

胸部肿瘤专题

· 临床研究 ·

# 胸部肿瘤放疗中呼吸运动对偏中心处点剂量和面剂量的影响\*

柏晗, 夏耀雄, 刘旭红<sup>△</sup>, 陈飞虎, 鄢佳文, 朱思瑾, 李一江

650118 昆明, 云南省肿瘤医院/昆明医科大学第三附属医院/云南省癌症中心 放射治疗科

**[摘要]** 目的: 评估呼吸运动的幅度、频率对放疗计划中偏中心处物理剂量产生影响的程度。方法: 入组肺癌患者 12 例, 四维 CT 定位, 最大密度投影确定内大体肿瘤 (internal gross target volume, IGTV), 外扩临床靶区 (clinical target volume, CTV)、计划靶区 (planning target volume, PTV), 而后设计调强放疗物理计划。将计划移植到四维程控运动模体 QUASAR 上生成模体计划, 而后在 QUASAR 上以振幅为 0、3、6、8、10、15、20 mm 和频率为 15、20F/min 做“模拟呼吸运动”的条件下, 对模体计划偏中心处的点剂量和面剂量进行测量, 比较分析测量的点剂量和面剂量与计划输出的差异。结果: 偏中心处剂量的偏差与幅度有成正比趋势, 频率对点剂量的影响很小; 当振幅 > 8 mm, 平面剂量的  $\gamma$  通过率 (3mm, 3%, 10% 的标准) < 60%, 剂量偏差大。结论: 当振幅  $\geq$  8 mm 时, 振幅对偏中心处剂量的影响很大, 受呼吸运动影响面剂量  $\gamma$  通过率降低了 30%。

**[关键词]** 肺癌; 四维放疗计划; 偏中心; 点剂量验证; 面剂量验证

**[中图分类号]** R730.55; R734.2 **[文献标志码]** A doi:10.3969/j.issn.1674-0904.2020.09.005

**引文格式:** Bai H, Xia YX, Liu XH, et al. Impact of respiratory motion on point and planar radiation dose for thoracic tumor at off-center location [J]. J Cancer Control Treat, 2020, 33(9): 753-759. [柏晗, 夏耀雄, 刘旭红, 等. 胸部肿瘤放疗中呼吸运动对偏中心处点剂量和面剂量的影响 [J]. 肿瘤预防与治疗, 2020, 33(9): 753-759.]

## Impact of Respiratory Motion on Point and Planar Radiation Dose for Thoracic Tumor at Off-Center Location

Bai Han, Xia Yaoxiong, Liu Xuhong, Chen Feihu, Yan Jiawen, Zhu Sijin, Li Yijiang

Yunnan Cancer Hospital &amp; The Third Affiliated Hospital of Kunming Medical University &amp; Yunnan Cancer Center, Kunming 650118, Yunnan, China

**Corresponding author:** Liu Xuhong, E-mail: cqxlxh@sina.com

This study was supported by grants from Sciences &amp; Technology Department of Yunnan Province and Kunming Medical University [NO. 2019FE001 (-224)].

**[Abstract]** **Objective:** To evaluate the impact of the amplitude and frequency of respiratory movement on the physical radiation dose at off-center location. **Methods:** A total of 12 patients with lung cancer were enrolled. Internal gross target volume, clinical target volume and planning target volume were determined by four-dimensional computed tomography and maximum density projection; and then IMRT plan was designed for every patient. We transplanted plans into a four dimensional QUASAR phantom, and generated a phantom plan. Point and planar radiation dose at off-center location were measured by the QUASAR phantom when patients breathed with amplitude of 0, 3, 6, 8, 10, 15 or 20 mm and frequency of 15 or 20 f/min. Acquired data were compared with planned output. **Results:** At the off-center location, the deviation of point dose was proportional to the amplitude, and the frequency had little effect on point dose. When the amplitude was greater than 8 mm,

the  $\gamma$  pass rate of planar dose (3 mm, 3%, 10% standard) was less than 60%, which was a large dose deviation. **Conclusion:** When the amplitude is greater than 8 mm, the amplitude has a great influence on the dose at the off-center location, the  $\gamma$  pass rate of planar dose affected by respiratory

**[收稿日期]** 2020-04-13 **[修回日期]** 2020-05-23

**[基金项目]** \* 云南省科技厅-昆明医科大学应用基础研究联合专项资金项目 [编号: 2019FE001 (-224)]

**[通讯作者]** <sup>△</sup> 刘旭红, E-mail: cqxlxh@sina.com

movement has decreased by 30%.

