

论著·临床研究 doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2017.35.020

PET/CT 联合 4DCT 在食管癌放疗中的应用*

何瀚, 黄荣, 蒋军

(广东省佛山市第一人民医院胸腹放疗科 528000)

[摘要] **目的** 分析标准摄取值(SUV)阈值下的正电子发射断层显像(PET)/CT和全时相4DCT在食管癌靶区勾画的相关性,探索能准确反映靶区空间运动的最优SUV值。**方法** 将该院初治的82例食管癌患者于同一天分别行PET/CT和4DCT扫描定位,选取不同SUV阈值($\geq 2.0, 2.5, 3.0, 3.5$)及最大SUV值的百分比($\geq 20\% \text{ SUV}_{\max}, 30\% \text{ SUV}_{\max}, 40\% \text{ SUV}_{\max}$)勾画PET/CT靶区内大体肿瘤体积($\text{IGTV}_{\text{PET/CT}}$),叠加各时相4DCT靶区得到包含所有呼吸状态的靶区 IGTV_{10} ,对比两图像的靶区中心偏移、体积比和适形指数(CI),选出与4DCT靶区配准度相对较好的SUV值,并分析该阈值下靶区中心偏移、体积比和CI分别与 IGTV_{10} 体积、 IGTV_{10} 长轴径、头脚方向位移及空间运动位移的相关性。**结果** SUV取2.0或 $20\% \text{ SUV}_{\max}$ 时,4DCT和PET/CT图像靶区空间匹配程度较好。 $\text{IGTV}_{\text{PET}2.0}$ 、 $\text{IGTV}_{\text{PET}20\%}$ 与 IGTV_{10} 的靶区中心偏移在头脚方向位移和空间运动位移上均呈正相关($P < 0.05$);体积比在 IGTV_{10} 体积、 IGTV_{10} 长轴径、头脚方向位移及空间运动位移间均无相关性($P > 0.05$);CI在 IGTV_{10} 体积和 IGTV_{10} 长轴径上呈正相关,在头脚方向位移及空间运动位移上呈负相关($P < 0.05$)。**结论** SUV取2.0和 $20\% \text{ SUV}_{\max}$ 时,PET/CT与全时相4DCT勾画食管癌靶区的体积相近,但在适形度上二者仍有一定偏差,应对PET/CT阈值及4DCT时相选取做进一步研究。

[关键词] 食管肿瘤;放射治疗;靶区勾画;正电子发射计算机断层成像;四维计算机断层成像

[中图分类号] R735.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-8348(2017)35-4963-03

Application of PET/CT combined with 4DCT in radiotherapy of esophageal carcinoma*

He Han, Huang Rong, Jiang Jun

(Department of Chest and Abdomen Radiotherapy, Foshan Municipal First People's Hospital, Foshan, Guangdong 528000, China)

[Abstract] **Objective** To study the correlation of positron emission tomography/computed tomography (PET/CT) under different standardized uptake value (SUV) thresholds and full time four-dimensional computed tomography (4DCT) in esophageal carcinoma target delineation and explore the optimum SUV value that can accurately reflect the spatial movement of the target. **Methods** Eighty-two patients with esophageal cancer initial treatment in this hospital were respectively performed the scanning localization by PET/CT and 4DCT on the same day. Then different SUV thresholds ($\geq 2.0, 2.5, 3.0, 3.5$) and the percentage of maximum SUV value ($\geq 20\% \text{ SUV}_{\max}, 30\% \text{ SUV}_{\max}, 40\% \text{ SUV}_{\max}$) were selected to delineate the internal gross target volume ($\text{IGTV}_{\text{PET/CT}}$) in PET/CT, the ten phases of the 4DCT were collected to obtain the full time target IGTV_{10} , the target center offset, volume ratio and conformity index (CI) were compared between the two images, the relatively good SUV value with the registration in 4DCT target was picked out, then the correlation between the target center offset, volume ratio and CI with the IGTV_{10} volume, long axial diameter of IGTV_{10} , displacement of head-to-foot direction and spatial motion was analyzed. **Results** When the SUV threshold was 2.0 or $20\% \text{ SUV}_{\max}$, the spatial matching degree of 4DCT and PET/CT images was better. The head-to-foot direction displacement and special motion displacement in the target center offset of $\text{IGTV}_{\text{PET}2.0}$, $\text{IGTV}_{\text{PET}20\%}$ and IGTV_{10} showed the positive correlation ($P < 0.05$); the volume ratio had no correlation with the IGTV_{10} volume, IGTV_{10} long axial diameter, head-to-foot direction displacement and special motion displacement ($P > 0.05$); CI had positive correlation with IGTV_{10} volume and IGTV_{10} long axial diameter, while had negative correlation with the head-to-foot direction displacement and special motion displacement ($P < 0.05$). **Conclusion** When SUV taking 2.0 or $20\% \text{ SUV}_{\max}$, the esophageal carcinoma target volume of PET/CT is similar to that of full time 4DCT, but there are still some deviations in the conformity index, therefore the PET/CT threshold value and 4DCT time phase selection should be further studied.

