

## MLC叶片系统误差对鼻咽癌VMAT和IMRT计划剂量影响的比较

叶淑敏,滕建建,石锦平,张利文,刘致滨

佛山市第一人民医院/中山大学附属佛山医院肿瘤中心放疗科,广东 佛山 528000

**【摘要】目的:**研究多叶准直器(MLC)叶片系统误差对鼻咽癌容积调强(VMAT)计划和普通调强(IMRT)计划剂量学影响的差异。**方法:**随机选取20例鼻咽癌患者,分别设计VMAT计划和IMRT计划。通过MATLAB 2009a只修改计划文件中MLC运动叶片的位置,人为引入0.2、0.5、1.0 mm的系统误差,导入治疗计划系统中重新进行剂量计算。对两种调强技术,比较靶区和危及器官生物学剂量(gEUD)受叶片位置误差影响的差异,并研究gEUD差值与叶片误差之间的关系。**结果:**靶区和危及器官两种计划gEUD的变化差异具有统计学意义( $P<0.01$ )。PGTV、PTVnd、PTV1、PTV2、脑干、脊髓、左侧腮腺、右侧腮腺等gEUD的变化与叶片误差成线性关系,VMAT计划分别变化为3.6、3.8、4.0、3.0、5.6、5.6、6.8、6.8%/mm( $P<0.001$ );IMRT计划分别变化为10.7、10.5、11.2、10.7、16.6、15.0、14.6、14.4%/mm( $P<0.001$ )。**结论:**MLC叶片系统误差对VMAT计划剂量的影响比IMRT计划小。为保证PGTV的gEUD变化控制在2%以内,VMAT和IMRT叶片系统误差应分别小于0.6和0.2 mm。

**【关键词】**鼻咽癌;多叶准直器;系统误差;调强放疗;容积调强;剂量学

**【中图分类号】**R815.6

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2019)10-1139-06

## Comparison of dosimetric impacts of MLC systematic errors on VMAT and IMRT plans for nasopharyngeal carcinoma

YE Shumin, TENG Jianjian, SHI Jinping, ZHANG Liwen, LIU Zhibin

Department of Radiation Oncology, Cancer Center, First People's Hospital of Foshan/Affiliated Foshan Hospital of Sun Yat-sen University, Foshan 528000, China

**Abstract: Objective** To study the differences in the dosimetric impacts of multi-leaf collimator (MLC) systematic errors on volumetric modulated arc therapy (VMAT) and intensity-modulated radiotherapy (IMRT) plans for nasopharyngeal carcinoma. **Methods** Twenty patients with nasopharyngeal carcinoma were randomly enrolled in the study. Two different plans, namely VMAT and IMRT, were designed for each patient. The systematic errors of 0.2, 0.5, 1.0 mm were manually generated by only changing the positions of MLC leaves in the treatment plan file via MATLAB 2009a. The dose was recomputed after the modified plan file was inputted to treatment planning system. The impacts of MLC systematic errors on generalized equivalent uniform dose (gEUD) of planning target volume (PTV) and organ-at-risk between two plans were compared, and the relationship between gEUD difference and MLC systematic errors was analyzed. **Results** There were statistical differences in the gEUD variations of PTV and organs-at-risk between two plans ( $P<0.001$ ). The gEUD variations of PGTV, PTVnd, PTV1, PTV2, brainstem, spinal cord, left parotid gland and right parotid gland varied linearly with MLC systematic errors. The corresponding gEUD variations due to MLC systematic errors in VMAT plan were 3.6, 3.8, 4.0, 3.0, 5.6, 5.6, 6.8 and 6.8%/mm, respectively ( $P<0.001$ ), which were less than 10.7, 10.5, 11.2, 10.7, 16.6, 15.0, 14.6 and 14.4%/mm in IMRT plan ( $P<0.001$ ). **Conclusion** MLC systematic error has a greater dosimetric impact on IMRT plan than VMAT plan. The MLC system errors in VMAT and IMRT should be less than 0.6 and 0.2 mm, respectively, so as to ensure that the gEUD variation of PGTV is controlled within 2%.

