

## M6 型射波刀立体定向放疗系统追踪肺部肿瘤的运动规律及影响因素的研究\*

牛泽乾 宋勇春 袁智勇 王境生 董洋 于旭耀 陈华明 田啸林

**摘要** 目的:探讨 M6 型射波刀立体定向放疗 (stereotactic radiotherapy, SRT) 系统追踪肺部肿瘤的运动规律及影响因素,为实施精准 SRT 肺部肿瘤提供参考依据。方法:回顾性分析天津医科大学肿瘤医院 2022 年 1 月至 2024 年 8 月 29 例采用 M6 型射波刀 SRT 系统肺追踪技术治疗的肺部肿瘤患者,统计患者的肿瘤位置、肿瘤体积、照射剂量、等剂量线、分割次数等资料。按照肺部肿瘤位置进行分类,采用 SPSS 26.0 软件分析肿瘤左右 (LFT/RGT, LR)、前后 (ANT/POS, AP)、头脚 (SUP/INF, SI) 方向的运动幅度,以  $\bar{x} \pm s$  表示,采用 *t* 检验进行组间比较。采用多元线性回归分析年龄、性别、肿瘤位置、肿瘤体积对肺部肿瘤运动幅度的影响。结果:19 例上肺的肿瘤,10 例下肺的肿瘤 LR、AP、SI 方向的运动幅度分别为 (3.5±1.8) mm、(5.3±1.7) mm、(7.3±5.4) mm; (3.1±1.6) mm 和 (4.5±2.2) mm、(12.2±4.4) mm。SI 方向上,下肺肿瘤和上肺肿瘤的运动幅度相比较,差异具有统计学意义 ( $P=0.0153$ )。LR、AP 方向上,两者差异无统计学意义 ( $P>0.05$ )。SI 方向上,肺部肿瘤的运动幅度受到肿瘤位置的影响 ( $P=0.035$ )。LR、AP 方向上,肺部肿瘤的运动幅度与性别、年龄、肿瘤位置、肿瘤体积因素无关。结论:不同位置、方向的肺肿瘤运动幅度受患者呼吸运动影响不同。SI 方向上,受到肿瘤位置的影响,下肺肿瘤运动幅度比上肺肿瘤运动幅度大。LR、AP 方向上,下肺肿瘤和上肺肿瘤的运动幅度接近,不受性别、年龄、肿瘤位置、肿瘤体积的影响。

**关键词** M6 型射波刀立体定向放疗 肺追踪技术 肺肿瘤 运动幅度 影响因素

doi:10.12354/j.issn.1000-8179.2025.20241261

## Study on the movement patterns and influencing factors of lung tumors tracked by M6 cyberknife stereoscopic radiotherapy system

Zeqian Niu, Yongchun Song, Zhiyong Yuan, Jingsheng Wang, Yang Dong, Xuyao Yu, Huaming Chen, Xiaolin Tian

Correspondence to: Yongchun Song; E-mail: [sych1977@qq.com](mailto:sych1977@qq.com)

Department of Radiotherapy, Tianjin Medical University Cancer Institute & Hospital, National Clinical Research Center for Cancer, Tianjin Key Laboratory of Cancer Prevention and Therapy, Tianjin's Clinical Research Center for Cancer, Tianjin 300060, China

This work was supported by Tianjin Medical Key Discipline (Specialty) Construction Project (No. TJYXZDXK-009A) and "358 Plan" Clinical Trial Fund of Tianjin Medical University Cancer Hospital (No. 358-2023-15)

