

# CyberKnife系统中肝癌计划实施剂量计算及验证的评价研究

葛瑞刚, 解传滨, 戴相昆, 杨涛, 王越, 王树鑫, 曲宝林, 徐寿平

解放军总医院第一医学中心 放射治疗科, 北京 100853

**[摘要]** 目的 采用Monte Carlo与Ray-Tracing算法实施剂量计算及验证, 分析和评估肝癌典型病例CyberKnife计划的准确性、可靠性, 为不同算法在临床应用中的选择提供参考。方法 选择在我科行CK治疗的肝癌肿瘤患者33例, 分别使用射线追踪(Ray-Tracing, RT)算法和蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)算法进行计划剂量计算并评估; 另从中选取10例用固体水模对计划进行剂量验证。结果 左叶肝癌靶区RT算法的平均剂量值为58.21 Gy, MC算法的平均值为57.76, 两者相差0.45 Gy (0.78%); 右叶肝癌RT算法的平均值为55.82 Gy, MC算法的平均值为54.60 Gy, 两者相差1.22 Gy (2.23%); 采用MC算法重新精算后, 食管、胃、脊髓、肠道、十二指肠及肝脏的平均剂量均有所降低, 差异有统计学意义( $P<0.05$ ); 以MC算法剂量计算作为基准, 肝癌患者中RT算法高估1.09%, 差异有统计学意义( $P<0.05$ ); 采用均匀固体水进行验证, RT和MC两种算法点剂量计算值与测量值差异均在 $\pm 3\%$ 以内, 采用3%/2 mm标准分析 $\gamma$ 通过率均大于93%。结论 本研究通过对RT和MC两种算法在肝癌肿瘤实施计划剂量计算及其验证开展了系统研究与测试, 对其准确性及偏差进行了考证, 可为CK系统中肝癌计划算法的选择和治疗实施提供依据, 对临床具有一定的指导意义。

**[关键词]** 立体定向放射治疗; 射线追踪算法; 蒙特卡罗算法; 剂量计算; 剂量验证

## Evaluation of Dose Calculation and Verification Plan of Liver Cancer in CyberKnife

GE Ruigang, XIE Chuanbin, DAI Xiangkun, YANG Tao, WANG Yue, WANG Shuxin, QU Baolin, XU Shouping

Department of Radiotherapy, The First Medical Center of Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China

**Abstract:** Objective In this study, different algorithms were used for dose calculation and verification of SRT plans in typical cases of liver cancer. The accuracy and reliability of SRT plans under different conditions were analyzed and evaluated, so as to provide certain reference for the selection of different algorithms in clinical application. Methods In this study, 33 liver cancer patients treated with CK in our department were chosen. The dose calculation and verification were done to evaluate using Ray-Tracing (RT) and Monte Carlo (MC) algorithms respectively. In addition, 10 typical cases were selected to do the dose verification with solid water. The differences between the two algorithms and its selection of application were analyzed and discussed. Results The average dose value of RT algorithm in the target area of left lobe liver cancer was 58.21 Gy, and the average value of MC algorithm was 57.76. The difference between two algorithms was 0.45 Gy (0.78%). The mean value of RT algorithm in right lobe liver cancer was 55.82 Gy, and the average value of MC algorithm was 54.60 Gy, with a difference of 1.22 Gy (2.23%). After re-calculation using MC algorithm, the average dose of esophagus, stomach, spinal cord, intestinal tract, duodenum and liver were all decreased, with statistical significance ( $P<0.05$ ). Taking the dose calculation of MC algorithm as the baseline, RT algorithm was overestimated by 1.09% in patients with liver cancer, and the difference was statistically significant ( $P<0.05$ ). Uniform solid water was used for verification, the difference between the calculated value of point dose and the measured value of RT and MC was within  $\pm 3\%$ , and the passing rate of  $\gamma$  analysis using 3%/2 mm standard was greater than 93%. Conclusion In this study, the systematic research and measurement were carried out on dose calculation and verification of the RT and MC algorithms in liver tumor sites, and their accuracy and deviation were verified, thus providing the basis for the selection and treatment implementation of SRT plans in liver sites of CK system, which has a certain guiding significance for clinical practice.