**Keywords:** nasopharyngeal carcinoma; multi-leaf collimator; systematic error; intensity-modulated radiotherapy; volumetric modulated arc therapy; dosimetry

**【收稿日期】**2019-05-12

**【基金项目】**国家科技部课题(2017YFC0113205)

**【作者简介】**叶淑敏,主管技师,研究方向:肿瘤精准放射治疗,E-mail: fsysmin@163.com

**【通信作者】**石锦平,主任技师,研究方向:肿瘤精准放射治疗,E-mail: rath55@126.com

## 前言

容积调强 (Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT) 相对于普通调强 (Intensity Modulated Radiation Therapy, IMRT) 具有相似甚至更好的剂量分布, 治疗时间短, 已经被广泛地应用于鼻咽癌的治疗<sup>[1-3]</sup>。VMAT 通过改变机架旋转速度、多叶准直器 (Multileaf Collimator, MLC) 叶片位置以及射线剂量率来实现射野强度的调整, 而 IMRT 仅通过改变 MLC 叶片位置来实现调强<sup>[4]</sup>。MLC 叶片位置误差分为随机误差与系统误差, 会对调强计划剂量分布产生影响, 其中系统误差相对随机误差的影响更大<sup>[5-7]</sup>。本文拟研究 MLC 叶片系统误差对于鼻咽癌 VMAT 和 IMRT 两种调强技术剂量学影响的差异。

## 1 材料与方法

### 1.1 病例选择

随机选取佛山市第一人民医院 2018 年 1 月~8 月间接受 VMAT 放射治疗的鼻咽癌患者 20 例。处方剂量: 计划肿瘤靶区 (Planning Gross Target Volume, PGTV) 为 70 Gy (2.12×33 Gy), 淋巴结计划靶区 (Planning Target Volume of node, PTVnd) 为 68 Gy (2.06×33 Gy), 高危临床靶区 (Planning Target Volume 1, PTV1) 为 60 Gy (1.82×33 Gy), 下颈部预防照射区 (PTV2) 为 50 Gy (1.64×33 Gy)。

### 1.2 计划设计

使用 Eclipse 13.5 对每一个鼻咽癌病例分别设计 VMAT 计划和 IMRT 计划。VMAT 计划包含两条弧: 一条弧机架角 179°~181°, 准直器角度依据实际情况在 345°~340°之间取值; 另一条弧机架角 181°~179°, 准直器角度在 15°~20°之间取值。准直器大小限定在 15 cm 以内, 最大剂量率 600 MU/min。IMRT 计划采用 9 野动态调强, 机架角分别为 0°、40°、80°、120°、160°、200°、240°、280°、320°, 准直器角度为 0°, 不限制射野大小, 剂量率为 400 MU/min。同一病例的两种计划优化设计时, 剂量优化条件相同。所有计划采用光子优化算法 (Photon Optimizer, PO) 13.5 进行计划优化, 采用各向异性分析算法 (Anisotropic Analytical Algorithm, AAA) 13.5 进行剂量计算, 计算网格大小 2.5 mm。治疗使用 6 MV 光子线, 在 Varian 公司的 Trilogy 上执行治疗, 该加速器拥有 40 对叶片, 中间 20 对叶片的宽度为 0.5 cm, 其余两侧叶片的宽度为 1 cm。

### 1.3 模拟叶片系统误差

将两种调强计划的计划文件分别从治疗计划系统中导出。利用 MATLAB R2009a 设计程序, 修改计划文件中 MLC 叶片的位置, 人为引入 -1.0、-0.5、-0.2、

