

锥形束 CT 测量胸段食管癌调强放疗摆位误差对剂量学的影响

吴爱东 张绍虎 张红雁 闫冰 刘磊

【摘要】 目的 应用千伏级锥形束 CT(kV-CBCT)测量胸段食管癌调强放疗的摆位误差,探讨摆位误差对肿瘤靶体积和周围正常组织受照剂量的影响。方法 21 例胸段食管癌患者经图像引导调强放疗,共获得 173 组 CBCT 摆位误差数据,利用这些数据在三维治疗计划系统中模拟患者的实际治疗过程,分析摆位误差对肿瘤靶区及周围正常组织受照剂量的影响。结果 21 例患者左右、头脚、前后方向的摆位误差分别是 (2.73 ± 1.85) 、 (3.19 ± 2.71) 和 (2.35 ± 1.71) mm。摆位误差对患者 GTV 的剂量学影响不明显,但误差却使患者 95% PTV($D_{95\%}$)接受的剂量与标准计划相比降低 3.38 Gy,PTV 最小剂量(D_{min})和平均剂量(D_{mean})分别下降 9.83 和 0.65 Gy,摆位误差的修正提高了计划靶区的适形度和剂量均匀性,标准计划相应值分别为 (0.74 ± 0.10) 和 (1.07 ± 0.02) ,模拟计划相应值分别为 (0.69 ± 0.08) 和 (1.13 ± 0.07) ,差异均有统计学意义($t = 3.43$ 和 -3.91 , $P < 0.05$);摆位误差对脊髓的最大剂量(D_{max})、双肺和心脏等周围正常组织受照剂量影响,差异无统计学意义($P > 0.05$),模拟计划中脊髓的最大剂量均值为 (42.20 ± 4.97) Gy,标准计划为 (41.37 ± 2.75) Gy,摆位误差使部分患者脊髓最大剂量超过 45 Gy,其中 1 例最大值达到 52.8 Gy。结论 kV-CBCT 图像引导胸段食管癌调强放疗可减小患者的摆位误差,提高 PTV 的受照剂量和治疗精度,摆位误差对双肺、脊髓和心脏受照剂量未见明显改变。

【关键词】 食管肿瘤; 调强放疗; 图像引导放疗; 摆位误差; 剂量学

A kV cone-beam CT based analysis of the setup errors and the corresponding impact on the dose distribution of intensity modulated radiotherapy for thoracic esophageal carcinoma WU Ai-dong, ZHANG Shao-hu, ZHANG Hong-yan, YAN Bing, LIU Lei. Department of Radiation Oncology, Anhui Provincial Hospital Affiliated to Anhui Medical University, Hefei 230001, China

【Abstract】 **Objective** To measure the setup errors in thoracic esophageal carcinoma treated with intensity modulated radiotherapy (IMRT) using kilo-voltage cone-beam CT (kV-CBCT), and to evaluate the impact of the setup errors on the dose distributions in tumor target volume and the peripheral normal tissues. **Methods** Twenty-one patients with thoracic esophageal carcinoma undergoing image guided IMRT (IG-IMRT) were included in this study. Using kV-CBCT, 173 setup errors of these patients were acquired before treatment. By shifting the isocenters, these setup errors were simulated in the 3-dimensional treatment planning system and the corresponding impact of the dose distribution in tumor target volume and peripheral organs were evaluated. **Results** The translational deviations of lateral, longitudinal and vertical directions were (2.73 ± 1.85) , (3.19 ± 2.71) , and (2.35 ± 1.71) mm, respectively. The dose of gross tumor volume (GTV) was not impacted significantly by the setup errors. However, comparing with the standard plan without setup errors, the setup errors in the simulated plan reduced the dose of 95% planning target volume (PTV) by 3.38 Gy. The dose to PTV D_{min} and PTV D_{mean} were also reduced by 9.83 Gy and 0.65 Gy respectively. The correction of setup errors improved the conformity index (CI) and the homogeneity index (HI) for PTV. The CI and HI for the standard plan were 0.74 ± 0.10 and 1.07 ± 0.02 , respectively. The CI and HI for the simulated plan were 0.69 ± 0.08 and 1.13 ± 0.07 , respectively. Statistically significance was observed in these differences ($t = 3.43$ and -3.91 respectively, $P < 0.05$). No statistical significance was observed in the dose differences in lungs, spinal cord and heart between the two plans ($P > 0.05$). The mean maximum dose of the spinal cord was (42.20 ± 4.97) Gy in the simulation plan, which was (41.37 ± 2.75) Gy in the standard plan. For some patients, the maximum

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2012.04.011

基金项目:安徽省 2010 年高校省级自然科学基金(KJ2010B380)

作者单位:230001 合肥,安徽医科大学附属医院放疗科

dose of the spinal cord exceeded the tolerance level of 45 Gy in the simulation plan, and one case even reached 52.8 Gy. **Conclusions** Using the image guidance of kV-CBCT, the setup errors can be reduced significantly for patients with esophageal carcinoma receiving IG-IMRT. The correction of setup errors can increase the treatment precision and enhance the dose in PTV. No significant dose changes were observed in the lung, spinal cord and heart as a result of setup error correctio.

