

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2020.02.001

医学放射物理

## 5种铅门X轴固定技术在鼻咽癌容积旋转调强放疗中的剂量学比较

吴凡<sup>1</sup>,郎锦义<sup>1</sup>,许敬辉<sup>1</sup>,袁佳薇<sup>2</sup>,康盛伟<sup>1</sup>,陈亚正<sup>1</sup>,吴骏翔<sup>1</sup>

1. 电子科技大学医学院附属肿瘤医院四川省肿瘤医院放疗中心/放射肿瘤学四川省重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 四川省科学城医院肿瘤科, 四川 绵阳 621900

**【摘要】目的:**比较鼻咽癌容积旋转调强(VMAT)计划设计中X轴方向不同铅门大小的剂量学差异,探讨鼻咽癌VMAT设计中最优的铅门固定大小。**方法:**在Eclipse 11.0计划系统中采用5种铅门固定方法分别对10例鼻咽癌患者设计放疗计划,比较5种计划得到的靶区和危及器官的剂量学参数以及机器跳数。采用SPSS 23.0软件对数据进行配对 $t$ 检验分析。**结果:**5种固定铅门技术得到的靶区 $D_{95}$ 、 $D_{mean}$ 和HI等剂量学参数均无明显差异( $P>0.05$ ),铅门在X2方向全关(FJ<sub>1</sub>)计划组的CI好于其他计划组( $t=-2.97\sim-1.06$ ,  $P<0.05$ );FJ<sub>1</sub>计划组得到的脊髓 $D_{max}$ 、左右侧腮腺、喉以及口咽的 $V_{30}$ 和 $D_{mean}$ 等剂量学参数均优于其他计划组( $t=-5.83\sim-1.14$ ,  $P<0.05$ ),而对于脑干、耳蜗和颞叶等器官,5种固定铅门技术无明显差异( $t=-0.99\sim-2.99$ ,  $P>0.05$ );FJ<sub>1</sub>计划组的机器跳数高于其他计划组( $t=8.15\sim8.86$ ,  $P<0.05$ )。**结论:**5种铅门固定技术均能满足临床要求,而FJ<sub>1</sub>计划组能够更好地降低危及器官照射剂量,但同时增加了机器跳数,增加了照射时间;而铅门在X2方向从半开到全关(FJ<sub>2</sub>)计划组相比FJ<sub>1</sub>计划组对于器官的保护较差,但提高了治疗效率。

**【关键词】**鼻咽癌;铅门固定技术;容积旋转调强;剂量学

**【中图分类号】**R815;R312

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2020)02-0133-05

## Dosimetric study of 5 fixed-jaw techniques in volumetric modulated arc therapy for nasopharyngeal carcinoma

WU Fan<sup>1</sup>, LANG Jinyi<sup>1</sup>, XU Jinghui<sup>1</sup>, YUAN Jiawei<sup>2</sup>, KANG Shengwei<sup>1</sup>, CHEN Yazheng<sup>1</sup>, WU Junxiang<sup>1</sup>

1. Sichuan Key Laboratory of Radiation Oncology/Radiation Oncology Center, Sichuan Cancer Hospital, School of Medicine, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610041, China; 2. Department of Oncology, Sichuan Science City Hospital, Mianyang 621900, China

**Abstract: Objective** To compare dosimetric differences of X-axis directional fixed-jaw techniques in volumetric modulated arc therapy (VMAT) for nasopharyngeal carcinoma (NPC) for investigating the optimal fixed-jaw scheme. **Methods** In Eclipse 11.0 treatment planning system, 5 fixed-jaw techniques were used to design radiotherapy plans for 10 NPC patients. The differences in dosimetric parameters of target areas and organs-at-risk as well as monitor units were compared among 5 plans, and SPSS 23.0 software was used to perform paired sample  $t$ -test on the obtained data. **Results** There was no significant difference among 5 plans in the  $D_{mean}$ ,  $D_{95}$  and homogeneity index of target areas ( $P>0.05$ ), but the conformity index in FJ<sub>1</sub> plan in which the jaw was fully closed in X2 direction was better than that in other fixed-jaw techniques ( $t=-2.97\sim-1.06$ ,  $P<0.05$ ). The  $D_{max}$  of spinal cord, the  $V_{30}$  and  $D_{mean}$  of parotid glands, larynx and oral cavity in FJ<sub>1</sub> plan were lower than those in the others, with statistical significances ( $t=-5.83\sim-1.14$ ,  $P<0.05$ ). No statistical significance was found in brainstem, cochlea and temporal lobes ( $t=-0.99\sim-2.99$ ,  $P>0.05$ ). Moreover, FJ<sub>1</sub> plan had the highest monitor units ( $t=8.15\sim8.86$ ,  $P<0.05$ ). **Conclusion** All the 5 fixed-jaw techniques can meet the clinical requirements, while FJ<sub>1</sub> techniques can reduce organs-at-risk doses, but increase monitor units and delivery time. Compared with FJ<sub>1</sub> techniques, FJ<sub>2</sub> technique in which the jaw is changed from half-open to fully-closed in X2 direction has inferior organs-at-risk sparing, but improves treatment efficiency.

