

基于 Q.Flex 技术的 Q.Clear 算法中 β 值对图像质量的影响及最佳 β 值范围研究

王亚亚¹ 王子阳¹ 刘建井² 隋国庆¹ 李艳¹ 岳园芳¹ 卢笛¹ 戴东²

¹天津市肿瘤医院空港医院核医学科、国家恶性肿瘤临床医学研究中心,天津 300308;

²天津医科大学肿瘤医院分子影像与核医学诊疗科、国家恶性肿瘤临床医学研究中心、天津市恶性肿瘤临床医学研究中心、天津市肿瘤防治重点实验室,天津 300060

通信作者:戴东, Email: dongdai@tmu.edu.cn

【摘要】 目的 评估 Q.Flex 技术下惩罚因子 β 值对图像质量和定量分析的影响,探讨图像重建适合的 β 值。**方法** 采用美国国家电气制造商协会 (NEMA)/国际电工委员会 (IEC) 图像质量模体进行模体研究;回顾性收集天津市肿瘤医院空港医院 2022 年 6 月至 2024 年 11 月间因可疑肺结节接受 ¹⁸F-FDG PET/CT 显像的 74 例患者[男 40 例,女 34 例,年龄 61(39,73)岁;83 个高代谢肺结节]进行横断面研究。对模体和患者,均在 Q.Flex 技术下采用 Q.Clear 算法重建图像(β 值:100、200、300、400、500、600、700、800、900、1 000)。分析如下定量参数: SUV、肿瘤代谢体积 (MTV)、病灶糖酵解总量 (TLG) 和信噪比 (SNR)。由 2 位医师分别对患者 PET 图像质量进行视觉评分,取其评分均值进行组间比较。用 Kruskal-Wallis 秩和检验比较不同 β 值组间定量参数的差异;用 Kappa 检验分析医师主观评分的一致性。**结果** 模体和临床研究结果均显示, SUV_{mean} 和 SUV_{max} 随 β 值增大而减小, SNR 随 β 值增高而增高,但仅临床数据组间差异有统计学意义 (H 值:20.65、36.35、55.63, 均 $P < 0.05$); SUV_{peak} 随 β 值增大而缓慢减少, MTV 随 β 值增大而增大, TLG 总体稳定,但不同 β 值组间差异均无统计学意义 (H 值:0.88~15.42, 均 $P \geq 0.05$)。2 位医师间图像评分(病灶显著性、图像清晰度)有良好的一致性 (Kappa 值:0.65、0.63, 均 $P < 0.05$)。不同 β 值组间 2 位医师在病灶显著性和图像清晰度方面的评分均值差异有统计学意义 (H 值:419.29、442.80, 均 $P < 0.001$), $\beta = 500$ 时 2 位医师在上述 2 个方面的均分中位数最高[均为 5(5,5)分],且评分一致率最高[94.0%(78/83)、97.6%(81/83)]。**结论** 惩罚因子 β 值为 500 时,基于 Q.Flex 技术的 ¹⁸F-FDG PET/CT 图像质量最佳。

【关键词】 孤立性肺结节;多发性肺结节;图像处理,计算机辅助;正电子发射断层显像术;体层摄影术,X 线计算机;氟脱氧葡萄糖 F18

基金项目:天津市卫生健康科技项目 (TJWJ2023MS055, TJWJ2023QN105)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20250611-00182

Impact of β value in Q.Clear algorithm on image quality and semi-quantification for PET/CT with Q.Flex

Wang Yaya¹, Wang Ziyang¹, Liu Jianjing², Sui Guoqing¹, Li Yan¹, Yue Yuanfang¹, Lu Di¹, Dai Dong²

¹Department of Nuclear Medicine, Tianjin Cancer Hospital Airport Hospital, National Clinical Research Center for Cancer, Tianjin 300308, China; ²Department of Molecular Imaging and Nuclear Medicine, Tianjin Medical University Cancer Institute and Hospital, National Clinical Research Center for Cancer, Tianjin's Clinical Research Center for Cancer, Tianjin Key Laboratory of Cancer Prevention and Therapy, Tianjin 300060, China
Corresponding author: Dai Dong, Email: dongdai@tmu.edu.cn

