

摆位误差对立体定向放射治疗计划剂量学验证的影响

李玉成^{1,2}, 陈维军², 单国平³, 赵凯³, 史国栋³, 邵凯南³, 李浦³, 杨一威³, 陈祥¹, 程晶晶¹

1. 南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 浙江省人民医院放疗科, 浙江 杭州 311400; 3. 浙江省肿瘤医院放射物理室, 浙江 杭州 311400

【摘要】目的:分析立体定向放射治疗(SBRT)患者中摆位误差对剂量学验证结果的影响。**方法:**分别对14例肺癌患者进行SBRT计划设计,并将计划移植到Delta4剂量验证模体中进行剂量计算,在Varian Trilogy加速器上进行照射,通过移动治疗床模拟患者左(+X)、右(-X)、头(+Y)、脚(-Y)、腹(+Z)、背(-Z)方向上1、3、5 mm的摆位误差,对这6个方向 γ 通过率的相关性进行分析,从而在 $\gamma(3\%/3\text{ mm}, 2\%/2\text{ mm})$ 两个标准情况下验证摆位误差对剂量学验证通过率的影响。**结果:** $\gamma(2\%/2\text{ mm})$ 参数下仅摆位误差为1 mm时的右方向和脚方向与原计划相比差异无统计学意义($P>0.05$); $\gamma(3\%/3\text{ mm})$ 参数下摆位误差为1 mm时所有方向与原计划相比差异均无统计学意义($P>0.05$)。当摆位误差为1 mm时各方向的两个标准的 γ 通过率均 $>90\%$;当摆位误差为3 mm时, $\gamma(3\%/3\text{ mm})$ 的右、脚、腹和背方向的 γ 通过率 $>90\%$,其它方向以及 $\gamma(2\%/2\text{ mm})$ 标准下的 γ 通过率均 $<90\%$;当摆位误差为5 mm时,各方向的两个标准的 γ 通过率均 $<90\%$,头方向 $\gamma(2\%/2\text{ mm})$ 通过率降为 $(35.29\pm 8.40)\%$ 。**结论:**摆位误差对于SBRT计划的剂量学验证有较大的影响,标准越严格,摆位误差对验证通过率的影响越明显。

【关键词】立体定向放射治疗;摆位误差;剂量验证; γ 通过率;肺癌

【中图分类号】R730.55

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2018)08-0869-05

Effects of setup errors on dosimetric verification of stereotactic body radiotherapy plan

LI Yucheng^{1,2}, CHEN Weijun², SHAN Guoping³, ZHAO Kai³, SHI Guodong³, SHAO Kainan³, LI Pu³, YANG Yiwei³, CHEN Xiang¹, CHENG Pinjing¹

1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China; 2. Department of Radiotherapy, Zhejiang Provincial People's Hospital, Hangzhou 311400, China; 3. Department of Radiation Physics, Zhejiang Cancer Hospital, Hangzhou 311400, China

Abstract: Objective To analyze the effects of setup errors on dosimetric verification of stereotactic body radiotherapy (SBRT) in patients with lung cancer. **Methods** SBRT plans were designed for 14 patients with lung cancer, and then transplanted to Delta4 phantom for dose calculation. The irradiation was implemented on Varian Trilogy linear accelerator. The setup errors were simulated by moving the treatment couch to the left (+X), right (-X), head (+Y), foot (-Y), ventral (+Z), back (-Z) by 1, 3 and 5 mm. The relationships of gamma passing rate in the 6 directions were analyzed for verifying the effects of setup errors on dose verification under different gamma criteria (3%/3 mm, 2%/2 mm). **Results** Only when the setup error was 1 mm, the differences in the right and foot directions had no statistical significance as compared with original plan under the gamma criterion of 2%/2 mm ($P>0.05$), and no statistical significance was found in all directions under the gamma criterion of 3%/3 mm ($P>0.05$). When the setup error was 1 mm, the gamma passing rates were all greater than 90% under the two gamma criteria (3%/3 mm, 2%/2 mm). When the setup error was 3 mm, only the gamma passing rates in the direction of right, foot, ventral and back were greater than 90%. When the setup error was 5 mm, the gamma passing rates were all less than 90% under the two gamma criteria (3%/3 mm, 2%/2 mm), and the total passing rate of head direction were decreased to $(35.29\pm 8.40)\%$. **Conclusion** Setup error has great effects on the dosimetric verification of SBRT plan. The finer the gamma criteria are, the more obvious the effects of setup error on the gamma passing rate are.

