

两套商用治疗计划系统中VMAT计划质量及其验证的对比研究

刘良友, 杨涛, 丛小虎, 王小深, 王金媛, 刘梦雯, 徐寿平

解放军总医院放疗科, 北京 100853

【摘要】目的:探讨两套商用治疗计划系统(TPS)用于喉癌与直肠癌患者容积旋转调强放疗(VMAT)的剂量学特性与验证结果差异,为其临床应用提供一定的依据。**方法:**选取喉癌患者10例、直肠癌患者12例,分别利用Eclipse和Pinnacle商用TPS进行VMAT及其验证计划设计,利用ArcCheck实施剂量数据的采集,分析标准为3%/3 mm和2%/2 mm条件下Gamma通过率。从计划质量、实施效率、验证结果等方面评价两套系统执行VMAT技术的差异性。**结果:**计划质量方面:喉癌VMAT计划中,Eclipse在危及器官保护以及计划靶区(PTV)的适形度指数(CI)、均匀性指数(HI)上与Pinnacle相近($P>0.05$),Eclipse的MU要少于Pinnacle,但无统计学差异($P>0.05$);直肠癌VMAT计划中,Eclipse在MU、PTV的CI和HI以及对膀胱、小肠的保护上与Pinnacle相近,在左右股骨头的 V_{40} 上,Eclipse略优于Pinnacle,但无统计学差异($P>0.05$)。剂量验证方面:无论是喉癌还是直肠癌VMAT计划,在分析评价标准3%/3 mm和2%/2 mm条件下,Eclipse的Gamma通过率均高于Pinnacle,且均具有统计学差异($P<0.05$)。**结论:**尽管两套TPS的喉癌和直肠癌VMAT计划质量相近,且剂量验证均能满足临床治疗的要求,但两套计划系统在MU以及剂量验证通过率上存在一定的差异性,仍需选择更多的病例进一步探讨以确定其差异的原因。

【关键词】容积旋转调强放疗;喉癌;直肠癌;计划质量;剂量验证;治疗计划系统

【中图分类号】R312;R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2018)11-1241-05

Comparison on plan quality and dose verification of volumetric modulated arc therapy plans designed by two commercial planning systems

LIU Liangyou, YANG Tao, CONG Xiaohu, WANG Xiaoshen, WANG Jinyuan, LIU Mengwen, XU Shouping

Department of Radiation Oncology, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China

Abstract: Objective To investigate the differences in dosimetric characteristics and dose verification of volumetric modulated arc therapy (VMAT) plans designed by two commercial planning systems for patients with laryngeal and rectal cancers for providing some guidance for the clinical application of treatment planning system. **Methods** VMAT plans and verification plans based on Eclipse and Pinnacle were designed for 10 patients with laryngeal cancer and 12 patients with rectal cancer. ArcCheck system was used for data collection and Gamma passing rates were analyzed with the criteria of 3%/3 mm and 2%/2 mm. The plan quality, delivery efficiency and dose verification were analyzed to discuss the differences between VMAT plans based on two different planning systems. **Results** For patients with laryngeal cancer, the protection of organs-at-risk, the conformity index and homogeneity index of planning target area in VMAT plans based on Eclipse were similar to those in VMAT plans based on Pinnacle ($P>0.05$), but the monitor unit of VMAT plans based on Eclipse was less than that of VMAT plans based on Pinnacle, without statistical differences ($P>0.05$). For patients with rectal cancer, the monitor units, the conformity index and homogeneity index of planning target area were similar between VMAT plans based on Eclipse and VMAT plans based on Pinnacle, so was the protection of bladder and small intestine. However, the V_{40} of femur-L and femur-R in VMAT plans based on Eclipse for rectal cancer were superior to that in VMAT plans based on Pinnacle, without statistical differences ($P>0.05$). Under the criteria of 3%/3 mm and 2%/2 mm, the Gamma passing rates of VMAT plans based on Eclipse were higher than those of VMAT plans based on Pinnacle for laryngeal and rectal cancers, and the differences were statistically significant ($P<0.05$). **Conclusion** Although the plan quality and dose verification of VMAT plans based on Eclipse and Pinnacle can satisfy the requirements of clinical treatment, there is a slight difference in the passing rates of dose verification and monitor units. Further investigations should

【收稿日期】2018-06-11

【基金项目】国家重点研发专项项目(2017YFC0112105);国家自然科学基金青年科学基金(61601012)

【作者简介】刘良友,物理师,研究方向:医学物理,E-mail: 15901113022@163.com

【通信作者】徐寿平,高级工程师,研究方向:肿瘤放射物理与精确放疗,E-mail: shoupingxu@yahoo.com

be conducted in more cases to explore the reasons for the differences.

