

## 准直器角度误差对脑转移瘤VMAT计划Gamma通过率的影响

邓官华<sup>1</sup>, 黄爱花<sup>2</sup>, 陈丽霞<sup>3</sup>, 罗龙辉<sup>1</sup>, 戴鹏<sup>1</sup>, 张平<sup>1</sup>, 赖名耀<sup>1</sup>, 山常国<sup>1</sup>, 黄庆<sup>1</sup>, 蔡林波<sup>1</sup>

1. 广东三九脑科医院肿瘤综合治疗中心, 广东 广州 510510; 2. 广州中医药大学祈福医院呼吸内科, 广东 广州 511495; 3. 南方医科大学生物医学工程学院, 广东 广州 510515

**【摘要】目的:**通过旋转准直器角度模拟准直器角度误差,探讨准直器角度误差对单中心多发脑转移瘤容积旋转调强技术(VMAT)计划Gamma通过率的影响。**方法:**随机选取21例多发脑转移瘤患者的非共面VMAT计划,以无准直器角度误差放疗计划为模板计划,分别将准直器的角度旋转偏移 $\pm 0.5^\circ$ 、 $\pm 1.0^\circ$ 、 $\pm 1.5^\circ$ 、 $\pm 2.0^\circ$ ,不进行通量优化,重新计算剂量分布形成模拟计划,利用OmniPro-I'mRT软件比较模板计划与模拟计划在3%/3 mm、2%/3 mm、3%/2 mm、2%/2 mm及1%/1 mm标准下的Gamma通过率,并通过非参数配对Wilcoxon秩和检验分析不同准直器角度误差Gamma通过率的差异。**结果:**在3%/3 mm、2%/3 mm、3%/2 mm、2%/2 mm及1%/1 mm标准下,当准直器角度误差大于 $0.5^\circ$ 时,其Gamma通过率差异具有统计学意义( $P < 0.05$ )。在1%/1 mm标准下,- $2.0^\circ$ 、 $-1.5^\circ$ 、 $-1.0^\circ$ 、 $-0.5^\circ$ 、 $0.5^\circ$ 、 $1.0^\circ$ 、 $1.5^\circ$ 、 $2.0^\circ$ 准直器角度误差的Gamma平均通过率分别降低4.80%、3.30%、2.00%、0.82%、0.73%、1.50%、2.10%和3.10%( $P=0.003$ 、 $0.005$ 、 $0.020$ 、 $0.593$ 、 $0.469$ 、 $0.043$ 、 $0.030$ 、 $0.001$ )。**结论:**随着准直器角度误差越大和应用标准越严格,Gamma通过率下降越大。为了保证VMAT计划执行的准确性,需要对准直器角度做更加严格的质量控制和保证控制,建议准直器角度误差控制在 $\pm 0.5^\circ$ 范围内。

**【关键词】**准直器;角度误差;脑转移瘤;容积旋转调强技术;Gamma通过率

**【中图分类号】**R815

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2019)12-1411-05

## Effects of collimator angle error on Gamma passing rates for volumetric modulated arc therapy plan for intracranial metastases

DENG Guanhua<sup>1</sup>, HUANG Aihua<sup>2</sup>, CHEN Lixia<sup>3</sup>, LUO Longhui<sup>1</sup>, DAI Peng<sup>1</sup>, ZHANG Ping<sup>1</sup>, LAI Mingyao<sup>1</sup>, SHAN Changguo<sup>1</sup>, HUANG Qing<sup>1</sup>, CAI Linbo<sup>1</sup>

1. Department of Oncology, Guangdong Sanjiu Brain Hospital, Guangzhou 510510, China; 2. Department of Respiratory Medicine, Clifford Hospital, Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou 511495, China; 3. School of Biomedical Engineering, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China

