

## Monaco统计噪声参数设置对计算效率和剂量精度的影响

李晨光<sup>1</sup>, 赵晶晶<sup>2</sup>, 李正贤<sup>3</sup>, 黎田<sup>2</sup>, 牛小宇<sup>1</sup>, 岳海振<sup>2</sup>

1. 中国海洋大学海洋技术系, 山东 青岛 266100; 2. 北京大学肿瘤医院暨北京市肿瘤防治研究所放疗科/恶性肿瘤发病机制及转化研究教育部重点实验室, 北京 100142; 3. 吉林国文医院放疗科, 吉林 公主岭 136100

**【摘要】目的:**对比 Monaco 计划系统 Per Calculation(PC)和 Per Control Point(PCP)两种统计噪声设置方式的剂量计算精度和计算效率。**方法:**选取 30 例 IMRT/VMAT 治疗计划, 其中胸部和鼻咽部肿瘤各 15 例, 两种噪声统计方式按照剂量计算精度递减的方式分别设置为 5 组和 6 组, 评估其对计算时间和各剂量学评价指标的影响。**结果:**两种噪声统计方式计算时间(s)分别为 131.78±26.91、6.76±3.57、1.75±0.57、0.84±0.24、0.84±0.24(PC)和 259.20±80.15、73.53±26.00、9.18±3.26、3.60±1.67、1.59±0.75、1.13±0.49(PCP), 均与计算精度呈负相关, 且差异具有统计学意义( $P<0.05$ ); 两组计划各剂量学评价指标箱图分析显示, 均值和特定剂量的体积等指标四分位距较小, 最大值和全局最大值等评价指标四分位距较大; 两组计划各剂量学评价指标单因素 ANOVA 分析结果无统计学差异( $P>0.05$ )。**结论:**两种统计噪声设置方式均可用于临床治疗计划计算精度设置; 治疗计划全局最大值与统计噪声正相关, 计算时间与统计噪声负相关; 不同 PC/PCP 参数设置对均值和特定剂量的体积等评价影响较小, 对全局和串行器官最大值影响较大。

**【关键词】** Monaco 计划系统; 统计噪声; 计算效率; 剂量精度

**【中图分类号】** R144.1

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1005-202X(2018)07-0766-05

## Effects of different uncertainty settings in Monaco treatment planning system on computation efficiency and dosimetric accuracy

LI Chenguang<sup>1</sup>, ZHAO Jingjing<sup>2</sup>, LI Zhengxian<sup>3</sup>, LI Tian<sup>2</sup>, NIU Xiaoyu<sup>1</sup>, YUE Haizhen<sup>2</sup>

1. Department of Marine Technology, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Carcinogenesis and Translational Research (Ministry of Education), Department of Radiotherapy, Peking University Cancer Hospital & Institute, Beijing 100142, China; 3. Department of Radiotherapy, Jilin Guowen Hospital, Gongzhuling 136100, China

**Abstract: Objective** To compare the accuracy and efficiency of dose calculation using two uncertainty settings in Monaco treatment planning system, namely Per Calculation (PC) and Per Control Point (PCP). **Methods** Thirty intensity-modulated radiotherapy (IMRT) or volumetric modulated arc therapy (VMAT) plans, including 15 for thoracic cancer and 15 for nasopharyngeal carcinoma, were included in this study. According to the decreasing accuracy of dose calculation, 5 groups of PC and 6 groups of PCP, with a total of 11 parameters, were selected in this study. The effects of uncertainty settings on computation time and dosimetric evaluation indicators were evaluated. **Results** The computation time (s) was 131.780±26.910, 6.76±3.57, 1.75±0.57, 0.84±0.24 and 0.84±0.24 for PC, and 259.20±80.15, 73.53±26.00, 9.18±3.26, 3.60±1.67, 1.59±0.75 and 1.13±0.49 for PCP, respectively. The computation time of PC and PCP was negatively correlated with the accuracy of dose calculation, with statistical significance ( $P<0.05$ ). The box plot analysis of dosimetric evaluation indicators between two settings showed smaller interquartile ranges among the mean dose and several dose-volume indexes, and larger interquartile ranges in the maximum dose and global maximum dose. Single factor ANOVA analysis of different dosimetric evaluation indicators showed no statistical differences between two uncertainty settings ( $P>0.05$ ). **Conclusion** The two uncertainty settings can be used in the clinical treatment planning. The global maximum dose is positively correlated with uncertainty, while the computation time is negatively correlated with uncertainty. PC/PCP settings have marginal effects on the mean dose and specific dose-volume indexes, but significant effects on the global maximum dose and the maximum dose to the serial organs.

