

AXB算法与AAA算法在宫颈癌VMAT放射治疗中的剂量学差异

张向学, 张谦, 孙春堂, 尹如铁, 李清丽, 陈亚正

四川大学华西第二医院 妇产科, 四川 成都 610041

[摘要] 目的 分析和比较宫颈癌术后容积旋转调强放射治疗 (Volumetric Intensity-Modulated Arc Therapy, VMAT) 中光子剂量算法 (Acuros External Beam Algorithm, AXB) 和各向异性分析算法 (Anisotropic Analytical Algorithm, AAA) 的剂量学差异。方法 选取24例宫颈癌术后患者, 分别在Eclipse 15.5治疗计划系统上采用AXB算法和AAA算法设计VMAT计划, 并生成相应的EPID验证计划, 比较靶区及危及器官的剂量学参数。结果 两种算法计算所得靶区的 $D_{2\%}$ 、 $D_{5\%}$ 、 $D_{98\%}$ 及 D_{max} 均有显著统计学差异 ($P<0.05$), 其中AAA算法中的最大剂量为 (48.1 ± 17.2) Gy, AXB算法中的最大剂量为 (48.7 ± 28.7) Gy, 两种算法PTV的适形度指数有显著统计学差异 ($P=0.047$); 危及器官的骨 (髌骨和骶骨)、左股骨头和右股骨头的 D_{mean} 差异均有显著统计学差异 ($P<0.05$)。除 D_{min} 、 $D_{95\%}$ 、 $D_{98\%}$ 和小肠的 V_{25} 外, 其余参考指标AAA算法结果均低于AXB算法; 两种算法的验证计划无统计学差异 ($P>0.05$)。结论 AXB算法与AAA算法在宫颈癌VMAT中虽然存在一定的剂量学差异, 但均符合剂量学和临床要求, 且在验证通过率方面差异无统计学意义, 两种算法都可以应用于临床治疗。

[关键词] AXB算法; AAA算法; 宫颈癌放射治疗; 调强放射治疗; 剂量验证

Dosimetric Difference Between AXB Algorithm and AAA Algorithm in VMAT Radiotherapy for Cervical Cancer

ZHANG Xiangxue, ZHANG Qian, SUN Chuntang, YIN Rutie, LI Qingli, CHEN Yazheng

Department of Gynecology and Obstetrics, West China Second University Hospital, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610041, China

Abstract: Objective To analyze and compare the photon dose algorithm (AcurosXB) and the anisotropic analysis algorithm (Anisotropic Analytical Algorithm, AAA) in Volumetric Intensity-Modulated Arc Therapy (VMAT) after cervical cancer surgery. The dosimetric difference. Methods A total of 24 postoperative patients with cervical cancer were selected to design the VMAT plan using AXB algorithm and AAA algorithm on the Eclipse 15.5 treatment planning system, and generate corresponding EPID verification plans. The dosimetric parameters of target area and organs at risk were compared. Results The $D_{2\%}$, $D_{5\%}$, $D_{98\%}$ and D_{max} of the target area calculated by the two algorithms showed significant statistical differences ($P<0.05$). The maximum dose of AAA algorithm was (48.1 ± 17.2) Gy, and the maximum dose of AXB algorithm was (48.7 ± 28.7) Gy, and the PTV conformity index has significant statistical differences ($P=0.047$). There were significant differences in D_{mean} between the bones of the organs at risk (ilium and sacrum), left femoral head and right femoral head ($P<0.05$). And except D_{min} , $D_{95\%}$, $D_{98\%}$ and V_{25} of the small intestine, the results of all other reference indexes AAA algorithm were lower than the AXB algorithm. There was no statistical difference in the verification plans between the two algorithms ($P>0.05$). Conclusion Although there are certain dosimetric differences between AXB algorithm and AAA algorithm in cervical cancer VMAT, they both meet the dosimetry and clinical requirements, and there is no statistically significant difference in the verification pass rate. Both algorithms can be applied to clinical treatment.

