

一种用于全身照射技术的全身模拟定位CT扫描与图像重建方法

高正心^{1,2}, 徐秋怡^{1,2}, 龚飞³, 谭苏华^{1,2}, 洪雅玲^{1,2}, 龚卿^{1,2}, 施飞^{1,2}, 胡巧英^{1,2}, 余奇^{1,2}, 傅深^{1,2}

1. 上海泰和诚肿瘤医院/上海美中嘉和肿瘤门诊部, 上海 200020; 2. 放射医学与辐射防护国家重点实验室/苏州大学质子重离子医学研究中心, 江苏 苏州 215213; 3. 上海联影医疗科技股份有限公司, 上海 201807

【摘要】目的:探索一种适用于全身照射(TBI)的CT重建方法,可同体位连续扫描后获得一套完整的全身模拟定位CT。**方法:**使用TBI CT重建方法对患者进行CT模拟定位,完成后于Eclipse v15.5计划系统中生成一套全身模拟定位CT,将其运用到TBI计划设计与评估。在应用过程中,基于Python系统开发出相应的图像重建软件,与手动图像重建结果进行对比。**结果:**该全身模拟定位扫描方案可在Eclipse v15.5中实现两套CT的重建。在工作效率上,手工重建方法生成全身模拟定位CT平均需要10 min,软件重建方法只需要5 s。两种CT重建方法在图像质量上无差异,重建CT与真实值相比误差小于1 mm。使用重建的全身模拟定位进行TBI计划设计与评估,靶区适形度指数(CI)=0.854,剂量均匀性指数(HI)=0.199。**结论:**本文介绍的TBI全身模拟定位CT扫描与图像重建的方法可以简单、快速地获得完整的全身模拟定位CT图像,适用于后期的TBI计划设计、优化和评估过程。

【关键词】CT全身扫描;全身照射技术;图像重建

【中图分类号】R815

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2023)03-0286-05

Total-body CT simulation and image reconstruction method for total-body irradiation

GAO Zhengxin^{1,2}, XU Qiuyi^{1,2}, GONG Fei³, TAN Suhua^{1,2}, HONG Yaling^{1,2}, GONG Qing^{1,2}, SHI Fei^{1,2}, HU Qiaoying^{1,2}, YU Qi^{1,2}, FU Shen^{1,2}

1. Shanghai Concord Cancer Center/Shanghai Concord Medical Outpatient Department, Shanghai 200020, China; 2. State Key Laboratory of Radiation Medicine and Protection/Proton & Heavy Ion Medical Research Center, Soochow University, Suzhou 215213, China; 3. Shanghai United Imaging Healthcare Co., Ltd., Shanghai 201807, China

Abstract: Objective To explore a CT reconstruction method suitable for total-body irradiation (TBI), which can obtain a complete set of total-body CT images after continuous scanning at the same posture. **Methods** After CT simulation positioning using the TBI CT reconstruction method, a set of total-body CT images was generated in Eclipse v15.5 system, and it was applied to TBI planning and plan evaluation. Meanwhile, the corresponding image reconstruction software was developed based on Python system, and the reconstruction results were compared with manual image reconstruction results. **Results** The scanning protocol for the total-body simulation and positioning completed the reconstruction of two sets of CT images in Eclipse v15.5. The manual reconstruction method took 10 min on average to generate each set of total-body CT images, while the software only took 5 s. The image quality between the two CT image reconstruction methods did not differ significantly, and the error between the reconstructed CT and the real value was less than 1 mm. The TBI plan was formulated based on the reconstructed whole-body CT, and the plan evaluation showed that the conformity index and homogeneity index of target area were 0.854 and 0.199, respectively. **Conclusion** The total-body CT simulation and image reconstruction method for TBI can obtain a complete set of total-body CT images simply and quickly, which is suitable for the later TBI planning, optimization and evaluation.

