

乳腺癌根治术后特定射野固定钨门分野静态IMRT与VMAT的临床剂量学评估

巩汉顺, 孟玲玲, 解传滨, 谷珊珊, 王金媛, 杨涛, 戴相昆, 徐寿平

中国人民解放军总医院 第一医学中心放疗科, 北京 100853

[摘要] 目的 比较乳腺癌根治术后患者特定射野固定钨门静态调强放疗 (Intensity Modulated Radiation Therapy, IMRT) 与容积旋转调强放疗 (Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT) 的剂量学差异。方法 选择24例乳腺癌根治术后患者, 分别设计IMRT计划与VMAT计划, 其中IMRT计划中特定射野对锁骨上区与胸壁区分别采用固定钨门技术进行照射。分别比较两组计划靶区和危及器官的剂量参数、机器跳数和验证通过率。结果 VMAT计划的靶区CI及HI结果均优于IMRT计划 ($P<0.05$)。健侧肺 V_5 以下等低剂量区体积参数VMAT计划均高于IMRT计划, 而患侧肺 V_{10} 以上的高剂量区体积参数VMAT计划显著低于IMRT计划 ($P<0.05$)。心脏: 左侧乳腺癌患者VMAT计划中 V_5 及以上各体积参数均低于IMRT计划, 而右侧乳腺癌患者则呈现相反趋势。VMAT计划的平均MUs少于IMRT计划, 尤其是对于左侧乳腺癌患者, 具有显著性差异 ($t=4.18, P<0.05$)。结论 对于乳腺癌根治术后患者, 特定射野固定钨门IMRT计划与VMAT计划皆能满足临床需求, VMAT计划比IMRT计划具有更好靶区的适形度和均匀性; 减少了肺组织等危及器官高剂量区的受照体积, 但增加了其低剂量区的受照范围; 同时降低了MUs, 缩短了治疗时间。

[关键词] 乳腺癌; 调强放疗; 容积旋转调强放疗; 剂量学

Clinical Dosimetry Evaluation of Static IMRT with Fixed Jaws in Specific Field and VMAT for Breast Cancer after Radical Mastectomy

GONG Hanshun, MENG Lingling, XIE Chuanbin, GU Shanshan, WANG Jinyuan, YANG Tao, DAI Xiangkun, Xu Shouping

Department of Radiotherapy, First Medical Center of Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China

Abstract: Objective To compare the dosimetric difference between static intensity modulated radiation therapy (IMRT) with fixed jaws in specific field and volumetric modulated arc therapy (VMAT) in patients with breast cancer after radical mastectomy. Methods A total of 24 patients with breast cancer after radical mastectomy were selected. IMRT plans and VMAT plans were designed respectively. In the IMRT plans, the supraclavicular area and chest wall area were irradiated by fixed jaw technology in specific fields. The dose parameters of the target areas and organs at risk, the number of machine units and the verification pass rate were compared between the two groups. Results The results of CI and HI in target area of the VMAT plan were better than those of the IMRT plan ($P<0.05$). The volume parameters in low-dose areas below V_5 of contralateral lung in VMAT plan were higher than those in IMRT plan, while the volume parameters of the high-dose area of the affected lung tissue above V_{10} was significantly lower than the IMRT plan ($P<0.05$). Heart: the parameters of V_5 and above in the VMAT plan for patients with left breast cancer were lower than the IMRT plan. On the other hand, the cardiac parameters of the right breast cancer showed an opposite trend. The average MUs of the VMAT plan was less than that of the IMRT plan, especially for patients with left breast cancer, with significant difference ($t=4.18, P<0.05$). Conclusion For patients after radical mastectomy for breast cancer, both IMRT plan with fixed jaw in specific field and VMAT plan can meet the clinical needs. The VMAT plan has better target area conformity and uniformity than the IMRT plan, while reduced exposure volume of the high-dose area in lung tissue and other organ at risk, but increased the irradiated range of the low-dose area; at the same time, decreased MUs and shortened the treatment time.

Key words: breast cancer; intensity modulated radiotherapy; volume modulated arc radiotherapy; dosimetry

[中国分类号] R730.55

[文献标识码] A

doi: 10.3969/j.issn.1674-1633.2021.04.026

[文章编号] 1674-1633(2021)04-0113-06

引言

乳腺癌是女性最常见的恶性肿瘤之一, 放射治疗是乳

收稿日期: 2021-01-05

基金项目: 国家重点研发计划专项 (2017YFC0112100); 解放军总医院医疗大数据与人工智能研发项目 (2019MBD-043)。

通信作者: 徐寿平, 高级工程师, 主要研究方向为光子/质子的调强放疗、图像引导放疗、自适应放疗、人工智能、大数据及医学影像影像组学放疗领域应用。

通信作者邮箱: Shouping_xu@yahoo.com

腺癌综合治疗的重要组成部分^[1]; 开展根治术或改良根治术后放疗可以有效降低局部和区域淋巴结复发概率。乳腺癌改良根治术后的放疗靶区主要沿着胸壁, 形状为不规则弧形, 常规切线照射通常会把胸壁内侧正常肺组织包括在内, 导致肺受照体积大幅增加; 对于中晚期患者手术后通常需要对锁骨上下淋巴引流区和胸壁内乳区进行辅助放疗。

