

doi:10.3969/j.issn.1005-3697.2024.02.021

❖ 临床研究 ❖

中上段食管癌在不同呼吸时相下 VMAT 技术放疗的剂量学研究

阳华东,黎鹏,袁强,周进伟,杨天岳,李贤富

(川北医学院附属医院肿瘤科,四川南充 637000)

【摘要】目的: 研究中上段食管癌患者在呼气末屏气和吸气末屏气状态下与自由呼吸下放疗剂量学的差异。**方法:** 收集本院 20 例中上段食管癌患者的资料,患者靶区 PTV 的处方剂量均为 50.4 Gy/28Fx、1.8Gy/Fx。对患者进行呼吸训练后由电子计算机断层扫描(CT)定位扫描时分别采集自由呼吸、呼气末和吸气末图像,导入 MONACO 进行靶区勾画和计划设计,比较患者在呼气末屏气、吸气末屏气和自由呼吸时相下计划靶区(PTV)的体积、最大剂量、平均剂量、均匀性指数(HI)、适形度指数(CI);肺(lung)的体积、最大剂量、平均剂量、V5、V20、V30;心脏(heart)的体积、最大剂量、平均剂量、V20、V30、脊髓最大剂量(spinal cord dmax)、机器跳数(monitor unit)、子野数。**结果:** 呼气末屏气期相和吸气末屏气期相的 PTV 最大剂量、HI、CI 和子野数、MU 水平分别大于自由呼吸时相的 100.95 cGy、0.02、0.04、55、327 和 82.35 cGy、0.02、0.04、59、318 ($P < 0.05$); 吸气末屏气期相 lung 的最大剂量、平均剂量、V20 和 V30 均值分别小于呼气末屏气相和自由呼吸时相 111.41 cGy、152.18 cGy、2.89%、3.12% 和 123.82 cGy、127.23 cGy、2.90%、3.35% ($P < 0.05$)。**结论:** 呼气末屏气和吸气末屏气会影响靶区和危及器官的体积改变,从而影响剂量学参数和剂量分布,这会带来潜在的脱靶和正常组织受照剂量变化的风险,对于中上段食管癌患者,在放射治疗过程中应重视呼吸控制。

【关键词】 放射治疗;VMAT;剂量学;呼吸时相

【中图分类号】 R735.1 **【文献标志码】** A

Dosimetry study of radiation therapy with VMAT technique in different respiratory phases of middle and upper esophageal carcinoma

YANG Hua-dong, LI Peng, YUAN Qiang, ZHOU Jin-wei, YANG Tian-yue, LI Xian-fu

(Department of Oncology, Affiliated Hospital of North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, Sichuan, China)

【Abstract】 Objective: To study the differences in radiotherapy dosimetry between patients with upper and middle esophageal cancer under end-expiratory breath-holding and end-inspiratory breath-holding states versus free breathing. **Methods:** The data of 20 patients with middle and upper esophageal cancer in our hospital were collected, and the prescribed doses of PTV in the target area of the patients were 50.4Gy/28Fx and 1.8Gy/Fx. Free-breathing, end-expiratory, and end-inspiratory images were captured respectively during the localization scanning by electronic computed tomography (CT) scanning after the respiratory training of the patients. The images were imported to the MONACO was used to outline the target area and plan the design, and the volume of planning tumor volume (PTV), maximum dose, average dose, homogeneity index (HI), conformity index (CI), volume, maximum dose, mean dose, V5, V20, V30 of lung, and volume, maximum dose, mean dose, V20, V30 for heart, Spinal Cord Dmax, Monitor Unit, subfield number of heart were compared in the end-expiratory, end-inspiratory, and free-breathing phases of the patient. **Results:** The levels of PTV maximum dose, HI, CI, and number of subfields and MU were greater than 100.95 cGy, 0.02, 0.04, 55, 327 and 82.35 cGy, 0.02, 0.04, 59, 318 in the free-breathing phase of the breath-holding phase at the end of expiration and the end-of-inspiratory phase of the breath-holding phase, respectively ($P < 0.05$). Lung's maximum dose, mean dose, V20, and V30 in the end-of-inspiratory phase of the breath-holding phase, mean dose, V20 and V30 mean values were smaller than 111.41cGy, 152.18cGy, 2.89%, 3.12% and 123.82cGy, 127.23cGy, 2.90%, 3.35% in end-expiratory breath-holding and free-breathing phases, respectively ($P < 0.05$). **Conclusion:** Breath-holding at the end of expiration and breath-holding at the end of inspiration affects the volume change of the target area and the organs at risk, thus affecting the dosimetric parameters and the dose distribution, which will bring the potential risk of off-target and the change of irradiated dose in normal tissues, and respiratory control should be paid attention to in the course of radiation therapy for patients with upper-mid-

