

颈/胸上段食管癌 dIMRT 和 VMAT 的剂量学及剂量稳健性对比分析

李晓春, 王锐懿, 刘雪萍, 谭榜宪

(川北医学院附属医院肿瘤科, 四川 南充 637000)

【摘要】目的: 对比分析颈段或者胸上段食管癌固定野动态调强放疗 (dIMRT) 和容积旋转调强放疗 (VMAT) 的剂量学及剂量稳健性。**方法:** 选取 22 例行根治性放疗的颈段或者胸上段食管癌患者为研究对象, 行 dIMRT 和 VMAT 两种放疗计划。比较两种放疗计划在患者双肺、心脏、脊髓等的剂量; 每种技术计划在 X 轴 (左右)、Y 轴 (前后)、Z 轴 (头脚) 6 个方向各平移治疗中心 3 mm 模拟摆位误差重新计算靶区和危及器官剂量分布, 观察靶区和危及器官剂量分布与原计划的变化。**结果:** 两种放疗技术均能达到靶区处方剂量, 靶区适形度高, 靶区内剂量分布均匀; dIMRT 双肺 V5、V10、V15、V20、V30、Dmean, 均高于 VMAT ($P < 0.05$); VMAT 心脏 V20、V30、V40、Dmean 高于 dIMRT ($P < 0.05$)。在 3 mm 摆位误差引入下, 并不降低靶区的处方剂量, 危及器官照射剂量也在剂量限制范围内, dIMRT 与 VMAT 靶区和周围危及器官照射剂量和照射体积变化相差不大, 二者稳健性一致。**结论:** 在危及器官, VMAT 对心脏的照射剂量比 dIMRT 多, dIMRT 对肺的照射剂量比 VMAT 多, 但都在剂量限制范围内。dIMRT 的机器跳数更少, VMAT 的治疗时间更短。在 X、Y、Z 三个轴, 左右、前后、头脚 6 个方向引入 3 mm 摆位误差时, dIMRT 与 VMAT 剂量学参数变化均不大, 稳健性一致。

【关键词】 食管癌; 放射治疗; 固定野动态调强放疗; 容积旋转调强放疗

【中图分类号】 R735.1 **【文献标志码】** A

Comparative analysis of dosimetry and dose robustness between dIMRT and VMAT for cervical/upper thoracic esophageal cancer

LI Xiao-chun, WANG Rui-si, LIU Xue-ping, TAN Bang-xian

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

【Abstract】 Objective: To analyze and compare the differences in dosimetric parameters between two radiotherapy techniques [dynamic intensity modulated radiotherapy (dIMRT) and volumetric modulated arc radiotherapy (VMAT)] for cervical or upper thoracic esophageal cancer patients, as well as the dose robustness of dIMRT and VMAT under the introduction of 3 mm positioning error. **Methods:** Selected 22 patients with cervical or upper thoracic esophageal cancer who undergo radical radiotherapy to design a radiotherapy plan. Design dIMRT and VMAT radiotherapy plans simultaneously for each patient, and compare the dose differences between the two radiotherapy plans in the lungs, heart, spinal cord, and other areas. Each technology plan involved translating the treatment center in 6 directions, including the X-axis (left and right), Y-axis (front and back), and Z-axis (head and feet), with a simulated positioning error of 3 mm. The dose distribution of the target area and endangered organs was recalculated, and the changes in the dose distribution of the target area and endangered organs compared to the original plan are observed. **Results:** Both radiotherapy techniques were able to achieve the prescribed dose in the target area, with high conformability and uniform dose distribution within the target area. Both lungs: For V5, V10, V15, V20, V30, and Dmean, dIMRT was slightly higher than VMAT, and the difference was statistically significant ($P < 0.05$). Heart: For V20, V30, V40, and Dmean, VMAT was slightly higher than dIMRT, and the difference was statistically significant ($P < 0.05$). Under the introduction of 3 mm positioning error, the prescription dose in the target area was not reduced, and the radiation dose to organs at risk was also within the dose limit range. The difference in radiation dose and volume between dIMRT and VMAT target areas and surrounding organs at risk was not significant, and the robustness of the two was consistent. **Conclusion:** When endangering organs, VMAT has a higher radiation dose to the heart than dIMRT, and dIMRT has a higher radiation dose to the lungs, but both are within the dose limit range. dIMRT has fewer machine hops and shorter treatment time for VMAT. When introducing a 3 mm positioning error in the X, Y, and Z axes, left and right, front and back, and head and foot directions, there is little change in the dosime-

