

## 非均整与均整模式下宫颈癌容积旋转调强放疗计划的剂量学比较

王占宇, 谭军文, 龙雨松, 贺先桃, 韦婷, 李钢  
广西医科大学第四附属医院肿瘤科放疗室, 广西 柳州 545005

**【摘要】目的:**容积旋转调强放疗(VMAT)是治疗宫颈癌的有效方法之一,通过比较宫颈癌非均整与均整模式下VMAT计划的剂量学特性,分析宫颈癌非均整模式下VMAT计划的临床可行性。**方法:**选取2016年1月~2017年3月期间的宫颈癌患者10例,分别对同一患者的CT图像及临床靶区,用相同的处方剂量50.4 Gy在RayStation计划系统平台设计均为两个全弧的6 MV-X射线非均整模式(6FFF)和均整模式(6X)的VMAT计划,比较6FFF计划与6X计划的剂量学特性、剂量验证通过率、机器跳数和出束时间。**结果:**6X与6FFF两种VMAT计划所得PTV的最大剂量 $D_{2\%}$ 、平均剂量 $D_{mean}$ 、最小剂量 $D_{98\%}$ 、靶区覆盖率、靶区适形指数均相差不大( $P>0.05$ );在危及器官保护上,6FFF计划中膀胱的 $V_{45}$ 、平均剂量 $D_{mean}$ 和小肠的 $V_{45}$ 均低于6X计划;6FFF计划受到相应剂量照射的正常组织体积均小于6X计划;两种计划的剂量验证通过率均能满足治疗要求,其中6FFF计划验证通过率均值为 $(98.52\pm0.66)\%$ ,6X VMAT计划剂量验证通过率比6FFF计划略高;二者的机器跳数相比,6FFF计划平均机器跳数增加至6X计划的1.34倍( $P=0.000$ ),平均出束时间减少为6X计划出束时间的95.5%( $P=0.012$ )。**结论:**6X计划和6FFF计划均能满足临床剂量学要求。在危及器官保护和正常组织低剂量照射方面,6FFF计划更具优势,有利于降低二次癌症的发生率,6FFF计划剂量验证通过率满足临床要求,二者在机器跳数和出束时间上,虽然6FFF的机器跳数增加,但出束时间反而下降,因此采用非均整模式并不会降低治疗效率。如何评估非均整模式下宫颈癌VMAT计划的临床效果,需进一步研究讨论。

**【关键词】**宫颈癌;非均整模式;容积旋转调强放疗;剂量学比较

**【中图分类号】**R815.6

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2017)11-1110-07

## Dosimetric comparison of VMAT plans in different modes for cervical cancer: flattening filter free vs flattening filter

WANG Zhanyu, TAN Junwen, LONG Yusong, HE Xiantao, WEI Ting, LI Gang

Room of Radiotherapy, Department of Oncology, Fourth Affiliated Hospital of Guangxi Medical University, Liuzhou 545005, China

**Abstract: Objective** To compare the dosimetric characteristics of flattening filter free (FFF) volumetric-modulated arc therapy (VMAT) plans and flattening filter VMAT plan for cervical cancer for analyzing the feasibility of VMAT plan in FFF mode for cervical cancer. **Methods** Ten patients with cervical cancer admitted between January 2016 and March 2017 were selected. Based on the CT image and clinical target areas of each patient, two plans with the same prescription dose of 50.4 Gy and the same parameters were designed in RayStation planning system, namely VMAT plan with 6 MV FFF X-ray (6FFF plan) and VMAT plan with 6 MV flattening filter X-ray (6X plan). The dosimetric characteristics, dose passing rate, monitor unit and delivery time were compared between 6FFF plan and 6X plan. **Results** The differences between 6X plan and 6FFF plan in the maximum dose ( $D_{2\%}$ ), mean dose and minimum dose ( $D_{98\%}$ ) of planning target volume, target coverage and conformity index of target areas were trivial ( $P>0.05$ ). The  $V_{45}$  and  $D_{mean}$  of bladder and the  $V_{45}$  of small intestine were lower in 6FFF plan than in 6X plan. The irradiated volume of normal tissue in 6FFF plan was less than that in 6X plan. Both 6FFF plan and 6X plan met the requirements for dosimetric verification. The average gamma passing rate in 6FFF plan were  $(98.52\pm0.66)\%$ , slightly lower than that in 6X plan. 6FFF plan increased the average monitor unit to 1.34 times of that in 6X plans ( $P=0.000$ ), but reduced the average delivery time to the 95.5% of that in 6X plan ( $P=0.012$ ). **Conclusion** Though both 6X plan and 6FFF plan meet the requirements for clinical dosimetric verification, 6FFF plan has more advantages in decreasing the dose to low dose area in normal tissue and protecting organs-at-risk, which can reduce the risk of cancer recurrence. The dosimetric verification also showed that 6FFF plan can achieve a gamma passing rate satisfying the clinical requirements. Compared with 6X plan, 6FFF plan increases the monitor units but shortens the delivery time, which means using VMAT plan in FFF mode wouldn't reduce efficiency. How to evaluate the clinical

**【收稿日期】**2017-06-20

**【作者简介】**王占宇,工程师,E-mail: wzyliuzhou@163.com

effect of the VMAT plan in FFF mode for cervical cancer needs further study.

