

基于块序列正则化期望最大化重建算法对 ^{90}Y PET/CT 显像优化的研究

张田田¹ 梁子威¹ 杭仲斌¹ 张岩¹ 刘德庆¹ 单宇航¹

廖勇² 黄鑫² 梁斌³ 张琳² 冯晓彬² 何作祥¹

¹清华大学北京清华长庚医院核医学科,北京 102218;²清华大学北京清华长庚医院肝胆胰腺外科,北京 102218;³清华大学北京清华长庚医院放射科,北京 102218

通信作者:何作祥, Email: zuoxianghe@hotmail.com

【摘要】 目的 采用块序列正则化期望最大化 (BSREM) 重建算法优化 ^{90}Y -选择性内放射治疗 (^{90}Y -SIRT) 后 PET/CT 显像的图像质量, 评估不同 β 值对图像质量和定量分析的影响。方法 回顾性纳入 2024 年 6 月至 2025 年 1 月清华大学北京清华长庚医院收治的 8 例接受 ^{90}Y 树脂微球治疗的男性肝脏肿瘤患者 [年龄为 62(52, 71) 岁], 患者均在微球给药 [给药活度 2.6(0.9, 3.6) GBq] 后行 ^{90}Y PET/CT 肝显像。显像数据经 BSREM 重建, 重建过程中采用不同的噪声惩罚加权因子 β (0, 300, 1 000, 1 500, 2 500, 3 500, 4 000, 6 000, 8 000, 10 000)。由 2 位核医学医师对图像质量进行 4 分制评分 (1=最差, 4=最优), 计算 2 位医师的评分一致性并行 Kappa 检验, 以两者均分为最终评分结果, 用 Friedman 检验比较各 β 值组间评分差异, 以评分最高且评分者间差异最小的 β 值作为视觉优化最佳参数。采用 MIM 软件计算肿瘤区、正常肝组织及全肝的最大吸收剂量 (D_{\max}) 和平均吸收剂量 (D_{mean}), 通过 CV 评估 β 值对定量结果的影响。结果 β 值 0, 3 500, 6 000 组的评分一致性最高, 均为 7/8, 均 Kappa=0.88 (均 $P<0.05$); 不同 β 值组间评分差异有统计学意义 ($\chi^2=28.74, P<0.001$), 其中 β 值 3 500, 4 000 组的评分均较高 [4.0(4.0, 4.0) 分], 综合评估 $\beta=3 500$ 为视觉优化最佳参数。定量分析示: (1) 随 β 值升高, 肿瘤区、正常肝及全肝的 D_{\max} 呈下降趋势, $\beta>1 000$ 时降幅趋缓 (各区域 D_{\max} 的 CV 为 56%~67%); (2) 各区域 D_{mean} 在不同 β 值下保持稳定 (CV 为 0.04%~5.00%)。结论 BSREM 重建中, $\beta=3 500$ 为 ^{90}Y -PET 图像质量优化最佳参数。 β 值显著影响 D_{\max} , 当 $\beta>1 000$ 时, D_{\max} 趋于稳定, 但 β 值对 D_{mean} 无明显影响, 提示重建参数主要调整剂量分布形态。

【关键词】 肝肿瘤; 近距离放射疗法; 微球体; 钷放射性同位素; 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

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC2402000)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20250307-00063

Optimization of ^{90}Y PET/CT imaging based on the block-sequential regularized expectation maximization reconstruction algorithm

Zhang Tiantian¹, Liang Ziwei¹, Hang Zhongbin¹, Zhang Yan¹, Liu Deqing¹, Shan Yuhang¹, Liao Yong², Huang Xin², Liang Bin³, Zhang Lin², Feng Xiaobin², He Zuoxiang¹

¹Department of Nuclear Medicine, Beijing Tsinghua Changgung Hospital, School of Clinical Medicine, Tsinghua Medicine Tsinghua University, Beijing 102218, China; ²Department of Hepatobiliary and Pancreatic Surgery, Beijing Tsinghua Changgung Hospital, School of Clinical Medicine, Tsinghua Medicine Tsinghua University, Beijing 102218, China; ³Department of Radiology, Beijing Tsinghua Changgung Hospital, School of Clinical Medicine, Tsinghua Medicine Tsinghua University, Beijing 102218, China

