 和 (107±39) ml, EF: (46±15)% 和 (54±16)%; *t* 值: -6.23, -10.71, *P* 值: 0.001, 0.001]; IQ-SPECT 经过 SC 和 AC 后, SRS 和 TPD 均较未校正显著降低 [SRS: 2(1, 4) 和 5(3, 11), TPD: 3%(1%, 5%) 和 7%(3%, 12%); *z* 值: -4.11, -4.16, 均 *P* < 0.001]; 2 种方法测得的各项参数也有较好的相关性 (*r* 值: 0.956, 0.978, 0.958, *r_s* 值: 0.926, 0.944, 均 *P* < 0.001) 和一致性。结论 IQ-SPECT 与 LEHR-SPECT 测得的心功能和血流灌注指标有较好的相关性和一致性, IQ-SPECT 可有效缩短采集时间, 在临床应用方面更具有优势。

【关键词】 心肌灌注显像; 体层摄影术, 发射型计算机, 单光子; 99m 锝甲氧基异丁基异腈; 图像处理, 计算机辅助

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20201117-00415

Comparison of IQ-SPECT and low energy high-resolution collimator SPECT in clinical application

Han Kai, Zhang Hailong, Zhang Zongyao, Sun Xiaoxin, Wang Lei, Fang Wei

Department of Nuclear Medicine, Fuwai Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100037, China

Corresponding author: Fang Wei, Email: nuclearfw@126.com

【Abstract】 **Objective** To investigate differences in cardiac function and perfusion parameters measured by IQ-SPECT and low energy high-resolution (LEHR)-SPECT, as well as effects of scattering correction (SC) and CT attenuation correction (AC) on myocardial perfusion imaging. **Methods** From May 2020 to September 2020, 80 patients (58 males, 22 females, age (57±10) years) who underwent SPECT myocardial perfusion imaging were retrospectively enrolled in Fuwai Hospital. According to the standardized left ventricular end-diastolic diameter of body surface measured by two-dimensional echocardiography, patients were divided into 2 groups: A group (*n*=34) with significantly enlarged left ventricle and B group (*n*=46) with no significant enlargement of left ventricle. LEHR-SPECT and IQ-SPECT gated myocardial perfusion imaging were performed in all patients. Left ventricular end-diastolic volume (EDV), end-systolic volume (ESV), ejection fraction (EF), summed rest score (SRS) and total perfusion defect (TPD) were measured. Parameters measured by two methods and differences before and after SC and AC were compared by using paired *t* test and Wilcoxon signed rank test. The correlation was analyzed by Pearson correlation or Spearman rank correlation analyses, and the consistency was analyzed by Bland-Altman analysis. **Results** In A group, EDV, EF and SRS measured by IQ-SPECT were significantly lower than those

assessed by LEHR-SPECT after SC and AC (EDV: (257 ± 137) vs (276 ± 154) ml, EF: $(21 \pm 11)\%$ vs $(26 \pm 13)\%$, SRS: $17(6, 25)$ vs $18(8, 28)$; t values: $-2.63, -7.46, z = -2.14$, all $P < 0.05$); all parameters measured by LEHR-SPECT and IQ-SPECT had well correlation (r values: $0.965, 0.969, 0.967, r_s$ values: $0.920, 0.960$, all $P < 0.001$) and consistency. In B group, EDV and EF measured by IQ-SPECT were significantly lower than those assessed by LEHR-SPECT after SC and AC (EDV: (96 ± 40) vs (107 ± 39) ml, EF: $(46 \pm 15)\%$ vs $(54 \pm 16)\%$; t values: $-6.23, -10.71$, both $P = 0.001$); SRS and TPD measured by IQ-SPECT after SC and AC were significantly lower than non-SC and non-AC (SRS: $2(1, 4)$ vs $5(3, 11)$, TPD: $(3\% (1\%, 5\%))$ vs $7\% (3\%, 12\%)$; z values: $-4.11, -4.16$, both $P < 0.001$); all parameters measured by LEHR-SPECT and IQ-SPECT had well correlation (r values: $0.956, 0.978, 0.958, r_s$ values: $0.926, 0.944$, all $P < 0.001$) and consistency. **Conclusions** There are good correlation and consistency of left ventricular function and myocardial perfusion parameters acquired by IQ-SPECT and LEHR-SPECT. Moreover, IQ-SPECT is able to shorten acquisition time, resulting in great potential in clinical application.

