

基于 smart LMC 算法的动态调强技术在舌癌术后放疗中的剂量学研究

岳堃^{1,2}, 姚原¹, 贾晓斌¹, 董晓庆³, 袁峥奎¹

1. 上海交通大学医学院附属第九人民医院放疗科, 上海 201900; 2. 上海大学通信与信息工程学院, 上海 200444; 3. 同济大学附属第十人民医院放疗科, 上海 200072

【摘要】目的:探讨 Varian 速锋刀 EDGE 上, 动态调强放疗 (Sliding Window, SW)、静态调强放疗 (Step-and-Shoot, SS) 与基于 smart LMC 算法的新动态调强放疗 (SW-smart) 3 种技术在舌癌术后放疗中的剂量学差异及适用性。**方法:**选取 26 例舌癌 (分期为 $T_{2-3}N_{1-2}M_0$) 术后的病人, 在 13.6 版本的 Eclipse 上进行 SS、SW、SW-smart 计划设计, 对 3 种计划的靶区和危及器官剂量分布进行比较和统计学分析, 包括靶区的近似最小剂量 $D_{98\%}$, 近似最大剂量 $D_{2\%}$, 中位剂量 $D_{50\%}$, 均匀性指数及适形度指数以及正常组织脊髓、脑干的最高剂量, 喉的平均剂量及 50 Gy 剂量线包绕的体积, 左右腮腺平均剂量及 30 Gy 剂量线包绕的体积, 咽缩肌和唇的平均剂量。记录比较 3 种计划的机器跳数和治疗时间。**结果:**SW、SW-smart 的 PTV 的 $D_{50\%}$ 、适形度和均匀性指数均优于 SS, 结果具有统计学意义, SW-smart 略优于 SW, 却没有统计学意义; SW-smart 的 $D_{2\%}$ 最低, SW 次之, SS 的 $D_{2\%}$ 最高, 对热点的控制最差, 三者之间均有统计学差异。在正常组织保护上, SW 与 SS 之间没有统计学差异, 仅 SW-smart 具有统计学意义上的优势; 喉的 V_{50} 及左右腮腺的 V_{30} , 3 种计划优化结果相互之间均不存在统计学差异。SS 的跳数最少, 治疗用时最长, SW-smart 和 SW 没有明显差异。**结论:**基于 Varian 速锋刀和新版本 Eclipse 中 smart LMC 算法的动态调强技术, 与传统静态及动态调强相比, 可提供更好的靶区剂量分布和正常组织保护, 在舌癌术后放疗计划的优化上具有明显的优势。

【关键词】舌癌; smart LMC; 动态调强; 静态调强; 速锋刀; 术后放疗

【中图分类号】R815.6

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2019)11-1255-06

Dosimetric study on dynamic IMRT technology based on smart LMC in postoperative radiotherapy for tongue cancer

YUE Kun^{1,2}, YAO Yuan¹, JIA Xiaobin¹, DONG Xiaoqing³, YUAN Zhengxi¹

1. Department of Radiotherapy, the Ninth People's Hospital Affiliated to Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 201900, China; 2. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 3. Department of Radiotherapy, the Tenth People's Hospital of Tongji University, Shanghai 200072, China

Abstract: Objective To investigate dosimetric differences and applicability of different Varian EDGE-based intensity-modulated radiotherapy (IMRT), namely sliding window IMRT (SW), step-and-shoot IMRT (SS) and the novel dynamic IMRT based on smart leaf motion calculator (SW-smart), in the postoperative radiotherapy for tongue cancer. **Methods** Twenty-six postoperative patients with tongue cancer (stage of $T_{2-3}N_{1-2}M_0$) were enrolled in the study. The plans of SS, SW and SW-smart were designed on Eclipse (version 13.6). The dose distribution of target areas and organs-at-risk among 3 plans were compared and statistically analyzed, and the comparison parameters includes the $D_{98\%}$, $D_{2\%}$, $D_{50\%}$, homogeneity index and conformity index of target areas and the D_{max} of spinal cord and brainstem, the D_{mean} of larynx, parotid-L, parotid-R, pharyngeal constrictors and lip, the V_{50} of larynx and the V_{30} of parotid-L and parotid-R. The monitor units and delivery time of 3 plans were also recorded and compared. **Results** The $D_{50\%}$, conformity index and homogeneity index of planning target volume in SW and SW-smart were superior to those in SS, and the results were statistically significant. SW-smart was slightly better than SW, but there was no statistical significance.

