

TomoDirect技术在鼻咽癌放疗中的剂量学研究

赵洪利, 刘晖, 钟亚华, 谢丛华, 王骁踊
武汉大学中南医院肿瘤放疗科, 湖北 武汉 430071

【摘要】目的:研究鼻咽癌患者应用TomoDirect(TD)、TomoHelical(TH)及常规加速器固定野调强技术(FF-IMRT)设计的计划的剂量学差异。**方法:**选取10例鼻咽癌患者,对患者CT图像分别设计TH、TD和FF-IMRT计划,评估靶区、危及器官和正常组织的剂量分布。采用单因子方差分析法比较TH、TD、FF-IMRT计划的剂量学参数差异,并用LSD法进行两两比较。**结果:**TD技术设计的计划,靶区剂量学与TH、FF-IMRT无明显差异;危及器官保护与TH相似,相比于FF-IMRT,脊髓最大剂量降低约4 Gy($P=0.000$);腮腺平均剂量降低约20%($P=0.000$), D_{33} 、 D_{50} 、 D_{60} 显著低于FF-IMRT($P=0.000$);口腔、喉的平均剂量分别比FF-IMRT降低约7 Gy($P=0.000$)和20 Gy($P=0.000$);颞颌关节的最大剂量比FF-IMRT降低10 Gy($P=0.000$);而在视神经、视交叉的保护上,TD与TH均不如FF-IMRT;靶区外正常组织受照剂量,TD计划具有一定优势。**结论:**鼻咽癌患者TD计划的剂量学参数与TH计划相似,整体优于FF-IMRT计划,完全满足临床剂量学要求,可以作为一种新的治疗手段。

【关键词】鼻咽癌; TomoDirect技术; 固定野调强; 螺旋断层调强; 剂量学

【中图分类号】R815

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2018)02-0166-05

Dosimetric study of TomoDirect technology in radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma

ZHAO Hongli, LIU Hui, ZHONG Yahua, XIE Conghua, WANG Xiaoyong

Department of Radiation and Medical Oncology, Zhongnan Hospital of Wuhan University, Wuhan 430071, China

Abstract: Objective To evaluate the dosimetric differences of TomoDirect (TD), TomoHelical (TH) and fixed-field intensity-modulated radiotherapy (FF-IMRT) plans for nasopharyngeal carcinoma (NPC). **Methods** Ten patients with NPC were enrolled in this study, and based on their CT images, three plans were designed for each patient, namely TH, TD and FF-IMRT plans. The dose distribution in target areas, organs-at-risk and normal tissues were evaluated. Furthermore, the dosimetric differences were compared among three plans by single factor analysis of variance, and compared in pairs by LSD method. **Results** For dosimetric parameters in target areas, TD plans didn't showed any statistical differences with TH and FF-IMRT plans. TD and TH plans showed significant improvement over IMRT plans in terms of OAR protection. Compared with FF-IMRT plan, the maximum dose of spinal cord in the other two plans was reduced by about 4 Gy ($P=0.000$); the mean dose of parotid gland was decreased by about 20% ($P=0.000$) and the D_{33} , D_{50} and D_{60} were significantly lower ($P=0.000$); the mean dose of oral cavity and larynx were reduced by about 7 Gy and 20 Gy, respectively ($P=0.000$, 0.000); and the maximum dose of temporomandibular joint was lower by 10 Gy ($P=0.000$). However, FF-IMRT plan was superior to TD and TH plans in the protection of optic nerve and chiasm. Besides, TD plans showed certain advantages in the irradiation dose of the normal tissues outside the target areas. **Conclusion** For patients with NPC, the differences in dosimetric parameters between TD and TH plans were trivial, and both TD and TH plans showed significant improvements over IMRT plans, completely meeting the clinical requirements. TD technology is feasible to treat patients with NPC.

