

医用直线加速器无均整器下6 MV X线能谱特性的蒙特卡罗研究

周鹏, 胡南, 刘岩海, 游士虎, 徐婷婷, 余娴, 杨镇洲, 王阁
第三军医大学大坪医院野战外科研究所肿瘤中心, 重庆 400042

【摘要】目的:利用蒙特卡罗方法研究医用直线加速器产生的6 MV-X射线在有均整器和无均整器状态下,光子能谱和空间分布的差异。**方法:**使用Geant4蒙特卡罗模拟程序计算医用加速器射野大小分别为5 cm×5 cm、10 cm×10 cm、15 cm×15 cm和20 cm×20 cm的6 MV-X射线在具备均整器和移除均整器条件下,初始光子的能谱和空间分布。**结果:**均整器移除后光子能谱光子注量变大,且随着射野的增大,射野内光子通量比值都明显减小,而且平均能量明显降低。此外,均整器的移除改变光子的相对分布,射野外光子数在整个相空间平面内光子中所占份额明显减少,而且与射野大小有关,5 cm×5 cm时减少6.00%,10 cm×10 cm时减少4.42%,15 cm×15 cm时减少3.48%,20 cm×20 cm时减少2.28%,这表明移除均整器对于尺寸较小的射野意义重大。**结论:**均整器的移除可以优化射野的能谱分布,特别是对于调强放射治疗无均整器模式成为更有益模式。但是,由于均整器移除后导致的高剂量率在提高治疗增益的同时也带来了治疗风险,因此需要更进一步的研究和论证。

【关键词】蒙特卡罗;直线加速器;均整器;光子能谱

【中图分类号】R815.6;R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2016)08-0761-05

Monte Carlo research on 6 MV X-ray spectrum characteristic of linear accelerator without flattening filter

ZHOU Peng, HU Nan, LIU Yan-hai, YOU Shi-hu, XU Ting-ting, YU Xian, YANG Zhen-zhou, WANG Ge

Cancer Center, Institute of Field Surgery Research, Daping Hospital, Third Military Medical University, Chongqing 400042, China

Abstract: Objective To analyze the differences of 6 MV X-ray spectrum and spatial distribution of linear accelerator with and without flattening filter by using Monte Carlo method. **Methods** With the field sizes of (5×5) cm², (10×10) cm², (15×15) cm² and (20×20) cm², the initial photon spectrums and spatial distributions of 6 MV X-ray with and without flattening filter were calculated and analyzed by using Geant4 Monte Carlo simulation program. **Results** The photon fluence increased when the flattening filter was removed. With the increase of field size, the photon flux ratio in the field reduced, and the average energy decreased significantly. When the flattening filter was removed, the relative photon distribution was changed, and the ratio of photon fluence of the out-field to the whole phase plane was reduced significantly and related to field sizes. The reduction percentages of field sizes changing from (5×5) cm² to (20×20) cm² were respectively reduced by 6.00%, 4.42%, 3.48% and 2.28%, which showed flattening filter free had significant influences on the smaller field sizes. **Conclusion** The photon spectrum and distribution were optimized by removing the flattening filter. Flattening filter free is more benefit for intensity-modulated radiotherapy. However, the high dose rate of flattening filter free would cause the treatment risk, so the further research and discussion are necessary.

Key words: Monte Carlo; linear accelerator; flattening filter; photo spectrum

前言

目前,无均整器运行模式下与传统加速器束流

特性的差异,以及对治疗效果影响的研究成为国际放疗物理界的研究热点之一。均整器被置于传统加速器的射束轴线上以保证某一固定深度(10 cm)剂量呈现均匀分布^[1-2]。然而,有研究结果表明均整器是治疗机头中漏射线和散射线的主要诱发因素,因此去除传统加速器上的均整器得到越来越多的关注^[3-4]。

O'Brien等^[5]在AECL Therac-6型加速器上实现

【收稿日期】2016-03-11

【基金项目】吴阶平医学基金(#320.6750.12177)