**Abstract: Objective** To analyze the effect of collimator angle error which was simulated by rotating collimator angles on Gamma passing rates for volumetric modulated arc therapy (VMAT) plan for monocentric and multiple intracranial metastases. **Methods** The non-coplanar VMAT treatment plans of 21 patients with multiple intracranial metastases were analyzed. The radiotherapy plan without collimator angle error was taken as template plan, and then simulation plans were created by recalculating dose profiles without flux optimization after the collimator was rotated by  $\pm 0.5^\circ$ ,  $\pm 1.0^\circ$ ,  $\pm 1.5^\circ$  and  $\pm 2.0^\circ$ . OmniPro-I'mRT software was used to compare the Gamma passing rates between the template plan and simulation plans under the criteria of 3%/3 mm, 2%/3 mm, 3%/2 mm, 2%/2 mm and 1%/1 mm. The differences in Gamma passing rates of different collimator angles were analyzed by non-parametric paired Wilcoxon rank test. **Results** Under the criteria of 3%/3 mm, 2%/3 mm, 3%/2 mm, 2%/2 mm and 1%/1 mm, there was statistical difference ( $P < 0.05$ ) in Gamma passing rates when the collimator angle error was greater than  $0.5^\circ$ . The plans with the collimator angle errors of  $-2.0^\circ$ ,  $-1.5^\circ$ ,  $-1.0^\circ$ ,  $-0.5^\circ$ ,  $0.5^\circ$ ,  $1.0^\circ$ ,  $1.5^\circ$  and  $2.0^\circ$  had the mean Gamma passing rates decreased by 4.80%, 3.30%, 2.00%, 0.82%, 0.73%, 1.50%, 2.10% and 3.10%, respectively ( $P=0.003$ ,  $0.005$ ,  $0.020$ ,  $0.593$ ,  $0.469$ ,  $0.043$ ,  $0.030$ ,  $0.001$ ), under the criterion of 1%/1 mm. **Conclusion** With greater collimator angle errors and stricter criteria, the decrease in mean Gamma passing rate becomes larger. The strengthening of quality control and assurance on collimator angle is required to guarantee the accuracy of VMAT delivery and it is recommended that the collimator angle error should be controlled within  $\pm 0.5^\circ$ .

**Keywords:** collimator; angle error; intracranial metastasis; volumetric modulated arc therapy; Gamma passing rate

**【收稿日期】**2019-08-20

**【基金项目】**广东三九脑科医院新技术项目(2017012)

**【作者简介】**邓官华, 硕士, 中级职称, 研究方向: 肿瘤的早期发现及放射治疗, E-mail: gh.deng@foxmail.com

**【通信作者】**蔡林波, 硕士, 主任医师, 研究方向: 脑肿瘤放射治疗及靶向治疗, E-mail: cailinbo999@163.com

## 前言

脑转移瘤是成年颅内常见的恶性肿瘤之一,随着医疗技术的发展,肿瘤患者生存时间的延长,约10%~30%的肿瘤患者会发生脑转移<sup>[1]</sup>,且有约50%的脑转移瘤患者为多发脑转移瘤<sup>[2]</sup>。容积旋转调强技术(VMAT)能实现更好的靶区均匀性、适形度及剂量跌落更快,常作为治疗多发脑转移瘤的首选治疗技术<sup>[3]</sup>。相对于传统固定野调强技术,VMAT计划的计算复杂度更高,对加速器机械精度要求更为严格<sup>[4]</sup>。为了保证放疗过程中的安全性,治疗前都需要对VMAT计划进行剂量学验证。目前,多数放疗中心在进行放疗计划剂量验证时采用Gamma通过率来判断VMAT计划是否合格<sup>[5-8]</sup>。Gamma通过率受到Gamma分析标准、剂量分布分辨率、准直器叶片(Multi-Leaf Collimator, MLC)到位精度及角度精度等多种因素的影响。现有的大多数文献,主要集中在研究摆位误差<sup>[9-10]</sup>、剂量分布分辨率<sup>[11-12]</sup>及MLC到位精度<sup>[4,13-14]</sup>对Gamma通过率的影响。准直器角度误差对单中心多发脑转移瘤VMAT计划的Gamma通过率是否有影响,相关文献报道较少。本质上讲,Gamma比较法是一种定量比较两种剂量分布的方法,它不仅可用于计划系统计算分布与测量分布之间的比较,同时还可以用于两种测量分布或者两种计算分布之间的比较<sup>[15-16]</sup>。因此,本研究通过旋转准直器角度模拟准直器角度误差大小来分析单中心多发脑转移瘤VMAT计划中准直器角度误差对Gamma通过率的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 一般资料

