

^{90}Y PET/CT 和 ^{90}Y 韧致辐射 SPECT/CT 显像评估肝恶性肿瘤 ^{90}Y -选择性内放射治疗后辐射剂量的对比

王玉君 于丽娟 潘登 熊亮 蒋海壮 陈璐

海南省肿瘤医院核医学科,海口 570311

通信作者:于丽娟, Email: yulijuan2003@126.com

【摘要】 **目的** 比较 ^{90}Y PET/CT 和 ^{90}Y 韧致辐射 (BRS) SPECT/CT 显像评估肝恶性肿瘤 ^{90}Y -选择性内放射治疗 (SIRT) 术后实际吸收剂量的差异,以及 2 种显像方式图像质量的优劣。**方法** 回顾性分析 2021 年 9 月至 2022 年 8 月在海南省肿瘤医院核医学科同时行 ^{90}Y PET/CT 显像及 ^{90}Y BRS SPECT/CT 显像的肝恶性肿瘤 ^{90}Y -SIRT 术后患者 21 例 [男 15 例、女 6 例;年龄 (52.4±15.4) 岁;原发性肝癌 15 例,肝转移瘤 6 例;共 39 个病灶];分别计算 ^{90}Y PET/CT 及 ^{90}Y BRS SPECT/CT 显像评估的肿瘤实际吸收剂量与肿瘤反应最低吸收剂量阈值 (100 Gy) 的比值,并对 2 种显像方式的图像对比度、可区分度评分,采用 Wilcoxon 符号秩检验和 Wilcoxon 秩和检验比较组间差异。**结果** ^{90}Y PET/CT 和 ^{90}Y BRS SPECT/CT 评估的肿瘤吸收剂量值分别为 143.94 (55.91, 233.48) Gy 和 107.82 (53.59, 157.53) Gy。24 个病灶的 ^{90}Y PET/CT 评估值高于标准阈值,19 个病灶的 ^{90}Y BRS SPECT/CT 评估值高于标准阈值。与 ^{90}Y PET/CT 相比, ^{90}Y BRS SPECT/CT 评估的肿瘤吸收剂量被低估 [-24.25% (-32.32%, -12.14%)]。 ^{90}Y PET/CT、 ^{90}Y BRS SPECT/CT 评估的肿瘤实际吸收剂量与最低标准阈值的比值分别为 1.33 (0.56, 1.91)、0.97 (0.47, 1.25), 差异有统计学意义 ($z=0.04, P<0.001$)。PET/CT 与 SPECT/CT 图像对比度评分为 0、1、2、3 分的分别有 2、2、12、23 个病灶和 2、3、16、18 个病灶 ($z=-1.29, P=0.199$);可区分度评分为 0、1、2 分的分别有 3、15、21 个病灶和 4、32、3 个病灶,差异有统计学意义 ($z=-2.79, P=0.005$)。**结论** 对于肝恶性肿瘤 ^{90}Y -SIRT 术后患者, ^{90}Y PET/CT 显像在肿瘤吸收剂量评估和图像上病灶区分度方面要优于 ^{90}Y BRS SPECT/CT 显像。

【关键词】 肝肿瘤;近距离放射疗法;钇放射性同位素;辐射剂量;正电子发射断层显像术;体层摄影术,X 线计算机

基金项目: 海南省临床医学研究中心项目 (LCYX202403)

DOI: 10.3760/cma.j.cn321828-20230216-00038

Comparison of ^{90}Y PET/CT and ^{90}Y bremsstrahlung SPECT/CT imaging in evaluation of radiation dose after ^{90}Y -selective internal radiation therapy in liver malignancies