**Key words:** stereotactic radiation therapy; Ray-Tracing algorithm; Monte Carlo algorithm; dose calculation; dose verification

[中图分类号] R730.55

[文献标识码] A

doi: 10.3969/j.issn.1674-1633.2021.04.030

[文章编号] 1674-1633(2021)04-0132-05

收稿日期: 2021-03-11

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(81801799)。  
通信作者: 徐寿平, 高级工程师, 主要研究方向为光子/质子的调强放疗、图像引导放疗、自适应放疗、人工智能、大数据及医学影像影像组学放疗领域应用。

通信作者邮箱: Shouping\_xu@yahoo.com

## 引言

肝癌是全球第五大最常见的肿瘤, 是癌症相关死亡的第三大原因<sup>[1-2]</sup>。手术切除是目前最为有效的治疗方法, 但满足外科手术切除条件的患者较少<sup>[3]</sup>。近年来, 随着计

算机和医学影像学的发展,精确放射治疗在肝癌的总和和治疗中取得了一定的作用。肝脏属于运动器官,上下活动的范围大约为 2 cm,常规放射治疗会导致肿瘤“脱靶”现象,导致正常肝脏组织受到不必要的照射,容易引起肝损伤,而且肿瘤组织出现欠量<sup>[4]</sup>,造成肿瘤复发。CyberKnife(CK)可以通过金标植入,采用红光同步呼吸追踪系统、实时影像引导等功能改善治疗范围,并且最大限度的避开了毗邻的放射敏感器官肠道、胃、十二指肠等,提高了肿瘤局控率、生存率,降低了毒副反应。

CK 系统作为新型的立体定向放射外科治疗设备,代表着肿瘤立体定向放射治疗的进步<sup>[5-7]</sup>。CK 治疗计划系统(MultiPlan<sup>®</sup>)配置有射线追踪(Ray-Tracing, RT)和蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)两种算法,二者剂量计算的结果存在一定的差异<sup>[8-9]</sup>;通常认为 MC 算法作为剂量沉积计算的金标准,其剂量计算准确性更高。但是由于计算效率、硬件等因素的影响,目前国内外 CK 系统的临床应用中用户普遍更多采用 RT 算法,并未普遍采用 MC 算法,且对于不同临床需求中采用何种算法缺乏明确的界定和数据支持。本研究回顾性分析 33 例肝癌患者两种算法剂量计算及计划验证的差异,分析和评估其准确性、可靠性,从而为不同算法在临床应用中的选择提供一定的参考依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 临床资料

本研究选取 2018 年 1 月至 2019 年 12 月在本院就诊的肝癌患者 33 例,其中男性 26 例,女性 7 例。年龄 33~86 岁,中位年龄 64 岁。患者基本情况如表 1 所示。

表 1 33 例肝癌患者资料

项目	例数/例	构成比/%
靶区体积/cm <sup>3</sup>		
<15	4	12.12
15~65	11	33.33
>65	18	54.55
病灶部位		
肝左叶	12	36.36
肝右叶	21	63.64

### 1.2 仪器设备

采用德国 SIEMENS 放疗专用大孔径模拟定位 CT 和 GE 定位 MRI;图像融合和轮廓勾画工作站(MIM MaestroR, 6.9.5 版本);德国 PTW 公司 UNIDOS webline 型静电计、PTW 31010(0.125cc)型电离室和固体水;美国 ISP 公司 EBT3 胶片。CK 数据管理系统(CyberKnife Data Management System, CDMS)和治疗计划系统 MultiPlan<sup>®</sup>(4.0.2)。

### 1.3 患者体位固定及靶区和危及器官勾画

在 CK 治疗定位前约一周在 CT 引导下经皮肝脏于肿瘤内部或肿瘤附近植入 3~6 枚金标,作为肿瘤定位及治疗追踪的参考系统。待金标的位置相对稳定后,采用真空垫固定并行 CT、MRI 定位扫描,扫描范围从膈顶上 10 cm

