

鼻咽癌 IMRT 中实际机架角度对计划执行准确度影响

孙彦泽 周钢 陈列松 钱建军 朱雅群 田野

215004 苏州大学附属第二医院放疗科 苏州大学肿瘤放射治疗学研究所

通信作者:周钢,Email:zhougang0626@163.com

DOI:10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2017.10.016

【摘要】 目的 探讨鼻咽癌 IMRT 中实际机架角度对治疗计划执行准确度的影响,以寻求减少这种影响的方法。**方法** 应用 Pinnacle 计划系统对 27 例鼻咽癌患者设计 IMRT 计划,每个计划在 0~360°范围以 30°为间隔选取 8 个射野。按照射野参数分为 A、B 两组计划,A 组设置最小子野面积 5 cm² 和最小跳数 5 MU,最大子野数 80;B 组设置最小子野面积 8 cm² 和最小跳数 8 MU,最大子野数 60。用 Mapcheck2 分别在归零和实际角度验证射野的 γ 通过率(3%/3 mm、2%/2 mm),比较两种方式验证结果差别(Δ 值),分析 Δ 值与射野角度及计划设计射野参数之间关系。配对样本 *t* 检验组间差异。**结果** A 组计划采用 3%/3 mm 标准时 Δ 平均值为 0.90%,除 270°、300°、330°外其他角度两种验证方式结果比较均不同($P=0.000\sim 0.007$);采用 2%/2 mm 标准时 Δ 平均值为 2.72%,除 300°外均不同($P=0.000\sim 0.019$)。B 组计划采用 3%/3 mm 标准时 Δ 平均值为 0.40%,除 300°外其他角度两者比较均相近($P=0.052\sim 0.639$);采用 2%/2 mm 标准时 Δ 平均值为 1.52%,除 210°、240°、270°、300°外均相近($P>0.05$)。采用 B 组计划参数设计时 Δ 明显减少,两种方式验证结果更加吻合,治疗计划的执行准确度提高。**结论** 与归零角度验证方式相比,重力等因素会导致实际角度验证的 γ 通过率降低,这种影响的大小与射野角度无明显的相关性但与计划设计时射野的设置参数有关。在设计鼻咽癌 IMRT 计划时应尽可能减少总子野数目、增大最小子野面积及最小跳数,提高治疗计划执行准确度。

【关键词】 机架角度; 计划优化; 剂量准确度; 鼻咽肿瘤/调强放射疗法

基金项目:江苏省科技厅临床医学科技专项(BL2014040);苏州市科技计划项目(SS201642、SYSD2015083)

Impact of actual gantry angle on accuracy of intensity-modulated radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma

Sun Yanze, Zhou Gang, Chen Liesong, Qian Jianjun, Zhu Yaqun, Tian Ye

Department of Radiotherapy & Oncology, Second Affiliated Hospital of Soochow University, Institute of Radiotherapy & Oncology, Soochow University, Suzhou 215004, China

Corresponding author: Zhou Gang, Email: zhougang0626@163.com

【Abstract】 Objective To investigate the impact of actual gantry angle on the accuracy of intensity-modulated radiotherapy (IMRT) for nasopharyngeal carcinoma (NPC). **Methods** A total of 27 patients with NPC were enrolled in this study. IMRT plans were designed with Pinnacle treatment planning system (TPS), and 8 beams with an interval of 30° (within 0°-360°) were selected for each plan. These plans were divided into plan A and plan B according to the beam parameters. In plan A, the minimum sub-field area was 5 cm², the minimum number of sub-field monitor unit (MU) was 5, and the maximum sub-field number was 80; in plan B, the minimum sub-field area was 8 cm², the minimum number of sub-field MUs was 8, and the maximum sub-field number was 60. The gamma passing rate using the criteria of 3%/3 mm and 2%/2 mm at actual and zero degree gantry angles were calculated using Mapcheck 2 device for dose verification, and were compared with the paired *t*-test. The relationship between the above differences (Δ value) and the beam angle or the beam parameters was also analyzed. **Results** In plan A with the criteria of 3%/3 mm, the beams were significantly different ($P=0.000\sim 0.007$) except for at angles of 270°, 300°, and 300°, and the mean Δ value was 0.90%; under the criteria of 2%/2 mm, all beams were significantly different ($P=0.000\sim 0.019$) except for at an angle of 300°, and the mean Δ value was 2.72%. In plan B with the criteria of 3%/

