

基于体素的射波刀肺追踪剂量覆盖率体积直方图研究

张建平^{1,2}

1. 福建医科大学附属协和医院放射治疗科, 福建 福州 350001; 2. 福建省消化、血液系统与乳腺恶性肿瘤放射与治疗临床医学研究中心, 福建 福州 350001

【摘要】目的:基于体素计算分次间射波刀肺追踪的剂量覆盖率体积直方图(CVH),并探讨肿瘤体积、解剖位置与CVH鲁棒性之间的相关性。**方法:**回顾性分析外周型肺癌患者55例(上肺26例,中肺22例,下肺7例),共339分次。所有患者均采用射波刀(VSI型)Xsight Lung追踪(2-view)方式进行治疗,拍片时间间隔为60 s。在射波刀的动态追踪系统(MTS)中记录的呼吸追踪数据均转化为患者坐标系。以射波刀治疗时产生的log文件为基础,基于体素利用MATLAB科学计算软件计算不同外扩范围下的CVH,并讨论肿瘤体积、解剖位置与CVH鲁棒性之间的相关性。**结果:**采用95%靶区覆盖率(C95)大于95%即C95>95%作为是否满足临床要求的评价指标,满足临床要求的计划在整个治疗疗程内并非所有治疗分次都能达到评价指标。对于同一外扩范围,其CVH由大到小依次为:上肺>中肺>下肺。另外,对于中、下肺而言,肿瘤外扩5 mm并不能满足临床评价指标即C95>95%。肿瘤体积和治疗过程中CVH的鲁棒性之间呈负相关。肿瘤体积越大治疗过程中的CVH波动越小,反之,肿瘤体积越小,治疗期间覆盖率的不确定度越大,鲁棒性越差。对于下肺肿瘤,上述现象更加明显。另外,随着外扩范围的增加,CVH的鲁棒性也逐渐上升。**结论:**对于小体积和下肺肿瘤的治疗,平均覆盖率小于大体积和上肺肿瘤,治疗过程中应根据患者肿瘤体积、位置等因素综合考虑外扩范围,以进一步提高临床疗效。

【关键词】射波刀;肺追踪;治疗分次;剂量覆盖率体积直方图

【中图分类号】R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2024)11-1343-06

Dose-coverage rate volume histogram for lung tracking with Cyberknife based on voxels

ZHANG Jianping^{1,2}

1. Department of Radiation Oncology, Fujian Medical University Union Hospital, Fuzhou 350001, China; 2. Fujian Clinical Research Center for Radiology and Radiotherapy for Digestive, Hematological and Breast Malignancies, Fuzhou 350001, China

Abstract: Objective To calculate the inter-fractional dose-coverage rate volume histogram (CVH) of Cyberknife Xsight lung tracking based on voxels, and to investigate the correlation among tumor volume, anatomical location and CVH robustness. **Methods** A retrospective analysis was conducted on 55 peripheral lung cancer patients, with 26 in upper lobe, 22 in middle lobe and 7 in lower lobe, and there were 399 fractions. All patients were treated with Cyberknife (VSI) Xsight Lung tracking (2-view), with a scanning time interval of 60 s. The respiration tracking data recorded in Cyberknife motion tracking system were converted into patient coordinates. Based on the log files generated during Cyberknife treatment, the CVH of different margins were calculated with MATLAB on a voxel scale, and the correlation among anatomical location, tumor volume and CVH robustness was discussed. **Results** The target coverage rate (coverage of 95%, C95) greater than 95%, that is C95>95%, was taken as the evaluation criterion of whether the clinical requirements were met. Not coverage rate of all fractions met the clinical requirement when an evaluable treatment plan was delivered during treatment course. For the same margin, the value of CVH in order from the largest to the smallest was: upper lobe > middle lobe > lower lobe. The margin of 5 mm won't met the criterion of C95>95% for lung cancer in middle and lower lobes. There was a negative correlation between tumor volume and CVH robustness during treatment. The larger the tumor size, the smaller the fluctuation of CVH; conversely, the smaller the tumor size, the greater the uncertainty of coverage during treatment and the poorer the robustness. For lower lobe lung tumors, the above phenomenon was more obvious. Additionally, CVH robustness

【收稿日期】2024-05-15

【基金项目】福建省中青年教育科研项目(JAT200165)

【作者简介】张建平, 硕士, 工程师, 研究方向: 立体定向放射治疗及放射生物, E-mail: zhangjianpn@126.com

improved with increasing margin. **Conclusion** For small volume and lower lobe lung tumors, the average coverage rate is lower than that of large volume and upper lobe lung tumor, and the margin should be comprehensively considered based on the factors such as tumor volume and location for further improving clinical efficacy.