[Key words] esophageal neoplasms; radiotherapy; target delineation; positron emission tomography; four-dimensional computed tomography

食管癌是我国发病率较高的恶性肿瘤,其发病率高居第5位^[1]。采用合理的手段治疗食管癌,能有效提高食管癌的控制率,延长患者生存期。当前,立体定向放疗已经成为治疗食管

癌的重要手段,但传统的3DCT定位技术由于只能对患者病灶的某一时刻成像,无法克服呼吸运动和心脏搏动的影响,因此在放疗时容易造成靶区移出治疗射野外。4DCT技术能够对

患者的各个呼吸时相进行扫描,重建出肿瘤在每个呼吸运动下的状态,很好地弥补了 3DCT 的不足^[2-3]。正电子发射断层显像(PET)/CT 联合 4DCT 进行肿瘤定位可以减少勾画者主观因素引起的误差和器官运动产生的伪影。本研究将 PET/CT 下不同标准摄取值(SUV)阈值勾画的靶区 IGTV_{PET/CT}(IGTV:内大体肿瘤体积)与 4DCT 下全时相融合靶区 IGTV₁₀ 进行比较,分析二者的关联性,以及 IGTV_{PET/CT} 和 IGTV₁₀ 两种靶区的靶区中心偏移、体积比和适形指数(CI)的差异,为肿瘤的精确放疗提供依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料 收集 2015 年 1 月至 2016 年 12 月本院初治食管癌患者 82 例,其中男 53 例,女 29 例;年龄 49~84 岁,中位年龄 69 岁;所有患者均经病理确诊为鳞癌,Ⅲ期 52 例,Ⅳ期 30 例;病灶分别位于食管上段 39 例,食管中段 29 例,食管下段 14 例。纳入标准:(1)患者经食管镜或病理确诊为食管癌;(2)临床分期为局部Ⅲ期或部分Ⅳ期,且经影像学证实无远处转移;(3)患者生存质量卡氏评分(KPS)大于 70 分,心肺功能基本正常,能完成呼吸训练;(4)患者空腹状态下血糖在正常水平,或经药物控制在正常水平;(5)患者中性粒细胞计数大于或等于 $1.5 \times 10^9/L$,血小板大于或等于 $100 \times 10^9/L$,血红蛋白大于或等于 100 g/L,肝肾功能基本正常;(6)经患者及家属同意,并签署知情同意书。排除标准:(1)既往或现在患有其他恶性肿瘤;(2)患者存在放疗禁忌证;(3)出现严重的消化道反应;(4)患者或家属放弃治疗。本研究经伦理委员会审查批准。

