

调强放疗计划中射野角度归零与实际角度的剂量验证比较

孔伟¹, 丁莉², 叶红强¹, 夏新舍¹, 赵婷¹, 丁伟¹, 尚钧¹

1. 宁夏医科大学总医院肿瘤医院放疗科, 宁夏 银川 750004; 2. 宁夏医科大学总医院心脑血管病医院病案统计室, 宁夏 银川 750004

【摘要】目的:比较分析调强放射治疗(IMRT)计划验证中射野角度归零和射野实际角度的剂量偏差(Dose Difference, DD)、吻合距离(Distance to Agreement, DTA)和 γ 通过率的差异性。**方法:**在Pinnacle 9.2 m计划系统中选取6例头颈部、11例胸部和4例腹部肿瘤放射治疗计划,共121个射野。在Delta4模体上分别制作射野角度归零和射野实际角度验证计划,利用三维验证设备Delta4和VARIAN Clinac IX加速器实测两种验证方法在121个射野中的通过率,每个射野在模体中的最大剂量归一为100%,并分析其不同标准、不同剂量区域和不同角度范围内的差异性。**结果:**与实际角度验证结果相比,角度归零验证在10%以上剂量区域的DD、DTA和 γ 通过率均明显提高($P<0.05$);0%~10%之间剂量区域中除3 mm/3%标准的 γ 通过率 P 值大于0.05,其它 P 值均小于0.05。在水平线上和水平线下角度范围内射野,角度归零的DD、DTA和 γ 通过率均基本一致,但水平线下角度范围内射野,实际角度验证的通过率均低于角度归零验证,而水平线下角度范围内射野的实际角度验证通过率均低于水平线上角度范围内射野的实际角度验证通过率。当实际角度为260°~285°和75°~100°时,射野归零在10%以上剂量区域,DD、DTA和 γ 通过率均明显提高($P<0.05$),其中2 mm/2%标准下DTA明显提高。**结论:**IMRT中,按射野实际角度进行IMRT计划验证能够得到更接近真实的验证结果。

【关键词】Delta 4;调强放疗;计划验证; γ 通过率;射野角度;剂量验证

【中图分类号】R815.6

【文献标识码】A

【文章编号】1005-202X(2015)06-0892-05

Dosimetric verification of practical beam angle and beam angle returning to zero in intensity-modulated radiotherapy plan

KONG Wei¹, DING Li², YE Hong-qiang¹, XIA Xin-she¹, ZHAO Ting¹, DING Wei¹, SHANG Jun¹

1. Department of Radiotherapy, General Hospital of Ningxia Medical University, Yinchuan 750004, China; 2. Medical Record Room of Cardio-cerebrovascular Diseases, General Hospital of Ningxia Medical University, Yinchuan 750004, China

Abstract: Objective To compare and analyze the dose difference (DD), distance to agreement (DTA), and gamma (γ) pass rate of the practical beam angle and beam angle returning to zero (RZ beam angle) in intensity-modulated radiotherapy (IMRT) plan. **Methods** Based on the Pinnacle 9.2 m planning treatment system, 21 IMRT plans respectively for 6 cases of head and neck cancers, 11 cases of thoracic cancers, and 4 cases of abdominal cancers were selected, containing 121 radiation fields. The verification plans of RZ beam angle and practical beam angle were respectively designed on Delta4 phantom. The three-dimensional verification device, Delta4, and VARIAN Clinac IX accelerator were applied to measure the γ pass rate of these two verifications in 121 radiation fields. The maximum dose of each radiation field was normalized to 100% to analyze the impacts of different criteria, different dose regions and different angles on γ pass rate. **Results** Compared with the practical beam angle verification, the DD, DTA and γ pass rate of the dose region above 10% of RZ beam angle verification were significantly improved, $P<0.05$. While in the 0%-10% dose region, all the criteria showed significant differences ($P<0.05$), except the pass rate of 3 mm/3% criteria ($P>0.05$). For the radiation fields under and above horizontal line, RZ beam angle verification basically achieved the same DD, DTA and γ pass rate. However, for the radiation field under horizontal line, the pass rate of practical angle verification was lower than that of RZ angle verification. And for the practical angle verification,

