

## 准直器角度对鼻咽癌容积旋转调强计划及剂量验证的影响

武星蕾, 吴爱东, 吴爱林

中国科学技术大学附属第一医院西区, 安徽 合肥 230031

**【摘要】目的:**通过旋转准直器,研究准直器的旋转对鼻咽癌容积旋转调强(VMAT)计划与剂量验证的影响。**方法:**选择10名T<sub>3</sub>期鼻咽癌患者,每位患者分别设计10个VMAT计划,10个VMAT计划准直器角度分别为0°、5°、10°、15°、20°、25°、30°、35°、40°、45°,比较分析不同计划中靶区剂量、危及器官和正常组织的受照剂量以及机器跳数,并对每个计划进行剂量验证。**结果:**准直器角度为10°的VMAT计划,PGTV<sub>nx</sub>、PTV1以及PTV2的HI均值最小,CI均值最大( $P<0.05$ )。PGTV<sub>nd</sub>的HI均值在所有计划中变化不大( $P>0.05$ ),CI均值在5°~30°最大( $P<0.05$ )。脑干、脊髓以及眼球D<sub>max</sub>在5°~20°时较小( $P<0.05$ ),视交叉和下颌骨D<sub>max</sub>在15°~25°时较小,腮腺V<sub>30</sub>在35°时最小。靶区外正常组织,在低剂量区V<sub>5</sub>~V<sub>20</sub>时,0°和5°受照体积最低,在高剂量区V<sub>25</sub>~V<sub>50</sub>,10°最低。在不同的准直器角度,机器跳数平均值最小的是准直器为0°的计划,最大的是30°( $P<0.05$ )。所有计划的 $\gamma$ 通过率均在98%以上,其中准直器在20°时通过率最高。**结论:**在进行鼻咽癌VMAT计划设计时,可以将准直器角度设置在10°~20°来获取更好的靶区剂量分布,减少危及器官以及正常组织的受照剂量,同时不会降低剂量验证的通过率。**【关键词】**鼻咽癌;容积旋转调强;准直器角度;剂量验证

**【中图分类号】**R815.6

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2019)11-1249-06

## Effects of collimator angles on planning and dose verification of volumetric modulated arc therapy for nasopharyngeal carcinoma

WU Xinglei, WU Aidong, WU Ailin

West Branch of the First Affiliated Hospital of University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China

**Abstract: Objective** To study the effects of collimator rotation on the planning and dosimetric verification of volumetric modulated arc therapy (VMAT) for nasopharyngeal carcinoma. **Methods** Ten patients with stage T<sub>3</sub> nasopharyngeal carcinoma were selected and 10 VMAT plans with collimator angles of 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40° and 45° were designed for each patient. Dosimetric parameters, such as target coverage, the dose to organs-at-risk and normal tissues as well as monitor units, were compared among different plans, and dose verification was performed on each plan. **Results** The PGTV<sub>nx</sub>, PTV1, and PTV2 in VMAT plan with a collimator angle of 10° had the lowest average homogeneity index and the largest average conformity index ( $P<0.05$ ). The differences in average homogeneity index of PGTV<sub>nd</sub> among all plans was trivial ( $P>0.05$ ), and the maximum average conformity index occurred at 5°-30° ( $P<0.05$ ). The maximum doses to brain stem, spinal cord and eyeball were relatively lower at 5°-20° ( $P<0.05$ ); the maximum doses to optic chiasm and mandible were relatively smaller at 15°-25°; and the smallest parotid gland V<sub>30</sub> was at 35°. For the normal tissue outside the target areas (B-P), the minimum radiation volume in low-dose region (V<sub>5</sub>, V<sub>10</sub>, V<sub>15</sub> and V<sub>20</sub>) was at 0° and 5°, while that in high dose region (from V<sub>25</sub> to V<sub>50</sub>) was at 10°. Among all plans, the average monitor unit is minimum for the plan with collimator angles of 0° and was maximum for the plan with collimator angles of 30° ( $P<0.05$ ). The average gamma passing rates for all plans were above 98%, and the plan with collimator angles of 20° had the highest gamma passing rate. **Conclusion** In VMAT planning for nasopharyngeal carcinoma, collimator angle can be set at 10°-20° to obtain better target dose distribution, reduce the doses to organs-at-risk and normal tissues while maintaining the passing rate of dose verification. **Keywords:** nasopharyngeal carcinoma; volumetric modulated arc therapy; collimator rotation; dose verification

