

APBI 治疗过程中身体主要器官吸收剂量的蒙特卡洛模拟

霍万里¹, 吴爱东², 陈 志¹, 徐 榭¹

1.中国科学技术大学核科学技术学院,安徽 合肥 230027; 2.安徽省立医院肿瘤放疗科,安徽 合肥 230001

【摘 要】目的: 使用蒙特卡洛方法分析患者接受加速部分乳腺照射(APBI)治疗过程中身体主要器官的剂量分布。**方法:** 使用 MammoSite 球囊进行后装治疗是一种主要的 APBI 照射治疗手段。与传统的乳腺全照射(WBI)相比,APBI 的治疗周期更短,对心肺的副作用更小。蒙特卡洛方法是一种基于概率和统计理论的数值计算方法。能对放射治疗计划提供最准确的器官剂量信息。本文使用 MCNP5 蒙特卡洛粒子输运软件包和三维异构体素模型 RPI-Adult Female 模拟左右两侧乳房分别接受 APBI 治疗时身体主要器官所受到的剂量。**结果:** 当不同侧乳房接受治疗时,需分情况考虑不同器官所受到的剂量。另外由于治疗区域靠近心脏和肺部,当对患者进行 APBI 治疗时,需格外考虑心脏和肺的辐照剂量,必要时可以采取缩野,以免对心肺造成不必要的放射性损伤。**结论:** 本篇文章使用蒙特卡洛方法和体素模型对接受 APBI 治疗的患者的全身大部分器官受到的剂量进行研究,模拟结果对临床医生和物理师开展 APBI 治疗具有一定的指导作用。

【关键词】 加速部分乳腺照射; 蒙特卡洛方法; 体素模型; 吸收剂量

【DOI 编码】 doi:10.3969/j.issn.1005-202X.2015.02.007

【中图分类号】 TL72

【文献标识码】 A

【文章编号】 1005-202X(2015)02-0183-04

Absorbed Dose Research of Main Organs in APBI Therapy by Monte Carlo Simulation

HUO Wan-li¹, WU Ai-dong², CHEN Zhi¹, XU Xie¹

1.School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
2. Department of Radiation Oncology, Anhui Provincial Hospital, Hefei 230001, China

Abstract: **Objective** To analyze organ absorbed doses from the accelerated partial breast irradiation(APBI) treatment procedure by Monte Carlo method. **Methods** The treatment cycle of APBI (MammoSite) is shorter and less harmful to the heart and lung when compared with the traditional Whole Breast Irradiation (WBI). Monte Carlo method is a numerical computation method based on probability and statistics theory. Radiotherapy treatment plan based on Monte Carlo method provides the most accurate result about organ absorbed dose. In this paper, we calculated the absorbed dose of different organs when the left and right breasts were undergoing APBI therapy, respectively. The MCNP Monte Carlo code (Version 5) and RPI-AF (Rensselaer Polytechnic Institute - Adult Female) phantom were used. **Results** The absorbed doses of heart and lung should be considered seriously when patients are treated with APBI. In order to reduce severe radiation damage to the heart and lung, radiation field narrowing could be used. **Conclusion** Detailed absorbed dose research of multiple organs in APBI brachytherapy using Monte Carlo simulation and voxelized phantom are reported, which can be helpful to clinical physicians and physicists for the appropriate treatment planning.

Key words: accelerated partial breast irradiation; Monte Carlo; voxelized phantom; absorbed dose

前言

加速部分乳腺照射(Accelerated Partial Breast Ir-

radiation, APBI)是一种治疗周期短、瘤床照射精确、局部控制率良好的保乳术后放射治疗方式^[1]。蒙特卡洛方法是一种以概率统计理论为指导的非常重要的数值计算方法,被认为是放疗剂量计算的黄金标准。本研究使用蒙特卡洛方法与三维体素人体模型模拟患者不同侧乳房在接受 APBI 治疗过程中主要器官的剂量分布,探讨在保证治疗效果的前提下减少患者所受到的辐射损伤。