**Keywords:** cervical cancer; flattening filter free; volumetric-modulated arc therapy; dosimetric comparison

## 前言

宫颈癌是常见的妇科恶性肿瘤之一,在全球女性恶性肿瘤中的发病率仅次于乳腺癌<sup>[1]</sup>。放射治疗可有效降低肿瘤局部复发率,延长生存时间<sup>[2-3]</sup>。容积旋转调强放疗技术(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT)是在固定野调强的基础上发展而来的一种新的放射治疗技术,采用机架旋转照射并在机架旋转的过程中动态改变机架转速、剂量率、多叶准直器(MLC)的位置,从而得到高度适形的剂量分布,与常规调强相比,VMAT技术可以在不降低最终剂量分布的前提下减少治疗时间和出束跳数<sup>[4-8]</sup>。

在直线加速器中加入均整器的目的是使剂量在模体的特定深度处(一般10 cm)分布均匀,在调强技术未普及之前,剂量分布均匀对于计算剂量非常必要,但随着调强技术的发展,理论上只需要MLC的运动即可产生所需剂量分布<sup>[9-10]</sup>。移除均整器后的非均整射束与均整射束相比,射线质变软、散射减少、剂量率增加<sup>[11]</sup>,可减少正常组织所受剂量<sup>[12]</sup>,降低二次癌症的发生概率<sup>[13]</sup>。

目前,将非均整模式应用于宫颈癌VMAT放疗的相关报道较少,本文基于Varian Trilogy 6060直线加速器均整、非均整模式及RayStation三维治疗计划系统,研究比较宫颈癌在非均整与均整模式下VMAT计划的剂量学特性,为非均整模式应用于宫颈癌的临床治疗提供一定的参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 病例选择

随机选取2016年1月~2017年3月广西医科大学第四附属医院肿瘤科宫颈癌术后患者10例,年龄在37~63岁,中位年龄51岁,按国际妇产科协会(Federation Internationale of Gynecologie and Obstetrique, FIGO)分期均在Ⅰ<sub>a</sub>期至Ⅲ<sub>a</sub>期之间,患者需行宫颈癌根治性放疗。

### 1.2 模拟定位

患者在模拟定位前清空直肠,于定位前1 h排空小便,之后喝300 mL水憋尿,保证膀胱充盈程度。定位时,患者仰卧,双手合抱举至头顶,采用热塑体膜固定,CT扫描的同时,注射碘伏醇进行影像增强,扫描范围为胸椎10至闭孔下缘2~3 cm,层厚5 mm,扫

描所得CT图像以DICOM格式传输至RayStation三维治疗计划系统进行三维重建,由临床医师勾画靶区。

### 1.3 靶区勾画

按照ICRU50及ICRU62号报告勾画术后宫颈癌临床靶区(Clinical Target Volume, CTV),将CTV在三维方向外扩5 mm得到计划靶区(Planning Target Volume, PTV),并勾画小肠、股骨头、直肠及膀胱等危及器官(Organ at Risk, OAR),膀胱为充盈状态下的整个膀胱,直肠的上界为直肠乙状结肠交界处、下界至肛门<sup>[14]</sup>。处方剂量均为:PTV接受剂量5 040 cGy(28次)照射的体积 $\geq 95\%$ ,PTV接受处方剂量的110%的体积小于5%,靶区外无剂量热点,CTV内无剂量冷点;OAR的限量均为:直肠 $V_{50} < 50\%$ ( $V_{50}$ 表示接受50 Gy剂量照射的体积百分比),小肠 $V_{50} < 10\%$ ,股骨头 $V_{50} < 5\%$ ,膀胱 $V_{50} < 50\%$ 。