**Abstract Objective:** To explore the movement patterns and factors influencing lung tumors tracked using the M6 cyberknife stereotactic radiotherapy (SRT) system and to provide a reference for the implementation of precise stereotactic radiotherapy for lung tumors. **Method:** A retrospective analysis was conducted on 29 patients with lung tumors who were treated using x-sight lung tracking technology and the M6 cyberknife SRT system at Tianjin Medical University Cancer Institute & Hospital, from January 2022 to August 2024. The tumor location and volume, irradiation dose, isodose line, and number of divisions were recorded. Lung tumor location and SPSS 26.0 software were used to analyze the movement amplitude of tumors in the left and right (LFT/RGT, LR) directions, the anterior-posterior (ANT/POS, AP) direction, and the superior-inferior (SUP/INF, SI) direction. The results are expressed as the mean±standard deviation ( $\bar{x} \pm s$ ) mm, and a *t*-test was used for inter-group comparisons. Multiple linear regression was used to analyze the effects of factors such as age, gender, tumor location (upper and lower lungs), and tumor volume on the amplitudes of the lung tumor movements. **Result:** The average motion amplitudes in the LR directions, AP direction, and SI direction of the tumor target areas were (3.5±1.8) mm, (5.3±1.7) mm, and (7.3±5.4) mm for the upper lung, based on 19 cases, and (3.1±1.6) mm, (4.5±2.2) mm, and (12.2±4.4) mm for the lower lung, based on 10 cases, respectively. There was a statistically significant difference ( $P=0.0153$ ) in the amplitude of movements between the lower and upper lung tumors in the SI direction. The lung tumor movement amplitude in the SI direction was influenced by tumor location ( $P=0.035$ ), and the movement amplitudes in the LR directions and the AP direction were not related to factors such as gender, age, tumor location, and tumor volume. **Conclusions:** The lung tumor

作者单位:天津医科大学肿瘤医院放疗科,国家恶性肿瘤临床医学研究中心,天津市"肿瘤防治"重点实验室,天津市恶性肿瘤临床医学研究中心(天津市300060)

\*本文课题受天津市医学重点学科(专科)建设项目(编号:TJYXZDXK-009A)和天津医科大学肿瘤医院"358 计划"临床试验基金项目(编号:358-2023-15)资助

通信作者:宋勇春 [sych1977@qq.com](mailto:sych1977@qq.com)

movement amplitudes for the different locations varied depending on the respiratory movement shown by the patient. In the SI direction, the movement amplitude of the lower lung tumors was greater than that of upper lung tumors, and this was due to tumor location effects. The movement amplitudes of the lower and upper lung tumors were similar in the LR directions and AP directions. Furthermore, movement amplitude was not affected by gender, age, tumor location, and tumor volume.

**Keywords:** M6 cyberknife stereotactic radiotherapy, lung tracking technology, lung tumor, movement amplitude, influencing factor

在肺癌患者治疗过程中,约有 70% 肺癌患者需要接受放射治疗。与传统放疗相比,立体定向放疗(stereotactic radiotherapy, SRT)能够延长患者生存期,并减少放疗并发症的发生率。SRT 已成为早期非小细胞肺癌的重要根治性手段,尤其在不可手术或拒绝外科手术的患者中,更是首选的治疗手段<sup>[1-2]</sup>。肺部肿瘤随着患者的呼吸同步运动,并且不同位置的肿瘤运动幅度不同。肺部肿瘤呼吸运动管理方法包括 4DCT 技术、呼吸门控技术、DIBH 技术、胸腹部加压技术、同步呼吸追踪技术<sup>[3-4]</sup>。M6 型射波刀 SRT 系统系统采用实时图像引导追踪技术和对运动的肺部肿瘤同步追踪技术,不仅能利用影像追踪定位系统精确地治疗全身各部位相对静态的肿瘤,也能利用独特的呼吸追踪系统对随呼吸运动的肺部肿瘤做同步动态修正,确保治疗肺部肿瘤靶区的精准度<sup>[5-6]</sup>。

