

基于自动勾画和快速蒙特卡罗计算的放射治疗全身器官剂量数据库平台的可行性研究

邱涛¹, 高宁¹, 皮一飞², 王海洋², 齐雅平³, 程博¹, 裴曦^{1,4}, 徐榭^{1,5}

1. 中国科学技术大学核科学技术学院, 安徽 合肥 230025; 2. 郑州大学第一附属医院放射治疗部, 河南 郑州 450052; 3. 中国计量科学研究院电离辐射计量科学研究所, 北京 100029; 4. 安徽慧软科技有限公司, 安徽 合肥 230088; 5. 中国科学技术大学附属第一医院放疗科, 安徽 合肥 230001

【摘要】目的:探讨建立一种放射治疗全身器官剂量数据库平台的可行性。**方法:**使用基于深度学习的自动勾画软件 DeepViewer[®]在1例食管癌患者的全身CT上勾画全身器官,然后利用基于GPU加速的蒙特卡罗软件 ARCHER 计算相应的器官剂量分布,最后利用 Lyman-Kutcher-Burman (LKB)模型评估放疗患者正常组织并发症概率(NTCP)。**结果:**针对该病例,成功建立基于 DeepViewer[®]、ARCHER 和 LKB 模型的全身器官剂量数据库,发现距离靶区越近的器官剂量越大,其中心脏与靶区间距离最小,剂量为 14.11 Gy,但因其模型参数特殊,通过 LKB 模型计算的 NTCP 为 0.00%;左、右肺的剂量分别为 3.19 和 1.16 Gy,但是 NTCP 值却很大,分别为 2.13% 和 1.60%。对于距离靶区较远的头颈部器官(视交叉、视神经和眼)和腹部器官(直肠、膀胱和股骨头)剂量分别约为 9 和 2 mGy,并且 NTCP 均近似为 0.00%。**结论:**研究结果证明通过自动勾画软件 DeepViewer[®]、蒙特卡罗软件 ARCHER 和 LKB 模型建立全身器官剂量数据库的可行性。

【关键词】食管癌;自动勾画;蒙特卡罗;正常组织并发症概率

【中图分类号】R318;R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2022)11-1339-06

Feasibility of establishing a whole-body organ dose database for radiotherapy using automatic segmentation and fast Monte Carlo calculation

QIU Tao¹, GAO Ning¹, PI Yifei², WANG Haiyang², QI Yaping³, CHENG Bo¹, PEI Xi^{1,4}, XU Xie^{1,5}

1. School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230025, China; 2. Department of Radiotherapy, the First Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China; 3. Institute of Ionizing Radiation Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China; 4. Anhui Wisdom Technology Co., Ltd, Hefei 230088, China; 5. Department of Radiotherapy, the First Affiliated Hospital of University of Science and Technology of China, Hefei 230001, China

Abstract: Objective To discuss the feasibility of establishing a whole-body organ dose database platform for radiotherapy. **Methods** The automatic segmentation software DeepViewer[®] based on deep learning was used to delineate organs in whole-body CT of a patient with esophageal cancer, and the Monte Carlo software ARCHER accelerated by GPU was used to calculate the dose profile. Finally, the Lyman-Kutcher-Burman (LKB) model was used to calculate the normal tissue complication probability (NTCP). **Results** For this case, the whole-body organ dose database was established successfully using DeepViewer[®], ARCHER and LKB model. It was found that the closer to the target area, the greater the organ dose. The heart was closest to the target area, and it was irradiated with 14.11 Gy, but its NTCP calculated by LKB model was 0.00% due to its special model parameters. The left and right lungs were irradiated with 3.19 and 1.16 Gy, respectively, but their NTCP were larger (2.13% and 1.60%, respectively). Head and neck organs (optic chiasm, optic nerve and eyes) and abdominal organs (rectum, bladder and femoral head) which are far from target area were irradiated with about 9 and 2 mGy, respectively, and their NTCP were approximately 0.00%. **Conclusion** The establishment of whole-body organ dose database using automatic segmentation software DeepViewer[®], Monte Carlo software ARCHER and LKB model is practicable.