Keywords: stereotactic body radiotherapy; setup error; dosimetric verification; gamma passing rate; lung cancer

【收稿日期】2018-02-27

【基金项目】国家重点研发计划(2017YFC0113201);浙江省医药卫生科技计划项目(2017PY014)

【作者简介】李玉成, 硕士研究生, 研究方向:放射物理治疗, E-mail: liyucheng0402@163.com

【通信作者】程晶晶, 副教授, 研究方向:放射物理治疗, E-mail: nhuchpj@aliyun.com

前言

自20世纪90年代开展体部立体定向放射治疗(Stereotactic Body Radiotherapy, SBRT)技术以来,由于其“三高一低”,即高精度、高剂量、高治疗增益比和靶区周围剂量低的特点越来越受到放疗医生的青睐^[1-2]。基于这些特点使得它对照射摆位和照射野的准确性要求也就越高,因此SBRT的实施需要保证整个治疗过程的高精度要求。如果不能尽可能减小摆位误差的影响,其技术优势就不能体现出来。国内外许多学者就普通调强摆位误差对剂量分布的影响做了较多研究,但面向SBRT摆位误差的影响则报道相对较少^[3-8]。本研究通过模拟不同的摆位误差大小来分析SBRT计划中摆位误差对剂量验证 γ 通过率的影响。

1 材料与方法

1.1 病历选取

随机选取2017年1~6月就诊的14例肺癌患者,男性9例,女性5例;年龄31~85岁,中位数72岁;肿瘤体积为 $(39.28\pm24.67)\text{cm}^3$;所有患者卡氏评分>70分。

1.2 CT定位及靶区勾画

使用飞利浦32排大孔径CT模拟定位机(Philips, BrillianceTM CT Big Bore, 荷兰)对患者进行4DCT扫描,所有患者采取仰卧位,扫描层厚为3 mm,由医生根据ICRU报告进行靶区勾画^[9-10]。

1.3 计划设计及剂量验证

采用RayStation v4.5.1.14治疗计划系统(瑞典),分别为14例患者设计SBRT计划。使用容积旋转调强技术,统一使用计划系统提供的“Dual Arc”功能生成顺时针和逆时针方向的对偶弧^[11]。左肺患者使用330°到180°的对偶弧,右肺患者使用182°到30°的对偶弧,每隔2°一个控制点,两弧机头角度为10°,X线能量为6 MV,剂量网格为0.2 cm/voxel,计划制定完成后移植到Delta4模体中重新计算得到QA计划,并使用Varian公司的Trilogy加速器对Delta4模体进行照射,应用ScandiDos软件提供的 γ 分析法对Delta4测试的结果与TPS中模体计划的剂量分布进行比较。

1.4 摆位误差的模拟

在每次模拟之前都需要对加速器机械参数进行质量验证,保证其都在允许范围内,剂量验证时通过移动治疗床的位置分别向患者的左、右、头、脚、腹、背方向分别移动1、3、5 mm来模拟摆位误差并获取剂量验证结果。

1.5 统计学方法

剂量分布采用 γ (3%/3 mm和2%/2 mm)两种标准对总的 γ 通过率进行分析,并使用SPSS 19.0软件分别对原计划和左(+X)、右(-X)、头(+Y)、脚(-Y)、腹(+Z)、背(-Z)方向通过率的相关性进行配对样本的 t 检验, $P<0.05$ 表示有统计学意义,并使用GraphPad Prism 5作图。

