

呼吸运动对 Sliding Window 调强射野剂量学的影响

沐金明, 田源, 戴建荣

国家癌症中心/国家肿瘤临床医学研究中心/中国医学科学院北京协和医学院肿瘤医院, 北京 100021

【摘要】目的:研究呼吸运动对 Sliding Window(SW)调强射野剂量学的影响。**方法:**使用胶片分别测量多叶光栅在不同的叶片移动速度(叶片速度)和不同射野宽度条件下,窄束野在呼吸运动平台驱动下胶片上的剂量分布。对运动模式、叶片速度、射野宽度等多个因素分组进行对比分析。**结果:**不同的运动模式对剂量分布影响差异显著不同;随着叶片速度的增大,射野内剂量波动幅度随之显著增大;随着射野宽度的增大,射野内剂量波动幅度随之减小;射野宽度小叶片速度高,对剂量分布的影响最为显著。**结论:**有呼吸运动影响时,应通过提高射野宽度和(或)减小叶片速度等方法来减小呼吸运动对 SW 调强射野剂量分布的影响。

【关键词】调强放射治疗;呼吸运动;Sliding Window;剂量分布

【中图分类号】R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2019)01-0043-07

Effects of respiratory motion on the dosimetry of Sliding Window intensity-modulated radiotherapy

MU Jinming, TIAN Yuan, DAI Jianrong

National Cancer Center/National Clinical Research Center for Cancer/Cancer Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100021, China

Abstract: Objective To study the dosimetric effects of respiratory motion in Sliding Window intensity-modulated radiotherapy. **Methods** The dose distributions with different motion modes, field widths and velocities of multileaf collimators were obtained and compared using EBT2 films driven by respiratory phantom (Quasar). The effects of motion modes, field widths and velocities of multileaf collimators on the dose distribution were analyzed. **Results** The effects of different motion modes on the dose distribution was significantly different. With the increase of leaf velocity, the dose fluctuation amplitude was obviously increased, and with the increase of the field width, the dose fluctuation amplitude was decreased. The large field width with high leaf velocity had the most significant effects on the dose distribution. **Conclusion** With the influence of respiratory motion, the effects of respiratory motion on the dose distribution can be reduced by increasing the field width and (or) decreasing the leaf velocity. **Keywords:** intensity-modulated radiotherapy; respiratory motion; Sliding Window; dose distribution

前言

目前,调强放疗已经成为肿瘤放射治疗的主要方式,调强技术按叶片运动模式主要分为 Step & Shoot(SS)^[1]和 Sliding Window(SW)^[2]。SW 方式因其能产生与 SS 方式相同甚至更优的剂量分布,且治疗效率优于 SS 方式^[3],正逐渐取代 SS 方式。目前主要用于治疗器官位置相对固定的头颈部肿瘤。近年来,越来越多的胸腹部肿瘤也开始采用 SW 方式的调

强放射治疗^[4-5]。SW 方式的多叶光栅(MLC)子野多为窄束野,随着临床上对剂量分布要求的不断提高,窄束野射野宽度也越来越小。但胸腹部肿瘤靶区和危及器官通常都受到呼吸等生理运动的影响而产生移动。这些位移对窄束野剂量分布的影响也越来越明显。

本研究以乳腺癌放射治疗为模型,通过使用胶片分别测量 MLC 在不同的叶片移动速度和不同射野宽度条件下,窄束野在呼吸运动平台驱动下胶片上的剂量分布,研究在呼吸运动影响下射野宽度与叶片速度等因素对 SW 射野剂量分布的影响。

1 材料与方法

1.1 实验装置

使用 Quasar 呼吸运动平台来驱动 IBA 调强验证

【收稿日期】2018-10-28

【作者简介】沐金明, E-mail: mjm_F@hotmail.com

【通信作者】戴建荣, E-mail: Dai_jianrong@163.com; 田源, E-mail: yuan.tian@cicams.ac.cn

模体在治疗床面上沿 GT(Gun-Target)方向做水平运动^[6-7],模体源皮距 98 cm。采用同一批次的辐射自显影胶片 Gafchromic EBT2^[8-9]采集剂量分布。胶片位于模体表面下 2 cm。机架角度为 0°,准直器角度为 90°,如图 1 所示。