Wang Yujun, Yu Lijuan, Pan Deng, Xiong Liang, Jiang Haizhuang, Chen Lu

Department of Nuclear Medicine, Hainan Cancer Hospital, Haikou 570311, China

Corresponding author: Yu Lijuan, Email: yulijuan2003@126.com

【Abstract】 **Objective** To compare the differences of actual absorbed doses of liver malignant tumors after ^{90}Y -selective internal radiation therapy (SIRT) evaluated by ^{90}Y PET/CT and ^{90}Y bremsstrahlung (BRS) SPECT/CT imaging, and to compare the image quality of the 2 imaging methods. **Methods** Twenty-one patients (15 males and 6 females; age: (52.4±15.4) years) with liver malignant tumors (15 cases of primary liver cancer, 6 cases of liver metastases; 39 lesions) between September 2021 and August 2022 were retrospectively analyzed. All patients underwent both ^{90}Y PET/CT imaging and ^{90}Y BRS SPECT/CT imaging in the Department of Nuclear Medicine, Hainan Cancer Hospital. The ratios of the actual absorbed doses based on ^{90}Y PET/CT imaging and ^{90}Y BRS SPECT/CT imaging to the lowest standard absorbed dose (100 Gy) for tumor response were calculated. The image contrast and distinguishability of the two imaging methods were scored. Wilcoxon signed rank test and Wilcoxon rank sum test were used for data analysis. **Results** The tumor absorbed doses evaluated by ^{90}Y PET/CT and ^{90}Y BRS SPECT/CT were 143.94 (55.91, 233.48) Gy and 107.82 (53.59, 157.53) Gy respectively. The doses evaluated by ^{90}Y PET/CT were higher than the standard threshold in 24 lesions, while 19 lesions showed higher evaluated doses by ^{90}Y BRS SPECT/CT than the standard threshold. Compared with ^{90}Y PET/CT, ^{90}Y BRS SPECT/CT underestimated the tumor absorbed dose of -24.25% (-32.32%, -12.14%). The ratio of dose evaluated by ^{90}Y PET/CT to the lowest stand-

ard threshold was 1.33(0.56, 1.91), which was higher than that of dose evaluated by ^{90}Y BRS SPECT/CT to the lowest standard threshold (0.97(0.47, 1.25); $z = 0.04$, $P < 0.001$). PET/CT image contrast was scored 0, 1, 2, 3 in 2, 2, 12, 23 lesions respectively, and SPECT/CT image contrast was scored 0, 1, 2, 3 in 2, 3, 16, 18 lesions respectively ($z = -1.29$, $P = 0.199$). The distinguishability scores of 0, 1, 2 based on PET/CT images were found in 3, 15, 21 lesions, while those based on SPECT/CT images were found in 4, 32, 3 lesions respectively ($z = -2.79$, $P = 0.005$). **Conclusion** ^{90}Y PET/CT imaging is superior to ^{90}Y BRS SPECT/CT imaging in radiation dose evaluation and tumor focus differentiation in patients with liver malignant tumors after ^{90}Y -SIRT.

【Key words】 Liver neoplasms; Brachytherapy; Yttrium radioisotopes; Radiation dosage; Positron-emission tomography; Tomography, X-ray computed

Fund program: Clinical Medical Research Center Project of Hainan Province (LCYX202403)

DOI:10.3760/cma.j.cn321828-20230216-00038

原发性肝癌是我国最常见的恶性肿瘤之一。只有约 40% 的肝癌确诊患者可行手术^[1],其他晚期患者使用局部或全身治疗,但效果较差。转移性肝癌的治疗也是难点,文献报道手术切除的结直肠癌肝转移患者 5 年中位生存率为 30%,而无法切除的患者 5 年生存率低于 6%^[2-4]。

