

机械旋转误差对多发脑转移瘤VMAT计划剂量分布的影响

邓官华¹, 林正茂², 陈丽霞³, 戴鹏¹, 张平¹, 罗龙辉¹, 罗日顺¹, 赖名耀¹, 山常国¹, 黄庆¹, 蔡林波¹
1. 广东三九脑科医院肿瘤综合治疗中心, 广东 广州 510510; 2. 中山大学孙逸仙纪念医院, 广东 广州 510120; 3. 南方医科大学
物医学工程学院, 广东 广州 510515

【摘要】目的:探讨直线加速器的机械旋转误差对单中心多发转移瘤VMAT计划剂量分布的影响。**方法:**随机选取21例多发脑转移瘤患者,假定患者均采用非共面VMAT放疗计划,分别将治疗床、准直器的角度旋转偏移 $\pm 0.5^\circ$ 、 $\pm 1.0^\circ$ 、 $\pm 1.5^\circ$ 、 $\pm 2.0^\circ$,并通过Eclipse 13.6治疗计划系统模拟机械旋转偏移误差在多发脑转移瘤VMAT计划中对剂量分布的影响。记录并分析不同治疗床、准直器角度旋转偏移下靶区的适形度指数(CI)、剂量梯度跌落指数(GI)、剂量均匀性指数(HI)以及危及器官的最大剂量。**结果:**当治疗床及准直器角度旋转偏移大于 0.5° 时,靶区的CI、GI(治疗床除外)及HI指数差异具有统计学意义($P < 0.05$);危及器官的最大剂量差异无统计学意义($P > 0.05$)。**结论:**在设计多发脑转移VMAT计划时应考虑等中心与靶区之间的距离,六维床旋转误差校正阈值为 0.5° 更为合理。

【关键词】多发脑转移瘤;容积旋转调强;机械旋转误差;单中心

【中图分类号】R811.1;R312 **【文献标志码】**A **【文章编号】**1005-202X(2020)01-0038-06

Effect of rotational mechanical errors on dose distribution of volumetric modulated arc therapy for multiple intracranial metastases

DENG Guanhua¹, LIN Zhengmao², CHEN Lixia³, DAI Peng¹, ZHANG Ping¹, LUO Longhui¹, LUO Rishun¹, LAI Mingyao¹, SHAN Changguo¹, HUANG Qing¹, CAI Linbo¹
1. Department of Oncology, Guangdong Sanjiu Brain Hospital, Guangzhou 510510, China; 2. Sun Yat-sen Memorial Hospital, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510120, China; 3. School of Biomedical Engineering, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China

Abstract: Objective To investigate the effect of rotational mechanical errors of linear accelerator on the dose distribution of single-isocenter volumetric modulated arc therapy (VMAT) for multiple intracranial metastases. **Methods** A total of 21 patients with multiple intracranial metastases were enrolled in the study. Assuming that patients were treated with non-coplanar VMAT, the treatment couch and collimator angle were shifted by $\pm 0.5^\circ$, $\pm 1.0^\circ$, $\pm 1.5^\circ$ and $\pm 2.0^\circ$, respectively. Eclipse 13.6 treatment planning system was used to study the effects of the rotational mechanical errors on dose distribution of VMAT for multiple intracranial metastases. With different rotational errors, the conformity index, gradient index and homogeneity index of target areas as well as the maximum dose of organs-at-risk were recorded and analyzed. **Results** There were significant differences in the conformity index, gradient index (except for couch), and homogeneity index of target areas ($P < 0.05$) when the rotational deviations of treatment couch and collimator angle were greater than 0.5° . No significant difference was found in the maximum dose of organs-at-risk ($P > 0.05$). **Conclusion** In the planning of VMAT for multiple intracranial metastases, the distance between the isocenter and target areas should be taken into consideration and the reasonable correction threshold for six-dimensional couch rotational errors should be 0.5° .

