

## Impact of iteration number of point spread function correction on $^{18}\text{F}$ -FDG standard uptake value of phantom

LEI Xinkun<sup>1,2</sup>, WANG Jingtian<sup>1,2</sup>, GUO Xiaorui<sup>1,2</sup>, HAO Luping<sup>1,2</sup>, WU Xiaowei<sup>1,2</sup>, SHANG Hua<sup>1,2\*</sup>

(1. Department of Nuclear Medicine, the Second Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050061, China; 2. Hebei Provincial Quality Management and Control Center for Nuclear Medicine Specialty, Shijiazhuang 050061, China)

**[Abstract]** **Objective** To investigate the impact of iteration number of point spread function (PSF) on  $^{18}\text{F}$ -FDG standardized uptake values (SUV) of phantom. **Methods** Six spheres with diameter of 10, 13, 17, 22, 28 and 37 mm in International Electrotechnical Commission body phantom were filled with  $^{18}\text{F}$ -FDG solution of 20 kBq/ml concentration. PET/CT scanning was performed using Vereos PET/CT system, and PET images were reconstructed using ordered subsets expectation maximization (OSEM) (with fixed parameters of 2 iterations and 8 subsets) and PSF correction (regularization number was set to be 10, while PSF iteration number was 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 15, 20, 25, 35 and 50, respectively). Totally 16 sets of PET data were obtained, PSF (10, 1) group was denoted as PSF\_1iter group, and so on. The maximum SUV ( $\text{SUV}_{\text{max}}$ ) and mean SUV ( $\text{SUV}_{\text{mean}}$ ) of each sphere in the phantom were measured, while SUV recovery coefficient (RC) and its error value were calculated. SUV between consecutive groups were compared, and the impact of PSF iteration number and sphere size on SUV RC were observed. **Results** The differences of average  $\text{SUV}_{\text{max}}$  of the spheres measured in PET between consecutive groups were all significant (all  $P < 0.05$ ), indicating that  $\text{SUV}_{\text{max}}$  increased with the increase of iteration number. There were significant differences of average  $\text{SUV}_{\text{mean}}$  of the spheres between consecutive groups of PSF\_1iter to PSF\_7iter groups, also between PSF\_25iter and PSF\_35iter groups (all  $P < 0.05$ ), manifested as  $\text{SUV}_{\text{mean}}$  increased with the increase of iteration number, while the average  $\text{SUV}_{\text{mean}}$  of the spheres of the other consecutive groups were not different (all  $P > 0.05$ ). The error values of  $\text{SUV}_{\text{max}}$  RC and  $\text{SUV}_{\text{mean}}$  RC for the same sphere both showed an increasing trend when PSF correction iteration number increased. Compared with  $\text{SUV}_{\text{max}}$  RC,  $\text{SUV}_{\text{mean}}$  RC of the spheres were closer to the true values. When PSF correction iteration number increased, the increased value of  $\text{SUV}_{\text{max}}$  RC and  $\text{SUV}_{\text{mean}}$  RC in 10, 13 and 17 mm diameter spheres were all greater than those of other spheres. **Conclusion** With the increase of PSF correction iteration number,  $\text{SUV}_{\text{max}}$  of the phantom increased.  $\text{SUV}_{\text{mean}}$  of the phantom showed a gradually increase when then iteration number ranged from 1 to 7, but became convergent when the iteration number was greater than 7.

**[Keywords]** positron-emission tomography and computed tomography; fluorodeoxyglucose F18; iteration ordinal number

DOI:10.13929/j.issn.1003-3289.2026.03.024

## 点扩散函数校正迭代次数对于体模 $^{18}\text{F}$ -FDG标准摄取值的影响

雷昕锟<sup>1,2</sup>, 王镜添<sup>1,2</sup>, 郭小瑞<sup>1,2</sup>, 郝路平<sup>1,2</sup>, 武晓伟<sup>1,2</sup>, 尚 华<sup>1,2\*</sup>

(1. 河北医科大学第二医院核医学科, 河北 石家庄 050061; 2. 河北省核医学专业质量管理与控制中心, 河北 石家庄 050061)