Keywords: volumetric intensity modulated arc therapy; laryngeal cancer; rectal cancer; plan quality; dose verification; treatment planning system

前言

近年来随着放射治疗技术的进一步发展,容积旋转调强(Volumetric Intensity Modulated Arc Therapy, VMAT)放射治疗技术早已普遍应用于临床治疗^[1]。相对于调强放射治疗^[2],VMAT在治疗过程中机架连续旋转,同时多叶准直器(MLC)、照射剂量率、子野的形状等都是在不断的变化之中,利用一个或者多个旋转照射弧对患者实施治疗的一种照射技术^[3-5],其在满足肿瘤剂量分布要求和降低正常组织受量的同时,也大大提高了治疗效率,缩短了治疗时间。当前有多种不同的商用计划系统可以实现VMAT计划的设计,但由于VMAT技术对治疗机器的要求更加精确^[6-10],同时也就是对治疗的剂量验证提出了更高的要求。目前,VMAT治疗计划的质量保证主要依据是美国物理学家协会(AAPM)第119号报告^[11]。本研究选取解放军总医院放疗科两种不同部位肿瘤的患者病例,均利用Varian Eclipse和Philips Pinnacle两种治疗计划系统(TPS)实施VMAT治疗计划的设计,首先评估两种计划系统下的计划优化质量,然后同时采用ArcCheck系统进行剂量验证,并分析评价两套商用计划系统中特定患者验证通过率的情况。

1 材料与方法

1.1 病例选取

选取解放军总医院放疗科近期临床治疗完成的患者病例共22例,其中喉癌10例、直肠癌12例,所有的治疗计划要求100%的处方剂量覆盖至少95%的靶区体积,同时所有的危及器官必须达到临床标准要求,以满足临床治疗为基本原则。

1.2 CT图像获取及靶区勾画

所有患者采用仰卧位,热塑头颈膜和体膜分别固定,西门子螺旋CT模拟定位,定位图像经网络系统传至医诺医生工作站进行患者器官的勾画,然后分别传输至Varian Eclipse(Ver 10.0.1)和Philips Pinnacle³(Ver 9.10)TPS,由有丰富临床经验的医生进行靶区勾画。靶区勾画原则采用国际辐射单位和剂量委员会(ICRU)第50号和第62号报告的标准:喉癌肿瘤靶区(GTV)为喉部声门上区或声门区肿瘤原发病灶及转移淋巴结;临床靶区(CTV)包括GTV、舌会

厌溪、会厌前间隙、软骨、梨状窝内侧壁、声带及潜在扩散区域和淋巴引流区;计划靶区(PTV)为CTV在各个方向上外扩0.3 cm;危及器官包括脊髓、口腔、两侧腮腺等,处方剂量PTV为60 Gy/30 F。直肠癌GTV为肿瘤原发病灶及转移淋巴结;CTV包括GTV、直肠、直肠系膜区、骶前区、坐骨直肠窝及盆腔区域淋巴结;PTV为CTV在各方向上外扩0.5~1.0 cm;危及器官包括小肠、膀胱、双侧股骨头,处方剂量PTV为50 Gy/25 F。

1.3 计划设计

Eclipse和Pinnacle计划系统采用的是同一套建模数据,使用这两套计划系统对所有的病例进行双弧VMAT治疗计划的设计。Eclipse计划系统机架起始角度是180.1°和179.9°,顺时针和逆时针设计两个完整弧,Eclipse计划系统的优化算法是PRO(Progressive Resolution Optimizer),最终剂量计算算法是AAA(Analytical Anisotropic Algorithm)。Pinnacle计划系统同样采用的是机架起始角度为180.1°和179.9°,顺时针和逆时针设计两个完整弧,Pinnacle计划系统是基于SmartArc优化模块来优化VMAT计划,最终剂量计算采用的算法是CCC(Collapsed Cone Convolution)。两套计划系统中临床上执行参数的计算分辨率分别是2和4 mm,机架角度间隔为2°和4°。计划设计完成后,需要从剂量分布、DVH、治疗照射参数等方面来评估两种VMAT计划的一致性,使其达到相同的要求。