选取2018年1月~2019年6月广东三九脑科医院肿瘤综合治疗中心收治确诊为多发脑转移瘤患者21例,其中男10例,女11例,年龄29~74岁,肿瘤的体积为(0.7~68.7) cm<sup>3</sup>。

### 1.2 仪器设备

美国Varian UNIQUE直线加速器,配备60对全自动独立MLC,中心40对MLC宽度为0.5 cm,两端各10对MLC宽度为1.0 cm,采用滑窗调强运动模式,计划剂量率设置为400 MU/min。放疗计划系统为Varian Eclipse 13.6,射线能量为6 MV X线,剂量算法为各向异性解析算法(Anisotropic Analytical Algorithm, AAA)<sup>[17]</sup>,计算网格设置为2.5 mm。

### 1.3 VMAT计划设计

所有患者均采用VMAT动态调强滑窗技术照射,采用3~4条弧,其中1~2条为共面弧,2条非共面

弧,等中心位于各个肿瘤中心与等中心之间的距离之和最小的位置<sup>[18]</sup>,如图1所示。为了避免Varian MLC沟槽效应的影响,准直器角度设置为10°或350°。计划靶区(PTV)处方剂量为24 Gy,8 Gy/次。正常组织约束条件为<sup>[19]</sup>:脑干D<sub>max</sub><23.1 Gy,延髓D<sub>max</sub><21.9 Gy,晶体D<sub>max</sub><7 Gy,视神经D<sub>max</sub><17.4 Gy。VMAT计划设计完成并得到医生确认后,将此治疗计划作为模板计划。

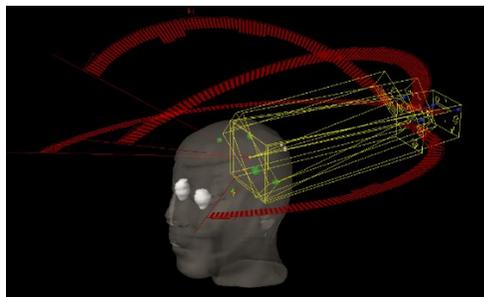


图1 多发脑转移瘤VMAT计划等中心设置示意图  
Fig.1 Iso-center setting of volumetric modulated arc therapy for multiple brain metastases

VMAT计划执行过程中准直器角度误差模拟:在模板计划的基础上,改变准直器角度,保持其他参数不变,模拟准直器角度误差。准直器的旋转偏移角度为±0.5°、±1.0°、±1.5°、±2.0°，“+”号误差为顺时针方向旋转误差，“-”号误差为逆时针方向旋转误差。例如,+0.5°表示VMAT计划中每条弧的准直器角度旋转偏移0.5°。不进行通量优化,重新计算剂量分布,然后分别输出每个计划等中心水平面的剂量分布图,输出时剂量分布的分辨率设置为0.392 mm/像素<sup>[11]</sup>。所有生成VMAT计划,均不作为实际执行治疗计划,仅限于实验参数比较。

### 1.4 Gamma指数分析

采用Gamma分析法进行等中心平面剂量分布比较,即将模板计划的等中心平面剂量分布图与准直器角度旋转偏移的等中心平面剂量分布图进行Gamma分析比较,其计算公式如下所示<sup>[12,20]</sup>:

$$\gamma(\mathbf{r}_m) = \min \left\{ \Gamma(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_c) \right\} \forall \{ \mathbf{r}_c \} \quad (1)$$

其中,

$$\begin{cases} \Gamma(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_c) = \sqrt{\frac{r^2(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_c)}{\Delta d_m^2} + \frac{\delta^2(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_c)}{\Delta D_m^2}} \\ r(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_c) = |\mathbf{r}_c - \mathbf{r}_m| \\ \delta(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_c) = D_c(\mathbf{r}_c) - D_m(\mathbf{r}_m) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $r(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_c)$ 为c点与m点之间的距离, $\delta(\mathbf{r}_m, \mathbf{r}_c)$ 为c点与m点之间的剂量差。 $\Delta D$ 为剂量差别标准, $\Delta d$ 为

