

# 铅门跟随与固定技术结合有无均整器模式的鼻咽癌 IMRT 剂量学比较

黄霞<sup>1</sup>, 苏坤普<sup>2</sup>, 罗焕丽<sup>1</sup>, 靳富<sup>1</sup>, 王颖<sup>1</sup>

1. 重庆大学附属肿瘤医院/重庆市肿瘤研究所/重庆市肿瘤医院, 重庆 400030; 2. 陆军特色医学中心, 重庆 400010

**【摘要】目的:**研究铅门跟随与固定技术结合有无均整器4种模式在鼻咽癌调强放疗中的剂量分布,为选择最优治疗技术提供指导和参考。**方法:**选择10例早期鼻咽癌患者,采用Varian公司的Eclipse 13.6治疗计划系统,设计铅门跟随无均整器模式(JTT-FFF)、铅门跟随有均整器模式(JTT-FF)、铅门固定无均整器模式(SJT-FFF)和铅门固定有均整器模式(SJT-FF)4种治疗计划,评估靶区、危及器官和正常组织剂量学参数以及机器跳数。**结果:**4组计划的靶区剂量分布均达到临床要求,且靶区的适形度差异无统计学意义( $P>0.05$ );SJT-FF计划靶区的均匀性最好,相对于JTT计划差异有统计学意义( $P<0.05$ ),但相对于SJT-FFF计划差异无统计学意义( $P>0.05$ )。在JTT-FFF计划中,晶体的最大剂量以及眼球、口腔、颞叶、下颌骨和Body的平均剂量最低但机器跳数最多;在JTT-FF计划中,脑干、垂体、交叉、视神经、脊髓的最大剂量和腮腺、喉、内耳的平均剂量最低。**结论:**4种计划均能满足临床使用要求,靶区适形度差异无统计学意义,JTT计划靶区均匀性相对于SJT计划要差,但能更好地降低危及器官和正常组织的受照剂量。

**【关键词】**鼻咽癌;铅门跟随技术;无均整器;调强放疗;剂量学

**【中图分类号】**R739.62;R815.2

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2020)07-0858-05

## Different intensity-modulated radiotherapy plans for nasopharyngeal carcinoma: a dosimetric comparison among JTT-FFF, JTT-FF, SJT-FFF and SJT-FF

HUANG Xia<sup>1</sup>, SU Kunpu<sup>2</sup>, LUO Huanli<sup>1</sup>, JIN Fu<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>1</sup>

1. Chongqing University Cancer Hospital/Chongqing Cancer Institute/Chongqing Cancer Hospital, Chongqing 400030, China; 2. Army Medical Center, Chongqing 400010, China

**Abstract: Objective** To analyze the dose comparison of intensity-modulated radiotherapy (IMRT) plans for nasopharyngeal carcinoma (NPC) using 4 different modes for providing guidance and reference for the selection of the optimal treatment technique. **Methods** Ten patients with early NPC were enrolled in the study. Treatment planning system (Varian Eclipse, Version 13.6) was used to design 4 different IMRT plans for each patient using jaw tracking technique with flattening filter free mode (JTT-FFF), jaw tracking technique with flattening filter mode (JTT-FF), static jaw technique with flattening filter free mode (SJT-FFF) and static jaw technique with flattening filter mode (SJT-FF), separately. Monitor units and the dosimetric parameters of target areas, organs-at-risk and normal tissues were analyzed. **Results** The target coverage of the 4 groups of plans met clinical requirements, and there was no statistical difference in conformity index ( $P>0.05$ ). The homogeneity index of the target areas in SJT-FF plan was the lowest, and was statistically different from that of JTT plans ( $P<0.05$ ), but there was no statistical difference compared with SJT-FFF plan ( $P>0.05$ ). The maximum dose of lens, the mean dose of eyeball, oral cavity, temporal lobe, mandible and Body in JTT-FFF plan were the lowest, but machine units was the highest. The maximum dose of brainstem, hypophysis, chiasma, optic nerve, spinal cord, and the mean dose of parotid, larynx, and inner ear in JTT-FF plan were the lowest. **Conclusion** All the 4 plans can meet clinical requirements, and the conformity index of the target areas is similar in 4 plans. The target homogeneity of JTT plans is inferior to that of SJT plan, but JTT plan can better reduce the dose to organs-at-risk and normal tissues.