【收稿日期】2015-06-23

【基金项目】宁夏科技支撑计划

【作者简介】孔伟(1986-),助理工程师,主要研究方向:肿瘤放射物理。Tel: 18395190786; E-mail:kongwei1220@126.com。

【通信作者】尚钧(1970-),在职研究生,正高职高级工程师,主要研究方向:肿瘤放射物理。Tel: 13895000118; E-mail:shangjun138118@163.com。

the pass rate in the radiation field under horizontal line was lower than that above horizontal line. When the beam angles were practically set as 260° - 285° and 75° - 100° , DD, DTA and pass rate in the dose region above 10% of RZ angle verification were significantly improved ($P < 0.05$), especially the DTA of 2 mm/2% criteria. **Conclusion** The IMRT plan based on the practical beam angle can achieve verification results closer to the real.

Key words: Delta4; Intensity-modulated radiation therapy; verification; Gamma pass rate beam angle; dosimetric verification

前言

作为一项常规技术,调强放疗(IMRT)技术广泛应用于肿瘤放射治疗。IMRT执行过程中,由于子野的复杂性、治疗计划系统(Treatment Planning System, TPS)算法拟合的有限性及整个放射治疗过程执行要求的精确性和安全性,患者需在接受放射治疗前执行IMRT计划剂量验证。目前多数医院使用二维探测阵列 MapCHECK^[1]和 MatriXX^[2]对IMRT计划进行验证,部分由于硬件限制而不能进行射野实际角度验证的,只能进行射野角度归零验证。射野角度归零验证与实际照射条件不一致,忽略了很多问题,例如治疗床的影响^[3]、Gantry 和多叶准角器(Multi Leaf Collimator, MLC)在重力作用下的影响^[4]等。本文拟利用 Delta4 比较分析 IMRT 验证计划射野角度归零与射野实际角度的剂量偏差(Dose Difference, DD)、吻合距离(Distance to Agreement, DTA)和 γ 通过率^[5]的差异性。

1 材料与方 法

1.1 设备和仪器

PTW公司的UNIDOSE和TW 30013型指形电离室,该剂量仪经中国计量科学研 究院校准。VARIAN公司Clinac IX医用直线加速器(使用碳素纤维治疗床)和Pinnacle 9.2 m TPS。ScandiDos公司的Delta4,模体大小为22 cm×40 cm,内置两个正交排列的半导体探头矩阵,共有1069个敏感面积为0.78 mm²的P型半导体探头,6 cm×6 cm中心区域的探头间隔为5 mm,其它区域的探头间隔为10 mm,同时配备有角度响应器。

1.2 临床病例选取和计划设计

选取6例头颈部、11例胸部、4例腹部肿瘤患者,使用Pinnacle 9.2 m TPS设计IMRT计划,共121个射野。

1.3 验证计划设计

在Delta4模体CT影像的中心上,对上述21例IMRT计划分别制作两种验证计划:射野角度归零和射野实际角度。将验证计划与TPS产生的剂量分布图分别传输到加速器和Delta4测量软件。

1.4 剂量验证与分析方法

(1)通过剂量仪与标准模体校准加速器的输出

剂量与理论值一致;(2)连接Delta4剂量验证系统的各个部件后,在激光灯引导下对Delta4等中心摆位,预热Delta4探头阵列20 min后,把当前机房温度和机架角度输入Delta4软件系统,分别进行射野角度归零和射野实际角度的验证,完成测量;(3)分别记录所有射野在2 mm/2%和3 mm/3%的标准下,剂量区域为10%以上和0%~10%之间的DD、DTA和 γ 通过率,分析全部射野角度归零与实际角度的验证结果,根据射野实际角度为水平线上、下角度范围进行分类,比较角度归零与实际角度的验证结果。选取实际角度为 260° ~ 285° 和 75° ~ 100° 的射野,比较10%以上剂量区域的角度归零与实际角度的验证结果。

1.5 统计分析

采用SPSS 16.0软件进行配对 t 检验, $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结 果

121个射野的角度归零与实际角度的验证结果:10%以上剂量区域,角度归零验证的DD、DTA和 γ 通过率均明显提高,具有统计学意义($P < 0.05$);0%~10%之间剂量区域,除3 mm/3%标准下的 γ 通过率具有统计学意义,其它均不具有统计学意义($P > 0.05$)。详见表1、表2。