Keywords: total-body CT scanning; total-body irradiation technique; image reconstruction

【收稿日期】2022-10-26

【基金项目】国家肿瘤质控中心放疗质控指南项目(201905);省部共建放射医学与辐射防护国家重点实验室开放课题(GZK1202130);上海市黄浦区卫生健康系统科研项目(HLZ202218)

【作者简介】高正心,工程师,研究方向:医学物理,E-mail: zhengxin.gao@ccm.cn

【通信作者】傅深,教授,主任医师,博士生导师,研究方向:肿瘤放射治疗、质子重离子放射治疗的基础与临床转化研究,E-mail: shen.fu@ccm.cn

前言

全身照射(Total Body Irradiation, TBI)是一种有效的骨髓清除方法^[1-3],常作为异基因干细胞移植和骨髓移植预处理方案的一个组成部分,用于治疗血液系统恶性肿瘤、淋巴瘤和骨髓瘤等疾病。随着放射治疗技术的自动化和精准化,TBI也从最初延长源皮距(Source-to-Skin Distance, SSD)下的AP/PA(Anterior-to-Posterior/Posterior-to-Anterior)^[4-6]或双侧非调强野照射^[7]发展为基于螺旋断层放射系统的全身螺旋照射(Helical Tomotherapy, HT)^[8-10]和基于医用电子直线加速器(Linear accelerator, Linac)多叶光栅调制的多等中心容积旋转调强(Volumetric-Modulated Arc Therapy, VMAT)技术^[11-16]。非调强野大野全身照射的剂量分布本不均匀,如果要达到均匀分布需要根据每位患者的情况定制挡铅^[17]。HT和VMAT技术则不同,二者可以通过内部准直器的变化改善全身剂量分布^[18],提高靶区剂量的适形性和均匀性,但同时也要要求患者必须参与CT模拟定位扫描流程获得完整的全身CT图像。市场上模拟定位螺旋断层扫描机(Computed Tomography Simulator, CT-SIM)具有最大扫描长度限值:GE Healthcare Discovery RT(GE Healthcare, 美国)的最大扫描长度为150 cm, Philips Big Bore CT(Philips Healthcare, 荷兰)的最大扫描长度为150 cm, Siemens CT SOMATOM(Siemens Healthineers, 德国)的最大扫描长度为150 cm,都无法一次性完成身高大于160 cm个体的全身CT模拟定位扫描,难以为TBI计划设计和优化提供完整计划CT。

目前,文献[11-16]主要报道了两种获得TBI计划CT的办法。方法一:患者以头先进、仰卧位(Head-first-Supine, HFS)进行扫描,利用CT-SIM的最大扫描长度,扫描“头”至“大腿中段”的距离,通过在计划系统(Treatment Planning System, TPS)中复制大腿中段最后一层,生成一套与患者等身高的全身模拟定位CT^[13]。方法二:患者先以HFS体位扫描“头-大腿中段”范围的CT,再以脚先进、仰卧位(Feet-first-Supine, FFS)扫描“脚-大腿中段”范围的第二套CT。计划时,先将两套扫描CT进行配准,再对两套CT分别进行计划与优化,叠加剂量后进行评估。Springer等^[11]先分别完成患者上半身和下半身两套模拟定位CT图像的计划优化,使用Eclipse v15.5(瓦里安治疗计划系统,美国)系统中的计划叠加功能对两套计划进行评估与完善。Teruel等^[14]先使用Eclipse(瓦里安治疗计划系统,美国)系统中的图像配准界面进行刚性配准,计划设计时,先完成“脚-大腿中段”范围的计

