

## 医用加速器输出剂量长期稳定性分析

周军,黄胜,刘崇武,胡厚,胡铭阳,何水  
武警四川省总队医院肿瘤科,四川 乐山 614000

**【摘要】目的:**分析医用加速器输出剂量长期稳定性及其影响因素。**方法:**按照IAEA TRS 277技术报告,对武警四川省总队医院医用加速器进行吸收剂量测量,统计分析2012年5月~2017年12月共计240组输出剂量数据,分析医用加速器输出剂量长期稳定性及其影响因素,为加速器剂量质量保证提供方法与措施。**结果:**6 MV-X输出剂量3组数据K-S检验双尾渐进概率 $P$ 值分别为0.101、0.269、0.549,均大于显著性水平0.05,符合标准正态分布,且 $P$ 值逐渐增大,符合程度越来越好;剂量误差 $\leq 1\%$ 符合率达到91.94%,剂量误差 $\leq 2\%$ 符合率达到97.92%。**结论:**武警四川省总队医院医用加速器输出剂量具有很好的正态性和长期稳定性,完全能够满足临床放疗需求;影响加速器输出剂量稳定性的主要因素有加速器硬件自身稳定性、剂量仪电离室稳定性、剂量测量方法准确性、摆位误差等;物理师应按照科室实际情况,制定个体化的加速器剂量质量保证程序,并按照规定频次校准输出剂量,监测输出剂量的稳定性,为精准放疗提供有力保障。

**【关键词】**医用加速器;输出剂量;剂量测量;稳定性

**【中图分类号】**R318.6;R811.1

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2019)08-0903-05

### Long-term stability analysis on output dose of medical accelerator

ZHOU Jun, HUANG Sheng, LIU Chongwu, HU Hou, HU Mingyang, HE Shui

Department of Radiation Oncology, Sichuan Provincial Corps Hospital of Chinese People's Armed Police Forces, Leshan 614000, China

**Abstract: Objective** To analyze the long-term stability of the output dose of medical accelerator and discuss its influencing factors. **Methods** According to IAEA TRS 277 report, the absorbed dose measurement was performed on medical accelerators in Sichuan Provincial Corps Hospital of Chinese People's Armed Police Forces, and a total of 240 groups of output dose data from May 2012 to December 2017 were statistically analyzed. The long-term stability of the output dose of medical accelerator and its influencing factors were analyzed for providing methods and measures for the dose quality assurance of medical accelerator. **Results** The K-S test on 3 groups of 6 MV-X output doses showed that two-tailed progressive probability  $P$  values were 0.101, 0.269, and 0.549, respectively, which were all greater than the significance level of 0.05 and accord with the standard normal distribution. The  $P$  value was gradually increased, and the degree of coincidence was also gradually increased. Moreover, the coincidence rates of dose error  $\leq 1\%$  and  $\leq 2\%$  were 91.94% and 97.92%, respectively. **Conclusion** The output dose of the medical accelerator in Sichuan Provincial Corps Hospital of Chinese People's Armed Police Forces has good normality and long-term stability, and can fully meet the needs of clinical radiotherapy. The main factors that affect the stability of the output dose of accelerator includes the self stable of accelerator hardware, the stable of dosimeter and ionization chamber, the accuracy of measurement method and setup errors, etc. Physicists should formulate an individualized accelerator dose quality assurance procedure according to the actual situation of the department, and calibrate the output dose according to the specified frequency, and monitor the stability of the output dose, thereby providing a guarantee for precision radiotherapy.

**Keywords:** medical accelerator; output dose; dose measurement; stability

### 前言

随着放射治疗新技术的快速发展,调强放疗

(Intensity-Modulated Radiation Therapy, IMRT)和容积旋转调强放疗(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT)已经逐渐成为主流肿瘤放疗技术,标志着肿瘤放疗由传统放疗进入精准放疗时代<sup>[1-2]</sup>。医用加速器是肿瘤放疗的最主要设备,随着现代医用加速器逐渐更新发展,其结构更加复杂、数字化程度更高、精度要求更高,任何一个部件老化或故障都会引起

