

基于 Monte Carlo 算法的角度变化 对乳腺癌术后电子线放疗剂量分布影响研究

王春宇¹, 侯吉光¹, 李聪², 陈大伟³, 陈冲³, 王洪伟³

1. 吉林大学第二医院, 吉林 长春 130041; 2. 吉林大学物理学院; 3. 吉林大学公共卫生学院

摘要: 目的 使用蒙特卡罗算法分析不同照射角度变化对乳腺癌患者术后电子线放疗计划剂量分布影响。方法 使用 MCNP5 蒙特卡罗粒子输运软件包建立乳腺癌患者术后电子线照射模型, 模拟电子线照射过程中 350°、355°、5°、10° 四个照射角度变化, 计算靶区胸壁及敏感器官患侧肺、健侧肺、心脏的剂量分布, 分析其剂量学特点。结果 选取 350°、355°、0°、5°、10° 五个角度后 0° 对照组胸壁接受剂量最高, 355° 组、350° 组、10° 组、5° 组接受剂量依次降低; 敏感器官的接受剂量在旋转角度模拟后均有升高, 患侧肺和心脏靠近射野, 接受剂量和变化程度均较大, 0° 对照组、350° 组、355° 组、10° 组、5° 组患侧肺接受剂量依次升高, 0° 对照组、355° 组、350°、10° 组、5° 组心脏和健侧肺接受剂量依次升高。结论 本文使用蒙特卡罗算法对乳腺癌患者术后电子线放疗进行模拟研究, 发现不同照射角度变化会降低靶区接受剂量, 升高敏感器官接受剂量。

关键词: 蒙特卡罗; 乳腺癌; 电子线; 角度变化

DOI:10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2016.04.002

The Dosimetric Effect of the Angle Change in Electron Beam Irradiation after Breast Surgery by Monte Carlo Simulation. WANG Chun-yu, HOU Ji-guang, LI Cong, CHEN Da-wei, CHEN Chong, WANG Hong-wei. 1. The Second Hospital of Jilin University, Changchun 130041 China; 2. Institute of physics, Jilin University; 3. School of Public Health, Jilin University.

Corresponding Author: CHEN Da-wei, Email: 843195924@qq.com

Abstract: **Objective** To study the dosimetric effect of the rotational angle change in electron beam irradiation after breast surgery by Monte Carlo method. **Methods** The MCNP5 Monte Carlo code was used to simulate the female patients' left breast cancer. The irradiation was set 350°、355°、0°、5°、10° rotational angle change. The dosimetric effect of chest wall, two lungs and heart was measured and analysed. **Results** After the set of 350°、355°、0°、5°、10° rotational angle change, the dose of chest wall of 0° control group was the highest dose, the dose of 355° group, 350° group, 10° group, 5° group in turn reduced. The irradiation dose of sensitive organs was increased in the simulation of rotation angle. Two lungs and heart near the radiation field, their dose and the dose change were large. the dose of 0° control group, 350° group, 355° group, 10° group, 5° group of the same lung was in turn increased, the dose of 0° control group, 355° group, 350°, 10° group, 5° group of the heart and contralateral lung were in turn increased. **Conclusion** The electron beam irradiation after breast surgery was explored by Monte Carlo simulation, which indicate irradiation angle change target to lower dose of target organs and the higher dose of sensitive organs.

