

## G4射波刀治疗头的蒙特卡罗模拟

戴春艳<sup>1</sup>, 刘永明<sup>2</sup>, 于春山<sup>2</sup>, 曹洋森<sup>2</sup>, 张明涛<sup>2</sup>, 涂彧<sup>1</sup>

1. 苏州大学医学部放射医学与防护学院, 江苏 苏州 215123; 2. 第二军医大学长海医院放疗科, 上海 200433

**【摘要】**用BEAMnrc程序代码构建G4射波刀治疗头,用DOSXYZnrc程序代码计算6种不同准直器射野的百分深度剂量及离轴比。通过与测量数据对比,分别微调次级准直器大小,从而确保模型的合理构建,并借助BEAMDP程序代码分析射波刀射束中光子谱分布及平均能量、粒子能谱分布及角分布等特点。结果显示各射野的百分深度剂量误差均在2%以内;在辐射野范围内,对于>20 mm的射野,蒙特卡罗方法计算的离轴比与测量值间的误差在3%以内,而对于<20 mm的射野,误差最大不超过5%;光子谱峰值能量为0.380 MeV,光子平均能量为1.570 MeV;出射光子强度比电子强度高出3个数量级;光子角分布集中在与中心轴成5°的范围内,而电子角分布范围较大。这些信息对临床与辐射防护有一定意义,该模型也为射波刀剂量学特点的后续研究提供了基础。

**【关键词】**蒙特卡罗; G4射波刀; 光子谱; 能谱; 角分布

**【中图分类号】**R730.55; R144.1

**【文献标识码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2016)05-0525-05

### Monte Carlo simulation for treatment head of G4 Cyberknife

DAI Chun-yan<sup>1</sup>, LIU Yong-ming<sup>2</sup>, YU Chun-shan<sup>2</sup>, CAO Yang-sen<sup>2</sup>, ZHANG Ming-tao<sup>2</sup>, TU Yu<sup>1</sup>

1. School of Radiation Medicine and Protection, Medical College of Soochow University, Suzhou 215123, China; 2. Department of Radiotherapy, Changhai Hospital, Second Military Medical University, Shanghai 200433, China

**Abstract:** The BEAMnrc code was used to model the treatment head of G4 Cyberknife, and the DOSXYZnrc code was used to calculate the percentage depth dose (PDD) and off-axis ratio (OAR) of the field of six collimators. The calculated data were compared with the measured data and the sizes of secondary collimators were fine-tuned respectively to ensure the model was built correctly. The photon spectrum distribution and mean energy, particle energy spectrum distribution and angular distributions of Cyberknife were analyzed by using the BEAMDP code. The results showed the PDD error of each field was within 2%. In the range of radiation field, the OAR errors between calculated data and measured data were within 3% for the fields larger than 20 mm, and the maximum error was less than 5% for the fields smaller than 20 mm. The peak energy of photon spectra was 0.380 MeV, and the average energy of photon was 1.570 MeV; emerging photon intensity was three orders of magnitude higher than electron intensity; the angular distribution of photon was mainly concentrated within the range of 5° off the central axis, while that of electron was in a relatively larger range. All the information is significant for the clinic and radiation protection, and the constructed model also provides basis for the further research on the dosimetric characteristics of Cyberknife.

**Key words:** Monte Carlo; G4 Cyberknife; photon spectrum; energy spectrum; angular distribution

### 前言

射波刀治疗通过小射野集中照射使治疗靶区受照剂量较高,而周围正常组织受照剂量较低。侧向电子分布不平衡、剂量梯度陡峭、探测器材质及体积的限制等使得小射野剂量学的临床测量较为困难。蒙特卡罗

(MC)方法是以概率统计理论为基础的计算方法,可以真实地描述光子、电子、中子等粒子的运输过程,在一定意义上可以部分代替物理实验,MC方法也被视为医学物理研究中的黄金标准<sup>[1]</sup>。MC模拟可以排除探测器,真实地模拟水中粒子的分布情况,而水中剂量分布只能间接地反映射束的一些特点,并不详细。国外已有关于MC模拟射波刀的研究报道,但很少有针对射束特点的报道<sup>[2-5]</sup>。每一代略有不同的射波刀设计都对剂量分布及射束特点有影响。国内由于射波刀引入较晚,射波刀模拟的研究不多,目前还没有关于射波刀射束特点的报道<sup>[6]</sup>。构建射波刀的MC模型,并与探测器的测