^{90}Y -选择性内照射治疗(selective internal radiation therapy, SIRT)为肝恶性肿瘤患者提供了 1 种新的有效的治疗方式。 ^{90}Y 树脂微球和 ^{90}Y 玻璃微球均可用于治疗肝细胞癌、肝内胆管癌以及包括神经内分泌肿瘤和结直肠癌在内的恶性肿瘤的肝转移瘤,但玻璃微球与树脂微球的大小和比活度存在一定差异,因此在肿瘤反应吸收剂量阈值方面也存在一定差异。临床上常用 ^{90}Y 肝脏 PET/CT 显像和 ^{90}Y 韧致辐射(bremsstrahlung, BRS)SPECT/CT 显像评估 ^{90}Y -SIRT 是否成功,但难以进行剂量验证,而 MIM SurePlan LiverY90 软件可以将 ^{90}Y PET 和 ^{90}Y BRS SPECT 图像转换为剂量分布图进行剂量验证。本研究对比 MIM SurePlan LiverY90 软件处理的 ^{90}Y PET 和 ^{90}Y BRS SPECT 术后剂量验证结果,以及 2 种显像方式的图像对比度和可区分度,以寻找 ^{90}Y -SIRT 最佳评估方式,为临床剂量的准确制定提供依据。

资料与方法

1. 研究对象。本研究通过海南省肿瘤医院伦理委员会审批[批件号:2022 年(科研)第(36)号]。回顾性选取 2021 年 9 月至 2022 年 8 月在海南省肿瘤医院核医学科进行 ^{90}Y -SIRT 术后显像的肝恶性肿瘤患者。入组标准:(1)符合相关指南中诊断标准,经病理或影像学、血清学检查确诊的肝原发恶性肿瘤或肝转移瘤^[5-6];(2)同时行 ^{90}Y PET/CT 肝显像及 ^{90}Y BRS SPECT/CT 显像,且肿瘤长径 ≥ 2 cm。

共纳入 21 例患者,其中男 15 例、女 6 例,年龄(52.4 \pm 15.4)岁;原发性肝癌 15 例(肝细胞癌 12 例、胆管细胞癌 3 例),结直肠癌肝转移瘤 6 例; ^{90}Y 树脂

微球治疗 11 例, ^{90}Y 玻璃微球治疗 10 例,共 39 个病灶。

2. 图像采集。所有患者在 ^{90}Y -SIRT 术后 24 h 内行 ^{90}Y PET/CT 和 ^{90}Y BRS SPECT/CT 检查。(1)PET/CT 显像。使用美国 GE Discovery710 PET/CT 仪进行显像。PET 至少采集 2 个床位,每个床位用时约 20 min;矩阵 128 \times 128;采集范围包含整个肝脏。CT 扫描参数:电压 120 kV,电流 100 mA。(2)SPECT/CT 显像。使用美国 GE Discovery NM/CT670 SPECT/CT 仪进行显像,采用高能准直器,初始能峰 90~125 keV,本底能峰 310~410 keV。首先进行 SPECT 全身显像,范围从头部到大腿近端;然后进行局部显像及断层显像,图像采集范围从锁骨区向下包括整个肺及肝脏区域;8 个子集,16 次迭代,矩阵 128 \times 128。CT 扫描参数:电压 120 kV,电流 100 mA。

3. 图像处理及评估。(1)吸收剂量评估。所有患者术后图像经过美国 GE XELERIS 3.0 软件后处理转化为医学数字成像和通信(digital imaging and communication in medicine, DICOM)格式,然后将其导入美国 MIM SurePlan LiverY90 软件(7.2.4 版),采用局部沉积模型(local deposition model, LDM)已知活度的剂量测定方法分别评估 PET/CT 和 SPECT/CT 显像肝脏肿瘤病灶的实际吸收剂量。将基于 2 种显像方式得到的实际吸收剂量值分别与吸收剂量阈值进行对比,计算比值。吸收剂量标准阈值如下:①国外专家共识指出 ^{90}Y 树脂微球治疗原发性肝癌、转移性肝癌、胆管细胞癌的肿瘤反应最低吸收剂量阈值均为 100 Gy^[7];②2023 年发布的专家共识指出 ^{90}Y 玻璃微球治疗原发性肝肿瘤的肿瘤反应最低吸收剂量阈值为 205 Gy^[8],玻璃微球对转移性肿瘤的吸收阈值尚无相关标准,本研究暂定 100 Gy。

