

## Eclipse系统的通量平滑技术在头颈部肿瘤放疗中的应用

贾晓斌<sup>1</sup>,董晓庆<sup>2</sup>,朱皓<sup>3</sup>,丁继平<sup>1</sup>,袁峥奎<sup>1</sup>,岳堃<sup>1</sup>

1.上海交通大学医学院附属第九人民医院放疗科,上海 201900; 2.同济大学附属第十人民医院放疗科,上海 200072; 3.瓦里安医疗系统公司临床应用部,北京 102600

**【摘要】目的:**基于Edge系统,评估通量平滑技术在头颈部放疗中的应用。**方法:**采用Eclipse v13.6计划系统对40例头颈部肿瘤患者做回顾性分析,每位患者制定6组逆向调强计划,包括对照组(Smooth 0, 0)即X和Y平滑值为0、实验I组(Smooth 20, 20)、实验II组(Smooth 40, 40)、实验III组(Smooth 60, 60)、实验IV组(Smooth 80, 80)和实验V组(Smooth 100, 100)。评估各组计划靶区及危及器官的剂量学差异,分析平均叶片对展宽(ALPO)、MU factor及 $\gamma$ 通过率。**结果:**与对照组相比,实验组的PCTV60和PCTV54的HI、PCTV60 CI和喉 $V_{50}$ 均存在统计学差异( $P<0.05$ );实验II~V组脊髓 $D_{max}$ 存在统计学差异( $P<0.05$ );实验IV与实验V组喉 $D_{mean}$ 存在统计学差异( $P<0.05$ );实验III与实验V组左侧腮腺 $V_{30}$ 存在统计学差异( $P<0.05$ );实验II与实验IV组左侧腮腺 $D_{mean}$ 存在统计学差异( $P<0.05$ );实验V组右侧腮腺 $V_{30}$ 与 $D_{mean}$ 具有统计学差异( $P<0.05$ )。随着通量平滑值的增加,PCTV60 CI呈现先增加后降低趋势(Smooth 40, 40最大),PCTV60和PCTV54的HI则呈现先减小后增加低趋势(Smooth 40, 40最小)。MU factor则先呈现降低趋势(Smooth 0, 0到Smooth 60, 60),随后呈现增加趋势(Smooth 60, 60到Smooth 100, 100)。 $\gamma$ 通过率、喉 $V_{50}$ 和ALPO随平滑度增长呈现增长趋势,而机器跳数呈现下降趋势。**结论:**适度的平滑值降低了计划投照复杂性,过度的平滑则影响靶区覆盖率并且提高危及器官的受量。基于临床需求及硬件限制,头颈部放疗计划的X和Y平滑值建议设为40。

**【关键词】**头颈部肿瘤;通量平滑技术;调强放疗;平均叶片对展宽

**【中图分类号】**R815

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2020)10-1224-06

## Application of fluence-smoothing technique of Eclipse system in intensity-modulated radiotherapy for head and neck tumors

JIA Xiaobin<sup>1</sup>, DONG Xiaoqing<sup>2</sup>, ZHU Hao<sup>3</sup>, DING Jiping<sup>1</sup>, YUAN Zhengxi<sup>1</sup>, YUE Kun<sup>1</sup>

1. Department of Radiotherapy, the Ninth People's Hospital Affiliated to Shanghai Jiaotong University School of Medicine, Shanghai 201900, China; 2. Department of Radiotherapy, Tenth People's Hospital of Tongji University, Shanghai 200072, China; 3. Clinical Application Department of Varian Medical Systems, Inc., Beijing 102600, China