【投稿日期】2014-11-20

【基金项目】国家自然科学基金(11375181, 11375182)

【作者简介】霍万里(1992-),男(汉族),湖南衡阳人,硕士研究生,

E-mail: huowl@mail.ustc.edu.cn。

【通信作者】徐 榭,男(汉族),教授(千人计划),E-mail: xgxu@ustc.edu.cn。

1 APBI

乳腺癌保乳手术治疗已经成为早期乳腺癌的标准治疗方法。但保乳手术后如果不进行辅助性放射治疗,将有较高的肿瘤复发率。根据乳腺癌肿块切除手术后的 20 年随访数据显示,未进行放射治疗的复发率为 39.2%,而肿块切除手术加术后放疗的同侧复发率仅为 14.3%^[1]。早期乳腺癌保乳手术加术后放射治疗的总生存率和局部复发率已经和全乳腺切除手术相当,而且兼具美容效果。但是,传统的保乳手术后的全乳腺照射(Whole Breast Irradiation, WBI)的治疗时间相对较长,需要大约 4~5 周的时间^[1-4],并且较长的放疗时间也影响了化疗的安排,对心肺等重要器官的损伤较大,令医生和患者难以取舍,因此,部分患者被迫放弃术后放射治疗。

研究表明,75%的患者保乳手术后的局部复发区域在原肿瘤的瘤床附近^[1]。保乳手术的术后放疗主要是为了减少肿瘤的局部复发,因此,有必要对具有高复发风险的瘤床区域进行补量照射,同时缩小乳腺照射范围。目前 APBI 有代替 WBI 的趋势^[1]。APBI 相对于 WBI,照射时间更短,一般在 1 周之内完成,且照射区域局限在原瘤床附近。WBI 一般单次照射剂量为 2.0 Gy,总剂量 50 Gy^[2]; APBI 一般分割方式为每次 3.4 Gy,总剂量 34 Gy^[2],相对于 WBI,APBI 的副作用更小。

APBI 常用的治疗方式有:近距离放疗、术中治疗和照射^[3]。常用的近距离治疗技术有两种:单导管球囊和组织间插植^[3]。MammoSite 是一种常用的球囊近距离放疗设备。MammoSite 由一个球囊和与其相连的双通道导管组成,导管内包含有 1 个可以膨胀的通道和一个高剂量率(High Dose Rate, HDR)Ir-192 后装源通道。MammoSite 导管置入乳腺后,注入盐水和对比剂使球囊膨胀并且填充原瘤腔,以便更好地显示瘤腔、球囊和源通道的位置关系。球囊膨胀后源通道会经过球囊中央,HDR Ir-192 后装放射源通过源通道导管进入球囊进行照射^[1-4]。

2 材料与方法

随着 APBI 的推广应用,对接受 APBI 治疗过程中患者主要器官所受到的剂量进行评估显得尤为重要。由于照射部位靠近心脏,放射性心脏损伤如放射性心包炎等术后发生的概率随着心脏受到的剂量增加而增加^[5-10],较低的心脏受照剂量可以给患者更加安全的治疗,但是目前国内还没有开展相关的研究。伦斯利尔理工的 Mille 等曾经对左侧乳房接受 APBI 治疗时身体主要器官的剂量分布进行了研究^[11],但是目前还没有左右乳房分别受照射时身体主要器官所受到剂量的对比研究。

MCNP5 (Monte Carlo N Particle Transport Code)是由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos

National Laboratory)开发的基于蒙特卡罗方法的用于计算三维复杂几何结构中的中子、光子、电子或者耦合中子/光子/电子输运问题的通用软件包^[12]。本研究利用 MCNP5 软件包(1.60 版)来计算主要器官的吸收剂量。Ir-192 核素放出 γ 射线和 β 粒子, HDR Ir-192 源通常被不锈钢或镍钛诺包裹,可以屏蔽绝大多数 β 粒子,其他的 β 粒子都被后装治疗的 MammoSite 球囊给阻挡。Ir-192 最大的 γ 射线能量为 1378 keV,平均能量为 372 keV^[13]。本文将 HDR Ir-192 源简化为位于球囊中央的点源,之前的研究表明这样的简化是合理的^[13]。在实际操作中, Mammo-Site 球囊被盐水和对比剂填充,本文中将其简化成一个水球。球囊的边界和详细的几何结构比如硅树脂球壁和尼龙导管在本次研究中都没有考虑。

为了让蒙特卡罗方法计算一个尽量真实的乳腺癌后装治疗计划,本文使用由美国伦斯利尔工学院研发的 RPI-AF(RPI-Adult Female)成年女性模型来替代女性患者^[14](如图 1 所示)。



图 1 半身体覆盖了皮肤的 RPI-AF 模型

Fig.1 Half-Skinned Trimetric View of the RPI-Adult Female Phantom

RPI-AF 是一个由边长为 2.5 mm 的正方体素构成的体素模型,整个体模由超过 24×10^6 个体素组成,模型精确地表示出了人体内的 140 多个器官,整个模型的高、宽、深度分别为 164 cm、61.5 cm 和 37.5 cm,各项参数与 ICRP 中的标准女性(身高 163 cm,体质量 60 kg)相同^[11]。构成 RPI-AF 的 140 多个器官与 ICRP 的参考值之差都在 0.5% 之内^[11,14]。

两次模拟分别定义一个直径为 4.4 cm 的水球在左右乳房的中间,模拟置入瘤腔中的 MammoSite 球囊,在水球的中间定义一个 Ir-192 点源来模拟 HDR Ir-192 放射源。水球的表面与皮肤的距离均大于 10 mm。将水球外扩 1 cm 作为 PTV(如图 2 所示),并假设整个治疗期间 PTV(计划靶区)受到的总剂量为 34 Gy,即每次在距离 Ir-192 放射源 3.2 cm 的地方受到的

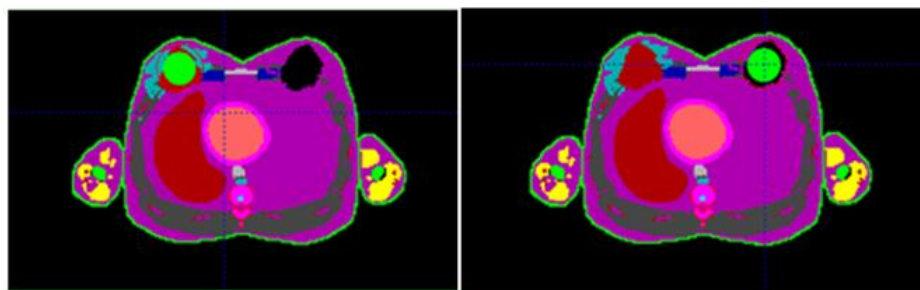


图 2 放射源位置示意图

Fig.2 The Sketch Map of the Radioactive Source Location for Brachytherapy Treatment

The Green Ball in the Picture is MammoSite ball; the Red Circle is PTV, the Radioactive Source at Center of the Green Ball.

The Picture at Left is the Left Breast Treatment Simulation; the Picture at Right is the Right Breast Treatment Simulation.