**【收稿日期】**2019-02-01

**【基金项目】**乐山市重点科研项目(19SZD180)

**【作者简介】**周军,工程师,研究方向:放射物理、加速器物理与工程,

E-mail: joelchou@126.com

加速器输出剂量的变化。加速器输出剂量稳定性作为肿瘤放疗质量保证的重要组成部分,按照AAPM TG 142医用加速器质量保证报告要求<sup>[3]</sup>,对加速器输出剂量定期监测至关重要,这样才能保证肿瘤靶区剂量的准确性。本研究按照IAEA TRS 277号技术报告<sup>[4]</sup>,对武警四川省总队医院医用加速器每周剂量进行测量,监测2012年5月~2017年12月共计240组每周输出剂量数据,本文分析影响输出剂量稳定性的因素,为加速器剂量质量保证提供方法与措施。

## 1 材料与方法

### 1.1 设备与仪器

Elekta BMEI 6-MV医用加速器、BDM-3剂量仪、NE 0.6 cm<sup>3</sup> 2571 Farmer电离室、(30×30×30) cm<sup>3</sup>标准水箱、Visi-X光射野一致性校正板、前指针、数字水平仪、气压表、数字温度计湿度计、坐标纸、钢尺、螺丝刀等工具一套。

### 1.2 加速器机械参数校准

剂量测量前需对医用加速器机械参数进行校准。首先,用前指针和Visi-X光射野一致性校正板对加速器等中心、加速器等中心与辐射中心一致性、光射野一致性、十字叉丝中心进行校准,按照AAPM TG 142号报告要求<sup>[3]</sup>,分别校准到误差范围以内;然后,对激光灯、光距尺指示、光野数显指示、机架机头数显指示做校准,按照AAPM TG 142号报告<sup>[3]</sup>,分别校准到误差范围以内(表1)。

### 1.3 剂量测量

按照IAEA TRS 277号报告,对武警四川省总队医院医用加速器进行每周剂量测量,监测2012年5月~2017年12月共计240组每周剂量测量数据。

测量条件:射线能量6 MV-X,辐射质TPR<sub>10</sub><sup>0</sup>=0.65,射野大小(10×10) cm<sup>2</sup>,源到水面的距离为100 cm,测量深度为水下5 cm,电离室的有效测量点为几何中心以上0.6×3.15 mm=1.89 mm处,故测量深度实际应为5.2 cm处,机架、机头为0°,经过气压、温度修正和电离室各项修正因子修正后,测量加速器跳数为200 MU时在最大剂量深度处的吸收剂量,监测加速器输出剂量的稳定性。

### 1.4 统计学分析

采用SPSS 20.0统计分析软件,分析240组每周加速器中心轴输出剂量数据,对剂量波动图进行分析,绘制能量频率分布直方图,与标准正态分布曲线做比较,用Q-Q图检验方法、单样本K-S检验方法,检验加速器输出剂量数据的分布与理论值的符合度。

表1 AAPM TG 142号报告机械参数误差范围

Tab.1 Mechanical tolerance in AAPM TG 142 report

机械参数	机械参数误差范围		
	适形放疗	调强放疗	立体定向放疗
激光灯/mm	2	1.5	1
等中心处光距尺/mm	2	2	2
准直器大小显示/mm	2	2	1
光射野一致性	-	2 mm或单侧1%	-
光射野一致性(非对称)	-	1 mm或单侧1%	-
激光灯与前指针距离检测装置/mm	-	1	-
机架/准直器角度数显	-	1.0°	-
钨门大小显示(对称)/mm	-	2	-
钨门大小显示(非对称)/mm	-	1	-
十字叉丝中心/mm	-	1	-
定位激光灯/mm	±2	±1	<±1
准直器旋转中心/mm	-	±1	-
机架旋转中心/mm	-	±1	-
床旋转中心/mm	-	±1	-
辐射中心与机械中心一致性/mm	±2	±2	±1