**【收稿日期】**2019-05-18

**【基金项目】**国家自然科学基金(11805198)

**【作者简介】**武星蕾, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 肿瘤放射物理学、放疗质控技术等, E-mail: 18005638890@163.com

**【通信作者】**吴爱东, 博士, 硕士生导师, 高级工程师, E-mail: aidongwu@21cn.com

## 前言

鼻咽癌作为头颈部恶性肿瘤中较为常见的一种,放射治疗是有效的治疗手段<sup>[1-4]</sup>。在鼻咽癌放疗中,动态容积旋转调强计划(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT)具有较好的靶区适形度,危及器

官(Organ-at-Risk, OAR)及靶区周围正常组织受到的照射较低,与固定野调强放射治疗(Intensity-Modulated Radiotherapy, IMRT)相比机器跳数(Monitor Unit, MU)更低,治疗时间明显缩短,具有更高的治疗效率<sup>[5-9]</sup>。因此,近年来VMAT普遍应用于临床治疗中。通常,在靶区形状较为复杂、多个靶区以及多种剂量要求的情况下,使用两个或者更多的VMAT弧来提高剂量分布<sup>[10-11]</sup>。在VMAT执行过程中,随着机架的转动加速器控制系统能够改变剂量率和多叶准直器(Multileaf Collimator, MLC)的位置,通过旋转准直器角度能够减少叶片间漏射和凹凸槽影响<sup>[12]</sup>。尽管国内外有些学者研究了准直器对VMAT计划的影响,但针对鼻咽癌的研究较少,本文对鼻咽癌VMAT计划设计过程中准直器角度的影响进行了研究,为更好地设计临床治疗计划提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象

选取10例分期为T<sub>3</sub>期且无放疗禁忌证的鼻咽癌患者作为研究对象进行回顾性研究。所有患者均为初次治疗并签署放疗知情同意书,患者治疗在配有kV级图像引导的加速器上进行,根据医师的要求时间实施锥形束CT图像引导,在线校正摆位误差,摆位误差在3 mm以下方可继续进行调强放射治疗。

### 1.2 体位固定和CT扫描

所有患者的扫描均采用仰卧位,头颈肩热塑面膜配合适合患者尺寸的头枕固定,在面膜表面做定位摆位标记,采用螺旋CT扫描,扫描方式为平扫+增强扫描;扫描范围为头顶至胸骨切迹下2 cm,层厚3 mm,扫描的CT图像经网络传输到Pinnacle<sup>3</sup> 9.10 治疗计划系统,以便勾画靶区与设计计划。

所有患者均进行MRI扫描,扫描采用增强扫描,范围从颞叶中部到胸廓入口,扫描的MRI图像经网络传输到Pinnacle<sup>3</sup> 9.10 治疗计划系统,并与CT图像进行融合。

### 1.3 靶区和危及器官的勾画

以2010年鼻咽癌放疗专家共识为依据,医师在CT与MRI融合的图像上逐层勾画。肿瘤靶区(Gross Tumor Volume, GTV)包括影像临床检查可见的原发肿瘤部位及其侵犯范围(GTVnx)以及影像和临床检查观察到的肿大淋巴结区域(GTVnd)。临床靶区(Clinical Target Volume, CTV)包括临床靶体积与高危淋巴引流区的临床靶体积(CTV1)以及需要预防照射的淋巴结引流区(CTV2)。计划靶区(Planning Target Volume, PTV):根据本单位摆位误

差对GTVnx、GTVnd、CTV1、CTV2分别外扩3 mm得出的PTV依次定义为PGTVnx、PGTVnd、PTV1、PTV2。OAR以ICRU 83号报告为依据勾画,包括脊髓、脑干、晶体、眼球、视神经、视交叉、垂体、颞叶、腮腺、颞颌关节等。

### 1.4 计划设计

应用Pinnacle<sup>3</sup> 9.10 治疗计划系统进行VMAT计划设计,在Varian公司Trilogy加速器上进行治疗,每个病例设计10个治疗床角度为0°的双弧VMAT计划,一个弧从180.1°到180.0°顺时针旋转,10组VMAT计划准直器角度Arc1分别是0°、5°、10°、15°、20°、25°、30°、35°、40°、45°;另一个弧从180.0°到180.1°逆时针旋转,准直器角度Arc2为360°-Arc1。10组计划的剂量约束条件和优化参数保持一致,采用靶区D<sub>mean</sub>归一方式,要求所有靶区95%体积达到相应的处方剂量。OAR要求:脑干D<sub>max</sub><54 Gy、脊髓D<sub>max</sub><45 Gy、眼球D<sub>max</sub><50 Gy、晶体D<sub>max</sub><8 Gy、视神经D<sub>max</sub><50 Gy、视交叉D<sub>max</sub><50 Gy、颞叶D<sub>max</sub><70 Gy、颞颌关节D<sub>max</sub><70 Gy、口腔D<sub>mean</sub><40 Gy、喉D<sub>mean</sub><45 Gy、腮腺V<sub>30</sub>(30 Gy剂量线所包围的腮腺体积占腮腺总体积的百分比)<50%、下颌骨D<sub>max</sub><70 Gy。

