

## 基于形变配准和伪CT的鼻咽癌自适应放疗剂量评估

周琼,李永武,王奇,施国志,庞晓燕,周勤煊  
浙江大学医学院附属邵逸夫医院,浙江 杭州 310016

**【摘要】目的:**基于形变配准千伏级锥形束CT(kV CBCT)生成的伪CT图像,探讨了鼻咽癌自适应放疗的优势和重要性。**方法:**选取10例鼻咽癌患者1套定位CT图像和每周的摆位验证kV CBCT图像,采用Velocity软件形变配准生成6套伪CT。定位图像CT0上制定的Arc计划Plan0分别复制到6套伪CT上:A组方案是不改变参数直接计算最终剂量;B组方案是重新优化设计计算剂量。A、B两组各6次计划的剂量分别形变配准累积到CT0上得到累积剂量Dose<sub>actual</sub>和Dose<sub>replan</sub>。比较A组、B组和原计划每周肿瘤靶区和危及器官体积以及累积剂量的变化。**结果:**10例患者PGTVnx、GTVnd、PTV、左右腮腺体积退缩比率为 $3.81\%\pm 7.67\%$ 、 $11.45\%\pm 9.89\%$ 、 $3.50\%\pm 2.50\%$ 、 $23.67\%\pm 7.39\%$ 、 $24.18\%\pm 6.69\%$ 。A组方案的靶区PGTVnx、GTVnd、PTV D<sub>95</sub>剂量比原计划平均每周分别下降了0.946、1.054、0.809、0.848、1.426、0.799 Gy,1.407、1.501、1.627、1.236、2.028、1.373 Gy,2.330、3.419、3.938、2.696、4.213、2.574 Gy。B组计划与原计划处方剂量吻合度较高。相比于原计划,A组左侧腮腺D<sub>50</sub>、D<sub>mean</sub>分别提高0.43、0.10 Gy,V<sub>30</sub>降低了1.94%;右侧腮腺D<sub>50</sub>、D<sub>mean</sub>、V<sub>30</sub>分别提高了2.59 Gy、2.81 Gy、8.97%。B组左侧腮腺D<sub>50</sub>、D<sub>mean</sub>、V<sub>30</sub>比原计划分别降低1.22 Gy、1.13 Gy、4.15%,右侧腮腺D<sub>50</sub>、D<sub>mean</sub>、V<sub>30</sub>比原计划提高了2.8 Gy、3.09 Gy、5.44%。**结论:**相对于实际照射剂量,应用形变配准kV CBCT生成伪CT图像的鼻咽癌自适应放疗,既保证肿瘤靶区剂量与原计划Plan0一致,同时降低了危及器官的累积照射剂量,具有一定程度的剂量学优势。**【关键词】**鼻咽癌;形变配准;自适应放疗;kV CBCT;伪CT;Velocity软件**【中图分类号】**R730.55;R312**【文献标志码】**A**【文章编号】**1005-202X(2019)08-0892-06

## Dosimetric evaluation of adaptive radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma based on deformable registration and synthetic CT

ZHOU Qiong, LI Yongwu, WANG Qi, SHI Guozhi, PANG Xiaoyan, ZHOU Qinxuan  
Sir Run Run Shaw Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310016, China

**Abstract; Objective** To evaluate the advantages and importance of adaptive radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma based on the synthetic CT image generated by the deformable image registration of kV cone-beam CT (kV CBCT). **Methods** The weekly acquired kV CBCT images of 10 patients with nasopharyngeal carcinoma and a set of positioning CT image of one patient were selected in the study. A total of 6 sets of synthetic CT images were generated with the deformable image registration of Velocity software. The Arc plan (Plan0) designed based on the positioning image (CT0) was copied to 6 sets of synthetic CT images. In group A, the final dose was directly calculated without changing the parameters, while the dose in group B was re-calculated after the design was re-optimized. The doses of 6 plans in groups A and B were accumulated into CT0 to obtain the cumulative doses, namely Dose<sub>actual</sub> and Dose<sub>replan</sub>. The original plan (Plan0) was compared with plans in group A and group B, and the changes in the weekly volume and accumulative dose of tumor target areas and organs-at-risk were evaluated. **Results** The volume shrinkage rates of PGTVnx, GTVnd, PTV, left and right parotid glands in the 10 patients was  $3.81\%\pm 7.67\%$ ,  $11.45\%\pm 9.89\%$ ,  $3.50\%\pm 2.50\%$ ,  $23.67\%\pm 7.39\%$ ,  $24.18\%\pm 6.69\%$ , respectively. Compared with those in the original plan (Plan0), the weekly mean doses of the D<sub>95</sub> of PGTVnx, GTVnd and PTV in 6 plans in group A were reduced by 0.946, 1.054, 0.809, 0.848, 1.426, 0.799 Gy, 1.407, 1.501, 1.627, 1.236, 2.028, 1.373 Gy, and 2.330, 3.419, 3.938, 2.696, 4.213, 2.574 Gy, respectively. The prescription dose of group B had a higher degree of agreement with that of original plan. Compared with the original plan (Plan0), group A had higher D<sub>50</sub>, D<sub>mean</sub> of left parotid gland and D<sub>50</sub>, D<sub>mean</sub>, V<sub>30</sub> of right parotid gland which were increased by 0.43 Gy, 0.10 Gy, 2.59 Gy, 2.81 Gy, 8.97%, and a lower V<sub>30</sub> of left parotid gland which were decreased by 1.94%. Compared with the