**Keywords:** Monaco treatment planning system; uncertainty; computation efficiency; dosimetric accuracy

**【收稿日期】** 2018-04-15

**【基金项目】** 北京市自然科学基金(1174016, 7172048, 1184014); 国家自然科学基金(11505012); 首都卫生发展科研专项(首发 2018-4-1027); 北京大学医学科技创新平台发展基金-青年培育基金(BMU2017PY028, BMU2017PY003)

**【作者简介】** 李晨光, E-mail: 779503913@qq.com

**【通信作者】** 岳海振, 硕士, 工程师, 研究方向: 医学物理, E-mail: yuezhz@163.com

## 前言

蒙特卡罗(Monte Carlo)方法是以概率统计理论为基础的一种计算方法,被视为较为精确的剂量计算工具<sup>[1-2]</sup>,为临床放疗剂量验证的金标准。Monaco计划系统是以蒙特卡罗算法为基础,通过对两种统计噪声参数的设置(Per Calculation/Per Control Point),决定入射源模拟产生粒子的数量,从而达到所要求的计算精度。文献[3-5]表明蒙特卡罗算法在极限条件的剂量计算精度优于各向异性、卷积迭代等算法,但其计算效率较低,因此在保证精度的前提下有效提高计算效率有利于临床工作的开展。在Elekta公司Monaco临床治疗计划方案制定过程中,评估两种设置方式在计算成本和计算精度方面的性能对于放疗方案质量和效率非常关键。本研究选取30例IMRT/VMAT治疗计划,其中腹部和鼻咽部肿瘤各15例,在保证逆向优化结果、体素大小、计算网格等参数不变的前提下,仅修改两种统计噪声设置参数后重新进行剂量计算,对比分析计算时间和各危及器官的 $D_{max}$ 、 $D_{mean}$ 等评价参数差异,寻求计算效率较高的统计噪声设置方式,对保证放疗精度和工作效率具有参考意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 统计噪声

Monaco计划系统用户说明书介绍,在治疗计划逆向优化完成之后正向剂量计算之前,Monaco根据用户定义的统计噪声设置参数决定从源模型中生成用于剂量计算的粒子数。粒子数的计算基于一个经验方程,包含用户输入的蒙特卡罗统计噪声,用户根据计划质量的不同要求,通过提高粒子数降低噪声和统计标准差。Per Calculation(PC)方式用于定义单次剂量计算的统计噪声,Per Control Point(PCP)方式用于定义每个控制点在剂量计算时的统计噪声。临床治疗计划方案包括多个射野或控制点(子野),整个计划的统计噪声可能低于每个单独射野的统计噪声,尤其在重叠区。射野统计噪声可能低于每一个控制点统计噪声。统计噪声的差异是与射野和子野的权重及面积相关。鉴于在计算前无法评估射束子野的优化权重,Monaco计划系统需要增加粒子数来确保达到用户设置的统计噪声,因此在其计算结果与设置精度有一定差别。

### 1.2 软硬件设置与病例选取

Monaco计划系统计算服务器为HP Z840,处理器28核Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2697 V3,主频

2.6 GHz,内存64 GB。为避免计算任务之间的干扰,每次只执行一个治疗计划的计算任务;为避免体素大小不同对蒙特卡罗统计误差的影响,30例病例的计算网格统一设置为0.3 cm。Monaco计划系统统计噪声设置方式有两种,依据研究者临床经验按照剂量计算精度递减的方式分别设置为PC方式5个(0.1、0.5、1、3、5),PCP方式6个(0.5、1、3、5、8、10),共11个参数。在保持其他优化条件不变前提下,只改变统计噪声并重新进行剂量计算。