Key words: Monte Carlo; Breast Cancer; Electron Beam; Angle Change

中图分类号: R815 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2016)04-0389-04

乳腺癌是我国常见的女性恶性肿瘤之一,近年来我国乳腺癌发病率呈现上升趋势,但我国乳腺癌的临床治疗水平仍与欧美发达国家存在较大差距。当前乳腺癌主要治疗模式为以乳腺癌根治术和乳腺癌保乳术为代表的手术治疗与放射治疗、生物治疗相结合的综合治疗模式^[1]。术后电子线放疗是乳腺癌标准治疗方

式之一,据统计,国内大型医院中约 60%~90% 的乳腺癌患者采用术后放疗治疗^[2]。长期临床研究发现,乳腺癌术后电子线放疗在保证靶区足够的照射剂量之外,须减少肺、心脏等关键敏感器官的剂量的分布,以减少心血管晚期毒性等并发症风险^[3]。但靶区胸壁野形状不规则,且敏感器官患侧肺和心脏靠近靶区,治疗过程中靶区的勾画设计、精准的摆位和重复率直接影响治疗效果。电子线照射方式为二维平面照射,照射

作者简介:王春宇(1990-)男,吉林九台人,硕士研究生,研究方向为放射医学。
通讯作者:陈大伟,Email: 843195924@qq.com

野直接对应靶区范围,角度的变化改变靶区和敏感器官的剂量曲线,因此旋转角度的变化对电子线放疗计划的制定较为重要。

蒙特卡罗是波兰数学家乌拉姆所创立的实验统计方法,能够模拟真实的物理过程,在解决复杂系统粒子输送方面应用较广。MCNP5 程序的是美国 Los Alamos 实验室研发的基于蒙特卡罗算法的粒子计算程序包,其对放疗过程模拟的计算精度能够满足临床需要,应用性较强^[4]。本研究使用 MCNP5 程序包建立乳腺癌术后电子线放疗模型,对角度变化引起的靶区胸壁及敏感器官肺、心脏的剂量分布变化进行蒙特卡罗计算,以期为放疗医师拟定治疗计划提供剂量学依据。

1 材料与方法

1.1 基于 Monte Carlo 的乳腺癌患者术后放疗模型建立

使用美国 Los Alamos 实验室研发的 MCNP5 程序包模拟电子线放疗过程中的粒子输送。根据美国瓦里安 23EX 型医用电子直线加速器结构建立术中放疗模型,包括括电子线限光筒、铅门、初级准直器、次级准直器、均整器、电离室等构件,在该结构中模拟 1×10^9 个电子进行运算。首先使用 MCSIM 程序模拟计算 20 cm × 20 cm 单向射野,100 cm 源皮距垂直照射水模体,记录中心位置 0.5 cm × 0.5 cm × 0.5 cm 体积内沉积能量,绘制 10 cm 内百分深度剂量(PDD)曲线。然后使用瑞典 IBA Blue phantom2 三维水箱系统实测上述条件下 10 cm 深度内 PDD 曲线。利用 Matlab 程序比较两者结果,通过调整高斯径向分布半高宽度、入射电子强度及术中放疗限光筒结构使两者计算误差 < 3%。

乳腺癌患者模型采用吉林大学物理学院原子核科学与技术研究中心模拟的简易成年女性胸腔体素模型。该模型高度(Z轴)、宽度(X轴)、厚度(Y轴)分别为 30、40、36 cm,体重 19.5 kg;由 40 层体素组成,每层包含从锁骨下部至肺叶底部 3 cm 共 180 864 个体素,每个体素 5 mm × 5 mm × 5 mm;模拟了人体皮肤、胸腔、肺、心脏等器官,各个器官的形状由一定数量的体素构成,主要器官组成详见表 1。

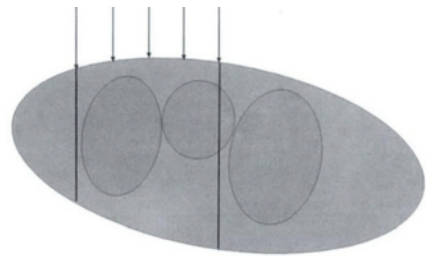
表 1 成年女性模型主要器官组成

器官或组织	体素数	质量(g)
皮肤	12 600	1 575.00
胸腔	122 087	15 260.88
双肺	41 047	1 975.39
心脏	5 130	673.31

