

# 不同 OSEM 参数对<sup>99m</sup>Tc SPECT/CT 定量结果的影响\*

龚成鹏, 胡佳<sup>△</sup>, 李坤, 胡帆, 胡蒙蒙, 高再荣

华中科技大学同济医学院附属协和医院核医学科, 分子影像湖北省重点实验室, 武汉 430022

**摘要:**目的 探讨有序子集最大期望值重建算法(ordered-subsets expectation maximization, OSEM)中不同迭代次数与子集数对<sup>99m</sup>Tc SPECT/CT 定量结果的影响。方法 在美国电气制造商协会(NEMA)国际电工委员会(IEC)体模的 6 个不同大小的小球(直径分别为 37、28、22、17、13、10 mm)中填充入 0.54 MBq/mL 的<sup>99m</sup>Tc 与碘克沙醇混合液(含碘量约 0.3%),改变罐体放射性浓度形成不同的靶本比(32:1, 16:1, 8:1, 4:1)。使用美国 GE 公司 Discovery NM/CT 670 Pro 型 SPECT/CT 显像仪对不同靶本比的体模行临床协议下的 SPECT/CT 采集,对采集的数据进行衰减校正、散射校正、分辨率恢复校正,使用 GE Xeleris Version 4.0 Q-Metrix 软件以 CT 阈值法自动勾画各小球感兴趣体积(volume of interest, VOI),并选择以下 OSEM 参数对小球定量分析。固定 OSEM 10 个子集,分别行 1、2、4、8、12、16、24、32 次迭代,定量计算不同迭代次数下各小球恢复系数(recovery coefficient, RC)(RC=测量活度/真实活度);固定 8 次迭代,分别行 2、6、10、14、18、20、22、26、32 个子集,计算不同子集下各小球 RC。变换靶本比模型重复扫描,RC 取平均值,采用 Pearson 相关性分析评价各小球 RC 与迭代次数、子集数的相关性,分析各小球 RC 随迭代次数、子集数变化趋势。结果 各小球定量 RC 与迭代次数、子集数呈正相关,均随迭代次数增加而增加(小球由大到小  $r=0.723、0.723、0.725、0.729、0.800、0.864$ ,均  $P<0.05$ ),随子集数增加而增加(小球由大到小  $r=0.800、0.709、0.744、0.742、0.832、0.865$ ,均  $P<0.05$ );随着迭代次数、子集数不断增加 RC 变化越来越缓慢逐渐趋于平稳,直径 $\geq 22$  mm 的 3 个小球 8 次迭代 10 个子集后 RC 增加趋于平稳,直径 $\leq 17$  mm 的 3 个小球 16 次迭代 20 个子集后 RC 趋于平稳。结论 OSEM 参数选择对<sup>99m</sup>Tc SPECT 定量分析影响显著。临床工作中建议当靶区直径 $\geq 22$  mm 时选择 8 次迭代,10 个子集;直径 $\leq 17$  mm 时选择 16 次迭代,20 个子集。

**关键词:**体层摄影术,发射型计算机,单光子; 体层摄影术,X 线计算机; 有序子集最大期望值法; <sup>99m</sup>Tc  
中图分类号:R814 DOI:10.3870/j.issn.1672-0741.2021.06.015

## Impact of Different Ordered-subsets Expectation Maximization Reconstruction Parameters on the Quantitative Results of <sup>99m</sup>Tc SPECT/CT

Gong Chengpeng, Hu Jia<sup>△</sup>, Li Kun *et al*

Department of Nuclear Medicine, Union Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology; Hubei Key Laboratory of Molecular Imaging, Wuhan 430022, China