本研究选取15例鼻咽部和15例胸部肿瘤的治疗计划进行对比研究,参与评估的危及器官包含串行器官和并行器官,评价参数包括危及器官的最大值和平均值及特定剂量的体积指标等。对于胸部计划,统计脊髓最大值,肺 $V_5$ 、 $V_{20}$ 、平均剂量,心脏 $V_{30}$ 、平均剂量、最大剂量点,共7个参数;头颈部计划,统计脊髓、脑干、视神经、视交叉、晶体的最大值,腮腺、下颌骨的均值,全局最大剂量值,共11个参数。由于所选病例的特殊性,统计数据并不完全包括上述危及器官的统计参数,导致本研究个别危及器官的统计数据有所缺失。

### 1.3 数据处理及统计学方法

通过改变统计噪声设置得到的两个部位共18个危及器官的11个剂量值采用Origin12做框图分析;利用SPSS 21对30个病例的每个统计噪声设置参数得到的18个剂量值进行单因素ANOVA分析, $P<0.05$ 表示差异具有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 时间与统计噪声关系

对30例患者11个统计噪声参数设置方式计算时间(s)的均值与标准差分别为:131.78±26.91、6.76±3.57、1.75±0.57、0.84±0.24、0.84±0.24(PC);259.20±80.15、73.53±26.00、9.18±3.26、3.60±1.67、1.59±0.75、1.13±0.49(PCP),其中PC方式下3和5计算时间相同;计算时间除以不同的系数之后做箱图分析,结果如图1所示。对PC/PCP两种设置方式计算时间分别做单因素ANOVA分析, $P=0.00$ ,具有显著的统计学差异,表明统计噪声与计算时间负相关。

### 2.2 单因素ANOVA分析

对30例患者各危及器官不同评价指标的两种统计噪声设置方式分别做单因素ANOVA分析,结果如表1所示。结果显示各危及器官评价指标 $P$ 值均大于0.05,差异不具有统计学意义。其中,两组病例全局最大值和脊髓最大值差异较大,表明两种统计噪声设置方式对最大值较为敏感。

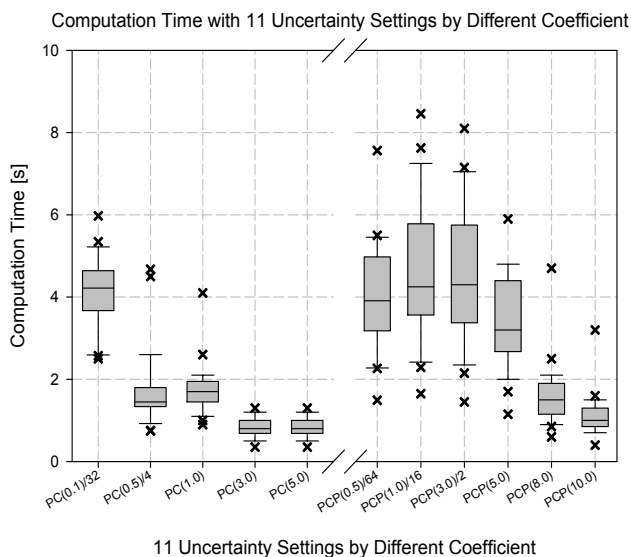


图1 30例患者11个统计噪声参数对应计算效率乘以不同系数的箱图分析

Fig.1 Multiplying computation time corresponding to 11 uncertainty parameters by different coefficient for 30 patients

表1 30例患者两种统计噪声设置方式的单因素ANOVA分析结果

Tab.1 One-way ANOVA analysis results of two uncertainty setting methods for 30 patients

Organs-at-risk	P values for uncertainty settings	
	PC	PCP
Brain stem	1.000	1.000
NPC_Spinal cord	0.999	1.000
Optic chiasm	1.000	1.000
Optic never_L	1.000	1.000
Optic never_R	1.000	1.000
Lens_L	1.000	1.000
Lens_R	1.000	1.000
Madible_Mean	1.000	1.000
Parotid_L	1.000	1.000
Parotid_R	1.000	1.000
NPC_D <sub>max</sub>	0.444	0.886
Lung_V <sub>5</sub>	1.000	1.000
Lung_V <sub>20</sub>	1.000	1.000
Lung_Mean	1.000	1.000
Thorax_Spinal cord	0.964	0.995
Heart_V <sub>30</sub>	1.000	1.000
Heart_Mean	1.000	1.000
Thorax_D <sub>max</sub>	0.812	0.975