划优化,再以此作为本底计划对患者“头-大腿中段”扫描范围进行容积旋转调强优化。Guo等^[15]使用第三方图像配准软件MIM Maestro(MIM, 瑞典)完成两套CT图像的刚性配准,得到完整的全身模拟定位CT图像,再完善计划设计。蒋晓芹等^[16]利用Philips Brilliance CT分别以头进向扫描“头-大腿中段”和以脚进向扫描“脚-大腿中段”两套CT,两套CT存在20 cm的重叠扫描区域;计划时,作者使用Eclipse系统对两套CT进行刚性配准,然后对两套CT分别计划并在重叠扫描区域设计出剂量跌落,最后将两个计划叠加后评估全身放射治疗计划。

以上文献报道的办法都无法直接在TPS中生成一套完整、精确的全身模拟定位CT用于放疗计划设计。方法一中,剂量师无法获得“大腿中段-脚”的准确图像;方法二中,剂量师需要对两套CT分别计划和优化,考虑图像衔接处的剂量处理,再叠加后进行评估,如需修改则重新回到单个CT上进行,再叠加计划评估,如此反复,增加了计划设计的复杂性和时间。

本文将介绍一种可同体位连续扫描,在Eclipse v15.5系统中独立完成的全身模拟定位CT重建方法。该方法不依赖于第三方重建软件,避免分别在两套CT上计划的复杂性和难度,提高工作效率。同时,团队在应用过程中基于Python语言开发一款图像重建软件,相比手动重建提高了工作效率。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 患者信息 男性,67岁,身高175 cm,疾病诊断:慢性粒细胞白血病,治疗方案:骨髓移植前于上海美中嘉和肿瘤门诊部接受单次3 Gy剂量TBI预处理。

1.1.2 模具准备和制作 模具准备:定制180 cm俯卧位真空垫和180 cm仰卧位真空垫。仰卧位制模:患者仰卧位平躺于180 cm仰卧位真空垫上,双肩自然放松,双臂自然伸直紧贴身体两侧,手心向内,双腿自然伸直,尽量保持水平。待患者姿势确定后,负压抽真空固定真空垫形状。注意真空垫形状在肩膀处贴近患者,防止患者向上移动。体表4条定位标记线分别为:(1)连接“鼻尖-胸骨角-剑突-肚脐”人体纵向延长线;(2)过手臂连接“两乳头”的胸部横断位延长线;(3)穿过“肚脐”的横断位平行延长线;(4)连接“两侧膝关节髌骨中点”的横断位延长线,见图1。图像重建标记:在患者两髌骨中点的连线中点贴上“十”字铅丝做为重建标记。

1.2 方法

1.2.1 全身模拟定位CT扫描 扫描采用GE Discovery

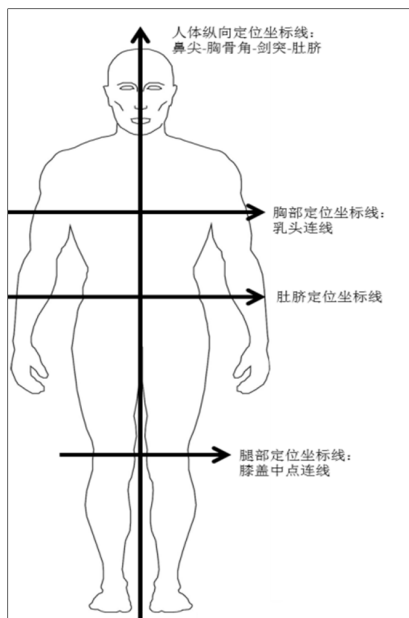


图1 仰卧位制模体时4个定位标记线
Figure 1 Positioning marking lines for the mould-making in the supine position

