

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2021.03.003

医学放射物理

左侧乳腺癌术后放疗无均整器模式剂量学优势分析

罗红樱^{1,2}, 周剑良¹, 单国平², 邵凯南², 杨一威², 周霞³

1. 南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 中国科学院大学附属肿瘤医院(浙江省肿瘤医院)放射物理室, 浙江 杭州 310022; 3. 中国科学院大学附属肿瘤医院(浙江省肿瘤医院)放疗科, 浙江 杭州 310022

【摘要】目的:比较左侧乳腺癌全切术后无均整器(FFF)与均整器(FF)模式下容积旋转调强放疗(VMAT)计划剂量学特点,分析无均整器模式下剂量学优势。**方法:**随机选取2019~2020年左侧乳腺癌全切术后的患者10例,分别用两种模式对同一患者的计划靶区(PTV)给予相同的处方剂量50 Gy,在RayStation计划系统上设计FFF和FF的VMAT计划,在满足临床要求的情况下,比较两组剂量学特点、机器总跳数、出束总时间。**结果:**FFF模式靶区PTV的 $D_{98\%}$ 低于FF模式($P=0.007$), $D_{95\%}$ 、 $D_{2\%}$ 、CI、HI两者比较差异均无统计学意义($P>0.05$);FFF模式在患侧肺、全肺、心脏、脊髓以及冠状动脉前降支保护上明显优于FF模式($P<0.05$),患侧肺平均剂量同比降低9.59%,心脏平均剂量降低12.20%;在健侧肺、臂丛以及正常组织的保护上两者比较差异无统计学意义($P>0.05$);FFF模式的机器总跳数相对于FF模式增加1.30倍,出束总时间缩短至FF模式的87.15%。**结论:**在两组治疗计划均能满足临床治疗要求的前提下,FFF模式可显著减少患者危及器官以及正常组织的受照剂量,虽然机器总跳数增加,但患者的治疗时间反而下降。因此可知FFF模式优于FF模式的治疗效率。

【关键词】乳腺癌;无均整器模式;容积旋转调强放疗;剂量学

【中图分类号】R318;R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2021)03-0281-06

Dosimetric advantages of postoperative radiotherapy in flattening filter-free mode for left-sided breast cancer

LUO Hongying^{1,2}, ZHOU Jianliang¹, SHAN Guoping², SHAO Kainan², YANG Yiwei², ZHOU Xia³

1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China; 2. Department of Radiation Physics, Cancer Hospital of the University of Chinese Academy of Sciences (Zhejiang Cancer Hospital), Hangzhou 310022, China; 3. Department of Radiotherapy, Cancer Hospital of the University of Chinese Academy of Sciences (Zhejiang Cancer Hospital), Hangzhou 310022, China

Abstract: Objective To compare the dosimetric characteristics of volumetric modulated arc therapy (VMAT) plan in flattening filter (FF) mode and flattening filter-free (FFF) mode, and to analyze the dosimetric advantages of FFF-VMAT. **Methods** Ten patients with left-sided breast cancer after total resection from 2019 to 2020 were randomly selected. The same prescription dose of 50 Gy was given to the planning target volume (PTV) of the same patient by two modes separately, and two kinds of plans, namely FFF-VMAT plan and FF-VMAT plan, were designed on RayStation planning system. When the clinical requirements were met, the dosimetric characteristics, total monitor units and total delivery time were compared between FFF-VMAT and FF-VMAT. **Results** Except for the $D_{98\%}$ of PTV which was lower in FFF-VMAT than that in FF-VMAT ($P=0.007$), there was no significant difference between two groups in the $D_{95\%}$, $D_{2\%}$, CI and HI of PTV ($P>0.05$). FFF mode was superior to FF mode in protection of affected lung, the whole lungs, heart, spinal cord and anterior coronary artery ($P<0.05$), and compared with those in FF-VMAT, the average dose delivered to the affected lung and heart in FFF-VMAT were decreased by 9.59% and 12.20%, respectively. The differences between FF-VMAT and FFF-VMAT in sparing of the healthy lung, brachial plexus and normal tissues were trivial, without statistical significance ($P>0.05$). The total monitor units of FFF-VMAT was 1.30 times of that of FF-VMAT, and the total delivery time was shortened to 87.15% of FF-VMAT. **Conclusion** On the premise that the treatment plans of both groups can meet the clinical treatment requirements, FFF mode can significantly reduce the radiation dose delivered to organs-at-risk and normal tissues. Although the total monitor units in FFF-VMAT is increased, the treatment time is shortened. Therefore, the treatment efficiency of FFF mode is better than that of FF mode.