Corresponding author: He Zuoxiang, Email: zuoxianghe@hotmail.com

【Abstract】 **Objective** To optimize the image quality of PET/CT following ^{90}Y -selective internal radiation therapy (^{90}Y -SIRT) using block-sequential regularized expectation maximization (BSREM) reconstruction algorithm, and to evaluate its impact of different β values on image quality and quantitative analysis. **Methods** A retrospective study was conducted on 8 male patients with hepatic tumors (age: 62(52, 71) years) treated at Beijing Tsinghua Changgung Hospital, School of Clinical Medicine, Tsinghua Medicine Tsinghua University, between June 2024 and January 2025. All patients were treated with ^{90}Y resin microspheres (2.6(0.9, 3.6) GBq) and underwent post-treatment ^{90}Y PET/CT liver imaging. Imaging data were reconstructed using BSREM with different noise penalty weighting factors (β values: 0, 300, 1 000, 1 500, 2 500, 3 500, 4 000, 6 000, 8 000, 10 000). Visual assessment was independently performed by two nu-

clear medicine physicians, using a 4-point scale (1 = worst, 4 = best). The mean score was considered as the final score. The consistency of the 2 reviewers was calculated and analyzed by *Kappa* test. Visual scores of different β value groups were compared by Friedman test. The β value demonstrating highest mean score and optimal consistency was selected as the optimal. Quantitative analysis was performed using MIM software to calculate the maximum absorbed dose (D_{\max}) and the mean absorbed dose (D_{mean}) for tumor, normal liver, and whole liver regions, and the *CV* was used to evaluate the impact of β values. **Results** The visual assessment consistency of reviewers in 3 β value groups (0, 3 500, 6 000) were the highest (7/8) (all *kappa* = 0.88, all $P < 0.05$). Visual scores of the 10 β value groups were significantly different ($\chi^2 = 28.74$, $P < 0.001$), and the visual scores of 2 β value groups (3 500, 4 000) were the highest, both of which were 4.0 (4.0, 4.0). Overall, visual assessment identified $\beta = 3 500$ as the optimal. Quantitative analysis revealed that, (1) D_{\max} in all regions (tumor, normal liver, whole liver) decreased with the increasing β values, stabilizing when $\beta > 1 000$ (*CV* 56%–67%); (2) D_{mean} remained stable across different β values (*CV* 0.04%–5.00%). **Conclusions** In BSREM reconstruction, $\beta = 3 500$ is the optimal parameter for improving ^{90}Y -PET image quality. β values significantly affect D_{\max} (stabilizing at $\beta > 1 000$), but have no significant impact on D_{mean} , suggesting that reconstruction parameters primarily influence dose distribution morphology rather than average dose assessments.

【Key words】 Liver neoplasms; Brachytherapy; Microspheres; Yttrium radioisotopes; Image processing, computer-assisted; Positron-emission tomography; Tomography, X-ray computed

Fund program: National Key Research and Development Program of China (2022YFC2402000)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20250307-00063

^{90}Y -选择性内放射治疗 (selective internal radiation therapy, SIRT) 通过肝动脉栓塞 ^{90}Y 微球治疗不可切除肝脏恶性肿瘤^[1-3]。准确评估 ^{90}Y -SIRT 后 ^{90}Y 微球的分布是评价治疗效果和保障患者安全性的重要途径^[4-6]。治疗后通过 PET/CT 评估 ^{90}Y 分布时, 由于 ^{90}Y 正电子分支比仅 3.19×10^{-6} ^[7] [较 ^{18}F (96.86%)^[8-9] 低], 其图像噪声高、计数率低。传统有序子集最大期望迭代法重建需平衡迭代次数与噪声, 难以兼顾图像质量与定量精度^[10]。块序列正则化期望最大化 (block-sequential regularized expectation maximization, BSREM) 作为一种 PET 重建算法, 可以使 PET 图像在不因噪声降低图像质量的情况下达到完全收敛, 实现精准定量的同时, 保持高信噪比和高的空间分辨率^[11]。本研究旨在通过临床患者数据, 系统评估 BSREM 算法不同噪声惩罚加权因子 β 对 ^{90}Y PET/CT 图像质量的优化效果, 并量化其对肿瘤区域、正常肝区域及全肝区域吸收剂量的影响, 为临床应用提供参数依据。

资料与方法

1. 研究对象。回顾性纳入 2024 年 6 月至 2025 年 1 月 8 例在清华大学北京清华长庚医院核医学科接受 ^{90}Y -SIRT (给药活度 0.7~5.3 GBq) 的患者。患者均为男性, 年龄为 62 (52, 71) 岁。入组标准: (1) 根据临床指征需要接受 ^{90}Y -SIRT 的肝脏肿瘤患者; (2) CT 上至少有 1 处可测量的大于 17 mm 的病变; (3) 给药后 4 h 内接受 PET/CT 显像。本机构进行回顾性图像评估, 已获得清华大学北京清华长庚医院伦理委员会审批 (审查编号: 25282-6-01)。