基金项目: 川北医学院校级科研发展计划项目(CBY20-QA-Y05)

作者简介: 阳华东(1991-),男,硕士,临床医学工程师。E-mail:394249530@qq.com

通讯作者: 李贤富,教授。E-mail:lixianfu13@163.com

dle esophageal cancer.

【Key words】 Radiotherapy; VMAT; Dosimetry; Breathing phase

对于肿瘤放射治疗来说,放疗因其具有电离辐射的性质,如不正确使用会对正常组织造成损伤,所以肿瘤治疗需要更加精确,肿瘤放射治疗中提出了“三精”原则:精确定位、精确设计和精确治疗。呼吸运动是人体正常的生理运动,会影响放射治疗精准度,对放疗病人需要重视呼吸训练。

在人体,特别是胸部的放射治疗,如乳腺癌、肺癌、食管癌和肝癌是最容易受到呼吸运动影响的癌症,有专家在放疗顶刊文章中阐述了呼吸对于胸部放疗的重要性^[1]。目前国内肿瘤治疗普遍使用的是定位 CT 图像,这种方法的劣势在于获取图像为静态图像,无法直接获得患者呼吸动态图像。对于常规胸部 CT 检查来说,需要深吸气屏气获得最大肺组织成像,而在放疗中常让患者自由呼吸进行成像。虽然均匀呼吸有效控制了胸部活动范围,但自由呼吸时 CT 扫描定位时呼吸时相与治疗时呼吸时相不一致,这依旧会带来 PTV (planning target volume) 脱靶和危及器官 (organ-at-risk, OAR) 高量的危险^[2]。如果靶区剂量的偏差超过 5%,会造成肿瘤控制率下降^[3]。此外,因为食管周围的解剖学关系,剂量的偏差落在正常组织也会导致放射性食管炎、放射性肺炎和心脏损伤等^[4]。

川东北地区及周边区域是国内食管癌的高发地区之一^[5]。而放射治疗作为食管癌治疗的一种常用手段,有许多患者在治疗过程中都接受过放射治疗。研究治疗过程中因呼吸运动引起的放射剂量学改变具有重要的意义。因此,本研究对食管癌放疗过程中因呼吸运动引起的靶区剂量、危及组织器官剂量和放疗物理参数改变进行研究,以明确不同的呼吸时相(自由呼吸、呼气末屏气和吸气末屏气)引起的剂量学差异。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取 2023 年 1 月 1 日至 2023 年 7 月 31 日川北医学院附属医院进行放射治疗的 20 例食管癌患者为研究对象。纳入标准:(1)病理证实为鳞状细胞癌的患者;(2)经过训练可以接受定位 CT 三期扫描,分别为自由呼吸、深呼吸屏气和深呼气屏气扫描;(3)患者无语言或精神障碍,具有配合能力;(4)放疗处方剂量及次数一致。排除标准:(1)患者扫描图像质量欠清;(2)患者具有呼吸道慢性病史或病情严重;(3)患者未能完成整个治疗疗程。患者年龄 55~74 岁,中位年龄 69 岁;男性 14 例,女性 6

例;据 AJCC (american joint committee on cancer, 美国癌症联合委员会)第 8 版分期,Ⅱ期 2 例,Ⅲ期 8 例,ⅣA 期 10 例。本研究已经获得本院医学伦理委员会批准(批准号 2023ER002-1)。

