

VARIAN 直线加速器 IGRT 全碳纤维治疗床与虚拟治疗床对高能 X 射线剂量的影响

李 军^{1,2,3}, 张西志², 花 威², 张先稳², 桂龙刚², 汤晓斌^{1,3}, 柴 磊^{1,3}, 陈 达^{1,3}

1. 南京航空航天大学核科学与工程系, 江苏 南京 210016; 2. 苏北人民医院放疗科, 江苏 扬州 225001; 3. 江苏省高校放射医学协同创新中心, 江苏 南京 210016

【摘要】目的:探讨放疗后斜射野中 VARIAN 直线加速器影像引导放射治疗 (IGRT) 全碳纤维治疗床与虚拟治疗床对高能 X 射线的剂量学研究。**方法:**将固体水模体置于加速器 IGRT 治疗床的中心处, 改变机架角度, 从不同机架角度即射野入射角度让不同能量 (6 MV 和 15 MV) 的高能 X 射线穿透治疗床的薄、中、厚 3 个部分, 分别测量对比穿透因子 (F 值), 并利用放射治疗计划系统设计加虚拟治疗床和不加虚拟治疗床的计划, 计算对比测量值与放射治疗计划系统 (Treatment Planning System, TPS) 计算值的差异百分比 (PD)。**结果:**6 MV 和 15 MV X 射线对 IGRT 治疗床薄、中、厚 3 个位置的 F 值随射线入射角度的变化分别在机架角度 110° 时最小, 对应的 F 值分别为 0.9510、0.9496、0.9409 和 0.9668、0.9645、0.9600; IGRT 治疗床薄、中、厚 3 个位置测量值与计划设计相对应的 IGRT 虚拟治疗床位置的 PD 值在 160°~180° 范围内达到最大, 分别为 2.79%、2.37%、1.81% 和 1.15%、0.90%、0.53%; IGRT 治疗床薄、中、厚 3 个位置测量值与放射治疗计划系统不加虚拟治疗床计算值的 PD 绝对值在 120° 时较大, 分别为 1.85%、2.23%、3.08% 和 1.42%、1.68%、1.83%。**结论:**在 TPS 中加虚拟治疗床的 PD 绝对值比不加虚拟治疗床的 PD 绝对值小, 所以加虚拟治疗床在临床上是必要的。而对于后斜射野, F 值和 PD 值均受以下 3 个因素影响: (1) 射线入射角度, 入射角度越大则 F 值及 PD 值越大; (2) 全碳纤维治疗床的厚度, 床厚度越大则 F 值、PD 值越小; (3) 高能 X 射线能量, 能量越大则 F 值越大, 但 PD 值越小。

【关键词】直线加速器; 全碳纤维治疗床; 虚拟治疗床; 穿透因子; 放射治疗

【中图分类号】R814.2

【文献标识码】A

【文章编号】1005-202X(2015)04-0479-05

Effects of whole carbon fiber treatment couch and virtual treatment couch of VARIAN linear accelerator IGRT on radiotherapy dose of high-energy X-ray

LI Jun^{1,2,3}, ZHANG Xi-zhi², HUA Wei², ZHANG Xian-wen², GUI Long-gang², TANG Xiao-bin^{1,3}, CHAI Lei^{1,3}, CHEN Da^{1,3}

1. Department of Nuclear Science & Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Department of Radiotherapy, Subei People's Hospital, Yangzhou 225001, China; 3. Collaborative Innovation Center of Radiation Medicine, Higher Education Institutions, Nanjing 210016, China

Abstract: Objective To study on the effects of whole carbon fiber treatment couch and virtual treatment couch of VARIAN linear accelerator IGRT on radiotherapy dose of high energy X-ray in the posterior oblique field of radiotherapy. **Methods** The solid water phantom was fixed at the center of treatment couch of accelerator IGRT. The gantry angle was changed to let 6 MV and 15 MV high-energy X-ray respectively penetrate the thin, medium and thick part of treatment couch from different incident angles of the beam. The penetration factors (F) were calculated and compared. The radiotherapy plans with and without virtual couch were designed by treatment planning system (TPS). And the percentage difference (PD) values, the percentage difference between measured values and values calculated by TPS, were calculated and compared. **Results** With the

【收稿日期】2015-03-25

【基金项目】国家自然科学基金(11475087); 中央高校基本科研业务费青年科技创新基金(NS2014060)