放疗过程中不良反应的降低主要依赖于所采用的放疗技术及设计策略。不同学者所采用的治疗手段^[2]及固定野调强的射野数与布野角度也不尽相同^[3],并进行了广泛的剂量学比较^[4]。固定钨门技术调强放疗可以限定射野范围^[5],使某些照射野作用于特定的治疗区域,以获得更好的剂量分布^[6],将其运用到钨门跟随计划中,相互结合可以降低乳腺癌患者放疗过程中肺和心脏等正常器官的所受剂量。容积旋转调强放疗(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT)是调强放疗的一种高级形式,其特点是机架在弧形线上连续运动时,多叶准直器(Multi-Leaf Collimator, MLC)连续运动对射束的强度进行实时调节,相比于常规调强,在提高靶区适形度的同时治疗速度也提高了数倍。对于乳腺癌患者,VMAT技术能获得更好的靶区覆盖度及剂量均匀性^[7],但同时也会造成健侧肺、健侧乳腺和心脏的平均剂量一定程度增加及低剂量范围扩大^[8-9]。

本研究通过对锁骨上淋巴结转移乳腺癌根治术后患者分别设计特定射野固定钨门IMRT计划与VMAT计划,其中IMRT计划中特定射野对锁骨上区与胸壁区分别采用固定钨门技术进行照射,用于在最大程度保护患侧肺组织的前提下更好地提高靶区剂量。从靶区剂量分布及心脏、肺等危及器官受照剂量体积等方面比较两种计划优缺点,旨在为临床优选提供参考。

1 材料与方法

1.1 临床资料

选取24例在我院接受治疗的同一主诊组中锁骨上淋巴结转移的女性乳腺癌根治术后放疗患者,右侧:12例,左侧:12例。患者年龄32~87岁,中位年龄为47岁。

1.2 定位扫描

患者躺于乳腺托架,仰卧位双上肢外展上举,具体角度根据患者身体状况而定,在自由呼吸状态下采用Siemens大孔径CT(Siemens SOMATOM)实施CT扫描,层厚为5mm,分辨率为512×512。扫描范围一般从中颈至膈下。

1.3 靶区及重要器官定义

将扫描所得图像以DICOM RT格式传输至Pinnacle3 9.10计划系统。由主诊组医生勾画靶区(CTV:胸壁及锁骨上淋巴结区,不超出皮下3mm)及危及器官(左、右肺;心脏;脊髓;食管;健侧乳腺;皮肤:皮下3mm)。

1.4 治疗计划设计

利用Pinnacle3 9.10计划系统,基于瓦里安ix 5230加速器分别设计静态调强及容积旋转调强计划,选择6MV X线,默认剂量率600 MU/min;CTV处方剂量为50 Gy/25f,通过计划优化使95%处方剂量包绕95%靶区体积。危及器官限量如下:患侧肺 $V_{20}<25\%$;健侧肺 $V_5<15\%$;心脏 $V_{30}<10\%$;脊髓 $D_{max}\leq 35$ Gy;食管 $D_{max}\leq 50$ Gy;健侧乳腺 $D_{max}\leq 7$ Gy或 $V_7\leq 2\%$;45Gy剂量线紧贴患侧肺外缘。

静态调强计划设计通常采用6个主射野50个子野,最大子野面积为10 cm²,最小子野MUs为10。左侧乳腺

各射野机架角度通常为172°、160°、135°、110°、10°及300°;其中172°及160°射野采用固定钨门技术(172°的射野范围为锁骨上靶区,机头角度为0°;160°的射野范围为胸壁靶区机头角度通常为85°);右侧乳腺各射野机架角度通常为55°、355°、250°、220°、200°、190°;其中200°及190°射野采用固定钨门技术(200°的射野范围为胸壁靶区,机头角度通常为103°;190°的射野范围为锁骨上靶区,机头角度为0°)。各射野具体角度根据靶区形状可进行细微的调整。

容积旋转调强计划采用2个半弧设计,射野机架角度范围:左侧乳腺通常为179.9°~300°和300°~179.9°;右侧乳腺通常为180.1°~65°和65°~180.1°。各射野机头角度及X方向钨门宽度根据靶区形状进行合理调整。

