

## 基于Halcyon加速器的乳腺癌IMRT计划设计方法

魏夏平<sup>1</sup>, 苏洁洪<sup>1</sup>, 黄小伟<sup>2</sup>, 王小深<sup>3</sup>, 王兴柳<sup>3</sup>, 张震<sup>3</sup>, 刘叶明<sup>1</sup>, 黄明超<sup>1</sup>

1. 广州中医药大学金沙洲医院肿瘤放射治疗中心, 广东 广州 510080; 2. 东莞理工学院科学技术处, 广东 东莞 523808; 3. 瓦里安医疗系统公司, 北京 100176

**【摘要】目的:**探索一种基于Halcyon平台的快速简洁的乳腺癌调强放射治疗(IMRT)计划设计方法,旨在降低乳腺癌IMRT计划设计难度。**方法:**回顾性选择10例包含锁骨上靶区的乳腺癌病例,在Halcyon上进行固定模式12野IMRT计划设计,勾画特定的辅助结构,使用基本固定的优化条件得到乳腺癌IMRT计划(HAL\_IMRT)。并将该计划同TrueBeam临床使用的容积调强弧形治疗(TrueBeam\_VMAT)计划进行比较。**结果:**HAL\_IMRT计划患侧肺 $V_5$ 、 $V_{10}$ 、 $V_{20}$ 、 $D_{mean}$ ,健侧肺 $V_5$ ,健侧乳腺 $V_5$ 及 $D_{mean}$ 显著低于TrueBeam\_VMAT计划( $P<0.05$ );靶区方面CI、HI、 $D_2$ 、 $D_{98}$ 均不存在统计学差异( $P>0.05$ ),但HAL\_IMRT计划靶区最大点剂量 $D_{max}$ 高于TrueBeam\_VMAT计划( $P<0.05$ )。**结论:**使用Halcyon固定模式的IMRT计划方法在满足临床剂量要求下,能够降低危及器官剂量,并且能够明显降低乳腺癌IMRT计划设计的难度。

**【关键词】**乳腺癌;Halcyon;调强放射治疗;计划设计

**【中图分类号】**R737.9;R815.6

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2022)07-0817-06

### IMRT planning for breast cancer based on Halcyon accelerator

WEI Xiaping<sup>1</sup>, SU Jiehong<sup>1</sup>, HUANG Xiaowei<sup>2</sup>, WANG Xiaoshen<sup>3</sup>, WANG Xingliu<sup>3</sup>, ZHANG Zhen<sup>3</sup>, LIU Yeming<sup>1</sup>, HUANG Mingchao<sup>1</sup>

1. Department of Radiation Oncology, Jinshazhou Hospital of Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou 510080, China; 2. Science and Technology Division, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China; 3. Varian Medical Systems, Beijing 100176, China

**Abstract: Objective** To reduce the difficulty of intensity-modulated radiotherapy (IMRT) planning for breast cancer by exploring a simple and rapid method for breast cancer IMRT planning based on Halcyon platform. **Methods** Ten cases of breast cancer with supraclavicular target were retrospectively selected. Fixed-mode 12-field IMRT planning was carried out on Halcyon, and the specific auxiliary structure was delineated. Halcyon-based IMRT plan (HAL\_IMRT) of breast cancer was obtained after the optimization using basically fixed optimization objectives. The obtained plan was compared with the conventional TrueBeam VMAT plan in clinic (TrueBeam\_VMAT). **Results** The  $V_5$ ,  $V_{10}$ ,  $V_{20}$  and  $D_{mean}$  of ipsilateral lung, the  $V_5$  of contralateral lung and the  $V_5$  and  $D_{mean}$  of contralateral breast in HAL\_IMRT plan were significantly lower than those in TrueBeam\_VMAT plan ( $P<0.05$ ). There were no significant differences in CI, HI,  $D_2$  and  $D_{98}$  of target area ( $P>0.05$ ), but the maximum point dose ( $D_{max}$ ) of target area in HAL\_IMRT plan was higher than that of TrueBeam\_VMAT plan ( $P<0.05$ ). **Conclusion** When meeting clinical dose requirements, fixed-mode HAL\_IMRT planning can reduce the dose to organs-at-risk and significantly reduce the difficulty of IMRT planning for breast cancer.