1.2 旋转角度对剂量分布的影响

将编写好的医用电子直线加速器模型文件和成年女性模型文件导入

MCNP5 程序包中,在 MCSIM 程序中编写代码,模拟平放于治疗床上的成年左乳乳腺癌患者,模拟放射条件为 100 cm 源皮距、6 MeV 电子束、400 cGy/min 剂量率、射野面积为 20 cm × 20 cm(射野左界为人体中线,右界为腋中线,上界为前肋下缘,下界为乳腺褶皱之下 2 cm)。取平放于治疗床上的成年左乳乳腺癌患者对对照组(即 0° 旋转),模拟患者 350°、355°、5°、10° 四个角度(顺时针)旋转,使用 MCSHOW 记录靶区胸壁、患侧肺、健侧肺、心脏的剂量分布,见图 1。



注:照射角度 0° 组为对照组,摆位方式为使机架垂直于地面,使照射野切线平行于地面。

图 1 0° 角照射模拟示意图

1.3 数据处理

应用 PASW Statistics 18 软件进行数据处理,采用 matlab 软件绘制笛卡尔坐标图,X 轴为人体右腋中线至左腋中线,Y 轴为乳腺褶皱之下 2 cm 至前肋下缘,Z 轴为胸部前缘至背部后缘。

2 结果

2.1 蒙特卡罗模拟的标定

为验证模拟准确有效性,对瓦里安 23EX 型医用电子直线加速器进行标定,蒙特卡罗计算结果与三维水箱实测结果见图 2,两者 PDD 曲线相近,蒙特卡罗模拟略高于实测结果,深度小于 10 cm 时差距均在 3% 以内,拟合结果良好。

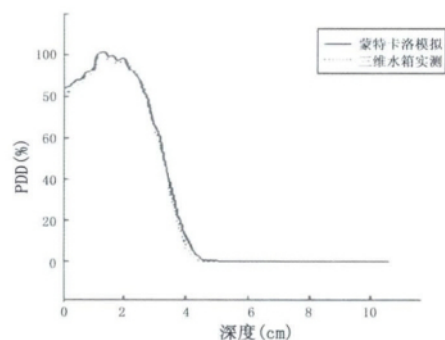
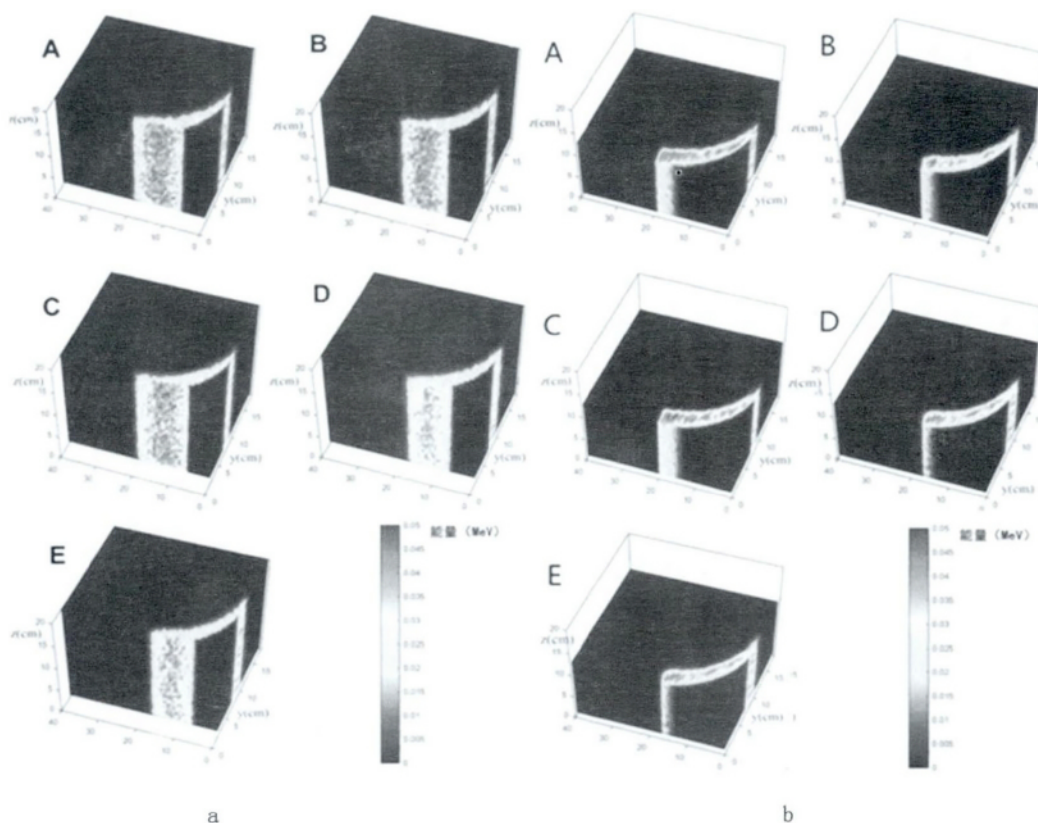


