

Octavius 4D 系统稳定性验证分析

牛振洋^{1,2}, 费振乐², 陈志¹

1. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230027; 2. 中国人民解放军第105医院, 安徽 合肥 230031

【摘要】目的:探讨 Octavius 4D 系统用于容积旋转调强放射治疗 (VMAT) 三维剂量验证的稳定性。**方法:**比较分析 semiflex 电离室和 Octavius 729 探测器阵列在 6 MV、10 MV 射束下对射野大小、剂量线性、剂量率线性和射野输出因子的响应。测量观察 Octavius 4D 系统旋转过程中角度仪示值与机架角的角度偏差。用 3%/3 mm 标准分析 (10×10) cm² 旋转照射计划和 VMAT 计划机架归零与旋转照射的二维剂量分布; 用 3%/3 mm gamma 分析标准评估 VMAT 计划。**结果:**预热剂量大于 6 Gy 是探测器稳定的必要条件。探测器阵列剂量响应是线性的, 不同标称剂量率下剂量测量是稳定的。旋转照射过程中加速器机架角和 Octavius 4D 模体旋转角度误差在 0.4° 以内。6 MV 和 10 MV 射束 VMAT 计划在分析标准为 3%/3 mm 时, 三维剂量分布的平均通过率分别为 96.03% 和 95.56%, 满足临床计划剂量验证的标准。**结论:** Octavius 4D 模体联合 Octavius 729 探测器阵列是一套稳定性装置, 用于治疗前验证 VMAT 计划是可靠的。

【关键词】Octavius 4D 系统; 容积旋转调强放射治疗; 探测器阵列; γ 通过率; 稳定性

【中图分类号】R312

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2018)06-0628-05

Stability analysis of Octavius 4D system

NIU Zhenyang^{1,2}, FEI Zhenle², CHEN Zhi¹

1. University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 2. the 105 Hospital of the Chinese People's Liberation Army, Hefei 230031, China

Abstract: Objective To explore the stability of Octavius 4D system in the three-dimensional dose verification of volumetric modulated arc therapy (VMAT). **Methods** The responses of semiflex ionization chamber and Octavius 729 detector array to field size, dose linearity, dose rate linearity and output factors were assessed for 6 MV and 10 MV beams. When Octavius 4D system was running, the angular deviations between inclinometer and gantry were measured. With gantry in rotating state or fixed at 0°, the two-dimensional dose distributions of (10×10) cm² arc plans and VMAT plans were analyzed with 3%/3 mm criteria. VMAT plans were assessed by 3%/3 mm gamma analysis standard. **Results** A warm-up dose larger than 6 Gy was essential for detector stability. Dose response of detector array was linear, and dose-rate measurements were stable at different nominal dose rates. During rotating irradiation, the angular deviation of accelerator gantry angle and rotation angle of Octavius 4D phantom was found to be within 0.4°. When 3%/3 mm criteria was applied, the average gamma passing rate of three-dimensional dose distribution were 96.03% and 95.56% for VMAT plan with 6 MV or 10 MV beams. **Conclusion** Octavius 4D phantom combined with Octavius 729 detector array is a stable device and is reliable for pretreatment verification of VMAT.

Keywords: Octavius 4D system; volumetric modulated arc therapy; detector array; gamma passing rate; stability

前言

容积旋转调强放射治疗 (Volumetric Modulated Arc therapy, VMAT) 由于在其治疗过程中, 能同时改

变机架角、机架旋转速度, 多叶准直器 (Multi-Leaf Collimator, MLC) 叶片形状、剂量率等^[1]对束流进行优化, 在相对较短时间内照射出一个高度适形的剂量分布^[2-5], 提高治疗精度, 缩短治疗时间, 极大地改善了调强放射治疗的临床治疗效果和患者治疗舒适性, 进而受到越来越多放疗单位的青睐。复杂调强放疗技术的发展和患者的个体化需求使得调强放疗计划的验证显得更为重要^[6], 早期的剂量验证包括一维的点剂量和二维的面剂量验证, 随着 VMAT 技术的广泛使用, 旋转照射过程中机架^[7]与 MLC^[8]对剂量