实际角度为水平线上、下角度范围内,射野角度归零与实际角度验证结果:水平线上角度范围,只有10%以上剂量区域、3 mm/3%标准下的DTA和 γ 通过率和0%~10%之间剂量区域、3 mm/3%标准下的DTA具有统计学意义($P < 0.05$);水平线下角度范围,射野角度归零的DD、DTA和 γ 通过率均明显提高,具有统计学意义($P < 0.05$)。水平线上、下两个角度范围内的射野,在10%以上剂量区域内,角度归零后两者的验证结果基本一致;水平线下角度范围内,射野实际角度验证的通过率均低于角度归零验证;而水平线下角度范围内,射野的实际角度验证通过率均低于水平线上角度范围内射野的实际角度验证通过率。详见表3~表6。

在实际角度为 260° ~ 285° 和 75° ~ 100° 范围内的射野,10%以上剂量区域内,与实际角度的验证结果相

表1 10%以上剂量区域DD、DTA和γ通过率比较(%, $\bar{x}\pm s, n=121$)

Tab.1 Comparison of DD, DTA and γ of dose region above 10% (%, Mean±SD, n=121)

Criteria	Index	RZ beam angle	Practical beam angle	t	P
2 mm/2%	DD	79.5±5.5	78.3±6.7	2.163	0.033
	DTA	89.4±4.1	87.6±8.3	2.366	0.020
	γ	96.4±2.2	94.7±3.6	5.031	0.000
3 mm/3%	DD	88.2±3.7	87.3±5.3	2.127	0.035
	DTA	99.5±0.8	98.2±2.3	4.711	0.000
	γ	99.7±0.4	99.5±0.8	4.321	0.000

Note: DD: Dose difference; DTA: Distance to agreement; γ: Gamma; SD: Standard deviation; RZ beam angle: Beam angle returning to zero

表2 0%~10%之间剂量区域DD、DTA和γ通过率比较(%, $\bar{x}\pm s, n=121$)

Tab.2 Comparison of DD, DTA and γ of 0%~10% dose region (%, Mean±SD, n=121)

Criteria	Index	RZ beam angle	Practical beam angle	t	P
2 mm/2%	DD	90.8±5.7	90.2±6.5	2.867	0.005
	DTA	89.5±4.1	87.6±8.3	2.393	0.018
	γ	98.3±3.7	98.0±3.3	2.037	0.044
3 mm/3%	DD	95.4±1.9	94.7±2.4	3.165	0.002
	DTA	99.1±0.8	98.2±2.3	4.512	0.000
	γ	100.0±0.1	99.9±0.3	1.632	0.105

表3 水平线下角度、10%以上剂量区域DD、DTA和γ通过率比较(%, $\bar{x}\pm s, n=56$)

Tab.3 DD, DTA and γ of dose region above 10% and fields under horizontal line (%, Mean±SD, n=56)

Criteria	Index	RZ beam angle	Practical beam angle	t	P
2 mm/2%	DD	78.7±5.9	76.0±7.3	2.787	0.007
	DTA	90.1±4.0	84.9±9.4	4.135	0.000
	γ	96.4±2.1	93.4±4.2	5.023	0.000
3 mm/3%	DD	87.9±4.0	85.3±5.6	3.760	0.000
	DTA	99.1±0.9	97.5±2.9	4.349	0.000
	γ	99.8±0.4	99.3±1.0	3.281	0.002

表4 水平线下角度、0%~10%之间剂量区域DD、DTA和γ通过率比较(%, $\bar{x}\pm s, n=56$)

Tab.4 DD, DTA and γ of 0%~10% dose region and fields under horizontal line (%, Mean±SD, n=56)

Criteria	Index	RZ beam angle	Practical beam angle	t	P
2 mm/2%	DD	91.1±5.2	89.8±6.2	3.159	0.003
	DTA	90.1±3.9	84.9±9.4	4.186	0.000
	γ	98.3±3.6	97.6±2.7	2.641	0.011
3 mm/3%	DD	95.7±1.4	94.4±2.2	4.046	0.000
	DTA	99.1±0.9	97.5±2.9	4.189	0.000
	γ	100.0±0.1	99.9±0.5	2.048	0.045