M6 型射波刀 SRT 系统的肺追踪技术是一种无痛、不用植入金标、可直接追踪肺部肿瘤的方法。该技术可以利用正交 X 线影像,通过肺与实体肿瘤之间的密度差异准确计算肿瘤靶区的位置,实现精确追踪受人体呼吸运动影响的肿瘤,该项技术利用双侧球管 X 射线同步捕获肺部图像,并采集患者 15 个呼吸周期内的曝光点,生成患者的呼吸运动模型,建立 3 个追踪标记与肺部肿瘤的对应关系,引导放射刀的机械臂控制射线束与患者呼吸运动进行同步移动,治疗肺部肿瘤<sup>[7-8]</sup>。肿瘤运动幅度大小是由追踪中实际肿瘤运动幅度表示,用于指导 M6 型射波刀 SRT 时机械臂运动的幅度。患者身上放置的 3 个红外线标记点提供患者呼吸运动的频率,用于指导 M6 型射波刀 SRT 时机械臂运动的频率<sup>[9]</sup>。X-sight 肺追踪技术应满足下述条件:1)肿瘤尺寸:在所有轴上,肿瘤直径>15 mm;2)肿瘤形态:肿瘤应该具有清晰的边界和周围组织有鲜明的对比;3)肿瘤可视化:肿瘤靶区 45°影像板 A/B 图像上,至少有 1 侧不应被椎体、心脏等结构所遮挡。

本研究回顾性分析 29 例采用 M6 型射波刀 SRT 系统肺追踪技术治疗的肺部肿瘤患者,探索肺部肿瘤靶区的运动幅度及影响因素,为实施精准 SRT 肺部肿瘤提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 临床资料

回顾性分析 2022 年 1 月至 2024 年 8 月天津医

科大学肿瘤医院接受 M6 型射波刀 SRT 系统肺追踪技术治疗的 29 例(19 例上肺,10 例下肺)肺部肿瘤患者,其中男性 22 例,女性 7 例,中位年龄 72.7(57.0~89.0)岁。其中,包含 3 例肺鳞癌患者,2 例肺腺癌患者,24 例 PET-CT 临床诊断为肺癌患者。肿瘤靶区体积 5.58~61.83 cm<sup>3</sup>,处方剂量 5 000~6 000 cGy,等剂量线 68%~81%,分割次数 3~8 次。本研究经过本院医学伦理学委员会审批(批号:E20241186)并且全部患者均已签署知情同意书。

### 1.2 方法

肺部肿瘤患者接受 M6 型射波刀 SRT x-sight 肺追踪技术治疗时,在其呼吸运动模型中,能够记录到左右(LFT/RGT, LR)、前后(ANT/POS, AP)、头脚(SUP/INF, SI)方向肺部肿瘤的真实运动幅度大小。

### 1.3 统计学分析

采用 GraphPad Prism 8 和 SPSS 26.0 软件进行统计学分析。将肺部肿瘤患者按照肿瘤位置(上肺、下肺)进行分类,分别统计肿瘤靶区 LR、AP、SI 方向的运动幅度,以  $\bar{x} \pm s$  表示,应用 *t* 检验进行组间比较。采用多元线性回归分析年龄、性别、肿瘤靶区位置(上肺、下肺)、肿瘤靶区体积等因素对肺部肿瘤 3 个方向上运动幅度的影响。以  $P < 0.05$  为差异具有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 不同位置的肺部肿瘤运动幅度

19 例上肺的肿瘤,10 例下肺的肿瘤 LR、AP、SI 方向的运动幅度分别为(3.5±1.8)mm、(5.3±1.7)mm、(7.3±5.4)mm 和(3.1±1.6)mm、(4.5±2.2)mm、(12.2±4.4)mm。通过 *t* 检验分析,发现 SI 方向上,下肺肿瘤和上肺肿瘤的运动幅度相比较,差异具有统计学意义( $P=0.015$ ),而 LR、AP 方向上,两者差异无统计学意义( $P=0.547$  和 0.332),见表 1。

### 2.2 3 个方向上肺部肿瘤影响因素的多元线性回归分析

以肺部肿瘤在 LR、AP、SI 方向的运动幅度为因变量,以性别、年龄、身高、肿瘤位置、肿瘤体积为自变量,进行多元线性回归分析(检验数据均符合正态分布),Logistic 回归模型方程分别为: $y_1=7.137+0.267x_1-$