**[摘要]** **目的** 观察点扩散函数(PSF)校正迭代次数对于体模 $^{18}\text{F}$ -FDG标准摄取值(SUV)的影响。**方法** 对国际电工

**[第一作者]** 雷昕锟(1995—),男,河北石家庄人,本科,主管技师。研究方向:影像与核医学技术。E-mail: 29500768@hcbmu.edu.cn

**[通信作者]** 尚华,河北医科大学第二医院核医学科,050061;河北省核医学专业质量管理与控制中心,050061。E-mail: 27700107@hcbmu.edu.cn

**[收稿日期]** 2025-04-11 **[修回日期]** 2025-09-29

委员会体模中直径分别为 10、13、17、22、28 及 37 mm 的 6 个球体灌注浓度 20 kBq/ml 的<sup>18</sup>F-FDG 溶液后,利用 Vereos PET/CT 系统对其进行 PET/CT 扫描,并以有序子集最大期望值法(OSEM)重建 PET 图像(参数固定为迭代次数 2,8 个子集),且行 PSF 校正,其正则化次数为 10,迭代次数分别为 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、13、15、20、25、35 及 50,共获得 16 组相应 PET 数据,将 PSF(10,1)组记为 PSF\_1iter 组,依此类推。测量体模中各球体的最大 SUV(SUV<sub>max</sub>)及平均 SUV(SUV<sub>mean</sub>),计算 SUV 恢复系数(RC)及其误差值;比较连续组间 SUV 差异,观察 PSF 迭代次数及球体大小对 SUV RC 的影响。**结果** 基于 PET 所测连续组间球体平均 SUV<sub>max</sub> 差异均有统计学意义(P 均<0.05),SUV<sub>max</sub> 随迭代次数增加而增加;PSF\_1iter 组至 PSF\_7iter 组连续组间及 PSF\_25iter 组与 PSF\_35iter 组间球体平均 SUV<sub>mean</sub> 差异均有统计学意义(P 均<0.05),表现为 SUV<sub>mean</sub> 随迭代次数增加而增加,其余连续组间差异均无统计学意义(P 均>0.05)。随 PSF 校正迭代次数增加,同一球体 SUV<sub>max</sub> RC 及 SUV<sub>mean</sub> RC 误差值均呈增大趋势,而 SUV<sub>mean</sub> RC 比 SUV<sub>max</sub> RC 更接近真实值。随 PSF 校正迭代次数增加,直径 10、13 及 17 mm 球体的 SUV<sub>max</sub> RC 和 SUV<sub>mean</sub> RC 增幅均大于其他球体。**结论** 体模 SUV<sub>max</sub> 随 PSF 校正迭代次数增加而增加,而 SUV<sub>mean</sub> 在迭代次数为 1~7 时表现为逐渐增加、迭代次数>7 时则具有收敛性。

[关键词] 正电子发射断层扫描与计算机断层扫描; 氟脱氧葡萄糖 F18; 迭代次数

[中图分类号] R-33; R445.6 [文献标识码] A [文章编号] 1003-3289(2026)03-0439-05

标准摄取值(standardized uptake value, SUV)是 PET/CT 显像评估组织代谢活性的重要半定量参数,而显像设备及重建算法等因素均可影响该值<sup>[1-2]</sup>。点扩散函数(point spread function, PSF)校正技术是近年广泛应用的 PET/CT 重建算法,能有效提高图像空间分辨率、信噪比及小病灶检出率<sup>[3-4]</sup>,但可高估病灶 SUV<sup>[5]</sup>。Vereos PET/CT 系统的 PSF 校正包含迭代次数及正则化因子两个参数,而后者对 SUV 的影响有限。本研究观察 PSF 校正中的迭代次数对于体模<sup>18</sup>F-FDG SUV 的影响。

### 1 材料与方 法

1.1 材料 采用美国国家电气制造商协会(National Electrical Manufactures Association, NEMA)国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)体模,其腔内含有 6 个球体,直径分别为 10、13、17、22、28 及 37 mm,以及 1 个位于体模中心的肺模(图 1)。参照 EANM 指南<sup>[6]</sup>向体模中的 6 个球体内灌注浓度 20 kBq/ml 的<sup>18</sup>F-FDG 溶液、向其空腔区域内灌