所有患者均采用6 MV光子线同步加量调强照射的治疗方式,靶区处方剂量PGTVnx为2.12 Gy/次、PGTVnd为2.00 Gy/次、PTV1为1.81 Gy/次、PTV2为1.64 Gy/次,总计33次,每周5次,总剂量分别为70、66、60、54 Gy。

### 1.5 治疗计划评估

在保证所有PTV 95%体积满足处方剂量的前提下,采用剂量体积直方图对PTV、OAR和正常组织的受照剂量参数进行统计学分析。PTV参数:均匀性

指数(Homogeneity Index, HI) =  $\frac{D_{2\%} - D_{98\%}}{D_{50\%}}$ <sup>[13]</sup>。其中,

D<sub>2%</sub>、D<sub>50%</sub>、D<sub>98%</sub>分别表示2%、50%、98%靶区体积所受剂量,HI值越接近0,代表靶区的均匀性越好。适形

度指数(Conformity Index, CI) =  $\frac{V_{T,ref}}{V_T} \times \frac{V_{T,ref}}{V_{ref}}$ <sup>[14]</sup>。其

中,V<sub>T,ref</sub>为参考等剂量线所覆盖靶体积,V<sub>T</sub>为靶区体积,V<sub>ref</sub>为参考等剂量线所围绕的所有体积,CI值越接近1,代表靶区的适形度越好。主要OAR受照剂量:脑干、脊髓、眼球、晶体、视神经、视交叉、颞叶、颞颌关节及下颌骨的D<sub>max</sub>;口腔及喉的D<sub>mean</sub>;腮腺V<sub>30</sub>。正常组织的受照剂量:将CT扫描的体积(B)减去所有PTV体积(P)后的正常组织定义为B-P,评估B-P的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>、V<sub>45</sub>、V<sub>50</sub>。统计所有计划的MU。

1.6 剂量验证

利用 SunNuclear 公司的三维剂量验证模体 ArcCheck 及 SNCP 分析软件对每个患者的 10 个治疗计划进行剂量验证。将每个病例的 VMAT 计划以 DICOM 格式经网络传至 Varian 治疗系统,用来实际测量。同时将 VMAT 计划复制到 QA 模体上,包括剂量通量图、MLC 位置信息、机架角度、射野权重等参数。在 QA 计划中以 QA 模体为射野中心,重新设置剂量框,将治疗计划的 MU 输入到 QA 计划中,重新计算出归一到 QA 模体上的剂量通量,将 QA 计划从 Pinnacle 计划系统传到 SunNuclear\_SCP 文件夹以便导入到 SNCP 分析软件中,与测量结果进行对比。对  $\gamma$  分析方式下相对剂量通过率结果进行比较。选择 10(参与比对的最小剂量限制)/3%(最大允许的剂量偏差)/3 mm(最大允许的采样位置范围)的验证标准。

1.7 统计学分析

本文所有数据均使用 SPSS 22.0 软件进行统计学分析,使用非参数秩和检验分析法,统计结果用均数 $\pm$ 标准差描述, $P<0.05$  为差异有统计学意义。本研究中初步判断 10°~20°的准直器角度较其他角度获得更好的剂量参数。在数据统计时,为摒除相近数据对统计的干扰,对 0°、10°、25°以及 45°这 4 组数据进行两两配对  $t$  检验。