【Key words】 Myocardial perfusion imaging; Tomography, emission-computed, single-photon; Technetium Tc 99m sestamibi; Image processing, computer-assisted

DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20201117-00415

SPECT 心肌灌注显像在冠状动脉粥样硬化性心脏病(简称冠心病)心肌缺血诊断、治疗决策和预后评估中均发挥着重要的作用,同时 CT 的配备以及规范化操作使得 SPECT 能够进行更为细致的融合显像^[1-2]。近年来,专门用于心肌灌注显像的新型 SPECT 及采集技术不断发展,其目标主要是为了进一步提高诊断效率,包括缩短采集时间和减少放射性药物用量^[3-5]。为实现这一目的,研究者通过不同的技术方式提高心脏扫描的灵敏度,如采用碲镉镅(cadmium-zinc-telluride, CZT)晶体探头、针孔准直器、多焦点准直器等,其中 IQ-SPECT 采用了多焦点、锥形孔的 SMARTZOOM 准直器,使心脏始终处于最敏感的中心区域,有效增加了心脏采集的计数率,从而提高了灵敏度;在放射性药物用量不变的情况下,采集时间可缩短至配置低能高分辨(low energy high-resolution, LEHR)准直器 SPECT (LEHR-SPECT)的 $1/4$ ^[6]。有研究认为 IQ-SPECT 同样具有较好的诊断效能,但与传统 LEHR-SPECT 相比,重建后的图像会有所差异^[7-8]。但多数研究采用的是心脏模型比较^[9],直接的临床对比研究相对较少。本研究将分别比较 IQ-SPECT 和 LEHR-SPECT 在左心室容积正常和增大的 2 类患者中,心肌灌注图像半定量评分和心功能参数测定结果是否存在差异。

资料与方法

1.研究对象。回顾性分析阜外医院 2020 年 5 月至 2020 年 9 月期间行 SPECT 心肌灌注显像的患者 80 例,其中男 58 例、女 22 例,年龄 (57 ± 10) 岁。根据二维超声心动图测得的体表面积标准化的左心室舒张末期内直径^[10],将患者分为 2 组:A 组 34 例,有明显的左心室增大,即体表面积标准化的左心室舒张末期内直径 > 58 mm(男性)或 > 52 mm(女性),其中 12 例诊断为冠心病、22 例诊断为扩张型心肌病;B

组 46 例,左心室未见明显增大,即体表面积标准化的左心室舒张末期内直径 ≤ 58 mm(男性)或 ≤ 52 mm(女性)。本研究符合《赫尔辛基宣言》的原则。

2.图像采集。所有患者均行 LEHR-SPECT 和 IQ-SPECT 门控静息心肌灌注显像。显像剂为^{99m}Tc-甲氧基异丁基异腈(methoxyisobutylisonitrile, MIBI),由原子高科股份有限公司提供,放化纯 $> 95\%$,注射剂量为 740 MBq。注射后 1 h 开始进行显像,先进行 LEHR-SPECT(LEHR 准直器),随后更换准直器,继续进行 IQ-SPECT(SMARTZOOM 准直器),显像设备为德国 Siemens Symbia T16 型 SPECT/CT 仪,采集参数见表 1。LEHR-SPECT 和 IQ-SPECT 均进行散射校正(scatter correction, SC)和 CT 衰减校正(attenuation correction, AC),SC 能窗为 $140(\pm 7.5\%)$ keV, AC 采集参数为管电压 130 kV,管电流 25 mA,层厚 5 mm,螺距 0.95。

表 1 LEHR-SPECT 和 IQ-SPECT 心肌灌注显像的采集参数

参数	LEHR-SPECT	IQ-SPECT
矩阵	128×128	128×128
放大倍数	1.45	1.0
双探头夹角(°)	90	76
采集时间(s/帧)	20(体质量 > 114 kg 则 25)	9(体质量 > 114 kg 则 14)
采集帧数(帧)	30	17
门控帧数(帧)	8	8
旋转角度(°)	180(RAO 45 至 LPO -45)	208(RAO 59 至 LPO -45)
探头类型	LEHR	SMARTZOOM