0.2、0.5、1.0 mm 的系统误差。误差为负数时表示叶片间隙变小, 为正数时表示叶片间隙变大。仅修改运动叶片的位置, 一条弧内只要任意两个控制点间叶片位置不同就认为是运动叶片。修改叶片位置时考虑机器的物理限制, 运动叶片的最小间隙为 5 mm, 一条弧内任意控制点任意两条叶片的位置之差小于 15 cm。将修改后的计划文件导回治疗计划系统, 重新进行剂量计算。

### 1.4 生物学剂量一般等效均匀剂量 (generalized Equivalent Uniform Dose, gEUD)

从治疗计划系统中导出剂量体积直方图, 计算靶区 (PGTV、PTVnd、PTV1、PTV2) 和危及器官 (脑干、脊髓、左侧腮腺、右侧腮腺) 的 gEUD。gEUD 是指整个靶区均匀照射时产生与实际剂量分布相同的克隆源细胞存活的剂量<sup>[8-9]</sup>。公式如式(1)所示:

$$gEUD = \left( \sum_i v_i D_i^a \right)^{1/a} \quad (1)$$

其中,  $v_i$  表示受到  $D_i$  剂量照射的体积,  $a$  是用来描述体积效应的特定组织参数。参数  $a$  参照 AAPM 106 号报告<sup>[10]</sup>, 靶区选 -10, 脑干选 16, 脊髓选 20, 腮腺选 1。计算 gEUD 的相对变化, 公式如(2)所示:

$$\Delta gEUD_x = \frac{gEUD_x - gEUD_{Baseline}}{gEUD_{Baseline}} \times 100\% \quad (2)$$

其中,  $gEUD_x$  表示重建计划的 gEUD, 而  $gEUD_{Baseline}$  表示原治疗计划的 gEUD,  $\Delta gEUD_x$  表示变化的相对差别。

### 1.5 统计学分析

采用 SPSS 22.0 进行数据分析, 数据资料采用均数 ± 标准差的方式表示; 两组差值服从正态分布, 采用配对  $t$  检验,  $P < 0.05$  为差异具有统计学意义。同时用回归分析法检测 MLC 系统误差与生物学剂量相对偏差间的线性关系。

## 2 结果

### 2.1 靶区 gEUD 变化的比较

如表 1 所示, 对于靶区 gEUD, MLC 系统误差对 VMAT 的影响比 IMRT 小, 差异具有统计学意义 ( $P < 0.001$ )。当 MLC 误差为 0.2、0.5、1.0 mm 时, VMAT 的 gEUD 变化分别在 1%、2%、4% 左右, 而 IMRT 变化在 2%、5%、11% 左右。

### 2.2 危及器官 gEUD 变化的比较

如表 2 所示, 对脑干、脊髓、腮腺等危及器官的 gEUD, MLC 系统误差对 VMAT 的影响也比 IMRT 小, 差异具有统计学意义 ( $P < 0.001$ )。当 MLC 误差为 0.2、0.5、1.0 mm 时, VMAT 的 gEUD 变化分别在 1%、3%、6% 左右, 而 IMRT 变化在 3%、7%、15% 左右。

表1 比较两种计划之间MLC系统误差对靶区gEUD的影响( $\bar{x} \pm s, \%$ )Tab.1 Comparison of the impacts of MLC systematic errors on gEUD of target areas between two plans ( $Mean \pm SD, \%$ )