**Keywords:** nasopharyngeal carcinoma; jaw tracking technique; flattening filter free; intensity-modulated radiotherapy; dosimetry

**【收稿日期】**2020-02-15

**【基金项目】**重庆市院士牵头科技创新引导专项(cstc2017jcyj-yszxX0014)

**【作者简介】**黄霞,硕士,放疗物理师,研究方向:放疗物理,E-mail: huangxia1988@foxmail.com

**【通信作者】**靳富,博士,正高级工程师,研究方向:肿瘤放射物理,E-mail: jfzj@126.com

## 前言

鼻咽癌是一种鼻咽上皮组织肿瘤,放疗是其重要的治疗手段,而调强放疗(Intensity-Modulated Radiotherapy, IMRT)因其剂量学优势而被广泛应用于鼻咽癌治疗。在满足靶区剂量要求的情况下应尽可能地保护邻近的危及器官和正常组织,减小远期放疗并发症的发生率,提高病人放疗后的生存质量<sup>[1-3]</sup>。常规动态IMRT技术在铅门固定的情况下,通过多叶准直器(Multi-Leaf Collimator, MLC)的运动实现野内的剂量调节。美国Varian公司的Edge加速器具有铅门跟随功能,铅门跟随技术是指在MLC运动的同时,X、Y方向铅门根据子野大小自动调整照射范围,可以减少叶片的透射和漏射<sup>[4-7]</sup>。同时,Edge的非均整器(Flattening Filter Free, FFF)模式移除加速器射野均整器,射线质变软、散射减小、剂量率增加,其射野的剂量分布与常规均整器模式有较大差别<sup>[8-9]</sup>。有研究表明,IMRT采用铅门跟随和铅门固定两种技术,靶区和危及器官受量均能满足临床治疗要求,而铅门跟随技术能更好地降低正常组织和危及器官的剂量照射<sup>[10-11]</sup>;鼻咽癌患者采用6 MV X射线FFF模式和有均整器(Flattening Filter, FF)模式计划均能满足临床治疗要求,且FFF计划更有利于保护射野边缘危及器官<sup>[12-13]</sup>。本研究基于鼻咽癌IMRT技术,研究铅门跟随与铅门固定技术结合有无均整器这4种模式在靶区覆盖和危及器官保护方面的剂量学特点,为临床选择不同治疗技术提供指导和参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 一般临床资料

随机选择2019年重庆市肿瘤医院收治的10例早期鼻咽癌患者。其中,男6例,女4例;年龄30~64岁,中位年龄47岁;2例T<sub>1</sub>N<sub>2</sub>M<sub>0</sub>,2例T<sub>2</sub>N<sub>1</sub>M<sub>0</sub>,2例T<sub>2</sub>N<sub>2</sub>M<sub>0</sub>,4例T<sub>2</sub>N<sub>3</sub>M<sub>0</sub>。

### 1.2 治疗计划

**1.2.1 定位图像采集** 所有患者均取仰卧位,使用头颈肩模固定,采用放疗专用大孔径螺旋CT(Brilliance-16, Philips Medical Systems Inc., Cleveland, Ohio)进行3 mm层厚的扫描。CT图像经过DICOM传输至Eclipse 13.6治疗计划系统。

**1.2.2 治疗计划制定** 由经验丰富的放疗医生确定鼻咽癌原发灶和颈部转移淋巴结的肿瘤计划靶区PGTV,原发灶周围可能受侵的高危区域为计划靶区PTV1,原发灶周围可能受侵及中下颈淋巴结引流区的低危区域为计划靶区PTV2。靶区的处方剂量为PGTV:70.4 Gy/32次,PTV1:60.8 Gy/32次,PTV2:54.4 Gy/32次。危及器