基金项目: 四川省南充市市校合作科研专项 (18SXHZ0413)

作者简介: 李晓春 (1996 -), 男, 硕士研究生。E-mail: lxc19960323@163.com

通讯作者: 谭榜宪。E-mail: tbx_nsmc@126.com

tric parameters of dIMRT and VMAT, and their robustness is consistent.

【Key words】 Esophageal cancer; Radiation therapy; Dynamic intensity modulated radiotherapy; Volumetric modulated arc radiotherapy

食管癌(esophageal Cancer, EC)是常见的消化道恶性肿瘤,发病率居全世界恶性肿瘤第八位,死亡率居全世界恶性肿瘤第六位^[1]。EC的治疗原则是手术、放疗和化疗相结合的综合治疗。颈段或者胸上段食管癌因其特殊解剖位置,多推荐行根治性放疗^[2]。目前临床上常用的放疗技术有固定野动态调强放疗(dynamic intensity modulated radiotherapy, dIMRT)和容积旋转调强放疗(volumetric modulated arc radiotherapy, VMAT)等。dIMRT技术通过固定直线加速器机架头,围绕治疗中心设置数个照射野,使每个野内因多叶光栅的运动形成不同剂量的子野。VMAT是由调强放疗和弧形放疗相结合发展起来的一种新型现代放疗技术,在加速器多叶光栅位置不断变化的同时,加速器机架头也不停的围绕治疗中心点旋转,在机架旋转的同时对肿瘤不间断的照射。有研究^[3]表明,与IMRT相比,VMAT技术可以减少患者的治疗时间,提高治疗效率,减轻患者的不适感,但是在危及器官剂量分布方面VMAT是否优于IMRT,目前仍没有统一的结论。此外,摆位误差仍是影响放疗质量的一大难题。颈段或者胸上段食管癌因其特殊的解剖结构和食管癌患者营养状况较差,治疗期间体位变化较大,摆位误差也相对较大。对于dIMRT及VMAT两种放疗技术,在摆位误差引入下,其稳健性(即剂量分布变化情况)如何,是否需要增加图像引导治疗频次、增加PTV勾画范围或者选用重复性更好的固定工具,目前缺乏相关研究报道。因此,本研究旨在对比分析dIMRT与VMAT的剂量学及剂量稳健性,为颈段或者胸上段食管癌患者放射治疗提供指导。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取2023年1月至2023年12月川北医学院附属医院收治的22例行根治性放疗的颈段或者胸上段食管癌患者为研究对象,均行dIMRT和VMAT两种放疗计划。本研究经医院伦理委员审核批准,患者及其家属知情同意。纳入标准:(1)经病理学证实的食管癌患者;(2)食管病变位于颈段或者胸上段,临床分期为I~IV期(IVB期患者仅为锁骨上淋巴结转移);(3)患者一般情况良好,ECOG评分 ≤ 2 分;(4)影像学检查或临床症状未发现食管穿孔或有穿孔倾向的征象;(5)全组患者均接受根治性同期推量放疗+化疗。排除标准:(1)已行根治性