**Keywords:** nasopharyngeal carcinoma; fixed-jaw technique; volumetric modulated arc therapy; dosimetry

**【收稿日期】**2019-10-03

**【基金项目】**四川省重点研发项目(2018GZ0197);国家重点研发计划(2017YFC0113100)

**【作者简介】**吴凡,主管技师,研究方向:辐射物理与医学物理, E-mail: 506352702@qq.com

**【通信作者】**吴骏翔,研究实习员,研究方向:肿瘤放射物理学, E-mail: wujx610@qq.com

## 前言

鼻咽癌靶区形状不规则、数量多、剂量梯度大,并且解剖结构复杂,包括软组织、气腔以及骨骼等,靶区周围的危及器官多,如脊髓、脑干、晶体、视神经、视交叉、腮腺、喉等,因此鼻咽癌的调强计划设计

难度较大。容积弧形调强放射治疗(Volumetric Intensity Modulated Arc Therapy, VMAT)相比于IMRT技术靶区适形度高、剂量均匀性好并且可以有效减少治疗时间,该技术应用于鼻咽癌的计划设计中可以获得更好的计划质量<sup>[1-4]</sup>。本研究使用美国瓦里安公司的Novalis TX加速器,其相邻MLC运动范围限制在15 cm以内<sup>[5-6]</sup>,如果铅门设置大于15 cm会降低MLC的调制自由度,增加危及器官的照射剂量,从而降低计划质量。鼻咽癌患者的靶区在X方向通常均大于15 cm,铅门的运动范围限制会对鼻咽癌计划质量产生较大影响。本研究对不同的铅门固定大小在鼻咽癌患者计划设计中的应用进行剂量学比较,探讨鼻咽癌VMAT计划设计中最优的铅门固定大小。

## 1 材料与方法

### 1.1 临床资料

随机选取四川省肿瘤医院2018年1月~4月收治的10例经病理组织学确诊的鼻咽癌患者,其中男6例,女4例;年龄35~75岁,中位年龄48岁; $T_2$ 期2例, $T_3$ 期6例, $T_4$ 期2例。

### 1.2 定位及靶区勾画

全部患者均接受根治性外照射。患者采用仰卧体位,双手抱肘置于额头,头颈肩热塑膜固定体位,头下垫B枕或C枕。CT扫描范围为头顶至锁骨头下缘5 cm,扫描层厚为0.3 cm,并将患者CT数据传送到IMRT医生工作站由资深放疗医师负责勾画靶区。本研究将鼻咽癌的靶区体积划分为根据CT、MRI或PET-CT显示的原发肿瘤及颈部转移淋巴结边界勾画的鼻咽大体肿瘤体积(PGTV<sub>nx</sub>)和颈部转移淋巴结(PGTV<sub>nd</sub>),临床靶体积1(PTV1)为原发肿瘤高危亚临床区域,临床靶体积2(PTV2)为原发肿瘤低危亚临床区域,临床靶体积3(PCTV<sub>ln</sub>)为需预防照射的颈部淋巴结引流区。本研究中的计划靶区(PTV)为所有靶区之和,10例患者的PTV最大宽度为16.5~21.5 cm,PGTV<sub>nx</sub>+PGTV<sub>nd</sub>体积为53.1~102.9 cm<sup>3</sup>。