照射剂量为 3.4 Gy。每次模拟 2×10^8 个粒子,使得绝大部分器官的吸收剂量的 MCNP5 误差在 1% 以内。

3 结果

3.1 源的标定

在进行模拟前,为了验证本次模拟所使用的放射源的真实有效性,对在 MCNP5 里面使用的源进行了标定。建立一个半径为 30 cm 的水球,水球的球心位于原点,将源放置在球中心。在 x, y, z 轴上取距离球心指定距离的点为计算点,并把这 6 个点上模拟的吸收剂量进行平均后作为该距离处的吸收剂量的计算值。然后计算距离源 0.1~10 cm 的点的值。将 $r=1$ cm 作为参考点 r_0 , 将数据代入 APPM TG43u1 推荐的剂量参数参考公式^[15],得到各个距离上的径向剂量函数值 $g(r)$ ^[16-17]。将得到的 $g(r)$ 与 Daskalov 之前得到的数据进行对比,详细数据见表 1。当 r 小于 5 时,两组数据之间的差值均在 1.5% 之内,当 $r=6$ cm、8 cm 和 10 cm 时,它们之间的差值也仅为 1.77%、2.69% 和 4.86%^[17]。从表中数据可以看出在小半径范围内($r < 7$ cm)HDR Ir-192 的剂量按 r^2 衰减,因为 $g(r)$ 是近似不变的,这一结果也与之前文献中的数据相吻合^[17]。

3.2 不同侧乳房接受治疗的数据对比

表 2 中列出了左乳房和右乳房分别接受加速部分乳腺放射治疗时 MCNP5 模拟的主要器官的吸收剂量和误差。通过表 2 和图 3 中的数据对比可以发现,当左乳房接受治疗时,左肾上腺、左眼、左肾、左肺、左唾液腺、脾脏、胃壁和胸腺的吸收剂量分别为右乳房接受照射时的 2.75、1.57、2.1、4.68、1.68、3.56、1.66 和 1.52 倍;左肾上腺、心脏、左肾、左肺、脾脏、胃壁和胸腺的吸收剂量分别提高了 0.461 Gy、0.448 Gy、0.962 Gy、2.162 Gy、0.523 Gy、0.413 Gy 和 0.9377 Gy。

当右乳房接受照射时,右肾上腺、右眼、胆囊、右肾、肝脏、右肺和右唾液腺的吸收剂量分别为左乳房受到照射时的 3.14、1.48、1.66、2.46、1.87、5.1 和 1.58 倍;胆囊、右肾、肝脏、右肺的吸收剂量分别提高了 0.521 Gy、0.921 Gy、1.04 Gy、0.436 Gy 和 2.5 Gy。而像大脑、食道、胰腺、肋骨、皮肤、膀胱壁、子宫等在体内

表 1 径向剂量函数值 $g(r)$ Tab.1 Radial Dose Function Values $g(r)$

r/cm	$g(r)$	
	Monte Carlo	Daskalov
0.1	0.992	1.004
0.2	0.9932	1
0.3	0.9939	1.001
0.5	0.9961	1
1	1	1
1.5	1.004	1.003
2	1.009	1.007
2.5	1.011	1.008
3	1.012	1.008
4	1.012	1.004
5	1.01	0.995
6	0.9984	0.981
7	0.993	0.964
8	0.9653	0.94
9	0.9536	0.913
10	0.925	0.882

相对左右对称的器官无论是左乳房还是右乳房接受治疗,它们的吸收剂量相差较小。而受照射乳房同侧肺的吸收剂量明显高于对侧肺的相应剂量,因此可见,在体内呈左右分布的器官的吸收剂量与是否对同侧乳房照射密切相关。由表 2 数据还可以得出,离放射源相对较近的器官,如心脏、肺和胸骨等的吸收剂量相对较大,而离放射源相对较远的器官,如子宫、卵巢、膀胱壁等的吸收剂量则相对要小得多。

4 结论

本篇文章使用蒙特卡洛方法和三维异构体素模型,对接受加速部分乳腺照射患者主要器官剂量分布的研究。文章使用 RPI-AF 三维体素模型和蒙特卡洛软件 MCNP5 分别模拟了患者左乳房和右乳房接受加速部分乳腺照射过程中身体主要器官的吸收剂量。本文得出的结果显示,器官剂量随着器官与源的距离增加而显著减小,离放射源较近的器官如心脏和肺的剂量需要格外注意,这一结论与 Mille 等^[11]的文章得出的结论相一致。同时本文也补充了 Mille 等的工作,