2 结果

2.1 PTV 剂量参数比较

所有计划均能满足靶区的临床要求。对于 PGTV<sub>nx</sub>, HI 在 5°、10°、15°均值最小( $P<0.05$ );CI 在 10°均值最大( $P<0.05$ )。对 0°、10°、25°以及 45°两两进行配对  $t$  检验, PGTV<sub>nx</sub> 的 HI、CI 差异均有统计学意义( $P<0.05$ );对于 PGTV<sub>nd</sub>,HI 均值在所有度数基本一致( $P>0.05$ )。CI 均值在 5°~30°最大( $P<0.05$ ),对 0°、10°、25°以及 45°两两进行配对  $t$  检验,0°和 10°、10°和 45°差异有统计学意义( $P<0.05$ ),其他角度差异无统计学意义;对于 PTV1, HI 均值在 10°最小( $P<0.05$ ),对 0°、10°、25°以及 45°两两进行配对  $t$  检验,差异均有统计学意义( $P<0.05$ )。CI 均值在 10°最大( $P<0.05$ ),对 0°、10°、25°以及 45°两两进行配对  $t$  检验,0°和 10°对比差异有统计学意义( $P<0.05$ ),其他角度差异无统计学意义;对于 PTV2,HI 均值在 10°最小( $P<0.05$ ),对 0°、10°、25°以及 45°两两进行配对  $t$  检验,0°和 10°、10°和 25°、10°和 45°差异均有统计学意义( $P<0.05$ ),其他角度差异无统计学意义,CI 均值在 10°和 20°最大( $P<0.05$ ),对 0°、10°、25°以及 45°两两进行配对  $t$  检验, CI 差异均有统计学意义( $P<0.05$ )。在准直器旋转角度大于 30°后,靶区的 HI 和 CI 有变差的趋势,详见表 1。

表 1 不同准直器角度 PTV 剂量学参数( $\bar{x} \pm s$ )  
Tab.1 Dosimetric parameters of planning target volume at different collimator angles (Mean $\pm$ SD)

参数	准直器角度										F 值	P 值
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°		
PGTVnx												
HI	0.08±0.02	0.07±0.02	0.07±0.02	0.07±0.02	0.08±0.01	0.09±0.02	0.09±0.02	0.10±0.02	0.10±0.02	0.10±0.02	74.504	0.000
CI	0.76±0.07	0.78±0.07	0.79±0.06	0.78±0.04	0.77±0.07	0.74±0.06	0.72±0.08	0.70±0.10	0.68±0.12	0.67±0.12	49.799	0.000
PGTVnd												
HI	0.06±0.02	0.06±0.02	0.06±0.02	0.06±0.02	0.06±0.02	0.06±0.02	0.06±0.02	0.06±0.02	0.06±0.02	0.06±0.02	5.23	0.810
CI	0.14±0.07	0.15±0.07	0.15±0.07	0.15±0.08	0.15±0.08	0.15±0.08	0.15±0.07	0.14±0.07	0.14±0.07	0.14±0.07	40.60	0.000
PTV1												
HI	0.22±0.04	0.22±0.03	0.21±0.03	0.22±0.04	0.23±0.03	0.23±0.04	0.24±0.04	0.24±0.04	0.24±0.04	0.24±0.05	64.53	0.000
CI	0.44±0.11	0.45±0.12	0.47±0.11	0.46±0.09	0.46±0.09	0.46±0.10	0.45±0.10	0.44±0.10	0.42±0.08	0.43±0.10	17.27	0.045
PTV2												
HI	0.36±0.03	0.36±0.03	0.35±0.03	0.36±0.04	0.36±0.02	0.37±0.04	0.37±0.04	0.37±0.04	0.37±0.04	0.37±0.04	20.28	0.010
CI	0.73±0.02	0.74±0.03	0.75±0.03	0.74±0.04	0.75±0.04	0.74±0.04	0.73±0.04	0.72±0.04	0.70±0.05	0.70±0.05	42.35	0.000

2.2 OAR 受照剂量比较

脑干、脊髓以及眼球  $D_{max}$  在 5°~20°时较小,在 25°之后明显增大( $P<0.05$ ),对 0°、10°、25°以及 45°两两进行

配对  $t$  检验,除 0°和 10°没有统计学意义,其他角度两两配对均有统计学意义( $P<0.05$ )。视交叉和下颌骨  $D_{max}$  在 15°~25°时较小,在其他角度明显增大( $P<0.05$ ),对 0°、

10°、25°以及45°两两进行配对 $t$ 检验,除25°和10°没有统计学意义,其他角度两两配对均有统计学意义( $P<0.05$ )。晶体、视神经、颞叶和颞颌关节的 $D_{\max}$ 以及喉和口腔的 $D_{\text{mean}}$ 在每个旋转角度相差不大,没有明显的变化趋势( $P>0.05$ )。腮腺 $V_{30}$ 在准直器角度为35°时最小,准直器角度大于20°时腮腺 $V_{30}$ 明显小于20°之前的角度( $P<0.05$ ),对0°、10°、25°以及45°两两进行配对 $t$ 检验,两两配对均无统计学意义( $P>0.05$ ),详见表2。