【收稿日期】2019-06-18

【基金项目】国家自然科学基金 (11575108)

【作者简介】岳堃, 硕士, 博士在读, 主管工程师, 放射物理师, 研究方向: 医学物理学, E-mail: yuekunrt@163.com

【通信作者】姚原, 博士, 主任医师, 研究方向: 放射肿瘤学和放射生物学, E-mail: yao95yuan@163.com

SW-smart had the lowest $D_{2\%}$ of target areas, followed by SW and SS which had the worst capability to control high dose, and there were significant differences among 3 groups. SW-smart had statistical advantages over SW and SS in normal tissue sparing, and no statistical difference was found in normal tissue sparing between SW and SS. The V_{50} of larynx and the V_{30} of parotid-L and parotid-R were similar in 3 plans, without statistical differences. SS had the fewest monitor units and the longest delivery time, and there was no significant difference in monitor units and delivery time between SW-smart and SW. **Conclusion** Compared with the traditional static and dynamic IMRT, the novel dynamic IMRT technique based on Varian EDGE and smart LMC of new version of Eclipse can provide better target dose distribution and normal tissue sparing, having obvious advantages in postoperative radiotherapy for tongue cancer.

Keywords: tongue cancer; smart leaf motion calculator; dynamic intensity-modulated radiotherapy; step-and-shoot intensity-modulated radiotherapy; EDGE; postoperative radiotherapy

前言

全球肿瘤发病率和死亡率呈快速上升趋势,肿瘤的放射治疗是肿瘤治疗的手段之一,目前肿瘤的调强放射治疗技术为主流技术^[1]。随着物理及计算机技术的发展,多叶准直器(Multileaf Collimator, MLC)技术日趋完善,使得调强放疗(IMRT)在肿瘤临床放射治疗中得到越来越广泛的应用^[2-7]。在IMRT治疗中,射线强度的调制是借助MLC叶片的运动来实现剂量的不均匀分布。根据叶片运动方式和出束关系的不同,通常以两种模式来实现:静态调强^[8-10]和动态调强^[11-14]。在静态调强方法中,不同调制强度的子野按照特定的顺序以“步进”的方式进出束,即叶片在运动的过程中加速器处于停止出束的状态,叶片运动到达各自指定位置并保持静止后才开始出束。而在动态调强中,叶片以不断变化的速度始终保持运动,且在整个叶片运动过程中,加速器均处于出束状态。在Varian自主研发的治疗计划系统Eclipse中,这两种调强方式可通过静态调强放疗(Step-and-Shoot, SS)和动态调强放疗(Sliding Window, SW)技术分别实现。

在前期的研究中,国内外学者比较了两种优化方式在鼻咽癌、前列腺癌及乳腺癌等病例中的剂量学差异,发现采用SW技术具有较好的靶区剂量分布,而SS模式对正常组织的保护则略优于SW^[15-16]。在SS技术下,优化结果也会受到强度级数的影响。Budgell^[17]研究表明SS模式下,强度级数为15~25,足以满足计划需求。Keller-Reichenbecher等^[18]报道,普通的调强计划,强度级数只需等级5即可。葛宁等^[19]对不同强度级数SS及SW在治疗效率、靶区和危及器官的剂量学参数进行比较,建议强度级数10的SS模式进行鼻咽癌放射治疗。Chui等^[15]研究发现,SS强度级数为10时,就能得出具有与SW相当的计算结果;强度级数增至20以上,优化结果也几乎没有获益。对一些非复杂计划,使用强度级数5即可完成。

13.6版本的Eclipse治疗计划系统(TPS)中,对

SW技术采用一种新的叶片运动优化算法smart LMC (smart Leaf Motion Calculator),配合高精度多叶准直器(High-Definition Multileaf Collimator, HD-MLC; 120叶准直器,总宽度22 cm,中心32对叶片宽度0.25 cm,两边各14对叶片宽度0.50 cm)的速锋刀(EDGE),使得调强计划具有更为优化的剂量分布。本文旨在探讨装配了全新软硬件设施的速锋刀上不同调强技术的剂量学比较。