3 mm, the beams showed no significant difference ($P=0.052-0.639$) except for at an angle of 300° , and the mean Δ value was 0.40%; under the criteria of 2%/2 mm, all beams showed no significant difference ($P>0.05$) except for at angles of 210° , 240° , 270° , and 300° , and the mean Δ value was 1.52%. When the plan B parameters were used, the Δ value was reduced; the results of two verification methods were more consistent, so the accuracy was also improved. **Conclusions** Compared with the validation method at zero degree gantry angle, the validation method at an actual gantry angle is associated with reduced gamma passing rate because of some factors such as gravity, which is not significantly related to the beam angle, but the beam parameters. In the design of IMRT plans for NPC, the total number of sub-fields should be decreased as far as possible, and the minimum sub-field area and the minimum number of MU should be increased, so as to improve the accuracy of treatment plans.

【Key words】 Gantry angle; Plan optimization; Dose accuracy; Nasopharyngeal neoplasms/intensity modulated radiotherapy

Fund programs: Jiangsu Provincial Special Program of Medical Science (BL2014040); Suzhou Science and Technology Development Program (SS201642, SYSD2015083)

IMRT 目前已成为鼻咽癌放疗常规技术, 由于其技术复杂, 在整个治疗过程中存在多种不确定因素, 最终可能造成患者接受的剂量与计划设计结果不一致^[1-2], 因此需要在治疗实施前对 IMRT 计划照射的剂量分布进行验证。临床上常采用的二维探测器阵列在归零机架角度测量方式能够验证治疗计划系统是否准确地进行了剂量计算, 检验了包括加速器数据建模、患者图像数据采集以及剂量算法等带来的误差大小, 但是忽略了加速器在不同机架角时因重力、惯性、摩擦力等因素对多叶准直器叶片运动产生的影响^[3-4]。因此, 本研究通过对鼻咽癌 IMRT 计划在机架角度归零和实际机架角度两种条件下的验证结果进行比较, 两者差别即反映了加速器实际机架角度对射野剂量分布影响。通过分析这种差别与射野角度及计划设计射野参数之间关系, 探讨提高治疗计划执行准确度方法。

材料与方 法

1. 主要设备和仪器: 医科达公司 Synergy 直线加速器, 内置 40 对等中心宽度为 1 cm 的多叶准直器, 选用 6 MV X 射线。计划设计采用 Pinnacle 放疗计划系统 (Version 9. 8, Philips), DMPO 的优化类型。二维电离室矩阵采用 Sun Nuclear 公司 Mapcheck2 剂量验证系统, 有 1 527 个 N 型半导体探头, 探测区域大小为 $32\text{ cm}\times 26\text{ cm}$, 探头有效探测面积为 0.64 mm^2 , 间距为 7.07 mm。

2. 病例选择和计划设计: 选取 2015 年 6—9 月在我科收治的 27 例鼻咽癌患者, 使用 Pinnacle 计划系统设计 IMRT 计划, 靶区处方剂量 PTV_{m} 为 70 Gy 分 30 次, PTV_{nd} 为 64~66 Gy 分 30 次, PTV_1 为 60 Gy 分 30 次, PTV_2 为 54 Gy 分 30 次, OAR 剂量限值参照相关指南。每个计划在 $0\sim 360^\circ$ 以 30° 为间隔选取 8 个射野共面照射。9 例患者为一组, 第 1 组射野角