(2)图像质量评估。由 2 位经验丰富的核医学科医师对图像进行判读,根据放射性分布情况对病灶对比度评分:0 分为放射性分布与本底相仿,1 分为放射性分布大于本底且小于等于病灶边缘,2 分

为放射性分布大于病灶边缘,3 分为放射性分布明显大于病灶边缘;分数越高,表明摄取的⁹⁰Y 微球越多,局部所吸收的剂量越高。同时进行可区分度评分:0 分为灌注区域内无法区分肿瘤界限,1 分为灌注区域内可隐约区分肿瘤界限,2 分为灌注区域内可以清晰区分肿瘤界限;分数越高,表明图像分辨率越高。

4. 统计学处理。以 SAS 9.4 软件进行统计学分析,符合正态分布的定量资料用 $\bar{x} \pm s$ 表示;非正态分布的定量资料以 $M(Q_1, Q_3)$ 表示,用 Wilcoxon 符号秩检验比较 2 种显像方式所评估剂量与最低吸收剂量阈值间的差异;定性资料以频数 (%) 表示,用 Wilcoxon 秩和检验比较 PET/CT 与 SPECT/CT 图像间对比度评分和可区分度评分结果的差异, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

1. 吸收剂量评估结果及对比。⁹⁰Y PET/CT 评估的肿瘤吸收剂量为 143.94 (55.91, 233.48) Gy; ⁹⁰Y BRS SPECT/CT 评估的肿瘤吸收剂量为 107.82 (53.59, 157.53) Gy。39 个病灶中, ⁹⁰Y PET/CT 评估值高于最低吸收剂量阈值的有 24 个,而 ⁹⁰Y BRS SPECT/CT 评估值高于该阈值的有 19 个。与 ⁹⁰Y PET/CT 相比, ⁹⁰Y BRS SPECT/CT 评估的肿瘤吸收剂量被低估 [-24.25% (-32.32%, -12.14%)]。 ⁹⁰Y PET/CT 与 ⁹⁰Y BRS SPECT/CT 显像评估的肿瘤实际吸收剂量与最低吸收剂量阈值的比值分别为 1.33 (0.56, 1.91) 和 0.97 (0.47, 1.25), 差异有统计学意义 ($z=0.04, P<0.001$)。

2. 图像质量评估结果及对比。⁹⁰Y PET/CT 与 ⁹⁰Y BRS SPECT/CT 图像的对比度和可区分度评分结果见表 1, 2 种显像的图像对比度差异无统计学意义 ($z=-1.29, P=0.199$), 可区分度差异有统计学意义 ($z=-2.79, P=0.005$), 表明 ⁹⁰Y PET/CT 显像在病变的可区分度观察上更具优势。典型病例图像见图 1, 2。

表 1 21 例肝恶性肿瘤患者 (39 个病灶) ⁹⁰Y-SIRT 术后 2 种显像方式的图像质量评分 个

显像方式	图像对比度评分				图像可区分度评分		
	0分	1分	2分	3分	0分	1分	2分
⁹⁰ Y PET/CT	2	2	12	23	3	15	21
⁹⁰ Y BRS SPECT/CT	2	3	16	18	4	32	3
<i>z</i> 值	-1.29				-2.79		
<i>P</i> 值	0.199				0.005		