**Abstract: Objective** To analyze and evaluate fluence-smoothing technique in the radiotherapy for head and neck tumors based on Edge system. **Methods** The clinical information of 40 postoperative patients with head and neck tumors were retrospectively analyzed, and 6 reverse intensity-modulated radiotherapy (IMRT) plans were designed for each patient with Eclipse v13.6 system. The 6 groups of plans included control group (Smooth 0, 0) which were optimized with the smoothing values of X, Y at 0, experimental I group (Smooth 20, 20), experimental II group (Smooth 40, 40), experimental III group (Smooth 60, 60), experimental IV group (Smooth 80, 80) and experimental V group (Smooth 100, 100). The dosimetric differences of target areas and organs-at-risk were evaluated among different groups, and the average leaf pair opening (ALPO), MU factor and gamma passing rate were also analyzed. **Results** Compared with the dosimetric parameters in control group, there were statistical differences in the HI and CI of PCTV60, the HI of PCTV54 and the  $V_{50}$  of larynx in experimental groups ( $P<0.05$ ), the  $D_{max}$  of spinal cord in experimental II to V groups ( $P<0.05$ ), the  $D_{mean}$  of larynx in experimental IV and V groups ( $P<0.05$ ), the  $V_{30}$  of parotid-L in experimental III and V groups ( $P<0.05$ ), the  $D_{mean}$  of parotid-L in experimental II and IV groups ( $P<0.05$ ), and the  $V_{30}$  and  $D_{mean}$  of parotid-R in experimental V group ( $P<0.05$ ). With the increase of smoothing values, the CI of PCTV60 showed an increasing and then decreasing trend (reaching the maximum in

**【收稿日期】**2020-04-20

**【基金项目】**国家自然科学基金(11575108)

**【作者简介】**贾晓斌,硕士研究生,放疗物理师,研究方向:放射物理,E-mail: 1337643544@qq.com

**【通信作者】**岳堃,博士在读,放疗物理师,研究方向:放射物理,E-mail: yuekunrt@163.com

Smooth 40, 40 plan), while the HI of PCTV60 and PCTV54 presented a decreasing and then increasing trend (reaching the minimum in Smooth 40, 40 plan). MU factor also showed a decreasing (Smooth 0,0 to Smooth 60, 60) and then increasing tendency (Smooth 60,60 to Smooth 100, 100). Moreover, gamma passing rate, the  $V_{50}$  of larynx and ALPO were increased as the increase of smoothing values, while MU showed a decreasing tendency. **Conclusion** Moderate fluence-smoothing reduces the complexity of plan delivery, but excessive fluence-smoothing affects target coverage and increases the dose of OAR. Based on clinical demands and linac limitations, the smoothing values of X,Y should be set at 40.

**Keywords:** head and neck tumors; fluence-smoothing technique; intensity-modulated radiotherapy; average leaf pair opening

前言

调强放射治疗 (Intensity-Modulated Radiotherapy, IMRT) 利用不同强度的笔形束可以在提高靶区剂量的同时有效地降低危及器官的照射剂量,因而被广泛应用在各类肿瘤治疗中<sup>[1-3]</sup>。当前基于通量优化算法主要分为强度优化过程和叶片运动计算 (Smart Leaf Motion Calculator, Smart LMC) 过程。强度优化过程着重考虑临床最优剂量分布,子野分解过程考虑加速器硬件调制复杂度<sup>[4-6]</sup>。早期由于硬件限制,导致逆向调强计划系统生成的子野序列无法满足最优剂量分布。针对此类问题,相关学者提出两类改进算法。第一类算法直接求解可调制子野和强度,省略强度图求解过程,但是建模过程复杂<sup>[7-8]</sup>;第二类通过目标函数式罚分降低通量图中相邻笔形束强度的离散值。Varian Eclipse v13.6 内置目标函数式平滑策略及 Smart LMC,配合 Edge 机型配置宽度为 2.5 mm 的 HD120 MLC,提高对复杂病例通量的可调制性。本研究选取 40 例接受头颈部放疗的患者,分析通量平滑值差异对平均叶片对展宽 (Average Leaf Pair Opening, ALPO)、评估叶片运动复杂度的跳数因子 (MU factor)、机器跳数 (Monitor Unit, MU) 及  $\gamma$  通过率的影响,分析靶区及危及器官的剂量学差异,探讨通量平滑取值在头颈部肿瘤临床治疗中的价值。

