

HT 加速器参数调整对射线质及横截面剂量分布影响

肖斌 岳麒 张莉 王志伟 杨秀美 谷丹 段继梅 张勇

671000 大理大学第一附属医院肿瘤科(肖斌、张莉);650032 昆明医科大学第一附属医院肿瘤放疗科(岳麒、王志伟、杨秀美、谷丹、段继梅、张勇)

通信作者:张勇,Email:neukaryon@163.com

DOI:10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2017.09.018

【摘要】 目的 研究 HT 机器参数电子枪电流 IC、电子枪电压 IV 和磁控管脉冲 PFN 的改变对射线质 (D_{20}/D_{10}) 及射野横截面剂量分布 (Profile) 的影响规律,以提高对剂量稳定性的 QC。**方法** 改变 IC、IV 和 PFN 值,采用电离室和 TomoDose 分别测出各情况下的射线质和 Profile,对射线质数据进行 Pearson 法相关分析,对 Profile 数据进行比较分析。**结果** 对于射线质:IV 和 PFN 与射线质均无相关性 ($P>0.05$),IC 与射线质有强相关性 ($P=0.007$) 且随 IC 增大能量比降低。对于 x 方向上的 Profile:(1) 主射野区域 ($-200\sim 200$ mm),随 IC 增大 Profile 肩区明显呈规律性上升;IV 从 6.42 V 增大到 6.54 V 时 Profile 无变化,IV = 6.60 V 时 Profile 肩区上升到最高点,之后 Profile 随 IV 增大而下降;随 PFN 增大 Profile 肩区明显呈规律性下降;(2) 半影区 (± 200 mm 以外的区域),IC、IV 和 PFN 对 Profile 都无影响。对于 y 方向上的 Profile:(1) 主射野区域 ($-20\sim 20$ mm),IC 取 5.40 和 5.46 V 时在离轴距 <16 mm 区域内 Profile 才可见上升趋势,但整体上 Profile 肩区随 IC 增大而上升;IV 和 PFN 对 Profile 无影响;(2) 半影区 (± 20 mm 以外区域),Profile 随 IV 增大规律性下降,IC 和 PFN 对 Profile 无影响。3 个参数在主射野区域对 Profile 影响显著程度大小依次为 IC、PFN 和 IV,半影区对 Profile 有影响的只有 IV。**结论** 调节射线质时应以 IC 值为主,PFN 作为辅助进行微调;调节 Profile 时主射野区域应以调节 IC 为主,IV 为辅,半影区的调节只涉及到 y 方向 Profile,应调节 IV。研究结果对射线质和 Profile 的 QC 具有指导性作用,能减少 QC 的盲目性,节省时间。

【关键词】 螺旋断层治疗; 射线质; 剂量分布; 半导体探测器

基金项目:国家自然科学基金(81560462);云南省自然科学基金面上项目(2016FB150)

Influence of changing the parameters on energy and profiles of helical tomotherapy Xiao Bin, Yue Qi, Zhang Li, Wang Zhiwei, Yang Xiumei, Gu Dan, Duan Jimei, Zhang Yong

Department of Oncology, First Affiliated Hospital of Dali University, Dali 671000, China (Xiao B, Zhang L); Department of Radiation Oncology, First Affiliated Hospital of Kunming Medical College, Kunming 650032, China (Yue Q, Wang ZW, Yang XM, Gu D, Duan JM, Zhang Y)