1.2 方法

1.2.1 3DCT 和 4DCT 图像的采集 所有患者均采用仰卧位,选择负压真空袋结合热塑体模固定。定位采用 GE 大孔径 CT(Discovery CT590 RT),患者在经呼吸训练后分别行 3DCT 和 4DCT 扫描,3DCT 轴位扫描周期为 2.8 s(扫描时间 1 s、扫描范围 2.4 cm、间隔时间 1.8 s),层厚 3 mm。4DCT 扫描时间大于 60 s,重建层厚 3 mm。利用瓦里安公司的实时位置管理(RPM)系统追踪 4DCT 扫描的呼吸运动时相。在患者剑突处放置两个荧光标记点,在床尾处放置红外摄像装置以检测标记点的运动。工作站将摄像装置检测到的标记点轨迹信号转换成呼吸信号,RPM 将呼吸周期平均分为 10 个时相并归类对应时相下的 4DCT,其中,将吸气未定为 0%时相。

1.2.2 PET/CT 图像的采集 确定患者血糖水平正常后,静脉注射 18 氟脱氧葡萄糖(¹⁸F-FDG)0.15 mCi/kg,45 min 后行全身 PET/CT 显像。静息 60 min,采用与 3D/4DCT 相同的固定装置和体位,行 PET/CT 扫描。先行胸部 CT 扫描,结束后立刻进行 PET 图像采集,采集时间为每个床位 2 min,共采集 3~5 个床位。PET 和 CT 采集层厚分别为 4.25 mm 和 5 mm。将扫描完的 PET 图像和 CT 图像进行重建并融合。图像重建采用有序子集最大期望值法,利用 CT 透射扫描数据对 PET 图像进行衰减校正,得到 PET 图像和 CT 图像。

1.2.3 图像配准 将采集的 3DCT、4DCT 及 PET/CT 图像传至 MIM 软件,以 3DCT 为标准图像,将 PET/CT 的 CT 图像与其按照灰度配准,在不改变原始图像灰度信息的情况下,基于解剖结构微调边界及轮廓。4DCT 及 PET 图像自动配准到此坐标系下。

1.2.4 靶区的勾画 按照国际辐射单位和测定委员会(ICRU)50 号^[4]及 62 号^[5]报告对 3D/4DCT 图像进行靶区勾画,靶区勾画的 CT 条件为窗宽 850 HU,窗位 -750 HU,将食管

厚度大于 5 mm 或充气状态下厚度大于 10 mm 作为大体肿瘤靶区(GTV)。将 4DCT 各个时相采集到的 GTV 叠加得到 10 个时相下的肿瘤靶区 IGTV₁₀。对 PET/CT 图像勾画靶区时则基于不同的 SUV 阈值,将不同 SUV 值(≥ 2.0 、2.5、3.0、3.5)及最大 SUV 值的百分比($\geq 20\%$ SUV_{max}、30% SUV_{max}、40% SUV_{max})作为靶区分区的条件,分别得到靶区 IGTV_{PET2.0}、IGTV_{PET2.5}、IGTV_{PET3.0}、IGTV_{PET3.5},以及 IGTV_{PET20%}、IGTV_{PET30%}、IGTV_{PET40%}^[6-8]。比较 4DCT 靶区和不同 SUV 阈值的 PET/CT 靶区的相关性。

1.2.5 靶区中心偏移、体积比和 CI 的计算 靶区中心的计算:计算 4DCT 和 PET/CT 靶区中心的空间坐标,二者之差在左右方向记为 Δx ,头脚方向记为 Δy ,腹背方向记为 Δz ,利用空间距离公式 $(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)^{1/2}$ 得到靶区中心的距离。体积比的计算:体积比定义为 IGTV₁₀ 与 IGTV_{PET} 体积的比值,与 SUV 阈值选取有关;CI 的计算:CI 定义为 4DCT 和 PET/CT 靶区的交集与并集的比值,即 $(IGTV_{10} \cap IGTV_{PET}) / (IGTV_{10} \cup IGTV_{PET})$ ^[7]。CI 反映 4DCT 和 PET/CT 靶区在形状和位置上的匹配程度,CI=1 表示靶区完全重合。