RT(通用,美国)大孔径CT扫描仪,扫描层厚1 cm,扫描直径75 cm。扫描时,患者采用FFS体位平躺在一体式真空垫之上,将患者连同真空垫向机器方向推动至定位床F4刻度处,此时患者的小腿部模具将悬空于定位床。使用激光灯对位体表标记线,将患者大腿髌骨处的“十”字铅丝设为扫描零点。预扫描,以髌骨处显影“十”字铅丝作为分界,扫描“头顶-大腿髌骨中点”范围,记为“CT_Upper”。在不退出该患者扫描界面的情况下,进入机房将患者连同真空垫向机架反方向平移至定位床F8刻度处,使用激光灯对位标记线,保证患者与第一次扫描体位只有“进、出”方向的平移,没有其他方向的形变与运动。预扫描,以髌骨处显影“十”字铅丝作为分界,扫描“大腿髌骨中点-脚底”范围,记为“CT_Down”。退出扫描界面,使用GE“bind”功能,按照“CT_Upper”+“CT_Down”的顺序重建图像,命名为“CT_FullScan”,得到一套顺序为“头顶-大腿髌骨中点-脚底”的全身扫描CT图像。检查图像,确保重建后的CT图像在大腿髌骨处衔接流畅。

1.2.2 图像重建 GE Discovery RT工作站可以及时完成图像的合并,生成“CT_FullScan”供医生与物理师检查全身模拟定位CT扫描图像的完整性和患者体位衔接的顺畅性。但该重建后的图像在导入Eclipse v15.5后会出现图像重叠现象(图2),无法作为计划CT图像使用。笔者需要对扫描图像在Eclipse v15.5计划系统中进行后处理。

(1)图像人工重建方法。本文介绍的做法是在Eclipse v15.5 计划系统的 Selection 界面中打开

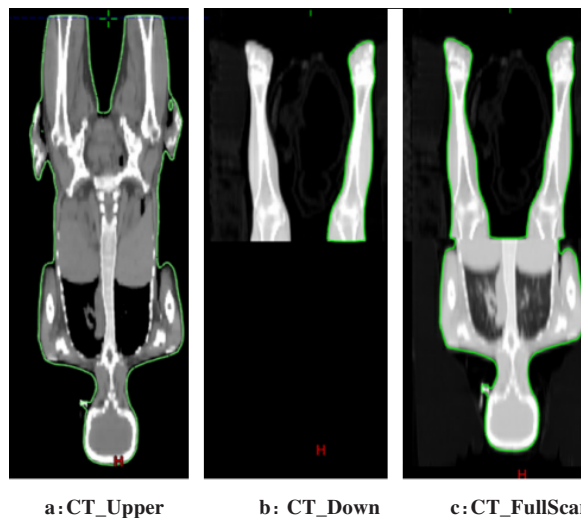


图2 导入Eclipse系统后显示的CT模拟定位扫描图像
Figure 2 Imported CT scans during CT simulation in Eclipse system

“CT_Upper”和“CT_Down”序列中的所有图层,见图3a、b。以“CT_Upper”的Z轴坐标为基准(例如“CT_Upper”序列中大腿髌骨中点图像Z轴值为“x”),按照“大腿髌骨中点-脚底”的顺序依次复制“CT_Down”序列中的第“n”层图层,并更改其Z轴坐标值为(x-n),使新复制的图层按照Z轴数值顺序依次排列在“CT_Upper”序列图层之后。选中“CT_Upper”序列和复制的新图层,生成新3DCT图像“CT_Full Body”,如图3c所示,操作流程见图4。

(2)图像软件重建方法。团队在应用过程中开发了一种基于Python语言的图像重建软件。该程序

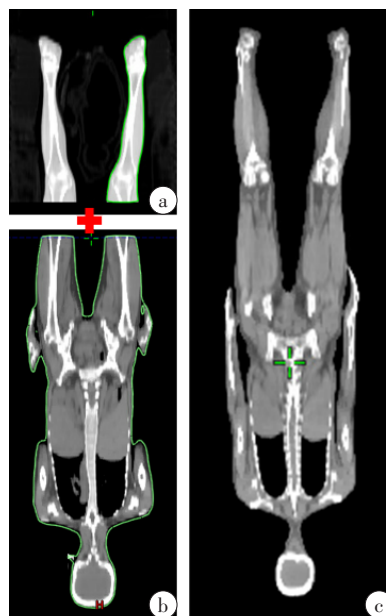


图3 GE Discovery RT扫描得到“CT_Upper”(a)、“CT_Down”(b)和在计划系统Eclipse生成的“CT_Full Body”图像(c)
Figure 3 “CT_Upper” (a) and “CT_Down” (b) obtained using GE Discovery RT and the reconstructed “CT_Full Body” (c)