Keywords: nasopharyngeal carcinoma; TomoDirect technology; fixed-field intensity-modulated radiotherapy; TomoHelical technology; dosimetry

前言

【收稿日期】2017-09-03

【作者简介】赵洪利, 硕士, 物理师, 研究方向: 放射物理及精确放疗, E-mail: 2511988634@qq.com

【通信作者】王骁踊, 物理师, 研究方向: 医学物理及精确放疗, E-mail: wangxy_06@hotmail.com

螺旋断层调强放疗技术(TomoHelical, TH)将一台6 MV的直线加速器机头固定在类似于CT的滑环机架上,机头在围绕治疗床360°旋转照射的同时,治疗床沿轴向匀速前进。通过调节二进制的多叶准直器的开启和关闭时间对到达靶区和危及器官的射线进行强度调节,满足靶区和危及器官的临床剂量学要求。机头产

生的6 MV扇形X射线束经过64对气动多叶准直器调制,机架旋转速度12~60 s/圈,每圈形成51个投影角度,剂量率为865 MU/min。叶片在等中心处宽度0.625 cm,最快开关时间20 ms,每个治疗点能被扇形束照射2~5次,大约受到100~250个子束流照射,而每个子束流又被64对叶片调制。因此,TH具有极强的剂量调制能力^[1-4]。

目前新一代的螺旋断层放疗系统能够实现静态定角照射TomoDirect(TD)^[5-8],即TH的固定野调强(FF-IMRT)模式,加速器机头在固定角度出束,治疗床沿头脚方向匀速前进,靶区得到断层式治疗,根据治疗计划设计需要可选择多个射野方向。该种治疗方式既区别于TH的360°旋转照射,也区别于FF-IMRT的固定床模式,已经在乳腺癌、中段食管、全脑全脊髓以及全身照射等放疗中得到临床应用和报道^[9-12]。在鼻咽癌放疗中,其临床剂量学研究还未开展过,本文研究鼻咽癌患者TH、TD和FF-IMRT这3种技术的物理计划,分析三者的剂量学差异,得出TD技术在鼻咽癌放疗中的剂量学可行性。

1 材料与方法

1.1 病例资料

选择武汉大学中南医院2017年5~7月收治的10例鼻咽癌患者,男8例,女2例,年龄34~60岁,中位年龄49岁。经病理证实均为低分化鳞癌,TN分期为T₁期1例,T₂期5例,T₃期4例;N₁期2例,N₂期4例,N₃期4例。

1.2 系统与设备

西门子CT模拟定位机,Eclipse13.5计划系统和TomoTherapy治疗计划系统。

1.3 模拟定位

患者采用仰卧位、双手置于体侧,头颈肩热塑膜固定,做好体表铅点标记后行CT扫描,范围自头顶至锁骨头下3 cm处,层厚与层间距均为3 mm,并将定位CT经网络传输至医生工作站。

1.4 靶区、危及器官勾画

临床医生在医生工作站行靶区、危及器官勾画。靶区定义参考ICRU 50及62号文件,将影像学及临床检查可见的原发肿瘤部位定义为GTV_{nx},外扩3 mm命名为PGTV_{nx};颈部转移性淋巴结体积定义为GTV_{nd},外扩3 mm命名为PGTV_{nd};原发肿瘤及颈部转移性淋巴结极有可能侵犯或转移的高危区域,包括GTV_{nx}、整个鼻咽粘膜、鼻咽周围结构和双侧上颈部的淋巴引流区定义为临床靶区CTV1,外扩3 mm作为计划靶区PCTV1;由肿瘤生物学行为推断出的可能出现淋巴结转移的低危临床靶区命名为CTV2,外扩3 mm作为预防照射靶区PCTV2。危及器官根据ICRU 83号报告进