注: BRS 为韧致辐射, SIRT 为选择性内照射治疗

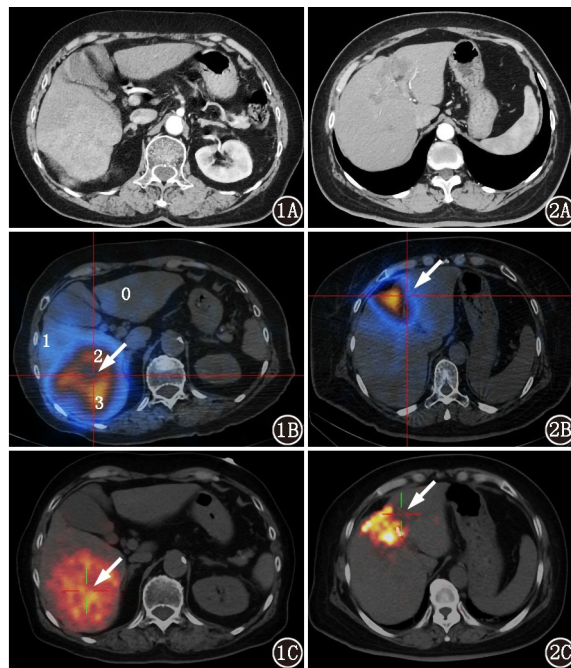


图 1 肝恶性肿瘤患者 (女, 85 岁; 根据实验室及影像学检查结果诊断为肝细胞癌) ⁹⁰Y-选择性地内照射治疗 (SIRT) 术后影像学检查图。1A. 增强 CT 图像示肝右叶病灶呈不均匀强化; 1B. ⁹⁰Y 韧致辐射 (BRS) SPECT/CT 图像示病灶中心及右后缘放射性分布稀疏 (箭头示), 图中数值为对比度评分; 1C. ⁹⁰Y PET/CT 图像示病灶放射性分布较均匀 (箭头示), 较 SPECT/CT 显像能够更清晰地显示 ⁹⁰Y 微球在肿瘤内的沉积。图 2 肝恶性肿瘤患者 (女, 66 岁; 结合实验室检查结果及影像学表现考虑为胆管细胞癌) ⁹⁰Y-SIRT 术后影像学检查图。2A. 增强 CT 图像示病灶呈不均匀“花环”状强化; 2B. ⁹⁰Y BRS SPECT/CT 图像示肿瘤界限模糊不清 (箭头示), 可区分度评分为 1 分; 2C. ⁹⁰Y PET/CT 图像示肿瘤界限清晰 (箭头示), 可区分度评分为 2 分

讨 论

⁹⁰Y-SIRT 被广泛应用于无法手术切除的肝恶性肿瘤。Hermann 等^[9]的研究发现, 接受至少 100 Gy 肿瘤吸收剂量的患者比接受少于 100 Gy 者存活时间更长 (14.1 个月与 6.1 个月; $P<0.001$), 在肿瘤吸收剂量大于或等于 100 Gy 时观察到最高的疾病控制率。Cardarelli-Leite 等^[10]的研究显示, 与常规治疗组相比, 21 例肝细胞癌伴有门静脉癌栓者经 ⁹⁰Y 微球治疗后生存期显著延长: 中位总生存期分别为 18.2 和 45.3 个月 ($P=0.003$), 治疗后中位生存期分别为 4.9 和 19.1 个月 ($P=0.005$); ⁹⁰Y 微球组死亡风险降低 70% [危险比 0.30 (95% CI: 0.13~0.70), $P=0.005$], 4 年生存率提高 (53.9% 与 11.2%)。由此可见, 肿瘤实际吸收剂量对疗效的评估具有重要意义。但是, 目前 PET/CT 或 SPECT/CT 的后处理工

作站缺少⁹⁰Y 剂量评估相关软件,致使剂量评估只能借助第 3 方软件。Guerrero 等^[11]使用 MIM SurePlan liver Y90 软件的 LDM,对肝和肺叶的平均剂量给出了良好的估计结果。Maughan 等^[12]和 Mikell 等^[13]的研究显示,LDM 方法剂量测量在均匀介质的情况下精度在 5%以内。本研究利用 MIM SurePlan LiverY90 软件的 LDM 方法对肝恶性肿瘤患者⁹⁰Y-SIRT 术后⁹⁰Y PET/CT 和⁹⁰Y BRS SPECT/CT 图像进行处理,估算出肿瘤实际所吸收的剂量,其中⁹⁰Y PET/CT 估算的剂量更高。