**Abstract Objective** To evaluate the effects of different ordered-subsets expectation maximization(OSEM)reconstruction parameters on the quantitative results of <sup>99m</sup>Tc SPECT/CT. **Methods** Six different spheres(diameter:37,28,22,17,13,10 mm) in National Electrical Manufacturers Association International Electrotechnical Commission(NEMA IEC)model were filled with a mixture of 0.54 MBq/mL <sup>99m</sup>Tc and iodixanol. The mixture iodine content was about 0.3%, which led to different target background ratio(T/B)(32:1, 16:1, 8:1, 4:1)by changing the radioactivity concentration of the cylinder. Routine imaging was performed on different T/B phantom which was scanned by SPECT/CT(Discovery NM/CT 670 Pro),attenuation correction, scattering correction and resolution recovery correction were performed on the collected data. The volume of interest(VOI)of each sphere was automatically delineated by CT threshold using GE Xeleris Version 4.0 Q-Metrix software,and the following OSEM parameters selected to quantitatively analyze the VOI. Fixed OSEM with 10 subsets,we performed 1,2,4,8,12,16,24, and 32 iterations respectively, and quantitatively calculated recovery coefficient(RC)(RC=measuring activity/true activity)of each sphere under different iteration frequencies. By fixing 8 iterations, we ran 2,6,10,14,18,20,22,26, and 32 subsets several-ly, and calculated RC of each sphere under different subsets. We changed the T/B model to repeat the scan,took the average values of RCs,used the Pearson correlation to analyze the correlation between RCs of each sphere and the number of iterations and the number of subsets,and analyzed the trend of the RC of each sphere changing with the number of iterations and the number of subsets. **Results** There were significant relationships between the number of iterations and RC( $r$  values from large sphere to

\* 华中科技大学自主创新研究基金资助项目(No. 2017KFYXJJ231)

龚成鹏,男,1989 年生,技师,医学硕士,E-mail:452541436@qq.com

<sup>△</sup>通讯作者,Corresponding author,E-mail: Hu\_jia\_Anna@126.com

small;0.723,0.723,0.725,0.729,0.800,0.864,all  $P<0.05$ ). There were significant relationships between the number of subsets and RC( $r$  values from large sphere to small;0.800,0.709,0.744,0.742,0.823,all  $P<0.05$ ). With the increasing number of iterations and subsets, the change of RC became more and more stable. Using the OSEM of 8 iterations and 10 subsets, the RCs of larger spheres(37,28,22 mm)became stable;the RCs of smaller spheres(17,13,10 mm)were stabilized by using the 16 iterations and 20 subsets. **Conclusion** The choice of OSEM parameters has a significant impact on the quantitative analysis of <sup>99m</sup>Tc SPECT. We suggest that 8 iterations and 10 subsets should be selected when the sphere diameter is above 22 mm;16 iterations and 20 subsets should be selected when the sphere diameter is below 17 mm.

**Key words** tomography, emission-computed, single-photon; tomography, X-ray computed; ordered-subsets expectation maximization; <sup>99m</sup>Tc

核医学显像定量分析是利用核医学平面显像或断层显像,采用半定量或定量的方法对示踪剂在生物体内的分布情况进行相对或绝对的数值评估。目前定量分析已经在正电子发射型断层扫描仪(PET)上广泛使用,但是由于一些技术原因的限制,在过去很长一段时间内单光子发射计算机断层扫描(SPECT)被认为仅能进行半定量相对分析。随着SPECT/CT融合技术、图像重建算法、光子补偿技术的不断完善和应用,这些技术瓶颈被不断打破,在SPECT/CT中开展类似于PET的定量分析已经成为可能。其中4个主要技术分别是衰减校正(attenuation correction, AC)、散射校正(scatter correction, SC)、分辨率恢复校正(resolution recovery, RR)及有序子集最大期望值迭代(ordered-subsets expectation maximization, OSEM)重建算法。尤其是OSEM重建算法,其可以将AC、SC、RR等多种校正方法整合到迭代过程中。因此,OSEM参数(迭代次数与子集数)的选择便成了影响定量准确性的关键因素之一。本文利用NEMA IEC体模实验探讨OSEM不同的迭代次数与子集数对SPECT/CT定量结果的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器和设备

使用美国GE公司Discover NM/CT 670 Pro型SPECT/CT显像仪,配备16排螺旋CT,低能高分辨准直器,断层空间分辨率10.59 mm,系统灵敏度为73.4 cps/MBq。定量分析软件为GE Xeleirs Version 4.0 Q-Metrix。<sup>99m</sup>Tc(<sup>99</sup>Mo-<sup>99m</sup>Tc发生器,中国原子高科股份有限公司)。碘克沙醇注射液(碘浓度为270 mg/mL)购自江苏恒瑞医药股份有限公司。CRC-25R型放射性活度计为美国CAPINTEC公司产品。NEMA IEC体模购自美国Data Spectrum公司,标准模体内部长度180 mm,可填充的6个小球直径分别为37、28、22、17、13、10 mm,容积分别为26.52、11.49、5.57、2.57、1.15、0.52 mL,插入肺插件后罐体容积为9700 mL。