至右肾下界,层厚 1 mm,扫描完成后将图像经过网络传输至 MIM 工作站,由临床医师勾画 GTV,并勾画重要危及器官包括正常肝组织、心脏、脊髓、胃和十二指肠、小肠、结肠肝区、胰腺、肺、肾脏等。

### 1.4 计划设计

采用非等中心、非共面照射模式,按照靶区 2/3 最大径尺寸选择相应大小限光筒,同时选择一个比其小 1~2 档的另一个较小尺寸限光筒<sup>[10]</sup>。所有患者都采用 Sequentia 模块进行计划优化,在计划优化过程中,为提高治疗计划实施效率,设置好每例计划最大单野 MU 值,计划的总跳数等参数。优化完成后,将计算框覆盖范围拉大,使之包括所有 CT 扫描体素。为了方便比较两种算法的剂量学差异,首先采用高精度计算网格的 RT 算法进行精算,记录肿瘤靶区和危及器官的各项剂量指标,然后保持所有计划参数不变,采用 MC 进行重新精算,不确定度设置成 1%。处方剂量统一设定为 50/5F,处方剂量线设为 70%。

### 1.5 计划评估

治疗计划设计完成后,通过等剂量曲线分布对各组计划进行评估,通过剂量体积直方图(Dose Volume Histogram, DVH)获取靶区及各危及器官相关剂量学参数,其中靶区剂量评估包括靶区剂量体积参数 D<sub>98</sub>、D<sub>95</sub>、D<sub>90</sub>、D<sub>50</sub>、D<sub>10</sub>、D<sub>5</sub>,剂量分布的均匀性指数(Homogeneity Index, HI)、适形度指数(Conformal Index, CI)、新适形指数(New Conformal Index, nCI)、靶区外正常组织剂量跌落梯度参数(Gradient Index, GI),GI 意义在于反映靶区外的剂量跌落情况,较小的 GI 表示靶区外剂量扩散较少,剂量跌落急剧<sup>[11]</sup>。对于危及器官的评价主要参考 AAPM 101 号报告的剂量限值<sup>[12]</sup>。

### 1.6 验证计划的设计与实施

选取 10 例已完成计划移植到 PTW 固体水模体,首先采用 RT 算法的高精度计算网格行精算。考虑到免冲洗 EBT3 胶片只能采集 0.1~1000 cGy 剂量范围的限制,计算时将 Scale 值设为 0.7,对剂量进行比例缩放的降低,保证胶片中计算的剂量小于 1000 cGy,排除因剂量过高引起的测量误差。计算完成保存后采用 MC 算法,将不确定度设为 1% 重新精算,精确计算完成后对 QA 计划进行保存。

执行验证计划,记录剂量仪读数,从模体中取出胶片并记录好患者姓名和照射完成时间,在照射完成 24 h 扫描胶片得到测量的平面剂量分布。将电离室测量的点剂量分别与 RT 和 MC 两种算法计算的点剂量进行比对,得到相应的误差值。将胶片采集到的实测剂量图像导入到 FilmQA Pro 2016 胶片分析软件中,采用 2%/2 mm、3%/2 mm 两种评价标准组合分别与两种算法得到计划剂量分布进行 Gamma 分析,定量评价两种算法的计算差异。

### 1.7 统计学方法

所有计划完成后通过 DICOM 协议传输至 MIM 工作站进行数据读取。采用 SPSS 19.0 软件对计划进行数据分析,首先检验样本数据是否服从正态分布,若满足正态分布对

两种算法计算结果的参数比较采用配对  $t$  检验分析。数据结果用均值  $\pm$  标准差 ( $\bar{x} \pm s$ ) 表示,  $P < 0.05$  代表差异具有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 肝癌剂量分布比较