### 1.4 计划设计

对每一患者的同一CT图像及CTV,采用相同的处方剂量及相同的优化目标函数,射线能量均为6 MV,处方剂量为50.4 Gy,治疗次数为28次,计划采用两个全弧照射,用RayStation计划系统分别设计均整模式下的6X(6 MV Flattening Filter X-ray)和非均整模式下的6FFF(6 MV Flattening Filter Free X-ray)VMAT计划。为便于摆位,提高治疗效率,两种计划均采用一个全弧+两个半弧设计,机架从0°开始,最终转回0°,即第一段半弧由0°顺时针转至179°(准直器角度15°~30°),第二段全弧由179°逆时针转至181°(准直器角度330°~345°),第三段弧由181°顺时针转至0°(准直器角度15°~30°)。两种计划均采用相同的参数进行优化以减少其他因素的影响,采用CC卷积叠加算法(Collapsed Cone Convolution Superposition),单次优化迭代70次,经几次优化后,将所得计划进行分析比较。

### 1.5 评估方法

比较优化后所得6FFF VMAT计划和6X VMAT计划的剂量分布图和分辨率为1 cGy的剂量体积直方图(Dose Volume Histogram, DVH),并将6FFF VMAT计划和6X VMAT计划所得的各结果进行统计学分析。

PTV剂量评估:根据ICRU 83号报告<sup>[15]</sup>,比较最大剂量 $D_{2\%}$ ( $D_{2\%}$ 表示 $\leq 2\%$  PTV体积接受的剂量),平



均剂量  $D_{\text{mean}}$ , 最小剂量  $D_{98\%}$  ( $D_{98\%}$  表示 98% PTV 体积接受的最低照射剂量), 靶区覆盖率 (处方剂量包围的 PTV 体积与 PTV 总体积的比值)。

靶区适形指数 (Conformity Index, CI)

$$= \frac{\text{PTV接受的处方剂量体积}}{\text{PTV体积}} \times \frac{\text{PTV接受的处方剂量体积}}{\text{全身接受的处方剂量体积}}$$

CI 值在 0~1 之间, 适形度越高 CI 值越接近 1。

靶区均匀指数 (Homogeneity Index, HI)

$$= \frac{D_{2\%} - D_{98\%}}{D_{50\%}}$$

靶区均匀性越好, HI 值越小。

ORA 剂量评估: 用  $V_{45}$  ( $V_{45}$  表示 45 Gy 照射剂量的体积)、 $V_{50}$ 、 $D_{\text{mean}}$  来评估小肠、直肠、膀胱、股骨头的受照情况。

正常组织低剂量照射评估: 评估人体 (Body) 的  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ 、 $V_5$ 、 $V_7$ 、 $V_{10}$ 、 $V_{15}$ 、 $V_{20}$ 、 $V_{30}$ 、 $V_{40}$ 。

采用 PTW 公司的二维电离室矩阵 OCTAVIUS Detector 1500 和 OCTAVIUS 4D 模体对 10 例病人的 6X 计划和 6FFF 计划进行调强剂量验证, 采用 max dose 评判方式计算通过率 (按 3 mm 和 3 % 的误差标准)。

优化完成之后计算两种计划的机器总跳数 (Monitor Unit, MU) 及两种计划在 Varian Trilogy 6060 直线加速器的总出束时间 (T)。

## 1.6 统计学分析

采用 SPSS 18.0 统计软件包进行数据的统计学分析, 计量资料均数  $\pm$  标准差表示, 6X 与 6FFF VMAT 计划之间的比较采用配对样本  $t$  检验进行比较, 分别对靶区剂量、危及器官的剂量、MU 及 T 进行对比,  $P < 0.05$  则认为该差异具有统计学意义。

## 2 结果

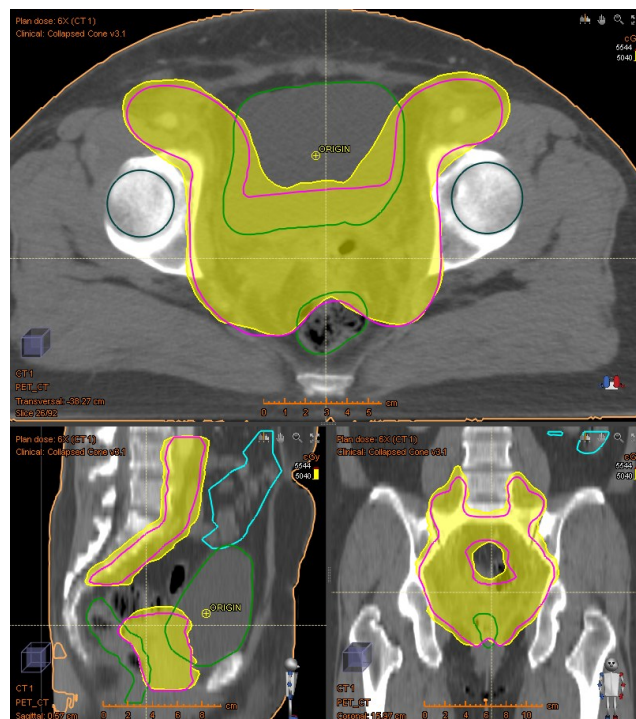
### 2.1 剂量分布图及 DVH

用 RayStation 计划系统分别设计的 6X 与 6FFF 两种 VMAT 计划均能满足处方要求, 其剂量分布图 (包含横断面、矢状位、冠状位) 如图 1、图 2 所示。