Keywords: Cyberknife; lung tracking; treatment fractionation; dose-coverage rate volume histogram

前言

根据国家癌症中心最新统计数据显示,2022年我国居民肺癌的发病率和死亡率在恶性肿瘤中均占首位^[1]。近年来,立体定向放射治疗(Stereotactic Body Radiotherapy/Stereotactic Ablative Radiotherapy, SBRT/SABR)越来越多地被用于可手术、不可手术、不愿意手术以及联合免疫治疗的肺癌患者^[2-5]。根据最新随机抽样三期国际临床实验研究表明,对于可进行手术治疗的I期非小细胞型早期肺癌,SBRT比侵入性手术疗法更能延长存活率。手术的3年存活率为79%,SBRT为95%,而对应的3年无复发存活率分别为80%和86%^[6]。美国研究学者提出,将免疫治疗与SBRT结合,大剂量SBRT杀伤肿瘤细胞后释放的一些物质,能更有效地诱导机体肿瘤特异性免疫,从而杀伤远位肿瘤细胞,降低远处转移^[7]。而肺部肿瘤因受呼吸及生理性运动等影响其平均运动幅度可达5~8 mm,对于下叶肺的肿瘤在头脚方向运动幅度可超过10 mm^[8-11]。因此,对于实施肺部SBRT技术的最大挑战为防止脱靶即呼吸运动管理及治疗中的质控。

射波刀是目前市场上唯一真正实现呼吸实时动态追踪的放射外科装置,其中肺部肿瘤追踪技术(Xsight Lung)无需金标植入,直接以肿瘤作为追踪目标。肺追踪的基本原理为:(1)根据实时X射线影像和体表标记点建立相关呼吸模型;(2)根据体表标记点位置和呼吸模型对肿瘤位置进行预测;(3)将预测位置提前115 ms反馈到机器人控制器,从而实现实时动态追踪,其追踪精确度在1.5 mm之内^[12]。实时影像获取时间一般设置为60 s,用于呼吸模型的验证和更新。因此,动态肺追踪治疗时间一般在40 min左右。由于追踪精度与肿瘤解剖位置、患者呼吸幅度、呼吸频率以及呼吸规律程度等因素相关^[13-14],故射波刀在如此长的治疗时间内,肿瘤被消融剂量覆盖程度对治疗效果有着重要的临床参考意义。目前临床上对于肺追踪患者治疗计划的质量保证有端到端测试(E2E)^[15]、点剂量验证^[16-17]、二维剂量验证^[18-19]和静态三维剂量验证^[20],这些研究仅仅验证了治疗过程整体的精确度,并没有考虑到治疗中每个射束

的准确性,分次内照射时剂量对靶区覆盖程度并未进行验证。这使得剂量投照如同黑盒子一般,未能直观体现治疗的准确性和精度。对于射波刀肺部动态追踪系统而言,上述问题更为重要。

运动肿瘤在治疗计划评估时除了关注放射治疗计划的总体剂量分布情况,对于追踪系统而言其不同覆盖率水平下目标区域的覆盖情况也显得尤为重要。前者用剂量体积直方图(Dose and Volume Histogram, DVH)来评估,后者则可用剂量覆盖率体积直方图(Dose-Coverage Rate Volume Histogram, CVH)来评估。射波刀肺部动态追踪技术能实现射束和肿瘤运动的同步,这得益于其灵活的六维关节KUKA机械手臂。在动态追踪过程中,射束(剂量)对靶区的覆盖情况,防止脱靶为临床关心的主要问题。因此与其他设备相比,除了使用DVH, CVH对于射波刀计划的评估也具有重要的临床意义。本研究采用CVH显示处方剂量对靶区的某一覆盖率水平上接受辐射的体积比,其优势和意义有:(1)覆盖率的明确展示, CVH明确显示不同覆盖率水平下靶区的体积覆盖情况,使医生更容易评估治疗计划的有效性;(2)治疗效果的直观评估, CVH通过显示不同覆盖率水平下目标区域的体积覆盖情况,可以更直观地评估治疗效果,确保目标区域接受到足够的剂量;(3) CVH可以根据每个患者的具体情况,提供详细的覆盖信息,支持个体化治疗方案的制定。本研究基于患者治疗时产生的log文件,以及患者CT影像利用MATLAB对数据进行提取、清洗和数据处理,最终计算得到患者治疗过程中的CVH,更好地评估整个放射治疗的精准性和准确度。