行定义勾画,主要包括脑干、脊髓、晶体、视神经、视交叉、腮腺、口腔、喉、颞下颌关节、垂体、颞叶、内耳、下颌骨等。

1.5 计划设计

患者采用6 MV X线同步推量放疗。处方剂量PGTV_{nx}:7 000 cGy,PGTV_{nd}:6 800 cGy,PCTV1:6 000 cGy,PCTV2:5 400 cGy,分割次数31次。对每例患者分别设计TH、TD及FF-IMRT计划,要求处方剂量至少包绕95%的靶区体积。FF-IMRT TPS采用Eclipse10.0计划系统,9个野均分共面照射,180°起始,剂量率400 MU/min,Sliding Window技术,剂量计算采用AAA算法、计算矩阵0.25 cm,加速器型号VARIAN IX,其含有叶片准直器60对,中间40对叶片厚度0.5 cm,两边20对叶片厚度1.0 cm。TH、TD采用TomoTherapy(美国Accuray公司)计划系统,Tomo HD加速器,TH、TD计划均采用射野宽度2.5 cm,螺距0.287,调制因子2.8,剂量率865 MU/min,剂量计算模型为convolution superposition,TD计划布野方式与FF-IMRT计划相同。

1.6 计划评估

使用剂量体积直方图(DVH)评估靶区和危及器官的剂量分布。靶区评估参数有98%的靶区体积接受的剂量(D_{98})、靶区处方剂量所包绕的体积(V_{100})、最大剂量(D_{max})、平均剂量(D_{mean})。因鼻咽癌含有4个处方剂量,各剂量线分布在靶区间重叠较多,因此本研究未统计适形度指数(CI)和均匀性指数(HI)。危及器官评估指标参考ICRU 83号^[13]及RTOG0615号报告,包括脊髓、脑干、晶体、视神经、视交叉的 D_{max} 及对应外放5 mm后的危及器官计划靶区(Planning Organ at Risk Volume, PRV)的 D_1 ,眼球的 D_{mean} ,腮腺的 D_{33} 、 D_{50} 、 D_{60} 和 D_{mean} ,内耳的 D_{max} 和 D_{mean} ,垂体的 D_{max} ,口腔与喉的 D_{mean} ,下颌骨的 D_5 和 D_{mean} ,颞下颌关节的 D_{max} ,颞叶的 D_5 。对于靶区外正常组织[定义为全身(Body)减去所有靶区(PTV)后的体积,即B-P],评估其受照5、10、20、30、40 Gy的体积占总的B-P体积百分比(即 V_5 、 V_{10} 、 V_{20} 、 V_{30} 、 V_{40})。通过平均机器跳数评估3种计划的射线利用率。

1.7 统计学方法

使用SPSS 21.0统计软件对3组计划的参数差异进行单因子方差分析,并用LSD法进行两两比较, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 靶区剂量分布比较

3种计划的处方剂量线对各靶区的覆盖基本一致,各靶区 D_{98} 均能满足临床要求,PGTV_{nd}的 D_{98} ,TD与TH

比FF-IMRT计划小1%,存在统计学差异,但不具有实际临床意义。TD计划的PGTV_{nx} D_{mean} 比TH和FF-IMRT计划高0.6%,存在统计学差异,无实际临床意义。各靶区其它参数均无统计学差异,详见表1。

表1 3种计划的靶区剂量学比较($\bar{x} \pm s$)
Tab.1 Dosimetric comparison of target areas in three plans (Mean±SD)

Target areas	Parameters	TH plan	TD plan	FF-IMRT plan	P value
PGTV _{nx}	D_{98}/Gy	69.70±0.29	69.64±0.33	70.01±0.38	0.048
	D_{max}/Gy	75.37±1.04	76.11±0.94	75.98±0.83	0.191
	D_{mean}/Gy	72.48±0.39	73.00±0.52	72.41±0.32	0.007
PGTV _{nd}	D_{98}/Gy	67.98±0.35	68.11±0.49	68.72±0.34	0.001
	D_{max}/Gy	72.88±0.80	73.50±0.77	74.02±1.81	0.135
	D_{mean}/Gy	70.28±0.26	70.69±0.51	70.37±0.62	0.160
PCTV1	D_{98}/Gy	60.37±0.34	60.05±0.32	60.18±0.42	0.172
	$V_{100}/\%$	98.65±0.60	98.10±0.65	98.24±0.71	0.078
PCTV2	D_{98}/Gy	54.01±0.37	53.95±0.18	54.05±0.33	0.184
	$V_{100}/\%$	98.07±0.96	97.75±0.58	97.90±0.63	0.258

