

## CT扫描电压与CT值-相对电子密度值转换曲线不匹配对放疗计划剂量的影响

孔繁图<sup>1</sup>, 陈露茜<sup>1</sup>, 金锦辉<sup>2</sup>, 董洁<sup>1</sup>, 贺亚迪<sup>2</sup>, 李政欢<sup>1</sup>

1. 中山大学附属第三医院肿瘤放射治疗科, 广东 广州 510630; 2. 南方医科大学生物医学工程学院, 广东 广州 510515

**【摘要】目的:**探讨选取不同放疗定位CT扫描电压和CT值-相对电子密度值(CT-RED)转换曲线对放疗计划剂量计算的影响。**方法:**利用大孔径CT模拟定位机在80、100、120和140 kV电压下对CIRS 062M模体进行扫描, 分别建立不同电压下的CT-RED转换曲线; 在均匀石蜡模体中心嵌入高密度材料, 通过选择不同CT扫描电压与CT-RED转换曲线的组合条件, 在计划系统(TPS)设计不同照射角度的放疗计划。分别在高密度材料前、材料中和材料后选取3个兴趣点 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ , 统计高密度材料的 $D_{mean}$ 、 $D_2$ 、 $D_{98}$ , 分析CT扫描电压与CT-RED转换曲线不匹配时对以上3个兴趣点剂量( $D_{I1}$ 、 $D_{I2}$ 、 $D_{I3}$ )和高密度材料 $D_{mean}$ 、 $D_2$ 、 $D_{98}$ 的影响。**结果:**CT扫描电压与CT-RED转换曲线不匹配的组合条件下, 放疗计划剂量有较大差异, 其中 $D_{mean}$ 、 $D_{98}$ 、 $D_{I2}$ 、 $D_{I3}$ 影响较大, 差异具有统计学意义(均 $P<0.05$ )。**结论:**放疗患者CT定位的扫描电压需要与TPS计划设计时选取的CT-RED转换曲线匹配, 否则会造成高密度组织中的剂量和射野出口处的剂量计算有较大差异, 从而影响放疗计划的准确性。

**【关键词】**CT扫描电压; CT值; 相对电子密度; 放疗计划; 剂量计算

**【中图分类号】**R318; R811

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2021)03-0312-05

### Effects of mismatch between CT scanning voltage and CT-RED conversion curve on radiotherapy dose

KONG Fantu<sup>1</sup>, CHEN Luxi<sup>1</sup>, JIN Jinhui<sup>2</sup>, DONG Jie<sup>1</sup>, HE Yadi<sup>2</sup>, LI Zhenghuan<sup>1</sup>

1. Department of Radiation Oncology, The Third Affiliated Hospital of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510630, China; 2. School of Biomedical Engineering, South Medical University, Guangzhou 510515, China

**Abstract: Objective** To explore the effects of different voltages selected for computed tomography (CT) positioning and CT number-relative electron density (CT-RED) conversion curves on the calculation of radiotherapy dose. **Methods** Under the voltages of 80, 100, 120 and 140 kV, CIRS 062M phantom were scanned by a large-aperture CT simulator, thereby establishing CT-RED conversion curves under different voltages. A known high-density material was embedded in the center of a uniform paraffin phantom, and by setting a series of combinations of different voltages and CT-RED conversion curves, radiotherapy plans with different irradiation angles were established in treatment planning system. The variations of doses ( $D_{I1}$ ,  $D_{I2}$  and  $D_{I3}$ ) delivered to 3 points of interest ( $I_1$ ,  $I_2$  and  $I_3$ ) selected at the front, middle and rear of the high-density material and the changes in the  $D_{mean}$ ,  $D_2$  and  $D_{98}$  of the high-density material were analyzed when voltages mismatched with CT-RED conversion curves. **Results** Under the mismatch between voltages and CT-RED conversion curves, the doses of radiotherapy plan were significantly different, among which  $D_{mean}$ ,  $D_{98}$ ,  $D_{I2}$ ,  $D_{I3}$  were most affected, with statistical differences (all  $P<0.05$ ). **Conclusion** The voltage for CT positioning needs to match with CT-RED conversion curve selected for radiotherapy planning. Otherwise, it will lead to great differences in the calculations of dose in the high-density material and the dose at the exit of radiation field, thus affecting radiotherapy accuracy.