误差	计划	PGTV	PTVnd	PTV1	PTV2
-1.0 mm	VMAT	-3.66±0.50	-3.86±0.53	-4.12±0.47	-3.05±0.64
	IMRT	-10.51±0.71	-10.54±0.75	-11.11±0.57	-10.67±0.72
	<i>t</i> 值	63.976	41.606	81.862	44.480
	<i>P</i> 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
-0.5 mm	VMAT	-1.82±0.25	-1.92±0.27	-2.03±0.23	-1.51±0.32
	IMRT	-5.29±0.34	-5.33±0.37	-5.62±0.29	-5.42±0.37
	<i>t</i> 值	67.394	41.441	77.341	43.513
	<i>P</i> 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
-0.2 mm	VMAT	-0.72±0.10	-0.77±0.11	-0.80±0.09	-0.60±0.13
	IMRT	-2.14±0.13	-2.20±0.15	-2.31±0.12	-2.26±0.16
	<i>t</i> 值	73.092	41.594	68.391	40.487
	<i>P</i> 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
0.2 mm	VMAT	0.72±0.11	0.76±0.11	0.79±0.09	0.60±0.13
	IMRT	2.15±0.16	2.01±0.18	2.19±0.13	2.04±0.15
	<i>t</i> 值	-52.285	-33.955	-81.411	-48.768
	<i>P</i> 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
0.5 mm	VMAT	1.79±0.26	1.90±0.28	1.96±0.24	1.49±0.33
	IMRT	5.41±0.37	5.18±0.41	5.61±0.32	5.29±0.38
	<i>t</i> 值	-60.026	-36.509	-80.890	-46.835
	<i>P</i> 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
1.0 mm	VMAT	3.53±0.522	3.75±0.55	3.86±0.47	2.95±0.66
	IMRT	10.79±0.71	10.43±0.81	11.26±0.63	10.68±0.77
	<i>t</i> 值	-63.338	-37.376	-79.524	-46.225
	<i>P</i> 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

VMAT:容积调强放射治疗;IMRT:调强放射治疗;PGTV:计划肿瘤靶区;PTVnd:计划淋巴结靶区;PTV1:高危临床靶区;PTV2:下颈部预防照射区

### 2.3 MLC系统误差与gEUD变化的关系

系统误差为-1.0~1.0 mm时,MLC系统误差与gEUD的变化成线性关系,对于VMAT和IMRT,PGTV、PTVnd、PTV1、PTV2、脑干、脊髓、左侧腮腺、右侧腮腺等受MLC系统误差的变化分别为3.6与10.7%/mm、3.8与10.5%/mm、4.0与11.2%/mm、3.0与10.7%/mm、5.6与16.6%/mm、5.6与15.0%/mm、6.8与14.6%/mm、6.8与14.4%/mm。MLC误差对脑干、脊髓、腮腺等危及器官gEUD的影响比靶区的影响较大(表3)。

### 3 讨论

鼻咽癌肿瘤靶区周围含有脑干、脊髓、腮腺等众多危及器官,为保证肿瘤剂量充足的同时减少危及器官的受照剂量,通常采用调强放射治疗,通过改变MLC叶片位置来调整射线的强度,能够在靶区和危及器官之间形成一个陡峭的剂量梯度<sup>[11]</sup>。

MLC系统误差主要是由单个叶片或整组叶片的刻度误差,灯光野与辐射野间的误差,不同偏心位置处射线半影的变化以及治疗计划系统中叶片的不准

表2 比较两种计划之间MLC系统误差对危及器官gEUD的影响( $\bar{x} \pm s, \%$ )  
 Tab.2 Comparison of the impacts of MLC systematic error on gEUD of organs-at-risk between two plans (Mean $\pm$ SD, %)