**【收稿日期】**2016-01-15

**【作者简介】**戴春艳(1985-),硕士,研究方向:医学物理,E-mail: dancylove@163.com。

**【通信作者】**涂彧(1965-),博士,教授,研究方向:放射医学与防护,放射卫生, Tel: 18952400052, E-mail: tuyu@suda.edu.cn。

量结果比较,从而进一步了解射波刀射束特点,这对射波刀的质量保证有一定意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验测量

实验采用剂量率为800 MU/min的G4射波刀、IBA Blue Phantom<sup>2</sup>三维水箱、PTW60012半导体探测器。其中,G4射波刀安装于上海长海医院,产生6 MV光子束。所有测量均在IBA Blue Phantom<sup>2</sup>水箱中进行。用PTW60012半导体探测器测量当源皮距(SSD)为80.0 cm时,5、10、20、30、40、60 mm射野的中心轴百分深度剂量(PDD)及相应射野下1.5、5.0、10.0 cm深度处的离轴比(OAR)。然后将二级准直器移除,测量中心轴PDD及水下2.5 cm深度处的OAR,要求源轴距(SAD)为80.0 cm。扫描系统的位置精度 $\pm 0.1$  mm;扫描可重复性 $\pm 0.1$  mm;PTW60012半导体探测器的灵敏层厚2.5  $\mu$ m。每组测量重复两次。

### 1.2 MC模拟

由于缺少厂商提供的射波刀治疗头详细信息、机头材料及几何数据,所以参照射波刀设备手册中有关800 MU/min G4射波刀结构图及Wagner等<sup>[4]</sup>射波刀结构简图以确定模拟机头的各组件及位置;Lee等<sup>[3]</sup>在模拟600 MU/min G4射波刀时列出了靶、初级准直器、电子过滤器等机头组件的材料及具体数据;而Li等<sup>[5]</sup>表示800 MU/min G4射波刀中靶的钨材料厚度比600 MU/min G4射波刀要薄一些,即 $< 0.200$  cm,且铝电子过滤器厚度为0.958 cm;Li等<sup>[7]</sup>模拟的800 MU/min射波刀当SSD=80.0 cm时,最大射野的平均光子谱为1.585 MeV,可利用这一数据对射波刀模型进行大量模拟,并最终确定靶中钨材料厚度。至此,射波刀机头模型已基本构建成功,但对于初级准直器开口及次级准直器开口,还需根据几何关系推算,与测量值比较,并进一步微调。

不考虑电子束打靶前的情况,EGSnrc的用户代码BEAMnrc用于模拟射波刀系统产生6 MV的光子束<sup>[8-10]</sup>。图1为BEAMnrc程序构建的机头结构简图,主要部件包括靶、初级准直器、电子过滤器、电离室、限制射野的防护装置、二级准直器。从靶到水模体上表面设SSD=80.0 cm,并将相空间收集平面设在此处。以相空间文件作为输入,用DOSXYZnrc程序来计算构建的水模体中的剂量分布<sup>[11]</sup>。为了验证机头上面部分构建的准确性,需先将二级准直器移除,再将次级准直器加入模拟,计算不同准直器射野的PDD及OAR,并与测量数据对比,分别微调次级准直器尺寸;模拟的总粒子数为3E8,在开野下,不断调整初始电子束的能量及半高宽(FWHM)。BEAMnrc程

序及DOSXYZnrc程序中参数的设置为AE=ECUT=0.700 MeV, AP=PCUT=0.010 MeV(AE、ECUT、AP、PCUT分别表示 $\delta$ 电子低能量阈值、电子截止能量、次级韧致辐射光子低能量阈值、光子截止能量),应用电子射程拒绝低限值增加模拟效率,全局电子截断能量为1.000 MeV。方差缩减技术采用均匀韧致辐射分裂,其中分裂数为20,其它参数为默认设置。模拟所用计算机的处理器为Inter(R)Core(TM)i5-3210M CPU@2.5 GHz,整个模拟时间约为15 h。