官参考ICRU 83号报告定义和勾画,其限制剂量参考常规照射正常组织耐受剂量<sup>[14]</sup>。采用Varian Eclipse 13.6治疗计划系统和Edge加速器6 MV X射线模式分别制定铅门跟随FFF模式(Jaw Tracking Technique with FFF mode, JTT-FFF)、铅门跟随FF模式(Jaw Tracking Technique with FF mode, JTT-FF)、铅门固定FFF模式(Static Jaw Technique with FFF mode, SJT-FFF)、铅门固定FF模式(Static Jaw Technique with FF mode, SJT-FF)这4种治疗计划,机架角度为200°、240°、280°、320°、0°、40°、80°、120°、160°。4组计划设置相同的优化目标和约束条件,要求处方剂量至少包绕95%的靶区体积,处方剂量的110%所包绕的体积不得超过靶区体积的1%。优化过程中,FFF模式默认剂量率上限为1 200 MU/min,FF模式默认剂量率上限为600 MU/min。采用各向异性解析算法(Analytical Anisotropic Algorithm, AAA)进行剂量计算,选择Smart LMC(Leaf Motion Calculator)计算叶片运动方式,选取是否勾选Jaw tracking确定是否选择铅门跟随模式。采用95%以上的靶区达到处方剂量对计划进行剂量归一。

### 1.3 计划比较评估

比较4组计划的剂量-体积直方图(Dose-Volume Histogram, DVH)和等剂量分布,采用适形度指数(Conformity Index, CI)和均匀性指数(Homogeneity Index, HI)评估靶区的剂量分布。参考文献[15]的评估公式: $CI=(V_{T,ref}/V_T) \times (V_{T,ref}/V_{ref})$ ,其中, $V_{T,ref}$ 为参考等剂量所包绕的靶区体积, $V_{ref}$ 为参考等剂量所包绕的体积, $V_T$ 为靶区体积,这里参考等剂量取处方剂量。参考ICRU 83号报告定义 $HI=(D_2-D_{98})/D_{50}$ , $D_2$ 为2%靶区体积对应高剂量, $D_{50}$ 表示50%的靶区体积受到的照射剂量, $D_{98}$ 为98%体积对应低剂量。CI值为0~1,越接近1,表明靶区处方剂量线的适形度越好;HI越低,靶区均匀性越好,HI为0是最佳理想情况。采用最大剂量评估脑干、垂体、脊髓、晶体、视神经、视交叉;采用平均剂量评估腮腺、眼球、颞叶、下颌骨、喉、口腔、内耳、Body。

### 1.4 统计学分析

采用SPSS 19统计学软件进行数据处理,计量资料用均数±标准差表示,采用配对t检验进行分析, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 靶区剂量分布

对于所选取的10例病例,4组计划的靶区剂量分布均能满足临床使用要求。PGTV、PTV1和PTV2的CI比较,差异无统计学意义( $P>0.05$ );SJT-FF计划中

PGTV、PTV1 和 PTV2 的 HI 最好, 相对于 SJT-FFF 计划差异无统计学意义 ( $P>0.05$ ), 但相对于 JTT 计划差异有统计学意义 ( $P<0.05$ )。结果见表 1。

2.2 危及器官和正常组织剂量分布

表1 4组计划的靶区剂量比较结果  
Tab.1 Comparison of dosimetric parameters of target areas in 4 plans

靶区参数	JTT-FFF	SJT-FFF	JTT-FF	SJT-FF	P值					
					JTT-FFF vs	JTT-FFF vs	JTT-FFF	SJT-FFF vs	SJT-FFF vs	JTT-FF vs
					SJT-FFF	JTT-FF	vs SJT-FF	JTT-FF	SJT-FF	SJT-FF
PGTV CI	0.886±0.023	0.884±0.024	0.874±0.021	0.893±0.025	0.735	0.084	0.399	0.323	0.110	0.098
PTV1 CI	0.582±0.142	0.577±0.145	0.574±0.146	0.583±0.145	0.081	0.089	0.865	0.350	0.230	0.067
PTV2 CI	0.866±0.014	0.870±0.017	0.872±0.018	0.873±0.022	0.488	0.068	0.417	0.197	0.671	0.373
PGTV HI	0.070±0.007	0.065±0.007	0.068±0.006	0.063±0.006	0.000	0.163	0.002	0.010	0.410	0.000
PTV1 HI	0.221±0.007	0.210±0.008	0.226±0.007	0.209±0.008	0.000	0.001	0.000	0.000	0.900	0.000
PTV2 HI	0.352±0.016	0.332±0.014	0.365±0.014	0.331±0.011	0.000	0.011	0.020	0.000	0.240	0.000