由 1、图 2 可知 6X 与 6FFF 两种 VMAT 计划剂量分布类似, 处方剂量均能较好地包围靶区, 靶区外无剂量热点, CTV 内无剂量冷点, PTV 内未见超出处方剂量的 110% 的区域。

靶区及部分主要危及器官剂量 DVH 如图 3 所示。

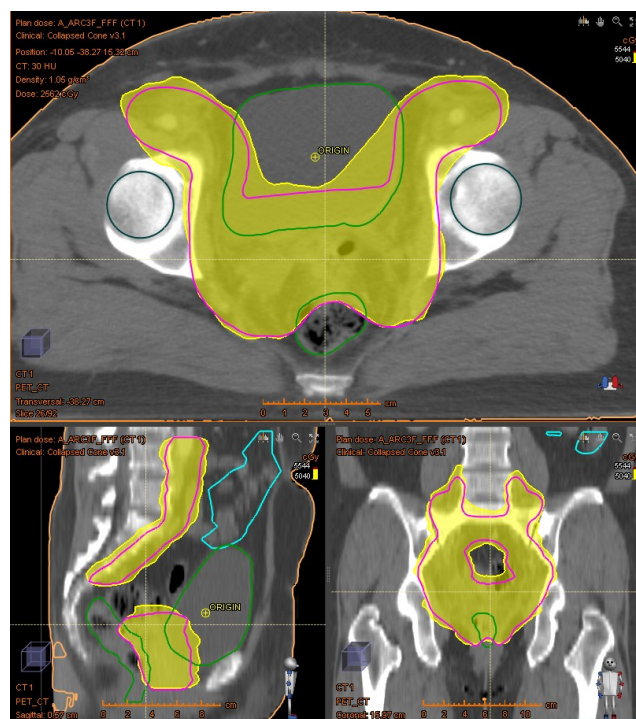
由图 3 可以得出, 6X 与 6FFF 两种 VMAT 计划的 PTV 与各 OAR 均达到处方要求, 但两种计划存在一定的差别, 需进行进一步统计学分析。



6X: 6 MV flattening filter X-ray

图1 6X计划剂量分布图

Fig.1 Dose distribution of 6X plan



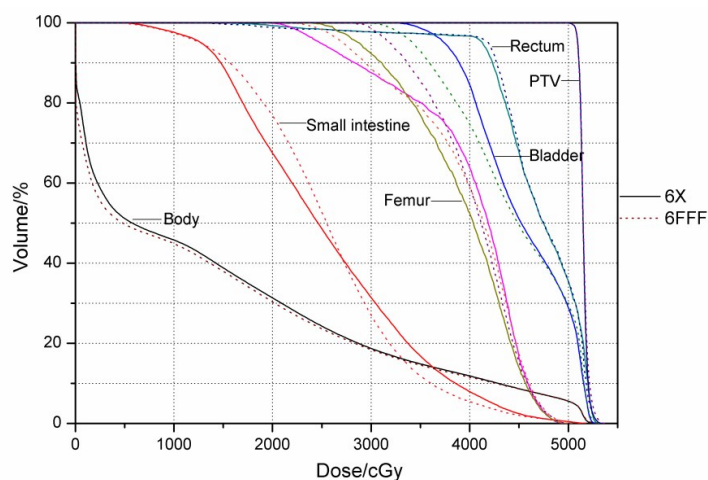
6FFF: 6 MV flattening filter free X-ray

图2 6FFF计划剂量分布图

Fig.2 Dose distribution of 6FFF plan

### 2.2 靶区剂量比较

分别对 6X 与 6FFF 两种 VMAT 计划所得 PTV 的  $D_{2\%}$ 、 $D_{\text{mean}}$ 、 $D_{98\%}$ 、靶区覆盖率、靶区 CI、靶区 HI 进行统计学比较, 结果见表 1。



The solid line represents the 6X plan, while the dashed line represents the 6FFF plan.