1 资料与方法

1.1 研究对象

回顾性分析2018年~2022年于福建医科大学附属协和医院就诊的外周型肺癌患者55例(上肺26例、中肺22例、下肺7例),中位年龄68岁(40~84岁)。肿瘤中位体积为8.24 cm³(0.40~139.78 cm³),由GTV均匀外扩5 mm作为PTV。患者数据已经医院伦理委员会批准,批准审批号为2023KJCX067。所有患者均采用射波刀(VSI型)Xsight Lung追踪(2-view)

方式进行治疗,考虑到整体治疗时间和治疗的精准性,治疗过程影像系统拍片时间间隔为 60 s。

1.2 数据采集

患者在治疗过程中的相关呼吸追踪数据均记录在射波刀的动态追踪系统(Motion Tracking System, MTS),其中肿瘤实时坐标以患者坐标系的格式存储在 Modelpoint.log 中,肿瘤预测坐标以机器坐标的格式存储在 Predictor.log 中。为了更好地分析和解释临床现象,本文将所有数据均按照式(1)归一为患者坐标^[21]:

$$P = \begin{bmatrix} \cos 45^\circ & \sin 45^\circ & 0 \\ -\sin 45^\circ & \cos 45^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot R \tag{1}$$

其中,P为患者坐标系,R为机器人坐标系。

1.3 CVH 计算

与 DVH 类似,CVH 表示覆盖率和体积之间的关系,用以描述在治疗过程中靶区被覆盖程度。假设在一个分次的治疗过程中总共获取实时影像 n 次,其中 k 次($k \in [1, n]$)有覆盖到肿瘤,则对应的覆盖率 y 为:

$$y = \frac{\bigcup_{i=1}^{\alpha} \bigcap_{j=1}^k (A_{ij} \cap B)}{B} \tag{2}$$

其中, $\alpha = C_n^k$; $x = k/n$; A_{ij} 为第 i 种组合方式中,第 j 个元素,代表的是拍片获得肿瘤位置(图 1 蓝色区域); B 为原始肿瘤位置(图 1 红色区域)。最终,治疗过程中肿瘤剂量积分覆盖率为 y 关于 x 的函数。

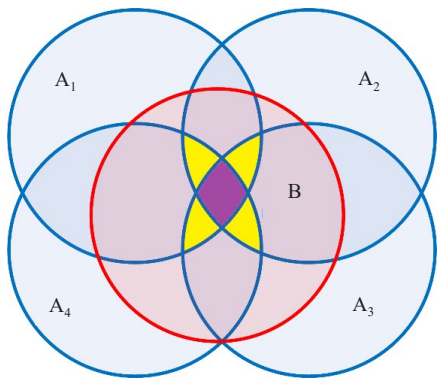


图 1 剂量覆盖率体积直方图计算原理
Figure 1 Calculation principle of dose-coverage rate volume histogram

例如,当拍片总数为 4 次时,4 次均覆盖到全部靶区,对应的 x 为 100%(图 1 紫色区域),此时 y 可按式(3)计算:

$$y = \frac{(A_1 \cap B) \cap (A_2 \cap B) \cap (A_3 \cap B) \cap (A_4 \cap B)}{B} \tag{3}$$

4 次中有 3 次覆盖到靶区,对应的 x 为 75%(图 1 黄色加紫色区域),此时 y 可按式(4)计算,以此类推:

$$y = \frac{\left\{ \begin{aligned} &[(A_1 \cap B) \cap (A_2 \cap B) \cap (A_3 \cap B)] \cup \\ &[(A_1 \cap B) \cap (A_2 \cap B) \cap (A_4 \cap B)] \cup \\ &[(A_1 \cap B) \cap (A_3 \cap B) \cap (A_4 \cap B)] \cup \\ &[(A_2 \cap B) \cap (A_3 \cap B) \cap (A_4 \cap B)] \end{aligned} \right\}}{B} \tag{4}$$