Corresponding author: Zhang Yong, Email: neukaryon@163.com

【Abstract】 Objective To investigate the impact of injection current (IC), injection voltage (IV), and pulse forming network (PFN) on energy (depth ratio D_{20}/D_{10}) and profiles of helical tomotherapy, and to improve the quality control for the stability of beam characteristics. **Methods** The energy and profiles were measured by ion chamber and TomoDose at different values of IC, IV, and PFN, the relationship between the energy and various parameters was evaluated by Pearson correlation analysis, and the changes in profiles were evaluated by comparative analysis. **Results** The energy had no correlation with IV and PFN values ($P>0.05$), but had a strong correlation with IC value ($P=0.007$), which showed a downward trend with the increase in IC. For the profiles in the x direction: (1) in the main beam region (-200 to 200 mm), the shoulder area of the profiles increased regularly with the increase in IC. There were no significant changes for the profiles when the IV values ranged from 6.42 V to 6.54 V, and the shoulder area of the profiles reached the highest point with IV = 6.60 V, then decreased with further increase in IV. The shoulder area of the profiles decreased regularly with the increase in PFN. (2) In the penumbral region (± 200 mm outside), all the three parameters had no effect on the profiles. For the profiles in the y direction: (1) in the main

beam region (-20 to 20 mm), the profiles showed an upward trend in the area with an off-axis distance less than 16 mm when IC values were 5.40 V and 5.46 V, and showed an upward trend in the area with an off-axis distance less than 16 mm. But on the whole, the shoulder area of the profiles increased with the increase in IC, and was not affected by IV and PFN. (2) In the penumbral region (± 20 mm outside), the profiles decreased regularly with the increase in IV, and was not affected by IC and PFN. IC had the highest influence on the profiles in the main beam region, followed by PFN and IV. Only IV had impact on the profiles in the penumbral region. **Conclusions** When the energy needs to be adjusted, the IC value should be given a priority, and PFN should be taken as a supplementary factor. When the profile needs to be adjusted, the IC value should be given a priority, and IV should be used as an auxiliary factor in the main beam region. But in the penumbral region, adjustment of parameters is only related to the profiles in y direction, so the IV value should be adjusted. This study has a guiding role in the quality control of energy and profiles, which can reduce the blindness of quality control, thus saving the time.

【Key words】 Helical tomotherapy; Actinogen; Dose distribution; Semiconductor detector

Fund programs: National Natural Science Foundation of China (81560462); General Projects of Natural Science Foundation of Hubei Province (2016FB150)

对放疗直线加速器进行 QA 和 QC, 是保障放射治疗安全有效地进行的必须措施, 其中对直线加速器射线稳定性控制和监测是一项重要工作^[1-4]。HT 取消了均整器, 依靠二元气动装置控制多叶光栅闭合时间来调制强度, 没有射野平坦度的要求, 但剂量稳定性要求增高, 需要周期性监测^[4-5]。AAPM 甚至专门对 HT 的 QA 进行研究并给出 QA 规程^[4]。实际工作中 HT 机器故障、更换部件或者金属靶老化等原因都会影响剂量稳定性。因此, 日常 QA 过程中剂量输出及 Profile 超出误差范围时现场工程师需要对机器参数 IC、IV 和 PFN 进行调整, 使之符合机器验收时的金标准, 但每次调整都具有一定的盲目性。目前, 对 HT 机器参数改变对剂量稳定性的研究报道中, Shi 等^[6]的研究缺少对 Profile 的检测和 IV 的评估, van de Vondel 等^[7]研究的是磁控管电流和 IC 对束流性能的影响。Wagner 等^[8]、Langen 等^[9]和 Chen 等^[10]对 TomoDose 测量 Profile 进行研究, 一致认为 TomoDose 可用于监测和预测 HT 射线束 Profile, van de Vondel 等^[7]测量 Profile 也采用 TomoDose, 所以有了方便易行地检测 Profile 的方法。鉴于此, 可更加全面地研究 HT 机器参数 IC、IV 和 PFN 的改变对射线质及 Profile 的影响规律, 以期加强对 HT 剂量稳定性的监测和控制以保障治疗, 同时希望能为使用 HT 的同行提供相关帮助。

材料与方 法

1. 材料与设备: 螺旋断层放疗加速器 (HT Hi. Art)、A1SL 指型电离室 (Standard imaging)、不同厚度的等效水模体 (Standard imaging)、二维半导体阵列 (TomoDose, Sun Nuclear Corp. of Melbourne, FL)。TomoDose 是专为 HT 质量控制设计的二维半导体阵列, 其包含 223 个半导体探测器, 分布在横纵为 50

cm \times 10 cm 的矩形范围, 纵向 (y 轴) 探测器间隔 4 mm, 横向 (x 轴) 探测器间隔 5 mm; 每个半导体灵敏度为 32 nC/Gy, 灵敏尺寸为 0.8 mm \times 0.8 mm, 探测器位于距离 TomoDose 表面 0.77 cm 处, 等效于水下 1 cm 的建成深度。