**Keywords:** CT scanning voltage; CT number; relative electron density; radiotherapy plan; dose calculation

### 前言

**【收稿日期】**2020-09-22

**【作者简介】**孔繁图, 助理工程师, 研究方向: 放射治疗物理, E-mail: mralonekft@163.com

**【通信作者】**李政欢, 主管技师, 研究方向: 放射治疗物理, E-mail: huanliz2819@163.com

随着现代放疗技术的成熟和设备的不断发展, 精确放疗对设备精度和治疗计划系统的计算精度要求也越来越高, 以CT扫描为基础的放射治疗计划设计在肿瘤治疗中扮演了越来越重要的角色<sup>[1]</sup>。定位CT作为放疗计划设计的重要组成部分, CT扫描参数的差异可能会使某一组织重建影像的CT值发生改变<sup>[2]</sup>。物质的相对电子密度(Relative Electron

Density, RED)影响着射线在人体组织中的吸收与散射,因此准确标定采集数据时CT值与物质RED的关系,成为提高现代精确放疗计划系统中不均匀组织计算精度的基础<sup>[3]</sup>。

保证计划系统剂量计算的准确性是精确放疗治疗的基础,而放疗定位图像CT值的准确性决定着剂量计算的精度<sup>[4-5]</sup>。CT值代表X射线穿过组织被吸收后的衰减值,主要有3个方面的因素影响CT值:(1)CT的设备参数,如扫描电压、图像采集层厚等的影响;(2)患者因素,如患者外轮廓、植入物等的影响;(3)其他辅助设备,如病床、固定材料等的影响<sup>[6]</sup>。

在6 MV光子线下,高密度组织材料对剂量的影响比低密度组织材料更敏感,高密度组织材料(HU值>100)中10%的RED值变化将会引起3%的剂量改变<sup>[7]</sup>。高密度组织在不同的扫描电压下,其CT值变化较低密度组织大;CT值-相对电子密度值(CT-RED)转换曲线造成的剂量计算差异不受放疗技术(如适形、调强)的影响<sup>[8]</sup>。人体各部位的组织构成复杂,在不同扫描部位采集得到的CT-RED转换曲线会不一样,为了确保剂量计算的精度,对于头部与胸部肿瘤应该尽量选择各自扫描模式下的CT-RED转换曲线进行剂量计算<sup>[9]</sup>。本研究旨在探讨CT扫描电压与CT-RED转换曲线不匹配的情况下对放疗计划剂量计算的影响。

1 材料

使用放疗定位CT,设置特定参数及序列,扫描已知密度模体,选用CIRS062M型模体通过放疗计划系统(TPS)建立各个扫描条件下的CT-RED曲线,并利用TPS设计模体照射计划。其中,放疗定位CT为西门子(Siemens)的SOMATOM Definition AS64层大孔径螺旋扫描CT,定位床面为放疗专用碳纤维平面床板;激光定位仪为GAMMEX公司的三维移动激光灯;TPS为医科达公司的MONACO5.11.01版本。

计划设计模体如图1所示,其结构为直径14 cm的均匀密度石蜡,石蜡中心为CIRS062M型的062MA-18号模体,物理密度1.82 g/cc,电子密度 $5.66\times10^{23}$  electrons/cc,相对水电子密度1.695,直径2.5 cm。

2 方法

2.1 建立CT-RED转换曲线

扫描前进行放疗大孔径CT机自检,确保CT工作状态正常。CT扫描电压分别设置为80、100、120和140 kV,电流均为382 mAs,扫描层厚为3 mm。扫描模体及其CT图像如图2所示。在CT横断面中测量各模体棒的对应CT值,测量选取区域为模体棒中心。以圆

