

基于 Raystation 计划系统实现多病种多类型自动计划技术的研究

娄朝阳 毛荣虎 李定杰 田玲玲 李兵 葛红

郑州大学附属肿瘤医院 河南省肿瘤医院放疗科 450008

通信作者:葛红,Email:gehong666@126.com

【摘要】 **目的** 使用 Raystation 计划系统脚本,开发一种适用于多病种多计划类型的自动计划平台,以此提高计划设计效率。**方法** 采用 IronPython 计算机语言和 WPF 用户界面框架编写应用程序,针对不同病种不同类型计划在设计中的差异问题,分别从处方识别、可视化计划参数输入和目标优化函数的设置方面进行程序设计。将该自动计划程序应用于全脑照射、鼻咽癌、宫颈癌、食管癌、乳腺癌病种的测试,包括 IMRT 和 VMAT,对比人工计划评估计划设计效率,并选择全脑照射评估计划剂量学参数。**结果** 程序应用中物理师只需输入并选择必需的计划参数,即可实现放疗计划自动设计。对比 5 个病种自动计划程序设计效率最大可以提高至 2.4 倍,全脑照射剂量学参数评估中,人工计划和自动计划均满足临床需求,靶区 $D_{2\%}$ 、CI、HI 相近 ($P>0.05$),人工计划靶区 $D_{98\%}$ 和晶体 D_{max} 的平均值高于自动计划 0.4% 和 7.1% ($P<0.05$)。**结论** 本程序具备了自动计划系统的功能,能够实现多病种多类型放疗计划的自动设计,大幅提高计划设计效率,具有重要的临床应用价值。

【关键词】 自动计划; Raystation 系统; 多病种; 可视化

基金项目: 国家自然科学基金项目 (81773230); 河南省 2018 年度重点研发与推广专项 (182102310297)

DOI:10.3760/cma.j.cn113030-20190426-00154

Study of automatic planning of multi-disease and multi-plan type based on Raystation planning system

Lou Zhaoyang, Mao Ronghu, Li Dingjie, Tian Lingling, Li Bing, Ge Hong

Department of Radiation Oncology, Affiliated Cancer Hospital of Zhengzhou University, Henan Cancer Hospital, Zhengzhou 450008, China

Corresponding author: Ge Hong, Email: gehong666@126.com

【Abstract】 **Objective** To propose an automatic planning platform of the Raystation planning system suitable for multi-disease and multi-plan technique by using the Raystation built-in script function. **Methods** IronPython and WPF user interface framework were utilized for programming and resolving the differences in the design of different types of plans for different diseases. The program was designed from prescription identification, visual plan parameter input and cost-function setting. The efficiency of automatic planning and manual planning was compared when applied in whole brain irradiation, nasopharyngeal carcinoma, cervical cancer, esophageal cancer and breast cancer, including IMRT and VMAT. The dosimetric parameters of the whole brain irradiation were chosen. **Results** Physicists were only required to enter and select the necessary parameters to achieve the plan design by using the program. Compared with the five types of diseases, the maximum efficiency of automatic planning was 1.4 times higher than that of manual planning. In the dosimetric evaluation of the whole brain irradiation plan, both manual and automatic planning could meet the clinical needs, and the $D_{2\%}$, CI and HI of the target area did not significantly differ (all $P>0.05$). The mean $D_{98\%}$ of the target area and the D_{max} of lens in the manual plan were significantly higher than those in the automatic plan by 0.4% and 7.1% (both $P<0.05$). **Conclusion** The developed program has the function of automatic planning system, which can realize the automatic planning of multi-disease and multi-type radiotherapy, significantly improve the efficiency of plan design and has important clinical application value.