1.4 治疗设备及软件

直线加速器采用Varian Clinac iX加速器实施VMAT计划照射;该设备配备Millennium 120 MLC,中间有宽度为0.5 cm的40对叶片,两侧有宽度1.0 cm的20对叶片;最大移动速度2.5 cm/s;机架最大旋转速度4.8 deg/s;6 MV X射线,标定最大剂量率为600 MU/min。验证工具采用的是美国SunNuclear公司的ArcCheck系统,其有效测量照射野面积为21 cm×21 cm,共有1 386个0.8 mm×0.8 mm的探测器,采集时间间隔为50 ms,模体的水等效建成材料厚度为3.3 cm,探测器有效测量深度是2.9 cm,在中心10 cm×10 cm范围内探测器密度大于230个。该设备独特的圆柱形螺旋设计可以测量任意角度和弧度的剂量,可以提供更加全面的数据信息以完成患者计划的剂量验证,同时该设备可以测量加速器

的机械误差,并分析这些误差产生的原因^[12]。ArcCheck系统剂量验证软件是SNCPatient(Ver 6.7.2)。

1.5 验证和分析

将22例患者共44个计划通过放疗网络系统排程,同时把所有的计划移植到ArcCheck模体中重新进行剂量计算,计算方法采用的是AAA和CCC算法,并将最终的计算结果保存为DICOM RT格式,导入到SNCPatient分析软件中与实际测量得到的结果进行比对分析。采用Gamma方法分析两者之间的差异,Gamma分析标准分别选用的是3%/3 mm和2%/2 mm,本底阈值均采用TH10。

1.6 剂量学评估

通过分析计划的靶区剂量适形度指数(CI)、均匀性指数(HI)、MU和危及器官的剂量分布,分别比较喉癌和直肠癌在不同计划系统下的相同参数条件下VMAT计划的差异性。靶区CI为^[13]: $CI=(TV_{PV})^2/(PV \times TV)$,其中 TV_{PV} 为靶区处方剂量所覆盖的靶区

体积,TV为靶区的总体积,PV为处方剂量所覆盖的总体积。靶区HI为^[14]: $HI=(D_{2\%}-D_{98\%})/D_T$,其中 $D_{2\%}$ 和 $D_{98\%}$ 分别是2%和98%的靶区体积所受到的照射剂量, D_T 为处方剂量。CI值介于0~1之间,越接近1表示靶区的适形度越好;HI值越接近于0表示靶区的均匀性越好。喉癌的危及器官评价脊髓 D_{max} 、口腔 V_{40} 、左右侧腮腺 D_{mean} ;直肠癌中危及器官评价膀胱 V_{40} 、左右侧股骨头 V_{40} 、小肠 V_{30} 和 V_{40} 。

1.7 统计学方法

采用SPSS 18.0统计软件分析,配对 t 检验比较两组数据,数据结果用均数±标准差表示, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

本研究所有治疗计划的结果都满足计划设计的临床要求,统计分析结果如表1~2所示,其中剂量单位为cGy,相对体积为百分比(%)。

表1 喉癌计划剂量学参数比较($\bar{x} \pm s$)

Tab.1 Comparison of dosimetric parameters in laryngeal cancer plans (Mean±SD)

System	Spinal cord	Oral cavity	Parotid gland-L	Parotid gland-R	PTV		MU
	D_{max}/cGy	$V_{40}/\%$	D_{mean}/cGy	D_{mean}/cGy	HI	CI	
Eclipse	4 301.2±104.1	9.5±7.3	2 491.7±498.8	2 461.4±699.9	0.086±0.010	0.871±0.021	572.0±127.9
Pinnacle	4 260.9±125.3	10.5±8.5	2 555.5±385.9	2 500.7±651.1	0.080±0.020	0.874±0.027	700.1±101.7
P value	0.341	0.709	0.415	0.598	0.280	0.662	0.061

PTV: Planning target volume; HI: Homogeneity index; CI: Conformity index; MU: Monitor unit

表2 直肠癌计划剂量学参数比较($\bar{x} \pm s$)

Fig.2 Comparison of dosimetric parameters in rectal cancer plans (Mean±SD)

System	Bladder	Femur-L	Femur-R	Intestine		PTV		MU
	$V_{40}/\%$	$V_{40}/\%$	$V_{40}/\%$	$V_{30}/\%$	$V_{40}/\%$	HI	CI	
Eclipse	37.9±4.0	0.6±1.2	0.8±1.5	34.8±12.1	20.4±9.4	0.079±0.120	0.915±0.017	606.0±119.1
Pinnacle	37.5±2.1	0.9±1.5	1.2±1.8	35.9±11.0	20.5±8.7	0.069±0.135	0.912±0.026	590.5±49.0
P value	0.745	0.073	0.082	0.376	0.984	0.052	0.634	0.718