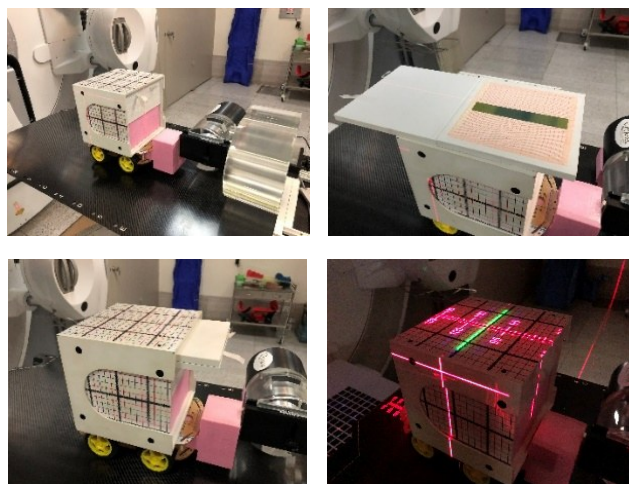


图1 实验装置示意图

Fig.1 Experimental device and setup

1.2 窄束野的设计

依据 Elekta 提供的 RTPConnect Interface 格式^[10],设计一组 SW 窄束照射野。窄束野平滑地扫过照射区域(总射野宽度),形成类似于常规矩形野的剂量分布;出束时间大于一个呼吸周期(3.33 s^[11]),照射过程中 MLC 叶片运动方向保持不变;叶片速度保持一致;射野宽度(相对叶片间端与端的距离)保持一致;射野长度均为 150 mm;使用 6 MV 光子线,输出剂量率为 600 MU/min。为使胶片上沉积足够的剂量,需进行多次重复照射。实验中保持输出剂量率不变,将照射野 MLC 运动速度和 Quasar 运动速度同时同比例降低,增加 MU。窄束野具体参数如表 1 所示。表 1 中 G 是射野宽度;V 是叶片速度;TL 为叶片扫过的距离,TL=V×Pr+G,其中 Pr 为呼吸周期;TT 是持续出束的时间,TT=TL÷V;PD 是一次照射胶片剂量沉积的估算值,PD=DR×(G÷V),式中 DR 为剂量率(10 cGy/s);M 是要使得胶片沉积剂量在 150 cGy 左右,需要重复照射的次数,M=Max(150÷DG, 1);MT 为降低速度后的出束时间,MT=TT×M;MU 为治疗机跳数,MU=DR×MT。

表1 窄束野的设计参数

Tab.1 Design parameters of narrow-beam fields

Field ID	G/mm	V/mm·s ⁻¹	TL/mm	TT/s	PD/cGy	M	MT/s	MU
05-05	5.00	5.00	23.33	4.67	10.00	15.00	70.00	700.00
05-10	5.00	10.00	41.67	4.17	5.00	30.00	125.00	1 250.00
05-15	5.00	15.00	60.00	4.00	3.33	45.00	180.00	1 800.00
05-20	5.00	20.00	78.33	3.92	2.50	60.00	235.00	2 350.00
10-05	10.00	5.00	28.33	5.67	20.00	7.50	42.50	425.00
10-10	10.00	10.00	46.67	4.67	10.00	15.00	70.00	700.00
10-15	10.00	15.00	65.00	4.33	6.67	22.50	97.50	975.00
10-20	10.00	20.00	83.33	4.17	5.00	30.00	125.00	1 250.00
15-05	15.00	5.00	33.33	6.67	30.00	5.00	33.33	333.33
15-10	15.00	10.00	51.67	5.17	15.00	10.00	51.67	516.67
15-15	15.00	15.00	70.00	4.67	10.00	15.00	70.00	700.00
15-20	15.00	20.00	88.33	4.42	7.50	20.00	88.33	883.33
20-05	20.00	5.00	38.33	7.67	40.00	3.75	28.75	287.50
20-10	20.00	10.00	56.67	5.67	20.00	7.50	42.50	425.00
20-15	20.00	15.00	75.00	5.00	13.33	11.25	56.25	562.50
20-20	20.00	20.00	93.33	4.67	10.00	15.00	70.00	700.00