【收稿日期】2017-12-25

【基金项目】国家重点研发计划 (2017YFC0107504)

【作者简介】牛振洋, 工程师, 主要从事放射物理工作, E-mail: nzy105yy@163.com

【通信作者】陈志, 副教授, 研究方向: 辐射防护, E-mail: zchen@ustc.edu.cn

的影响与固定机架角照射又有所不同,所以需要能够对VMAT的三维剂量分布进行验证。目前,PTW、SUN Nuclear、IBA等公司都有各自的三维剂量验证系统。PTW最新版本的Octavius 729探测器阵列可以置于圆柱形的Octavius 4D模体中,这种组合称为Octavius 4D系统。Octavius 4D模体与一个置于直线加速器机架上的角度计相连,用来实时监测机架的角度。因此,通过角度计可让Octavius 4D系统与加速器机架同步旋转。本文对Octavius 4D系统的稳定性进行探讨,分析其用于VMAT三维剂量验证的可靠性。

1 材料与方法

Octavius 4D系统包括Octavius 729探测器阵列和Octavius 4D模体两部分。Octavius 729探测器是一个二维探测器阵列,由729个电离室组成,电离室中心间距为1 cm,分布在一个有效面积为 $(27 \times 27) \text{ cm}^2$ 的平面上。每个电离室尺寸为 $(0.5 \times 0.5 \times 0.5) \text{ cm}^3$ 。Octavius 729探测器的物理尺寸为2.2 cm(厚度) \times 30.0 cm(宽) \times 42.0 cm(长度),有效参考点位于探测器阵列的表面下0.75 cm处。Octavius 4D模体是一个机械化的圆柱形模体,圆柱的长34.3 cm,直径32.0 cm。它可以360°旋转,靠一个固定在机架上的角度仪来确定角度大小,探测器阵列插入模体中,这样就可以测定在不同角度下的平面剂量,测量过程中需要始终保持探测器与入射束垂直,以避免探测器的方向依赖性^[9]。所有的数据都是在ELEKTA Synergy直线加速器上6 MV和10 MV X射线下分别测量获得的。Octavius 729探测器插入Octavius 4D模体后将探测器阵列中央电离室置于加速器等中心处,4D模体的源皮距SSD=84 cm,4D系统获得的所有数据都是在此条件下测量。

1.1 探测器阵列的预热和冷却

电离室在进行测量之前需要一定剂量的预热照射^[10-11]。把Octavius 4D系统置于加速器治疗床上并将探测器阵列中央电离室置于加速器等中心处,大小为 $(27 \times 27) \text{ cm}^2$ 射野下选用6 MV X射线,每次出束100 MU连续照射15次,并分析每次照射中央电离室的剂量响应情况。这样的操作重复3次且每次的测量结果都归一到第15次的结果中。为了评估冷却的周期,电离室需要先用1 000 MU进行照射,接着照射100 MU作为参考(此照射称为“控制照射”)。探测器阵列在初始照射(1 000 MU)后5、10、15和20 min各照射100 MU,并将结果与“控制照射”的结果相比较,这一操作重复3次。

1.2 探测器阵列和指型电离室响应的剂量线性比较

剂量线性是用来评估加速器射束输出稳定性的参考数据。分别用semiflex电离室(PTW31010)在三维水箱内和用Octavius 4D系统对剂量线性进行测量,6 MV和10 MV X射线均采用 $(10 \times 10) \text{ cm}^2$ 照射野,其中指型电离室是在射束的最大剂量深度处进行测量,Octavius 4D系统的测量,依据的是中央电离室的响应。两种射束加速器的输出量均设为5、10、25、50、100、250、500和1 000 MU(临床上除了调强放射治疗中会出现几MU的子野照射,基本上不会出现这样的矩形野照射,所以加速器最小输出量设置为5 MU),每个照射重复3次,机器出束剂量率设为300 MU/min,两种测量方式电离室测得的剂量各自归一到加速器输出100 MU时其测得的剂量值。