2. 测量方法: 记录下机器在年检调节后标准状态下的 IC、IV 和 PFN 值, 将之作为基础以 0.06 V 的间隔调整 IC 和 IV 的值, 以 0.02 V 的间隔调整 PFN 的值; 调整其中 1 个参数值时, 其他参数保持标准状态下的原值不变; 机器参数调整范围如下: 5.34 V \leq IC \leq 5.76 V, 6.42 V \leq IV \leq 6.90 V, 3.40 V \leq PFN \leq 3.52 V, 各项参数标准值 IC = 5.64 V、IV = 6.60 V、PFN = 3.48 V。每次调整参数时, 采用电离室组合等效水模体模拟测量水下 20、10 cm 处吸收剂量比, 即测量射线质 D_{20}/D_{10} ; 同时, 采用 TomoDose 组合等效水模体测量水下 1.5 cm 处的射线束 Profile。射线质和 Profile 的测量均在 MLC 全开、铅门宽度 (Jaw) 5 cm、螺距 (SSD) 85 cm 摆位和出束 20 s 的情况下获得。

3. 统计方法: 采用 SPSS 19 软件进行 Pearson 法相关性分析, 每个参数调整所得到的 Profile 采用 Origin 8.0 拟合图进行比较分析。P < 0.05 为差异有统计学意义。

结 果

1. 机器参数调整对射线质的影响分析结果: 将机器参数 IC、IV 和 PFN 的改变对射线质的影响结果分别进行线性相关性分析, 结果发现 IV 与射线质无相关性 ($P = 0.357$), PFN 与射线质无相关性 ($P = 0.092$); IC 与射线质有强相关性 ($P = 0.007$), 且随 IC 增大能量比降低, 影响显著, 见图 1。这说明 IC 对能量比的影响具有规律性, 是影响射线能量比的

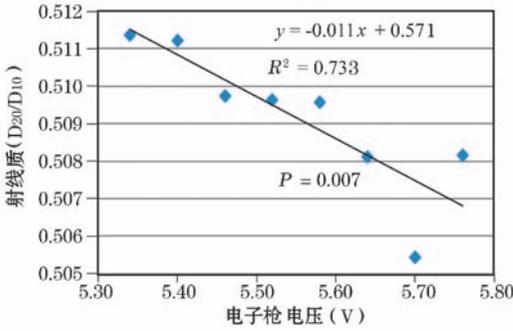


图 1 IC 的改变对射线质的影响相关性分析

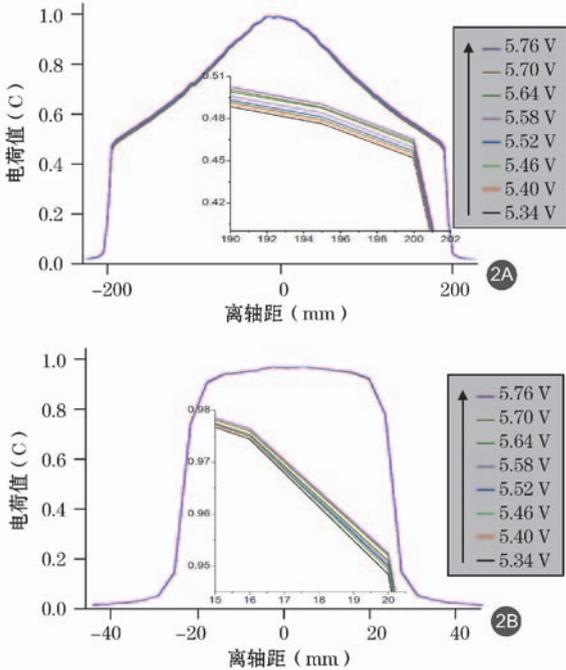


图 2 IC 的变化对 x 方向(左)和 y 方向(右)上 Profile 的影响(电荷值归一到最大值)