A_i 对应于 $PTV_{n,i}$ (GTV 外扩 n mm 而生成的 PTV 在第 i 次拍片时的位置), B 对应于 GTV,在实际程序计算过程中均基于体素进行计算。图 2 为基于 MATLAB 软件的详细计算流程图。

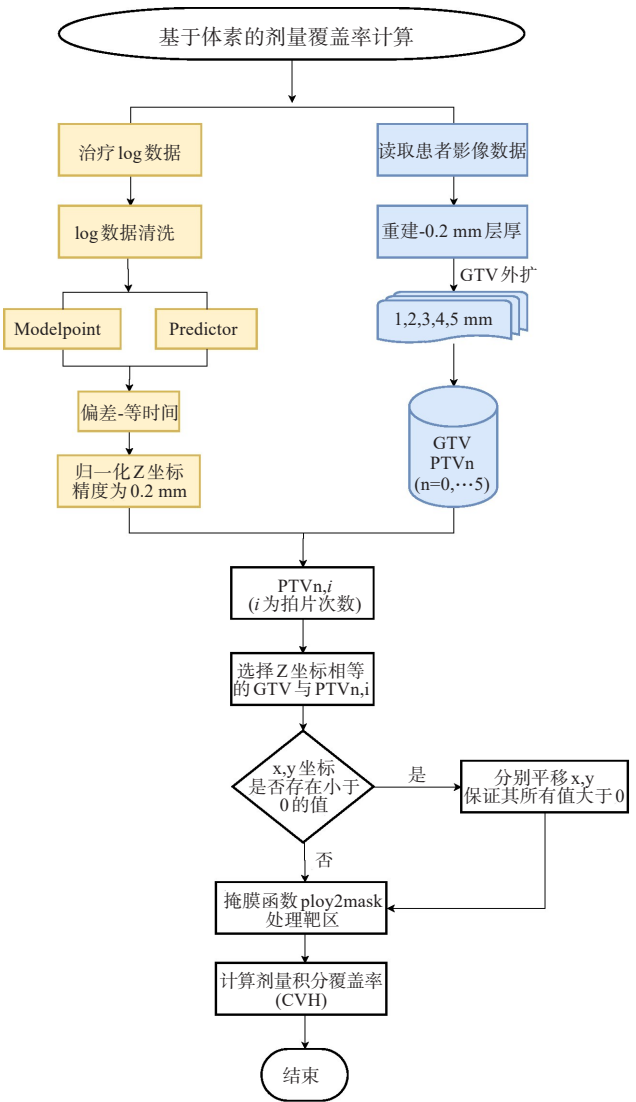


图 2 剂量覆盖率体积直方图计算流程图
Figure 2 Dose-coverage rate volume histogram calculation flowchart

关于 CVH 的计算已在文献[22]及[23]中进行详细阐述,本文不再赘述。本研究采用 95% 靶区覆盖率(Coverage of 95%, C95)对应 GTV 体积 $\geq 95\%$ 即

C95 \geq 95% 作为是否满足临床要求的评价指标^[22]。其中C95 \geq 95%可解释为:在治疗过程中总共拍片 n 次,其中有95%次PTV可覆盖到GTV,且覆盖GTV的体积为95%以上,以此来衡量追踪过程的准确性。本文分别计算GTV外扩1、2、3、4、5 mm的C95,以分析不同外扩范围下,在实际治疗过程中靶区的覆盖情况。

1.4 统计学分析

采用MATLAB软件对55例患者共339个分次进行分析。经检验不同解剖位置、外扩范围的CVH数据符合正态分布,故采用配对样本 t 检验, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。本文利用Spearman相关性分析方法对肿瘤体积、解剖位置与CVH鲁棒性之间的相关性进行分析。

2 结果

2.1 CVH

图3所示为某例患者治疗过程中GTV外扩5 mm的CVH,其中蓝色、红色曲线分别代表每一分次的CVH和平均CVH。由图3可知,在整个治疗疗程内并非所有的治疗分次都能满足C95 $>$ 95%,但是其所有分次的C95平均值为97.66%,满足评价要求。由此可见,保证每个治疗分次患者呼吸运动的重复性,是实现精准放疗的前提。