度分别为 0° 、 60° 、 90° 、 180° 、 210° 、 270° 、 300° 、 330° ; 第 2 组为 30° 、 60° 、 120° 、 150° 、 180° 、 240° 、 270° 、 300° , 第 3 组为 0° 、 30° 、 90° 、 120° 、 150° 、 210° 、 240° 、 330° 。治疗计划按照射野参数分为两组, A 组设置最小子野面积 5 cm^2 , 最小机器跳数 5 MU, 最大子野数为 80 个; B 组设置最小子野面积 8 cm^2 , 最小机器跳数 8 MU, 最大子野数为 60 个。共计 54 个治疗计划, 432 个射野。

3. 二维半导体探测器固定与校准: 首先使用免洗胶片检查 MLC 叶片位置的准确性, 调用条状野叠加照射的治疗文件照射胶片, 通过阅现场片和将现场片与参考片比较的方法确定叶片位置误差, 允许误差在 1 mm 范围内。在常规条件下对加速器进行输出剂量校准后, 将二维探测器矩阵通过固定装置挂在机头上 (如图 1)。源到探测器平面的距离 $SDD=77.2\text{ cm}$, 调节水平和左右方向旋钮对准中心位置, 探测器表面放 2 cm 固体水模并固定。事先对探测器在 $SDD=77.2\text{ cm}$ 处进行了均匀性和绝对剂量的标定。在进行射野剂量验证前使用标准 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 的方野每隔 30° 进行照射, 比较 Profile 曲线的重合度并计算所有角度下 50% 剂量区域射野边界 (x 、 y 轴方向) 最大偏移量, 以验证固定装置的稳定性。

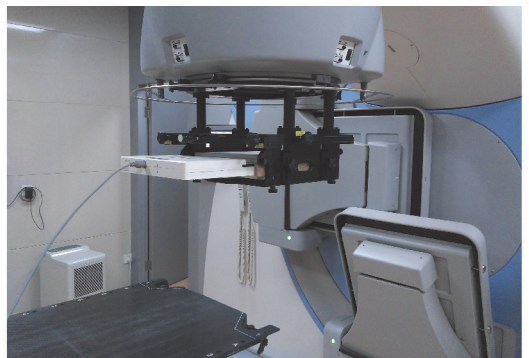


图 1 Mapcheck2 通过固定附件悬挂在加速器机头上

4.归零角度和实际角度计划验证:归零角度计划验证利用医科达 Synergy 加速器的超越功能,将治疗计划的射野在保持其子野形状和机器跳数不变的情况下将机架角转到 0°照射;实际角度计划验证保持计划中的所有射野角度不作任何改变按实际角度照射。以治疗计划系统计算的剂量分布作为参考,分别与这两种方式测量的剂量分布结果进行绝对剂量比较,采用 γ 通过率 (3%/3 mm、2%/2 mm 标准) 方法评价验证结果。以公式 $\Delta = (M - N) / M \times 100\%$ 计算每个射野采用两种方式验证通过率的差异,式中 M 为采用归零角度验证的 γ 通过率, N 为实际角度验证的 γ 通过率。 Δ 值较小说明两种方式的验证结果接近,两种方式射野的执行情况吻合,实际机架角度照射对该射野执行准确度的影响小;反之, Δ 值较大则说明两种方式射野的执行情况差异较大,实际机架角度对该射野执行准确度的影响大。

5.统计方法:采用 SPSS 19.0 软件进行配对样本 t 检验, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

1.固定装置稳定性检测:图 2 为加速器开 20 cm \times 20 cm 的方野,在每隔 30°机架角探测器矩阵所测得射野 x 、 y 轴方向 Profile 曲线,所有角度曲线的吻合度较高。以最大剂量的 50% 作为射野边界,计算其他各个角度与 0°角的 x 、 y 轴方向射野边界的偏差均在 0.1 mm 以内,探测器固定装置在各个角度具有很好的稳定性。

2.归零角度和实际角度计划验证结果:表 1 为 A 组计划的 216 个射野归零角度和实际角度验证 γ 通过率的比较。结果显示采用 3%/3 mm 标准归零角度与实际角度验证的平均 γ 通过率分别为 97.63% 和 96.75%, Δ 平均值为 0.90%, 其中除 0°、270°、300°、330° 机架角外两者比较均不同;采用 2%/2 mm 标准时归零角度与实际角度验证的平均 γ 通过率分别为 86.29% 和 83.94%, Δ 平均值为 2.72%, 其中除机架角为 0°、300° 外两者均不同。表