【Key words】 Automatic planning; Raystation system; Multi-disease; Visualization

Fund programs: National Natural Science Foundation of China (81773230); Special Fund for Key Research and Development and Promotion of Henan Province in 2018(182102310297)

DOI: 10.3760/cma.j.cn113030-20190426-00154

放疗计划系统是整个放疗网络的重要组成部分,当前主流的计划系统有 Eclipse、Monaco、Pinnacle 及 Raystation 等,瑞典 Raysearch 公司为其开发的 Raystation 计划系统脚本功能提供了丰富的接口。该计划系统脚本基于 IronPython 语言平台,具备强大的拓展功能,物理师只需运行编写好的脚本即可对计划设计的多个步骤进行自动化处理。目前已有文章针对 Raystation 的脚本功能进行了报道,例如利用脚本针对同一病种相同布野方案的快速设置;对具有相同剂量分割方案的计划参数自动设置和自动优化等^[1-5]。而针对多病种多计划类型的自动计划程序的研究,尚罕见文献报道。针对这一问题,我们在 Raystation 4.7 计划系统平台上,通过自主编写脚本程序的方法,开展基于 Raystation 计划系统多病种多计划类型自动计划的研究。

材料与方 法

1. 基本情况:本研究中基于 4.7 版本的 Raystation 计划系统,分别采用 IronPython v2.7 编程语言和微软公司的 WPF 用户界面框架,编写自动计划程序和可视化用户界面。因不同的患者所患病种不同或所患同一病种分期不同,其所需放疗方案也往往不同。在计划设计过程中的差异主要表现 3 个方面:其一为处方剂量和分次的不同;其二为采用的照射技术和射野排布不同,如 IMRT、VMAT、FFF 模式照射、非共面照射技术等;其三为处方剂量、靶区和危及器官不同导致的目标优化函数设置不同。

2. 针对多病种多计划类型 Raystation 自动计划程序的解决方案

(1) 针对不同的计划,如何通过程序实现分次和处方剂量的识别和录入,并根据录入结果自动进行相应计划设计的问题。本方法是物理师在计划靶区名称后面添加分次和处方剂量然后让程序自动识别来解决,例如 PTV_25_5000,表示靶区 PTV,处方分次为 25,处方剂量为 5 000 cGy;对于有多个不同处方剂量的情况,只需在对应靶区的名称后面后缀其对应处方剂量即可,例如 PGTV_6000,表示靶区 PGTV 处方剂量为 6 000 cGy。对应的分次和处方剂量的识别代码如下:

```
roi_names = [ r. Name for r in patient. PatientModel.
RegionsOfInterest ]
tarls = [ ] ; dosels = [ ]
for m in roi_names:
    con = collections. Counter ( m )
if con['_'] = 2:
```

```
ptvname = m
numf = m. split ('_')[1]
tarls. append ( m )
ptvdose = int ( m. split ('_')[2] )
dosels. append ( ptvdose )
if con['_'] = 1:
    tarls. append ( m )
    dosels. append ( int ( m. split ('_')[1] ) )
```

此段代码循环遍历所有轮廓名称,识别带有处方剂量和分次的轮廓并存储,完成处方剂量和分次的识别。随后程序分别利用识别参数进行计划设计。

(2) 针对不同的计划设计中照射技术的选择和射野排布问题,通过在编写的用户界面中进行人机交互的方法解决。其用户界面如图 1 所示。该窗口主要由 3 个下拉选择菜单和 1 个文本输入框构成,物理师分别在对应项选择或填入对应的参数即可,其中 Accelerator 对应加速器的选择;Strategy 对应放射技术,有 IMRT、VMAT、SRS 项可选;Beams 对应为布野方案,分别针对常规剂量分割模式的 IMRT 和 VMAT,以及大剂量分割模式的 SRS 和 SBRT 计划类型设置了多种布野方案预设。该菜单内容与 Strategy 菜单联动,只能选择与 Strategy 菜单中相匹配的布野方案。F Dose [cGy] 对应为单次剂量,需物理师在文本框中手动输入计划的单次剂量。程序自动于后台核对总处方剂量、分次数和单次剂量之间的匹配关系,减少错误发生。