【作者简介】周鹏,本科,物理师,研究方向:医学物理与医学影像,E-mail:512638685@qq.com

【通信作者】王阁,博士,教授,主任医师,E-mail:wangge70@hotmail.com

放射外科治疗时,为了减少耗时,最早提出了“无均整器治疗模式”,其结果表明在直径3 cm的射野内有效提高剂量率至2.75倍。更多的研究结果表明,去除均整器可以在有效提高剂量率的同时^[6-8],尽可能减少散射和漏射^[9-10]。对于目前广泛应用于临床的调强放射治疗(IMRT)中的光子通量可以通过多叶准直器和“钨门”来进行调制,这使得移除均整器的治疗射野成为临床上更有益的方式^[11]。此外,在IMRT中去除均整器可以减少二次肿瘤风险率^[4,12]。一些设备如Versa HD、Ture Beam、Cyberknife和Tomo Therapy等已经通过去除均整器增加这些优势^[13-15]。

由于实验测量技术和设备的限制,很难获取完整的数据用于分析^[16]。研究电子及光子在介质中的输运过程,蒙特卡罗(MC)方法是一种重要的手段。之前有关MC研究主要分析均整器下光子束能谱和剂量学特性的变化,但是对于光子能谱的空间分布影响很少被提及^[17-18]。本文在Geant4 MC程序基础以Elekta直线加速器为几何原型进行二次开发,对比不同射野条件下无均整器和有均整器时,6 MV光子束中光子能量的空间分布特点。此外,为了提高计算效率,计算程序实现了并行运算。

1 材料与方法

1.1 模拟方法

本文使用Geant4 MC程序包执行所有粒子的输运行为,Geant4是以C++语言编写且能够模拟多种粒子在介质中经迹的工具包,目前被广泛用于医学、高能物理、宇宙辐射等领域的研究^[19]。Geant4已经发布了多个版本,且以开源代码形式发布,用户可以根据自己需要做二次开发,本模拟使用的是最新发布版本Geant4.9.6。

1.2 几何设置

程序中加速器几何构造基于真实的医用直线加速器,这些几何参数来自设备厂商。程序中的直线加速器构造(图1),模拟的标准加速器机头包括靶端、初级准直器、均整器、电离室、反光镜、次级准直器,相空间平面距靶端100 cm。为了减少水模的背散射对原始射束能谱产生影响,相空间平面收集能谱时,并不放置模体。

1.3 模拟设置

在模拟程序中,本文主要考虑光子与物质间的电磁相互作用过程的模拟。电磁相互作用主要包括以下一些物理过程:光电效应、康普顿散射、电子对效应,以及相关的电离、电子对湮灭、韧致辐射等过程,这些物理过程由Geant4提供的类来描述。为了

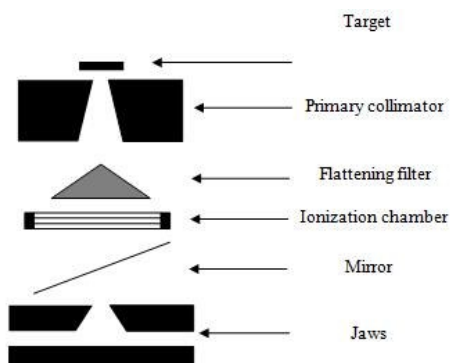


图1 用于程序模拟的标准加速器机头构造

Fig.1 Linac-head components used in Monte Carlo simulation

更真实地模拟加速器产生的电子轰击靶的过程,程序中使用打靶的具有高斯能谱分布的平行电子束(平均能量为6.000 MeV,标准差为0.127 MeV)。

相空间平面为30 cm×30 cm,其中心与射束中心重合,水模体表面射野的大小分别是5 cm×5 cm、10 cm×10 cm、15 cm×15 cm和20 cm×20 cm。为了减少系统误差,对于5 cm射野起始电子数目为 5×10^9 ,其余射野的起始电子数均为 3×10^9 个。所有的模拟均在个人计算机上完成(CPU: Intel core T6670; SDRAM: 1 024 MB; OS: Ubuntu 13.04)。

