

## 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

贺先桃,王占宇,谭军文,龙雨松,李钢,冯永富  
柳州市工人医院肿瘤科放疗室,广西 柳州 545005

**【摘要】目的:**探讨固定铅门模式下乳腺癌根治术后放疗中容积旋转调强放疗(VMAT)与动态调强放疗(dIMRT)的剂量学差异及技术特点。**方法:**选取左、右侧根治术后乳腺癌患者各10例,使用Raystation 4.7.5治疗计划系统制定VMAT计划和Eclipse 11.0治疗计划系统制定7野dIMRT计划,两种计划均采用合适的固定铅门技术,靶区处方剂量为50 Gy/25 F。比较两种计划的剂量学差异、机器跳数、治疗出来时间以及剂量验证 $\gamma$ 通过率。**结果:**VMAT计划的靶区最大剂量、平均剂量、均匀性指数均优于dIMRT计划,前者剂量均匀性显著提升,且靶区内无剂量热点;两种计划的最小剂量、适形指数、靶区覆盖率基本相近( $P>0.05$ )。主要危及器官双肺、心脏等的整体受照剂量VMAT计划明显低于dIMRT,尤其患侧肺的低剂量照射体积 $V_5$ 、 $V_{20}$ 及心脏的 $V_{30}$ 显著降低;正常组织的整体受量VMAT计划偏高。VMAT计划单次照射的机器跳数比dIMRT平均减少了59%,治疗出来时间平均减少了60%。两种计划的 $\gamma$ 通过率均满足治疗要求( $>95\%$ )。**结论:**两种技术均能满足临床处方要求,但VMAT技术具有更大的优势,其靶区剂量均匀性更好,可明显降低主要危及器官的整体受照剂量,尤其降低肺的低剂量照射体积,且显著减少机器跳数,缩短治疗时间。

**【关键词】**乳腺癌;容积旋转调强;动态调强;固定铅门;剂量学

**【中图分类号】**R730.55

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2018)08-0889-06

## Comparison of VMAT vs dIMRT with fixed-jaw technique for postoperative radiotherapy of breast cancer

HE Xiantao, WANG Zhanyu, TAN Junwen, LONG Yusong, LI Gang, FENG Yongfu

Radiotherapy Treatment Room, Department of Oncology, Liuzhou Worker's Hospital, Liuzhou 545005, China

**Abstract: Objective** To explore the dosimetric differences and technology features of volumetric modulated arc therapy (VMAT) and dynamic intensity-modulated radiotherapy (dIMRT) with fixed-jaws technique for postoperative radiotherapy of breast cancer. **Methods** Twenty breast cancer patients after radical surgery were selected, with 10 cases of left-sided breast cancer and 10 of right-sided breast cancer. Raystation 4.7.5 treatment planning system and Eclipse 11.0 treatment planning system were used to design VMAT plans and 7-field dIMRT plans, respectively, with a target prescription dose of 50 Gy/25 F. Moreover, the most appropriate fixed-jaw technology was applied for the two plans of each patient. The dosimetric differences, monitor units, treatment time and gamma passing rate in dose verification were compared. **Results** VMAT plans were better than dIMRT plans in the maximum dose, mean dose, and homogeneity index of target areas, and the dose homogeneity of the former was significantly improved, without hot spots in target areas. The minimum dose, conformity index and target coverage of VMAT plans and dIMRT plans were basically similar ( $P>0.05$ ). Compared with dIMRT plans, VMAT plans showed significantly decreased radiotherapy dose of major organs-at-risk, such as the whole lung and heart, especially the  $V_5$ ,  $V_{20}$  of low dose region in the ipsilateral lung and the  $V_{30}$  of the heart. The total dose of normal tissue in VMAT plans was slightly higher than that in dIMRT plans. Compared with those in dIMRT plans, the average number of monitor units was reduced by an average of 59% per fraction, and the treatment time was reduced by an average of 60% per fraction in VMAT plans. The gamma passing rate of VMAT plans and dIMRT plans met the requirement of treatment ( $>95\%$ ). **Conclusion** Both VMAT and dIMRT meet the requirements of clinical prescription, but VMAT has more advantages. VMAT can not only provide better dose homogeneity, significantly reduce the total dose of

**【收稿日期】**2018-05-12

**【作者简介】**贺先桃,助理工程师,研究方向:肿瘤放射物理,E-mail: hxt\_467842013@sina.com

**【通信作者】**王占宇,工程师,研究方向:肿瘤放射物理,E-mail: wzy\_liuzhou@163.com

major organs-at-risk, especially the low dose volume of lungs, but also obviously decrease monitor units and shorten treatment time.

