

国产医用直线加速器开展立体定向放射治疗的可行性研究

聂鑫, 韩军, 杨晶, 祝小惠, 柳刚, 刘洪源, 曹婷, 梁志文, 陈秘, 李勤
华中科技大学同济医学院附属协和医院肿瘤中心, 湖北 武汉 430022

【摘要】目的:从剂量输出、机械性能和辐射性能方面比较两种进口医用电子直线加速器和3种国产医用电子直线加速器的各项参数指标,对比分析国产医用直线加速器的技术和性能是否达到开展立体定向放射治疗的基本标准。**方法:**选取两种开展过立体定向放射治疗的进口医用电子直线加速器和3种装机量较大的国产医用电子直线加速器。利用电离室和静电计在水模体上测量加速器的剂量输出性能;利用坐标纸、前指针、刻度尺等工具测量加速器机械精度;通过PIPSpro5.3.1和doselab图形分析软件测量加速器辐射性能和到位精度,从而分析固体水和EBT免冲洗胶片记录辐射野。**结果:**以AAPM TG-142和中华人民共和国医药行业标准YY0832.2-2015为参考,建立一套完整的针对国产电子医用直线加速器的评价标准。检测发现国产加速器输出剂量精度、重复性、线性较高,旋转机架、准直器和治疗床辐射野等中心精度大部分小于1 mm,铅门和多叶准直器平均到位精度小于0.5 mm,两种国产加速器端对端偏差结果小于5%,说明国产加速器基本性能较好。**结论:**部分国产加速器从剂量输出和治疗精度方面已达到开展立体定向放射治疗的基本要求,但开展立体定向治疗需要相关放疗单位投入更多的人力和相应设备做好加速器的质量保证和质量控制工作。

【关键词】医用电子直线加速器;立体定向放射治疗;技术性能;评价体系

【中图分类号】R312;R815

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2019)02-0130-06

Feasibility study of applying domestic medical linear accelerators in stereotactic radiotherapy

NIE Xin, HAN Jun, YANG Jing, ZHU Xiaohui, LIU Gang, LIU Hongyuan, CAO Ting, LIANG Zhiwen, CHEN Mi, LI Qin
Cancer Center, Union Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430022, China

Abstract: Objective To evaluate the dose output, mechanical and radiation performances of 2 imported medical linear accelerators and 3 domestic medical linear accelerators for analyzing the performance of domestic medical linear accelerators and assessing whether it is suitable for stereotactic radiotherapy. **Methods** Two imported medical linear accelerators which stereotactic radiotherapy had already been treated on and 3 domestic medical linear accelerators with superior installed capacities were chose for research. The ionization chamber and electrometer were used to measure the dose output performance of the linear accelerators on water phantom. The mechanical precision of the linear accelerators was measured with coordinate paper, front pointer, scales and other tools. The radiation performance and multi-leaf collimator positioning accuracy were obtained by PIPSPRO5.3.1 and doselab softwares, which provided great conveniences in analyzing the recorded radiation fields taken by solid water and EBT films. **Results** According to the AAPM TG-142 and the People's Republic of China Pharmaceutical Industry Standard YY0832.2-2015, a complete set of evaluation criteria for domestic medical linear accelerators had been set up. The evaluation results showed that the accuracy, repeatability and linearity of the output dose of domestic medical linear accelerators are high; that the radiation field isocenters accuracies of gantry, collimator and couch were mostly less than 1 mm; that the average positioning accuracy of jaws and multileaf collimators was less than 0.5 mm; and that the end-to-end deviations of two kinds of domestic accelerators were less than 5%. All these results revealed that domestic medical linear accelerators had good basic performances. **Conclusion** The dose output and treatment accuracy of some domestic medical linear accelerator has already met the basic requirements of stereotactic radiotherapy. However, the relevant radiotherapy units should invest more manpower and corresponding equipments to carry out the quality assurance and quality control of the medical linear accelerator in order to promote stereotactic radiotherapy.