$0.042x_2-0.213x_3-0.026x_4; y_2=6.257+0.446x_1-0.013x_2-0.752x_3-0.006x_4; y_3=12.144-3.897x_1-0.075x_2+4.662x_3+0.057x_4$ 。  $y_1、y_2、y_3$  分别代表肺部肿瘤 LR、AP、SI 方向的运动幅度,  $x_1、x_2、x_3$  和  $x_4$  分别代表性别、年龄、肿瘤位置和肿瘤体积, 以  $\alpha=0.05$  作为检验水准。结果显示, 在 SI 方向上, 肺部肿瘤的运动幅度受到病灶位置的影响( $P=0.035$ ), 与性别、年龄等其他因素无关。LR、AP 方向, 显示肺部肿瘤的运动幅度与性别、年龄、肿瘤位置、肿瘤体积因素无关, 见表 2。

表 2 肺部肿瘤在各方向上各影响因素的多元线性回归分析

因素	LR方向				AP方向				SI方向			
	$\beta$	SE	$t$	$P$	$\beta$	SE	$t$	$P$	$\beta$	SE	$t$	$P$
性别	0.267	0.758	0.353	0.727	0.446	0.871	0.512	0.613	-3.897	2.238	-1.742	0.128
年龄	-0.042	0.036	-1.159	0.258	-0.013	0.042	-0.305	0.763	-0.075	0.107	-0.698	0.094
肿瘤位置	-0.213	0.705	-0.302	0.765	-0.752	0.810	-0.928	0.363	4.662	2.081	2.240	0.035
肿瘤体积	-0.026	0.020	-1.283	0.212	-0.006	0.023	-0.263	0.795	0.057	0.060	0.952	0.350

### 3 讨论

M6 型射波刀 SRT 系统的多叶光栅 (multi leaf collimator, MLC) 次级准直器系统, 对于多发小肿瘤靶区和复杂大肿瘤靶区, 从治疗计划设计到实际照射治疗, 可减少肿瘤患者治疗时间, 提高临床治疗工作效率, 同时肿瘤靶区的局部控制率更高, 不良反应更小<sup>[10-11]</sup>。X-sight 肺追踪技术可直接对患者肺部肿瘤进行呼吸运动追踪, 该技术集合肺部肿瘤靶区识别、肿瘤运动、呼吸追踪、同步照射等功能。在实时二维图像定位的指导下, 实时跟踪患者和目标在治疗过程中的呼吸运动, 自动校正肿瘤靶区位置, 真正实现实时动态图像引导放射治疗<sup>[12-14]</sup>。黎国全等<sup>[15]</sup>对 152 例 x-sight 肺追踪技术的肺部肿瘤患者采用偏移模式、调整跟踪范围、调整不确定性、二次脊柱追踪辅助定位和启用建议影像/主要参考影像进行优化处理, 比较优化前后射波刀治疗过程中 Synchrony 模型重建的频率, 发现肿瘤在上肺、直径较大患者优先选择 x-sight 肺追踪技术, 可以提高成功率。邱禄伟等<sup>[16]</sup>对 69 例肺部肿瘤患者进行模拟肺追踪技术, 显示 45 例患者实现肺追踪技术, 发现肿瘤直径大小 ( $OR=1.53, P=0.022$ )、肺部病灶位于上肺 ( $OR=4.5, P=0.015$ ), 更容易采用 x-sight 肺追踪技术。对于年龄大、身体状况差、有外科手术禁忌证且无法进行金标植入术、合适肿瘤大小和位置的肺部肿瘤患者, 可以选择 x-sight 肺追踪技术进行 M6 型放射刀 SRT 治疗。

Guo 等<sup>[17]</sup>选取 72 例肺部肿瘤分为肺追踪组和脊柱追踪组两组, 中位随访时间为 22 个月, 总缓解率分别为 93.33% 和 74.07%, x-sight 肺追踪组的短期局部控制率优于 x-sight 脊柱追踪组, 在肺下段肿瘤总缓解

表 1 肺部肿瘤靶区的运动幅度 ( $\bar{x} \pm s$ )

运动方向	肿瘤位置	运动幅度(mm)	$F$	$P$
LR	上肺	3.5±1.8	1.266	0.547
	下肺	3.1±1.6		
AP	上肺	5.3±1.7	1.675	0.332
	下肺	4.5±2.2		
SI	上肺	7.3±5.4	1.506	0.015
	下肺	12.2±4.4		