距离一致性标准。采用 IBA OmniPro-ImRT (Version: 1.7) 软件计算 Gamma 指数, 计算中取最大剂量点为归一点,  $\Delta D$  和  $\Delta d$  分别取 3%/3 mm、2%/3 mm、3%/2 mm、2%/2 mm 及 1%/1 mm 标准。当  $\gamma(r_m) \leq 1$  时, 计算通过, 否则计算失败。实际剂量分布的采集采用 Varian Unique 自带的 a-Si 1000 非晶硅半导体探测器, 有效探测面积为 40 cm×30 cm, 分辨率为 0.392 mm/像素。通过 OmniPro-ImRT 可得到剂量分布的 Gamma 通过率, 对比不同准直器角度误差得到的 Gamma 通过率结果, 分析准直器角度误差对单中性多发脑转移瘤 VMAT 计划 Gamma 通过率的影响。

### 1.5 统计学方法

采用 IBM SPSS 21.0 对数据进行统计学处理分析, 计量资料采用均数±标准差表示, 采用非参数配对 Wilcoxon 秩和检验, 显著性检验水准为 0.05,  $P < 0.05$  表示差异有统计学意义。

## 2 结果

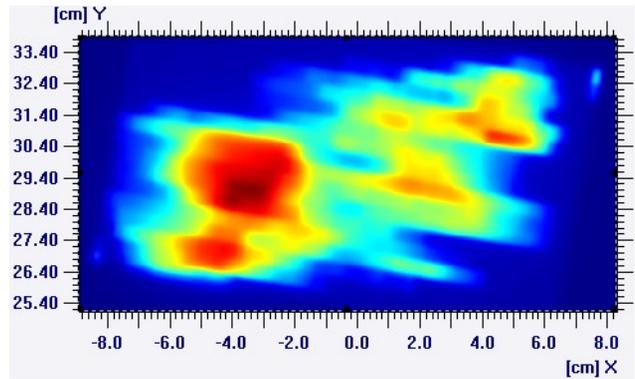
图 2 为无准直器角度误差下, 计划系统预测通量图和 EPID 实际采集的通量图及 3%/3 mm 标准下 Gamma 指数的分布图。表 1 为 3%/3 mm 标准下, 不同准直器角度误差的 Gamma 通过率及统计学差异。从表 1 可以看出, 当准直器角度误差大于 0.5° 时, 其 Gamma 通过率具有显著性差异。此外, 随着准直器角度误差增大, Gamma 通过率的标准差也随之增大。

图 3 显示为应用 3%/3 mm、2%/3 mm、3%/2 mm、2%/2 mm 及 1%/1 mm 标准作为评价指标时, 每种准直器角度误差引起 Gamma 平均通过率的变化图。在 1%/1 mm 标准下, -2.0°、-1.5°、-1.0°、-0.5°、0.5°、1.0°、1.5°、2.0° 准直器角度误差的 Gamma 平均通过率分别降低 4.80%、3.30%、2.00%、0.82%、0.73%、1.50%、2.10%、3.10%。

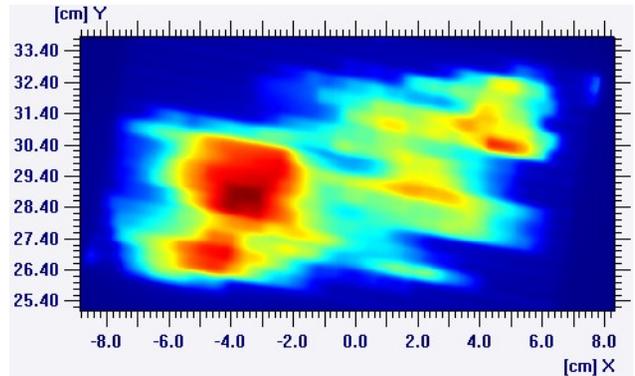
图 4 为准直器角度误差为 ±0.5°、±1.0°、±1.5°、±2.0° 时, 分别在 3%/3 mm、2%/3 mm、3%/2 mm、2%/2 mm 及 1%/1 mm 标准下, 其 Gamma 通过率的统计学分析结果图。从图 4 可以看出, 当准直器角度误差小于或等于 0.5° 时, 在 3%/3 mm、2%/3 mm、3%/2 mm、2%/2 mm 及 1%/1 mm 标准下, Gamma 通过率无统计学差异 ( $P < 0.05$ )。例如当评价标准为 1%/1 mm 标准时, -2.0°、-1.5°、-1.0°、-0.5°、0.5°、1.0°、1.5°、2.0° 准直器角度误差的  $P$  值分别为 0.003、0.005、0.020、0.593、0.469、0.043、0.030 及 0.001。