2. ^{90}Y PET/CT 肝显像。8 例患者注射 ^{90}Y 微球 (武汉社泰医疗科技有限公司提供) 的活度为 2.6 (0.9, 3.6) GBq。 ^{90}Y 微球给药后 4 h 内行 PET/CT 肝显像, 设备为美国 GE Discovery MI PET/CT 仪, CT 扫描参数: 电压 120 kV, 电流 200 mA, 窗宽/窗位为 400/40; PET 数据采集采用列表模式 (listmode), 每个床位采集 20 min, 1~2 个床位 (包围肝脏), 矩阵 192×192。除进行常规的有序子集最大期望值迭代法重建外, 还采用 BSREM 重建, 设置系列 β 值: 0、300、1 000、1 500、2 500、3 500、4 000、6 000、8 000、10 000。本文只针对 BSREM 重建进行分析。

3. 图像评估。(1) 视觉评估。对每例患者的多组重建图像进行匿名评估, 采用随机数字表生成编号, 由 2 名 5 年以上阅片经验的核医学医师分别对每例患者的各组图像质量进行视觉评分^[11]: 1 分为差, 图像无法诊断; 2 分为较差, 图像噪声广泛分布, 病灶显示不清楚; 3 分为一般, 图像存在零星的肝外噪声, 病灶和本底边界界限不清; 4 分为优, 图像无明显的肝外噪声, 病灶与本底边界清楚。2 名核医学医师在评估前完成标准化培训。对每种重建条件 (不同 β 值) 下的图像均进行评分, 计算并分析各 β 值组 2 位医师的评分一致性。每例患者图像质量最终取 2 位医师的均分。以评分最高且医师间差异最小 (一致性最高) 组的 β 值作为视觉优化的最佳 β 值。

(2) 定量评估。采用美国 MIM SurePlan Liver ^{90}Y (MIM 7.2.7) 后处理商用软件进行定量测量。首先进行全肝的自动勾画, 随后手动勾画肿瘤 ROI, 并且对同一患者在不同 β 值下保持统一的勾画区域, 以保证一致性。勾画完成后, 输入给药活度, 自动生成

肿瘤区域、正常肝区域和全肝区域的最大吸收剂量 (maximum absorbed dose, D_{\max}) 和平均吸收剂量 (mean absorbed dose, D_{mean})。为了评估不同重建 β 值对 D_{mean} 和 D_{\max} 测定的影响, 计算每例患者不同 β 值下吸收剂量的 CV, 计算公式如下: $CV = \sigma/\mu \times 100\%$, 其中 σ 为某例患者所有重建条件下参数的标准差; μ 为某例患者所有重建条件下参数的均值。

4. 统计学分析。使用 IBM SPSS Statistics 27.0 进行统计学分析, 不符合正态分布的定量资料用 $M(Q_1, Q_3)$ 表示。2 名图像评估医师间的视觉评分一致性行 Kappa 检验, 不同 β 组间视觉评分差异行 Friedman 检验, 进一步行两两比较使用 Wilcoxon 符号秩检验及 Bonferroni 校正。 $P < 0.05$ (双侧检验) 为差异或一致性有统计学意义, Bonferroni 校正 $P < 0.0011$ 为差异有统计学意义。

结 果

1. 视觉评估。8 例患者不同 BSREM 重建 β 值下的图像评分及一致性见表 1。不同 β 值组的视觉评分差异具有统计学意义 ($\chi^2 = 28.74, P < 0.001$), 其中 β 值 3 500、4 000 组的评分均较高 [4.0 (4.0, 4.0) 分]。进一步两两比较表明, $\beta = 3 500$ 组的评分显著高于 0、300、1 000、8 000、10 000 组 (均校正后 $P < 0.0011$), 但与 2 500、4 000、6 000 组差异无统计学意义 (均校正后 $P > 0.0011$)。 β 值 0、3 500、6 000 组的 2 位评分者一致性最高, 均为 7/8; 各组 Kappa 值均为 0.88 (均 $P < 0.05$)。 综上, 视觉分析图像质量最佳 β 值确定为 3 500。典型病例图像见图 1。