### 1.2 显像模型制备

由于模体出厂时可能存在误差,且本实验不需肺插件,因此实验前需使用纯水实测模体体积。本次实验NEMA IEC模体6个小球体积实测为:26.50、11.50、5.60、2.50、1.20、0.52 mL,小球加连接杆体积为:27.00、11.90、6.20、3.10、1.80、1.20 mL,不带肺插件时罐体实测容积为10122 mL。晾干模体内液体后,将新鲜淋洗的0.5 mL 199.8 MBq <sup>99m</sup>Tc溶液加入到366.5 mL纯水中混匀后取出50.7 mL,在取出的50.7 mL溶液中加入0.5 mL碘浓度为270 mg/mL的碘克沙醇混匀后刚好充满NEMA IEC模型的6个小球(小球加连接杆总体积51.2 mL),则球内为0.54 MBq/mL的<sup>99m</sup>Tc与碘克沙醇混合液(混合液中含碘量135 mg,约占0.3%)。将剩余的316.3 mL <sup>99m</sup>Tc溶液全部倒入罐体中并将罐体充满纯水,罐体放射性浓度约为0.017 MBq/mL。以小球为靶区,罐体为背景本底,则形成靶本比约为32:1模型。扫描后加倍本底即可形成16:1模型,以此类推制作并扫描8:1、4:1模型。

### 1.3 数据采集参数及图像后处理

将制备好的NEMA IEC模型平放于检查床探头视野中心位置,调整床高使十字激光定位灯中心与模型内面中心基本重合。SPECT采集选用低能高分辨准直器,主能峰(140 KeV,窗宽10%),散射峰(120 KeV,窗宽5%),矩阵128×128,放大倍数1.0,使用body contour自动贴近,360°采集,6°/帧,一帧20 s;同机CT采集选用120 kV管电压,自动管电流,层厚1.25 mm。采集的数据使用GE Xeleirs Version 4.0 Q-Metrix后处理软件融合及定量分析,首先输入SPECT/CT系统灵敏度、注射前显像剂活度及测量时间、注射后残留活度及测量时间、显像时间、药物半衰期等相关信息。然后在已连接杆排除在外的范围内使用CT值≥200 HU为阈值自动勾画6个小球的感兴趣体积(volume of interest, VOI)。固定OSEM 10个子集,分别行1、2、4、8、12、16、24、32次迭代,定量计算不同迭代次数下各小球恢复系数(recovery coefficient, RC)(RC=

测量活度/真实活度);固定 8 次迭代,分别行 2、6、10、14、18、20、22、26、32 个子集,计算不同子集下各小球 RC。变换靶本比模型重复扫描,多次测量不同靶本比模型各小球 RC( $\bar{x} \pm s$ ),绘制各小球 RC 随迭代次数、子集数变化趋势图。

#### 1.4 统计学处理

采用 SPSS 20.0 软件进行统计学分析,符合正态分布的计量数据以  $\bar{x} \pm s$  表示,采用 Pearson 相关性分析评价各小球迭代次数、子集数与 RC 相关性,以  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 小球 RC 与迭代次数、子集数的相关性

各小球定量 RC 与迭代次数、子集数呈正相关,均随迭代次数增加而增加(小球由大到小  $r =$

0.723、0.723、0.725、0.729、0.800、0.864,均  $P < 0.05$ ),随子集数增加而增加(小球由大到小  $r =$  0.800、0.709、0.744、0.742、0.832、0.865,均  $P < 0.05$ )。越小的球 RC 越低,直径  $\leq 17$  mm 的小球,在不同重建参数下 RC 均不到 0.6。不同迭代次数各小球 RC 见表 1,不同子集数各小球 RC 见表 2。

### 2.2 小球 RC 随迭代次数、子集数的变化趋势

随着迭代次数、子集数不断增加,RC 变化越来越缓慢。直径  $\geq 22$  mm 的 3 个小球 8 次迭代 10 个子集后 RC 增加趋于平稳,较小的球需要更多的迭代次数与子集数,RC 才能达到稳定,直径  $\leq 17$  mm 的 3 个小球 16 次迭代 20 个子集后 RC 趋于平稳。不同迭代次数横断位同一层面比较见图 1,不同子集数横断位同一层面比较见图 2,RC 随迭代次数、子集数的变化趋势见图 3。