Key words: AXB algorithm; AAA algorithm; cervical cancer radiotherapy; intensity-modulated radiotherapy; dose verification

[中图分类号] R737.33; 730.55

[文献标识码] A

doi: 10.3969/j.issn.1674-1633.2022.02.009

[文章编号] 1674-1633(2022)02-0039-04

引言

全球约 80% 的宫颈癌患者需要放射治疗, 而照射剂量准确性是放射治疗质量控制的重要组成部分^[1]。容积旋转调强放射治疗 (Volumetric Intensity-Modulated Arc Therapy, VMAT) 剂量均由放射治疗计划系统中剂量计算模型计算

所得^[2-3]。本研究主要包括光子剂量算法 (Acuros External Beam Algorithm, AXB) 和各向异性分析算法 (Anisotropic Analytical Algorithm, AAA) 两种剂量计算模型。AAA 算法是一种基于笔形束卷积的剂量算法并采用卷积 / 叠加 (C/S) 方法进行计算^[4-7]; AXB 是一种新型光子剂量算法, 其基于网格的迭代求解线性玻尔兹曼运输方程, 在异质性计算方面接近蒙特卡洛算法^[8-10]。目前国内对 AXB 算法的研究报道相对较少, 在宫颈癌放疗计划方向使用 AXB 算法的研究更少。为了提高对 AXB 计算模型及其在宫颈癌放疗计划

收稿日期: 2021-01-27

基金项目: 四川省科技厅社会发展重点研发课题 (2020YFS0437)。

通信作者: 陈亚正, 副教授, 副研究员, 主要研究方向为医疗器械和放射治疗。

通信作者邮箱: 574186214@qq.com

设计中应用的了解,并为其安全地应用于临床放射治疗提供相关的物理实践数据,有必要对该算法的特性进行研究探讨。本研究通过使用 AAA 和 AXB 两种不同的计算模型进行剂量计算,比较剂量学差异,并通过 EPID 验证两种算法所做计划的通过率,为临床应用提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 临床资料

选取四川大学华西第二医院 2020 年 3 月至 11 月接受放射治疗的 24 例宫颈癌术后患者,患者年龄 35~61 岁,中位年龄 49 岁,病理类型均为鳞状细胞癌。

1.2 设备材料

使用飞利浦大孔径 CT 获取患者图像, Eclipse 15.5 (美国 Varian) 计划系统制订放疗计划,对应加速器为 Trilogy (美国 Varian), 60 对多叶光栅 (MLC), 最大开野 40 cm × 40 cm。

1.3 CT 定位

所有患者均采用仰卧位, 双上肢抱头, 在 CT 模拟定位机上 (Brilliance Big Bore) 做平静状态下扫描, CT 扫描层厚为 3 mm, 扫描范围为上界 T10 至下界股骨中段。

1.4 靶区勾画和处方剂量

由高年资医师勾画计划靶区体积 (Planning Target Volume, PTV) 和危及器官 (Organ at Risk, OAR)。PTV 范围包括阴道残端、宫旁组织及淋巴结引流区, 剂量处方为 45 Gy/25 次。OAR 包括膀胱、小肠、直肠、左右股骨头及其他骨组织 (髌骨和髌骨)。

1.5 计划设计

在 Eclipse 15.5 计划系统中进行 VMAT 计划设计, 能量均为 6 MV X 射线, 射野设计为两个全弧 (逆时针 179°~181°, 准直器角度 357°; 顺时针 181°~179°, 准直器角度 3°), 剂量率 600 MU/min, 计算网格设置 2.5 mm × 2.5 mm × 2.5 mm。对每一个 VMAT 计划, 在设计参数和优化条件一致的情况下分别采用 AAA 算法和 AXB 算法进行剂量计算。使用 AXB 算法之前须指定物理材料表, 本研究使用 Eclipse 15.5 计划系统自带的物理材料 AcurosXB-13.5。AXB 算法基于材料和质量密度进行计算, 物理师需要单独勾画高密度结构及其产生的伪影, 并指定相应高密度材料, 避

免产生计算误差。

1.6 计划评估

1.6.1 靶区剂量学参数

将两种算法的计划靶区剂量归一至 D_{95} 45 Gy。PTV 最大剂量 D_{max} 、最小剂量 D_{min} 、平均剂量 D_{mean} , 以及体积剂量参数 $D_{2\%}$ 、 $D_{5\%}$ 、 $D_{50\%}$ 、 $D_{95\%}$ 、 $D_{98\%}$ 都可以从剂量-体积直方图 (Dose-Volume Histogram, DVH) 中提取, 图 1 为选取的某例患者的 DVH 图。计算 PTV 剂量均匀性指数^[11-12] (Homogeneity Index, HI) [公式 (1)]、适形度指数^[11] (Conformity Index, CI)。比较和统计以上剂量学参数在两种计划中的统计学差异。