Keywords: breast cancer; flatten filter-free mode; volumetric modulated arc therapy; dosimetric

【收稿日期】2020-11-12

【基金项目】浙江省重点科技研发计划(2019C03003);浙江省医药卫生科技计划(2020KY472)

【作者简介】罗红樱, 硕士研究生, 研究方向:放射物理治疗, E-mail: 1374109214@qq.com

【通信作者】周剑良, 教授, 博士生导师, 研究方向:辐射防护, E-mail: 13327341099@qq.com

前言

乳腺癌是常见的肿瘤之一,根据国际癌症研究机构编制的GLOBOCAN 2018年癌症发病率和死亡率估算,2018年全球约有1 810万新发癌症患者以及960万新发癌症死亡病例,其中新发乳腺癌占11.60%,致死率高达6.60%。

对于原位癌、微小癌以及年迈体弱作根治术的患者采取全乳房切除,术后如符合高危复发,需进行放射治疗,原则上给予共50 Gy/25次的剂量。容积旋转调强技术(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT)作为一种新的适形调强放疗,可以在机架旋转照射的同时连续出束,减少患者的治疗时间^[1-2]。直线加速器中加入均整器是为了让剂量在特定的深度分布均匀,在调强技术未成熟之前,这一要求对计划系统制作计划非常重要。但随着调强技术的发展,理论上移除均整器也能产生所需要的剂量分布,非均整模式可提高剂量率,减少散射,从而进一步减少患者治疗时间,降低二次癌症复发的概率^[3-7]。

乳腺癌改良根治术后放疗的靶区包括高危复发区及高危淋巴引流区,具体包括胸壁、区域淋巴引流区、锁骨上区、腋窝及内乳区等,靶区形状比较复杂,使用常规切线野逆向调强技术(Intensity Modulated Radiotherapy, IMRT)难以达到临床要求的靶区覆盖率和正常器官剂量限值。相比较而言,VMAT在这种复杂靶区方面具有明显的优势^[8]。由于乳腺癌患者的生存期较长,降低放疗对肺和心脏的毒副作用显得尤为重要。Varian TrueBeam 加速器(Varian Medical System, CA)支持的无均整器模式(Flatten Filter Free, FFF)最大剂量率为1 400 MU/min(6 MV),而常规均整模式(Flatten Filter, FF)为600 MU/min,因此FFF-VMAT的剂量率调制范围(0~1 400 MU/min)比FF-VMAT(0~600 MU/min)更大,在乳腺癌这种使用部分照射弧的放疗计划中具有更大的调制自由度。另外FFF模式射束中低能部分的X射线更多,也更适用于乳腺癌这种接近体表的靶区^[9-11]。

目前,将加速器非均整器模式应用于左侧乳腺癌全切术后的相关研究较少,本文基于Varian直线加速器FF、FFF模式以及RayStation的TPS计划系统(RaySearch Laboratories, Sweden),研究比较全切乳腺癌术后在FF、FFF模式下VMAT计划系统的剂量学特性,为临床上治疗全切乳腺癌术后提供一定参考。

1 资料与方法

1.1 病例资料

随机选取10例自2019年1月至2020年1月在浙

江省肿瘤医院行左乳腺改良根治术术后放疗的左侧乳腺癌患者,需行乳腺上方锁骨区域淋巴结照射,年龄33~78岁,均为女性。

1.2 模拟定位

患者均采取仰卧姿势平躺于乳腺托架上,调节托架使胸壁与床面平行,双手上举握住手固定杆,头偏右侧,下颌上抬,充分暴露出左侧乳腺区域。使用Phillips Brilliance大孔径CT(Philips, Brilliance™ Big Bore CT, Netherlands)扫描患者下颌骨角至脐部范围,扫描层距为5 mm,扫描结束后图像传输至Raystion计划系统进行勾画。