1.2 方法

1.2.1 定位和扫描 所有患者均由热塑膜进行体位固定,取仰卧位,两手上举握住床柱,在肿瘤中心层面分别于前正中线和左右腋中线放置铅点。扫描前沟通并训练患者配合呼吸。西门子 16 排 CT 定位机进行定位扫描,管电压 130 kV,管电流 200 mAs,重建层厚 3 mm,螺距 0.8。扫描范围从颈 1 椎体到肋膈角下端。在固定位置行自由呼吸(F)、呼气末屏气(E)和吸气末屏气(I)扫描。获得图像传输至放射治疗计划系统 (treatment planning system, TPS),由高年资同一放疗医师进行靶区勾画。见图 1。

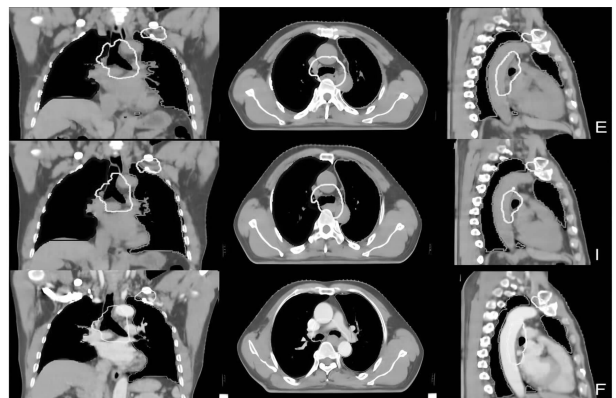


图 1 同一患者不同呼吸时相下 CT 图像

蓝色包绕曲线为 PTV 靶区,紫色包绕曲线构成右肺轮廓,绿色包绕曲线构成左肺轮廓。F:自由呼吸时相;E:呼气末屏气时相;I:吸气末屏气时相。

1.2.2 计划设计 由 10 年以上计划制作经验的同一高级物理师在 MONACO (版本 6.00.11) 治疗计划系统进行计划设计。依据处方剂量要求,靶区 PTV 为 50.4 Gy/28Fx, 110% 处方剂量的体积 < 5%。危及器官中两肺平均剂量 < 15 Gy, V20 < 30%, V30 < 20%;心脏剂量 V30 < 40%, V40 < 30%;脊髓最大剂量 < 45 Gy;肝受照剂量 V30 < 30%;胃和小肠受照剂量 V40 < 40%。其中 V_x 表示接受剂量超过 x 的百分体积。采用容积弧形旋转调强放疗技术 (volumetric modulated arc therapy, VMAT), 所有计划设计均采用 3 个段弧 (顺时针) 分别是: 1 800-2 350、3 150-450、1 300-1 800。实验计划设计时以平静呼吸时相的计划设计参数为标准,在其他两个呼吸时相执行剂量计算,并对计划参数进行微调,当

PTV D95、危及器官剂量限制满足处方剂量要求时保存计算结果。对平静呼吸时相的计划进行验证,验证通过后传输至 Elekta Infinity 加速器进行治疗。

1.2.3 剂量学资料 收集每位患者在 F、E 和 I 的呼吸时相下的剂量学数据。包括 PTV 体积、PTV 最大剂量和 PTV 平均剂量、HI 和 CI;lung 体积、lung 最大剂量、lung V5、lung V20 和 lung V30;heart 最大剂量、heart 平均剂量、heart V20 和 heart V30;spinal cord dmax;机器跳数 (monitor unit, MU) 和子野个数。HI 和 CI 的计算方式如下:

$$CI = \frac{V_{R-T}}{V_T} \times \frac{V_{R-T}}{V_R} \quad HI = \frac{D_{2\%} - D_{98\%}}{D_{50\%}}$$

1.3 统计学分析

所有的数据通过 SPSS 21.0 统计学软件进行。计量资料用 ($\bar{x} \pm s$) 表示,所有数据行 Shapiro-Wilk

检验,以检验数据是否为正态分布。符合正态分布的数据采用单因素方差分析 (one-way ANOVA),两两比较满足方差齐性的数据采用 LSD-*t* 检验;方差非齐性的数据采用 Tamhane 的多重比较方法。非正态分布数据采用 Kruskal-Wallis *H* 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