Keywords: esophageal cancer; automatic segmentation; Monte Carlo; normal tissue complication probability

【收稿日期】2022-06-15

【基金项目】安徽省自然科学基金(1908085MA27);中国科学技术大学“Med-X医学物理与生物工程双一流交叉学科”建设经费(YD2140000601)

【作者简介】邱涛, 硕士, 研究方向: 蒙特卡罗计算、器官剂量学等, E-mail: qt026@mail.ustc.edu.cn

【通信作者】徐榭, 博士, 教授, 研究方向: 体模、蒙特卡罗计算等, E-mail: xgxu@ustc.edu.cn

前言

电离辐射在杀死肿瘤的同时也会不可避免地照射身体其它部位的正常组织和器官,引起并发症和二次癌症。在传统的肿瘤治疗计划中,一些距离靶区较远的区域剂量相对较低而常被忽略,尽管此剂量水平在放疗中的研究相对于医学影像和核医学领域较少,但其重要性也是不可忽略的^[1-2]。近年来,美国放疗和辐射防护界对远离靶区的器官和组织的二次癌症问题进行了详细的研究并提出有关解决方案的共识,包括使用真实解剖信息的人体模型进行放疗中全身剂量学研究的建议^[3-4]。此外,Rubin等^[5]尝试解决辐射对正常组织和器官的毒性问题,相关工作作为研究放疗引起的并发症问题提供基础。随着放疗新治疗技术的出现,临床上对正常组织和器官的剂量与二次癌症和并发症关系的准确认识有着共同的需求。

基于上述理由,Muhammad等^[6]提出建立与放射肿瘤学相关的个人器官剂量档案的概念,通过为放疗患者建立个人器官剂量档案可以获得全身器官剂量数据库,从而为治疗计划和流行病学剂量研究提供全面的器官辐射信息。但Muhammad等^[6]没能证明这些概念的可行性。Lee等^[7]使用蒙特卡罗代码XVMC和标准人体计算全身器官剂量,但是该研究没有建立真实的医用加速器模型,而且计算速度很慢,无法应用于临床。因此,尽管全身器官剂量数据库的相关概念在几年前就已经被提出,但由于临床治疗计划系统(Treatment Planning System, TPS)普遍不具备全身器官自动勾画能力以及TPS使用的解析算法对于射野外区域计算不够准确,全身器官剂量数据库不能得以实现和使用^[8]。

近年来,中国科学技术大学团队和慧软科技联合开发了基于深度学习的自动勾画软件DeepViewer[®]^[9-10]和基于GPU加速的快速蒙特卡罗软件ARCHER^[11-16]。DeepViewer[®]主要用于治疗计划制定过程中对靶区和危及器官的自动勾画,在本项目中为不同患者全身器官剂量数据库的构建提供勾画信息。ARCHER作为一款快速蒙特卡罗软件,其前期工作主要是开发和临床测试基于GPU加速的蒙特卡罗剂量计算引擎^[11-14],近期工作把该剂量计算引擎上扩展了不同医用加速器的虚拟源模型^[16],因此可以在本项目中实现快速准确的全身器官剂量计算,为数据库的构建提供基础。此外,本项目还在器官剂量的基础上使用基于Lyman-Kutcher-Burman (LKB)模型的正常组织并发症概率(Normal Tissue Complication Probability, NTCP)计算方法量化放疗过程中患者并发症的风险,从而达到优化治疗计划