2 结果

左、右、头、脚、腹、背方向的不同标准下不同摆位误差的相关性分析见表1。SBRT原计划分别与左、右、头、脚、腹、背方向的 γ 通过率的相关性见表2。图1~4为头方向摆位误差为0、1、3、5 mm时Delta4分析界面的 γ (2%/2 mm)通过率的结果。不同标准下的摆位误差与 γ 通过率的变化趋势见图5~图6,由图可得 γ (2%/2 mm)标准下的 γ 通过率的变化趋势比 γ (3%/3 mm)变化要明显。表3为在 γ (2%/2 mm)标准下没有位移时的单个弧与总弧的 γ 通过率。

表1 不同位移方向、不同误差下的 γ 通过率(% , $\bar{x}\pm s$)

Tab.1 Gamma passing rates with difference setup errors in difference directions (% , Mean \pm SD)

Setup error/mm	Direction	3%/3 mm	P value	2%/2 mm	P value
1	Left	97.99 \pm 4.00	0.18	85.81 \pm 10.89	0.02
	Right	99.57 \pm 0.96		94.81 \pm 7.32	
3	Left	83.81 \pm 11.80	0.00	59.66 \pm 12.65	0.00
	Right	97.23 \pm 4.20		83.88 \pm 6.95	
5	Left	63.13 \pm 11.50	0.00	45.08 \pm 10.93	0.00
	Right	83.21 \pm 9.59		62.15 \pm 5.70	
1	Head	97.04 \pm 5.07	0.04	84.24 \pm 11.52	0.00
	Foot	99.10 \pm 0.27		98.14 \pm 2.30	
3	Head	74.73 \pm 11.47	0.00	51.90 \pm 7.85	0.00
	Foot	97.55 \pm 4.39		79.56 \pm 13.62	
5	Head	53.95 \pm 9.23	0.00	35.29 \pm 8.40	0.00
	Foot	76.59 \pm 7.57		50.95 \pm 13.95	
1	Ventral	98.65 \pm 4.09	0.40	92.12 \pm 7.33	0.61
	Back	99.64 \pm 0.73		93.45 \pm 5.72	
3	Ventral	90.66 \pm 9.63	0.38	74.11 \pm 12.29	0.63
	Back	93.23 \pm 4.04		76.28 \pm 10.16	
5	Ventral	73.39 \pm 9.53	0.10	51.00 \pm 9.69	0.06
	Back	78.59 \pm 5.23		61.06 \pm 13.59	

3 讨论

表2 SBRT 原计划与不同移动方向、不同误差下的 γ 通过率(% , $\bar{x} \pm s$)Tab.2 Gamma passing rate of original plan and other plans (% , $\bar{x} \pm s$)

Setup error	3%/3 mm	P value	2%/2 mm	P value
Original plan	99.89 \pm 0.41	-	98.25 \pm 1.69	-
Left_1 mm	97.99 \pm 4.00	0.12	85.81 \pm 10.89	0.00
Right_1 mm	99.57 \pm 0.96	0.32	94.81 \pm 7.32	0.14
Left_3 mm	83.81 \pm 11.80	0.00	59.66 \pm 12.65	0.00
Right_3 mm	97.23 \pm 4.20	0.04	83.88 \pm 6.95	0.00
Left_5 mm	63.13 \pm 11.50	0.00	45.08 \pm 10.93	0.00
Right_5 mm	83.21 \pm 9.59	0.00	62.15 \pm 5.70	0.00
Head_1 mm	97.04 \pm 5.07	0.07	84.24 \pm 11.52	0.00
Foot_1 mm	99.10 \pm 0.27	0.92	98.14 \pm 2.30	0.91
Head_3 mm	74.73 \pm 11.47	0.00	51.90 \pm 7.85	0.00
Foot_3 mm	97.55 \pm 4.39	0.82	79.56 \pm 13.62	0.00
Head_5 mm	53.95 \pm 9.23	0.00	35.29 \pm 8.40	0.00
Foot_5 mm	76.59 \pm 7.57	0.00	50.95 \pm 13.95	0.00
Ventral_1 mm	98.65 \pm 4.09	0.3	92.12 \pm 7.33	0.01
Back_1 mm	99.64 \pm 0.73	0.33	93.45 \pm 5.72	0.02
Ventral_3 mm	90.66 \pm 9.63	0.00	74.11 \pm 12.29	0.00
Back_3 mm	93.23 \pm 4.04	0.00	76.28 \pm 10.16	0.00
Ventral_5 mm	73.39 \pm 9.53	0.00	51.00 \pm 9.69	0.00
Back_5 mm	78.59 \pm 5.23	0.00	61.06 \pm 13.59	0.00