1 材料与方法

1.1 病例选取

选取 40 例从 2017 年 6 月到 2019 年 5 月在上海交通大学附属第九人民医院放疗科收治的口咽癌术后患者,其中,男 27 例,女 13 例,年龄 48~73 岁 (中位年龄 59 岁)。TNM 分期为:8 例  $T_1N_2M_0$ ;7 例  $T_1N_3M_0$ ;6 例  $T_2N_1M_0$ ;9 例  $T_2N_2M_0$ ;10 例  $T_2N_3M_0$ 。所有病例数据均经病理证实,患者均签署知情同意书。

1.2 CT 定位与图像获取

患者取仰卧位于头颈肩固定板,头部覆盖热网膜固定。CT 扫描范围从颅底骨到第七颈椎下缘,扫

描层厚 2.5 mm。由同一医师参照国际辐射单位及测量委员会 (ICRU) 83 号报告勾画患者高危临床靶区 (CTV60)、颈部淋巴预防靶区 (CTV54) 和正常组织。计划肿瘤靶区 (PCTV60) 由 CTV60 外扩 0.3 cm 获得;计划预防靶区 (PCTV54) 由 CTV54 外扩 0.3 cm 获得。PCTV60 处方剂量为 60 Gy/30 F;PCTV54 照射剂量为 54 Gy/30 F。危及器官保护要求:脊髓最大剂量 ( $D_{max}$ ) <40 Gy;喉  $V_{50}$  <20%,平均剂量 ( $D_{mean}$ ) <35 Gy;腮腺  $V_{30}$  <50%, $D_{mean}$  <26 Gy。

1.3 Smooth 平滑函数

当前通量平滑技术主要分为目标函数内显式平滑策略和目标函数内隐式平滑策略<sup>[9-10]</sup>。Varian Eclipse v13.6 内置目标函数内显式平滑罚分函数。该罚分函数在初始目标函数中加入平滑罚分函数并重新计算,计算式如下<sup>[11]</sup>:

$$\sum_{obj} F_{obj} = \sum_{PTV} F_{PTV} + \sum_{PRV} F_{PRV} + F_{NTO} + F_{smoothXY} \quad (1)$$

$$F_{smoothXY} = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n w_{i,j,k} \cdot (x_{i+1,j,k} - x_{i,j,k})^2 \quad (2)$$

其中,  $\sum_{PTV} F_{PTV}$  表示计划靶区罚分函数;  $\sum_{obj} F_{obj}$  表示危及器官罚分函数,  $F_{NTO}$  表示剂量跌落函数 (Normal Tissue Objective, NTO);  $F_{smoothXY}$  表征通量平滑罚分函数;  $x_{i,j,k}$  表示优化通量中当前射束的强度值;  $w_{i,j,k}$  表示通量强度中相邻射束在 X (叶片运动方向) 及 Y (垂直叶片运动方向) 的平滑权重值,取值范围为 0~1 000。

1.4 计划设计

Eclipse 中通量平滑函数与靶区及危及器官目标函数等罚分项参与通量优化过程,因此通量平滑值与危及器官目标函数权重值的比率显著影响光子优化算法结果。为了提高实验组计划的差异性以及计划的临床实用性,本研究依据通量平滑值与危及器官目标函数最大权重 (本研究中危及器官权重  $w_{max}$  设为 100) 百分比制定 6 组逆向调强计划。对照组 (Smooth 0, 0), 即 X、Y 平滑值为 0; 实验 I 组 (Smooth 20, 20), 即 X 和 Y 平滑值为 0.2  $w_{max}$ ; 实验 II 组 (Smooth 40, 40), 即 X 和 Y 平滑度设置为 0.4  $w_{max}$ ; 实验 III 组 (Smooth 60, 60), 即 X 和 Y 平滑度设置为

0.6  $w_{\max}$ ;实验IV组(Smooth 80, 80),即X和Y平滑度设置为0.8  $w_{\max}$ ;实验V组(Smooth 100, 100),即X和Y平滑度设置为  $w_{\max}$ ;实验组其他参数与对照组一致。所有计划均采用9野均分共面调强技术(0°、40°、80°、120°、160°、200°、240°、280°和320°),剂量率500 MU/min,Sliding Window技术。

1.5 结果评估

所有计划归一于处方剂量覆盖95%的PCTV60靶区体积。靶区剂量学评估包括靶区适形度指数(Conformity Index, CI)和靶区均匀性指数(Homogeneity Index, HI)。