的目的。

本研究介绍了如何在全身CT上使用自动勾画软件DeepViewer[®]、蒙特卡罗软件ARCHER和LKB模型构建全身器官剂量数据库,以此证明建立该平台的可行性。

1 资料与方法

1.1 数据获取与处理

本研究对象是1例25岁男性食管癌患者的全身CT数据,图像尺寸为512×512×280,每个体素的大小为1.52 mm×1.52 mm×5.00 mm。由资深医生按照常见食管癌形态与位置模拟勾画肿瘤靶区,使用自动勾画软件DeepViewer[®]勾画全身器官。该软件使用改进后的全卷积神经网络U-Net实现自动勾画,通过和手动勾画比较Dice相似性系数(Dice Similarity Coefficient, DSC)发现有11种危及器官的DSC平均值在0.9以上,5种危及器官DSC平均值为0.8~0.9,5种危及器官DSC平均值为0.7~0.8,结果表明该软件能够实现危及器官自动勾画^[9]。本研究共勾画了25种典型组织和器官,其中头颈部器官12种,包括:脑、脑干、垂体、左眼、右眼、左视神经、右视神经、视交叉、左腮腺、右腮腺、喉和甲状腺,胸腹部器官13种,包括:心脏、左肺、右肺、全肺、肝、胃、胰腺、左肾、右肾、直肠、膀胱、左股骨头和右股骨头,勾画完成后生成RT-Structure文件保存器官轮廓信息。该软件在Windows 10专业版操作系统上运行,硬件配置为Intel Core i7-7700 CPU @ 3.60 GHz、NVIDIA GeForce GTX 1060 6 GB和16 G内存,完成以上勾画花费时间约40 s。使用Eclipse治疗计划系统在该病例上制定了1套5个射野的食管癌放疗计划,处方剂量50 Gy,分25次照射,加速器机型为TrueBeam SN1352。

1.2 剂量计算

ARCHER^[11-16]作为一款蒙特卡罗软件,为验证其计算的准确性,在水箱和临床病例中进行测试,在水箱中,使用ARCHER和DOSXYZnrc计算的剂量曲线吻合程度较好,在临床病例中,使用ARCHER和Geant4分别计算前列腺、肺部和头颈部病例,在2%/2 mm标准下,Gamma通过率分别为99.7%、98.5%和97.2%^[11],此结果说明ARCHER剂量计算的准确性。与一般临床病例相比,全身CT病例体素更多且涉及的计算范围更大,粒子运输时到距离靶区较远区域的数量较少,如果模拟粒子数不够会产生统计不确定度偏大而导致结果不准确的问题,本研究为保证全身剂量计算的准确性,通过调整粒子数,使得所有器官的统计不确定度尽可能小于5%。

使用ARCHER进行剂量计算。解析从TPS中导出的治疗计划,获取每个控制点的角度、机器跳数和次级准直器位置等信息,调用ARCHER剂量计算引擎和对应医用加速器虚拟源模型,加速器型号为TrueBeam SN1352^[16],获取器官剂量分布。模拟粒子数为 1×10^{10} ,保证所有器官的统计误差均小于6%。

吸收剂量是单位质量受照射物质所吸收的平均辐射能量^[17]。因此在本研究的CT体素模型中各器官吸收剂量计算公式如下所示:

$$D = \frac{\sum_i^n d_i \cdot m_i}{\sum_i^n m_i} \quad (1)$$

式中, D 为某器官吸收剂量, d_i 为该器官第 i 个体素的剂量, m_i 为该器官第 i 个体素的质量, n 为该器官内体素数量。

参考AAPM TG 105报告^[17],各器官剂量统计不确定度计算公式如下所示:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_i^n \varepsilon_i^2}{n}} \quad (2)$$

式中, ε 为器官不确定度, ε_i 为第 i 个体素的不确定度, n 为该器官的体素个数。

1.3 NTCP评估

本研究使用Lyman^[18]的LKB模型计算正常组织和器官并发症概率NTCP,公式如下所示:

$$P_c = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-t^2/2} dt \quad (3)$$

$$u = \frac{D - TD_{50}(v)}{m \times TD_{50}(v)} \quad (4)$$

$$TD_{50}(v) = TD_{50}(1)/v^n \quad (5)$$

$$v = V/V_{ref} \quad (6)$$

式中, P_c 为器官的NTCP; D 为器官受到的均匀照射的剂量; $TD_{50}(v)$ 为对某个器官进行均匀照射时并发症概率为50%的耐受剂量, v 表示器官的照射体积分数, $v=1$ 即整个器官均受到均匀照射; m 为剂量响应曲线最大斜率的倒数; n 为器官的体积效应参数,通过拟合得到; V 和 V_{ref} 分别表示器官被照射的体积和参考体积。从式(3)到式(6)可以看出,一旦确定参数 TD_{50} 、 m 、 n 和 V_{ref} 便可以计算某个接受均匀照射的器官的NTCP。