注浓度 2 kBq/ml 的<sup>18</sup>F-FDG 溶液并充分摇匀,使其靶本比为 10:1。

1.2 仪器与方法 采用 Philips Vereos PET/CT 系统扫描体模。先行 CT 扫描,管电压 120 kV,管电流为自动毫安秒,球管旋转时间 0.75 s,螺距 0.827;之后行 PET 扫描,以 CT 完成解剖结构校正和衰减校正、散射校正及随机校正,时间分辨率 310/s,空间分辨率 4.1 mm,采用三维列表模式采集,每个床位 5 min,共采集 2 个床位。扫描结束后采用有序子集最大期望值法(ordered subsets expectation maximization, OSEM)重建 PET 图像,设迭代次数为 2,8 个子集并行 PSF 校正,将正则化因子设为临床常用的 10,迭代次数分别为 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、13、15、20、25、35 及 50,共获得 16 组 PET 数据,将 PSF(10,1)组记为 PSF\_1iter 组,其余类推。

1.3 图像分析 采用 Philips 后处理软件进行定量分析。基于 CT 显示球体最大直径层面,以 50%最大 SUV(maximum SUV, SUV<sub>max</sub>)为阈值,于各组 PET 中自动勾画球体感兴趣容积(volume of interest, VOD<sup>[7]</sup>),获得各球体 SUV<sub>max</sub> 及平均 SUV(mean SUV, SUV<sub>mean</sub>);取每组图像中 6 个球体测值的均值,计算各球体 SUV 恢复系数(recovery coefficient, RC)及其误差值,见公式(1)、(2):

$$\begin{aligned} \text{SUV RC} &= \frac{\text{SUV 测量}}{\text{SUV 真实}} = \frac{\text{所测球体放射性浓度}}{\text{真实球体放射性浓度}} \\ &= \frac{\text{所测球体放射性浓度}}{\frac{\text{注射剂量/体质量}}{\text{真实球体放射性浓度}}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{SUV RC 误差值} = \text{所测球体 SUV RC} - \text{真实 SUV RC(即 1)} \quad (2)$$

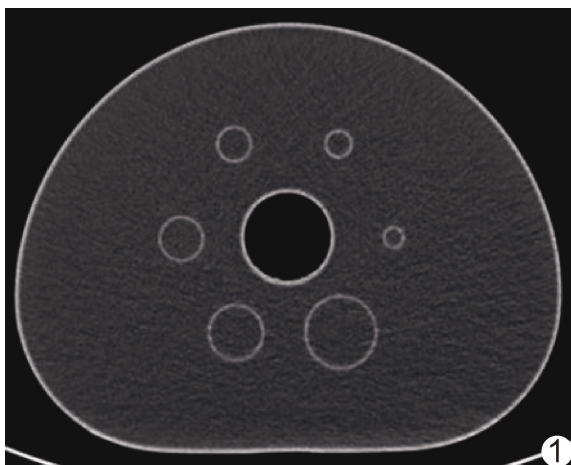


图 1 轴位 CT 图示体模中的 6 个球体及肺模

其中,体质量指向球体灌注<sup>18</sup>F-FDG 溶液后的重量。

1.4 统计学分析 采用 SPSS 25.0 统计分析软件。以  $\bar{x} \pm s$  表示符合正态分布的 SUV,以中位数(上下四分位数)表示偏态分布的 SUV。采用配对样本 *t* 检验或 Wilcoxon 符号秩检验比较连续组间 6 个球体 SUV 的差异;利用折线图观察 PSF 校正迭代次数及球体大小对 SUV RC 的影响。 $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 组间球体 SUV 比较 连续组间球体平均 SUV<sub>max</sub> 差异均有统计学意义 ( $Z$  均 = 2.201,  $P$  均 = 0.028),SUV<sub>max</sub> 随迭代次数增加而增加;PSF\_1iter 组至 PSF\_7iter 组连续组间球体平均 SUV<sub>mean</sub> 差异均有统计学意义 ( $t = 3.069 \sim 5.115, P$  均  $< 0.05$ ),SUV<sub>mean</sub> 随迭代次数增加而增加;PSF\_8iter 组至 PSF\_50iter 组中除 PSF\_25iter 组与 PSF\_35iter 组间球体平均 SUV<sub>mean</sub> 差异有统计学意义 ( $t = 2.767, P = 0.040$ ),其余连续组间球体平均 SUV<sub>mean</sub> 差异均无统计学意义 ( $t = 1.929 \sim 2.541, P$  均  $> 0.05$ )。见表 1。