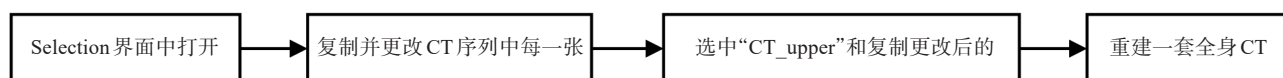


图4 Eclipse计划系统中手动图像重建操作流程

Figure 4 Manual image reconstruction procedures in Eclipse system

可以代替手工操作实现“CT_Down”序列中图层沿Z轴的定向平移与图像重建,重新赋予用户识别符(User Identification, UID)后,Eclipse v15.5可读取该图像序列。

1.2.3 TBI计划设计 按照上文步骤进行全身CT模拟定位,TBI计划采用延长SSD下低剂量率VMAT技术照射,计划结果如图5所示。治疗时,患者横躺于医用直线加速器机头下依次进行俯卧位和仰卧位的照射,仰卧时患者背部距离地面约15 cm高,并于患者与机头间架设1 cm厚有机玻璃散射屏,以提高患者体表剂量,如图6所示。

1.2.4 计划评估参数 TBI计划评估使用适形度指数(Conformity Index, CI)和均匀性指数(Homogeneity

Index, HI)两个参数进行。CI主要用来衡量放疗剂量分布体积与靶区体积的大小和形状的适形性。对于TBI计划而言,全身就是靶区,最终计划评估只需考虑计划照射不足的情况,根据临床研究^[19],本文选用Lomax和Scheib^[20]提出的CI公式对TBI计划进行评估:

$$CI = \frac{V_{T,ref}}{TV} \quad (1)$$

其中, $V_{T,ref}$ 指接受剂量等于或大于参考剂量的靶区体积,单位 cm^3 ;TV指靶区体积,单位 cm^3 。本公式中,CI范围为0~1,CI=0表示参考剂量精确地覆盖靶区体积,健康组织不受处方剂量以上的照射,适形性最佳;CI=0,表示没有适形性。

HI可以分析和量化靶区体积内的剂量均匀性,可有效评估计划的剂量分布情况。根据临床研究^[19],本文选用Kataria等^[21]提出的公式对TBI计划进行评估。在这个公式中,HI的理想值为0,HI随计划剂量分布不均匀而增大:

$$HI = \frac{(D_{1\%} - D_{98\%})}{D_p} \quad (2)$$

其中, $D_{1\%}$ 和 $D_{98\%}$ 为1%和98%靶区体积接受的剂量,单位为cGy; D_p 为处方剂量,单位为cGy。

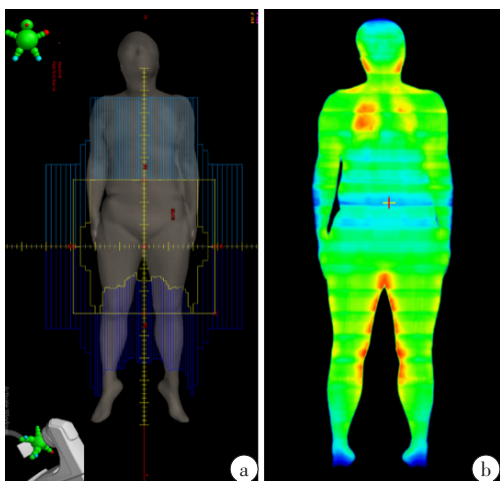


图5 TBI计划中多叶光栅的运动(a)和剂量分布(b)