表 1 不同迭代次数各小球的 RC( $\bar{x} \pm s$ )

Table 1 RC of each sphere with different iteration frequencies( $\bar{x} \pm s$ )

迭代次数	小球直径					
	37 mm	28 mm	22 mm	17 mm	13 mm	10 mm
1	0.635 $\pm$ 0.127	0.472 $\pm$ 0.092	0.335 $\pm$ 0.081	0.229 $\pm$ 0.044	0.179 $\pm$ 0.019	0.112 $\pm$ 0.015
2	0.704 $\pm$ 0.112	0.571 $\pm$ 0.106	0.460 $\pm$ 0.106	0.362 $\pm$ 0.097	0.283 $\pm$ 0.066	0.154 $\pm$ 0.010
4	0.768 $\pm$ 0.103	0.650 $\pm$ 0.097	0.562 $\pm$ 0.099	0.483 $\pm$ 0.101	0.390 $\pm$ 0.085	0.231 $\pm$ 0.038
8	0.805 $\pm$ 0.105	0.710 $\pm$ 0.094	0.645 $\pm$ 0.087	0.553 $\pm$ 0.084	0.462 $\pm$ 0.083	0.305 $\pm$ 0.046
12	0.812 $\pm$ 0.104	0.719 $\pm$ 0.093	0.652 $\pm$ 0.090	0.568 $\pm$ 0.084	0.489 $\pm$ 0.084	0.335 $\pm$ 0.048
16	0.816 $\pm$ 0.104	0.724 $\pm$ 0.093	0.659 $\pm$ 0.090	0.578 $\pm$ 0.082	0.504 $\pm$ 0.083	0.353 $\pm$ 0.046
24	0.820 $\pm$ 0.104	0.728 $\pm$ 0.093	0.666 $\pm$ 0.090	0.586 $\pm$ 0.080	0.522 $\pm$ 0.083	0.375 $\pm$ 0.043
32	0.822 $\pm$ 0.103	0.731 $\pm$ 0.093	0.669 $\pm$ 0.090	0.590 $\pm$ 0.079	0.532 $\pm$ 0.082	0.388 $\pm$ 0.040
$r$	0.723	0.723	0.725	0.729	0.800	0.864
$P$	0.043	0.043	0.042	0.040	0.018	0.006

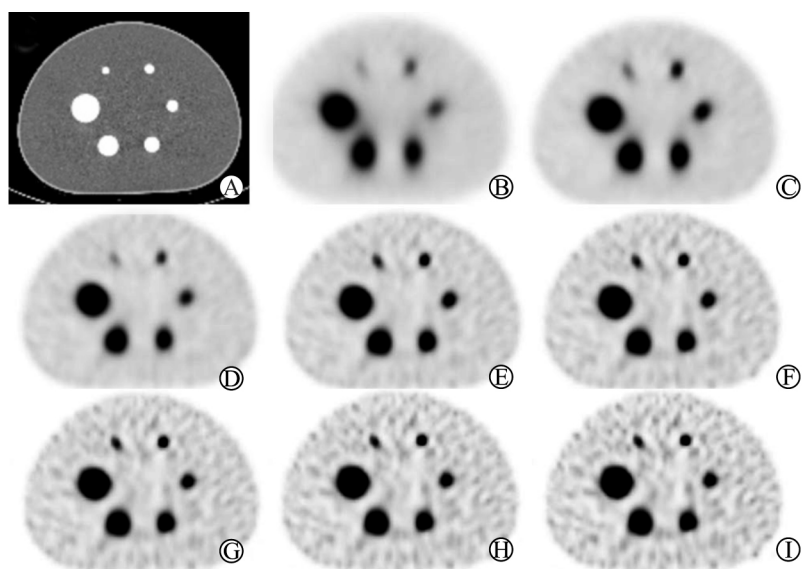
后处理方式:OSEM 10 个子集,CTAC+SC+RR。

表 2 不同子集数各小球的 RC( $\bar{x} \pm s$ )

Table 2 RC of each sphere with different subsets( $\bar{x} \pm s$ )