由于器官剂量分布是不均匀的,以上公式不能直接使用,为了解决此问题,Niemierko^[19]提出使用广义等效均匀剂量(generalized Equivalent Uniform Dose, gEUD)的方法,见式(7)。该参数表示当器官受到均匀剂量为gEUD时,产生的并发症概率和真实剂量分布产生的概率一致。

$$gEUD = \left[\frac{1}{N_{\text{voxels}}} (d_1^{1/n} + d_2^{1/n} + \dots + d_{N_{\text{voxels}}}^{1/n}) \right]^n \quad (7)$$

式中, N_{voxels} 为体素的数量, d_i 为第 i 个体素的剂量。

NTCP计算结果的准确性取决于模型参数 TD_{50} 、 m 和 n 以及器官参考体积 V_{ref} ,从Quantitative Analyses of Normal Tissue Effects in the Clinic (QUANTEC)^[20]相关文献中获得部分器官的模型参数及对应的并发症类型。由于在本研究中使用的是全身CT数据,可获得所有器官完整的剂量分布,所以在计算NTCP时,器官照射体积分数均为1。

2 结果

2.1 数据处理

自动勾画软件DeepViewer[®]在该食管癌病例全身CT上自动勾画了25种典型的正常组织和器官,结果如图1所示。

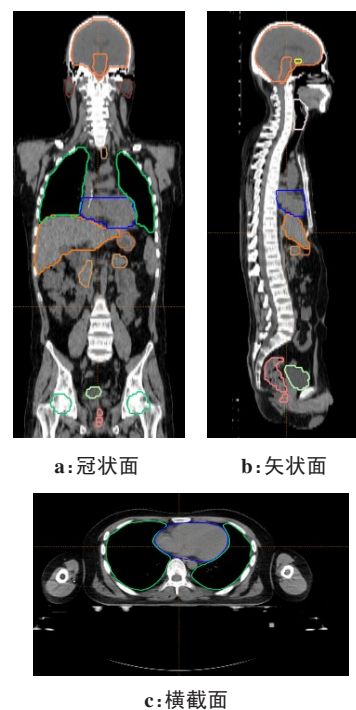


图1 DeepViewer[®]勾画食管癌病例全身正常组织和器官
Figure 1 Normal tissues and organs in a case of esophageal cancer delineated by DeepViewer[®]

2.2 剂量计算及NTCP评估

调用ARCHER剂量计算引擎和医用加速器虚拟源模型,获取处方50 Gy下的全身剂量和统计不确定数组,全身剂量分布如图2所示。使用包含器官轮廓信息的RT-Structure文件从全身剂量和不确定数组中提取出共计25种器官数据,根据式(1)~式(2)计算得到各器官的吸收剂量和统计不确定度,再采用LKB模型计算部分器官的NTCP,计算结果如表1所示。