主要因素,而 PFN 对能量比的影响程度微弱。

2. 机器参数调整对 Profile 的影响分析结果

(1) IC 变化对 Profile 的影响:调节 IC 对 x 方向和 y 方向 Profile 的影响见图 2。IC 对 x 方向和 y 方向 Profile 的影响都成规律性变化:①x 方向上,随 IC 增大,在主射野区域(-200 mm ~ 200 mm 的区域) Profile 肩区呈明显的规律性上升趋势,半影区(±200 mm 以外的区域)不变;②y 方向上,IC 取 5.40 和 5.46 V 时在离轴距为 16 mm 以内 Profile 才可见上升趋势,整体上在主射野区(-20 ~ 20 mm 的区域) Profile 肩区随 IC 增大也呈上升趋势,半影区(±20 mm 以外的区域)不变。

(2) IV 变化对 Profile 的影响:调节 IV 对 x 方向和 y 方向 Profile 的影响见图 3。由图可以看出:①x 方向上,在主射野区域,随着 IV 从 6.42V 增大

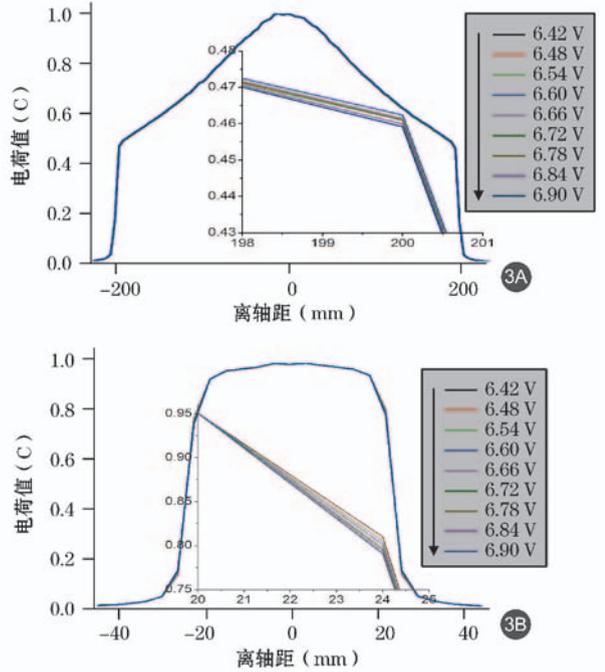


图 3 IV 的变化对 x 方向(左)和 y 方向(右)上 Profile 的影响(电荷值归一到最大值)

到 6.54V 时,Profile 无变化,IV = 6.60V 时 Profile 肩区上升到最高,之后 IV 增大呈下降趋势,半影区无变化;②y 方向上,主射野区域无变化,半影区 Profile 随 IV 增大呈明显的下降趋势。

(3) PFN 变化对 Profile 的影响:调节 PFN 对 x 方向和 y 方向 Profile 的影响如图 4 所示。在 x 方向上,主射野区域随 PFN 增大 Profile 肩区明显呈规律性下降趋势,PFN 对半影区无影响;在 y 方向上,在主射野区域和半影区,PFN 对 Profile 都无影响。

(4) 比较分析结果:为了估计参数对 Profile 影响的程度大小和变化,用参数取最大值时的 Profile 数据减去对应取最小值的 Profile 数据,得到的差值即单个参数改变时引起 Profile 变化的最大幅度,然后比较 3 个参数对 Profile 引起的最大幅度之间的变化趋势,见图 5。由图可得以下 2 点:①x 方向上 IC 引起的变化幅度最大,且在主射野区域内引起的变化最明显,PFN 对 Profile 引起的变化幅度低于 IC,但明显高于 IV;②y 方向上,在主射野区域 IC 引起的变化幅度最大,IV 和 PFN 相近;在半影区 IV 引起的变化幅度最大,IC 和 PFN 相近。