**Keywords:** breast cancer; Halcyon; intensity-modulated radiotherapy; treatment planning

### 前言

近年来,国内乳腺癌发病率不断增高,是威胁广大女性健康的恶性疾病。放射治疗在乳腺癌的治疗

过程中发挥着重要作用,乳腺癌的放射治疗不仅能够降低肿瘤复发率,而且还能进一步提升患者生存率<sup>[1-3]</sup>。随着放射治疗技术的发展,乳腺癌的放射治疗方法也在不断进步。从早期的普放技术,到三维适形技术再到当前广泛使用的调强放射治疗(Intensity-Modulated Radiation Therapy, IMRT)技术,使得乳腺癌放疗中,危及器官的照射剂量不断降低,靶区剂量更加均匀,并且能够进一步提高靶区放疗剂量<sup>[4-6]</sup>。包含锁骨上靶区的乳腺癌计划对物理师/剂量师的计划设计水平要求较高,不同的计划设计

**【收稿日期】**2022-03-05

**【作者简介】**魏夏平,硕士,研究方向:肿瘤放射物理,E-mail: wei-xia-ping@163.com

**【通信作者】**苏洁洪,医疗器械工程师,研究方向:肿瘤放射物理,E-mail: 573921373@qq.com

方法存在较大的剂量学差异。如使用切线野或者靶区入射角度的均分野,危及器官接受剂量则存在较大差异<sup>[7]</sup>;使用基于轮廓优化技术的正向调强方法能得到较好的剂量分布<sup>[8]</sup>;固定铅门技术和铅门跟随技术可以进一步降低危及器官剂量<sup>[9-11]</sup>;此外仍可以通过分段布野的方式进行放疗计划设计,能够减少心脏和患侧肺剂量<sup>[12]</sup>;常规加速器乳腺癌计划设计方法多样,且设计方法的不同可能导致较大的剂量学差异。

Halcyon加速器为瓦里安新一代智慧放疗平台,其设计与常规加速器存在较大差异。Halcyon具有双层多叶准直器(Multi-Leaf Collimator, MLC)错位设计,其射线漏射极小,且具有很高的治疗安全性<sup>[13]</sup>。且Halcyon在乳腺癌放疗中应用广泛,具有很高的束流效率<sup>[14-19]</sup>。本研究基于Halcyon加速器平台探索一种固定模式的IMRT计划设计方法,减少物理师/剂量师的计划经验对放射治疗计划的影响,提高乳腺癌计划设计效率。



a: Halcyon加速器的双层MLC



b: Halcyon加速器透视图

图1 Halcyon加速器构造

Figure 1 Overview of Halcyon accelerator

### 1.3 计划设计方法

Halcyon乳腺癌计划布野方式如图2所示,射野数量为12个射野,角度采用患侧均分原则。如左侧乳腺癌计划设计布野从机架角160°的切线野开始以20°递减,直到机架角300°切线野为止;右侧乳腺癌计划设计则从机架角200°切线野开始以20°递增,直到机架角60°切线野为止。

勾画一个辅助结构block,目的是使用该结构实现MLC运动的限制,尽量保护肺组织。如图3所示,A标志线表示Block左侧区域到此线附近,B标志线表示Block右侧区域到此标志线附近,原则上不超出肺部区域;C和D标志线表示Block区域长轴方向和PTV长轴方向相同;E表示Block区域和PTV区域距离为3 cm(此距离可根据计划难度进行调整,本研究均采用3 cm)。

计划优化方法与IMRT计划优化方法相同,但是Block区域采用瓦里安Eclipse放射治疗计划系统特有

## 1 材料和方法

### 1.1 患者信息

回顾性选取10例包含锁骨上区域的乳腺癌患者,计划处方为计划靶区(Plan Target Volume, PTV) 50 Gy/25 F。10例患者均采用容积弧形调强治疗(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT)技术,使用瓦里安公司TrueBeam医用直线加速器完成治疗(TrueBeam\_VMAT计划)。现将这10例患者在Halcyon加速器平台上重新进行计划设计(HAL\_IMRT计划),并与原治疗计划进行对比。