表 1 8 例肝肿瘤患者 ^{90}Y PET/CT 显像不同块序列正则化期望最大化 (BSREM) 重建 β 值下的图像评分及一致性

β 值	视觉评分 [分; $M(Q_1, Q_3)$]		最终评分 [分; $M(Q_1, Q_3)$]	一致性
	1 号评分者	2 号评分者		
0	1.0 (1.0, 1.8)	1.0 (1.0, 1.0)	1.0 (1.0, 1.0)	7/8
300	1.0 (1.0, 2.0)	1.0 (1.0, 2.0)	1.0 (1.0, 2.0)	6/8
1 000	2.0 (2.0, 2.8)	2.0 (2.0, 2.8)	2.0 (2.0, 2.8)	6/8
1 500	3.0 (2.3, 3.0)	2.5 (2.0, 3.0)	3.0 (2.0, 3.0)	6/8
2 500	4.0 (3.0, 4.0)	3.0 (3.0, 4.0)	3.5 (3.0, 4.0)	6/8
3 500	4.0 (4.0, 4.0)	4.0 (4.0, 4.0)	4.0 (4.0, 4.0)	7/8
4 000	4.0 (3.3, 4.0)	4.0 (3.0, 4.0)	4.0 (4.0, 4.0)	6/8
6 000	3.5 (3.0, 4.0)	4.0 (3.0, 4.0)	4.0 (3.0, 4.0)	7/8
8 000	3.0 (3.0, 3.0)	3.0 (3.0, 4.0)	3.0 (3.0, 3.0)	5/8
10 000	3.0 (2.0, 3.0)	2.0 (2.0, 3.0)	2.5 (2.0, 3.0)	5/8

2. 定量评估。(1) D_{mean} 。8 例患者不同重建 β 值下肿瘤区域、正常肝区域和全肝区域的 D_{mean} 如图 2A 所示, 随着 β 值增大, 上述区域的 D_{mean} 变化并不

明显, 表明 β 值改变对各区域 D_{mean} 的影响较小。另外, 正常肝的 D_{mean} 相较于整肝和肿瘤区域出现波动, 这是因为正常肝的 D_{mean} 较小, 存在较大计数统计波动。

(2) D_{\max} 。8 例患者不同重建 β 值下肿瘤区域、正常肝区域和全肝区域的 D_{\max} 如图 2B 所示, 随着 β 值增大, 上述区域的 D_{\max} 均呈现指数下降趋势, 特别是在 $\beta > 1 000$ 时, 下降幅度趋于平缓, 进一步表明 β 值对 D_{\max} 的影响随着 β 值的增加逐渐减弱。

(3) CV。不同重建 β 值组之间, D_{\max} 的变异性较大, CV 在 56%~67% 间; D_{mean} 的变异性很小, CV 在 0.04%~5.00% 之间, 表明 β 值的改变对剂量分布均匀性的影响较大, 但是几乎不影响 D_{mean} 的评估。

讨 论

当前, 基于 BSREM 算法的临床研究多集中于 ^{18}F -FDG PET/CT^[12-15], 而针对 ^{90}Y PET/CT 显像最佳 β 值的研究较少, 且此前对 ^{90}Y 的研究多基于模体数据, 缺乏临床患者尤其是定量相关参数的系列 β 值评估与验证^[16-19]。本研究基于 BSREM 重建算法, 在临床患者中系统评估了不同 β 值对图像质量和 ^{90}Y 剂量分布定量参数 (D_{\max} 、 D_{mean}) 的影响。 研究结果显示, 综合图像质量评分及评分者间差异分析, $\beta = 3 500$ 组在视觉评分中表现最优, 且与 $\beta = 2 500$ 、4 000、6 000 组无显著差异, 提示 $\beta = 3 500$ 可作为临床参数优化的平衡点。进一步对剂量参数的分析显示, D_{\max} 随 β 值增加呈下降趋势 ($\beta > 1 000$ 时趋缓, CV 在 56%~67% 间), 而 D_{mean} 在不同 β 值下保持稳定 (CV 在 0.04%~5.00% 间), 这表明 β 值主要通过调整局部剂量分布形态 (如病灶内高摄取区域的界定) 影响 D_{\max} , 而对全区域平均剂量的评估影响较小。上述发现与 Rowley 等^[17] 基于模体的研究结果不同, 该模体研究表明 β 值增加可降低噪声但减少活度恢复, 推荐 $\beta = 1 000$ 为定量分析最佳值; 然而, 本研究提示对于临床患者数据, $\beta > 1 000$ 时 D_{\max} 趋于稳定, 可能更适用于实际剂量评估的稳定性需求。此外, Hou 等^[16] 建议视觉优化 β 值取 2 500, 定量分析 β 值取 300~1 000, 但本研究综合结果表明, $\beta = 3 500$ 在视觉质量与定量稳定性之间更具临床实用性。

本研究的创新性在于, 在接受 ^{90}Y -SIRT 的患者中验证了 BSREM 算法的优势: 其在降低图像噪声的同时, 可提供更精准的剂量分布信息 (尤其是肿瘤区域 D_{\max})。然而, 本研究也存在以下局限性: 首先, 样本量较小且为单中心设计, 可能限制统计效能