图 2 蒙特卡罗模拟与三维水箱实测 PDD 比较图

2.2 不同旋转角度对胸壁接受剂量对比

通过对比不同旋转角度的蒙特卡罗模拟的胸壁同层体素的剂量沉积结果发现,0° 照射组胸壁接受剂量高于旋转角度组,其中 355° 组、350 组°、10° 组、5° 组接受剂量依次降低(见图 3)。



注: A-E 依次为 0°对照组、350°组、355°组、5°组、10°组 a 为 Y 方向切片层, b 为 Z 方向切片层。

图 3 不同旋转角度对胸壁能量沉积对比

2.3 不同旋转角度对敏感器官接受剂量对比 对敏感器官患侧肺、健侧肺、心脏的模拟发现, 0°照射组患侧肺、心脏、健侧肺接受剂量沉积分别为 0.81 Gy、0.68 Gy、0.19 Gy, 旋转后三者接受剂量升高, 0°对照组、350°组、355°组、10°组、5°组患侧肺接受剂量依次升高, 0°对照组、355°组、350°、10°组、5°组组心脏和健侧肺接受剂量依次升高见表 2、图 4。

表 2 不同角度下心肺接受剂量

器官	不同角度下心肺剂量(Gy)				
	350°	355°	0°	5°	10°
患侧肺	0.91	0.88	0.81	1.12	0.92
健侧肺	0.22	0.21	0.19	0.29	0.23
心脏	0.72	0.70	0.68	0.84	0.74