1.3 探测器阵列和指型电离室响应的剂量率线性比较

剂量率线性的测量条件如同剂量线性测量,6 MV和10 MV X射线均采用 $(10 \times 10) \text{ cm}^2$ 照射野,每个照射野照射100 MU。由于Synergy直线加速器X射束在临床模式下只有4档剂量率:75、150、300和600 MU/min,所以测量时剂量率设置为此4档,每个照射重复3次,测量结果各自归一到相应射线300 MU/min时电离室的测量值。

1.4 射野输出因子的比较

射野输出因子是放射治疗中重要的剂量学参量,其定义为水模中该野与参考野在同一百分深度剂量(PDD)处射野中心轴上的剂量率之比。由于小于 $(3 \times 3) \text{ cm}^2$ 的方形野需要用pinpoint电离室测量,所以测量时射野设置为 (3×3) 、 (5×5) 、 (10×10) 、 (15×15) 、 (20×20) 、 (25×25) 和 $(30 \times 30) \text{ cm}^2$ 。在SSD=100 cm,水下5 cm用指型电离室测量的输出剂量与Octavius 4D系统测得剂量值各自归一到相应能量参考野为 $(10 \times 10) \text{ cm}^2$ 时的输出剂量,每个照射重复3次,机器输出剂量率设为300 MU/min。

1.5 角度仪和机架旋转对剂量的影响

机架位于0°,Octavius 4D系统安装连接好后开机,4D模体会顺时针(Clockwise, CW)、逆时针(Counter Clockwise, CCW)各旋转一周做试运行来确定0°位置而进入准备测量状态。在临床模式下设置一些固定机架角的照射野,然后在控制台操作机架旋转,观察4D模体跟随其旋转时角度仪测量的角度读数,顺、逆时针各测量3次。选择6 MV和10 MV X射线在4D模体上各制定一个射野大小 $(10 \times 10) \text{ cm}^2$ 全弧旋转照射计划,这个计划照射后去除角度仪数据可转化为静态野的二维剂量分布。该剂量分布与 $(10 \times 10) \text{ cm}^2$ 前置垂直静态野照射同样MU的二维剂

量相比较,用来评估旋转照射过程中角度仪和机架旋转对剂量分布的影响。为进一步评估此影响,选择12例不同部位肿瘤的病例分别设计6 MV和10 MV X射线的VMAT计划,在加速器上以QA模式进行机架角归零与旋转照射去除角度仪数据分别得到二维剂量并将其相比较,分析软件为VeriSoft 5.1, γ 分析标准均采用3%/3 mm和2%/2 mm。

1.6 临床照射

临床条件下的治疗计划的照射需用一系列计划去评估。选择12例不同部位肿瘤的病例分别设计6 MV和10 MV X射线的VMAT计划后,将这些计划移植到4D虚拟模体创建QA计划,计算后输出QA计划的三维剂量分布。将Octavius 4D系统置于加速器治疗床上安装连接执行试运行后,再执行这些VMAT计划照射到Octavius 4D系统上,实测的剂量分布与计划计算的剂

量分布(蒙特卡算法)用Verisoft 5.1验证软件作对比分析, γ 分析标准采用3%/3 mm,最小阈值10%。

2 结果

2.1 预热和冷却

如图1a所示,为了确保探测器响应的稳定,需要6 Gy(~ 800 MU)以上的预热照射。照射100 MU情况下,有预热和没有预热的剂量误差为2%~3%,改变加速器出束剂量率对此结果没有影响,这说明影响探测器稳定性的是照射剂量的大小而不是照射时间的长短。预热照射后,电离室的冷却时间需进行评估,这是因为在临床上,两次测量之间进行分析或者获得下一个计划都需要时间,这样会有一个时间间隔。如图1b所示,预热照射5 min后探测器响应减少不到1%,但20 min后这一误差将上升到2%左右。