【Abstract】 Objective To evaluate the impact of penalization factor (β) value on image quality and semi-quantitative analysis for PET/CT with Q.Flex, and explore the optimal β value for image reconstruction. **Methods** A phantom study was conducted using the National Electrical Manufacturers Association (NEMA)/International Electrotechnical Commission (IEC) image quality phantom. A retrospective cross-sectional study was performed on 74 patients (40 males, 34 females, age: 61(39,73) years; 83 hyper-metabolic pulmonary nodules) who underwent ¹⁸F-FDG PET/CT imaging in Tianjin Cancer Hospital Airport Hospital between June 2022 and November 2024. All PET images were reconstructed using Q.Clear algorithm (β values: 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1 000) with Q.Flex. The following quantitative parameters were analyzed: SUV, metabolic tumor volume (MTV), total lesion glycolysis (TLG), and signal-to-noise ratio (SNR). Visual scoring was performed in PET images by two physicians. The Kruskal-Wallis rank-sum test was used to compare the differences in quantitative parameters among different β value groups,

while *Kappa* test was employed to analyze the consistency of visual scores. **Results** Both the phantom and clinical study showed that SUV_{mean} and SUV_{max} decreased as β values increased, while SNR had an increasing trend, but significant differences among different β value groups were only found in clinical data (H values: 20.65, 36.35, 55.63, all $P < 0.05$). Peak of SUV (SUV_{peak}) had a decreasing trend, while MTV slightly increased and TLG were relatively stable as β values increased, with no statistical difference among different β value groups (H values: 0.88–15.42, all $P \geq 0.05$). The image scoring between the two physicians demonstrated good consistency (tumor conspicuity: *Kappa* = 0.65; image clarity: *Kappa* = 0.63; both $P < 0.05$). The differences of scores in tumor conspicuity and image clarity across different β value groups were both significant (H values: 419.29, 442.80, both $P < 0.001$). The highest median score (5(5,5)) with highest agreement rate between the two physicians (94.0%, 78/83; 97.6%, 81/83) was observed at β being 500. **Conclusion** For ^{18}F -FDG PET/CT with Q.Flex, β value set as 500 is thought to be optimal, which providing best image quality.

【Key words】 Solitary pulmonary nodule; Multiple pulmonary nodules; Image processing, computer-assisted; Positron-emission tomography; Tomography, X-ray computed; Fluorodeoxyglucose F18

Fund program: Tianjin Health Science and Technology Project (TJWJ2023MS055, TJWJ2023QN105)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20250611-00182

有序子集最大期望值迭代法 (ordered subsets expectation maximization, OSEM) 是常用的 PET 显像重建算法,其主要缺点是图像噪声随迭代次数增加而增加^[1]。减少迭代次数可抑制噪声,但会降低定量准确性。Q.Clear 是一种商业化块序列正则化期望最大化 (block-sequential regularized expectation maximization, BSREM) 重建算法。该算法采用点扩散函数 (point-spread function, PSF) 建模,并通过嵌套的噪声抑制正则化惩罚项,从而控制图像噪声。改变 β 值可调整惩罚项权重,进而调整相邻体素间的计数差异,并保持图像边缘的体素差异,实现图像噪声抑制与边缘保持之间的平衡。与 OSEM 算法相比, Q.Clear 算法可有效降低图像噪声,提升定量的准确性^[2]。

呼吸运动是影响 PET 图像质量和定量分析的另一重要因素^[3-4]。最新商业化 Q.Flex 技术通过分析 PET 采集过程中获得的体素运动信息,对各体素差异化校准,以克服运动伪影的影响、改善图像质量和提高定量准确性^[5]。Q.Flex 技术下 β 值对病灶图像质量和定量分析的影响少有研究报道。本研究采用模体与临床结合的方法,探讨在 Q.Flex 技术下不同 β 值对图像质量和定量分析的影响。

资料与方法

1. Q.Flex 技术。Q.Flex 技术 (GE 公司,美国) 原理在之前的研究中已详述^[5],该技术包括三维 (five-dimensional, 5D) 采集和重建两部分: (1) 5D 采集获得全体素向量运动信息,计算最大运动强度与噪声强度的比值 R 。根据扫描部位设置 R 的阈值 (本研究设置为 15) 自动触发 5D 采集,即当最大运动强度超过噪声强度特定倍数时,记录该运动为有效运动信息。 (2) 5D 重建在体素水平进行柔性运