2 结果与分析

2.1 光子能谱的对比

不同射野内对应均整器移除前后的光子能谱分布(图2),结果显示“无均整器”模式下,光子注量变大,特别是低能区光子份额明显增大。表1分别给出不同射野条件下,光子通量、峰值通量比值和两种模式下的平均能量,结果表明随着射野的增大,射野内总通量和峰值通量比值都明显减小。此外,随着射野的增大两种模式下的平均能量均在减小,而相比均整器模式下的平均能量,均整器移除后平均能量明显变小,这些规律与之前的研究一致。

2.2 光子能谱的空间分布

为了更详细地研究均整器的移除对光子能谱的影响,本文根据相空间平面获得的粒子信息得到粒子空间分布情况(图3)。光子能谱空间分布结果表明,均整器对光子能谱空间分布产生明显的影响,移除均整器状态下的分布在射野外的相对光子数比均整器存在时射野外的相对光子数明显减少,而且这种趋势随射野变大在逐渐减小。本文利用射野外光子占整个相空间平面所有光子数的百分比评估这种改变。表2给出不同射野外光子百分比,结果显示移除均整器后,5 cm×5 cm时减少6.00%,10 cm×

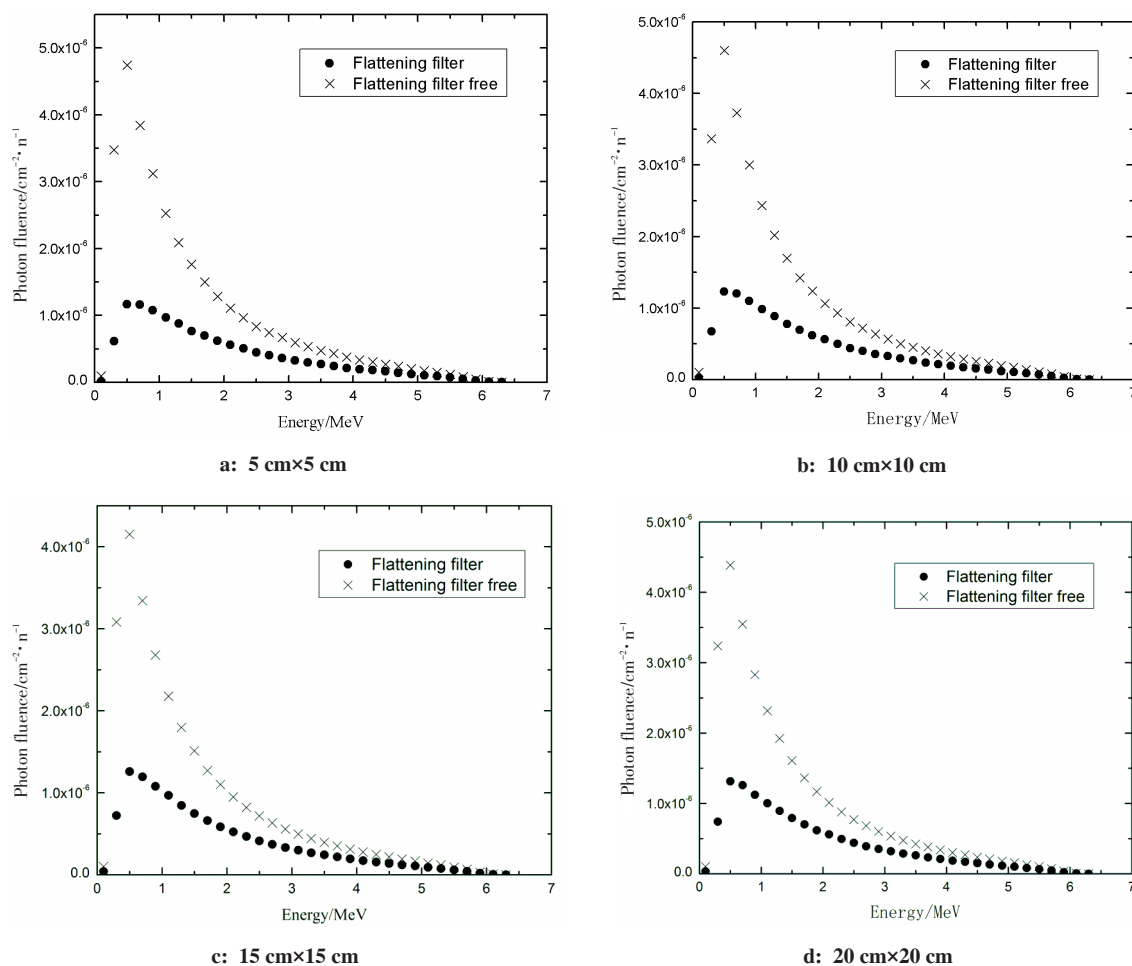


图2 医用直线加速器不同射野条件下无均整器和均整器下光子能谱

Fig.2 Photon spectrum of linear accelerator with and without flattening filter (FF)

表1 不同射野条件下均整器移除前后的能谱参数