### 1.3 计划设计

采用Eclipse 11.0放射治疗计划系统对10例患者设计固定铅门VMAT计划。计划设计中采用两个往返全弧(弧1顺时针181°~179°,弧2逆时针179°~181°,弧1弧2准直器角度和床板角度均为0°),弧1铅门的X1值根据靶区宽度打开固定不变,X2的范围从靶区最大宽度一半到0 cm。弧2的X1、X2方向铅门的设置与弧1相反。每例患者根据不同的铅门大小分别设计5种计划:(1)铅门根据靶区宽度在X1、X2方向

全部打开(FJ<sub>5</sub>);(2)铅门在X2方向从全开到半开之间(FJ<sub>4</sub>);(3)铅门在X2方向半开(FJ<sub>3</sub>);(4)铅门在X2方向从半开到全关(FJ<sub>2</sub>);(5)铅门在X2方向全关(FJ<sub>1</sub>),具体如图1所示。5种技术优化时靶区和危及器官的条件一致,迭代次数一致。计算网格采用临床常用的0.25 cm,优化算法为PRO(Progressive Resolution Optimizer)11.0.31版本,剂量计算采用AAA(Anisotropic Analytical Algorithm)11.0.31版本。加速器采用瓦里安公司的Novalis TX,其中32对0.25 cm多叶光栅,28对0.50 cm多叶光栅。射线能量为6 MV X射线,剂量率600 MU/min。

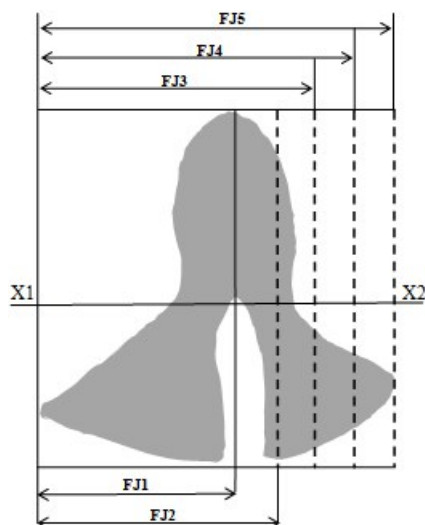


图1 5种固定方式示意图

Fig.1 Schematic diagrams of 5 fixed-jaw techniques

### 1.4 计划评估

PGTV<sub>nx</sub>、PGTV<sub>nd</sub>、PTV1、PTV2、PCTV<sub>ln</sub>的处方剂量分别为70.4、70.4、66.0、60.0、57.6 Gy/32次,要求靶区的95%体积达到100%的处方剂量,靶区的D<sub>max</sub>小于处方的110%。靶区的评估指标包括D<sub>95</sub>、D<sub>mean</sub>、D<sub>max</sub>、适形度指数(Conformity Index, CI)<sup>[7-8]</sup>以及均匀性指数(Homogeneity Index, HI)<sup>[8-9]</sup>,其中CI定义为处方剂量包裹的体积V<sub>prescribed</sub>与靶区的体积V<sub>PTV</sub>的比值,HI定义为1%靶区体积所对应的剂量与处方剂量的比值。重要危及器官的剂量限值为:脑干-PRV的D<sub>max</sub><54 Gy;脊髓-PRV的D<sub>max</sub><45 Gy;腮腺D<sub>mean</sub><35 Gy, V<sub>30</sub><50%;喉D<sub>mean</sub><35 Gy, V<sub>30</sub><50%;口咽D<sub>mean</sub><35 Gy, V<sub>30</sub><50%;耳蜗D<sub>mean</sub><45 Gy;颞叶D<sub>mean</sub><15 Gy(V<sub>n</sub><m%表示n Gy剂量所包裹的危及器官的体积小于m%);以及机器跳数。

### 1.5 统计学方法

采用SPSS 23.0软件对本研究中的数据进行配对t检验分析,数据以均数±标准差表示,P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 靶区剂量学参数比较

5种固定铅门技术靶区的剂量学参数结果如表1所示。由表1可知,5种固定铅门技术得到的靶区剂量均

能满足临床处方要求,靶区的 $D_{95}$ 、 $D_{mean}$ 和HI等剂量学参数无统计学意义( $P>0.05$ ),但是对于PGTVnx的CI, FJ<sub>1</sub>计划组优于其他4种计划组,并且差异具有统计学意义( $t=-2.97\sim-1.06$ ,  $P<0.05$ )。