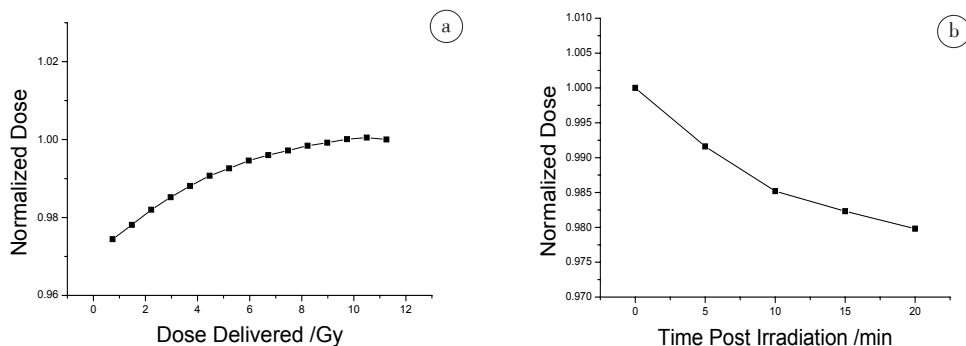


图1 Octavius 729探测器阵列在6 MV X射线下的预热(a)及冷却(b)

Fig.1 Octavius 729 detector warm-up (a) and cool-down (b) with 6 MV X-ray

2.2 剂量线性

图2显示用Octavius 4D系统和三维水箱测量,Octavius 729探测器和semiflex电离室对X射线的剂量线性响应是一致的,也说明了加速器剂量的输出是稳定的。

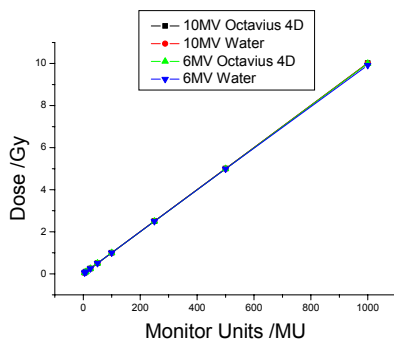


图2 Octavius 729探测器和semiflex电离室剂量线性响应

Fig.2 Dose linearity of Octavius 729 detector and semiflex ionization chamber

2.3 剂量率线性

如图3所示,在ELEKTA Synergy直线加速器的临床模式下,用semiflex电离室和Octavius 4D系统进行剂量测量,其值随剂量率的变化呈线性关系,semiflex电离室和Octavius729探测器阵列的测量结果与剂量率大小无关,随剂量率变化响应是稳定的。

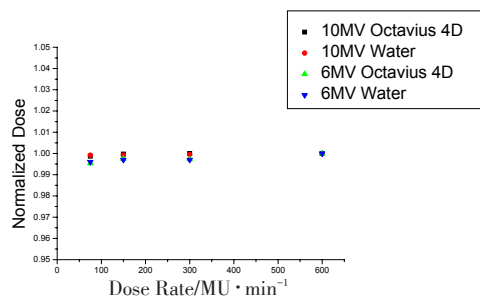


图3 Octavius 729探测器和semiflex电离室剂量率线性响应

Fig.3 Dose rate linearity of Octavius 729 detector and semiflex ionization chamber

2.4 射野输出因子

使用指型电离室和 Octavius 4D 系统进行射野输出因子测量, 由于测量的介质深度及表面曲度不一致, 测量结果不完全一致, 但两种测量模式测量结果有着相似的趋势, 如图 4 所示。