图3 6X与6FFF两种VMAT计划DVH图对比

Fig.3 Comparison of dose-volume histogram between 6X plan and 6FFF plan

表1 6X与6FFF两种VMAT计划的靶区剂量学比较( $\bar{x} \pm s$ )

Tab.1 Dosimetry comparison of target areas between 6X plan and 6FFF plan ( $Mean \pm SD$ )

Plan	$D_{98\%}/cGy$	$D_{2\%}/cGy$	$D_{mean}/cGy$	Target dose coverage rate/%	CI	HI
6X	5 060.3 $\pm$ 18.9	5 321.8 $\pm$ 46.3	5 192.5 $\pm$ 34.8	98.81 $\pm$ 0.67	0.765 $\pm$ 0.019	0.050 4 $\pm$ 0.010 0
6FFF	5 069.7 $\pm$ 14.6	5 318.6 $\pm$ 41.3	5 193.2 $\pm$ 35.4	99.06 $\pm$ 0.41	0.767 $\pm$ 0.021	0.047 9 $\pm$ 0.007 0
P value	0.271	0.678	0.695	0.227	0.443	0.377

CI: Conformity index; HI: Homogeneity index

由表1可知,6X与6FFF两种VMAT计划所得PTV的 $D_{2\%}$ 、 $D_{mean}$ 、 $D_{98\%}$ ,靶区覆盖率,靶区CI,靶区HI均无明显差异( $P>0.05$ ),说明两种计划的靶区剂量差异较少。

### 2.3 OAR剂量比较

两种计划中,OAR直肠、膀胱、小肠、股骨头的受量 $V_{45}$ 、 $V_{50}$ 、 $D_{mean}$ 结果示于表2。

由表2可知,6X与6FFF两种计划OAR的受照剂量相比,6FFF计划中,膀胱的 $V_{45}$ 、 $D_{mean}$ 和小肠的 $V_{45}$ 均低于6X计划,差异具有统计学意义( $P<0.05$ );其它参数对比,二者无明显统计学差异。6FFF计划与6X计划对比,它在对OAR的保护上略有优势。

### 2.4 正常组织低剂量照射评估

6X与6FFF两种计划的正常组织(Body)受到低剂量照射的体积见表3。

由表3可知,正常组织(Body)受到低剂量照射的体积,6FFF计划都小于6X计划,除 $V_{10}$ 、 $V_{15}$ 、 $V_{20}$ 外,其余结果具有统计学意义( $P<0.05$ )。

### 2.5 两种计划的剂量验证通过率比较

6X计划和6FFF计划剂量通过率验证分别如图4

和图5所示,图4a、图5a均为计划系统计算所得剂量分布图,图4b、图5b为实际测量所得剂量分布图,图4c、图5c为某一横断面二者剂量分布曲线,图4d、图5d为剂量通过情况分布图。由图4、图5可以看出,在该层面6X计划的剂量验证通过率略高于6FFF计划。

10例病人剂量验证通过率的结果如表4所示。由表4可知,两种计划的剂量验证通过率均大于95%,均能满足治疗要求,其中6X计划验证通过率均值为(99.78 $\pm$ 0.12)%,6FFF计划验证通过率均值为(98.52 $\pm$ 0.66)%,6X VMAT计划剂量验证通过率比6FFF计划高1.26%,结果具有统计学意义( $P=0.000$ )。

### 2.6 MU及T比较

两种计划的MU及T见表5。由表5可知两种计划比较,6FFF计划平均MU增加至6X计划的1.34倍,结果具有统计学意义( $P=0.000$ ),6FFF计划平均出束时间与6X计划相比减少了4.5%,结果同样具有统计学意义( $P=0.012$ )。

## 3 讨论

在调强技术未普及之前,均整器的应用使普放

表2 6X与6FFF两种计划危及器官的剂量学比较( $\bar{x}\pm s$ )Tab.2 Dosimetric comparisons of organs-at-risk (OAR) between 6X plan and 6FFF plan (*Mean $\pm$ SD*)