动校正。

2. 模体准备。采用美国国家电气制造商协会 (National Electrical Manufacturers Association, NEMA)/国际电工委员会 (International Electrotechnical Commission, IEC) 图像质量模体,内含直径为 10、13、17、22、28 mm 的小球。本研究在 5 个小球和腔体内分别注射放射性浓度为 77.33 和 9.99 kBq/ml (即信号与背景比值 $\approx 8:1$) 的 ^{18}F -FDG 溶液 (天津原子高科同位素医药有限公司,放化纯 $>99\%$)。使用自制运动平台模拟呼吸运动,模体沿轴向进行幅度为 3 cm,持续时间为 4 s 的往复式运动,触发 5D 采集和重建^[6]。

3. 临床研究对象。回顾性收集天津市肿瘤医院空港医院 2022 年 6 月至 2024 年 11 月间因可疑肺结节接受 ^{18}F -FDG PET/CT 显像的患者进行横断面研究。纳入标准: (1) PET/CT 图像上有肉眼可见最大径 ≤ 3 cm 的实性高代谢 (结节 SUV_{max} $>$ 肝脏本底 SUV_{max}) 结节; (2) 触发 5D 采集和重建。排除标准: 未配合完成 5D PET/CT 显像者。最终共纳入 74 例患者的 83 个结节,74 例中男 40 例,女 34 例;年龄 61 (39,73) 岁;身高 165 (159,170) cm;体质量 69.2 (61.9,75.1) kg。本研究经天津市肿瘤医院空港医院医学伦理委员会批准 (批件号: LWK-2025-0025), 纳入患者均签署 PET/CT 检查知情同意书。

4. PET/CT 采集与重建。模体和患者均在配有 Q.Flex 技术的 Discovery MAX+PET/CT (GE 公司,美国) 上进行采集。模体 PET 采集参数: 层厚 3.75 mm, 矩阵 192×192 , 每个床位采集 3 min (23% 床位重叠)。患者空腹 6 h 以上,血糖 ≤ 11.1 mmol/L,按患者体质量注射 ^{18}F -FDG (3.04~3.70 MBq/kg) 后 60 min 进行 PET/CT 采集。PET 扫描为表模式 (listmode), 范围

从颅底至大腿中段,层厚 2.78 mm,矩阵 256×256,每个床位采集 1.5 min。CT 扫描参数:管电压 120 kV,自动电流范围:30~180 mA,噪声指数 25,螺距 0.984,层厚 3.75 mm,旋转时间 0.5 s。对 PET 图像均采用 Q.Clear 算法重建(β 值:100、200、300、400、500、600、700、800、900、1 000)。

5. 图像分析。在 Advantage Workstation 4.7 (GE 公司,美国)工作站上分析图像,用 PET VCAR (volume computed assisted reading) 软件在 42% 阈值下自动勾画热灶(病灶),记录其 SUV_{max} 、 SUV_{mean} 、 SUV_{peak} (peak of SUV, SUV_{peak})、肿瘤代谢体积 (metabolic tumor volume, MTV) 和病灶糖酵解总量 (total lesion glycolysis, TLG)。背景噪声在模体中以背景中心均匀区域中直径 3 cm 球体的 SUV 标准差 (standard deviation of SUV, SUV_{SD}) 表示,在患者中以正常肝右叶上极摄取均匀区域中直径 1 cm 球体的 SUV_{SD} 表示。信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) = 热灶(病灶) SUV_{mean}/SUV_{SD} , SNR 增加量指相邻 β 值之间 SNR 的差异量。

6. 视觉评分。由 2 位具有 5 年以上 PET/CT 阅片经验的主治医师对 83 个结节的图像质量进行独立盲评。根据 2 个指标 (图像清晰度和病灶显著性) 进行 5 分法评分:1 分为整个图像清晰度、平滑程度差,病灶无法识别;2 分为整体图像模糊、噪声大,诊断能效较差;3 分为诊断图像模糊、有较多小噪声点,但可以诊断;4 分为诊断图像稍模糊,病灶检出性良好;5 分为图像清晰、几乎无噪声,图像质量好,病灶检出性能优秀。计算两评分者的评分均值,进行组间差异比较。