表 1 A 组计划 216 个射野归零角度与实际角度验证时 γ 通过率 (%) 的比较

机架角度	3%/3mm 标准			P 值	2%/2mm 标准			P 值
	归一角度	实际角度	变化		归一角度	实际角度	变化	
0°	98.29±1.07	98.13±0.84	0.16	0.223	87.77±2.59	86.97±2.58	0.91	0.074
30°	96.79±1.97	95.88±2.12	0.94	0.003	84.21±3.89	82.48±3.72	2.05	0.000
60°	97.93±1.25	96.11±1.67	1.86	0.000	84.87±3.12	81.93±3.89	3.43	0.000
90°	96.94±2.16	94.84±1.85	2.17	0.000	86.49±3.00	81.16±3.35	6.16	0.000
120°	97.73±1.87	96.38±2.18	1.38	0.000	87.00±3.68	82.55±3.52	5.11	0.000
150°	98.14±1.60	96.83±1.41	1.33	0.000	86.71±3.20	83.84±2.88	3.31	0.000
180°	98.03±1.05	97.36±0.98	0.68	0.000	88.04±3.05	85.08±3.30	3.36	0.000
210°	97.91±1.05	97.21±1.07	0.71	0.001	86.94±3.70	84.56±3.80	2.74	0.000
240°	97.91±1.30	97.41±1.44	0.51	0.007	86.79±2.89	85.32±2.69	1.69	0.019
270°	97.14±1.82	96.66±1.86	0.49	0.132	86.78±2.73	85.14±3.12	1.89	0.005
300°	97.37±1.74	97.34±1.56	0.03	0.867	84.89±4.91	84.80±4.95	0.11	0.850
330°	97.41±1.53	96.88±2.12	0.54	0.082	85.03±3.34	83.43±3.36	1.88	0.007

表 2 B 组计划归零角度与实际角度验证时 γ 通过率 (%) 的比较

机架角度	3%/3mm 标准			P 值	2%/2mm 标准			P 值
	归一角度	实际角度	变化		归一角度	实际角度	变化	
0°	97.62±1.18	97.63±1.27	0.01	0.959	84.96±2.74	84.72±2.47	0.28	0.643
30°	96.67±1.79	96.27±1.91	0.04	0.273	83.54±3.55	83.47±3.44	0.08	0.911
60°	98.17±0.85	98.02±1.30	0.15	0.639	86.74±1.61	86.56±1.65	0.21	0.603
90°	97.62±1.69	96.92±2.16	0.72	0.052	87.46±3.43	86.37±3.41	1.25	0.089
120°	97.46±2.14	97.48±1.51	0.02	0.199	86.82±3.97	85.86±3.80	1.11	0.077
150°	97.81±1.28	97.48±1.51	0.34	0.319	85.61±2.50	84.78±3.78	0.97	0.197
180°	98.52±0.77	98.04±1.19	0.49	0.058	87.13±2.97	86.09±3.63	1.19	0.093
210°	98.19±1.12	97.75±1.23	0.45	0.082	87.37±3.01	84.69±4.46	3.07	0.000
240°	98.04±1.51	97.48±0.90	0.57	0.052	87.51±3.21	84.58±3.62	3.35	0.000
270°	97.99±0.93	97.28±1.46	0.72	0.091	87.24±2.80	85.00±3.59	2.57	0.000
300°	98.31±1.46	97.55±1.52	0.77	0.009	87.13±3.93	84.41±4.95	3.12	0.000
330°	97.38±1.58	96.84±1.51	0.55	0.109	83.05±2.58	82.22±4.66	1.00	0.387

2 为 B 组计划的比较结果,采用 3%/3 mm 标准归零角度与实际角度验证的平均 γ 通过率分别为 97.82% 和 97.40%, Δ 平均值为 0.40%, 除机架角 300° 外两者比较均相近;采用 2%/2 mm 标准归零角度与实际角度验证的平均 γ 通过率分别为 86.21% 和 84.90%, Δ 平均值为 1.52%, 除机架角为 210°、240°、270°、300° 外均相近。可见,采用 B 组计划参数设计时射野在归零与实际角度条件下验证结果的差异 Δ 明显减少。