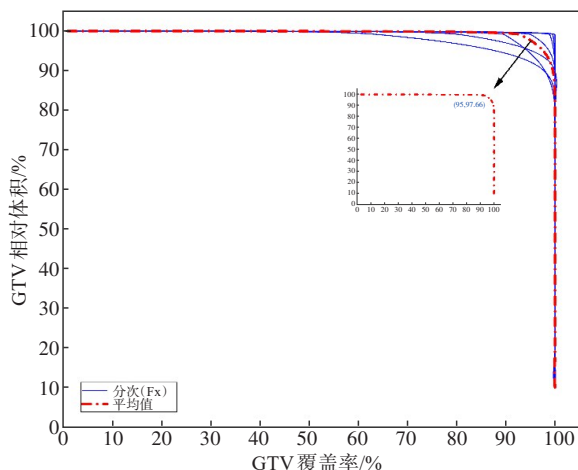


图3 某例患者治疗所有分次剂量覆盖率体积直方图

Figure 3 Dose-coverage rate volume histogram of all fractions for a patient

2.2 不同解剖位置、外扩范围的CVH

图4所示为上肺、中肺和下肺GTV分别在外扩1、2、3、4、5 mm下的C95。肺部肿瘤运动幅度、频率和轨迹因其解剖位置不同而存在差异。本研究表明对于同一外扩范围,其C95从大到小依次为:上肺 $>$ 中肺 $>$ 下肺。另外,对于中、下肺而言,GTV外扩5 mm并

不能满足临床评价指标即C95 $>$ 95%。其中对于GTV外扩1 mm的中肺、下肺,GTV外扩2 mm的上肺、下肺和GTV外扩3 mm的上肺、下肺,C95差异有统计学意义($P<0.05$);其他指标差异均无统计学意义。

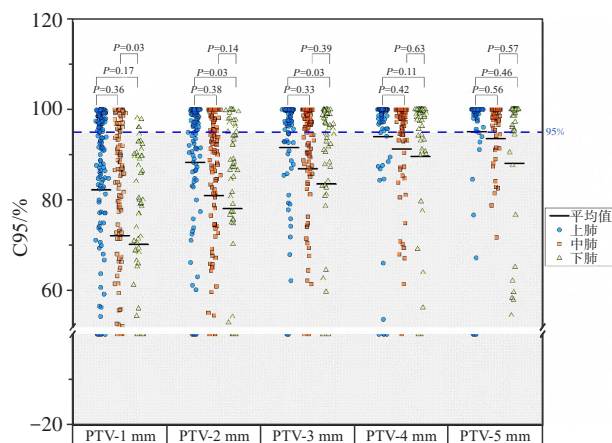


图4 不同解剖位置和外扩范围的剂量覆盖率

Figure 4 Cumulative dose-coverage rate at different anatomical locations and margins

2.3 肿瘤体积、解剖位置与CVH鲁棒性之间的相关性

射波刀肺追踪技术的精确度与肺部肿瘤的体积、解剖位置是否存在相关性,为此本文开展了多因素的相关性研究。如图5所示,肿瘤体积和治疗过程中CVH的鲁棒性[用GTV外扩1~5 mm肿瘤覆盖率的标准差(SD.1 mm~SD.5 mm)表示]之间呈负相关。即肿瘤体积越大治疗过程中的CVH波动越小,反之,肿瘤体积越小,治疗期间覆盖率的不确定度越大,鲁棒性越差。对于下肺肿瘤,上述现象更加明显。另外,随着外扩范围的增加,CVH的鲁棒性也逐渐上升。

3 讨论

放射外科技术由于其有效的肿瘤控制率和较小的毒副作用,越来越多地应用于临床全身肿瘤治疗。然而对于肝、肺等运动肿瘤,呼吸运动的管理是一个新的挑战。本研究挖掘射波刀治疗时产生的log文件,基于体素利用MATLAB科学计算软件计算不同外扩范围下的CVH,并讨论肿瘤体积、解剖位置与CVH鲁棒性之间的相关性。

在临床工作中经常采用95%靶区的覆盖率为95%以上即C95 $>$ 95%作为治疗计划的评价指标。本文分别计算GTV外扩1、2、3、4、5 mm的C95,以评价上述外扩范围在实际治疗过程中的覆盖率是否达到