Keywords: multiple intracranial metastases; volumetric modulated arc therapy; rotational mechanical error; single isocenter

前言

【收稿日期】2019-07-14
【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: 肿瘤放射治疗及免疫治疗, E-mail: cailinbo999@163.com

立体定向放射治疗(Stereotactic Radiosurgery, SRS)因其能将高能射线聚焦于靶区内,使得肿瘤组织受到高剂量照射,周围正常组织受量减小的特点成为多发脑转移瘤治疗的重要治疗手段^[1-3]。容积旋转调强技术(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT)具有治疗速度快、调制射线能力强等特点,常作为实现SRS的首选方式^[4]。如果在VMAT计划实施过程中,射线传递不准确将会给肿瘤周边正常组

织带来不可逆的组织损伤。因此,减少放射治疗误差和提高放射治疗的精度是放射物理领域研究人员不断追求的目标。Van herk^[5]在其发表的研究中指出,放疗误差产生的原因主要包括4个方面:靶区的勾画、患者的摆位、危及器官的运动以及直线加速器设备的机械误差。2009年,美国医学物理师协会(American Association of Physicists in Medicine, AAPM)发表TG-142号报告^[6],给出了直线加速器的质量保证和质量控制的详细流程及相应检测项目的容差推荐值。然而在TG-142报告中,并没有探讨机械误差对放疗计划剂量分布的影响。现有的绝大多数文献^[7-12]主要探讨患者摆位误差对放疗计划剂量分布的影响,缺乏对直线加速器机械误差对放疗计划剂量分布影响的理论与数值分析,而且直线加速器的机械误差除了沿垂直轴(X、Y、Z方向)的误差外,机械的旋转误差同样也会对放疗计划的剂量分布产生影响。研究机械旋转误差对放疗计划剂量分布的影响,制定出更为完善的质量保证(QA)和质量控制(QC)程序,对于减少放射治疗误差,提高放射治疗精度有重要的意义。因此,本研究将从理论和实际出发,探讨治疗床、准直器角度旋转偏移对单中心多发脑转移瘤VMAT计划剂量分布的影响。

1 资料与方法

1.1 一般资料

随机选取2018年1月~2019年6月于广东三九脑科医院肿瘤综合治疗中心收治确诊为脑转移瘤的21例患者的头部定位CT图像,其中男10例,女11例,年龄(56.05±11.09)岁,肿瘤的体积为0.7~68.7 cm³,其中2个脑转移瘤病灶11例,3个脑转移瘤病灶5例,4个脑转移瘤病灶5例。

1.2 仪器设备

Siemens 64排大孔径螺旋放疗专用CT模拟定位机(SOMATOM Definition AS),CT扫描层厚为1.5 mm;Varian UNIQUE直线加速器,射线能量为6 MV光子,配备60对全自动独立多叶准直器(Multi Leaf Collimator, MLC),其中中间40对MLC宽度为0.5 cm,其余MLC宽度为1.0 cm,采用滑窗调强运动模式;Varian Eclipse 13.6治疗计划系统,可实现VMAT计划设计。

1.3 机械旋转误差的数学计算公式推导

图1为机械旋转误差导致肿瘤由A位置旋转到B位置的示意图,以等中心点为旋转中心,D为旋转半径(等中心点到靶区距离), θ 为旋转偏移角度,则机械旋转误差产生的位移偏差可表示为^[13]:

$$E = 2D \times \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

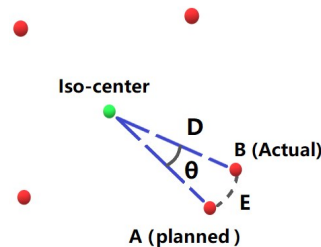


图1 旋转误差引起的位移偏差示意图
Fig.1 Schematic diagram of displacement errors caused by rotational errors

1.4 调强放疗计划设计

由资深医生勾画计划靶区(PTV)和危及器官后,经物理师设计调强放疗计划。所有治疗计划均采用VMAT动态调强滑窗技术照射,MLC角度为10°或350°,避免叶片引起的凹凸论效应,采用3~4条弧,其中1~2条为共面弧,2条为非共面弧。在本文中,等中心位于各个靶区与等中心之间距离之和最小的位置,如图2所示。假设在患者头部中存在 n 个靶区,则每个靶区与等中心 (x, y, z) 的距离之和可表示为^[14]:

$$f(x, y, z) = \sum_{k=1}^n [(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_n - z)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

其中, x_n, y_n, z_n 分别为第 n 个靶区的空间坐标,式(2)的最优解 \hat{f} 可表示为:

$$\hat{f}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) = \underset{x, y, z}{\operatorname{argmin}} f(x, y, z) \quad (3)$$

其中, $\hat{f}(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ 为目标函数 f 的最优解。通过调用Matlab中的无约束非线性规划函数fminunc^[15-16]编写程序可求解式(3)。