1 材料与方法

1.1 病例选择

结合上海交通大学医学院附属第九人民医院头颈肿瘤外科的特色,选取26例舌癌(分期为 $T_{2-3}N_{1-2}M_0$)术后的病例,其中男16例,女10例,年龄45~68岁,中位年龄55岁。由于速锋刀的叶片总宽度仅为22 cm,在兼顾计划复杂性的同时,选取病人的靶区头脚方向长度均小于20 cm。

1.2 CT定位和靶区勾画

根据患者手术前后的临床检查、CT/MRI等影像学资料、病理及ICRU 83号报告靶区定义原则,在扫描层厚为2.5 mm的定位CT上由同一位副主任医师进行靶区和正常组织的勾画。高危亚临床靶区(术前瘤体边缘3D方向加1.0~1.5 cm,若原发灶不明或外放后未包术床时则需将术床作为靶区)及高危淋巴结区(转移淋巴区及其下一站淋巴区)给予60 Gy/30 F的照射剂量;对侧颈部低危预防区(如pN1即需包括对侧II-IV区淋巴结)给予54 Gy/30 F的剂量照射^[17]。

1.3 计划制定

对26例病例分别制定3个调强计划,每个计划采用6 MV的X线以九野均分的方式进行照射。在计划优化时分别选择SW和SS两种方式进行,其中SS优化时,结合前人研究结果,强度级数选择默认等级10。EDGE作为TrueBeam系列的高端机型,结合新版本Eclipse中的smart LMC算法,可在软硬件上支持一种新

的技术—铅门跟随(Jaw Tracking),因此第 3 个计划基于 smart LMC 算法的新动态调强放疗(SW-smart)即采用 smart LMC 算法,运用 Jaw Tracking 技术的 SW 优化方式。

1.4 计划评估

将计划归一为 60 Gy 处方剂量覆盖 95% 的 PTV60 体积,参考 ICRU 83 号报告,分别对 3 个计划进行剂量学的分析与评估。

1.4.1 靶区评估 在评估靶区时,主要评估靶区的以下几项参数:近似最小剂量 $D_{98\%}$,近似最大剂量 $D_{2\%}$,中位剂量 $D_{50\%}$,均匀性指数(HI)及适形度指数(CI)。 $HI=(D_{2\%}-D_{98\%})/D_{50\%}$, $CI=V_{T,ref}/V_T \times V_{T,ref}/V_{ref}$,其中 $D_{2\%}$ 、 $D_{98\%}$ 、 $D_{50\%}$ 分别表示 2%、98% 和 50% PTV 所受的照射剂量; $V_{T,ref}$ 为参考等剂量线包绕的靶区体积, V_T 为靶区体积, V_{ref} 为全身接受处方剂量的体积。HI 值越接近 0,靶区均匀性越好;CI 值小于等于 1,越接近 1,靶区适形度越高。考虑到 PTV60 的影响,PTV54 的 CI 值此处不作评估。

1.4.2 危及器官评估 脊髓和脑干的最高剂量(D_{max}),喉的平均剂量(D_{mean})及 50 Gy 剂量线包绕的体积 V_{50} ,左右腮腺 D_{mean} 及 30 Gy 剂量线包绕的体积 V_{30} ,咽缩肌及唇 D_{mean} 。

1.5 机器跳数及治疗时间的测量

分别记录所有病人 3 种计划的平均机器跳数和治疗时间(不包括摆位时间,从第一个野出束开始至最后一个野出束完成所需的时间),比较不同计划的临床实施效率。

1.6 统计学分析

用 SPSS 软件对优化数据进行统计学处理。每个病例的 3 种优化结果均采用均数±标准差表示,均值比较采用单因素方差分析(one-way ANOVA)。组间的两两比较选用 LSD-*t* 检验, $P<0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 靶区评估

3 种不同技术优化结果中,靶区的剂量学评估比较及统计学分析结果如表 1 和表 2 所示。由结果可以看出,3 种算法的靶区评估比较对于高危靶区和预防靶区,体现出相同的规律:(1)与 SS 相比,SW 可有效控制靶区的高量,且运用 Jaw Tracking 技术 SW-smart 靶区 $D_{2\%}$ 最低,高量控制最好;3 种算法结果之间的比较均具有统计学意义。(2)对靶区近似最小剂量 $D_{98\%}$ 的评估,3 种算法之间不存在统计学差异。(3)动态调强技术在降低中位剂量 $D_{50\%}$ 、提高靶区 HI 及 CI 方面体现出明显的优越性。SW 与 SW-smart 的靶区 $D_{50\%}$