TH: TomoHelical; TD: TomoDirect; FF-IMRT: Fixed-field intensity-modulated radiotherapy; PGTV: Planning gross tumor volume; PCTV: Planning clinical target volume

2.2 危及器官剂量学比较

具体结果见表2。3种计划中,脊髓的 D_1 均值TD与TH计划相当,比FF-IMRT减小11%,有统计学差异,但无实际临床意义,均在临床许可范围之内。晶体的剂量3种计划无显著性差异,但是晶体PRV的 D_{max} ,TD与TH计划均比FF-IMRT计划小17%,有统计学差异,无实际临床意义。对于腮腺的 D_{33} 、 D_{50} 、 D_{60} 以及 D_{mean} ,TD计划远小于FF-IMRT计划($P=0.000$),显示出了很好的腮腺保护能力,具有实际临床意义,虽略高于TH计划,但并无明显临床意义。喉、口腔、下颌骨的 D_{mean} ,TH与TD计划无统计学差异,分别比FF-IMRT计划降低约20、7、8 Gy,统计有显著性差异。颞下颌关节的 D_{max} ,TH与TD计划无统计学差异,比FF-IMRT计划低22%,差异有统计学意义。而对于视神经、神交叉及对应的PRV的 D_{max} ,TH与TD计划均大于FF-IMRT计划,有统计学差异,但由于远小于临床许可限值,无实际临床意义。对于脑干、颞叶、内耳等并未发现差异有统计学意义,且都在临床许可范围内。

2.3 靶区外正常组织受照剂量比较

靶区外正常组织小于500和1 000 cGy的受照体积,TH>TD>FF-IMRT($P<0.05$),TH计划所受低剂量区最高;而对于 V_{30} 和 V_{40} ,TH与TD计划相似,无统计学差异,显著低于FF-IMRT计划,有统计学差异。3种计划在 V_{20} 上并无统计学差异($P>0.05$)。因此,TD计划在

正常组织低剂量区上具有一定优势。详见表3。

2.4 机器跳数比较

TH、TD、FF-IMRT计划的机器跳数平均值分别为6 681、6 659和1 939 MU。FF-IMRT计划机器跳数最低。TD相对于TH计划并未出现显著跳数减少。

3 讨论

TD技术概念源于常规加速器FF-IMRT技术,在螺旋断层放疗系统中得到广泛应用。对于每一个固定野,肿瘤靶区沿头脚方向匀速通过固定宽的射线束直至遍布整个靶区,靶区在通过固定宽的射束时短时间内达到相应的射野剂量。Hashimoyo等^[14],Reynders等^[15],Chung^等^[16]研究TH、TD和常规放疗技术在术后乳腺恶性肿瘤中的应用,TomoTherapy和TD技术可以得到临床接受的治疗计划,从危及器官的保护角度看还要好于常规放疗技术。徐英杰等^[17]研究TD技术在全脑全脊髓放疗中的布野方案,5野的TD技术具有一定优势。刘志强等^[10]比较TD技术与TH、常规放疗技术在中段食管癌放疗中的剂量学差异,与TH技术相比,TD技术射线利用率高,治疗时间短,与IMRT技术相比,TD技术对肺的保护更具优势。林金勇等^[18]探讨TD和TH技术在左侧乳腺癌保乳术后放疗中的剂量学差异,TD技术可以给出较TH技术优越的危及器官受量。

考虑目前还未见有关TD技术在鼻咽癌放疗中应

表2 3种计划的危及器官剂量学比较(Gy, $\bar{x} \pm s$)Tab.2 Dosimetric comparison of organs-at-risk in three plans (Gy, $Mean \pm SD$)

