

基于IAEA430号报告的射线剂量学参数比较软件开发

谢朝^{1,2}, 胡金有^{1,2}, 邹炼^{1,2}, 殷云鹏^{1,2}, 于路新^{1,2}, 骆科林^{1,2}

1. 四川省人民医院肿瘤中心, 四川 成都 610072; 2. 四川省人民医院医学物理联合实验室, 四川 成都 610072

【摘要】目的:快速比较计划系统建模后百分深度剂量(PDD)和离轴剂量(OAD)的计算值和测量值以及每年加速器年检中两次测量值的PDD和OAD,用以判断加速器建模数据准确性和测量数据一致性。**方法:**运用基于面向对象Python程序开发了基于IAEA 430号报告的比对软件ComparePO(CPO),该软件由文件准备、PDD模块、OAD模块、比对参数可视化和报告生成模块构成。**结果:**在临床上首先验证CPO的运行情况和结果报告的正确性,其次对新安装的两台加速器验收和加速器机头更换电离室后的数据测试都用到了该软件,该软件都能快速得出PDD和OAD的比较报告,为放射治疗物理师提供判断指导。**结论:**该软件界面友好,功能强大,能快速计算生成PDD和OAD比较报告,大大节约核查时间,提高放射治疗物理师的工作效率。

【关键词】Eclipse; Python; 百分深度剂量; 离轴剂量; 剂量学参数

【中图分类号】R318; R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2020)04-0408-05

Development of a software for dosimetric comparison according to IAEA technical report series No.430

XIE Zhao^{1,2}, HU Jinyou^{1,2}, ZOU Lian^{1,2}, YIN Yunpeng^{1,2}, YU Luxin^{1,2}, LUO Kelin^{1,2}

1. Department of Oncology, Sichuan Provincial People's Hospital, Chengdu 610072, China; 2. Joint Laboratory for Medical Physics, Sichuan Provincial People's Hospital, Chengdu 610072, China

Abstract: Objective To realize a rapid comparison between calculated and measured percentage depth dose (PDD) and off-axis dose (OAD) after the modeling by treatment planning system as well as the comparison of different measurements during the maintenance of medical accelerators once per year for determining the accuracy of accelerator modeling data and the consistency of measurements. **Methods** Object-oriented Python program was used to develop a ComparePO (CPO) software for PDD and OAD comparisons according to IAEA technical report series No.430. CPO was composed of document preparation module, PDD module, OAD module, comparison parameter visualization and report generation module. **Results** The successful execution of CPO in clinic and the accuracy of reports were firstly verified. Secondly, CPO was utilized for the quality maintenance of two newly installed accelerators and the dose data testing after ionization chamber replacement. The reports of PDD and OAD comparisons were quickly generated by CPO, thereby proving guidance for radiation therapy physicists. **Conclusion** CPO which is a user-friendly and powerful software is able to generate comparison reports of PDD and OAD automatically and rapidly, significantly shortening checking time and improving the working efficiency of radiation therapy physicists.

Keywords: Eclipse; Python; percentage depth dose; off-axis dose; dosimetric parameter

前言

作为肿瘤治疗的主要手段之一,放射治疗的目标在于最大化肿瘤控制概率,同时最小化正常组织

并发症概率。放疗计划系统(Treatment Planning System, TPS)是实现这一目标的中枢环节,它通过对放射源建模,采用一种或多种算法对患者体内剂量分布进行精确计算,从而帮助物理师针对不同患者设计出最佳的治疗方案^[1]。由于TPS是保证放疗效果及放疗安全的关键,因此许多国家及相关国际组织发布了一系列针对TPS的验收规范及方法,如美国医学物理师协会(AAPM)第23及53号报告、国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)第430号技术报告、中国医药行业放射治疗计

【收稿日期】2019-12-23

【基金项目】国家重点研发计划(2016YFC0105107)

【作者简介】谢朝,硕士,工程师,研究方向:医学物理, E-mail: xz024202-4028@126.com; 胡金有,助理工程师,研究方向:医学物理, E-mail: jinyou.med@qq.com(谢朝与胡金有共同第一作者)