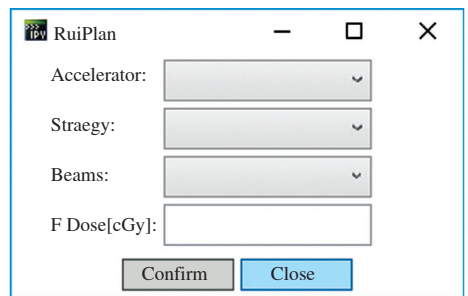


图 1 自动计划程序图形界面

(3) 靶区和危及器官的目标优化函数的设置问题,其中靶区的目标优化函数可通过读取识别靶区名称的命名来设置。针对危及器官目标优化函数的设置,首先须确定危及器官的类型,然后跟据特定的危及器官设置其目标优化函数。依据 AAPM TG263 报告并综合临床医师的命名习惯,设计了危及器官命名列表,如左侧晶体命名列表为:

```
left_lendic = [ 'LEN-L', 'LENS-L', 'LENL', 'LENSL', 'LEN-LEFT', 'LENS-LEFT', 'LENLEFT', 'LENS LEFT' ]。
```

如果轮廓列表中的某一元素存在于该危及器官

命名列表中,则会被程序定义为左侧晶体(大小写不敏感),通过搜寻命名列表即可实现危及器官类型的识别。危及器官的剂量约束限值则由回归模型得出,该方法同时考虑了危及器官与靶区位置关系、处方剂量大小对危及器官受量的贡献,由 Pang 等^[6]提出,其表达式为:

$$D_s = C_0 + C_{in} \cdot V_{in} + C_1 \cdot V_1 + C_2 \cdot V_2 + \dots + C_n \cdot V_n,$$

式中 D_s 代表危及器官不同体积的归一受照剂量,如 D_{10} 、 D_{20} 、 D_{30} 等, V_{in} 表示危及器官和靶区相交的归一体积, V_1 、 V_2 ... V_n 表示由靶区外扩一系列的等间距的同心区域与危及器官相交部分的归一体积, C_0 、 C_{in} 、 C_1 ... C_n 为系数项。

针对不同危及器官进行参数拟合过程中物理师筛选计划原则为:①所有计划中患者年龄 20~65 岁之间且均为第 1 程计划,各个危及器官不存在特殊剂量限值;②排除非共面计划;③所有靶区处方剂量覆盖 >95%;④挑选头颈部、胸腹部和盆腔肿瘤计划,每组 30 个。所有被选计划均由有经验丰富的物理师重新在 Raystation 进行优化,保证靶区剂量覆盖 >95% 并尽可能降低危及器官剂量直至无明显改善为止;然后在计划系统中利用脚本程序将所需参数导出,最后由 MATLAB 拟合。不同危及器官的拟合系数以 Python 二维数组的形式保存至自动计划程序文件中。自动计划程序运行中根据器官的类型以及当前患者轮廓结构,自动读取相应系数矩阵并计算得到剂量体积直方图曲线上若干的点作为目标优化值,然后利用 Add Optimization Function 函数添加初始目标优化函数。

3. 程序使用方法:物理师首先依据医生处方修改相应的计划靶区名称;然后在 Script Creation 模块中选择并运行自动计划程序,在弹出的图形界面中依次选择所需参数;最后依次点击图 1 中 Confirm 和 Close 按钮。程序根据参数输入,调用计划系统相应的模块,自动完成包括轮廓处理、剂量限制区域生成(包括生成多个环、壳结构)、新建计划、迭代优化参数设置、目标优化函数设置和记录等,并自动开始剂量优化。该自动计划程序在每次迭代优化完成后会根据当前优化结果,自动调整目标优化函数和生成新的剂量限制轮廓继续优化,类似物理师在人工计划中反复修改(trial and error)的过程,其原理为每次迭代优化完成后判断靶区剂量覆盖情况。如果靶区覆盖 >90%,然后针对所有危及器官将当前优化结果与其目标优化函数设置进行比较;如果优化结果低于目标函数设置,则自动收紧并记录目标优化函数,反之该目标优化函数不变。如果靶区覆盖 <90%

