

## 肺癌固定剂量率旋转调强和容积旋转调强的剂量学分析

龙雨松, 谭军文, 贺先桃, 梁卫学, 王占宇, 李钢, 冯永富  
广西医科大学第四附属医院肿瘤科, 广西 柳州 545005

**【摘要】目的:**通过对肺癌固定剂量率旋转调强放疗(IMAT)计划和容积旋转调强放疗(VMAT)计划的剂量学分析,为临床应用肺癌VMAT放疗剂量率方式的选取提供参考。**方法:**取11例肺癌患者,用RayStation计划系统设计IMAT和VMAT计划,比较其剂量学、机器跳数(MU)和治疗时间的差异。**结果:**(1)11例肺癌患者的双弧IMAT和VMAT计划均能满足临床要求,IMAT和VMAT计划的靶区最小剂量 $D_{98\%}$ 、最大剂量 $D_{2\%}$ 、平均剂量( $D_{mean}$ )、靶区均匀性指数、靶区适形度指数相近,无明显差异。靶区覆盖率VMAT计划好于IMAT计划。(2)危及器官受量:全肺的 $V_5$ 、 $V_{10}$ 、 $V_{20}$ 、 $D_{mean}$ 和心脏的 $V_{20}$ ,VMAT计划比IMAT计划低。全肺的 $V_{30}$ 、心脏的 $V_{30}$ 、脊髓的最大剂量 $D_{1\%}$ ,两种计划之间无明显差异。(3)正常组织在低剂量部分 $V_5$ 、 $V_{10}$ 、 $V_{15}$ 和 $D_{mean}$ ,VMAT计划低于IMAT计划; $V_{20}$ 、 $V_{25}$ 两种计划无明显差异;接近处方剂量部分 $V_{30}$ 、 $V_{35}$ 、 $V_{40}$ ,VMAT计划高于IMAT计划。(4)出束时间和MU:VMAT计划相比于IMAT计划,治疗出束时间大大减少,VMAT计划出束时间仅为IMAT计划出束时间的62%。两者的MU无明显差异。(5)两种计划的剂量验证通过率均大于95%,达到98.72%以上,能满足治疗要求。VMAT计划的剂量验证通过率略低于IMAT计划,相差约0.44%。**结论:**VMAT技术相较于IMAT技术,其计划调制能力更强,可得到更优的靶区剂量分布,提高治疗效率,可以更好地保护危及器官,尤其是减少肺的低剂量照射体积。因此,在肺癌的旋转调强放射治疗中,VMAT技术相较于IMAT技术存在较大的优势。

**【关键词】**肺癌;容积旋转调强放疗;旋转调强放疗;固定剂量率

**【中图分类号】**R815.6

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2018)02-0176-07

## Dosimetric analysis of intensity-modulated arc radiotherapy with fixed dose rate *versus* volumetric modulated arc therapy for lung cancer

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

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

**Abstract: Objective** To analyze the dosimetric differences between intensity-modulated arc radiotherapy (IMAT) with fix dose rate and volumetric modulated arc radiotherapy (VMAT) for lung cancer, and provide reference for the selection of dose rate mode of VMAT for lung cancer. **Methods** IMAT and VMAT plans were designed for 11 patients with lung cancer using RayStation treatment planning system, and the differences in dosimetric parameters, monitor unit and delivery time were compared. **Results** Both dual arc IMAT and VMAT plans for lung cancer in 11 patients met the clinical requirements, and no significant differences were found in the minimum dose  $D_{98\%}$ , the maximum dose  $D_{2\%}$ , the average dose  $D_{mean}$ , homogeneity index and conformal index of target areas. However, the target coverage rate of VMAT plan was better than that of IMAT plan. The  $V_5$ ,  $V_{10}$ ,  $V_{20}$ ,  $D_{mean}$  of whole lung and the  $V_{20}$  of heart in VMAT were lower than those in IMAT plan, and the differences in the  $V_{30}$  of whole lung, the  $V_{30}$  of heart and the  $D_{1\%}$  of spine between IMAT and VMAT plans were not obvious. Compared with IMAT plan, VMAT plan had lower  $V_5$ ,  $V_{10}$  and  $V_{15}$  of normal tissues in the low-dose area, and normal tissues- $D_{mean}$ , but higher  $V_{30}$ ,  $V_{35}$ ,  $V_{40}$  of normal tissues; two plans had no significant differences in the  $V_{20}$  and  $V_{25}$  of normal tissues. The delivery time of VMAT plan was greatly reduced, only 62% of that of IMAT plan. Two plans had similar monitor unit, without statistical differences. Though the dose passing rate of VMAT plan was slightly lower than that of IMAT plan, with a difference of about 0.44%, both the dose passing rates of the two plans were more than 98.72%, meeting treatment requirements. **Conclusion** Compared with IMAT, VMAT for lung cancer has a stronger plan modulation ability, can obtain better target dose distribution, improve the efficiency of treatment, and protect the organs-at-risk better, especially reducing the low-dose irradiation volume of lung. VMAT can bring more benefits to patients with lung cancer. **Keywords:** lung cancer; volumetric modulated arc therapy; intensity-modulated arc radiotherapy; fixed dose rate