1.5 剂量参数评估

(1)靶区的最大剂量(D_{max})、最小剂量(D_{min})、平均剂量(D_{mean})、CTV_{95%}、CTV_{100%}、CTV_{105%}、HI和CI^[10]以及机器跳数(Monitor Unit, MU)。HI= $D_{5\%}/D_{95\%}$,其中 $D_{5\%}$ 为5%靶区体积所受到的照射剂量, $D_{95\%}$ 为95%靶区体积所受到的照射剂量;HI越接近1则靶区的剂量越均匀。

$$CI = \frac{V_{t,ref} \times V_{t,ref}}{V_t \times V_{ref}}$$

其中 $V_{t,ref}$ 为参考等剂量线所包绕的靶区体积, V_t 为靶区体积, V_{ref} 是参考等剂量线包绕的总体积。CI值介于0~1之间,越接近于1,表示剂量分布适形度越好。

(2)危及器官主要包括 D_{max} 、 D_{min} 、 D_{mean} 、 $D_{2\%}$ 、 $D_{50\%}$ 以及 V_x 。

1.6 计划验证

在计划系统中将各患者计划导入至ArcCHECK的CT图像序列中进行剂量计算并导出RP及RD文件;在加速器上完成实际剂量测量;利用SNC Patient验证分析软件按照3%/3 mm/TH:10的 γ 分析标准对导出剂量图与实际测量结果进行定量对比评估。

1.7 统计学方法

数据以均值±标准差表示,采用SPSS 17.0软件,对各项指标进行配对t检验统计分析, $\alpha<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 靶区剂量参数

对于靶区CTV:VMAT计划的 D_{max} 均小于IMRT计划,但只有左侧乳腺癌的结果差异有统计学意义($P<0.05$);HI与CI:无论左侧还是右侧乳腺癌,VMAT计划均优于IMRT计划($P<0.05$)。VMAT计划中CTV接受处方剂量的95%、100%及105%的体积相对于IMRT计划均有所提高,差异有统计学意义($P<0.05$)。具体结果如表1所示。

2.2 危及器官剂量体积参数比较

在健侧肺受照剂量体积参数比较中:对于左侧乳腺癌患者, V_2 、 V_3 、 V_5 等低剂量区体积参数,VMAT计划均高

于 IMRT 计划, 差异有统计学意义 ($P<0.05$), 而 V_{10} 及以上的体积参数 VMAT 计划均低于 IMRT 计划, 但差异无统计学意义; 右侧乳腺癌患者, VMAT 计划各体积参数 V_x 均显著高于 IMRT 计划。

对于患侧肺组织, VMAT 计划的 V_2 及 V_3 等低剂量区相对于 IMRT 计划具有不同程度的增加, 尤其是右侧乳腺癌患者则具有显著增加 ($P<0.05$); 而 V_{10} 以上的高剂量区体积参数 VMAT 计划显著低于 IMRT 计划 ($P<0.05$)。

心脏的受照剂量体积比较中, 左侧乳腺癌患者 VMAT 计划 V_5 及以上各体积参数均低于 IMRT 计划; 而右侧乳腺癌患者心脏各剂量体积参数: VMAT 计划均高于 IMRT 计划。食管的 $V_5\sim V_{40}$ 等参数 VMAT 计划均低于 IMRT 计划, 而右侧乳腺癌患者的食管 V_2 及 V_3 等剂量区参数则呈现相反趋势。对于健侧乳腺各参数: 与 D_{\max} 及 V_7 及以上的体积参数不同, D_{\min} 、 D_{mean} 及 $V_2\sim V_5$ 等参数 VMAT 计划均高于 IMRT 计划。对于脊髓的 D_{\max} 、VMAT 计划均显著低于 IMRT 计划。具体数值如表 2~3 所示。

2.3 机器跳数及模体验证通过率

无论是左侧还是右侧乳腺癌患者, 其 VMAT 计划的平均 MUs 少于 IMRT 计划, 尤其是对于左侧乳腺癌患者, 差异有统计学意义 ($t=4.18$, $P<0.05$); 模体验证通过率均具有显著提升, 差异有统计学意义 ($t=-3.16$ 、 -5.00 , $P<0.05$)。统计结果列于表 4。

3 讨论

乳腺癌治疗效果通常较好, 绝大多数患者可长期生存, 辐射致癌效应越来越引起医务工作者的重视, 低剂量区体积的增加也逐渐引起关注^[11]。相对于适形放疗, 多野调强放射治疗在提高靶区适形度和均匀性的同时也增加了危及器官低剂量区照射体积^[12]。本研究两种计划的患侧肺和心脏的 V_5 均在 40% 以上, 相对体积均较高。