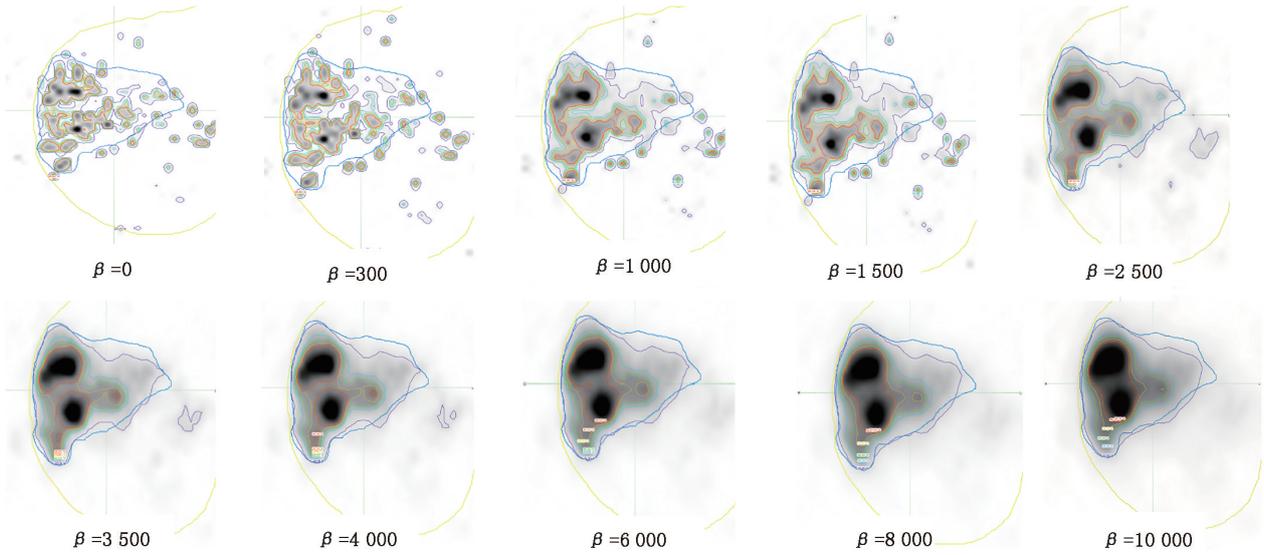


图 1 肝细胞癌患者(患者 1,男,62 岁)⁹⁰Y PET/CT 显像不同块序列正则化期望最大化(BSREM)重建 β 值下的肿瘤图像。患者⁹⁰Y 微球给药活度为 0.7 GBq。可见 β 值在 2 500~6 000 的范围,对应图像质量较高、较清晰