表 2 MCNP5 模拟当不同侧乳房接受总剂量 34Gy APBI 治疗时身体各器官的总吸收剂量以及 MCNP5 统计误差

Tab.2 The Organ Doses and the MCNP5 Statistical Errors Were Calculated Using the MCNP5 for 34 Gy Breast Brachytherapy Treatments

Organ	Left breast		Right breast	
	Dose(Gy)	MCNP5 Error	Dose(Gy)	MCNP5 Error
Adrenal gland, left	0.7234	0.22%	0.2627	0.36%
Adrenal gland, right	0.2432	0.39%	0.7639	0.22%
Brain	0.05997	0.15%	0.0596	0.15%
Oesophagus	0.5833	0.11%	0.5986	0.11%
Eye lense, left	0.1565	0.09%	0.0996	0.16%
Eye lense, right	0.1004	2.56%	0.1481	2.16%
Gall bladder	1.3947	0.13%	2.3154	0.10%
Heart	4.469	0.04%	4.021	0.04%
Kidney, left	1.8397	0.11%	0.8777	0.15%
Kidney, right	0.71	0.18%	1.7456	0.12%
Small intestine	0.1499	0.10%	0.1369	0.10%
Liver	0.5034	0.05%	0.9391	0.03%
Lung, left	2.7497	0.02%	0.5875	0.04%
Lung, right	0.6087	0.03%	3.11	0.02%
Ovary, left	0.1585	0.59%	0.1306	0.58%
Ovary, right	0.1231	0.60%	0.1642	0.56%
Pancreas	0.4924	0.10%	0.519	0.10%
Pituitary gland	0.0915	1.57%	0.09443	1.56%
Ribs, cortical	0.9934	0.03%	0.9743	0.03%
Ribs, spongiosa	0.8355	0.03%	0.821	0.03%
Salivary gland, left	0.2619	0.21%	0.1552	0.29%
Salivary gland, right	0.1352	0.30%	0.2138	0.26%
Skin	0.3298	0.00%	0.3215	0.00%
Spinal cord	0.3377	0.12%	0.3863	0.11%
Spleen	0.7298	0.09%	0.205	0.14%
Sternum, cortical	3.2251	0.14%	3.3516	0.15%
Sternum, spongiosa	2.7276	0.07%	2.8575	0.07%
Stomach wall	1.0379	0.05%	0.6252	0.06%
Thymus	2.735	0.09%	1.7973	0.10%
Thyroid	0.2975	0.27%	0.3047	0.27%
Tongue	0.2264	0.23%	0.2291	0.22%
Trachea	0.789	0.16%	0.8837	0.15%
Urinary bladder wall	0.02915	0.34%	0.0305	0.33%
Uterus	0.1285	0.26%	0.1396	0.26%

特别是发现了当不同侧乳房接受照射时,那些分布在与受照乳房同侧的器官的吸收剂量明显高于对侧,并且差异明显。而那些距离照射部位较近的器官如肺、胸骨、心脏和胸腺受到的剂量相对较高,在做治疗计划的时候需要格外注意这几个器官的剂量,必要时可以采取适当的方法减少这些器官受到的辐射损伤。本研究表明当对患者的不同侧乳房进行 APBI 治疗时,那些与放射源处于同侧的器官受到剂量需要特别关注。放射性心脏损伤如放射性心包炎等术后发生的概率随着心脏受到的剂量增加而增加。由于治疗区域靠近心脏和肺部,较低的心肺受照剂量能够给患者更加安全的治疗。当对心肺功能较差的患者进行 APBI 治疗时,需格外考虑心脏和肺部的剂量,必要时可以采

