

基于蒙特卡罗方法的光子束均整与非均整模式能谱对比分析

岳海振, 张艺宝, 张健, 刘卓伦, 胡俏俏, 蒋璠, 吴昊

北京大学肿瘤医院暨北京市肿瘤防治研究所放疗科, 恶性肿瘤发病机制及转化研究教育部重点实验室, 北京 100142

【摘要】目的:对比分析6 MV光子束均整与非均整模式在空气和标准水模中特定深度处的能谱分布。**方法:**利用BEAMnrc程序建立美国Varian公司TrueBeam加速器均整和非均整模式的机头模型, 分别计算 (40×40) cm²照射野下空气和标准水模中SSD=110 cm深度处的相空间文件, 并利用BEAMDP程序对射野内不同区域的能谱分布进行对比分析。**结果:**空气中 (40×40) cm²射野内SSD=110 cm深度处, 均整模式能谱分布低能部分随着统计区域增大而增大, 与非均整模式分布规律相反; 在标准水模中Depth=10 cm深度处, 有无反散的情况下两种模式的能谱分布相差较大, 主要在小于0.511 MeV的区域; 射野内不同位置的能谱分布均整模式在离轴方向低能部分逐渐减少, 而非均整模式分布情况相反; 相对于电子和正电子来说, 相同射野内光子对能谱分布影响较大。**结论:**该研究为医用直线加速器临床剂量学数据的测量和校正提供依据。

【关键词】光子束; 均整模式; 非均整模式; 蒙特卡罗; 能谱

【中图分类号】R144.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2018)06-0633-05

Comparison analysis of energy spectra between flattened and flattening-filter-free Monte Carlo models for photon beam

YUE Haizhen, ZHANG Yibao, ZHANG Jian, LIU Zhuolun, HU Qiaoqiao, JIANG Fan, WU Hao

Key Laboratory of Carcinogenesis and Translational Research (Ministry of Education/Beijing), Department of Radiotherapy, Peking University Cancer Hospital & Institute, Beijing 100142, China

Abstract: Objective To compare and analyze the energy spectra of 6 MV flattened and flattening-filter-free photon beam in the air medium and standard water phantom at specific depth. **Methods** BEAMnrc program was used to model Varian TrueBeam accelerator gantry head, including flattened model and flattening-filter-free model. The phase space files of (40×40) cm² field at SSD of 110 cm in air medium and standard water phantom were calculated. The energy spectrum distribution in different regions of the irradiation field were compared and analyzed with the use of BEAMDP program. **Results** For the irradiation field of (40×40) cm² at SSD of 110 cm in air medium, with the enlargement of statistical regions, the low energy part in the energy spectrum of flattened model increased, while that of flattening filter-free model decreased. For the standard water phantom at depth of 10 cm, large differences were found in the energy spectrum of two models with or without scatter, mainly in the area less than 0.511 MeV. The low energy part in the energy spectrum of flattened model in different locations decreased in crossplane direction, while the flattening filter-free model showed opposite trend. Compared with electron and positron, the photon had great effects on the energy spectrum in the same irradiation field. **Conclusion** This study provides basis for further clinical dosimetric data measurement and calibration of medical linear accelerator.

Keywords: photon beam; flattened model; flattening-filter free model; Monte Carlo; energy spectrum

【收稿日期】2017-12-21

【基金项目】北京市自然科学基金(1174016, 7172018); 国家自然科学基金(11505012); 北京市医院管理局“青苗”计划专项(QML20151004); 质检公益性行业科研专项(201510001-002)

【作者简介】岳海振, 硕士, 工程师, 研究方向: 医学物理, E-mail: yuezh@163.com

【通信作者】吴昊, 高级工程师, 研究方向: 医学物理, E-mail: 13552661030@139.com

前言

兆伏级光子束对于治疗较深部位肿瘤具有十分重要的意义, 医用直线加速器兆伏级光子束能谱的深入探索是建立加速器束流模型和吸收剂量计算的关键, 同时对早期加速器机头、均整器和兆伏级CT的设计, 以及电离室测量值与剂量转换因子的确定(阻止本领比、质能吸收系数等)是非常必要的^[1-3]。均整器是医用直线加速器均整模式下较为重要的一