2.1 喉癌计划质量比较

2.1.1 靶区剂量学参数分析 如表1所示,相比于Eclipse计划系统,PTV HI在Pinnacle计划系统中均匀性稍好,但没有明显的统计学差异($P>0.05$);PTV CI在Pinnacle计划系统中适形度稍好,但同样没有明显的统计学差异($P>0.05$);MU在Eclipse计划系统下数量明显较少,计划实施效率较高,但是仍然不存在统计学差异($P>0.05$)。

2.1.2 危及器官剂量学参数分析 如表1所示,相比于Eclipse计划系统,Pinnacle计划系统对脊髓 D_{max} 的保护略好,但不存在统计学差异($P>0.05$);Eclipse计划系统在口腔 V_{40} 、左右腮腺 D_{mean} 保护上略占优势,均不存在统计学差异($P>0.05$)。

2.1.3 计划剂量验证分析 喉癌在Eclipse计划系统中选用3%/3mm和2%/2 mm的Gamma分析标准时的验证通过率分别为(98.9±0.8)%和(94.4±2.4)%,而

Pinnacle计划系统分别为 $(94.6 \pm 2.3)\%$ 和 $(83.2 \pm 5.4)\%$,从结果可以看出Eclipse计划系统Gamma通过率明显较高($P=0.000$),均存在明显统计学差异($P<0.01$)。且Pinnacle系统中患者计划2%/2 mm的剂量验证结果中 γ 通过率明显低于90%。

2.2 直肠癌计划质量比较

2.2.1 靶区剂量学参数分析 如表2所示,相比于Eclipse计划系统,PTV HI在Pinnacle计划系统中均匀性稍好,但没有明显的统计学差异($P>0.05$);相比于Pinnacle计划系统,PTV CI在Eclipse计划系统中适形度稍好,但同样没有明显的统计学差异($P>0.05$);MU在Pinnacle计划系统下数量较少,计划实施效率相对较高,但是仍然不存在统计学差异($P>0.05$)。

2.2.2 危及器官剂量学参数分析 如表2所示,膀胱 V_{40} 在Eclipse和Pinnacle两种计划系统中的受量几乎无差异,不存在统计学差异($P>0.05$);相对于Pinnacle计划系统,Eclipse计划系统对股骨头左、右侧 V_{40} 的保护更好,同样不存在统计学差异($P>0.05$);小肠 V_{30} 、 V_{40} 在两种计划系统中的受量基本无差异($P>0.05$)。

2.2.3 计划剂量验证分析 直肠癌在Eclipse计划系统中选用3%/3 mm和2%/2 mm的Gamma分析标准时的验证通过率分别为 $(99.4 \pm 0.6)\%$ 和 $(95.6 \pm 2.6)\%$,在Pinnacle计划系统分别为 $(98.3 \pm 0.9)\%$ 和 $(91.4 \pm 3.1)\%$,从结果中可以看出Eclipse计划系统Gamma通过率明显较高,均存在明显统计学差异($P<0.01$),且均大于90%通过率。

3 讨论

无论是Eclipse还是Pinnacle计划系统,对于喉癌与直肠癌的VMAT计划,都可以达到较好的靶区适形度和剂量分布均匀性,同时都可以在满足靶区剂量的前提下有效地保护正常器官。从统计分析的结果可以看出,在保证两套计划系统的VMAT计划不存在明显差异的情况下,剂量验证的结果却存在较为明显的差异性。尽管计划质量不存在统计学上的差异,但是比较Eclipse和Pinnacle计划的MU,两者之间仍然存在一定的差异。喉癌的Pinnacle计划系统的MU要比Eclipse计划系统要高一些,但是在直肠癌计划中,两者的MU差异几乎没有。Clemente等^[15]对于同一治疗计划利用不同的加速器参数设计VMAT计划,可以发现在计划质量没有统计学差异的情况下Varian比Elekta加速器的VMAT计划MU更多。但是本研究是基于相同的加速器不同计划系统下的VMAT计划,可见喉癌中MU也存在一定的差异性。