则自动放松低于实际优化结果的目标函数并记录,并在靶区外部和内部分别生成新的剂量限制轮廓;外部轮廓目的收紧剂量线,内部轮廓提升靶区覆盖,并据此继续添加约束条件,再次进行优化;如此循环往复,直至优化收敛或者达到最大预设循环次数,程序自动保存优化结果,结束计划优化。其流程图见图 2,其中剂量限制轮廓的生成、新建计划、目标优化函数的修改、剂量体积直方图曲线读取、迭代再优化、计划自动保存的脚本不在本文中详细说明,其主要使用的函数如表 1 中所示。

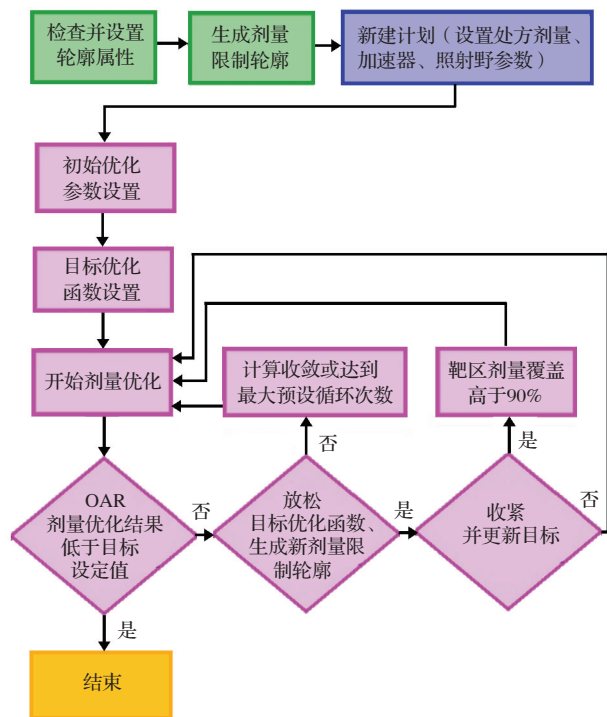


图 2 自动计划程序流程图

表 1 自动计划程序使用到的主要函数

功能	主要函数
新建计划	patient. AddNewPlan()
生成剂量限制区域	patient. PatientModel. CreateRoi()
目标优化函数修改	plan. AddOptimizationFunction() plan. DeleteFunction()
剂量体积直方图曲线读取	beam_set. FractionDose. GetDoseAtRelativeVolumes() beam_set. FractionDose. GetDoseStatistic()
迭代优化参数设置	plan. OptimizationParameters. Algorithm
子野参数设置	plan. OptimizationParameters. Segment Conversion
迭代再优化	plan. RunOptimization()
计划保存	patient. Save()

4. 计划设计效率评估:针对全脑照射、鼻咽癌、宫颈癌、食管癌、乳腺癌 5 个常见病种,各随机挑选 20 个病例,分别进行人工和自动计划设计,对比计

划耗时。将物理师完整设计 1 个计划的时间分为人工操作时间和计算机处理时间,并分别进行对比。其中人工操作时间规定为物理师通过外部指令操控计划系统的时间总和,计算机处理时间为物理师操作完成后计划系统自主进行计算处理的时间总和。其中全脑照射、鼻咽癌、宫颈癌计划类型为 VMAT,食管癌、乳腺癌计划类型为 IMRT。