3 讨论

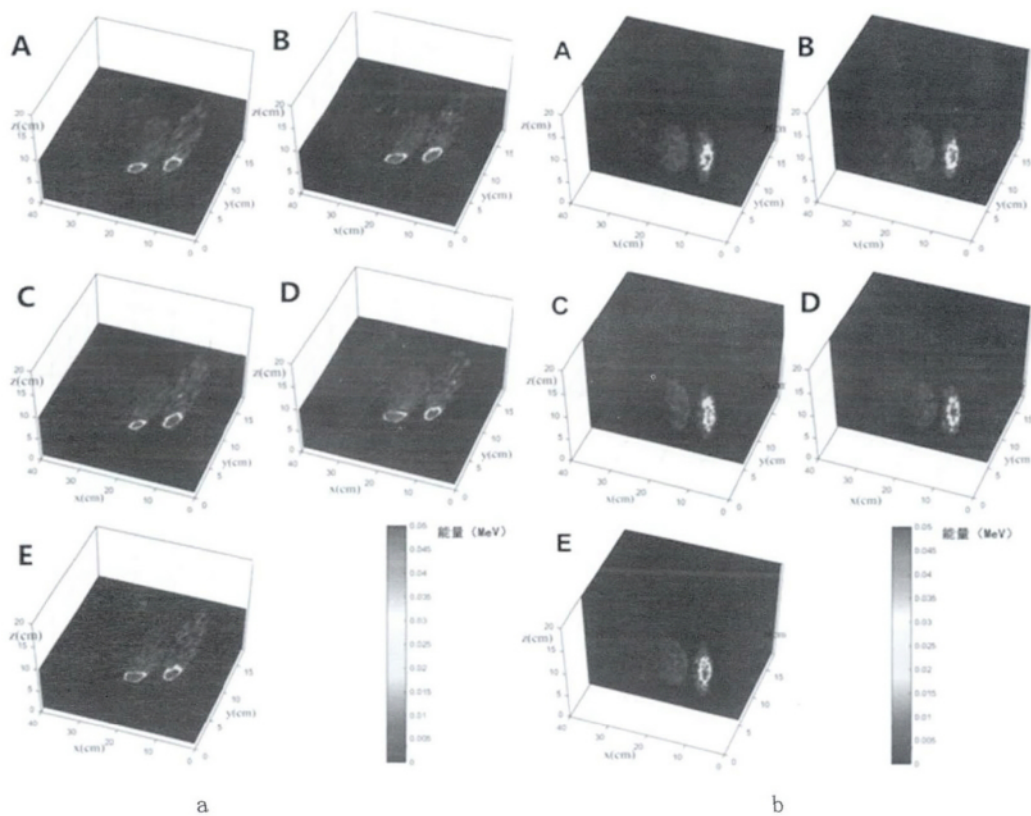
今二十年来, 乳腺癌的治疗方法取得了令人瞩目的进步, 形成了以包括手术治疗和放射治疗在内的局部治疗, 与包括全身化疗和生物治疗在内的全身治疗的综合治疗模式。然而, 我国乳腺癌治疗手段仍与欧美国家存在较大差距, 多项多中心临床试验表明根治术及术后胸壁和内乳区电子线放疗仍是我国乳腺癌的主要治疗模式^[5]。Chopra^[6]等回顾大量文献发现, 乳腺癌术后电子线放疗对敏感器官的损伤易产生较

高的肺毒性和心血管晚期毒性, 这引发的非肿瘤死亡部分抵消了电子线放疗增高的患者生存率。电子线放疗为二维平面照射, 精准的摆位是保证电子线放疗疗效的重要因素, 刘子毅^[7]等对乳腺癌术后放疗的研究认为放疗计划中的摆位误差影响靶区剂量分布, 敏感器官外剂量梯度的锐度决定敏感器官所受损伤大小; 而这些研究均局限于水平位移对靶区和敏感器官接受剂量的影响, 国内在角度变化对术后放疗剂量分布的研究相对匮乏^[8]。

本研究应用蒙特卡罗算法和成年女性体素模型研究角度变化对乳腺癌术后的电子线放疗的影响, 对靶区胸壁和敏感器官患侧肺、健侧肺、心脏的剂量分布变化进行了探讨。研究使用 MNCP5 程序包模拟了左乳腺癌患者的胸壁接受剂量, 0°对照组与 350°、355°、5°、10°四个旋转角度的模拟结果中, 0°照射组胸壁接受剂量最高, 355°组、350°组、10°组、5°组接受剂量依次降低, 这与旋转导致部分靶区偏离射野有关。其他对旋转角度的相关研究中有类似结果, Mongio^[9]等研究了前列腺肿瘤患者的调强放疗, 发现三个笛卡尔轴方向的 3°以内的旋转角度误差降低了前列腺靶区接受剂量; 姚丽红^[10]等研究了宫颈癌患者术后放疗过程中摆位误差的产生因素, 发现三维角度的