2.2 SUV RC 误差值 SUV RC 误差值图(图 2)显示,同一球体的 SUV<sub>max</sub> RC 及 SUV<sub>mean</sub> RC 误差值均随 PSF 校正迭代次数增加而呈增大趋势;相比 SUV<sub>max</sub> RC,球体 SUV<sub>mean</sub> RC 更接近真实值。各球体 SUV<sub>max</sub> RC 在 PSF 校正迭代次数为 1 时最接近真实值,而 SUV<sub>mean</sub> RC 则在迭代次数为 7 时最接近真实值。

2.3 PSF 校正迭代次数及球体大小对 SUV 的影响 随 PSF 校正迭代次数增加,直径 10、13 及 17 mm 球体的 SUV<sub>max</sub> RC 和 SUV<sub>mean</sub> RC 增幅均大于其他球体;迭代次数为 1 时,上述球体 SUV<sub>max</sub> RC 分别为 0.86、

表 1 基于不同 PSF 校正迭代次数 PET 所测球体 SUV

组别	SUV <sub>max</sub>	SUV <sub>mean</sub>
PSF_1iter 组	13.21(11.71,13.93)	9.04±1.74
PSF_2iter 组	15.21(12.72,16.62)	10.35±2.00
PSF_3iter 组	16.88(13.57,18.78)	11.39±2.33
PSF_4iter 组	18.13(14.41,20.79)	12.32±2.61
PSF_5iter 组	19.02(15.18,22.88)	13.10±3.00
PSF_6iter 组	19.73(15.89,24.86)	13.75±3.26
PSF_7iter 组	20.31(16.56,26.72)	14.47±3.53
PSF_8iter 组	20.77(17.37,28.51)	14.96±3.99
PSF_9iter 组	21.14(18.43,29.03)	15.58±4.19
PSF_10iter 组	21.73(18.59,31.87)	16.07±4.90
PSF_13iter 组	23.36(19.41,35.20)	17.62±5.90
PSF_15iter 组	24.24(19.98,39.41)	18.02±6.39
PSF_20iter 组	26.40(21.44,44.84)	21.03±8.38
PSF_25iter 组	28.32(22.66,52.96)	22.16±10.36
PSF_35iter 组	31.84(24.75,62.96)	25.78±13.02
PSF_50iter 组	36.82(27.05,74.39)	28.92±15.79

1.26 及 1.42,SUV<sub>mean</sub> RC 分别为 0.56、0.86 及 1.00;迭代次数增至 50 时,上述球体 SUV<sub>max</sub> RC 分别为 4.60、7.74 及 7.25,SUV<sub>mean</sub> RC 分别 2.84、4.98 及 4.56。见图 3。

3 讨论

SUV 本质上是 PET 采集的光子计数,符合泊松分布<sup>[8]</sup>;即使采用相同放射源,随统计计数波动,所获 SUV 仍可能存在差异。SUV 越大、采集的光子数越多,光子计数的不确定性随之增加,使得 PSF 校正的收敛速度变慢,需增加迭代次数方能达到可接受收敛水平,以获得稳定、准确的图像;但增加迭代次数将增加 VOI 内噪声<sup>[9]</sup>。本研究发现,随 PSF 校正迭代次数增加,球体 SUV<sub>max</sub> 增大,且 SUV<sub>max</sub> 相比 SUV<sub>mean</sub> 较大;球体 SUV<sub>mean</sub> 亦随 PSF 迭代次数增加而增加,但迭