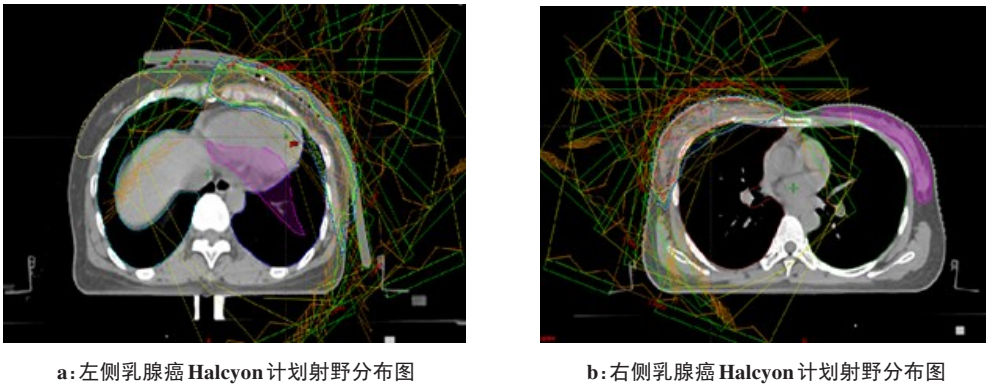
### 1.2 Halcyon加速器平台

Halcyon加速器为瓦里安新一代智慧放疗系统,其设计与常规加速器存在较大差异。如图1所示,Halcyon加速器采用环形机架设计,且使用双层MLC设计,加速器治疗机架旋转达到2圈/min,MLC叶片运行速度达到5 cm/s,剂量率达800 MU/min,相对于常规加速器治疗速度更快且实际临床操作更加便捷。

的Entry+Exit功能。该功能可以将穿过Block结构的所有射束的通量设置为0,限制射线从此区域通过。其余靶区及危及器官均按照常规优化条件进行添加,并开始优化。由于乳腺癌肿瘤位置位于前侧体表,因此在放射治疗过程中存在呼吸动度问题,为避免在治疗过程中由于患者呼吸导致的靶区漏照,需要在射野外进行MLC外扩。针对IMRT计划使用Skin Flash Tool工具,将切线野外缘MLC叶片进行外扩,再使用该工具完成叶片外扩后,若剂量出现较大偏差,则直接继续优化,无需修改任何优化参数。对于优化后的热点处理使用Edit fluence功能,将高剂量点区域通量进行修改,以消除热点区域。

### 1.4 计划比较

将HAL\_IMRT计划与TrueBeam\_VMAT计划行剂量学比较,分别比较PTV、患侧肺、健侧肺、健侧乳腺、脊髓、心脏的相关剂量学参数,如表1所示。



a: 左侧乳腺癌 Halcyon 计划射野分布图                      b: 右侧乳腺癌 Halcyon 计划射野分布图

图2 Halcyon 乳腺癌计划布野方式

Figure 2 Field arrangement of Halcyon-based IMRT plan of breast cancer

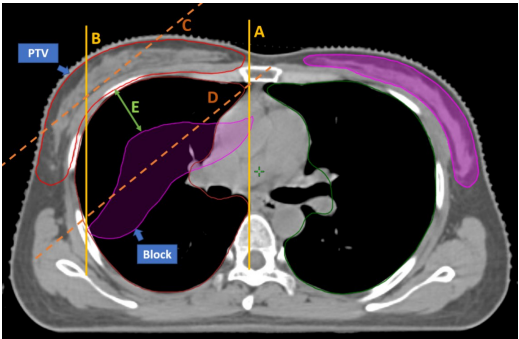


图3 辅助结构勾画方法

Figure 3 Auxiliary structure delineation

适形度指数(Conformity Index, CI)和均匀性指数(Homogeneous Index, HI)公式如下:

$$CI = \frac{V_{t,Prep}^2}{V_T \times V_{Prep}} \tag{1}$$

$$HI = \frac{D_2}{D_{98}} \tag{2}$$

其中,  $V_T$  为靶区体积;  $V_{Prep}$  为处方剂量包含所有组织体积;  $V_{t,Prep}$  为处方剂量包含靶区体积;  $D_2$  为靶区 2% 体积对应的剂量;  $D_{98}$  为靶区 98% 体积对应的剂量。

1.5 统计学分析

使用 SPSS V19.0 软件进行统计学分析, 统计数  
据结果以  $M(Q1, Q3)$  表示, 且所有数据均使用  
Wilcoxon 秩和检验,  $P<0.05$  为差异具有统计学意义。

2 结果

HAL\_IMRT 计划与 TrueBeam\_VMAT 计划剂量  
学对比如表 2 所示。PTV 方面: CI、HI、 $D_2$ 、 $D_{98}$  均无统  
计学差异 ( $P>0.05$ ), 但 HAL\_IMRT 计划的  $D_{max}$  高于  
TrueBeam\_VMAT 计划。危及器官方面: 患侧肺及健  
侧乳腺 HAL\_IMRT 计划明显优于 TrueBeam\_VMAT  
计划, HAL\_IMRT 计划健侧肺的  $V_5$  优于  
TrueBeam\_VMAT 计划 ( $P<0.05$ ); 心脏、健侧肺的