1.3 靶区以及危及器官的勾画

临床靶区(Clinical Target Volume, CTV)指高危复发区及高危淋巴引流区,由临床医生根据CT图像及其他临床资料勾画CTV,具体包括CTV Chestwall:胸壁;CTV SC:锁骨上区;CTV ALN:腋窝,包括I、II、III区;CTV IMN:内乳区。CTV外放5 mm形成计划靶区(Planned Target Volume, PTV)。危及器官包括左肺、右肺、心脏、脊髓、臂丛、冠状动脉前降支等。

1.4 计划设计

靶区处方剂量均为50 Gy,分25次进行照射,选择6 MV X射线。在Raystation计划系统上,每一例患者均在同一CT以及同一临床靶区采取同样的靶区剂量,分别设计FFF和FF的VMAT计划,统一将最终剂量归一到95%,也就是 $D_{95\%}$ 等于5 000 cGy。在制定FFF计划时,通过设置计划系统中“Max delivery time(sec)”选项,可以限制每个治疗弧的出束时间。经尝试,每个治疗弧的时间限制(second)设定为起始与结束角度度数之差的1/6,即尽可能要求加速器机架按照最大6°/sec的速度运行,可以使最终优化得到的射野以高剂量率输出。由于乳腺癌改良根治术后进行放疗的靶区范围大,可按照需要适当调整FFF模铅门的大小。为了减少健侧危及器官的受照剂量,所有计划的射野均选择在患侧,同一患者两个不同均整器模式下照射角度保持一致(适当选取FFF计划里4个比较有代表性的横断面,如图1所示)。治疗射线选择光子线,为保证患者乳腺皮肤表面照射剂量,治疗计划和实际照射过程中均添加厚度为0.5 cm材质类似水的补偿膜。

1.5 计划评估

(1)临床要求靶区PTV需满足: $V_{50} \geq 95\%$ 、 $D_{max} < 110\%$ PTV(V_x 表示包含x Gy的靶区体积比, D_{max} 为靶区最大剂量)。统计靶区PTV的 $D_{98\%}$ 、 $D_{95\%}$ 、 $D_{2\%}$ ($D_{x\%}$ 表示x% PTV体积受照的剂量)靶区适形度指数(Conformality Index, CI)、均匀性指数(Heterogeneity Index, HI)。 $CI = (VT_{ref}/VT) \times (VT_{ref}/V_{ref})$,其中 VT_{ref} 是处方剂量等剂量线所包含的计划靶区体