对于放射治疗可能引起的肺损伤主要与肺接受的平均剂量有关^[13], 而肺的 V_5 、 V_{10} 、 V_{20} 及 V_{30} 等体积参数是预估放射性肺炎的重要判定指标^[14]。Yorke 等^[15]研究显示, 当肺的 V_{10} 大于 50% 时, 肺部相关并发症概率接近 20%。本研究中的患侧肺 V_{10} , VMAT 计划显著低于固定钨门 IMRT 计划且均低于 50% 的标准。与静态调强相比,

VMAT 计划的肺、心脏的极低剂量区 (V_2 、 V_3) 的体积存在不同程度的增大, 此研究结果与史玉静等^[16]的研究结果一致。Hamo 等^[17]研究显示心脏的平均剂量及 V_{30} 对心脏的放射毒性有重要指导意义; 而 V_{30} 值在 10% 以下, 发生放射性心损伤的几率明显降低^[18]。表 2、3 中的数据表明无论 IMRT 还是 VMAT 计划心脏 V_{30} 均低于 6%, 均能有效地保护心脏各项机能。本研究中对于左、右侧乳腺癌患者分别进行统计研究, 结果显示右侧乳腺放疗计划中心脏各指标普遍低于左侧乳腺癌计划, V_{30} 平均值甚至低于 1%。

乳腺患者治疗过程中靶区位置会随着呼吸运动而发生变化^[19], 为了降低由次而造成的靶区漏照风险, 本研究中两种计划设计方式均采用在 PTV (CTV 外放 1 cm, 且不进入肺) 的基础上向胸前及患侧方向各外放 1 cm 以生成 PTV-H, 并且在优化时设定 PTV-H 的最小剂量为处方剂量, 从而保证计划优化时各射野钨门宽度及 MLC 按照 PTV-H 的范围进行展开, 保证足够的射野范围; 与 Monaco 计划系统的 Auto-Flash^[20-21] 射野边界外放功能不同, 此种方法只能将 MLC 在靶区外的叶片外放, 而不能保证所有子野均外放, 因此对患者靶区位置精度要求更高。

VMAT 计划的平均 MUs 值相对较少, 可以减少机器出束时间^[22-23], 从而有效降低治疗过程中的位置误差; 同时提高治疗工作效率及加速器的利用率。本研究中无论是左侧还是右侧乳腺癌, VMAT 计划的模体验证通过率相对于 IMRT 计划均具有显著提升, IMRT 计划均选自临床治疗计划, 射野中心通常放置在参考中心点, 考虑到实际治疗过程中机架与患者之间的安全距离, 其位置通常靠近体中线, 从而造成射野偏中心, 降低 MLC 调制能力; 而 VMAT 计划的射野中心选择则是尽量靠近靶区中心, 有效地减小射野钨门最大横向距离, 保证叶片到位精度; 并且大大地提高机架旋转治疗过程中 MLC 调制能力, 最终使其验证通过率有不同程度的提升。

总之, 对于乳腺癌根治术后患者, 特定射野固定钨门 IMRT 计划与 VMAT 计划皆能满足临床需求, VMAT 计划比 IMRT 计划具有更好靶区的适形度和均匀性; 减少了肺组织等危及器官高剂量区的受照体积, 但增加了其低剂量区的受照范围; 同时降低了 MUs, 缩短了治疗时间。

表1 乳腺癌患者静态调强和容积旋转调强计划的靶区剂量学比较($\bar{x}\pm s$)

靶区	组别	D_{\max}/Gy	D_{\min}/Gy	$D_{\text{mean}}/\text{Gy}$	HI	CI	$\text{CTV}_{95\%}$	$\text{CTV}_{100\%}$	$\text{CTV}_{105\%}$
左侧	IMRT	59.05 ± 1.76	36.65 ± 2.63	52.75 ± 0.25	1.12 ± 0.02	0.62 ± 0.04	98.82 ± 0.41	93.01 ± 1.48	56.76 ± 4.81
	VMAT	57.44 ± 0.72	36.53 ± 3.40	52.84 ± 0.21	1.11 ± 0.01	0.76 ± 0.04	99.25 ± 0.40	94.41 ± 1.17	61.94 ± 4.70
	t 值	2.68	0.11	-0.90	2.52	-9.69	-2.92	-2.76	-2.40
	P 值	0.031	0.912	0.397	0.040	<0.001	0.022	0.028	0.048
右侧	IMRT	58.00 ± 1.14	31.43 ± 3.45	52.60 ± 0.18	1.11 ± 0.01	0.63 ± 0.02	98.77 ± 0.70	93.68 ± 1.26	55.28 ± 5.03
	VMAT	57.55 ± 0.59	36.58 ± 4.02	52.91 ± 0.23	1.10 ± 0.01	0.77 ± 0.03	99.38 ± 0.45	95.08 ± 1.59	63.96 ± 6.09
	t 值	1.04	-3.08	-2.88	3.12	-12.36	-3.94	-3.87	-3.01
	P 值	0.333	0.018	0.024	0.017	<0.001	0.006	0.006	0.020