表1 对比参数列表  
Table 1 Comparison parameters

| 结构   | 剂量学参数                           |
|------|---------------------------------|
| PTV  | $D_2, D_{98}, D_{max}, CI, HI$  |
| 患侧肺  | $V_5, V_{10}, V_{20}, D_{mean}$ |
| 健侧肺  | $V_5, D_{mean}$                 |
| 脊髓   | $D_{max}$                       |
| 健侧乳腺 | $V_5, D_{mean}$                 |
| 心脏   | $V_{30}, D_{mean}$              |

$D_x$ : 靶区或危及器官 x % 体积对应的剂量;  $V_x$ : 靶区或  
危及器官 x Gy 剂量对应百分体积;  $D_{max}$ : 最大点剂量;  
 $D_{mean}$ : 平均剂量; CI: 适形度指数; HI: 均匀性指数

$D_{mean}$  以及脊髓的  $D_{max}$  没有统计学差异 ( $P>0.05$ )。

图 4 为 HAL\_IMRT 计划和 TrueBeam\_VMAT 计  
划横断面剂量分布对比图, 其中粉色加粗的剂量线  
为 20 Gy 的剂量线, 橙色的为 10 Gy 剂量线、白色的为  
5 Gy 剂量线。HAL\_IMRT 计划的剂量线更贴近胸  
壁, 患侧肺的受照量更低。图 5、图 6 为冠状面和矢状  
面的剂量分布对比, 可以观察到同样的剂量分布结  
果, HAL\_IMRT 计划在患侧肺的保护要明显优于  
TrueBeam\_VMAT 计划。

3 讨论

Halcyon 为环形加速器, 将所有束流设备集成安  
装在环形机架上, 使其治疗时机架旋转速度大大提  
升, 锥形束计算机断层成像 (Cone Beam Computed  
Tomography, CBCT) 扫描时间最短缩短至 15 s, 治疗  
时机架转速达 24 °/s, 可实现治疗计划全自动执行,  
Halcyon 的 MLC 叶片运动速度也提升至 5 cm/s, 剂量  
率达到 800 MU/min, 使得患者的治疗速度大幅度提  
升, 因此即使治疗计划设置多个射野也能够快速完  
成治疗<sup>[14-15, 18-19]</sup>。同时, Halcyon 加速器采用双层



表 2 剂量学参数对比[ $M(Q1, Q3)$ ]  
Table 2 Comparison of dosimetric parameters [ $M(Q1, Q3)$ ]

| 结构   | 参数                    | HAL_IMRT            | TrueBeam_VMAT       | P 值   |
|------|-----------------------|---------------------|---------------------|-------|
| PTV  | CI                    | 0.83(0.82, 0.85)    | 0.86(0.85, 0.87)    | 0.203 |
|      | HI                    | 1.09(1.08, 1.09)    | 1.08(1.08, 1.10)    | 0.721 |
|      | D <sub>2</sub> /Gy    | 53.68(53.09, 53.8)  | 53.35(53.19, 53.70) | 0.799 |
|      | D <sub>98</sub> /Gy   | 49.23(49.2, 49.35)  | 49.38(49.16, 49.43) | 0.878 |
|      | D <sub>max</sub> /Gy  | 56.46(55.76, 56.94) | 55.34(54.87, 55.99) | 0.028 |
| 患侧肺  | V <sub>5</sub> /%     | 47.8(44.99, 53.01)  | 56.17(53.36, 59.65) | 0.022 |
|      | V <sub>10</sub> /%    | 31.48(27.33, 34.86) | 37.19(35.16, 41.93) | 0.005 |
|      | V <sub>20</sub> /%    | 20.86(17.15, 24.04) | 23.46(21.32, 29.64) | 0.007 |
|      | D <sub>mean</sub> /Gy | 11.1(10.19, 13.47)  | 12.46(11.79, 15.01) | 0.005 |
| 健侧肺  | V <sub>5</sub> /%     | 8.78(7.18, 10.15)   | 16.71(9.7, 18.93)   | 0.028 |
|      | D <sub>mean</sub> /Gy | 2.20(1.9, 2.67)     | 2.93(2.31, 3.36)    | 0.059 |
| 心脏   | V <sub>30</sub> /%    | 0.44(0, 1.92)       | 0.08(0, 1.02)       | 0.612 |
|      | D <sub>mean</sub> /Gy | 3.21(2.58, 7.81)    | 5.2(4.09, 5.74)     | 0.575 |
| 健侧乳腺 | V <sub>5</sub> /%     | 12.47(6.41, 20.6)   | 34.31(24.6, 43.16)  | 0.011 |
|      | D <sub>mean</sub> /Gy | 2.74(2.41, 3.48)    | 4.55(4.23, 4.94)    | 0.015 |
| 脊髓   | D <sub>max</sub> /Gy  | 29.81(27.76, 31.37) | 30.99(29.23, 33.25) | 0.575 |