划系统质量保证指南(YY/T 0798-2010)等^[2-5]。其中IAEA-430号报告规定的验收项目中包含了在均匀水模体中对比计划系统计算值与实际水中测量值,其判断标准及方法引用了Venselaar等^[6]研究成果。此外,为保证计划系统建模的辐射场与实际加速器辐射场一致性,需要建立常规质量保证程序,定期重复验收主要测试项目,将新的测试结果与验收时结果进行比较^[7]。因此通常需要在关键部件维修后或年检时再次进行水箱数据采集^[8-12],将测量数据与建模时测量数据进行比较,再根据IAEA-430号报告标准判断是否需要重新建模。

由于在验收及后续质控的整个过程中涉及不同射野大小,不同深度的上百组数据间的比较,数据量大而繁琐,人工操作比较费时费力,国内外相关研究大多只选取几个具有代表性的射野给出比较结果而缺乏对比较过程的研究^[13-17],各计划系统也并未提供针对IAEA-430号报告要求的比对结果,实际工作中缺乏相应的比较工具。因此,本研究开发了一套基于IAEA-430号标准的剂量学数据比对软件,以期为计划系统建模数据验收及后续质控提供指导与帮助。

1 材料与方法

本研究采用了一种面向对象、解释型计算机程序设计语言Python^[18],其语法简洁清晰,具有丰富强大的类库。在显示界面主框架和数据调度方面用到了Traits和TraitsUI两个库,Traits除了可以为Python对象的属性增加类型定义功能以外,还提供初始化、验证、委托、监听、可视化等功能,而TraitsUI是一套建立在Traits库基础上的用户界面库。另外在软件画图方面用到了Python最著名的绘图库matplotlib^[19],它提供了一整套和matlab相似的命令应用程序编程接口,非常适合交互式制图,并且制作绘图控件也很方便。在结果处理方面,程序用到了win32com模块,它将Python程序与word建立起联系,将结果输出并保存到word文档中。

放射治疗直线加速器验收和年检都包含水箱扫描项目,水箱扫描数据包括百分深度剂量(Percentage Depth Dose, PDD)、离轴剂量(Off-Axis Dose, OAD)等,根据IAEA-430号报告计划系统进行加速器建模后都需要进行计划系统验收,其中包括在均匀模体水中计划系统计算值与实际水中测量值的比对,以及年检后比对两次水中测量值的偏差,判断是否需要重新进行加速器建模,而Eclipse13.6计划系统或大多数计划系统并没有直接给出IAEA430号

报告要求比对的结果,现开发一套基于IAEA430号报告的剂量学数据比对软件,能快速验证计划系统建模数据正确性和每年水箱扫描数据比对结果,判断是否需要重新建模。该软件模块包括:文件准备、PDD模块、OAD模块、比对参数可视化和报告生成模块。

1.1 文件准备

在Eclipse13.6计划系统中Beam Configuration建模数据完成后只给出了处理后的测量数据和计算数据比较图,给出了一些特定区域的Gamma分析结果^[20],评价标准为相对于测量值距离偏差3 mm,剂量偏差1%,并且没有按照IAEA-430报告给出的评价标准进行分类比较,计算值与测量值的比较偏差常用计算公式见式(1):

$$\delta = 100\% \times \frac{(D_{\text{calc}} - D_{\text{meas}})}{D_{\text{meas}}} \quad (1)$$

其中, δ 是相同模体相同点测量值与计算值的偏差, D_{calc} 是计算值剂量, D_{meas} 是相同点的测量值剂量,本软件将Eclipse建模后的测量和计算数据导出作为ComparePO(CPO)的输入文件,不需要做任何处理。

1.2 PDD和OAD模块

在IAEA-430报告中给出了PDD比较标准,包括最大剂量之前 δ 偏差在10%之内,和最大剂量之后 δ 偏差在2%之内。另外对于OAD比较标准,包括射野内平坦区域 δ 偏差在3%之内,半影区域 δ 偏差小于10%;射野外区域比较是相对于中心归一后的偏差小于3%,如式(2)所示:

$$\delta = 100\% \times \frac{(D_{\text{calc}} - D_{\text{meas}})}{D_{\text{meas, cav}}} \quad (2)$$

其中, $D_{\text{meas, cav}}$ 是OAD曲线上中心轴的测量值;射野半高宽 RW_{50} 小于2 mm,以及射野肩区(相对于中心轴90%到50%)距离偏差在2 mm之内。