OAR	Parameter	6X plan	6FFF plan	P value
Rectum	V <sub>45</sub> /%	73.71 $\pm$ 15.84	71.66 $\pm$ 14.76	0.123
	V <sub>50</sub> /%	38.92 $\pm$ 9.48	39.91 $\pm$ 8.13	0.358
	D <sub>mean</sub> /cGy	4 640.0 $\pm$ 227.2	4 623.5 $\pm$ 235.5	0.165
Bladder	V <sub>45</sub> /%	52.35 $\pm$ 9.74	50.56 $\pm$ 9.69	0.034
	V <sub>50</sub> /%	31.80 $\pm$ 6.34	32.08 $\pm$ 6.98	0.559
	D <sub>mean</sub> /cGy	4 489.8 $\pm$ 242.8	4 445.6 $\pm$ 258.6	0.011
Small intestine	V <sub>45</sub> /%	14.38 $\pm$ 10.62	13.45 $\pm$ 9.86	0.025
	V <sub>50</sub> /%	5.82 $\pm$ 5.46	5.88 $\pm$ 5.46	0.569
	D <sub>mean</sub> /cGy	3 042.8 $\pm$ 633.6	3 012.6 $\pm$ 638.3	0.188
Femur_L	V <sub>45</sub> /%	16.15 $\pm$ 4.83	14.89 $\pm$ 5.59	0.172
	V <sub>50</sub> /%	0.16 $\pm$ 0.21	0.22 $\pm$ 0.23	0.255
	D <sub>mean</sub> /cGy	3 899.8 $\pm$ 306.8	3 843.4 $\pm$ 365.0	0.212
Femur_R	V <sub>45</sub> /%	16.50 $\pm$ 4.94	15.54 $\pm$ 5.59	0.223
	V <sub>50</sub> /%	0.85 $\pm$ 1.15	0.36 $\pm$ 0.45	0.252
	D <sub>mean</sub> /cGy	3 760.5 $\pm$ 348.3	3 722.2 $\pm$ 395.5	0.382

表3 6X与6FFF两种计划正常组织低剂量照射体积比较  
(%,  $\bar{x}\pm s$ )Tab.3 Comparison of the volume of normal tissue (body) receiving low dose radiation in 6X plan and 6FFF plan (%, *Mean $\pm$ SD*)

Parameter	6X plan	6FFF plan	P value
V <sub>1</sub>	68.51 $\pm$ 2.66	64.01 $\pm$ 2.59	0.000
V <sub>2</sub>	59.58 $\pm$ 2.54	56.10 $\pm$ 2.41	0.000
V <sub>3</sub>	55.09 $\pm$ 2.44	52.43 $\pm$ 2.28	0.000
V <sub>5</sub>	50.14 $\pm$ 2.36	48.90 $\pm$ 2.17	0.000
V <sub>7</sub>	47.58 $\pm$ 2.42	46.86 $\pm$ 2.13	0.000
V <sub>10</sub>	44.57 $\pm$ 2.79	44.22 $\pm$ 2.34	0.135
V <sub>15</sub>	38.43 $\pm$ 3.35	38.26 $\pm$ 3.18	0.630
V <sub>20</sub>	31.68 $\pm$ 3.45	31.14 $\pm$ 3.50	0.057
V <sub>30</sub>	19.94 $\pm$ 3.05	19.38 $\pm$ 3.43	0.045
V <sub>40</sub>	12.03 $\pm$ 2.41	11.74 $\pm$ 2.46	0.023

技术得到的较大的发展,但均整器的应用同时也制约了加速器的输出剂量,均整模式输出剂量约为非均整模式的1/4,使加速器的输出特性改变<sup>[16]</sup>。随着调强技术的发展,理论上只需要MLC的运动即可产生所需剂量分布,目前非均整模式已广泛应用在立体定向体部放射治疗和立体定向放射外科中<sup>[17]</sup>。本

文基于Varian Trilogy 6060直线加速器均整、非均整模式及RayStation三维治疗计划系统,研究比较宫颈癌在非均整与均整模式下VMAT计划的剂量学特性,为非均整模式应用于宫颈癌的临床治疗提供一定的参考。

本研究针对同一患者的同一CT图像,采用相同的优化参数,设计了6X、6FFF两种VMAT计划。研究表明,6X、6FFF两种VMAT计划均能满足临床使用要求;6X计划与6FFF计划相比,靶区剂量无明显差异,在OAR保护上,6FFF计划中膀胱的V<sub>45</sub>、D<sub>mean</sub>和小肠的V<sub>45</sub>均低于6X计划,差异具有统计学意义( $P < 0.05$ ),6FFF计划在对OAR的保护上略有优势。6FFF计划受到相应剂量照射的正常组织体积均小于6X计划,有利于降低二次癌症的发生率;两种计划的剂量验证通过率均能满足治疗要求,其中6FFF计划验证通过率均值为(98.52 $\pm$ 0.66)%,6X VMAT计划剂量验证通过率比6FFF计划略高,结果具有统计学意义;两种计划的机器跳数相比6FFF计划平均机器跳数增加至6X计划的1.34倍,结果具有统计学意义;两种计划的出束时间相比,6FFF计划平均出束时间为6X计划出束时间的95.5%,结果有统计学意义。