4组计划的危及器官和正常组织剂量分布均达到了临床基本要求。在 JTT-FFF 计划中, 晶体的最大剂量、眼球、口腔、颞叶、下颌骨和 Body 的平均剂量最低但机器跳数最多, 其中, 晶体的最大剂量和机器跳数相对于其他 3 组计划, 差异有统计学意义 ( $P<0.05$ ), 眼球、口腔、颞叶、下颌骨和 Body 的平均剂量相对于 SJT 计划差异有统计学意义 ( $P<0.05$ ), 但相对于 JTT-FF 计划差异无统计学意义 ( $P>0.05$ )。在

JTT-FF 计划中, 脑干、垂体、交叉、视神经、脊髓的最大剂量和腮腺、喉、内耳的平均剂量最低, 其中脑干和垂体的最大剂量相对于其他 3 组计划差异有统计学意义 ( $P<0.05$ ), 交叉、视神经、脊髓的最大剂量和腮腺、喉、内耳的平均剂量相对于 SJT 计划差异有统计学意义 ( $P<0.05$ ), 但相对于 JTT-FFF 计划计划差异无统计学意义 ( $P>0.05$ )。结果见表 2 和表 3。

表2 4组计划危及器官的D<sub>max</sub>比较结果(Gy)  
Tab.2 Comparison of the maximum dose to organs-at-risk in 4 plans (Gy)

危及器官	JTT-FFF	SJT-FFF	JTT-FF	SJT-FF	P值					
					JTT-FFF vs	JTT-FFF vs	JTT-FFF vs	SJT-FFF	SJT-FFF	JTT-FF vs
					SJT-FFF	JTT-FF	SJT-FF	vs JTT-FF	vs SJT-FF	SJT-FF
左晶体	3.50±1.14	4.84±2.15	3.99±0.94	6.96±1.90	0.01	0.03	0.00	0.16	0.00	0.00
右晶体	3.47±1.00	4.52±1.80	4.13±0.98	6.87±1.58	0.01	0.01	0.00	0.41	0.00	0.00
脑干	49.72±0.80	50.52±1.06	49.14±1.22	50.46±1.33	0.00	0.02	0.01	0.00	0.69	0.00
垂体	47.88±6.78	48.77±6.20	46.82±6.37	48.73±5.99	0.00	0.00	0.02	0.00	0.78	0.00
视交叉	23.30±17.07	24.53±17.02	22.98±16.50	25.60±15.86	0.00	0.53	0.00	0.06	0.12	0.00
左视神经	25.78±16.25	27.19±16.30	25.35±15.49	28.09±15.16	0.00	0.39	0.00	0.03	0.17	0.00
右视神经	27.26±14.68	28.74±14.77	26.81±14.20	29.54±13.92	0.00	0.35	0.00	0.02	0.17	0.00
脊髓	32.24±1.77	34.61±1.40	31.80±1.63	34.26±1.52	0.00	0.23	0.00	0.00	0.27	0.00

3 讨论与结论

常规动态 IMRT 中多采用固定铅门, MLC 以不同的速度连续运动的方式实现射野内的剂量调节。由于鼻咽癌靶区形状不规则且体积大, 常规动态 IMRT

中铅门开放位置相对较大, MLC 的漏射和透射会对靶区和危及器官的剂量产生较大的影响。Losasso 等<sup>[16]</sup>研究发现 MLC 的漏射和透射会随着射野增大而增加; 而 Cadman 等<sup>[17]</sup>研究发现在铅门和 MLC 同时对射线进行遮挡的情况下, 射线的漏射和透射小于