**【收稿日期】**2017-10-27

**【作者简介】**龙雨松,工程师,主要从事肿瘤放射物理学方面的研究,E-mail: liuzhouie@126.com

**【通信作者】**王占宇,工程师,主要从事肿瘤放射治疗物理和技术方面的研究,E-mail: wzyliuzhou@163.com

## 前言

肺癌是常见的恶性肿瘤之一,在大多数发达国家中,肺癌的发病率及死亡率在男性常见恶性肿瘤中占首位,在女性常见恶性肿瘤中占第2或第3位<sup>[1]</sup>。到2025年中国的肺癌年发病人数将超过100万,为世界“第一肺癌大国”<sup>[2]</sup>。随着放射治疗技术的飞速发展,放射治疗在肺癌治疗中占据越来越重要的地位<sup>[3]</sup>。旋转调强放疗技术是在固定野调强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,旋转调强放疗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(MU)<sup>[4-10]</sup>,能够增加肿瘤控制率,减少对正常组织毒害性,提高治疗效率<sup>[11]</sup>。

在旋转调强放疗中,出束方式的选择对靶区剂量分布、出束时间、MU等均有影响。当前常用的两种旋转调强出束方式分别为:剂量率在机架运动过程中固定的旋转调强放疗(Intensity-Modulated Arc Radiotherapy, IMAT)和剂量率在机架运动过程中可改变的容积旋转调强放疗(Volumetric Modulate Arc Therapy, VMAT),后者对加速器软硬件和计划系统的要求更高。目前,对肺癌固定野调强(Intensity-Modulated Radiotherapy, IMRT)和VMAT剂量学的比较已经有较多的研究,普遍认为VMAT技术能在较短时间内达到与IMRT相当或更优的治疗效果<sup>[12-13]</sup>。邵凯南等<sup>[12]</sup>比较了胸部VMAT和静态调强放射治疗(sIMRT)两种计划,VMAT计划具有更好的靶区适形度和更高的执行效率,肺部的低剂量区 $V_5$ 略高。Jiang等<sup>[13]</sup>分析比较了肺癌的IMRT和SA/PA-VMAT(单弧/部分弧)计划,SA/PA-VMAT计划和IMRT计划相比,肺的 $V_{20}$ 、 $V_{30}$ 和平均剂量( $D_{mean}$ )更低,且治疗效率更高,SA-VMAT(单弧)计划的靶区覆盖率更好,但肺的低剂量区 $V_5$ 、 $V_{10}$ 略高,PA-VMAT(部分弧)计划可进一步降低肺的 $V_{20}$ 、 $V_{30}$ 和 $D_{mean}$ 。

目前VMAT技术与IMAT技术的剂量学比对的文献仍较少。张若辉等<sup>[10]</sup>通过在Varian Clinical 23IX常规直线加速器与Elekta Synergy<sup>TM</sup>加速器上分别设计食管癌的IMAT和VMAT计划发现,IMAT计划在靶区覆盖、适形度和均匀性上要等于或优于VMAT计划,最大优势在于有很高的治疗效率,能大大缩短治疗时间,提高靶区生物剂量。目前未见肺癌IMAT和VMAT之间剂量学比较的相关报道。本研究基于Varian Trilogy直线加速器,采用RayStation计划系统

对肺癌患者的同一定位CT图像分别设计IMAT和VMAT计划,分析两种计划的质量和执行效率,为采用旋转调强治疗肺癌时,选取合适的出束方式提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 病例选择

选取2016年1月~2017年9月广西医科大学第四附属医院肿瘤科肺癌患者11例,年龄43~78岁,中位年龄58岁,患者均在本院Varian Trilogy直线加速器上接受旋转调强放射治疗。

### 1.2 模拟定位

定位时,患者仰卧,双手合抱举至头顶,交待病人平稳呼吸,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,扫描范围为颈椎2至肾上腺水平,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