PC: Per Calculation; PCP: Per Control Point

### 2.3 危及器官箱图分析

分别对鼻咽部和胸部肿瘤各危及器官的11个统计噪声设置得到的数值做箱图分析,见图2。其中全肺V<sub>5</sub>、V<sub>20</sub>、平均剂量,心脏V<sub>30</sub>和平均剂量,双侧腮腺、下颌骨的平均剂量等,四分位距较小,异常值较小;其他危及器官和全局最大值等评价参数,四分位距较大,且异常值较大,其中两个肿瘤部位治疗计划的全局最大值差别最大,表明两种统计噪声设置方式对各组织和器官的最大值影响较大。

综合计算效率和剂量计算精度两种因素,本研究推荐在治疗计划制定过程中使用PC/PCP两种方式较高的参数进行正向剂量计算以提高计算效率,在治疗计划完成之后采用PC/PCP任意一种方式下较低参数重新计算,以获取精确的计算结果和较低的全局或串行器官最大值的统计结果。

### 3 结论与讨论

IMRT/VAMT技术在鼻咽癌和肺癌病例靶区适形度的提高和危及器官的保护方面独具优势<sup>[6-8]</sup>,临床上用于剂量计算的算法精度问题成为临床和科研工作者比较关心的问题。Monaco方法被广泛应用于临床上常见的各向异性(AAA)、卷积迭代(CCC)、Acrous XB等算法精度验证等方面<sup>[9-12]</sup>和临床治疗计划系统的验证等方面<sup>[13-15]</sup>。Monaco计划系统结合蒙特卡罗剂量计算精度和强健的优化工具,为3DCRT、IMRT、VMAT、SRS和SBRT提供高质量的放射治疗方案,使得临床医生和病人能够从蒙特卡罗算法的准确性中获益<sup>[16-17]</sup>,研究表明Monaco算法本身精度与入射电子的粒子数正相关,与模拟的CT图像的体素负相关,同时粒子数的增加意味着模拟时间的大量提高<sup>[18-19]</sup>。Monaco计划系统是基于蒙特卡罗方法的治疗计划系统,其模拟精度有两种设置方式,均可用于临床治疗计划剂量计算精度的控制。在满足临床需求的前提下,综合评估计算成本和治疗计划计算精度对临床物理师制定放疗计划具有一定的指导意义。

本研究通过分析两种统计噪声设置方式在计算效率和各危及器官评价指标方面的差异,旨在研究统计噪声设置方式和参数值对各种评价指标之间的关系,为使用Monaco计划系统的临床物理师制定治疗计划提供参考。研究结果显示,统计噪声设置参数对平均剂量和特定剂量对应的体积等评估指标影响较小,而对全局最大值和串行器官如脊髓最大值等评估指标影响较大,其中全局最大值与统计噪声设置数值呈正相关,且差异具有统计学意义。另外,