【作者简介】李 军(1975-), 男, 在读博士研究生, 物理师兼高级工程师, 主要从事肿瘤临床放射物理学工作。E-mail: 18051061218@163.com。

【通信作者】陈 达, 男, 中国科学院院士, 教授。E-mail: 1571423562@qq.com。

change of incident angle of the beam, the F of 6 MV and 15 MV X-ray on the thin, medium and thick part of IGRT couch, was at the lowest level at the gantry angle of 110° , and the corresponding F was respectively 0.9510, 0.9496, 0.9409 and 0.9668, 0.9645, 0.9600. At the gantry angle from 160° to 180° , the PD between the measured values of these three parts of IGRT treatment couch and the values of corresponding parts of IGRT virtual couch reached the maximum level, respectively 2.79%, 2.37%, 1.81% and 1.15%, 0.90%, 0.53%. At the gantry angle of 120° , the PD between the measured values of these three parts of IGRT treatment couch and the corresponding calculated values of TPS without virtual couch reached the maximum level, respectively 1.85%, 2.23%, 3.08% and 1.42%, 1.68%, 1.83%. **Conclusion** The absolute PD values of TPS with virtual treatment couch are less than the absolute PD values of virtual treatment couch, so the virtual treatment couch is necessary to be used. In the posterior oblique field, F and PD are affected by the following three factors, incident angle of the beam, thickness of whole carbon fiber treatment couch, and energy of high-energy X-ray. F and PD are getting higher with the bigger incident angles of the beam. F and PD are getting lower with the greater thickness of whole carbon fiber treatment couch. When the energy of high-energy X-ray is greater, F is getting higher but PD is getting lower.

Key words: linear accelerator; whole carbon fiber treatment couch; virtual treatment couch; penetration factor; radiotherapy

前 言

美国 VARIAN IGRT 全碳纤维治疗床是由碳纤维(Carbon Fiber, CF)材料组成, CF 是一种含碳量在 95% 以上的高强度、高模量纤维的新型纤维材料。它是由片状石墨微晶等有机纤维沿纤维轴向方向堆砌而成, 经碳化及石墨化处理而得到的微晶石墨材料。碳纤维质量比金属铝轻, 但强度却高于钢铁, 并且具有耐腐蚀、高模量的特性, 在国防军工和民用方面都是重要材料。它不仅具有碳材料的固有无本征特性, 又兼备纺织纤维的柔软可加工性, 是新一代增强纤维。碳纤维具有许多优良性能, 碳纤维的轴向强度和模量高, 密度低、比性能高, 无蠕变, 非氧化环境下耐超高温, 耐疲劳性好, 比热及导电性介于非金属和金属之间, 热膨胀系数小且具有各向异性, 耐腐蚀性好, X 射线透过性好, 在考虑无变形和大承载力的同时最大限度地接近空气电子密度, 因此在放疗领域有着广泛的应用^[1-3]。VARIAN IGRT 全碳纤维治疗床的结构是根据患者治疗部位的不同, 针对头颈部、胸腹部、盆腔部的组织结构及身体厚度的不同分别对应 IGRT 治疗床的薄、中、厚 3 个部分。临床上直线加速器的治疗床是病人放疗的载体, 因此放疗过程在考虑吸收剂量的影响因素时, 应充分考虑治疗床对病人剂量的影响^[4-8]。而 VARIAN Eclipse 8.6 放射治疗计划系统(Treatment Planning System, TPS)在设计放射治疗计划时提供薄、中、厚 3 种 IGRT 虚拟治疗床的选择, 期望补偿治疗床对吸收剂量的影响。本文将通过对实测值和计划值的比较, 研究虚拟治疗床在制定放射治疗计划时对吸收剂量的影响, 以保证放疗过程中能获得准确的剂量。

1 材料与实验方法

1.1 仪器设备与材料

美国 VARIAN CLINAC IX 型医用直线加速器; VARIAN IGRT 全碳纤维治疗床; 整个床板从靠近机架端开始分别为薄(Thin)、中(Medium)、厚(Thick)3 个部分; VARIAN Eclipse 8.6 TPS; 美国 GE 16 排大孔径螺旋模拟定位 CT; 德国 PTW UNIDOS E 型剂量仪; 测量介质为长×宽×高=30 cm×30 cm×10 cm 多层叠放的固体水模体; TW30013 0.6 cm³ 指型防水电离室, 电离室中心点位于固体水模体的几何中心, 且中心点距固体水模体上下表面均为 5 cm。