注:LEHR 为低能高分辨,LPO 为左后斜位,RAO 为右前斜位

3.图像处理与数据分析。所有图像均采用 Flash 三维软件(德国 Siemens 公司)进行图像重建。LEHR-SPECT 采用有序子集最大期望值迭代法进行图像重建,4次迭代,8个子集;IQ-SPECT 采用有序

子集共轭梯度法进行图像重建,10 次迭代,3 个子集。重建后的图像采用定量门控 SPECT (quantitative gated SPECT, QGS) 软件(美国 Cedars-Sinai 公司)测得左心室功能参数,包括左心室舒张末期容积(end-diastolic volume, EDV),收缩末期容积(end-systolic volume, ESV)和射血分数(ejection fraction, EF)。采用定量灌注 SPECT (quantitative perfusion SPECT, QPS) 软件(美国 Cedars-Sinai 公司)测得左心室心肌灌注半定量评分,包括静息总积分(summed rest score, SRS)和心肌总灌注缺损程度(total perfusion defect, TPD)。

4.统计学处理。采用 IBM SPSS 21.0 软件进行统计学分析。符合正态分布的定量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示;不符合正态分布的定量资料用 $M(Q_1, Q_3)$ 表示。2 种方法测得的 EDV、ESV、EF 采用配对 t 检验进行比较;SRS、TPD 采用 Wilcoxon 符号秩检验进行比较。采用 Pearson 相关或 Spearman 秩相关分析和 Bland-Altman 评价 2 种方法的相关性和一致性。 $P <$

0.05 为差异或相关性有统计学意义。

结 果

1.心脏有明显增大(A 组)患者的检测结果(表 2;图 1)。对于 LEHR-SPECT, 无论是否进行 SC 和 AC,测得的 EDV、ESV 和 EF 差异均无统计学意义(t 值:0.62~1.77,均 $P > 0.05$);而 SRS 和 TPD 经过 SC 和 AC 后显著降低(z 值:-2.14、-2.36, P 值:0.032、0.018)。对于 IQ-SPECT, 无论是否进行 SC 和 AC 校正,EDV、ESV、EF、SRS 和 TPD 差异均无统计学意义(t 值:-1.07~0.82, z 值:-0.70、-0.41,均 $P > 0.05$)。如果不进行 SC 和 AC 校正,IQ-SPECT 测得的 EDV、EF、SRS 和 TPD 明显低于 LEHR-SPECT(t 值:-3.80、-7.48, z 值:-3.32、-3.71,均 $P < 0.05$);而经过 SC 和 AC 校正后,IQ-SPECT 测得的 EDV、EF 和 SRS 也显著低于 LEHR-SPECT 的测量结果(t 值:-2.63、-7.46, $z = -2.14$,均 $P < 0.05$)。经过 SC 和 AC 校正后,LEHR-SPECT 和 IQ-SPECT 测得的各项参数均有相关性(r 值:0.965、0.969、0.967, r_s 值:

表 2 34 例左心室增大(A 组)患者经 LEHR-SPECT 和 IQ-SPECT 测得的各项参数比较 [$\bar{x} \pm s$ 或 $M(Q_1, Q_3)$]

参数	LEHR-SPECT				IQ-SPECT			
	NSC+NAC	SC+AC	检验值	P 值	NSC+NAC	SC+AC	检验值	P 值
EDV (ml)	273±152	276±154	1.77	0.085	255±136 ^b	257±137 ^b	0.82	0.416
ESV (ml)	210±128	213±132	1.57	0.126	206±118	206±118	0.25	0.807
EF (%)	26±13	26±13	0.62	0.540	21±11 ^b	21±11 ^b	-1.07	0.292
SRS	21(9, 31)	18(8, 28)	-2.14 ^a	0.032	18(7, 26) ^b	17(6, 25) ^b	-0.70 ^a	0.484
TPD (%)	30(12, 42)	25(11, 38)	-2.36 ^a	0.018	25(11, 38) ^b	25(8, 36)	-0.41 ^a	0.686