误差	计划	脑干	脊髓	左侧腮腺	右侧腮腺
-1.0 mm	VMAT	-5.32 $\pm$ 0.78	-5.27 $\pm$ 0.49	-6.68 $\pm$ 1.00	-6.61 $\pm$ 1.37
	IMRT	-14.97 $\pm$ 0.76	-12.94 $\pm$ 1.03	-13.63 $\pm$ 0.78	-13.41 $\pm$ 1.23
	<i>t</i> 值	48.449	38.309	43.247	40.236
	<i>P</i> 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
-0.5 mm	VMAT	-2.73 $\pm$ 0.41	-2.70 $\pm$ 0.27	-3.37 $\pm$ 0.51	-3.34 $\pm$ 0.70
	IMRT	-7.76 $\pm$ 0.41	-6.77 $\pm$ 0.58	-7.15 $\pm$ 0.43	-7.01 $\pm$ 0.64
	<i>t</i> 值	47.662	36.076	45.4	41.151
	<i>P</i> 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
-0.2 mm	VMAT	-1.11 $\pm$ 0.17	-1.10 $\pm$ 0.11	-1.36 $\pm$ 0.21	-1.35 $\pm$ 0.28
	IMRT	-3.18 $\pm$ 0.17	-2.82 $\pm$ 0.26	-3.06 $\pm$ 0.18	-3.00 $\pm$ 0.25
	<i>t</i> 值	49.808	33.215	45.844	39.939
	<i>P</i> 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
0.2 mm	VMAT	1.16 $\pm$ 0.18	1.14 $\pm$ 0.12	1.38 $\pm$ 0.21	1.37 $\pm$ 0.29
	IMRT	3.55 $\pm$ 0.30	3.27 $\pm$ 0.31	2.86 $\pm$ 0.29	2.80 $\pm$ 0.38
	<i>t</i> 值	-38.459	-36.539	-36.425	-34.953
	<i>P</i> 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
0.5 mm	VMAT	2.93 $\pm$ 0.46	2.88 $\pm$ 0.32	3.46 $\pm$ 0.53	3.43 $\pm$ 0.73
	IMRT	8.99 $\pm$ 0.72	8.36 $\pm$ 0.81	7.59 $\pm$ 0.70	7.44 $\pm$ 0.88
	<i>t</i> 值	-41.277	-36.315	-44.976	-45.586
	<i>P</i> 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
1.0 mm	VMAT	5.96 $\pm$ 0.94	5.85 $\pm$ 0.66	6.96 $\pm$ 1.07	6.91 $\pm$ 1.48
	IMRT	18.20 $\pm$ 1.45	16.96 $\pm$ 1.70	15.55 $\pm$ 1.39	15.26 $\pm$ 1.74
	<i>t</i> 值	-41.765	-34.841	-47.427	-48.960
	<i>P</i> 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

确建模引起的<sup>[6]</sup>。笔者在本文中仅研究叶片刻度误差导致的系统误差,将误差分为两组叶片向相同方向和相反方向移动两类<sup>[12]</sup>。当MLC两组叶片向相同方向移动且不改变射野大小时对剂量变化的影响较小,这与等中心位移时对剂量的影响相似<sup>[13-14]</sup>。当两组叶片向相反方向移动时,射野会变大或缩小, Mu等<sup>[6]</sup>研究了此类误差对12例头颈癌患者简单调强计划的剂量影响,发现1 mm的误差使靶区的D<sub>95</sub>,脑干和脊髓的最大剂量变化大约为4%,而腮腺平均剂量变化大约为9%。所以笔者在本研究中仅对MLC向相反方向移动的情况进行研究分析。

物理剂量仅仅指的是某个特定点的剂量,而生物学剂量gEUD用来评价解剖结构受到不均匀剂量

照射时的生物学效应,可以反映整条剂量体积直方图曲线的变化趋势,因此生物学剂量更适合用来评价误差对靶区和危及器官造成的剂量影响。Oliver等<sup>[15]</sup>研究了MLC系统误差对10例前列腺癌VMAT计划的影响,结果发现MLC叶片同向运动时,PTV的gEUD变化约1%/mm,而MLC叶片反向运动时,PTV的gEUD变化约8%/mm。根据公式(1)的定义,照射体积V<sub>i</sub>和物理剂量D<sub>i</sub>是影响生物学剂量gEUD的因素,MLC误差可以同时引起受照体积和剂量的变化,因此本文中笔者直接分析了叶片误差对生物学剂量的影响,研究方法与Oliver相同。