由放疗医师勾画肿瘤靶区(GTV)、临床靶区(CTV),将CTV在三维方向外扩5~8 mm得到计划靶区(PTV),并勾画双肺、心脏、脊髓等危及器官。处方剂量均为:PTV接受剂量6 000 cGy(30次)照射的体积 $\geq 95\%$ ,PTV接受110%处方剂量的体积小于5%,靶区外无剂量热点(高于110%处方剂量的区域),CTV内无剂量冷点(低于95%处方剂量的区域);危及器官限量均为:双肺 $V_{20} < 28\%$ (接受20 Gy剂量照射肺的体积小于28%,以此类推),心脏 $V_{30} < 50\%$ ,脊髓 $D_{max} < 40$  Gy(接受的最大照射剂量小于40 Gy)。

### 1.4 计划设计

对每个患者的同一CT图像及CTV,采用相同的处方剂量6 000 cGy及相同的优化目标参数,用RayStation 4.7.5计划系统分别设计IMAT和VMAT计划。计划均采用6 MV X射线,IMAT计划每一个弧的剂量率选取是从100~600 MU/min中每隔100 MU/min为一档中自动选取合适的一档作为该弧的剂量率,VMAT计划每一个弧的剂量率在100~600 MU/min范围内按照计划需要任意变化,两种计划的机架转速由计划系统自动选取某一固定值作为该弧的机架转速。两种计划均采用两个半弧一个全弧的设计(多弧共面照射,共计两个全弧),机架开始由0°顺时针转至179°,准直器角度为20°,再由179°逆时针转至181°,准直器角度为340°,最后顺时针由181°转回0°,准直器角度改为20°;两种计划均采用相同的参数进行优化以减少人为干扰,采用筒串卷积叠加算法每3°一个控制点,单次优化迭

代70次。经RayStation自动优化后,将所得计划进行分析比较。

### 1.5 评估方法

比较优化后所得IMAT和VMAT计划的剂量分布图和分辨率为1 cGy的剂量体积直方图(DVH),并将IMAT和VMAT计划所得结果进行统计学分析。

PTV剂量评估:根据ICRU 83号报告<sup>[14]</sup>,比较最大剂量 $D_{2\%}$ (2% PTV体积受到的最大照射剂量,以此类推)、 $D_{mean}$ 、最小剂量 $D_{98\%}$ 、靶区覆盖率(处方剂量包围的PTV体积与PTV总体积的比值);靶区适形度指数(CI): $CI = (PTV \text{ 接受的处方剂量体积} / PTV \text{ 体积}) \times (PTV \text{ 接受的处方剂量体积} / \text{全身接受处方剂量的体积})$ ,CI值在0~1之间,适形度越高CI值越接近1;靶区均匀性指数(HI): $HI = (D_{2\%} - D_{98\%}) / D_{50\%}$ ,靶区均匀性越好,HI值越小。

危及器官剂量评估:用 $V_5$ (受到5 Gy照射剂量的体积,以此类推)、 $V_{10}$ 、 $V_{20}$ 、 $V_{30}$ 、 $D_{mean}$ 来评估全肺的受照情况,用 $V_{20}$ 、 $V_{30}$ 、 $D_{mean}$ 来评估心脏受量,用 $D_i$ 来评估脊髓最大剂量。

正常组织受照剂量比较:比较两种计划中,Body的 $V_5$ 、 $V_{10}$ 、 $V_{15}$ 、 $V_{20}$ 、 $V_{25}$ 、 $V_{30}$ 、 $V_{35}$ 、 $V_{40}$ 。

出束时间及MU:优化完成之后两种计划的机器总跳数MU及两种计划在Varian Trilogy直线加速器的总出束时间T。

采用PTW公司的二维电离室矩阵OCTAVIUS Detector 1500和OCTAVIUS 4D模体对11例病人的

IMAT和VMAT计划进行调强剂量验证,采用max dose评判方式计算通过率按Gamma通过率3 mm/3%的标准。

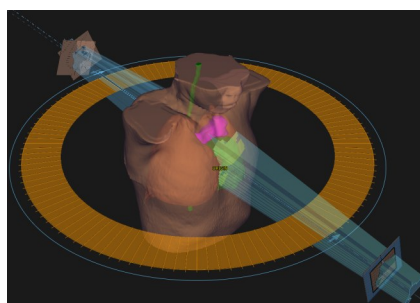
### 1.6 统计学方法

采用SPSS 18.0统计软件包进行数据的统计学分析,计量资料用均数±标准差表示,IMAT和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、危及器官剂量、剂量验证通过率、MU及出束时间进行比对, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