子集数	小球直径					
	37 mm	28 mm	22 mm	17 mm	13 mm	10 mm
2	0.718 $\pm$ 0.117	0.572 $\pm$ 0.107	0.452 $\pm$ 0.107	0.315 $\pm$ 0.084	0.244 $\pm$ 0.051	0.135 $\pm$ 0.006
6	0.791 $\pm$ 0.107	0.692 $\pm$ 0.096	0.607 $\pm$ 0.103	0.507 $\pm$ 0.100	0.410 $\pm$ 0.085	0.251 $\pm$ 0.046
10	0.805 $\pm$ 0.105	0.710 $\pm$ 0.094	0.641 $\pm$ 0.088	0.553 $\pm$ 0.084	0.462 $\pm$ 0.083	0.305 $\pm$ 0.046
14	0.808 $\pm$ 0.107	0.714 $\pm$ 0.091	0.648 $\pm$ 0.097	0.561 $\pm$ 0.081	0.474 $\pm$ 0.083	0.319 $\pm$ 0.050
18	0.808 $\pm$ 0.107	0.714 $\pm$ 0.091	0.648 $\pm$ 0.097	0.561 $\pm$ 0.081	0.474 $\pm$ 0.083	0.319 $\pm$ 0.050
20	0.816 $\pm$ 0.105	0.722 $\pm$ 0.089	0.659 $\pm$ 0.088	0.581 $\pm$ 0.084	0.502 $\pm$ 0.081	0.351 $\pm$ 0.049
22	0.816 $\pm$ 0.105	0.722 $\pm$ 0.089	0.659 $\pm$ 0.088	0.581 $\pm$ 0.084	0.502 $\pm$ 0.081	0.351 $\pm$ 0.049
26	0.824 $\pm$ 0.108	0.723 $\pm$ 0.089	0.667 $\pm$ 0.099	0.583 $\pm$ 0.083	0.522 $\pm$ 0.090	0.363 $\pm$ 0.049
32	0.828 $\pm$ 0.105	0.725 $\pm$ 0.086	0.667 $\pm$ 0.101	0.582 $\pm$ 0.078	0.525 $\pm$ 0.083	0.366 $\pm$ 0.037
$r$	0.800	0.709	0.744	0.742	0.832	0.865
$P$	0.010	0.036	0.022	0.022	0.005	0.003