**Keywords:** breast cancer; volumetric modulated arc therapy; dynamic intensity-modulated radiotherapy; fixed-jaw; dosimetry

## 前言

放射治疗是乳腺癌根治术后的主要方式,可以明显提高乳腺癌的局部控制率和总体生存率<sup>[1-2]</sup>。乳腺癌靶区因其形状不规则、非常贴近危及器官,使得肺和心脏的受量在乳腺癌根治术后放疗中难以降低;胸壁部分的靶区受呼吸运动影响会出现靶区中心偏离加速器等中心的可能<sup>[3-5]</sup>;腋窝淋巴结是乳腺癌独立预后因素与治疗的必要条件<sup>[6]</sup>,但腋窝及锁骨淋巴结引流部分的靶区因患者手臂摆位重复性差,使这部分靶区有可能移超出射野照射范围,造成靶区的照射剂量不准,甚至手臂的正常组织有被治疗野照射的危险<sup>[7-9]</sup>。固定铅门技术是一种简单、直观的调强技术,它可以限定照射野的范围,从而作用在某些特定治疗区域,有选择地避开危及器官和正常组织。相较于非固定铅门模式,固定铅门技术具有子野数目少、机器跳数(MU)低、不存在分野、治疗时间短的优势<sup>[10]</sup>,因此有助于解决乳腺癌放疗中遇到的挑战。本研究对固定铅门模式下容积旋转调强放疗(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT)和固定野动态调强放疗(dynamic Intensity Modulated Radiation Therapy, dIMRT)两种技术在乳腺癌根治术后的应用进行比较,为其临床选择提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 病人选择

选取2017年3~11月在柳州市工人医院肿瘤科的乳腺癌改良根治术后患者20例,其中左、右侧各10例,中位年龄42岁,患者均在广西医科大学第四附属医院Trilogy直线加速器上接受过VMAT。

### 1.2 定位及CT扫描

患者仰卧位,双手抱肘置额前,交代病人平稳呼吸,采用热塑体膜固定,注射碘伏醇进行影像增强,扫描范围为寰椎上界至乳皱下2 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。

### 1.3 靶区、危及器官勾画

所有病例的靶区均由广西医科大学第四附属医院肿瘤科放疗医师在Raystation计划系统上勾画。临床靶区1(Clinical Target Volume 1, CTV1)定义为胸壁区域,CTV2定义为腋窝及锁骨上相关预防照射区域。计划靶区(Planning Target Volume, PTV)由CTV1、CTV2

在三维方向上外扩得到,前界在皮肤表面下3 mm,同时勾画出肺、心脏、脊髓、肱骨头等危及器官,画好后将每个病人的靶区、危及器官及CT影像以Dicom格式传至Eclipse计划系统,PTV的处方剂量为50 Gy/25 F。

### 1.4 计划设计

对每例患者分别设计VMAT和dIMRT两种计划,均选用瓦里安Trilogy直线加速器6 MV X射线,计算网格边长均为3 mm,准直器角度根据各个射野方向观视(Beam's Eye View, BEV)方向靶区的形状沿着靶区长轴方向,设置相同的射野中心点,并且均采用相同的优化函数进行优化,不同的地方在于:(1)VMAT计划采用Raystation 4.7.5三维治疗计划系统设计,每3°一个控制点,剂量计算算法为卷积叠加算法(Collapsed Cone Convolution, CCC),射野均采用6段部分弧+固定铅门的方式,左侧乳腺癌部分弧起止角度基本设置为顺时针方向300°~45°、45°~150°(固定铅门)、150°~179°,加反方向逆时针179°~150°、150°~45°(固定铅门)、45°~0°;右侧乳腺癌逆时针方向60°~315°、315°~210°(固定铅门)、210°~181°,加反方向顺时针181°~210°、210°~315°(固定铅门)、315°~0°。其中,固定铅门部分的射野均只对胸壁区域靶区适形并外放1 cm左右,每段弧的剂量率在100~600 MU/min内由计划系统自动控制变化。(2)dIMRT计划使用瓦里安Eclipse 11.0三维治疗计划系统设计,剂量计算算法选用各向异性算法(Anisotropic Analytical Algorithm, AAA),剂量率选取500 MU/min,射野布置为共面7野,射野角度为乳腺胸壁两个切线方向野、一个与切线野垂直的射野,另外4个射野的其中两个是在上方切线野分别加10°、20°生成,另两个是在下方切线野分别减10°、20°生成,具体的射野角度根据靶区形状大小略有差别;下方的切线野至与切线野垂直的4个射野均使用固定铅门技术,作用范围限定在胸壁区域并对靶区适形,同样外放约1 cm。