**【收稿日期】**2019-01-16

**【基金项目】**浙江省医药卫生科研项目(2018243203)

**【作者简介】**周琼,硕士,助理工程师,研究方向:放射物理治疗,E-mail: 3415009@zju.edu.cn

original plan (Plan0), the  $D_{50}$ ,  $D_{mean}$ ,  $V_{30}$  of left parotid gland in group B were decreased by 1.22 Gy, 1.13 Gy, 4.15%, while the  $D_{50}$ ,  $D_{mean}$ ,  $V_{30}$  of right parotid gland were increased by 2.8 Gy, 3.09 Gy, 5.44%. **Conclusion** The adaptive radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma which is designed based on synthetic CT generated by the deformable image registration of kV CBCT can guarantee that the target dose coverage is consistent with that of Plan0 and reduce the cumulative dose of organs-at-risk, with significant dosimetric advantages.

**Keywords:** nasopharyngeal carcinoma; deformable registration; adaptive radiotherapy; kV cone beam computed tomography; synthetic CT; Velocity software

## 前言

鼻咽癌调强放疗过程中,因患者体质量的下降以及正常器官和肿瘤退缩等原因,会造成肿瘤靶区及危及器官解剖结构和位置关系发生变化。若继续执行初始放疗计划易导致肿瘤漏照射(照射剂量不足)和危及器官的超剂量照射<sup>[1-2]</sup>。为了保证更为精确的放射治疗,越来越多的医院开展了图像引导(Imaged-Guided Stereotactic Radiotherapy, IGRT)技术,通过在常规放疗直线加速器设备(Linear Accelerator, LA)上装备kV级成像装置,在患者治疗前快速采集锥形束CT(Cone Beam CT, CBCT)图像并与计划CT进行在线配准,校正患者治疗的体位。在IGRT基础上,为了达到精确和个体化放疗的目的,进一步提出了自适应放疗的概念。根据患者分次放疗过程中,靶区和正常组织、器官的形态变化,重新设计和优化放疗计划,实现对肿瘤靶区的精确剂量照射和最大程度的正常器官保护。

为了正确评估整个放疗过程中靶区和正常器官形变带来的剂量差异,目前常用的手段是利用形变配准技术来对放疗过程中采集到的CT和CBCT图像进行关联和剂量映射,从而得到相对准确的累积剂量分布<sup>[3]</sup>。考虑到治疗前快速采集CBCT的图像质量低于常规CT图像,散射引起的HU不一致性以及头脚方向有限显示视野(Field of View, FOV)在进行剂量计算时需要进行额外的标定和校正。Varian Velocity是一款用于图像处理和评估的专业放疗软件,不仅可以实现CT/CBCT/MR等不同模态图像的形变配准和剂量累加,还可以基于CBCT等图像与CT图像的配准关系生成伪CT。该伪CT既保留了CBCT图像中关于患者肿瘤和正常器官的位置和形变信息,又具备原有CT的FOV尺寸和电子密度值,能够用于放疗计划的剂量评估和再计划。本研究基于千伏级CBCT(kV CBCT)图像形变配准生成的伪CT对10例鼻咽癌患者的自适应计划和实际治疗计划分别与原计划的剂量学参数进行比较,探讨临床鼻咽癌患者实行再计划的重要性。