Rangel等<sup>[16]</sup>研究了MLC系统误差对7例头颈癌IMRT计划剂量的影响,发现1 mm的系统误差使临

表3 MLC系统误差与gEUD相对变化的线性关系(%/mm)  
Tab.3 Linear relationship between gEUD variations and MLC systematic errors (%/mm)

结构	计划	斜率	95%置信区间		$R^2$	$t$ 值	$P$ 值
			上限	下限			
PGTV	VMAT	3.597	3.688	3.505	0.981	78.203	<0.001
	IMRT	10.664	10.791	10.536	0.996	166.012	<0.001
PTVnd	VMAT	3.808	3.904	3.712	0.981	78.674	<0.001
	IMRT	10.492	10.631	10.353	0.995	149.683	<0.001
PTV1	VMAT	3.989	4.074	3.905	0.987	93.540	<0.001
	IMRT	11.193	11.300	11.085	0.997	205.353	<0.001
PTV2	VMAT	3.003	3.119	2.887	0.957	51.284	<0.001
	IMRT	10.684	10.817	10.550	0.995	158.584	<0.001
脑干	VMAT	5.644	5.802	5.486	0.977	70.866	<0.001
	IMRT	16.630	16.895	16.364	0.992	123.907	<0.001
脊髓	VMAT	5.566	5.674	5.457	0.989	101.554	<0.001
	IMRT	14.995	15.320	14.670	0.986	91.381	<0.001
左侧腮腺	VMAT	6.822	7.007	6.637	0.978	73.035	<0.001
	IMRT	14.622	14.859	14.386	0.992	122.353	<0.001
右侧腮腺	VMAT	6.761	7.016	6.507	0.959	52.607	<0.001
	IMRT	14.362	14.656	14.068	0.988	90.454	<0.001

床靶区和脊髓的gEUD分别改变6%和4%。Oliver等<sup>[17]</sup>研究了MLC误差对8例头颈癌VMAT计划剂量的影响,发现1 mm的系统误差使PTV和脊髓的gEUD分别改变3%和2%。Oliver对照Rangel的研究,认为如果使PTV的gEUD变化在2%以内,VMAT和IMRT计划的MLC误差应分别小于0.76和0.36 mm。Oliver直接引用了Rangel的研究数据,没有针对相同的病人进行研究,治疗计划系统也不相同,而研究结果会受到病例、计算方法、计算网格大小等的影响。

笔者针对20例鼻咽癌患者展开了研究,采用相同的MLC配置、优化算法、计算算法和计算网格,比较了MLC误差对VMAT和IMRT计划影响的差别。研究发现VMAT计划MLC误差对靶区和危及器官gEUD的影响比IMRT计划要小。如果要限制PGTV的gEUD变化在2%以内,对于VMAT和IMRT,MLC系统误差分别应小于0.6和0.2 mm,笔者的研究结果与Oliver相似。

MLC系统误差对IMRT计划gEUD的影响比VMAT计划大的原因可能在于两种计划之间的差别。Eclipse计划系统优化IMRT计划时采用基于通量的优化算法,而优化VMAT计划时采用的是直接

进行子野优化的方法<sup>[18]</sup>。相对于VMAT计划,IMRT计划的机器跳数大,子野数目多,子野面积小。相同的MLC误差对小子野的影响比大子野的大。

为确保放射剂量在允许的误差范围之内,必须利用胶片、EPID等测量工具定期对MLC的叶片位置进行检测<sup>[19-20]</sup>,执行IMRT计划时需要比执行VMAT计划进行更加严格的MLC质量控制。