### 1.5 评估方法

比较两种计划的剂量体积直方图(DVH)和横断面、冠状面、矢状面的等剂量分布图,其他评估具体如下:(1)PTV:评估靶区的最大剂量、最小剂量、平均剂量( $D_{mean}$ )、适形指数(Conformity Index, CI)以及均匀性指数(Homogeneity Index, HI),根据ICRU 83号报告<sup>[11]</sup>,靶区最大剂量用 $D_2$ (2%的体积所受剂量)表示,最小剂量用 $D_{98}$ (98%的体积所受剂量)表示,靶区



CI定义为:

$$CI = \frac{\text{PTV接受处方剂量的体积}}{\text{PTV体积}} \times \frac{\text{PTV接受处方剂量的体积}}{\text{全身接受处方剂量的体积}},$$

CI的值介于0到1之间,越接近1说明靶区适形度越好;

靶区HI定义为:  $HI = \frac{D_2 - D_{98}}{D_{50}}$ , HI值越接近0,说明靶区的均匀性越好;同时分别统计107%、110%处方剂量包

绕靶区的体积 $V_{107\%}$ 、 $V_{110\%}$ 。(2)危及器官与正常组织:定义 $V_x$ 表示接受 $x$  Gy剂量照射的体积比。评估健侧肺、患侧肺、对侧乳腺、心脏、脊髓、肱骨头、正常组织Body等的相关剂量体积参数 $V_x$ 、 $D_{mean}$ ,脊髓的最大剂量用 $D_1$  (1%体积所受剂量)表示。(3)MU和治疗出束时间:优化完成之后两种计划的各射野相加的总MU及两种计划在瓦里安Trilogy直线加速器的治疗出束时间 $T$ 。(4)采用PTW公司的二维电离室矩阵OCTAVIUS Detector 1500和OCTAVIUS 4D模体对20例病人的VMAT和

dIMRT计划进行调强剂量验证,按 $<3$  mm的距离偏差和 $<3\%$ 的剂量偏差计算 $\gamma$ 通过率,以 $\geq 95\%$ 为通过标准。

## 1.6 统计学分析

采用SPSS 18.0软件对数据进行统计学分析,数据资料以均数 $\pm$ 标准差表示,两组数据比较采用配对样本 $t$ 检验, $P<0.05$ 认为差异具有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 剂量分布图及DVH

为了方便两种计划的剂量分布比较,将所有dIMRT计划传至Raystation 4.7.5计划系统读取,其中1例左侧乳腺癌患者VMAT和dIMRT计划在某一横断面、冠状面、矢状面的等剂量分布图如图1所示,DVH如图2所示。从剂量分布图可以看出,两种计划靶区的处方剂量(50 Gy)覆盖基本相似,但VMAT计划的处方剂量线更贴近靶区,靶区内剂量热点明显减少。