本研究定义了两个类:一个是与PDD有关的PDDGraph类;另一个是与OAD有关的OADGraph类。PDDGraph类中定义了一些函数,包括绘制PDD函数(plotpdd)、比较PDD函数(pddcompare)、报告PDD函数(pddreport),plotpdd函数能根据用户选择的射野大小在同一图上绘制出两条PDD曲线,并由pddcompare函数处理已选PDD曲线的比较偏差并绘制在图中,pddreport是产生PDD分析结果并输出到word的函数。OADGraph类中也定义了类似的函数,包括绘制OAD函数(plotOAD)、比较OAD函数(OADcompare)、报告PDD函数(OADreport),plotOAD函数能根据用户选择的射野大小和深度在同一图上绘制出两条OAD曲线,并由OADcompare函数处理已选OAD曲线的比较偏差

并绘制在图中,OADreport产生 OAD 分析结果并输出到 word 的函数。

1.3 比对参数可视化

本研究使用 Traits 库设计了显示界面,该界面能独立打开两个 PDD 或两个 OAD 文件,并进行绘图,绘图用到了 matplotlib 绘图库,能保存绘制的图片结果。程序界面主要分上下两个部分,上部分是选择 PDD 或 OAD 文件窗口,下部分是绘图窗口,绘图的左边对于 PDD 有射野大小选择栏、画 PDD 图、画 PDD 比较图和 PDD 比较结果输出按钮,而对于 OAD 有射野大小和深度选择栏、画 OAD 图、画 OAD 比较图和 OAD 比较结果输出按钮,绘图的右边能根据用户选择射野和深度的不同,并响应画 PDD 或 OAD 图等按钮更新绘图。

1.4 报告生成模块

CPO 软件输出文件类型为 .doc,程序在处理 word 文档用到了 win32com 模块,它将 Python 程序与 word 建立起联系,能生成两个报告:一个是 PDD 报告,其中包括不同射野大小、最大剂量之前和之后的两种类型的比较结果;另一个是 OAD 报告,其中包括 5 个深度处不同射野大小、射野内、半影、射野外、射野肩区以及半高宽的比较结果,若结果与 IAEA-430 号标准不一致,则统一用红字显示。

2 结果

2.1 验证软件运行情况

在 CPO 软件上,随机选择 PDD 或 OAD 文件并运行软件,软件能绘制出 PDD 或 OAD 的曲线图和比较图,并能给出报告,接下来检查每条 PDD 和 OAD 曲线绘制的数据准确性,结果显示为正确,最后核查软件给出的结果与人工计算结果的一致性,结果一致。表明 CPO 能给出临床计划系统建模时 PDD 和 OAD 计算值与测量值的比较结果,方便放射治疗物理师快速判断建模的准确性或前后两次水箱扫描数据的一致性。

2.2 临床使用情况

四川省人民医院的 TrueBeam 和 Trilogy 放射治疗加速器在安装完成后的初次建模、加速器的年检,以及 TrueBeam 加速器两次更换电离室后的质控测试,都用到了此软件,为放射治疗物理师提供了极大方便,节约了分析比对数据的时间,提高工作效率。

表 1 是 TrueBeam 加速器建模后计算和测量 PDD 比较报告,表中没有出现红字,表明加速器建模后的计算值与测量值是符合 IAEA-430 号报告的标准。表 2 是 TrueBeam 两次测量 OAD 比较报告,其中表 2 里红色字样是未满足 IAEA-430 号报告标准,比如 200.0 mm×200.0 mm 射野大小、深度为 16.0 mm、射野内两次测量值最大偏差是 4.67%,超过了允许的最大偏差 3%,这些数据需要进一步检查,分析原因,判断是否需要重新进行水箱扫描。表 3 是针对表 2 中偏差较高的数据进行重新测量后的比较值,结果满足 IAEA-430 号报告的标准。

表 1 PDD 比较报告
Tab.1 Report of percentage depth dose comparison

在以下条件下 PDD 比较	射野大小											
	30.0 mm× 30.0 mm	40.0 mm× 40.0 mm	60.0 mm× 60.0 mm	80.0 mm× 80.0 mm	100.0 mm× 100.0 mm	120.0 mm× 120.0 mm	150.0 mm× 150.0 mm	200.0 mm× 200.0 mm	250.0 mm× 250.0 mm	300.0 mm× 300.0 mm	350.0 mm× 350.0 mm	400.0 mm× 400.0 mm
最大剂量之前的 δ/%	≤6.75	≤1.57	≤1.88	≤3.05	≤1.50	≤3.10	≤2.23	≤3.29	≤1.83	≤2.04	≤2.60	≤0.40
最大剂量之后的 δ/%	≤0.86	≤0.64	≤0.35	≤0.69	≤0.54	≤1.07	≤0.96	≤0.47	≤0.65	≤0.49	≤0.49	≤0.62