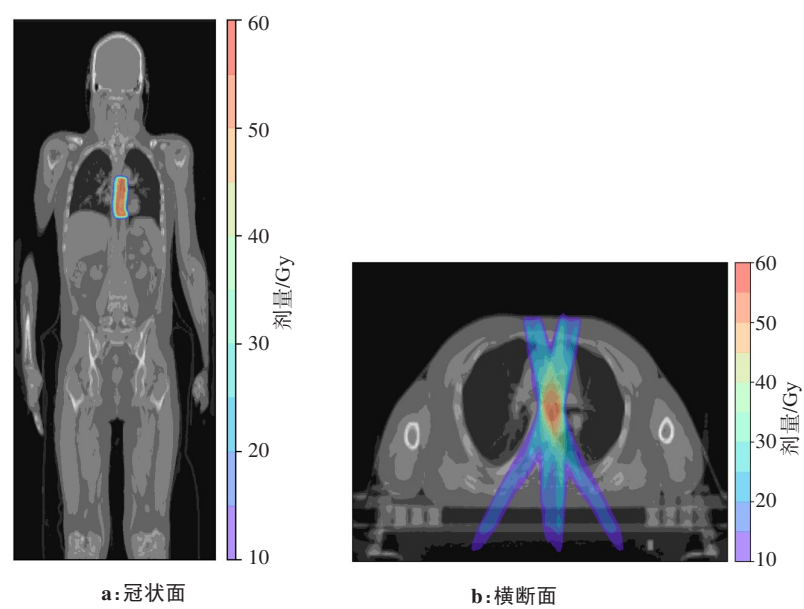


图2 全身剂量分布图

Figure 2 Whole-body dose profiles

表1 25种器官的吸收剂量和NTCP数据

Table 1 Absorbed dose and NTCP of 25 organs

器官	吸收剂量/mGy	统计不确定度/%	LKB 模型参数			并发症	NTCP/%
			TD ₅₀	<i>n</i>	<i>m</i>		
心脏	14 108.39	0.22	48.0	0.35	0.10	心包炎	0.00
左肺	3 190.04	0.63	31.4	1.00	0.45	放射性肺炎	2.13
全肺	2 129.92	0.68	31.4	1.00	0.45	放射性肺炎	1.83
右肺	1 164.54	0.73	31.4	1.00	0.45	放射性肺炎	1.60
肝	275.11	0.74	49.4	0.35	0.39	辐射导致肝损伤	0.56
胃	245.95	0.83	59.0	0.09	0.30	胃出血	0.05
胰腺	121.35	0.82	-	-	-	-	-
甲状腺	100.34	0.88	-	-	-	-	-
左肾	80.88	0.97	28.0	0.70	0.10	肾炎	0.00
右肾	65.28	1.05	28.0	0.70	0.10	肾炎	0.00
喉	53.36	2.31	46.3	0.45	0.16	喉水肿	0.00
左腮腺	18.33	1.87	-	-	-	-	-
右腮腺	16.10	2.00	-	-	-	-	-
垂体	9.60	2.31	-	-	-	-	-
脑干	9.53	2.40	60.0	0.16	0.14	神经毒性	0.00
右视神经	9.34	2.76	65.0	0.25	0.14	失明	0.00
左视神经	9.13	2.48	65.0	0.25	0.14	失明	0.00
左眼	8.61	2.83	-	-	-	-	-
视交叉	8.37	2.68	65.0	0.25	0.14	失明	0.00
右眼	8.25	2.92	-	-	-	-	-
脑	6.49	3.12	-	-	-	-	-
直肠	1.99	5.03	76.9	0.09	0.013	腹泻	0.00
膀胱	1.88	5.17	-	-	-	-	-
左股骨头	1.81	4.88	-	-	-	-	-
右股骨头	1.66	5.02	-	-	-	-	-

此病例为 1 例食管癌患者,结合图 2a 和表 1 发现距离靶区越近器官吸收剂量越大,其中心脏最近,其剂量高达 14.11 Gy,左肺剂量为 3.19 Gy,右肺剂量为 1.16 Gy,结合图 2 发现肺部处射束布置更偏向于左肺,因此左肺剂量更高。对于头颈部器官,视交叉、视神经和眼等,剂量仅约 9 mGy,对于腹部器官,直肠、膀胱和股骨头,剂量仅约 2 mGy。Xu 等^[1]和 Qi 等^[21]提出随着计算位置与靶区距离增加,器官剂量通常会呈指数衰减趋势减少,所以在此食管癌病例中,当计算位置处于头颈部和腹部时,由于距离靶区距离较远,器官剂量较小。

从表 1 中各器官 NTCP 发现,肺部 NTCP 最大,左肺为 2.13%,右肺为 1.60%,在相同 LKB 模型参数中,由于左肺剂量大于右肺,因此 NTCP 更大。此外,吸收剂量最大的心脏 NTCP 却为 0.00%。为了直观地反映各种器官受到的剂量与 NTCP 之间的关系,绘制各器官的剂量-NTCP 曲线,如图 3 所示。从图 3 可以看出,不同器官的剂量-NTCP 曲线由于模型参数不同,变化形式差异很大,即使在相同剂量下,不同器官发生并发症的概率也可能完全不同。心脏受到的照射剂量较小时,其 NTCP 值变化平坦,近似为 0,到约 35 Gy 时 NTCP 才逐渐上升。肺部的剂量-NTCP 曲线在剂量较小时便快速上升,所以在此食管癌病例中,即使心脏的剂量更大,其 NTCP 值也远小于肺。