计划靶区(Planning Target Volume, PTV)的CI定义为:

$$CI = (V_{T.ref}/V_T) \cdot (V_{T.ref}/V_{ref})$$

(3)

其中, $V_{T.ref}$ 表示处方剂量包含靶区体积; $V_{ref}$ 表示处方剂量覆盖总体积; $V_T$ 表示计划靶区体积。CI趋近于1表示适形度越好。

PTV的HI定义为:

$$HI = (D_2 - D_{98})/D_{mean}$$

(4)

其中, $D_2$ 和 $D_{98}$ 为DVH中2%、98%靶区体积接受剂量, $D_{mean}$ 为靶区平均剂量。HI数值趋近0表明均匀性越好。

Smart LMC中,叶片运动复杂度由MU factor表示<sup>[11]</sup>,MU factor值越高代表叶片运动越复杂,理论通量与实际通量的差异性越大。本研究中MU factor直接由计划射野配置文件导出;Zygmanski等<sup>[12]</sup>提出了ALPO,用于评估通量复杂性以及计划投照效率。对于Sliding Window技术,通量平滑通过降低叶片宽度显著影响ALPO结果,通量复杂度越高,ALPO越低。本研究中ALPO由射野配置文件导出。

1.6 通量验证

EDGE加速器的aSi-1200型非晶硅电子射野影像板(Electronic Portal Imaging Device, EPID)的有效探测面积为43 cm×43 cm,分辨率为1 280×1 280,在SSD为100~140 cm时,采集图像。计划的二维剂量验证通过Portal Dosimetry软件完成<sup>[13]</sup>。Gamma分析标准采用TG218报告推荐的3%/2 mm标准<sup>[14]</sup>。

1.7 统计学方法

通过数据软件IBM SPSS 19对上述剂量学参数采用配对t检验,双侧显著性检验 $P<0.05$ 具有统计学意义。

2 结果

2.1 实验组计划统计学结果

由表1和表2可知,与Smooth 0, 0组相比,其他组PCTV60和PCTV54的HI、PCTV60 CI和喉 $V_{50}$ 均存在统计学差异( $P<0.05$ );Smooth 40, 40、Smooth 60, 60、Smooth 80, 80和Smooth 100, 100的脊髓 $D_{\max}$ 存在统计学差异( $P<0.05$ );Smooth 80, 80与Smooth 100, 100中喉 $D_{mean}$ 存在统计学差异( $P<0.05$ );Smooth 60, 60与Smooth 100, 100的左侧腮腺 $V_{30}$ 存在统计学差异( $P<0.05$ );Smooth 40, 40与Smooth 80, 80中左侧腮腺 $D_{mean}$ 存在统计学差异( $P<0.05$ );Smooth 100, 100中右侧腮腺 $V_{30}$ 与 $D_{mean}$ 存在统计学差异( $P<0.05$ )。

2.2 ALPO、MU factor、靶区CI与HI、MU和 $\gamma$ 通过率比较

由图1a可知,随着通量平滑值的增加,各组计划ALPO总体呈现增加趋势;MU factor则先呈现降低趋势(Smooth 0, 0到Smooth 60, 60),随后呈现增加趋势(Smooth 60, 60到Smooth 100, 100)。图1b中各组计划中PCTV60的CI先呈现增长趋势(Smooth 0, 0

表1 6组计划靶区及危及器官剂量学比较( $\bar{x} \pm s$ )  
Tab.1 Dosimetric comparison of target areas and organs-at-risk in 6 groups (Mean±SD)