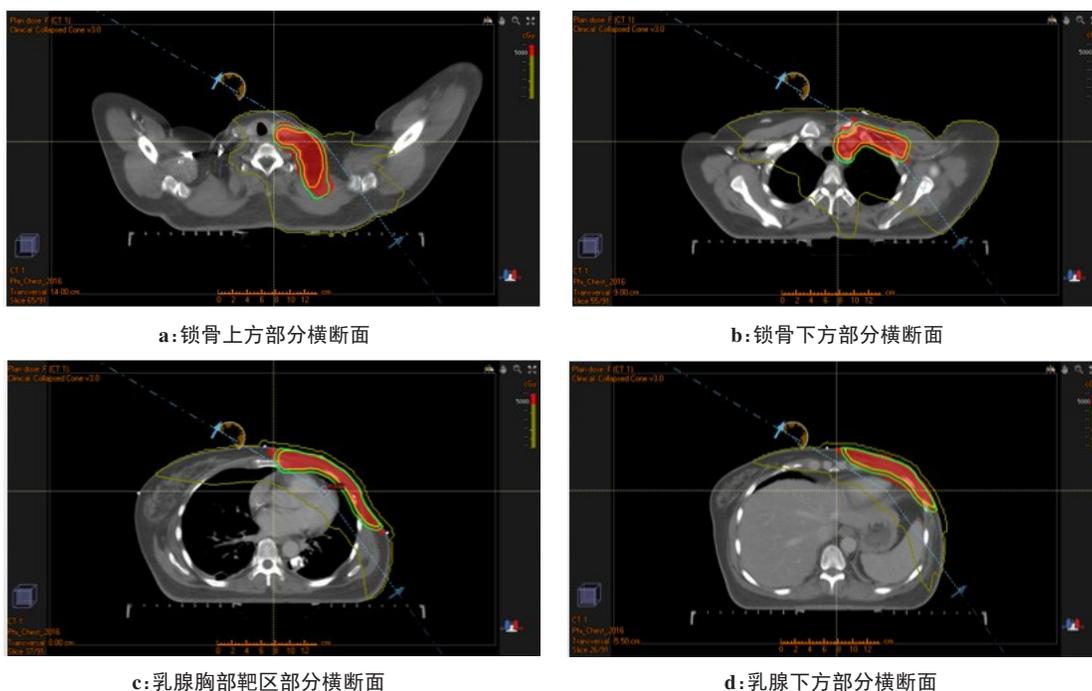


图1 某例患者FFF计划的4个横断位图像,显示CTV、PTV、100%剂量线及照射野起始角度

Fig.1 Four transverse images of a FFF plan, showing CTV, PTV, 100% dose line and the starting angle of radiation

积, VT是计划靶区体积, V_{ref} 是处方剂量线等剂量线包含的所有体积, CI值为0~1, CI值越接近1代表靶区适形度越好; $HI=(D_{2\%}-D_{98\%})/D_{50\%}$, HI值为0~1, HI值越接近0表示靶区的适形度越高。

(2)危及器官及周围组织剂量评估: 按照患者不同的危及器官类型分别统计 V_{40} 、 V_{30} 、 V_{20} 、 V_5 、 $D_{98\%}$ 、 $D_{95\%}$ 、 $D_{2\%}$ 、 D_{max} 、平均剂量(D_{mean}), 以及统计正常组织(PTV外放1.5 cm到体表范围内的所有组织)的 D_{mean} 、臂丛 $D_{0.1cm^3}$ [D_{xcm^3} 表示 $x cm^3$ 体积内的最大剂量])和冠状动脉前降支 $D_{0.1cm^3}$ 。

(3)计划效率评估: 统计FFF与FF模式下VMAT计划的机器总跳数以及出束总时间。

1.6 统计学方法

使用SPSS 23.0软件对数据进行统计分析,符合正态分布的数据采用配对t检验,不符合正态分布的数据采用非参数检验。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 靶区剂量比较

分别对两种模式PTV的 $D_{98\%}$ 、 $D_{95\%}$ 、 $D_{2\%}$ 的靶区覆盖率、CI和HI进行统计学比较,结果如表1所示。从表1可以得出,FF与FFF模式的计划靶区除 $D_{98\%}$ ($P=0.007$) 之外其它4种参数均相近,差异无统计学意义 ($P>0.05$)。

两种模式的靶区以及乳腺附近重要危及器官剂量-体积直方图(Dose Volume Histogram, DVH)对比图如图2所示。PTV与临床靶区两种模式曲线相差

表1 FF模式与FFF模式PTV剂量学比较($\bar{x} \pm s$)

Tab.1 Comparison of dosimetric parameters of planning target volume between FF-VMAT and FFF-VMAT (Mean±SD)

参数	FF-VMAT	FFF-VMAT	t值	P值
$D_{98\%}/cGy$	4 693.10±74.85	4 602.00±109.25	3.483	0.007
$D_{95\%}/cGy$	5 000.00±0.00	4 999.99±0.00	0.896	0.390
$D_{2\%}/cGy$	5 553.30±33.46	5 539.64±41.84	0.686	0.510
CI	0.84±0.03	0.84±0.03	-0.459	0.646
HI	0.16±0.02	0.18±0.02	2.178	0.057

不大,危及器官FFF模式均低于FF模式。从图3也可看出,两种模式剂量分布图类似。

2.2 危及器官以及正常组织剂量比较

两种计划的危及器官以及正常组织接受的剂量见表2。由表2可知,FFF模式里健侧肺的受照剂量 D_{mean} 和 V_5 稍低于FF模式,但该差异无统计学意义 ($P>0.05$); 而患侧肺、全肺、心脏以及脊髓FFF模式使之产生的受照量均明显低于FF模式,差异有统计学意义 ($P<0.05$)。所以在危及器官保护上FFF模式优于FF模式。冠状动脉前降支受照量在FFF模式中低于FF模式,差异具有统计学意义 ($P<0.05$); 其它参数臂丛以及正常组织受照量虽然FFF模式稍微优于FF模式,但差异无统计学意义 ($P>0.05$)。