部分,主要材质为铜,对于辐射野内能量起到均匀和硬化作用。非均整模式治疗技术在SBRT、SRS等新的肿瘤治疗技术中发挥着越来越重要的作用^[4-8],由于去除了均整器加大了射野内剂量梯度,提高输出剂量率,其能谱分布与均整模式下相差较大,具有野外照射剂量减少和周围正常组织的受照剂量减少等优势^[9-12]。早期的研究主要集中在均整模式下兆伏级光子束,而对于非均整模式下的能谱分析,辐射野内不同位置的能谱分布以及两种模式之间的对比研究涉及较少。

本研究利用加拿大国家研究委员会研发的BEAMnrc^[13]程序分别生成6 MV均整和非均整模式下,SSD为110 cm和水下10 cm处的相空间文件,利用BEAMDP^[14]程序分析射野内不同区域和相同区域内不

同粒子的能谱分布,并对比两种模式能谱分布的区别,为加速器基础数据测量工作中探测器的能量依赖和能量响应的评估和基础数据的校正提供必要的参考。

1 材料与方法

1.1 加速器机头模型

本研究设置6 MV均整与非均整两种模型如图1所示。BEAMnrc模型描述靶、初级准直器、均整器(6X)或铜箔(6 FFF)、监测电离室、反光镜、Y/X Jaw组件部分,并分别在SSD=100 cm和水下10 cm位置存储记录粒子的相空间文件用于BEAMDP程序的能谱分析。依据Varian公司相关材料,模型6 FFF的BEAMnrc模型中在原均整器的位置设置一个厚度为0.812 6 cm的铜箔。

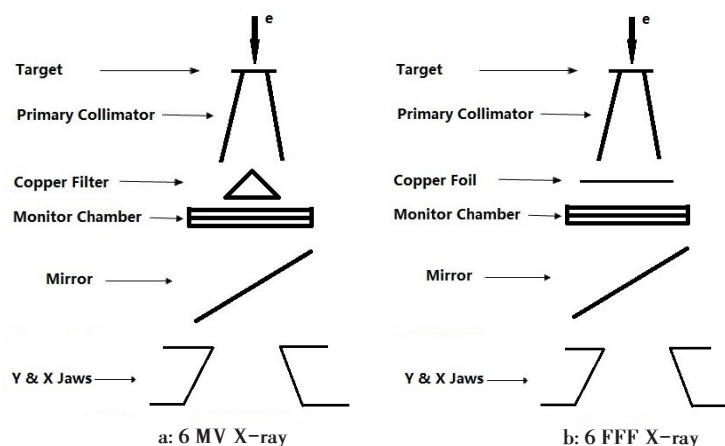


图1 6 MV均整与非均整模式蒙特卡罗模型

Fig.1 Monte Carlo models for 6 MV flattened filter (FF) and flattening filter-free (FFF) X-ray

本模型入射源设置为ISOURC19,入射电子束为高斯分布的6.0 MeV(FF模式)和6.1 MeV(FFF模式),半高全宽(FWHM)为0.75 mm。电子输运截止能量(ECUT)和碰撞产生电子的最低能量(AE)设置为0.7 MeV,光子输运截止能量(PCUT)和韧致辐射产生光子的最低能量(AP)为0.01 MeV;为了尽可能提高BEAMDP程序模拟精度,(40×40) cm²射野入射粒子数设置为8.99×10¹⁰,两种能量模式分别在空气和标准水模体两种介质中SSD=110 cm处,产生大小为50 G的相空间文件。

1.2 X线能谱

高能电子打靶后产生的光子线(X线)能谱为连续谱,其中横轴为能量,单位MeV,纵轴为能量分布情况。分析(40×40) cm²射野内不同区域的能谱分布对于了解射野内能谱分布和探测器的响应问题有很大帮助,尤其是crossplane方向不同位置的能谱不同,

是导致电离室的能量响应不一致的重要因素,对于加速器基准数据中离轴比的测量具有一定的参考作用。

1.3 BEAMDP程序

BEAMDP程序是为omega项目设计的交互式程序,用于从BEAMnrc程序生成的相空间文件中分析医用加速器电子和光子束的能谱、角分布等参数。考虑到高能光子束常具有狭窄的峰值,所以一般建议箱宽设置为0.1 MeV。考虑到原初光子在均整器或者铜箔中产生电子对效应,能量为0.511 MeV,本实验设置箱宽为0.001 MeV。

2 结果

2.1 不同射野空气中能谱分布

在空气中SSD=110 cm处,取均整与非均整模式射野为(40×40) cm²生成相空间文件,对比分析两种

模式下射野内不同范围的能谱分布,如图2所示。对于均整模式,能谱分布随着区域的变大而变小,主要集中在1.5 MeV以下,而非均整模式则相反;两种模式的能谱分布在能量为0.511 MeV处有一个尖峰