## 3 讨论

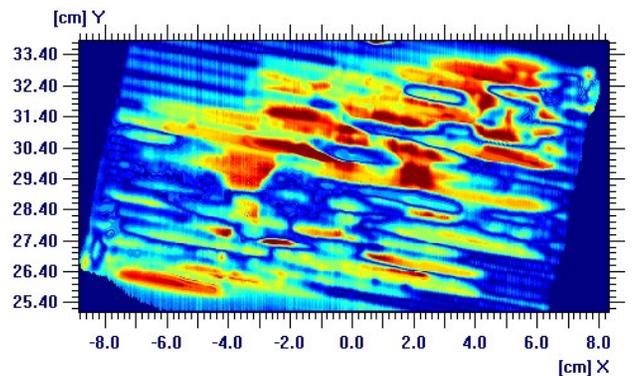
随着准直器调强技术在临床上的广泛应用, 放



a: 计划系统预测通量图



b: EPID 实际采集通量图



c: 3%/3 mm 标准下, Gamma 指数分布图

图 2 无准直器角度误差中, 3%/3 mm 标准下 Gamma 指数分布图  
Fig.2 Gamma distribution maps with the collimator angle error of 0° under the criterion of 3%/3 mm

表 1 3%/3 mm 标准下, 不同准直器角度误差的 Gamma 通过率 ( $\bar{x} \pm s$ )

Tab.1 Gamma passing rates with different collimator angle errors under the criterion of 3%/3 mm (Mean±SD)

角度误差	Gamma 通过率/%	Z 值	P 值
-2.0°	96.60±2.30	-4.286	0.001
-1.5°	97.30±2.25	-4.286	0.001
-1.0°	98.00±2.21	-4.000	0.001
-0.5°	98.40±1.88	-3.715	0.001
0.0°	98.60±1.79	-	-
0.5°	98.60±1.85	-0.747	0.455
1.0°	98.30±2.31	-2.072	0.038
1.5°	97.90±2.48	-4.172	0.001
2.0°	97.10±2.75	-4.286	0.001

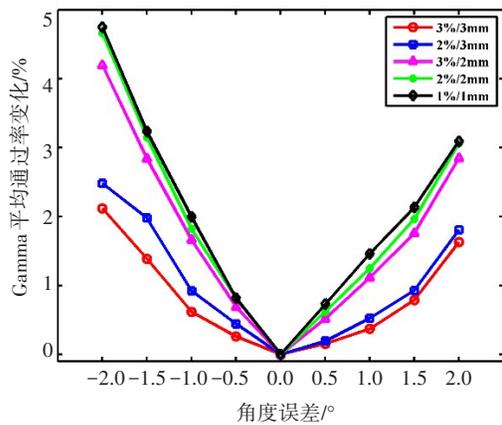


图3 引入准直器角度误差后在不同标准下Gamma通过率的变化图

Fig.3 Gamma passing rate changes after introducing different collimator angle errors under difference criteria