[Key words] Lung cancer; 4DCT plan; Off-center location; Point dose verification; Planar dose verification

放射治疗是肺癌不可或缺的治疗手段,放疗要达到预期的效果,运动靶区的管控至关重要。四维CT(four-dimensional computed tomography, 4DCT)出现以前,对肺癌运动靶区管控的手段非常有限,主要通过外扩较大的边界来实现<sup>[1]</sup>。4DCT出现以后,定义内靶区(internal target volume, ITV)和设计4D计划,理论上能很好地保证靶区的覆盖<sup>[2-3]</sup>。但在实际的计划执行时,运动对计划剂量的扰动一定会导致实际剂量与计算剂量产生偏差<sup>[4]</sup>。以往的对该偏差的研究,所选择的研究位置多数为射束的聚焦中心,而对偏中心区位置的剂量偏差关注得不够。而偏中心区位置的剂量偏差可能是实际结果与预期不一致而导致毒副反应(例如放射性肺损伤)的重要原因。本课题组在前期肺癌4D放疗计划设计研究<sup>[5-6]</sup>的基础上,采用四维程控运动模体QUASAR对呼吸运动对偏中心处实际照射剂量的影响进行了测量,评估呼吸运动的幅度、频率对偏中心处放疗物理剂量产生影响的程度,为采用不同的呼吸运动管控技术提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 设备及材料

加拿大 Modus QA 公司生产的四维程控运动模体 Quasar: Quasar 模体是一个宽 30 cm、高 20 cm、长 12 cm 的椭圆形有机玻璃体模,模体偏中线一侧有 1 个圆孔可供插入 8 cm 直径的插件,圆孔的中心距离模体的几何中心 10 cm,插件提供 1 个 0.6cc 探头的

适配器和 6.0 cm × 12.0 cm 胶片适配器(图 1); Farmer 0.6cc 指型电离室,cafcchromic EBT3 免洗干胶片、医用胶片扫描仪、瓦里安 IX 加速器(6MV X 线,60 对叶片,中间 40 对叶片宽度为 5 mm,两边 20 对叶片宽度为 10 mm)和 Pinnacle3 计划系统。将带有指型电离室和胶片的 QUASAR 模体,在患者 CT 定位相同的条件下分别进行 CT 定位,获得 CT 图像传至物理师工作站,命名为 Quasar (point), Quasar (film) 备用。

### 1.2 研究方法

验证共入组 12 例肺癌患者,4DCT 扫描获取患者呼吸运动 10 个时相的 CT 序列图像,网络传至放射治疗计划系统(treatment planning system, TPS)。调强放疗(intensity-modulated radiation therapy, IM-RT)物理计划设计时,选取呼吸运动 20% 时相对应的 CT 序列作为主图像(在前期肺癌 4D 放疗计划设计研究时发现,20% 时相对应的 CT 序列上肺脏的体积,肺脏的物理密度和计划设计后得到的各项参数与 10 个时相的算术平均值最接近),其它 9 套 CT 序列作为确定内大体肿瘤(internal gross target volume, IGTV)(ITV)的配准图像。当患者计划的各项指标都达到临床要求后,将患者计划分别移植至 Quasar (point), Quasar (film) 模体生成新的模体计划 Qplan (point), Qplan (film)。2 个计划的 TPS 单次剂量及归一值保持一致,并输出 Farmer 0.6cc 指型电离室空腔区域内的剂量平均值 Dmean 和 cafcchromic EBT3 免洗干胶片所在的偏等中心处平面的剂量分布。