2.3 机器参数比较

FFF模式机器的总跳数(873.08 ± 174.12) MU明显高于FF模式(673.14 ± 122.41) MU,差异有统计学

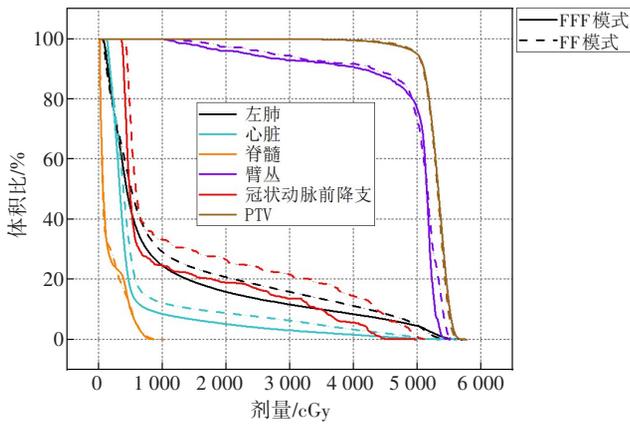


图2 某例患者FFF与FF模式DVH比较

Fig.2 Comparison of dose-volume histograms between FFF mode and FF mode for the same patient

意义($P<0.05$),是FF模式的1.30倍。尽管总跳数增加,但FFF模式出束总时间(85.30 ± 25.48)s仅为FF模式(97.88 ± 24.72)s的87.15%。

3 讨论

左侧乳腺癌全切术后放疗研究对象均为同一患者的同一CT图像,采用6 MV X射线,设计FF和FFF模式的VMAT治疗计划,FF模式输出剂量为600 MU/min,FFF模式为1 400 MU/min。两组计划均能满足临床要求,其中FFF模式与FF模式剂量分布如图3所示。两种治疗模式的PTV剂量除了 $D_{98\%}$ 有统计学差异(FF模式高于FFF模式, $P=0.007$), $D_{95\%}$ 、 $D_{2\%}$ 、CI以及HI比较差异无统计学意义($P>0.05$)。在