注:^a为 z 值,余为 t 值;^b为低能高分辨 (LEHR)-SPECT 与 IQ-SPECT 相应参数相比, $P < 0.05$;AC 为衰减校正,EDV 为舒张末期容积,EF 为射血分数,ESV 为收缩末期容积,NAC 为未进行 AC,NSC 为未进行散射校正(SC),SRS 为静息总积分,TPD 为心肌总灌注缺损程度

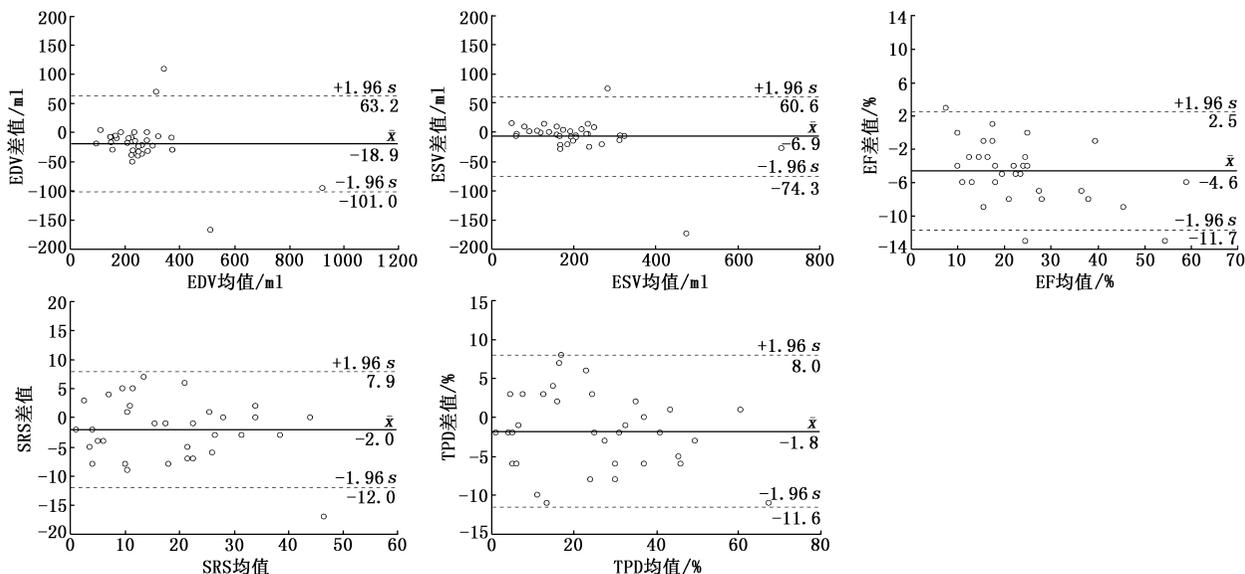


图 1 34 例左心室增大(A 组)患者经低能高分辨 (LEHR)-SPECT 和 IQ-SPECT 测得的左心室舒张末期容积(EDV)、收缩末期容积(ESV)、射血分数(EF)、静息总积分(SRS)和心肌总灌注缺损程度(TPD)的 Bland-Altman 分析图

0.920、0.960, 均 $P < 0.001$)。2 种方法测得的各项参数的一致性较好(图 1)。

2. 无心脏增大(B 组)患者的检测结果(表 3; 图 2)。对于 LEHR-SPECT 和 IQ-SPECT, 无论是否进行 SC 和 AC, 测得的 EDV、ESV 和 EF 差异均无统计学意义(t 值: $-1.35 \sim 0.42$, 均 $P > 0.05$); 而 SRS 和 TPD 经过 SC 和 AC 后均显著降低(z 值: $-4.16 \sim -2.08$, 均 $P < 0.05$)。如果不进行 SC 和 AC, IQ-SPECT 测得的 EDV 和 EF 均明显低于 LEHR-SPECT(t 值: -6.67 、 -10.43 , P 值: 0.001 、 0.001); 而经过 SC 和 AC 后, IQ-SPECT 测得的 EDV 和 EF 也显著低于 LEHR-SPECT(t 值: -6.23 、 -10.71 , P 值: 0.001 、 0.001)。经过 SC 和 AC 后, LEHR-SPECT 和 IQ-SPECT 测得的各项参数均有相关性(r 值: 0.956 、 0.978 、 0.958 , r_s 值: 0.926 、 0.944 , 均 $P < 0.001$)。2 种方法测得的各项参数的一致性较好(图 2)。