率分别为 100% 和 72.73%, 肺追踪组在肺叶下段的短期局部控制率优于 x-sight 脊柱追踪组, 在肺部肿瘤 (体积<15 mL、直径接近 3 cm) 的患者中, 总缓解率分别为 92.59% 和 70.59%, 采用 x-sight 肺追踪技术, 临床治疗优势更大。Bibault 等<sup>[18]</sup>分析 22 例采用射波刀 x-sight 肺追踪技术 SRT 的外周性肺部肿瘤患者, 肿瘤直径为 15 ~ 60 mm, 等剂量线为 84%, 剂量分割模式 60 Gy/3 F。局部肿瘤控制率为 100%, 其中 11 例患者完全缓解, 5 例患者部分缓解, 7 例患者疾病稳定。不良反应较低, 7 例患者发生 1 级肺炎, 显示出 x-sight 肺追踪技术可以提高肺部肿瘤的局部控制率, 减少肺炎等不良反应的发生。

朱六玲等<sup>[19]</sup>在射波刀 SRT 治疗过程中, 通过建立同步呼吸模型方法, 测量 3 个方向上左下肺金标的运动幅度分别为 (0.388±0.150)cm、(0.509±0.211)cm 和 (1.468±0.415)cm; 右下肺金标的运动幅度为 (0.379±0.977)cm、(0.446±0.150)cm 和 (1.500±0.550)cm, 这与本研究采用 M6 型射波刀 SRT 的患者, 下肺肿瘤的真实运动幅度一致。麻亚茹等<sup>[20]</sup>采用每次 SRT 前 4D-CBCT 图像扫描, 分析 15 例上肺和 15 例中下肺的非小细胞肿瘤患者, 获得 X 轴(左右)、Y 轴(上下)、Z 轴(前后)3 个方向的肿瘤运动幅度。发现上肺和中下肺肿瘤在 X ( $P=0.072$ )、Z ( $P=0.152$ ) 方向运动, 差异无统计学意义。X、Z 方向肿瘤运动幅度分别为 (0.17±0.12)cm、(0.25±0.14)cm。上肺和中下肺肿瘤在 Y 方向运动幅度分别为 (0.35±0.21)cm、(1.05±0.53)cm, 差异具有统计学意义 ( $P<0.001$ )。上肺和中下肺非小细胞肺癌在 X、Z 方向的肿瘤运动幅度无差异, 在 Y 方向的肿瘤运动幅度有较为明显的差异, 中

下肺明显大于上肺。通过分析 M6 射波刀立体定向放疗系统追踪肺部肿瘤的运动规律及影响因素,发现不同位置肺部肿瘤的运动幅度受患者呼吸运动影响不同。SI 方向上,下肺肿瘤的运动幅度比上肺肿瘤运动幅度大。LR、AP 方向上,下肺肿瘤和上肺肿瘤的运动幅度接近,不受性别、年龄、肿瘤位置和肿瘤体积的影响。在制定精准立体定向放射治疗肺部肿瘤的计划靶区中,具有一定的参考价值,以期提高肺部肿瘤的局部控制率,减少肺部正常组织的并发症。

X-sight 肺追踪技术是目前唯一一种可直接对患者肺部肿瘤进行呼吸运动追踪的技术。该技术集合了肿瘤靶区识别、肿瘤运动、呼吸追踪、同步照射等功能。在实时二维图像定位的指导下,实时追踪患者和肿瘤靶区在治疗过程中的呼吸运动,及时自动校正肿瘤靶区位置,真正实现实时动态图像引导放射治疗。对于随呼吸同步运动的肺肿瘤,能够减少肿瘤临床靶区的外放范围,可以增加肿瘤靶区的照射剂量,显著提高肿瘤的局部控制率,减少肺炎等不良反应的发生。在肺部肿瘤患者就诊时,根据肿瘤的大小、位置、是否有遮挡组织等,提前判断是否符合肺追踪技术的条件,可使建模的成功率最大程度的提高。