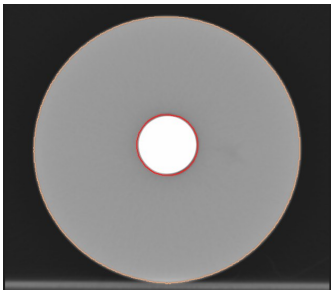


图1 高密度模体嵌入均匀石蜡CT图像  
Fig.1 CT image of high-density phantom embedded in a uniform paraffin phantom

形取样,其直径为模体棒直径的1/3,共取4个层面统计其CT均值。将相同模体内层和外层CT值取平均,结果如表1所示。通过MONACO计划系统CT-RED转换曲线程序建立不同扫描电压的CT-RED转换曲线(图3)。

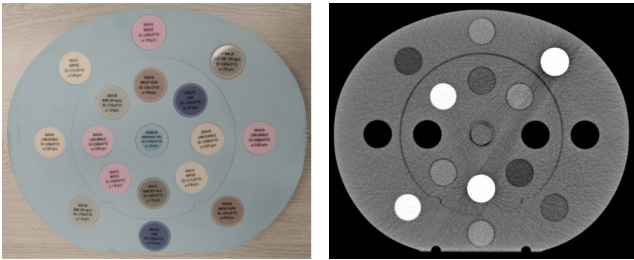


图2 CIRS062电子密度模体及其CT扫描图像  
Fig.2 CIRS062 electron density phantom and its CT image

表1 等效组织模体对应的相对电子密度和CT值  
Tab.1 Relative electron density (RED) and CT number of the tissue-equivalent phantom

模型	相对电子密度	扫描电压/HU			
		140 kV	120 kV	100 kV	80 kV
Air	0.001	-1 000	-1 000	-1 000	-1 000
Lung-Inhale	0.205	-842	-838	-842	-838
Lung-Exhale	0.507	-533	-533	-532	-532
Adipose	0.960	-76	-82	-87	-98
Breast	0.990	-33	-39	-41	-51
Water	1.000	0	-1	-1	-2
Muscle	1.060	48	45	46	46
Liver	1.070	76	75	79	84
Bone-Trabecular	1.117	228	246	284	346
Dense Bone1	1.456	816	890	1 023	1 237
Dense Bone2	1.695	1 263	1 377	1 587	1 921
Paraffin wax	0.935	-140	-115	-100	-90

2.2 实验设计

嵌有062MA-18高密度模体的石蜡分别以电压

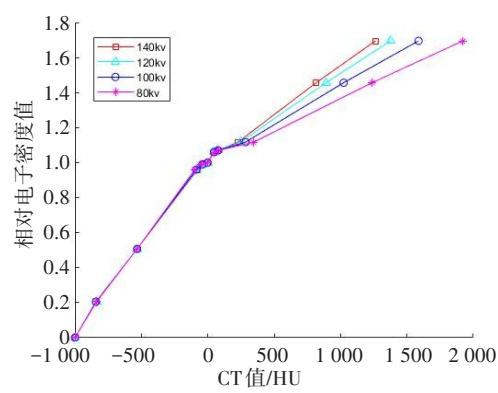


图3 不同扫描电压下CT值与相对电子密度值的转换曲线  
Fig.3 CT-RED conversion curves under different voltages

80、100、120、140 kV, 电流 382 mAs, 3 mm 层厚进行扫描, 将该 4 套 CT 图像传至 MONACO 治疗计划系统。勾画石蜡外轮廓并命名为 Patient, 勾画高密度组织并命名为计划靶区 (Planning Target Volume, PTV), 在该 4 套 CT 图像分别设计 0°、45°、90°、135°、180°、225°、270°、315° 的单野计划, 图 4 为 0° 的单野计划, 射野参数如下, grid spacing: 3 mm、statistical uncertainty: 2%, PTV 外放 1.0 cm 得到照射野范围, 机器跳数 100 MU, 分别在射野中心轴上 PTV 前、PTV 中心、PTV 后等距离 4 cm 处建立 3 个感兴趣点, 命名为 I<sub>1</sub>、I<sub>2</sub>、I<sub>3</sub>。按照射线衰减规律, D<sub>11</sub>、D<sub>12</sub>、D<sub>13</sub> (感兴趣点 I<sub>1</sub>、I<sub>2</sub>、I<sub>3</sub> 点剂量) 及 PTV 剂量统计值 D<sub>mean</sub> (靶区剂量均值)、D<sub>2</sub> (2% 体积覆盖剂量)、D<sub>98</sub> (98% 体积覆盖剂量) 能有效反映不同照射计划情况下, 照射计划的剂量学统计情况。