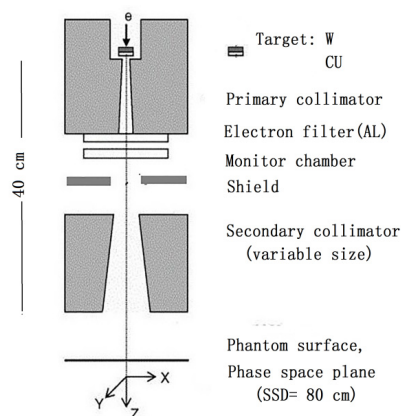


图1 EGSnrc/BEAMnrc程序模拟射波刀治疗头及各组件的结构简图

Fig.1 Structure of treatment head and components used in EGSnrc/BEAMnrc simulations for Cyberknife

用MC方法计算5、10、20、30、40、60 mm射野的PDD,以及1.5、5.0、10.0 cm深度处的OAR,并与测量数据相比较,以验证射波刀射野测量数据的准确性。用BEAMDP程序分析射波刀射束的相空间文件信息,并进行处理以获取射束进入水模体前的光子谱分布及平均能量、不同射野粒子能谱及角分布情况<sup>[12]</sup>。

## 2 结果及讨论

### 2.1 射波刀治疗头模型建立及初始电子束确定

图2为移除二级准直器后,模拟射波刀开野在SAD=80.0 cm时的PDD,并比较水下2.5 cm深度处OAR的模拟数据与实际测量数据。除模体表面由电子污染所致的差异较大外,模拟开野PDD与测量值的吻合很好,误差在2%以内,如图2a所示;而开野OAR与测量值的误差在辐射野范围内大部分也不超过3%,如图2b所示。影响射野中心轴PDD的因素有射线能量、组织深度、射野大小和SSD;而源到准直器的距离、准直器的设计、加速器束流均整器的设计、放射源的大小等对OAR的影响很大<sup>[13]</sup>。由此可见对于射波刀系统,初级准直器的设计直接影响OAR,而能量主要影响PDD。经过大量尝试,通过模拟开野的PDD和OAR,及其与测量数据的

比较,可以较为准确地确定治疗头上面部分的结构,并

确定初始电子束的能量为6.500 MeV,FWHM为3 mm。

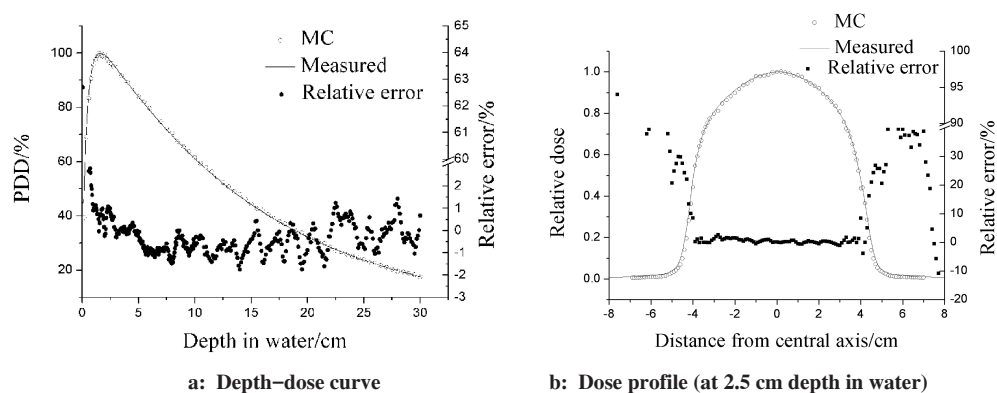


图2 移除二级准直器后PDD及OAR的模拟值与测量值(SAD=80.0 cm)

Fig.2 Comparison of measured and calculated PDD and OAR after removing secondary collimators (SAD=80.0 cm)