Keywords: medical linear accelerator; stereotactic radiotherapy; technical performance; evaluation system

【收稿日期】2018-07-12

【基金项目】国家重点研发计划(2016YFC0106701)

【作者简介】聂鑫,博士,主管技师,研究方向:放射治疗技术,E-mail: orange_nx@163.com

前言

基于医用直线加速器的立体定向放射治疗技术开始于20世纪80年代,1987年有学者在Varian直线加速器上设计了一系列圆形准直系统,使用6 MV X线和多弧非共面等中心方式开展头部立体定向放射治疗^[1]。随着肿瘤学家对这种大剂量高聚焦治疗技术物理生物学原理理解的加深以及放射治疗技术和设备的发展更新,近几年来,立体定向放射治疗技术(尤其是体部立体定向放射治疗)在临床上被广泛使用和研究,疗效也得到了充分的肯定。相对于常规治疗方式,立体定向放射治疗具有单次剂量高、分次数少、剂量梯度大、生物效应高等特点^[2-5],因此在治疗过程中对治疗精度有很高的要求,这就对实施这项技术的人员和设备提出了更高的挑战。

本研究采集了5种医用直线加速器(两种进口加速器A、B以及三款国产加速器C、D、E)的基本性能参数,统计分析国产和进口设备的性能差异,并建立基于医用直线加速器立体定向放射治疗设备的技术性能评价体系,为国产设备的提升和研发提供方向,为国家国产设备的发展策略提供参考。

1 研究内容与方法

立体定向放疗对直线加速器的性能提出了更高的要求,本研究主要从直线加速器性能指标、端对端(E2E)剂量验证等方面全面评测设备性能。(1)直线加速器性能指标包括输出剂量准确度和稳定性、剂量跳数线性、外指示激光线的准确性、多叶光栅(MLC)到位精度、旋转机架、准直器和治疗床的机械和辐射等中心精度等;(2)E2E剂量验证是通过电离室从绝对剂量上分析其剂量的照射精度。

1.1 输出剂量准确度、重复性和线性测试

使用常规测量小水箱(30 cm×30 cm×30 cm),源至水表面距离SSD=100 cm,水表面的射野大小为10 cm×10 cm,指型电离室有效测量点位于水下5 cm(6 MV光子),机器跳数(MU)=200。

直线加速器的线性和重复性测试条件同上,选取临床上常用的立体定向剂量率(如600 MU/min),剂量监测系统预设值由100 MU开始,分别出束100、200、300、500、800、1 000 MU。每个测量剂量测3次,观察其输出剂量重复性,然后取平均值,用最小二乘法测定其线性。

1.2 两侧激光线精度检测

将直线加速器机架位置旋转至90°(使用水平仪进行校准),打开激光定位灯,观察激光线与机头上

十字线重合情况。旋转机架至270°,重复以上过程,并在等中心左右1 m范围内观察两侧激光线并进行精度检测,要求激光线与机头十字线两者之间的偏差<1 mm。将机架位置旋转至0°(使用水平仪进行校准),打开激光定位灯,观察激光线与机头上十字线重合情况,要求激光线与机头十字线两者之间的偏差<1 mm。

1.3 机架、准直器与治疗床机械等中心精度检测

机架机械等中心精度测试是将一针尖(直径<1 mm)参照激光线系统或机头十字线投影置于机架旋转中心位置固定,针尖与等中心重合,360°范围内旋转机架,打开光野,观察针尖与机头十字线投影位置变化情况,要求在等中心处偏差<1.5 mm(最大直径)。准直器和治疗床机械等中心精度测试与机架类似。

1.4 机架、准直器与治疗床辐射等中心精度检测

将EBT免冲洗胶片固定在固体水中心位置,按照固体水摆位标记在胶片上用记号笔画出两条垂直线以标记中心位置,固体水无摆位标记时,可参照激光系统或机头十字线投影在胶片和固体水上做好摆位标记和中心位置记号,在胶片上覆盖1 cm固体水,将固体水用胶带固定在一起并竖立,调节治疗床和固体水的位置,使胶片中心位于机架旋转等中心处,开射野大小为6 mm×100 mm,在机架0°、30°、90°、120°、240°、330°处出束照射,MU=500,出束完成后,用PIPSpro5.3.1和doselab图形分析软件分析射野中心(各射野中心的交点或交点的质心)与标记中心点的偏差。准直器和治疗床的测试方法与机架类似,仅需将固体水平放且测试角度略有不同,故不再赘述。