对以上 IC、IV 和 PFN 三个参数对 Profile 的影响的结果进行综合分析可知:首先,不论在那个方向上,IC 只对主射野区域的 Profile 有影响;IV 则不同,在 X 方向上只影响主射野区的 Profile,在 y 方向上只影响半影区的 Profile;PFN 在 x 方向上只影响

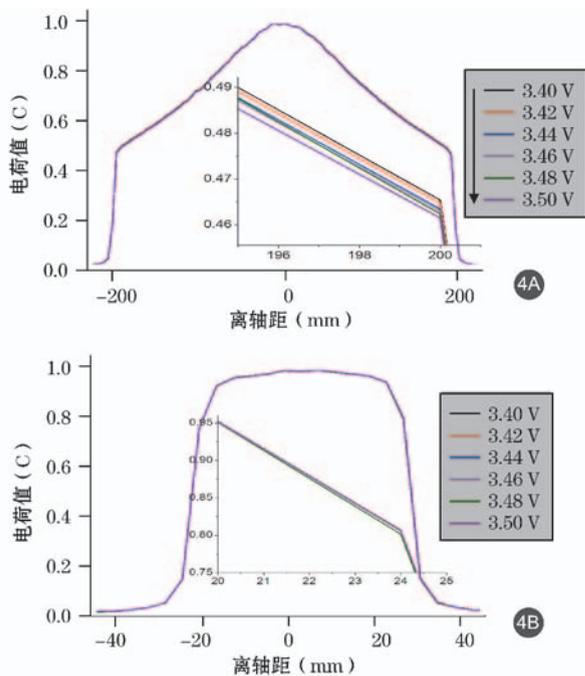


图 4 PFN 的变化对 x 方向(左)和 y 方向(右)上 Profile 的影响(电荷值归一到最大值)

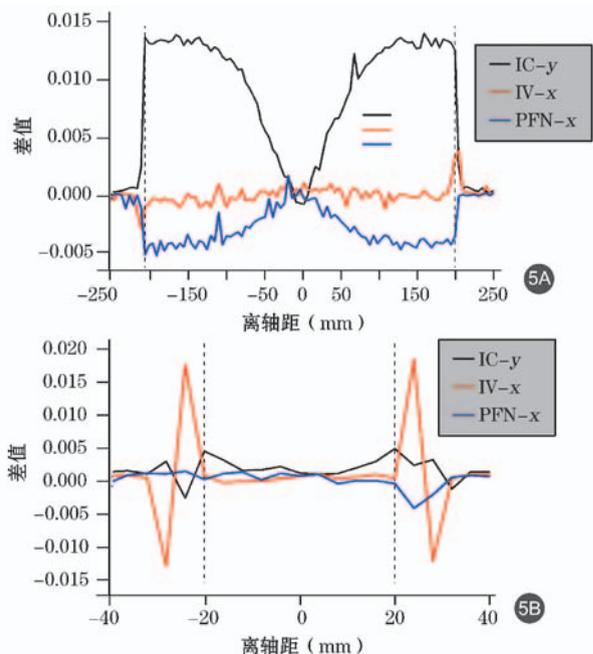


图 5 在 x 方向(左)和 y 方向(右)上 Profile 的差值变化

主射野区域的 Profile,对 y 方向的主射野区域和半影区均无影响。其次,从图 5 中 Profile 差值变化可明显看出,IC 的调整对 Profile 的影响程度最大;结合对比分析结果,可知 3 个参数在主射野区域对 Profile 影响显著程度大小依次为 IC、PFN 和 IV;半影区对 Profile 有影响的只有 IV。

3.调整 IC、IV 和 PFN 对射线质和 Profile 的影响研究结果

(1)对于射线质:IV 和 PFN 与射线质无相关性 ($P=0.357、0.092$);IC 与射线质有强相关性 ($P=0.007$),随 IC 增大能量比降低,影响显著。