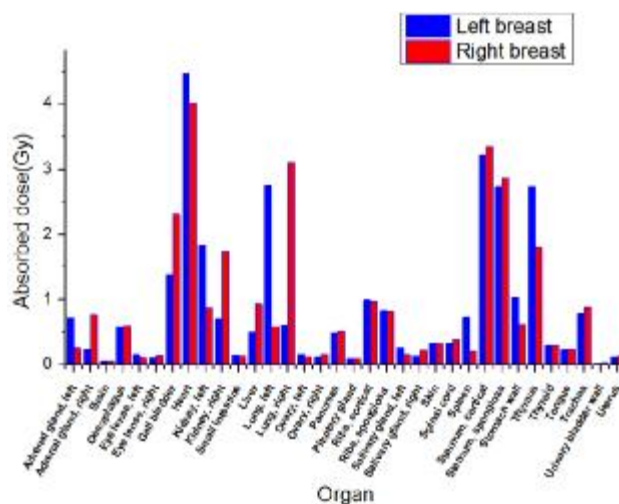


图 3 当不同侧乳房接受总剂量 34 Gy APBI 治疗时身体各器官总吸收剂量对比图

Fig.3 Comparison of the Organ Doses Were Calculated Using the MCNP5 for 34 Gy Breast Brachytherapy Treatments

取缩野, 以免对心脏和肺部造成不必要的放射性损伤。

【参考文献】

- [1] 高劲, 钱立庭. 乳腺癌保乳术后加速部分乳腺照射的研究进展 [J]. 现代肿瘤医学, 2008, 16(2): 302-205.
Gao J, Qian LT. Progress on accelerated partial breast irradiation after conservative surgery for breast cancer[J]. Modern Oncology, 2008, 16 (2): 0302-0305.
- [2] 张勇乾, 王雅楠. 乳腺癌保乳术后加速部分乳腺照射研究进展 [J]. 中国肿瘤临床, 2013, 4(3): 178-181.
Zhang YQ, Wang YL. Accelerated partial breast irradiation after breast conserving surgery: a review of techniques and progress[J]. Chin J Clin Oncol, 2013, 4(3): 178-181.
- [3] 杨瑞杰, 王俊杰. 部分乳腺加速照射近距离治疗技术设备进展 [J]. 临床肿瘤学杂志, 2010, 15(10): 948-951.
Yang RJ, Wang JJ. Advance of brachytherapy technology and devices for accelerated partial breast irradiation[J]. Chinese Clinical Oncology, 2010, 15(10): 948-951.
- [4] Chen PY. Accelerated partial breast irradiation: Keeping guidelines in step with evolving data[J]. Int J Radiation Oncol Biol Phys, 2014, 88 (2): 263-265.
- [5] 韩树奎, 孙艳. 应用剂量体积直方图分析放疗对心脏毒性影响 [J]. 中国医学物理学杂志, 2003, 20(4): 197-200.
Han SK, Sun Y. Using DVHs analyze the harm of heart by radiotherapy [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2003, 20 (4): 197-200.
- [6] 杨苏萍, 张琴, 高艳蓉, 等. 胸部肿瘤放疗致心电图学指标改变的研究 [J]. 重庆医学, 2012, 41(3): 233-237.
Yang SP, Zhang Q, Hao YR, et al. A clinical study of the indexes of electrocardiolog of heart injury-induced by chemoradiotherapy for the thoracic tumor [J]. Chongqing Medicine, 2012, 41(3): 233-237.
- [7] 付雷, 胡立宽, 闵瑞, 等. 肺癌大剂量常规分次三维适形放疗对心脏的影响 [J]. 山东大学学报: 医学版, 2008, 46(12): 1173-1176.
Fu L, Hu LK, Min R, et al. Side-effect of highdose conventional fractionation in 3DCRT on the heart for non-small-cell lung cancer [J]. Journal of Shandong University (Health Sciences), 2008, 46 (12): 1173-1176.