【Key words】 Esophageal neoplasm; Intensity modulated radiotherapy; Image guided radiotherapy; Setup error; Dosimetry

摆位误差是影响调强放疗(intensity modulated radiotherapy, IMRT)剂量分布准确性的重要因素之一,而图像引导放疗(image guided radiotherapy, IGRT)是继三维适形放疗和调强放疗之后的新技术^[1]。调强放疗中,利用图像引导可获取和修正患者的摆位误差,提高患者治疗位置的准确性。本研究利用千伏级锥形束 CT(kV-CBCT)实时在线校正胸段食管癌调强放疗中的摆位误差,并根据测得的误差数据在计划系统中模拟患者的实际治疗过程,计算并分析摆位误差对食管癌肿瘤靶区及周围正常组织剂量学参数的影响。

资料与方法

1. 一般临床资料:21 例胸段食管癌患者,无放疗禁忌证,其中男性 15 例,女性 6 例,年龄 47~81 岁,中位年龄 64 岁。患者均签署了知情同意书。

2. 模拟定位与计划设计:患者取仰卧位,采用放疗体架及负压真空垫固定,CT 扫描范围从环状软骨至肋膈角下缘,层厚 3 mm,图像经网络传输到 Pinnacle 8.0 计划系统,由医生在重建后的 CT 图像上逐层勾画 GTV、CTV、PTV 和危及器官(OAR)。GTV 包括食管病变壁厚 ≥ 0.5 cm 的原发灶和纵隔内短径大于 1 cm 的淋巴结,CTV 是在 GTV 基础上左右前后外扩 0.5 cm,上下外扩 2~3 cm,PTV 为 CTV 外扩 0.3~0.5 cm,危及器官主要是脊髓、心脏和全肺。计划采用 5 野静态(sMLC)调强放疗,要求 95% 的 PTV 体积达到处方剂量 64 Gy,2 Gy/次,共 32 次,该计划命名为标准计划,此计划不涉及患者的摆位误差。

3. CBCT 图像获取与误差修正:按患者体表标记摆位,确定照射中心后,应用 Synergy IGRT 加速器的千伏级锥形束 CT 扫描,获取患者的 CBCT 影像,将中分辨率重建后的影像与计划 CT 影像进行匹配融合,根据椎体的骨性标志和肿瘤靶区的形状和位置,利用自动+手动匹配方式配准得到患者的左右(x)、头脚(y)、腹背(z)三维平移以及旋转摆位误差,在确保 3 个方向旋转误差 $\leq 3^\circ$ (当 $> 3^\circ$ 时需重新

摆位并扫描通过后再实施调强放疗)的情况下,移动加速器治疗床修正平移误差。每例患者开始治疗的前 3 次均行图像引导并在线修正摆位误差,第 4 次时取患者前 3 次摆位误差的平均值修正患者的照射中心并调整摆位标记,按修正后的照射中心进行本周的治疗,在后续的疗程中每周再行 1 次图像引导并修正前 1 周的照射等中心。根据 CBCT 资料及图像注册坐标系统,患者在 x、y、z 三维方向摆位误差的正值分别表示患者的右、头和腹侧,误差值的正负仅表示偏移的方向,因此,误差统计时采用其绝对值计算分次间的摆位误差。

4. 摆位误差的模拟及剂量学分析:仅在计划系统中依照 IGRT 误差数据改变射野等中心三维坐标模拟患者的实际治疗过程,其余所有条件包括射线能量与角度、射野形状、机器跳数和处方剂量都不改变,不进行重新优化,再次计算剂量分布,这种模拟相当于单纯改变患者的体位,而照射方案和标准计划完全一致,剂量线分布的改变只反映出因摆位误差而导致的肿瘤靶区和危及器官受照剂量分布的变化,此含有误差的计划命名为模拟计划。