讨 论

IQ-SPECT 主要有 3 个特征: 一是使用 SMART-

ZOOM 多焦点准直器, 视野中央为扇形, 而边缘为平行孔, 可放大视野中心的心脏区域^[11]; 二是被设计成为在以心脏为中心、半径为 28 cm 的轨道旋转, 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^[4]; 三是采用 Flash 三维高速图像重建方法, 即有序子集共轭梯度法。利用心脏模型的研究发现, 当采集时间相同时, IQ-SPECT 图像的信噪比比 LEHR-SPECT 高, 图像质量更好^[9]。

研究发现, IQ-SPECT 采集 4 min 与 LEHR-SPECT 采集 21 min 2 种方案相比有很高的诊断一致性, 用于负荷心肌灌注显像时, 两者的诊断符合率为 97%; 静息心肌灌注显像时, 两者的诊断符合率为 91%; 总的符合率为 96%^[7]。在采用门控技术检测左心室功能参数方面, IQ-SPECT 测得的 EF 与平衡法核素心室显像和心脏磁共振成像测得的 EF 均具有较好的相关性^[12]。另一项研究还发现, 对于容积较小的心室($ESV < 20$ ml), IQ-SPECT 测得的心功

表 3 46 例左心室正常(B 组)患者经 LEHR-SPECT 和 IQ-SPECT 测得的各项参数比较 [$\bar{x} \pm s$ 或 $M(Q_1, Q_3)$]

参数	LEHR-SPECT				IQ-SPECT			
	NSC+NAC	SC+AC	检验值	P 值	NSC+NAC	SC+AC	检验值	P 值
EDV (ml)	107±39	107±39	0.15	0.883	96±41 ^b	96±40 ^b	-0.80	0.937
ESV (ml)	54±40	54±40	0.42	0.675	57±43	57±42	-0.37	0.717
EF (%)	54±16	54±16	0.20	0.844	47±15 ^b	46±15 ^b	-1.35	0.183
SRS	4(2, 9)	3(1, 7)	-2.08 ^a	0.037	5(3, 11)	2(1, 4)	-4.11 ^a	<0.001
TPD (%)	5(3, 10)	3(1, 7)	-3.43 ^a	0.001	7(3, 12)	3(1, 5)	-4.16 ^a	<0.001

注: ^a 为 z 值, 余为 t 值; ^b 为低能高分辨(LEHR)-SPECT 与 IQ-SPECT 相应参数相比, $P < 0.05$; AC 为衰减校正, EDV 为舒张末期容积, EF 为射血分数, ESV 为收缩末期容积, NAC 为未进行 AC, NSC 为未进行散射校正(SC), SRS 为静息总评分, TPD 为心肌总灌注缺损程度