1.2 实验方法

1.2.1 测量射线通过治疗床的实际剂量 首先校准加速器 6 MV、15 MV X 射线的绝对剂量。将固体水模体放置于治疗床板待测量的位置上, 固体水模体于床板左右边距等距, 并调整水平。测量条件为 T=28.7 °C, P=1015.3 mbar。同中心照射 SCD=100 cm (源到电离室中心距离), 照射野为 10 cm×10 cm, 剂量率为 300 MU/min, 机器跳数为 100 MU, 对治疗床薄、中、厚 3 个位置, 机架顺时针方向每隔 10° 测量 0°~90° 与 90°~180° 的吸收剂量。以 IGRT 治疗床以上 0°~90° 的各点测量值作为参考数值 D_r , 治疗床以下 90°~180° 之间各对应测量点的读数为 D_c , 治疗床对 X 射线的穿透因子 $F=D_c/D_r (F \leq 1)$ ^[2-4]。

1.2.2 放疗计划加 IGRT 虚拟床的计算值 固体水模体经 GE 大孔径螺旋模拟定位 CT 扫描, 设扫描层厚为 2.5 cm。扫描图像经 ARIA 网络传输至 Eclipse 8.6 TPS 进行三维重建。首先 TPS 设计为 VARIAN IGRT 虚拟治疗床选薄床、射野为 10 cm×10 cm、机器跳数

为 100 MU、剂量率为 300 MU/min、剂量体积(Dose Volume)算法为各向异性分析算法(Anisotropic Analytical Algorithm, AAA),等中心设定在电离室中心(同实际测量),勾画电离室测量部分为计划评价体积。对 6 MV、15 MV X 射线从机架角度 90°~180°,每隔 10°分别设计计划,记录每个计划评价体积的平均剂量 D_{mean} 。对于 IGRT 虚拟治疗床中、厚床的计划设计同上。为充分探讨虚拟治疗床在放射治疗中对吸收剂量的影响,本文还设计了不加虚拟治疗床的计划,计划设计方案亦同上。

1.2.3 测量值与 TPS 计算值的差异 因机架角度在 120°左右时,10 cm×10 cm 的照射野完全通过治疗床板,所以本研究中探讨机架角度在 120°~180°之间测量值与 TPS 计算值的差异百分比(PD)= $100 \cdot (f \cdot D_c - D_{\text{mean}}) / D_{\text{mean}} \%$,其中 f 为照射量和吸收剂量的转换因子^[1-3],本 UNIDOS E 型剂量仪对应 6 MV X 线的 f 为 0.953,15 MV X 线的 f 为 0.936。本研究中比较不同 X 射线能量下治疗床薄、中、厚 3 个位置测量值与计划设计时相对应的 IGRT 虚拟床位置的测量值与 TPS 计算值的 PD,同时比较与计划设计时不使用 IGRT 虚拟床时的差异。

2 结果

2.1 6 MV、15 MV X 射线照射条件下 IGRT 治疗床薄、中、厚 3 个位置的 F 随射野入射角度的变化

在 6 MV、15 MV X 线照射条件下,治疗床薄、中、厚 3 个位置的 F 随射野入射角度的变化分别如图 1、图 2 所示。 F 值在 110°时最小,对应 6 MV、15 MV X 射线的 F 值分别为 0.951 0、0.949 6、0.940 9 和 0.966 8、0.964 5、0.960 0。当射野入射角度继续增加, F 值也随之增加并在 180°时达到最大,对应 6 MV、15 MV X 射线的 F 值分别为 0.989 0、0.985 0、0.977 1 和 0.996 4、0.991 0、0.987 5。

除此以外,对于相同能量的 X 射线和射野入射角度, F 值随治疗床厚度的增加而逐渐减小;而对于相同厚度的治疗床, F 值随 X 射线能量的增加而增大。

2.2 不同能量 X 射线下 IGRT 治疗床薄、中、厚 3 个位置测量值与计划设计时相对应的 IGRT 虚拟治疗床位置的 PD 的变化趋势

如图 3、图 4 所示,在不同能量 X 射线下的 IGRT 治疗床薄、中、厚 3 个位置测量值与计划设计时相对应的 IGRT 虚拟治疗床位置的 PD 变化趋势也同 F 一