G: Field width; V: Leaf velocity; TL: The sweeping distance of MLC leaves; TT: Total time of irradiation; PD: Predicted dose; M: Multiple; MT: Total time after multiplication; MU: Monitor unit

1.3 呼吸波形与运动模式

使用如图2所示的呼吸波形模拟人体呼吸,幅度为20 mm。按照MLC叶片运动方向与模体在呼吸运动曲线吸气段时运动方向之间的关系设计了3种相

对运动模式:模式A为叶片运动方向与模体运动方向一致(采用图2a的波形);模式B为叶片运动方向与模体运动方向相反(采用图2b的波形);模式C为模体静止,用于参考。

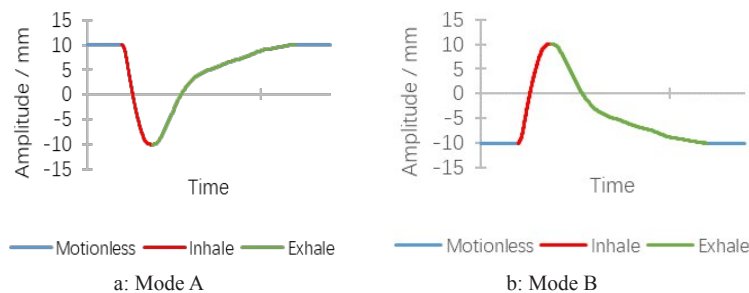


图2 Quasar 可编程呼吸运动平台模拟的呼吸运动曲线
Fig.2 Respiration curves simulated by Quasar

1.4 剂量分布曲线的采集与处理

让加速器加载照射野以及 Quasar 驱动平台,加载该照射野对应的驱动文件后,同时启动加速器与 Quasar 驱动平台,完成照射野的出束与胶片的照射(Profile 胶片)。并对胶片进行灰度剂量定标。待胶片稳定后^[12-14],使用 Medi-6000 医用激光胶片扫描仪扫描,使用 16 bits 灰阶,分辨率为 600 dpi。

通过程序将 Profile 胶片转换为二维数组后,将二维数组中每一列数据的平均值作为剂量分布曲线对应位置的灰度值,这样在有效减小锯齿的同时,保留了剂量分布曲线的特性,如图3所示。

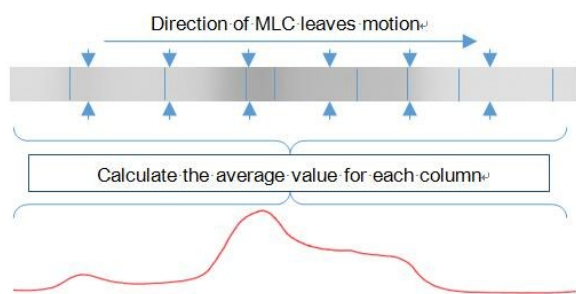


图3 胶片剂量转换为剂量分布曲线示意图

Fig.3 Illustration of converting film dose distribution to profile

1.5 数据分析

将剂量分布曲线进行分组比对分析。(1)相同射野不同运动模式之间的比对:分析同一照射野在不同模式下的照射范围(照射范围定义为模式C下中心轴剂量25%所包绕的范围^[15])。并分析模式A、B照射范围增幅特性。(2)相同运动模式不同射野下之间的比对:分析A、B模式下每条剂量曲线的最大剂量、最小剂量;对比相同射野宽度下不同叶片速度的射野剂量分布;对比相同叶片速度下不同射野宽度的射

野剂量分布。

采用 SPSS 24.0 统计软件进行分析,对射野剂量分布曲线的照射范围及增幅、最大剂量、最小剂量等采用独立样本 t 检验, $P < 0.05$ 为结果有统计学意义。