7. 统计学分析。使用 R 语言 (4.4.2 版) 进行统计学分析。不符合正态分布的定量资料使用 $M(Q_1, Q_3)$ 表示,使用 Kruskal-Wallis 秩和检验比较组间差异,进一步两两比较采用 Nemenyi 检验。采用

Kappa 检验分析 2 位医师的评分一致性。 $P < 0.05$ (双侧检验) 为差异或一致性有统计学意义。

结 果

1. 图像质量评估。总体上,模体和临床研究结果均显示,SNR 随 β 值增高而增高 (图 1)。临床各 SNR 增加量间差异有统计学意义 ($H = 55.63, P < 0.001$),模体 SNR 增量差异无统计学意义 ($H = 12.71, P = 0.548$)。2 位医师在图像清晰度评分 ($Kappa = 0.63$)、病灶显著性评分 ($Kappa = 0.65$) 方面均展现出良好的一致性 (均 $P < 0.05$)。不同 β 值组间 2 位医师在上述 2 个方面的评分均值差异有统计学意义 (H 值:442.80、419.29,均 $P < 0.001$;图 2),进一步两两比较显示, β 值取 500 和 600 时评分 [图像清晰度:5.0 (5.0, 5.0) 和 4.5 (4.0, 5.0) 分;病灶显著性:5.0 (5.0, 5.0) 和 5.0 (4.0, 5.0) 分] 高于其他组 (均 $P < 0.05$)。 β 值取 500 时,2 位评分者的一致率最高 [图像清晰度:97.6% (81/83);病灶显著性:94.0% (78/83)]。图 3 展示了不同 β 值的代表性图像。

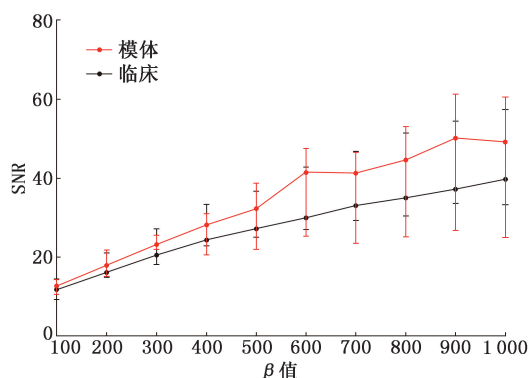


图 1 不同 β 值下 ^{18}F -FDG PET/CT 图像信噪比 (SNR) 变化趋势 临床研究对象为 74 例疑似肺结节患者的 83 个高代谢结节

2. 代谢参数评估。图 4 显示, SUV_{mean} 和 SUV_{max} 均随 β 值增大而减小, β 值在 400~1 000 间上述参

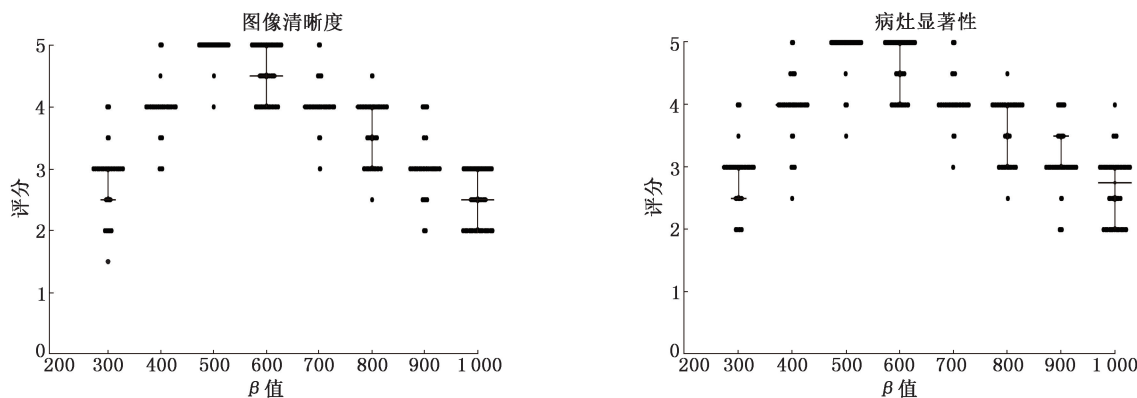


图 2 83 个肺高代谢结节 (74 例患者) 的不同 β 值下 ^{18}F -FDG PET/CT 图像质量评分 β 值取 100、200 时评分过低,未展示