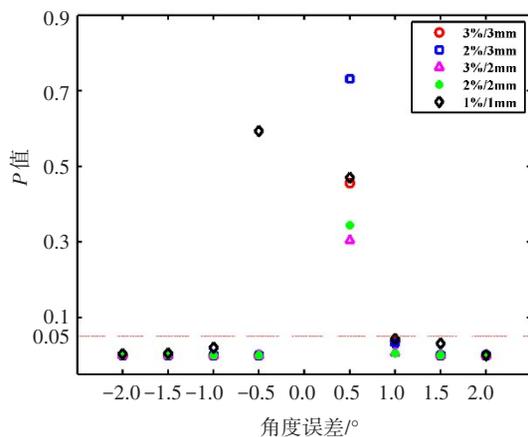


图4 不同准直器角度误差下Gamma通过率统计学分析结果图

Fig.4 Results of statistical analysis on Gamma passing rates after introducing different collimator angle errors under difference criteria

射治疗已经进入精确放疗时代<sup>[3]</sup>。VMAT作为一种精度要求较高的调强放疗技术,能最大限度将高能射线聚焦于靶区内,最大限度保护周围正常组织和危及器官不受照射。但由于技术本身的特点,微小的误差都有可能对靶区和危及器官的照射量形成较大的影响。在实际临床工作中,计划的剂量分布与实际照射的剂量分布存在一定差异,这可能是患者摆位误差所致,也有可能是加速器本身机械误差的原因。现有的文献主要侧重研究MLC到位精度对调强计划剂量分布的影响,缺乏对准直器角度误差对脑转移瘤VMAT计划剂量分布影响的分析。在本文中主要探讨准直器角度误差对多发脑转移瘤VMAT计划Gamma通过率的影响。

在本研究中,如表1所示,随着准直器角度误差增大,Gamma通过率的标准差也随之增大。这提示当准直器角度误差增大时,Gamma通过率的稳定性

有所下降。另外,如图3所示,在相同旋转方向上,准直器角度误差越大,Gamma平均通过率下降越大,且评价标准越严格,其下降幅度越大。例如,3%/3 mm标准下,当准直器角度误差为-2°时,其Gamma平均通过率下降2.12%,而在1%/1 mm标准下,其Gamma平均通过率下降4.75%。此外,由图4可知,当准直器角度误差大于0.5°时,在3%/3 mm、2%/3 mm、3%/2 mm、2%/2 mm及1%/1 mm标准下,其Gamma通过率具有统计学差异( $P < 0.05$ )。在0.5°范围内,虽然Gamma通过率差异没有统计学意义,但是数据的离散度有所增加,稳定性下降。在AAPM TG-142报告中<sup>[21]</sup>,要求准直器角度误差要控制在 $\pm 0.5^\circ$ 内,这与本文的研究结果一致。

根据美国物理师协会的建议,在3%/3 mm标准下,Gamma通过率需大于90%,调强计划才符合临床要求。Gamma通过率作为评价VMAT计划是否符合临床要求的一个重要指标,其受多种因素影响<sup>[9-14]</sup>。张达光等<sup>[11]</sup>、曹午飞等<sup>[12]</sup>研究表明在剂量分布验证中图像的分辨率对Gamma通过率有显著影响。其试验结果显示Gamma通过率会随着图像分辨率的增大而减小,并建议计划系统输出的剂量分布的分辨率选取为1 mm更合适。为了避免取样分辨率对Gamma通过率的影响,在本研究中剂量分布的分辨率选取为0.392 mm/像素,既保证Gamma通过率的可靠性,同时兼顾Gamma通过率的计算时间。此外,Gamma通过率还与探测器的空间分辨率有关。张建英<sup>[7]</sup>发现对二维电离室矩阵(IBA Matrixx)进行插值后,调强验证的Gamma通过率显著下降,结果显示使用电离室矩阵固有分辨率进行验证的Gamma通过率最高。在本文中,采用Varian Unique自带的a-Si 1000非晶硅半导体探测器进行实际测量,其有效探测面积为40 cm×30 cm,分辨率高达0.392 mm/像素,涵盖计划系统输出剂量分布的分辨率,避免探测器空间分辨率对Gamma通过率的影响。