Figure 5 MLC position (a) and dose distribution (b) in TBI planning



图6 延长SSD下基于容积旋转调强技术的全身照射

Figure 6 TBI based on VMAT technique at an extended SSD

2 结果

(1)图像质量:利用模拟定位时在髌骨衔接处标记的“十”字铅丝,保证两段CT在衔接处没有解剖信息的缺失和重复。(2)重建效率:使用人工图像重建方法时,图像重建时长根据“CT_Down”序列的数量而定,平均操作一张CT横断位影像需要3 s,重建完成总时间依赖于一套CT的总序列数量,手工重建方法生成全身模拟定位CT平均需要10 min。而基于软件的图像重建,完成一套CT重建平均耗时仅为5 s。(3)重建误差:无论是采用手动重建还是软件重建,原理都是将重建错位的CT图像重新排列以获得完整的全身模拟定位CT。该方法的误差产生于初始两段CT扫描时产生的误差。全身模拟定位扫描时会在患者的膝盖处以“十”字铅丝作为两段CT扫描标记点,在预扫描上以该标记点作为上半段CT的末端和下半段CT的起始端。误差的产生来源于两次扫描时肉眼判断该铅丝标记处的位置,本单位使用CT模拟显影丝直径为1 mm,肉眼的定位误差则产生于这1 mm内。

(4)计划评估:TBI分为俯卧位和仰卧位照射,执行计划总跳数为15 580 MU,人体内平均剂量率小于10 cGy/min。计划评估参数:CI=0.854,HI=0.199。全身计划采用延长SSD的VMAT技术,不存在靶区接野问题,故不存在靶区接野处的冷、热点问题。

3 讨论

本文介绍的模拟定位CT扫描方法和重建方法可以在Eclipse v15.5计划系统中生成完整的全身模拟定位CT图像,扫描中无需患者更换扫描体位,也不依赖于第三方图像重建软件进行图像重建,重建的图像可以直接用于后续TBI计划设计与评估,减少了在常规SSD下进行优化时存在的衔接处剂量不确定性,减少了最终计划需叠加评估,又需分别修改的复杂性;而对于延长SSD下的VMAT技术,一套完整的全身计划CT完善了患者的腿部解剖信息,在计划设计时可以提高腿部实际剂量的计算准确性和剂量分布均匀性^[13]。

该扫描方法的成功应用依赖于机器的严格质控,操作中涉及患者与真空垫沿着床方向的推移与激光线复位,要求CT-SIM机器的外置、内置激光线与扫描坐标的精准对位,同时要求患者前后两次扫描在同一水平面上且垂直于CT扫描床,进出方向无平移差值,否则易出现图7所示的重建错位结果。

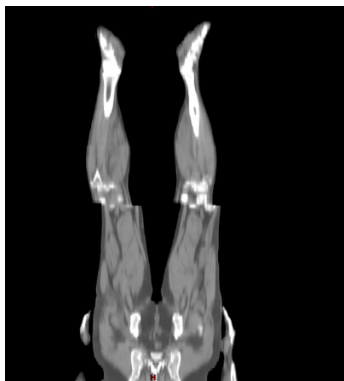


图7 重建图像横向错位

Figure 7 Horizontal misalignment of the reconstructed images

【参考文献】

- [1] Wong JY, Filippi R, Dabaja BS, et al. Total body irradiation: guidelines from the international lymphoma radiation oncology group (ILROG) [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2018, 101(3): 521-529.
- [2] Paix A, Antoni D, Waissi W, et al. Total body irradiation in allogeneic bone marrow transplantation conditioning regimens: a review [J]. *Crit*