讨 论

鼻咽癌是头颈部常见的恶性肿瘤之一,由于其解剖结构复杂,重要 OAR 多且邻近靶区等原因,IMRT 技术目前已经成为鼻咽癌的标准治疗手段^[5]。IMRT 技术利用 MLC,通过使用较多的子野对束流强度分布进行调整,以达到靶区剂量适形度高、均匀性好的同时更好地保护 OAR 的目的。由于

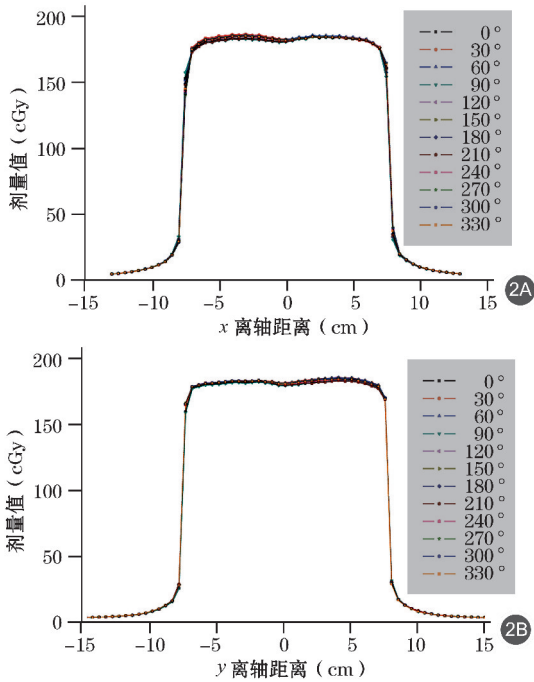


图 2 不同机架角度探测器所测 20 cm×20 cm 射野在 x (2A) 轴和 y (2B) 轴方向的 profile 曲线

技术复杂,在 IMRT 的计划设计及计划实施阶段都可能存在误差,最终造成患者接受的剂量与计划设计结果不一致,导致疗效的降低或加重正常组织的损伤^[2]。因此,在治疗实施前对放疗计划进行剂量验证是保证鼻咽癌 IMRT 安全可靠的重要环节。

治疗计划在按照射野实际角度执行的过程中将受到重力、惯性、摩擦力等因素的影响,这是计划系统无法模拟的。这些因素会造成 MLC 的走位与治疗计划结果之间的差别,是影响治疗计划执行准确度的重要因素。将所有射野归一到 0° 测量无法验证治疗设备(包括加速器和多叶准直器)在不同机架角度时的误差导致的输出剂量差异^[6]。已有文献报道,通过对 IMRT 计划使用 Mapcheck 进行射野角度归零和 Delta4 进行射野实际角度的验证进行比较,得出两种验证结果的差异具有统计学意义^[7]。该方法虽然也比较了这两种方式的验证结果,但半导体和电离室探测器两者的测量本身就存在差别,在使用 Delta4 验证水平线以下的射野时还会受到治疗床的影响。也有使用 EPID 进行剂量验证的报道^[8],但 EPID 受射线质、剂量率、伪影等因素的影响较大,在重力作用下 x、y 轴方向有一定位移需要校正。MapCheck2 是新一代的二维半导体矩阵,具有剂量线性、重复性好的剂量学特征且有较高灵敏度和分辨率,二维半导体矩阵可以替代胶片及电离室进行 IMRT 的剂量验证^[9-10]。本研究通过固定附件将