$$HI = (D_{2\%} - D_{98\%}) / (D_{50\%}) \quad (1)$$

式 (1) 中, $D_{2\%}$ 、 $D_{98\%}$ 、 $D_{50\%}$ 分别为 DVH 图上 2%、98%、50% 的靶区体积所对应的绝对剂量, HI 越接近于 0 说明靶区均匀性越好。CI 计算方法如式 (2) 所示。

$$CI = \frac{V_{T95\%}}{V_T} \times \frac{V_{T95\%}}{V_{95\%}} \quad (2)$$

式 (2) 中, $V_{T95\%}$ 为 95% 处方剂量所包绕的靶区体积, V_T 为靶区体积, $V_{95\%}$ 为 95% 处方剂量所包绕的所有区域的体积, CI 值越大表示适形度越好。图 2 为该例患者等中心位置的剂量分布曲线图。

1.6.2 危及器官剂量学参数

收集小肠的 V_{20} 、 V_{25} 、 V_{30} 和平均剂量 D_{mean} (V_{20} 、 V_{25} 、 V_{30} 分别为照射剂量为 20 Gy、25 Gy、30 Gy 的体积百分比); 直肠和膀胱的 V_{35} 、 V_{40} 和 D_{mean} ; 骨 (髌骨和髌骨) 和两侧股骨头的 D_{mean} 。此外, 比较两种算法的 EPID 验证计划的通过率。

1.7 统计学分析

采用 SPSS 24.0 统计软件对以上剂量学参数进行配对 t 检验分析, 采集数据以均数 ± 标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示, $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 靶区剂量参数比较

从表 1 可以看出在宫颈癌术后 VMAT 计划中, AXB 算法与 AAA 算法所得靶区剂量参数存在差异, $D_{2\%}$ 、

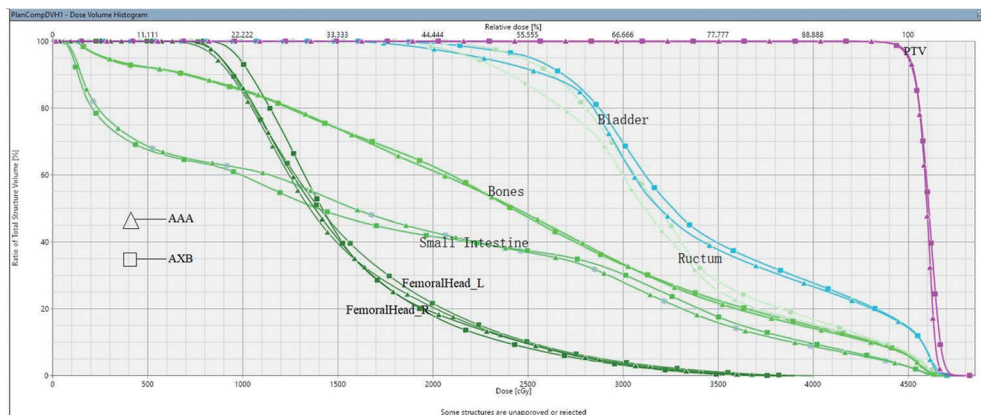


图1 靶区和危及器官DVH图

$D_{5\%}$ 、 $D_{98\%}$ 和 D_{\max} 差异均有统计学差异 ($P < 0.05$), 而 D_{mean} 、 D_{\min} 、 $D_{50\%}$ 、 $D_{95\%}$ 无统计学差异 ($P > 0.05$)。AAA 算法和 AXB 算法所得的 HI 分别为 0.0563 ± 0.0224 和 0.0587 ± 0.0255 , 差异无统计学意义 ($P > 0.05$), AAA 算法和 AXB 算法所得的 CI 分别为 0.888 ± 0.025 和 0.878 ± 0.037 , 差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。HI 越趋近于 0, 说明均匀性越好, CI 越大说明适形度越好。

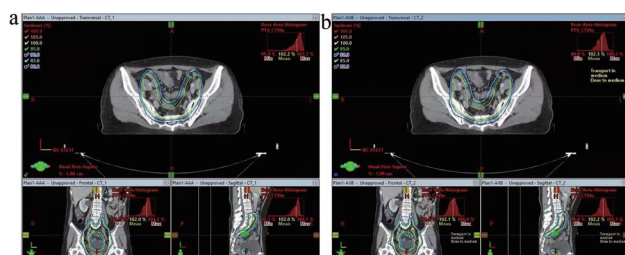


图2 等中心位置剂量分布曲线图
注: a. AAA算法, b. AXB算法。

表1 AXB算法与AAA算法靶区剂量学参数比较 ($n=24$, $\bar{x} \pm s$)