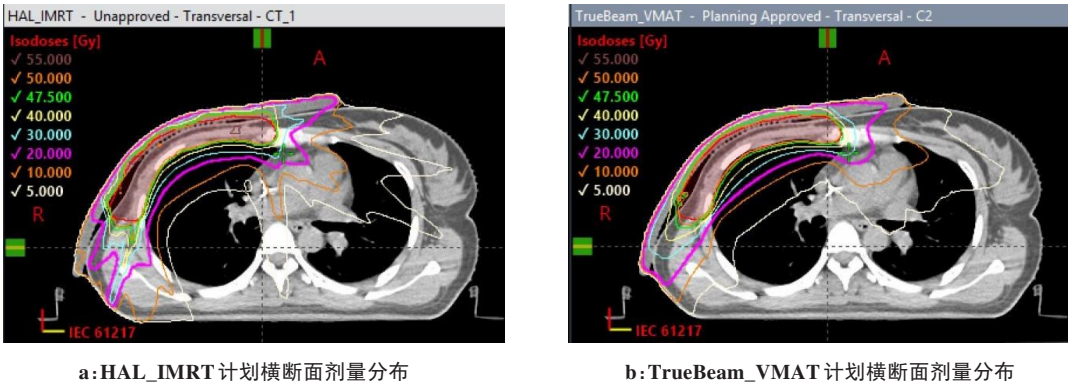


图 4 横断面剂量分布对比图  
Figure 4 Comparison of transversal dose distribution

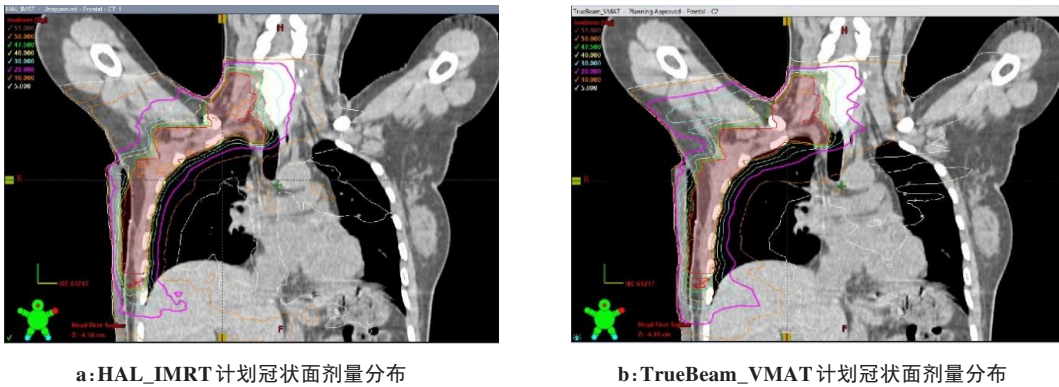


图 5 冠状面剂量分布对比图  
Figure 5 Comparison of coronal dose distribution

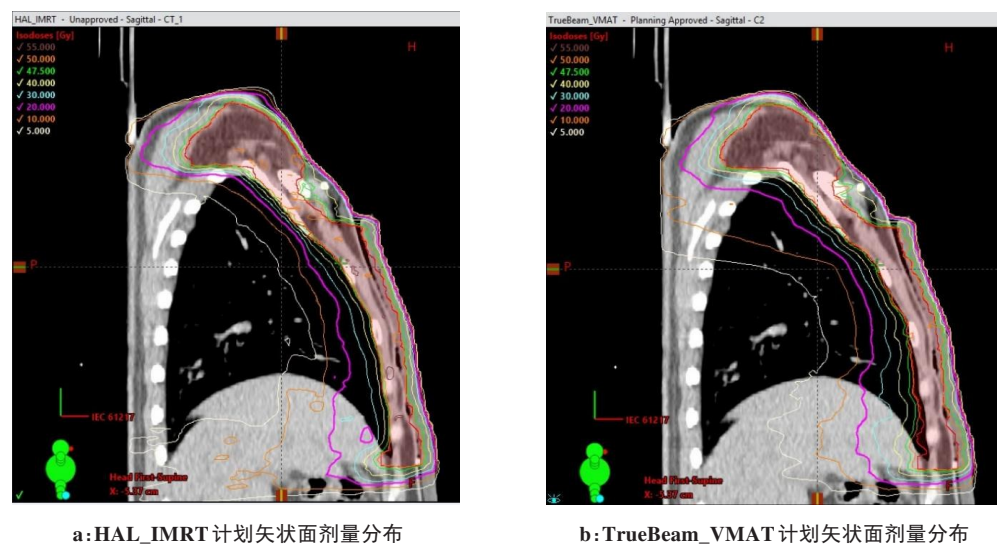


图 6 矢状面剂量分布对比图

Figure 6 Comparison of sagittal dose distribution

MLC 错位设计(如图 1a),摒弃铅门,该设计能够极大地减少叶片间漏射。

Halcyon 加速器在乳腺癌中已进行常规使用,相对于 C 型加速器同样具有良好的剂量学优势<sup>[14-15]</sup>,且治疗时间明显缩短<sup>[14, 16-18]</sup>。但是在乳腺癌计划的设计中,由于 Halcyon 没有铅门,无法实现锁铅门技术,会导致射野路径方向的危及器官剂量升高(如该乳腺癌病种,患侧肺剂量升高);为避免该问题,本研究使用优化界面的 avoidance structure 工具,减少危及器官剂量。基于 Halcyon 加速器设计的固有因素,本研究乳腺癌计划采用固定的计划设计模式,对于乳腺癌计划设计经验较少的物理师具有很好的帮助。Halcyon 加速器不具备呼吸监测功能,无法实现深吸屏气或者主动呼吸控制治疗方法<sup>[20-24]</sup>,因此计划设计过程中同样需要考虑到呼吸运动问题,计划优化完成后使用 skin flash tool 对射野通量进行皮肤外扩展,形成靶区外 MLC 的扩展<sup>[25]</sup>。

关于乳腺癌计划设计过程中高剂量点问题,常规方法可以通过勾画出高剂量区域,在优化界面进行限制,或者通过手动修改 MLC 实现高剂量区域缩小<sup>[26]</sup>。基于 Eclipse 计划系统的乳腺癌计划设计容易产生体积较小的高剂量点,使用编辑通量的方式,对不同射野方向高剂量区域通量值进行修改,达到降低高剂量的作用。