表3 4组计划危及器官的D<sub>mean</sub>剂量(Gy)比较和MU比较

Tab.3 Comparison of the mean dose (Gy) to organs-at-risk and monitor units in 4 plans

危及器官及 机器跳数	JTT-FFF	SJT-FFF	JTT-FF	SJT-FF	P值					
					JTT-FFF vs	JTT-FFF vs	JTT-FFF vs	SJT-FFF vs	SJT-FFF vs	JTT-FF vs
					SJT-FFF	JTT-FF	SJT-FF	JTT-FF	SJT-FF	SJT-FF
左腮腺	29.98±2.46	31.60±2.41	29.75±2.53	31.93±2.57	0.00	0.31	0.00	0.00	0.14	0.00
右腮腺	31.87±2.05	33.34±1.94	31.71±2.16	33.69±1.96	0.00	0.56	0.00	0.00	0.15	0.00
喉	36.68±2.35	39.28±1.97	36.48±2.47	38.88±2.16	0.00	0.57	0.00	0.00	0.17	0.00
左内耳	35.43±3.97	36.81±3.54	34.73±4.44	37.24±3.87	0.00	0.07	0.00	0.00	0.18	0.00
右内耳	35.03±3.53	36.51±3.31	34.53±3.82	36.97±3.30	0.00	0.13	0.00	0.00	0.11	0.00
左眼球	4.48±1.60	5.46±2.01	4.88±1.28	7.49±1.85	0.00	0.07	0.00	0.19	0.00	0.00
右眼球	4.66±1.09	5.62±1.55	5.15±0.94	7.83±1.41	0.00	0.05	0.00	0.28	0.00	0.00
口腔	34.58±2.35	36.46±2.50	34.76±2.35	36.70±2.34	0.00	0.26	0.00	0.00	0.20	0.00
左颞叶	10.94±2.32	12.48±2.48	11.02±2.37	14.12±3.01	0.00	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00
右颞叶	10.82±2.35	12.31±2.47	10.85±2.32	13.90±2.86	0.00	0.82	0.00	0.00	0.00	0.00
下颌骨	36.45±3.92	37.88±3.96	36.46±3.97	38.03±3.99	0.00	0.96	0.00	0.00	0.37	0.00
Body	17.00±1.69	17.80±1.72	17.14±1.74	19.09±1.82	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00
机器跳数/MU	3 312±580	3 127±531	3 091±487	2 853±438	0.00	0.04	0.01	0.68	0.01	0.00

0.1%。在直线加速器中使用均整器是为了在模体的特定深度处产生均匀分布的剂量,从而方便计算。随着调强技术的发展,均整器的应用限制了加速器的输出剂量<sup>[18]</sup>,而现有的调强技术只需要MLC的运动即可产生所需的剂量分布<sup>[19-20]</sup>。FFF模式在加速器的射束路径上移除均整器,从而表现出离轴剂量不均匀、平均能量降低、机头的散射减小、射野半影锐利、周围剂量减小的特点。

对比本研究的4组计划,发现靶区的适形度无明显差异,而SJT计划的均匀性指数明显优于JTT计划。交叉、视神经、脊髓的最大剂量和眼球、口腔、颞叶、下颌骨、腮腺、喉、内耳、Body的平均剂量在JTT-FFF和JTT-FF计划中无明显差异,但均明显低于SJT计划。在冯仲苏等<sup>[21]</sup>研究中也发现在直肠癌术前放疗计划设计中,铅门跟随技术能够更好地降低危及器官和正常组织的受照剂量,从而降低正常组织并发症的概率,而在贾飞等<sup>[22]</sup>研究中发现脊髓、视神经、腮腺和整个治疗区域的受照剂量在鼻咽癌VMAT-FFF和VMAT-FF计划中无明显差异。因而在鼻咽癌IMRT计划设计中,为了使得这些组织器官的受照剂量更低,只需要选择使用铅门跟随技术,而FFF模式或FF模式不会对结果造成明显影响。