Organs-at-risk	Parameters	TH plan	TD plan	FF-IMRT plan	P value
Spinal cord	D _{max}	32.29±2.35	34.75±3.14	37.38±1.21	0.000
	D ₁	31.12±2.20	32.32±2.67	36.24±1.19	0.000
Spinal cord (PRV)	D ₂	35.47±2.40	37.92±2.82	38.62±0.95	0.009
Brainstem	D _{max}	47.06±4.72	49.11±4.34	49.80±2.62	0.294
	D ₁	42.89±4.46	45.09±3.87	45.72±3.48	0.263
Brainstem (PRV)	D ₂	50.67±4.17	52.08±3.80	51.93±2.61	0.634
Lens	D _{max}	3.13±0.39	3.18±0.43	3.65±0.40	0.184
Lens (PRV)	D _{max}	5.81±0.69	5.77±0.50	7.09±0.82	0.037
Optic nerves	D _{max}	38.97±5.02	40.00±5.67	11.32±3.20	0.000
PRV optic nerves	D _{max}	46.81±6.75	47.10±6.49	23.63±4.17	0.000
Eyes	D _{mean}	5.57±1.01	5.05±0.83	4.78±1.03	0.431
Chiasm	D _{max}	36.84±6.92	36.55±7.35	11.93±6.67	0.000
Chiasm (PRV)	D ₁	42.72±5.39	43.47±7.17	21.44±7.98	0.000
Parotid gland	D ₃₃	34.83±6.13	37.46±5.46	47.94±5.43	0.000
	D ₃₀	22.96±2.91	25.92±3.10	35.59±3.26	0.000
	D ₆₀	19.14±1.15	21.61±1.48	30.80±1.68	0.000
	D _{mean}	29.69±2.82	31.75±2.61	39.02±2.53	0.000
Inner ear	D _{max}	55.99±8.29	54.63±9.57	57.86±8.97	0.724
	D _{mean}	43.52±9.48	42.98±10.32	45.78±9.53	0.796
Pituitary	D _{max}	51.57±5.34	52.18±5.57	47.51±11.87	0.394
Larynx	D _{mean}	19.11±2.19	19.59±2.57	39.35±2.06	0.000
Oral cavity	D _{mean}	29.27±2.49	30.22±2.30	37.01±3.72	0.000
Mandible	D ₅	56.57±2.62	57.99±2.97	59.10±3.64	0.159
	D _{mean}	34.79±4.49	35.27±4.37	43.07±3.45	0.000
Temporal-mandibular joint	D _{max}	39.65±9.50	38.87±10.61	50.46±8.36	0.019
Temporal lobe	D ₅	54.18±4.74	53.24±5.81	49.01±6.14	0.108

PRV: Planning organ at risk volume

表3 3种计划的正常组织剂量学比较(%, $\bar{x} \pm s$)Tab.3 Dosimetric comparison of the normal tissues in three plans (%, $Mean \pm SD$)

Parameters	TH plan	TD plan	FF-IMRT plan	P value
V ₅	53.97±3.45	51.94±4.14	48.74±3.84	0.030
V ₁₀	46.21±3.44	44.91±3.76	41.06±3.00	0.006
V ₂₀	32.10±2.91	31.62±3.05	32.49±2.94	0.811
V ₃₀	17.70±2.13	18.22±2.00	22.92±2.96	0.000
V ₄₀	9.35±0.97	10.20±1.13	12.23±1.70	0.000

用的研究报道,故该研究探究TD技术在鼻咽癌放疗中的剂量学方面是否具有临床优势,为鼻咽癌放疗提供新的临床技术。临床中,鼻咽癌放疗应用比较多的是利用常规加速器的FF-IMRT技术,布野通常采用9野均分,通过动态多叶准直器调节光子通量。考虑与IMRT