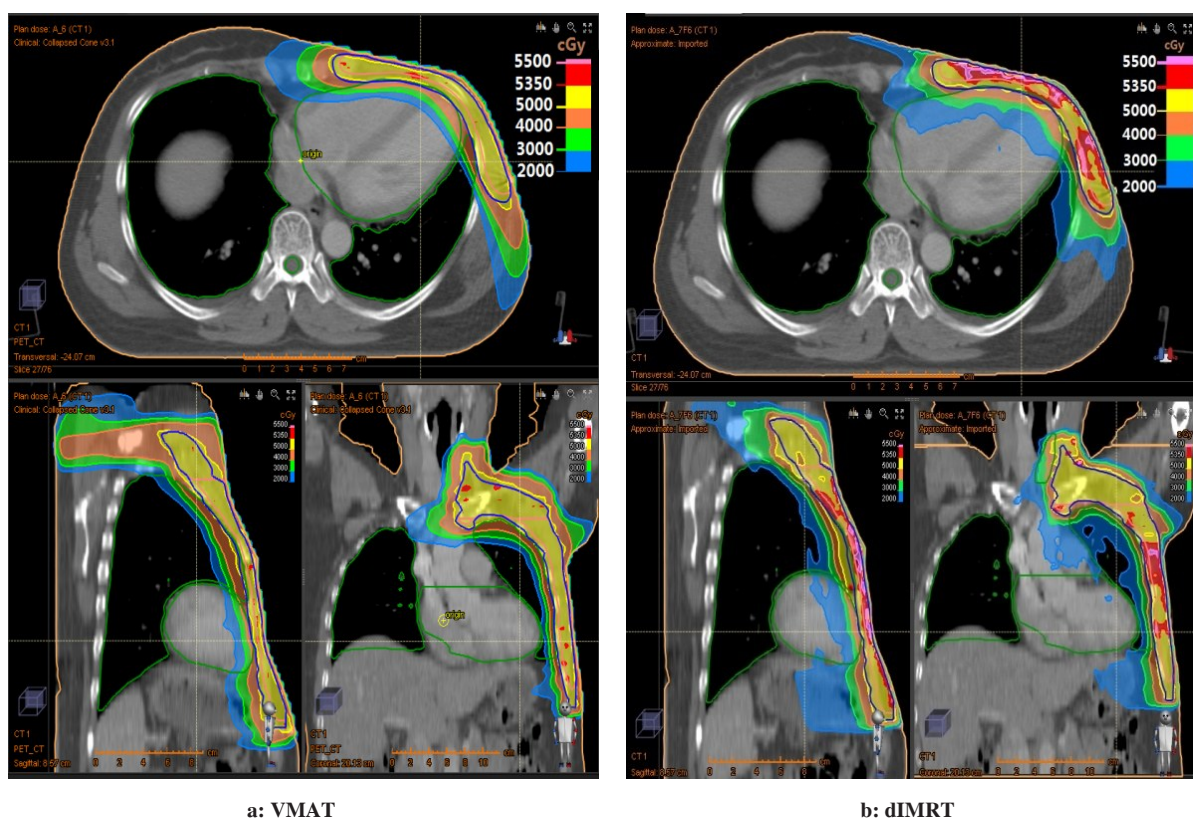


图1 某例患者两种计划的等剂量分布图比较

Fig.1 Comparison of isodose distribution in the two plans for a specific patient

VMAT: Volumetric modulated arc therapy; dIMRT: Dynamic intensity-modulated radiation therapy

### 2.2 靶区剂量比较

两种计划的靶区相关剂量参数 $D_2$ 、 $D_{98}$ 、 $D_{mean}$ 、CI、HI、 $V_{107\%}$ 、 $V_{110\%}$ 、靶区覆盖率的比较见表1。

由表1可知,两种计划的最小剂量 $D_{98}$ 、CI、靶区覆盖率基本相近,差异不具有统计学意义( $P>0.05$ ),

但VMAT计划的CI略高于dIMRT计划;VMAT计划的最大剂量 $D_2$ 、 $D_{mean}$ 、HI、 $V_{107\%}$ 、 $V_{110\%}$ 均明显低于dIMRT计划,剂量均匀性显著提升,该结果表明VMAT计划的靶区剂量分布更均匀,靶区内高量区域相比dIMRT计划明显减少。

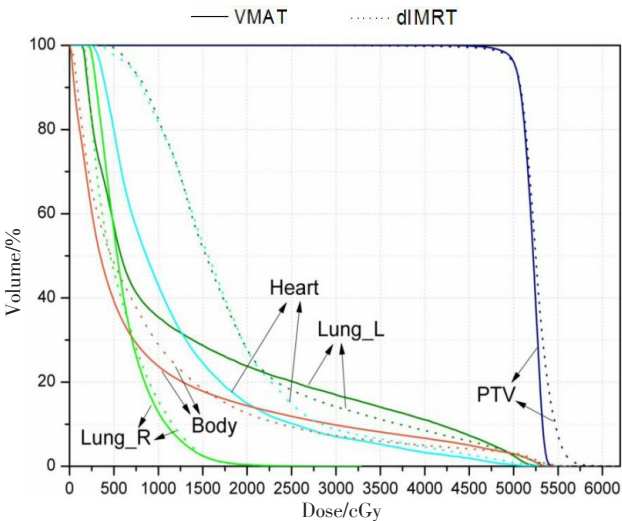


图2 某例患者两种计划的DVH图比较

Fig.2 Comparison of dose-volume histogram in the two plans for a specific patient