PDD: Percentage depth dose; OAR: Off-axis ratio; SAD: Source axis distance

## 2.2 各射野条件下PDD及OAR的模拟结果与测量数据的比较

图3显示了MC方法计算生成的射波刀二级准直器为5、10、20、30、40、60mm时的中心轴PDD与测量数据的比较,每条深度剂量曲线归一在最大剂量点深度处,所有准直器模拟的PDD与半导体测量数据的符合度都在2%以内。图4为上述各准直器的

MC方法计算OAR与测量数据的比较,曲线显示当SAD=80.0 cm时,水下1.5、5.0、10.0 cm深度处的OAR分布。对于>20 mm的射野,MC方法计算的OAR与测量值之间的误差在3%以内;对于<20 mm的射野,误差最大不超过5%,考虑为小射野粒子侧向分布不平衡及半导体的硅原子序数高而对测量的影响。

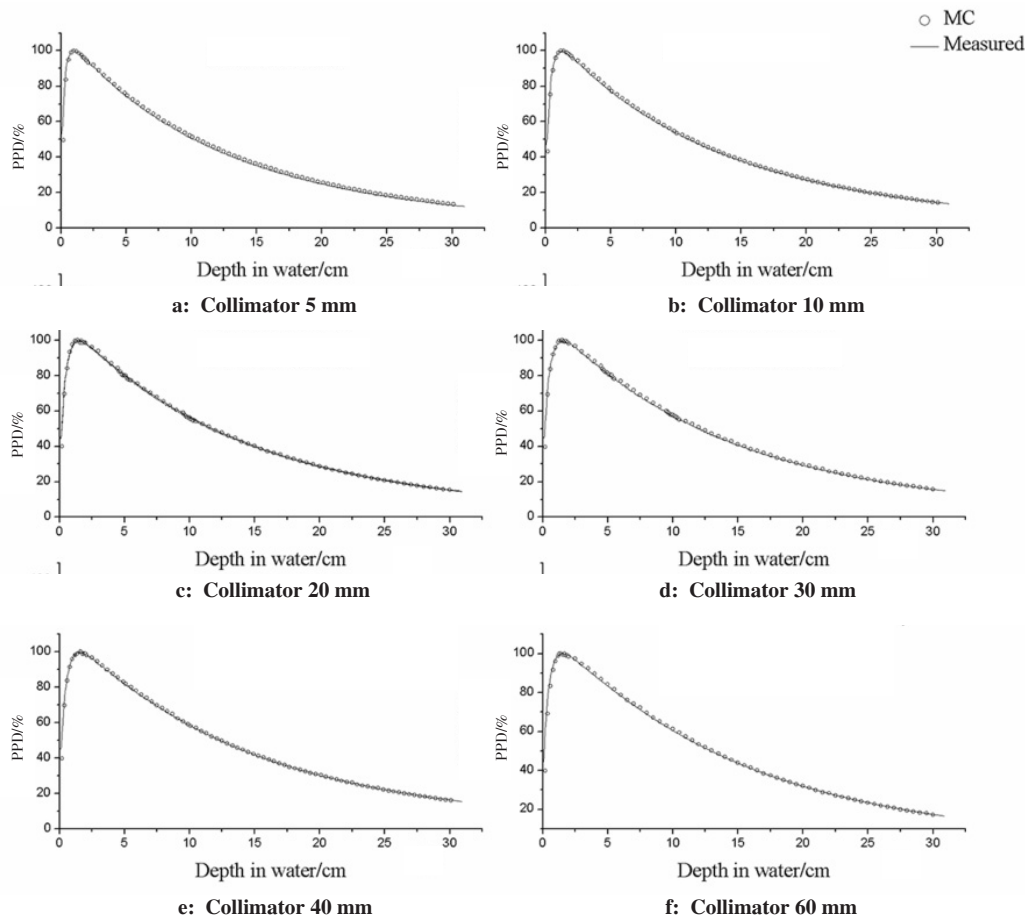


图3 各射野PDD模拟值与测量值比较(SSD=80.0 cm)

Fig.3 Comparison of measured and calculated PDD in different fields (SSD=80.0 cm)