Kao 等^[14]、Gates 等^[15]的研究证实基于治疗后⁹⁰Y PET/CT 的⁹⁰Y-SIRT 剂量学评估是可取的,而在临床无法获得⁹⁰Y PET/CT 的情况下,⁹⁰Y BRS SPECT/CT 可以作为治疗后吸收剂量估计的替代方法。Elschot 等^[16]使用模体实验证明了基于飞行时间(time of flight, TOF)技术的⁹⁰Y PET/CT 剂量估计比基于 BRS 显像的⁹⁰Y BRS SPECT/CT 剂量估计更准确。Brosch 等^[17]通过研究 9 例患者的 10 次⁹⁰Y-SIRT 治疗情况发现,与⁹⁰Y PET/CT 对比,⁹⁰Y BRS SPECT/CT 对肿瘤吸收剂量估计被显著低估[(-50±13)%],该百分比与本研究的-24.25%(-32.32%,-12.14%)有差异,可能是样本量不同、存在偏差所致,但 2 个研究都能反映出⁹⁰Y PET/CT 较⁹⁰Y BRS SPECT/CT 显像评估肿瘤吸收剂量更有优势。

通过对图像对比度和可区分度进行评分,既能够直观了解病灶摄取放射性的多少,又可以比较不同显像方式图像的优劣,提高诊断效率^[18]。Kao 等^[19]通过研究 23 例患者⁹⁰Y PET/CT 与⁹⁰Y BRS SPECT/CT 显像,得出⁹⁰Y PET/CT 在定性分析各方面均优于⁹⁰Y BRS SPECT/CT 显像的结论,⁹⁰Y PET/CT 图像分辨率较高,也能够提高诊断医师书写报告的信心。本研究结果显示,⁹⁰Y PET/CT 较⁹⁰Y BRS SPECT/CT 图像在病变的可区分度上更有优势,图像对比度方面二者差异不具有统计学意义($P>0.05$)。

总体而言,通过⁹⁰Y BRS SPECT/CT 显像,可以对⁹⁰Y 微球的分布状况有初步了解,并观察肝以外其他部位有无放射性分布,肝内放射性分布是否与术前显像一致,还能够对全身显像可疑区域进行重点甄别,对异常分布进行早期干预,降低不良反应的症状。SPECT/CT 具有扫描范围更大、价格更低等优势。而⁹⁰Y PET/CT 显像范围虽然较 SPECT 要小,但其图像质量更优,在术后剂量评估中更具有优势。

吸收剂量主要依靠核医学图像中的放射性计数进行推算,图像配准不好会导致放射性计数不准确,

从而对剂量结果准确性造成影响^[20]。本研究中个别病例 2 种图像剂量计算结果有较大差异,可能原因如下:(1) PET/CT 图像分辨率更高,得到更高的放射性计数,因此计算的吸收剂量普遍高于 SPECT/CT;(2) 患者图像采集参数和后处理参数不同;(3) 在配准过程中患者体位变化较大、呼吸运动等均能够影响图像匹配的准确性,造成剂量计算出现偏差,小病灶和靠近肝脏顶部的病灶更是如此^[21]。

本研究尚有不足之处,主要如下:(1) 因该项目在国内开展时间尚短,病例数较少,可能不能够准确反映 PET/CT 与 SPECT/CT 在术后评估中的差异;(2) 通过短期随访,达到最低吸收剂量阈值的患者或病灶有所缩小,或相关检验指标下降,但长期随访疗效尚待后续研究予以证实;(3) 对图像对比度和可区分度的分析没有成熟的体系,受主观因素影响较大,需进一步制定完善评估体系。另外,本研究未对树脂微球和玻璃微球进行区分研究,也没有对肝细胞癌、胆管细胞癌、肝转移瘤进行分别研究,这些内容将是本研究组未来研究的方向。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 王玉君:研究实施、论文撰写;于丽娟:研究指导、论文修改、经费支持;潘登、陈璐:统计学分析、论文修改;熊亮、蒋海壮:数据解析