PTV: Planning target volume; CI: Conformity index; HI: Homogeneity index

表1 两种计划的靶区剂量学比较

Tab.1 Target dosimetric comparison between two plans

PTV	VMAT	dIMRT	t value	P value
D <sub>2</sub> /cGy	5 358.9±30.7	5 504.1±87.4	-7.550	0.000
D <sub>95</sub> /cGy	4 917.3±30.4	4 926.5±58.9	-0.799	0.434
D <sub>mean</sub> /cGy	5 188.4±13.8	5 211.8±20.6	-4.094	0.001
V <sub>107%</sub> /%	3.50±3.30	13.60±7.10	-5.848	0.000
V <sub>110%</sub> /%	0.03±0.07	2.70±2.40	-4.799	0.000
CI	0.834±0.029	0.825±0.033	-0.831	0.235
HI	0.085±0.010	0.111±0.027	-4.957	0.000
Target coverage/%	95.66±0.95	95.69±1.78	-0.076	0.941

2.3 危及器官的剂量比较

两种计划各危及器官的受量比较见表2。可看出VMAT计划患侧肺在低剂量部分V<sub>5</sub>、V<sub>10</sub>、V<sub>20</sub>分别低于dIMRT计划22.7%、30.3%、17.2%(P值均为0.000),同时,D<sub>mean</sub>降低了约17.6%,V<sub>30</sub>、V<sub>40</sub>要高于dIMRT计划,但相差不大。健侧肺的V<sub>5</sub>降低了约17.8%,差异具有统计学意义(P=0.008),并且D<sub>mean</sub>和V<sub>10</sub>略低于dIMRT计划,但V<sub>20</sub>要稍高于dIMRT计划,差异不显著(P>0.05)。VMAT计划心脏的V<sub>20</sub>、V<sub>30</sub>、V<sub>40</sub>、D<sub>mean</sub>均有不同程度的降低,具有统计学差异(P<0.05)。对侧乳腺的受量差异明显,VMAT计划明显低于dIMRT计划。VMAT计划脊髓的最大值D<sub>1</sub>,肱骨头的V<sub>40</sub>、D<sub>mean</sub>均高于dIMRT计划,但脊髓的平均量要低,4个剂量参数的差异均有统

计学意义(P<0.05)。

2.4 正常组织的受照剂量比较

两种计划正常组织Body的V<sub>5</sub>、V<sub>10</sub>、V<sub>15</sub>、V<sub>20</sub>、V<sub>25</sub>、V<sub>30</sub>、V<sub>35</sub>、V<sub>40</sub>、D<sub>mean</sub>如表3所示。可以看出,对于正常组织的低剂量部分(V<sub>5</sub>、V<sub>10</sub>),VMAT计划要低于dIMRT计划,其中V<sub>5</sub>差异具有统计学意义;但dIMRT计划的V<sub>15</sub>、V<sub>20</sub>、V<sub>25</sub>、V<sub>30</sub>、V<sub>35</sub>、V<sub>40</sub>、D<sub>mean</sub>均显著低于VMAT计划,差异具有统计学意义,因此造成VMAT计划正常组织的整体受照剂量相比dIMRT偏高。

2.5 MU和治疗出束时间的比较

MU和治疗出束时间的比较见表4所示。相比可知两种计划的MU和出束时间差异明显,VMAT计划比dIMRT计划单次照射的总MU平均减少了约59%,治疗出束时间平均减少了约60%,(P=0.000)。

2.6 剂量验证通过率的比较

两种计划的γ通过率VMAT为95.7%±0.5%,dIMRT为98.4%±0.7%,均达到了95%以上,满足治疗要求,但VMAT计划的通过率略低于dIMRT(P=0.000)。