均小于 SS(更接近处方剂量),CI 值均高于 SS(更接近 1),HI 值均小于 SS(更接近 0),结果均具有统计学意义;SW-smart 这 3 项参数指标略优于 SW,但二者之间的比较没有统计学意义。

表 1 不同计划的靶区评估比较($\bar{x} \pm s$)
Tab.1 Comparison of target evaluations among different treatment plans (Mean±SD)

结构	参数	SW-smart	SS	SW
PTV60	$D_{2\%}/cGy$	6 278.89±43.87	6 402.45±47.93	6 334.30±49.56
	$D_{98\%}/cGy$	5 942.69±23.18	5 932.09±22.72	5 935.75±21.79
	$D_{50\%}/cGy$	6 157.04±25.34	6 197.23±34.57	6 170.17±36.49
	CI	0.91±0.03	0.85±0.08	0.89±0.04
	HI	0.06±0.01	0.07±0.01	0.06±0.01
PTV54	$D_{2\%}/cGy$	5 647.25±44.85	5 745.21±56.00	5 679.80±56.32
	$D_{98\%}/cGy$	5 411.71±44.47	5 389.19±47.29	5 403.58±41.82
	$D_{50\%}/cGy$	5 554.47±39.62	5 594.79±39.65	5 571.02±40.18
	HI	0.04±0.01	0.07±0.01	0.05±0.01

2.2 危及器官评估

各危及器官的剂量学评估比较及统计学分析结果如表 3 和表 4 所示。对于所有危及器官的计算结果,均是 SW-smart 最优,SS 次之,SW 计划对正常组织的保护最差。但是统计学分析表明,SW 与 SS 之间的比较没有统计学意义,仅 SW-smart 与其余两项技术相比,在正常组织的保护上具有统计学意义上的优势。同时,对于评估剂量体积的参数,如喉的 V_{50} 及左右腮腺的 V_{30} ,3 种计划的优化结果之间均不存在统计学意义。

2.3 机器跳数及治疗时间的比较

3 种计划的平均跳数及治疗时间如表 5 所示。在这 3 种计划中,SS 的跳数最少,SW-smart 和 SW 之间没有明显差异。SS 的治疗时间则是三者当中最长的,SW-smart 和 SW 之间同样没有明显差异,二者治疗用时比 SS 节省约 22%。

3 讨论

本文对舌癌病例不同优化方法的比较研究,结果显示在新机型 EDGE 上,无论是传统的 SW 技术还是结合新算法的 SW-smart 技术与强度级数为 10 的 SS 模式比较,靶区剂量分布具有统计学优势^[20]。固定野动态调强能更好地控制靶区高量,且有更优的靶区适形度、均匀性及更接近处方的中位剂量。如

表 2 靶区各评估参数统计学分析
Tab.2 Statistical analysis on evaluation parameters of target areas

结构	参数	P 值	LSD		
			参考组	比较组	P 值
PTV60	D _{2%}	0.000	SW-smart	SS	0.000
			SW-smart	SW	0.000
			SW	SS	0.000
	D _{98%}	0.234	SW-smart	SS	0.095
			SW-smart	SW	0.271
			SW	SS	0.560
	D _{50%}	0.000	SW-smart	SS	0.000
			SW-smart	SW	0.149
			SW	SS	0.004
	CI	0.001	SW-smart	SS	0.000
			SW-smart	SW	0.219
			SW	SS	0.012
	HI	0.000	SW-smart	SS	0.000
			SW-smart	SW	0.171
			SW	SS	0.002
PTV54	D _{2%}	0.000	SW-smart	SS	0.000
			SW-smart	SW	0.029
			SW	SS	0.000
	D _{98%}	0.189	SW-smart	SS	0.073
			SW-smart	SW	0.513
			SW	SS	0.248
	D _{50%}	0.002	SW-smart	SS	0.000
			SW-smart	SW	0.138
			SW	SS	0.035
	HI	0.000	SW-smart	SS	0.000
			SW-smart	SW	0.250
			SW	SS	0.000