### 【参考文献】

- [1] WANG J, CHEN Z, LI W, et al. A new strategy for volumetric modulated arc therapy planning using AutoPlanning based multicriteria optimization for nasopharyngeal carcinoma[J]. Radiat Oncol, 2018, 13(1): 94-103.
- [2] RADHAKRISHNAN S, CHANDRASEKARAN A, SARMA Y, et al. Dosimetric comparison between single and dual arc-volumetric modulated arc radiotherapy and intensity modulated radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma using a simultaneous integrated boost technique[J]. Asian Pac J Cancer Prev, 2017, 18(5): 1395-1402.
- [3] IMANO N, MURAKAMI Y, NAKASHIMA T, et al. Clinical outcomes of concurrent chemoradiotherapy with volumetric modulated arc therapy in patients with locally advanced nasopharyngeal carcinoma[J]. Jpn J Radiol, 2017, 35(11): 673-680.
- [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] PARSANI H, CHO P S, PHILLIPS M H, et al. Random and systematic beam modulator errors in dynamic intensity modulated radiotherapy [J]. *Phys Med Biol*, 2003, 48(9): 1109-1121.
- [6] MU G, LUDLUM E, XIA P. Impact of MLC leaf position errors on simple and complex IMRT plans for head and neck cancer[J]. *Phys Med Biol*, 2008, 53(1): 77-88.
- [7] BAI S, LI G, WANG M, et al. Effect of MLC leaf position, collimator rotation angle, and gantry rotation angle errors on intensity-modulated radiotherapy plans for nasopharyngeal carcinoma[J]. *Med Dosim*, 2013, 38(2): 143-147.
- [8] NIEMIERKO A. Reporting and analyzing dose distributions: a concept of equivalent uniform dose[J]. *Med Phys*, 1997, 24(1): 103-110.
- [9] WU Q, MOHAN R, NIEMIERKO A, et al. Optimization of intensity modulated radiotherapy plans based on the equivalent uniform dose [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2002, 52(1): 224-235.
- [10] ALLEN L X, ALBER M, DEASY J O, et al. The use and QA of biologically related models for treatment planning: short report of the TG-166 of the therapy physics committee of the AAPM[J]. *Med Phys*, 2012, 39(3): 1386-1409.
- [11] WORTHY D, WU Q. Dosimetric assessment of rigid setup error by CBCT for HN-IMRT[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2010, 11(3): 3187.
- [12] NORVILL C, JENETSKY G. Clinical significance of multi-leaf collimator calibration errors[J]. *Australas Phys Eng Sci Med*, 2016, 39(1): 253-258.
- [13] SIEBERS J V, KEALL J, WU Q, et al. Effect of patient setup errors on simultaneously integrated boost head and neck IMRT treatment plans[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2005, 63(2): 422-433.
- [14] SAMUELSSON A, MERCKE C, JOHANSSON K A. Systematic setup errors for IMRT in the head and neck region: effect on dose distribution [J]. *Radiother Oncol*, 2003, 66(3): 303-311.
- [15] OLIVER M, BUSH K, ZAVGORODNI S, et al. Understanding the impact of RapidArc therapy delivery errors for prostate cancer[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2011, 12(3): 3409.
- [16] RANGEL A, DUNSCOMBE P. Tolerances on MLC leaf position accuracy for IMRT delivery with a dynamic MLC[J]. *Med Phys*, 2009, 36(7): 3304-3309.
- [17] OLIVER M, GAGNE I, BUSH K, et al. Clinical significance of multi-leaf collimator positional errors for volumetric modulated arc therapy [J]. *Radiother Oncol*, 2010, 97(3): 554-560.
- [18] UNKELBACH J, BORTFELD T, CRAFT D, et al. Optimization approaches to volumetric modulated arc therapy planning[J]. *Med Phys*, 2015, 42(3): 1367-1377.
- [19] CLARKE M F, BUDGELL G J. Use of an amorphous silicon EPID for measuring MLC calibration at varying gantry angle[J]. *Phys Med Biol*, 2008, 53(2): 473-485.
- [20] CHRISTOPHIDES D, DAVIES A, FLECKNEY M. Automatic detection of MLC relative position errors for VMAT using the EPID-based picket fence test[J]. *Phys Med Biol*, 2016, 61(23): 8340-8359.

(编辑:薛泽玲)