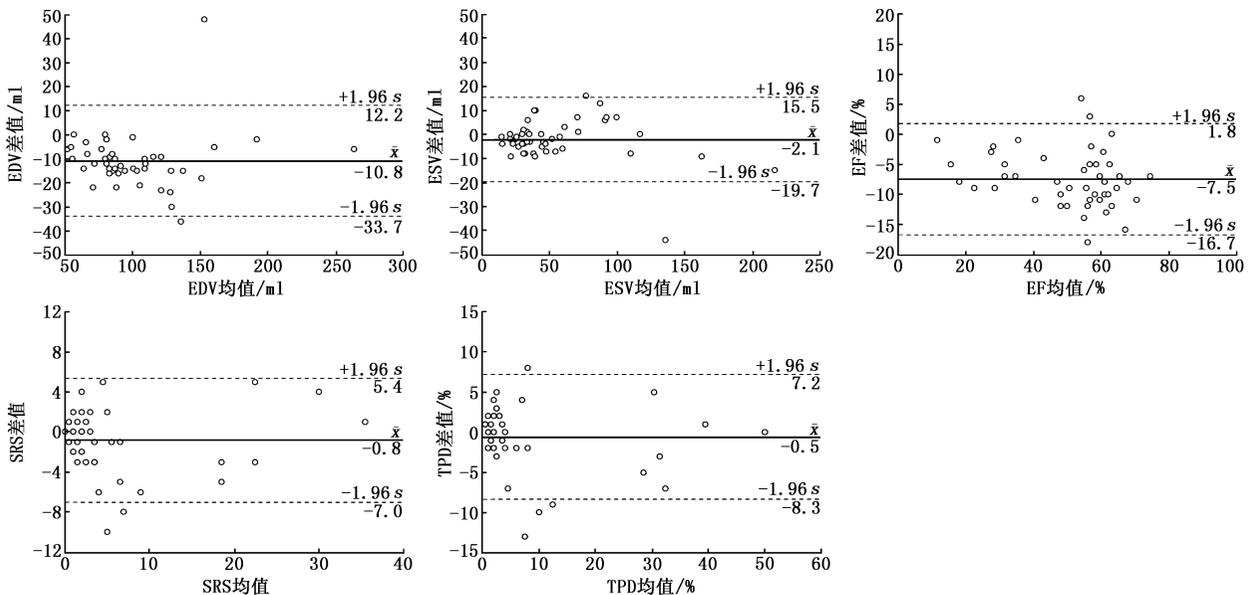


图 2 46 例左心室正常(B 组)患者经低能高分辨(LEHR)-SPECT 和 IQ-SPECT 测得的左心室舒张末期容积(EDV)、收缩末期容积(ESV)、射血分数(EF)、静息总积分(SRS)和心肌总灌注缺损程度(TPD)的 Bland-Altman 分析图

能参数与 LEHR-SPECT 差异很小^[13]。

卫华等^[14]发现 AC 和 SC 后, IQ-SPECT 左心室心尖、前壁及间壁的放射性分布更加稀疏, 下壁部分没有明显变化。本研究也得出了相似的结果, 同时还发现 IQ-SPECT 的下壁得到了补偿。在本研究中, 无论是否进行 AC 和 SC, IQ-SPECT 测的 EDV 和 EF 均小于 LEHR-SPECT 方法测定的结果, 这与以往的研究结果相似^[4,7-8,15]。其原因有以下几点: 一是 IQ-SPECT 分辨率高, 勾画的室壁较小, 左心室的 EDV 测得较小, 导致 EF 较低; 二是 IQ-SPECT 的算法包含了对 SMARTZOOM 准直器的准直器-探测器响应补偿^[16], 因此可以产生更高的对比度或更高的空间分辨率, 由于心脏 ESV 相对较小, 受部分容积效应的影响, 从而略微改变了左心室的体积; 三是心肌在 IQ-SPECT 图像中比在 LEHR-SPECT 图像中更短更厚^[8]; 四是在 IQ-SPECT 中有限的视图数量会导致对心室容积的低估, Horiguchi 等^[17]曾发现, 将视图次数从 17 次增加到 36 次, 得到的图像与 LEHR-SPECT 获得的图像结果更为相似。

有研究发现, IQ-SPECT 和 LEHR-SPECT 的左心室 EF 测量一致性区间的波动幅度超过了 30%, 故该研究认为两者是不可互换的^[18]。在评估心脏功能状态时, 应谨慎使用 IQ-SPECT 采集的数据, 一般认为 2 种方案测得的 EF 波动范围在 10% 内是可以接受的^[19]。本研究中 2 种方法 AC 和 SC 后的数据比较并未出现明显差异, Bland-Altman 分析显示 2 种方法一致性好。

本研究还发现对于左心室增大的患者, IQ-SPECT 与 LEHR-SPECT 的血流灌注半定量指标存在一定的差异, 以往的研究也发现过类似的现象^[20]。IQ-SPECT 测定的 SRS 和 TPD 小于 LEHR-SPECT, 可能是由于 IQ-SPECT 有更高的灵敏度和计数率, 因此 TPD 小于 LEHR-SPECT。此外, 前面提及的 IQ-SPECT 获得的心肌图像更厚, 可能也是产生差异的原因之一。

无论对于 IQ-SPECT 还是 LEHR-SPECT, AC 和 SC 都是十分重要的问题。以往研究已证实, 对于 LEHR-SPECT 而言, 进行 AC 和 SC 能够有效地改善下壁伪影, 减少假阳性诊断, 但有时也会出现过度校正的现象^[21-22]。本研究结果也发现 LEHR-SPECT 进行 AC 和 SC 后, SRS 和 TPD 会有显著差异。而对于 IQ-SPECT 来说, 心尖部受到的衰减影响与 LEHR 基本相同, 而远离心尖的部位, 探测器捕获到的是以一定角度入射的光子, 其穿过的组织和距离比平行