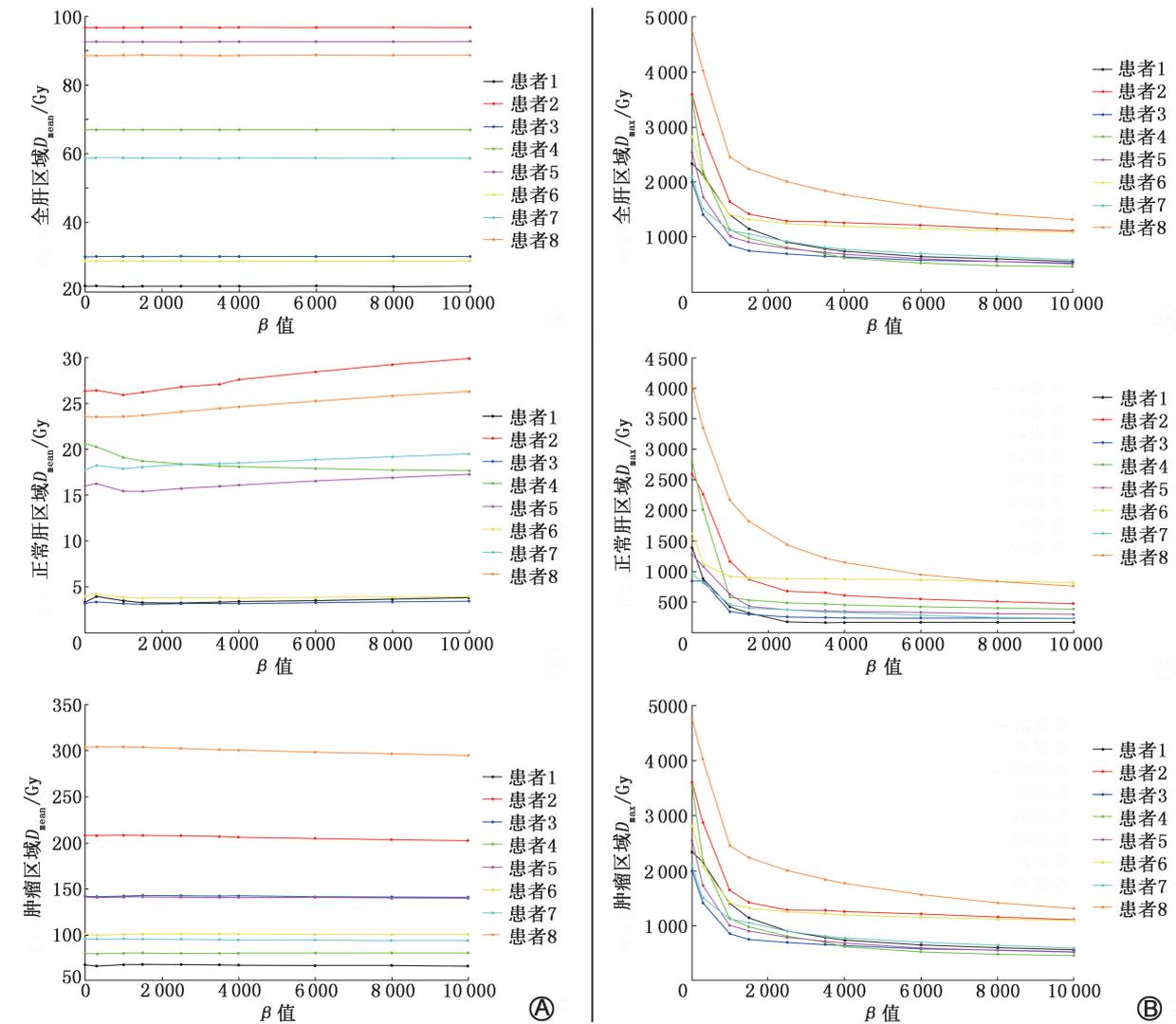


图 2 肝肿瘤患者⁹⁰Y PET/CT 显像不同 BSREM 重建 β 值(0,300,1 000,1 500,2 500,3 500,4 000,6 000,8 000,10 000)下各区域吸收剂量变化。A.平均吸收剂量(D_{mean})变化;B.最大吸收剂量(D_{max})变化。患者 1~8 均为男性,年龄依次为 62,53,70,62,77,45,72,38 岁

及结论的普适性;其次,尽管采用标准化评分流程,视觉评估仍存在主观性风险,未来需结合深度学习等自动化分析方法提升客观性;最后,不同设备及显像剂的 β 值优化可能存在差异^[10,20-25],需进一步开展多中心研究验证参数的广泛适用性。

总之,本研究采用 BSREM 算法,基于多个 β 值分析图像,结果表明 $\beta=3\ 500$ 是优化⁹⁰Y-PET/CT 图像质量的合理选择,其在高 β 值范围内(>1 000)可提供稳定的 D_{\max} 评估,且对 D_{mean} 无显著影响。这一结果为⁹⁰Y-SIRT 术后剂量分布的精准分析提供了重要参考。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 张田田:研究设计、论文撰写;梁子威:研究设计与指导;杭仲斌:论文撰写、数据处理;张岩:图像制作、论文审阅;刘德庆、单宇航:病例筛查;廖勇、黄鑫、梁斌、张琳、冯晓彬:图像重建、靶区勾画;何作祥:研究指导、论文审阅、经费支持