表2 不同准直器角度OAR剂量学参数( $\bar{x} \pm s$ )

Tab.2 Dosimetric parameters of organs-at-risk at different collimator angles (Mean±SD)

参数	准直器角度										F值	P值
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°		
脑干												
D <sub>max</sub> /Gy	52.61±	51.91±	52.24±	52.64±	52.51±	53.28±	54.03±	53.64±	54.16±	54.27±	40.800	0.000
	0.66	1.32	1.44	1.42	1.30	1.26	2.20	1.08	1.75	1.69		
脊髓												
D <sub>max</sub> /Gy	42.83±	42.81±	42.78±	42.90±	43.17±	43.51±	43.98±	44.56±	44.62±	44.51±	43.287	0.000
	1.47	1.65	1.36	1.42	1.84	1.86	2.14	1.97	1.69	2.10		
晶体												
D <sub>max</sub> /Gy	5.86±	5.79±	5.94±	6.14±	5.85±	5.93±	6.11±	5.67±	5.82±	5.72±	8.510	0.480
	1.03	1.12	0.99	0.93	1.14	0.95	1.03	1.16	0.98	0.95		
眼球												
D <sub>max</sub> /Gy	24.21±	22.17±	21.52±	22.36±	22.16±	24.65±	26.48±	23.45±	24.43±	24.20±	20.204	0.017
	9.21	6.48	6.82	6.02	6.36	7.64	9.02	8.10	7.97	9.27		
视神经												
D <sub>max</sub> /Gy	33.78±	35.77±	36.75±	35.81±	35.22±	34.94±	34.67±	34.52±	35.65±	34.76±	9.840	0.364
	12.70	11.36	10.67	11.92	11.33	11.91	12.69	12.63	12.81	13.21		
视交叉												
D <sub>max</sub> /Gy	31.16±	29.76±	24.99±	22.84±	21.15±	22.89±	25.94±	26.26±	27.66±	26.95±	41.921	0.000
	6.75	7.91	7.42	6.40	6.93	8.06	10.01	8.12	8.66	8.96		
颞颌关节												
D <sub>max</sub> /Gy	60.79±	60.84±	60.93±	61.33±	61.06±	60.66±	61.23±	62.10±	62.50±	62.89±	10.648	0.301
	3.27	3.03	3.00	3.09	3.99	3.09	2.66	3.33	3.77	5.19		
下颌骨												
D <sub>max</sub> /Gy	66.72±	66.32±	66.19±	66.00±	66.27±	66.14±	66.58±	66.62±	66.74±	67.35±	28.092	0.001
	3.89	3.95	3.71	4.64	4.27	4.90	4.47	4.15	3.84	4.33		
颞叶												
D <sub>max</sub> /Gy	65.60±	65.61±	66.14±	65.78±	66.02±	66.57±	64.91±	65.06±	65.19±	65.17±	10.648	0.301
	3.78	3.49	3.44	3.56	3.61	4.03	4.64	4.26	3.92	3.97		
口腔												
D <sub>mean</sub> /Gy	38.29±	38.09±	37.98±	37.81±	37.74±	38.04±	37.90±	37.40±	37.50±	37.38±	10.669	0.299
	3.32	3.10	2.88	3.04	3.01	3.05	3.11	3.36	3.72	3.73		
喉												
D <sub>mean</sub> /Gy	43.74±	43.71±	43.37±	43.49±	43.62±	43.37±	43.55±	43.46±	43.38±	43.37±	4.255	0.894
	1.78	1.95	2.11	2.07	1.77	2.20	2.29	2.52	2.78	2.97		
腮腺												
V <sub>30</sub> /%	36.74±	36.67±	36.29±	35.60±	34.20±	34.72±	35.51±	33.80±	34.35±	34.58±	19.055	0.025
	4.51	4.16	6.09	5.63	6.62	6.74	6.85	6.54	6.87	6.72		

2.3 B-P受照剂量比较

对于B-P,除 $V_{10}$ 和 $V_{15}$ 外,其他剂量区受照体积

差异均有统计学意义。在低剂量区 $V_5\sim V_{20}$ ,0°和5°受照体积最低,在高剂量区 $V_{25}\sim V_{50}$ ,10°最低。在所有



