

光子优化算法在宫颈癌术后调强计划中的剂量学分析

刘致滨, 石锦平, 张利文, 谢秋英, 滕建建, 李盈辉

佛山市第一人民医院(中山大学附属佛山医院)肿瘤中心放疗科, 广东 佛山 528000

【摘要】目的:探讨宫颈癌术后调强放射治疗(IMRT)计划中采用光子优化(PO)算法与常规的剂量体积优化(DVO)算法的剂量学差异。**方法:**选取20例接受宫颈癌术后IMRT的患者。勾画靶区和危及器官后,分别设计基于PO算法和DVO算法的两种IMRT计划,比较两种计划的剂量学特性、剂量验证通过率和治疗计划的效率。**结果:**两种计划中计划靶区(PTV)的 $D_{98\%}$ 、靶区覆盖率和均匀性指数无明显差异,但是PO计划在PTV的 $D_{2\%}$ 、 D_{mean} 均低于DVO计划($P=0.019, 0.016$),同时PTV的适形度指数优于DVO计划($P=0.005$)。在危及器官保护上,PO计划的膀胱 V_{30} 和左股骨头 V_{30} 低于DVO计划($P=0.000, 0.009$),但是小肠 V_{15} 、直肠 V_{30} 和左右侧股骨头 V_{30} 高于DVO计划($P=0.000, 0.001, 0.000, 0.000$)。PO计划在正常组织 V_{30} 的受量上低于DVO计划($P=0.005$),但在 V_5 和 V_{10} 的受量上高于DVO计划($P=0.000, 0.000$)。两种计划的剂量验证通过率均能满足治疗的要求,其中PO计划通过率为 $(98.06\pm 0.81)\%$,优于DVO计划通过率 $(96.05\pm 1.09)\%$ 。PO计划相比DVO计划,机器跳数平均减少10.7%,治疗时间平均减少10.5%,优化耗时平均缩短35.4%。**结论:**PO计划和DVO计划都能满足临床要求。PO算法应用于宫颈癌术后IMRT在靶区剂量分布上略有优势,能够提高靶区适形度,减少机器跳数,缩短计划设计时间和治疗时间,同时剂量投照更准确。

【关键词】宫颈癌;调强放疗;光子优化算法;剂量体积优化算法;剂量学分析

【中图分类号】R730.55;R737.33

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2019)07-0765-05

Dosimetric analysis of photon optimization algorithm in postoperative intensity-modulated radiotherapy for cervical cancer

LIU Zhibin, SHI Jinping, ZHANG Liwen, XIE Qiuying, TENG Jianjian, LI Yinghui

Department of Radiation Oncology, Cancer Center, the First People's Hospital of Foshan (Affiliated Foshan Hospital of Sun Yat-sen University), Foshan 528000, China

Abstract: Objective To explore the dosimetric differences between photon optimization (PO) algorithm and conventional dose volume optimization (DVO) algorithm in postoperative intensity-modulated radiotherapy (IMRT) for cervical cancer. **Methods** Twenty patients who received postoperative IMRT for cervical cancer were enrolled in this study. After target areas and organs-at-risk were delineated, two kinds of IMRT plans, namely PO plan and DVO plan, were designed based on PO algorithm and DVO algorithm, separately. The dosimetric characteristics, passing rate and treatment efficiency of the two kinds of treatment plans were evaluated. **Results** No significant difference was found in the $D_{98\%}$, target coverage and homogeneity index of planning target volume (PTV). However, compared with those in DVO plan, the $D_{2\%}$ and D_{mean} of PTV were lower in PO plan ($P=0.019, 0.016$), and the conformity index (CI) of PTV was better in PO plan ($P=0.005$). The V_{30} of bladder and V_{20} of left femoral head in PO plan were lower than those in DVO plan ($P=0.000, 0.009$), while the V_{15} of small intestine, V_{30} of rectum and V_{30} of left and right femoral heads in PO plan were higher than those in PO plan ($P=0.000, 0.001, 0.000, 0.000$). Compared with DVO plan, PO plan had a lower dose exposure in the V_{30} of normal tissues ($P=0.005$) and higher dose exposures in the V_5 and V_{10} of normal tissue ($P=0.000, 0.000$). The passing rates of two kinds of plans met treatment requirements, and the passing rate of PO plan were $(98.06\pm 0.81)\%$, higher than $(96.05\pm 1.09)\%$ of DVO plan. Compared with those of DVO plan, the monitor units in PO plan was decreased by an average of 10.7%; the treatment time was reduced by an average of 10.5%; and the optimization time was shortened by an average of 35.4%. **Conclusion** Both PO plan and DVO plan can satisfy clinical requirements. The application of PO algorithm in IMRT plan for cervical cancer which has advantages in the target dose distribution can improve the target