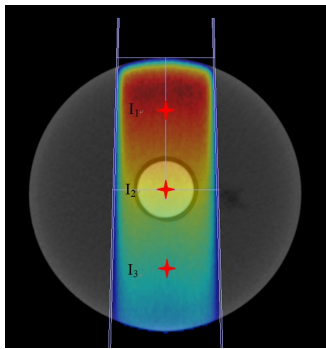


图4 0°单野计划, 图中“+”依次为 I<sub>1</sub>、I<sub>2</sub>、I<sub>3</sub> 感兴趣点  
Fig.4 Three points of interest (I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub> and I<sub>3</sub>) were marked as '+' in the 0° single-field radiotherapy plan

在 0°、45°、90°、135°、180°、225°、270°、315° 8 个角度分别设计相同参数的单野计划, 每个角度正确选择 CT 扫描电压和 CT-RED 转换曲线分别存在 4 种情况, 扫描电压和 CT-RED 转换曲线匹配共 32 组, 命名为 A, 如表 2 所示。将 CT 扫描电压与 CT-RED 转换曲线不匹配的分组命名为 B, 共 96 组, 如表 3 所示。

整个研究共计 128 组计划数据, 每组包含 6 个剂量学统计参数, 实验结果数据使用 SPSS 20 进行独立样本 *t* 检验, 以验证计划剂量差异情况。

表2 CT扫描电压与CT-RED转换曲线匹配的分組  
Tab.2 Match of voltages and CT-RED conversion curves and its grouping

CT扫描电压 & CT-RED转换曲线	组别
80 kV & 80 kV	A
100 kV & 100 kV	A
120 kV & 120 kV	A
140 kV & 140 kV	A

表3 CT扫描电压与CT-RED转换曲线不匹配的分組  
Tab.3 Mismatch of voltages and CT-RED conversion curves and its grouping

CT扫描电压 & CT-RED转换曲线	组别	CT扫描电压 & CT-RED转换曲线	组别
80 kV & 100 kV	B	120 kV & 80 kV	B
80 kV & 120 kV	B	120 kV & 100 kV	B
80 kV & 140 kV	B	120 kV & 140 kV	B
100 kV & 80 kV	B	140 kV & 80 kV	B
100 kV & 120 kV	B	140 kV & 100 kV	B
100 kV & 140 kV	B	140 kV & 120 kV	B

2.3 实验结果

根据不同CT扫描电压建立的CT-RED转换曲线表明, 在不同扫描电压下高密度组织材料的RED并不完全相同, 扫描电压越高RED越大。包含代表肺、水、肌肉和骨头组织的模体在不同CT扫描电压下的CT值如图5所示, 其中在模体RED值为1.456时因不同扫描电压造成的CT值变化较其余RED值大。CT-RED转换曲线(图3)表明在CT值500以下的RED值几乎重叠, 因剂量计算以相对电子密度为基础, CT值为500以下的组织并不会带来明显的剂量计算差异。本课题研究的高密度组织CT值为1 500, 处于RED变化较大的区域, 由此将引起较大的剂量计算差异。

设计不同条件的照射计划, 其剂量学统计结果如表4所示。分组A和B分别为32组和96组, 共计128组数据, A组和B组的剂量学参数D<sub>mean</sub>、D<sub>2</sub>、D<sub>98</sub>、D<sub>11</sub>、D<sub>12</sub>和D<sub>13</sub>统计值如表4所示。利用独立样本*t*检验统计A组与B组的剂量学参数差异情况。其中进行独立样本*t*检验前提条件为方差齐次, 其各项参数统计值*F*值均大于0.05 (*F*>0.05), 说明其为方差齐