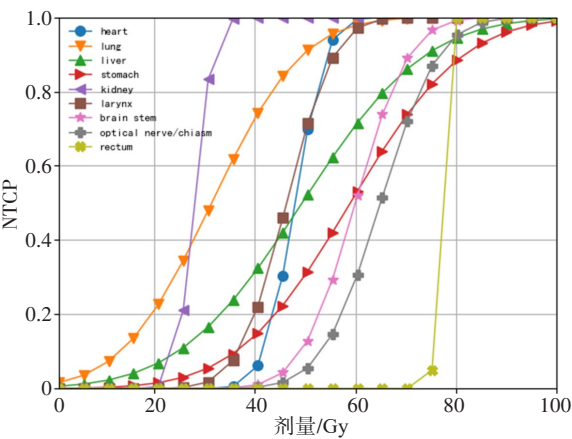


图 3 不同器官的剂量-NTCP 曲线
Figure 3 Dose-NTCP curves of different organs

2.3 全身器官剂量数据库建立

基于上述结果建立全身器官剂量数据库,流程如图 4 所示。该数据库中包括患者信息和器官数据,后者为各器官吸收剂量和 NTCP 值。从 TPS 中导出患者 CT 和 RT 文件,解析文件获取患者信息。然后基于 CT 和 RT 文件,使用自动勾画软件 DeepViewer[®]勾画出全身器官轮廓,再使用基于 GPU 加速的蒙特

卡罗软件 ARCHER 快速计算器官剂量,最后使用 LKB 模型计算各器官 NTCP。因此,利用患者信息和器官数据,采用该流程方法可构建全身器官剂量数据库。此外,还可根据经验设置患者 NTCP 限值,当 NTCP 过大时,该数据库会提出风险警告并反馈给 TPS。

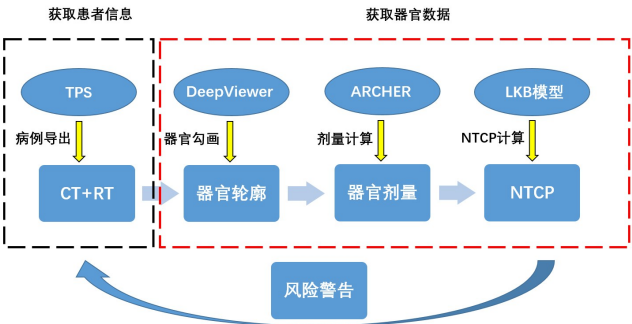


图 4 全身器官剂量数据库建立流程图
Figure 4 Flowchart of establishing a whole-body organ dose database

3 结 论

本研究在 1 例食管癌患者全身 CT 上使用基于深度学习的自动勾画软件 DeepViewer[®]获得全身主要器官勾画信息,再使用基于 GPU 加速的蒙特卡罗软件 ARCHER 计算全身剂量分布,通过器官勾画信息和全身剂量分布计算得到各器官吸收剂量,最后使用 LKB 模型扩展器官风险评估,根据以上流程便可建立全身器官剂量数据库。在放疗全身器官剂量数据库平台上可以为各类患者提供详细的器官剂量信息,并在当前临床程序中实现较好的记录保存,达到剂量追踪的目的,此外通过计算各器官 NTCP 还可以实现计划优化,此平台的建立正是 QUANTEC 研究重点之一^[20]。虽然本研究仅考虑了 1 例食管癌病例,但是有关器官剂量和风险评估的计算方法证明了依赖 DeepViewer[®]和 ARCHER 等工具建立全身器官剂量数据库平台的可行性。

【参考文献】

[1] Xu XG, Bednarz B, Paganetti H. A review of dosimetry studies on external-beam radiation treatment with respect to second cancer induction[J]. Phys Med Biol, 2008, 53(13): R193-R241.
[2] Kry SF, Bednarz B, Howell RM, et al. AAPM TG 158: measurement and calculation of doses outside the treated volume from external-beam radiation therapy[J]. Med Phys, 2017, 44(10): e391-e429.
[3] Travis LB, Ng AK, Allan JM, et al. Second malignant neoplasms and cardiovascular disease following radiation[J]. Health Phys, 2014, 106 (2): 18.
[4] Howell R. Second primary cancers and cardiovascular disease after radiation therapy: NCRP Report No.170[J]. Med Phys, 2012, 39(12): 7729-7731.
[5] Rubin P, Casarett GW. Clinical radiation pathology as applied to