手术治疗;(2)有食管穿孔或穿孔倾向的征象;(3)已证实存在远处脏器转移;(4)既往因颈胸部肿瘤或其他疾病接受过放射治疗;(5)接受姑息放疗的患者。

1.2 方法

患者取仰卧位,双上肢置于身体两侧,头部垫枕,颈肩热塑膜固定。CT模拟机下定位,行颈胸部增强扫描,上界:颈1椎体上缘,下界:腰1椎体下缘,层厚3 mm。扫描后的图像资料以DICOM格式传输至Monaco治疗计划系统。由同一名经验丰富的放疗医师结合CT定位图像、食管钡餐造影、胃镜检查、食管内镜超声、PET-CT等影像学检查资料,在Monaco治疗计划系统上勾画大体肿瘤体积(GTV)、转移淋巴结(GTVnd)、临床靶区(CTV)、计划靶区(PTV)及周围危及器官(OAR),参考中国食管癌放射治疗指南(2022年版)^[4]。处方剂量:95% P-GTV 60 Gy/30 Fx, 2 Gy/Fx; 95% P-GTVnd 60 Gy/30 Fx, 2 Gy/Fx; 95% PTV 51 Gy/30 Fx, 1.7 Gy/Fx, 1次/d, 5次/周。危及器官限量双肺为V5 < 50%, V20 < 20%, V30 < 15%; 心脏为Dmean < 30 Gy, V30 < 30%; 脊髓为Dmax < 45 Gy。由同一名经验丰富的物理师使用Elekta公司Monaco放疗计划系统设计两种放疗计划(dIMRT和VMAT),并在两种计划中,在X、Y、Z三个轴,左右、前后、头脚6个方向移动治疗中心3 mm模拟摆位误差,其他参数不变重新设计放疗计划,全部计划射线能量均采用6MV-X线。由放疗主管医师和物理师共同审核放疗计划,要求95% PTV、95% P-GTV体积接受规定的处方剂量,照射野形状必须与靶区保持一致,剂量分布尽可能均匀,无热点及冷点落在靶区,周围危及器官不超过规定的限制剂量等。

1.3 观察指标

(1)dIMRT与VMAT参数:包括在颈段或者胸上段食管癌根治性放疗中的靶区适形度(CI)、靶区均匀性(HI),危及器官照射剂量[脊髓(Dmax)、心脏(Dmean、V30、V40)、肺(V5、V10、V15、V20、V30、Dmean)]、机器跳数(monitor unit, MU)和治疗时间(t)。(2)dIMRT与VMAT剂量学参数稳健性:引入3 mm摆位误差[包括X(左右)、Y(前后)、Z(头脚)三个轴六个方向]时两种放疗技术的靶区CI及HI;危及器官照射剂量[脊髓(Dmax)、心脏(Dmean、V30、V40)、肺(V5、V10、V15、V20、V30、Dmean)],并减去原计划的照射剂量,将VMAT与dIMRT各方向移动3 mm的照射剂量与原计划的照射剂量差值。

1.4 统计学分析

采用 SPSS 22.0 软件对数据进行处理与分析。计量资料符合正态分布且方差齐性,以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示,组间比较行独立样本 t 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 dIMRT 与 VMAT 参数比较

两种放疗技术均能达到靶区处方剂量,靶区适形度高,靶区内剂量分布均匀,CI、HI 比较,差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。dIMRT 双肺 V5、V10、V15、V20、V30、Dmean 高于 VMAT ($P < 0.05$);VMAT 心脏 V20、V30、V40、Dmean,高于 dIMRT ($P < 0.05$);脊髓:两种放疗技术 Dmax 比较,差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。VMAT MU 高于 dIMRT ($P < 0.05$);dIMRT 治疗时间高于 VMAT ($P < 0.05$)。见表 1。