变化导致鼻咽癌靶区部分偏离放射范围,靶区接受剂量降低;结合本研究说明,鉴于不同角度变化对靶区接受剂量影响,制定乳腺癌术后放疗计划时应避免偏向人体左臂方向。敏感器官的接受剂量在旋转角度后均有升高,患侧肺和心脏靠近射野,接受剂量和变化程度均较大。 0° 对照组、 350° 组、 355° 组、 10° 组、 5° 组患侧肺接受剂量依次升高。 0° 对照组、 355° 组、 350° 、 10° 组、 5° 组心脏和健侧肺接受剂量依次升高。原因可能在于电子线照射在 5° 和 10° 照射时,射野偏向人体左臂方向,电子束与敏感器官间入射距离发生改变,这提示 5° 和 10° 的旋转角度带来的接受剂量提升可能会增大心血管晚期毒性等并发症的风险。该现

象与 Guckenberger^[11]等对胸部肿瘤的研究一致,该研究发现胸部肿瘤患者的水平旋转误差为 $1.13^{\circ} \pm 2.78^{\circ}$,其中旋转角度偏向人体左臂方向患者同侧肺接受 ≥ 20 Gy 照射的百分体积(V_{20})和同侧肺平均剂量(MLD)显著高于旋转角度较小的患者。董明^[12]等探究了乳腺癌术后放疗患者调强放疗的摆位误差,认为左、腹、足方向,放疗计划剂量变化明显,放射性肺损伤主要是在左、腹、足方向外放的边界,这与 5° 和 10° 的旋转角度方向一致。因此,本研究认为 5° 和 10° 旋转角度变化对靶区和敏感器官接受剂量影响较大,建议摆位误差难以规避时,可适当向人体中线方向旋转以减少敏感器官接受剂量。



注: A-E 依次为 0° 对照组、 350° 组、 355° 组、 5° 组、 10° 组。图中从左到右依次为健侧肺、心脏、患侧肺。a 为 Y 方向切片层, b 为 Z 方向切片层。

图 4 不同旋转角度下敏感器官能量沉积对比

本研究使用蒙特卡罗算法系统的评价角度变化引起的乳腺癌术后电子线放疗剂量分布变化,发现角度的变化降低了胸壁和敏感器官接受剂量,以偏向人体左臂方向旋转角度最为明显。鉴于本研究结果,建议临床上实际摆位过程中应尽量避免偏向人体左臂方向,以提高疗效并降低并发症发生。

参考文献

- [1] Houssami N, Macaskill P, Marinovich M L, et al. Meta-analysis of the impact of surgical margins on local recurrence in women with early-stage invasive breast cancer treated with breast-conserving

therapy[J]. European Journal of Cancer, 2010, 46(18): 3219-3232.

- [2] 黎艳萍,陈卫东,廖玲霞. 早期乳腺癌保乳术及术后治疗的研究进展[J]. 医学综述, 2013, 19(1): 69-71.
- [3] 曹鸿斌,任伟,于靓杰,等. 乳腺癌放射治疗真空垫固定摆位误差分析及优势[J]. 中国癌症杂志, 2012, 22(4): 283-286.
- [4] Botta F, Mairani A, Battistoni G, et al. Customization of FLUKA Monte Carlo code for dosimetry on PET-CT and SPECT-CT images: Comparison with EGS-based 3D-RD and MCNP5[J]. Journal of Nuclear Medicine, 2012, 53(supplement 1): 1497.
- [5] 刘力,刘国文,谭米多. 乳腺癌的综合治疗现状[J]. 中国肿瘤外科杂志, 2013(1): 60-63.