5. 计划剂量学参数评估:针对 20 例全脑照射计划的剂量学数据进行对比,处方剂量均为 30 Gy 分 10 次。评估靶区剂量 $D_{2\%}$ 、 $D_{98\%}$,晶体 D_{\max} 及靶区适形指数 (conformal index, CI),靶区剂量均匀性指数 (homogeneity index, HI)。公式为:

$$CI = \left(\frac{V_{t,ref}}{V_{ref}} \times \frac{V_{t,ref}}{V_t} \right),$$

其中 $V_{t,ref}$ 为参考等剂量曲面所包绕的靶区体积, V_{ref} 为参考等剂量曲面所包绕的三维空间体积, V_t 为靶区体积。CI 值为 0~1, 值越大适形度越好。

$$HI = 100\% \times \frac{D_{2\%} - D_{98\%}}{D_{ref}},$$

HI 值越小越好,其中 $D_{2\%}$ 、 $D_{98\%}$ 分别为 2%、98% 靶区对应的体积剂量, D_{ref} 处方剂量。

6. 统计方法:采用 SPSS 17.0 软件对人工计划和自动计划结果行配对样本 t 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

我们采用 IronPython 计算机语言以及微软公司的 WPF 用户界面框架,编写了基于 Raystation 计划系统的多病种多计划类型可视化的自动计划程序,并于 2018 年对该软件进行著作权的认证——RuiPlan。该软件具有轮廓处理、处方剂量识别、新建计划、计划优化、修改目标优化函数、迭代再优化等多个自动化模块,以及人性化的用户操作界面,物理师只需输入并选择必需的计划参数,程序即可自动完成计划设计。本研究选取全脑照射、鼻咽癌、宫颈癌、食管癌、乳腺癌 5 个常见病种 2 种计划类型就人工计划和自动计划效率进行对比,以及全脑照射的剂量学参数对比。

1. 计划设计效率比较:从表 2 可看到,相比人工计划,5 个病种两种计划类型的自动计划在人工操作时间上远低于人工计划,效率为人工计划的 2.6~10.5 倍。在计算机处理时间上,除鼻咽癌人工计划平均耗时略低于自动计划外,其余在计算机处理时间对比中自动计划耗时均占优。综合人工操作

和计算机处理的总时间,全脑照射、鼻咽癌、宫颈癌、食管癌、乳腺癌 5 个病种,自动计划效率分别是人工计划的 1.9、1.4、1.7、2.4、2.2 倍。其中 IMRT 计划效率提升较 VMAT 计划显著。

表 2 5 种病例各 20 例肿瘤患者自动计划与人工计划耗时比较 (min, Mean±SD)

项目	人工计划		自动计划	
	M/Time	C/Time	M/Time	C/Time
全脑照射	13.6±2.8	13.4±2.4	1.3±0.3	12.8±2.2
鼻咽癌	27.8±4.7	31.2±8.4	5.7±1.4	35.5±6.4
宫颈癌	18.3±3.8	31.6±4.7	2.2±0.5	27.6±4.5
食管癌	14.9±2.8	6.4±1.6	4.7±1.9	4.2±0.9
乳腺癌	17.4±3.8	5.9±1.3	5.8±1.9	4.6±1.1

注:M/Time 表示人工操作时间,C/Time 表示计算机处理时间

2. 计划剂量学参数比较:两组计划对比中,所有计划剂量学参数均满足临床需求。自动计划靶区的 $D_{2\%}$ 、 $D_{98\%}$ 平均较人工计划低分别低 0.5%、0.4%。两种计划 CI、HI 对比差异较小。自动计划晶体 D_{\max} 的平均值较人工计划降低 7.1%,余见表 3。

表 3 5 种病例各 20 例肿瘤患者剂量学参数自动计划与人工计划比较

量学参数	人工计划	自动计划	P 值
靶区			
$D_{2\%}$ (cGy)	3 182.3±18.1	3 167.1±26.9	0.14
$D_{98\%}$ (cGy)	2 986.3±25.9	2 974.6±24.7	0.01
适形指数	0.92±0.01	0.92±0.01	0.20
均匀性指数	6.2%±1.0%	6.4%±1.2%	0.44
晶体 D_{\max} (cGy)	639.2±40.7	594.1±15.4	0.01