两套计划系统采用的优化算法不同,Eclipse计

划系统计划优化方法采用的是PRO算法,优化过程分为4个多分辨率的水平。在4个水平内所有控制点被同时优化,只有剂量计算分辨率从第一到第四个水平被逐步细化,并且根据设置的剂量直接优化MLC的运动、机架旋转速度和剂量率形成所优化的剂量分布。Pinnacle计划系统优化基于SmartArc优化模块实现,采用的是Bzdusek等^[16]提出的优化算法,前期的优化先将整个弧粗略地均分成每24°的控制间隔,形成最初的射野强度分布;然后将得到的通量图转化成子野,所有的子野被滤过后按整个弧重新分布,经过插值得到设定的控制间隔;形成的子野通过优化来满足剂量-体积的目标值和叶片运动、剂量率以及机架速度的约束;再根据子野权重优化执行最终的剂量计算,从而得到VMAT治疗计划^[17]。优化的目标函数是利用物理剂量和EUD方式定义。由于计划系统的不同,所形成的子野也会存在差异,相对于Eclipse而言,Pinnacle计划系统在子野优化的过程中更容易生成不规则的窄长条状子野,Varian加速器通量优化的过程中会产生较小的子野。因此,在相对较为复杂的靶区中,子野的数目多且形状不规则不但会导致MU增加,同时会影响计划的实施效率,对计划的剂量验证也会产生一定程度的影响。喉癌相对于直肠癌较为复杂,在实际的计划设计中Pinnacle计划系统可以根据靶区自动优化初始铅门大小从而最大化MLC射野的面积,射野面积越大对MU的利用率也就越高。对于Eclipse计划系统,由于其更多地考虑加速器机械参数的因素,可能会对小子野的优化无法达到极限;而Pinnacle系统对小子野的优化可以达到一个非常小的面积,但因小面积子野存在侧向电子失衡,计划系统很难精确计算这种情况下的剂量,同时由于MLC的凹凸槽效应会导致数量较多的小子野产生更多的漏射线可能,但准直器输出因子很难处理这种MU数量很少的子野,因此小子野数目越多产生的剂量偏差也许会越大。

另外剂量计算算法也不相同,Pinnacle系统最终剂量计算算法是CCC算法,Eclipse系统最终剂量计算算法是AAA算法。Hasenbalg等^[18]研究发现CCC算法在剂量计算精确性等方面要优于AAA算法。同样有研究表明在剂量分布中出现剂量波动较大的点,并不会对通过率产生一定的影响,并且当计算网格减小时则会出现较多的剂量波动较小的点,这时反而有可能会提高通过率。相比于Pinnacle,Eclipse计划系统不会出现噪声,而噪声则是有可能引起通过率偏低的原因。在计算分辨率方面有研究表明Gamma通过率的均值会随着计算分辨率的增大而减

小,同时Gamma通过率的标准差随着计算分辨率的增大而明显增大,反映出当计算分辨率相比于测量数据的分辨率过大时会影响Gamma通过率的准确性。而在本研究的两套计划系统中,Pinnacle计划系统的计算分辨率相对较大。

Mu等^[19]研究发现叶片的序列文件在经过网络传输至加速器计算机的过程中有可能会发生数据丢失,在验证实施的过程中可能会因为叶片位置的随机性偏差引起剂量的偏差,偏差的大小与计划设计的复杂程度正相关。而在本研究中喉癌计划相对直肠癌更为复杂,在整体通过率上也是相对较低。

最后,机架角度间隔同样也可能是导致通过率存在差异的原因之一,本研究中Eclipse与Pinnacle计划系统分别采用的是2°和4°的机架角度间隔,因此两套计划系统的控制点分别是178和91个。控制点越多计划设计时间也会增加,治疗时间同样也会增加。Abdellatif等^[20]研究发现控制点的数量越多, γ 分析通过率的结果也会有所提高。

4 结 论

两套TPS优化出的VMAT计划质量及剂量验证结果均能满足临床治疗的要求,其验证通过率也均超过90%,但其Gamma通过率的差异在临床应用中应当引起一定的重视。而其影响两套计划系统通过率存在差异的原因很多,诸如上述笔者分析到的剂量计算算法、优化算法、MU利用率、多种不规则子野的利用率、噪声、计算分辨率、控制点的数量和叶片位置随机性偏差等多种因素。当然,两者之间存在差异性的原因可能还有很多,笔者未来仍需更多的病例进一步探讨分析不同商业计划系统之间验证通过率差异的可能。