## 2 结果与分析

### 2.1 剂量波动图分析

对240组每周加速器中心轴输出剂量数据绘制剂量波动图,如图1所示。240组数据中,剂量误差 $\Delta \leq \pm 1\%$ 的有204组,占85.00%; $-2\% \leq \Delta < -1\%$ 、 $1\% < \Delta \leq 2\%$ 的有31组,占12.92%; $-3\% \leq \Delta < -2\%$ 、 $2\% < \Delta \leq 3\%$ 的有5组,占2.08%。按照AAPM TG 142号报告要求,加速器输出剂量月稳定性应控制在 $\pm 2\%$ 范围内,日稳定性控制在 $\pm 3\%$ 范围内<sup>[3]</sup>。剂量误差在误差允许范围 $\pm 2\%$ 以内的有235组,占97.92%,故加速器输出剂量的符合率达到97.92%;超出误差范围的有5组,占2.08%。

查阅质量保证记录、维修记录,剂量仪送国家标准实验室中国计量科学研究所校准5次(其中,Farmer电离室石墨探头故障1次,维修后校准),校准后误差最大达2.3%,最小为0.45%;加速器故障10次,其中磁控管故障(更换磁控管)7次、加速管故障(更换加速管)1次、剂量监测系统平板电离室故障1次、加速器剂量率低故障1次,剂量误差最大达3%,最小为-0.2%。240组数据中,如果扣除剂量仪送检

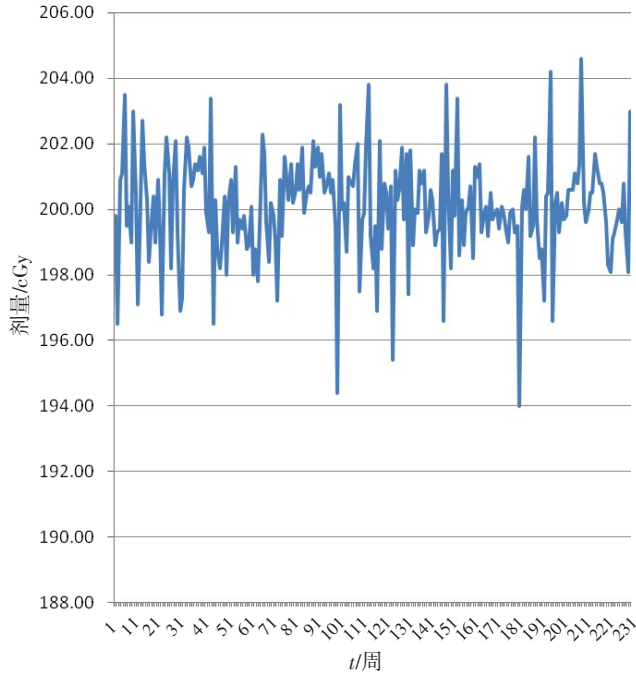


图1 加速器6 MV-X 输出剂量波动图  
Fig.1 Kymogram of 6 MV-X accelerator output dose

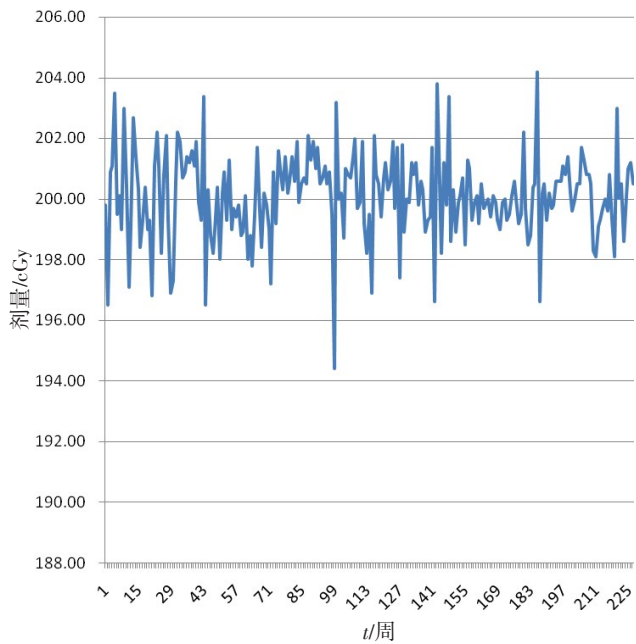


图2 扣除加速器故障及剂量仪校准后加速器输出剂量波动图  
Fig.2 Kymogram of output dose after deducting the fault of accelerator and the calibration of dosimeter