Tab.1 Parameters of spectrum for different field sizes with and without flattening filter

Field size/cm ²	Photon flux ratio (FFF/FF)	Peak flux ratio (FFF/FF)	Average energy/MeV	
			FF	FFF
5×5	2.599	4.064	1.886	1.513
10×10	2.470	3.743	1.851	1.506
15×15	2.313	3.339	1.809	1.498
20×20	2.291	3.301	1.792	1.486

FFF: Flattening filter free

10 cm时减少4.42%, 15 cm×15 cm时减少3.48%, 20 cm×20 cm时减少2.28%, 这表明射野越小影响越显著。此外, 野外光子平均能量也随着均整器移除而增大。

3 结论和讨论

本文采用MC方法研究均整器对医用直线加速器初始射束光子能谱和空间分布的影响情况。研究

结果表明, 均整器对光子能谱和空间分布都产生影响, 这种影响包括: 均整器移除后光子能谱光子注量变大, 特别是低能区光子份额明显增大, 且随着射野的增大, 射野内总通量和峰值通量比值都明显减小, 而且平均能量明显变低。此外, 均整器的移除改变了光子的相对分布, 射野外光子数在整个相空间平面内光子中所占份额明显减少, 这也是 Mesbahi 等^[9-10]提出移除均整器后野外剂量减少的原因之一。