线的光子要远得多, 因此心尖部的衰减最小, 而越接近基底段衰减越显著。由此可见, IQ-SPECT 在临床应用, AC 和 SC 更应该受到重视, 但其对诊断结果实际影响的程度需要更大病例组的研究进一步予以证实。本研究中对于左心室正常者, IQ-SPECT 经过 AC 和 SC 后, SRS 和 TPD 发生显著变化。

综上所述, 本研究主要探讨了 IQ-SPECT 的临床应用价值。以往 IQ-SPECT 与 LEHR-SPECT 的比较研究结果并不完全一致。本研究依据实际临床应用的心功能和血流灌注参数的测量结果, 得出 IQ-SPECT 与 LEHR-SPECT 2 种方法有较好的相关性和一致性, 因此, IQ-SPECT 用于心肌灌注显像是可靠的。同时, IQ-SPECT 具有更高的灵敏度和分辨率, 在临床应用上可以有效缩短采集时间, 因此在临床应用方面更具优势。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 韩凯: 论文撰写、统计分析; 张海龙、张宗耀、孙晓昕、汪蕾: 研究实施、论文撰写; 方伟: 研究指导、论文修改、经费支持

参 考 文 献

- [1] 石洪成. SPECT/CT 的临床应用: 在优势互补中寻求亮点[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2017, 37(7): 385-387. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2017.07.001.
Shi HC. Clinical application of SPECT/CT: using its advantage over other medical imaging modalities[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2017, 37(7): 385-387. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2017.07.001.
- [2] 中华医学会核医学分会《SPECT 心肌灌注显像技术与图像操作要点专家共识(2019 版)》编写委员会, 中华医学核医学分会“基于中国正常人群的心肌灌注 SPECT 定量分析多中心研究”项目组. SPECT 心肌灌注显像技术与图像处理要点专家共识(2019 版)[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2020, 40(1): 32-36. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2020.01.007.
Writing Committee of Chinese Society of Nuclear Medicine for the 2019 Expert Consensus for Key Points of Technique and Image Process during SPECT Myocardial Perfusion Imaging, Chinese Society of Nuclear Medicine Expert Group of Multi-center Study on Quantitative Analysis of SPECT Myocardial Perfusion Imaging in Normal Chinese Population. 2019 Expert consensus for key points of technique and image process during SPECT myocardial perfusion imaging[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2020, 40(1): 32-36. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-2848.2020.01.007.
- [3] Joergensen T, Hansson SH. Evaluation of the left ventricular ejection fraction with gated IQ-SPECT myocardial perfusion imaging[J]. J Nucl Med Technol, 2015, 43(3): 193-200. DOI: 10.2967/jnmt.115.155382.
- [4] Lecchi M, Malaspina S, Scabbio C, et al. Myocardial perfusion scintigraphy dosimetry: optimal use of SPECT and SPECT/CT technologies in stress-first imaging protocol[J]. Clin Transl Imaging, 2016, 4(6): 491-498. DOI: 10.1007/s40336-016-0212-9.
- [5] Havel M, Kolacek M, Kaminek M, et al. Myocardial perfusion imaging parameters: IQ-SPECT and conventional SPET system com-