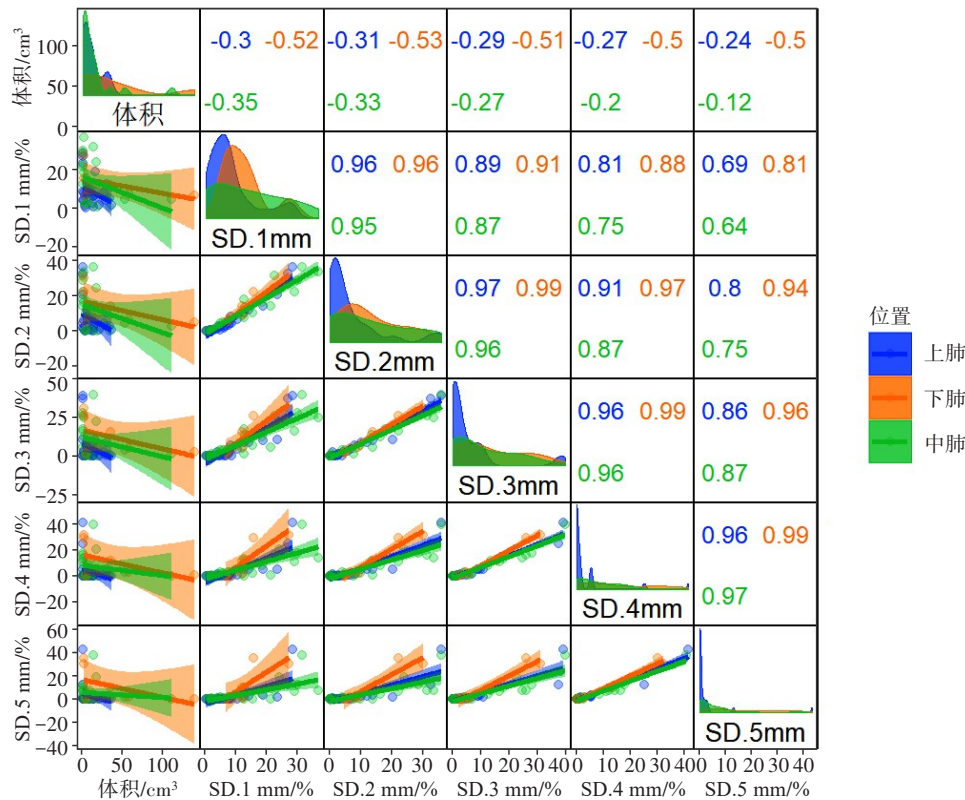


图5 肿瘤体积、解剖位置与CVH鲁棒性之间的相关性

Figure 5 Correlation among tumor volume, anatomical location and CVH robustness

SD.1 mm~SD.5 mm代表GTV外扩1~5 mm肿瘤覆盖率的标准差;图中蓝色、黄色和绿色数字分别代表上肺、下肺和中肺相对应两个因素的相关系数,“+”代表正相关,“-”代表负相关

临床要求。由于在实际治疗过程中,患者在不同分次治疗过程中的身体状况、呼吸幅度、呼吸频率等不同,治疗追踪的精准性也存在较大的差异。如图3所示,显然有3个分次其覆盖率没有达到临床评估标准,而其整个疗程的平均覆盖率为97.66%,满足治疗标准。因此在治疗过程中不仅要保证位置的重复性,对于运动肿瘤的治疗,所有影响肿瘤运动的因素如呼吸幅度、频率等也应在分次间保持一致。为此,在治疗过程中应配合适当呼吸管理措施,如呼吸训练、宣教等,以达到较好的临床效果,实现真正意义上的精准放疗^[24-26]。

研究表明,对于射波刀外周型肺部追踪技术而言,建议PTV应由GTV均匀外放5 mm,以补偿整个放疗流程各个环节产生的不确定度^[11, 27-28]。以上外放值的计算一般基于Van Herk误差评估法^[15]或者不确定度评估法^[11],考虑了治疗过程中的系统误差和随机误差。然而消融剂量对靶区的真实覆盖程度才是临床上最关心的问题。因此本文分别对不同外扩范围、不同解剖位置进行CVH的计算。由图4可知,在同一外扩范围,上肺肿瘤在治疗过程中其覆盖率最高,而下肺肿瘤的覆盖率最低。产生这种现象的

原因是上肺肿瘤运动幅度小于下肺肿瘤运动幅度,而射波刀肺追踪精确度与肿瘤运动幅度呈正相关。对于下肺或者运动幅度较大的肿瘤,在实际临床应用中应特别注意。另外,从本文研究结论可知,GTV外扩5 mm作为PTV在实际应用中并不能保证95%的临床覆盖率,尤其对于中、下肺而言。在计划设计时,不应千篇一律的对所有肿瘤都均匀外扩5 mm,应结合肿瘤解剖位置等因素进行个体化考虑。