PTV 的 CI 及 HI 均无统计学差异,但是最大剂量点 TrueBeam\_VMAT 计划优于 HAL\_IMRT 计划,其原因可能在于计划设计过程中为更好地保护危及器官,Block 辅助结构距离靶区较近,导致优化过程中高剂量点的出现。若要降低靶区最大点剂量则可尝

试扩大 Block 到靶区边缘的距离,但是患侧肺剂量会有所升高。HAL\_IMRT 计划的患侧肺剂量明显优于常规加速器计划,正是得益于 Block 辅助结构。计划优化时,任何射野通过该结构时,Block 投影区域通量都为 0,实现该区域在射野方向的 MLC 完全遮挡。该功能保证有效射野均是相切于靶区方向,严格控制患侧肺剂量。本研究使用 12 个射野进行计划设计,射野数量较多,同样可以使用较少的 8 或者 9 个射野进行相关均分射野计划设计,以达到类似剂量学结果。

使用射野方向遮挡的计划设计方式相对于常规计划设计具有更好的优势,虽然没有铅门进行锁野技术,但是叶片透射极低,能够有效的避免叶片漏射导致的低剂量问题。另一方面由于 Halcyon 加速器的 MLC 能够完全在射野路径上移动,对于射野方向部分射野遮挡之后的偏心野问题能够很好的解决,而常规加速器则需要考虑铅门运动范围限制问题。

结合文献回顾,当前阶段乳腺癌计划设计方法很多<sup>[7-11,14,18]</sup>。其中使用适形切线野结合 IMRT 技术进行混合计划设计,可在保证治疗稳定性的基础上实现更好的剂量分布;单纯使用 IMRT 技术,不同的布野方式可能对计划质量造成较大的影响,因此对于经验较少的物理师,乳腺癌 IMRT 计划设计具有很大挑战;或者使用当前流行的 VMAT 技术进行计划设计,存在健侧肺和健侧乳腺的低剂量区问题。本研究结合 Halcyon 加速器的物理特性及 Eclipse 计划系统新版本特性,采用此固定的乳腺癌 IMRT 计划设计方法,能够快速完成乳腺癌 IMRT 计划设计,并较好的满足临床要求。

## 4 结 论

本研究提出的基于Halcyon平台的乳腺癌IMRT计划设计方法能够得到较好的临床计划结果,并且具有固定计划设计模式,减少对物理师计划设计经验的依赖,更好地应用于乳腺癌计划设计。