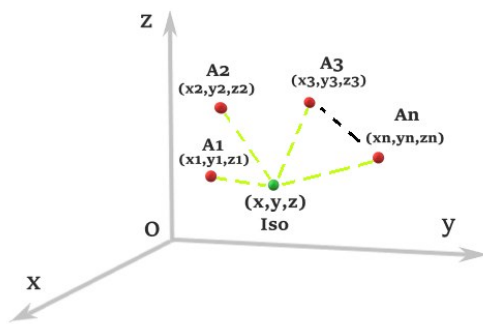


图2 多发脑转移瘤VMAT计划等中心设置示意图
Fig.2 Isocenter setting of volumetric modulated arc therapy (VMAT) for multiple brain metastases

采用各向异性算法计算照射区域剂量,PTV处方剂量为24 Gy,8 Gy/次。正常组织约束条件为^[17]:脑干 $D_{\max} < 23.1$ Gy,晶体 $D_{\max} < 7$ Gy,视神经 $D_{\max} < 17.4$ Gy,延髓 $D_{\max} < 21.9$ Gy。VMAT计划优化完成后由医生评估确认,并以此治疗计划作为模板计划。

1.5 机械旋转误差获取

在模板计划的基础上,分别改变治疗床、准直器旋转角度,保持其他参数不变,模拟机械旋转误差。治疗床、准直器的旋转偏移角度为±0.5°、±1.0°、±1.5°、±2.0°,不进行通量优化,重新计算剂量分布。所有生成的VMAT计划均不作为实际执行治疗计划,仅限于实验参数比较。

1.6 PTV和危及器官的剂量学评价

在本研究中引入适形度指数(Conformal Index, CI)、剂量梯度跌落指数(Gradient Index, GI)以及均匀性指数(Homogeneity Index, HI)来评估PTV的计划质量。CI、GI及HI计算公式如下^[18]:

$$\left\{\begin{aligned} CI &= \frac{(TV_{PV})^2}{TV \times PV} \\ GI &= \frac{V_{50\%}}{V_{100\%}} \\ HI &= \frac{D_{2\%} - D_{98\%}}{D_p} \times 100\% \end{aligned}\right. \quad (3)$$

其中,TV_{PV}为接受处方剂量的PTV体积,TV为PTV体积,PV为处方剂量的体积,V_{50%}为50%处方剂量的体积,V_{100%}为处方剂量的体积,D_{2%}为近似最大剂量,D_{98%}为近似最小剂量,D_p为处方剂量(单位为Gy)。同时还记录左右晶体、左右眼球、左右视神经、脑干的最大剂量。

1.7 统计学方法

采用SPSS 21.0统计软件对数据进行统计学处理分析,计量资料用均数±标准差表示,采用非参数配

对Wilcoxon检验,显著性检验水准为0.05。

2 结果

表1为不同旋转半径D以及旋转偏移角度θ对肿瘤旋转位移偏差的影响。当旋转半径D固定时,肿瘤位移偏差随着旋转偏移角度α的增加而增加;当旋转偏移角度α固定时,肿瘤位移偏差随着旋转半径D的增加而增加,如表1所示。

表1 旋转误差引起的位移偏差
Tab.1 Displacement errors caused by rotational errors

D/cm	位移误差/mm			
	θ=0.5°	θ=1.0°	θ=1.5°	θ=2.0°
1	0.1	0.2	0.3	0.3
3	0.3	0.5	0.8	1.0
5	0.4	0.9	1.3	1.7
7	0.6	1.2	1.8	2.4
10	0.9	1.7	2.6	3.5

图3为不同治疗床角度旋转偏移下,PTV的CI、GI及HI变化的箱线图。由图3可知,当治疗床旋转角度偏差大于±0.5°时,其CI(0.5°:P=0.248;-0.5°:P=0.311;1.0°:P=0.011;-1.0°:P=0.006;1.5°:P=0.005;-1.5°:P=0.001;2.0°:P<0.001;-2.0°:P=0.001)及HI(0.5°:P=0.086;-0.5°:P=0.416;1.0°:P<0.001;-1.0°:P=0.033;1.5°:P<0.001;-1.5°:P<0.001;2.0°:P<0.001;-2.0°:P=0.002)指数差异具有统计学意义。