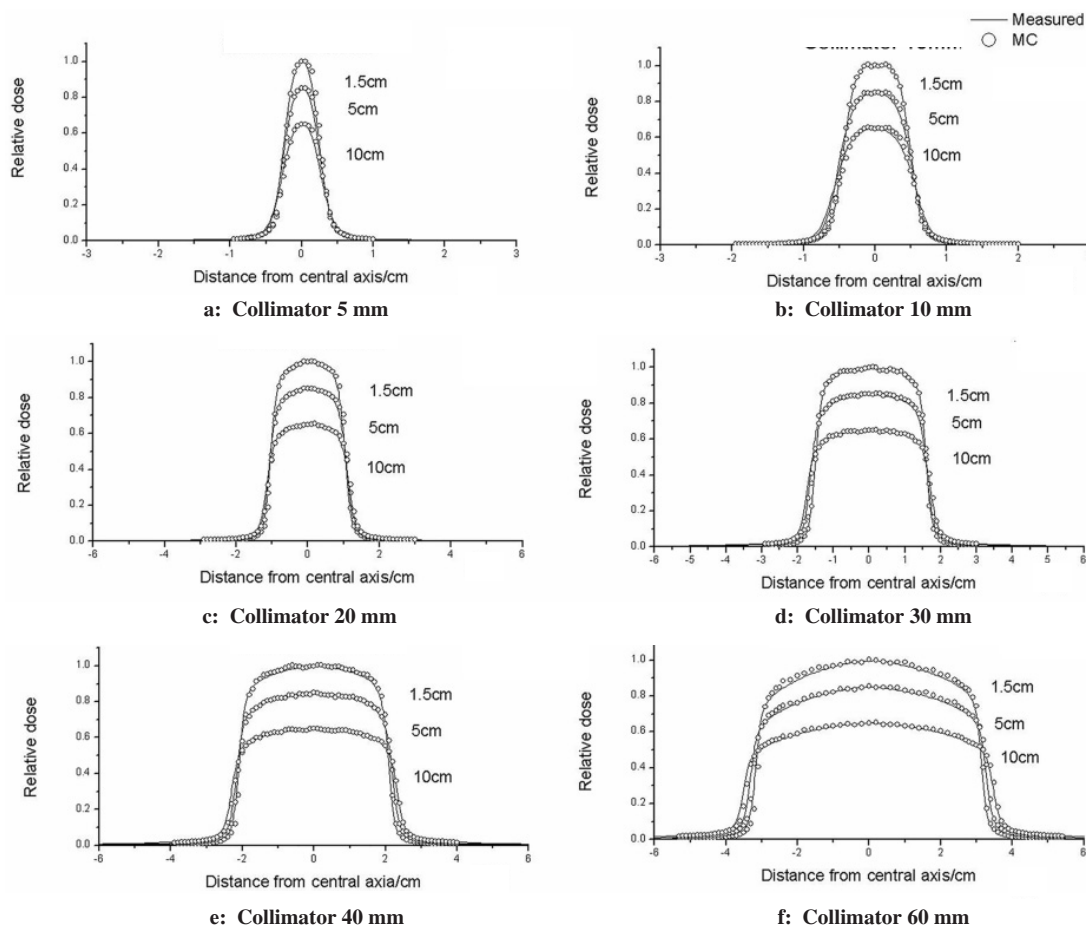


图4 各射野1.5、5.0、10.0 cm深度处OAR模拟值与测量值比较(SSD=80.0 cm)  
Fig.4 Comparison of measured and calculated OAR at 1.5, 5.0 and 10.0 cm depth in water (SSD=80.0 cm)

对于<10 mm的小射野测量,小体积电离室相对于射野较大的体积并不合适,因为小体积电离室相对的低信号会导致结果偏差<sup>[2]</sup>。用半导体测量小射野较为合理,但是半导体的非等效性及能量依赖会影响结果。对于PTW60012半导体探测器,推荐的适用范围为10~100 mm。本文测量全部用PTW60012半导体进行,可能对结果有所影响,但以上模拟与测量结果比较显示这个误差是可接受的。