1.5 辐射野尺寸偏差

将铅门大小分别调至10 cm×10 cm、6 cm×6 cm和2 cm×2 cm,在过等中心并与辐射束轴垂直的平面内放置EBT胶片,其上放置固体水。将直线加速器机架和准直器的角度置于0°,并依次曝光,将曝光后的胶片通过扫描仪输入计算机,利用确定的灰度-剂量响应曲线将胶片灰度转换为相应的剂量值,分别找出每张胶片中辐射束中心轴位置附近的吸收剂量,定义该剂量值为该张胶片的100%吸收剂量值;测量所测射野大小对应的胶片沿辐射野两主轴方向上50%吸收剂量点之间的距离,计算辐射野尺寸偏差,应符合孔径<20 mm、偏差≤1 mm、孔径≥20 mm、偏差≤2 mm的规定。

1.6 MLC到位精度测量

根据所测直线加速器,在对应的计划系统中设

计测量计划,使铅门相对等中心对称开至 X=16 cm、Y=20 cm 的射野,MLC 相应开至 X=8 cm、Y=20 cm 的射野,出射剂量为 500 MU。选取测量用的 EBT 免冲洗胶片固定在 5 cm 固体水上置于直线加速器等中心位置,机架、准直器和治疗床角度均设为 0°;打开光野,将一个微小的铅粒放置于胶片上机头的十字线中心处,并在 Y 轴方向离等中心一定距离放置另一微小铅粒,利用刻度尺精确确定两铅粒之间的距离为 8 cm。在胶片上覆盖厚度为 1 cm 的固体水,最后读取并执行之前设计的测量计划。

1.7 E2E 剂量验证

模体 StereoPHAN 可以对直线加速器进行精确的 E2E 立体定向检测和验证,其操作方法为:(1)将带 152 mm 圆柱转盘的基础底架安装在治疗床上,标准插件能简易地通过模体支架固定在底架上,并以此把 StereoPHAN 模体安装好;(2)将电离室插件放置于基础底架中,并使其中心正好位于直线加速器的几何等中心位置,然后用通用空间附件将电离室插件精确固定在圆柱形测量支架中,利用中间的空洞将指形电离室插入到电离室插件中,调出测量计划来测量直线加速器的绝对剂量。

2 考核指标和要求

根据医用直线加速器的质控标准 AAPM TG-142^[6]和中华人民共和国医药行业标准 YY0832.2-2015^[7],本研究拟定直线加速器性能及相关指标评估标准和 E2E 剂量验证标准:对模体计划进行绝对点剂量验证,结果要求测量值 D_M 和 TPS 计算值 D_C 之间的差异 $\leq 5\%$,计算公式为 $r = \frac{D_C - D_M}{D_M} \times 100\%$ 。各项目的参考标准见表 1。

表1 项目参考标准

Tab.1 Project reference standard

Project	Reference
Mechanical precision	
Laser precision	1 mm
Collimator isocenter	1 mm
Gantry isocenter	1 mm
Couch isocenter	1 mm
Consistency of mechanical and radiation center	2 mm
MLC position accuracy	1 mm
Collimator (MLC) radiation field size (field<20 mm)	1 mm
MLC position accuracy	1 mm
Collimator (MLC) radiation field size (field \geq 20 mm)	2 mm
Dosimetry accuracy	
Radiographic stability	$\leq 2\%$
Dose output stability	$\leq 2\%$
Dose output linearity	$\leq 2\%$

MLC: Multi-leaf collimator

3 测试结果

3.1 输出剂量准确度、重复性和线性测试

对各单位直线加速器类型进行剂量测试,取测量平均值,结果如表 2 所示。剂量测试的结果显示除国产 D 型加速器外,其他机型的剂量输出平均值均达到测试标准,且标准偏差不大,另外各机型的剂量输出重复性和线性都很好,这说明只要加强对输出剂量的监测,并进行调校,各机型输出剂量便可以长期保持稳定并符合标准。