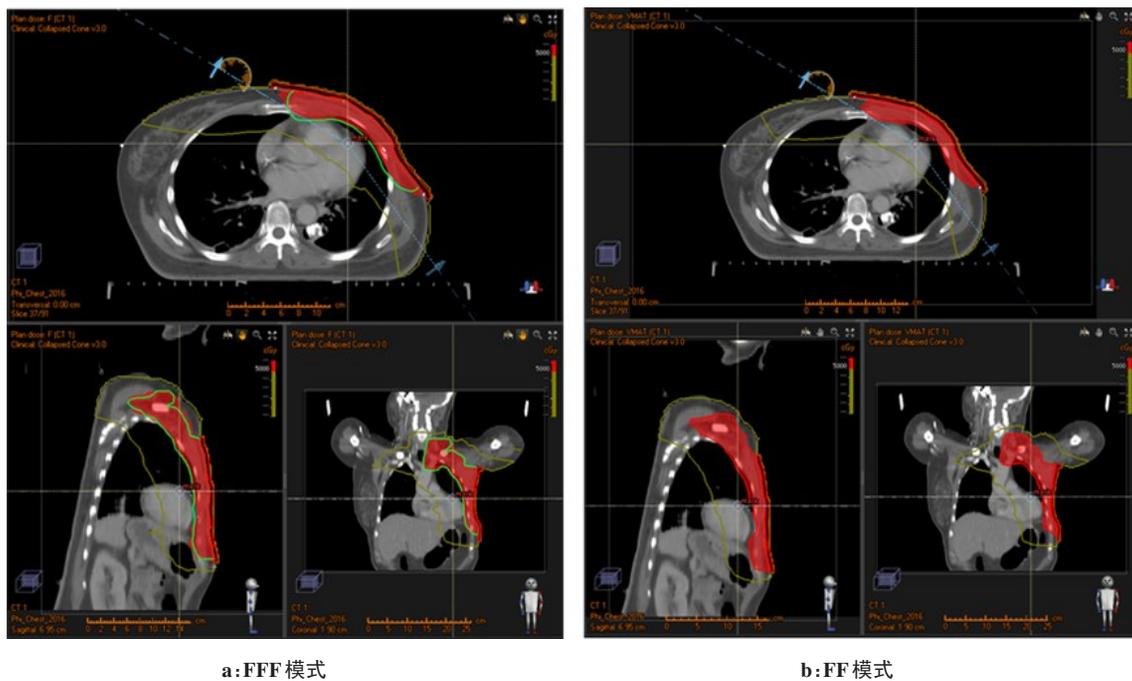


图3 某例患者FFF模式与FF模式计划剂量分布图

Fig.3 Planned dose distributions of FFF mode and FF mode for the same patient

危及器官保护上,FFF模式在患侧肺部、全肺、心脏、脊髓方面明显优于FF模式,考虑到乳腺癌患者的生存期较长,降低放疗对肺和心脏的毒负反应显得尤为重要。健侧肺的剂量优势没有统计学意义,是因为健侧肺距PTV较远,本身影响并不大,无显著差异属于正常范围。在正常组织冠状动脉前降支保护上,FFF模式同样略胜于FF模式,臂丛以及正常组织两者无明显差异。从机器治疗时长来看,虽然FFF模式机器总跳数是FF模式的1.30倍,但机器出束的总时间却减少至FF模式的87.15%,结果具有统计学意义($P<0.05$),大大减少了患者的治疗时间,可以减少患者二次癌症复发的概率。

虽然FFF治疗模式具有高剂量率的特点,但在常

规分割VMAT放疗中,单一分次剂量仅为2~3 Gy,如果使用全弧照射,或照射弧的角度范围较大,受限于C臂机架旋转速度($5^{\circ}\sim 6^{\circ}/\text{sec}$),即使使用FFF模式,射束也无法持续以高剂量率输出,只能达到与FF模式相似的效果,因此以往对于FFF模式优势的讨论研究多见于大剂量分割(8~12 Gy)的SRS/SBRT治疗。由于乳腺癌是部分弧照射,射野角度范围相对较小,在机架旋转速度为 $5^{\circ}\sim 6^{\circ}/\text{sec}$ 时,射束仍能保持FFF模式的高剂量率输出。Varian最新的Halcyon环形加速器机架旋转速度是TrueBeam加速器的4倍^[12],且多叶准直器叶片具有较高的运动速度及较低的传输速度,预计FFF治疗模式会有更大的剂量学优势^[13-17]。

表2 FF模式与FFF模式计划危及器官与正常组织剂量比较($\bar{x} \pm s$)Tab.2 Comparison of doses delivered to organs-at-risk and normal tissues between FF-VMAT and FFF-VMAT (Mean \pm SD)

危及器官和正常组织	参数	FF模式	FFF模式	t值	P值
健侧肺	D _{mean} /cGy	251.31 \pm 68.82	250.06 \pm 66.68	0.175	0.870
	V _{5 Gy} /%	11.95 \pm 5.88	10.36 \pm 5.19	2.107	0.064
患侧肺	D _{mean} /cGy	1 385.04 \pm 140.99	1 252.22 \pm 153.32	10.165	0.000
	V _{30 Gy} /%	18.54 \pm 2.79	15.25 \pm 2.80	11.136	0.000
	V _{20 Gy} /%	24.36 \pm 3.06	20.57 \pm 3.27	11.136	0.000
	V _{5 Gy} /%	55.47 \pm 4.53	52.22 \pm 6.23	11.136	0.000
全肺	D _{mean} /cGy	754.70 \pm 78.28	694.51 \pm 79.43	10.349	0.000
	V _{30 Gy} /%	8.22 \pm 1.06	6.76 \pm 1.10	10.045	0.000
	V _{20 Gy} /%	10.86 \pm 1.18	9.19 \pm 1.29	11.095	0.000
	V _{5 Gy} /%	31.32 \pm 3.66	28.96 \pm 3.99	-2.701	0.007
心脏	D _{mean} /cGy	618.47 \pm 145.61	542.99 \pm 133.77	5.006	0.001
	V _{40 Gy} /%	1.45 \pm 1.22	0.96 \pm 0.70	2.538	0.032
臂丛	D _{0.1 cm³}	5 485.93 \pm 27.19	5 450.00 \pm 72.92	11.136	0.400
冠状动脉前降支	D _{0.3 cm³}	3 678.36 \pm 1 240.06	3 115.78 \pm 1379.70	2.472	0.035
正常组织	D _{mean} /cGy	295.56 \pm 33.69	296.00 \pm 36.45	0.090	0.930
脊髓	D _{max} /cGy	1 938.00 \pm 569.11	1 455.80 \pm 408.00	2.693	0.011