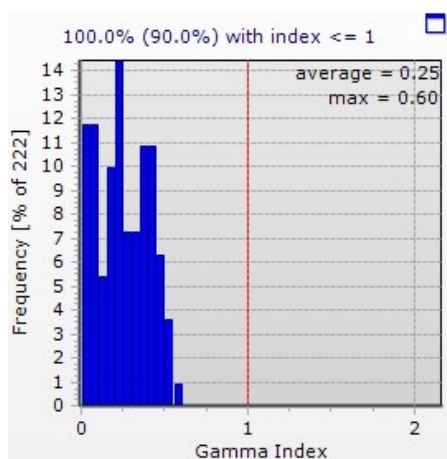
图1 头方向摆位误差为0 mm的 γ 通过率

Fig.1 Gamma passing rate with the setup error of 0 mm in head direction

SBRT 是一种精确度要求比较高的现代放疗技术,精确放疗的最大目的是最大限度地放射剂量集中到靶区内的同时,最大限度保护周围正常组织和关键器官免受不必要的照射^[12]。由于其本身的技

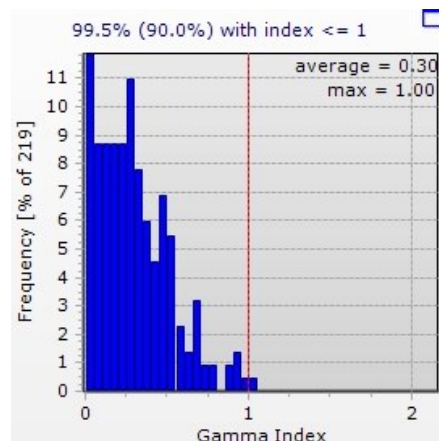
图2 头方向摆位误差为1 mm的 γ 通过率

Fig.2 Gamma passing rate with the setup error of 1 mm in head direction

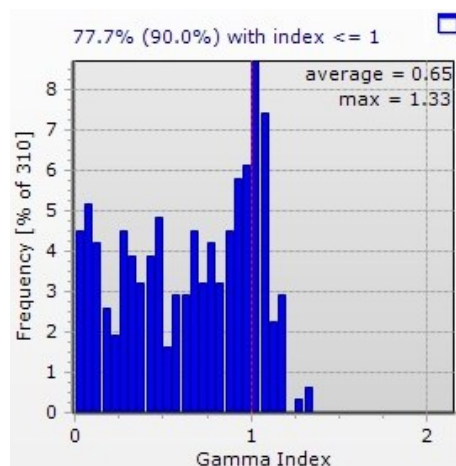
图3 头方向摆位误差为3 mm的 γ 通过率

Fig.2 Gamma passing rate with the setup error of 3 mm in head direction

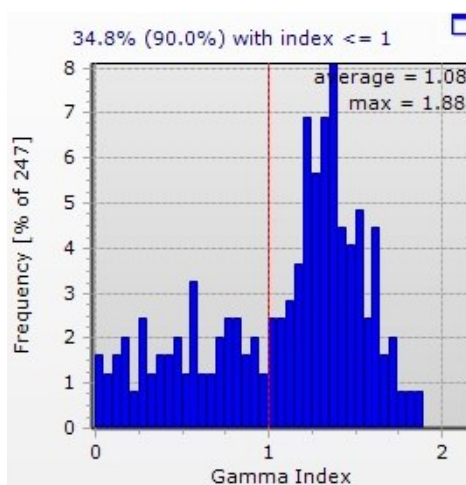
图4 头方向摆位误差为5 mm的 γ 通过率

Fig.4 Gamma passing rate with the setup error of 5 mm in head direction

术原因^[1-2],微小的误差将会对靶区和危及器官的实

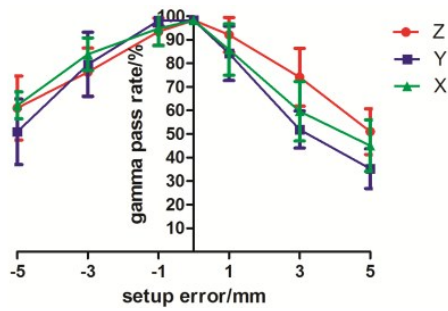


图5 $\gamma(2\%/2\text{ mm})$ 标准下摆位误差与 γ 通过率的关系
Fig.5 Relationship of setup error and gamma pass rate under gamma criterion of 2%/2 mm

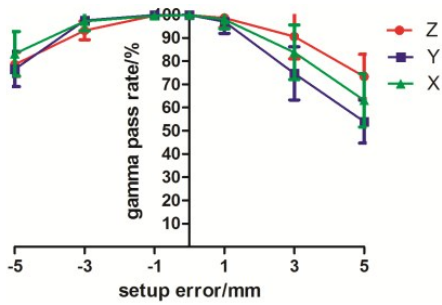


图6 $\gamma(3\%/3\text{ mm})$ 标准下摆位误差与 γ 通过率的关系
Fig.6 Relationship of setup error and gamma pass rate under gamma criterion of 3%/3 mm

表3 $\gamma(2\%/2\text{ mm})$ 标准下没有位移时的单个弧与总的弧的
 γ 通过率(%)

Tab.3 Gamma passing rate for single arc and total arc with no displacement under gamma criterion of 2%/2 mm (%)