【收稿日期】2019-01-23

【基金项目】国家科技部课题(2017YFC0113205)

【作者简介】刘致滨, 硕士, 研究方向:放疗物理, E-mail: lzbin2008@sina.com

【通信作者】石锦平, 主任技师, 研究方向:放疗计划设计与质量控制, E-mail: rath55@126.com

conformity, reduce monitor units, shorten planning time and treatment time, and achieve a more accurate dose exposure.

Keywords: cervical cancer; intensity-modulated radiotherapy; photon optimization algorithm; dose volume optimization algorithm; dosimetric analysis

前言

宫颈癌是我国最常见的恶性肿瘤之一,发病率居女性恶性肿瘤第二,仅次于乳腺癌。手术治疗主要应用于早期宫颈癌,需切除子宫和淋巴结。宫颈癌患者术后可根据复发危险因素选择放射治疗等辅助治疗来降低复发率,改善预后^[1-2]。调强放射治疗(Intensity-Modulated Radiotherapy, IMRT)是通过多个照射野形成一系列不规则形状、强度可变的射野来实现不均匀的剂量分布,在靶区得到高剂量照射的同时有效地降低周围正常组织的受照剂量。逆向优化算法是IMRT应用的基础,不同的优化算法会直接影响IMRT计划的靶区剂量分布及治疗效率^[3-5]。目前Eclipse计划系统IMRT计划常规使用剂量体积优化(Dose Volume Optimization, DVO)算法,先进行强度图优化,再进行多叶准直器(Multileaf Collimator, MLC)叶片序列优化。光子优化(Photon Optimization, PO)算法是Eclipse计划系统13.5版本提出的一种全新的优化算法,目前相关的报道较少。本研究针对这两种优化算法在宫颈癌术后IMRT计划中的剂量学特性进行分析比较,从而为临床治疗提供参考。

1 材料与方法

1.1 临床资料

随机选取2018年5月~2018年12月在佛山市第一人民医院(中山大学附属佛山医院)接受术后IMRT的20例宫颈癌患者作为研究对象。年龄35~78岁,中位年龄58岁。患者均接受广泛子宫切除和盆腔淋巴结清扫术,无髂总淋巴结转移和放疗禁忌症。

1.2 CT模拟定位

病人采用仰卧位,真空垫固定,需要在定位前排空直肠,行静脉增强造影。在Philips Brilliance 16排大孔径CT模拟机上进行CT平扫和增强扫描。平静呼吸下开始扫描,扫描范围自第二腰椎至闭孔下缘,层厚为5 mm。扫描图像通过网络传输至Varian Eclipse计划系统工作站。

1.3 靶区勾画及剂量限制

由临床放疗医生在CT图像上勾画靶区和危及器官(Organs-at-Risk, OAR)。根据ICRU 62号报告,临床靶区应包括阴道上端1/2及残端、阴道旁软组织

及盆腔淋巴引流区等^[6]。考虑摆位误差及机器的机械和剂量误差等,计划靶区(Planning Target Volume, PTV)是在临床靶区边界基础上头脚方向外扩1 cm,左右、前后方向各外扩7 mm得到。勾画的OAR主要有小肠、膀胱、直肠、左右股骨头。小肠勾画至PTV最顶层上2 cm处;正常组织为PTV最顶层面上2 cm至PTV最底层面上2 cm的外轮廓减去PTV部分。