JTT-FFF计划的左右晶体的最大剂量低于JTT-FF计划,考虑原因是本研究采用早期鼻咽癌,晶体位置到靶区距离较远,FFF离轴剂量跌落快,且FFF模

式下的射线软化因而MLC的透射因子减小造成的<sup>[23]</sup>。若计划设计中晶体的受照剂量是考虑的重点,可以采用JTT-FFF模式制作计划。在贾飞等<sup>[22]</sup>研究中发现鼻咽癌VMAT-FFF计划中脑干受照剂量比VMAT-FF高,但却不具备实际意义,与本研究SJT-FFF与SJT-FF计划对比结果一致;而JTT-FF计划的脑干和垂体的最大剂量明显低于JTT-FFF计划,考虑原因是FFF模式射线本身剂量分布不均匀,并且结合铅门跟随技术对靶区均匀性的影响,为保证靶区的处方剂量包绕,需要更多的机器跳数,而脑干和垂体距离靶区较近导致剂量增加。

铅门跟随降低了叶片的透射和漏射,并且FFF模式移除了均整器导致射线剂量分布的变化,都会导致机器跳数增加,因而JTT-FFF计划机器跳数最多;由于是常规分次剂量照射,FFF模式的高剂量率优势并没有发挥出来。Fu等<sup>[24]</sup>研究也发现当单次治疗剂量为2 Gy时,FFF和FF模式在治疗时间上无明显差异。本研究选择的鼻咽癌治疗射野大且部位单一,JTT-FFF、JTT-FF、SJT-FFF、SJT-FF这4种技术对其他部位和不同体积靶区的剂量学影响还需进一步研究。