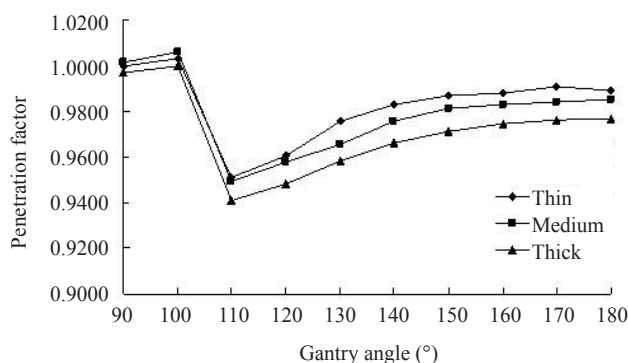


图 1 6 MV X 射线穿透因子曲线

Fig.1 The penetration factor curve of 6 MV X-ray

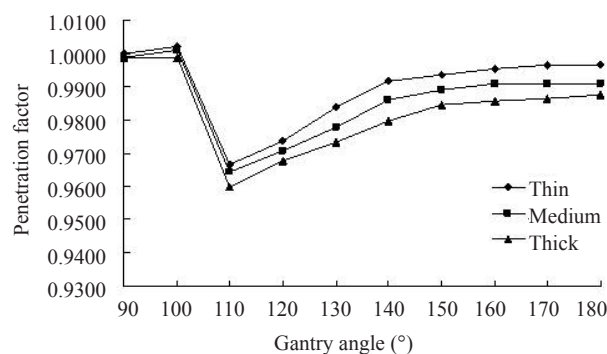


图 2 15 MV X 射线穿透因子曲线

Fig.2 The penetration factor curve of 15 MV X-ray

致,有随 X 射线入射角度增大 PD 值逐渐增大的趋势。3 个位置的 PD 值在 160°~180°的角度范围内达到最大,分别为 2.79%、2.37%、1.81% 和 1.15%、0.90%、0.53%。当 X 射线能量、射野入射角度均相同的条件下,PD 值随治疗床厚度的增加而减少;当治疗床厚度和射野入射角度均相同的条件下,PD 值随 X 射线能量的增加而减小。

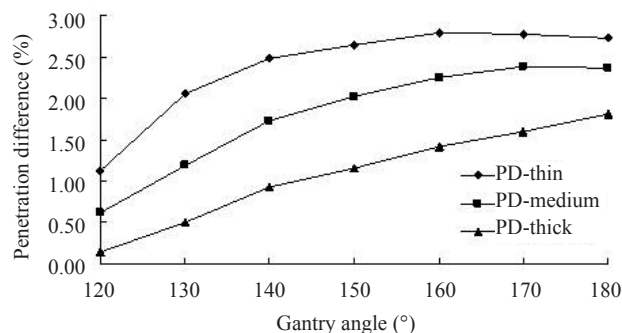


图 3 6 MV X 射线对应治疗床测量值与 TPS 加虚拟治疗床计算值的 PD 曲线

Fig.3 The PD curve of 6 MV X-ray related to measured values and calculated values of TPS with virtual treatment couch

Note: PD: Percentage difference; TPS: Treatment planning system

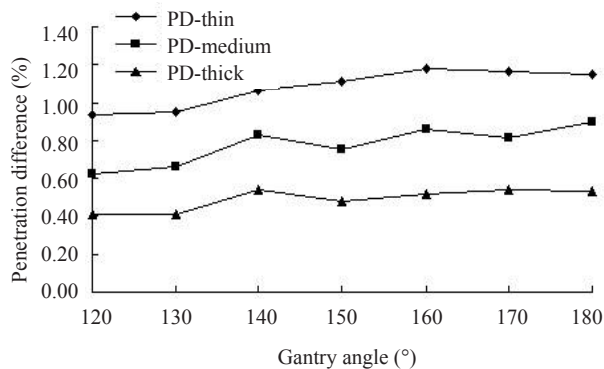


图4 15 MV X射线对应治疗床测量值与TPS加虚拟治疗床计算值的PD曲线

Fig.4 The PD curve of 15 MV X-ray related to measured values and calculated values of TPS with virtual treatment couch

2.3 IGRT 治疗床薄、中、厚3个位置测量值与TPS不加虚拟治疗床计算值的PD的变化趋势

如图5、图6所示,在6 MV、15 MV X射线照射条件下,对于IGRT治疗床薄、中、厚3个位置的PD绝对值在120°最大,分别为1.85%、2.23%、3.08%和1.42%、1.68%、1.83%;在X射线入射角度和IGRT治疗床厚度均相同的条件下,PD绝对值随X射线能量的增加而减小。