值。该峰值来自打靶后产生的原初光子在某体元内发生电子对效应,正电子在湮灭时产生两个方向相反的能量为0.511 MeV的光子在剂量沉积平面沉积并记录在相空间文件中。

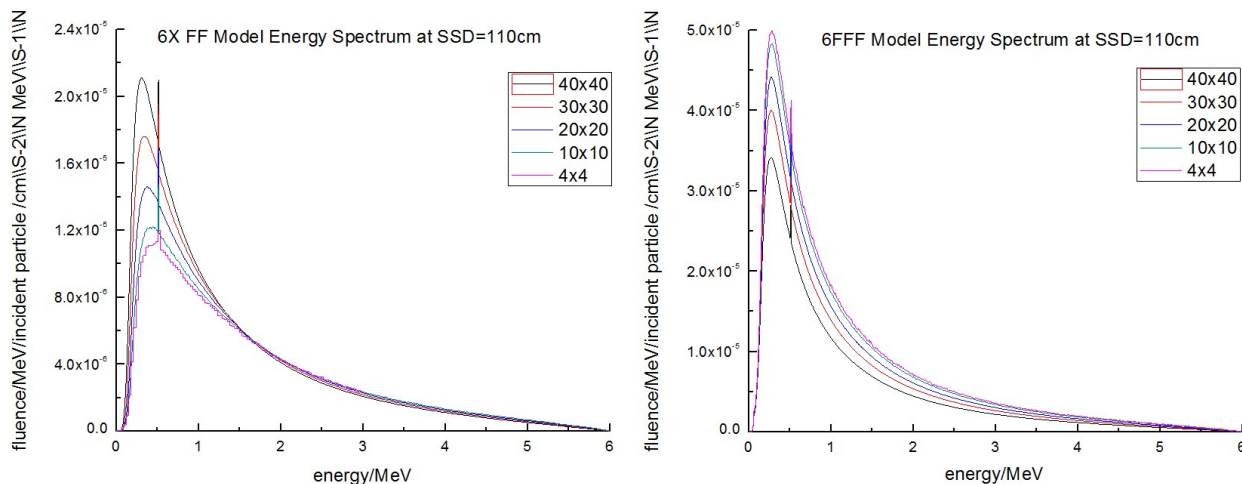


图2 FF与FFF模式在SSD=110 cm位置能量注量分布对比

Fig.2 Comparison of fluence at SSD of 100 cm between FF model and FFF model

2.2 水下10 cm处能谱分布

百分深度剂量和离轴比数据测量时,特定厚度的反散材料对探测器的影响较大。图3和图4为两

种模式下标准水模体中SSD=110 cm深度处,加反散与不加反散的情况下对能谱的影响。结果显示反散对于0~0.511 MeV范围内的能量分布影响较大。

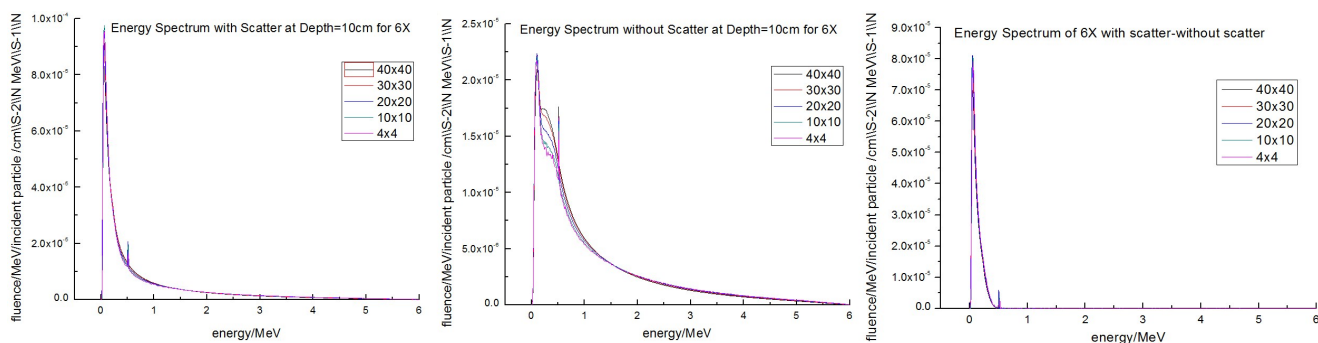


图3 FF模式在Depth=10 cm位置能量注量分布对比

Fig.3 Comparison of energy spectrum with or without scatter at depth of 10 cm for FF model