数相对稳定,不同 β 组间差异仅临床数据有统计学意义(临床: H 值:20.65、36.35, P 值:0.014、<0.001;模体: H 值:15.42、16.91, P 值:0.080、0.050)。SUV_{peak}随 β 值增大而缓慢减少,差异不明显(模体: $H=15.42$, $P=0.080$;临床: $H=1.88$, $P=0.993$)。MTV随 β 值增大而增大, β 值在400~1000间该参数相对稳定(模体: $H=4.49$, $P=0.814$;临床: $H=7.73$, $P=0.561$)。TLG随 β 值增大而增大,总体稳定(模体: $H=0.88$,临床: $H=1.03$,均 $P>0.05$)。

讨 论

本研究通过模体和临床研究两部分探索了 Q.Flex 技术下不同 β 值对图像质量及定量结果的影响。本

研究结果显示,SNR随 β 值增高而增高,临床数据显示不同 β 组间 SNR 的增加量差异有统计学意义($P<0.05$),表明 β 值的增加能够显著抑制噪声。但同时,SNR 离散程度的增加提示 β 值过大会降低图像质量的稳定性。代谢参数分析显示,SUV随 β 值增大而减小,MTV和TLG随 β 值的增大而增大,但仅SUV_{max}、SUV_{mean}的组间差异有统计学意义(均 $P<0.05$),提示这2个参数易受 β 值改变的影响。

已有研究基于模体分析 β 值对 PET 图像质量和定量的影响^[7],但鲜见在 5D 重建下针对 β 值在模体评估的研究。Rogasch 等^[8]和 Sadeghi 等^[7]的研究结果均显示 SNR 随 β 值增加而增加,与本研究

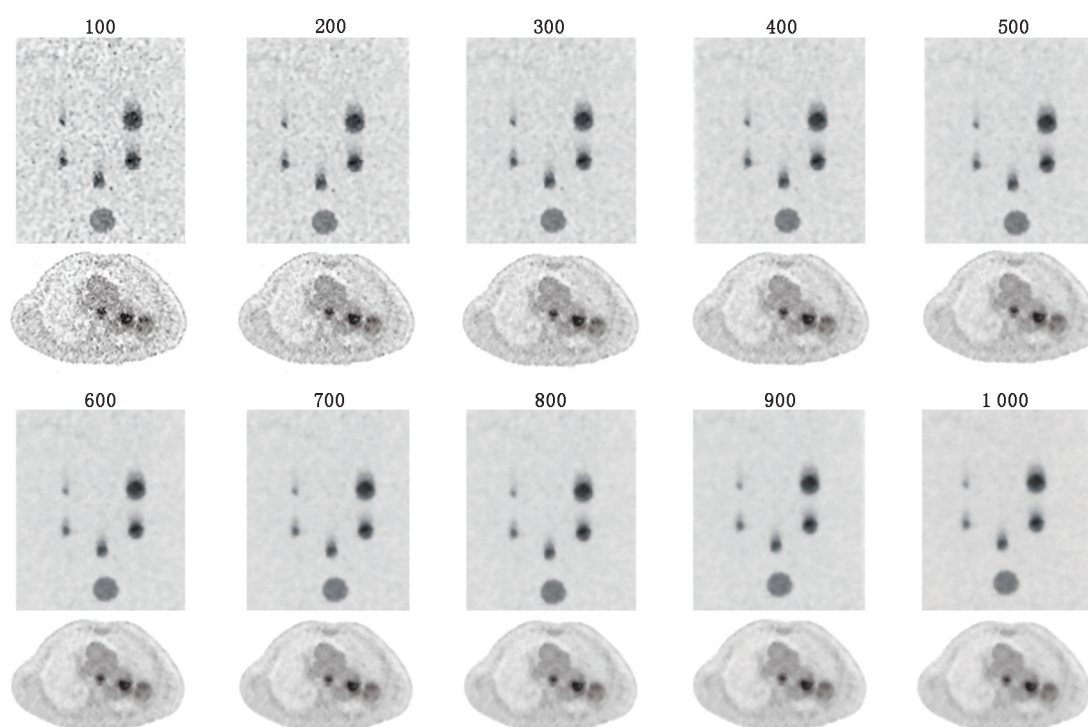


图3 不同 β 值组模体与疑似肺结节患者(男,83岁)¹⁸F-FDG PET 图像(1,3排为模体,2,4排为患者) 各组小球均可看到随运动发生的运动伪影,患者左肺均可见高代谢病灶且病灶中心空洞,随 β 值逐渐增大而不可见