No. of patient	First arc	Second arc	Total arc
1	99.8	96.7	100.0
2	100.0	100.0	100.0
3	98.1	99.1	96.3
4	100.0	91.6	94.2
5	97.9	98.4	99.3
6	100.0	99.0	100.0
7	100.0	100.0	98.2
8	95.5	99.6	97.3
9	99.6	100.0	99.6
10	100.0	100.0	100.0
11	96.1	99.6	96.4
12	98.0	99.6	98.0
13	94.7	97.1	97.7
14	100.0	96.2	98.5

研究主要是使用计划系统来进行模拟^[13-16]。而在临床实践中,计划剂量与实际照射剂量有一定的差异,可能是加速器本身的原因,也可能是患者摆位时的实际误差。而本研究主要采用Delta4来研究摆位误差对SBRT计划的剂量学分布造成的影响。Delta4是一种专门用于容积旋转调强计划验证的工具^[17-18],既可以验证单个弧的通过率也可以验证整个弧的通过率。

本研究结果发现,如表1所示, $\gamma(3\%/3\text{ mm})$ 和 $2\%/2\text{ mm})$ 两个标准通过率的腹背方向和 $\gamma(3\%/3\text{ mm})$ 的左右方向的摆位误差为1 mm时无统计学意义($P>0.05$)外,其它方向的 γ 通过率均有统计学意义($P<0.05$),因此本文对左、右、头、脚、腹、背6个方向的摆位误差进行分析,从图1~4中可以看出当患者头方向的摆位误差为1 mm时, $\gamma(3\%/3\text{ mm})$ 通过率为99.5%, γ 通过率变化较小;当摆位误差为3 mm时, $\gamma(3\%/3\text{ mm})$ 通过率为77.7%,变化较大;而当摆位误差为5 mm时, $\gamma(3\%/3\text{ mm})$ 通过率降为34.8%。表2结果说明在摆位误差为1 mm时,摆位误差对 γ 通过率影响较小;而当摆位误差 $\geq 3\text{ mm}$, $\gamma(3\%/3\text{ mm})$,除脚方向位移3 mm无统计学意义外其它方向均有统计学意义,说明摆位误差 $\geq 3\text{ mm}$ 对 γ 通过率影响较大。在表1~2可以发现头方向相对于其它方向对剂量最敏感,这一点与孙晓欢等^[19]结论相同。而患者右方向相对于其它方向剂量不敏感,当摆位误差为3 mm时,其 $\gamma(3\%/3\text{ mm})$ 通过率 $>90\%$ 。据其不同摆位误差的 γ 通过率得到每个方向对剂量的敏感顺序为患者的头、左、腹、脚、背、右方向,因此我们在做SBRT的CBCT扫描矫正摆位误差时,要特别注意头方向的误差。