## 1 材料与方法

### 1.1 患者情况

回顾性选取浙江大学医学院附属邵逸夫医院接受调强放射治疗的10例鼻咽癌患者,男性5例、女性5例。患者均为非角化性癌,其中2例为分化型,8例为未分化型。病人临床分期情况如下: $T_2N_2M_0$ , 1例; $T_3N_2M_0$ , 5例; $T_4N_2M_0$ , 3例; $T_4N_3M_0$ , 1例。患者年龄37~68岁(中位数52岁)。

### 1.2 体位固定及CT扫描

10例患者仰卧,热塑头颈肩膜固定。Philips Brilliance CT Big Bore模拟定位机行放疗前CT扫描,扫描范围为头顶至锁骨下缘,扫描参数为130 kV、200 mA,图像分辨率 $512 \times 512$ ,重建层厚3 mm。将定位CT图像(CT0)传输至计划系统,作为与患者kV CBCT图像配准的参考图像。

### 1.3 kV CBCT获取

Varian Trilogy直线加速器OBI系统,该系统由加速器机载的CBCT和图像处理软件组成。扫描参数为100 kV、40 mA,图像重建矩阵 $512 \times 512$ ,重建层厚3 mm。治疗期间每周行1次kV CBCT在线图像引导校正体位,每位患者行6次CBCT。

### 1.4 伪CT与形变配准

在形变配准前先进行刚性配准,通过Velocity软件将每周的kV CBCT与定位CT进行CBCT修正的形变配准,CBCT修正应用了校正滤波修正以解决环和噪声伪影,形变配准时考虑了CBCT自带的DICOM坐标(摆位修正)。然后对定位CT进行重采样得到伪CT,与定位CT共享相同的体素尺寸和参考框架以及患者的坐标系方向,其体素值通过三线插值获得,应用周围体素的距离加权平均值。重采样是一种几何操作,其结果取决于体素尺寸和形变图(场)。

将重采样得到的每周伪CT1、伪CT2、伪CT3、伪CT4、伪CT5、伪CT6作为目标图像分别与参考图像CT0进行配准。刚性配准后进行形变配准。本研究中采用基于B样条的自由形变模型互信息配准算法,

该算法基于B样条正规化结合多分辨率互信息相似性测度精确配准CT与CBCT图像,最终通过形变矢量场(Deformation Vector Field, DVF)计划CT信息和轮廓传输到CBCT上,同时可将每周的伪CT上计算的总照射剂量形变累积归一到定位图像CT0上,从而得到总剂量<sup>[4-5]</sup>。为了保证形变配准的精度,形变配准分辨率在3个方向置为0.2 cm。

### 1.5 靶区勾画

**1.5.1 定位图像CT0上的勾画** 由经验丰富的医生依据ICRU第50号报告以及第62号报告,在定位图像CT0上进行靶区以及危及器官的勾画,其中,GTVnx包括了影像学CT、MRI以及临床检查可见的原发肿瘤部位以及咽后淋巴结,PGTVnx为医师根据GTVnx适当外扩2 mm所形成的临床预防靶区,GTVnd包括符合诊断标准的颈部转移性淋巴结,PTV包含以上靶区,且在三维方向上外扩5~10 mm形成整个头颈部的预防靶区。危及器官的勾画主要有脑干、脊髓、腮腺、视神经、视交叉、垂体、晶体等。

**1.5.2 伪CT上的勾画** 通过Velocity软件自动轮廓勾画功能勾画危及器官,将定位图像CT0上的靶区和危及器官经形变配准到伪CT上,由同一位临床医生对肿瘤靶区及危及器官逐层检查并手动修正。同时利用伪CT的勾画轮廓,记录和评估患者放疗过程中靶区和腮腺的体积变化。

### 1.6 计划设计

(1)应用Eclipse计划系统(Version 11.5 Varian)对10例患者在定位图像CT0上设计2个弧的旋转调强计划,称为原计划(Plan0),处方剂量为PGTVnx:70 Gy,GTVnd:66 Gy,PTV:60 Gy,每周5次,共30次。

(2)由于放疗前行了CBCT在线配准引导治疗,因此将原计划分别复制到伪CT1、伪CT2、伪CT3、伪CT4、伪CT5、伪CT6上时计划等中心点可以自动获取。实际治疗计划方案(A组)是将复制过来的计划仅保持照射中心坐标一致,不做其他调整直接在伪CT上进行剂量计算,得到6组剂量分布(Plan1、Plan2、…、Plan6),该方案可在一定程度上反映未采用自适应放疗方案的患者直接受照剂量;自适应计划方案(B组)是将复制到伪CT上的计划重新设置合理的限制参数进行优化和计算(再计划),得到新的放疗计划(re\_plan1、re\_plan2、…、re\_plan6)。记录每个计划中95%靶区体积达到的剂量( $D_{95}$ ),用于评估靶区的照射剂量。