的剂量区,在准直器旋转 25°之后,随着准直器进一步旋转,受照体积明显增加,对 0°、10°、25°以及 45°两两进行配对 *t* 检验,在所有剂量区域,除 0°和 10°没有统计学意义,其他角度两两对比均有统计学意义 ( $P<0.05$ ),详见表 3。

2.4 MU 比较

10 组计划的平均 MU 差异有统计学意义 ( $P<0.05$ )。MU 在 0°计划中最低,在 30°最高,每组计划的跳数均较低,对 0°、10°、25°以及 45°两两进行配对 *t* 检验,0°和 25°、0°和 45°差异有统计学意义 ( $P<0.05$ ),其他角度差异无统计学意义,详见表 3。

表 3 不同准直器角度正常组织的剂量学参数( $\bar{x} \pm s$ )  
Tab.3 Dosimetric parameters of normal tissues at different collimator angles (Mean±SD)

参数	准直器角度										F 值	P 值
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°		
V <sub>5</sub> /%	47.97±5.08	47.82±5.03	48.51±5.19	49.2±5.12	49.04±5.03	49.11±4.61	49.57±4.63	49.94±4.88	49.82±4.83	49.99±5.16	54.589	0.000
V <sub>10</sub> /%	39.75±4.34	39.93±4.12	40.11±4.21	40.26±4.18	40.18±4.30	39.98±3.68	40.51±3.82	40.65±4.15	40.26±3.60	40.21±4.29	16.713	0.053
V <sub>15</sub> /%	34.62±3.68	34.57±3.49	34.77±3.37	34.89±3.63	34.83±3.68	34.88±3.19	35.30±3.22	35.30±3.37	34.98±3.03	34.75±3.52	12.960	0.164
V <sub>20</sub> /%	29.93±3.02	29.95±3.00	30.03±2.88	30.27±3.24	30.13±3.15	30.55±2.86	30.99±3.00	31.03±2.98	30.79±2.90	30.55±3.14	31.724	0.000
V <sub>25</sub> /%	25.35±2.61	25.45±2.54	25.30±2.43	25.65±2.95	25.37±2.73	26.15±2.61	26.83±2.70	26.94±2.64	26.93±2.79	26.80±2.88	59.564	0.000
V <sub>30</sub> /%	20.79±2.03	20.93±2.09	20.47±2.03	21.01±2.55	20.59±2.45	21.59±2.43	22.59±2.36	22.73±2.24	23.08±2.55	23.08±2.71	67.265	0.000
V <sub>35</sub> /%	16.16±1.41	16.41±1.58	15.87±1.77	16.41±2.17	16.05±2.17	17.06±2.14	18.18±1.99	18.31±1.85	19.07±2.30	19.06±2.62	71.302	0.000
V <sub>40</sub> /%	11.63±1.01	11.81±1.18	11.57±1.40	11.90±1.59	11.66±1.70	12.34±1.55	13.39±1.55	13.52±1.48	14.40±1.78	14.38±2.12	70.931	0.000
V <sub>45</sub> /%	7.54±0.58	7.58±0.70	7.50±0.86	7.62±0.90	7.59±1.07	7.93±0.92	8.66±1.09	8.84±1.12	9.47±1.44	9.35±1.37	68.662	0.000
V <sub>50</sub> /%	4.13±0.40	4.04±0.38	4.03±0.44	4.07±0.47	4.07±0.55	4.24±0.51	4.67±0.67	4.87±0.73	5.29±0.96	5.12±0.80	68.793	0.000
MU	489.0±37.6	506.4±35.3	514.3±39.4	517.8±39.5	521.9±39.2	526.1±38.4	528.0±38.7	521.0±39.0	509.4±38.9	513.7±25.6	20.080	0.020
γ通过率/%	98.53±0.93	98.35±0.83	98.40±0.67	98.51±0.74	98.71±0.46	98.38±0.71	98.34±0.89	98.33±0.88	98.26±1.11	98.25±1.02	7.310	0.610

2.5 计划验证 γ 通过率比较

在不同的准直器角度,VMAT 计划 γ 通过率均在 98% 以上,其中准直器角度在 20°时通过率最高。准直器角度在 0°~20°时 γ 通过率高于 25°~45°,详见表 3。

3 讨论

Li 等<sup>[15]</sup>选择 10 名前列腺癌患者研究准直器旋转对前列腺癌 VMAT 计划的影响,研究结果表明在 45°时,靶区的 CI、HI 值表现最好,与 0°相比直肠和膀胱的 V<sub>60</sub>不会明显增大,最终认为 45°是最佳角度,其他研究者也得出了类似结果<sup>[16]</sup>。