比,射野角度归零的DD、DTA和γ通过率均明显提高,具有统计学意义($P<0.05$),其中2 mm/2%标准的DTA明显提高。详见表7($P<0.01$)。

3 讨论

Delta4常用于IMRT和容积旋转调强(VMAT)计划验证,相关结果表明Delta4是一种理想、有效的验

证工具^[6]。本研究应用Delta4进行IMRT计划的射野角度归零和射野实际角度的验证比较,将每个射野在Delta4模体中最大剂量归一为100%。10%以上剂量区域为射野照射范围,是最受关注的区域,结果表明在该区域,相比实际角度验证,射野角度归零在2 mm/2%和3 mm/3%标准下均提高了DD、DTA和γ通过率。0%~10%之间剂量区域为散射线照射范围,结

表5 水平线上角度、10%以上剂量区域DD、DTA和 γ 通过率比较(%, $\bar{x}\pm s$, $n=65$)Tab.5 DD, DTA and γ of dose region above 10% and fields above horizontal line (%, Mean \pm SD, $n=65$)

Criteria	Index	RZ beam angle	Practical beam angle	<i>t</i>	<i>P</i>
2 mm/2%	DD	80.2 \pm 5.0	80.4 \pm 5.4	-0.393	0.696
	DTA	88.9 \pm 4.1	90.0 \pm 6.3	-1.353	0.181
	γ	96.3 \pm 2.4	95.7 \pm 2.6	1.909	0.061
3 mm/3%	DD	88.4 \pm 3.4	89.0 \pm 4.4	-1.293	0.201
	DTA	99.2 \pm 0.8	98.8 \pm 1.4	2.204	0.031
	γ	99.7 \pm 0.4	99.6 \pm 0.6	3.116	0.003

表6 水平线上角度、0%~10%之间剂量区域DD、DTA和 γ 通过率比较(%, $\bar{x}\pm s$, $n=65$)Tab.6 DD, DTA and γ of 0%~10% dose region and fields above horizontal line (%, Mean \pm SD, $n=65$)

Criteria	Index	RZ beam angle	Practical beam angle	<i>t</i>	<i>P</i>
2 mm/2%	DD	90.8 \pm 6.2	90.6 \pm 6.7	0.722	0.473
	DTA	88.9 \pm 4.1	90.0 \pm 6.3	-1.355	0.180
	γ	98.2 \pm 3.9	98.3 \pm 3.7	-0.240	0.811
3 mm/3%	DD	95.1 \pm 2.2	95.0 \pm 2.5	0.489	0.626
	DTA	99.2 \pm 0.8	98.8 \pm 1.4	2.052	0.044
	γ	100.0 \pm 0.1	100.0 \pm 0.1	-0.116	0.908

表7 260°-285°和75°-100°范围内射野、10%以上剂量区域DD、DTA和 γ 通过率比较(%, $\bar{x}\pm s$, $n=29$)Tab.7 DD, DTA and γ of dose region above 10% and fields with angle of 260°-285° and 75°-100° (%, Mean \pm SD, $n=29$)

Criteria	Index	RZ beam angle	Practical beam angle	<i>t</i>	<i>P</i>
2 mm/2%	DD	80.1 \pm 6.5	77.4 \pm 6.0	2.252	0.032
	DTA	88.2 \pm 4.5	83.2 \pm 6.3	3.582	0.020
	γ	96.4 \pm 2.6	94.2 \pm 3.3	3.221	0.003
3 mm/3%	DD	88.7 \pm 3.8	86.9 \pm 4.0	2.362	0.025
	DTA	99.2 \pm 0.8	97.9 \pm 1.8	3.05	0.001
	γ	99.8 \pm 0.4	99.6 \pm 0.8	2.391	0.024