(3)将Eclipse中的计划导入到Velocity软件上,将每位患者A、B两组各6个计划按每周治疗5次(共30次)形变配准归一到原计划CT上累加,得到相应

的累积剂量分布,称为Dose\_actual和Dose\_replan。对两组计划的累积剂量进行评估,涉及到的危及器官剂量限制:左右腮腺 $V_{30}<50\%$ ( $V_x$ 代表接受 $x$  Gy照射体积占总体积的百分比),平均剂量 $D_{mean}<30$  Gy,脊髓最大剂量 $D_{max}<45$  Gy,脑干 $D_{max}<54$  Gy,视交叉 $D_{max}<54$  Gy,视神经 $D_{max}<54$  Gy,晶体 $D_{max}<6$  Gy,眼球 $D_{mean}<10$  Gy,下颌骨 $D_{mean}<60$  Gy。

### 1.7 统计学方法

采用SPSS 22统计软件,对靶区和危及器官的A、B组剂量分别与原计划行配对 $t$ 检验, $P<0.05$ 为结果有统计学意义。Origin 9.0软件对剂量体积直方图(Dose-Volume Histogram, DVH)进行处理。

## 2 结果

### 2.1 靶区和左右腮腺的体积变化

如图1所示,10例患者在分次放疗过程中,靶区和左右腮腺均出现不同程度的退缩。第6周的伪CT6与放疗前的定位图像CT0相比,PGTVnx、GTVnd、PTV体积退缩比率为 $3.81\%\pm 7.67\%$ 、 $11.45\%\pm 9.89\%$ 、 $3.50\%\pm 2.50\%$ ;左右腮腺的退缩比率为 $23.67\%\pm 7.39\%$ 、 $24.18\%\pm 6.69\%$ , $P$ 值均 $<0.05$ 。其中有2位患者的左侧腮腺,3位患者的右侧腮腺下降比超过30%,左右腮腺体积在第3周的缩小最明显。

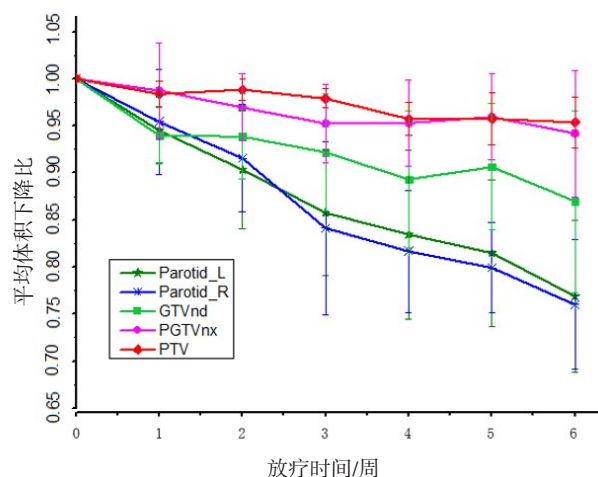


图1 10例患者靶区和左右腮腺体积变化比

Fig.1 Volume shrinkage rate of target areas and left and right parotid glands in 10 patients

### 2.2 靶区剂量学变化

10例患者每周伪CT上原计划与A组计划以及B组计划中靶区PGTVnx、GTVnd、PTV的 $D_{95}$ 剂量对比分别如图2、3、4所示。在整个6周的放疗过程中,没有重新优化的A组PGTVnx、GTVnd、PTV的 $D_{95}$ 比原计划每周分别下降了0.946、1.054、0.809、0.848、1.426、0.799 Gy,



1.407、1.501、1.627、1.236、2.028、1.373 Gy, 2.330、3.419、3.938、2.696、4.213、2.574 Gy。这反映了随着患者靶区形状和体积变化,实际靶区受照剂量与原计划处方剂量相比有所欠缺,重新优化计算的B组计划与原计划处方剂量吻合度较高。