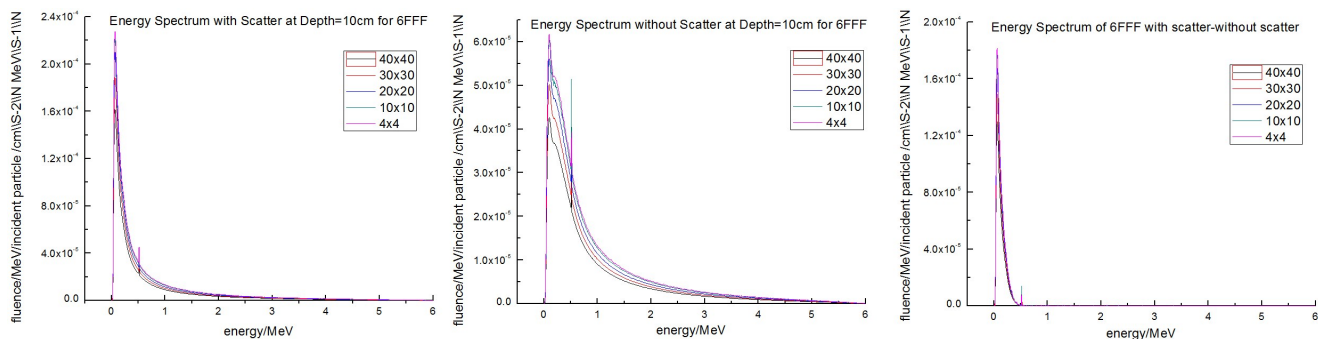


图4 FFF模式在Depth=10 cm位置能量注量分布对比

Fig.4 Comparison of energy spectrum with or without scatter at depth of 10 cm for FFF model

2.3 射野内不同位置能谱分布

在标准模体中,SSD=110 cm深度处,射野大小为 (40×40) cm²,crossplane方向依次取 (1×1) cm²区域分析其能谱分布,如图5所示。对于6 X和6 FFF,能谱