## 【参考文献】

- [1] 魏少锋. 保乳术与改良根治术治疗乳腺癌对患者生存质量的影响[J]. 临床医学研究与实践, 2018, 3(11): 60-61.  
Wei SF. Effects of breast conservation surgery and modified radical operation on survival quality in patients with breast cancer[J]. Clinical Research and Practice, 2018, 3(11): 60-61.
- [2] 中国抗癌协会乳腺癌专业委员会. 中国抗癌协会乳腺癌诊治指南与规范(2021年版)[J]. 中国癌症杂志, 2021, 31(10): 954-1040.  
Chinese Anti-Cancer Association Breast Cancer Professional Committee. Chinese anti-cancer association breast cancer diagnosis, and treatment guidelines and specifications (2021 Edition)[J]. China Oncology, 2021, 31(10): 954-1040.
- [3] 李侃, 杜庆安. 乳腺癌改良根治术后调强放疗与常规放疗疗效及对心肺的影响[J]. 中国医学物理学杂志, 2021, 38(2): 168-171.  
Li K, Du QA. Therapeutic effects of intensity-modulated radiotherapy and conventional radiotherapy on breast cancer after modified radical mastectomy and their effects on the heart and lungs[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2021, 38(2): 168-171.
- [4] 狄文忆, 张煜捷, 陈涵波, 等. 乳腺癌放射治疗相关心脏毒性研究进展[J]. 肿瘤学杂志, 2020, 26(5): 448-453.  
Di WY, Zhang YJ, Chen HB, et al. Research progress on radiation-induced heart disease for breast cancer[J]. Journal of Oncology, 2020, 26(5): 448-453.
- [5] 杨灵, 李小兵, 李丹丹, 等. 调强放疗技术在乳腺癌放疗中的临床研究[J]. 中国医学装备, 2014(S1): 216-217.  
Yang L, Li XB, Li DD, et al. Clinical research of breast cancer radiotherapy in IMRT[J]. China Medical Equipment, 2014(S1): 216-217.
- [6] 刘艳莉, 李文辉, 常莉, 等. 早期乳腺癌保乳术后放射治疗进展[J]. 现代肿瘤医学, 2013, 21(3): 656-658.  
Liu YL, Li WH, Chang L, et al. Progress on radiation therapy after conservative surgery for early breast cancer[J]. Journal of Modern Oncology, 2013, 21(3): 656-658.
- [7] 陈维军, 狄小云, 王彬冰, 等. 乳腺癌保乳术后两种逆向调强放疗计划的剂量学比较[J]. 中国医学物理学杂志, 2010, 27(5): 2100-2104.  
Chen WJ, Di XY, Wang BB, et al. Dosimetric comparison of two common inverse intensity modulated radiotherapy of breast cancer[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2010, 27(5): 2100-2104.
- [8] 李兵, 沈君妹, 朱锡旭, 等. 基于轮廓优化技术在乳腺癌调强放疗计划设计中的应用[J]. 医学研究生学报, 2012, 25(10): 1052-1056.  
Li B, Shen JS, Zhu XX, et al. Application of contour-based optimization technique in the intensity-modulated radiation therapy for breast carcinoma[J]. Journal of Medical Postgraduates, 2012, 25(10): 1052-1056.
- [9] 常晓斌, 吴湘阳, 冯涛, 等. 固定铅门调强技术对乳腺癌术后放射治疗计划设计的作用[J]. 现代肿瘤医学, 2017, 25(3): 462-465.  
Chang XB, Wu XY, Feng T, et al. The role of fixed jaws technique for treatment planning of postoperative radiotherapy with breast cancer[J]. Journal of Modern Oncology, 2017, 25(3): 462-465.
- [10] 成树林, 宾石珍, 单冬勇, 等. 铅门跟随技术与铅门固定技术在乳腺癌根治术后调强放疗中的剂量学比较[J]. 中国医学物理学杂志, 2017, 34(5): 480-483.  
Cheng SL, Bing SZ, Shan DY, et al. Jaw tracking versus static jaw techniques in intensity-modulated radiotherapy after radical mastectomy for breast cancer: dosimetric comparison[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2017, 34(5): 480-483.
- [11] 贺先桃, 王占宇, 谭明文, 等. 固定铅门模式下容积旋转调强放疗与动态调强放疗在乳腺癌根治术后放疗中的比较[J]. 中国医学物理学杂志, 2018, 35(8): 889-894.  
He XT, Wang ZY, Tan JW, et al. Comparison of VMAT vs IMRT with fixed-jaw technique for postoperative radiotherapy of breast cancer[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2018, 35(8): 889-894.
- [12] Li CQ, Chen JH, Zhu J, et al. Plan quality comparison for cervical carcinoma treated with Halcyon and Trilogy intensity-modulated radiotherapy[J]. J Cancer, 2019, 10(24): 6135-6141.