2.2 dIMRT 与 VMAT 剂量学参数稳健性比较

在 X、Y、Z 三个轴,左右、前后、头脚 6 个方向引入 3 mm 摆位误差时,dIMRT 与 VMAT 剂量学参数变化均不大,稳健性一致。在 dIMRT,双肺 (V5、V10、V15、V20、V30) 剂量体积平均值变化在 0.01% ~ 1.49%,双肺 (Dmean) 剂量平均值变化在 1.22 ~ 37.16 cGy,心脏 (V20、V30、V40) 剂量体积平均值变化在 0.00% ~ 1.76%,心脏 (Dmean) 剂量平均值变化在 0.24 ~ 73.81 cGy,脊髓 (Dmax) 剂量平均值变化在 60.69 ~ 271.33 cGy,靶区 (CI、HI) 变化在 0.00 ~ 0.07。在 VMAT,双肺 (V5、V10、V15、V20、V30) 剂量体积平均值变化在 0.00% ~ 1.63%,双肺

(Dmean) 剂量平均值变化在 0.45 ~ 36.93 cGy,心脏 (V20、V30、V40) 剂量体积平均值变化在 0.01% ~ 1.69%,心脏 (Dmean) 剂量平均值变化在 1.35 ~ 72.44 cGy,脊髓 (Dmax) 剂量平均值变化在 33.2 ~ 336.39 cGy,靶区 (CI、HI) 变化在 0.01 ~ 0.05。见表 2-表 4。

表 1 dIMRT 与 VMAT 参数比较 ($\bar{x} \pm s, n = 22$)

参数	dIMRT	VMAT	t 值	P 值
双肺				
V5 (%)	36.78 ± 7.42	34.24 ± 9.57	-2.193	0.040
V10 (%)	25.96 ± 4.56	22.96 ± 6.54	-3.593	0.002
V15 (%)	20.23 ± 3.59	17.05 ± 4.75	-4.541	0.001
V20 (%)	15.74 ± 3.24	12.78 ± 3.37	-4.781	0.001
V30 (%)	7.82 ± 2.02	6.70 ± 2.06	-2.676	0.014
Dmean (cGy)	825.78 ± 132.65	745.95 ± 169.24	-4.114	0.001
心脏				
Dmean (cGy)	547.71 ± 419.87	588.25 ± 453.69	2.104	0.048
V20 (%)	10.03 ± 9.29	11.33 ± 10.05	2.511	0.020
V30 (%)	5.69 ± 5.86	7.11 ± 6.47	2.780	0.011
V40 (%)	2.59 ± 2.78	3.39 ± 3.17	2.479	0.022
脊髓 Dmax (cGy)	3 913.66 ± 768.36	3 951.67 ± 106.61	0.241	0.812
P-CTV				
适形度 CI	0.95 ± 0.01	0.95 ± 0.01	1.754	0.094
均匀性 HI	0.27 ± 0.04	0.26 ± 0.02	-1.469	0.157
P-GTV				
适形度 CI	0.96 ± 0.01	0.97 ± 0.01	0.667	0.512
均匀性 HI	0.08 ± 0.02	0.08 ± 0.01	0.387	0.702
其他				
MU	746.24 ± 124.28	818.06 ± 126.26	2.221	0.037
时间 t (s)	330.82 ± 51.58	232.43 ± 45.35	-13.197	0.001

表 2 在 X 轴方向移动 3 mm 时 dIMRT 与 VMAT 各项参数变化比较 ($\bar{x} \pm s, n = 22$)