1.3 统计学处理 采用 SPSS18.0 统计软件对 4DCT 和 PET/CT 的靶区中心偏移、体积比、CI 进行统计学处理,以 $\bar{x} \pm s$ 表示,各参数两两间行配对 *t* 检验,靶区中心偏移、体积比与 CI 的相关性分析采用 Pearson 法分析。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 4DCT 和 PET/CT 的靶区中心偏移、体积比和 CI 对比 将 82 例食管癌患者 IGTV₁₀ 和各 IGTV_{PET} 的靶区中心偏移、体积比和 CI 进行对比,当 SUV 阈值取 SUV = 2.0 和 20% SUV_{max} 时,4DCT 和 PET/CT 图像在靶区中心的偏移量和体积差异最小,且 CI 高于其他阈值,见表 1。因此,选择 SUV 为 2.0 和 20% SUV_{max} 作为进一步研究指标。图 1 为某例食管癌患者 4DCT 图像勾画 IGTV₁₀ (绿色)和 PET-CT 图像勾画 IGTV_{PET2.0} (红色)在横截位、矢状位和冠状位的配准结果。

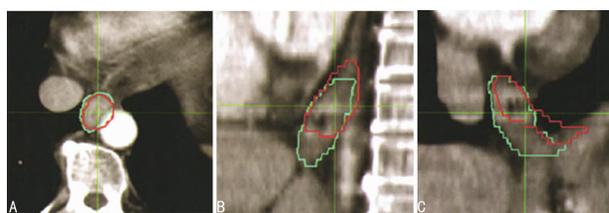
2.2 IGTV_{PET2.0}、IGTV_{PET20%} 与 IGTV₁₀ 的相关性分析 IGTV_{PET2.0}、IGTV_{PET20%} 与 IGTV₁₀ 在 IGTV₁₀ 体积、IGTV₁₀ 长轴径、头脚方向位移及空间运动位移的相关性见表 2。结果显示,在靶区中心偏移方面,IGTV_{PET2.0} 及 IGTV_{PET20%} 与 IGTV₁₀ 在头脚方向位移和空间运动位移上均呈正相关;在体积比方面,IGTV_{PET2.0} 及 IGTV_{PET20%} 与 IGTV₁₀ 在 IGTV₁₀ 体积、IGTV₁₀ 长轴径、头脚方向位移及空间运动位移间均无相关性;在 CI 方面,IGTV_{PET2.0} 及 IGTV_{PET20%} 与 IGTV₁₀ 在 IGTV₁₀ 体积和 IGTV₁₀ 长轴径上呈正相关,在头脚方向位移及空间运动位移上呈负相关。

表 1 82 例食管癌患者 IGTV₁₀ 和各 IGTV_{PET} 的靶区中心偏移、体积比和 CI 对比($\bar{x} \pm s$)

SUV 阈值	靶区中心偏移(mm)	体积比	CI
2.0	1.78±1.19	1.05±0.11	0.61±0.20
2.5	2.87±2.59	0.72±0.22	0.52±0.23
3.0	2.97±2.92	0.75±0.24	0.48±0.22
3.5	3.15±2.13	0.63±0.31	0.47±0.31
20% SUV _{max}	1.95±1.05	0.93±0.21	0.59±0.19
30% SUV _{max}	3.02±2.09	0.70±0.26	0.47±0.25
40% SUV _{max}	4.08±5.37	0.69±0.37	0.44±0.20

表 2 82 例食管癌患者在 IGTV₁₀ 体积、IGTV₁₀ 长轴径、头脚方向位移及空间运动位移间的相关性

观察指标	IGTV ₁₀ 体积		IGTV ₁₀ 长轴径		头脚方向位移		空间运动位移	
	r	P	r	P	r	P	r	P
靶区中心偏移								
IGTV _{PET2.0}	0.049	0.823	0.077	0.731	0.571	0.005	0.782	0.000
IGTV _{PET20%}	0.056	0.732	0.082	0.635	0.629	0.002	0.775	0.000
体积比								
IGTV _{PET2.0}	-0.311	0.151	-0.115	0.526	0.051	0.810	0.021	0.938
IGTV _{PET20%}	-0.236	0.267	-0.334	0.132	0.172	0.461	0.135	0.503
CI								
IGTV _{PET2.0}	0.581	0.004	0.795	0.000	-0.477	0.026	-0.464	0.031
IGTV _{PET20%}	0.631	0.002	0.572	0.005	-0.432	0.046	-0.435	0.042