表2 左侧乳腺癌患者静态调强和容积旋转调强计划中危及器官的剂量学统计评估($\bar{x} \pm s$)

靶区	组别	D _{max} /Gy	D _{min} /Gy	D _{mean} /Gy	V ₂	V ₃	V ₅	V ₇	V ₁₀	V ₂₀	V ₃₀	V ₄₀	V ₅₀
左侧肺	IMRT	55.70 ± 0.46	1.52 ± 0.50	13.78 ± 0.80	93.48 ± 9.23	86.02 ± 12.00	65.05 ± 8.83	-	40.01 ± 3.06	24.81 ± 1.21	16.51 ± 1.52	8.52 ± 1.33	1.09 ± 0.37
		55.36 ± 0.54	1.07 ± 0.56	12.14 ± 0.80	98.85 ± 1.01	90.05 ± 6.81	55.58 ± 3.43	-	33.42 ± 1.32	20.31 ± 2.29	13.28 ± 2.13	7.14 ± 1.46	0.74 ± 0.28
	<i>t</i> 值	1.23	3.05	5.10	-1.62	-0.80	3.25	-	4.72	7.03	9.87	3.48	2.00
	<i>P</i> 值	0.258	0.019	0.001	0.149	0.449	0.014	-	0.002	<0.001	<0.001	0.010	0.086
右侧肺	IMRT	27.73 ± 10.88	0.16 ± 0.06	1.70 ± 0.28	25.17 ± 7.12	13.50 ± 4.19	5.55 ± 2.08	-	1.04 ± 0.61	0.09 ± 0.14	0.01 ± 0.03	0	0
		24.02 ± 11.56	0.43 ± 0.19	2.70 ± 0.59	55.55 ± 19.93	33.29 ± 13.61	10.30 ± 3.80	-	0.69 ± 0.45	0.04 ± 0.08	0.01 ± 0.02	0	0
	<i>t</i> 值	1.44	-5.12	-4.07	-3.79	-3.83	-2.75	-	1.33	1.36	0.37	1.00	-
	<i>P</i> 值	0.194	0.001	0.005	0.007	0.006	0.029	-	0.224	0.216	0.725	0.351	-
心脏	IMRT	49.75 ± 6.34	1.21 ± 0.26	13.21 ± 2.93	96.63 ± 3.62	91.54 ± 5.40	82.00 ± 8.87	-	56.74 ± 14.03	18.95 ± 12.08	5.86 ± 3.91	2.03 ± 1.80	0.19 ± 0.29
		47.98 ± 9.68	2.49 ± 1.15	10.30 ± 2.26	98.49 ± 2.52	94.14 ± 7.31	75.08 ± 10.15	-	35.85 ± 15.48	10.49 ± 6.15	3.90 ± 2.96	1.27 ± 1.32	0.08 ± 0.09
	<i>t</i> 值	1.15	-3.01	4.15	-0.99	-0.68	1.36	-	4.12	2.88	2.80	3.38	1.17
	<i>P</i> 值	0.290	0.020	0.004	0.357	0.520	0.215	-	0.004	0.024	0.027	0.012	0.280
食管	IMRT	45.47 ± 4.77	6.55 ± 4.00	16.56 ± 4.45	100.00 ± 0	99.78 ± 0.61	97.31 ± 4.89	-	65.30 ± 25.09	28.15 ± 16.42	15.68 ± 8.16	3.82 ± 3.38	0
		44.78 ± 4.45	3.61 ± 1.93	13.18 ± 4.07	99.17 ± 1.63	92.95 ± 14.01	85.78 ± 20.05	-	50.50 ± 24.03	20.53 ± 8.65	8.39 ± 7.31	1.52 ± 1.79	0
	<i>t</i> 值	0.79	2.37	4.52	1.44	1.44	1.97	-	2.61	2.32	3.92	2.13	-
	<i>P</i> 值	0.457	0.049	0.003	0.193	0.193	0.089	-	0.035	0.054	0.006	0.071	-
右侧乳腺	IMRT	17.72 ± 4.86	0.06 ± 0.03	1.73 ± 0.46	30.27 ± 11.94	16.78 ± 8.80	6.78 ± 5.27	1.79 ± 1.41	0.33 ± 0.37	0.01 ± 0.02	0	0	0
		11.26 ± 3.25	0.14 ± 0.07	2.49 ± 0.55	54.16 ± 14.66	33.08 ± 14.84	7.48 ± 6.71	0.55 ± 0.050	0.01 ± 0.03	0	0	0	0
	<i>t</i> 值	4.72	-3.75	-3.80	-4.08	-3.12	-0.26	2.70	2.41	1.00	-	-	-
	<i>P</i> 值	0.002	0.007	0.007	0.005	0.017	0.803	0.031	0.047	0.351	-	-	-
脊髓	IMRT	32.48 ± 1.82	1.08 ± 0.87	10.73 ± 3.37	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		16.28 ± 6.79	0.45 ± 0.39	5.35 ± 2.78	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>t</i> 值	7.44	2.93	13.18	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>P</i> 值	<0.001	0.022	<0.001	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表3 右侧乳腺癌患者静态调强和容积旋转调强计划中危及器官的剂量学统计评估($\bar{x} \pm s$)