如图 1 所示的剂量分布可以看出两种算法处方剂量均能实现较好的靶区覆盖, 且靶区外剂量跌落均能满足临床治疗的要求。

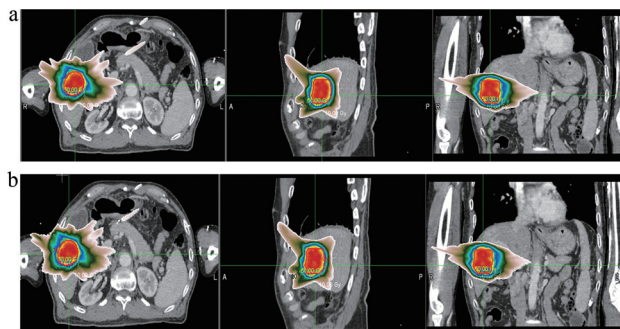


图1 肝癌部位两种算法同一病例计划等剂量曲线分布图

注: a. 射线追踪算法横断面、矢状面和冠状面等剂量曲线分布图; b. 蒙特卡罗算法横断面、矢状面和冠状面等剂量曲线分布图。

### 2.2 肝癌病例DVH结果的比较

图 2 是 33 例肝癌病例靶区平均 DVH 比较结果的显示。从图中可以看出使用 MC 算法计算对比后 RT 算法略微低估靶区剂量, 但差异不大。比较图 3 左叶肝癌平均 DVH 和图 4 右叶肝癌平均 DVH 可以看出, 左叶肝癌两种算法靶区覆盖率差异相对较小, 但右叶肝癌靶区覆盖率差异相对较大。对于平均剂量, 经计算, 左叶肝癌靶区 RT 算法的平均值为 58.21 Gy, MC 算法的平均值为 57.76, 两者相差 0.45 Gy (0.78%); 右叶肝癌 RT 算法的平均值为 55.82 Gy, MC 算法的平均值为 54.60 Gy, 两者相差 1.22 Gy (2.23%)。

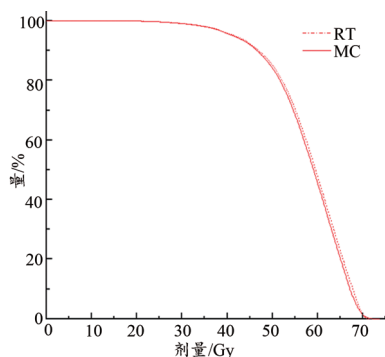


图2 肝癌病例靶区平均DVH

### 2.3 肝癌靶区剂量学结果的比较

肝癌病例 RT 和 MC 两种算法靶区剂量学比较的结果, 见表 2。其中, 两种算法计算结果对于靶区较大体积剂量参数  $D_{98}$ 、 $D_{95}$ 、 $D_{90}$ , 以及靶区小体积剂量参数  $D_5$ 、 $D_{10}$  和 50% 体积剂量参数  $D_{50}$ , MC 较 RT 算法都降低, 且差异具有统计学意义; 以 MC 算法计算结果为基准, 肿瘤靶区最

大剂量和处方剂量的平均值, RT 算法低 0.71 Gy (0.98%), 差异具有统计学意义 ( $P < 0.05$ ); 靶区平均剂量 RT 算法高 0.62 Gy (1.09%), 差异具有统计学意义 ( $P < 0.05$ ); 靶区覆盖率 RT 算法高 1.90% (2.59%), 差异具有统计学意义 ( $P < 0.05$ ); 适形指数 CI 的平均值, RT 算法高 0.03 (2.54%), 具有统计学差异 ( $P < 0.05$ ); 均匀性指数 RT 算法降低, 差异具有统计学意义 ( $P < 0.05$ ); 梯度指数 GI 平均值 RT 算法低 0.09 (2.59%), 差异具有统计学意义, 新适形指数 nCI 无明显差异。

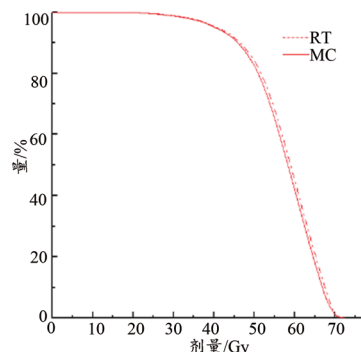


图3 左叶肝癌靶区平均DVH

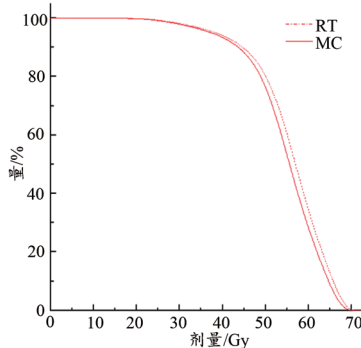


图4 右叶肝癌靶区平均DVH

表2 肝癌两种算法靶区剂量学比较的结果 ( $\bar{x} \pm s$ )