### 2.3 光子谱分布及平均能量、粒子的能谱分布和角度分布情况

**2.3.1 光子谱及平均能量** 分析6 MV光子在60 mm准直器射野下的光子谱,如图5所示。发现光子谱高峰值附近,即能量0.500 MeV附近有一处突起,表示光子与物质相互作用,产生正负电子对效应,其中的正电子停止下来时与物质中的自由电子发生湮灭作用,产生两个能量均为0.511 MeV的光子。图6显示光子谱的峰值在能量0.380 MeV处,其平均能量为1.570 MeV,比Araki等<sup>[2]</sup>报告的1.710 MeV低,因为Araki所用的G2射波刀电子过滤器为铅,该研究中G4射波刀的电子过滤器为铝,原子序数要比铅低的多,所以平均能量要比Araki的研究结果低。而Dong

等<sup>[6]</sup>研究中的光子平均能量为1.460 MeV,考虑到G4射波刀的钨靶下有铜作为基底及钨靶厚度不一样,这些都对光子谱分布及平均能量有一定影响。

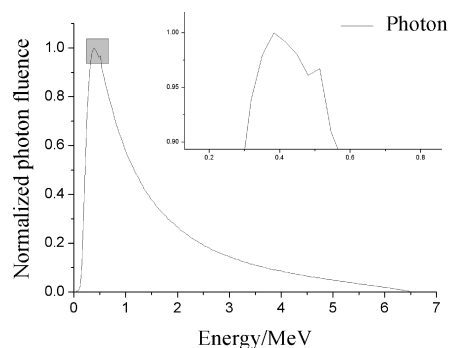


图5 60 mm准直器射野在水模体表面的光子谱分布  
Fig.5 Photon spectrum distribution on the surface of water phantom for 60 mm collimator

**2.3.2 射束能谱分布** 图6所示为准直器射野为30和60 mm时,6 MV光子束下光子及电子的能谱分布。从图中可以看出各射野光子强度比电子强度高出3个数量级,这与陈朝斌等<sup>[14]</sup>和程晶晶等<sup>[15]</sup>报道的常规加速器情况相同。在整个能量范围内光子能谱呈连续性分布,30、60 mm射野的光子能谱符合度很好。随能量增加,

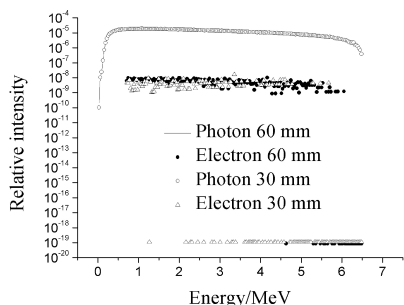


图6 30、60 mm准直器射野粒子的能谱分布

Fig.6 Particle energy spectrum distribution of 30 and 60 mm collimators

光子能谱上升迅速,在1.060 MeV左右达峰值,后趋于平缓;电子能谱近似呈连续性分布,某些能量位置由于电子数量少,统计误差大,导致电子能谱波动性较大,其符合性不如光子能谱好,但总体趋势较为一致。

**2.3.3 粒子角度分布** 图7为6 MV光子束下,当SSD=80.0 cm时,参考野60 mm射野的光子及电子的角分布信息。可以看出光子角度分布集中在5.0°内,这说明光子主要以行进方向为主,较少发生散射情形,这主要是因为光子能量高;而在75.0°以后光子分布出现很大波动,这是由于后面的角度范围内光子数量太少,导致统计误差过大。此外,电子在3.8°前上升迅速,之后平缓,在39.0°以后发生波动。而在0°~39.0°,电子相对强度变化只有一个数量级,说明电子角分布有明显的分散情况,这是因为电子能量低,易与周围介质发生作用,产生散射而失去方向性。电子在0°~39.0°内都有分布,且角度分布高峰值约3.8°,靠近光子行进方向。而在孔栋等<sup>[16]</sup>对加速器射束特点描述中,认为加速器10 cm×10 cm射野的电子角度分布在0°~90.0°内相差一个数量级,且均有分布,考虑电子角度分布与初级准直器开口角度有关,其用到的西门子加速器开口角度为28°15'。而本文中射波刀的初级准直器开口角度比常规加速器要小得多,所以射波刀的光子及电子角度分布范围要比常规加速器小。