参数	X + 3 (左)		t 值	P 值	X - 3 (右)		t 值	P 值
	dIMRT	VMAT			dIMRT	VMAT		
双肺								
V5 (%)	-0.08 ± 0.15	-0.10 ± 0.15	1.414	0.172	0.08 ± 0.15	0.13 ± 0.15	-2.761	0.012
V10 (%)	-0.06 ± 0.15	-0.06 ± 0.15	-0.103	0.919	0.09 ± 0.16	0.12 ± 0.15	-0.924	0.366
V15 (%)	-0.07 ± 0.19	-0.05 ± 0.18	-1.245	0.227	0.12 ± 0.17	0.14 ± 0.17	-0.565	0.578
V20 (%)	-0.08 ± 0.21	-0.05 ± 0.17	-1.312	0.204	0.16 ± 0.20	0.18 ± 0.18	-0.784	0.442
V30 (%)	-0.08 ± 0.20	0.00 ± 0.20	-3.349	0.003	0.22 ± 0.18	0.18 ± 0.19	1.773	0.091
Dmean (cGy)	-4.03 ± 6.59	11.25 ± 64.06	-1.128	0.272	8.55 ± 5.90	8.48 ± 6.37	0.100	0.921
心脏								
Dmean (cGy)	0.24 ± 9.21	1.35 ± 9.19	-1.553	0.135	-2.59 ± 8.56	-4.16 ± 8.64	2.386	0.026
V20 (%)	-0.07 ± 0.30	0.01 ± 0.28	-1.616	0.121	-0.02 ± 0.27	-0.09 ± 0.27	2.007	0.058
V30 (%)	0.00 ± 0.16	0.01 ± 0.16	-0.814	0.425	-0.03 ± 0.17	-0.05 ± 0.15	1.403	0.175
V40 (%)	-0.02 ± 0.12	0.01 ± 0.08	-1.879	0.074	0.00 ± 0.13	-0.02 ± 0.08	1.172	0.254
脊髓 Dmax (cGy)	141.28 ± 809.98	69.25 ± 85.36	0.410	0.686	249.28 ± 795.58	205.75 ± 112.32	0.251	0.804
P-CTV								
适形度 CI	-0.02 ± 0.01	-0.02 ± 0.01	2.766	0.012	-0.02 ± 0.01	-0.02 ± 0.01	0.387	0.703
均匀性 HI	0.05 ± 0.03	0.04 ± 0.01	0.706	0.488	0.05 ± 0.03	0.04 ± 0.02	0.757	0.457
P-GTV								
适形度 CI	-0.04 ± 0.03	-0.05 ± 0.03	1.291	0.211	-0.05 ± 0.03	-0.04 ± 0.02	-0.534	0.599
均匀性 HI	0.03 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.951	0.352	0.07 ± 0.18	0.02 ± 0.02	1.120	0.276

“负值”代表比原计划减少。

表 3 在 Y 轴方向移动 3 mm 时 dIMRT 与 VMAT 各项参数变化比较 ($\bar{x} \pm s, n = 22$)

参数	X + 3(后)		t 值	P 值	X - 3(前)		t 值	P 值
	dIMRT	VMAT			dIMRT	VMAT		
双肺								
V5(%)	-1.49 ± 0.44	-1.35 ± 0.37	-1.263	0.220	1.41 ± 0.36	1.63 ± 0.57	-1.46	0.159
V10(%)	-1.19 ± 0.31	-1.08 ± 0.29	-1.328	0.198	1.16 ± 0.25	1.34 ± 0.76	-0.991	0.333
V15(%)	-1.00 ± 0.23	-0.86 ± 0.24	-2.371	0.027	0.98 ± 0.19	1.15 ± 0.93	-0.832	0.415
V20(%)	-0.84 ± 0.21	-0.70 ± 0.21	-2.842	0.010	0.82 ± 0.17	0.88 ± 0.53	-0.487	0.631
V30(%)	-0.53 ± 0.18	-0.42 ± 0.13	-3.018	0.007	0.50 ± 0.16	0.36 ± 0.47	1.710	0.102
Dmean(cGy)	-37.16 ± 9.72	-32.45 ± 8.00	-2.333	0.030	36.40 ± 7.40	36.93 ± 7.81	-0.245	0.808
心脏								
Dmean(cGy)	-72.09 ± 38.33	-72.44 ± 39.57	0.126	0.901	73.81 ± 35.99	65.49 ± 64.73	0.718	0.480
V20(%)	-1.7 ± 1.00	-1.69 ± 0.98	-0.031	0.975	1.76 ± 0.98	1.48 ± 1.69	0.893	0.382
V30(%)	-1.02 ± 0.69	-1.19 ± 0.77	2.265	0.034	1.58 ± 2.39	0.91 ± 1.89	1.082	0.292
V40(%)	-0.51 ± 0.37	-0.64 ± 0.47	2.694	0.014	0.55 ± 0.36	0.53 ± 0.98	0.139	0.891
脊髓 Dmax(cGy)	171.60 ± 766.77	90.18 ± 102.19	0.493	0.627	-60.69 ± 775.44	-33.2 ± 75.16	-0.163	0.872
P-CTV								
适形度 CI	-0.02 ± 0.01	-0.02 ± 0.01	0.687	0.499	-0.02 ± 0.01	-0.02 ± 0.01	1.172	0.254
均匀性 HI	0.06 ± 0.03	0.05 ± 0.02	1.263	0.221	0.04 ± 0.03	0.02 ± 0.02	1.511	0.146
P-GTV								
适形度 CI	-0.01 ± 0.02	-0.02 ± 0.02	1.748	0.095	-0.05 ± 0.04	-0.05 ± 0.03	-0.541	0.594
均匀性 HI	0.01 ± 0.02	0.02 ± 0.01	-1.767	0.092	0.03 ± 0.01	0.02 ± 0.01	2.870	0.009