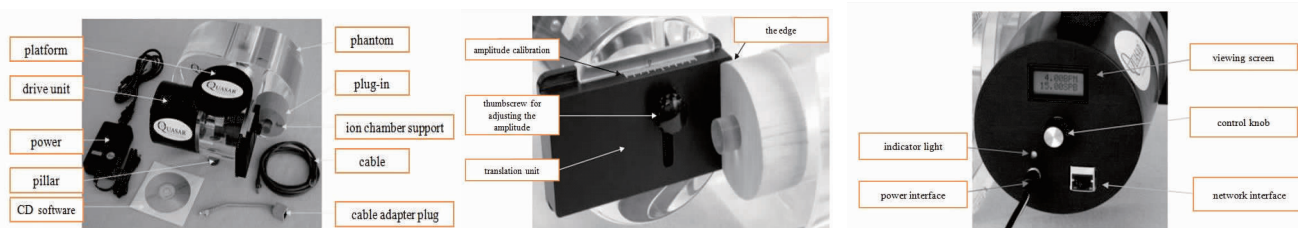


图 1 Quasar 模体及功能部件图

Figure 1. Quasar Phantom and Function Component

Panel A shows the Quasar phantom and common parts. The plug-in can be pulled out from the other side of the ellipsoid of human body shape for replacement. Point dose measurements can be carried out when the plug-in is an ion chamber support. Planar dose measurements can be carried out when the plug-in is a planar adapter. Panel B shows components for the adjustment to amplitude of Quasar phantom. The amplitude of the plug-in can be controlled by adjusting the thumbscrew on the translation unit. Panel C shows components for the adjustment to frequency of Quasar phantom. The frequency of the plug-in can be controlled by adjusting the control knob on the translation unit.

### 1.3 剂量验证

首先对直线加速器的多页光栅(multi-leave collimators, MLC)、输出剂量和剂量的平坦度、对称性做了严格质控检查,使其符合临床使用标准。然后,在等中心水下 1.0cm 处对胶片进行刻度(图 2),得到“剂量-灰度”曲线(图 3)。最后,进行点剂量验证和平面剂量验证。

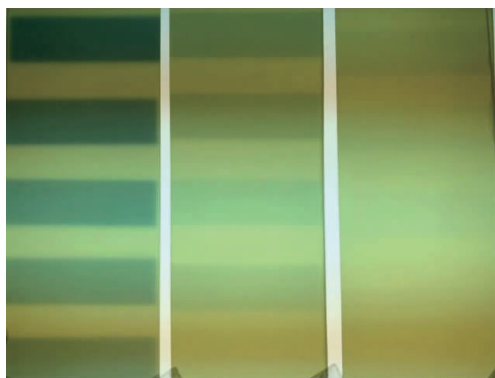


图 2 刻度用胶片图  
Figure 2. Film for Calibration

Width of Central Projection in the Jaw was 3.0 cm for each exposure, and the exposure dose was from 450.0 cGy to 5.0 cGy.

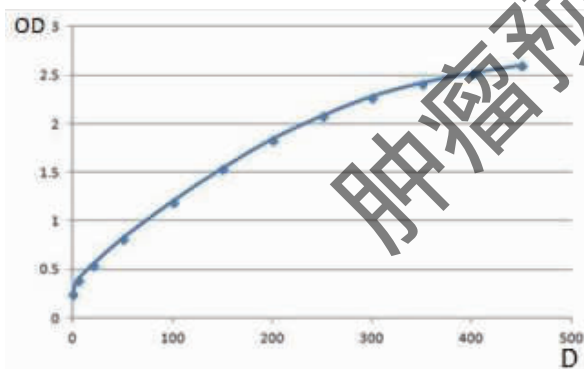


图 3 胶片的剂量(D)-光密度(OD)曲线图  
Figure 3. Sensitometric Curve of the Film

1.3.1 点剂量验证 第一步,将设计好的 IMRT 物理计划移植至 Quasar (point) 进行剂量计算后,读取 0.6cc 指型电离室空腔区域的剂量平均值 Dmean; 第二步,进行静态测量,保持“松木”适配器(插件)静止不动进行剂量测量,以检测 TPS 算法对 IMRT 计划剂量计算的准确性;第三步,调节“松木”适配器作“模拟呼吸运动”,运动的振幅依次为 3、6、8、10、15、20 mm,每个振幅下测量 2 个频率 15、20F/min 的剂量。

1.3.2 面剂量验证 第一步,将设计好的 IMRT 物

理计划移植至 Quasar (film) 进行剂量计算,并输出 cafcchromic EBT3 免洗干胶片所在的偏等中心处平面的剂量分布;第二步,调节“松木”适配器作“模拟呼吸运动”,运动的振幅依次为 3、6、8、10 mm,每个振幅下也测量 2 个频率 15、20F/min 的平面剂量。

### 1.4 比较指标

1.4.1 点剂量验证比较指标 测量与 TPS 输出的点剂量偏差由公式(1)计算得到,点剂量偏差的平均值由公式(2)得到。

$$\delta_i(\omega, A) = \frac{|D_m - D_c|}{D_c} \times 100\% \quad (1)$$

其中,  $i$  为第  $i$  个患者,  $D_m$  是点剂量的测量值,  $D_c$  为点剂量的计算值,  $\omega$  为某一频率,  $A$  为某一振幅。

$$\overline{\delta(\omega, A)} = \frac{\sum_i^N \delta_i(\omega, A)}{N} \quad (2)$$