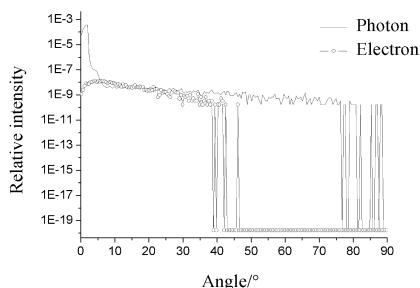


图7 60 mm射野的粒子角分布

Fig.7 Particle angular distributions for 60 mm field

### 3 结论

MC方法计算的射波刀各射野中心轴PDD及侧

向剂量分布与实验测量结果符合性很好, BEAMnrc和DOSXYZnrc程序在计算射波刀系统中6 MV光子束的剂量分布有很好的精度。文中还研究射波刀射束进入水模前射束的光子谱分布及平均能量、粒子的能谱分布和角度分布信息,这些信息对于临床和辐射防护有一定的意义。此外,射波刀MC模型的建立对射波刀剂量学特点的后续研究奠定了基础。

### 【参考文献】

- [1] VERHAEGEN F, SEUNTJENT J. Monte Carlo modeling of external radiotherapy photon beams[J]. Phys Med Biol, 2003, 48(21): 107-164.
- [2] ARAKI F. Monte Carlo study of a Cyberknife stereotactic radiosurgery system[J]. Med Phys, 2006, 33(8): 2955-2963.
- [3] LEE C L, SHIN J W, SHIN H J, et al. Monte Carlo study using GEANT4 of Cyberknife stereotactic radiosurgery system [J]. Korean J Med Phys, 2010, 21(2): 192-200.
- [4] WAGNER A, CROP F, LACORNERIE T, et al. Use of a liquid ionization chamber for stereotactic radiotherapy dosimetry [J]. Phys Med Biol, 2013, 58(8): 2445-2459.
- [5] LI J S, FAN J, MA C M. SU-GG-T-314: Monte Carlo investigation of the new Cyberknife with a high dose rate[J]. Med Phys, 2008, 35(6): 2797.
- [6] DONG X Q, LUO W Y, YUE K, et al. Monte Carlo study on 6 MV photon beams of a Cyberknife® stereotactic radiosurgery system [J]. Nucl Sci Tech, 2010, 21(1): 16-19.
- [7] LI Y, WANG S, WU Z, et al. A Monte Carlo study on dosimetry calibration of Cyberknife beam [C]. World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, IFMBE Proceedings 39, 2012: 1779-1792.
- [8] KAWRAKOW I. Accurate condensed history Monte Carlo simulation of electron transport. II. application to ionchamber response simulations[J]. Med Phys, 2000, 27(3): 499-513.
- [9] ROGERS D W, FADDEGON B A, DING G X, et al. BEAM: a Monte Carlo code to simulate radiotherapy treatment units [J]. Med Phys, 1995, 22(22): 503-524.
- [10] ROGERS D W, WALTERS B R, KAWRAKOW I, et al. BEAMnrcusers manual[R]. National Research Council of Canada Report PIRS-509(a)revH 01, 2004.
- [11] MA C M, ROGERS D W, WALTERS B R. DOSXYZnrcusers manual [R]. National Research Council of Canada Report PIRS-794revB, 2010.
- [12] MA C M, ROGERS D W. BEAMDPusers manual [R]. National Research Council of Canada Report PIRS-509, 1995.
- [13] 胡逸民, 张宏志, 戴建荣, 等. 肿瘤放射物理学[M]. 北京: 原子能出版社, 1999: 172.
- [14] 陈朝斌, 黄群英, 吴宜灿, 等. 蒙特卡罗方法在放射治疗中计划的应用[J]. 核技术, 2006, 29(1): 22-28.
- [15] 程品晶, 王宇, 凌球. 医用直线加速器治疗头的蒙特卡罗模拟[J]. 核电子学与探测技术, 2009, 29(1): 105-107.
- [16] 孔栋, 苗利, 赵飞, 等. 西门子加速器射束特点的Geant4模拟研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学, 2013, 31(5): 58-64.
- [17] KONG D, MIAO L, ZHAO F, et al. Simulation study on Siemens accelerator beam characteristics with GENT4 code[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2013, 31(5): 58-64.

(编辑:陈丽霞)