(2)对于 x 方向上的 Profile:①主射野区域,随 IC 增大 Profile 肩区呈明显规律性上升;IV 从 6.42~6.54 V 时 Profile 无变化,IV=6.60 V 时 Profile 肩区上升到最高点,之后 Profile 随 IV 增大而下降;随 PFN 增大 Profile 肩区明显呈规律性下降。②半影区,IC、IV 和 PFN 对 Profile 都无影响。

(3)对于 y 方向上的 Profile:①主射野区域,IC 取 5.40 和 5.46 V 时在离轴距为 16 mm 以内 Profile 才可见上升趋势,整体上在主射野区域 Profile 肩区随 IC 增大而呈上升;IV 和 PFN 对 Profile 无影响。②半影区,Profile 随 IV 增大规律性下降,IC 和 PFN 对 Profile 无影响。

(4)3 个参数在主射野区域对 Profile 影响显著程度大小依次为 IC、PFN 和 IV;半影区对 Profile 有影响的只有 IV。

讨 论

现代 IMRT 要求精准治疗,在保障治疗效果的同时减少正常组织器官的受量,随之而来的是放疗加速器的复杂程度增高,对加速器 QA 和 QC 的要求也随之加强。对于 HT 而言,机器的集成度和复杂程度高,故障率也随之增高,物理师对 HT 进行 QA 和 QC 是保障精准放疗的一项重要工作。在日常过程中,工程师对机器参数 IC、IV 和 PFN 进行调整之后,物理师需要对剂量稳定性进行检测,对射线质和 Profile 进行校正,使其符合机器验收时的金标准。Shi 等^[6]研究了机器参数 PFN 和 IC 的改变对 HT 输出和能量的影响,结果显示 IC 值平均增加 1.0% 则能量比(D_{20}/D_{10})降低 0.3%;PFN 从 4.00 V 增加到 4.10 V,能量比只有 0.5% 的变化,而 IC 从 3.5 V 增加到 3.7 V,能量变化了 2.0%,改变能量比更多地依赖于 IC;并且在正常剂量率区域内,输出和能量与 IC 和 PFN 呈线性关系。van de Vondel 等^[7]研究了磁控管电流和 IC 对能量比(D_{20}/D_{10})和 Profile 的影响,结果发现磁控管电流变化 14 A 则平均能量比改变 1.63%,离轴 10 cm 处的剂量改变 1.9%;IC 变化 334.5 mA 引起平均能量比有 1.43% 的变化,离轴 10 cm 处的剂量改变 3%;但认为磁控管电流和 IC 不是引起能量变化主要因素;对 Profile 的研究结果显示 IC 对 Profile 的影响程度高于磁控管电流。对于射线质的影响,本研究结果显示 IC 对射线质的

影响程度最大,与 Shi 等^[6]和 van de Vondel 等^[7]的研究结果一致。本研究结果与 HT 的加速器中电子产生和加速的原理,以及 MLC 和 Jaw 的结构特点密切相关。HT 加速器部分由电子枪和加速管组成,电子枪将电子注入加速管中,经加速管加速、打靶产生 X 光子。电子枪由加热极(Heater)、阴极(Cathode)和栅极(Grid)3 部分构成,Heater 给 Cathode 提供能量,产生的电子进入 Cathode 和 Grid 之间的空间电荷区并不断积累,当 Grid 上的偏压达到一个正确值时电子枪才将电子注入到加速管中。IV 加到 Cathode 上,配合 Grid 将电子存储在空间电荷区;IC 加到 Grid 上,使 Grid 上的偏压值达到正确值,使电子注入到加速管中。IC 决定着注入到加速管中的电子数量,也就是说 IC 决定着打靶的电子数量,进而决定产生的 X 光子的能量,所以 IC 对射线质的影响最大。HT 加速管是驻波加速管,PFN 决定着磁控管脉冲输出幅度,与电子加速-耦合的频率相匹配时才能最大程度加速电子,所以影响电子打靶的速度,从而影响能量。对于 Profile 的影响原因:(1) IV 通过配合栅极来控制打靶的电子束流的束斑大小,所以对 Profile 有影响;Profile 是射野横截面剂量分布,会受到能量的影响^[1],所以 IC 和 PFN 对 Profile 必然有影响。(2) 对于在 x 和 y 方向、主射野区与和半影区的影响不同,是由 HT 的 MLC 和 Jaw 的结构特点决定的。HT 中 MLC 决定着射野在 x 方向上的宽度,Jaw 决定着射野在 y 方向上的宽度。测试时 MLC 全开,射野在 x 方向上的宽度为 40 cm,能量对 Profile 影响程度十分明显;测试时 Jaw = 5 cm,射野在 y 方向上的宽度为 5 cm,相对于 x 方向的 40 cm,尺寸相对较小,导致准直器产生的物理半影非常明显。