3 结论

放射治疗直线加速器用于临床放疗前,需要进行质量验收,包括加速器的机械、辐射和影像性能的验收等,同时还包括计划系统的验收。计划系统验收即对建模数据准确性验收,现在大多数计划系统如 Eclipse 计划系统、Monaco 计划系统和 Fonics 计划系统等都没有按照 IAEA-430 号报告给出相关的评价标准。本研究使用的瓦里安 Eclipse 计划系统,虽然

给出了测量值与计算值的 Gamma 分析结果,但是没有给出 IAEA-430 号报告要求的评价标准。本研究开发出 CPO 软件,用户可以快速得到 PDD 和 OAD 结果,以判断建模数据的准确性和两次水箱扫描结果的一致性。虽然 CPO 功能较为强大,但在用于临床工作前,还需对软件的运行情况做详细核查,确保软件的安全使用,同时希望国际和国产计划系统早日给出 IAEA-430 号报告要求的评价标准,方便放射治疗物理师核查,提高工作效率。

表2 OAD比较报告
Tab.2 Report of off-axis dose (OAD) comparison

在以下条件下 OAD 比较	射野大小											
	30.0	40.0	60.0	80.0	100.0	120.0	150.0	200.0	250.0	300.0	350.0	400.0
	mm×	mm×	mm×	mm×	mm×	mm×	mm×	mm×	mm×	mm×	mm×	mm×
	30.0 mm	40.0 mm	60.0 mm	80.0 mm	100.0 mm	120.0 mm	150.0 mm	200.0 mm	250.0 mm	300.0 mm	350.0 mm	400.0 mm
16.0 mm 深度处射野内的 $\delta/\%$	≤0.57	≤0.72	≤0.72	≤0.69	≤0.36	≤0.59	≤0.58	≤4.67	≤1.45	≤1.21	≤2.24	≤1.40
50.0 mm 深度处射野内的 $\delta/\%$	≤0.90	≤0.45	≤0.34	≤0.47	≤0.35	≤0.71	≤0.49	≤0.58	≤0.67	≤0.84	≤3.90	≤0.43
100.0 mm 深度处射野内的 $\delta/\%$	≤1.03	≤0.74	≤0.40	≤0.47	≤0.43	≤0.73	≤0.49	≤0.40	≤0.91	≤0.70	≤1.91	≤1.30
200.0 mm 深度处射野内的 $\delta/\%$	≤1.02	≤0.58	≤0.59	≤0.62	≤0.50	≤1.08	≤0.30	≤0.70	≤0.45	≤0.61	≤0.90	≤0.42
300.0 mm 深度处射野内的 $\delta/\%$	≤1.03	≤0.88	≤0.41	≤1.67	≤0.60	≤0.62	≤0.40	≤0.85	≤1.00	≤0.85	≤1.00	≤0.58
16.0 mm 深度处半影的 $\delta/\%$	≤0.78	≤0.32	≤1.09	≤1.41	≤1.74	≤1.27	≤1.34	≤2.20	≤3.19	≤2.89	≤6.11	≤1.60
50.0 mm 深度处半影的 $\delta/\%$	≤1.09	≤1.23	≤1.29	≤0.53	≤1.76	≤1.08	≤1.77	≤1.55	≤2.28	≤2.96	≤5.90	≤2.28
100.0 mm 深度处半影的 $\delta/\%$	≤0.90	≤0.78	≤1.40	≤0.60	≤1.13	≤0.89	≤1.09	≤1.60	≤3.42	≤3.04	≤4.80	≤2.48
200.0 mm 深度处半影的 $\delta/\%$	≤1.35	≤0.51	≤0.27	≤0.52	≤1.08	≤1.00	≤1.23	≤0.44	≤2.12	≤1.90	≤4.20	≤1.94
300.0 mm 深度处半影的 $\delta/\%$	≤1.22	≤0.93	≤0.66	≤1.30	≤0.58	≤1.26	≤0.66	≤0.59	≤1.65	≤1.77	≤3.80	≤1.80
16.0 mm 深度处射野外的 $\delta/\%$	≤0.37	≤0.50	≤0.70	≤0.24	≤1.08	≤0.96	≤1.32	≤1.57	≤2.18	≤1.58	≤1.46	≤0.70