参 考 文 献

- [1] Llovet JM, Zucman-Rossi J, Pikarsky E, et al. Hepatocellular carcinoma [J]. Nat Rev Dis Primers, 2016, 2: 16018. DOI: 10.1038/nrdp.2016.18.
- [2] Zampino MG, Magni E, Ravenda PS, et al. Treatments for colorectal liver metastases: a new focus on a familiar concept [J]. Crit Rev Oncol Hematol, 2016, 108: 154-163. DOI: 10.1016/j.critrevonc.2016.11.005.
- [3] Simmonds PC, Primrose JN, Colquitt JL, et al. Surgical resection of hepatic metastases from colorectal cancer: a systematic review of published studies [J]. Br J Cancer, 2006, 94(7): 982-999. DOI: 10.1038/sj.bjc.6603033.
- [4] 中国临床肿瘤学会核医学专家委员会,北京市核医学质量控制和改进中心.钇-90(⁹⁰Y)微球选择性内放射治疗原发性和转移性肝癌的中国专家共识[J].中华肝脏病杂志, 2021, 29(7): 648-658. DOI: 10.3760/cma.j.cn501113-20210302-00103. Nuclear Medicine Committee, Chinese Society of Clinical Oncology; Beijing Nuclear Medicine Quality Control and Improvement Center. Chinese expert consensus on selective internal radiation therapy with yttrium-90 for primary and metastatic hepatocellular carcinoma [J]. Chin J Hepatol, 2021, 29(7): 648-658. DOI: 10.3760/cma.j.cn501113-20210302-00103.
- [5] 中国抗癌协会肝癌专业委员会.中国肿瘤整合诊治指南-肝癌(2022 精简版) [J].中国肿瘤临床, 2022, 49(17): 865-873. DOI: 10.12354/j.issn.1000-8179.2022.20220942. China Anti-Cancer Association Committee of Liver Cancer. Guidelines for holistic integrative management of liver cancer (2022 abridged ver-