评估参数	靶区	AAA/Gy	AXB/Gy	P值	t值
D_{\max}	PTV	48.1 ± 0.2	48.7 ± 0.3	0.002	-5.865
D_{\min}	PTV	38.8 ± 1.1	38.7 ± 1.3	0.804	0.262
D_{mean}	PTV	46.1 ± 0.1	46.1 ± 0.1	0.252	-1.296
$D_{2\%}$	PTV	47.0 ± 0.2	47.2 ± 0.2	0.007	-4.377
$D_{5\%}$	PTV	46.8 ± 0.2	47.0 ± 0.2	0.011	-3.919
$D_{50\%}$	PTV	46.2 ± 0.1	46.2 ± 0.1	0.401	-0.916
$D_{95\%}$	PTV	45.1 ± 0	45.0 ± 0	0.064	2.372
$D_{98\%}$	PTV	44.5 ± 0.1	44.4 ± 0.1	0.006	4.509
HI	PTV	0.0563 ± 0.0224	0.0587 ± 0.0255	0.438	0.843
CI	PTV	0.888 ± 0.025	0.878 ± 0.037	0.047	-2.617

2.2 危及器官剂量的差异

从表2可以看出用 AAA 和 AXB 两种不同算法评估 OAR 的剂量参数差异, AAA 算法计算所得的小肠的 V_{20} 、 V_{25} 、 V_{30} 、 D_{mean} 与 AXB 算法接近, 差异无统计学意义 ($P > 0.05$); 膀胱和直肠的 V_{35} 、 V_{40} 、 D_{mean} 差异也无统计学意义 ($P > 0.05$); 骨 (髌骨和骶骨)、左股骨头和右股骨头的 D_{mean} 差异均有统计学意义 ($P < 0.05$)。

表2 两种不同算法危及器官剂量学参数比较 ($n=24$, $\bar{x} \pm s$)

危及器官	评估参数	AAA	AXB	P值	t值
小肠	V_{20}	57.9 ± 14.3	58.7 ± 14.1	0.460	-0.800
	V_{25}	45.9 ± 12.7	45.9 ± 11.8	0.973	0.035
	V_{30}	31.0 ± 9.4	32.5 ± 9.7	0.303	-1.149
	$D_{\text{mean}}/\text{Gy}$	22.3 ± 5.2	22.5 ± 5.1	0.387	-0.947
膀胱	V_{35}	41.0 ± 5.4	42.8 ± 6.4	0.207	-1.449
	V_{40}	30.0 ± 5.7	30.6 ± 6.5	0.500	-0.727
	$D_{\text{mean}}/\text{Gy}$	34.4 ± 0.8	34.8 ± 1.4	0.356	-1.015
直肠	V_{35}	45.8 ± 9.6	49.6 ± 11.6	0.241	-1.331
	V_{40}	28.8 ± 5.3	31.0 ± 6.4	0.309	-1.131
	$D_{\text{mean}}/\text{Gy}$	34.5 ± 2.2	35.2 ± 2.5	0.195	-1.495
骨	$D_{\text{mean}}/\text{Gy}$	23.9 ± 1.4	24.7 ± 2.0	0.001	-3.885
左股骨头	$D_{\text{mean}}/\text{Gy}$	17.5 ± 1.8	18.8 ± 2.6	0.006	-3.160
右股骨头	$D_{\text{mean}}/\text{Gy}$	17.7 ± 2.2	19.2 ± 3.1	0.004	-3.428

2.3 两种不同算法对验证计划的统计学差异

由表3可知, 两种算法在进行 EPID 计划验证时, γ 通过率均高于 95%, 满足临床治疗要求。就单个全弧来看, 逆时针 ($179^\circ \sim 181^\circ$) 和顺时针 ($181^\circ \sim 179^\circ$) 方向全弧的 γ 通过率比较差异均无统计学意义 ($P > 0.05$), 而对整个计划而言, 两种算法的 γ 通过率比较差异也无统计学意义。

表3 两种不同算法计划验证通过率比较 ($n=24$, $\bar{x} \pm s$)

Field	AAA	AXB	P值	t值
逆时针	97.1 ± 1.3	97.0 ± 1.1	0.941	0.077
顺时针	99.4 ± 0.4	99.1 ± 0.4	0.061	2.301
全计划	98.1 ± 1.2	98.0 ± 0.9	0.794	0.273