当摆位误差为1 mm时各方向 $\gamma(3\%/3\text{ mm})$ 通过率 $>90\%$,这与AAPM TG-142^[20]和IAEA398要求的质量控制指标 $<1\text{ mm}$ 一致,因此在做CBCT矫正摆位误差时,当误差为1 mm可以选择不移动治疗床。由表3发现第1个患者的两个单弧的 γ 通过率都小于总弧的 γ 通过率,可能是两个弧的误差相互抵消造成的,另外第3个患者两个单弧的 γ 通过率都大于总弧的 γ 通过率,可能是两个弧的误差叠加引起的。

从本研究结果来看,同样的平移数据导致剂量验证 γ 通过率的下降幅度是各异的,这可能与高剂量包绕的体积和形状相关,假设高剂量包绕体积移出原探测器范围较多,则会导致通过率的大幅下降,但这只是一个假设,具体原因还有待进一步探讨研究。

由于Varian Trilogy 加速器的治疗床只能平移运

实际照射剂量产生巨大的影响,以往对于摆位误差的

动不能旋转运动,所以本文只对平移方向的摆位误差进行研究。另外,对于平移误差的研究为单个方向的,但在实际治疗中,往往是多个方向的误差同时存在。所以,本研究还存在局限性,但是对于摆位误差对SBRT计划剂量学验证的影响有了一个初步的认识。

综上所述,摆位误差对于SBRT计划的剂量学验证有较大的影响,标准越严格,摆位误差对验证通过率的影响越明显,尤其是头方向的剂量分布影响更加显著,这也要求我们在实际的SBRT治疗实施中要严格控制摆位误差,从而获得理想的治疗效果。