其中,  $N$  为患者的总例数。

1.4.2 面剂量验证比较指标 当第  $i$  个病人的模体计划的插件以幅度  $A$  和频率  $\omega$  运动时,平面验证的通过率为  $\gamma_i(\omega, A)$ , 则  $\gamma(\omega, A)$  为该振幅和频率下  $N$  例通过率的平均值,表达式见(3)。

$$\overline{\gamma(\omega, A)} = \frac{\sum_i^N \gamma_i(\omega, A)}{N} \quad (3)$$

### 1.5 统计方法

采用 SPSS 20.0 对不同频率相同振幅下得到的点剂量偏差进行配对  $t$  检验,采用 Pearson 相关性分析,分析剂量偏差与振幅和频率的关系。

## 2 结果

### 2.1 点剂量验证结果

2.1.1 静止状态下点剂量偏差的结果 为了充分研究振幅和频率对剂量的影响,首先要检验在静止状态下,计算值与测量值之间的偏差。因此,当呼吸运动幅度  $A = 0$  时,测量到的剂量 ( $D_m$ ) 与 TPS 输出的探头所在位置处(探头)空腔体积内的剂量平均值 ( $D_c$ ) 比较,利用公式(1)可得到静止状态下剂量偏差的百分数(表 1)。

2.1.2 点剂量偏差随振幅和频率的变化 改变呼吸运动幅度  $A$  和频率  $\omega$ , 比较  $D_m$  与  $D_c$ , 利用公式(1)计算出偏差的百分数(表 2)。对振幅和偏差求 Pearson 系数,分别得到在 15F/min 和 20F/min 频率下的  $r_1 = 0.990$  和  $r_2 = 0.989$ ; 分别将不同频率相同振幅下得到的偏差进行配对  $t$  检验,  $P > 0.05$ 。这说明点剂量的偏差与振幅相关,与频率无关。点剂量偏差随振幅和频率的变化如图 4 所示。

表 1 振幅 A=0 时 12 例患者的点剂量测量偏差结果

Table 1. Dosimetric Deviations in 12 Patients when Amplitude (A) =0

Dosimetric deviation	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11	No. 12
$\delta_i(\%)$	1.5	1.1	1.0	2.2	2.8	1.7	2.0	2.3	1.6	1.4	1.9	2.4

表 2 频率分别为 15F/min 和 20F/min 时不同振幅下 12 例患者的点剂量测量偏差结果(单位:%)

Table 2. Dosimetric Deviations in 12 Patients when Amplitude =15F/min or Amplitude =20F/min

Dosimetric	Deviation	No. 1 (%)	No. 2 (%)	No. 3 (%)	No. 4 (%)	No. 5 (%)	No. 6 (%)	No. 7 (%)	No. 8 (%)	No. 9 (%)	No. 10 (%)	No. 11 (%)	No. 12 (%)	$\delta \pm s$
15F/min	3mm	1.1	1.6	1.0	2.0	3.9	1.5	4.2	2.4	1.6	1.4	1.9	2.4	2.08 ± 0.98
	6mm	1.8	2.1	1.4	2.0	5.9	2.0	3.8	2.5	1.7	1.6	2.2	3.0	2.50 ± 1.20
	8mm	3.0	4.1	2.8	3.6	7.3	3.4	5.5	3.8	2.9	2.6	3.4	4.1	3.88 ± 1.27
	10mm	4.6	3.9	3.3	4.0	6.8	4.2	6.6	4.2	3.3	3.6	4.6	4.0	4.43 ± 1.09
	15mm	6.4	5.9	5.2	6.1	8.6	5.6	8.1	4.5	4.1	4.9	5.7	6.1	5.93 ± 1.27
	20mm	9.8	7.3	6.0	8.8	10.1	6.3	9.6	5.7	4.8	4.9	6.7	6.0	7.17 ± 1.84
20F/min	3mm	1.2	1.5	1.2	1.8	4.0	1.6	4.0	2.0	1.8	1.6	2.0	2.3	2.08 ± 0.91
	6mm	2.0	2.0	1.5	1.9	4.9	1.8	3.8	2.6	1.8	1.8	2.3	3.0	2.45 ± 0.96
	8mm	3.1	3.8	3.0	3.7	6.9	3.4	6.0	3.6	3.0	2.9	3.0	3.8	3.85 ± 1.22
	10mm	4.6	4.0	3.5	3.9	6.5	4.0	6.8	4.5	3.0	3.8	4.6	5.1	4.53 ± 1.09
	15mm	5.8	6.0	5.3	6.0	7.8	5.5	7.8	4.8	4.2	5.1	5.6	6.0	5.83 ± 1.02
	20mm	9.5	7.2	6.3	9.1	9.8	7.2	8.6	6.3	5.0	5.6	6.3	7.1	7.33 ± 1.51