校准4次、加速器故障10次共计13组剂量数据,得到227组剂量数据,绘制剂量波动图,如图2所示。

仔细分析图2剂量波动图,发现有8次连续两周测量波动较大出现正负拐点的异常情况,查阅质量保证记录,发现连续8次异常情况中,每次前后两周都做了剂量校准,1次在1%范围内做了校准,6次在1%~2%范围内做了校准,1次在>2%范围做了校准。出现这些异

常拐点的原因,主要是随机误差,例如参数(气压、温度、湿度)变化,模体摆位误差,人为校正误差等。如果扣除这16次由于随机误差导致的异常拐点情况,得到211组剂量数据,绘制剂量波动图,如图3所示,剂量波动均在±2%误差范围内,符合率达到100%;误差≤1%的有194组,占91.94%,误差>1%的17组,占8.06%。

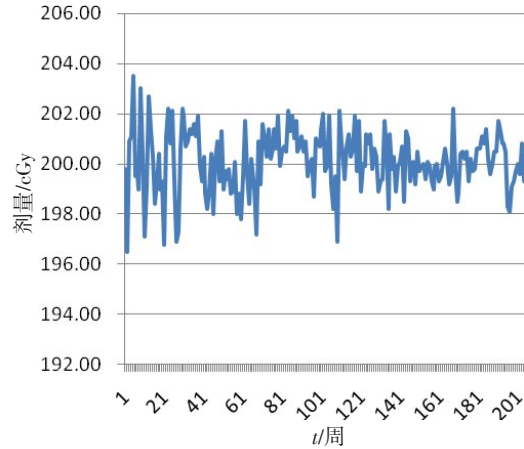


图3 扣除加速器故障、剂量仪校准、随机校准误差后加速器输出剂量波动图

Fig.3 Kymogram of output dose after deducting the fault of accelerator, the calibration of dosimeter and random calibration error

本研究共监测5.5年输出剂量数据,加速器新装前半年输出剂量波动相对较大,后面逐渐趋于平稳,误差在1%以内;加速器运行5年后,由于元器件老化等原因,输出剂量波动误差变大,但均在1%范围内。

### 2.2 概率分布直方图

加速器2012年5月~2017年12月每周加速器中心轴输出剂量概率分布直方图如图4所示,其中图4a、b、c分别对应图1、2、3输出剂量数据的概率分布直方图。概率分布直方图清晰反映输出剂量值与频率之间的关系,配以标准的正态分布曲线,可直观的判断分布情况。图4总体较好符合了正态分布规律,且符合程度越来越好,初步判定加速器输出剂量稳定性较好;在去除剂量仪校准、加速器故障、人为随机校正误差后,图4c非常好的符合了标准正态分布规律,加速器具有很好的输出剂量稳定性。

### 2.3 Q-Q图检验

为了进一步验证输出剂量分布情况,采用Q-Q图检验,检验结果如图5所示,其中图5a、b、c剂量点均较好的围绕在直线附近,且符合程度越来越好,同样可以判定输出剂量符合正态分布规律,具有很好的输出剂量稳定性。