前面为单因素方差分析的 P 值;后面为组间的两两比较 LSD-t 检验的 P 值

图 1 所示,SS 和 SW 的不同优化方法导致上述的结果。图 1 中实线表示剂量强度曲线,左右点线分别表示一对叶片(leading leaf & trailing leaf)的运动路径。SS 的优化方式是步进式的,其剂量强度曲线是离散的,而 SW 方式是在叶片运动的过程中不断出束,剂量强度曲线的变化是连续的。与 SS 阶梯状的剂量强度相比,SW 的分布曲线更加圆滑,这也使得 SW 方法的优化结果更加接近最终实际的剂量分布。

表 3 危及器官各评估参数统计学分析
Tab.3 Statistical analysis on evaluation parameters of organs-at-risk

结构	参数	P 值	LSD		
			参考组	比较组	P 值
脊髓	D _{max}	0.000	SW-smart	SS	0.002
			SW-smart	SW	0.000
			SW	SS	0.290
脑干	D _{max}	0.002	SW-smart	SS	0.015
			SW-smart	SW	0.001
			SW	SS	0.275
喉	D _{mean}	0.002	SW-smart	SS	0.021
			SW-smart	SW	0.000
			SW	SS	0.189
	V ₃₀	0.332	SW-smart	SS	0.324
			SW-smart	SW	0.147
			SW	SS	0.638
左侧腮腺	D _{mean}	0.000	SW-smart	SS	0.000
			SW-smart	SW	0.000
			SW	SS	0.353
	V ₃₀	0.609	SW-smart	SS	0.485
			SW-smart	SW	0.337
			SW	SS	0.793
右侧腮腺	D _{mean}	0.000	SW-smart	SS	0.000
			SW-smart	SW	0.000
			SW	SS	0.783
	V ₃₀	0.500	SW-smart	SS	0.447
			SW-smart	SW	0.248
			SW	SS	0.690
咽缩肌	D _{mean}	0.011	SW-smart	SS	0.016
			SW-smart	SW	0.006
			SW	SS	0.713
唇	D _{mean}	0.000	SW-smart	SS	0.000
			SW-smart	SW	0.000
			SW	SS	0.225

对危及器官受量的分析比较可知,SS 和 SW 对于正常组织的保护没有统计学上的差异。Eclipse 的 SW 方法是叶片对按照从左往右的固定方向运动,开始出束时叶片对位于靶区的左边界。靶区需接受大剂量照射的部分,叶片对是开放的,且处在靶区内部。需低剂量照射的部分,叶片对会在治疗开始时,

表 4 不同计划的危及器官评估比较($\bar{x} \pm s$)

Tab.4 Comparison of organs-at-risk evaluation among different treatment plans (Mean±SD)

结构	参数	SW-smart	SS	SW
脊髓	D _{max} /cGy	3 488.01±90.22	3 568.03±100.98	3 595.07±82.24
脑干	D _{max} /cGy	3 281.28±142.37	3 376.63±132.88	3 418.78±139.07
喉	D _{mean} /cGy	2 965.52±72.61	3 013.20±70.56	3 040.03±75.67
	V ₅₀ /cc	1.56±0.70	1.76±0.72	1.85±0.72
左侧腮腺	D _{mean} /cGy	2 274.49±44.51	2 329.50±57.43	2 343.45±58.41
	V ₃₀ /cc	27.51±5.43	28.55±5.33	28.94±5.32
右侧腮腺	D _{mean} /cGy	2 276.70±34.26	2 355.70±50.33	2 359.25±52.25
	V ₃₀ /cc	26.10±5.43	27.25±5.51	27.85±5.23
咽缩肌	D _{mean} /cGy	3 989.07±124.99	4 075.99±127.76	4 089.01±128.06
唇	D _{mean} /cGy	1 401.67±21.71	1 428.11±21.34	1 435.36±21.13

表 5 不同技术机器跳数及治疗时间比较

Tab.5 Comparison of delivery time and monitor units among different technologies

优化技术	机器跳数/MU	时间/s
SW-smart	1 462.6±159.8	250.7±40.0
SS	1 247.7±122.2	324.2±54.3
SW	1 480.5±150.2	252.1±42.1

在左侧准直器后面停留一段时间,之后这些叶片对在安全的情况下开始以最快的速度向右移动。当出束结束时,所有的叶片对都将停留在靶区的右边界。而在出束过程中,每对叶片中至少有一根叶片在以最大速度运动(值得注意的是,此处的最大速度和每对叶片起始及终止位置及强度分布的复杂度有关,因此每对叶片有独特的最大速度,并不是设备所允