3 讨论

近年来,调强技术发展日趋成熟,固定铅门技术在调强放疗中也有较多的研究应用。杨波等<sup>[12]</sup>在直肠癌调强放疗中的研究显示,相对于非固定铅门的分野治疗,固定铅门技术能有效减少子野数目和MU,缩短治疗时间;常晓斌等<sup>[13]</sup>研究了固定铅门技术在乳腺癌调强放疗中的应用,认为其能在保证靶区适形度和均匀性的前提下,明显地降低肺和心脏受照剂量。乳腺癌靶区体积适中,但非常贴近危及器官,且易受呼吸运动和锁骨上区复位重复性差的影响,固定铅门技术所显示的优势有助于更好地解决以上挑战。VMAT和dIMRT是目前两种主流的放疗照射技术,两者在乳腺癌的治疗中虽有较多研究<sup>[14-16]</sup>,但固定铅门模式下VMAT与dIMRT在乳腺癌根治术后放疗中的应用比较研究却鲜见报道。

本研究的结果表明固定铅门模式下,两种放疗技术均能满足临床处方要求,但剂量学存在着明显差异。VMAT计划的处方剂量线更加贴近靶区,107%处方剂量所占的体积即V<sub>107%</sub>相比dIMRT降低了约73%,而接受110%处方剂量照射的体积V<sub>110%</sub>的数值甚至接近零,说明VMAT计划几乎没有55 Gy以上的热点区域,而dIMRT计划还占有着相当一部分体积。这是因为相比VMAT技术,dIMRT只有固定、有限的出束方向,为了达到靶区的处方要求和保护贴近靶区的危及器官,剂量分布受优化条件限制而出现较大程度的不规则挤压,很容易在靶区内外产生高量、热点区域<sup>[17]</sup>。本研究结

表2 两种计划的危及器官剂量比较  
Tab.2 OAR dose comparison between two plans

OAR	Parameter	VMAT	dIMRT	t value	P value
Ipsilateral lung	V <sub>5</sub> /%	64.4±8.9	83.3±6.5	-4.941	0.000
	V <sub>10</sub> /%	47.1±9.1	67.6±6.1	-9.091	0.000
	V <sub>20</sub> /%	23.1±1.3	27.9±1.9	-7.853	0.000
	V <sub>30</sub> /%	16.8±1.9	16.3±1.4	1.609	0.124
	V <sub>40</sub> /%	11.1±1.6	9.7±1.5	5.533	0.000
	D <sub>mean</sub> /cGy	1 539.7±172.7	1 870.5±97.5	-9.045	0.000
Contralateral lung	V <sub>5</sub> /%	35.1±7.6	42.7±6.1	-10.997	0.008
	V <sub>10</sub> /%	10.4±5.2	12.6±6.1	-1.187	0.250
	V <sub>20</sub> /%	0.9±0.3	0.7±0.2	0.920	0.369
	D <sub>mean</sub> /cGy	572.1±145.3	618.5±89.3	-1.734	0.099
Heart	V <sub>20</sub> /%	9.3±6.7	21.4±10.2	-9.033	0.000
	V <sub>30</sub> /%	3.1±1.8	6.7±3.1	-5.419	0.000
	V <sub>40</sub> /%	1.3±1.2	1.8±1.7	-2.578	0.018
	D <sub>mean</sub> /cGy	1 071.1±312.2	1 505.7±283.4	-9.857	0.000
Contralateral mammary gland	D <sub>1</sub> /cGy	1 115.3±131.4	1 346.2±192.7	-1.182	0.013
	D <sub>mean</sub> /cGy	529.5±49.3	782.6±54.2	-2.351	0.000
Spine	D <sub>1</sub> /cGy	1 761.1±329.2	1 513.4±250.6	2.771	0.012
	D <sub>mean</sub> /cGy	522.9±129.6	685.6±118.9	-4.096	0.001
Caput humeri	V <sub>40</sub> /%	2.3±1.9	0.3±0.8	4.055	0.001
	D <sub>mean</sub> /cGy	1 637.7±258.2	1 447.8±199.7	3.029	0.005