Sandrini 等<sup>[17]</sup>研究了准直器角度对肺癌患者 SBRT 治疗的 VMAT 计划影响,发现在 0°和 90°时,计

划比预期的更差,准直器在 20°~45°之间靶区的均匀性和适形度以及 OAR 保护得更好。

在 Eclipse (Varian Medical Systems) 计划系统中,推荐使用 10°(350°)和 30°(330°)作为大部分情况下的最优准直器角度。准直器角度是影响 VMAT 计划质量的一个重要因素,在 0°时,随着机架的旋转 MLC 叶片间漏射进行累积,计划执行过程中累积的漏射剂量造成了不需要的剂量分布,这种剂量分布不能通过计划优化来控制,在不同的准直器角度,不需要的剂量能够通过计划优化的过程来控制。因此,在 VMAT 计划中通过旋转准直器能够获得更好的剂量分布,同时靶区周围的正常组织得到更好的保护。

然而,目前还没有一项技术能够在 VMAT 计划执

行过程中实时的旋转准直器角度,因此在进行计划设计时必须选择一个合适的准直器角度,计划设计者根据经验以及相关文献报道,同时考虑靶区形状、尺寸和靶区位置设定最优的准直器角度<sup>[18]</sup>。

本研究分析了10个不同准直器角度对鼻咽癌VMAT计划与剂量验证的影响,鼻咽癌不同于其他癌症,在靶区附近分布着许多重要的OAR如脑干、脊髓、视神经等。从本研究中可以看出在准直器角度在5°~20°的计划大部分靶区适形度、均匀性均很好,在大于30°之后,又有变差的趋势。在OAR的保护方面,除腮腺外,与0°相比小幅度(<25°)旋转准直器能够降低脑干、脊髓以及眼球等OAR受量。旋转准直器角度增加了低剂量区域受照体积,降低了高剂量区域的受照体积。在准直器旋转超过25°时,整个剂量区的受照体积明显变大。

通过ArcCheck对每个计划进行了剂量验证,发现所有准直器角度 $\gamma$ (3%/3 mm标准)通过率均能达到98%以上。在20°时,通过率达到98.71%,在较小的角度, $\gamma$ 通过率明显高于大于20°,这一结果与Kim等<sup>[19]</sup>研究结果类似,他们使用二维电离室矩阵MatriXX系统验证VMAT计划,以此分析准直器角度对VMAT计划剂量学验证的影响。研究结果显示随着准直器角度增大,通过率增大且在10°时达到峰值,之后随着旋转角度增大,通过率逐渐减小。

加速器治疗照射的准确性依赖于机架和准直器等中心以及叶片位置的几何精度。在不同的准直器角度和机架角度,叶片的极限速度、MLC的位置以及机器的等中心都会不同<sup>[20-21]</sup>。所以计划验证时 $\gamma$ 通过率对准直器角度有一定依赖性。准直器角度相对越小,计划通过率越高。但是对于MLC漏射问题,角度相对越大,漏射越少,因此,对于角度的选择需要进行一定取舍。

通过10例T<sub>3</sub>期鼻咽癌放疗患者的不同准直器角度VMAT计划的物理参数评估,对OAR保护、B-P受照体积以及计划验证 $\gamma$ 通过率的对比研究发现,准直器角度在10°~20°时,能够提高靶区的均匀性和适形度,更有效的保护脑干、脊髓以及眼球等重要器官,降低B-P的受照剂量体积,计划执行的准确性也较高。在其他医院由于计划系统和加速器型号不同,研究结果可能不完全相同,但通过与文章中相似的测量方法,能够发现最优准直器角度。同时,通过本研究发现准直器旋转在VMAT计划设计中的作用,为进一步设计动态准直器旋转角度提供指导性意义。

## 【参考文献】

[1] 徐国镇,唐平章,罗京伟.加强以放射治疗为主的鼻咽癌综合治疗研究[J].中华耳鼻咽喉头颈外科杂志,2012,47(3):177-179.  
XU G Z, TANG P Z, LUO J W. Strengthen the comprehensive treatment of nasopharyngeal carcinoma treated with radiotherapy[J]. Chinese Journal of Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery, 2012, 47(3): 177-179.