A:横截位;B:矢状位;C:冠状位

图 1 IGTV₁₀ 和 IGTV_{PET2.0} 的靶区配准结果

3 讨 论

食管癌精确放疗的准确性受呼吸运动、食管蠕动及心脏搏动等诸多因素的影响,其中呼吸运动为最主要的影响因素^[9],通过 4DCT 构建全时相的呼吸周期可以将上述因素考虑在内。但 CT 本身存在伪影,且医师在勾画靶区时存在主观性,使得食管癌边界的勾画存在一定难度。PET/CT 在肿瘤诊断方面有很大优势,近年来成为肿瘤靶区勾画研究的热点^[10]。PET/CT 通过设置 SUV 阈值能够自动识别肿瘤靶区,克服了医师的主观因素。但 PET/CT 存在空间分辨率差的缺点,肿瘤运动对成像质量影响较大,同时,阈值选择的不确定性也会影响靶区勾画的准确度。本研究通过设置不同 SUV 阈值,力图找到最佳的 SUV,食管癌的 PET/CT 和 4DCT 图像在空间上尽可能一致。

本研究结果显示,当 SUV 阈值取 2.0 和 20% SUV_{max} 时,4DCT 和 PET/CT 图像空间匹配程度最高。这与 Wang 等^[8]得到的研究结果一致。在比较 IGTV_{PET2.0}、IGTV_{PET20%} 与 IGTV₁₀ 在 IGTV₁₀ 体积、IGTV₁₀ 长轴径、头脚方向位移及空间运动位移间的相关性时发现,IGTV_{PET2.0}、IGTV_{PET20%} 与 IGTV₁₀ 的靶区中心偏移在头脚方向位移和空间运动位移上均呈正相关;体积比在 IGTV₁₀ 体积、IGTV₁₀ 长轴径、头脚方向位移及空间运动位移间均无相关性;CI 在 IGTV₁₀ 体积和 IGTV₁₀ 长轴径上呈正相关,在头脚方向位移及空间运动位移上呈负相关。因此,虽然 SUV 取 2.0 和 20% SUV_{max} 时 4DCT 和 PET/CT 的空间匹配程度高于其他阈值,但仍然不能使 PET/CT 代替 4DCT,这主要表现在 IGTV_{PET} 与 IGTV₁₀ 的 CI 在 IGTV₁₀ 体积、IGTV₁₀ 长轴径、头脚方向位移及空间运动位移间均有相关性。

影响两靶区 CI 的因素主要是靶区体积、形状和位置偏移。

观察上述结果,SUV 取 2.0 和 20% SUV_{max} 时,IGTV₁₀ 和 IGTV_{PET} 靶区中心偏移量分别为 1.78±1.19 和 1.95±1.05,且体积比接近于 1,但 CI 仅为 0.61±0.20 和 0.59±0.19。因此,本研究中影响 CI 的主要因素是靶区形状的改变。这可能是由于 4DCT 的主观因素和 PET/CT 空间分辨率低导致二者边界不一致。

此外,产生 4DCT 与 PET/CT 图像匹配差异的原因,还与患者在图像扫描时的呼吸幅度和频率不一致有关,因此患者在定位前应先接受必要的呼吸训练。最后,患者体内的¹⁸F-FDG 水平不均匀也会导致差异产生,坏死病灶和炎症可能会干扰肿瘤的勾画^[11],仅凭借 SUV 值很难获得精确的病灶信息。