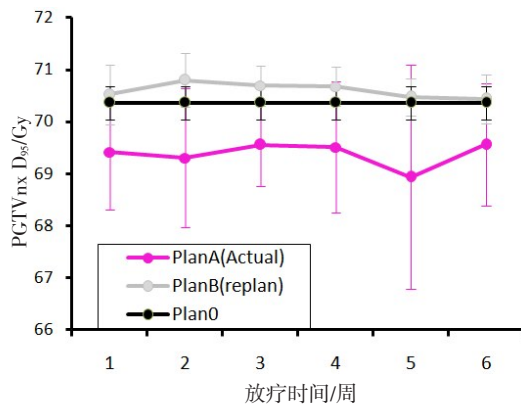


图2 PGTVnx的D<sub>95</sub>剂量分布图

Fig.2 Dose distribution of PGTVnx D<sub>95</sub>

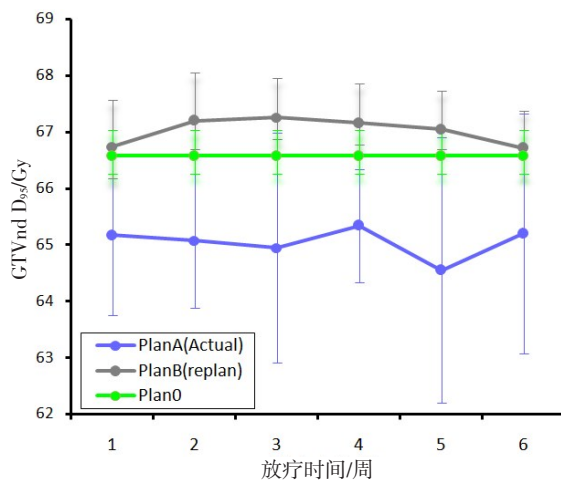


图3 GTVnd的D<sub>95</sub>剂量分布图

Fig.3 Dose distribution of GTVnd D<sub>95</sub>

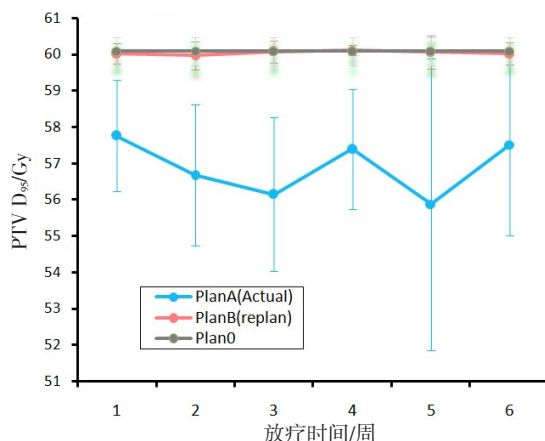


图4 PTV的D<sub>95</sub>剂量分布

Fig.4 Dose distribution of PTV D<sub>95</sub>

10例患者危及器官的累积剂量变化如表1所示,相对于原计划,A组左侧腮腺D<sub>50</sub>、D<sub>mean</sub>分别提高0.43、0.10 Gy,V<sub>30</sub>降低了1.94%;右侧腮腺D<sub>50</sub>、D<sub>mean</sub>、V<sub>30</sub>分别提高了2.59 Gy、2.81 Gy、8.97%。B组左侧腮腺D<sub>50</sub>、D<sub>mean</sub>、V<sub>30</sub>比原计划分别降低1.22 Gy、1.13 Gy、4.15%,右侧腮腺D<sub>50</sub>、D<sub>mean</sub>、V<sub>30</sub>比原计划提高了2.8 Gy、3.09 Gy、5.44%,其中A组与原计划右侧腮腺D<sub>50</sub>、D<sub>mean</sub>、V<sub>30</sub>有统计学差异( $P_A < 0.05$ ),B组腮腺累积剂量的与原计划没有统计学差异( $P_B > 0.05$ );A、B两组脊髓和脑干的最大剂量D<sub>max</sub>变化不大;A组左侧晶体比原计划提高了2.56 Gy,右侧晶体提高了2.69 Gy( $P_A < 0.05$ )。B组左右晶体D<sub>max</sub>与原计划比较变化不大。与原计划相比,患者危及器官实际累积受照剂量有所增加,通过再计划,可在一定程度上降低危及器官的累积受照剂量。

### 3 讨论

图像引导和自适应放疗是当前精确放疗的重要实现手段。形变配准、剂量累积、伪CT生成和再计划技术是自适应放疗的主要环节。本研究使用Eclipse+Velocity的软件组合流畅完成了上述过程,加快了自适应放疗计划修改的效率,验证了每周CBCT图像离线自适应放疗的剂量优势和可行性。