这与贺先桃等^[18]研究结果相类似,FFF模式与FF模式PTV无明显差异,FFF模式的机器总跳数相较于FF模式增加0.19倍,出束时间减少8.80%。而吴丽丽等^[19]研究则提出不同意见,他们的试验结果显示在健侧肺、心脏、脊髓这些危及器官的保护上二者无明显差异,但在皮肤、正常组织以及患侧肺受照量上FFF模式明显低于FF模式。与本文研究略有不同,原因可能有以下两种情况:一是采用的机器最大剂量率不同;二是IMRT与VMAT两种调强计划的差异性。左侧乳腺癌全切术后FFF与FF模式下VMAT在PTV上有着类似的分布(图3),并没有因为移除均整器而使PTV的剂量分布达不到临床要求,理论上只要MLC运动即可产生剂量分布。FFF模式优于FF模式是高剂量率带来的VMAT调制自由度,以及射束profile半影区梯度比FF更陡,目前FFF模式已经在SBRT和SRS上取得一定的治疗成果^[18,20-21]。高剂量率射束是FFF模式的优势所在,在研究中应注意的是在选择FFF模式进行治疗计划制作时,需要人为控制各旋转弧的出束时间,否则难以实现高剂量率出束。

综上所述,FFF和FF模式均可以达到临床要求。在患侧肺、全肺、心脏、脊髓危及器官的保护中,FFF模式相较于FF模式更胜一筹,差异有统计学意义;在

正常组织臂丛的保护中也具有显著性差异的优势;再则减少了机器出束的总时间,有利于患者的治疗,减少二次癌症的复发概率。因此,FFF模式优于FF模式。本研究使用的样本量较少,考虑FFF模式后续的放疗效果还需要加大样本量,并结合其他临床疗效、毒性反应及长期回访结果综合评估。

【参考文献】

- [1] YU C X. Intensity-modulated arc therapy with dynamic multileaf collimation: an alternative to tomotherapy[J]. Phys Med Biol, 1995, 40(9): 1435.
- [2] OTTO K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc[J]. Med Phys, 2008, 35(1): 310-317.
- [3] STATHAKIS S, ESQUIVEL C, GUTIERREZ A, et al. Treatment planning and delivery of IMRT using 6 and 18 MV photon beams without flattening filter[J]. Appl Radiat Isotopes, 2009, 67(9): 1629-1637.
- [4] HALL E J. Intensity-modulated radiation therapy, protons, and the risk of second cancers[J]. Int J Radiat Oncol, 2006, 65(1): 1-7.
- [5] FU W, DAI J, HU Y, et al. Delivery time comparison for intensity-modulated radiation therapy with/without flattening filter: a planning study[J]. Phys Med Biol, 2004, 49(8): 1535-1547.
- [6] 邓莹,张美芳,孙文钊,等.有无均整器模式下臂架与准直器不同角度条件下的剂量学比较[J].中国医学物理学杂志,2020,37(8): 958-964.
- [7] DENG Y, ZHANG M F, SUN W Z, et al. Dosimetric comparison at different gantry and collimator angles in flattening filter-free or flattening filter mode[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2020, 37(8): 958-964.
- [7] LECHNER W, KRAGL G, GEORG D, et al. Evaluation of treatment plan quality of IMRT and VMAT with and without flattening filter

using Pareto optimal fronts [J]. *Radiother Oncol*, 2013, 109(3): 437-441.