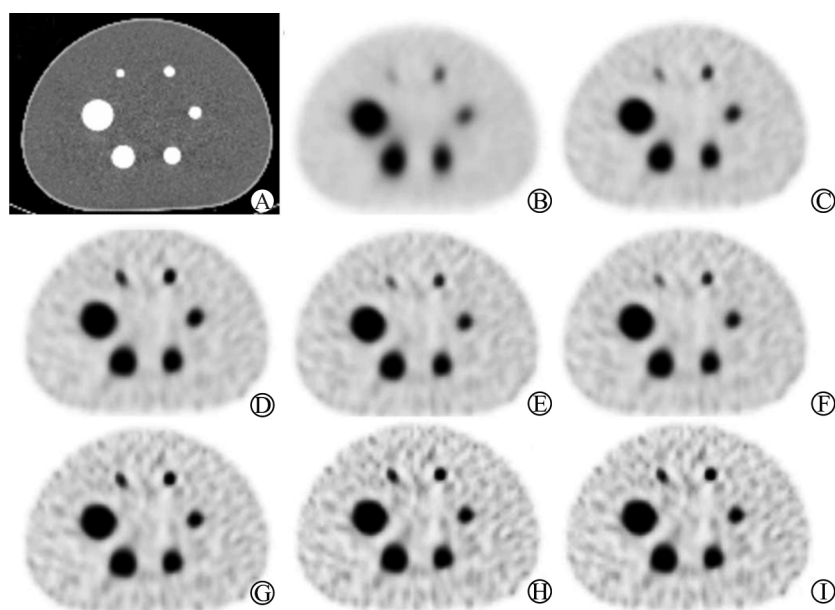
后处理方式:OSEM 8 次迭代,CTAC+SC+RR。



A:CT 图像;B~I:迭代次数分别为 1、2、4、8、12、16、24、32

图 1 NEMA IEC 体模不同迭代次数横断位同一层面图像比较

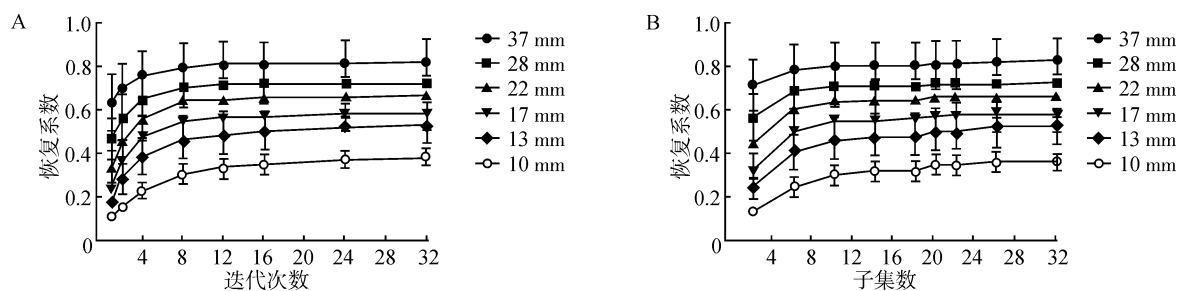
Fig 1 Transaxial images of NEMA IEC model with different iteration frequencies



A:CT 图像;B~I:子集数分别为 2、6、10、14、18、22、26、32

图 2 NEMA IEC 体模不同子集数横断位同一层面图像比较

Fig 2 Transaxial images of NEMA IEC model with different subsets



A:迭代次数与恢复系数的关系;B:子集数与恢复系数的关系

图 3 RC 随迭代次数与子集数变化趋势

Fig 3 The trends of RC changing with different iteration frequencies and number of subsets

### 3 讨论

定量核医学的目的是对放射性示踪剂的局部浓度进行相对或绝对的定量评估,定量测量克服了纯粹视觉分析的缺点<sup>[1-2]</sup>,增强了核医学图像数据解释的客观性,从而提高了诊断的准确性<sup>[3]</sup>。然而直到最近,SPECT/CT才被认为是真正的定量显像方式,已有多项研究证明SPECT定量在临床显像中的有效性<sup>[4-6]</sup>。

SPECT/CT定量准确性在很大程度上依赖于校正方式及重建算法的选择,既往我们已探讨了校正方式对SPECT/CT定量结果的影响<sup>[7]</sup>。本研究主要探讨重建算法对SPECT/CT定量结果的影响。常用的重建算法有滤波反投影(filtered back projection,FBP)和OSEM。FBP是在频率空间对投影数据进行滤波,再将滤波后的投影数据反投影得到重建图像。其优点是操作简便,速度快,可用于临床实时断层重建,但是抗噪能力差,在欠采样和热源较小情况下,图像质量差。OSEM是将各个方向投影数据每隔一定角度划分为多个子集,每个子集都单独对投影数据校正一次,即完成一次迭代,在迭代过程中还可以融入多种校正技术来不断提高图像的质量。大量研究表明OSEM在很多方面都要优于FBP<sup>[8-10]</sup>,OSEM中的2个重要的可变参数会影响重建图像的质量,即子集数与迭代次数。本研究选用OSEM重建算法,在迭代过程中集成了AC、SC、RR校正技术并对不同靶本比模型选用不同迭代次数与子集数进行后处理定量分析。可以看到迭代次数和子集数对定量结果影响显著,迭代次数越高、子集数越大,小球RC越高。这与OSEM原理密不可分,OSEM本身是一种逐步逼近的数学计算方法,迭代次数和子集数越多,图像会越接近真实,但OSEM重建图像所需时间等于迭代次数与每次迭代时间乘积,过多的迭代次数会导致数据的大量冗余,处理图像所需的时间会大大延长<sup>[11]</sup>,且原始数据的噪声在每一次迭代过程中都会被放大,导致图像信噪比下降。子集数的增加虽不会增加处理时间,但随着子集数增加,单个子集包含信息量就更少,导致重建信噪比进一步下降,到重建收敛的时候,甚至会明显影响到图像观察和病灶VOI勾画。因此采用无限的增加迭代次数及子集数的方式来增加图像精度是不可取的,选择的OSEM重建方案应在保证定量准确性的同时兼顾处理时间、图像噪声。即应选择使RC趋于平稳的最小迭代次数与子集数。本研究引入少量低浓度碘造影剂,利用CT阈