本文无影响其科学性与可信度的经济利益冲突。

#### 参考文献

- [1] 中国医师协会放射肿瘤治疗医师分会.早期非小细胞肺癌立体定向放射治疗指南[J].*国际肿瘤学杂志*,2022,49(1):1-11.
- [2] 中华医学会放射肿瘤治疗学分会,中国抗癌协会肿瘤放射治疗学专业委员会,中国医师协会放射治疗医师分会.早期非小细胞肺癌立体定向放疗中国专家共识(2019 版)[J].*中华肿瘤杂志*,2020,42(7):522-530.
- [3] 程光惠,赵红福,刘影.加速器为基础的体部立体定向放疗进展[J].*中华放射肿瘤学杂志*,2020,29(7):495-501.
- [4] 马佳怡.不同追踪方式在 M6 射波刀治疗肺肿瘤中的应用[J].*中文科技期刊数据库(引文版)医药卫生*,2022(7):252-254.
- [5] Xiao F, Chang Y, Zhang S, et al. Integrating CVH and LVH metrics into an optimization strategy for the selection of Iris collimator for Cyberknife Xsight lung tracking treatment[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2021, 22(1):210-217.
- [6] Sacino F, Jansen N, Mievis C, et al. Long term outcomes and lung function evolution of primary lung tumors treated with Cyberknife SABR[J]. *Radiother Oncol*, 2020, 152:S543-S544.
- [7] Moeckli R, Bailod A, Gibellieri D, et al. Dose indicator for CyberKnife image-guided radiation therapy[J]. *Med Phys*, 2020, 47(5): 2309-2316.
- [8] 赵鹏,苏秀军,王宇,等.医用射波刀系统的质量保证测试研究[J].*世界复合医学*,2022,8(1):73-77.
- [9] Chee LY, Tang C, Bydder S, et al. Clinical outcomes of primary lung cancer treated with cyberknife stereotactic body radiotherapy: A prospective cohort study[J]. *Resp Med*, 2017, 132:275-276.
- [10] 苏坤普,周德力,李林山,等.M6 型射波刀立体定向放疗系统的验收测试[J].*中国医学物理学杂志*,2023,40(7):814-821.
- [11] 王境生,徐新宇,薛志孝,等.M6 型射波刀立体定向放疗系统图像引导照射剂量研究[J].*中国肿瘤临床*,2023,50(18):941-945.
- [12] 赵瑞,林虎,李莎,等.射波刀治疗中追踪肿瘤边界缩放对肺追踪定位参数的影响[J].*医疗卫生装备*,2020,41(1):34-37.
- [13] 杨孝伟,景生华,顾莹,等.呼吸运动对射波刀 Synchrony 追踪目标定位精度的影响[J].*实用肿瘤杂志*,2021,36(5):444-447.
- [14] 魏晓,马向捷,李明生,等.自制肺部模体用于射波刀肺追踪 E2E 验证分析[J].*中国辐射卫生*,2024,33(1):1-6.
- [15] 黎国全,胡斌,朱斌,等.肺追踪优化对射波刀 Synchrony 建模的价值[J].*医疗卫生装备*,2019,40(3):34-37.
- [16] 邱禄伟,王恩敏,戴嘉中,等.肺部肿瘤射波刀治疗前模拟追踪结果研究[J].*中国医学计算机成像杂志*,2021,27(1):57-61.
- [17] Guo YH, Zhuang HQ, Zhao LJ, et al. Influence of different image guided tracking methods upon the local efficacy of CyberKnife treatment in lung tumors[J]. *Thorac Cancer*, 2015, 6(3):117-122.
- [18] Bibault JE, Lartigau E. Xsight® Lung tracking system in clinical use: the lille experience[J]. *Clin Lung Cancer*, 2020, 78:58-63.
- [19] 朱六玲,蔡陈枫,孟岩.X 射线模拟机和射波刀同步呼吸追踪下肺肿瘤的运动规律分析[J].*中国医学装备*,2018,15(12):53-56.
- [20] 麻亚茹,周姝含,林茂盛.非小细胞肺癌放疗中的肿瘤运动幅度[J].*吉林医学*,2022,43(10):2772-2774.

(编辑:周晓颖 校对:武斌)

#### 作者简介

牛泽乾 专业方向为射波刀立体定向放疗物理技术。

E-mail: 892406052@qq.com