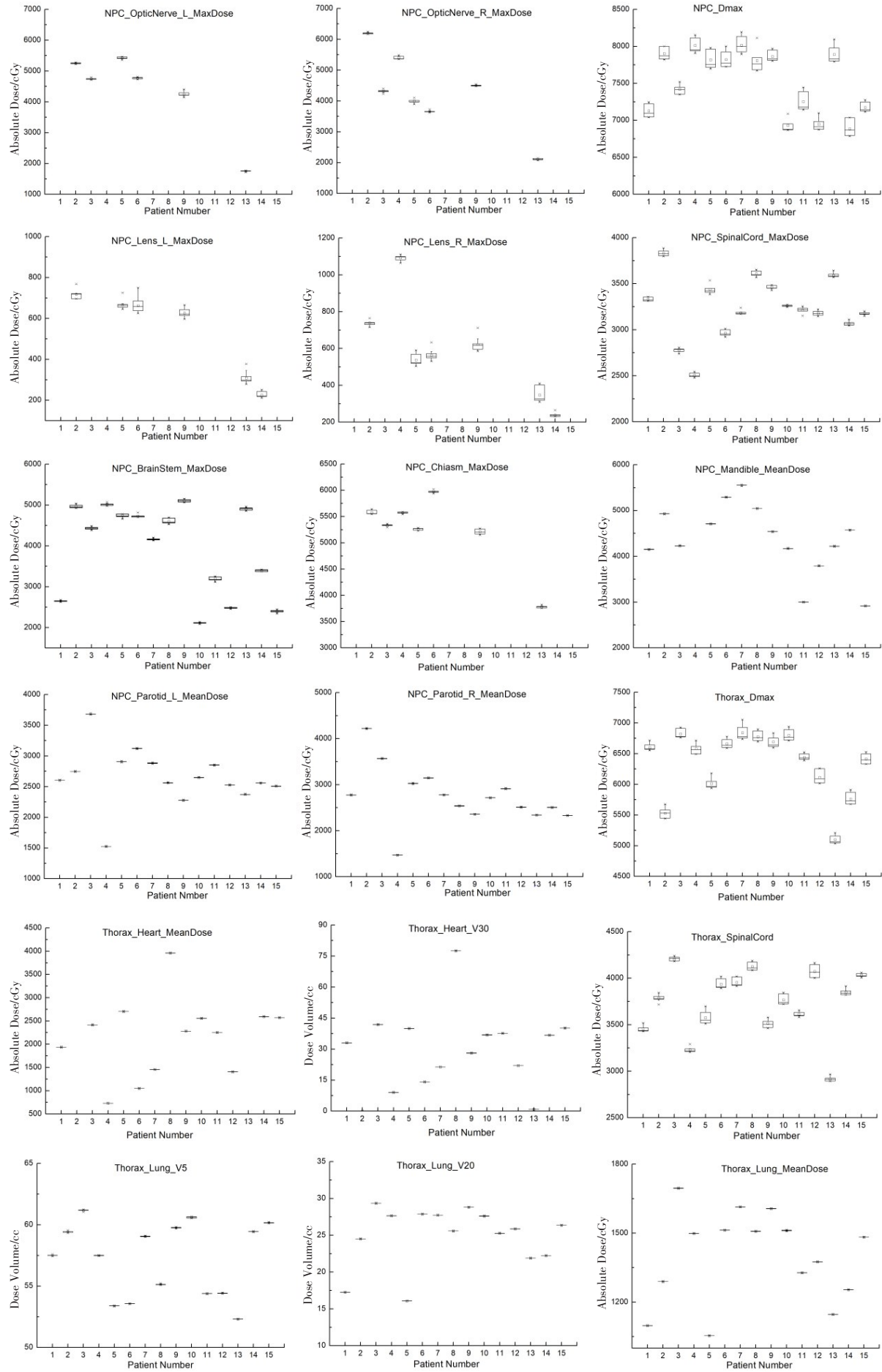


图2 两个部位肿瘤病例18个危及器官剂量学评价指标框图分析

Fig.2 Box chart analysis of 18 OAR dosimetric evaluation indicators for two types of cancer

两种统计噪声设置方式之间并无差异,均可用于治疗计划质量的控制,其计算效率与统计噪声要求呈负相关,即精度要求越高(统计噪声值越小),所需时间越长。临床物理师可根据放疗中心治疗计划系统的硬件配置和放疗剂量计算精度的临床要求设置该参数,在现有硬件基础上,保证临床剂量计算精度的前提下提高工作效率。