【参考文献】

- [1] OTTO K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc[J]. Med Phys, 2008, 35(1): 310-317.
- [2] YU C X. Intensity-modulated arc therapy with dynamic multileaf collimation: an alternative tomotherapy[J]. Phys Med Biol, 1995, 40(9): 1435-1449.
- [3] BEDFORD J L. Treatment planning for volumetric modulated arc therapy[J]. Med Phys, 2009, 36(11): 5128-5138.
- [4] YU C X, GRACE T. Intensity-modulated arc therapy: principles, technologies and clinical implementation[J]. Phys Med Biol, 2011, 56(5): R31-R54.
- [5] WIM D, WERNER D G, KOEN V, et al. Whole abdominopelvic radiotherapy (WAPRT) using intensity-modulated arc therapy (IMAT): first clinical experience[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2003, 57(4): 1019-1032.
- [6] RAO M, YANG W. Comparison of Elekta VMAT with helical tomotherapy and fixed field IMRT: plan quality, delivery efficiency and accuracy[J]. Med Phys, 2010, 37(3): 1350-1359.
- [7] BERTELSEN A, HANSEN C R, JOHANSEN J, et al. Single arc volumetric modulated arc therapy of head and neck cancer[J]. Radiother Oncol, 2010, 95(2): 142-148.
- [8] SHAFFER R, NICHOL A M, VOLLANS E. A comparison of volumetric modulated arc therapy and conventional intensity-modulated radiotherapy for frontal and temporal high-grade gliomas[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2010, 76(4): 1177-1184.
- [9] JOHNSTON M, CLIFFORD S, BROMLEY R, et al. Volumetric-modulated arc therapy in head and neck radiotherapy: a planning comparison using simultaneous integrated boost for nasopharynx and oropharynx carcinoma[J]. Clin Oncol, 2011, 23(8): 503-511.
- [10] EUGENIO V, ALESSANDRO C, GIORGIA N, et al. Volumetric modulated arc radiotherapy for carcinomas of the oro-pharynx, hypopharynx and larynx: a treatment planning comparison with fixed field IMRT[J]. Radiother Oncol, 2009, 92(1): 111-117.
- [11] EZZE U, BUMEISTER, DOGAN N, et al. IMRT commissioning: multiple institution planning and dosimetry comparisons, a report from AAPM Task Group 119[J]. Med Phys, 2009, 36(11): 5359-5373.
- [12] LETOUMEAU D, PUBLICOVER J, KOZELKA J, et al. Novel dosimetric phantom for quality assurance of volumetric modulated arc therapy[J]. Med Phys, 2009, 36(5): 1813-1820.
- [13] FEUVRET L, NOËL G, MAZERON J J, et al. Conformity index: a review[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2006, 64(2): 333-342.
- [14] HODAPP N. The ICRU Report 83: prescribing, recording and reporting photon-beam intensity-modulated radiation therapy (IMRT)[J]. Strahlenther Onkol, 2012, 188(1): 97-99.
- [15] CLEMENTE S, COZZOLINO M, OLIVIERO C, et al. Impact of machines on plan quality: volumetric modulated arc therapy and intensity modulated radiation therapy[J]. Clin Transl Oncol, 2013, 16(2): 141-146.
- [16] BZDUSEK K, FRIBERGER H K. Development and evaluation of an efficient approach to volumetric arc therapy planning[J]. Med Phys, 2009, 36(6): 2328-2339.
- [17] 杨涛,徐伟,徐寿平,等. 两套TPS之间VMAT计划优化质量评价研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2017, 26(10): 1192-1198.
- [18] YANG T, XU W, XU S P, et al. Evaluation of plan quality between two treatment planning systems for volumetric modulated arc therapy[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2017, 26(10): 1192-1198.
- [19] HASENBALG F, NEUENSCHWANDER H, MINI R, et al. Collapsed cone convolution and analytical anisotropic algorithm dose calculations compared to VMC++ Monte Carlo simulations in clinical cases[J]. Phys Med Biol, 2007, 52(13): 3679-3691.
- [20] MU G, LUDLUM E, XIN P. Impact of MLC leaf position errors on simple and complex IMRT plans for head and neck cancer[J]. Phys Med Biol, 2008, 53(1): 77-88.
- [21] ABDELLATIF A, GAEDE S. Control point analysis comparison for 3 different treatment planning and delivery complexity levels using a commercial 3-dimensional diode array[J]. Med Dosim, 2014, 39(2): 174-179.

(编辑:陈丽霞)