- curative radiotherapy[J]. *Cancer*, 1968, 22(4): 767-778.
- [6] Muhammad W, Liang Y, Hart GR, et al. Big data in radiation oncology[M]. London: CRC Press, 2019.
- [7] Lee C, Jung JW, Pelletier C, et al. Reconstruction of organ dose for external radiotherapy patients in retrospective epidemiologic studies[J]. *Phys Med Biol*, 2015, 60(6): 2309-2324.
- [8] Howell RM, Scarboro SB, Kry SF, et al. Accuracy of out-of-field dose calculations by a commercial treatment planning system[J]. *Phys Med Biol*, 2010, 55(23): 6999-7008.
- [9] 汪志, 常艳奎, 徐榭, 等. 基于深度学习的危及器官自动勾画软件系统DeepViewer在放疗中的应用及评估[J]. *中国医学物理学杂志*, 2020, 37(8): 1071-1075.
- Wang Z, Chang YK, Xu X, et al. Application and evaluation of deep learning-based DeepViewer system for automatic segmentation of organs-at-risk[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2020, 37(8): 1071-1075.
- [10] Peng Z, Fang X, Yan P, et al. A method of rapid quantification of patient-specific organ doses for CT using deep-learning-based multi-organ segmentation and GPU-accelerated Monte Carlo dose computing[J]. *Med Phys*, 2020, 47(6): 2526-2536.
- [11] Su L, Yang Y, Bednarz B, et al. ARCHERRT -a GPU-based and photon-electron coupled Monte Carlo dose computing engine for radiation therapy: software development and application to helical tomotherapy[J]. *Med Phys*, 2014, 41(7): 071709.
- [12] Liu T, Xu XG, Carothers CD. Comparison of two accelerators for Monte Carlo radiation transport calculations, Nvidia Tesla M2090 GPU and Intel Xeon Phi 5110p coprocessor: a case study for X-ray CT imaging dose calculation[J]. *Ann Nucl Energy*, 2015, 82: 230-239.
- [13] Lin H, Liu T, Su L, et al. Modeling of radiotherapy linac source terms using ARCHER Monte Carlo code: performance comparison for GPU and MIC parallel computing devices [C]//European Physical Journal Web of Conferences. 2017: 04010.
- [14] Adam DP, Liu T, Caracappa PF, et al. New capabilities of the Monte Carlo dose engine ARCHER-RT: clinical validation of the Varian TrueBeam machine for VMAT external beam radiotherapy[J]. *Med Phys*, 2020, 47(6): 2537-2549.
- [15] Xu XG, Liu T, Su L, et al. ARCHER, a new Monte Carlo software tool for emerging heterogeneous computing environments[J]. *Ann Nucl Energy*, 2015, 82: 2-9.
- [16] 徐适. 照射光子放疗虚拟源建模方法及其在剂量验证中的临床应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- Xu Y. Method of virtual source modeling for external photon radiotherapy and its clinical application in dose checking[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [17] Chetty IJ, Curran B, Cygler JE, et al. Report of the AAPM Task Group No. 105: issues associated with clinical implementation of Monte Carlo-based photon and electron external beam treatment planning: AAPM Task Group Report No. 105: Monte Carlo-based treatment planning[J]. *Med Phys*, 2007, 34(12): 4818-4853.
- [18] Lyman JT. Complication probability as assessed from dose-volume histograms[J]. *Radiat Res*, 1985, 104(2): S13-S19.
- [19] Niemierko A. Reporting and analyzing dose distributions: a concept of equivalent uniform dose[J]. *Med Phys*, 1997, 24(1): 103-110.
- [20] Bentzen SM, Constine LS, Deasy JO, et al. Quantitative analyses of normal tissue effects in the clinic (QUANTEC): an introduction to the scientific issues[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2010, 76(3): S3-S9.
- [21] Qi Y, He L, Wang Z, et al. Evaluation of secondary dose and cancer risk for out-of-field organ in esophageal cancer imrt in a chinese hospital using atom phantom measurements[J]. *Radiat Prot Dosim*, 2017, 177(4): 389-396.

(编辑:陈丽霞)