值自动勾画VOI,具有较好的准确性和重复性,同时也不会对图像AC产生较大影响<sup>[7,12]</sup>,较好地解决了本模型高迭代次数下VOI难以准确勾画的问题。研究结果显示,在较低的迭代与子集数时RC随迭代及子集数的增加而明显增加,随着迭代次数、子集数不断增加RC变化越来越缓慢逐渐趋于平稳。热区直径 $\geq 22$  mm时,增加到8次迭代10个子集后RC趋于平稳;热区直径 $\leq 17$  mm时,16次迭代20个子集后RC趋于平稳。

OSEM算法中子集划分方法有多种形式,本研究中选择14个子集与18个子集,20个子集与22个子集小球RC相同,可能是因为这两组子集数设置得过于密集,小球RC变化很小,精确到小数点后3位仍无法看出差别。部分容积效应使SPECT对小于3倍系统空间分辨率的病灶定量准确性显著下降<sup>[13-14]</sup>,本研究中体积小的热区,需要更高的迭代与子集数才能使RC趋于平稳。但即使选择合适的迭代参数,直径 $\leq 17$  mm的3个小球RC也不到0.6,因此,对于此类小病灶除了选择合适的迭代参数外还需充分考虑部分容积效应给予适当的校正。

综上所述,OSEM参数选择对<sup>99m</sup>Tc SPECT定量分析影响显著。临床工作中建议当热区直径 $\geq 22$  mm时选择8次迭代,10个子集;直径 $\leq 17$  mm的小病灶选择16次迭代,20个子集。本研究未能对小病灶提出更有效的校正方法,进一步的研究中将对较小病灶细化分组进行研究,以期拟合出病灶大小与RC的校正公式,提高较小病灶定量的准确性。

### 参 考 文 献

- [1] Zeintl J, Vija A H, Yahil A, et al. Quantitative accuracy of clinical <sup>99m</sup>Tc SPECT/CT using ordered-subset expectation maximization with 3-dimensional resolution recovery, attenuation, and scatter correction[J]. J Nucl Med, 2010, 51(6): 921-928.
- [2] Shcherbinin S, Celler A, Belhocine T, et al. Accuracy of quantitative reconstructions in SPECT/CT imaging[J]. Phys Med Biol, 2008, 53(17): 4595-4604.
- [3] Ross J C, Vilic D, Sanderson T, et al. Does quantification have a role to play in the future of bone SPECT? [J]. Eur J Hybrid Imaging, 2019, 3(1): 8.
- [4] Liu C, Zhu Y, Su H, et al. Preliminary results of targeted prostate-specific membrane antigen imaging in evaluating the efficacy of a novel hormone agent in metastatic castration-resistant prostate cancer[J]. Cancer Med, 2020, 9(10): 1-9.
- [5] Dittmann H, Kaltenbach S, Weissinger M, et al. The prognostic value of quantitative bone SPECT/CT before <sup>223</sup>Ra treatment in metastatic castration-resistant prostate cancer[J]. J Nucl Med, 2021, 62(1): 48-54.
- [6] Arvola S, Jambor I, Kuusma A, et al. Comparison of standardized uptake values between <sup>99m</sup>Tc-HDP SPECT/CT and <sup>18</sup>F-NaF PET/CT in bone metastases of breast and prostate cancer[J]. EJNMMI Res, 2019, 9(1): 6.

(下转第799页)