“负值”代表比原计划减少。

表 4 在 Z 轴方向移动 3 mm 时 dIMRT 与 VMAT 各项参数变化比较 ($\bar{x} \pm s, n = 22$)

参数	Z + 3(头)		t 值	P 值	Z - 3(脚)		t 值	P 值
	dIMRT	VMAT			dIMRT	VMAT		
双肺								
V5(%)	0.05 ± 0.14	0.23 ± 0.93	-0.926	0.365	0.08 ± 0.31	0.07 ± 0.13	0.056	0.956
V10(%)	0.14 ± 0.17	0.24 ± 1.03	-0.450	0.657	-0.04 ± 0.31	0.10 ± 0.12	-2.154	0.043
V15(%)	0.16 ± 0.17	0.29 ± 1.13	-0.527	0.604	-0.09 ± 0.29	0.10 ± 0.34	-2.308	0.031
V20(%)	0.12 ± 0.19	0.20 ± 0.69	-0.491	0.628	-0.07 ± 0.28	0.08 ± 0.41	-1.776	0.090
V30(%)	-0.02 ± 0.15	-0.12 ± 0.40	1.156	0.261	0.01 ± 0.19	0.14 ± 0.46	-1.376	0.183
Dmean(cGy)	-1.22 ± 4.66	0.45 ± 16.77	-0.473	0.641	3.17 ± 9.14	7.74 ± 14.06	-1.420	0.170
心脏								
Dmean(cGy)	10.82 ± 9.45	3.05 ± 41.93	0.853	0.403	-11.00 ± 10.08	-8.68 ± 8.82	-2.313	0.031
V20(%)	0.22 ± 0.22	-0.04 ± 1.12	1.005	0.326	-0.27 ± 0.34	-0.12 ± 0.21	-3.331	0.003
V30(%)	0.33 ± 0.30	0.02 ± 1.56	0.948	0.354	-0.34 ± 0.31	-0.34 ± 0.31	-0.066	0.948
V40(%)	0.32 ± 0.30	0.19 ± 0.84	0.839	0.411	-0.32 ± 0.31	-0.36 ± 0.32	1.474	0.155
脊髓 Dmax(cGy)	-104 ± 776.43	-103.77 ± 53.57	-0.001	0.999	271.33 ± 787.35	336.39 ± 499.36	-0.321	0.752
P-CTV								
适形度 CI	-0.01 ± 0.01	-0.01 ± 0.01	0.815	0.424	-0.01 ± 0.01	-0.02 ± 0.01	2.351	0.029
均匀性 HI	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	1.433	0.167	0.01 ± 0.02	0.01 ± 0.01	-1.046	0.307
P-GTV								
适形度 CI	-0.06 ± 0.02	-0.05 ± 0.03	-0.493	0.627	-0.03 ± 0.04	-0.05 ± 0.03	1.850	0.079
均匀性 HI	0.03 ± 0.02	0.03 ± 0.02	1.997	0.059	0.00 ± 0.02	0.02 ± 0.02	-2.771	0.011