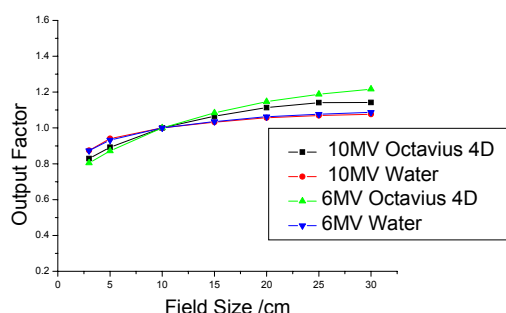


图4 Octavius 729探测器和semiflex电离室测得的射野输出因子
Fig.4 Output factors measured by Octavius 729 detector and semiflex ionization chamber

2.5 角度仪和机架旋转对剂量的影响

Octavius 4D 系统通过角度仪与加速器机架同步旋转过程中两者角度偏差小于 0.4° , 如图 5 所示。(10×10) cm² 射野旋转照射与前置固定野照射相比, 分析标准为 3%/3 mm 和 2%/2 mm 时, 6 MV 和 10 MV 的二维剂量分布的 γ 通过率为 100.0%、99.3% 和 100.0%、99.6%。12 例不同病例分别设计的 6 MV 和 10 MV X 射线 VMAT 计划, 机架角归零与旋转照射测得的二维剂量分布相比较, 分析标准为 3%/3 mm 和 2%/2 mm 时 6 MV 计划的平均 γ 通过率为 99.4%、94.8%, 10 MV 计划为 99.9%、97.9%。

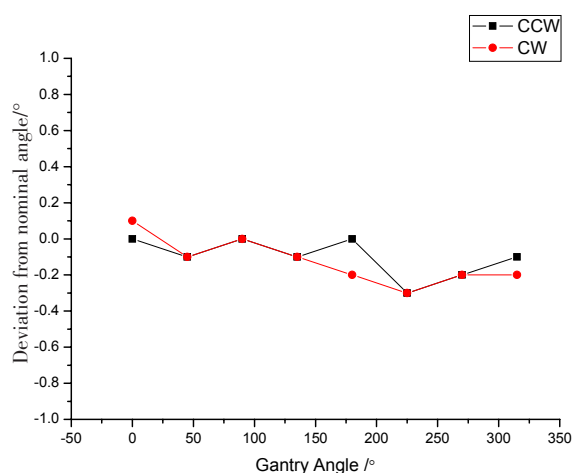


图5 Octavius 4D 系统与加速器机架同步旋转的角度偏差
Fig.5 Angular deviations of Octavius 4D system and accelerator gantry at synchronous rotation

CW: Clockwise; CCW: Counter clockwise

2.6 临床照射

12 例不同部位肿瘤的 6 MV 和 10 MV X 射线的 VMAT 计划三维剂量分布验证的平均 γ 通过率为 96.03% 和 95.56%。

3 讨论

上述结果展示了 Octavius 4D 系统在旋转照射计划中的剂量学精度和机械精度。测量显示, 预热剂量对于确保探测器充分响应是必需的, 预热剂量一般为 6 Gy (~800 MU)。在机器超过 5 min 没有使用的情况下, 探测器就会冷却, 这时需再次预热才能进行测量。对于其他电离室探测器阵列同样需要预热。同样地, 对于新探测器阵列的使用, 预热和冷却的影响都是必需实验观察的。