表1 5种固定铅门技术靶区的剂量参数比较( $\bar{x} \pm s$ )  
Tab.1 Comparison of dosimetric parameters of target areas among 5 fixed-jaw techniques (Mean±SD)

靶区	剂量学参数	计划类型					P值
		FJ <sub>5</sub>	FJ <sub>4</sub>	FJ <sub>3</sub>	FJ <sub>2</sub>	FJ <sub>1</sub>	
PCTVln	D <sub>95</sub> /Gy	57.7±0.1	57.6±0.2	57.8±0.1	57.7±0.1	57.7±0.1	>0.05
	D <sub>mean</sub> /Gy	62.8±0.1	62.4±0.1	62.6±0.1	62.4±0.1	62.3±0.1	>0.05
PTV2	D <sub>95</sub> /Gy	60.1±0.1	60.2±0.1	60.0±0.2	60.1±0.1	60.0±0.1	>0.05
	D <sub>mean</sub> /Gy	64.9±0.0	64.7±0.0	64.8±0.0	64.6±0.0	64.6±0.1	>0.05
PTV1	D <sub>95</sub> /Gy	66.1±0.2	66.2±0.1	66.1±0.1	66.1±0.2	66.0±0.1	>0.05
	D <sub>mean</sub> /Gy	69.2±0.0	69.1±0.0	69.3±0.0	69.1±0.0	69.1±0.0	>0.05
PGTVnd	D <sub>95</sub> /Gy	70.4±0.2	70.4±0.3	70.5±0.2	70.4±0.2	70.4±0.1	>0.05
	D <sub>mean</sub> /Gy	71.8±0.0	71.8±0.0	71.9±0.0	71.8±0.0	71.7±0.0	>0.05
PGTVnx	D <sub>95</sub> /Gy	70.5±0.1	70.4±0.2	70.4±0.3	70.5±0.2	70.4±0.1	>0.05
	D <sub>mean</sub> /Gy	71.9±0.0	71.6±0.0	72.9±0.0	72.6±0.0	71.8±0.0	>0.05
	HI	1.04±0.00	1.04±0.00	1.04±0.00	1.04±0.00	1.04±0.00	>0.05
	CI	1.34±0.00	1.31±0.00	1.31±0.00	1.34±0.00	1.29±0.00	<0.05

以上的P值均为FJ<sub>1</sub>技术分别与FJ<sub>2</sub>、FJ<sub>3</sub>、FJ<sub>4</sub>和FJ<sub>5</sub>技术对比获得

2.2 危及器官剂量学参数比较

表2为5种固定铅门技术下脑干D<sub>max</sub>,脊髓D<sub>max</sub>,腮腺、喉和口咽V<sub>30</sub>和D<sub>mean</sub>,耳蜗、颞叶D<sub>mean</sub>的比较结果。FJ<sub>1</sub>计划组的脊髓D<sub>max</sub>、左右侧腮腺、喉以及口咽的V<sub>30</sub>和D<sub>mean</sub>等剂量学参数均优于其他计划组,差异具有统计学意义( $t=-5.83\sim1.14$ ,  $P<0.05$ );而对于脑干、耳蜗和颞叶等器官,5种固定铅门技术无明显差异( $t=-0.99\sim2.99$ ,  $P>0.05$ )。FJ<sub>1</sub>计划组和FJ<sub>5</sub>计划组靶区和部分危及器官的DVH比较如图2所示。

2.3 机器跳数比较

FJ<sub>5</sub>、FJ<sub>4</sub>、FJ<sub>3</sub>、FJ<sub>2</sub>以及FJ<sub>1</sub>组得到的机器跳数分别为(714±84)、(716±93)、(715±72)、(745±65)和(856±90)MU, FJ<sub>1</sub>计划组机器跳数高于其他计划组,分别增加20.0%、19.6%、19.7%和14.9%(FJ<sub>1</sub>与FJ<sub>5</sub>、FJ<sub>4</sub>、FJ<sub>3</sub>和FJ<sub>2</sub>相比),差异具有统计学差异( $t=8.15\sim8.86$ ,  $P<0.05$ )。

3 讨论

VMAT技术已广泛应用于鼻咽癌放射性治疗,与IMRT技术相比具有更多的自由度、靶区适形度高、剂量均匀性好以及危及器官受照剂量低等<sup>[10-14]</sup>优势