本文只对准直器角度误差进行单因素研究,但在实际治疗中,往往是多个因素同时存在影响着Gamma通过率。例如,王清鑫等<sup>[4]</sup>发现3%/3 mm标准下,当MLC整体偏移2 mm时,Gamma通过率下降7.9%。卢晓光等<sup>[22]</sup>研究表明准直器的重力效应会对调强放疗计划Gamma通过率产生影响。另外,本文是针对整个中心平面进行Gamma分析,一些无关重要的测量点会在计算范围内,这可能会影响到最终Gamma通过率的数值。AAPM TG-218报告中<sup>[23]</sup>,提出理想的Gamma分析应该针对单个组织、器官或者PTV,所以本研究仍存在一定的局限性,但是对于准

直器角度误差对单中心多发脑转移瘤VMAT计划剂量学验证的影响已有一个初步的认识。

## 4 结论

本文通过旋转准直器角度模拟准直器角度误差,探讨准直器角度误差对单中心多发脑转移瘤VMAT计划Gamma通过率的影响。实验结果显示在3%/3 mm、2%/3 mm、3%/2 mm、2%/2 mm及1%/1 mm标准下,当准直器角度误差大于0.5°时,其Gamma通过率具有统计学差异。随着准直器角度误差越大和应用标准越严格,Gamma平均通过率下降越大。因此,为了保证VMAT计划执行的准确性,需要对准直器角度做更加严格的质量控制和保证。