2 结果

2.1 不同运动模式间比较

如图4所示,3种模式下的剂量分布有着显著的差异,(图4d为3种运动模式下射野宽度10 mm,叶片速度10 mm/s的窄束野剂量分布)。在模式C下,如图4c所示,所有的剂量分布曲线表现为照射范围内区域平坦,边缘迅速跌落,与直接大野照射类似;模式A下,如图4a所示,剂量分布较模式C宽,照射范围增大($28.24 \pm 12.38\%$),最大剂量增幅无统计学意义,大部分照射区域剂量偏低,在吸气段时剂量有较大的差异,而呼气段时及其它时段则较平缓;在模式B下,如图4b所示,照射范围增幅较模式C无统计学差异,在吸气段时,剂量偏低,同时在照射范围中部出现了一个尖峰,最大剂量增幅达到($204.79 \pm 49.35\%$)。结果如表2所示。

2.2 按相同射野宽度分组比较

按相同射野宽度分组后剂量分布比对结果如图5所示,伴随叶片速度的增大,剂量波动幅度随之显著增大,同时射野的照射范围也随之增大。随着射野宽度的增大,射野内剂量波动幅度与叶片速度之间的关系逐渐减弱,但照射范围与叶片速度之间的关系未见明显减弱。

2.3 按相同叶片速度分组比较

按相同叶片速度分组后剂量分布比对结果如图6所示,随着射野宽度的增大,射野内剂量波动幅度随之减小,射野波动范围无显著变化。射野内剂量变化的幅度与射野宽度的关系小,模式B较为显著,

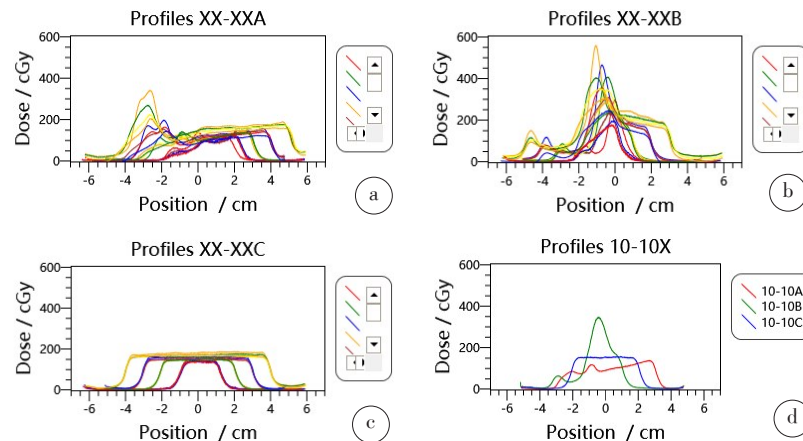


图4 不同运动模式下所有射野剂量曲线

Fig.4 Overview of all field dose profiles for different modes

a: Mode A; b: Mode B; c: Mode C; d: Dose distributions of 3 modes with field width of 10 mm and leaf velocity of 10 mm/s