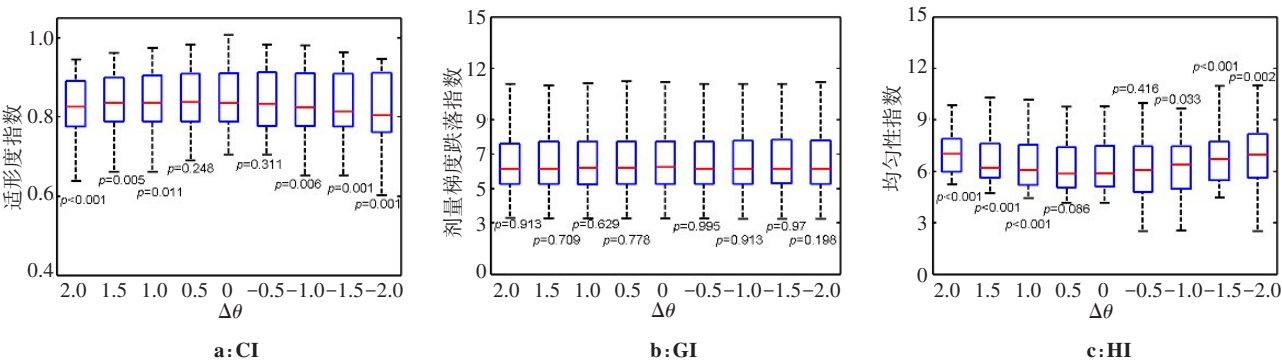


图3 不同治疗床角度旋转偏移对单中心VMAT计划剂量分布的影响
Fig.3 Dosimetric effects of couch angle errors on dose distribution of single-isocenter VMAT

图4为不同MLC角度旋转偏移下,PTV的CI、GI及HI变化的箱线图。由图4可知,当MLC旋转角度偏差为大于±0.5°时,其CI(0.5°:P=0.653;-0.5°:P=0.211;1.0°:P=0.024;-1.0°:P=0.014;1.5°:P=0.003;-1.5°:P=0.001;2.0°:P=0.001;-2.0°:P<0.001)、GI(0.5°:P=0.184;-0.5°:

P=0.327;1.0°:P=0.012;-1.0°:P=0.008;1.5°:P=0.003;-1.5°:P=0.001;2.0°:P=0.006;-2.0°:P<0.001)及HI(0.5°:P=0.002;-0.5°:P=0.001;1.0°:P<0.001;-1.0°:P=0.001;1.5°:P<0.001;-1.5°:P<0.001;2.0°:P<0.001;-2.0°:P<0.001)指数差异均具有统计学意义。

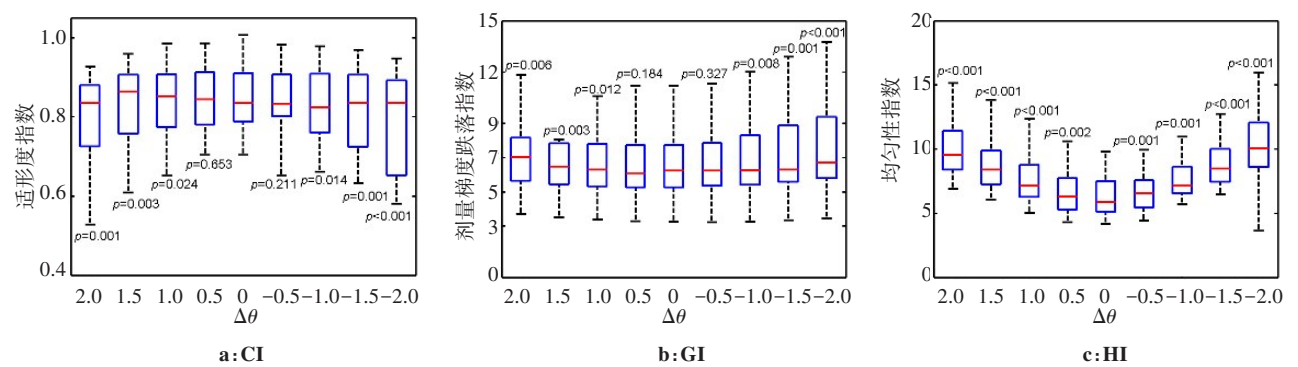


图4 不同MLC角度旋转偏移对单中心VMAT计划剂量分布的影响

Fig.4 Dosimetric effects of MLC angle errors on dose distribution of single-isocenter VMAT