- Rev Oncol Hematol*, 2018, 123: 138-148.
- [3] Stephens SJ, Thomas S, Rizzieri DA, et al. Myeloablative conditioning with total body irradiation for AML: balancing survival and pulmonary toxicity [J]. *Adv Radiat Oncol*, 2016, 1(4): 272-280.
- [4] Leung PM, Rider WD, Webb HP, et al. Cobalt-60 therapy unit for large field irradiation [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 1981, 7(6): 705-712.
- [5] Peters VG, Herer AS. Modification of a standard cobalt-60 unit for total body irradiation at 150 cm SSD [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 1984, 10(6): 927-932.
- [6] Miller RJ, Langdon EA, Tesler AS. Total body irradiation utilizing a single ⁶⁰Co source [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 1976, 1(5-6): 549-552.
- [7] Glasgow GP, Mill WB. Cobalt-60 total body irradiation dosimetry at 220 cm source-axis distance [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 1980, 6(6): 773-777.
- [8] Gruen A, Ebell W, Wlodarczyk W, et al. Total Body Irradiation (TBI) using Helical Tomotherapy in children and young adults undergoing stem cell transplantation [J]. *Radiat Oncol*, 2013, 8(1): 92.
- [9] Sarradin V, Simon L, Huynh A, et al. Total body irradiation using Helical Tomotherapy®: treatment technique, dosimetric results and initial clinical experience [J]. *Cancer Radiother*, 2018, 22(1): 17-24.
- [10] Peñagaricano JA, Chao M, Van Rhee F, et al. Clinical feasibility of TBI with helical tomotherapy [J]. *Bone Marrow Transplant*, 2011, 46(7): 929-935.
- [11] Springer A, Hammer J, Winkler E, et al. Total body irradiation with volumetric modulated arc therapy: dosimetric data and first clinical experience [J]. *Radiat Oncol*, 2016, 11: 46.
- [12] Symons K, Morrison C, Parry J, et al. Volumetric modulated arc therapy for total body irradiation: a feasibility study using Pinnacle³ treatment planning system and Elekta AgilityTM linac [J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2018, 19(2): 103-110.
- [13] Pierce G, Balogh A, Frederick R, et al. Extended SSD VMAT treatment for total body irradiation [J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2019, 20(1): 200-211.
- [14] Teruel JR, Taneja S, Galavis EP, et al. Automatic treatment planning for VMAT-based total body irradiation using Eclipse scripting [J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2021, 22(3): 119-130.
- [15] Guo BQ, Chrian S, Erin M, et al. Image-guided volumetric-modulated arc therapy of total body irradiation: an efficient workflow from simulation to delivery [J]. *J Appl Clin Phys*, 2021, 22(10): 169-177.
- [16] 蒋晓芹, 苏宝锋, 陈春想, 等. 容积调强弧形治疗技术全身照射的初次临床应用及剂量学验证 [J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2021, 30(8): 828-834.
- [17] Jiang XQ, Su BF, Chen CX, et al. First clinical application and dosimetric verification of total body irradiation with volumetric modulated arc therapy [J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2021, 30(8): 828-834.
- [18] Serban M, Seuntjens J, Roussin E, et al. Patient-specific compensation for Co-60 TBI treatments based on Monte Carlo design: a feasibility study [J]. *Phys Med*, 2016, 32(1): 67-75.
- [19] Tyson TE, Podgorsak MB, Singh AK, et al. Improved dose homogeneity using electronic compensation technique for total body irradiation [J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2018, 19(3): 159-167.
- [20] 邵琰, 王昊, 陈华, 等. 适形指数和均匀性指数的临床应用 [J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2017, 37(9): 717-721.
- [21] Shao Y, Wang H, Chen H, et al. Clinical applications of conformity index and homogeneity index [J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2017, 37(9): 717-721.
- [20] Lomax NJ, Scheib SG. Quantifying the degree of conformity in radiosurgery treatment planning [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2003, 55(5): 1409-1419.
- [21] Kataria T, Sharma K, Sabramani V, et al. Homogeneity index: an objective tool for assessment of conformal radiation treatments [J]. *J Med Phys*, 2012, 37(4): 207-213.

(编辑:薛泽玲)