表2 5 种类型加速器输出剂量精度、重复性和线性结果

Tab.2 Accuracy, repeatability and linearity of output dose for 5 types of Linacs

Linac model	Performance test of dose output			
	Average dose output/cGy	Standard deviation of dose output/cGy	Dose output repeatability/cGy	Dose output linearity
A	98.98	1.147	<0.5	<1%
B	99.20	1.602	<0.5	<1%
C	98.87	0.914	<1.0	<1%
D	94.80	3.128	<0.5	<1%
E	100.68	1.508	<0.5	<1%

3.2 激光线精度检测

对各直线加速器摆位激光线精度的检测结果发

现各机型 3 个方向的激光灯精度偏差均在 1 mm 以内,达到检测标准,表明各机型在激光灯的精度调校

方面都做得很好,保证技术师的摆位工作能准确高效地进行。

3.3 机架、准直器与治疗床机械和辐射等中心检测

对各直线加速器主要部件,即旋转机架、小机头准直器和治疗床机械和辐射等中心精度进行了检测和分析,结果如图1~2所示。图1中机架、准直器和治疗床的机械等中心精度测试结果表明进口A、B两种机型各项参数的平均值均达到标准,而国产C~E型的各项参数达标率较低。与此同时,国产3种机型精度的重复性与进口机型存在一定差距。从图2辐射等中心精度的统计结果来看,仅进口A和国产D两种机型各项参数的平均值达到标准。国产C型准直器的平均精度最高,国产D型治疗床的平均精度最高。与此同时,在准直器和治疗床精度上国产C型和D型同进口机型的重复性差别较小,但进口机型在旋转机架的精度上仍有较大领先。而国产E型3项测试结果均未达到标准,结果的重复性也较差。本研究的测试结果显示国产C型和D型同进口B型的机械和辐射等中心精度方面差距不大,甚至某些参数同进口A型也不分伯仲,只是精度的稳定性方面需要提升。

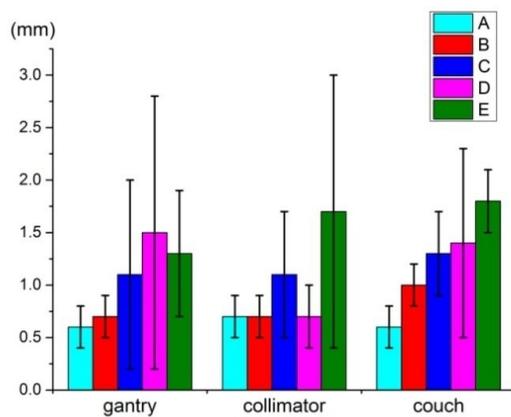


图1 5种类型加速器机械等中心平均值和标准差

Fig.1 Mean value and standard deviation of mechanical isocenters for 5 types of Linacs

3.4 辐射野尺寸偏差

表3为胶片记录的各直线加速器 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 、 $6\text{ cm}\times 6\text{ cm}$ 、 $2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$ 辐射野的尺寸和达标通过率。从测量结果上看,进口A型直线加速器的各辐射野尺寸均达到测量标准,且精度很高。其余4种机型均有部分未达标,进口B型结果仍略微优于国产机型,但差距不大,这4种机型在 $2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$ 射野大小下的通过率均较低,说明这4种机型小野的辐射输出需要更多的关注,并及时进行调整。

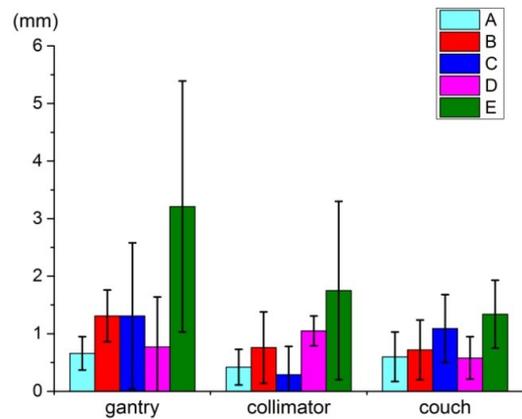


图2 5种类型加速器辐射等中心平均值和标准差

Fig.2 Mean value and standard deviation of radiation field isocenters for 5 types of Linacs