Velocity等软件提供了形变配准和自动轮廓勾画功能,不仅节省勾画时间,提高危及器官勾画的一致性和规范性,还可方便快捷的进行患者器官运动的在线或者离线图像比较,以及不同模态的剂量累积叠加计算<sup>[6-8]</sup>。

目前,临床上对于自适应放疗的研究大多在轮廓描绘和剂量计算方面<sup>[9-14]</sup>,在患者放疗期间进行一次或若干次的CT或CBCT扫描,获取的图像与原计划图像进行形变配准和剂量累积评估,并探讨再计划的剂量学优势和时机<sup>[15-18]</sup>。虽然目前有先进的滑轨CT加速器等设备可以在放疗机房内方便地进行CT扫描,但常规直线加速器更多还是只配备了kV CBCT装置进行放疗过程中的图像采集,多数研究也常用kV CBCT定位验证图像进行剂量计算和评估。考虑到CBCT图像的质量低于常规CT图像,散射引起的HU不一致性以及头脚方向有限FOV尺寸等不足,需要进行额外的标定和校正<sup>[19-20]</sup>。本研究使用Velocity软件,通过形变配准技术由kV CBCT生成伪CT用于剂量计算评估和再计划,规避了单纯使用kV CBCT的不足,具有更高的准确性。

头颈部肿瘤放疗期间解剖结构的变化会影响患者的实际受照射剂量。本研究中患者治疗结束时治

表1 10例鼻咽癌患者的危及器官累积剂量  
Tab.1 Accumulative dose of organs-at-risk in 10 patients with nasopharyngeal carcinoma

危及器官	参数	原计划	A组	B组	$t_A$ 值	$P_A$ 值	$t_B$ 值	$P_B$ 值
左侧腮腺	$D_{50}/\text{Gy}$	22.16±1.47	22.59±3.43	20.94±1.66	-0.01	0.99	0.72	0.48
	$D_{\text{mean}}/\text{Gy}$	26.03±1.84	25.93±4.08	24.90±1.90	0.08	0.94	0.90	0.38
	$V_{30}/\%$	30.68±2.91	28.74±10.45	26.53±5.63	0.61	0.54	1.32	0.20
右侧腮腺	$D_{50}/\text{Gy}$	22.30±0.96	24.89±2.90	25.10±3.21	-25.15	0.01	-1.86	0.07
	$D_{\text{mean}}/\text{Gy}$	26.34±0.90	29.15±3.57	29.43±3.10	-33.43	0.01	-1.97	0.06
	$V_{30}/\%$	29.42±3.09	38.39±11.66	34.86±6.05	-2.57	0.02	-1.56	0.13
脊髓	$D_{\text{max}}/\text{Gy}$	40.43±0.76	40.37±1.09	39.92±1.75	4.22	0.90	1.13	0.27
脑干	$D_{\text{max}}/\text{Gy}$	47.17±1.94	46.87±3.25	46.63±2.24	0.09	0.51	0.09	0.93
左侧晶体	$D_{\text{max}}/\text{Gy}$	4.88±0.53	7.44±3.65	4.94±1.95	-4.24	0.04	-1.13	0.27
右侧晶体	$D_{\text{max}}/\text{Gy}$	5.07±0.53	7.76±4.37	5.40±1.95	-4.40	0.04	-1.15	0.26