## 【参考文献】

- [1] PEREZ C A, BRADY L W. Principles and practice of radiation oncology[J]. Am J Clin Oncol, 1987, 15(3): 277.
- [2] HERK M V. Errors and margins in radiotherapy[J]. Semin Radiat Oncol, 2004, 14(1): 52-64.
- [3] 马一栋,李明焕,于金明.肿瘤精确放疗新技术的比较[J].中华肿瘤防治杂志,2010,17(23): 1995-1998.  
MA Y D, LI M H, YU J M. Comparison of advanced radiotherapy delivery techniques[J]. Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment, 2010, 17(23): 1995-1998.
- [4] 王清鑫,戴建荣,张可,等.容积调强旋转放疗的计划验证通过率对多叶准直器位置误差的灵敏度[J].中华放射医学与防护杂志,2013,33(4): 388-391.  
WANG Q X, DAI J R, ZHANG K, et al. The sensitivity of patient-specific VMAT QA to MLC positioning errors[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protect, 2013, 33(4): 388-391.
- [5] 王宁,王彬,陈阿龙,等. IMRT计划剂量验证通过率对机架角度误差灵敏度分析[J].中华放射肿瘤学杂志,2016,25(12): 1327-1330.  
WANG N, WANG B, CHEN A L, et al. Sensitivity of passing rates of intensity-modulated radiotherapy plans in dose verification against gantry angle errors[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2016, 25(12): 1327-1330.
- [6] 孙小杨,杨波,庞皓文,等. Mapcheck摆位误差对调强验证计划Gamma通过率的影响[J].医疗卫生装备,2017,38(1): 88-90.  
SUN X Y, YANG B, PANG H W, et al. Effect of mapcheck setup error on gamma pass rate for intensity-modulated radiation therapy verification plan[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2017, 38(1): 88-90.
- [7] 张建英. 插值对二维电离室矩阵调强验证Gamma通过率的影响[J].中国医学物理学杂志,2010,27(6): 2224-2226.  
ZHANG J Y. The effort to gamma pass rates of interpolation during the 2D chamber array IMRT QA [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2010, 27(6): 2224-2226.
- [8] 何栋成,张晓晔,张艳,等. ArcCheck剂量验证角度分析食管上段癌调强放疗技术[J].中国辐射卫生,2019,28(2): 206-208.  
HE D C, ZHANG X H, ZHANG Y, et al. The analysis of the radiotherapy techniques for the treatment of upper esophageal cancer form the dose verification by ArcCheck [J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2019, 28(2): 206-208.
- [9] 覃仕瑞,张寅,李红菊,等.摆位误差对前列腺癌靶区和危及器官剂量分布的影响研究[J].中华放射肿瘤学杂志,2019,28(1): 37-40.  
QIN S R, ZHANG Y, LI H J, et al. Effects of the setup errors on dose distribution of target area and organs at risk for prostate cancer[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2019, 28(1): 37-40.
- [10] 潘建基,潘才住,陈传本,等.摆位系统误差对鼻咽癌调强放疗剂量的影响[J].中华放射肿瘤学杂志,2007,16(5): 394-396.  
PAN J J, PAN C Z, CHENG C B, et al. Effect of setup error on intensity modulated radiotherapy dose for nasopharyngeal carcinoma [J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2007, 16(5): 394-396.
- [11] 张达光,蒋胜鹏,杨成文,等.计算分辨率对调强放疗计划验证Gamma通过率的影响[J].国际生物医学工程杂志,2014,37(2): 103-114.  
ZHANG D G, JIANG S P, YANG C W, et al. Impact of calculation resolution on gamma pass rate for plan verification of intensity-modulated radiotherapy [J]. International Journal of Biomedical Engineering, 2014, 37(2): 103-114.
- [12] 曹午飞,黄晓廷,孙文钊,等.剂量分布验证中分辨率对Gamma通过率的影响[J].中华放射肿瘤学杂志,2012,21(2): 172-175.  
CAO W F, HUANG X Y, SUN W Z, et al. The impact of resolution to gamma pass rate in the verification of dose distribution[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2012, 21(2): 172-175.
- [13] 程燕铭,胡彩容,阴晓娟,等.鼻咽癌IMRT和VMAT计划对机器跳数和MLC误差剂量学敏感度对比研究[J].中华放射肿瘤学杂志,2017,26(10): 1199-1203.  
CHENG Y M, HU C R, YIN X J, et al. Dosimetric sensitivity with MU and MLC errors in IMRT versus VMAT plan for nasopharyngeal carcinoma[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2017, 26(10): 1199-1203.
- [14] 李成强,陶城,朱健,等.多叶准直器叶片位置误差对鼻咽癌调强放疗剂量的影响[J].中华放射医学与防护杂志,2015,35(7): 544-547.  
LI C Q, TAO C, ZHU J, et al. Impact of multiloop collimator position errors on simultaneous integrated boost intensity-modulated radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protect, 2015, 35(7): 544-547.
- [15] DEPUYDT T, VAN ESCH A, HUYSKENS D P. A quantitative evaluation of IMRT dose distributions: refinement and clinical assessment of the gamma evaluation[J]. Radiother Oncol, 2002, 62(3): 309-319.
- [16] SPEZI E, LEWIS D G. Gamma histograms for radiotherapy plan evaluation[J]. Radiother Oncol, 2006, 79(2): 224-230.
- [17] 张玉海,李月敏,夏火生,等.肺癌调强放疗计划AAA算法与PBC算法比较研究[J].中华放射肿瘤学杂志,2013,22(3): 250-252.  
ZHANG Y H, LI Y M, XIA H S, et al. Comparison of pencil beam convolution and anisotropic analytical algorithm for intensity-modulated radiotherapy planning of lung cancer[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2013, 22(3): 250-252.
- [18] DANIELSSON P E. Euclidean distance mapping[J]. Comput Graph Image Process, 1980, 14(3): 227-248.
- [19] TIMMERMAN R D. An overview of hypofractionation and introduction to this issue of seminars in radiation oncology[J]. Semin Radiat Oncol, 2008, 18(4): 215-222.
- [20] LOW D A, HARMS W B, MUTIC S, et al. A technique for the quantitative evaluation of dose distributions[J]. Med Phys, 1998, 25(5): 656-661.
- [21] KLEIN E E, HANLEY J, BAYOUTH J, et al. Task Group 142 report: quality assurance of medical accelerators[J]. Med Phys, 2009, 36(9): 4197-4212.
- [22] 卢晓光,王峻峰,刘飞,等.多叶准直器重力效应对调强放射治疗剂量的影响研究[J].医疗卫生装备,2017,38(3): 90-93.  
LU X G, WANG J F, LIU F, et al. Study of dose variations induced by MLC weight effect for IMRT delivery[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2017, 38(3): 90-93.
- [23] MIFTEN M. TH-A-BRC-03: AAPM TG218: measurement methods and tolerance levels for patient-specific IMRT verification QA [J]. Med Phys, 2016, 43(6): 3852-3853.

(编辑:谭斯允)