## 【参考文献】

- [1] KEALL P J, SIEBERS J V, JERAJ R, et al. The effect of dose calculation uncertainty on the evaluation of radiotherapy plans[J]. *Med Phys*, 2000, 27(3): 478-484.
- [2] SHARMA S, OTT J, WILLIAMS J, et al. Dose calculation accuracy of the Monte Carlo algorithm for CyberKnife compared with other commercially available dose calculation algorithms[J]. *Med Dosim*, 2012, 36(4): 347-350.
- [3] MILLE M M, JUNG J W, LEE C, et al. Comparison of normal tissue dose calculation methods for epidemiological studies of radiotherapy patients[J]. *J Radiol Prot*, 2018, 38(2): 775-792.
- [4] MELO R C, PATRICIA N, SAULO F, et al. Effects of heterogeneities in dose distributions under nonreference conditions: Monte Carlo simulation vs dose calculation algorithms[J]. *Med Dosim*, 2018. doi: 10.1016/j.meddos.2018.02.009.
- [5] HAN T, MIKELL J K, SALEHPOUR M, et al. Dosimetric comparison of Acuros XB deterministic radiation transport method with Monte Carlo and model-based convolution methods in heterogeneous media [J]. *Med Phys*, 2011, 38(5): 2651-2664.
- [6] ZHANG W Z, LU J Y, CHEN J Z, et al. A dosimetric study of using fixed-jaw volumetric modulated arc therapy for the treatment of nasopharyngeal carcinoma with cervical lymph node metastasis[J]. *PLoS One*, 2016, 11(5): e0156675.
- [7] NING Z H, MU J M, JIN J X, et al. Single arc volumetric-modulated arc therapy is sufficient for nasopharyngeal carcinoma: a dosimetric comparison with dual arc VMAT and dynamic MLC and step-and-shoot intensity-modulated radiotherapy[J]. *Radiat Oncol*, 2013, 8(1): 1-9.
- [8] GU W, LI Q, DAN X, et al. The hippocampus sparing volume modulated arc therapy does not influence plan quality on locally advanced nasopharyngeal carcinoma patients[J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 3443.
- [9] KATHIRVEL M, SUBRAMANIAN V S, ARUN G, et al. SU-E-T-516: dosimetric validation of AcurosXB algorithm in comparison with AAA & CCC algorithms for VMAT technique[J]. *Med Phys*, 2012, 39 (6Part18): 3824.
- [10] ZHEN H, HRYCUSHKO B, LEE H, et al. Dosimetric comparison of Acuros XB with collapsed cone convolution/superposition and anisotropic analytic algorithm for stereotactic ablative radiotherapy of thoracic spinal metastases[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2015, 16(4): 181-192.
- [11] 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*, 2014, 9(1): 1-6.
- [12] FOGLIATA A, LOBEFALO F, REGGIORI G, et al. Evaluation of the dose calculation accuracy for small fields defined by jaw or MLC for AAA and Acuros XB algorithms[J]. *Med Phys*, 2016, 43(10): 5685.
- [13] LOBO J, POPESCU I A. Two new DOSXYZnrc sources for 4D Monte Carlo simulations of continuously variable beam configurations, with applications to RapidArc, VMAT, TomoTherapy and CyberKnife[J]. *Phys Med Biol*, 2010, 55(16): 4431-4443.
- [14] BELEC J, PLOQUIN N, RUSSA D J, et al. Position-probability-sampled Monte Carlo calculation of VMAT, 3DCRT, step-shoot IMRT, and helical tomotherapy dose distributions using BEAMnrc/DOSXYZnrc[J]. *Med Phys*, 2011, 38(2): 948-960.
- [15] TEKE T, BERGMAN A M, KWA W, et al. Monte Carlo based, patient-specific RapidArc QA using linac log files[J]. *Med Phys*, 2010, 37(1): 116-123.
- [16] CLEMENTS M, SCHUPP N, TATTERSALL M, et al. Monaco treatment planning system tools and optimization processes[J]. *Med Dosim*, 2018, 43(2): 106-117.
- [17] NARAYANASAMY G, SAENZ D L, DEFOOR D, et al. Dosimetric validation of Monaco treatment planning system on an Elekta VersaHD linear accelerator[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2017, 18(6): 123-129.
- [18] BERGSTROM P M, DALY T P, MOSES E I, et al. System and method for radiation dose calculation within sub-volumes of a Monte Carlo based particle transport grid: US6148272[P]. 2000.
- [19] ROBERT C, DEDES G, BATTISTONI G, et al. Distributions of secondary particles in proton and carbon-ion therapy: a comparison between GATE/Geant4 and FLUKA Monte Carlo codes[J]. *Phys Med Biol*, 2013, 58(9): 2879-2899.

(编辑:黄开颜)