[2] QIN D, HU Y, YAN J, et al. Analysis of 1 379 patients with nasopharyngeal carcinoma treated by radiation[J]. Cancer, 1988, 61(6): 1117-1124.  
[3] YI J L, GAO L, HUANG X D, et al. Nasopharyngeal carcinoma treated by radical radiotherapy alone: ten-year experience of a single institution[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2006, 65(1): 161-168.  
[4] ZHANG L, ZHAO C, GHIMIRE B, et al. The role of concurrent chemoradiotherapy in the treatment of locoregionally advanced nasopharyngeal carcinoma among endemic population: a meta-analysis of the phase III randomized trials[J]. BMC Cancer, 2010, 10(1): 558.  
[5] KJAER-KRISTOFFERSEN F, OHLHUES L, MEDIN J, et al. RapidArc volumetric modulated therapy planning for prostate cancer patients[J]. Acta Oncol, 2009, 48(2): 227-232.  
[6] BERTELSEN A, JØRGENSEN S, DREWSSEN M, et al. The rotational temperature of polar molecular ions in Coulomb crystals[J]. J Phys B-At Mol Opt, 2005, 39(5): L83-L89.  
[7] CLEMENTE S, WU B B, SANGUINETI G, et al. Smartarc-based volumetric modulated arc therapy for oropharyngeal cancer: a dosimetric comparison with both intensity-modulated radiation therapy and helical tomotherapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2011, 80(4): 1248-1255.  
[8] KUMAR S A, HOLLA R, SUKUMAR P, et al. Treatment planning and dosimetric comparison study on two different volumetric modulated arc therapy delivery techniques[J]. Rep Pract Oncol Radiother, 2013, 18(2): 87-94.  
[9] LEE K H, YIP W Y, CHEUNG C H, 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.  
[10] GUCKENBERGER M, RICHTER A, KRIEGER T, et al. Is a single arc sufficient in volumetric-modulated arc therapy (VMAT) for complex-shaped target volumes? [J]. Radiother Oncol, 2009, 93(2): 259-265.  
[11] BORTFELD T, WEBB S. Single-arc IMRT? [J]. Phys Med Biol, 2009, 54(1): N9-N20.  
[12] OTTO K, CLARK B G. Enhancement of IMRT delivery through MLC rotation[J]. Phys Med Biol, 2002, 47(22): 3997-4017.  
[13] QUAN E M, LI X Q, LI Y P, et al. A comprehensive comparison of IMRT and VMAT plan quality for prostate cancer treatment[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2012, 83(4): 1169-1178.  
[14] 庄志逸,吕长兴,刘俊.颈段及胸上段食管癌调强放射治疗计划的比较[J].中国医学物理学杂志,2010,27(11):2233-2235.  
ZHUANG Z M, LÜ C X, LIU J. Comparison of intensity-modulated radiation therapy (IMRT) for cervical and upper thoracic esophageal carcinoma[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2010, 27(11): 2233-2235.  
[15] LI M H, HUANG S F, CHANG C C, et al. Variations in dosimetric distribution and plan complexity with collimator angles in hypofractionated volumetric arc radiotherapy for treating prostate cancer[J]. J Appl Clin Med Phys, 2018, 19(2): 93-102.  
[16] KHAN M, REHMAN J, KHAN M, et al. Dosimetric dependence on the collimator angle in prostate volumetric modulated arc therapy[J]. Med Phys, 2014, 41(6): 366-367.  
[17] SANDRINI S E, SILVA A X, SILVA C M. Evaluation of collimator rotation for volumetric modulated arc therapy lung stereotactic body radiation therapy using flattening filter free[J]. Appl Radiat Isot, 2018, 141(5): 257-260.  
[18] KIM Y H, PARK H R, KIM W T, et al. Effect of the collimator angle on dosimetric verification of the volumetric modulated arc therapy[J]. J Korean Phys Soc, 2015, 67(1): 243-247.  
[19] KIM Y H, PARK D, PARK H R, et al. Effect of collimator angles on the dosimetric results of volumetric modulated arc therapy planning for patients with a locally-advanced nasopharyngeal carcinoma[J]. J Korean Phys Soc, 2017, 70(5): 539-544.  
[20] LING C C, CLIFTON C, ZHANG P, et al. Commissioning and quality assurance of rapidarc radiotherapy delivery system[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2008, 72(2): 575-581.  
[21] OKUMURA M, OBATA Y K, TAMURA M, et al. The effect of gantry and collimator angles on leaf limited velocity and position in dynamic multileaf collimator intensity-modulated radiation therapy[J]. Phys Med Biol, 2010, 55(11): 3101-3113.

(编辑:薛泽玲)