1.4 放射治疗计划设计

物理师在Eclipse 13.5计划系统设计IMRT计划,每例患者均采用PO算法和DVO算法制定PO计划和DVO计划,在Varian加速器Trilogy上执行。采用6 MV光子线,剂量率为400 MU/min。加速器Trilogy的MLC包括60对叶片,中间40对叶片宽度为0.5 cm,两边各有10对宽度1.0 cm的叶片。计划均采用5个照射野,照射野角度分别为181°、108°、36°、324°、252°。采用PO算法进行IMRT计划优化,所产生的计划能够满足处方剂量和OAR限量的要求;采用DVO算法优化时,删除PTV平均剂量的限制条件,并在保持其他的优化条件和参数均不变的情况下进行优化,得到相应的治疗计划。PTV的处方剂量为45 Gy/25 F,分5周完成。

1.5 评价指标

应用剂量体积直方图对两种优化算法得到的计划进行靶区和OAR的剂量学分析。根据ICRU 83号报告,PTV评价指标有最大剂量 $D_{2\%}$ 、平均剂量 D_{mean} 、最小剂量 $D_{98\%}$ 、靶区覆盖率、均匀性指数(Homogeneity Index, HI)和适形度指数(Conformity Index, CI)。 $CI = V_{t,ref}^2 / (V_t \times V_{ref})$,其中 $V_{t,ref}$ 表示PTV接受处方剂量的体积; V_t 表示PTV的体积; V_{ref} 表示全身接受处方剂量的体积。 $HI = (D_{2\%} - D_{98\%}) / D_{50\%}$,其中 $D_{50\%}$ 表示中位剂量^[7]。OAR根据类型分别评估:小肠的 V_{15} 、 V_{40} ;膀胱和直肠的 V_{30} 、 V_{40} ;左右侧股骨头的 V_{20} 、 V_{30} 、 V_{40} ;正常组织的 V_5 、 V_{10} 、 V_{20} 、 V_{30} 、 V_{40} 。

优化完成后统计PO计划和DVO计划的总机器跳数。治疗时间包括机器旋转、机器参数发送以及出束时间,但不包含摆位时间。优化耗时是指设置好优化限制条件后开始优化至剂量计算结束所耗费的时间。

剂量验证采用德国IBA公司的Matrixx二维矩阵和MultiCube模体对20例病人的PO计划和DVO计

划进行调强剂量验证。用 3 mm/3%、剂量阈值为 10%的标准来评价计划 gamma通过率。

1.6 统计学方法

采用 SPSS 20.0 软件对两种计划进行统计学分析,采用均数±标准差表示。PO 计划和 DVO 计划采用配对 *t* 检验进行比较,对靶区剂量分布、OAR 和正常组织的受量、机器跳数、治疗时间、优化耗时及剂量验证进行比对,显著性水平 $\alpha=0.05$ 。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 靶区剂量分布

由图 1 和表 1 可知,两种优化算法产生的计划靶区覆盖率均超过 95%,达到临床治疗要求,且无明显差异($P=0.340$)。两种计划的靶区剂量分布差异主要体现在 PTV 的 $D_{2\%}$ 、 D_{mean} 和 CI 上。PO 计划在 PTV 的 $D_{2\%}$ 、 D_{mean} 均低于 DVO 计划($P=0.019, 0.016$),同时 PO 计划的 CI 优于 DVO 计划($P=0.005$)。两种计划 PTV 的 $D_{98\%}$ 和 HI 无明显差异。