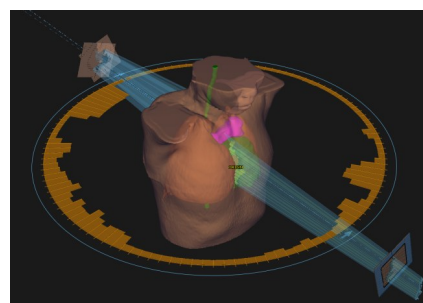
## 2 结果

### 2.1 剂量分布图及DVH

用RayStation计划系统分别设计的IMAT和VMAT计划均能满足处方要求,其中1例病例剂量分布图和每个控制点剂量权重图(包含横断面、矢状位、冠状位)如图1和图2所示,DVH如图3所示。Body为CT定位时整个扫描区域的躯体部分,PTV 6 000表示处方剂量为6 000 cGy的靶区,主要危及器官为Lung\_all(全肺)、Heart(心脏)、Spine(脊髓)。由图2可知,虽然两者靶区剂量分布区别较小,但低剂量区域2 000、3 000 cGy的分布区域有所差别。由图3可以得出,IMAT和VMAT计划的PTV与各危及器官均达到处方要求,但两种计划之间存在一定的差别,如Body、Lung\_all在低剂量区域,VMAT计划明显优于IMAT计划,因此需进一步统计学分析。



a: Control point weight distribution in IMAT plan



b: Control point weight distribution in VMAT plans

图1 IMAT计划和VMAT计划的控制点剂量权重分布

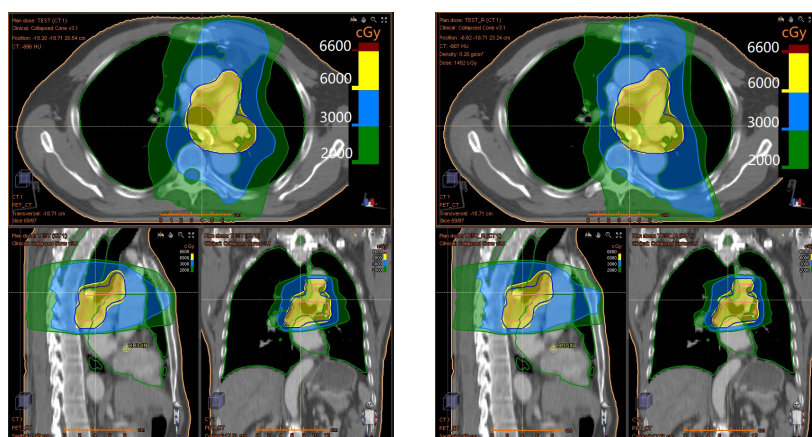
Fig.1 Control point weight distribution in IMAT and VMAT plans

IMAT: Intensity-modulated arc radiotherapy; VMAT: Volumetric modulate arc therapy

### 2.2 靶区剂量比较

IMAT和VMAT计划所得PTV的最大剂量 $D_{2\%}$ 、 $D_{mean}$ 、最小剂量 $D_{98\%}$ 的结果如图4所示,靶区覆盖率如图5所示。分别对IMAT和VMAT计划所得PTV的最小剂量 $D_{98\%}$ 、最大剂量 $D_{2\%}$ 、 $D_{mean}$ 、靶区覆盖率、CI、HI进行统计学比较,结果见表1。两种计划均能满足

处方剂量要求,由表1可知,IMAT和VMAT计划的靶区最小剂量 $D_{98\%}$ 、最大剂量 $D_{2\%}$ 、 $D_{mean}$ 、HI、CI相近,无明显差异。靶区覆盖率VMAT计划好于IMAT计划,差异有统计学意义。结果表明,IMAT和VMAT计划靶区剂量两者相近,VMAT计划在靶区覆盖率上略有优势。