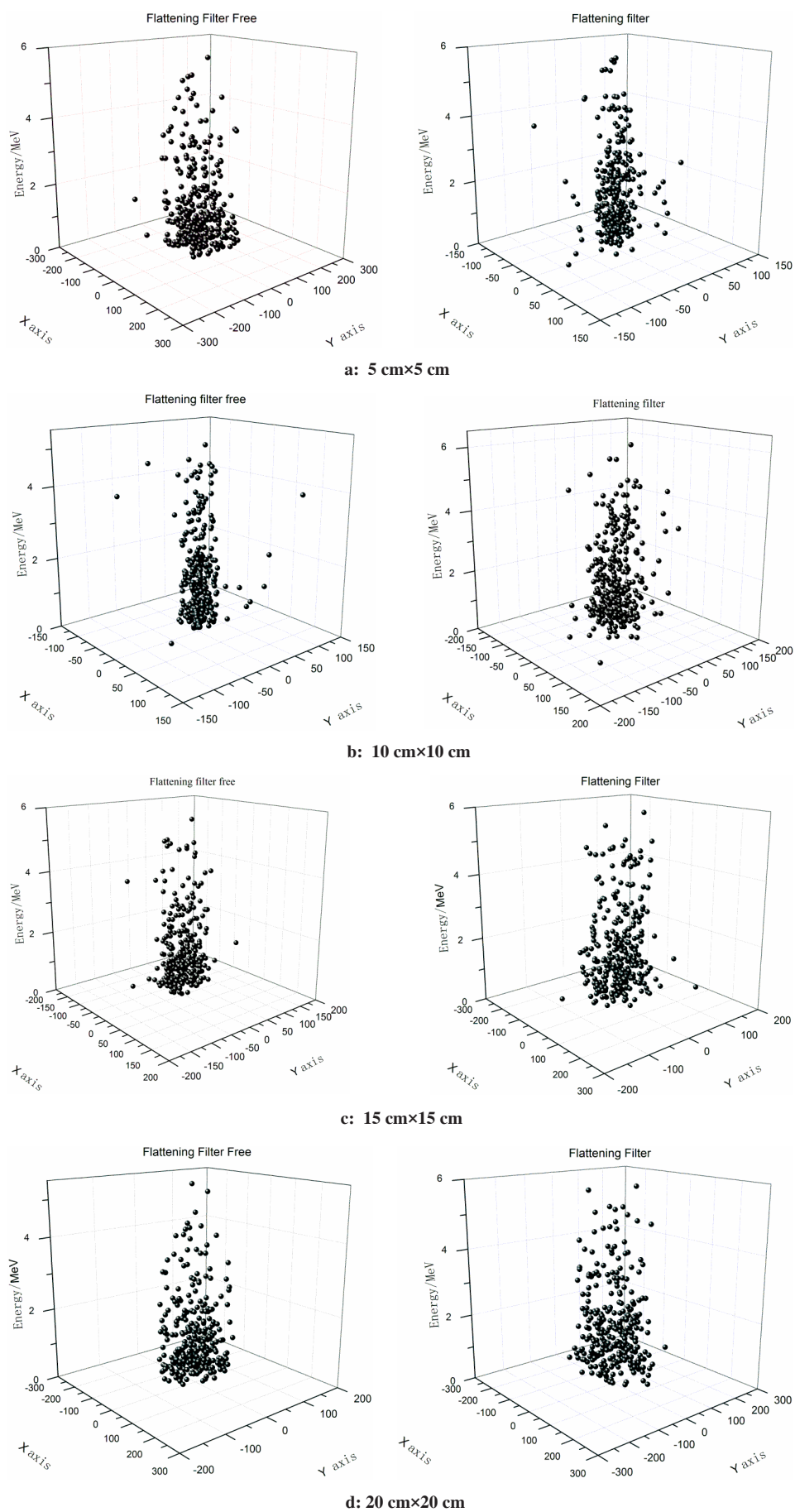


图3 不同射野条件下无均整器和均整器下光子空间分布射野
Fig.3 Photon distribution of linear accelerator with and without flattening filter

表2 不同射野条件下均整器移除前后的野外光子分布

Tab.2 The distribution of out-of-field photon for different field sizes with and without flattening filter

Field size/cm ²	Percentage of out-of-field photon /%		Average energy of out-of-field photon/MeV	
	FF	FFF	FF	FFF
5×5	12.467	6.464	2.023	2.112
10×10	7.789	3.373	1.723	1.903
15×15	5.134	1.651	1.578	1.752
20×20	3.539	1.258	1.458	1.608

这一结果将有利于进一步认识均整器对医用直线加速器初始射束光子能谱和空间分布影响的理解和认识。

本文研究表明,均整器不仅对医用直线加速器初始光子的能谱产生影响,同样也改变空间分布,这种分布将减少野外剂量,降低病人副反应。从研究结果可以得知相对于大野,小野的野外相对光子数减少更明显,对于目前临床上广泛使用的IMRT射野由若干尺寸较小的子野构成,这种影响将意义重大。虽然,一些临床结果已报道关于均整器移除后对临床治疗效果的意义,但是由于均整器移除后导致的高剂量率在提高治疗增益的同时也带来了治疗风险。因此如何提高相应剂量算法精度和靶向精度,需要进一步的研究和讨论。