(下转第 192 页)

- Kan LD. Biological electron microscopy technique[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2003: 31-40.
- [8] 王冬梅, 路敬祎, 王秀芳. 基于 Matlab 的同态滤波算法的研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(26): 6562-6564.
- Wang DM, Lu JH, Wang XF. Study of homomorphic filtering based on Matlab[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(26): 6562-6564.
- [9] 肖俊, 宋寿涛, 丁丽娟. 空域同态滤波算法研究[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(12): 2302-2306.
- Xiao J, Song ST, Ding LJ. Research on the fast algorithm of spatial homomorphic filtering[J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(12): 2302-2306.
- [10] Rafael C, Richarde W. Digital image processing[M]. Prentice Hall, 2007.
- [11] 陈春宁, 王廷杰. 在频域中利用同态滤波增强图像对比度[J]. 微计算机信息, 2007, 23(6): 264-266.
- Chen CN, Wang YJ. Image contrast enhancement by homomorphic filtering in frequency field[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(6): 264-266.
- [12] 马龔, 张成义. 基于 Matlab 的同态滤波器的优化设计[J]. 应用光学, 2010, 31(4): 584-588.
- Ma Y, Zhang CY. Optimal design of homomorphic filter based on Matlab[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(4): 584-588.

(上接第 186 页)

- [8] 王晓红, 柳栋, 王静雅, 等. 将左心室作为危及器官在左侧乳腺癌保乳术后放疗中的保护心脏作用[J]. 肿瘤防治研究, 2012, 39(6): 731-734.
- Heart-protected role of left ventricle as organ at risk in postoperative intensity modulation radiotherapy for left-sided breast cancer with breast-conserving operation [J]. Tumor Treat and Research, 2012, 39(6): 731-734.
- [9] 章倩, 郭小毛. 乳腺癌保放射治疗的心脏损伤研究进展 [J]. 中国癌症杂志, 2006, 16(9): 758-762.
- Zhan Q, Guo XM. Research progress on cardiac injury from breast cancer radiation therapy [J]. China Oncology, 2006, 16(9): 758-762.
- [10] 霍忠超, 王丽, 刘晓霞, 等. 食管癌再程放疗剂量与心脏损伤的相关性研究 [J]. 现代中西医结合杂志, 2010, 19(21): 2601-2602.
- Huo ZC, Wang L, Liu XX, et al. Study on correlation of heart injury and radioactive dose in second course of radiation on esophageal cancer [J]. Modern Journal of Interated Traditional Chinese and Western Medicine, 2010, 19(21): 2601-2602.
- [11] Mille MM, Xu XG. Comparison of organ doses for patients undergoing balloon brachytherapy of the breast with HDR 192Ir or electronic sources using Monte Carlo simulations in a heterogeneous human phantom [J]. Med Phys, 2010, 37(2): 662-671.
- [12] Briesemeister J. MCNP-a general Monte Carlo n-particle transport code [M]. Los Alamos National Laboratory, 1993.
- [13] 程晶晶, 宦淡, 凌球. 高剂量率铱-192 微型源在水模中的剂量分布计算 [J]. 核电子学与探测技术, 2007, 27(6): 1132-1134.
- Chen PJ, Lin Q. Simulating the distribution of mini HDR-192's dose in water phantom [J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2007, 27(6): 1132-1134.
- [14] Zhang J, Na YH, Caracappa PF, et al. RPI-AM and RPI-AF, a pair of mesh-based, size-adjustable adult male and female computational phantoms using ICRP-89 parameters and their calculations for organ doses from monoenergetic photon beams [J]. Phys Med Biol, 2009, 54: 5885-5908.
- [15] Rivard MJ, Coursey BM. Update of AAPM task Group No. 43 Report: A revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations[J]. Med Phys, 2004, 31(3): 633-674.
- [16] 孙亮, 李君利. Monte Carlo 法确定 ^{125}I 近距离放射治疗源剂量计算参数 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(9): 1593-1596.
- Sun L, Li JL. Monte Carlo calculations of the dosimetry parameters for the ^{125}I brachytherapy source [J]. Tsinghua Univ (Sci & Tech), 2006, 46(9): 1593-1596.
- [17] Daskalov GM. Monte Carlo-aided dosimetry of a new high dose-rate brachytherapy source[J]. Med Phys, 1998, 25(11): 2200-2208.