技术比较的需要,TD技术采用相同的布野方案;考虑与TH技术比较的需要,TD技术采用相同的射野宽度和调制因子。试验结果表明,TD技术的靶区覆盖率和最大剂量完全满足临床剂量要求,与TH、FF-IMRT技术相比,没有发现具有实际临床意义的显著性差异,说明3种调

强技术均可以做到较好的靶区临床剂量学分布。相对于FF-IMRT技术,TD技术能有效降低脊髓、晶体PRV剂量,虽然实际临床意义不大,但体现出TD技术具有一定限制剂量优势,而对于腮腺、喉、口腔、下颌骨等并联型器官,其受照剂量明显降低,统计具有显著性差异,脑干、颞叶、内耳等受到的剂量差异不具有统计学意义。此外,视神经、视交叉及对应的PRV受照剂量,FF-IMRT技术最小,差异具有显著性,这是因为目前国内TD、TH技术使用的都是静态铅门(Static Jaw)模式,该治疗模式下,当靶区头脚两端通过固定宽射野时,射束在靶区头尾边缘产生了半影效应,使得头脚方向邻近靶区的视神经、视交叉受到不必要的半影照射,国际上更先进的螺旋断层动态铅门技术^[19-20](Dynamic Jaw)已经弥补此不足,即便如此,视神经、视交叉剂量依然远小于临床许可值54 Gy,因此差异不具有实际临床意义。

对靶区外的正常组织,受照500、1 000 cGy的体积,TD技术要好于TH技术;受照3 000、4 000 cGy的体积,TD技术好于FF-IMRT技术。治疗时间上,TD技术剂量率865 MU/min,考虑出束时间及进出床的时间,TD治疗大约在8~9 min。由于鼻咽癌靶区较大,9野FF-IMRT往往还需要分野,如此下来,大部分的时间耗费在机器走位、机架旋转、叶片走位和确认上,大约花费10~15 min的总治疗时间。因此,实际的TD治疗时间并不比常规FF-IMRT治疗时间长。

综合考虑,TD技术在鼻咽癌放疗中的应用,相比于FF-IMRT技术具有一定优势,能显著降低腮腺、口腔、喉等危及器官剂量;与TH技术相比,具有正常组织低剂量受照体积小的优势。因此,从物理剂量学的角度来讲,TD技术具备一定的临床应用价值,对于拥有多种调强放疗技术的单位来讲,可为鼻咽癌放疗提供新的治疗手段。当然,由于该研究病例数较少,进一步研究还需增加样本数量完善统计结果,且其疗效仍需进一步临床评估。此外,由于本研究结果很大程度依赖于本单位的靶区勾画和计划设计,因此,研究结论与本单位的医生与物理师的水平直接相关,建议其他单位依据自身的工作经验与习惯分析与借鉴。