- the optical design of multifocal contact lenses on choroidal thickness[J]. PLoS One, 2018, 13(11): e0207637.
- [63] Li Z, Cui D, Hu Y, et al. Choroidal thickness and axial length changes in myopic children treated with orthokeratology[J]. Cont Lens Anterior Eye, 2017, 40(6): 417-423.
- [64] Li Z, Hu Y, Cui D, et al. Change in subfoveal choroidal thickness secondary to orthokeratology and its cessation; a predictor for the change in axial length[J]. Acta Ophthalmol, 2019, 97(3): e454-e459.
- [65] Sander B P, Collins M J, Read S A. Short-term effect of low-dose atropine and hyperopic defocus on choroidal thickness and axial length in young myopic adults[J]. J Ophthalmol, 2019, 2019: 4782536.
- [66] Sander B P, Collins M J, Read S A. The interaction between homatropine and optical blur on choroidal thickness[J]. Ophthalmic Physiol Opt, 2018, 38(3): 257-265.
- [67] Jiang Y, Zhang Z, Wu Z, et al. Change and recovery of choroid thickness after short-term application of 1% atropine gel and its influencing factors in 6-7-year-old children[J]. Curr Eye Res, 2021; 46(8): 1171-1177.
- [68] Carr B J, Stell W K. Nitric Oxide(NO) mediates the inhibition of form-deprivation myopia by atropine in chicks[J]. Sci Rep, 2016, 6(1): 9.
- [69] Ayajiki K, Tanaka T, Okamura T, et al. Evidence for nitroxi-dergic innervation in monkey ophthalmic arteries *in vivo* and *in vitro*[J]. Am J Physiol Heart Circ Physiol, 2000, 279(4): H2006-H2012.
- [70] Dai L, Yang W, Qin X, et al. Serum metabolomics profiling and potential biomarkers of myopia using LC-QTOF/MS[J]. Exp Eye Res, 2019, 186: 107737.
- [71] Ojaghi R, Sohanaki H, Ghasemi T, et al. Role of low-intensity laser therapy on naloxone-precipitated morphine withdrawal signs in mice: is nitric oxide a possible candidate mediator? [J]. Lasers Med Sci, 2014, 29(5): 1655-1659.
- [72] Burduli N M, Krifaridi A S. Effect of low-intensity laser radiation on the function of vascular endothelium in patients with chronic viral hepatitis[J]. Klin Med (Mosk), 2009, 87(1): 49-52.
- [73] Yamaura M, Yao M, Yaroslavsky I, et al. Low level light effects on inflammatory cytokine production by rheumatoid arthritis synoviocytes[J]. Lasers Surg Med, 2009, 41(4): 282-290.

(2021-04-08 收稿)

## (上接第 770 页)

- [7] 龚成鹏, 胡佳, 李坤, 等. 不同校正方式对<sup>99m</sup>Tc SPECT/CT 定量分析结果的影响[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2020, 40(11): 669-672.
- Gong C P, Hu J, Li K, et al. Impact of different post-processing correction techniques on the quantitative results of <sup>99m</sup>Tc SPECT/CT[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2020, 40(11): 669-672.
- [8] Hosny T, Khalil M M, Elfiky A A, et al. Image quality characteristics of myocardial perfusion SPECT imaging using state-of-the-art commercial software algorithms; evaluation of 10 reconstruction methods[J]. Am J Nucl Med Mol Imaging, 2020, 10(6): 375-386.
- [9] Trevisan A C, Raed M D, Tumas V, et al. Comparison between OSEM and FBP reconstruction algorithms for the qualitative and quantitative interpretation of brain DAT-SPECT using an anthropomorphic striatal phantom: implications for the practice[J]. Res Biomed Eng, 2020, 36(1): 77-88.
- [10] Pretorius P H, Ramon A J, King M A, et al. Retrospective fractional dose reduction in Tc-99m cardiac perfusion SPECT/CT patients: A human and model observer study[J]. J Nucl Cardiol, 2021, 28(2): 624-637.
- [11] 胡帆, 夏晓天, 张晓, 等. 不同处理方法对心肌灌注显像心功能指标的影响[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2017, 37(9): 564-567.
- Hu F, Xia X T, Zhang X, et al. Influence of different image processing methods on mensuration of cardiac function in myocardial perfusion imaging[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2017, 37(9): 564-567.
- [12] Bonta D V, Wahl R L. Overcorrection of iodinated contrast attenuation in SPECT-CT: Phantom studies[J]. Med Phys, 2010, 37(9): 4897-4901.
- [13] 黄克敏, 冯彦林, 梁伟棠, 等. 部分容积效应对 SPECT/CT 定量计算结果的影响[J]. 中国医学影像学杂志, 2017, 25(11): 73-77.
- Huang K M, Feng Y L, Liang W T, et al. Impact of partial volume effect on quantitative results in SPECT/CT[J]. Chin J Med Imaging, 2017, 25(11): 73-77.
- [14] Bailey D L, Willowson K P. An evidence-based review of quantitative SPECT imaging and potential clinical applications[J]. J Nucl Med, 2013, 54(1): 83-89.

(2021-04-06 收稿)