50.0 mm 深度处射野外的 $\delta/\%$	≤0.40	≤0.19	≤0.58	≤0.21	≤1.30	≤0.94	≤0.53	≤0.52	≤2.11	≤2.11	≤2.50	≤1.80
100.0 mm 深度处射野外的 $\delta/\%$	≤0.76	≤0.53	≤0.33	≤0.86	≤0.60	≤0.50	≤0.40	≤0.19	≤1.21	≤0.80	≤1.00	≤0.80
200.0 mm 深度处射野外的 $\delta/\%$	≤0.50	≤1.31	≤0.82	≤0.60	≤1.04	≤0.38	≤0.40	≤0.28	≤0.65	≤0.70	≤1.80	≤1.24
300.0 mm 深度处射野外的 $\delta/\%$	≤0.60	≤2.80	≤0.80	≤1.20	≤1.47	≤0.58	≤0.38	≤0.75	≤2.00	≤1.08	≤2.10	≤1.98
16.0 mm 深度处射野肩区的 $\Delta d/\text{mm}$	≤0.04	≤0.05	≤0.03	≤0.04	≤0.18	≤0.22	≤0.04	≤0.90	≤1.13	≤0.15	≤0.19	≤0.05
50.0 mm 深度处射野肩区的 $\Delta d/\text{mm}$	≤0.05	≤0.08	≤0.11	≤0.03	≤0.10	≤0.09	≤0.15	≤0.24	≤1.31	≤0.28	≤0.17	≤0.31
100.0 mm 深度处射野肩区的 $\Delta d/\text{mm}$	≤0.02	≤0.14	≤0.21	≤0.18	≤0.08	≤0.06	≤0.20	≤0.52	≤0.63	≤1.29	≤0.63	≤0.48
200.0 mm 深度处射野肩区的 $\Delta d/\text{mm}$	≤0.05	≤0.09	≤0.09	≤0.24	≤0.04	≤1.22	≤0.49	≤1.35	≤1.57	≤1.24	≤2.81	≤0.41
300.0 mm 深度处射野肩区的 $\Delta d/\text{mm}$	≤0.15	≤0.21	≤0.36	≤0.59	≤0.30	≤1.15	≤0.80	≤1.76	≤1.77	≤1.46	≤2.83	≤1.04
16.0 mm 深度处射野半高宽的 $\Delta d/\text{mm}$	≤0.00	≤0.03	≤0.08	≤0.18	≤0.18	≤0.08	≤0.12	≤0.24	≤0.36	≤0.44	≤0.00	≤0.00
50.0 mm 深度处射野半高宽的 $\Delta d/\text{mm}$	≤0.09	≤0.04	≤0.02	≤0.08	≤0.25	≤0.06	≤0.21	≤0.25	≤0.33	≤0.48	≤0.00	≤0.00
100.0 mm 深度处射野半高宽的 $\Delta d/\text{mm}$	≤0.08	≤0.13	≤0.12	≤0.02	≤0.20	≤0.07	≤0.20	≤0.12	≤0.57	≤0.52	≤0.00	≤0.00
200.0 mm 深度处射野半高宽的 $\Delta d/\text{mm}$	≤0.05	≤0.00	≤0.00	≤0.08	≤0.17	≤0.03	≤0.25	≤0.10	≤0.60	≤0.37	≤0.00	≤0.00
300.0 mm 深度处射野半高宽的 $\Delta d/\text{mm}$	≤0.18	≤0.04	≤0.00	≤0.02	≤0.02	≤0.11	≤0.12	≤0.02	≤0.45	≤0.40	≤0.00	≤0.00

表3 部分 OAD 比较报告
Tab.3 Report of partial OAD comparison

在以下条件下 OAD 比较	射野大小	
	200.0 mm×200.0 mm	350.0 mm×350.0 mm
16.0 mm 深度处射野内的 $\delta/\%$	≤1.07	-
50.0 mm 深度处射野内的 $\delta/\%$	-	≤0.52
200.0 mm 深度处射野肩区的 $\Delta d/\text{mm}$	-	≤0.77
300.0 mm 深度处射野肩区的 $\Delta d/\text{mm}$	-	≤0.65