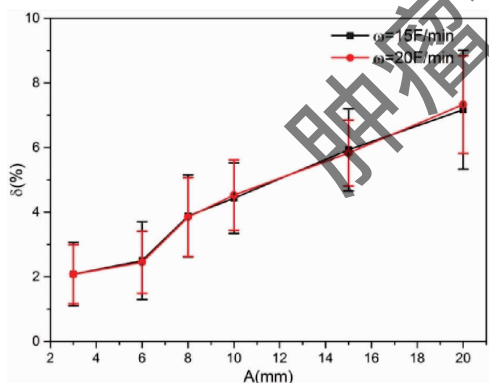


图 4 点剂量的偏差随振幅和频率的变化图  
Figure 4. Point Dose Deviated with Amplitude and Frequency

动幅度为 0 时,采用 3 mm,3.0%,10% 的  $\gamma$  分析标准分析干胶片测得的剂量与 TPS 输出的胶片所在位置处的剂量, $\gamma$  的(绝对)通过率详见表 3。

2.2.2 面剂量偏差随振幅和频率的变化 根据运动状态下点剂量的偏差趋势,随着振幅的变大偏差也变化。于是,在验证运动状态下的平面剂量时,只测量了振幅为 3,6,8,10mm 时的偏差, $\gamma$  的通过率详见表 4。对振幅和偏差求 Pearson 系数,分别得到在 15F/min 和 20F/min 频率下的  $r_{11} = -0.968$  和  $r_{12} = -0.964$ 。

分别将不同频率相同振幅下得到的  $\gamma$  通过率进行配对  $t$  检验, $P > 0.05$ 。说明面剂量的偏差与振幅相关,与频率无关。

## 2.2 面剂量验证结果

### 2.2.1 静止状态下面剂量偏差的结果 当呼吸运

表 3 振幅为 0 时 12 例患者的面剂量  $\gamma$  通过率

Table 3.  $\gamma$  Pass Rate of Planar Dose in 12 Patients when the Amplitude Range was between 0 and 12

$\gamma$ pass rate	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11	No. 12
$\gamma_i(\%)$	90.3	84.6	91.2	78.6	80.0	92.1	83.8	75.4	80.9	92.3	78.5	83.3

2.2.3 面剂量验证例举 平面验证结果例举(图 5、6)分别展示了 Pat. 3 和 Pat. 12 在频率为 15F/min,呼吸运动幅度为 3.0mm 时,TPS 输出的平面剂量(图的上半部分)与实测的平面剂量(图的下半部

分)的分布情况。Pat. 3 的  $\gamma$ (绝对)通过率是同组(频率为 15F/min,呼吸运动幅度为 3.0 mm 时)最高的,为 90.2%;Pat. 12 的  $\gamma$ (绝对)通过率是同组最高的,为 72.1%。

表 4 频率分别为 15F/min 和 20F/min 时不同振幅下 12 例患者面剂量的  $\gamma$  通过率(单位:%)

Table 4.  $\gamma$  Pass Rates of Planar Dose in 12 Patients when Amplitude = 15F/min or Amplitude = 20F/min

$\gamma$ pass rate		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11	No. 12	$\delta \pm s$
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
15F/min	3mm	86.5	85.0	90.2	75.4	79.0	89.7	80.0	75.1	75.4	90.2	73.2	72.1	81.0 $\pm$ 6.7
	6mm	76.4	80.1	75.3	72.2	67.4	81.6	65.4	60.9	63.7	79.9	78.5	64.4	72.1 $\pm$ 7.1
	8mm	63.3	55.2	50.2	49.5	50.8	60.0	54.7	40.3	45.1	42.3	44.4	40.4	49.7 $\pm$ 7.2
	10mm	31.6	40.0	38.9	39.8	35.7	42.1	40.5	42.6	48.3	30.6	48.9	42.1	40.1 $\pm$ 5.3
20F/min	3mm	87.4	78.9	86.3	76.7	76.6	90.0	81.2	70.8	75.2	89.9	75.1	70.8	79.9 $\pm$ 6.7
	6mm	77.5	82.2	74.4	73.6	70.4	78.7	68.2	63.9	67.3	74.4	76.8	62.1	72.5 $\pm$ 5.9
	8mm	56.3	50.4	49.2	50.5	44.8	55.5	57.4	53.3	45.9	43.2	56.4	43.4	50.5 $\pm$ 5.1
	10mm	33.9	48.0	36.9	41.8	32.7	46.6	42.9	40.8	48.7	37.6	38.9	46.7	41.3 $\pm$ 5.2