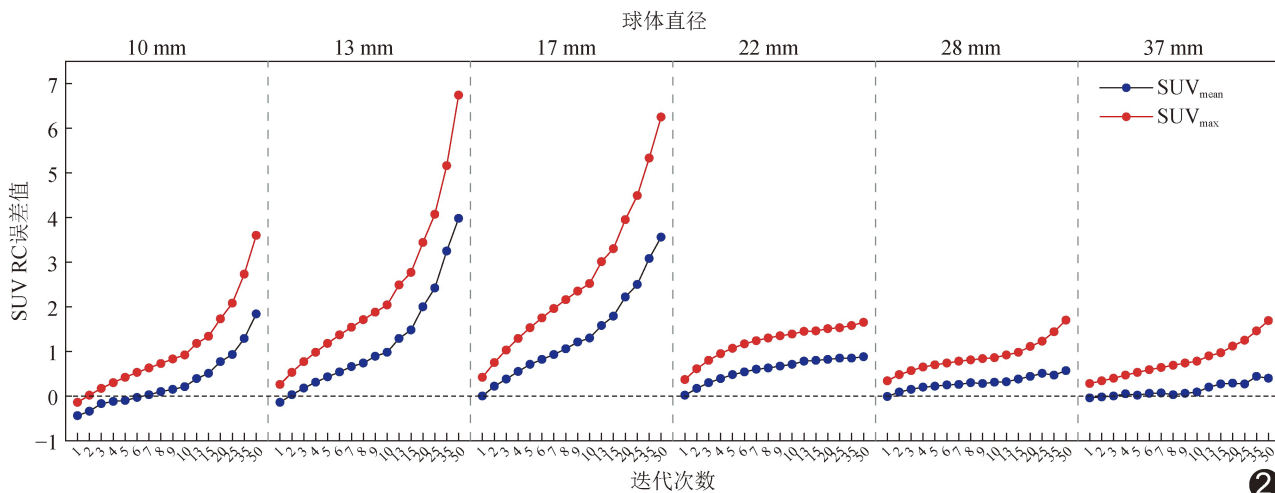


图 2 同一球体 SUV RC 误差值随 PSF 校正迭代次数变化的折线图

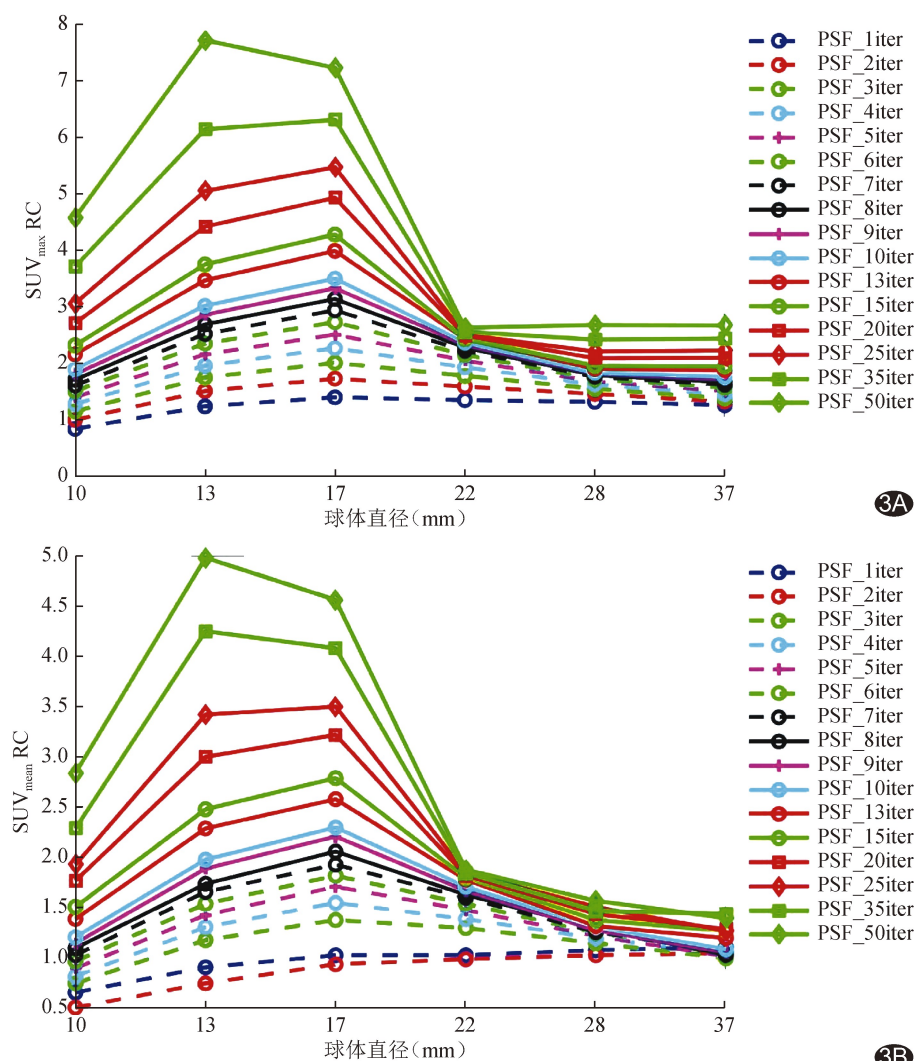


图3 球体 SUV RC 折线图 A、B. 相同 PSF 校正迭代次数下不同球体 SUV<sub>max</sub> RC(A) 及 SUV<sub>mean</sub> RC(B)折线图

迭代次数 > 7 时, 仅 PSF<sub>25iter</sub> 组与 PSF<sub>35iter</sub> 组间球体平均 SUV<sub>mean</sub> 差异有统计学意义, 其余连续组间球体平均 SUV<sub>mean</sub> 差异均无统计学意义, 即开始收敛。SUV<sub>max</sub> 反映 VOI 内所有体素中的单一体素的 SUV 最大值, 随 PSF 迭代次数和噪声水平增加而增加; SUV<sub>mean</sub> 则反映其平均值, 受噪声影响较小<sup>[10]</sup>; 推测原因在于迭代的收敛增益小于噪声对 SUV<sub>max</sub> 的影响, 使 SUV<sub>max</sub> 随迭代次数增加而增加, 即未见收敛; 而 SUV<sub>mean</sub> 在迭代次数为 1~7 时受迭代次数及噪声影响, 而迭代次数 > 7 后, 迭代收敛达到一定程度, 且噪声对其影响较小, 故此后续随迭代次数增加而开始收敛。

本研究误差值显示, 同一球体的 SUV<sub>max</sub> RC 及 SUV<sub>mean</sub> RC 误差值均随 PSF 校正迭代次数增加而呈增大趋势, 而球体 SUV<sub>mean</sub> RC 相比 SUV<sub>max</sub> RC 更加接近真实值。PSF 迭代次数增加可提升收敛效果, 使 VOI 内