- sion)[J]. Chin J Clin Oncol, 2022, 49(17): 865-873. DOI:10.12354/j.issn.1000-8179.2022.20220942.
- [6] 中国医师协会外科医师分会, 中华医学会外科分会胃肠外科学组, 中华医学会外科分会结直肠外科学组, 等. 中国结直肠癌肝转移诊断和综合治疗指南(V2023)[J]. 中华胃肠外科杂志, 2023, 26(1): 1-15. DOI:10.3760/cma.j.cn441530-20221229-00542. Chinese College of Surgeons; Section of Gastrointestinal Surgery, Branch of Surgery, Chinese Medical Association; Section of Colorectal Surgery, Branch of Surgery, Chinese Medical Association, et al. China guideline for diagnosis and comprehensive treatment of colorectal liver metastases (version 2023). Chin J Gastrointest Surg, 2023, 26(1): 1-15. DOI:10.3760/cma.j.cn441530-20221229-00542.
- [7] Levillain H, Bagni O, Deroose CM, et al. International recommendations for personalised selective internal radiation therapy of primary and metastatic liver diseases with yttrium-90 resin microspheres[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2021, 48(5): 1570-1584. DOI:10.1007/s00259-020-05163-5.
- [8] Salem R, Padia SA, Lam M, et al. Clinical, dosimetric, and reporting considerations for Y-90 glass microspheres in hepatocellular carcinoma: updated 2022 recommendations from an international multidisciplinary working group[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2023, 50(2): 328-343. DOI:10.1007/s00259-022-05956-w.
- [9] Hermann AL, Dieudonné A, Ronot M, et al. Relationship of tumor radiation-absorbed dose to survival and response in hepatocellular carcinoma treated with transarterial radioembolization with ⁹⁰Y in the SARAH study[J]. Radiology, 2020, 296(3): 673-684. DOI:10.1148/radiol.2020191606.
- [10] Cardarelli-Leite L, Chung J, Klass D, et al. Ablative transarterial radioembolization improves survival in patients with HCC and portal vein tumor thrombus[J]. Cardiovasc Intervent Radiol, 2020, 43(3): 411-422. DOI:10.1007/s00270-019-02404-5.
- [11] Guerrero M, Yao W, Lin M, et al. Validation of a commercial software dose calculation for Y-90 microspheres[J]. Brachytherapy, 2022, 21(4): 561-566. DOI:10.1016/j.brachy.2022.03.007.
- [12] Maughan NM, Garcia-Ramirez J, Arpidone M, et al. Validation of post-treatment PET-based dosimetry software for hepatic radioembolization of yttrium-90 microspheres[J]. Med Phys, 2019, 46(5): 2394-2402. DOI:10.1002/mp.13444.
- [13] Mikell JK, Mahvash A, Siman W, et al. Comparing voxel-based absorbed dosimetry methods in tumors, liver, lung, and at the liver-lung interface for ⁹⁰Y microsphere selective internal radiation therapy[J]. EJNMMI Phys, 2015, 2(1): 16. DOI:10.1186/s40658-015-0119-y.
- [14] Kao YH, Hock Tan AE, Burgmans MC, et al. Image-guided personalized predictive dosimetry by artery-specific SPECT/CT partition modeling for safe and effective ⁹⁰Y radioembolization[J]. J Nucl Med, 2012, 53(4): 559-566. DOI:10.2967/jnumed.111.097469.
- [15] Gates VL, Esmail AA, Marshall K, et al. Internal pair production of ⁹⁰Y permits hepatic localization of microspheres using routine PET: proof of concept[J]. J Nucl Med, 2011, 52(1): 72-76. DOI:10.2967/jnumed.110.080986.
- [16] Elschot M, Vermolen BJ, Lam MG, et al. Quantitative comparison of PET and bremsstrahlung SPECT for imaging the *in vivo* yttrium-90 microsphere distribution after liver radioembolization[J]. PLoS One, 2013, 8(2): e55742. DOI:10.1371/journal.pone.0055742.
- [17] Brosch J, Gosewisch A, Kaiser L, et al. 3D image-based dosimetry for Yttrium-90 radioembolization of hepatocellular carcinoma: impact of imaging method on absorbed dose estimates[J]. Phys Med, 2020, 80: 317-326. DOI:10.1016/j.ejmp.2020.11.016.
- [18] Neuville MF, Lovinfosse P, Jadoul A, et al. The use of a visual 4-point scoring scale improves the yield of ¹⁸F-FDG PET-CT imaging in the diagnosis of renal and hepatic cyst infection in patients with autosomal dominant polycystic kidney disease[J]. Eur J Nucl Med Mol Imaging, 2021, 48(1): 254-259. DOI:10.1007/s00259-020-04903-x.
- [19] Kao YH, Steinberg JD, Tay YS, et al. Post-radioembolization yttrium-90 PET/CT—part 1: diagnostic reporting[J]. EJNMMI Res, 2013, 3(1): 56. DOI:10.1186/2191-219X-3-56.
- [20] Chiesa C, Sjogreen-Gleisner K, Walrand S, et al. EANM dosimetry committee series on standard operational procedures: a unified methodology for ^{99m}Tc-MAA pre- and ⁹⁰Y peri-therapy dosimetry in liver radioembolization with ⁹⁰Y microspheres[J]. EJNMMI Phys, 2021, 8(1): 77. DOI:10.1186/s40658-021-00394-3.
- [21] Siman W, Mikell JK, Kappadath SC. Practical reconstruction protocol for quantitative ⁹⁰Y bremsstrahlung SPECT/CT[J]. Med Phys, 2016, 43(9): 5093. DOI:10.1118/1.4960629.

(收稿日期:2023-02-16)