果表明在该区域,相比实际角度验证,射线角度归零除3 mm/3%标准的 γ 通过率无统计学意义外,其它均明显提高且具有统计学意义,但DD、DTA和 γ 通过率基本均大于90%,因此0%~10%之间剂量区域验证结果只具有一定的参考意义。实际验证工作以10%以上剂量区域的通过率为主。戴越等^[7]使用MatriXX进行IMRT剂量射野角度归零与射野实际角度的验证比较,张伟等^[8]使用MapCHECK进行射野角度归零和Delta4进行射野实际角度的验证比较,均发现射野角度归零提高了通过率,与本研究一致。射野角度归零验证只能验证治疗计划在机架角0°时剂量计算的准确性,与射野实际角度验证相比,忽略了治疗

床的影响、Gantry和MLC在重力影响下的到位精度,因而不能全面反映实际照射条件下影响治疗精确性的因素,无法进行实际照射条件的治疗验证评估。在3 mm/3%标准下,射野角度归零与射野实际角度验证的 γ 通过率非常相近,但 $P=0$,这说明两者的通过率相近,但射野角度归零的通过率均得以提升。如果仅以3 mm/3%标准下 γ 通过率作为验证计划通过与否的标准,射野角度归零与射野实际角度验证对治疗计划验证无明显的意义,在射野角度归零进行验证亦可。但在IMRT验证中将 γ 通过率作为评判IMRT验证通过与否的唯一标准有待进一步研究,应加入其它验证项目,例如使用小体积电离室进行点剂量的绝对剂量验证^[9]等。

3.1 治疗床的影响

本研究按射野实际角度分为水平线上、下角度范围。两个角度范围内射野均受到重力的影响,但水平线下相比水平线上角度多了治疗床的影响。而两个角度范围内射野角度归零后,不受治疗床影响以及可以忽略重力影响,其他条件保持一致,结果表明在10%以上剂量区域内,角度归零后两者的验证结果基本一致,水平线下角度范围内,射野实际角度验证的通过率均低于角度归零验证;而水平线下角度范围内的射野的实际角度验证通过率均低于水平线上角度范围内的射野的实际角度验证通过率,这说明了碳素纤维治疗床对DD、DTA和 γ 通过率有着重要影响。实际角度在水平线下角度范围内的射野,在0%~10%之间和10%以上两个剂量区域内,角度归零均高于实际角度的验证通过率,具有统计学意义,这说明治疗床对射野照射区域和散射线照射区域均有影响。治疗床对射线有衰减作用,同时会改变剂量分布。剂量衰减影响DD,剂量分布改变影响DTA。国内外有数篇文献报道了碳素纤维床对放射治疗剂量的影响。沙翔燕等^[3]研究全碳素纤维床对吸收剂量的影响,结论表明碳素纤维床对靶区的吸收剂量的影响在5%以内,治疗计划设计时应充分考虑碳素纤维床的影响;在三维计划系统中加入床的模型发现剂量分布被改变,不考虑治疗床的存在会使靶区受

量减小^[10-11]。AAPM 176号报告详细介绍了关于治疗床对放射治疗剂量影响的文献,以及如何测量、减小或避免治疗床对剂量的影响^[12]。治疗床在放射治疗过程中是一个不可缺少的外部辅助设施,加速器机架角360°的旋转过程中,治疗床参与了整个放射治疗过程。其中有近一半的角度射线要先经过治疗床后再照射到肿瘤靶区,治疗床对射线的衰减是主要的影响因素;另一半的角度射线先照射肿瘤靶区,后穿过治疗床,这时治疗床产生的散射线是主要的影响因素。通常对治疗床产生的散射线影响可以忽略不计,主要考虑治疗床对射线的衰减作用。但目前市场在售的TPS,除Eclipse(只能修正VARIAN公司的加速器所配的碳素纤维床对剂量的影响)外,多数在剂量计算时未考虑碳素纤维床的影响。Mihaylov等^[13]也报道了在Pinnacle TPS手动添加碳素纤维床的模型来修正床对剂量计算的影响。AAPM 176号报告中,关于治疗床对剂量计算的影响做出建议,推荐TPS须能准确添加治疗床的模型参与剂量的计算,保证放射治疗剂量的精准性。