“负值”代表比原计划减少。

3 讨论

EC 是常见的消化道恶性肿瘤之一,大部分的患者在病程中都会接受放射治疗。目前放疗已进入三维调强放疗时代,能在提高靶区剂量的同时降低周围危及器官的照射剂量,从而增加肿瘤局部控制率和降低放疗副反应的发生率。dIMRT 和 VMAT 是

目前应用较广的两种调强放疗技术,理论上对于危及器官 VMAT 更有剂量学优势,但缺乏大型临床研究证实。

Chen 等^[5]研究表明,当 EC 照射野为 T 形野时 dIMRT 技术在减少肺组织照射剂量方面具有优越性。贾雪丽等^[6]研究结果显示,对于胸段食管癌, dIMRT 计划可降低部分危及器官的受量,能更好地

保护周围正常器官;对于 PTV, dIMRT 计划能改善 HI 值且减少 MU。另有研究^[7]表明,与 dIMRT 相比,VMAT 减少了 MU 和缩短治疗时间,VMAT 降低了肺和心脏等 OAR 照射剂量^[8-10]。本研究结果显示,dIMRT 在双肺的剂量分布高于 VMAT ($P < 0.05$),VMAT 在心脏的剂量分布高于 dIMRT,与上述研究结论相反,可能与受 dIMRT 的布野数量和 VMAT 的弧度影响有关。本研究 dIMRT 设置为 7 野,VMAT 弧度多为 180°且弧靠近左侧。两种放疗技术靶区和脊髓的剂量分布比较,差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。此外,VMAT 的 MU 高于 dIMRT ($P < 0.05$),VMAT 的治疗时间低于 dIMRT ($P < 0.05$)。

摆位误差是影响放射治疗质量的关键。对于靶区而言,误差可能使肿瘤脱靶,肿瘤照射剂量不够,局部控制率下降;对于危及器官而言,误差可能使危及器官的照射剂量超过剂量限值,放疗副反应增加,甚至对危及器官造成不可逆损伤,危及患者生命。Jiang 等^[11]研究显示,直肠癌在调强放疗中,如不对摆位误差进行纠正,可能会导致肿瘤周围正常组织或器官照射过量,对正常组织或器官造成严重损害,不利于患者预后。王笑良等^[12]研究显示,摆位误差使 EC 靶区 GTV、CTV 的受照剂量降低,部分患者脊髓最大剂量超过耐受量,双肺、心脏受照剂量有所下降。肖崇娟^[13]通过对放射治疗中心移动 3、5、8 mm 模拟食管癌摆位误差,观察摆位误差对 EC 放疗剂量学的影响,结果显示,患者模拟摆位误差对靶体积、脊髓、心脏剂量分布影响最大,其次为双肺 V20,建议食管癌 PTV 外扩距离为左右 4.0 mm、头脚 8.1 mm、前后 3.5 mm 为参考。本研究结果显示,在 3 mm 摆位误差情况下,dIMRT 与 VMAT 靶区剂量变化相差不大,稳健性一致。在 3 mm 摆位误差影响下,对靶区均匀性 (HI) 和适形度 (CI) 几乎无影响,对危及器官照射剂量有一定的减少或增加,但并不超过危及器官的限制剂量。

综上,对于颈段或者胸上段食管癌放射治疗,两种放疗技术都是优先选择。VMAT 治疗时间为 dIMRT 的 1/3,大大提高了设备使用率,但 VMAT 应用于临床的时间较短并且技术较为复杂,一个简单的 VMAT 计划优化时间需要 > 2 h,明显长于 dIMRT^[14],如何选择应根据放疗中心的物理师经验和放疗设备而异。在引入 3 mm 摆位误差的情况下,靶区和危及器官照射剂量都在允许范围内,但 > 3 mm 时危及器官是否会超量,仍未可知,建议至少每周在 IGRT 引导下配准 1 次。