的 SUV 更接近真实值, 但受噪声影响, SUV<sub>max</sub> 和 SUV<sub>mean</sub> 均随迭代次数增加而增加, 且噪声对 SUV<sub>max</sub> 的影响大于对 SUV<sub>mean</sub> 的影响, 故 SUV<sub>mean</sub> 的收敛速度更快、更接近真实值, 表明其稳定性更佳。相反, 亦有学者<sup>[11]</sup>认为 SUV<sub>mean</sub> 的可重复性不如 SUV<sub>max</sub>, 提示临床应根据实际情况适当选择 SUV 参数。

本研究发现, 随 PSF 校正迭代次数增加, 直径 10、13 及 17 mm 球体 SUV<sub>max</sub> RC 及 SUV<sub>mean</sub> RC 增幅均大于其他球体。PSF 能提高 VOI 边缘分辨率, 但同时增强邻近体素间的信号相关性, 使噪声由颗粒状变为块状, 对小直径 VOI 的影响更为显著<sup>[12-13]</sup>。随迭代次数增加, 噪声块状水平加剧, 而小直径球体本身计数基数较小, 新增计数占比较大, 故其 SUV RC 增幅较大。Vereos PET/CT 设备中 PSF 校正采用理查森-露西 (Richardson-Lucy) 反卷积算法, 通过最大似然估计消除模糊图像与真实图像之间的误差, 本质上是对重建图像的部分容积效应进行校正, 厂家工程师建议设定迭代次数为 1~2; 但为提高小直径病灶检出率, 临床工作中可适当增加迭代次数。