靶区及危及器官		Smoot 0,0	Smooth 20, 20	Smooth 40, 40	Smooth 60, 60	Smooth 80, 80	Smooth 100, 100
PCTV60	CI	0.82±0.05	0.83±0.06	0.86±0.05	0.85±0.03	0.79±0.03	0.73±0.05
	HI	0.08±0.01	0.08±0.02	0.05±0.01	0.06±0.01	0.08±0.02	0.10±0.03
PCTV54	HI	0.06±0.01	0.06±0.02	0.04±0.01	0.04±0.01	0.05±0.01	0.07±0.01
脊髓	$D_{\max}$ /Gy	35.96±1.00	35.88±1.05	35.44±1.11	35.58±1.20	36.55±1.50	37.66±1.83
喉	$V_{50}/\%$	1.45±0.09	1.49±0.09	1.85±0.32	2.26±0.65	2.64±0.95	3.71±0.72
	$D_{mean}$ /Gy	31.23±5.06	31.20±43.88	31.00±4.06	31.17±5.02	32.07±1.03	34.10±2.32
左侧腮腺	$D_{mean}$ /Gy	23.43±0.76	23.35±0.64	23.12±0.30	23.17±0.40	24.12±0.85	24.11±6.56
	$V_{30}/\%$	31.00±4.33	30.00±4.79	29.40±4.25	28.30±5.34	30.30±5.50	34.9 ±5.72
右侧腮腺	$D_{mean}$ /Gy	23.29±3.45	22.56±2.00	22.28±1.75	22.47±1.64	23.39±1.70	25.15±2.05
	$V_{30}/\%$	27.90±5.63	27.90±5.75	27.20±4.69	26.80±4.39	28.90±5.14	33.6 ±6.27

表 2 6组计划统计学比较  
Tab.2 Statistic comparison in 6 groups

计划	PCTV60		PCTV54	脊髓	喉		左侧腮腺		右侧腮腺	
	CI	HI	HI	D <sub>max</sub>	V <sub>50</sub>	D <sub>mean</sub>	V <sub>30</sub>	D <sub>mean</sub>	V <sub>30</sub>	D <sub>mean</sub>
Smooth 0, 0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Smooth 20, 20	<i>t</i> 值	-3.006	2.192	2.439	1.121	-2.421	0.632	0.999	0.728	1.053
	<i>P</i> 值	0.009*	0.045*	0.028*	0.28	0.029*	0.537	0.334	0.478	0.309
Smooth 40, 40	<i>t</i> 值	-7.397	9.359	8.552	3.802	-4.954	2.120	3.246	2.166	1.432
	<i>P</i> 值	0.001*	0.000*	0.000*	0.002*	0.001*	0.051	0.005	0.047*	0.173
Smooth 60, 60	<i>t</i> 值	-3.021	8.298	6.178	2.243	-4.158	0.419	3.002	1.496	1.179
	<i>P</i> 值	0.009*	0.001*	0.001*	0.040*	0.001*	0.681	0.009*	0.155	0.257
Smooth 80, 80	<i>t</i> 值	2.294	-2.295	5.222	-2.524	-4.496	-3.320	0.367	-3.592	-0.154
	<i>P</i> 值	0.037*	0.037*	0.001*	0.023*	0.001*	0.005*	0.719	0.003*	0.880
Smooth 100, 100	<i>t</i> 值	4.820	-3.443	-2.536	-5.169	-3.882	-5.048	-4.026	-0.428	-3.009
	<i>P</i> 值	0.001*	0.004*	0.023*	0.001*	0.001*	0.001*	0.001*	0.675	0.009*

\**P*<0.05;表中的*t*、*P*值表示与 Smooth 0, 0 比较

到 Smooth 40, 40),随后呈现下降趋势(Smooth 40, 40 到 Smooth 100, 100);PCTV60 和 PCTV54 的 HI 则先呈现降低趋势(Smooth 0, 0到 Smooth 40, 40),随后呈现增长趋势(Smooth 40, 40到 Smooth 100, 100)。由图 1c 和图 1d 可知,γ 通过率和喉 V<sub>50</sub> 随平滑度增长总体呈现增长趋势,而 MU 则呈现下降趋势。

3 讨论

Varian Eclipse 中内置通量平滑技术本质上类似于图像“降噪”算法,通过减少通量矩阵中相邻射束在 X 方向(叶片运动方向)及 Y 方向(垂直叶片运动方向)的强度差异性,在降低通量强度图复杂性的同时