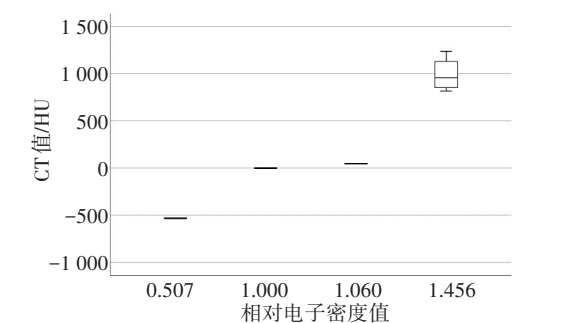


图5 不同扫描电压下不同密度模体CT值差异  
Fig.5 Differences in CT number of different density  
phantoms under different voltages

次, 可以进行独立样本  $t$  检验分析数据。统计分析数据  
显示, 剂量学参数  $D_2$  和  $D_{11}$  的比较差异, 不具有统计  
学意义 ( $P>0.05$ ), 而  $D_{mean}$ 、 $D_{98}$ 、 $D_{12}$  和  $D_{13}$  的比较差  
异, 具有统计学意义 ( $P<0.05$ )。独立样本  $t$  检验表明,  
CT扫描电压与CT-RED转换曲线匹配与不匹配情况  
下, 其带来的剂量学差异具有统计学意义。

表4 分组数据统计结果(Gy)					
Tab.4 Results of statistical analysis on grouping data (Gy)					
剂量值	组别	个案数	均数±标准差	F值	P值
$D_{mean}$	A	32	78.02±0.70	4.52	0.035
	B	96	78.10±0.92		
$D_2$	A	32	94.42±0.84	0.08	0.779
	B	96	94.37±0.84		
$D_{98}$	A	32	66.42±0.66	24.67	0.000
	B	96	66.63±1.44		
$D_{11}$	A	32	103.53±0.54	0.27	0.602
	B	96	103.53±0.58		
$D_{12}$	A	32	76.76±0.59	9.25	0.003
	B	96	76.87±0.88		
$D_{13}$	A	32	59.45±0.79	12.01	0.001
	B	96	59.51±1.27		

3 结论与讨论

根据统计分析结果, 其符合射线入射物体前后的  
衰减规律, 其剂量学统计量  $I_1$  表示射线在入射高密  
度物体前剂量差别不大, 配合CT-RED转换曲线(图  
3)可得知, 射线入射前经过区域的CT值变化不大,  
其对应RED值几乎无差异, 计划系统计算剂量亦无  
差异。而剂量学参数  $D_{mean}$ 、 $D_{98}$ 、 $D_{12}$  和  $D_{13}$  比较差异有  
统计学意味着射线通过高密度物质后, 因为其RED  
值的差异造成计划系统计算剂量的差异, 因此错误  
匹配的CT-RED转换曲线会造成高密度物质内部与

射线出口处的剂量差异。综合各项剂量学参数统计  
学比较结果, 为保证剂量计算结果准确, 放疗患者CT  
定位的扫描电压需要与TPS计划设计时选取的CT-  
RED转换曲线匹配, 否则会造成高密度组织中的剂  
量和射野出口处的剂量计算有较大差异, 从而影响  
放疗计划的准确性。

放射治疗过程中, 患者所接受的剂量通常与照  
射区域内组织的电子密度有关。组织不均匀性对剂  
量分布的影响主要有以下两个方面: 改变了照射区  
域内原射线的吸收和散射的分布, 改变了次级电子  
的注量分布<sup>[10]</sup>。CT值是放射治疗计划系统剂量计  
算的基础, 反映物质对X射线的平均衰减能力, 因此不  
同组织就体现了不同的CT值<sup>[11]</sup>。