- parison[J]. *Hell J Nucl Med*, 2014, 17(3): 200-203.
- [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] 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.
- [8] Hippeläinen E, Mäkelä T, Kaasalainen T, et al. Ejection fraction in myocardial perfusion imaging assessed with a dynamic phantom: comparison between IQ-SPECT and LEHR[J]. *EJNMMI Phys*, 2017, 4(1): 20. DOI:10.1186/s40658-017-0187-2.
- [9] 周翠红,王猛,金超岭,等. IQ-SPECT 和 LEHR-SPECT 心肌灌注显像的模型研究[J]. *中国医学装备*, 2016, 13(6): 50-52, 53. DOI:10.3969/J.ISSN.1672-8270.2016.06.016.
Zhou CH, Wang M, Jin CL, et al. The study of IQ/SPECT system and LEHR/SPECT system in myocardial perfusion imaging based on phantom[J]. *Chin Med Equip*, 2016, 13(6): 50-52, 53. DOI: 10.3969/J.ISSN.1672-8270.2016.06.016.
- [10] Lang RM, Badano LP, Mor-Avi V, et al. Recommendations for cardiac chamber quantification by echocardiography in adults: an update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging[J]. *J Am Soc Echocardiogr*, 2015, 28(1): 1-39.e14. DOI:10.1016/j.echo.2014.10.003.
- [11] Rajaram R, Bhattacharya M, Ding X, et al. Tomographic performance characteristics of the IQ · SPECT system[C]//2011 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, Valencia, Spain, 2011: 2451-2456. DOI:10.1109/NSSMIC.2011.6152666.
- [12] Pelletier-Galarneau M, Finnerty V, Tan S, et al. Assessment of left ventricular ejection fraction with cardiofocal collimators: comparison between IQ-SPECT, planar equilibrium radionuclide angiography, and cardiac magnetic resonance[J]. *J Nucl Cardiol*, 2019, 26(6): 1857-1864. DOI:10.1007/s12350-018-1251-6.
- [13] Yoneyama H, Shibutani T, Konishi T, et al. Validation of left ventricular ejection fraction with the IQ · SPECT system in small-heart patients[J]. *J Nucl Med Technol*, 2017, 45(3): 201-207. DOI: 10.2967/jnmt.116.188680.
- [14] 卫华,薛及弟,武志芳,等. CT 衰减校正对 IQ-SPECT/CT 和 LEHR-SPECT/CT 心肌灌注显像的影响[J]. *国际放射医学核医学杂志*, 2020, 44(7): 405-410. DOI: 10.3760/cma.j.cn121381-201903062-00054.
Wei H, Xue JD, Wu ZF, et al. Effect of CT attenuation correction on IQ-SPECT/CT and LEHR-SPECT/CT myocardial perfusion imaging[J]. *Int J Radiat Med Nucl Med*, 2020, 44(7): 405-410. DOI:10.3760/cma.j.cn121381-201903062-00054.
- [15] 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.
- [16] Vija AH, Malmin R, Yahil A, et al. A method for improving the efficiency of myocardial perfusion imaging using conventional SPECT and SPECT/CT imaging systems[C]//IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Knoxville, USA, 2010: 3433-3437. DOI:10.1109/NSSMIC.2010.5874444.
- [17] Horiguchi Y, Ueda T, Shiomori T, et al. Validation of a short-scan-time imaging protocol for thallium-201 myocardial SPECT with a multifocal collimator[J]. *Ann Nucl Med*, 2014, 28(8): 707-715. DOI:10.1007/s12149-014-0880-3.
- [18] Leva L, Matheoud R, Sacchetti G, et al. Agreement between left ventricular ejection fraction assessed in patients with gated IQ-SPECT and conventional imaging[J]. *J Nucl Cardiol*, 2020, 27(5): 1714-1724. DOI:10.1007/s12350-018-1457-7.
- [19] Curigliano G, Cardinale D, Suter T, et al. Cardiovascular toxicity induced by chemotherapy, targeted agents and radiotherapy: ESMO Clinical Practice Guidelines[J]. *Ann Oncol*, 2012, 23(Suppl 7): vii155-vii166. DOI:10.1093/annonc/mds293.
- [20] Okuda K, Nakajima K, Matsuo S, et al. Creation and characterization of normal myocardial perfusion imaging databases using the IQ · SPECT system[J]. *J Nucl Cardiol*, 2018, 25(4): 1328-1337. DOI:10.1007/s12350-016-0770-2.
- [21] Fricke H, Fricke E, Weise R, et al. A method to remove artifacts in attenuation-corrected myocardial perfusion SPECT introduced by misalignment between emission scan and CT-derived attenuation maps[J]. *J Nucl Med*, 2004, 45(10): 1619-1625.
- [22] Germano G, Slomka PJ, Berman DS. Attenuation correction in cardiac SPECT: the boy who cried wolf? [J]. *J Nucl Cardiol*, 2007, 14(1): 25-35. DOI:10.1016/j.nuclcard.2006.12.317.

(收稿日期:2020-11-17)