讨 论

本研究选取了 5 个病种各 20 例患者,通过对比自动计划程序和人工计划设计的效率差异发现,自动计划大幅提高了计划效率,约为人工计划设计效率的 1.4~2.4 倍,其中 IMRT 计划提升较 VMAT 计划显著。其原因是由于 Raystation 中使用了 GPU 加速功能,对 IMRT 计划可在很短时间 (1 min 左右) 完成一圈迭代优化运算;此时人工计划中手动操作耗时占据了大部分的总计划耗时,成为导致人工计划效率较低的主要原因,而自动计划则不存在这个问题。此外在计算计划设计耗时中,计划系统只提交一个作业,在日常工作中 1 台计划系统往往同时提交多个作业;物理师同时要关注多个计划,此时自动计划在效率方面更具优势。本研究 20 例全脑照射计划的剂量学参数对比中,自动计划与人工计划均满足临床要求;其中自动计划的 $D_{2\%}$ 略低于自动

计划($P>0.05$), $D_{98\%}$ 略低于人工计划($P<0.05$)。这是由于在人工计划设计过程中,会专门对靶区内的低剂量区域手动提出并进行优化;而 Raystation4.7 暂不支持类似功能的脚本实现,只能通过靶区内构建一系列壳层结构的方法提升靶区覆盖,故效果不如人工计划。本研究晶体保护方面自动计划结果优于人工计划, D_{max} 的平均值较人工计划降低 7.1%。这是由于自动计划设计过程中在晶体周围添加外扩轮廓,同时采用最大剂量和最大生物等效均衡剂量同时进行限制,使得自动计划对晶体的保护更为充分。实际使用中对于大多数计划,自动计划程序在 1 次运行后便可得到临床可用结果,对于靶区和危及器官情况复杂的病例如鼻咽癌,自动程序在运行完成后有时不能获得满意结果;在此优化基础上,通过手动的方式进行小幅度的修改,多数情况下能够获得满意的结果。

本研究存在的不足:①没有自动勾画危及器官和靶区的功能:尝试在以后研究中通过 model based segmentation 或 atlas based segmentation 的方法进行危及器官和靶区的自动勾画;②模型预测结果可能与实际最优解之间存在差距:将通过每次迭代计算完成后判断优化结果和目标优化函数的差异,并根据结果自动调节目标优化函数,从而最大限度降低模型预测不准确对计划结果的影响;③没有射野角度优化功能:本研究中通过建立大量射野模板的方法,来满足大多数病种不同计划类型的需求,尝试在以后的工作中研究射野优化算法,提高自动计划程序的自动化程度。

国内外大量学者和组织已开展自动计划程序的研究。基于 Raystation 计划系统的 IronPython 语言的脚本平台,邵凯南等^[2]实现了 IMRT 计划的半自动设计,王雪桃等^[5]实现了基于预测模型的宫颈癌 VMAT 计划的全自动设计。美国瓦里安公司通过机器学习的方法预测靶区和危及器官剂量体积直方图模型,开发出了基于 Eclipse 的自动计划系统 RapidPlan^[7-8]。基于 Pinnacle 计划系统, Xhaferllari 等^[9]通过脚本功能实现了 IMRT 计划设计的自动化。美国安德森肿瘤癌症中心通过引入射野角度优化算法以及自动化的轮廓处理和目标函数调整方法,开发出了适用于多病种多计划类型的 Pinnacle 自动计划系统 mdaccAutoPlan^[10-11]。总之关于自动计划系统的探索成为当前的研究热点之一。我们通过 IronPython 程序平台以及微软公司的 WPF 用户界