a: Radiation dose map in IMAT plans

b: Radiation dose map in VMAT plans

图2 IMAT计划和VMAT计划的剂量分布图

Fig.2 Radiation dose map in IMAT and VMAT plans

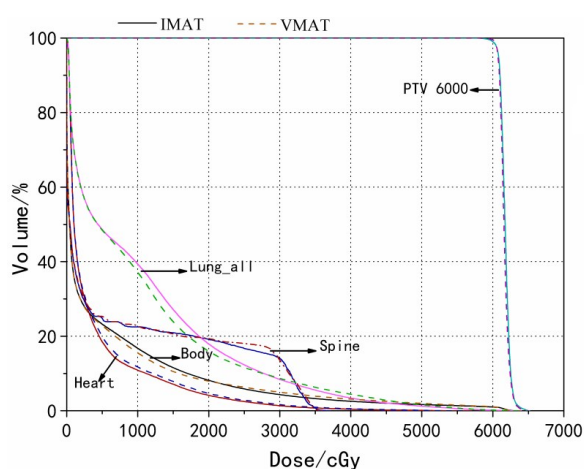
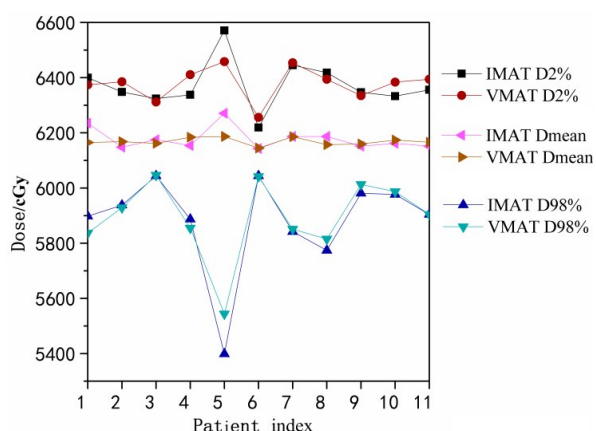


图3 IMAT和VMAT计划DVH图对比

Fig.3 Dose-volume histogram comparison between IMAT and VMAT plans

图4 IMAT和VMAT计划的 $D_{2\%}$ 、 $D_{mean}$ 和 $D_{98\%}$ 比较Fig.4 Comparison of  $D_{2\%}$ ,  $D_{mean}$  and  $D_{98\%}$  between IMAT and VMAT plans

### 2.3 危及器官的剂量比较

两种计划中,危及器官全肺、心脏、脊髓的剂量

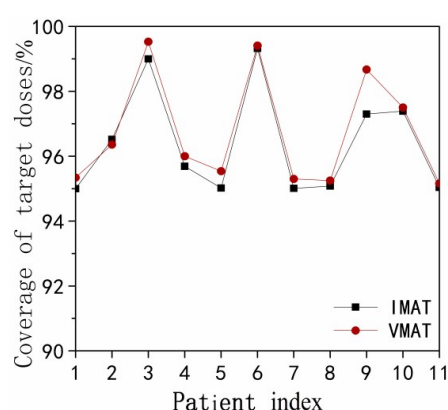


图5 IMAT和VMAT计划的靶区覆盖率

Fig.5 Target coverage rate in IMAT and VMAT plans

结果见表2。两种计划中,危及器官全肺的 $V_5$ 、 $V_{10}$ 、 $V_{20}$ 、 $D_{mean}$ 和心脏的 $V_{20}$ ,VMAT计划比IMAT计划低,差异有统计学意义。全肺的 $V_{30}$ 、心脏的 $V_{30}$ 和脊髓的最大剂量 $D_{1\%}$ ,两种计划之间均无明显差异。结果表明,在危及器官的保护方面,VMAT计划比IMAT计划更具优势。

### 2.4 正常组织受照剂量比较

两种计划中,正常组织 $V_5$ 、 $V_{10}$ 、 $V_{15}$ 、 $V_{20}$ 、 $V_{25}$ 、 $V_{30}$ 、 $V_{35}$ 、 $V_{40}$ 结果见表3。正常组织在低剂量部分 $V_5$ 、 $V_{10}$ 、 $V_{15}$ 和 $D_{mean}$ ,VMAT计划低于IMAT计划,差异具有统计学意义; $V_{20}$ 、 $V_{25}$ 两种计划无明显差异;接近处方剂量部分 $V_{30}$ 、 $V_{35}$ 、 $V_{40}$ ,VMAT计划高于IMAT计划,差异有统计学意义。结果表明,VMAT与IMAT计划相比,正常组织的总体受量降低,有利于降低二次癌症的发生率;低剂量区减少,但30 Gy以上的剂量区略有增加。

### 2.5 出束时间及MU比较

两种计划的出束时间及MU比较见表4。由表4

表 1 两种计划的靶区剂量学比较(  $\bar{x} \pm s$  )

Tab.1 Dosimetric comparison of target areas between IMAT and VMAT plans (Mean±SD)