的同时还减少治疗时间、提高治疗效率<sup>[15-16]</sup>。本研究使用瓦里安公司的Novalis TX加速器其MLC在X轴方向最大运动范围为15 cm,但是鼻咽癌靶区通常最大宽度均大于15 cm,当靶区大于15 cm时将会降低MLC的调制能力,降低VMAT计划质量。

目前,国内外通常使用固定铅门技术改善MLC运动范围受限对计划质量带来的影响,从而增加MLC的调制能力。当靶区X轴方向大于15 cm时,对于IMRT计划将使用分野技术将设置好的固定野分成2~3部分<sup>[17-18]</sup>,分野之后的计划增加了子野数、机器跳数以及照射时间等。Srivastava等<sup>[19]</sup>在IMRT计划中使用固定铅门技术将每个射野X方向大小控制在15 cm以内,避免了射野分野,固定铅门计划和分野计划均能获得较好的靶区覆盖和危及器官保护,另外固定铅门计划将子野数降低17.3%,机器跳数降低13.7%;对于VMAT计划,MLC运动范围限值, Kim等<sup>[20]</sup>研究表明在头颈肿瘤的VMAT计划设计中使用固定铅门技术可以降低所有危及器官4.3%~11.9%的D<sub>mean</sub>,其中腮腺的D<sub>5</sub>、D<sub>10</sub>和D<sub>20</sub>分别降低了2.0%~3.6%。

表2 5种固定铅门技术危及器官的剂量学参数比较( $\bar{x} \pm s$ )

Tab.2 Comparison of dosimetric parameters of organs-at-risk among 5 fixed-jaw techniques (Mean±SD)

危及器官	剂量学参数	计划类型					P值
		FJ <sub>5</sub>	FJ <sub>4</sub>	FJ <sub>3</sub>	FJ <sub>2</sub>	FJ <sub>1</sub>	
脑干-PRV	D <sub>max</sub> /Gy	51.1±2.4	50.9±2.5	50.8±2.3	50.6±2.6	51.0±2.3	>0.05
脊髓-PRV	D <sub>max</sub> /Gy	38.4±2.2	38.8±2.1	38.1±1.7	37.4±1.6	36.2±1.1	<0.05
左侧腮腺	V <sub>30</sub> /%	33.1±7.1	31.5±6.6	29.8±4.6	30.1±3.9	29.2±4.8	<0.05
	D <sub>mean</sub> /Gy	29.7±2.1	29.5±2.1	29.2±1.7	28.9±1.7	28.7±1.7	<0.05
右侧腮腺	V <sub>30</sub> /%	31.9±3.6	30.1±4.6	29.6±1.7	29.3±2.1	28.7±2.2	<0.05
	D <sub>mean</sub> /Gy	29.8±1.0	29.4±1.3	29.9±1.0	28.7±1.1	28.5±1.2	<0.05
喉	V <sub>30</sub> /%	39.7±3.5	39.1±3.8	36.7±4.9	33.4±4.3	31.5±3.4	<0.05
	D <sub>mean</sub> /Gy	31.5±2.1	31.8±2.0	30.4±1.0	29.7±1.0	29.4±1.1	<0.05
口咽	V <sub>30</sub> /%	44.6±6.5	46.8±7.1	42.7±9.6	38.3±6.7	37.4±6.5	<0.05
	D <sub>mean</sub> /Gy	32.0±1.7	31.8±1.7	31.1±1.7	30.5±1.2	30.5±1.2	<0.05
左侧耳蜗	D <sub>mean</sub> /Gy	38.6±4.6	35.0±11.6	38.7±4.5	38.7±3.3	39.6±4.1	>0.05
右侧耳蜗	D <sub>mean</sub> /Gy	39.5±1.8	39.9±2.2	39.4±2.1	41.0±3.1	41.0±3.1	>0.05
左侧颞叶	D <sub>mean</sub> /Gy	13.9±5.4	13.9±5.5	13.8±4.9	13.5±4.9	14.2±5.4	>0.05
右侧颞叶	D <sub>mean</sub> /Gy	13.6±4.2	13.7±4.1	13.7±4.3	13.4±3.9	13.6±4.2	>0.05

以上的P值均为FJ<sub>1</sub>技术分别与FJ<sub>2</sub>、FJ<sub>3</sub>、FJ<sub>4</sub>和FJ<sub>5</sub>技术对比获得