【参考文献】

[1] 张烨,黄晓东,高黎,等. 鼻咽癌IMRT后长期存活者晚期损伤及其变化趋势-患者评价和医生评价结果[J]. 中华放射肿瘤学杂志



- 志, 2018, 27(8): 721-726.
- ZHANG Y, HUANG X D, GAO L, et al. The change trend of late complications in patients with nasopharyngeal carcinoma treated by intensity-modulated radiotherapy: the clinician- and patient-reported outcomes[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2018, 27(8): 721-726.
- [2] 刘志萍, 田源, 王洪智, 等. 鼻咽癌IMRT中气腔对靶区及OAR剂量影响[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2017, 26(8): 862-866.
- LIU Z P, TIAN Y, WANG H Z, et al. Dosimetric effects of air cavity on target volume and organs at risk during intensity-modulated radiation therapy for nasopharyngeal carcinoma[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2017, 26(8): 862-866.
- [3] LEE T F, TING H M, CHAO P J, et al. Dual arc volumetric-modulated radiotherapy (VMAT) of nasopharyngeal carcinomas: a simultaneous integrated boost treatment plan comparison with intensity-modulated radiotherapies and single arc VMAT[J]. Clin Oncol, 2011, 24(3): 196-207.
- [4] KIM J I, PARK J M, PARK S Y, et al. Assessment of potential jaw tracking advantage using control point sequences of VMAT planning[J]. J Appl Clin Med Phys, 2014, 15(2): 160-168.
- [5] ARNFIELD M R, WU Q W, TONG S D, et al. Dosimetric validation for multileaf collimator based intensity modulated radiotherapy: a review[J]. Med Dosim, 2001, 26(2): 179-188.
- [6] JOY S, STARKSCHALL G, KRY S, et al. Dosimetric effects of jaw tracking in step-and-shoot intensity-modulated radiation therapy[J]. Appl Clin Med Phys, 2012, 13(2): 136-145.
- [7] SCHMIDHALTER D, FIX M K, NIEDERER P, et al. Leaf transmission reduction using moving jaws for dynamic MLC IMRT[J]. Med Phys, 2007, 34(9): 3674-3687.
- [8] STATHAKIS S, ESQUIVEL C, GUTIERREZ A, et al. Treatment planning and delivery of IMRT using 6 and 18 MV photon beams without flattening filter[J]. Appl Radiat Isot, 2009, 67(9): 1629-1637.
- [9] HALL E J, WU C S. Radiation-induced second cancers: the impact of 3D-CRT and IMRT[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2003, 56(1): 83-88.
- [10] 李成, 胡睿, 吴锦昌, 等. Jaw tracking技术对鼻咽癌调强放疗靶区和危及器官受照剂量影响的研究[J]. 国际生物医学工程杂志, 2015, 38(2): 95-98.
- LI C, HU R, WU J C, et al. Effects of jaw tracking technique in the absorb dose of PTV and OARs in intensity-modulated radiation therapy for nasopharyngeal carcinoma[J]. International Journal of Biomedical Engineering, 2015, 38(2): 95-98.
- [11] FENG Z, WU H, ZHANG Y, et al. Dosimetric comparison between jaw tracking and static jaw techniques in intensity-modulated radiotherapy[J]. Radiat Oncol, 2015, 10(1): 28.
- [12] ZWAHLEN D R, LANG S, HRBACEK J, et al. The use of photon beams of a flattening filter-free linear accelerator for hypofractionated volumetric modulated arc therapy in localized prostate cancer[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2012, 83(5): 1655-1660.
- [13] LONGI F, FOGLIATA A, CLERICI E, et al. Volumetric modulated arc therapy with flattening filter free beams for isolated abdominal pelvic lymph nodes: report of dosimetric and early clinical results in oligometastatic patients[J]. Radiat Oncol, 2012, 7: 204.
- [14] EMAMI B, LYMAN J, BROWN A, et al. Tolerance of normal tissue to therapeutic irradiation[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 1991, 21(1): 109-122.
- [15] PADDICK I. A simple scoring ratio to index the conformity of radiosurgical treatment plans[J]. J Neurosurg, 2000, 93(Suppl 3): 219-222.
- [16] LOSASSO T, CHUI C S, LING C C. Physical and dosimetric aspects of a multi-leaf collimation system used in the dynamic mode for implementing intensity modulated radiotherapy[J]. Med Phys, 1998, 25(10): 1919-1927.
- [17] CADMAN P, MCNUTT T, BZDUSEK K. Validation of physics improvements for IMRT with a commercial treatment-planning system[J]. J Appl Clin Med Phys, 2005, 6(2): 74-86.
- [18] YAO S, ZHANG Y, CHEN T, et al. Dosimetric comparison between jaw tracking and no jaw tracking in intensity-modulated radiation therapy[J]. Technol Cancer Res Treat, 2019, 1(8): 1-6.
- [19] TITT U, VASSILIEV O N, POENISCH F. Flattening filter free IMRT: first experimental results[J]. Med Phys, 2005, 32(6): 2146.
- [20] STATHAKIS S, ESQUIVEL C, GUTIERREZ A, et al. Treatment planning and delivery of IMRT using 6 and 18 MV photon beams without flattening filter[J]. Appl Radiat Isot, 2009, 67(9): 1629-1637.
- [21] 冯仲苏, 吴昊, 蒋璠, 等. 铅门跟随技术与铅门固定技术在直肠癌术前调强放疗中的剂量学比较[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2014, 34(12): 938-941.
- FENG Z S, WU H, JIANG F, et al. Dosimetric comparison of jaw tracking technique with static jaw technique in intensity-modulated radiotherapy for preoperative radiotherapy of rectal cancer[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2014, 34(12): 938-941.
- [22] 贾飞, 岳海振, 李国文, 等. 有无均整器模式下鼻咽癌容积旋转调强放疗计划的剂量学比较[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2014, 34(8): 597-600.
- JIA F, YUE H Z, LI G W, et al. Dosimetric comparison of volumetric-modulated arc therapy plans for nasopharyngeal carcinoma using flattening filter-free and flattening filter modes[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2014, 34(8): 597-600.
- [23] VASSILIEV O N, TITT U, POENISCH F, et al. Dosimetric properties of photon beams from a flattening filter free clinical accelerator[J]. Phys Med Biol, 2006, 51(7): 1907-1917.
- [24] FU W, DAI J, HU Y, et al. Delivery time comparison for intensity-modulated radiation therapy with/without flattening filter: a planning study[J]. Med Phys, 2004, 49(8): 1535-1548.

(编辑:谭斯允)