$t_A$ 、 $P_A$ 表示原计划和A组做配对样本 $t$ 检验之后的值, $t_B$ 、 $P_B$ 表示原计划和B组做配对样本 $t$ 检验之后的值

疗靶区均有一定程度的退缩,其中淋巴结靶区 GTVnd 退缩达 11%,左右腮腺退缩明显,达 24%左右,与文献[5, 8-9]报道结果相近。相对于原计划,A 组靶区 PGTVnx、GTVnd、PTV 的  $D_{95}$  变化范围较大,波动幅度非常大,95%的处方等剂量曲线并没很好包绕靶区,靶区脱靶的风险高。从微观上考虑肿瘤靶区剂量不足,导致肿瘤局部控制率降低,提高肿瘤复发的风险<sup>[21]</sup>。相比原计划,B 组计划靶区的  $D_{95}$ 、 $D_{\text{mean}}$  参数偏大,与其他学者研究结果相似<sup>[14]</sup>,当靶区体积缩小时,受照射剂量增加,肿瘤局部控制率也相应提高。由形变配准得到危及器官的累积总剂量比较中,左右腮腺和晶体变化最明显。相对于原计划,左侧腮腺的 B 组累积剂量  $D_{50}$ 、 $D_{\text{mean}}$ 、 $V_{30}$  分别下降了 1.22 Gy、1.13 Gy、4.15%,变化幅度大,具有明显的剂量学优势,而 A 组累积剂量与原计划区别不大。在 A 组和 B 组计划中右侧腮腺  $D_{50}$ 、 $D_{\text{mean}}$  累积剂量均比原计划高 3 Gy 左右, $V_{30}$  甚至高了 5.44% 和 8.97%,但相比实际照射剂量还是偏低。原计划和 B 组计划与 A 组计划相比,左右晶体得到很好的保护,左晶体  $D_{\text{max}}$  分别低 2.56、2.5 Gy,右晶体  $D_{\text{max}}$  分别低 2.69、2.36 Gy。Elström 等<sup>[5]</sup>选取了 1 例口咽癌患者每日的 CBCT 图像(33 次),分析了靶区体积和危及器官的体积变化与剂量累积,随着左右腮腺体积的萎缩,其累积受照剂量相比原计划增加了 11% 和 9%,与本文结果类似。与体积的变化不同,危及器官的累积剂量的评估受到诸多因素影响,例如每次摆位误差,图像采集周期、形变配准技术,剂量计算的准确性等。

本研究回顾性分析了形变配准用于临床自适应

放疗剂量计算及评估的可行性以及 Arc 调强放疗再计划的重要性。自适应放疗中的剂量评估和再计划图像来源是一个重要问题,每周重新施行 CT 定位,无法还原治疗的真实情况;在治疗前在线配准的 CBCT 图像分辨率和清晰度较差,各组织的 CT 值和物理密度非线性对应,很难用于勾画和剂量计算。使用 Veocity 软件高效准确地将 CBCT 图形形变配准重采样生成伪 CT,可实现了计划系统 TPS 上剂量的真实还原,保证了再计划的准确和高精度,同样伪 CT 技术在 MRI-linac 加速器上也有重要应用。

【参考文献】

[1] 曹建忠,罗京伟,徐国镇,等.鼻咽癌调强放疗中解剖及剂量学改变再次计划必要性研究[J].中华放射肿瘤学杂志,2008,17(3): 161-164.  
CAO J Z, LUO J W, XU G Z, et al. Necessity of replanning for the change of anatomy and dosimetry during intensity modulated radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2008, 17(3): 161-164.

[2] YAO W R, XU S P, LIU B, et al. Replanning criteria and timing definition for parotid protection-based adaptive radiation therapy in nasopharyngeal carcinoma[J]. Biomed Res Int, 2015(1): 476383.

[3] THÖRNQVIST S, PETERSEN J B, HØYER M, et al. Propagation of target and organ at risk contours in radiotherapy of prostate cancer using deformable image registration[J]. Acta Oncol, 2010, 49(7): 1023-1032.

[4] LAWSON J D, SCHREIBMANN E, JANI A B, et al. Quantitative evaluation of a cone-beam computed tomography-planning computed tomography deformable image registration method for adaptive radiation therapy[J]. J Appl Clin Med Phys, 2007, 8(4): 2432.

[5] ELSTRØM U V, WYSOCKA B A, MUREN L P, et al. Daily kV cone-beam CT and deformable image registration as a method for studying dosimetric consequences of anatomic changes in adaptive IMRT of