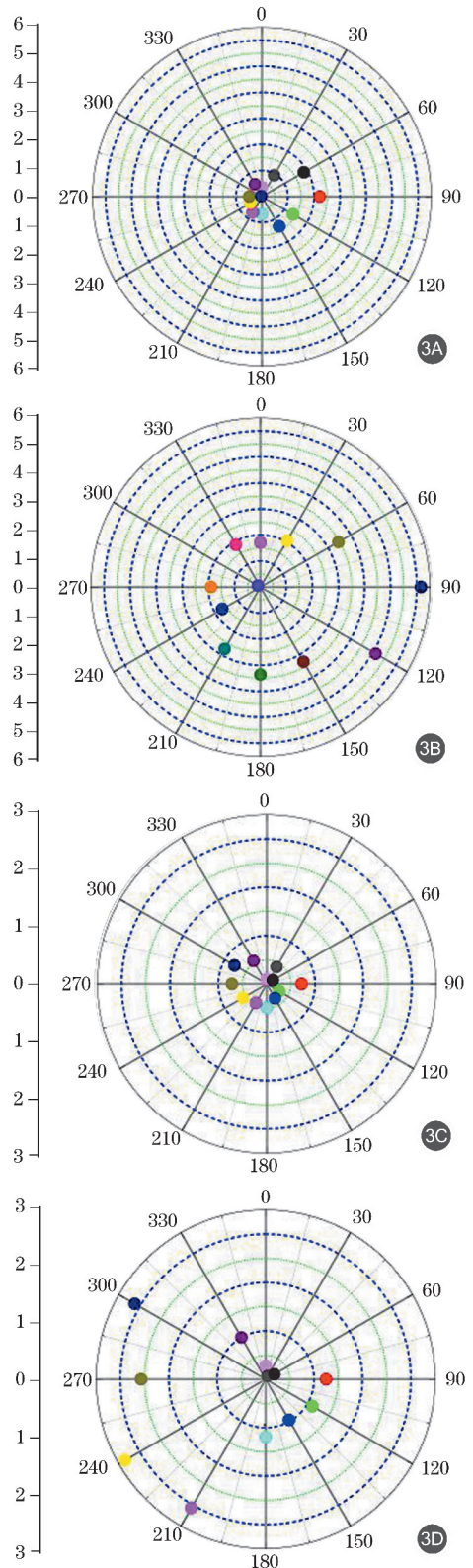


图 3 不同机架角度归零和实际角度验证结果的 Δ 分布图 (3A、3B 为 A 组计划分别采用 3%/3 mm、2%/2 mm 标准,3C、3D 为 B 组计划分别采用 3%/3 mm、2%/2 mm 标准)

MapCheck2 固定在加速器机头上,射野在归零和实际角度照射过程中探测器矩阵面板始终垂直于射线入射方向,且在机架旋转过程中位置偏差小、稳定性好。

IMRT 计划采用归零机架角度和实际机架角度两种方式验证结果的差异大小,体现了实际机架角度对加速器执行治疗计划准确性的影响程度。

本研究结果显示,在鼻咽癌 IMRT 中以治疗计划系统计算的剂量分布作为参考,非零角度的射野在归零角度验证时的 γ 通过率均高于实际角度验证结果,这与戴越等^[11]的研究结论一致。在射野参数设置为最小子野面积 5 cm²,最小机器跳数 5 MU,最大子野数 80 个的条件下优化的计划结果中采用 3%/3 mm 和 2%/2 mm 标准时两种方式的验证结果分别相差 0.90% 和 2.72%,而且上述差别在大多数机架角都具有统计学意义;这表明计划射野在实际机架角度执行时的 γ 通过率有较大幅度的下降,对计划执行的准确度影响较大;当射野参数设置为最小子野面积 8 cm²,最小机器跳数 8 MU,最大子野数 60 个时,采用 3%/3 mm 和 2%/2 mm 标准时两种方式验证结果分别相差 0.40% 和 1.52%,而且这种差异在大多数机架角度无统计学意义;表明实际机架角度对射野剂量分布的影响减小,两种方式验证结果更加吻合,治疗计划的执行准确度提高。Azimi 等^[12]也提出 IMRT 技术采用 MLC 形成多个子野,在子野数过多、面积过小时会引入更大的剂量不确定性。本研究还发现,在执行不同射野参数设置的治疗计划时,并不存在某些固定角度上两者偏差一直较高或者较低的现象。这可能与加速器在实际机架角度照射时所受影响的因素较多,除了受到重力、惯性、摩擦力等还受到 MLC 叶片到位重复性、叶片校准程序和光射野一致性等与角度无关的因素影响。