参考文献

- [1] Uhlenhopp DJ, Then EO, Sunkara T, et al. Epidemiology of esophageal cancer: update in global trends, etiology and risk factors [J]. *Clinical Journal of Gastroenterology*, 2020, 13(6): 1010 - 1021.
- [2] Cooper JS, Guo MD, Herskovic A, et al. Chemoradiotherapy of locally advanced esophageal cancer: long-term follow-up of a prospective randomized trial (RTOG 85 - 01). radiation therapy oncology group [J]. *JAMA*, 1999, 281(17): 1623 - 1627.
- [3] Klunklin P, Manoham T, Wanwilairat S, et al. Analysis of the planned, delivered dose distributions and quality assurance for helical tomotherapy and volumetric modulated arc therapy in locally advanced non-small cell lung cancer [J]. *Reports of Practical Oncology and Radiotherapy*, 2021, 26(6): 939 - 947.
- [4] 中国医师协会放射肿瘤治疗医师分会, 中华医学会放射肿瘤治疗学分会, 中国抗癌协会肿瘤放射治疗专业委员会. 中国食管癌放射治疗指南 (2022 年版) [J]. *国际肿瘤学杂志*, 2022, 49(11): 641 - 657.
- [5] Chen H, Huang Y, Wang H, et al. Dosimetric comparison and biological evaluation of fixed-jaw intensity-modulated radiation therapy for T-shaped esophageal cancer [J]. *Radiation Oncology*, 2021, 16(1): 158.
- [6] 贾雪丽, 闫文星, 徐晓捷, 等. 胸中段食管癌 3 种调强放疗剂量学比较 [J]. *食管疾病*, 2021, 3(4): 265 - 268.
- [7] Fung-Kee-Fung SD, Hackett R, Hales L, et al. A prospective trial of volumetric intensity-modulated arc therapy vs conventional intensity modulated radiation therapy in advanced head and neck cancer [J]. *World Journal of Clinical Oncology*, 2012, 3(4): 57 - 62.
- [8] Yin L, Wu H, Gong J, et al. Volumetric-modulated arc therapy vs. c-IMRT in esophageal cancer: a treatment planning comparison [J]. *World Journal of Gastroenterology*, 2012, 18(37): 5266 - 5275.
- [9] Shao Y, Chen H, Wang H, et al. Investigation of predictors to achieve acceptable lung dose in T-shaped upper and middle esophageal cancer with IMRT and VMAT [J]. *Frontiers in Oncology*, 2021, 11: 735062.
- [10] Wang Y, Xiao Q, Zeng B, et al. Tomotherapy as a neoadjuvant treatment for locally advanced esophageal cancer might increase bone marrow toxicity in comparison with intensity-modulated radiotherapy and volumetric-modulated arc therapy [J]. *Medical Dosimetry*, 2020, 45(1): e6 - e12.
- [11] Jiang SK, Wang JJ, Wang H, et al. Assessment of setup errors of IGRT combined with a six degrees of freedom bed for patients with primary rectal cancer [J]. *Chinese Journal of Oncology*, 2021, 43(1): 155 - 159.
- [12] 王笑良, 高春玲, 陈金平, 等. 食管癌调强放疗中摆位误差对剂量学的影响 [J]. *临床军医杂志*, 2015, 43(3): 293 - 296.
- [13] 肖崇娟. 肺癌及食管癌放疗摆位误差及对剂量学影响的研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [14] 陈婷婷, 张西志, 花威, 等. 容积旋转调强与固定野动态调强在上段食管癌治疗中的剂量学比较 [J]. *临床肿瘤学杂志*, 2013, 18(2): 151 - 154.

(收稿日期: 2024 - 05 - 20

修回日期: 2024 - 06 - 19)