通过对肿瘤体积、解剖位置与CVH鲁棒性之间的相关性展开研究发现,肿瘤体积和治疗过程中CVH鲁棒性之间呈负相关。故对于小体积肿瘤,在治疗过程中存在的不确定度比大体积肿瘤更大。这主要是因为小体积肿瘤更容易受呼吸等因素的影响,其运动幅度和轨迹容易发生异质性的变化,而大体积肿瘤相对来讲更加稳定一些,这种现象在临床中需特别注意。另外,与上面讨论类似,位于下肺肿瘤在治疗过程中CVH的鲁棒性更差。总体来说,从覆盖率方面来讲,对于小体积和下肺肿瘤,外扩5 mm是远远不够的,需根据临床实践具体调整。肺部肿瘤在运动过程中除了有平移和旋转,也必然存在着形变。为简化计算复杂度,本文在CVH计算时没有

考虑肿瘤在运动过程中的形变,将在后续研究中进一步探讨。

综上所述,本研究挖掘射波刀治疗时产生的log文件,基于体素利用MATLAB科学计算软件计算不同外扩范围的CVH,并讨论肿瘤体积、解剖位置与CVH鲁棒性之间的相关性。同一患者在不同分次间肿瘤剂量覆盖率不同,对于小体积和下肺肿瘤,治疗时平均覆盖率小于大体积和上肺肿瘤,肿瘤体积和治疗过程中CVH鲁棒性之间呈负相关。因此,在治疗过程中应根据患者肿瘤体积、位置等因素综合考虑外放范围,以进一步提高临床疗效。