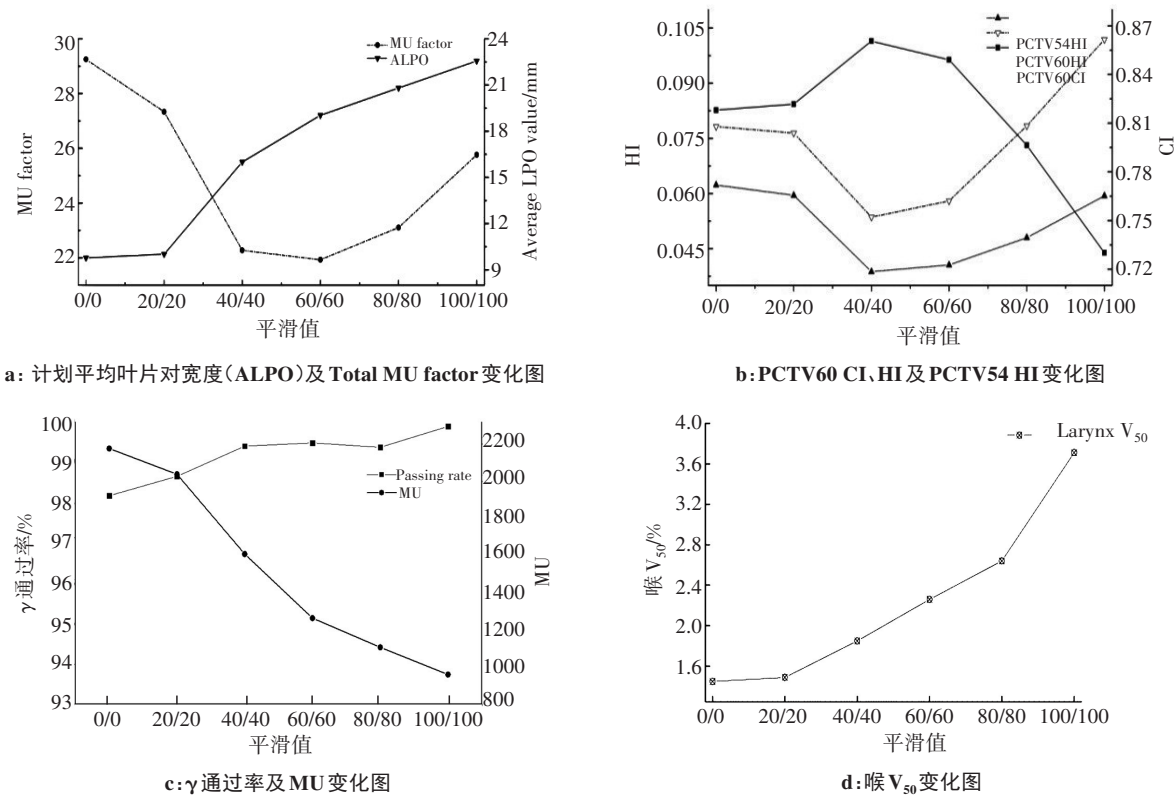


图 1 平滑参数变化对计划复杂度、对靶区 CI 与 HI、喉 V<sub>50</sub> 和 γ 通过率影响  
Fig.1 Effects of smooth parameter on plan complexity, HI and CI of target areas, V<sub>50</sub> of larynx and gamma passing rate



提高子野分解效率。其中,X方向平滑变化可以大幅度影响叶片运动的复杂性并降低MU。Y方向的平滑则对MLC的“凹凸槽”效应影响显著<sup>[11]</sup>。早期国外学者对通量平滑技术在临床中的应用进行了一系列研究,认为临床中使用适合的通量平滑值X、Y可以显著提高计划质量。Salter等<sup>[15]</sup>研究发现通量平滑变化影响组织器官的 $D_{\max}$ 与计划投照效率。Pandya等<sup>[16]</sup>则针对具体病例,研究Smooth 0, 0, smooth 40, 30和Smooth 100, 100这3种平滑条件对计划质量的影响,结果表明随着通量平滑值的降低,头颈部肿瘤靶区HI增长40%,CI保持不变,计划MU增长138%。而Armoogum<sup>[17]</sup>使用Eclipse v8.9对10例头颈部肿瘤应用做系统研究,发现靶区CI及HI随通量平滑度增加未有显著性变化。上述研究中,头颈部结果与本文存在差异,这可能与通量平滑值选取及病例数偏低有关,数据的离散性影响最终结果的分析。