靶区	组别	D _{max} /Gy	D _{min} /Gy	D _{mean} /Gy	V ₂	V ₃	V ₅		V ₁₀	V ₂₀	V ₃₀	V ₄₀	V ₅₀
左侧肺	IMRT	11.14 ± 4.55	0.15 ± 0.05	0.84 ± 0.12	7.75 ± 1.88	2.24 ± 1.18	0.36 ± 0.34	-	0.02 ± 0.03	0	0	0	0
		15.10 ± 3.61	0.49 ± 0.24	2.52 ± 0.55	51.16 ± 24.26	30.12 ± 14.58	8.39 ± 2.74	-	0.46 ± 0.35	0	0	0	0
	VMAT	15.10 ± 3.61	0.49 ± 0.24	2.52 ± 0.55	51.16 ± 24.26	30.12 ± 14.58	8.39 ± 2.74	-	0.46 ± 0.35	0	0	0	0
		15.10 ± 3.61	0.49 ± 0.24	2.52 ± 0.55	51.16 ± 24.26	30.12 ± 14.58	8.39 ± 2.74	-	0.46 ± 0.35	0	0	0	0
	<i>t</i> 值	-2.19	-4.22	-8.68	-4.93	-5.32	-8.23	-	-3.83	-	-	-	-
	<i>P</i> 值	0.065	0.004	<0.001	0.002	0.001	<0.001	-	0.006	-	-	-	-
右侧肺	IMRT	54.78 ± 0.69	1.22 ± 0.48	13.78 ± 0.55	93.84 ± 5.34	85.08 ± 5.73	61.57 ± 5.02	-	38.57 ± 3.38	24.86 ± 1.62	17.30 ± 1.43	9.87 ± 1.27	1.03 ± 0.52
		55.00 ± 1.26	1.27 ± 0.67	12.43 ± 0.55	98.64 ± 1.13	92.44 ± 3.80	58.14 ± 3.81	-	34.09 ± 2.09	21.11 ± 1.59	13.77 ± 1.29	7.16 ± 1.04	0.60 ± 0.45
	VMAT	55.00 ± 1.26	1.27 ± 0.67	12.43 ± 0.55	98.64 ± 1.13	92.44 ± 3.80	58.14 ± 3.81	-	34.09 ± 2.09	21.11 ± 1.59	13.77 ± 1.29	7.16 ± 1.04	0.60 ± 0.45
		55.00 ± 1.26	1.27 ± 0.67	12.43 ± 0.55	98.64 ± 1.13	92.44 ± 3.80	58.14 ± 3.81	-	34.09 ± 2.09	21.11 ± 1.59	13.77 ± 1.29	7.16 ± 1.04	0.60 ± 0.45
	<i>t</i> 值	-0.45	-0.29	6.45	-2.80	-4.36	2.30	-	4.42	7.91	9.44	5.29	3.42
	<i>P</i> 值	0.667	0.779	<0.001	0.027	0.003	0.055	-	0.003	<0.001	<0.001	0.001	0.011
心脏	IMRT	21.41 ± 6.25	0.39 ± 0.14	4.08 ± 0.90	47.92 ± 10.79	36.47 ± 6.38	30.33 ± 5.83	-	11.94 ± 5.84	1.07 ± 2.96	0.09 ± 0.24	0	0
		28.46 ± 13.17	1.17 ± 0.61	5.72 ± 2.22	82.68 ± 14.03	64.24 ± 21.09	41.35 ± 18.54	-	13.15 ± 11.08	2.83 ± 4.04	0.76 ± 1.12	0.07 ± 0.12	0
	VMAT	28.46 ± 13.17	1.17 ± 0.61	5.72 ± 2.22	82.68 ± 14.03	64.24 ± 21.09	41.35 ± 18.54	-	13.15 ± 11.08	2.83 ± 4.04	0.76 ± 1.12	0.07 ± 0.12	0
		28.46 ± 13.17	1.17 ± 0.61	5.72 ± 2.22	82.68 ± 14.03	64.24 ± 21.09	41.35 ± 18.54	-	13.15 ± 11.08	2.83 ± 4.04	0.76 ± 1.12	0.07 ± 0.12	0
	<i>t</i> 值	-1.27	-3.63	-1.77	-4.58	-3.09	-1.48	-	-0.24	-0.89	-1.58	-1.52	-