20 例患者在自由呼吸 (F)、深呼气屏气 (E) 和深吸气屏气 (I) 的呼吸时相下经 Shapiro-Wilk 检验可得,剂量数据中 heart 最大剂量、HI、CI、heart V20、heart V30 和子野数为非正态分布数据,其余数据均为正态分布。所有符合正态分布的数据经单因素方差分析 (ANOVA) 得到以下结果。见表 1。

表 1 呼气末 (E)、吸气末 (I) 和平静呼吸 (F) 时相下剂量学参数 (符合正态分布) 结果比较 ($\bar{x} \pm s$)

呼吸时相	PTV 体积 (cc)	PTV 最大剂量 (cGy)	PTV 平均剂量 (cGy)	lung 体积 (cc)	lung 最大剂量 (cGy)	lung 平均剂量 (cGy)	lung V ₅ (%)
E	463.0 ± 145.6	5 723.1 ± 83.9	5 305.5 ± 38.3	3 347.9 ± 860.2	5 671.0 ± 96.5	996.2 ± 135.6	44.57 ± 7.63
I	427.0 ± 199.8	5 711.9 ± 102.9	5 288.1 ± 60.2	4 269.7 ± 965.6	5 630.7 ± 98.2	979.2 ± 110.0	45.16 ± 5.92
F	384.1 ± 112.7	5 625.9 ± 81.8	5 262.6 ± 26.8	3 839.1 ± 1029.1	5 533.3 ± 72.0	848.0 ± 144.2	40.66 ± 8.39
F 值	1.121	3.576	2.162	3.598	5.584	3.909	1.362
P 值	0.341	0.042	0.135	0.040	0.009	0.032	0.273
LSD		F < E; F < I		E < I	I < E; I < F	I < E; I < F	
Tamhane							

续表 1

呼吸时相	lung V ₂₀ (%)	lung V ₃₀ (%)	heart 体积 (cc)	heart 平均剂量 (cGy)	spinal cord 最大剂量 (cGy)	MU
E	18.07 ± 2.73	10.79 ± 2.28	590.6 ± 106.5	1 120.6 ± 858.9	3 889.4 ± 93.9	1013.2 ± 128.4
I	17.83 ± 2.40	9.93 ± 1.34	579.6 ± 100.7	1 067.5 ± 894.0	3 862.8 ± 80.8	917.1 ± 142.8
F	15.05 ± 3.31	7.12 ± 2.24	652.6 ± 88.9	1 136.6 ± 916.5	3 834.6 ± 89.8	642.2 ± 64.0
F 值	3.465	8.436	1.564	0.010	0.959	22.657
P 值	0.046	0.001	0.228	0.990	0.396	0.000
LSD	I < E; I < F	I < E; I < F				
Tamhane						F < E; F < I

PTV 的最大受照剂量均值在自由呼吸时相下小于呼气末屏气时相和深吸气屏气时相,差距分别为 100.95 和 82.35 cGy。lung 受照最大剂量和平均剂量均值在深吸气屏气相下分别小于自由呼吸相和呼气末屏气相 123.82、111.41 和 127.23、152.18 cGy。lungV20 和 lungV30 均值在深吸气屏气相下分别小于呼气末屏气相和自由呼吸相 2.89%、2.90% 和 3.12%、3.35%。呼气末屏气相和深吸气屏气相分

别高于自由呼吸相达到 327 个 MU 和 318 个 MU,差异均有统计学意义 ($P < 0.05$)。见表 2。

对于非正态分布的数据,采用 K-W *H* 检验得到以下结果,见表 2。呼气末屏气相和深吸气屏气相的靶区 HI 和 CI 较自由呼吸时相均值增加了 0.02 和 0.04。呼气末屏气相和深吸气屏气相的子野数的均值相较于自由呼吸时相增加了 55 和 59,差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。见图 2。

表 2 呼气末 (E)、吸气末 (I) 和平静呼吸 (F) 时相下剂量学参数 (非正态分布) 结果比较 ($\bar{x} \pm s$)