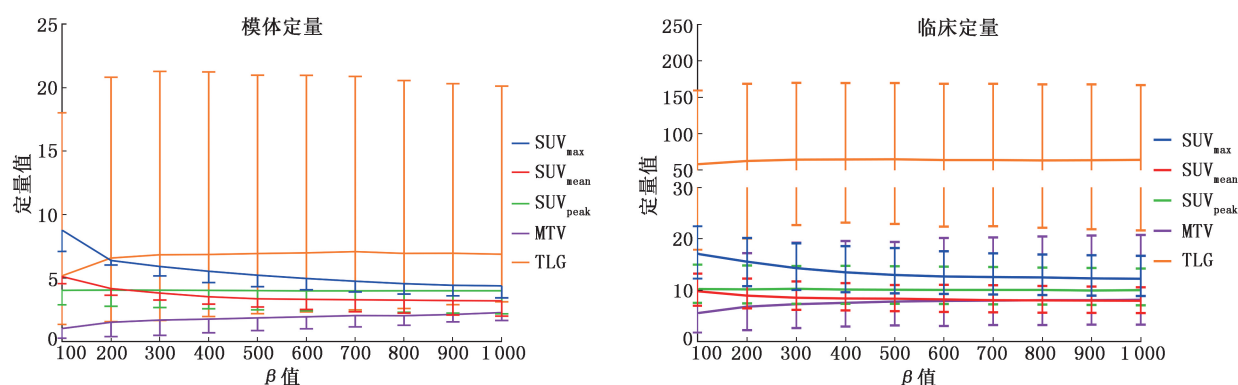


图4 不同 β 值下模体热灶和临床病灶(83个肺结节)¹⁸F-FDG PET/CT 显像代谢参数变化趋势 SUV_{peak}为 SUV 峰值,MTV 为肿瘤代谢体积(单位 ml),TLG 为病变糖酵解总量

结果一致。但上述研究中 β 值设置范围较小(100~500),缺少超高 β 值对 SNR 影响的评估。笔者尚未检索到有关 β 值在模体 SUV、MTV 和 TLG 中影响的研究。本研究模体评估的结果显示, β 值在 400~1 000 范围时,5D 重建下上述定量参数相对稳定。

本研究中对疑似肺结节患者图像质量评分结果显示, $\beta=500$ 组是 5D 重建下评分最高且 2 位医师的一致率最高的一组。Howard 等^[2]以病灶可检测性为标准的评估结果显示, β 值取 150(150~350)时视觉评分较高。Otani 等^[9]分别以图像质量和病灶可见性为标准进行评估,结果显示 β 值取 500(200~1 000)时,图像质量最佳;而小病灶(直径 ≤ 2 cm)在 β 值取 200 时可见性最高。这一结果提示入组病灶大小不同可能是本研究与 Howard 等^[2]的研究结果存在差异的原因。 β 值增加能够抑制噪声、改善图像质量,但过高的 β 值会导致图像过度平滑,可能降低小病灶的检出能力。因此最佳 β 值的选择可能要考量噪声抑制和小病灶显示之间的平衡。未来本研究团队需要针对小病灶患者,以病灶检出能力为标准进一步探索最佳 β 值。SNR 的评估结果与模体的结果基本一致,即 β 值增加能够抑制噪声,但过高的 β 值可能会降低图像质量稳定性。

代谢参数分析显示,本研究临床评估与模体实验结果基本一致,区别在于临床数据中不同 β 组间 SUV_{max} 、 SUV_{mean} 间差异有统计学意义(H 值:36.35、20.65,均 $P<0.05$)。Otani 等^[9]的临床评估结果显示,随着 β 值增高,病灶 SUV_{max} 和 SUV_{mean} 减低,与本研究结果一致。其进一步的小病灶(直径 ≤ 2 cm)分析显示, SUV_{max} 受 β 值变化影响较大。Trägårdh 等^[10]的研究结果显示,病灶 SUV_{max} 和 SUV_{peak} 随 β 值增加而减低,其中 SUV_{max} 差异明显, SUV_{peak} 变化相对平缓,与本研究结果一致。综合文献及本研究的结果,笔者初步认为 SUV_{peak} 、MTV 和 TLG 是受 β 值影响较少的参数,5D 重建下代谢参数在 β 值取 400~1 000 时相对稳定, SUV_{max} 是受 β 值影响最大的参数。