从射野中心轴到射野边缘部分,低能部分在逐步降低,因此在加速器基础数据测量过程中,6 X能量在射野边缘或射野外因为探测器过响应导致测量结果低于模拟结果或者实际值。

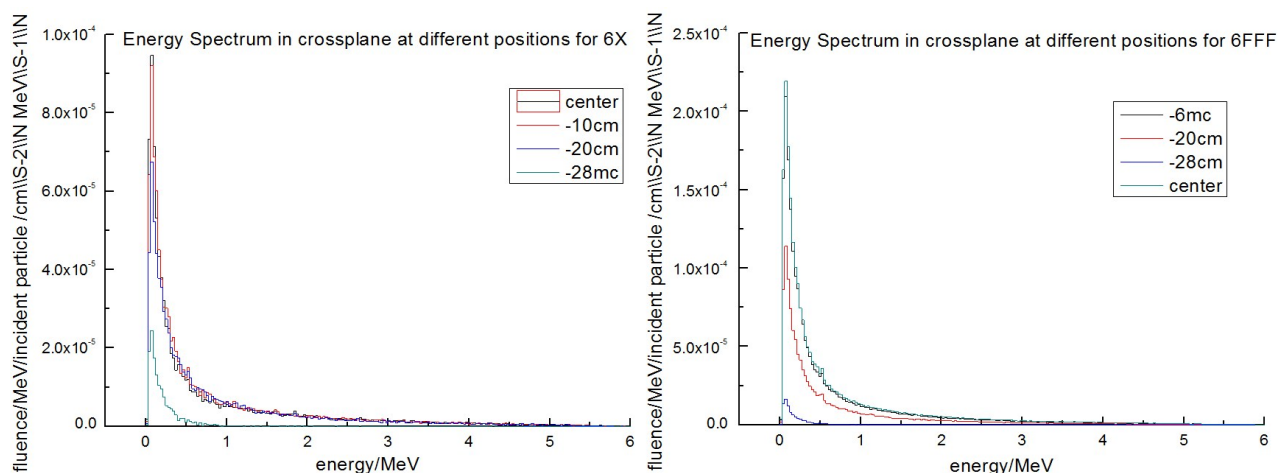


图5 crossplane方向能谱分布变化

Fig.5 Variation of energy spectrum in crossplane direction

2.4 各种粒子对能谱分布的影响

光子和带电粒子对能谱分布的影响如图6所示。对能谱的贡献主要来自光子,正负电子的贡献

分别低两三个数量级。另外,正电子和电子的能量低于0.18 MeV的部分几乎为零,或者说正负电子的能量大于0.18 MeV。

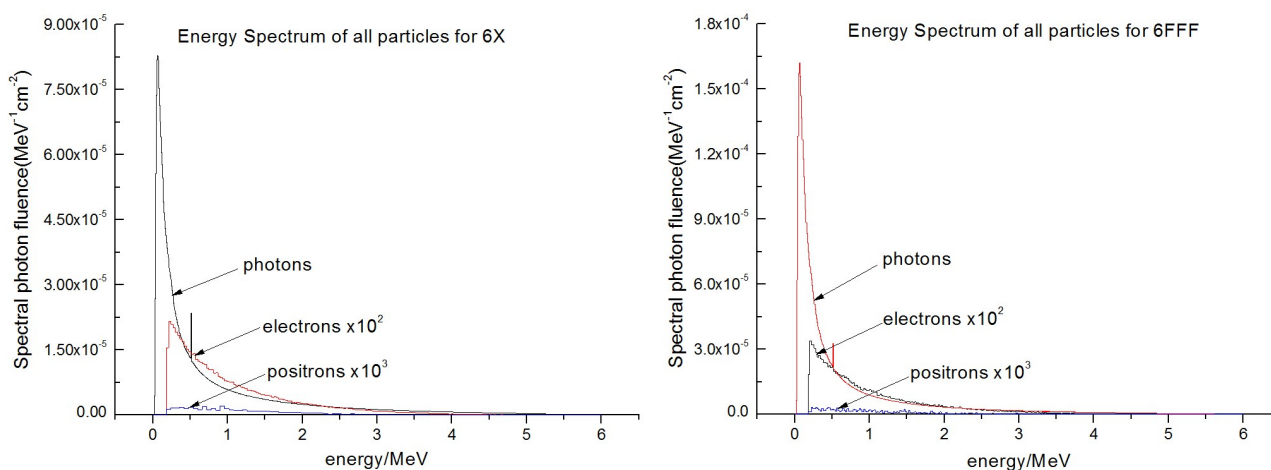


图6 两种模式下各种粒子对能谱分布的影响

Fig.6 Comparison of energy spectrum between photons and other particles for FF model and FFF model

3 讨论

兆伏级光子束能谱是影响医用直线加速器光子束射野内剂量分布和探测器能量响应的重要因素,具有重要的研究意义。医用直线加速器X射线能谱的研究,主要采用蒙特卡罗方法^[15-16],如Mohan等^[1]利用EGS3模拟计算Varian不同机型的X射线能谱,

文献[17-18]等利用蒙特卡罗方式模拟双散射质子束系统模型,为进一步研究患者治疗的剂量效应提供了可靠的验证工具。Ding^[19]和Kim等^[20]分别利用EGS4和Gent4模拟计算医用直线加速器X射线能谱。蒙特卡罗方法的主要优点是可以模拟复杂的医用直线加速器机头几何数据和复杂的材料数据,至少在理论上获取光子束的角分布以生成射野中心和

射野边缘的任意区域的能谱分布;分析不同粒子在同一位置的能谱分布,可用于计算探测器在射野内和射野边缘的能量响应从而修正探测器测量结果。基于此,我们建立了蒙特卡罗计算程序模拟,并可以适用于所有具有类似几何图形的加速器。这种技术的精度主要依赖于大量的计算来降低不确定度。因此,这些计算可以提供独立的确定性结果,并可以与测量结果符合很好。

本研究从理论计算上表明了以下几个方面的问题:①均整和非均整模式下射野内不同方形区域内兆伏级光子束能谱分布因为均整器的原因,射野边缘到射野中心轴的能谱分布规律相反;②反散对于能谱的影响较大,主要集中在0.511 MeV以下的低能部分,提示基础数据的测量中尤其是较大深度处的离轴比和百分深度剂量的尾部,需要保证足够厚度的反散以减少测量误差;③均整和非均整模式下射野内及射野边缘不同位置的能谱分布规律相反,原因与①相同;④能谱分布的绝大部分贡献主要来自光子,较正负电子的贡献分别高出3个和两个数量级。