呼吸时相	PTV HI	PTV CI	heart 最大剂量	heart V ₂₀	heart V ₃₀	子野数
E	1.09 ± 0.01	0.82 ± 0.03	5 290.2 ± 594.9	22.9 ± 19.3	13.4 ± 12.8	180.3 ± 11.84
I	1.09 ± 0.02	0.82 ± 0.04	5 231.2 ± 689.2	20.9 ± 18.5	15.3 ± 15.1	174.4 ± 20.10
F	1.07 ± 0.01	0.78 ± 0.03	4 550.0 ± 1934.8	24.4 ± 22.6	13.8 ± 12.7	120.6 ± 44.81
H 值	6.709	7.195	3.254	0.472	0.314	12.772
P 值	0.035	0.026	0.196	0.790	0.855	0.002
成对比较	F < E; F < I	F < E; F < I				F < E; F < I

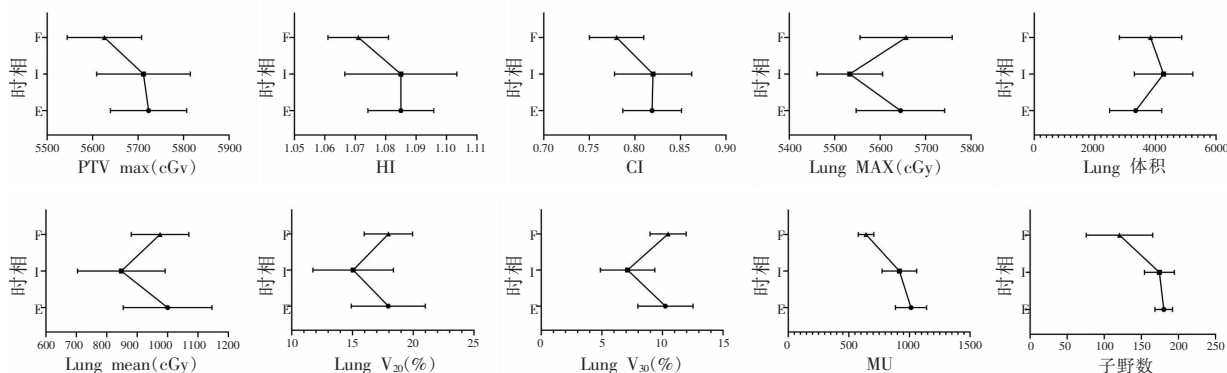


图2 呼气末(E)、吸气末(I)和平静呼吸(F)时相下剂量学参数折线图

3 讨论

所有的胸部放疗都会受到呼吸运动的影响,这种呼吸运动对于接受治疗的患者来说,可能会造成靶区偏移、剂量偏差的影响。解剖学上,呼吸运动引起食管周围的危及器官变化包括双侧肺组织、心脏和脊髓。这种呼吸运动下造成任何剂量传递的不确定,都会影响患者的治疗结果,如肿瘤局部控制率、危及器官的副反应、患者生存期和生活质量等^[6]。本研究主要从放射物理学角度来分析不同呼吸时相引起的剂量学变化。

本研究中,不同呼吸时相 PTV 的体积虽然没有得到统计学差异,但是在 I 和 E 时相 PTV 的平均体积大于 F 时相的平均体积,不仅表明了呼吸过程中靶区的变化,还反映了不同呼吸时相变化影响了放疗医师对靶区的判断。陈健铃等^[7]分析了 20 例食管癌患者在呼气末到吸气末过程中 GTV (gross tumor volume) 的变化,各呼吸时相 GTV 变化范围最小的为 0.52 cm³,最大达到 12.81 cm³,平均增加 9.58% 或减少 11.24%。李毅等^[8]一项关于呼吸运动对肺癌患者靶区体积变化的研究发现,自由呼吸下整个胸段的 GTV 较吸气末平均减少了 4.03%。谢生智等^[9]研究了 23 例食管癌患者,呼吸运动过程中 GTV 的位移为上侧 0.74 cm,下侧 1.62 cm,左侧 0.91 cm,右侧 0.66 cm,前侧 0.87 cm,后侧 0.59 cm,这说明了 GTV 的位移,但该研究并未从剂量学上进行探讨。在本研究中,发现 PTV 的最大剂量在 E 时相和 I 时相大于 F 时相,这是由于呼吸运动过程中靶区体积变化和靶区与肺等正常组织相对位置关系变化和剂量跌落共同影响^[10]。