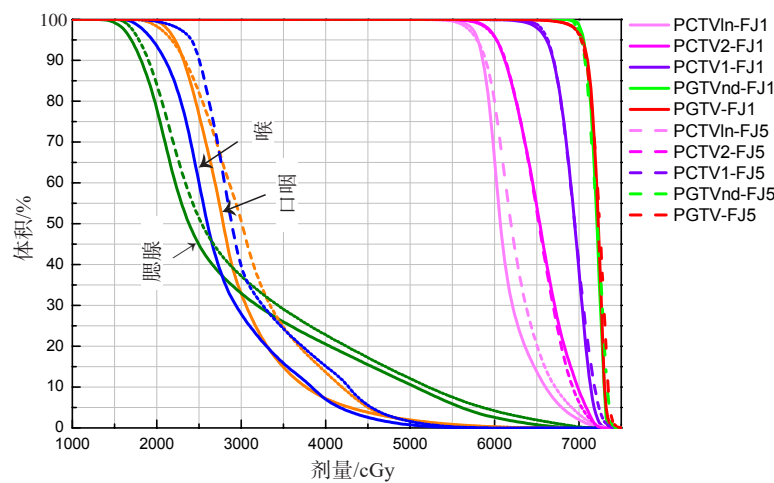


图2 FJ<sub>1</sub>计划组和FJ<sub>5</sub>计划组靶区和部分危及器官的DVH比较

Fig.2 Comparison of dose-volume histograms of target areas and some organs-at-risk between FJ<sub>1</sub> plan and FJ<sub>5</sub> plan

本研究使用Eclipse计划系统,分别对10例鼻咽癌患者使用5种固定铅门技术设计VMAT计划,比较5种铅门固定技术中靶区和危及器官受照剂量、剂量分布以及机器跳数。对于鼻咽癌VMAT计划,本研究结果表明使用5种铅门固定技术得到的计划均能满足临床要求,其FJ<sub>1</sub>计划组得到的PGTVnx的CI优于其他4种固定铅门技术( $t=-2.97\sim-1.06, P<0.05$ ),其他靶区剂量学参数无统计学差异( $P>0.05$ );但是FJ<sub>1</sub>计划组对于脊髓、腮腺、喉、口咽的保护更优,其中FJ<sub>1</sub>

计划组得到喉的V<sub>30</sub>分别比FJ<sub>5</sub>~FJ<sub>2</sub>计划组降低20.7%、19.4%、14.2%以及5.7%( $t=-4.57\sim-1.60, P<0.05$ ),D<sub>mean</sub>分别比FJ<sub>5</sub>~FJ<sub>2</sub>计划组降低6.7%、7.5%、3.3%以及1.0%( $t=-2.96\sim-0.82, P<0.05$ )。但是FJ<sub>1</sub>计划组因为铅门遮挡部分较多,减少了对靶区的直接照射,降低了射线利用率,该结果与Lee等<sup>[16]</sup>研究结果类似,使用固定铅门技术降低MLC的利用率从而增加计划的机器跳数。另外,从研究结果中可知,FJ<sub>2</sub>计划组与FJ<sub>1</sub>计划组在大多数危及器官的保护上差异较小,但



FJ<sub>2</sub>计划组相比于FJ<sub>1</sub>计划组减少了111 MU,差异具有统计学意义( $t=8.44$ ,  $P<0.05$ )。

综上所述,5种固定铅门技术均能满足临床要求。根据不同的临床需求,FJ<sub>1</sub>计划组对于器官的保护更优,但降低了治疗效率;而FJ<sub>2</sub>计划组对于器官的保护较差,但提高了治疗效率。由于本研究患者数量较少,还需进一步增加临床病例去验证本研究的结果。