出束跳数大于 5 MU 时, Octavius 729 探测器和 semiflex 电离室剂量线性响应是一致的。但据相关文献报道^[12], 当跳数低于 4 MU 时, 指型电离室的测量仍然是稳定的, 而探测器阵列将会产生大于 2% 的测量偏差。所以在调强放疗计划的优化设计中都对子野数进行限制, 避免出现小跳数子野, 减少其对剂量验证通过率的影响。加速器的不同标称剂量率下, Octavius 729 探测器和 semiflex 电离室的测量结果偏差在 1% 之内, 可以认为两者的测量结果都与剂量率大小无关, 剂量率响应稳定。对于 6 MV、10 MV 射束, 由于测量的介质深度及表面曲度不一致, semiflex 电离室和 Octavius 729 阵列在射野小至 (3×3) cm² 的输出因子虽有相似的趋势, 但并不一致。要想进一步观察 semiflex 电离室和 Octavius 729 阵列测量射野输出因子的差别, 需用到与 semiflex 电离室配套的介质适配板代替探测器阵列插入得到 4D 模体中, 使电离室中心位于等中心处, 即 semiflex 电离室和 Octavius 729 阵列在相同的介质中测量, 才能更好地观察两件设备测量射野输出因子的响应是否一致。Octavius 4D 系统通过角度仪与加速器机架同步旋转过程中两者之间会产生角度偏差, 这是因为在 VMAT 的实际治疗过程中, 机架旋转的速度不是匀速的, 是根据靶区剂量分布需要变化的, 就如同剂量率变化及 MLC 运动快慢变化是一样的, 由于惯性等因素, Octavius 4D 模体与机架的同步旋转总会产生微小的误差, 尤其是当机架旋转由极快变为极慢或由极慢变为极快时, Octavius 4D 模体与机架的同步旋转会产生最大 0.4° 的角度误差^[12], 其值在 1° 的容差范围之内。(10×10) cm² 射野旋转照射与前置固定照射 6 MV 和 10 MV 的二维剂量分布的 γ 通过率非常完

美,即使分析标准采用2%/2 mm通过率仍在99%以上。12例临床VMAT计划采用两种QA照射模式得到的二维剂量分布相互比较分析,其结果就有很大的不同,采用3%/3 mm分析标准时 γ 通过率降低微乎其微,但是分析标准为2%/2 mm时,6 MV和10 MV射线VMAT计划其 γ 通过率分别下降5%和2%左右。这表明VMAT计划在临床执行过程中机架旋转带来的等中心的变化和MLC叶片到位精度的变化对剂量分布是有一定影响的,但其引起的剂量误差在5%允许范围之内。造成这种结果的原因,除了Monaco模型MLC参数调整的优劣外^[13],还有两点:一是调强计划的优化设计过程中会产生相当数量的窄条野^[14],窄条野的存在会降低 γ 通过率。二是MLC的到位精度的变化。旋转照射过程中机架旋转不是匀速的,MLC所受重力、摩擦力、惯性等作用是不定时的,致使其到位精度发生变化^[15-16],而在(10×10) cm²射野的旋转照射过程中MLC是静止的。Octavius 4D系统利用基于PDD曲线的一种专有算法,每个角度下测量到的平面剂量都被用来确定沿探测器射线方向的剂量数值,探测器阵列探测到的剂量与深度剂量联合重建生成模体内的三维剂量分布。尽管Octavius 4D系统随加速器机架旋转的过程中产生很小的角偏差,12例不同部位肿瘤的6 MV和10 MV X射线的VMAT计划三维剂量分布验证的平均 γ 通过率为96.03%和95.56%。根据AAPM的TG 119号报告^[17]和Basran等^[18]的报道,采用了3%/3 mm的 γ 通过率 $\geq 90\%$ 作为计划验证合格的标准。显然Octavius 4D系统的测量结果是满足这一标准的。