表2为不同治疗床、MLC角度旋转偏移下,危及器官剂量学参数变化的表格。由表2可知,危及器官的最大剂量均无明显变化,差异无统计学意义($P>0.05$)。

表2 治疗床、MLC角度旋转偏移下对危及器官限量的影响

Tab.2 Effects of treatment couch and MLC angle errors on the maximum doses of organs-at-risk

危及器官	0°	治疗床				MLC			
		0.5°/-0.5°	1.0°/-1.0°	1.5°/-1.5°	2.0°/-2.0°	0.5°/-0.5°	1.0°/-1.0°	1.5°/-1.5°	2.0°/-2.0°
左晶体	65±70	65±69	65±70	66±69	66±69	65±70	65±70	65±70	65±71
		65±70	66±70	65±71	67±71	65±70	65±70	66±70	66±70
右晶体	83±76	83±77	84±77	84±77	84±76	83±78	83±79	82±79	82±80
		83±78	83±78	82±78	82±77	83±77	84±77	83±75	84±76
左眼	115±91	116±90	115±90	115±89	115±89	116±91	116±92	116±92	116±92
		116±91	116±92	117±92	119±93	116±91	116±91	116±90	116±89
右眼	114±107	114±108	114±105	114±104	114±104	112±106	111±106	110±107	109±107
		113±107	113±108	112±110	113±112	113±107	115±106	116±106	117±106
左视神经	171±163	176±178	176±180	177±181	177±182	177±178	177±178	178±178	179±179
		176±178	176±177	176±176	178±177	174±179	174±179	174±179	174±179
右视神经	184±181	184±180	183±179	183±178	183±178	185±183	185±183	183±184	185±185
		185±183	185±183	185±183	186±184	185±181	185±180	185±179	185±177
视交叉	295±206	296±208	296±208	297±209	297±210	296±207	296±208	299±210	300±211
		294±206	294±205	294±204	294±204	294±206	293±206	292±205	291±205
脑干	527±374	527±374	528±374	528±375	529±375	529±375	530±373	530±372	531±373
		529±377	532±379	533±382	527±374	520±383	528±381	528±382	529±386

3 讨论

临床上对于放疗计划的评价是建立在标准无误的放疗计划系统(Treatment Planning System, TPS)基础之上,并不能保证实际实施的放疗计划与TPS中预设的计划保持一致。虽然在实际工作中,物理师会定期对直线加速器进行QA与QC,以确保直线加速器的机械误差在允许范围内,但由于直线加速器的机械误差是无法消除的,这将必然会导致实际实施的放疗计划与TPS中的预设计划有差异,即患者体内的实际剂量分布和放疗计划预期不同。文献表明3%~5%的剂量改变可导致肿瘤的局控率下降以及正常组织的并发症率上升^[19-20]。相对于胸腹部肿瘤,头部肿瘤结构更为复杂,周围包含

差在允许范围内,但由于直线加速器的机械误差是无法消除的,这将必然会导致实际实施的放疗计划与TPS中的预设计划有差异,即患者体内的实际剂量分布和放疗计划预期不同。文献表明3%~5%的剂量改变可导致肿瘤的局控率下降以及正常组织的并发症率上升^[19-20]。相对于胸腹部肿瘤,头部肿瘤结构更为复杂,周围包含

着脑干、脊髓等重要器官,因而研究机械旋转误差对头部SRS计划剂量分布的影响具有重要的意义^[21-22]。

Rosca等^[23]研究指出,治疗床、MLC等部件的机械误差都会影响射线在等中心平面的剂量分布。针对上述问题,本文研究了直线加速器的治疗床、MLC角度旋转误差对单中心多发转移瘤VMAT计划剂量分布的影响。表1结果显示,肿瘤的位移偏差随着旋转半径及旋转偏移角度的增加而增加,这一结果与式(1)描述相吻合。如式(1)中所示,当旋转偏移角度固定时,肿瘤位移偏差 E 为单调函数,位移偏差 E 随着旋转半径 D 的增加而增大;当旋转半径 D 固定时,在 $0^\circ\sim 180^\circ$ 内,肿瘤位移偏差 E 随着旋转偏移角度 θ 增加而增大。当旋转半径为10 cm,旋转偏移角度大于 0.5° 时,肿瘤的位移偏差将大于1 mm,超出TG-142号报告允许的偏差范围1 mm。这提示物理师在设置等中心位置时,应考虑等中心与靶区的距离不超过10 cm,六维床允许旋转偏移角度不超过 $\pm 0.5^\circ$ 。李志聪等^[13]研究治疗床旋转误差对鼻咽癌IMRT计划准确性的影响发现当治疗床旋转误差 $\leq 1.5^\circ$ 时,靶区的Gamma通过率没有统计学差异,并且发现治疗床旋转误差对靶区剂量的准确性影响与靶区的长度有关,建议将治疗床的旋转容差值设定为 1.5° 。但对于大剂量的SRS治疗,AAPM TG-142号报告^[6, 24-25]中明确给出治疗床的允许误差推荐为 $\pm 0.5^\circ$ 。在本文中,如图3和图4所示,当治疗床及MLC角度偏转大于 $\pm 0.5^\circ$ 时,CI和HI会产生显著性差异($P < 0.05$),实验结果与AAPM TG-142号报告推荐值相符合。