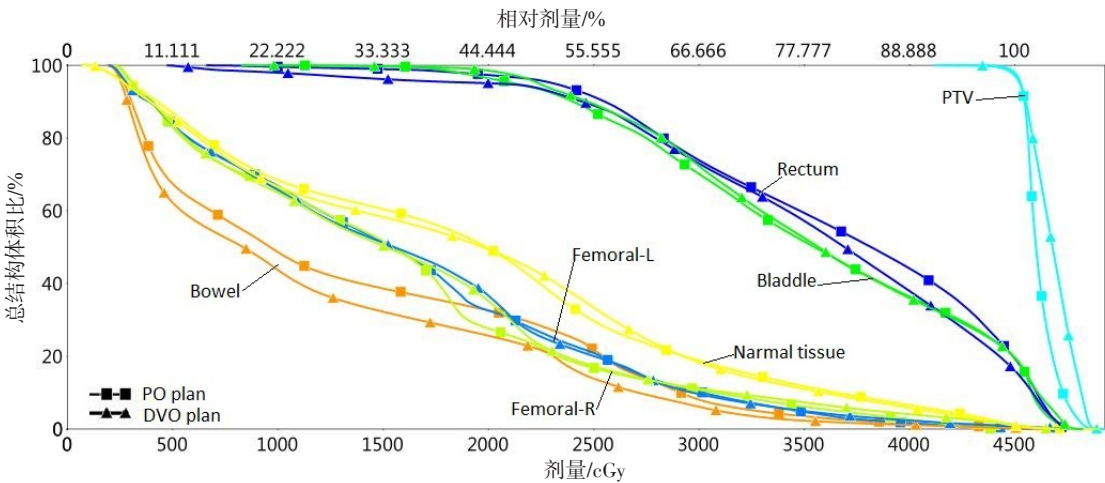


图1 PO 计划和DVO 计划的DVH图
Fig.1 Dose–volume histogram of photon optimization (PO) plan and dose volume optimization (DVO) plan

表 1 PO 计划和DVO 计划的患者 PTV 剂量参数比较
($n=20, \bar{x} \pm s$)
Tab.1 Dosimetric comparison of PTV between PO plan and DVO plan ($n=20, \text{Mean} \pm \text{SD}$)

参数	PO 计划	DVO 计划	<i>P</i> 值
$D_{2\%}/\text{cGy}$	4 840.4±51.0	4 857.1±60.3	0.019
$D_{98\%}/\text{cGy}$	4 486.6±24.8	4 486.8±21.0	0.963
D_{mean}/cGy	4 645.6±55.8	4 681.6±33.4	0.016
靶区覆盖率/%	97.18±1.16	97.40±0.87	0.340
CI	0.895±0.020	0.881±0.030	0.005
HI	0.075±0.014	0.077±0.014	0.244

CI:适形度指数;HI:均匀性指数

2.2 OAR 剂量分析

两种计划的小肠 V_{40} 、膀胱 V_{40} 、直肠 V_{40} 、左侧股骨头 V_{40} 、右侧股骨头 V_{20} 和 V_{40} 受量无统计学差异($P>0.05$)。PO 计划膀胱的 V_{30} 、左侧股骨头的 V_{20} 均低于 DVO 计划,差异有统计学意义($P=0.000, 0.009$)。而 DVO 计划的小肠 V_{15} 、直肠 V_{30} 和左右侧

股骨头的 V_{30} 均低于 PO 计划,且差异均有统计学意义($P<0.05$)。详见表 2。

表 2 PO 计划和DVO 计划的患者 OAR 剂量参数比较
($n=20, \%, \bar{x} \pm s$)
Tab.2 Dosimetric comparison of organs-at-risk between PO plan and DVO plan ($n=20, \%, \text{Mean} \pm \text{SD}$)

OAR	参数	PO 计划	DVO 计划	<i>P</i> 值
小肠	V_{15}	72.26±10.80	68.46±11.78	0.000
	V_{40}	16.84±6.89	17.01±7.52	0.444
膀胱	V_{30}	78.88±6.77	85.57±7.71	0.000
	V_{40}	44.29±6.17	45.36±6.84	0.078
直肠	V_{30}	77.27±8.62	76.06±9.19	0.001
	V_{40}	52.04±13.31	52.70±13.11	0.400
左侧股骨头	V_{20}	29.46±6.06	32.25±8.29	0.009
	V_{30}	10.35±0.99	9.12±0.98	0.000
	V_{40}	1.92±0.80	1.46±0.70	0.162
右侧股骨头	V_{20}	30.15±5.83	31.05±7.16	0.318
	V_{30}	10.24±1.00	9.30±1.28	0.000
	V_{40}	2.12±1.15	1.84±1.13	0.078