综上, 随 PSF 校正迭代次数增加, 体模 SUV<sub>max</sub> 增加; SUV<sub>mean</sub> 在迭代次数为 1~7 时表现为逐渐增加, 迭代次数 > 7 后具有收敛性。但本研究仅基于体模观察, 且仅采用单一 PET/CT 设备, 有待后续通过临床试验进一步分析。

利益冲突: 全体作者声明无利益冲突。

作者贡献: 雷昕锐研究设计、撰写文章; 王镜添经费支持; 郭小瑞查阅文献、指导; 郝路平修改文章; 武晓伟统计分析; 尚华审阅文章。

[参考文献]

[1] HUANG K, FENG Y, LIANG W, et al. Impact of time of flight and point spread function on quantitative parameters of lung

- lesions in  $^{18}\text{F}$ -FDG PET/CT[J]. BMC Med Imaging, 2021, 21(1):169.
- [2] 莫碧云, 牟兴宇, 秦杰, 等. 对比以国产 NeuWise 及 Philips Ingenuity TF PET/CT 仪所获  $^{18}\text{F}$ -FDG 全身显像图像质量及半定量参数[J]. 中国医学影像技术, 2025, 41(5):816-820.
- [3] ROGASCH J M, SULEIMAN S, HOFHEINZ F, et al. Reconstructed spatial resolution and contrast recovery with Bayesian penalized likelihood reconstruction (Q.Clear) for FDG-PET compared to time-of-flight (TOF) with point spread function (PSF)[J]. EJNMMI Phys, 2020, 7(1):2.
- [4] 黄克敏, 冯彦林, 梁伟棠, 等. 飞行时间和点扩散函数对 PET/CT 图像质量和标准摄取值影响的模型研究[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2021, 41(7):420-424.
- [5] WANG Y, LIN L, QUAN W, et al. Effect of Bayesian penalty likelihood algorithm on  $^{18}\text{F}$ -FDG PET/CT image of lymphoma[J]. Nucl Med Commun, 2022, 43(3):284-291.
- [6] BOELLAARD R, O'DOHERTY M J, WEBER W A, et al. FDG PET and PET/CT: EANM procedure guidelines for tumour PET imaging: Version 1.0[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2010, 37(1):181-200.
- [7] MOHYMEN A A, FARAG H I, REDA S M, et al. Impact of reconstruction algorithms at different sphere-to-background ratios on PET quantification: A phantom study[J]. Appl Radiat Isot, 2025, 220:111761.
- [8] TEYMURAZYAN A, RIAUKA T, JANS H S, et al. Properties of noise in positron emission tomography images reconstructed with filtered-backprojection and row-action maximum likelihood algorithm[J]. J Digit Imaging, 2013, 26(3):447-456.
- [9] 隋秀莉, 石洪成. SUV 测量准确性的影响因素及其解决对策[J]. 国际放射医学核医学杂志, 2021, 45(8):521-526.
- [10] WERNER J, STROBEL K, LEHNICK D, et al. Overall neutrophil-to-lymphocyte ratio and  $\text{SUV}_{\text{max}}$  of nodal metastases predict outcome in head and neck cancer before chemoradiation[J]. Front Oncol, 2021, 11:679287.
- [11] WERNER J, HÜLLNER M W, RUPP N J, et al. Predictive value of pretherapeutic maximum standardized uptake value ( $\text{SUV}_{\text{max}}$ ) in laryngeal and hypopharyngeal cancer[J]. Sci Rep, 2019, 9(1):8972.
- [12] BAYERLEIN R, SPENCER B A, ABDELHAFEZ Y G, et al. Numerical investigation reveals challenges in measuring the contrast recovery coefficients in PET[J]. Phys Med Biol, 2023, 68(21):10.1088/1361-6560/ad00fa.
- [13] CYSOUW M C F, KRAMER G M, HEIJTEL D, et al. Sensitivity of  $^{18}\text{F}$ -fluorodihydrotestosterone PET-CT to count statistics and reconstruction protocol in metastatic castration-resistant prostate cancer[J]. EJNMMI Res, 2019, 9(1):70.