(下转第 397 页)

片很难直接分辨出不同组织边界的位置,当不采用图像识别软件分析直接依靠操作人员肉眼判断估计组织边界位置可能存在 ± 3 mm 的误差。文章采用计算机图像识别软件分析不同灰度区域确定不同组织边界,这个步骤一定程度消除操作人员带来的误差。

测量采集图像时操作人员按压胸壁的压力会造成胸壁不同程度扭曲变形引起图像的畸变。通过多次实验比较,施压操作将引起胸壁厚度减少至少 1 mm,对于胸壁组织脂肪含量较高的被测量人,甚至将减少 5 mm。因此在测量过程中操作人员应尽量轻柔操作,减少彩超机探头对被测人胸壁的挤压。另外彩超机分辨率以及图像采集过程中探头的反正位置等因素也将引起约 ± 1.5 mm 误差。

参考文献

- [1] Fry FA, Sumerling T. Measurement of Chest Wall Thickness for Assessment of Plutonium in Human Lungs[J]. Health Physics, 1980, 39: 89–92.
- [2] D Broggio, X Lechaftois, O Ablin, et al. Energy Dependent Chest Wall Thickness Equations for Male Lung Monitoring with Germanium Detectors[J]. Health Physics, 2014, 106: 405–414.
- [3] 国际辐射单位与测量委员会. ICRU REPORT 44. 在辐射剂量学与测量组织代用品[R]. ICRU, 1989.
- [4] Vickers LR. The Gender-Specific Chest Wall Thickness Prediction Equations for Routine Measurements of ^{239}Pu and ^{241}Am within The Lungs Using HPGc Detectors[J]. Health Physics, 70: 346–357, 1996.

收稿日期: 2016-04-17 修回日期: 2016-06-15

(上接第 292 页)

- [6] Chopra S, Dinshaw KA, Kamble R, et al. Breast movement during normal and deep breathing, respiratory training and set up errors: implications for external beam partial breast irradiation[J]. The British journal of radiology, 2014.
- [7] 刘子毅, 江萍, 赵田地, 等. 乳腺癌放疗中真空负压垫联合 Posirest-2 手臂支撑装置的摆位误差分析[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2014, 34(012): 924–926.
- [8] Davidson S, Kirsner S, Mason B, et al. Dosimetric impact of setup accuracy for an electron breast boost technique[J]. Practical radiation oncology, 2015.
- [9] Mongioi V, Orlandi E, Palazzi M, et al. Set-up errors analyses in IMRT treatments for nasopharyngeal carcinoma to evaluate time

trends, PTV and PRV margins[J]. Acta Oncologica, 2011, 50(1): 61–71.

- [10] 姚丽红, 朱丽红, 王俊杰, 等. 利用 CBCT 联合六自由度治疗床研究宫颈癌术后放疗摆位误差及 CTV 外放边界[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2015, 24(1): 78–81.
- [11] Guckenberger M, Meyer J, Vordermark D, et al. Magnitude and clinical relevance of translational and rotational patient setup errors: a cone-beam CT study[J]. International Journal of Radiation Oncology Biology Physics, 2006, 65(3): 934–942.
- [12] 董明, 陈文彬, 李丹明, 等. 摆位误差对保乳术后放疗计划剂量分布的影响[J]. 实用癌症杂志, 2013, 28(2): 186–189.

收稿日期: 2016-02-18 修回日期: 2016-05-23

作者书写参考文献须知

DOI:10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2016.04.004

引用参考文献是反映论文的科学性和学术水平的重要依据,也是作者尊重他人研究成果的体现,并可向读者进一步提供有关信息。作者引用的参考文献应限于其亲自阅读过的、主要的、发表于正式出版物上的原始文献,要避免引用摘要作参考文献。与人通信、未公开发表(不包括已被接受的待发表资料)或在非正式出版物上发表的文章一般不应作为参考文献引用;若确有必要引用,可用括号插入正文或在当页注脚加注释说明,并应征得原作者的书面许可。文后参考文献的排序应与文中出现的先后顺序一致。参考文献书写的格式必须规范化,以便于检索。我国 2005 年发布了 GB/T 7714-2005《文后参考文献著录准则》,以代替 GB/T 7714-1987。目前,国内的出版物都在执行这一新的国家标准,作者如不太清楚新标准的著录格式,可参考本刊或中华预防医学会任一家系列杂志的稿约,其中都有对参考文献的要求。

本刊编辑部