【参考文献】

- [1] BENEDICT S H, YENICE K M, FOLLOWILL D, et al. Stereotactic body radiation therapy: the report of AAPM Task Group 101[J]. Med Phys, 2010, 37(8): 4078-4101.
- [2] RUYSSCHER D D, FAIVRE-FINN C, NESTLE U, et al. European organization for research and treatment of cancer recommendations for planning and delivery of high-dose, high-precision radiotherapy for lung cancer[J]. J Clin Oncol, 2010, 28(36): 5301-5310.
- [3] LI G, BAI S, CHEN N, et al. Evaluation of the sensitivity of two 3D diode array dosimetry systems to setup error for quality assurance (QA) of volumetric-modulated arc therapy (VMAT)[J]. J Appl Clin Med Phys, 2013, 14(5): 13-24.
- [4] SIEBERS J V, KEALL P J, WU Q, et al. Effect of patient setup errors on simultaneously integrated boost head and neck IMRT treatment plans[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2005, 63(2): 422-433.
- [5] HONG T S, TOM W A, CHAPPEAL R J, et al. The impact of daily setup variations on head-and-neck intensity-modulated radiation therapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2005, 61(3): 779-788.
- [6] 石锦平, 谢秋英, 张利文, 等. 鼻咽癌调强放疗摆位误差对剂量分布影响的研究[J]. 实用癌症杂志, 2010, 25(4): 394-396.
SHI J P, XIE Q Y, ZHANG L W, et al. Effects of the setup error on the dose distribution for nasopharyngeal carcinoma with intensity modulated radiation therapy[J]. The Practical Journal of Cancer, 2010, 25(4): 394-396.
- [7] 张利文, 石锦平, 谢秋英, 等. 等中心偏移误差对容积调强放疗计划的剂量影响[J]. 肿瘤预防与治疗, 2012, 25(3): 160-163.
ZHANG L W, SHI J Q, XIE Q Y, et al. The dose impact of the isocenter offset errors on the plan volumetric modulated arc therapy[J]. Journal of Cancer Control and Treatment, 2012, 25(3): 160-163.
- [8] 张俊俊. 基于ArcCheck模体研究摆位误差对调强放疗计划验证的影响[D]. 衡阳: 南华大学, 2015.
ZHANG J J. The effect of the set up error on the dosimetric verification for intensity modulated radiation therapy (IMRT) based on the ArcCheck phantom[D]. Hengyang: University of South China, 2015.
- [9] ICRU. International commission on radiation units and measurements prescribing, recording, and reporting photon beam therapy: ICRU Report 62[R]. ICRU, 1999: 1097-1101.
- [10] ICRU. International commission on radiation units and measurements prescribing, recording, and reporting photon-beam intensity-modulated radiation therapy (IMRT): ICRU Report 83[R]. ICRU, 2010: 1-106.
- [11] Raysearch Laboratories A B. Raysearch white paper volumetric modulated arc therapy (VMAT) optimization with RayArc [R]. Raysearch Laboratories A B, 2009.
- [12] MOHAN R, WU Q, MANNING M, et al. Radiobiological considerations in the design of fractionation strategies for intensity-modulated radiation therapy of head and neck cancers[J]. Int J Radiat Oncol, 2000, 46(3): 619-630.
- [13] 徐升, 张军宁, 周菊英, 等. 锥形束CT评估鼻咽癌调强放疗摆位误差及其对剂量分布的影响[J]. 实用癌症杂志, 2014, 29(9): 1187-1189.
XU S, ZHANG J N, ZHOU J Y, et al. Kilo-volt cone-beam CT evaluation of set-up errors in nasopharyngeal carcinoma treated with intensity modulation radiotherapy and its effects on dose distribution[J]. The Practical Journal of Cancer, 2014, 29(9): 1187-1189.
- [14] 陈远贵, 徐本华, 李小波, 等. 调强放疗中摆位误差对鼻咽癌患者剂量的影响[J]. 医疗装备, 2013, 26(12): 24-27.
CHEN Y G, XU B H, LI X B, et al. Set-up errors in nasopharyngeal carcinoma treated with intensity modulation radiotherapy and its effects on dose distribution[J]. Chinese Journal of Medical Device, 2013, 26(12): 24-27.
- [15] 沈君妹. 鼻咽癌调强放疗中的摆位误差对物理剂量学的影响[D]. 西安: 第四军医大学, 2006.
SHEN J Z. Effects of the setup error on the physics dose for nasopharyngeal carcinoma under going the intensity modulated radiation therapy[J]. Xi'an: The Fourth Military Medical University, 2006.
- [16] 王鑫, 胡超苏, 应红梅, 等. 摆位系统误差对鼻咽癌放疗剂量分布的影响[J]. 中国癌症杂志, 2018, 18(8): 620-625.
WANG X, HU C S, YING H M, et al. Systematic setup error for intensity modulated radiation therapy in the nasopharyngeal carcinoma: effect on dose distribution[J]. China Oncology, 2018, 18(8): 620-625.
- [17] 刘磊, 吴爱东, 闫冰. Delta4在容积弧形调强放疗验证中的应用[J]. 科技视界, 2014(23): 61.
LIU L, WU A D, YAN B. Application of Delta4 in the verification of volumetric arc intensity modulated radiation therapy[J]. Science & Technology Vision, 2014(23): 61.
- [18] 林珠, 吴丽丽, 陆佳扬. Delta4三维剂量验证系统的原理及应用[J]. 医疗装备, 2013, 26(7): 14-16.
LIN Z, WU L L, LU J Y. The principle and application of Delta4 three-dimensional dose verification system[J]. Medical Equipment, 2013, 26(7): 14-16.
- [19] 孙晓欢, 谭丽娜, 马奎, 等. 摆位误差对VMAT计划剂量学验证的影响[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2014, 23(6): 513-515.
SUN X H, TAN L N, MA K, et al. Effect of the setup error on the dosimetric verification for the volumetric modulated arc therapy[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2014, 23(6): 513-515.
- [20] KLEIN E E, HANLEY J, BAYOUTH J, et al. Task Group 142 Report: quality assurance of medical accelerators[J]. Med Phys, 2009, 36(9): 4197-4212.

(编辑:陈丽霞)