表2 窄束野的剂量曲线分析结果

Tab.2 Analysis results of narrow-beam field dose profiles

Field ID (G-V)	Mode C		Mode A				Mode B			
	IR/mm	Dc/cGy	IR/mm	AIR/%	RD _{max} /%	RD _{min} /%	IR/mm	AIR/%	RD _{max} /%	RD _{min} /%
05-05	26.7	149.1	38.5	44.4	92.34	37.76	29.7	11.4	196.71	27.78
05-10	45.9	162.3	58.8	28.1	90.26	52.21	45.7	-0.4	249.57	24.43
05-15	64.9	166.8	75.5	16.2	117.83	51.69	65.6	1.0	279.14	28.42
05-20	83.7	180.5	95.5	14.1	187.55	66.23	86.7	3.6	309.75	37.11
10-05	27.3	141.5	41.1	50.4	85.59	33.67	26.9	-1.4	163.25	30.18
10-10	46.0	152.0	61.0	32.6	89.52	48.08	45.2	-1.7	226.89	22.28
10-15	64.8	151.9	77.3	19.3	106.62	50.88	65.1	0.5	227.16	27.63
10-20	84.5	167.4	97.6	15.5	159.54	66.37	86.7	2.7	240.56	35.21
15-05	27.4	137.2	39.7	44.8	87.38	25.88	28.7	4.5	141.05	25.07
15-10	46.2	146.3	63.0	36.2	96.78	64.97	44.5	-3.9	195.48	22.17
15-15	65.3	151.4	80.6	23.4	101.31	56.87	65.1	-0.3	202.74	28.91
15-20	84.4	164.8	100.0	18.5	134.37	61.72	85.9	1.7	211.04	42.22
20-05	26.6	126.8	37.8	42.0	98.01	24.80	28.0	5.2	135.91	24.90
20-10	46.2	147.6	61.6	33.1	91.77	67.23	44.1	-4.7	164.07	26.88
20-15	65.0	159.1	76.0	16.9	89.16	47.59	60.4	-7.2	152.23	11.45
20-20	84.5	167.3	98.3	16.3	121.31	58.10	83.2	-1.5	181.14	30.82
Mean	-	-	-	28.24	109.33	49.93	-	0.61	204.79	27.53
SD	-	-	-	12.38	29.03	13.49	-	4.41	49.35	6.96
P value	-	-	-	<0.001	0.218	<0.001	-	0.590	<0.001	<0.001

IR: Irradiation range; Dc: Center point dose; AIR: Amplification of IR; RD_{max}: The ratio of the maximum dose to the Dc; RD_{min}: The ratio of the minimum dose to the Dc; SD: Standard deviation

模式A在高叶片速度的情况下较为显著。模式A波动主要变化集中在吸气段区域内,模式B主要集中在呼吸运动的吸气末端与呼气前端。

3 讨论

在实际临床治疗中,患者的生理运动是极其复杂的。通常情况下胸腹部器官运动幅度最大的是SI

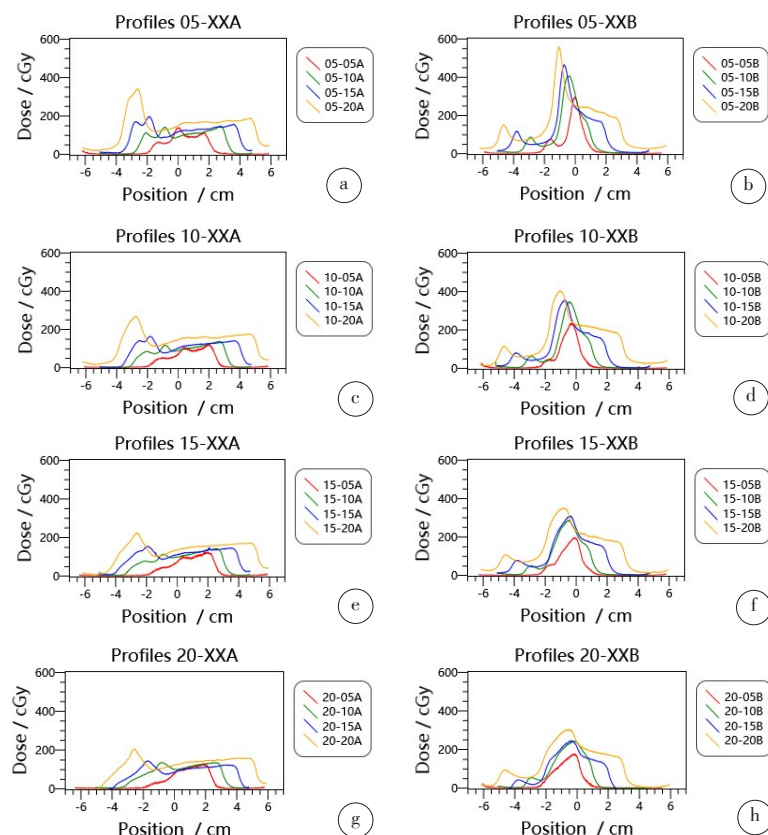


图5 相同射野宽度下不同叶片速度的射野剂量分布对比

Fig.5 Comparison of profiles with the same field width and different leaf velocities

The 4 rows in Fig.5 were the comparisons between mode A (left) and B (right) with the field width of 5, 10, 15, 20 mm, respectively.