3.5 MLC到位精度测量

分别测量5种机型的MLC叶片到位偏差,结果如图3所示。由于实际的治疗中辐射野的形成主要是依靠MLC的适形来完成的,因此MLC的到位精度能较好地反映实际治疗的精度。MLC的移动方向为X方向(横截面方向),由X1和X2两部分的MLC共同走位完成。进口机型方面,A的MLC平均到位偏差在 0.1 mm 左右,且从标准差来看,各结果之间浮动较小,说明走位十分准确,这也与文献[8-9]报道更多的立体定向放射治疗临床工作是在A型上进行的相符;B的X1部分的MLC到位平均偏差 0.4 mm 高于X2部分,且各结果间浮动也较大,但结果均小于 1 mm 。从国产机型结果来看,C型直线加速器的MLC到位精度同进口B型X1部分的MLC类似,浮动趋势也类似;D型直线加速器的MLC平均精度略高于C型,且各结果间差异较大,部分结果未达到 1 mm 精度标准;E型直线加速器的MLC到位精度较高,同C型结果各有优劣,但E型直线加速器的样本较少。总体来看,进口加速器的MLC到位精度优于国产加速器,但差距较小,MLC的准确走位有利于放疗计划的精确执行。

3.6 E2E剂量验证结果

表4为各直线加速器进行E2E绝对剂量验证(点剂量)的结果。E2E点剂量的测试结果表明进口的两种机型的测量结果达标,而国产E型直线加速器的测量结果未达标($\leq 5\%$),而且进口设备的测量结果大幅优于国产设备。由于E2E测量结果同设备硬件均有很大关联,而国产设备的等中心精度、辐射野尺寸以及MLC到位精度方面同进口设备存在一定的差距,各项因素综合下来就会对E2E的测量结果造成影响。

表3 5种类型加速器三种不同射野大小的辐射野尺寸偏差及通过率
Tab.3 Size deviation and passing rate for 5 types of Linacs with 3 different radiation fields

Field/cm ²	Statistics	Linac model				
		A	B	C	D	E
10×10	Average value/cm ²	10.02×10.07	9.67×9.74	10.04×10.05	9.97×10.10	10.06×10.12
	Standard deviation/cm ²	0.08×0.08	0.82×0.90	0.14×0.10	0.12×0.18	0.19×0.12
	Passing rate/%	100.0	83.3	80.0	50.0	75.0
6×6	Average value/cm ²	6.01×6.03	5.81×5.82	5.96×6.00	6.06×6.07	5.99×5.99
	Standard deviation/cm ²	0.05×0.05	0.48×0.50	0.23×0.28	0.18×0.17	0.19×0.25
	Passing rate/%	100.0	83.3	60.0	83.3	50.0
2×2	Average value/cm ²	2.00×2.00	1.93×1.92	2.31×2.38	2.38×2.27	1.90×2.01
	Standard deviation/cm ²	0.05×0.07	0.15×0.16	0.71×0.75	0.53×0.51	0.23×0.19
	Passing rate/%	100.0	33.3	20.0	33.3	25.0

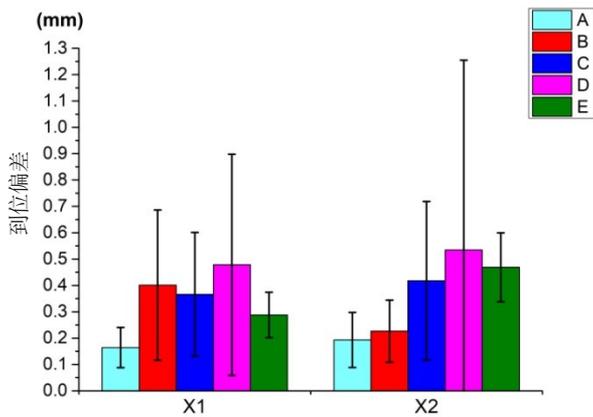


图3 5种类型加速器MLC到位精度
Fig.3 MLC accuracy for 5 type Linacs

表4 5种类型加速器E2E绝对剂量测试结果(%)