	<i>P</i> 值	0.244	0.008	0.120	0.003	0.018	0.183	-	0.821	0.405	0.158	0.172	-
食管	IMRT	44.84 ± 3.14	0.85 ± 0.51	9.43 ± 1.74	78.14 ± 14.93	71.73 ± 15.38	57.64 ± 15.54	-	25.69 ± 11.46	15.11 ± 3.49	8.08 ± 4.27	1.56 ± 1.64	0
		40.92 ± 3.26	1.62 ± 1.00	8.28 ± 1.84	92.78 ± 5.43	78.08 ± 19.97	50.47 ± 14.40	-	23.97 ± 6.68	10.36 ± 5.30	3.29 ± 2.62	0.15 ± 0.26	0
	VMAT	40.92 ± 3.26	1.62 ± 1.00	8.28 ± 1.84	92.78 ± 5.43	78.08 ± 19.97	50.47 ± 14.40	-	23.97 ± 6.68	10.36 ± 5.30	3.29 ± 2.62	0.15 ± 0.26	0
		40.92 ± 3.26	1.62 ± 1.00	8.28 ± 1.84	92.78 ± 5.43	78.08 ± 19.97	50.47 ± 14.40	-	23.97 ± 6.68	10.36 ± 5.30	3.29 ± 2.62	0.15 ± 0.26	0
	<i>t</i> 值	2.40	-2.63	2.10	-2.94	-0.70	1.02	-	0.56	3.26	3.18	2.25	-
	<i>P</i> 值	0.047	0.034	0.074	0.022	0.508	0.340	-	0.592	0.014	0.016	0.059	-
左侧乳腺	IMRT	16.91 ± 4.55	0.04 ± 0.02	1.16 ± 0.14	17.54 ± 2.95	8.59 ± 3.07	2.99 ± 1.94	0.91 ± 0.97	0.14 ± 0.23	0	0	0	0
		10.39 ± 1.66	0.18 ± 0.10	2.61 ± 0.59	61.99 ± 20.43	35.73 ± 12.64	6.51 ± 3.48	0.43 ± 0.34	0.01 ± 0.01	0	0	0	0
	VMAT	10.39 ± 1.66	0.18 ± 0.10	2.61 ± 0.59	61.99 ± 20.43	35.73 ± 12.64	6.51 ± 3.48	0.43 ± 0.34	0.01 ± 0.01	0	0	0	0
		10.39 ± 1.66	0.18 ± 0.10	2.61 ± 0.59	61.99 ± 20.43	35.73 ± 12.64	6.51 ± 3.48	0.43 ± 0.34	0.01 ± 0.01	0	0	0	0
	<i>t</i> 值	3.68	-4.73	-6.88	-5.95	-5.79	-2.72	1.67	1.71	1.00	-	-	-
	<i>P</i> 值	0.008	0.002	<0.001	0.001	0.001	0.030	0.138	0.130	0.351	-	-	-
脊髓	IMRT	31.95 ± 1.43	0.67 ± 0.65	8.15 ± 1.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		17.18 ± 6.15	0.46 ± 0.47	5.30 ± 2.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VMAT	17.18 ± 6.15	0.46 ± 0.47	5.30 ± 2.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		17.18 ± 6.15	0.46 ± 0.47	5.30 ± 2.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>t</i> 值	6.60	1.96	4.86	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	<i>P</i> 值	<0.001	0.090	0.002	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表4 乳腺癌患者静态调强和容积旋转调强计划的机器跳数及模体验证通过率的比较($\bar{x} \pm s$)