Plans	D <sub>98%</sub> /cGy	D <sub>2%</sub> /cGy	D <sub>mean</sub> /cGy	Target coverage rate/%	CI	HI
IMAT	5 880.7±179.4	6 372.6±88.1	6 178.7±40.5	96.40±1.64	0.790±0.046	0.079 2±0.041
VMAT	5 893.1±143.1	6 377.9±59.1	6 168.5±13.2	96.73±1.73	0.789±0.048	0.078 5±0.030
P value	0.449	0.740	0.381	0.019	0.882	0.847

CI: Conformal index; HI: Homogeneity index

表 2 两种计划危及器官的剂量学比较(  $\bar{x} \pm s$  )

Tab.2 Dosimetric comparison of organs-at-risk between IMAT and VMAT plans (Mean±SD)

Organs-at-risk	Parameters	IMAT plan	VMAT plan	P value
Lung_all	V <sub>5</sub> /%	53.65±8.44	50.14±10.55	0.020
	V <sub>10</sub> /%	38.44±7.40	35.49±8.54	0.000
	V <sub>20</sub> /%	15.98±3.87	14.98±3.25	0.042
	V <sub>30</sub> /%	7.61±2.40	7.77±2.31	0.311
	D <sub>mean</sub> /cGy	1 043.4±195.6	1 003.5±203.9	0.000
Heart	V <sub>20</sub> /%	21.11±14.44	20.08±13.81	0.044
	V <sub>30</sub> /%	14.52±11.12	14.77±10.67	0.511
	D <sub>mean</sub> /cGy	1 063.3±669.7	1 042.9±661.7	0.209
Spine	D <sub>1%</sub> /cGy	3 369.6±723.9	3 380.3±365.7	0.931

表 3 两种计划正常组织(Body)的剂量学比较(  $\bar{x} \pm s$  )

Tab.3 Dosimetric comparison of the normal tissue (Body) between IMAT and VMAT plans (Mean±SD)

Plans	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> /cGy
IMAT	23.36±3.81	15.71±2.72	10.82±2.47	7.73±2.27	5.77±2.02	4.37±1.71	3.33±1.37	2.55±1.02	500.9±103.3
VMAT	21.97±4.03	14.70±2.65	10.25±1.96	7.60±1.83	5.89±1.82	4.63±1.70	3.62±1.48	2.83±1.21	490.9±100.2
P value	0.006	0.001	0.035	0.374	0.196	0.002	0.003	0.006	0.001

可知,VMAT 计划相比于 IMAT 计划,治疗出束时间大大减少,VMAT 计划出束时间仅为 IMAT 计划出束时间的 62%。两者的 MU 无明显差异。

2.6 两种计划的剂量验证通过率比较

11 例病人剂量验证通过率的结果如表 5 所示。

表 4 两种计划 MU 及出束时间 T 比较(  $\bar{x} \pm s$  )

Tab.4 Comparison of monitor unit and delivery time between IMAT and VMAT plans (Mean±SD)

Parameters	IMAT	VMAT	P value
Delivery time/min	4.79±1.09	2.97±0.80	0.001
Monitor unit/MU	604.62±164.37	588.42±99.81	0.654

由表 5 可知,两种计划的剂量验证通过率均大于 95%,都能满足治疗要求。VMAT 计划的剂量验证通过率略低于 IMAT 计划,相差约 0.44%,有统计学意义。

3 讨论

11 例肺癌患者在同一计划系统(RayStation)上,针对同一直线加速器(Varian Trilogy)分别设计的固定剂量率的 IMAT 计划和可变剂量率的 VMAT 计划均能满足临床需要。VMAT 相较于 IMAT 计划,其在靶区覆盖率和危及器官的保护上更具优势,其原因可能是 VMAT 技术与 IMAT 技术相比,增加了剂量率调控,其调制能力更强,在弧数目相同的条件下,可

表5 两种计划剂量验证通过率比较(%)

Tab.5 Comparison of dose passing rate between IMAT and VMAT plans (%)

Plans	No. of patient											Averages	P value
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
IMAT	99.3	98.7	99.9	99.2	98.3	99.6	98.9	99.0	99.7	99.8	98.4	99.16±0.56	0.050
VMAT	98.8	98.4	99.4	98.3	99.6	98.6	97.8	98.5	99.0	99.3	98.3	98.72±0.55	0.050