6X、6FFF两种VMAT计划两者在靶区剂量分布上类似,现有的调强技术只需要MLC的运动即可产生所需剂量分布,移除均整器并未对靶区剂量分布



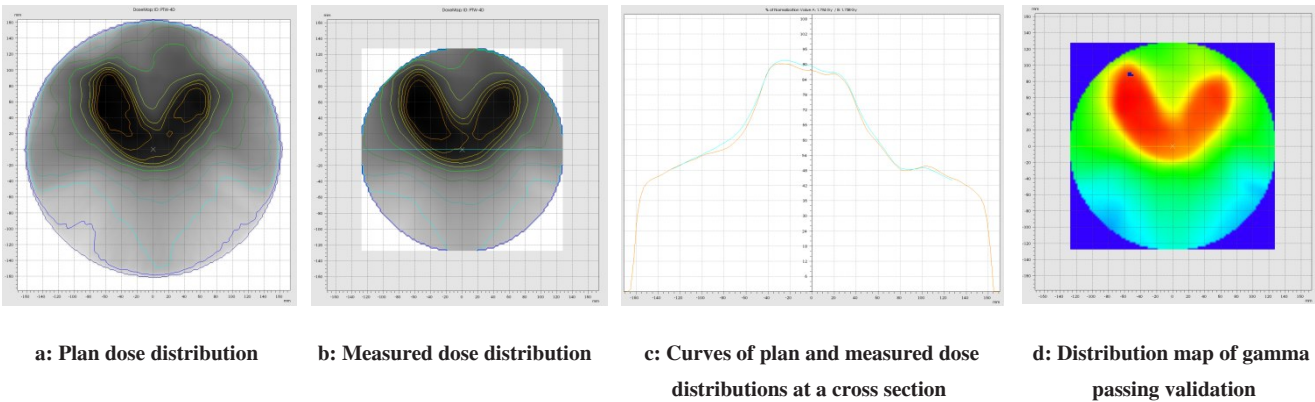


图4 6X计划剂量通过率验证  
Fig.4 Dosimetric verification for 6X plan

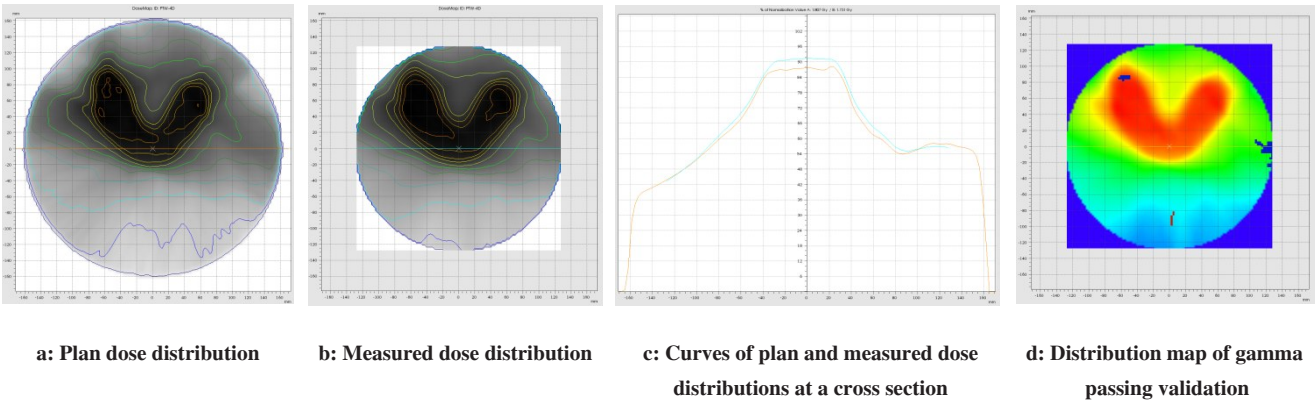


图5 6FFF计划剂量通过率验证  
Fig.5 Dosimetric verification for 6FFF plan

表4 两种计划剂量验证通过率比较(%)  
Tab.4 Comparison of dose passing rate between 6X plan and 6FFF plan (%)

Plan	No. of patient										Mean±SD	P value
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
6X	99.9	99.8	99.6	99.9	99.7	99.6	99.9	99.9	99.7	99.8	99.78±0.12	0.000
6FFF	99.2	98.9	98.4	99.1	98.5	98.5	98.3	99.0	96.9	98.4	98.52±0.66	

表5 两种计划机器跳数及出束时间比较( $\bar{x}\pm s$ )  
Tab.5 Comparison of monitor unit and delivery time between 6X plan and 6FFF plan (Mean±SD)

Evaluation item	6X plan	6FFF plan	P value
Delivery time/min	3.82±0.46	3.65±0.33	0.012
Monitor unit/MU	391.77±67.82	526.37±79.05	0.000