OAR: Organs-at-risk

表3 两种计划的正常组织受照剂量比较  
Tab.3 Comparison of normal tissue dose between two plans

Normal tissue	VMAT	dIMRT	t value	P value
V <sub>5</sub> /%	41.6±3.9	45.1±5.3	-2.920	0.009
V <sub>10</sub> /%	25.2±2.3	25.8±3.9	-1.840	0.081
V <sub>15</sub> /%	18.7±1.9	16.7±1.7	4.828	0.000
V <sub>20</sub> /%	14.3±1.5	10.7±1.2	12.649	0.000
V <sub>25</sub> /%	11.3±1.3	7.4±0.8	16.876	0.000
V <sub>30</sub> /%	9.1±1.1	5.1±0.6	18.644	0.000
V <sub>35</sub> /%	6.9±0.8	3.5±0.4	19.182	0.000
V <sub>40</sub> /%	4.9±0.7	2.4±0.3	17.970	0.000
D <sub>mean</sub> /cGy	939.3±67.4	821.2±46.7	5.517	0.000

表4 两种计划的MU和出束时间的比较  
Tab.4 Comparison of monitor units and delivery time between two plans

Parameter	VMAT	dIMRT	t value	P value
Monitor unit/MU	659.8±76.1	1 597.9±151.1	-22.938	0.000
Delivery time/min	2.62±0.27	6.50±0.83	-20.429	0.000

果也显示,VMAT计划肺的整体受量显著降低,特别是患侧肺V<sub>5</sub>、V<sub>20</sub>分别低于dIMRT计划约22.7%、17.2%,低

剂量区域明显减少;而美国放射肿瘤学协会研究发现,V<sub>5</sub>、V<sub>20</sub>不仅与放射性肺炎的发生概率有关,而且与其严重程度明显相关<sup>[18]</sup>,提示VMAT计划对预防、降低放射性肺炎的发生率及其严重程度具有更大的优势。本研究中VMAT计划心脏受照的低剂量、高剂量体积均明显低于dIMRT计划,特别是对于心脏贴近靶区的左乳腺癌,在胸壁越薄,靶区弯度较大的情况下<sup>[19-20]</sup>,两者的差异更加明显。值得一提的是,本研究中正常组织Body的整体受量VMAT计划偏高,其原因可能是因VMAT的射野几乎跨越整个靶区,在机架旋转的同时几乎连



续出束,而dIMRT计划主要在切线野或接近切线野方向,因此导致正常组织照射体积整体增加,这与杨国姿等<sup>[21]</sup>的研究结果一致,另外肱骨头的剂量差异也是基于此。正常组织受量偏高有可能增加二次癌症复发的概率<sup>[22]</sup>,这是临床医师在选择VMAT技术时需要考虑的一个点。

本研究中VMAT计划的MU和治疗出束时间相比dIMRT均减少了将近三分之二,这是因为动态调强主要通过多叶准直器滑窗实现,治疗时其剂量率几乎固定不变,且其子野是很小很细的窄缝,要通过增加MU来达到处方剂量要求;而VMAT在机架、多叶准直器连续运动出束的同时,其剂量率也是连续变化的,因此VMAT计划的MU、治疗时间相比dIMRT势必大幅减少。另外,VMAT计划优化设计时可调节的自由度较多,包括多叶光栅、剂量率、机架旋转速度、弧数目等,相比dIMRT技术其调制能力明显增强,因此完成一个计划会相对更容易、花费的时间会相对更短。同样也正因VMAT技术的空间参数较多、调制过程复杂,造成VMAT计划的剂量验证通过率略低于dIMRT计划,但是都达到了标准以上。

总之,固定铅门模式下VMAT相比dIMRT具有明显优势,能提供更好的靶区剂量均匀性、降低主要危及器官肺和心脏的整体受照体积,并且大幅减少MU和缩短治疗时间,极大提高了工作效率,具有实际的临床意义和较大的应用价值。