参数	RT计划	MC计划	t值	P值
$D_{max}/Gy$	$71.43 \pm 0.00$	$72.14 \pm 1.38$	-2.97	0.010
$D_{min}/Gy$	$23.42 \pm 7.26$	$22.77 \pm 7.29$	6.29	<0.001
$D_{mean}/Gy$	$57.71 \pm 2.98$	$57.09 \pm 3.12$	4.38	<0.001
Coverage	$84.10 \pm 8.01$	$82.53 \pm 8.88$	4.57	<0.001
$D_{98}/Gy$	$36.72 \pm 6.74$	$36.29 \pm 6.81$	3.89	<0.001
$D_{95}/Gy$	$41.85 \pm 5.93$	$41.40 \pm 5.94$	3.81	<0.001
$D_{90}/Gy$	$46.52 \pm 4.97$	$46.03 \pm 4.96$	3.85	<0.001
$D_{50}/Gy$	$59.30 \pm 3.13$	$58.64 \pm 3.32$	4.80	<0.001
$D_{10}/Gy$	$66.30 \pm 2.44$	$65.66 \pm 2.64$	3.77	<0.001
$D_5/Gy$	$67.49 \pm 2.02$	$66.91 \pm 2.29$	3.28	<0.001
CI	$1.21 \pm 0.16$	$1.18 \pm 0.15$	6.83	<0.001
nCI	$1.45 \pm 0.23$	$1.46 \pm 0.23$	-0.47	0.640
HI	$1.43 \pm 0.00$	$1.44 \pm 0.03$	-2.97	0.010
GI	$3.38 \pm 0.60$	$3.47 \pm 0.69$	-3.92	<0.001

### 2.4 肝癌危及器官剂量学结果的比较

肝癌病例 RT 和 MC 两种算法危及器官剂量学比较的结果, 见表 3。从表中可以看出, 采用 MC 算法重新精算后, 食管、胃、脊髓、肠道、十二指肠及肝脏的平均剂量均有



所降低, 差异有统计学意义 ( $P<0.05$ ); 食管、胃、脊髓、肠道、十二指肠和肝脏  $0.35\text{ cm}^3$  和  $5\text{ cm}^3$  体积的剂量均降低, 差异有统计学意义 ( $P<0.05$ )。

表3 肝癌病例危及器官剂量学比较的结果 ( $\bar{x} \pm s$ )