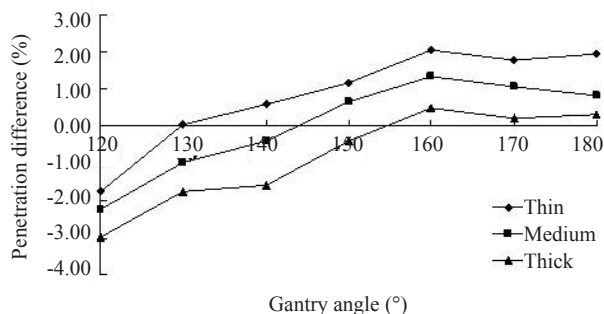


图5 6 MV X射线对应治疗床测量值与TPS不加虚拟治疗床计算值的PD曲线

Fig.5 The PD curve of 6 MV X-ray related to measured values and calculated values of TPS without virtual treatment couch

3 讨论

关于医用直线加速器全碳纤维治疗床对后斜射野剂量的影响,国外已有多篇文献报道^[3-8]。在用模体做实验研究时,当机架角度在碳纤维治疗床以下时(后斜射野),射线会部分或全部先透过碳纤维治疗床再到达模体。一方面碳纤维治疗床会对X射线产生衰减,导致模体内的剂量欠量;另一方面由于建成效应的存在会加大模体的表面剂量,并且X射线与

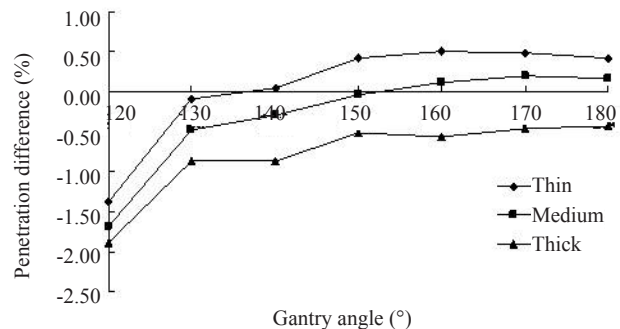


图6 15 MV X射线对应治疗床测量值与TPS不加虚拟治疗床计算值的PD曲线

Fig.6 The PD curve of 15 MV X-ray related to measured values and calculated values of TPS without virtual treatment couch

碳纤维治疗床作用也会产生电子散射并对模体造成电子污染,这也会增加模体的表面剂量^[9]。

根据F的定义可知F值越小,则表示碳纤维治疗床对射线剂量影响越大,越应该避免。反之,F值越大,则表示加速器投射剂量越准确,当F=1时,则表示碳纤维治疗床对剂量投射没有影响。根据本文研究的结果表明,当射野大小一定时,对于后斜射野(机架角度在90°~180°或180°~270°),F值的大小受以下3个因素影响^[10]:(1)射野入射角度的影响。机架角度越小时,在射束方向上,碳纤维治疗床的衰减距离越大,所以F值越小,机架角度在110°左右时F值达到最小,当机架角度进一步减小时,由于只有部分X射线穿透碳纤维治疗床,所以F值有所增加;(2)碳纤维治疗床厚度的影响。碳纤维治疗床的厚度越薄,则衰减距离越小,F值越大;(3)X射线能量的影响。当X射线能量越大,其F值也越大,这是因为X射线能量越高,其速度越快,射线质越“硬”,射线穿透时间少,能量损失越少,同时X射线的散射也会相对较少。

本文所用的VARIAN Eclipse 8.6 TPS通过增加虚拟治疗床的方法来对治疗计划进行补偿修正,从而减少全碳纤维治疗床对后斜射野的剂量影响。根据测量值与TPS计算值的PD定义可知,PD值越小,则TPS计算值与实际测量值越接近。根据本文的研究结果表明,即使TPS采用了虚拟治疗床,在射野大小一定的情况下,PD值同样受以下3个因素的影响:(1)射野入射角度越小,PD值越小,反之亦然;(2)全碳纤维治疗床的厚度越大,则PD值越小;(3)X射线能量越大,PD值越小,且PD值随射野入射角度变化不明显。当射野入射角度、X射线能量、全碳纤维治疗床厚度均相同时,对比加虚拟治疗床和不加虚拟