本研究局限性如下:(1)单中心回顾性研究的性质可能导致患者选择偏差,未来需开展多中心、前瞻性研究进一步验证;(2)缺少其他独立因素的分析,如未根据肿瘤大小进行分类等,未来仍需开展更多研究,为临床工作选择适合的 β 值提供更准确的指导方法。

综上所述,本研究结果表明,基于 Q.Flex 技术

的¹⁸F-FDG PET/CT 显像 β 值选择 500 时图像质量最佳,代谢参数相对稳定。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 王亚亚:研究设计、数据分析、论文撰写;王子阳:研究设计、数据分析;刘建井:研究设计;隋国庆:数据分析;李艳、岳园芳、卢笛:研究指导;戴东:研究指导、论文审阅、经费支持

参 考 文 献

- [1] Miller TR, Wallis JW. Clinically important characteristics of maximum-likelihood reconstruction[J]. J Nucl Med, 1992, 33(9): 1678-1684.
- [2] Howard BA, Morgan R, Thorpe MP, et al. Comparison of Bayesian penalized likelihood reconstruction versus OS-EM for characterization of small pulmonary nodules in oncologic PET/CT[J]. Ann Nucl Med, 2017, 31(8): 623-628. DOI:10.1007/s12149-017-1192-1.
- [3] Beyer T, Antoch G, Blodgett T, et al. Dual-modality PET/CT imaging: the effect of respiratory motion on combined image quality in clinical oncology[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2003, 30(4): 588-596. DOI:10.1007/s00259-002-1097-6.
- [4] Liu C, Pierce LA, Alessio AM, et al. The impact of respiratory motion on tumor quantification and delineation in static PET/CT imaging[J]. Phys Med Biol, 2009, 54(24): 7345-7362. DOI:10.1088/0031-9155/54/24/007.
- [5] 戴东,刘建井,卢笛,等. Q.Flex 技术提高肺结节 PET/CT 图像质量和定量准确性的临床研究[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2024, 44(2): 98-103. DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20221105-00334.
- [6] Dai D, Liu JJ, Lu D, et al. Clinical investigation of Q.Flex for improvement of PET/CT image quality and quantitative accuracy of pulmonary nodules[J]. Chin J Nucl Med Mol Imaging, 2024, 44(2): 98-103. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20221105-00334.
- [7] Wang Z, Liu J, Lu D, et al. Evaluation of a motion correction algorithm in lung cancer PET/CT: phantom validation and patient studies[J]. Med Phys, 2025, 52(7): e17846. DOI:10.1002/mp.17846.
- [8] Sadeghi F, Sheikhzadeh P, Farzanehfar S, et al. The effects of various penalty parameter values in Q.Clear algorithm for rectal cancer detection on ¹⁸F-FDG images using a BGO-based PET/CT scanner: a phantom and clinical study[J]. EJNMMI Phys, 2023, 10(1): 63. DOI:10.1186/s40658-023-00587-y.
- [9] Rogasch JM, 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. DOI:10.1186/s40658-020-0270-y.
- [10] Otani T, Hosono M, Kanagaki M, et al. Evaluation and optimization of a new PET reconstruction algorithm, Bayesian penalized likelihood reconstruction, for lung cancer assessment according to lesion size[J]. AJR Am J Roentgenol, 2019, 213(2): W50-W56. DOI:10.2214/AJR.18.20478.
- [11] Trägårdh E, Minarik D, Almquist H, et al. Impact of acquisition time and penalizing factor in a block-sequential regularized expectation maximization reconstruction algorithm on a Si-photomultiplier-based PET-CT system for ¹⁸F-FDG[J]. EJNMMI Res, 2019, 9(1): 64. DOI:10.1186/s13550-019-0535-4.

(收稿日期:2025-06-11)