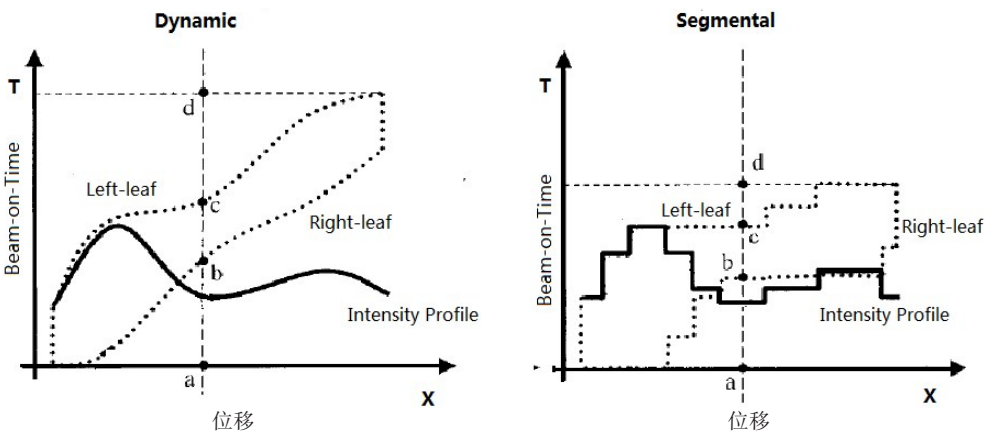


图 1 SW 和 SS 出束方式示意图
Fig.1 Delivery modes of SW and SS

许的固定的最大机械运动速度)。SW 连续的剂量强度曲线在提供比 SS 方法更好的靶区剂量分布的同时,不可避免地增加正常组织暴露在射野内的时间和体积。但是上述的 SW 优化策略尽可能缩短了出束时间,减少了漏射剂量。因此 SS 方法对正常组织的保护虽然略优于 SW,但是二者之间没有统计学差异。而 SW-smart 方法在传统优化方法的基础上采用 Jaw Tracking 技术,在 MLC 运动过程中,铅门位置并不是停留在靶区左右边界之外,而是在不影响靶区

剂量的情况下一直跟随 MLC 一同运动,更好地减少叶片间的漏射。因此 SW-smart 与其余两种方法相比,对正常组织的保护有统计学上的优势。

评估喉和腮腺的剂量体积参数时,3 种方法之间均没有统计学上的差别。导致这一现象的原因可能是优化参数的目标设定过于宽松,3 种方法的优化结果均远远低于目标(喉的 V₅₀<20%,左右腮腺的 V₃₀<50%),并不能体现出各方法的优劣。这也为今后的计划设计提供思路,这些较轻易达到的正常组织限量可适当严格

目标函数,为患者提供更好的保护。

与传统的SW方法相比,新技术并未增加计划跳数和计划的执行时间,虽然连续出束导致的跳数比SS方法增加,但计划执行时间却减少约22%。在临床实践中可有效提高工作效率,并减少因治疗时间过长而引入的靶区位置误差,提高治疗精度。

综上所述,Varian的速锋刀机型结合新版本Eclipse中的smart LMC算法,与传统静态及动态调强相比,在头颈部舌癌术后放射治疗计划的优化上具有明显的优势。新技术可提供更好的靶区剂量分布,提高HI及CI,降低靶区高量。不同于传统的动态调强,新技术在提升靶区优化的同时,新算法的Jaw Tracking技术为危及器官提供更好的保护。新技术并未增加计划跳数和计划的执行时间,结合医院的特色,是提高效率、改善舌癌术后放射治疗计划的有效可行方案。