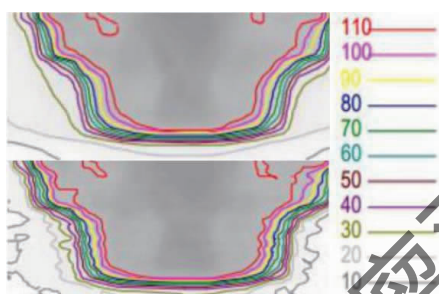


图 5 Pat. 3 TPS 输出的与实测的平面剂量对比  
Figure 5. Comparison between Treatment Planning System-Calculated and Measured Dose Based on Data of No. 3 Patient

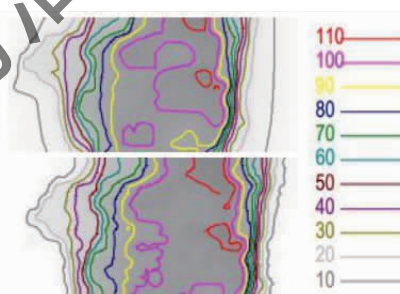


图 6 Pat. 12 TPS 输出的与实测的平面剂量对比  
Figure 6. Comparison between Treatment Planning System-Calculated and Measured Dose Based on Data of No. 12 Patient

### 3 讨论

肺癌放疗中的一个重要问题是,靶区和危及器官的大幅度周期运动会导致计算剂量与实际剂量间产生剂量差异。Jiang 等<sup>[7]</sup>利用振幅  $A = 1.0$  cm,频率  $\omega = 15$  F/min 的运动平台模拟肺脏的运动,在 300 MU/min 和 500 MU/min 剂量率下,分别对 IM-RT 放疗计划的等中心(isocenter, ISO)附近的点的剂量进行了验证,发现单野的剂量偏差会高达 30%,单次的剂量偏差达到了 8%,但如果对 30 次剂量进行测量发现剂量偏差降至 2% 以下。该研究结果反映出呼吸运动对 IMRT 的实际照射剂量会产生很大的影响,但影响呈现出“正负相消”的特点,偏大与偏小随机发生,多次测量后平均,该偏差就很

小了。当然,对于分次数比较少的大分割,例如立体定向放疗或立体定向放射外科而言,我们通常选用的一些呼吸运动管理办法,例如 4DCT 引导下定义出 ITV 或呼吸门控治疗等<sup>[8]</sup>,会减少呼吸运动带来的剂量误差,因为基于这些管理办法设计的放疗计划保证了靶区总是在处方剂量(参考剂量)包绕的空间内运动,靶区接受的剂量总会  $\geq$  处方剂量(参考剂量);对于肺的剂量,通常采用的管控办法是基于 4DCT 取平均,平均剂量在 4DCT 10 时相中的值或直接采用平均 CT 值来进行计划的剂量计算<sup>[9]</sup>。Duan 等<sup>[10]</sup>利用频率  $\omega = 15$ F/min 可在纵向(振幅  $A = 0.75$  cm)和横向(振幅  $A = 0.25$  cm)均发生正弦运动的模体模拟呼吸运动,并用 0.125cc 的电离室和胶片对点面剂量进行了测量,发现单野的点剂量

偏差范围为  $-11.7\% \sim 47.8\%$ , 单次的剂量偏差范围为  $-1.7\% \sim 3.5\%$ ; 当模体处于静止状态或呼吸门控状态下时, 测得的平面剂量分布和 DVH 与 TPS 输出的偏差很小, 而模体处于自由运动状态下时, 测得的偏差会变大, 靶区的剂量偏差会接近  $20\%$  ( $-18.8\% \sim 19.7\%$ )。这一研究结果再一次验证了呼吸运动对剂量的影响呈现出统计平均的这一特点, 但也提示不加控制的自由呼吸会对剂量产生重大影响。显见, 这 2 项研究对剂量偏差的考量主要还是集中在射束的中心, 即靶区所在位置, 而对偏中心的危及器官所在的位置关注得不够。