面框架,开发出了具有可视化界面的 Raystation 自动计划程序,实现了 Raystation 计划系统中多病种多类型放疗计划设计的自动设计,简化了计划设计流程,提高了计划设计效率,具有重要的临床应用价值。

利益冲突 本人与其他作者声明没有任何利益冲突

作者贡献声明 娄朝阳负责撰写文章;葛红负责最终修改;其他人参与研究工作

参 考 文 献

- [1] Eley, J. TH-D-BRB-03: Introduction to Scripting in RayStation [J]. Med Phys, 2016, 43(6): 3892-3892. DOI: 10.1118/1.4958233.
- [2] 邵凯南, 翁邓胡, 李玉成, 等. 基于 Python 脚本的 RayStation 治疗计划系统逆向调强放疗计划半自动设计 [J]. 中国医学物理学杂志, 2018, 35(2): 156-160. DOI: 10.3969/j.issn.1005-202X.2018.02.007. Shao KN, Weng DH, Li YC, et al. Semi-automatic design of inverse intensity-modulated radiotherapy treatment plans based on Python scripts in RayStation treatment planning system [J]. Chin J Med Phys, 2018, 35(2): 156-160. DOI: 10.3969/j.issn.1005-202X.2018.02.007.
- [3] 张建英, 孙菁, 王芸. RayStation 治疗计划系统脚本的初步应用 [J]. 中国医疗器械杂志, 2013, 37(4): 297-300. DOI: 1671-7104(2013)04-0297-04. Zhang JY, Sun J, Wang Y. Preliminary application of scripting in RayStation TPS system [J]. Chin J Med Instr, 2013, 37(4): 297-300. DOI: 1671-7104(2013)04-0297-04.
- [4] 张建英, 孙菁, 王芸. RayStation 治疗计划系统脚本的进阶应用 [J]. 中国医疗器械杂志, 2014, 38(6): 463-465. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7104.2014.06.022. Zhang JY, Sun J, Wang Y. Discussion to the advanced application of scripting in RayStation TPS [J]. Chin J Med Instr, 2013, 37(4): 297-300. DOI: 1671-7104(2013)04-0297-04.
- [5] 王雪桃, 肖江洪, 赵建玲, 等. 基于 RayStation 计划系统的宫颈癌容积旋转调强自动计划设计 [J]. 中华放射医学与防护杂志, 2018, 38(10): 751-755. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2018.10.006.
- [6] Pang H, Sun X, Yang B, et al. Predicting the dose absorbed by organs at risk during intensity modulated radiation therapy for nasopharyngeal carcinoma [J]. Br J Radiol, 2018, 91(1092): 20170289. DOI: 10.1259/bjr.20170289.
- [7] Tol JP, Dahele M, Delaney AR, et al. Can knowledge-based DVH predictions be used for automated, individualized quality assurance of radiotherapy treatment plans? [J]. Radiat Oncol, 2015, 10(1): 234. DOI: 10.1186/s13014-015-0542-1.
- [8] Tol JP, Delaney AR, Dahele M, et al. Evaluation of a knowledge-based planning solution for head and neck cancer [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2015, 91(3): 612-620. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2014.11.014.
- [9] Xhaferllari I, Wong E, Bzdusek K, et al. Automated IMRT planning with regional optimization using planning scripts [J]. J Appl Clin Med Phys, 2013, 14(1): 4052. DOI: 10.1120/jacmp.v14i1.4052.
- [10] Quan EM, Chang JY, Liao Z, et al. Automated volumetric modulated Arc therapy treatment planning for stage III lung cancer: how does it compare with intensity-modulated radio therapy? [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2012, 84(1): e69-76. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2012.02.017.
- [11] Li X, Quan EM, Li Y, et al. A fully automated method for CT-on-rails-guided online adaptive planning for prostate cancer intensity modulated radiation therapy [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2013, 86(5): 835-841. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2013.04.014.