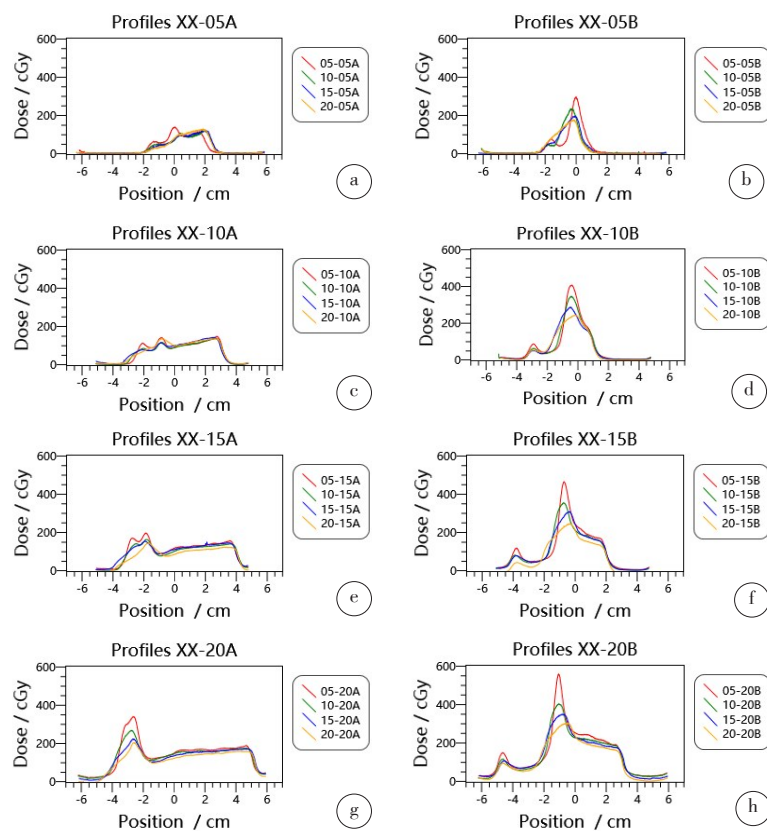


图6 相同叶片速度下不同射野宽度的射野剂量分布对比

Fig.6 Comparison of profiles with the same leaf velocity and different field widths

The 4 rows in Fig.6 were the comparisons between mode A (left) and B (right) with the leaf velocity of 5, 10, 15, 20 mm/s, respectively.

(Superior-Inferior)方向,其次是LR(left-Right)方向,最后是AP(Anterior-Posterior)方向。习勉等^[16]通过4DCT对腹部器官的研究显示腹部器官受到呼吸运动的影响主要为SI方向,最大幅度不超过11 mm。Brandner等^[17]应用4DCT对13例患者进行腹部呼吸运动度的研究,显示肝、脾、左右肾脏在头足方向的移动度分别达到13、13、11、13 mm。无论是哪种方向的运动,都会造成剂量学上的差异。当呼吸运动的方向与射野照射方向一致(或相反)时,由于照射部位除射野边缘外始终处于照射野内,因此剂量差异较小;当呼吸运动方向与叶片方向垂直时,由于SW射野中相邻叶片的剂量贡献,会对剂量波动进行补偿;而当呼吸运动方向与叶片方向一致(或相反)时,由于照射部位会脱离或追随照射野,造成的剂量波动将最为显著。而在治疗计划设计时叶片方向通常会在患者横断面上运动。由于乳腺部位的特殊性,最近Hirata等^[18]研究发现乳腺受呼吸运动影响的位移幅度为6~15 mm,主要运动方向为AP方向。再根据乳腺癌放疗时,射野通常处于患者两侧,因此本文选用AP方向来研究呼吸运动对SW射野剂量学最大潜在影响。