3 讨论

准确计算靶区剂量对评估放射治疗患者体内的肿瘤受量和 OAR 受量非常重要。在宫颈癌治疗中, VMAT 计划不仅具备了调强适形放疗 (Intensity-Modulated Radiotherapy, IMRT) 和三维适形放疗治疗的技术优势, 而且还有更多的自由度, 且靶区适形度高, 剂量均匀性好, OAR 受照剂量低, 故在宫颈癌中得到广泛应用。

Eclipse 系统从 10.0 版本开始嵌入 AXB 算法, 而这一算法在国内近几年才开始使用, 其在临床治疗的安全应用需要大量数据支持^[13]。国外有文献报道了 AXB 算法和 AAA 算法在食管癌、前列腺癌等部位放疗的剂量学差异, 结果都表明 AXB 算法在某些空腔或低密度区域具有更高的精度^[14-17]。然而国内, 刘致滨等^[18]比较了 AXB 与 AAA 算法在肺癌调强放疗计划中的剂量学差异, 结果显示 AAA 算法计算的 PTV 的 D_{\max} 均比 AXB 算法低, 但 AAA 算法的 D_{mean} 均小于 AXB 算法, 该结论与本研究结果有一定的出入, 出现以上差异的原因可能是宫颈癌的靶区、OAR 解剖位置和组织密度与肺癌不同。黎旦等^[19]研究了 AAA 算法和 AXB 算法在直肠癌 VMAT 放疗治疗中的剂量学差异, 发现直肠癌 VMAT 计划中最大差异的 OAR 是双侧股骨头, 与本研究结果具有良好的一致性。双侧股骨头和骨 (髌骨和骶骨) 处在低剂量区且组织密度较大, VMAT 计划的剂量分布是通过控制点实现的, 在治疗过程中机架需要在旋转运动中不停出束, 因此剂量分布受密度差异的影响更大。

本研究结果显示两种不同算法所得的靶区和 OAR 剂量学差异较为明显, 靶区的 $D_{2\%}$ 、 $D_{5\%}$ 、 $D_{98\%}$ 及 D_{\max} 均有显著统计学差异。AAA 算法和 AXB 算法计算的 CI 有显著统计学差异, AAA 算法的 CI 优于 AXB 算法, 这与国外的文献报道^[20]基本一致, 由于 AXB 算法是根据实际材料进行剂量计算的, 所以密度不同的地方沉积的剂量变化会很大, 从而造成 CI 变差。OAR 的骨 (髌骨和骶骨)、左股骨头和右股骨头的 D_{mean} 差异均有统计学意义, 而且 PTV 和 OAR, 除了 D_{\min} 、 $D_{95\%}$ 、 $D_{98\%}$ 和小肠的 V_{25} 外, 其余所有计划参数结果 AAA 算法均低于 AXB 算法, 但相差不大, 均满足临床治疗需求。由 EPID 计划验证结果可知, 两种算法的计划验证无统计学意义, 且均能达到临床质量控制要

求。同时本研究进一步证实,AXB算法在宫颈癌放疗计划中,高密度区域沉积的剂量变化会更大,这使骨形结构等高密度区域平均剂量更高,在做宫颈癌放疗计划选用AAA与AXB算法时,要充分考虑靶区包含多少高密度结构,避免增加患者骨髓抑制风险。

4 结论

AXB算法与AAA算法在宫颈癌VMAT中虽然存在一定的剂量学差异,但均符合剂量学和临床要求。AXB算法得出的PTV、OAR剂量略偏高,适形度略偏低是AXB算法计算更准确所致,故以上参数结果看起来略逊于AAA算法,但剂量更接近实际受量。放疗计划没有最优只有更好,所选用对比计划只要达到临床要求,便不会再继续优化,故优化结果会存在一定的差别,后续还需进一步探讨。本研究为使用Eclipse计划系统做宫颈癌等胸腹部肿瘤放疗计划设计提供了有效的技术参考。

[参考文献]