因此, 本研究采用 Quasar 模体模拟呼吸运动, 测量了在不同幅度和频率下偏中心处点剂量和面剂量的绝对偏差。模体在静止时, 测量到的偏差反映了计算机系统本身的计算误差或这种测量方法本身的缺陷导致的误差, 见表 1 和表 3, 这些误差与运动的幅度和频率是无关的。表 1 中的数据反映, 该研究使用的计划系统的计算误差  $< 3.0\%$ , 这是一个可以接受的计算误差<sup>[11-13]</sup>。表 3 中的  $\gamma$  通过率, 最小值是第 8 例患者, 为  $75.4\%$ , 影响胶片验证通过率的 因素很多也很复杂, 诸如扫描仪的质量、扫描时电压的稳定性、胶片制造的工艺条件等等<sup>[14-15]</sup>。但在本研究中, 影响  $\gamma$  通过率的主要原因是胶片所处的偏中心位置, 偏中心位置的绝对剂量随患者的呼吸变化很大。因此, 应当将胶片的通过率与点剂量的验证结果结合起来考察, 第 8 例患者的点剂量偏差为  $2.3\%$  ( $< 3.0\%$ )。表 2 中的数据反映, 点剂量的偏差随振幅变大而变大, 与频率几乎无关, 如图 3 所示。当 Quasar 的插件运动时, 插件携带的探头探测的是运动空间内多个点剂量的平均值, 即  $D_m$ , 并不是 TPS 输出的 CT 片上的探头所在点的剂量值  $D_c$ ,  $D_m$  与  $D_c$  偏差的大小, 取决于探头运动空间内剂量的均匀性, 若运动空间内的剂量均匀, 侧偏差较小; 反之, 则偏差较大。当 Quasar 的插件振幅变大时, 意味着探头运动空间变大, 这其实是在降低空间内剂量的均匀性, 因此偏差会随插件振幅变大而变大。频率的改变带来的是测量次数和测量速度的改变, 并不能带来运动空间的改变, 因此偏差平均值几乎不会随频率而变化。

表 4 展现的是平面剂量的验证结果,  $\gamma$  通过率也随振幅的增大而降低, 与频率几乎无关, 产生这一结果原因同上述产生点剂量偏差随振幅变大而变大与频率几乎无关的原因相同。表 4 展现的验证结果比报道的结果<sup>[16-17]</sup>低, 无论是在静止状态还是运动

状态, 这其中的一个主要原因是本研究的测量位置偏朝模体的一侧, 测量位置并不处于射野聚焦的中心, 即靶区处, 而是处在低剂量区, 且剂量不均匀。

## 4 结 论

点剂量的测量结果, 当  $A = 8 \text{ mm}$  时偏差  $\delta$  的平均值  $> 3.0\%$ , 和面剂量  $\gamma$  通过率的平均值  $50\%$  左右, 可以得出当  $A \geq 8 \text{ mm}$  时, 受呼吸运动影响面剂量  $\gamma$  通过率降低了  $30\%$ 。