危及器官	组别	机器跳数	验证通过率/%
左侧	IMRT	741.00 \pm 103.51	95.48 \pm 1.34
	VMAT	584.38 \pm 74.05	97.29 \pm 1.45
	t 值	4.18	-3.16
	P 值	0.004	0.016
右侧	IMRT	666.50 \pm 58.21	96.35 \pm 0.82
	VMAT	607.00 \pm 47.99	97.28 \pm 0.76
	t 值	2.30	-5.00
	P 值	0.055	0.002

[参考文献]

- [1] 王磊,倪昕晔,王根和,等.乳腺癌固定野调强射野数目的研究[J].中国医学物理学杂志,2018,35(11):1269-1275.
- [2] 叶祯开,唐洁,卢耀振,等.野中野调强放疗在左乳腺癌改良根治术后胸壁放疗的剂量学研究[J].中国医学物理学杂志,2020,37(5):541-544.
- [3] 周云浣,胡高武,邓海军,等.不同布野方式对左侧乳腺癌胸锁联合放疗计划的影响[J].医疗卫生装备,2020,41(2):48-51.
- [4] 邓威,徐细明,周静.两种不同的射野方式对乳腺癌调强计划剂量学的影响[J].中国医学装备,2019,16(4):24-28.
- [5] 赵洪利,陈颖,王骁踊,等.乳腺癌根治术后调强放疗的一体化射野设计[J].中华放射医学与防护杂志,2020,40(2):116-121.
- [6] 卢小开,黄立敏,鲁亮,等.固定铅门技术在左侧乳腺癌保乳术后放射治疗计划中的应用[J].医疗装备,2019,31(11):29-31.
- [7] Popescu CC, Olivotto I A, Beckham WA, et al. Volumetric modulated arc therapy improves dosimetry and reduces treatment time compared to conventional intensity-modulated radiotherapy for locoregional radiotherapy of left-sided breast cancer and internal mammary nodes[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2010, 76(1):287-295.
- [8] 柏晗,侯宇,李文辉,等.保乳术后全乳放疗容积旋转调强放疗(VMAT)物理计划的设计[J].医疗装备,2018,31(1):9-11.
- [9] 袁美芳,杨毅,赵玉涛,等.左乳癌根治术后sIMRT和VMAT对对侧乳腺和对侧肺的剂量学研究[J].临床医学研究与实践,2020,5(29):20-22.
- [10] Virén T, Heikkilä J, Myllyoja K, et al. Tangential volumetric modulated arc therapy technique for left-sided breast cancer radiotherapy[J]. *Radiat Oncol*, 2015, (10):79.
- [11] Berrington de GA, Curtis RE, Gilbert E, et al. Second solid cancers after radiotherapy for breast cancer in SEER cancer registries[J]. *Br J Cancer*, 2010, 102(1):220-226.
- [12] Ozyigit G, Gultekin M. Current role of modern radiotherapy techniques in the management of breast cancer[J]. *World J Clin Oncol*, 2014, 5(3):425-439.
- [13] 莫威,牛道立.肺低剂量区体积预测放射性肺炎的研究进展[J].国际医学放射学杂志,2016,39(1):35-38.
- [14] Marks LB, Bentzen SM, Deasy JO, et al. Radiation dose-volume effects in the lung[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2010, 76 (Suppl 3):S70-S76.
- [15] Yorke ED, Jackson A, Rosenzweig KE, et al. Correlation of dosimetric factors and radiation pneumonitis for non-small-cell lung cancer patients in a recently completed dose escalation study[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2005, 63(3):672-682.
- [16] 史玉静,鞠孟阳,胡晓伟,等.双侧乳腺癌术后IMRT与VMAT的剂量学差异[J].中国医学物理学杂志,2019,36(4):384-388.
- [17] Hamo CE, Bloom MW. Getting to the heart of the matter: an overview of cardiac toxicity related to cancer therapy[J]. *Clin Med Insights Cardiol*, 2015, 9(Suppl 2):47-51.
- [18] 王书文,和新盈,何海涛,等.左侧乳腺癌保乳术后放疗对病人心肌钙蛋白的影响[J].现代肿瘤医学,2009,17(6):1079-1081.
- [19] Zurl B, Stranzl H, Winkler P, et al. Quantification of contralateral breast dose and risk estimate of radiation-induced contralateral breast cancer among young women using tangential fields and different modes of breathing[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2013, 85(2):500-505.
- [20] Haga A, Magome T, Takenaka S, et al. Independent absorbed-dose calculation using the Monte Carlo algorithm in volumetric modulated arc therapy[J]. *Radiat Oncol*, 2014, 9(1):75.
- [21] 柴林燕,周灿,王科峰,等.基于VMAT的固定铅门技术在左侧乳腺癌改良根治术后放疗中的应用[J].现代肿瘤医学,2020,28(19):3409-3413.
- [22] 陈舒婷,杨帅,姜仁伟,等.乳腺癌根治术后IMRT和VMAT放疗技术剂量学研究[J].临床医学研究与实践,2019,(9):13-15.
- [23] 胡项英,罗翼,冼绍波,等. Plan IQ和Monaco优化乳腺癌改良根治术后放射治疗计划的剂量学研究[J].医学装备,2020,33(13):4-7.

本文编辑 皮志超