多影像联合勾画食管癌靶区可以弥补单一影像手段的不足。全时相 4DCT 虽能消除靶区运动的不确定性,包含靶区空间的运动信息,但其存在靶区被高估的可能,而 EE 时相下的 GTV 被认为较接近实际肿瘤大小^[12]。因此,单纯采用全时相 4DCT 配准 4DCT 和 PET/CT 是不可靠的,如何消除配准图像之间的空间错位、提高边缘适形度还需要进一步研究。

参考文献

- [1] Chen W, He Y, Zheng R, et al. Esophageal cancer incidence and mortality in China, 2009 [J]. J Thorac Dis, 2013,5(1):19-26.
- [2] Li F, Li J, Zhang Y, et al. Geometrical differences in gross target volumes between 3DCT and 4DCT imaging in radiotherapy for non-small-cell lung cancer [J]. J Radiat Res, 2013,54(5):950-956.
- [3] Wang W, Li J, Zhang Y, et al. Comparison of patient-specific internal gross tumor volume for radiation treatment of primary esophageal cancer based separately on three-dimensional and four-dimensional computed tomography images [J]. Dis Esophagus, 2014,27(4):348-354.
- [4] International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU report 50: prescribing, recording, and reporting photo beam therapy [R]. Bethesda, MD: International Commission on Radiation Units and Measurements, 1993.

乳腺癌,且术后能够保持良好乳房外形的早期乳腺癌患者。有研究显示,TNM 是乳腺癌根治术后复发的独立危险因素之一^[13],但也有国内外研究显示临床分期不会影响保乳手术的复发,与本研究结果一致。

如何保证阴性的手术切缘作为控制局部复发的关键因素是争论的焦点之一。通常认为手术切缘阳性会影响局部复发率,继而影响长期生存率。切缘阳性患者的 5 年和 10 年生存率均低于切缘阴性患者。本研究 Logistic 回归分析显示,手术切缘为 BCT 后复发的独立危险因素。目前国际上关于肿瘤安全切缘问题并没有广泛的共识,从而缺乏统一的肿瘤安全切缘定义标准,适合保乳手术的患者在不影响保乳的前提下,保证足够的切除范围,可控制术后的局部复发率。近年来对乳腺癌的分子分型研究成为热点,2011 年乳腺癌国际会议推荐 ER、PR、Her-2 和 Ki67 对乳腺癌分子分型进行区分^[14]。Her-2 基因是乳腺癌预后判断的重要因子之一,本研究显示 Her-2 为乳腺癌保乳术复发的独立危险因素,Her-2 阳性患者的复发率显著高于阴性患者。腋窝淋巴结转移是乳腺癌不良预后指标,提示局部复发及转移危险性增高^[15]。文献^[16]报道淋巴结阳性患者局部复发率和转移率显著升高,淋巴结阳性数目为 0、1~3、4~9 个的 5 年生存率分别为 95.2%、94.5%、76.5%。本研究 Logistic 回归分析显示,淋巴结转移是乳腺癌保乳术后局部复发的独立危险因素。

综上所述,淋巴结状态、Her-2 和切缘状态为年轻患者乳腺癌 BCT 后局部复发的独立危险因素。临床治疗中,应选择具有适应证的患者,并加强对高危患者的监控。

参考文献

- [1] 李隽婕,何炜,陈宏林,等. 乳腺癌保乳治疗后局部复发的随访研究[J]. 实用医学杂志,2012,28(7):1116-1118.
- [2] 雷雨,都庆国,王永恒,等. 保乳手术对 35 岁以下女性三阴性乳腺癌患者远期治疗效果的影响[J]. 广西医学,2016,38(8):1091-1094.
- [3] 陈刚. 56 例乳腺癌保乳手术临床分析[J]. 重庆医学,

2010,39(4):442-443.