**作者声明:** 本文全部作者对于研究和撰写的论文出现的不端行为承担相应责任; 并承诺论文中涉及的原始图片、数据资料等已按照有关规定保存, 可接受核查。

**学术不端:** 本文在初审、返修及出版前均通过中国知网 (CNKI) 科技期刊学术不端文献检测系统的学术不端检测。

**同行评议:** 经同行专家双盲外审, 达到刊发要求。

**利益冲突:** 所有作者均声明不存在利益冲突。

**文章版权:** 本文出版前已与全体作者签署了论文授权书等协议。

## [参考文献]

- [1] Lad T. The comparison of CAP chemotherapy and radiotherapy to radiotherapy alone for resected lung cancer with positive margin or involved highest sampled paratracheal node (stage IIIA). *LCSG 791* [J]. *Chest*, 1994, 106 (S6) : 302S-306S.
- [2] Cole AJ, O'Hare JM, McMahon SJ, *et al.* Investigating the potential impact of four-dimensional computed tomography (4DCT) on toxicity, outcomes and dose escalation for radical lung cancer radiotherapy [J]. *Clin Oncol (R Coll Radiol)*, 2014, 26 (3) : 142-150.
- [3] Li F, Li J, Zhang Y, *et al.* Geometrical differences in gross target volumes between 3DCT and 4DCT imaging in radiotherapy for non-small-cell lung cancer [J]. *J Radiat Res*, 2013, 54 (5) : 950-956.
- [4] Matsugi K, Nakamura M, Miyabe Y, *et al.* Evaluation of 4D dose to a moving target with Monte Carlo dose calculation in stereotactic body radiotherapy for lung cancer [J]. *Radiol Phys Technol*, 2013, 6 (1) : 233-240.
- [5] 李政良, 柏哈, 李文辉, 等. 4DCT 下肺癌大体肿瘤的变化及相关因素分析 [J]. *中国医学物理学杂志*, 2016, 33 (2) : 208-212.
- [6] 柏哈, 夏耀雄, 李政良, 等. 基于四维 CT 下胸部肿瘤调强计划中心和食道的剂量评估 [J]. *中国医学物理学杂志*, 2016, 33 (3) : 293-296.
- [7] Jiang SB, Pope C, Jarrah KM, *et al.* An experimental investigation on intra-fractional organ motion effects in lung IMRT treat-

- ments[J]. *Phys Med Biol*, 2003, 48(3):1773-1784.
- [8] 刘穆平, 初磊, 邓煜, 等. 呼吸门控技术以及非均整模式应用于早期非小细胞肺癌小病灶立体定向放疗的优势? [J]. *肿瘤预防与治疗*, 2019, 3(8):707-710.
- [9] Zvolanek K, Ma R, Zhou C, *et al*. Still equivalent for dose calculation in the Monte Carlo era? A comparison of free breathing and average intensity projection CT datasets for lung SBRT using three generations of dose calculation algorithms[J]. *Med Phys*, 2017, 44(5):1939-1947.
- [10] Duan J, Shen S, John B, *et al*. Dosimetric and radiobiological impact of dose fractionation on respiratory motion induced IMRT delivery errors: A volumetric dose measurement study[J]. *Med Phys*, 2006, 33(5):1380-1387.
- [11] 黄晓延, 黄邵敏, 张黎, 等. 三维治疗计划系统的剂量学验证 [J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2006, 15(6):496-500.
- [12] 吴仕章, 陈进琥, 李振江, 等. IMRT 计划剂量验证 924 例结果分析[J]. *中华肿瘤防治杂志*, 2018, 25(18):1323-1327.
- [13] Ezzell GA, Burmeister JW, 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.
- [14] 郑瑞亚, 黄敏霞, 陈维军. 基于辐射自显影胶片 EBT2 的剂量验证系统剂量响应特征及稳定性分析[J]. *肿瘤学杂志*, 2015, 21(1):74-77.
- [15] 张可, 谢玲灵, 张中柱, 等. 多层放射性铬胶片剂量验证系统的研制[J]. *中国医学装备*, 2014, 11(2):1-4.
- [16] Casanova BV, Pasquino M, Russo G, *et al*. Dosimetric characterization and use of GAFCHROMIC EBT3 film for IMRT dose verification[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2013, 14(2):158-171.
- [17] Xie K, Sun HF, Lin T, *et al*. IMRT dose verification considering passing rate and respiratory motion[J]. *Oncol Lett*, 2018, 16(4):963-969.

· 读者 · 作者 · 编者 ·

### 《肿瘤预防与治疗》2021 年征订启事

《肿瘤预防与治疗》系《中国科技论文统计源期刊》(即《中国科技核心期刊》), CN51-1703/R, ISSN1674-0904, 大 16 开, 月刊, 每月 25 日出版。

本刊主要报道国内外肿瘤防治研究领域的新成果、新进展。开设栏目有专家述评、国际交流、应用基础研究、临床研究、临床经验与技术交流、肿瘤流行病学、综述与讲座、短篇与个案报道等。所征稿件内容: 肿瘤流行病学、基础研究、肿瘤病理、临床研究、临床诊治经验、病例报告、国外研究动态等。

敬请读者及作者踊跃投稿, 欢迎订阅, 每期定价 15.00 元, 全年订价 180.00 元。需订阅者请到当地邮局订阅, 邮发代号 62-142, 错过订阅时间可直接向编辑部订阅, 款汇至成都市武侯区人民南路四段 55 号《肿瘤预防与治疗》编辑部。

邮编: 610041; 电话: 028-85420233

E-mail: zlyfyzl@163.com; 网址: www.zlyfyzl.cn

欢迎订阅, 欢迎使用网上投稿。

本刊编辑部