器官	参数	RT计划/Gy	MC计划/Gy	t值	P值
食管	$D_{\max}$	$15.48 \pm 9.02$	$15.26 \pm 8.73$	1.16	0.28
	$D_{\min}$	$3.37 \pm 2.91$	$2.81 \pm 2.81$	4.71	<0.001
	$D_{\text{mean}}$	$7.77 \pm 4.93$	$7.33 \pm 4.61$	2.93	0.02
	$D_{0.35\text{cc}}$	$12.72 \pm 6.97$	$12.25 \pm 6.63$	2.96	0.02
	$D_{5\text{cc}}$	$7.17 \pm 5.99$	$6.77 \pm 5.61$	2.49	0.04
胃	$D_{\max}$	$21.25 \pm 6.99$	$21.29 \pm 6.89$	-0.31	0.76
	$D_{\min}$	$1.07 \pm 0.81$	$0.53 \pm 0.47$	5.67	<0.001
	$D_{\text{mean}}$	$5.69 \pm 2.95$	$5.32 \pm 2.73$	3.87	<0.001
	$D_{0.35\text{cc}}$	$18.23 \pm 5.95$	$17.88 \pm 5.84$	3.34	<0.001
	$D_{5\text{cc}}$	$14.03 \pm 4.69$	$13.58 \pm 4.53$	4.52	<0.001
肠道	$D_{\max}$	$23.06 \pm 7.19$	$23.14 \pm 7.07$	-0.80	0.43
	$D_{\min}$	$0.86 \pm 0.52$	$0.30 \pm 0.27$	6.36	<0.001
	$D_{\text{mean}}$	$5.02 \pm 2.47$	$4.69 \pm 2.40$	4.64	<0.001
	$D_{0.35\text{cc}}$	$19.32 \pm 5.44$	$19.08 \pm 5.48$	2.61	0.02
	$D_{5\text{cc}}$	$14.15 \pm 3.54$	$13.84 \pm 3.46$	5.33	<0.001
十二指肠	$D_{\max}$	$17.32 \pm 8.22$	$17.12 \pm 8.26$	1.05	0.31
	$D_{\min}$	$1.52 \pm 0.96$	$0.95 \pm 0.63$	3.84	<0.001
	$D_{\text{mean}}$	$6.19 \pm 3.13$	$5.84 \pm 3.06$	2.73	0.01
	$D_{0.35\text{cc}}$	$13.72 \pm 6.59$	$13.34 \pm 6.49$	2.51	0.02
	$D_{5\text{cc}}$	$8.18 \pm 5.36$	$7.85 \pm 5.19$	2.57	0.02
脊髓	$D_{\max}$	$9.16 \pm 4.91$	$9.01 \pm 4.55$	1.60	0.12
	$D_{\min}$	$1.12 \pm 1.12$	$0.48 \pm 0.66$	5.30	<0.001
	$D_{\text{mean}}$	$3.59 \pm 2.81$	$3.15 \pm 2.45$	5.17	<0.001
	$D_{0.35\text{cc}}$	$7.95 \pm 4.50$	$7.59 \pm 4.17$	4.20	<0.001
	$D_{5\text{cc}}$	$5.72 \pm 3.97$	$5.35 \pm 3.62$	4.61	<0.001
肝脏	$D_{\max}$	$65.71 \pm 13.03$	$68.05 \pm 7.57$	-1.29	0.21
	$D_{\min}$	$0.94 \pm 0.71$	$0.34 \pm 0.26$	6.42	<0.001
	$D_{\text{mean}}$	$11.62 \pm 5.59$	$11.28 \pm 5.53$	4.22	<0.001
	$D_{0.35\text{cc}}$	$0.57 \pm 0.25$	$0.55 \pm 0.23$	2.72	0.01
	$D_{10\text{cc}}$	$0.36 \pm 0.19$	$0.35 \pm 0.19$	2.24	0.03

## 2.5 肝癌计划验证结果的比较

10 例肝癌患者在固体水测量结果的平均值, 见表 4。将 RT 和 MC 剂量计算结果分别与电离室测量值进行比较。可以看出, 两种算法剂量计算值与电离室测量值之间的平均差异在 3% 以内。对于平面剂量, MC 算法采用 2%/2 mm 和 3%/2 mm 标准的平均  $\gamma$  通过率分别为 95.38% 和 97.24%, RT 算法通过率分别为 91.26% 和 93.77%。

表4 肝癌计划验证测试结果

算法	电离室剂量			$\gamma$ 通过率/%	
	计算值/cGy	测量值/cGy	误差/%	2%/2 mm	3%/2 mm
RT	775.23	795.71	-2.58 ±	91.26	93.77
	±	±	±	±	±
	98.77	104.81	1.09	2.47	289
MC	784.17	795.71	-1.48	95.38	97.24
	±	±	±	±	±
	104.22	104.81	1.78	1.54	1.89

## 3 讨论

自 CK 问世以来, 治疗计划的计算方法得到了实质性的发展。最初, RT 算法是 CK 治疗计划系统唯一配置的算法, 该算法模型相对简单, 仅对单一路径长度上的光子校正来计算剂量沉积的特性, 中心轴有效深度计算考虑了组织的异质性, 并对预期的剂量分布作了进一步的调整, 整

个模拟计算过程需要复杂的近似和必要的简化。虽然这些方法对于处理相对均匀的组织结构和较大的辐射野是足够的, 但在精度上确实存在局限性。特别是在对高异质性组织区域的剂量分布进行建模时, RT 算法无法考虑自由电子的横向分布、散射和最终剂量沉积的变化, 从而导致对沉积剂量的高估<sup>[13-15]</sup>。此外, 由于 CK 治疗采用小照射野聚焦照射的方式, 精确的模拟射野边界的电子不平衡对于预测剂量沉积就显得尤为必要<sup>[16-18]</sup>。