综上所述,调整 IC、IV 或 PFN 的值都会引起射线质和 Profile 的变化,整体上对 Profile 影响显著程

度大小依次为 IC、PFN 和 IV。在调节射线质时,应以调节 IC 值为主,PFN 作为辅助进行微调;在调节 Profile 时,主射野区域应以调节 IC 为主、IV 为辅,半影区的调节只涉及到 y 轴 Profile,应调节 IV。此规律对于射线质和 Profile 的调节和 QC 具有指导性作用,能减少 QC 盲目性,节省时间。

参 考 文 献

- [1] 胡逸民,张红志,戴建荣.肿瘤放射物理学[M].北京:原子能出版社,1999:612.
Hu YM, Zhang HZ, Dai JR. Radiation oncology physics [M]. Beijing: Atomic energy press, 1999:612.
- [2] Kutcher GJ, Coia L, Gillin M, et al. Comprehensive QA for radiation oncology: report of AAPM radiation therapy committee task group 40 [J]. Med Phys, 1994, 21 (4): 581-618. DOI: 10.1118/1.597316.
- [3] Klein EE, Hanley J, Bayouth J, et al. Task group 142 report: Quality assurance of medical accelerators [J]. Med Phys, 2009, 36 (9): 4197-4212. DOI: 10.1118/1.3190392.
- [4] Langen KM, Papanikolaou N, Balog J, et al. QA for Helical Tomotherapy: report of the AAPM task group 148 [J]. Med Phys, 2010, 37(9): 4817-4853. DOI: 10.1118/1.3462971.
- [5] 马林,王连元,周桂霞. TomoTherapy 肿瘤断层放射治疗[M].成都:四川科学技术出版社,2010:89-142.
Ma L, Wang LY, Zhou GX. TomoTherapy tumor tomotherapy [M]. Chengdu: Sichuan science and technology press, 2010:89-142.
- [6] Shi C, Gutiérrez A, Liu Y, et al. SU-FF-T-250: impact of pulse forming network (PFN) and injection current (IC) parameters on output and energy variations of Helical Tomotherapy [J]. Med Phys, 2009, 36(6): 2578. DOI: 10.1118/1.3181726.
- [7] van De Vondel I, Tournel K, Duchateau M, et al. SU-E-T-457: influence of changing magnetron and injector current on the beam characteristics of a tomotherapy Hi-art system [J]. Med Phys, 2011, 38(6): 3594. DOI: 10.1118/1.3612411.
- [8] Wagner T, Langen K, Poole D, et al. SU-FF-T-194: evaluation of a commercial diode array (TomoDose) for tomotherapy beam profile measurements [J]. Med Phys, 2005, 32 (6): 1994. DOI: 10.1118/1.1997922.
- [9] Langen KM, Meeks SL, Poole DO, et al. Evaluation of a diode array for QA measurements on a Helical Tomotherapy unit [J]. Med Phys, 2005, 32(11): 3424-3430. DOI: 10.1118/1.2089547.
- [10] Chen C, Meadows J, Bichay T. TU-EE-A2-05: TomoDose: a daily quality assurance device for Helical Tomotherapy [J]. Med Phys, 2006, 33(6): 2207. DOI: 10.1118/1.2241597.

(收稿日期:2016-07-18)