### 2.4 单样本K-S检验

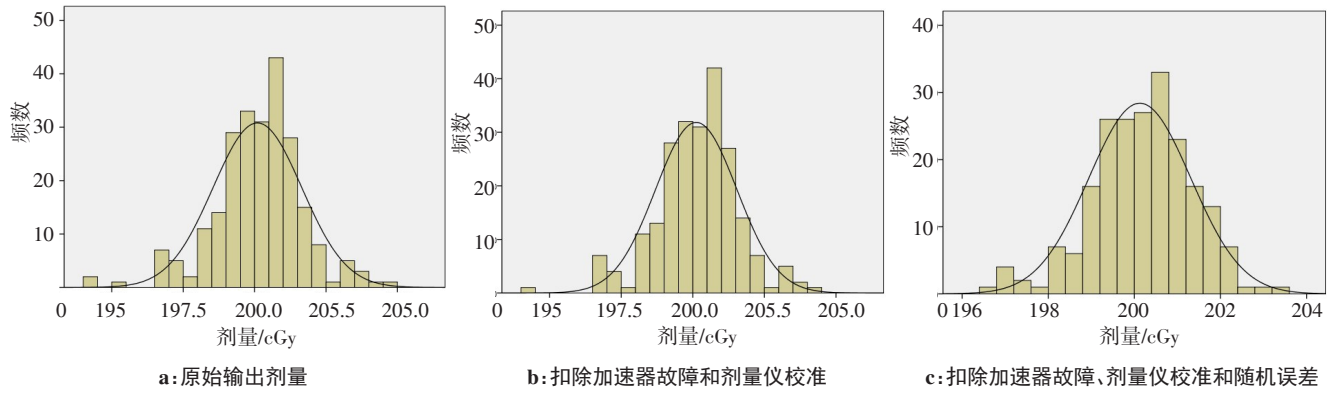


图4 加速器6 MV-X输出剂量概率分布直方图

Fig.4 Histogram of 6 MV-X accelerator output dose

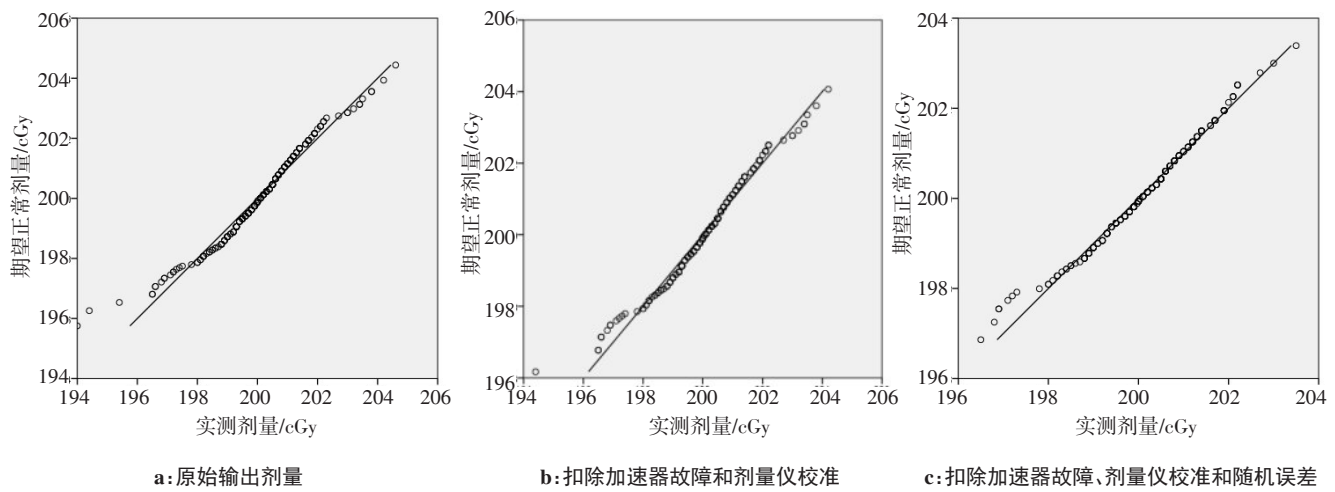


图5 加速器6 MV-X输出剂量Q-Q图检验结果

Fig.5 Results of Q-Q test on 6 MV-X accelerator output dose

为进一步分析输出剂量分布情况,采用K-S检验方法,计算均值、标准差、样本数据与理论数据的最大差值、双尾渐进概率 $P$ 值,检验输出剂量数据的分布与理论值的符合程度,K-S检验结果如表2所示。由表2可知,1、2、3组剂量数据均值分别为200.098、200.119、200.127;标准差分别为1.554、1.422、1.186,标准差逐渐减小;最大差值分别为0.079、0.066、0.055,最大差值逐渐减小;双尾渐进概率 $P$ 值分别为0.101、0.269、0.549,均大于显著性水平0.05,均符合标准正态分布,且 $P$ 值逐渐增大,符合程度越来越好。