【参考文献】

- [1] Han BF, Zheng RS, Zeng HM, et al. Cancer incidence and mortality in China, 2022[J]. J Natl Cancer Cent, 2024, 4(1): 47-53.
- [2] Chang JY, Lin SH, Dong WL, et al. Stereotactic ablative radiotherapy with or without immunotherapy for early-stage or isolated lung parenchymal recurrent node-negative non-small-cell lung cancer: an open-label, randomised, phase 2 trial[J]. Lancet, 2023, 402(10405): 871-881.
- [3] Jia Z, Fang F, Cao YS, et al. Efficacy and toxicity of stereotactic body radiotherapy for un-resectable stage III non-small cell lung cancer patients unfit for concurrent chemoradiation therapy: a retrospective study[J]. Radiat Oncol, 2023, 18(1): 140.
- [4] Vlaskou Badra E, Baumgartl M, Fabiano S, et al. Stereotactic radiotherapy for early stage non-small cell lung cancer: current standards and ongoing research[J]. Transl Lung Cancer Res, 2021, 10(4): 1930-1949.
- [5] Qiu B, Aili A, Xue LX, et al. Advances in radiobiology of stereotactic ablative radiotherapy[J]. Front Oncol, 2020, 10: 1165.
- [6] Chang JY, Senan S, Paul MA, et al. Stereotactic ablative radiotherapy versus lobectomy for operable stage I non-small-cell lung cancer: a pooled analysis of two randomised trials[J]. Lancet Oncol, 2015, 16(6): 630-637.
- [7] Bernstein MB, Krishnan S, Hodge JW, et al. Immunotherapy and stereotactic ablative radiotherapy (ISABR): a curative approach?[J]. Nat Rev Clin Oncol, 2016, 13(8): 516-524.
- [8] Harada K, Katoh N, Suzuki R, et al. Evaluation of the motion of lung tumors during stereotactic body radiation therapy (SBRT) with four-dimensional computed tomography (4DCT) using real-time tumor-tracking radiotherapy system (RTRT)[J]. Phys Med, 2016, 32(2): 305-311.
- [9] Li G, Sehovic A, Xu L, et al. A simulation study of tolerance of breathing amplitude variations in radiotherapy of lung cancer using 4DCT and Time-Resolved 4DMRI[J]. J Clin Med, 2022, 11(24): 7390.
- [10] Kitamura K, Takayama K, Yamazaki R, et al. A new method for assessing lung tumor motion in radiotherapy using dynamic chest radiography[J]. J Appl Clin Med Phys, 2022, 23(10): e13736.
- [11] Yang ZY, Chang Y, Liu HY, et al. Target margin design for real-time lung tumor tracking stereotactic body radiation therapy using CyberKnife Xsight lung tracking system[J]. Sci Rep, 2017, 7(1): 10826.
- [12] Yang B, Tang KK, Geng H, et al. Comparison of modeling accuracy between Radixact® and CyberKnife® Synchrony® respiratory tracking system[J]. Biomed Phys Eng Express, 2021, 7(6): 1-10.
- [13] Giżyńska MK, Seppenwoolde Y, JM Heijmen B. Tumor tracking with non-linear internal/external correlation models in the presence of respiratory motion baseline drifts and phase shifts[J]. Phys Med, 2024, 118: 103295.
- [14] Nakayama M, Nishimura H, Mayahara H, et al. Clinical log data analysis for assessing the accuracy of the CyberKnife fiducial-free lung tumor tracking system[J]. Pract Radiat Oncol, 2018, 8(2): e63-e70.
- [15] Pallotta S, Calusi S, Marrazzo L, et al. End-to-end test for lung SBRT: an Italian multicentric pilot experience[J]. Phys Med, 2022, 104: 129-135.
- [16] Hsu SM, Hung CH, Liao YJ, et al. Feasibility study on applying radiophotoluminescent glass dosimeters for CyberKnife SRS dose verification[J]. PLoS One, 2017, 12(1): e0169252.
- [17] Kurosu K, Sumida I, Shiomi H, et al. A robust measurement point for dose verification in delivery quality assurance for a robotic radiosurgery system[J]. J Radiat Res, 2017, 58(3): 378-385.
- [18] Yang B, Wong WK, Lam WW, et al. A novel method for monitoring the constancy of beam path accuracy in CyberKnife[J]. J Appl Clin Med Phys, 2019, 20(5): 109-119.
- [19] Dechambre D, Baart V, Cucchiario S, et al. Commissioning Monte Carlo algorithm for robotic radiosurgery using cylindrical 3D-array with variable density inserts[J]. Phys Med, 2017, 33: 152-158.
- [20] Ferris WS, Kissick MW, Bayouth JE, et al. Erratum: "evaluation of radixact motion synchrony for 3D respiratory motion: modeling accuracy and dosimetric fidelity"[J]. J Appl Clin Med Phys, 2023, 24(1): 96-106.
- [21] Zhang JP, Wang L, Li XB, et al. Quantification of intrafraction and interfraction tumor motion amplitude and prediction error for different liver tumor trajectories in cyberknife synchrony tracking[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2021, 109(5): 1588-1605.
- [22] Ricotti R, Seregni M, Ciardo D, et al. Evaluation of target coverage and margins adequacy during CyberKnife lung optimized treatment[J]. Med Phys, 2018, 45(4): 1360-1368.
- [23] Zhang JP, Wang L, Xie CY, et al. Novel utilization and quantification of Xsight diaphragm tracking for respiratory motion compensation in Cyberknife Synchrony treatment of liver tumors[J]. J Appl Clin Med Phys, 2024, 25(7): e14341.
- [24] Murphy MJ. Intelligent respiratory motion management for radiation TherapyRadiation therapy (RT) treatment[M]//El Naqa I, Murphy MJ. Machine and Deep Learning in Oncology, Medical Physics and Radiology. Cham: Springer International Publishing, 2022: 335-358.
- [25] Botticella A, Levy A, Auzac G, et al. Tumour motion management in lung cancer: a narrative review[J]. Transl Lung Cancer Res, 2021, 10(4): 2011-2017.
- [26] Habermann FN, Schmitt D, Failing T, et al. And yet it moves: clinical outcomes and motion management in stereotactic body radiation therapy (SBRT) of centrally located non-small cell lung cancer (NSCLC): shedding light on the internal organ at risk volume (IRV) concept[J]. Cancers (Basel), 2024, 16(1): 231.
- [27] Descovich M, McGuinness C, Kannarunimit D, et al. Comparison between target margins derived from 4DCT scans and real-time tumor motion tracking: insights from lung tumor patients treated with robotic radiosurgery[J]. Med Phys, 2015, 42(3): 1280-1287.
- [28] Floriano A, García R, Moreno R, et al. Retrospective evaluation of CTV to PTV margins using CyberKnife in patients with thoracic tumors[J]. J Appl Clin Med Phys, 2014, 15(6): 4825.

(编辑:薛泽玲)