- [4] 周琨. 乳腺癌保乳手术后局部复发因素的分析[J]. 中国临床医学,2014,21(4):431-432.
- [5] 张绍楠. 早期乳腺癌保乳手术的临床研究[D]. 大连:大连医科大学,2014.
- [6] 薛卫成. 介绍乳腺癌 TNM 分期系统(第 7 版)[J]. 诊断病理学杂志,2010,17(4):241-244.
- [7] 杨桂芳,汪勇. 早期乳腺癌保乳手术的疗效评价[J]. 重庆医学,2006,35(4):353-354.
- [8] 武志雄,张喜平,张瑞明,等. DNA 含量在乳腺癌保乳手术危险因素研究[J]. 内蒙古医学杂志,2015,62(10):1153-1157.
- [9] 孙荣能,赵迎春,陈剑平,等. 乳腺癌保乳手术复发影响因素分析[J]. 现代仪器与医疗,2015,21(6):65-67.
- [10] 徐艳蕾. 早期乳腺癌保乳手术后复发危险因素分析[D]. 新疆:新疆医科大学,2014.
- [11] 耿文文,张斌,梁新瑞,等. 年龄对保乳术后局部复发风险的影响[J]. 肿瘤,2012,32(12):1009-1014.
- [12] 赵剑,罗天航,丁三,等. 保乳手术患者术后局部复发情况调查及影响因素研究[J]. 中国临床医生,2015,44(1):79-80.
- [13] 张丽娜,杨艳芳,刘君,等. 年轻乳腺癌保乳手术治疗的预后分析[J]. 中华普通外科杂志,2013,28(8):593-596.
- [14] 秦春新. 乳腺浸润性小叶癌临床病理特征及保乳切缘阳性的危险因素[D]. 大连:大连医科大学,2014.
- [15] 林灿洁,钟声学,邓文忠,等. 乳腺密度与乳腺癌保乳术后局部复发的关系探讨[J]. 现代肿瘤医学,2016,24(11):1739-1741.
- [16] 余德,田野. 早期乳腺癌保乳术后局部复发的危险因素和预后分析[J]. 中国肿瘤,2002,11(7):406-409.

(收稿日期:2017-07-15 修回日期:2017-09-24)

(上接第 4965 页)

- [5] International Commission on Radiation Units and Measurements. ICRU report 62: prescribing, recording, and reporting photo beam therapy (supplement to ICRU report 50)[R]. Bethesda, MD: International Commission on Radiation Units and Measurements, 1999.
- [6] Riegel AC, Bucci MK, Mawlawi OR, et al. Defining internal target volume using positron emission tomography for radiation therapy planning of moving lung tumors[J]. J Appl Clin Med Phys, 2014, 15(1):4600.
- [7] Vali FS, Nagda S, Hall W, et al. Comparison of standardized uptake value-based positron emission tomography and computed tomography target volumes in esophageal cancer patients undergoing radiotherapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2010, 78(4):1057-1063.
- [8] Wang YC, Hsieh TC, Yu CY, et al. The clinical application of 4D 18F-FDG PET/CT on gross tumor volume delineation for radiotherapy planning in esophageal squamous cell cancer[J]. J Radiat Res, 2012, 53(4):594-600.

- [9] Hashimoto T, Shirato H, Kato M, et al. Real-time monitoring of a digestive tract marker to reduce adverse effects of moving organs at risk (OAR) in radiotherapy for thoracic and abdominal tumors[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2005, 61(5):1559-1564.
- [10] 刘琪,傅小龙. PET-CT 在食管癌放疗中的应用进展[J]. 中华放射肿瘤学杂志,2012,21(3):293-296.
- [11] Muijs CT, Beukema JC, Pruim J, et al. A systematic review on the role of FDG-PET/CT in tumour delineation and radiotherapy planning in patients with esophageal cancer[J]. Radiother Oncol, 2010, 97(2):165-171.
- [12] Persson GF, Nygaard DE, Munck Af Rosenschöld P, et al. Artifacts in conventional computed tomography (CT) and free breathing four-dimensional CT induce uncertainty in gross tumor volume determination[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2011, 80(5):1573-1580.

(收稿日期:2017-06-22 修回日期:2017-09-16)