CT球管发射出的射线能量会因不同工作电压而  
发生变化, 不同的射线能量和物质相互作用导致的  
光电效应强度产生变化, 光电效应在高电子密度组  
织中差异较大。不同扫描电压下, CT值在相对较低  
的电子密度组织中差异较小, 在相对较高的电子密  
度组织中差异较大<sup>[12]</sup>。不均匀组织中吸收剂量计  
算点所在位置对剂量点的剂量计算影响很大, 位于不  
均匀组织后方的点, 所受影响主要是原射线衰减的  
改变; 位于不均匀组织附近的点, 散射线的影响是  
主要的; 位于不均匀组织中及组织界面处, 次级电  
子注量的改变是主要的<sup>[13]</sup>。在计划系统中, 根据从  
CT图像中得到的RED进行剂量计算, 对不均匀组织  
电子密度进行校正, 再依据蒙特卡罗算法精确计算  
照射区域内的剂量分布<sup>[14-16]</sup>。相同组织在不同扫  
描条件下, 会造成最大265 HU的CT值差别, 此时可  
造成2.1%的剂量计算偏差<sup>[17]</sup>。

如图3所示, 在不同扫描电压下建立的CT-RED  
表, CT值为-1 000到0之间的曲线几乎重合, CT-RED  
曲线不随着扫描电压变化而变化, 因而在此CT值范  
围内的相对电子密度恒定, 所以在射线进入高密度  
组织材料前的剂量计算点  $I_1$  的剂量并不会随着扫描  
电压变化而变化。根据ICRU 24号报告, 肿瘤靶区剂  
量精确性应好于5%<sup>[18]</sup>。但是影响剂量计算精确性  
的因素很多, 在直线加速器执行治疗过程中多叶光  
栅到位精度会随着机架的运动而受到重力作用的影  
响<sup>[19]</sup>, 同时治疗床板对射线也会产生1.7%~6.1%衰  
减的影响<sup>[20-21]</sup>。但本研究中CT值超过1 000 HU后,  
随着CT值的增加在不同扫描电压下造成的RED值  
差距越来越大, 本研究中高密度材料在80、100、120  
和140 kV时的RED曲线显著分开, 因此可带来剂量  
计算的偏差。本研究TPS中采用的是蒙特卡罗算法,  
但是选择蒙特卡罗、卷积、锥形束等不同的计算方  
法并不会对剂量计算产生明显的误差<sup>[22]</sup>。CT模拟定  
位机的扫描电压对剂量计算的影响很大, 因此治疗计

划中选用的CT-RED转换曲线电压应与CT扫描电压相一致<sup>[23]</sup>。在放射治疗中,物理师在设计治疗计划时,使用精确的CT-RED转换曲线非常重要,需要与患者的CT模拟定位时扫描电压相一致,确保剂量计算用的相对电子密度信息与患者体内相对电子密度相一致。

从分析的数据来看,选择不同的扫描电压及选用不同电压的CT-RED曲线对高密度组织中及高密度组织后的剂量影响较大。为保证最终剂量计算的精度,特别是当CT图像中有高密度组织材料存在的时候,扫描电压和选用的CT-RED表的电压应该一致。