以达到更优的剂量分布。在正常组织受照方面, VMAT技术的正常组织平均受量更低,说明在剂量率可变的条件下配合MLC运动,和仅靠MLC运动相比,X射线更有选择性地从不同角度入射,减少了正常组织的受量;VMAT技术正常组织的低剂量区域减少而中高剂量区域增加,其原因可能是VMAT技术能够更好地避开肺、心脏等危及器官,使剂量更集中地从其他非要害区域入射,而造成低剂量区减少,中高剂量区略有增加。VMAT技术能够减少38%的出束时间,这与其高效的出束方式有关,它可以在合适的角度通过提高剂量率来获得更高的输出剂量,而IMAT技术则是在剂量率不变的情况下,通过MLC运动遮挡来保护危及器官,而电动多叶光栅的运动速度是有限的,从而造成治疗效率下降。在采用呼吸门控时,无论是自由呼吸门控技术,还是深吸气屏气的门控技术,更高的治疗效率都会大大减少治疗时间,对于深吸气屏气的门控技术,更少的治疗时间还将减少病人的屏息次数,提高位置重复性和患者舒适度<sup>[15]</sup>。两种计划的剂量验证通过率相比,VMAT技术略低于IMAT技术,相差约为0.44%,VMAT技术相对于IMAT技术其调制过程更为复杂,从而导致剂量通过率略有下降,但VMAT技术的通过率仍达到98.72%,远超过剂量通过率的标准(通过率≥95%)。该结果与张若辉等<sup>[10]</sup>研究结果有较大差异,原因可能是本研究采用了同一计划系统(RayStation)上,针对同一直线加速器(Varian Trilogy),与其针对不同加速器设计VMAT和IMAT计划存在差别;其次本研究VMAT技术采用的剂量率为在100~600 MU/min内按照计划需要任意变化,而他采用了阶梯式可变剂量率方式,共7个剂量率级别(分别为400、200、100、50、25、12和6 MU/min),在治疗过程中剂量率根据计划要求在7个剂量率级别间跳变,两者有所区别。

VMAT技术相较于IMAT技术,其计划调制能力更强,可得到更优的靶区剂量分布,提高治疗效率,可以更好地保护危及器官,尤其是减少肺的低剂量照射体积, $V_5$ 下降3.51%, $V_{10}$ 下降2.95%, $V_{20}$ 下降1%, $D_{mean}$ 下降约40 cGy。邵凯南等<sup>[12]</sup>研究结果为VMAT

比sIMRT计划肺的 $V_{20}$ 减少2.35%。Jiang等<sup>[13]</sup>报道结果为单弧VMAT比IMRT计划肺的 $V_{20}$ 减少4.6%,部分弧VMAT比IMRT计划肺的 $V_{20}$ 减少5.4%,因此VMAT计划可能对降低肺的 $V_{20}$ 有一定的优势,且IMAT与VMAT的差距比sIMRT和VMAT的差距要小。有文献<sup>[14,16-19]</sup>报道肺的 $V_5$ 、 $V_{10}$ 、 $V_{20}$ 、 $D_{mean}$ 与放射性肺炎的发生率息息相关,尤其是 $V_{20}$ ,因此,在肺癌的旋转调强放射治疗中,VMAT技术相较于IMAT技术存在较大的优势,但由于VMAT技术对设备和加速器质控的要求更高,这将给我们带来更多的挑战。另外,VMAT技术和IMAT技术的临床效果仍需长期、动态观察。

## 【参考文献】

- [1] PARKIN D M, BRAY F, FERLAY J, et al. Estimating the world cancer burden: globocan 2000[J]. Int J Cancer, 2001, 94(2): 153-156.
- [2] 柔倩. 15例非小细胞肺癌调强计划与IGRT计划剂量学比较研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆医科大学, 2013.  
ROU Q. Fifteen patients with no small cells lung cancer intensity-modulated planning and IGRT planning dosimetry comparative study [D]. Urumqi: Xinjiang Medical University, 2013.
- [3] 徐利明. 低剂量照射区体积与放射性肺损伤关系前瞻性研究[D]. 天津: 天津医科大学, 2010.  
XU L M. Low dose irradiated volume and radiation induced lung injury of prospective study [D]. Tianjin: Tianjin Medical University, 2010.
- [4] 李丹明, 王黎, 王沛沛, 等. 适形调强与容积旋转调强技术对局部晚期非小细胞肺癌临床效果比较[J]. 中国肿瘤, 2016, 25(9): 79-83.  
LI D M, WANG L, WANG P P, et al. Comparison of clinical effect of step-and-shoot intensity modulated radiotherapy and volumetric modulated arc therapy for locally advanced non-small cell cancer[J]. China Cancer, 2016, 25(9): 79-83.
- [5] 洪福. 胸部肿瘤容积旋转调强与静态调强放疗的剂量学比较[D]. 合肥: 安徽医科大学, 2014.  
HONG F. Dosimetric comparison between volumetric modulated arc therapy and static intensity modulated radiotherapy for thoracic neoplasms[D]. Hefei: Anhui Medical University, 2014.
- [6] 孙小梅, 夏文明, 姜新, 等. 局部晚期胰腺癌容积旋转调强与五野调强放疗的剂量学比较[J]. 吉林大学学报(医学版), 2017, 43(2): 365-368.  
SUN X M, XIA W M, JIANG X, et al. Comparison of dosimetry between RapidArc and 5F-IMRT in treatment of locally advanced pancreatic carcinoma [J]. Journal of Jilin University (Medicine Edition), 2017, 43(2): 365-368.