为了降低数据离散对研究结果的影响,本研究选取40例头颈部患者,对6组不同平滑值进行分析。研究发现Smooth 0, 0增长到Smooth 40, 40时,平滑度的提高降低了通量强度图中X及Y方向强度差异,提高了靶区的均匀性,使PCTV60、PCTV54的HI呈现降低趋势(图1b)。此外,平滑度的改变减少了实际通量与优化通量差异,降低了叶片运动的复杂度(图1a),增加了叶片对不规则靶区的包裹率,提高了PCTV60靶区的适形度。由Smooth 40, 40到Smooth 100, 100,X及Y方向通量强度差异减少,影响靶区边缘的剂量跌落梯度。子野分解过程受限于剂量跌落梯度影响与PO算法中罚分函数对高剂量区体积限制要求,可使用较高的叶片运动复杂度(图1a)来平衡靶区与危及器官间的剂量差异。此外,由于叶片间ALPO随通量平滑值增加而增加(图1a),MLC叶片对靶区的适形度降低,导致PCTV60的CI显著降低。Anker等<sup>[18]</sup>研究表明Eclipse计划系统中通量平滑值X, Y>100, 100时,计划靶区剂量显著降低,因此本研究并未考虑通量平滑值X, Y≥100, 100在头颈部肿瘤的应用。

通量平滑增长与调强计划验证通过率、喉 $V_{50}$ 呈现正相关,与MU呈现负相关。吴凡等<sup>[19]</sup>对胸段肿瘤的研究中,同样发现通量平滑显著降低计划MU数。本研究认为Sliding Window技术在MLC运动过程中持续出束,更容易受到MLC“凹凸槽效应”影响。随Y方向平滑度提高,相邻叶片间“凹凸槽区域”(Tongue and Groove region)在出束中暴露时间减少,降低了因“凹凸槽效应”导致的靶区局部欠剂量或过剂量,提高了验证通过率。X方向较高通量平滑值降

低了计划投照MU,提高了计划质量和机器投照效率<sup>[20]</sup>。喉靠近肿瘤靶区,因此当平滑度提高时,靶区与危及器官间通量强度差异降低会导致喉部受到高剂量影响显著, $V_{50}$ 显著提高。

综上所述,通量平滑度X, Y<40, 40时,随着平滑度提高,靶区适形度与计划验证通过率也会提高;当通量平滑度X, Y>40, 40时,尽管验证通过率及投照效率提高,但过度的平滑不仅降低了靶区的适形度还增加正常组织受照剂量,难以满足计划临床要求。对于Edge机型的头颈部复杂放疗计划,结合计划质量和投照效率,本研究建议通量平滑度X, Y=40, 40(Smooth 40, 40),从而保证临床需求和治疗执行效率的平衡。