结合上文结果,射野叶片运动方向与呼吸运动吸气时的方向一致时影响幅度和范围均较小,因此治疗计划设计时建议尽量使叶片与肿瘤在呼吸运动吸气时方向一致,如治疗乳腺癌时(仰卧),当机架处于患者两侧时,应使得叶片沿患者AP方向运动。

窄束野的射野宽度增大可以有效地减小射野内剂量波动幅度及范围,因此建议SW模式下射野的最小射野宽度应大于5 mm,尽可能大于10 mm。尽管设置最小射野宽度会增加治疗计划设计的难度,但是仍然是可以接受的。而叶片速度的减小可以有效地抑制剂量分布的波动。

田源等^[4]研究表明可结合临床需求使用大野照射贡献主要剂量,适当补以调强射野的方式来达到剂量调制的目的;既可以保证单次照射剂量的稳定性,也可以充分利用调强技术的剂量调制能力。但是对于靶区较小或与危及器官邻近的肿瘤,呼吸运动会使得剂量偏离靶区。可使用呼吸管理技术如呼吸门控技术^[19]或靶区跟踪技术^[20-21]等减少剂量分布的不确定性。

虽然在临床治疗中,最为关心的是患者的整个疗程治疗结束后的剂量分布,很少直接关注单个子野的剂量分布。但是临床上依然希望患者在治疗过程中受到稳定的照射。本文研究得到的射野照射幅度增幅值、最大剂量增幅值、最小剂量增幅值等并非

患者疗程结束后实际的值,而是患者在治疗过程中呼吸运动对剂量分布产生的潜在影响值,会对剂量分布产生不确定性。通过研究发现并减少这些潜在影响将有助于提高整个疗程结束后剂量分布的稳定性和精确性,从而使得临床上可以将重心放在患者的整个疗程治疗结束后的剂量分布情况。当然实际临床治疗中照射野的射野宽度、叶片速度对患者全疗程的剂量影响仍需要做进一步的研究。呼吸运动对剂量学影响的因素有很多,本文仅针对射野宽度、叶片速度等因素对剂量学的影响进行研究,对于患者的呼吸幅度与频率等因素对剂量学的影响还需要做进一步研究。

4 结 论

本研究通过使用胶片在呼吸模体驱动下在不同射野宽度和不同叶片速度下的剂量分布进行对比,发现射野宽度小、叶片速度高对剂量分布的影响最为显著。在设计SW模式下的计划时可以考虑加大射野宽度和(或)降低叶片速度的方式来减少运动对剂量分布的影响;而患者也可以采用浅呼吸,或使用呼吸控制装置来有效地减小剂量的波动幅度。

【参考文献】

- [1] CARLSSON F. Combining segment generation with direct step-and-shoot optimization in intensity-modulated radiation therapy[J]. Med Phys, 2008, 35(9): 3828-3838.
- [2] VORWERK H, WAGNER D, HESS C F. Impact of different leaf velocities and dose rates on the number of monitor units and the dose-volume-histograms using intensity modulated radiotherapy with sliding-window technique[J]. Radiat Oncol, 2008, 3: 31.
- [3] LAFOND C, JOUYAUX F, BELLEC J, et al. Which IMRT? From "step and shoot" to VMAT: physicist point of view[J]. Cancer Radiother, 2010, 14(6-7): 539-549.
- [4] 田源, 马攀, 门阔, 等. 基于VMAT的乳腺癌保乳术后全乳混合调强技术的建立与评价[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2016, 25(7): 728-732. TIAN Y, MA P, MEN K, et al. Development and evaluation of whole breast irradiation with volumetric modulated arc therapy-based hybrid intensity-modulated radiotherapy after breast conserving surgery for breast cancer[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2016, 25(7): 728-732.
- [5] RIOU O, REGNAULT D, AZRIA D, et al. Volumetric modulated arctherapy (VMAT) compared with sliding window intensity-modulated radiotherapy (IMRT) for whole pelvis irradiation (WPI) of locally advanced prostate cancer (LAPC)[J]. J Clin Oncol, 2012, 30(5): 171.
- [6] GHOLAMPOURKASHI S, VUJICIC M, BELEC J, et al. Experimental verification of 4D Monte Carlo simulations of dose delivery to a moving anatomy[J]. Med Phys, 2017, 44(1): 299-310.
- [7] DUNN L, KRON T, JOHNSTON P N, et al. A programmable motion phantom for quality assurance of motion management in radiotherapy[J]. Australas Phys Eng Sci Med, 2012, 35(1): 93-100.
- [8] ROBATJAZI M, MAHDAVI S R, TAKAVR A, et al. Application of