综上所述,在充分预热的情况下,Octavius 4D系统的剂量学和机械精度得到验证,用于VMAT计划三维剂量分布的验证是可靠的,是一套稳定性有保障的机械系统。

【参考文献】

- [1] OTTO K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc[J]. Med Phys, 2008, 35(1): 310-317.
- [2] MC GRATH S D, MATUSZAK M M, YAN D, et al. Volumetric modulated arc therapy for delivery of hypofractionated stereotactic lung radiotherapy: a dosimetric and treatment efficiency analysis[J]. Radiother Oncol, 2010, 95(2): 153-157.
- [3] YU C X, TANG G. Intensity-modulated arc therapy: principles, technologies and clinical implementation[J]. Phys Med Biol, 2011, 56(5): 31-54.
- [4] VERBAKEL W F, CUIJPERS J P, HOFFMANS D, et al. Volumetric intensity-modulated arc therapy versus conventional IMRT in head-and-neck cancer: a comparative planning and dosimetric study[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2009, 74(1): 252-259.
- [5] WOLFF D, STIELER F, WELZEL G, et al. Volumetric modulated arc therapy (VMAT) versus serial tomotherapy, step-and-shoot IMRT and 3D conformal RT for treatment of prostate cancer[J]. Radiother Oncol, 2009, 93(2): 226-233.
- [6] LANG S, REGGIORI G, PUXEU VAQUEE J, et al. Pretreatment quality assurance of flattening filter free beams on 224 patients for intensity modulated plans: a multicentric study[J]. Med Phys, 2012, 39(3): 1351-1356.
- [7] ZHU J H, CHEN L X, JIN G H, et al. A comparison of VMAT dosimetric verifications between fixed and rotating gantry positions[J]. Phys Med Biol, 2013, 58(5): 1315-1322.
- [8] 蒋胜鹏, 李智华. 加速器机架角度对多叶准直器叶片到位精度的影响[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2009, 18(4): 317-320.
JIANG S P, LI Z H. Impact of accelerator's gantry angle on multi-leaf collimator position accuracy[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2009, 18(4): 317-320.
- [9] SHIMOHIGASHI Y, ARAKI F, TOMINAGA H, et al. Angular dependence correction of MatriXX and its application to composite dose verification[J]. J Appl Clin Med Phys, 2012, 13(5): 3856.
- [10] HERZEN J, TODOROVIC M, CREMERS F, et al. Dosimetric evaluation of a 2D pixel ionization chamber for implementation in clinical routine[J]. Phys Med Biol, 2007, 52(4): 1197-1208.
- [11] LI J G, YAN G, LIU C. Comparison of two commercial detector arrays for IMRT quality assurance[J]. J Appl Clin Med Phys, 2009, 10(2): 2942.
- [12] MC GARRY C K, O'CONNELL B F, GRATAN M W, et al. Octavius 4D characterization for flattened and flattening filter free rotational deliveries[J]. Med Phys, 2013, 40(9): 091707.
- [13] 牛振洋, 费振乐, 段宗锦, 等. 探测器阵列在TPS模型调整中的应用[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2017, 26(7): 806-809.
NIU Z Y, FEI Z L, DUAN Z J, et al. Application of detector array in treatment planning system modeling adjustment[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2017, 26(7): 806-809.
- [14] 杨金磊, 刘博宇, 路双臣, 等. Monaco与Pinnacle计划在肺癌容积旋转调强计划中的比较[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2015, 35(2): 119-122.
YANG J L, LIU B Y, LU S C, et al. Comparison of Monaco and Pinnacle treatment planning systems in volumetric modulated arc therapy optimization for lung cancer[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2015, 35(2): 119-122.
- [15] 阮长利, 徐利明, 宋启斌, 等. 不同机架角时多叶准直器叶片对不同调强放疗剂量影响[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2011, 20(4): 345-347.
RUAN C L, XU L M, SONG Q B, et al. Impact of accelerator's multi-leaf collimator leaves on the intensity modulated radiation therapy dose at different gantry angles[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2011, 20(4): 345-347.
- [16] 孔伟, 丁莉, 叶红强, 等. 调强放疗计划中射野角度归零与实际角度的剂量验证比较[J]. 中国医学物理学杂志, 2015, 32(6): 892-896.
KONG W, DING L, YE H Q, et al. Dosimetric verification of practical beam angle and beam angle returning to zero in intensity modulated radiotherapy plan[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2015, 32(6): 892-896.
- [17] EZZELL G A, BURMEISTER J W, GOGAN N, et al. IMRT commissioning: multiple institution planning and dosimetry comparisons, a report from AAPM Task Group 119[J]. Med Phys, 2009, 36(11): 5359-5373.
- [18] BASRAN P S, WOO M K. An analysis of tolerance levels in IMRT quality assurance procedures[J]. Med Phys, 2008, 35(6): 2300-2307.

(编辑:薛泽玲)