## 【参考文献】

- [1] 鲍志荣,王大奖,陈诚,等.不同骨盆勾画及限量方式下宫颈癌术后IMRT计划的剂量学研究[J].中国医学物理学杂志,2019,36(9): 1023-1028.  
BAO Z R, WANG D J, CHEN C, et al. Dosimetric study of intensity-modulated radiotherapy with different pelvic delineations and dose limitations following surgery for cervical cancer [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2019, 36(9): 1023-1028.
- [2] 陈亚正,袁佳薇,梁丽华,等.半铅门技术在口咽癌调强治疗计划中的剂量学研究[J].中华放射医学与防护杂志,2018,38(12): 918-922.  
CHEN Y Z, YUAN J W, LIANG L H, et al. A dosimetric study of half jaw technique applied in the treatment planning for oropharyngeal cancer patients[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2018, 38(12): 918-922.
- [3] 李倩,尹勇,佟颖,等.左侧乳腺癌调强放疗中心跳对左心室肌及左前降支剂量评估的影响[J].中华放射医学与防护杂志,2018,38(10): 747-750.  
LI Q, YIN Y, TONG Y, et al. The impact of heartbeat on the left ventricular myocardial and the left anterior descending coronary arterial dosimetry following intensity modulated radiotherapy for left-sided breast cancer [J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2018, 38(10): 747-750.
- [4] 齐东洲,吴敏,刘晓慧,等.调强放疗中强度矩阵分解算法的研究[J].计算机应用研究,2017,34(3): 683-688.  
QI D Z, WU M, LIU X H, et al. Highly-efficient greedy algorithm or field splitting in intensity-modulated radiation therapy [J]. Application Research of Computers, 2017, 34(3): 683-688.
- [5] GUO C, ZHANG P, GUI Z, et al. An efficient method for improving the dose-volume-based optimization plan quality [J]. IEEE Access, 2017: 7520-7531.
- [6] DIAS J, ROCHA H, VENTURA T, et al. Automated fluence map optimization based on fuzzy inference systems [J]. Med Phys, 2016, 43(3): 1083-1085.
- [7] BEDFORD J L, WEBB S. Constrained segment shapes in direct-aperture optimization for step-and-shoot IMRT [J]. Med Phys, 2006, 33(4): 944.
- [8] LI Y, SUN X, WANG Q, et al. A feedback constraint optimization method for intensity-modulated radiation therapy of nasopharyngeal carcinoma[J]. Oncol Lett, 2015, 10(4): 2043-2050.
- [9] 闵志方.调强放疗中的数学规划问题研究[D].武汉:华中科技大学

- 大学, 2010.
- MIN Z F. The study of mathematical programming problems in intensity modulated radiation therapy [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [10] HANUŠOVÁT, VONDRÁČEK V, BADRAOUI-ČUPROVÁ K, et al. New method for estimation of fluence complexity in IMRT fields and correlation with gamma analysis [J]. J Phys: Conf Ser, 2015, 573(1): 012056.
- [11] Varian Medical Systems. Eclipse photo and electron algorithms reference guide v15.5 [M]. Palo Alto, CA: Varian Medical Systems, 2018.
- [12] ZYGMANSKI P, KUNG J H, JIANG S B, et al. Dependence of fluence errors in dynamic IMRT on leaf-positional errors varying with time and leaf number [J]. Med Phys, 2003, 30(10): 2736-2749.
- [13] BELLON M, KELLER P, BALTES C, et al. TH-CD-304-01: evaluating the accuracy of absolute portal dosimetry on the EDGE linear accelerator [C]. Fifty-seventh Annual Meeting of the American Association of Physicists in Medicine, 2015.
- [14] MIFTEN M, OLCH A, MIHAILIDIS D, et al. Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: Recommendations of AAPM Task Group No. 218 [J]. Med Phys, 2018, 45(4): e53-e83.
- [15] SALTER B J, ANKER C J, TOBLER M, et al. Optimization of IMRT fluence-map smoothing can result in improved IMRT plans [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2007, 69(3): S681.
- [16] PANDYA S, BURMEISTER J. SU-GG-T-127: effect of fluence smoothing on plan quality and delivery accuracy in intensity modulated radiotherapy [J]. Med Phys, 2008, 35(6): 2755.
- [17] ARMOOGUM K S. Effect of smoothing on treatment plan efficiency in IMRT: Eclipse Helios™ dose optimisation [J]. J Radiother Pract, 2012, 11(04): 229-238.
- [18] ANKER C J, WANG B, TOBLER M, et al. Evaluation of fluence-smoothing feature for three IMRT planning systems [J]. J Appl Clin Med Phys, 2010, 11(2): 33-61.
- [19] 吴凡, 刘敏, 康盛伟, 等. 通量平滑度在胸中上段食管癌容积弧形调强中的剂量学比较 [J]. 中华放射医学与防护杂志, 2020, 40(1): 32-35.
- WU F, LIU M, KANG S W, et al. Dosimetric comparison among volumetric modulate arc therapy plans with different fluence smoothing in the treatment of patients with middle and upper thoracic esophageal carcinoma [J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2020, 40(1): 32-35.
- [20] MITTAUER K, LU B, YAN G, et al. A study of IMRT planning parameters on planning efficiency, delivery efficiency, and plan quality [J]. Med Phys, 2013, 40(6): 061704.

(编辑:谭斯允)