参 考 文 献

- [1] Murthy R, Nunez R, Szklaruk J, et al. Yttrium-90 microsphere therapy for hepatic malignancy: devices, indications, technical considerations, and potential complications [J]. *Radiographics*, 2005, 25 Suppl 1: S41-S55. DOI:10.1148/rg.25si055515.
- [2] Feng X, Zhang L, Niu H, et al. Selective internal radiation therapy with yttrium-90 resin microspheres followed by anatomical hepatectomy: a potential curative strategy in advanced hepatocellular carcinoma [J]. *Asia Pac J Clin Oncol*, 2024, 20(2): 319-322. DOI:10.1111/ajco.13900.
- [3] 董家鸿,张琳,冯晓彬.精准外科范式引导下的肝癌介入放射治疗新理念和新技术 [J]. *中国实用外科杂志*, 2024, 44(9): 988-991,995. DOI:10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2024.09.04. Dong JH, Zhang L, Feng XB. New concepts and technologies in interventional radiotherapy for hepatocellular carcinoma guided by the paradigm of precision surgery [J]. *Chin J Pract Surg*, 2024, 44(9): 988-991,995. DOI:10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2024.09.04.
- [4] 张琳,冯晓彬,黄鑫,等.钇-90 微球选择性内放射治疗在肝癌降期转化移植中的应用进展 [J]. *中华消化外科杂志*, 2024, 23(12): 1566-1570. DOI:10.3760/cma.j.cn115610-20241025-00467. Zhang L, Feng XB, Huang X, et al. Progress in the application of selective internal radiation therapy with yttrium-90 microspheres in the downstaging and conversion treatment of hepatocellular carcinoma before liver transplantation [J]. *Chin J Dig Surg*, 2024, 23(12): 1566-1570. DOI:10.3760/cma.j.cn115610-20241025-00467.
- [5] Lu Z, Polan DF, Wei L, et al. PET/CT-based absorbed dose maps in ⁹⁰Y selective internal radiation therapy correlate with spatial changes in liver function derived from dynamic MRI [J]. *J Nucl Med*, 2024, 65(8): 1224-1230. DOI:10.2967/jnumed.124.267421.
- [6] 王玉君,于丽娟,潘登,等.⁹⁰Y PET/CT 和⁹⁰Y 韧致辐射 SPECT/CT 显像评估肝恶性肿瘤⁹⁰Y-选择性内放射治疗后辐射剂量的对比 [J]. *中华核医学与分子影像杂志*, 2024, 44(3): 159-163. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20230216-00038. Wang YJ, Yu LJ, Pan D, et al. Comparison of ⁹⁰Y PET/CT and ⁹⁰Y bremsstrahlung SPECT/CT imaging in evaluation of radiation dose after ⁹⁰Y-selective internal radiation therapy in liver malignancies [J]. *Chin J Nucl Med Mol Imaging*, 2024, 44(3): 159-163. DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20230216-00038.
- [7] Takahashi A, Himuro K, Yamashita Y, et al. Monte Carlo simulation of PET and SPECT imaging of ⁹⁰Y [J]. *Med Phys*, 2015, 42(4): 1926-1935. DOI:10.1118/1.4915545.
- [8] 孟令泽,陈禹轩,朱保吉,等.¹⁸F 气溶胶监测仪校准方法研究 [J]. *原子能科学技术*, 2024, 58(2): 451-460. DOI:10.7538/yzk.2023.youxian.0409. Meng LZ, Chen YX, Zhu BJ, et al. Research on calibration method of ¹⁸F aerosol monitor [J]. *Atom Energy Sci Technol*, 2024, 58(2): 451-460. DOI:10.7538/yzk.2023.youxian.0409.
- [9] 卢玉楷.简明放射性同位素应用手册 [M].上海:上海科学普及出版社,2004:18. Lu YK. Concise handbook of the application of radioisotopes [M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2004:18.
- [10] Miller TR, Wallis JW. Clinically important characteristics of maximum-likelihood reconstruction [J]. *J Nucl Med*, 1992, 33(9): 1678-1684.
- [11] Ahn S, Fessler JA. Globally convergent image reconstruction for emission tomography using relaxed ordered subsets algorithms [J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2003, 22(5): 613-626. DOI:10.1109/TMI.2003.812251.
- [12] 张廷杰,陈炜,卢洪辉,等. BSREM 重建算法优化¹⁸F-FDG PET 采集时间的可行性 [J]. *中国辐射卫生*, 2022, 31(2): 224-228. DOI:10.13491/j.issn.1004-714X.2022.02.017. Zhang TJ, Chen W, Lu HH, et al. Feasibility of optimizing acquisition time of ¹⁸F-FDG PET with BSREM reconstruction algorithm [J]. *Chin J Radiol Health*, 2022, 31(2): 224-228. DOI:10.13491/j.issn.1004-714X.2022.02.017.
- [13] Teoh EJ, McGowan DR, Macpherson RE, et al. Phantom and clinical evaluation of the Bayesian penalized likelihood reconstruction algorithm Q.Clear on an LYSO PET/CT system [J]. *J Nucl Med*, 2015, 56(9): 1447-1452. DOI:10.2967/jnumed.115.159301.
- [14] Matti A, Lima GM, Pettinato C, et al. How do the more recent reconstruction algorithms affect the interpretation criteria of PET/CT images? [J]. *Nucl Med Mol Imaging*, 2019, 53(3): 216-222. DOI:10.1007/s13139-019-00594-x.
- [15] Genç M, Yildirim N, Coskun N, et al. The variation of quantitative parameters and Deauville scores with different reconstruction algorithms in FDG PET/CT imaging of lymphoma patients [J]. *Rev Esp Med Nucl Imagen Mol (Engl Ed)*, 2023, 42(6): 388-392. DOI:10.1016/j.remnie.2023.07.006.
- [16] Hou X, Ma H, Esquinas PL, et al. Impact of image reconstruction method on dose distributions derived from ⁹⁰Y PET images: phantom and liver radioembolization patient studies [J]. *Phys Med Biol*, 2020, 65(21): 215022. DOI:10.1088/1361-6560/aba8b5.
- [17] Rowley LM, Bradley KM, Boardman P, et al. Optimization of image reconstruction for ⁹⁰Y selective internal radiotherapy on a Lutetium Yttrium Orthosilicate PET/CT system using a Bayesian penalized likelihood reconstruction algorithm [J]. *J Nucl Med*, 2017, 58(4): 658-664. DOI:10.2967/jnumed.116.176552.
- [18] Scott NP, McGowan DR. Optimising quantitative ⁹⁰Y PET imaging: an investigation into the effects of scan length and Bayesian penalised likelihood reconstruction [J]. *EJNMMI Res*, 2019, 9(1): 40. DOI:10.1186/s13550-019-0512-y.
- [19] 陈炜,耿建华,卢洪辉,等.正则化最大期望值重建算法中 β 值对 PET 图像质量和定量分析的影响 [J]. *中国医学装备*, 2021,