- head and neck cancer[J]. *Acta Oncol*, 2010, 49(7): 1101-1108.
- [6] 侯勇, 尹勇, 马长升, 等. 肺癌锥形束CT与计划CT形变配准自动勾画危及器官可行性研究[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2012, 21(5): 460-463.
- HOU Y, YIN Y, MA C S, et al. Study the feasibility of kilovolt cone beam CT organs at risk contouring automatically using deformation registration in the radiotherapy of lung [J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2012, 21(5): 460-463.
- [7] THOMSON D, BOYLAN C, LIPTROT T, et al. Evaluation of automatic segmentation algorithm for definition of head and neck organs at risk[J]. *Radiat Oncol*, 2014, 9: 173.
- [8] 单书灿, 邱杰, 全红, 等. 自动勾画软件对鼻咽癌靶区和危及器官勾画结果对比分析[J]. *中国医学装备*, 2015(7): 33-36.
- SHAN S C, QIU J, QUAN H, et al. Comparison of the two softwares for ABAS in NPC[J]. *China Medical Equipment*, 2015(7): 33-36.
- [9] POON M, HOLBORN C, CHENG K F, et al. Evaluation of deformed image-based dose calculations for adaptive radiotherapy of nasopharyngeal carcinoma[J]. *Med Dosim*, 2017, 42(4): 273-281.
- [10] 周露, 张书旭, 袁克虹, 等. 鼻咽癌自适应放疗中剂量变形与累积[J]. *广东医学*, 2015, 36(20): 3176-3178.
- ZHOU L, ZHANG S X, YUAN K H, et al. Dose deformation and accumulation in adaptive radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma [J]. *Guangdong Medical Journal*, 2015, 36(20): 3176-3178.
- [11] 马长升, 卢洁, 刘同海, 等. 变形配准与经验计算剂量累加法用于肺癌放疗计划累加剂量计算的研究[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2012, 32(1): 70-73.
- MA C S, LU J, LIU T H, et al. Application of deformable registration and empirical calculation method to calculate the accumulated dose for normal tissues and organs at risks in lung cancer radiotherapy plans [J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2012, 32(1): 70-73.
- [12] 陈龙, 谢小妹, 黄江琼, 等. 非小细胞肺癌自适应放疗剂量学研究[J]. *中国癌症防治杂志*, 2012, 4(1): 53-56.
- CHEN L, XIE X M, HUANG J Q, et al. Dosimetric study of adaptive radiation in non-small cell lung cancer [J]. *Chinese Journal of Oncology Prevention and Treatment*, 2012, 4(1): 53-56.
- [13] CASTELLI J, SIMON A, LOUVEL G, et al. Impact of head and neck cancer adaptive radiotherapy to spare the parotid glands and decrease the risk of xerostomia[J]. *Radiat Oncol*, 2015, 10(1): 6.
- [14] 甘晓根, 徐子海, 廖福锡, 等. 鼻咽癌自适应放疗中靶区和危及器官体积及剂量学变化[J]. *海南医学*, 2016(24): 4007-4010.
- GAN X G, XU Z H, LIAO F X, et al. Changes in volume of target and organs at risk and dosimetric medicine in adaptive radiation therapy for nasopharyngeal carcinoma [J]. *Hainan Medical Journal*, 2016(24): 4007-4010.
- [15] ZHAO L, WAN Q, ZHOU Y, et al. The role of replanning in fractionated intensity modulated radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma[J]. *Radiat Oncol*, 2011, 98(1): 23-27.
- [16] 黄慧娟, 陆合明, 冯国生, 等. 靶区及危及器官剂量学改变与鼻咽癌自适应放疗计划优化时机[J]. *中华肿瘤防治杂志*, 2016, 23(12): 799-805.
- HUANG H X, LU H M, FENG G S, et al. Timing of adaptive radiation therapy determined by dosimetric changes in targets and organs at risk for nasopharyngeal carcinoma [J]. *Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment*, 2016, 23(12): 799-805.
- [17] 沈群, 罗丽, 刘峰, 等. 鼻咽癌IMRT再计划的研究进展[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2018, 27(3): 312-315.
- SHEN Q, LUO L, LIU F, et al. Research progress in replanning during intensity-modulated radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2018, 27(3): 312-315.
- [18] 吴伟伟, 李韶今, 尹慧, 等. 局部晚期鼻咽癌调强放疗中解剖结构改变及剂量分布变化研究[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2017, 37(11): 826-831.
- WU W W, LI S J, YIN H, et al. Anatomical changes and dose distribution deviations of locally advanced nasopharyngeal carcinoma patients during IMRT[J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2017, 37(11): 826-831.
- [19] 杨波, 邱杰, 鹿廷田, 等. 头颈部CBCT图像对放疗剂量计算准确性的影响[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2008, 28(5): 523-525.
- YANG B, QIU J, PANG T T, et al. Effect of head and neck CBCT images on the accuracy of radiotherapy dose calculation[J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2008, 28(5): 523-525.
- [20] 吴魁, 李光俊, 蒋晓芹, 等. 千伏级锥形束CT影像用于鼻咽癌调强放疗计划剂量计算的可行性[J]. *华西医学*, 2010, 25(12): 2156-2159.
- WU K, LI G J, JIANG X Q, et al. Feasibility of kV-cone beam CT imaging for dose calculation in imrt planning of nasopharyngeal Cancer[J]. *West China Medical Journal*, 2010, 25(12): 2156-2159.
- [21] EISBRUCH A, GREGOIRE V. Balancing risk and reward in target delineation for highly conformal radiotherapy in head and neck cancer [J]. *Semin Radiat Oncol*, 2009, 19(1): 43-52.

(编辑:薛泽玲)