总之,加速器在实际机架角度照射时 MLC 的走位与计划系统计算结果之间的差别是影响治疗计划执行准确度的重要因素,这种影响的大小与射野角度之间无明显相关但与计划设计时的射野设置参数有关。在能满足临床要求的前提下,尽量减少治疗计划的总子野数目,增大最小子野面积及最小跳数,降低总子野序列的“零碎”程度,将有利于提高射野在实际角度与归零角度两种方式执行结果的吻合度,减少实际机架角度对射野执行的影响,提高治疗计划执行的准确度。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Bai S, Li GJ, Wang MJ, et al. Effect of MLC leaf position, collimator rotation angle, and gantry rotation angle errors on intensity-modulated radiotherapy plans for nasopharyngeal carcinoma [J]. *Med Dosim*, 2013, 38 (2): 143-147. DOI: 10.1016/j.meddos.2012.10.002.
- [3] Nelms BE, Zhen HM, Tomé WA. Per-beam, planar IMRT QA passing rates do not predict clinically relevant patient dose errors [J]. *Med Phys*, 2011, 38 (2): 1037-1044. DOI: 10.1118/1.3544657.
- [4] LoSasso T. IMRT delivery performance with a varian multileaf collimator [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2008, 71 (1 Suppl): S85-S88. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2007.06.082.
- [5] Kam MKM, Chau RMC, Suen J, et al. Intensity-modulated radiotherapy in nasopharyngeal carcinoma: dosimetric advantage over conventional plans and feasibility of dose escalation [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2003, 56 (1): 145-157. DOI: 10.1016/S0360-3016(03)00075-0.
- [6] 李齐林, 邓小武, 陈立新, 等. 二维半导体探测器阵列在调强放射治疗合成剂量验证中的应用 [J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2011, 31 (3): 359-362. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2011.03.030.
Li QL, Deng XW, Chen LX, et al. The application of a 2D diode array in verifying the composite dose distribution of intensity modulated radiation therapy [J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2011, 31 (3): 359-362. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2011.03.030.
- [7] 张伟, 马照, 邵鹏, 等. Delta4 的临床应用研究 [J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2010, 19 (1): 48-51. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2010.01.017.
Zhang W, Ma Z, Shao P, et al. Clinical application of Delta4 [J]. *Chin J Radiat Oncol*, 2010, 19 (1): 48-51. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2010.01.017.
- [8] Monti AF, Berlusconi C, Gelosa S. Gantry angle dependence in IMRT pre-treatment patient-specific quality controls [J]. *Phys Med*, 2013, 29 (2): 204-207. DOI: 10.1016/j.ejmp.2012.01.002.
- [9] Buonamici FB, Compagnucci A, Marrazzo L, et al. An intercomparison between film dosimetry and diode matrix for IMRT quality assurance [J]. *Med Phys*, 2007, 34 (4): 1372-1379. DOI: 10.1118/1.2713426.
- [10] Jursinic PA, Nelms BE. A 2-D diode array and analysis software for verification of intensity modulated radiation therapy delivery [J]. *Med Phys*, 2003, 30 (5): 870-879. DOI: 10.1118/1.1567831.
- [11] 戴越, 胡春红, 李小东, 等. MatriXX 两种 IMRT 剂量验证方法的比较分析 [J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2013, 22 (4): 312-314. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2013.04.014.
Dai Y, Hu CH, Li XD, et al. Analyse two kinds of intensity-modulated radiotherapy verification methods comparatively by using the MatriXX [J]. *Chin J Radiat Oncol*, 2013, 22 (4): 312-314. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2013.04.014.
- [12] Azimi R, Alaei P, Higgins P. The effect of small field output factor measurements on IMRT dosimetry [J]. *Med Phys*, 2012, 39 (8): 4691-4694. DOI: 10.1118/1.4736527.

(收稿日期: 2016-11-04)