2.3 正常组织剂量分布

两种计划在正常组织 V_{20} 和 V_{40} 的受照剂量无统计学意义 ($P>0.05$)。PO 计划在正常组织 V_{30} 的受量上低于 DVO 计划,且差异有统计学差异 ($P=0.005$),但是在正常组织 V_5 和 V_{10} 的受量上却高于 DVO 计划,差异具有统计学差异 ($P=0.000, 0.000$)。详见表 3。

表3 PO计划和DVO计划的患者正常组织剂量比较
($n=20$, %, $\bar{x} \pm s$)

Tab.3 Dosimetric comparison for normal tissues
between PO plan and DVO plan ($n=20$, %, $Mean \pm SD$)

参数	PO 计划	DVO 计划	P 值
V_5	86.47 \pm 2.07	85.76 \pm 1.94	0.000
V_{10}	67.13 \pm 2.43	65.85 \pm 2.44	0.000
V_{20}	49.04 \pm 2.45	49.46 \pm 2.12	0.159
V_{30}	17.32 \pm 1.79	18.01 \pm 2.19	0.005
V_{40}	5.85 \pm 0.67	5.84 \pm 0.74	0.901

2.4 机器跳数和计划效率

PO 计划的机器跳数为 (928.4 \pm 57.9) MU, 相对于 DVO 计划 (1 027.8 \pm 107.1) MU, 机器跳数平均减少了 10.7%, 差异具有统计学意义 ($P=0.000$)。PO 计划治疗时间为 (4.68 \pm 0.28) min, 相对于 DVO 计划 (5.17 \pm 0.53) min, 治疗时间平均减少 10.5%, 差异有统计学意义 ($P=0.000$)。PO 计划优化耗时为 (5.51 \pm 0.55) min, 相对于 DVO 计划 (7.46 \pm 1.35) min, 优化耗时平均缩短 35.4%, 差异有统计学意义 ($P=0.002$)。

2.5 剂量验证

20 例宫颈癌术后两种计划的 gamma 通过率在 3 mm/3% 标准下进行比较。PO 计划的剂量验证通过率为 (98.06 \pm 0.81)%, DVO 计划为 (96.05 \pm 1.09)%, 均达到 95% 以上, 满足临床治疗要求, 但 PO 计划的通过率略高于 DVO 计划, 且差异有统计学意义 ($P=0.002$)。

3 讨论

宫颈癌是常见的妇科肿瘤, 对于术后具有高危因素的患者实行术后辅助放疗可延长无进展生存期和总生存期^[8-12]。宫颈癌术后靶区大, 凹形的靶区结构形状使得 IMRT 成为重要的治疗手段。与常规放疗相比, IMRT 在宫颈癌术后放疗中具有较明显的剂量学优势, 在提高靶体积适形度的同时, 能够有效地降低 OAR 的剂量和受照体积, 降低对子宫旁组织的影响^[13-14]。

IMRT 实施过程中, 治疗计划的精确、高效是实现精准放疗的重要前提。而剂量计算的精度、模型的结构、逆向求解的寻优能力等对放疗计划的质量和效率有着直接的影响。DVO 算法又称两步优化法, 即先进行强度图优化, 然后进行 MLC 叶片序列优化。基于梯度优化的 DVO 算法容易存在局部极限值的问题, 当射野强度分布较为复杂时, 子野个数增多, 照射时间增加, 同时在强度图优化时进行光滑处理会导致生成的计划不是最优计划^[15-18]。而 PO 算法采用全新的三维体素结构模型, 在空间上使用图像的一个单一矩阵来进行采样剂量和剂量体积直方图计算。三维体素模型可以在更大的搜索空间里寻找最优解, 因而有可能得到更好权衡的计划^[19]。同时 PO 算法增加了对靶区平均剂量的约束条件, 并能实时显示二维平面剂量及优化目标条件的实际值。