Tab.4 Absolute dose test results of E2E for 5 type Linacs (%)

Statistics	Linac model				
	A	B	C	D	E
Average value	2.235	2.208	3.696	4.960	8.240
Standard deviation	1.195	1.388	3.346	4.495	4.133
Passing rate	100.0	100.0	66.7	60.0	33.3

4 讨论与结论

作为开展放射治疗的关键设备,医用直线加速器的出束精度是保证辐射剂量精准施于患者肿瘤病灶的基本要求。建立一套完善的直线加速器性能评价体系可以为治疗前的各项准备工作提供依据,根据测试结果再合理安排技术人员进行逐项调整,以达到精确放疗的基本要求。何盛烽等^[10]介绍了医用

直线加速器的相关标准和质量保证,其中涉及到对机架、准直器和治疗床等中心及输出剂量的质量保证。杨绍洲等^[11]介绍了Varian直线加速器机械等中心的验证和校准方法。90年代以后精确放疗理念的兴起带来了放疗理念的革新,立体定向放疗技术由此产生。吕仲虹等^[12]就立体定向放射治疗的设备、原则、处方剂量、存在问题和应用前景进行了详细的介绍,报道指出立体定向放射治疗以精确定位、精确摆位为基础从而达到精确治疗的目的。立体定向放疗技术以提高单次治疗剂量并缩短治疗次数,精准照射靶区,如外科手术刀般杀死病变组织,且保护周围正常组织,由于疗效好、疗程短,越来越多地应用在临床领域^[13-14]。由于这一技术对治疗仪器的精度要求比常规放疗更为严格,所以绝大多数是在先进的进口直线加速器上实施的^[15-16]。

本研究通过同样的评价体系测试国产和进口直线加速器各项性能指标,从而分析立体定向放射治疗在国产设备上实施的可行性。研究中直线加速器剂量验证采用配套的电离室和静电计,机械精度验证利用刻度尺、坐标纸和水平仪,影像方面的验证则利用胶片采集,然后用高精度图形分析软件PIPSpro5.3.1和doselab进行后期分析,检测出国产加速器的输出剂量重复性偏差小于1 cGy,剂量线性偏差小于1%,激光灯精度小于1 mm,旋转机架、准直器和治疗床辐射等中心精度大部分在1 mm以内,除小野外的其他检测射野通过率较高,过半加速器MLC到位精度小于1 mm,C和D型国产加速器E2E偏差小于5%,可见检测的国产加速器基本性能较好。从我们的评价体系来看,国产直线加速器开展立体定向放射治疗需要解决的问题包括:绝对剂量输出的

准确性需要提升;机械等中心和辐射等中心精度不够,还需进一步提升;小辐射野的精度较差,需要调整;部分直线加速器MLC到位精度需进一步提升。由于直线加速器的保养和质控是维持其精度的重要方法^[17-20],进口直线加速器厂商会通过定期的检查和维护来提升其设备的治疗精度和稳定性。虽然部分国产直线加速器已经达到开展立体定向放射治疗的基本要求,但其精度同进口产品仍有较大差距,国产厂商同医院技术人员需要加大人力和设备的投入,强化国产设备的质量保证和质量控制,发现问题及时改正和调整,继续提升上述硬件指标,进而提升E2E测试精度,最终达到能持续稳定开展立体定向放射治疗的要求。