- Gafchromic EBT2 film for intraoperative radiation therapy quality assurance[J]. *Phys Med*, 2015, 31(3): 314-319.
- [9] 张月美, 李光俊, 白龙, 等. 辐射显色胶片剂量仪在放射治疗中的应用进展[J]. *中国医学物理学杂志*, 2018, 35(6): 638-642.
- ZHANG Y M, LI G J, BAI L, et al. Implementation and development of radiochromic film dosimeter in radiotherapy [J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2018, 35(6): 638-642.
- [10] Elekta. RTPConnect Interface Specification[Z]. 2014.
- [11] GHOLAMPOURKASHI S, VUJICIC M, BELEC J, et al. Experimental verification of 4D Monte Carlo simulations of dose delivery to a moving anatomy[J]. *Med Phys*, 2017, 44(1): 299-310.
- [12] 葛宁, 韩栋梁, 辜石勇. 辐射自显影胶片EBT2在单次曝光与多次曝光条件下的剂量学研究[J]. *中国医学物理学杂志*, 2015, 32(4): 595-598.
- GE N, HAN D L, GU S Y. Dosimetric study on autoradiography films EBT2 under single-exposure and multi-exposure[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2015, 32(4): 595-598.
- [13] GANAPATHY K, KURUP P G, MURALI V, et al. A study on comparison of Gafchromic EBT2 film response under single and cumulative exposure conditions[J]. *J Med Phys*, 2013, 38(4): 173-177.
- [14] CARRASCO M A, PERUCHA M, LUIS F J, et al. A comparison between radiochromic EBT2 film model and its predecessor EBT film model[J]. *Phys Med*, 2013, 29(4): 412-422.
- [15] 胡逸民. 肿瘤放射物理学[M]. 北京: 原子能出版社, 1999: 659.
- HU Y M. Radiation oncology physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1999: 659.
- [16] 刁勉, 刘孟忠, 李巧巧, 等. 基于4DCT的腹部器官呼吸运动分析[J]. *癌症*, 2009, 28(9): 989-993.
- XI M, LIU M Z, LI Q Q, et al. Analysis of abdominal organ motion using four-dimensional CT[J]. *Chinese Journal of Cancer*, 2009, 28(9): 989-993.
- [17] BRANDNER E D, WU A, CHEN H, et al. Abdominal organ motion measured using 4DCT[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2006, 65(2): 554-560.
- [18] HIRATA K, YOSHIMURA M, MUKUMOTO N, et al. Three-dimensional intrafractional internal target motions in accelerated partial breast irradiation using three-dimensional conformal external beam radiotherapy[J]. *Radiother Oncol*, 2017, 124(1): 118-123.
- [19] SANTORO J P, YORKE E, GOODMAN K A, et al. From phase-based to displacement-based gating: a software tool to facilitate respiration-gated radiation treatment[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2009, 10(4): 2982.
- [20] ISHIHARA Y, NAKAMURA M, MIYABE Y, et al. Development of a four-dimensional Monte Carlo dose calculation system for real-time tumor-tracking irradiation with a gimbaled X-ray head[J]. *Phys Med*, 2017, 35: 59-65.
- [21] MATSUO Y, UEKI N, TAKAYAMA K, et al. Evaluation of dynamic tumour tracking radiotherapy with real-time monitoring for lung tumours using a gimbal mounted linac[J]. *Radiother Oncol*, 2014, 112(3): 360-364.

(编辑:薛泽玲)