张平等^[18]研究结果表明,在单中心脑转移瘤VMAT计划中,准直器角度选择对危及器官受量的影响并没有统计学意义,因此在本文中MLC角度设置为 10° 或者 350° 。此外,本研究结果显示当机械旋转误差在 $0^\circ\sim 2^\circ$ 时,危及器官的最大剂量均无明显变化,差异无统计学意义。这可能是由于危及器官距离靶区较远,机械旋转误差未能影响危及器官的最大剂量。Morrison等^[26]和Stanhope等^[27]研究表明,在多发脑转移瘤VMAT计划中,单中心与多中心的VMAT计划在GI、CI及HI指数方面并没有差异,因而在本文中对于多发脑转移瘤采用单中心VMAT计划。本研究仅单独考虑了治疗床或MLC旋转偏移对VMAT计划剂量分布的影响,而忽略了两者的相互影响。治疗床、MLC同时发生旋转偏移对VMAT计划剂量分布有多大的影响,还需进一步研究。

4 结论

本研究通过分别改变治疗床、MLC旋转偏移角

度,模拟机械旋转误差对单中心多发脑转移VMAT计划剂量分布的影响,发现当治疗床及准直器角度偏转大于 $\pm 0.5^\circ$ 时,靶区的CI及HI会产生显著性差异。本文的实验结果可为物理师设计单中心多发脑转移VMAT计划时选择合适的等中心位置,以及放射治疗师选择合适的六维床允许偏移角度提供技术参考。

【参考文献】

- [1] HALPERIN E C, BRADY L W, PEREZ C A, et al. 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] 夏廷毅. SBRT临床应用结果的思考[J]. 医疗装备, 2009, 22(7): 1-5.
- [4] XIA T Y. Thinking on the clinical application results of SBRT[J]. Chinese Journal of Medical Device, 2009, 22(7): 1-5.
- [5] WOLFF D, STIELER F, WELZEL G, et al. Volumetric modulated arc therapy (VMAT) vs. serial tomotherapy, step-and-shoot IMRT and 3D-conformal RT for treatment of prostate cancer[J]. Radiother Oncol, 2009, 93(2): 226-233.
- [6] VAN HERK M. Errors and margins in radiotherapy Seminars in radiation oncology[J]. Semin Radiat Oncol, 2004, 14(1): 52-64.
- [7] 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.
- [8] 李玉成, 陈维军, 单国平, 等. 摆位误差对立体定向放射治疗计划剂量学验证的影响[J]. 中国医学物理学杂志, 2018, 35(8): 869-873.
- [9] LI Y C, CHEN W J, SHAN G P, et al. Effects of setup errors on dosimetric verification of stereotactic body radiotherapy phan[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2018, 35(8): 869-873.
- [10] 潘建基, 潘才佳, 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.
- [11] PAN J J, PAN C Z, CHEN 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.
- [12] 许德权, 赵玲, 卓龙泉, 等. 图像引导放疗技术在直肠癌患者术前调强放疗中的应用[J]. 吉林大学学报(医学版), 2016, 42(6): 1226-1229.
- [13] XU D Q, ZHAO L, ZHUO L Q, et al. Application of image-guided radiation therapy technology in patients with rectal cancer treated with intensity modulated radiation therapy technology before operation[J]. Journal of Jilin University (Medicine Edition), 2016, 42(6): 1226-1229.
- [14] 戴鹏, 张平, 赖名耀, 等. 不同系统摆位误差对鼻咽癌双弧VMAT及动态IMRT计划中剂量分布影响的比较[J]. 中国医学装备, 2017, 14(4): 65-68.
- [15] DAI P, ZHANG P, LAI M Y, et al. Comparison on different system setup error on the effect of dose distribution for nasopharyngeal carcinoma therapy[J]. China Medical Equipment, 2017, 14(4): 65-68.
- [16] 张利文, 石锦平, 谢秋英, 等. 等中心偏移误差对容积调强放疗计划的剂量影响[J]. 肿瘤防治与治疗, 2012, 25(3): 160-163.
- [17] ZHANG L W, SHI J P, XIE Q Y, et al. The dose impact of the isocenter offset errors on the plan for volumetric modulated arc therapy[J]. Journal of Cancer Control and Treatment, 2012, 25(3): 160-163.
- [18] 何正中, 戴建荣, 乐文友. 调强放疗中摆位误差对脊髓剂量的影响[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2007, 16(2): 132-135.
- [19] HE Z Z, DAI J R, LE W Y. Dose uncertainty in the spinal cord from setup errors in intensity-modulated radiation therapy[J]. Chinese