在胸部放疗中,肺部的体积变化引起的位置变化最大,Huang 等^[11]对 4 名行 SBRT 肺癌患者的肿瘤位置进行了监测,平均移动距离达到 2.3 cm,最小的位置移动 1.4 cm,与本研究相似。吕海鹏等^[12]对 21 例食管癌患者的肺部体积和剂量进行研究,得

出在 EBH 和 IBH 的期相下,肺部体积、V₅、V₁₀、V₂₀ 和 Dmean 改变均具有统计学意义,这与本研究相似。在本研究中,在肺部 V₅ 和 V₁₀ 没有观察到相同的结论,这可能是由于吕海鹏等分析的患者采用的是固定野 5 野非均分照射的调强技术,而本文采用的是容积旋转调强技术,这种技术在带来治疗剂量优化和缩短治疗时间的同时,会带来弧内低剂量的分布增加^[13-14],且不受呼吸运动影响,这也是本研究在 V₁₀ 以下剂量未见差异的原因。另外,Tanaka 等^[15]得出,PTV 越大,PTV 外邻近健康组织受到的辐射剂量越大,本研究因呼吸运动影响的食管 PTV 增大也带来了食管附近肺组织受照剂量的变大,也是肺 V₂₀ 及以上剂量数据具有差异的原因。靶区的 CI 和 HI 在呼气末和吸气末状态下大于平静呼吸,差异具有统计学意义。本研究中,在呼气末和吸气末屏气状态下的 VR-T 和 VT 增大,但 VR-T 增大的二次方大于 VT,CI 的值必然增大。靶区最大剂量 (D_{2%}) 的均值增大,靶区最小剂量 (D₉₈) 均值减小,带来 HI 的增大。

此外,食管癌放疗过程中呼吸运动容易导致心脏毒性^[16],最常见的心脏毒性包括心包积液和房性快速性心律失常^[17]。虽然在本研究中没有观察到心脏剂量学上的差异,这是因为我们的入组标准未包括胸下段的食管癌患者,且在计划过程中,我们重点关注并限制了心脏剂量。Tamari 等^[18]和 Wei^[19]等研究了关于接受放化疗的食管癌患者心包积液危险因素的研究,多因素结果得出心脏 V₃₀ ≥ 41.6% 和 V₃₀ ≥ 46.0% 是心包积液的独立危险因素。而本研究中,心脏 V₃₀ 的范围 4.2% ~ 26.2%,未超过剂量限值。

在本研究中,呼气末屏气和吸气末屏气的 MU、子野数量均大于自由呼吸的 MU 和子野数量,这是由于呼气末屏气时正常组织离靶区更近,计划时为了控制肺等正常组织的受照剂量,计划调制度提高,增加了子野数,进而增加了 MU 数;吸气末屏气时靶

区的受照深度随着深吸气而增加,计划时为了达到靶区剂量要求增加了加速器出束总 MU 数。与李阔等^[20]研究得出的靶区和危及器官的计划权重增加使 MU 数量增加相似。本文还存在以下的不足,首先样本量较少,在未来我们会纳入更多的样本量得到更详实的结果;其次少数患者呼气或吸气状态不能保持,可能会存在微小的影响。

综上,自由呼吸下的 CT 扫描无法确定时相,呼气末屏气和吸气末屏气会影响到 PTV 体积、最大剂量和肺部最大剂量、平均剂量、V20、V30 等物理参数改变,这会带来潜在的脱靶和正常组织受照剂量变化的风险,可能导致临床治疗失败或毒性反应变化。放疗医师在勾画靶区时应注意考虑呼吸对靶区的影响,对于中上段食管癌患者,在放射治疗过程中应重视呼吸控制。

参考文献

[1] Henkelman RM, Mah K. How important is breathing in radiation therapy of the thorax? [J]. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, 1982, 8(11):2005-2010.

[2] Fallone CJ, Summers C, Cwajna W, et al. Assessing the impact of intrafraction motion correction on PTV margins and target and OAR dosimetry for single-fraction free-breathing lung stereotactic body radiation therapy[J]. *Medical Dosimetry: Official Journal of the American Association of Medical Dosimetrists*, 2023, 48(3):202-210.