3.2 重力的影响

本研究将实际角度在260°~285°和75°~100°范围内的射野角度归零与实际角度验证结果相比,在10%以上剂量区域内,射野角度归零的DD、DTA和 γ 通过率均明显提高,其中2 mm/2%标准的DTA变化显著。实际角度在范围内的射野角度归零与实际角度验证均不受治疗床的影响,但实际角度验证受重力影响。重力影响机架和MLC的到位误差,到位误差影响DTA,研究结果也证实了这一点。机架在旋转到各个角度时,机架位置的改变造成加速器整个系统重心的改变,由此使得加速器的等中心随着机架角度的变化有不同的位置。此影响在加速器验收时都应执行定量的测量,使等中心随机架角度的变化在误差范围内,并且尽量调试减小此误差。但此影响是客观存在的,只能在调试机器时尽可能地减小此误差,并不能做到彻底消除此影响。重力对叶片的到位精度有影响,射野角度归零验证时,整个验证过程中重力对叶片的到位精度影响是忽略不计的。随着机架角度的变化,重力对叶片施加作用力,并且随着机架角度的变化有不同的影响。蒋胜鹏等^[4]研究发现重力对叶片到位精度有影响,特别是在机架角270°时,重力对叶片的作用力最大,叶片的到位误差会达到最大,这与本研究结果一致。

综上所述,应在IMRT的TPS中加入治疗床模型

参与剂量计算,并按实际照射条件进行IMRT计划验证,以得到更接近真实的验证结果,保证放射治疗的精准性和安全性。

【参考文献】

- [1] Le'tourneau D, Gulam M, Yan D, et al. Evaluation of a 2D diode array for IMRT quality assurance[J]. *Radiother Oncol*, 2004, 70(2): 199-206.
- [2] Li JG, Yan C, Liu C. Comparison of two commercial detector arrays for IMRT quality assurance[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2009, 10(2): 62-74.
- [3] 沙翔燕, 王运来, 廖雄飞, 等. 全碳素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 doses[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2008, 17(3): 223-225.
- [4] 蒋胜鹏, 李智华. 加速器机架角度对多叶准直器叶片到位精度的影响[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2009, 18(4): 317-320.
Jiang SP, Li ZH. Impact of accelerator's gantry angle on multi-leaf collimator position accuracy[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2009, 18(4): 317-320.
- [5] Low DA, Harms WB, Mutic S, et al. A technique for the quantitative evaluation of dose distributions[J]. *Med Phys*, 1998, 25(5): 656-661.
- [6] Bedford JL, Lee YK, Wai P, et al. Evaluation of the Delta4 phantom for IMRT and VMAT verification[J]. *Phys Med Biol*, 2009, 54(9): 167-176.
- [7] 戴 越, 胡春红, 李小东, 等. MatriXX两种调强放疗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.
Dai Y, Hu CH, Li XD, et al. Analyse two kinds of intensity-modulated radiotherapy verification methods comparatively by using the MatriXX[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2013, 22(4): 312-314.
- [8] 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.
Zhang W, Ma Z, Shao P, et al. Clinical application of Delta4[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2010, 19(1): 48-51.
- [9] 戴建荣, 胡逸民, 张红志, 等. 针对患者调强放射治疗计划的剂量学验证[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2004, 13(3): 229-233.
Dai JR, Hu YM, Zhang HZ, et al. Plan-specific dosimetric verification for patient treated with intensity-modulated radiation therapy [J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2004, 13(3): 229-233.
- [10] 付庆国, 朱小东, 杨海明, 等. 加速器碳素纤维床对三维治疗计划剂量分布的影响[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2014, 23(6): 505-509.
Fu QG, Zhu XD, Yang HM, et al. The effect of carbon fiber couch on dose distribution of conformal intensity modulated plan[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2014, 23(6): 505-509.
- [11] Pulliam KB, Howell RM, Followill D, et al. The clinical impact of couch top and rails on IMRT and arc therapy[J]. *Phys Med Biol*, 2011, 56(23): 7435-7447.
- [12] Olch AJ, Gerig L, Li H, et al. Dosimetric effects caused by couch tops and immobilization devices: Report of AAPM Task Group 176 [J]. *Med Phys*, 2014, 41(6): 061501.
- [13] Mihaylov IB, Corry P, Yan Y, et al. Modeling of carbon attenuation properties with a commercial treatment planning system[J]. *Med Phys*, 2008, 35(11): 4982-4988.