【参考文献】

- [1] LUTZ W, WINSTAN K R, MALEKI N. A system for stereotactic radio-surgery with a linear accelerator[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 1988, 14(88): 90444-90446.
- [2] 胡逸民,张红志,戴建荣. 肿瘤放射物理学[M]. 北京: 原子能出版社, 1999: 99-144.
HU Y M, ZHANG H Z, DAI J R. Radiation oncology physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1999: 99-144.
- [3] 杨绍洲,陈龙华,张树军. 医用直线加速器[M]. 北京: 人民军医出版社, 2004: 1-11.
YANG S Z, CHEN L H, ZHANG S J. Medical linear accelerator[M]. Beijing: People's Military Medical Publisher, 2004: 1-11.
- [4] PODGORSK E B, OLIVIER A, PLA M, et al. Dynamic stereotactic radiosurgery[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 1988, 14(1): 115-126.
- [5] 郝俊芳,于水. 立体定向放疗技术及对设备的要求[J]. *现代肿瘤医学*, 2006, 14(3): 376-377.
HAO J F, YU S. Stereotactic radiotherapy technology and requirements for equipment [J]. *Journal of Modern Oncology*, 2006, 14(3): 376-377.
- [6] 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.
- [7] 国家食品药品监督管理总局. YY 0832.2-2015 X辐射放射治疗立体定向及计划系统第2部分: 体部X辐射放射治疗立体定向及计划系统[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
General Administration of Food and Drug Supervision of the People's Republic of China. YY 0832.2-2015 the second part of the stereotactic and planned system for X radiation therapy: stereotactic and planned system of body X radiotherapy[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [8] VERBAKEL W F, SENAN S, CUIJPERS J P, et al. Rapid delivery of stereotactic radiotherapy for peripheral lung tumors using volumetric intensity-modulated arcs[J]. *Radiat Oncol*, 2009, 93(1): 122-124.
- [9] HUNTZINGER C, FRIEDMAN W, BOVA F, et al. Trilogy image-guided stereotactic radiosurgery[J]. *Med Dosim*, 2007, 32(2): 121-133.
- [10] 何盛峰,文莉娜,杨文. 医用电子直线加速器的相关标准与质量保证[J]. *中国辐射卫生*, 2016, 25(4): 440-442.
HE C F, WEN L N, YANG W. Related standards and quality assurance of medical electronic linear accelerator [J]. *Chinese Journal of Radiological Health*, 2016, 25(4): 440-442.
- [11] 杨绍洲,王胜军. VARIAN加速器机械等中心的验证和调整方法[J]. *中国医疗设备*, 2008, 23(9): 45-46.
YANG S Z, WANG S J. Methods for verifying and adjusting the mechanical isocenter of Varian accelerators [J]. *China Medical Devices*, 2008, 23(9): 45-46.
- [12] 吕仲虹,杨天恩. 三维立体定向放射治疗的理论基础及临床应用前景[J]. *中华肿瘤杂志*, 2002, 24(5): 417-420.
LÜ Z H, YANG T E. Theoretical basis and clinical application of three-dimensional stereotactic radiotherapy [J]. *Chinese Journal of Oncology*, 2002, 24(5): 417-420.
- [13] KAVANAGH B D, TIMMERMAN R D. Stereotactic radiosurgery and stereotactic body radiation therapy: an overview of technical considerations and clinical applications[J]. *Hematol Oncol Clin North Am*, 2006, 20(1): 87.
- [14] OLIAI C, BERNETICH M, BRADY L, et al. Propensity score matched comparison of SBRT versus IMRT for the treatment of localized prostate cancer[J]. *J Radiat Oncol*, 2016, 5(2): 1-9.
- [15] WEN N, KIM J, DOEMER A, et al. Evaluation of a magnetic resonance guided linear accelerator for stereotactic radiosurgery treatment[J]. *Radiother Oncol*, 2018, 127(3): 460-466.
- [16] MUHAMMAD M F, AHMED E, STEPHANIE B H, et al. A treatment planning comparison between a novel rotating gamma system and robotic linear accelerator based intracranial stereotactic radiosurgery/radiotherapy[J]. *Phys Med Biol*, 2018, 63(3): 29-35.
- [17] TSAI J S, BUCK B A, SVENSSON G K, et al. Quality assurance in stereotactic radiosurgery using a standard linear accelerator[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 1991, 21(3): 737-748.
- [18] PAWLICKI T, WHITAKER M, BOYER A L. Statistical process control for radiotherapy quality assurance[J]. *Med Phys*, 2005, 32(9): 2777-2786.
- [19] TANABE S, UMETSU O, SASAGE T, et al. Clinical commissioning of a new patient positioning system, SyncTraX FX4, for intracranial stereotactic radiotherapy[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2018, 19(6): 149-158.
- [20] COURT L, WANG H, ATEN D, et al. Illustrated instructions for mechanical quality assurance of a medical linear accelerator[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2018, 19(3): 355-359.

(编辑:谭斯允)