由于 RT 和 MC 算法计算的准确性主要与人体器官组织的密度差异相关, 查阅国内外相关文献资料, 大都是针对人体组织密度差别最明显的胸部肿瘤进行比较研究<sup>[19-20]</sup>, 而对于腹部肿瘤肝癌却鲜有报道。

本研究入组了 33 例肝癌患者的临床资料, 回顾性地分析比较了 RT 和 MC 算法在靶区和危及器官方面的剂量学差异性。实验结果表明, 靶区 PTV 无论大体积的剂量还是小体积的剂量都没有统计学意义。危及器官的比较显示, 所有感兴趣器官的平均剂量和体积剂量都有所下降, 所有差异都具有统计学意义。虽然肝癌病灶常常为实质性的软组织密度结构, 但射线在到达靶区之前通常会穿过肺组织和胃肠道等密度不均匀的空腔组织, 从而导致 MC 计算后靶区剂量的降低<sup>[21]</sup>。对 MC 算法计算得到的结果分析发现, 光子在低密度机构组织中实际能量的沉积低于 RT 算法得出的计算结果, 所以危及器官食管、胃、十二指肠、空回肠等包含空气的部分, 经过 MC 计算得到的剂量结果低于 RT 算法计算的剂量分布。

CK 治疗方式为非共面小野集束照射, 小野照射过程中射束容易出现电子不平衡现象<sup>[22]</sup>, 测量时极易受到探测器介质和其体积的干扰, 带来临床剂量计算及评估的困难。另外, CK 患者验证还需要成熟的胶片分析软件及大量的胶片, 花费较为昂贵。长期以来, 大多单位都没有建立统一的 CK 患者计划验证规范。

本研究选择 10 例肝癌经典病例采用固体水对两种算法的治疗计划进行验证, 将 RT 和 MC 剂量计算结果分别与测量值进行比较。研究表明两种算法在肝癌患者中计算的剂量具有较好的一致性。

综上所述, 本研究通过肝癌典型病例计划设计, 分别采用两种算法进行剂量的计算, 并对两组剂量计算的结果进行对比及测量验证, 分析比较两种算法的剂量学差异, 评估其准确性、可靠性。结果表明 RT 算法在肝癌患者的计算精度是足够且适当的。

## [参考文献]

- [1] Parkin DM, Bray F, Ferlay J, et al. Estimating the world cancer burden[J]. *Int J Cancer*, 2001, (94):153-156.
- [2] Ferlay J, Colombet M, Soerjomataram I, et al. Estimating the global cancer incidence and mortality in 2018: GLOBOCAN sources and methods[J]. *Int J Cancer*, 2019, 44(8):1941-1953.
- [3] Cauchy F, Fuks D, Belghiti J. HCC: current surgical