## 【参考文献】

- [1] BUCHHOLZ T A. Radiotherapy and survival in breast cancer[J]. *Lancet*, 2011, 378(9804): 1680-1682.
- [2] VAN DE STEENE J, SOETE G, STORME G. Adjuvant radiotherapy for breast cancer significantly improves overall survival: the missing link[J]. *Radiother Oncol*, 2000, 55(3): 263-272.
- [3] AGRAWAL S. Late effects of cancer treatment in breast cancer survivors[J]. *South Asian J Cancer*, 2014, 3(2): 112-115.
- [4] FRAGKANDREA I, KOULOULIAS V, MAVRIDIS P, et al. Radiation induced pneumonitis following whole breast radiotherapy treatment in early breast cancer patients treated with conserving surgery: a single institution study[J]. *Hippokratia*, 2013, 17(3): 233-238.
- [5] DARBY S C, EWERTZ M, MCGALE P, et al. Risk of ischemic heart disease in women after radiotherapy for breast cancer[J]. *N Engl J Med*, 2013, 368(11): 987-998.
- [6] 钟鸣, 刘英霞, 翁剑华, 等. 乳腺癌腋窝淋巴结转移的危险因素[J]. *热带医学杂志*, 2018, 18(1): 43-46.  
ZHONG M, LIU Y X, WENG J H, et al. Risk factors for axillary lymph node metastasis in breast cancer[J]. *Journal of Tropical Medicine*, 2018(1): 43-46.
- [7] TAYLOR C W, MCGALE P, POVALL J M, et al. Estimating cardiac exposure from breast cancer radiotherapy in clinical practice[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2009, 73(4): 1061-1068.
- [8] QI X S, WHITE J, RABINOVITCH R, et al. Respiratory organ motion and dosimetric impact on breast and nodal irradiation[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2009, 78(2): 609-617.
- [9] QI X S, HU A, WANG K, et al. Respiration induced heart motion and indications of gated delivery for left-sided breast irradiation[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2012, 82(5): 1605-1611.
- [10] SRIVASTAVA S P, DAS I J, KUMAR A, et al. Dosimetry comparison of split field and fixed techniques for large target volume in the head and neck[J]. *Med Dosim*, 2011, 36(1): 6-9.
- [11] ICRU. Prescribing, recording, and reporting specification of photon-beam intensity-modulated radiation therapy (IMRT)[J]. *Journal of the ICRU*, 2010, 10(1): 23-29.
- [12] 杨波, 庞廷田, 孙显松, 等. 直肠癌调强放疗中固定铅门技术和分野技术的剂量学比较[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2012, 32(5): 509-511.  
YANG B, PANG T T, SUN X S, et al. Dosimetric comparison of split field and fixed jaw techniques for target volumes in the rectum cancer[J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2012, 32(5): 509-511.
- [13] 常晓斌, 吴湘阳, 冯涛, 等. 固定铅门调强技术对乳腺癌术后放疗治疗计划设计的作用[J]. *现代肿瘤学*, 2017, 25(3): 462-465.  
CHANG X B, WU X Y, 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.
- [14] PETRA M, POHL F. Treatment of left sided breast cancer for a patient with funnel chest: volumetric modulated arc therapy vs 3D-CRT with intensity-modulated radiotherapy[J]. *Med Dosim*, 2013, 38(1): 1-4.
- [15] POPESCU C C, OLIVOTTO I A, BECKHAM W A, 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*, 2013, 76(1): 287-295.
- [16] 张桂芳, 芦浩, 王传栋. 乳腺癌根治术后两种调强放疗模式的剂量学研究[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2011, 31(4): 456-459.  
ZHANG G F, LU H, WANG C D. Dosimetric comparison of two intensity modulated radiotherapy modes for breast cancer after radical mastectomy[J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2011, 31(4): 456-459.
- [17] 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.
- [18] AHAM M V, PURDY J A, EMAMI B, et al. Clinical dose volume histogram analysis for pneumonitis after 3D treatment for non small cell lung cancer (NSCLC)[J]. *Int J Radiat*, 1999, 45(2): 323-329.
- [19] KONG F M, KLEIN E E, BRADLEY J D, et al. The impact of central lung distance, maximum heart distance, and radiation technique on the volumetric dose of the lung and heart for intact breast radiation[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2010, 54(3): 963-971.
- [20] 叶威, 龚敏勇, 熊超. 乳腺癌根治术后VMAT技术对心脏受照剂量风险评估[J]. *实用癌症杂志* 2016, 31(2): 286-289.  
YE W, GONG M Y, XIONG C. Risk assessments of the heart dose from VMAT radiotherapy for post-mastectomy breast cancer[J]. *The Practical Journal of Cancer*, 2016, 31(2): 286-289.
- [21] 杨国姿, 潘振宇, 夏文明, 等. 容积旋转调强与固定野动态调强在宫颈癌术后放疗的剂量学比较[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2014, 34(1): 37-38.  
YANG G Z, PAN Z Y, XIA W M, et al. Dosimetric comparison and clinical application of RapidArc and intensity-modulated radiotherapy for postoperative radiotherapy of cervical cancer[J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2014, 34(1): 37-38.
- [22] 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.

(编辑:谭斯允)