本研究后续的研究方向为临床上常用电离室、半导体等探测器的蒙特卡罗模型的建立,结合现有研究内容,分析均整与非均整模式下能谱分布于探测器响应的关系,并与临床测量得到的基础数据做对比分析。

【参考文献】

- [1] MOHAN R, CHEN C, LIDOFISKY L. Energy and angular distributions of photons from medical linear accelerators[J]. Med Phys, 1985, 12(5): 592.
- [2] KHABAZ R. Effect of each component of a LINAC therapy head on neutron and photon spectra[J]. Appl Radiat Isot, 2018, 139: 40-45.
- [3] RAFIEI M M, TAVAKOLI-ANBARAN H. Calculation of the exposure buildup factors for X-ray photons with continuous energy spectrum using Monte Carlo code[J]. J Radiol Prot, 2018, 38(1): 207-217.
- [4] NAVARRIA P, PENTIMALLI S, ASCOLESE A, et al. Lung metastases in oligometastatic patients: a new SBRT approach using VMAT with flattening filter-free (FFF) beams[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2012, 84(3): S579.
- [5] RIEBER J, STREBLOW J, UHLMANN L, et al. Stereotactic body radiotherapy (SBRT) for medically inoperable lung metastases-a pooled analysis of the German working group "stereotactic radiotherapy"[J]. Lung Cancer, 2016, 97: 51-58.
- [6] MANCINI B R, PARK H S, HARDER E M, et al. Elderly patients undergoing SBRT for inoperable early-stage NSCLC achieve similar outcomes to younger patients[J]. Lung Cancer, 2016, 97(5): 22-27.
- [7] KIM G, RICE R, LAWSON J, et al. Stereotactic radiosurgery with FFF mode photon beams[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2012, 84(3): S823.
- [8] ABACIOGLU M, UNAL S, OZEN Z, et al. Head and neck IMRT with or without flattening filter: a dosimetric comparison[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2012, 84(3): S872-S873.
- [9] STEVENS S W, ROSSER K E, BEDFORD J L. A 4 MV flattening filter-free beam: commissioning and application to conformal therapy and volumetric modulated arc therapy[J]. Phys Med Biol, 2011, 56(13): 3809-3824.
- [10] PATHAK R S, TIBDEWAL A R, LASKAR S G, et al. Volume changes with stereotactic body radiation therapy in early lung cancer: time trends and outcomes[J]. J Med Imaging Radiat Oncol, 2016, 60(5): 661-667.
- [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] DZIERMA Y, LICHT N, NUESKEN F, et al. Beam properties and stability of a flattening-filter free 7 MV beam-an overview[J]. Med Phys, 2012, 39(5): 2595-2602.
- [13] ROGERS D W, WALTERS B R, KAWRAKOW I. BEAMnrc users manual[Z]. Nrc Report Pirs, 2011: 509.
- [14] MA C M, ROGERS D W. BEAMDP users manual[Z]. Nrc Report Pirs, 2009.
- [15] ASADI A, RAZAVI-RATKI S, JABBARI K, et al. Monte Carlo evaluation of the potential benefits of flattening filter free beams from the Oncor® clinical linear accelerator[J]. J Xray Sci Technol, 2018, 26(2): 281-302.
- [16] TYLER M K, LIU P Z, LEE C, et al. Small field detector correction factors: effects of the flattening filter for Elekta and Varian linear accelerators[J]. J Appl Clin Med Phys, 2016, 17(3): 223.
- [17] YUAN J K, ELLIS R, MACHTAY M. Technical note: an approach to building a Monte Carlo simulation model for a double scattering proton beam system [J]. Med Phys, 2018, 45(6): 2660-2666. DOI: 10.1002/mp.12895.
- [18] GRZANKA L, ARDENFORS O, BASSLER N. Monte Carlo simulations of spatial LET distributions in clinical proton beams[J]. Radiat Prot Dosimetry, 2018. DOI: 10.1093/rpd/ncx272.
- [19] DING G X. Energy spectra, angular spread, fluence profiles and dose distributions of 6 and 18 MV photon beams: results of Monte Carlo simulations for a Varian 2100EX accelerator [J]. Phys Med Biol, 2002, 47(7): 1025.
- [20] KIM H, KIM B, BEAK J, et al. Investigation of the use of external aluminium targets for portal imaging in a medical accelerator using Geant4 Monte Carlo simulation[J]. Br J Radiol, 2018, 91(1084): 20170376.

(编辑:陈丽霞)