- [7] 杨金磊, 刘博宇, 路双臣, 等. Monaco 与 Pinnacle 计划在肺癌容积旋转调强计划中的比较[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2015, 35(2): 119-122.
- YANG J L, LIU B Y, LU S C, et al. Comparison of Monaco and Pinnacle treatment planning systems in volumetric modulated arc therapy optimization for lung cancer [J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2015, 35(2): 119-122.
- [8] 弓健, 余荣, 吴昊, 等. 中心型肺癌快速旋转调强与固定射野动态调强放疗的剂量学比较[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2010, 30(4): 448-451.
- GONG J, YU R, WU H, et al. Dosimetric comparison between RapidArc and fixed gantry dynamic IMRT for central-type lung cancer radiotherapy [J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2010, 30(4): 448-451.
- [9] RAO M, YANG W, CHEN F, et al. Comparison of Elekta VMAT with helical tomotherapy and fixed field IMRT: plan quality, delivery efficiency and accuracy[J]. Med Phys, 2010, 7(3): 1350-1359.
- [10] 张若辉, 樊晓妹, 白文文, 等. 食管癌两种旋转调强放疗技术剂量学对比研究[J]. 国际肿瘤学杂志, 2014, 41(10): 785-788.
- ZHANG R H, FAN X M, BAI W W, et al. Dosimetric study of two intensity-modulated arc radiotherapy in esophageal cancer[J]. Journal of International Oncology, 2014, 41(10): 785-788.
- [11] OTTO K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc[J]. Med Phys, 2008, 35(1): 310-317.
- [12] 邵凯南, 杜锋磊, 李剑龙. RayArc 在胸部旋转调强放射治疗计划设计中的应用[J]. 中国医学物理学杂志, 2017, 34(2): 131-138.
- SHAO K N, DU F L, LI J L. Application of RayArc in volumetric modulated arc therapy planning of chest cancer[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2017, 34(2): 131-138.
- [13] JIANG X, LI T, LIU Y, et al. Planning analysis for locally advanced lung cancer: dosimetric and efficiency comparisons between intensity-modulated radiotherapy (IMRT), single-arc/partial-arc volumetric modulated arc therapy (SA/PA-VMAT)[J]. Radiat Oncol, 2011, 6(1): 140.
- [14] YORKE E D, ACKSON A, OSENZWEIG K E, 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, 2004, 60(1): 672-682.
- [15] 周琼. 呼吸门控系统 在肺癌放射治疗中的应用研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2015.
- ZHOU Q. The study of respiratory gating on lung cancer radiotherapy [D]. Hengyang: University of South China, 2015.
- [16] GRAHAM M V. Predicting radiation response[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 1997, 39(3): 561-562.
- [17] WANG S, LIAO Z, VAPORCIYAN A A, et al. Investigation of clinical and dosimetric factors associated with postoperative pulmonary complications in esophageal cancer patients treated with concurrent chemoradiotherapy followed by surgery[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2006, 64(3): 692-699.
- [18] 王彦, 李志强, 钟毓, 等. 螺旋断层放疗模式下非小细胞肺癌急性重度放射性食管炎的相关因素[J]. 实用医学杂志, 2017, 33(18): 3035-3039.
- WANG Y, LI Z Q, ZHONG Y, et al. Impact of dose volume parameters and clinical factors on severe acute radiation-induced esophagitis for NSCLC patients treated with tomotherapy[J]. The Journal of Practical Medicine, 2017, 33(18): 3035-3039.
- [19] MARKS L B, BENTZEN S M, DEASY J O, et al. Radiation dose-volume effects in the lung[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2010, 76(3): S70-S76.

(编辑:陈丽霞)