本研究将 PO 算法应用到宫颈癌术后 IMRT 计划上, 通过与常规的 DVO 算法进行比较, 分析该算法的剂量学特性。研究结果显示 PO 算法和 DVO 算法得到的计划均能满足临床使用要求。PO 算法产生的计划靶区 D_{mean} 更低, 能更好地适形靶区形状, 同时靶区最大剂量低于 DVO 计划。在 OAR 保护上, PO 计划和 DVO 计划各有所侧重。PO 计划膀胱 V_{30} 和左股骨头 V_{20} 低于 DVO 计划, 但是在小肠 V_{15} 、直肠 V_{30} 和左右侧股骨头的 V_{30} 却高于 DVO 计划。PO 计划受到相应剂量照射的正常组织 V_{30} 的受量低于 DVO 计划, 但在正常组织的 V_5 和 V_{10} 的受量上却高于 DVO 计划。两种计划在机器跳数和计划效率上, PO 计划由于机器跳数的减少, 治疗时间也相应减少, 从而有效地提高治疗效率。同时 PO 计划优化耗时的减少和剂量验证通过率的提高有利于提高物理师和剂量师的工作效率。

综上所述, 宫颈癌术后 IMRT 计划设计时, 推荐使用 PO 算法。在满足处方剂量的情况下, PO 算法提高了靶区适形度, 减少了机器跳数, 缩短了计划设计时间和治疗时间, 同时剂量投照更加准确。

【参考文献】

- [1] 周琦, 吴小华, 刘继红, 等. 宫颈癌诊断与治疗指南 (第四版) [J]. 中国实用妇科与产科杂志, 2018, 34(6): 613-621.
ZHOU Q, WU X H, LIU J H, et al. Guidelines for diagnosis and treatment of cervical cancer (4th edition) [J]. Chinese Journal of Practical Gynecology and Obstetrics, 2018, 34(6): 613-621.
- [2] 李鹏程, 冯艺兰, 范子焱, 等. 宫颈癌体外放射治疗技术进展 [J]. 肿瘤预防与治疗, 2016, 29(1): 53-58.
LI P C, FENG Y L, FAN Z X, et al. Advances in extracorporeal radiotherapy for cervical cancer [J]. Journal of Cancer Control and Treatment, 2016, 29(1): 53-58.