- treatment concepts[J]. *Langenbecks Arch Surg*, 2012, 97(5): 681-695.
- [4] 姚二华, 梁平, 郑银燕, 等. 射波刀治疗原发性肝癌328例初步结果分析[J]. *现代肿瘤医学杂志*, 2016, 24(11): 1763-1767.
- [5] Sumida I, Shiomi H, Higashinaka N, et al. Evaluation of tracking accuracy of the CyberKnife system using a webcam and printed calibrated grid[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2016, 17(2): 74-84.
- [6] Yang B, Wong WKR, 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.
- [7] Alhujaili SF, Biasi G, Alzorkany F, et al. Quality assurance of Cyberknife robotic stereotactic radiosurgery using an angularly independent silicon detector[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2019, 20(1): 76-88.
- [8] Chang SD, Main W, Martin DP, et al. An Analysis of the accuracy of the CyberKnife: a robotic frameless stereotactic radiosurgical system[J]. *Neurosurgery*, 2003, 52(1): 140-147.
- [9] Siddon RL. Prism representation: a 3D ray-tracing algorithm for radiotherapy applications[J]. *Phys Med Biol*, 1985, 30(8): 817-824.
- [10] 周含, 李傲梅, 景生华, 等. 射波刀计划设计中治疗路径选择对靶区剂量分布的影响[J]. *中国医学物理学杂志*, 2018, 35(12): 1408-1412.
- [11] Wagner TH, Bovaf J, Williams A, et al. A simple and reliable index for scoring rival stereotactic radiosurgery plans[J]. *Radiat Oncol*, 2003, 57(4): 1141-1149.
- [12] Benedict SH, Yenice KM, Followill D, et al. Stereotactic body radiation therapy: the report of AAPM Task Group 101[J]. *Med Phys*, 2010, 37(8): 4078-4101.
- [13] Yang J, Liu G, Liu HY, et al. Influence of CyberKnife P-prescription isodose line on the discrepancy of dose results calculated by the Ray Tracing and Monte Carlo algorithms for head and lung plans: a phantom study[J]. *Curr Med Sci*, 2020, 40(2): 301-306.
- [14] Haedinger U, Krieger T, Flentje M, et al. Influence of calculation model on dose distribution in stereotactic radiotherapy for pulmonary targets[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2005, 61(1): 239-249.
- [15] Ding C, Saw CB, Timmerman RD. Cyberknife stereotactic radiosurgery and radiation therapy treatment planning system[J]. *Med Dosim*, 2018, 43(2): 129-140.
- [16] Galonske K, Thiele M, Ernst I, et al. Comparison of treatment plans calculated by ray tracing and monte carlo algorithms for head and thorax radiotherapy with Cyberknife[J]. *Curr Direc Biomed Eng*, 2017, 3(2): 647-650.
- [17] Pokhrel D, Sood S, Badkul R, et al. Assessment of Monte Carlo algorithm for compliance with RTOG 0915 dosimetric criteria in peripheral lung cancer patients treated with stereotactic body radiotherapy[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2016, 17(3): 277-293.
- [18] Pokhrel D, McClinton C, Sood S, et al. Monte Carlo evaluation of tissue heterogeneities corrections in the treatment of head and neck cancer[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2016, 17(2): 258-270.
- [19] Kang KM, Jeong BK, Choi HS, et al. Combination effects of tissue heterogeneity and geometric targeting error in stereotactic body radiotherapy for lung cancer using CyberKnife[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2015, 16(5): 193-204.
- [20] 彭倩, 廖雄飞, 张声江, 等. 微光刀立体定向放射治疗系统剂量学测试[J]. *中国医疗设备*, 2018, 33(3): 94-96.
- [21] 曹洋森, 于春山, 张火俊, 等. 射波刀 Monte Carlo 与 Ray-Tracing 算法在胰腺癌中的剂量学比较[J]. *中国医学物理学杂志*, 2016, 33(10): 1008-1011.
- [22] 李洁, 汪晖, 汪冬, 等. 小野照射不同密度肺模体横向电子不平衡现象的蒙特卡罗模拟研究[J]. *中国医学物理学杂志*, 2019, 36(4): 379-383.

本文编辑 韩莹

## 参考文献格式编排举例

### (1) 期刊标注格式(文献类型标识: J)

[序号] 主要责任者. 题名[J]. 刊名, 年, 卷(期): 起止页码.

[1] 易文中, 李维金, 黄茂勇. 结肠造影 CT 扫描对大肠肿瘤性病变的应用评价[J]. *实用放射学杂志*, 2007, 23(10): 1347-1358.

[2] Gariepy J, Simon A, Chironi G, et al. Large artery wall thickening and its determinants under antihypertensive treatment: the IMT-INSIGHT study[J]. *Hypertens*, 2004, 22(1): 137-143.

注: 引用的文章不标注转页页码。

### (2) 专著标注格式(文献类型标识: M)

[序号] 主要责任者. 题名[M]. 版本(第一版不写). 译者, 译. 出版地: 出版者, 出版年: 页码范围(选择项).

[3] 徐宝华. 隐形口腔正畸治疗—当代舌侧正畸学的新概念与治疗技术[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2005: 5-11.

[4] Jones RM. Mechanics of Composite Materials[M]. New York: McGraw Hill Book Company, 1975.