治疗床的 PD 值, 可知加虚拟治疗床的 PD 绝对值明显小于不加虚拟治疗床的 PD 绝对值, 所以为了保证剂量的精度, 在临床上加虚拟治疗床是必要的。

对于临床放射物理师而言, 在设计放射治疗计划时, 为满足靶区和危及器官的剂量要求而必须布置后斜射野时, 应尽可能使 F 值大, PD 值小。而对于放疗技师而言, 由于 VARIAN IGRT 全碳纤维治疗床分为薄、中、厚 3 个部分, 常规分别对应人体的头颈部、胸腹部、盆腔部的不同治疗部位, 因此放疗技师在摆位时必须严格按照治疗计划中所加的虚拟治疗床对应不同病人在治疗床上的相应治疗体位, 以减少人为误差, 达到精确放疗的目的^[11-12]。

【参考文献】

- [1] 沙翔燕, 王运来, 廖雄飞, 等. 全碳纤维治疗床对吸收剂量的影响[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2008, 17(3): 223-225.
Sha XY, Wang YL, Liao XF, et al. Dosimetric evaluation of carbon fiber tabletop on absorbed dose[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2008, 17(3): 223-225.
- [2] 李 军, 张西志, 汪步海, 等. 探讨瓦里安加速器治疗床对放射治疗剂量的影响[J]. 生物医学工程与临床, 2009, 13(2): 131-134.
Li J, Zhang XZ, Wang BH, et al. Effect of VARIAN accelerator treatment couch on radiotherapy dose[J]. Biomedical Engineering and Clinical Medicine, 2009, 13(2): 131-134.
- [3] Christine SP, Ghyslain L, Charles L, et al. Correction of beam attenuation caused by carbon fiber tabletop in treatment planning system for radiotherapy[J]. Med Phys, 2009, 25(5): 547-552.
- [4] Poppe B, Chofor N, Ruhmann A, et al. The effect of a carbon-fiber couch on the depth-dose curves and transmission properties for megavoltage photon beams[J]. Strahlenther Onkol, 2007, 183(1): 43-48.
- [5] Myint WK, Niedbala M, Wilkins D, et al. Investigating treatment dose error due to beam attenuation by carbon fiber tabletop[J]. Med Phys, 2006, 7(3): 21-27.
- [6] McCormack S, Diffey J, Morgan A, et al. The effect of gantry angle on megavoltage photon beam attenuation by a carbon fiber couch insert[J]. Med Phys, 2005, 32(2): 483-487.
- [7] Deost B, Vanregemorter J, Shaeken B, et al. The effect of carbon fibre inserts on the build-up and attenuation of high energy photon beams[J]. Radiother Oncol, 1997, 45(3): 275-277.
- [8] Vieira SC, Kaatee RS, Dirks ML, et al. Two-dimensional measurement of photon beam attenuation by the treatment couch and immobilization devices using an electronic portal imaging device [J]. Med Phys, 2003, 30(4): 2981-2987.
- [9] 鞠永健, 陈美华, 汤娅红, 等. 加速器治疗床对不同角度射野吸收剂量的影响[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2008, 28(4): 374-376.
Ju YJ, Chen MH, Tang YH, et al. Effect of accelerator treatment couch on the absorbed dose of different angles field[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2008, 28(4): 374-376.
- [10] 花 威, 李 军, 陈婷婷, 等. Varian 直线加速器全碳纤维治疗床对放疗剂量的影响[J]. 医疗卫生装备, 2012, 33(7): 108-122.
Hua W, Li J, Chen TT, et al. Effect of whole carbon fiber couch of varian linear accelerator on radiotherapy dose[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2012, 33(7): 108-122.
- [11] 张西志, 李 军, 汪步海, 等. 医用直线加速器治疗床对放疗剂量影响的研究[J]. 生物医学工程学进展, 2008, 29(3): 161-163.
Zhang XZ, Li J, Wang BH, et al. Research of effect for medical linear accelerator treatment table on radiotherapy dosimetry[J]. Progress in Biomedical Engineering, 2008, 29(3): 161-163.
- [12] 甘家应, 胡银祥, 洪 卫, 等. Elekta 直线加速器全碳纤维六维治疗床床板对后斜野放疗剂量的影响[J]. 中国肿瘤, 2010, 19(8): 511-513.
Gan JY, Hu YX, Hong W, et al. The effect of the six-dimensional whole carbon fiber bed board of elekta linear accelerator on the radiation dose of posterior oblique field[J]. China Cancer, 2010, 19(8): 511-513.