产生明显影响。在OAR保护以及正常组织低剂量照射上,由于非均整模式具有更少的散射线,6FFF计划相较于6X计划更具优势,有利于降低二次癌症的发生率。6X、6FFF两种VMAT计划均能通过剂量验

证,说明6FFF计划具有一定的临床可行性。两种计划在机器跳数和出束时间上,虽然6FFF的机器跳数增加,但出束时间反而下降,因此非均整模式有利于提高治疗效率。本研究的病例数有限,需进一步增加病例;如何评估非均整模式下宫颈癌VMAT计划的临床效果,也需进一步研究讨论。

【参考文献】  
[1] 高岩,张新,王纯雁,等.同步放化疗治疗中晚期宫颈癌的疗效及毒副反应[J].中国肿瘤,2013,22(1):73-76.  
GAO Y, ZHANG X, WANG C Y, et al. Efficacy and toxicity of concurrent chemoradiotherapy in the treatment of advanced cervical cancer[J]. China Cancer, 2013, 22 (1): 73-76.

- [2] MUNDT A J, LUJAN A E, ROTMENSCH J, et al. Intensity-modulated whole pelvic radiotherapy in women with gynecologic malignancies [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2002, 52(5): 1330-1337.
- [3] YAO L, ZHU L, WANG J, et al. Positioning accuracy during VMAT of gynecologic malignancies and the resulting dosimetric impact by a 6-degree-of-freedom couch in combination with daily kilovoltage cone beam computed tomography[J]. *Radiat Oncol*, 2015, 10(1): 1-8.
- [4] YU C X, TANG G. Intensity-modulated arc therapy: principles, technologies and clinical implementation[J]. *Phys Med Biol*, 2011, 56(5): R31-R54.
- [5] OTTO K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc[J]. *Med Phys*, 2008, 35(1): 310-317.
- [6] PALMA D, VOLLANS E, JAMES K, et al. Volumetric modulated arc therapy for delivery of prostate radiotherapy: comparison with intensity-modulated radiotherapy and three-dimensional conformal radiotherapy[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2008, 72(4): 996-1001.
- [7] LEE T F, CHAO P J, TING H M, et al. Comparative analysis of SmartArc-based dual arc volumetric-modulated arc radiotherapy (VMAT) *versus* intensity-modulated radiotherapy (IMRT) for nasopharyngeal carcinoma[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2011, 12(4): 3587.
- [8] ZHANG P, HAPPERSETT L, HUNT M, et al. Volumetric modulated arc therapy: planning and evaluation for prostate cancer cases[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2010, 76(5): 1456-1462.
- [9] FU W, DAI J. Delivery time comparison for intensity-modulated radiation therapy with/without flattening filter: a planning study[J]. *Phys Med Biol*, 2004, 49(8): 1535-1548.
- [10] TITT U, VASSILIEV O N, POENISCH F. Flattening filter free IMRT: first experimental results[J]. *Med Phys*, 2005, 32(6): 2146.
- [11] 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 Isot*, 2009, 67(9): 1629-1637.
- [12] HALL E J, WUU C S. Radiation-induced second cancers: the impact of 3D-CRT and IMRT[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2003, 56(1): 83-88.
- [13] HALL E J. Intensity-modulated radiation therapy, protons, and the risk of second cancers[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2006, 65(1): 1-7.
- [14] BERTELSEN A, HANSEN C R, JOHANSEN J, et al. Single arc volumetric modulated arc therapy of head and neck cancer [J]. *Radiother Oncol*, 2010, 95(2): 142-148.
- [15] HODAPP N. The ICRU 83: prescribing, recording and reporting photon-beam intensity-modulated radiation therapy (IMRT) [J]. *Strahlenther Onkol*, 2012, 188(1): 97-99.
- [16] 耿建昊, 石安辉, 余荣, 等. NSCLC肺部小病灶非均整模式立体定向放疗的应用[J]. *中国肺癌杂志*, 2015, 18(5): 301-307.
- GENG J H, SHI A H, YU R, et al. Application of NSCLC in lung small lesion was an integral model of stereotactic radiotherapy[J]. *Chinese Journal of Lung Cancer*, 2015, 18(5): 301-307.
- [17] 岳海振, 张艺宝, 刘卓伦, 等. 直线加速器均整和非均整模式下射线质和射野输出因子的蒙特卡罗模拟与实测值比较[J]. *中国医学物理学杂志*, 2016, 33(6): 548-552.
- YUE H Z, ZHANG Y B, LIU Z L, et al. Comparison between Monte Carlo simulation and measurement of beam quality and output factor with flattened and flattening filter-free of linear accelerator [J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2016, 33(6): 548-552.

(编辑:薛泽玲)