## 【参考文献】

- [1] 廖雄飞,黎杰,王培. CT模拟定位机的扫描参数对放疗计划系统剂量计算的影响[J]. 肿瘤预防与治疗, 2015, 28(1): 49-51.
- [2] 张国前,张书旭,余辉,等. 放疗定位扫描条件对CT值的影响[J]. 中国医疗设备, 2015, 30(3): 13-16.
- [3] 邱强. CT值相对电子密度校正及其对TPS计算精度的影响[J]. 医疗装备, 2010, 23(12): 11-12.
- [4] ZWAN B J, BARNES M P, HINDMARSH J, et al. Commissioning and quality assurance for VMAT delivery systems: an efficient time-resolved system using real-time EPID imaging[J]. Med Phys, 2017, 44(8): 3909-3922.
- [5] YAMASHITA T, AKAGI T, ASO T, et al. Effect of inhomogeneity in a patient's body on the accuracy of the pencil beam algorithm in comparison to Monte Carlo[J]. Phys Med Biol, 2012, 57(22): 7673-7688.
- [6] DAVIS A T, PALMER A L, PANI S, et al. Assessment of the variation in CT scanner performance (image quality and Hounsfield units) with scan parameters, for image optimisation in radiotherapy treatment planning[J]. Phys Med, 2018, 45(1): 59-64.
- [7] KONIAROVA I. Inter-comparison of phantoms for CT numbers to relative electron density (RED)/physical density calibration and influence to dose calculation in TPS[J]. J Phys Conf Ser, 2019, 1248: 12046.
- [8] 高立权,孙小喆,刘智惠. CT-电子密度转换曲线的采集校正及对治疗计划剂量计算的影响[J]. 医疗卫生装备, 2016, 37(2): 103-105.
- [9] 李克,张晓华,邱凌平. 不同扫描部位采集的CT值-电子密度转换曲线对放疗剂量的影响[J]. 医疗卫生装备, 2017, 38(12): 80-83.
- [10] GAO L G, SUN H F, NI X Y, et al. Effects of 16-bit CT imaging scanning conditions for metal implants on radiotherapy dose distribution[J]. Oncol Lett, 2018, 15(2): 2373-2379.
- [11] GROELL R, RIENMUELLER R, SCHAFFLER G J, et al. CT number variations due to different image acquisition and reconstruction parameters: a thorax phantom study[J]. Comput Med Imaging Graph, 2000, 24(2): 53-58.
- [12] ÇATLI S. High-density dental implants and radiotherapy planning: evaluation of effects on dose distribution using pencil beam convolution algorithm and Monte Carlo method[J]. J Appl Clin Med Phys, 2015, 16(5): 46-52.
- [13] 胡逸民,张红志,戴建荣. 肿瘤放射物理学[M]. 北京: 原子能出版社, 1999: 206-207.
- [14] POKHREL D, MC CLINTON C, SOOD S, et al. Monte Carlo evaluation of tissue heterogeneities corrections in the treatment of head and neck cancer patients using stereotactic radiotherapy[J]. J Appl Clin Med Phys, 2016, 17(2): 258-270.
- [15] BAI S, LI G J, WANG M J, 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.
- [16] MC CORMACK S, DIFFEY J, MORGAN A. The effect of gantry angle on megavoltage photon beam attenuation by a carbon fiber couch insert[J]. Med Phys, 2005, 32(2): 483-487.
- [17] INNESS E K, MOUTRIE V, CHARLES P H. The dependence of computed tomography number to relative electron density conversion on phantom geometry and its impact on planned dose[J]. Australas Phys Eng Sci Med, 2014, 37(2): 385-391.
- [18] MONTERO J P, FENWICK J D. The effect of different control point sampling sequences on convergence of VMAT inverse planning[J]. Phys Med Biol, 2011, 56(8): 2569-2583.
- [19] TUĞRUL T. Absorption ratio of treatment couch and effect on surface and build-up region doses[J]. Rep Pract Oncol Radiother, 2018, 23(1): 1-5.
- [20] CHAIKH A, BALOSSO J. Quantitative comparison of dose distribution in radiotherapy plans using 2D gamma maps and X-ray computed tomography[J]. Quant Imaging Med Surg, 2016, 6(3): 243-249.
- [21] 甘家应,胡银祥,洪卫,等. Elekta直线加速器全碳纤维六维治疗床床板对后斜野放疗剂量的影响[J]. 中国肿瘤, 2010, 19(8): 511-513.
- [22] MOHSEN H, BAGHER F, MAHDI G, et al. Effect of computed tomography number-relative electron density conversion curve on the calculation of radiotherapy dose and evaluation of Monaco radiotherapy treatment planning system[J]. Australas Phys Eng Sci Med, 2019, 42(2): 489-502.
- [23] 吴先想,郭红博,费振乐,等. CT值相对电子密度转换关系影响因素及其对剂量计算的影响分析[J]. 中国医学物理学杂志, 2019, 36(2): 157-162.

(编辑:薛泽玲)