加速器输出剂量稳定性主要影响因素有加速器硬件自身稳定性、剂量仪电离室稳定性、剂量测量方法准确性、摆位误差等。医用加速器结构复杂、数字化程度高、精度高,任何一个部件老化或故障都会引起输出剂量的变化,核心元件(加速管、磁控管、闸流管、剂量监测系统、电子枪等)的稳定性将直接影响输出剂量的稳定性。本研究中,输出剂量波动较大的主要原因就是这些核心元件的故障所致。剂量仪作为计量仪器,每

表2 加速器6 MV-X输出剂量K-S检验结果

Tab.2 Results of K-S test on 6 MV-X accelerator output dose

6 MV-X 参数		1组	2组	3组
样本数		240	227	211
正态参数 <sup>a,b</sup>	平均值	200.098	200.119	200.127
	标准差	1.554	1.422	1.186
最大差值	最大绝对差值	0.079	0.066	0.055
	最大正差值	0.059	0.052	0.032
	最大负差值	-0.079	-0.066	-0.055
K-S 检验Z值	-	1.223	1.001	0.797
双尾渐进概率P值	-	0.101	0.269	0.549
检验分布	-	正态	正态	正态

年应送国家标准实验室校准,共校准5次,校准后误差最大达到2.3%;石墨电离室探头易损坏,应轻拿轻放,防止碰撞,并存放于干燥箱内。剂量测量方法还是基



于IAEA TRS 277号报告,测量过程中应严格修正各项修正因子,特别注意机房内温度、气压的修正,并保持机房湿度约50%。蒋社伟等<sup>[5]</sup>报道,其他条件相同的条件下,气压每波动0.01 atm或气温每波动3℃,输出剂量波动约1%。摆位精度也直接影响剂量测量准确性,可以通过图像引导技术或者光学表面成像技术辅助摆位,确保摆位的精确性,尽量减小摆位随机误差。

### 3 讨论和结论

目前,我国正在建立水吸收剂量标准,医用加速器绝对剂量测量及校准仍按照IAEA TRS 277报告通过Co<sup>60</sup>- $\gamma$ 空气比释动能(照射量)转换到水吸收剂量<sup>[4]</sup>,引入修正因子会导致不确定度变大;IEAE于2000年发布IAEA TRS 398号报告,基于水吸收剂量的校准因子替代基于照射量的校准因子,减少了测量的不确定度<sup>[6]</sup>。我国已具备Co<sup>60</sup>水吸收剂量的量值复现和量值传递能力,正在进行加速器高能光子水吸收剂量基准装置的研究<sup>[7]</sup>。中国计量科学研究院于2016年参加了国际剂量局(BIPM)的高能光子水吸收剂量比对(BIPM-K6)<sup>[7-8]</sup>,在取得正式等效后将具备高能光子水吸收剂量量值复现和传递能力,为我国放射治疗体系从基于空气比释动能(照射量)的量值传递过渡到基于水吸收剂量的量值传递做好了准备工作<sup>[10]</sup>。

输出剂量稳定性影响因素主要来源于电离室修正因子的不确定度、剂量测量方法、测量剂量仪稳定性、加速器稳定性、摆位误差等。剂量仪与电离室每年都应送国家标准实验室校准,得到电离室的照射量校准因子 $N_x$ ,高能X射线电离室修正因子的不确定度达2.6%<sup>[4]</sup>。何燕强<sup>[9]</sup>报道,剂量计校准因子的相对标准不确定度为1.5%,各种修正系数引入的相对标准不确定度为0.8%,电离室定位引入的相对标准不确定度为0.58%。笔者在输出剂量监测过程中,出现加速器、电离室故障11次,其中3次误差超过2%,分别为电离室石墨探头损坏故障1次和微波功率源磁控管故障2次,其中磁控管故障致剂量偏低达到3%。李贤富等<sup>[10]</sup>报道,更换加速管剂量偏低约4.7%,电离室击穿剂量偏低约6.3%,调制器稳压器损坏剂量偏低3.5%。吴丽丽等<sup>[11]</sup>用QA BeamChecker+监测加速器TrueBeam监测18个月输出剂量的日稳定性,18次中心轴剂量偏差>2%,4次是QABC+出现气压温度探测器故障,13次是由于加速器剂量联锁故障所致。刘卓伦等<sup>[12]</sup>报道,随着加速器使用年龄的增加,各档能量输出稳定性的差异均值逐渐升高,但其绝对值仍处在符合临床要求的较低范围。这些结论与监测加速器5.5年输出剂量长期稳定性的结果是一致的。