- 18(11): 27-31. DOI:10.3969/J.ISSN.1672-8270.2021.11.007.
- Chen W, Geng JH, Lu HH, et al. Influence of β value on image quality and quantitative analysis of PET in the BSREM reconstruction algorithm [J]. China Med Equip, 2021, 18(11): 27-31. DOI:10.3969/J.ISSN.1672-8270.2021.11.007.
- [20] Ahn S, Ross SG, Asma E, et al. Quantitative comparison of OSEM and penalized likelihood image reconstruction using relative difference penalties for clinical PET [J]. Phys Med Biol, 2015, 60(15): 5733-5751. DOI:10.1088/0031-9155/60/15/5733.
- [21] Lindström E, Sundin A, Trampal C, et al. Evaluation of penalized-likelihood estimation reconstruction on a digital time-of-flight PET/CT scanner for ^{18}F -FDG whole-body examinations [J]. J Nucl Med, 2018, 59(7): 1152-1158. DOI: 10.2967/jnumed.117.200790.
- [22] 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 ^{18}F -FDG [J]. EJNMMI Res, 2019, 9(1): 64. DOI:10.1186/s13550-019-0535-4.
- [23] Sadeghi F, Sheikhzadeh P, Farzanehfar S, et al. The effects of various penalty parameter values in Q.Clear algorithm for rectal cancer detection on ^{18}F -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.
- [24] Liberini V, Kotasidis F, Treyer V, et al. Impact of PET data driven respiratory motion correction and BSREM reconstruction of ^{68}Ga -DOTATATE PET/CT for differentiating neuroendocrine tumors (NET) and intrapancreatic accessory spleens (IPAS) [J]. Sci Rep, 2021, 11(1): 2273. DOI:10.1038/s41598-020-80855-4.
- [25] Rijnsdorp S, Roef MJ, Arends AJ. Impact of the noise penalty factor on quantification in Bayesian penalized likelihood (Q.Clear) reconstructions of ^{68}Ga -PSMA PET/CT scans [J]. Diagnostics (Basel), 2021, 11(5): 847. DOI:10.3390/diagnostics11050847.
- (收稿日期:2025-03-07)

· 读者 · 作者 · 编者 ·

关于论著文稿中中、英文摘要的书写要求

根据 GB 6447—86 的定义,文摘是以提供文献内容梗概为目的,不加评价和解释,简明确切地记述文献重要内容的短文。摘要应具有自明性和独立性,并拥有与一次文献同等量的主要信息。即不阅读全文就能获得必要的信息。它的详简程度取决于文献的内容,通常中文文摘以不超过 400 字为宜。应以第三人称的语气书写。不要使用“本人”、“作者”、“我们”等作为陈述的主语。

摘要的内容应包括四个要素,即目的、方法、结果、结论。(1)目的:指研究的前提和缘起,即为为什么要作此项研究,可以有简单的背景材料。(2)方法:指研究所用的原理、对象、观察和实验的具体方法等。(3)结果:指研究的结果、效果、数据等,着重反映创新性的、切实可行的成果,包括本组研究中的重要数据。(4)结论:指对结果进行综合分析,逻辑推理得出的判断。有的可指出实用价值和推广价值;如有特殊例外的发现或难以解决的问题,可以提出留待今后深入探讨。英文摘要的内容与中文摘要的内容要求大体一致。

英文摘要要求做到语法正确,用词准确,与中文摘要对应,方法、结果可略详于中文摘要。必要时,作者在投稿前请英文书写水平高的人员帮助修改。英文文题后列出全部作者及其单位、科室(包括城市、邮编)的英文规范表达。

敬请广大读者、作者周知,并遵照此要求投稿。

本刊编辑部