【参考文献】

- [1] CHANE E L, CULLIP T J, GABRIEL T A. A Monte Carlo study of accelerator head scatter[J]. Med Phys, 1994, 21(9): 1383-1390.
- [2] FIX M K, STAMPANONI M, MANSER P, et al. A multiple source model for 6 MV photon beam dose calculations using Monte Carlo [J]. Phys Med Biol, 2001, 46(5): 1407-1427.
- [3] KRAGL G, BAIER F, LUTZ S, et al. Flattening filter free beams in SBRT and IMRT: dosimetric assessment of peripheral doses[J]. Med Phys, 2011, 21(2): 91-101.
- [4] KRY S F, VASSILIEV O N, MOHAN R. Out-of-field photon dose following removal of the flattening filter from a medical accelerator [J]. Phys Med Biol, 2010, 55(8): 2155-2166.
- [5] O'BRIEN P F, GILLIES B A, SCHWARTZ M, et al. Radiosurgery with unflattened 6 MV photon beams[J]. Med Phys, 1991, 18(3): 519-521.
- [6] CASHMORE J. The characterization of unflattened photon beams from a 6 MV linear accelerator[J]. Phys Med Biol, 2008, 53(7): 1933-1946.
- [7] VASSILIEV O N, TITT U, PONISCH F, et al. Dosimetric properties of photon beams from a flattening filter free clinical accelerator[J].

Phys Med Biol, 2006, 51(7): 1907-1917.

- [8] VASSILIEV O N, TITT U, STEPHEN F, et al. Monte Carlo study of photon fields from a flattening filter-free clinical accelerator[J]. Med Phys, 2006, 33(4): 820-827.
- [9] MESBAHI A, NEJAD F S. Monte Carlo study on a flattening filter-free 18 MV photon beam of a medical linear accelerator[J]. Radiat Med, 2008, 26(6): 331-336.
- [10] MESBAH A. Dosimetric characteristics of unflattened 6 MV photon beams of a clinical linear accelerator: a Monte Carlo study[J]. Appl Radiat Isot, 2007, 65(9): 1029-1036.
- [11] VASSILIEV O N, KRY S F, KUBAN D A, et al. Treatment-planning study of prostate cancer intensity-modulated radiotherapy with a varian clinac operated without a flattening filter [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2007, 68(5): 1567-1571.
- [12] HALL E J. Intensity-modulated radiation therapy, protons, and the risk of secondary cancers[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2006, 65(1): 1-7.
- [13] ARAKI F. Monte Carlo study of a Cyberknife stereotactic radiosurgery system[J]. Med Phys, 2006, 33(8): 2955-2963.
- [14] JERAJ R, MACKIE T R, BALOG J, et al. Radiation characteristics of helical tomotherapy[J]. Med Phys, 2004, 31(2): 396-404.
- [15] MACKIE T R, HOLMES T, SWERDLOFF S, et al. Tomotherapy: a new concept for the delivery of dynamic conformal radiotherapy [J]. Med Phys, 1993, 20(6): 1709-1719.
- [16] KRAGL G, WETTERSTEDT S, KNAUSLSD B, et al. Dosimetric characteristics of 6 and 10 MV unflattened photon beams [J]. Radiother Oncol, 2009, 93(1): 141-146.
- [17] 张红, 任健, 胡志刚, 等. 蒙特卡罗方法研究均整器对6 MV X线能谱的影响[J]. 中国医学物理学杂志, 2014, 31(1): 4617-4621. ZHANG H, REN J, HU Z G, et al. Monte Carlo study of the effect of flattening filter for 6 MV X ray spectrum [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2014, 31(1): 4617-4621.
- [18] 陈勇, 张旭光, 倪婕, 等. 西门子直线加速器均整和未均整射束的光子束剂量学特性[J]. 核技术, 2012, 35(3): 179-184. CHEN Y, ZHANG X G, NI J, et al. Photon beam dosimetric characteristics of Siemens linear accelerator with/without flattening filter[J]. Nuclear Techniques, 2012, 35(3): 179-184.
- [19] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, et al. Geant4-a simulation toolkit [J]. Nucl Instrum Meth A, 2003, 506(3): 250-303.

(编辑:陈丽霞)