综上所述,本院加速器输出剂量长期监测结果显示,剂量误差 $\leq 1\%$ 符合率达到91.94%,剂量误差 $\leq 2\%$

符合率达到97.92%,具有很好的正态性和长期稳定性,完全能够满足临床放疗需求。物理师应按照科室实际情况,制定个体化的加速器剂量QA程序,并按照规定频次校准输出剂量,监测输出剂量的稳定性,为精准放疗提供有力保障。

### 【参考文献】

- [1] CLEMENTE S, WU 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.
- [2] DOORNAERT P, VERBAKEL W F, BIEKER M, et al. RapidArc planning and delivery in patients with locally advanced head-and-neck cancer undergoing chemoradiotherapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2011, 79(2): 429-435.
- [3] American Association of Physicists in Medicine. Quality assurance of medical accelerators. Task Group 142 report[J]. Med Phys, 2009, 36(9): 4198-4201.
- [4] International Atomic Energy Agency. Absorbed dose determination in photon and electron beams: an international code of practice. Technical reports series No.277[R]. 2nd ed. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1997.
- [5] 蒋社伟, 王艳霞. 气温和气压对医用直线加速器输出剂量刻度的影响[J]. 医疗卫生装备, 2016, 37(8): 109-111.  
JIANG S W, WANG Y X. Influences of temperature and pressure on output dose scale of medical linear accelerator[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2016, 37(8): 109-111.
- [6] International Atomic Energy Agency. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water. Technical reports series No.398[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2000.
- [7] 王坤, 金孙均, 苒雪, 等. 医用加速器水吸收剂量测量研究及国际比对[J]. 计量技术, 2015(5): 56-59.  
WANG K, JIN S J, CHANG X, et al. Medical accelerator water absorbed dose measurement study and international comparison[J]. Measurement Technique, 2015(5): 56-59.
- [8] 王坤, 金孙均, 范耀东, 等. 医用加速器水吸收剂量国际比对进展[J]. 计量学报, 2016, 37(4): 112-114.  
WANG K, JIN S J, FAN Y D, et al. International comparison and progress of absorbed dose to water in accelerator photon beams[J]. Acta Metrologica Sinica, 2016, 37(4): 112-114.
- [9] 何燕强. 医用加速器X辐射源吸收剂量测量不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2017, 44(3): 107-109.  
HE Y Q. Measurement uncertainty evaluation of absorbed dose for medical accelerator X-ray radiation source[J]. Metrology & Measurement Technique, 2017, 44(3): 107-109.
- [10] 李贤富, 谢力, 郭飞, 等. BJ-6B加速器剂量监测系统校准10年回顾[J]. 中国医学物理学杂志, 2013, 30(4): 4232-4234.  
LI X F, XIE L, GUO F, et al. Review of monitoring system calibration in BJ-6B accelerator[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2013, 30(4): 4232-4234.
- [11] 吴丽丽, 林浩, 陈泓, 等. 医用加速器TrueBeam剂量输出长期稳定性研究[J]. 中国医学装备, 2014, 11(6): 34-37.  
WU L L, LIN H, CHEN H, et al. Evaluation of dose delivery stability of a new linear accelerator TrueBeam[J]. China Medical Equipment, 2014, 11(6): 34-37.
- [12] 刘卓伦, 张艺宝, 岳海振, 等. 医用直线加速器中心轴绝对剂量输出长期稳定性对比分析[J]. 中国医学物理学杂志, 2016, 33(1): 1-5.  
LIU Z L, ZHANG Y B, YUE H Z, et al. Comparative analysis on long-term stability of absolute dose output at central axis of medical linear accelerators[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2016, 33(1): 1-5.

(编辑:薛泽玲)