[3] 杨天岳,许鹏,郭飞,等. 旋转摆位误差在宫颈癌放疗中的剂量学影响和相关性分析[J]. *中华肿瘤防治杂志*, 2023, 30(10):612-618.

[4] McAvoy S, Ciura K, Wei C, et al. Definitive reirradiation for locoregionally recurrent non-small cell lung cancer with proton beam therapy or intensity modulated radiation therapy: predictors of high-grade toxicity and survival outcomes[J]. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, 2014, 90(4):819-827.

[5] 国家卫生健康委员会. 食管癌诊疗规范(2018年版)[J]. *中华消化病与影像杂志(电子版)*, 2019, 9(4):158-192.

[6] Wu JK, Chen SH, Hsu FM, et al. Design of a motion simulation system to assist respiratory gating for radiation therapy[J]. *Medical Dosimetry: Official Journal of the American Association of Medical Dosimetrists*, 2021, 46(4):360-363.

[7] 陈健铃,陈炬辉. 食管癌不同呼吸时相下靶区体积变化[J]. *医疗装备*, 2016, 29(20):59-60.

[8] 李毅,李芳,李宇星,等. 呼吸运动对肺癌患者三维适形调强放

疗肿瘤靶区体积的影响[J]. *现代肿瘤医学*, 2022, 30(14):2609-2612.

[9] 谢生智,黎功,郑静晨,等. 呼吸运动对食管癌靶区影响的研究[J]. *肿瘤学杂志*, 2011, 17(12):914-916.

[10] 王海洋,皮一飞,韩滨,等. 螺旋断层调强放疗靶区外沿纵向剂量跌落及影响因素研究[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2021, 41(3):183-187.

[11] Huang C, Shiue K, Bartlett G, et al. Exploiting tumor position differences between deep inspiration and expiration in lung stereotactic body radiation therapy planning[J]. *Medical Dosimetry: Official Journal of the American Association of Medical Dosimetrists*, 2020, 45(3):293-297.

[12] 吕海鹏,王凯,刘晓,等. 中下段食管癌 21 例放疗不同呼吸时相正常组织剂量学研究[J]. *中华肿瘤防治杂志*, 2020, 27(15):1241-1246.

[13] Zhao Y, Chen L, Zhang S, et al. Predictive factors for acute radiation pneumonitis in postoperative intensity modulated radiation therapy and volumetric modulated arc therapy of esophageal cancer[J]. *Thoracic Cancer*, 2015, 6(1):49-57.

[14] Xu C, Xi M, Komaki R, et al. Dosimetric and clinical outcomes after volumetric modulated arc therapy for carcinoma of the thoracic esophagus[J]. *Advances in Radiation Oncology*, 2017, 2(3):325-332.

[15] Tanaka O, Taniguchi T, Adachi K, et al. Effect of stomach size on organs at risk in pancreatic stereotactic body radiotherapy[J]. *Radiation Oncology*, 2022, 17(1):136.

[16] Banfill K, Giuliani M, Aznar M, et al. Cardiac toxicity of thoracic radiotherapy: existing evidence and future directions[J]. *Journal of Thoracic Oncology: Official Publication of the International Association for the Study of Lung Cancer*, 2021, 16(2):216-227.

[17] Beukema JC, Van Luijk P, Widder J, et al. Is cardiac toxicity a relevant issue in the radiation treatment of esophageal cancer? [J]. *Radiotherapy and Oncology: Journal of the European Society for Therapeutic Radiology and Oncology*, 2015, 114(1):85-90.

[18] Tamari K, Isohashi F, Akino Y, et al. Risk factors for pericardial effusion in patients with stage I esophageal cancer treated with chemoradiotherapy [J]. *Anticancer Research*, 2014, 34(12):7389-7393.

[19] Wei X, Liu HH, Tucker SL, et al. Risk factors for pericardial effusion in inoperable esophageal cancer patients treated with definitive chemoradiation therapy[J]. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, 2008, 70(3):707-714.

[20] 李阔,张友九,李林林,等. 在 Eclipse 计划系统中减少治疗野总 MU 数的可行方法[J]. *国际生物医学工程杂志*, 2019, 42(2):150-153,160.

(收稿日期:2023-09-24

修回日期:2023-11-10)