[8] 陈亚正, 黎杰, 廖雄飞, 等. VMAT 和 IMRT 技术在乳腺癌根治术后放疗中的剂量学比较[J]. *肿瘤预防与治疗*, 2014, 27(5): 226-230. CHEN Y Z, LI J, LIAO X F, et al. Dosimetric comparison between vmat and imrt for postoperative radiotherapy of breast carcinoma [J]. *Journal of Cancer Control and Treatment*, 2014, 27(5): 226-230.

[9] FU G S, LI M H, SONG Y X, et al. A dosimetric evaluation of flattening filter-free volumetric modulated arc therapy in nasopharyngeal carcinoma[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2014, 39(3): 150-155.

[10] 杨鑫, 孙文钊, 陈利, 等. 新型双能医用直线加速器非均整剂量学特性研究[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2017, 26(2): 203-209. YANG X, SUN W Z, CHEN L, et al. Dosimetric characterization of a novel dual-energy medical linear accelerator without a flattening filter [J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2017, 26(2): 203-209.

[11] SPRUIJT K H, DAHELE M, CUIJPERS J P, et al. Flattening filter free vs flattened beams for breast irradiation[J]. *Int J Radiat Oncol*, 2013, 85(2): 506-513.

[12] LIM T Y, DRAGOJEVIĆ I, HOFFMAN D, et al. Characterization of the Halcyon™ multileaf collimator system[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2019, 20(4): 106-114.

[13] LI C Q, CHEN J H, 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.

[14] MANCOSU P, CASTIGLIONI S, REGGIORI G, et al. Stereotactic body radiation therapy for liver tumours using flattening filter free beam: dosimetric and technical considerations[J]. *Radiat Oncol*, 2012, 7(1): 16.

[15] 贾飞, 岳海振, 李国文, 等. 有无均整器模式下鼻咽癌容积旋转调强放疗计划的剂量学比较[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2014, 34(8): 600. JIA F, YUE H Z, LI G W, et al. Dosimetric comparison of volumetric-modulated arc therapy plans for nasopharyngeal carcinoma using flattening filter-free and flattening filter modes[J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2014, 34(8): 600.

[16] 孔潇潇, 赵洪斌, 李泉凤, 等. 整体考虑靶和均整器的设计来提高医用加速器剂量率的方法[J]. *高能物理与核物理*, 2005, 29(9): 903-906. KONG X X, ZHAO H B, LI Q F, et al. A method to increase the dose rate of medical linear electron accelerators by considering the target and the flattening filter as a whole system when designing the target [J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2005, 29(9): 903-906.

[17] WOLFF D, STIELER F, ABO-MADYAN Y, et al. Volumetric intensity modulated arc therapy (VMAT) vs. serial tomotherapy and segmental (step and shoot) IMRT for treatment of prostate cancer[J]. *Int J Radiat Oncol*, 2008, 72(1): S562.

[18] 贺先桃, 谭军文, 龙雨松, 等. 鼻咽癌FFF与FF模式下VMAT计划剂量学比较[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2018, 27(4): 401-405. HE X T, TAN J W, LONG Y S, et al. Comparison of dosimetric characteristics between flattening-filter-free and flattening filter mode VMAT plans in nasopharyngeal carcinoma[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2018, 27(4): 401-405.

[19] 吴丽丽, 张基永, 陆佳扬, 等. 左侧乳腺癌保乳术后调强放疗有无均整器模式剂量学研究[J]. *第三军医大学学报*, 2015, 37(20): 2098-2101. WU L L, ZHANG J Y, LU J Y, et al. Dosimetric study of intensity modulated radiation therapy for left breast cancer after breast conserving surgery[J]. *Acta Academiae Medicinae Militaris Tertiae*, 2015, 37(20): 2098-2101.

[20] SUBRAMANIAM S, THIRUMALAISWAMY S, SRINIVAS C, et al. Chest wall radiotherapy with volumetric modulated arcs and the potential role of flattening filter free photon beams[J]. *Strahlenther Onkol*, 2012, 188(6): 484-491.

[21] ZWAHLEN D R, LANG S, HRBACEK J, et al. The use of photon beams of a flattening filter-free linear accelerator for hypofractionated volumetric modulated arc therapy in localized prostate cancer[J]. *Int J Radiat Oncol*, 2012, 83(5): 1655-1660.

(编辑: 陈丽霞)