【参考文献】

- [1] BRAY F, FERLAY J, SOERJOMATARAM I, et al. Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries [J]. CA Cancer J Clin, 2018, 8: 3-31.
- [2] WOON W A, RAVINDRAN P B, EKAYANAKE P, et al. Validation of delivery consistency for intensity-modulated radiation therapy and volumetric modulated arc therapy plans[J]. J Med Phys, 2018, 43(2): 119-128.
- [3] HAMZEEI M, MODIRI A, KAZEMZADEH N, et al. Inverse-planned deliverable 4D-IMRT for lung SBRT[J]. Med Phys, 2018, 45(11): 5145-5160.
- [4] RAZINSKAS G, WEGENER S, GREBER J, et al. Sensitivity of the IQM transmission detector to errors of VMAT plans[J]. Med Phys, 2018, 45(12): 5622-5630.
- [5] ZHANG D D, WANG B, ZHANG G S, et al. Comparison of 3D and 2D gamma passing rate criteria for detection sensitivity to IMRT delivery errors[J]. J Appl Clin Med Phys, 2018, 19(4): 230-238.
- [6] POTTER L D, CHANG S X, CULLIP T J, et al. A quality and efficiency analysis of the IMFAST™ segmentation algorithm in head and neck "step & shoot" IMRT treatments [J]. Med Phys, 2002, 29(3): 275.
- [7] ADAMS E J, CONVERY D J, COSGROVE V P, et al. Clinical implementation of dynamic and step-and-shoot IMRT to treat prostate cancer with high risk of pelvic lymph node involvement[J]. Radiother Oncol, 2004, 70(1): 1-10.
- [8] SUN X, XIA P. A new smoothing procedure to reduce delivery segments for static MLC-based IMRT planning[J]. Med Phys, 2004, 31(5): 1158.
- [9] 张黎, 习勉, 孙文钊, 等. 肝癌三维适形、静态调强与容积旋转调强放射治疗的剂量学研究[J]. 中山大学学报(医学科学版), 2012, 33(3): 402-406.
ZHANG L, XI M, SUN W Z, et al. Dosimetric comparison of 3DCRT, static IMRT, and VMAT for hepatocellular carcinoma[J]. Journal of Sun Yat-sen University (Medical Sciences), 2012, 33(3): 402-406.
- [10] NI D D, WU X, CHEN J Q, et al. Comparison of algorithms for static multi-leaf collimator field segmentation[J]. Appl Mech Mater, 2011, 80-81: 1091-1095.
- [11] SVENSSON R, KALLMAN P, BRAHME A. An analytical solution for the dynamic control of multileaf collimators[J]. Phys Med Biol, 1994, 39(1): 37-61.
- [12] BORTFELD T R, KAHLER D L, WALDRON T J, et al. X-ray field compensation with multileaf collimators[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 1994, 28(3): 723-730.
- [13] STEIN J, BORTFELD T, DORSCHER B, et al. Dynamic X-ray compensation for conformal radiotherapy by means of multi-leaf collimation[J]. Radiother Oncol, 1994, 32(2): 163-173.
- [14] GIORGIA N, ANTONELLA F, LUCA C. IMRT with the sliding window: comparison of the static and dynamic methods. Dosimetric and spectral analysis[J]. Radiother Oncol, 2005, 75(1): 112-119.
- [15] CHUI C S, CHAN M F, YORKE E, et al. Delivery of intensity-modulated radiation therapy with a conventional multileaf collimator: comparison of dynamic and segmental methods[J]. Med Phys, 2001, 28(12): 2441-2449.
- [16] 马栋辉, 张国庆, 刘浩, 等. 鼻咽癌动态和静态调强方式的剂量学比较[J]. 新疆医科大学学报, 2007, 30(4): 86-88.
MA D H, ZHANG G Q, LIU H, et al. Comparison on sliding window and step and shoot in dosimetry of nasopharynx cancer intensity modulated radiotherapy (IMRT) [J]. Journal of Xinjiang Medical University, 2007, 30(4): 86-88.
- [17] BUDGELL G J. Temporal resolution requirements for intensity modulated radiation therapy delivered by multileaf collimators[J]. Phys Med Biol, 2001, 44(7): 1581-1596.
- [18] KELLER-REICHENBECHER M A, BORTFELD T, LEVEGRUN S, et al. Intensity modulation with the 'step and shoot' technique using a commercial MLC: a planning study[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 1999, 45(5): 1315-1324.
- [19] 葛宁, 陈福慈, 徐利明. 多叶准直器动态调强和静态调强方式的比较[J]. 医疗卫生装备, 2007, 28(12): 59-61.
GE N, CHEN F C, XU L M. Comparison between sliding window and step and shoot[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2007, 28(12): 59-61.
- [20] 王中和, 涂文勇. 口腔颌面-头颈肿瘤放射治疗学[M]. 上海: 上海世界图书出版社, 2013.
WANG Z H, TU W Y. Oral and maxillofacial-head and neck radiation oncology [M]. Shanghai: Shanghai World Book Publishing Company, 2013.

(编辑:陈丽霞)