- [13] Pawlicki T, Atwood T, McConnell K, et al. Clinical safety assessment of the Halcyon system[J]. Med Phys, 2019, 46(10): 4340-4345.
- [14] 李成强, 陶城, 陈进琥, 等. 一种新型加速器的乳腺癌固定野调强放射治疗中计划质量和执行效率评价[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2019, 39(8): 614-618.  
Li CQ, Tao C, Chen JH, et al. The plan quality and delivery efficiency of intensity modulated radiotherapy on a new designed linac for left side breast cancer[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2019, 39(8): 614-618.
- [15] Flores-Martinez E, Kim GY, Yashar CM, et al. Dosimetric study of the plan quality and dose to organs at risk on tangential breast treatments using the Halcyon linac[J]. J Appl Clin Med Phys, 2019, 20(7): 58-67.
- [16] Mazzilli A, Benecchi G, Maddalo M, et al. PD-0728 knowledge-based automatic plan optimization for whole breast radiotherapy with Halcyon®[J]. Radiother Oncol, 2022, 170(S1): S638-S640.
- [17] Barsky AR, O'Grady F, Kennedy C, et al. Initial clinical experience treating patients with breast cancer on a 6-MV Flattening-Filter-Free O-Ring linear accelerator[J]. Adv Radiat Oncol, 2019, 4(4): 571-578.
- [18] Sun T, Lin XT, Zhang GF, et al. Treatment planning comparison of volumetric modulated arc therapy with the trilogy and the Halcyon for bilateral breast cancer[J]. Radiat Oncol, 2021, 16(1): 35.
- [19] Ju E, Heo EJ, Park CG, et al. Dosimetric comparison of VitalBeam® and Halcyon™ 2.0 for hypofractionated VMAT with simultaneous integrated boost treatment of early-stage left-sided breast cancer[J]. J Appl Clin Med Phys, 2021, 22(10): 232-238.
- [20] 赵永亮, 储开岳, 吴建亭, 等. 两种不同调强技术配合主动呼吸控制系统在乳腺癌放疗中的比较[J]. 中国医学物理学杂志, 2014, 31(3): 4862-4864.  
Zhao YL, Chu KY, Wu JT, et al. Two different intensity modulated technology conjugation with active breathing control comparison in breast cancer radiotherapy[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2014, 31(3): 4862-4864.
- [21] 张光伟, 钟鹤立, 吴何苟, 等. 光学表面监测系统引导实现左侧乳腺癌深吸气压气治疗临床应用及评估[J]. 中国医学物理学杂志, 2021, 38(7): 793-797.  
Zhang GW, Zhong HL, Wu HG, et al. Application and evaluation of OSMS guided DIBH radiotherapy for left-sided breast cancer[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2021, 38(7): 793-797.
- [22] Rice L, Christy O, Mi Green M, et al. An effective deep-inspiration breath-hold radiotherapy technique for left-breast cancer: impact of post-mastectomy treatment, nodal coverage, and dose schedule on organs at risk[J]. Breast Cancer, 2017, 9: 437-446.
- [23] Kügele M, Mannerberg A, Nørring Bekke S, et al. Surface guided radiotherapy (SGRT) improves breast cancer patient setup accuracy[J]. J Appl Clin Med Phys, 2019, 20(9): 61-68.
- [24] Ranger A, Dunlop A, Grimwood A, et al. Voluntary versus ABC breath-hold in the context of VMAT for breast and locoregional lymph node radiotherapy including the internal mammary chain[J]. Clin Transl Radiat Oncol, 2021, 27: 164-168.
- [25] Xu Z, Yang G. SU-FF-T-416: The effect of skin flash on skin dose for breast IMRT treatment[J]. Med Phys, 2006, 33(6): 2141-2142.
- [26] 陈颖, 杨士勇, 刘茹佳, 等. 编辑多叶光栅缩小剂量热点方法在乳腺癌根治术后放疗中的应用[J]. 现代肿瘤医学, 2022, 30(10): 1851-1855.  
Chen Y, Yang SY, Liu RJ, et al. Application of method of editing multi-leaf collimator to shrink hot point in radiotherapy for post-radical mastectomy[J]. Journal of Modern Oncology, 2022, 30(10): 1851-1855.

(编辑: 薛泽玲)