【参考文献】

- [1] BURNET N G, ADAMS E J, FAIRFOUL J, et al. Practical aspects of implementation of helical tomotherapy for intensity-modulated and image-guided radiotherapy[J]. Clin Oncol, 2010, 22(4): 294-312.
- [2] MACKIE T R. History of tomotherapy[J]. Phys Med Biol, 2006, 51(13): R427-R453.
- [3] MACKIE T R, HOIMES T, SWEMLOFF S, et al. TomoTherapy: a new concept for the delivery of dynamic conformal radiotherapy[J]. Med Phys, 1993, 20(6): 1709-1719.
- [4] HAN C, LIU A, SCHULTHEIS T E, et al. Dosimetric comparisons of helical tomotherapy treatment plans and step-and-shoot intensity-modulated radiosurgery treatment plans in intracranial stereotactic radiosurgery[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2006, 65(2): 608-616.
- [5] FRANCO P, CATUZZO P, CANTE D, et al. TomoDirect: an efficient means to deliver radiation at static angles with tomotherapy[J]. Tumori, 2011, 97(4): 498-502.
- [6] LANGNER U W, MOLLOY J A, JR G J, et al. A feasibility study using TomoDirect for craniospinal irradiation[J]. J Appl Clin Med Phys, 2013, 14(5): 104-114.
- [7] FRANCO P, RICARDI U. TomoDirect to deliver static angle tomotherapy treatments[C]//VLSI Systems, Architecture, Technology and Applications (VLSI-SATA), 2015 International Conference on. IEEE, 2012: 1-5.
- [8] TARO M, YUTA S, YOSHIHIKO M, et al. Intensity-modulated radiation therapy using static ports of tomotherapy (TomoDirect): comparison with the TomoHelical mode[J]. Radiat Oncol, 2013, 8(1): 1-7.
- [9] 王方正, 蒋春儿, 杨双燕, 等. 基于断层调强放疗中扇形束兆伏级CT数据分析鼻咽癌的摆位误差[J]. 实用医学杂志, 2017, 33(9): 1490-1493.
- [10] WANG F Z, JIANG C E, YANG S Y, et al. An analysis on set-up errors by data of megavoltage fan-beam computed tomography during intensity-modulated radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma[J]. The Journal of Practical Medicine, 2017, 33(9): 1490-1493.
- [11] 刘志强, 胡志辉, 黄鹏, 等. 螺旋断层固定野调强放疗技术在中段食管癌放疗中的应用[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2016, 36(6): 430-434.
- [12] LIU Z Q, HU Z H, HUANG P, et al. TomoDirect in the clinical implementation of mid-esophageal carcinoma[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2016, 36(6): 430-434.
- [13] CHAN J M, WU V W, CHIU G. Dosimetric evaluation of TomoDirect, helical tomotherapy and field-in-field techniques in breast radiotherapy[J]. Radiother Oncol, 2013, 106: S135-S136.
- [14] SALZ H, BOHRISCH B, HOWITZ S, et al. Intensity-modulated total body irradiation (TBI) with TomoDirect™[J]. Radiat Oncol, 2015, 10(1): 1-9.
- [15] International Commission on Radiation Units and Measurements. Report 83. Prescribing, recording, and reporting photon-beam intensity-modulated radiation therapy (IMRT)[R]. Oxford: Pergamon Press, 2010.
- [16] HASHIMOYO H, OMURA M, MATSUI K, et al. Tangent field technique of TomoDirect improves dose distribution for whole breast irradiation[J]. J Appl Clin Med Phys, 2015, 16(3): 5369.
- [17] REYNDERS T, TOURNEL K, DECONINCK P, et al. Dosimetric assessment of static and helical TomoTherapy in the clinical implementation of breast cancer treatments[J]. Radiother Oncol, 2009, 93(1): 71-79.
- [18] CHUNG M J, KIM S H, LEE J H, et al. A dosimetric comparative analysis of TomoDirect and three-dimensional conformal radiotherapy in early breast cancer[J]. J Breast Cancer, 2015, 18(1): 57-62.
- [19] 徐英杰, 胡志辉, 黄鹏, 等. TomoDirect技术在全脑全脊髓放疗中的应用[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2015, 35(6): 445-448.
- [20] XU Y J, HU Z H, HUANG P, et al. Application of TomoDirect for craniospinal irradiation[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2015, 35(6): 445-448.
- [21] 林金勇, 胡彩容, 张秀春, 等. TomoDirect和TomoHelical技术在左侧乳腺癌保乳术后放疗中的剂量学比较[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2017, 37(3): 216-221.
- [22] LIN J Y, HU C R, ZHANG X C, et al. Dosimetric comparison of TomoDirect and TomoHelical modalities in Tomotherapy system for left breast cancer radiotherapy after breast-conserving surgery[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2017, 37(3): 216-221.
- [23] CHEN Y, CHEN Q, CHEN M, et al. Dynamic tomotherapy delivery[J]. Med Phys, 2011, 38(6): 3013-3024.
- [24] RONG Y, CHEN Y, SHANG L, et al. Helical tomotherapy with dynamic running-start-stop delivery compared to conventional tomotherapy delivery[J]. Med Phys, 2014, 41(5): 051709.

(编辑:陈丽霞)