【参考文献】

- [1] 刘兵, 曾自力, 滕炳祥, 等. 瓦里安Eclipse DX治疗计划系统的质量保证与质量控制[J]. 医疗卫生装备, 2012, 33(5): 110-112.
LIU B, ZENG Z L, TENG B X, et al. Quality assurance and quality control of Varian Eclipse DX treatment planning system[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2012, 33(5): 110-112.
- [2] American Association of Physicists In Medicine. AAPM report 55 of task group 23 of the radiation therapy committee: radiation treatment planning dosimetry verification[R]. Woodbury: American Institute of Physics, 1995.
- [3] FRAASS B, DOPPKE K, HUNT M, et al. American association of physicists in medicine radiation therapy committee task group 53: quality assurance for clinical radiotherapy treatment planning[J]. Med Phys, 1998, 25(10): 1773-1829.
- [4] International Atomic Energy Agency. Commissioning and quality assurance of computerized planning systems for radiation treatment of cancer, Technical Report Series No.430[R]. Vienna: IAEA, 2004.
- [5] YY/T 0798-2010, 放射治疗计划系统质量保证指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
YY/T 0798-2010, Radiotherapy treatment planning system-guidelines for quality assurance[S]. Beijing: China Standard Press, 2010.
- [6] VENSELAAR J, WELLEWEERD H, MIJNHEER B. Tolerances for the accuracy of photon beam dose calculations of treatment planning systems[J]. Radiother Oncol, 2001, 60(2): 191-201.
- [7] 于金明, 于甬华. 放射治疗的质量保证与质量控制[J]. 中国肿瘤, 2004, 13(8): 473-477.
YU J M, YU Y H. Quality assurance and quality control in radiotherapy[J]. China Cancer, 2004, 13(8): 473-477.
- [8] JIG589-2008, 医用电子加速器辐射源检定规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
JIG589-2008, Medical Electron accelerator radiation source verification procedures[S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
- [9] DAS I J, CHENG C W, WATTS R J, et al. Accelerator beam data commissioning equipment and procedures: report of the TG-106 of the Therapy Physics Committee of the AAPM[J]. Med Phys, 2008, 35(9): 4186-4215.
- [10] GB/T 19046-2013, 医用电子加速器验收试验和周期检验规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
GB/T 19046-2013, Medical electron accelerators-acceptance and periodic tests[S]. Beijing: China Standard Press, 2013.
- [11] GB 15213-2016, 医用电子加速器性能和试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
GB 15213-2016, Medical electron accelerators-functional performance characteristics and test methods[S]. Beijing: China Standard Press, 2016.
- [12] ERIC E K, JOSEPH H, JOHN B, et al. Task group 142 report: quality assurance of medical accelerators[J]. Med Phys, 2009, 36(9): 4197-4212.
- [13] JAMEMA S V, UPRETI R R, SHARMA S, et al. Commissioning and comprehensive quality assurance of commercial 3D treatment planning system using IAEA technical report series-430[J]. Australas Phys Eng Sci Med, 2008, 31(3): 207-215.
- [14] FAUSTO D, KATIA F, PAOLA M, et al. Dosimetric evaluation of a commercial 3D treatment planning system using Report 55 by AAPM Task Group 23[J]. Radiother Oncol, 1999, 52(1): 69-77.
- [15] EDUARD G, RAINER S, GRACIELA V, et al. Dosimetric verification of radiotherapy treatment planning systems: results of IAEA pilot study[J]. Radiother Oncol, 2009, 89(3): 338-346.
- [16] AKINO Y, GIBBONS J P, NECK N W, et al. Intra- and intervariability in beam data commissioning among water phantom scanning systems[J]. J Appl Clin Med Phys, 2014, 4(15): 251-258.
- [17] DANIEL S, JOSEPH R, WILBERT C, et al. Commissioning and cross-comparison of four scanning water tanks[J]. Int J Cancer Ther Oncol, 2016, 1(4): 1-9.
- [18] KUCHLING A M. Python v2.7.2 documentation[EB]. <https://python.readthedocs.io/en/v2.7.2/whatsnew/2.7.html>.
- [19] JOHN H, DARREN D. The matplotlib user's guide[EB]. <https://matplotlib.org/users/index.html>.
- [20] SPEZI E, LEWIS D G. Gamma histograms for radiotherapy plan evaluation[J]. Radiother Oncol, 2006, 79(2): 224-230.

(编辑:陈丽霞)