- Journal of Radiation Oncology, 2007, 16(2): 132-135.
- [13] 李志聪, 向昭雄, 游雁, 等. 旋转摆位误差对调强放疗剂量准确性的影响[J]. 医疗卫生装备, 2016, 37(4): 109-111.
- LI Z C, XIANG S X, YOU Y, et al. Impact of rotational set-up error in dose veracity of intensity-modulated radiotherapy [J]. Chinese Journal of Medical Device, 2016, 37(4): 109-111.
- [14] DANIELSSON P E. Euclidean distance mapping [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1980, 14(3): 227-248.
- [15] 王波, 赵转萍, 龚醒. 基于Matlab的大型球面模胎质量控制研究[J]. 机电工程, 2015, 32(3): 358-361.
- WANG B, ZHAO Z P, GONG X. Quality control on the large spherical mould based on Matlab [J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 2015, 32(3): 358-361.
- [16] 马莉. MATLAB语言实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- MA L. Practical course of MATLAB language[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [17] 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.
- [18] 张平, 戴鹏, 罗龙辉, 等. 准直器角度对颅内两个脑转移瘤容积旋转调强计划的影响[J]. 中国医学物理学杂志, 2018, 35(12): 1399-1403.
- ZHANG P, DAI P, LUO L L, et al. Effect of collimator angle on volumetric modulated arc therapy plans for two brain metastases [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2018, 35(12): 1399-1403.
- [19] 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.
- [20] GUTFELD O, KRETZLER A E, KASHANI R, et al. Influence of rotations on dose distributions in spinal stereotactic body radiotherapy (SBRT) [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2009, 73(5): 1596-1601.
- [21] 曹倩倩, 朱丽红, 王俊杰, 等. 6D治疗床对原发宫颈癌放疗摆位误差及靶区边界的影响[J]. 中华医学杂志, 2015, 95(9): 689-692.
- CAO Q Q, ZHU L H, WANG J J, et al. Assessments setup errors and target margin by 6D couch for primary cervical cancer [J]. National Medical Journal of China, 2015, 95(9): 689-692.
- [22] 史少华, 樊文刚, 解传滨, 等. 机械误差对肿瘤精确旋转放疗射野变形的影响及补偿算法研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(15): 158-167.
- SHI S H, FAN W G, XIE C B, et al. Research on radiation field deformation and compensation algorithm based on mechanical errors during precise radiotherapy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(15): 158-167.
- [23] ROSCA F, LORENZ F, HACKER F L, et al. An MLC-based linac QA procedure for the characterization of radiation isocenter and room lasers' position [J]. Med Phys, 2006, 33(6): 1780-1787.
- [24] 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.
- [25] FAUGHT A M, TRAGER M, YIN F F, et al. Re-examining TG-142 recommendations in light of modern techniques for linear accelerator based radiosurgery [J]. Med Phys, 2016, 43(10): 5437-5441.
- [26] MORRISON J, HOOD R, YIN F F, et al. Is a single isocenter sufficient for volumetric modulated arc therapy radiosurgery when multiple intracranial metastases are spatially dispersed? [J]. Med Dosim, 2016, 41(4): 285-289.
- [27] STANHOPE C, CHANG Z, WANG Z, et al. Physics considerations for single-isocenter, volumetric modulated arc radiosurgery for treatment of multiple intracranial targets [J]. Pract Radiat Oncol, 2016, 6(3): 207-213.

(编辑:谭斯允)