- [1] Rana S. Clinical dosimetric impact of Acuros XB and analytical anisotropic algorithm (AAA) on real lung cancer treatment plans: review[J]. *Int J Canc Ther Oncol*, 2014, 2(1): 2-13.
- [2] Padmanaban S, Warren S, Walsh A, et al. Comparison of Acuros (AXB) and anisotropic analytical algorithm (AAA) for dose calculation in treatment of oesophageal cancer: effects on modelling tumour control probability[J]. *Radiat Oncol (London, England)*, 2014, 31(4): 13-21.
- [3] Ong CCH, Ang KW, Soh RCX, et al. Dosimetric comparison of peripheral NSCLC SBRT using Acuros XB and AAA calculation algorithms[J]. *Medi Dosim*, 2017, 42(3): 567-572.
- [4] Senkesen O, Goksel E, Kucucuk H, et al. EP-1548: Dosimetric comparison of AAA and Acuros XB algorithms for lung stereotactic radiotherapy[J]. *Radiother Oncol*, 2014, 111 (Suppl 1): S183.
- [5] Cakir A, Akgun Z. Dosimetric comparison of integral radiation dose: anisotropic analytical algorithm and acuros XB in breast radiotherapy[J]. *Inter J Med Phys, Clin Engineer Radiat Oncol*, 2019(2): 57-67.
- [6] Kim KH, Chung JB, Suh TS, et al. Dosimetric and radiobiological comparison in different dose calculation grid sizes between Acuros XB and anisotropic analytical algorithm for prostate VMAT[J]. *PLoS One*, 2018, 13(11): e0207232.
- [7] Nguyen D, Josserand PF, Langeron G, et al. Dosimetric impact of the AAA algorithm versus Acuros XB in extra-cranial stereotactic treatments (SBRT) of lung cancer with VMAT technique[J]. *Physica Medica*, 2014, 30(1): 138-143.
- [8] Kang SW, Sun TS, Chung JB, et al. Dosimetric accuracy of AAA and acuros XB dose calculations within an air cavity for small fields of a 6-MV flattening filter-free beam[J]. *J Korean Phys Soc*, 2015(67): 2138-2145.
- [9] Ashfaq Z, Basim KM, Amjad H. A comparison of Monte Carlo, anisotropic analytical algorithm (AAA) and Acuros XB algorithms in assessing dosimetric perturbations during enhanced dynamic wedged radiotherapy deliveries in heterogeneous media[J]. *J Radiother Pract*, 2018, 13(3): 1-7.
- [10] Mynampati D, Kuo H, Yaparpalvi R, et al. SU-E-T-122: anisotropic analytical algorithm (AAA) vs. acuros XB (AXB) in stereotactic treatment planning[J]. *Med Phys*, 2015, 42(6): 3359.
- [11] Feuvret L, Noël G, Mazon JJ, et al. Conformity index: a review[J]. *Int J Radiat Oncol Bio Phys*, 2006, 64(2): 333-342.
- [12] 牛瑞军, 张晖, 刘志强, 等. 不同剂量算法在宫颈癌术后IMRT计划设计中的剂量学分析[J]. *中国医学物理学杂志*, 2018, 35(2): 145-150.
- [13] 陆佳扬, 张基永, 张武哲, 等. Acuros XB与AAA算法在鼻咽癌VMAT计划验证中的差异[J]. *中国老年学*, 2015, 35(14): 3909-3911.
- [14] Onizuka R, Araki F, Ohno T, et al. Accuracy of dose calculation algorithms for virtual heterogeneous phantoms and intensity-modulated radiation therapy in the head and neck[J]. *Radio Phys Tec*, 2016, 9(1): 77-87.
- [15] Koo T, Chung JB, Eom KY, et al. Dosimetric effects of the acuros XB and anisotropic analytical algorithm on volumetric modulated arc therapy planning for prostate cancer using an endorectal balloon[J]. *Radiat Oncol*, 2015(10): 48.
- [16] Hedin E, Bäck A. Influence of different dose calculation algorithms on the estimate of NTCP for lung complications[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2013, 14(5): 127-139.
- [17] Li Y, Rodrigues A, Li T, et al. Impact of dose calculation accuracy during optimization on lung IMRT plan quality[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2015, 16(1): 219-228.
- [18] 刘致滨, 石锦平, 张利文, 等. Acuros XB与AAA算法在肺癌调强放疗计划设计中的比较[J]. *中国医学物理学杂志*, 2017, 34(10): 984-987.
- [19] 黎旦, 宾石珍, 程晶晶, 等. AXB算法与AAA算法在直肠癌VMAT放射治疗中的剂量学差异[J]. *肿瘤学杂志*, 2017, 23(2): 92-96.
- [20] Elsherbini N, Ahmed W, Elwakeel S. Verification of performance of Acuros XB Algorithm (AXB) implemented on eclipse planning system[J]. *Research in Oncology*, 2018, 14(1): 1-5.

本文编辑 崔丽君