- [3] 吴建亭,狄慧,施春明,等. 两种算法在宫颈癌术后调强放疗中的剂量学比较研究[J]. 肿瘤预防与治疗, 2017, 30(1): 39-42.
WU J T, DI H, SHI C M, et al. Dosimetric study of two algorithms in postoperative intensity modulated radiotherapy for cervical carcinoma[J]. Journal of Cancer Control and Treatment, 2017, 30(1): 39-42.
- [4] DENG X, HAN C, CHEN S, et al. Dosimetric benefits of intensity-modulated radiotherapy and volumetric-modulated arc therapy in the treatment of postoperative cervical cancer patients[J]. J Appl Clin Med Phys, 2017, 18(1): 25-31.
- [5] PANG H W, SUN X Y, YANG B, et al. A quality control method for intensity-modulated radiation therapy planning based on generalized equivalent uniform dose[J]. J Appl Clin Med Phys, 2018, 19(3): 276-282.
- [6] 孙小梅,丁丽娟,董丽华,等. 容积旋转调强与固定野调强在晚期宫颈癌放疗的剂量学比较及疗效观察[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2016, 36(7): 509-512.
SUN X M, DING L J, DONG L H, et al. Dosimetry and efficacy between RapidArc and intensity-modulated radiotherapy for locally advanced cervical carcinoma[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2016, 36(7): 509-512.
- [7] FEURET L, NOEL G, MAZERON J J, et al. Conformity index: a review[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2006, 64(2): 333-342.
- [8] 温宏武,黄卫平,刘桐宇,等. 不同辅助治疗方法对 I a- II b 期子宫颈癌术后有危险因素患者预后的影响[J]. 中华妇产科杂志, 2013, 48(12): 920-924.
WEN H W, HUANG W P, LIU T Y, et al. Result of different postoperative adjuvant therapies for stage I b- II a cervical carcinoma with risk factors[J]. Chin J Obstet Gynecol, 2013, 48(12): 920-924.
- [9] ZHENG M, HUANG L, HE L, et al. Evaluation of the effects of type II radical hysterectomy in the treatment of 960 patients with stage I B- II B cervical carcinoma: a retrospective study [J]. J Surg Oncol, 2011, 103(5): 435-441.
- [10] ROGERS L, SIU S S, LUESLEY D, et al. Radiotherapy and chemoradiation after surgery for early cervical cancer[J]. Cochrane Database Syst Rev, 2012, 16(5): CD007583.
- [11] 鞠云鹤,蒋美萍,秦继勇,等. 宫颈癌术后调强放射治疗与常规放射在靶区覆盖及器官保护的剂量学比较[J]. 广东医学, 2015, 36(3): 419-421.
JU Y H, JIANG M P, QIN J Y, et al. Comparison of dosimetry between intensity modulated radiation therapy and conventional radiotherapy in target area coverage and organ protection in patients with cervical cancer Guangdong Medical Journal[J]. Guangdong Medical Journal, 2015, 36(3): 419-421.
- [12] 高晓飞,杜武,梁广立,等. 锥形束CT在评价两种宫颈癌调强放疗中的应用[J]. 中国现代医学杂志, 2017, 27(30): 98-102.
GAO X F, DU W, LIANG G L, et al. Application of cone beam CT in the evaluation of two intensity modulated radiotherapy for cervical cancer[J]. China Journal of Modern Medicine, 2017, 27(30): 98-102.
- [13] 涂剑楠,王新玲,张静雅,等. 早期宫颈癌术后预后与不同放疗方式的疗效及并发症比较[J]. 中国肿瘤临床, 2017, 44(6): 278-282.
TU J N, WANG X L, ZHANG J Y, et al. Prognostic analysis and comparison of different radiotherapy techniques for postoperative early cervical squamous cell carcinoma[J]. Chinese Journal of Clinical Oncology, 2017, 44(6): 278-282.
- [14] 蒋军,李莉,曾晓红,等. 宫颈癌术后适形调强放疗、旋转调强放疗与三维适形放疗的疗效分析[J]. 现代肿瘤医学, 2016, 24(13): 2142-2144.
JIANG J, LI L, ZENG X H, et al. Survival rates and side effects of intensity-modulated radiotherapy, RapidArc or 3-dimensional conformal radiotherapy for postoperative early cervical cancer with high-risk factors[J]. Journal of Modern Oncology, 2016, 24(13): 2142-2144.
- [15] DEASY J O. Multiple local minima in radiotherapy optimization problems with dose-volume constraints[J]. Med Phys, 1997, 24(7): 1157-1161.
- [16] 郭彩萍. 调强放疗计划质量和效率提高的方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
GUO C P. Study of the methods for improving the quality and efficiency of intensity modulated radiotherapy plan [D]. Taiyuan: North University of China, 2018.
- [17] 李楠. 放射治疗计划的自动优化及再优化关键技术研究[D]. 广州: 南方医科大学, 2014.
LI N. Research of re-optimization for adaptive radiotherapy and automated treatment planning [D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2014.
- [18] GUO C P, ZHANG P C, GUI Z G, et al. An efficient method for improving the dose-volume-based optimization plan quality[J]. IEEE Access, 2017, 5: 7520-7531.
- [19] JIANG F, WU H, YUE H, et al. Photon optimizer (PO) prevails over progressive resolution optimizer (PRO) for VMAT planning with or without knowledge-based solution[J]. J Appl Clin Med Phys, 2017, 18(2): 9-14.

(编辑:谭斯允)