## 【参考文献】

- [1] KAN M W, WONG W, LEUNG L H, et al. A comprehensive dosimetric evaluation of using RapidArc volumetric modulated arc therapy for the treatment of early-stage nasopharyngeal carcinoma [J]. J Appl Clin Med Phys, 2012, 13(6): 189-202.
- [2] VERBAKEL W, CUIJPERS J P, HOFFMANS D, et al. Volumetric intensity-modulated arc therapy vs conventional IMRT in head-and-neck cancer: a comparative planning and dosimetric study [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2009, 74(1): 252-259.
- [3] VANETTI E, CLIVIO A, NICOLINI G, et al. Volumetric modulated arc radiotherapy for carcinomas of the oro-pharynx, hypo-pharynx and larynx: a treatment planning comparison with fixed field IMRT [J]. Radiother Oncol, 2009, 92(1): 111-117.
- [4] COZZI L, DINSHAW K A, SHRIVASTAVA S K, et al. A treatment planning study comparing volumetric arc modulation with RapidArc and fixed field IMRT for cervix uteri radiotherapy [J]. Radiother Oncol, 2008, 89(2): 180-191.
- [5] VIEILLOT S, AZRIA D, LEMANSKI C, et al. Plan comparison of volumetric-modulated arc therapy (RapidArc) and conventional intensity-modulated radiation therapy (IMRT) in anal canal cancer [J]. Radiat Oncol, 2010, 5(1): 92.
- [6] ZHANG W Z, LU J Y, CHEN J Z, et al. A Dosimetric study of using fixed-jaw volumetric modulated arc therapy for the treatment of nasopharyngeal carcinoma with cervical lymph node metastasis [J]. PLoS One, 2016, 11(5): e0156675.
- [7] FEUVRET L, NOEL G, MAZERON J, et al. Conformity index: a review [J]. Int Radiat Oncol Biol Phys, 2006, 64(2): 333-342.
- [8] MURSHED H, LIU H H, LIAO Z H, et al. Dose and volume reduction for normal lung using intensity-modulated radiotherapy for advanced stage non-small-cell lung cancer [J]. Int Radiat Oncol Biol Phys, 2004, 58: 1258-1267.
- [9] TAYLOR A, ROCKALL A G, RCZNEK R H, et al. Mapping pelvic lymph nodes: guidelines for delineation in intensity-modulated radiotherapy [J]. Int Radiat Oncol Biol Phys, 2005, 63(55): 1604-1612.
- [10] YU C X, TANG G. Intensity-modulated arc therapy: principles, technologies and clinical implementation [J]. Phys Med Biol, 2011, 56(5): 31-54.
- [11] OTTO K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc [J]. Med Phys, 2008, 35(1): 310-317.
- [12] BEDFORD J L. Treatment planning for volumetric modulated arc therapy [J]. Med Phys, 2009, 36(11): 5128-5138.
- [13] LIN J C, TSAI J T, CHEN L J, et al. Compared planning dosimetry of TOMO, VMAT and IMRT in rectal cancer with different simulated positions [J]. Oncotarget, 2017, 8(26): 42020-42029.
- [14] LU S H, CHENG J C, KUO S H, et al. Volumetric modulated arc therapy for nasopharyngeal carcinoma: a dosimetric comparison with TomoTherapy and step-and-shoot IMRT [J]. Radiother Oncol, 2012, 104(3): 324-330.
- [15] WHITE P, CHAN K C, CHENG K W, et al. Volumetric intensity-modulated arc therapy vs conventional intensity-modulated radiation therapy in nasopharyngeal carcinoma: a dosimetric study [J]. J Radiat Res, 2013, 54(3): 532-545.
- [16] LEE F K, YIP C W, CHEUNG F C, et al. Dosimetric difference amongst 3 techniques: TomoTherapy, sliding-window intensity-modulated radiotherapy (IMRT), and RapidArc radiotherapy in the treatment of late-stage nasopharyngeal carcinoma (NPC) [J]. Med Dosim, 2014, 39(1): 44-49.
- [17] KAMATH S, SAHNI S, PALTA J, et al. Algorithms for optimal sequencing of dynamic multileaf collimators [J]. Phys Med Biol, 2004, 49(1): 33-54.
- [18] WU Q, ARNFIELD M, TONG S, et al. Dynamic splitting of large intensity-modulated fields [J]. Phys Med Biol, 2000, 45(7): 1731-1740.
- [19] SRIVASTAVA S P, DAS I J, KUMAR A, et al. Dosimetric comparison of split field and fixed jaw techniques for large IMRT target volumes in the head and neck [J]. Med Dosim, 2011, 36(1): 6-9.
- [20] KIM J I, PARK J M, PARK S Y, et al. Assessment of potential jaw-tracking advantage using control point sequence of VMAT planning [J]. J Appl Clin Med Phys, 2014, 15(2): 160-168.

(编辑:陈丽霞)