5. 治疗计划评估:利用剂量体积直方图(DVH)对标准计划与模拟计划的计划靶区、危及器官的受照剂量进行剂量学统计分析。所选择的肿瘤靶区参数包括:GTV 和 PTV 的最大剂量 D_{max} 、最小剂量 D_{min} 、平均剂量 D_{mean} ;5% 和 95% 的 PTV 受照射剂量 $D_{5\%}$ 和 $D_{95\%}$;PTV 的均匀性指数(homogeneity index, HI)和适形度指数 CI(conformity index, CI);危及器官参数包括:双肺的 V_5 、 V_{10} 、 V_{20} 、 V_{30} 、 D_{mean} 、 D_{max} ,脊髓最大剂量 D_{max} ,心脏的 V_{40} 、 V_{mean} 。其中, $HI = D_{5\%} / D_{95\%}$ ^[2], $CI = (V_{T,ref} \times V_{T,ref}) / (V_T \times V_{ref})$ ^[3],其中 V_{ref} 、 $V_{T,ref}$ 分别为 95% 的参考等剂量线所包围的体积和所覆盖的 PTV 体积, V_T 为 PTV 体积。HI 值越低(即越接近 1),表示靶区剂量均匀性越好,反之,HI 值越大表明剂量不均匀性较大。CI 值为 0~1,CI 值越大,表示适形度越好,等于 1 时最理想,等于 0 时最差。

6. 统计学处理:结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示。采用 SPSS 17.0 软件对 2 套计划进行配对 t 检验分析。 $P < 0.05$

为差异有统计学意义。

结 果

1. 摆位误差:共获得 173 组 CBCT 摆位误差数据, x 、 y 、 z 三维位移摆位误差为 (2.73 ± 1.85) 、 (3.19 ± 2.71) 和 (2.35 ± 1.71) mm。以 3、5 和 > 5 mm 对患者 x 、 y 、 z 三维位移偏差频数进行分析,结果见表 1。

表 1 21 例胸段食管癌调强放疗患者的位移偏差频率分布 (%)

方向	3 mm	5 mm	> 5 mm
x	69.2	24.6	6.2
y	61.6	25.3	13.1
z	74.0	20.2	5.8

2. 摆位误差对肿瘤靶区照射剂量的影响:摆位误差对患者 GTV 受照剂量(最大、最小和平均剂量)和计划靶区的最大剂量影响不明显,但误差使计划靶区的最小剂量和平均剂量分别减少 9.1 和 0.7 Gy ($t = 4.33, 2.63, P < 0.05$)。两套计划的 5% PTV 受照剂量 $D_{5\%}$ 差异无统计学意义,但 PTV 95% 的体积受照剂量 $D_{95\%}$ 差异有统计学意义($t = -0.09, P < 0.05$),表明摆位误差明显降低了 95% 的 PTV 受照剂量,与标准计划相比 $D_{95\%}$ 下降了 3.4 Gy,百分偏差为 5.27%,见表 2。另外,标准计划与模拟计划的 PTV 靶区适形度和剂量均匀性的差异均有统计学意义($t = 3.43$ 和 $3.91, P < 0.05$)。可见,摆位误差的校正可提高计划靶区适形度和剂量的均匀性。

3. 摆位误差对危及器官剂量学参数的影响:误差修正对双肺的 V_5 、 V_{10} 、 V_{20} 、 V_{30} 、 D_{mean} 、 D_{max} 、脊髓最大剂量 D_{max} 和心脏 V_{40} 、 V_{mean} 的影响,差异无统计学意义,表明摆位误差对双肺、脊髓和心脏受照剂量未见明显改变。值得注意的是,脊髓最大剂量的平均值 (42.20 ± 4.97) Gy 高于标准计划的 (41.37 ± 2.75) Gy,且差异无统计学意义,但进一步分析发现,在没有摆位误差的标准计划中,无一例

患者的脊髓受量超过 45 Gy 的脊髓最高剂量限量要求,而在实际调强治疗时,因摆位误差的存在导致模拟计划中有 4 例患者受量超过 45 Gy,最大 1 例达 52.8 Gy。

讨 论

调强放疗是当前食管癌的标准治疗方法之一,与常规放疗相比,调强放疗可更好地把高剂量集中于肿瘤靶区并保护肿瘤周围重要器官,但这也意味着肿瘤与正常组织之间的剂量梯度变化增大,对治疗摆位精确度要求更高,而调强放疗过程中的不确定因素(如体位固定和摆位技术等)势必会造成治疗等中心与计划 CT 等中心的位置偏差,使得实际放疗的剂量分布与计划设计剂量分布不一致,从而导致肿瘤剂量不足或危及器官过量照射。

本研究利用 CBCT 修正胸段食管癌调强放疗患者的摆位误差,发现患者头脚方向的摆位误差以及 > 5 mm 偏差的频数都大于左右和前后方向相应参数,分析认为,放疗虽然采用放疗体架及负压真空垫的体位固定方式,但是由于胸腹部呈圆桶状以及患者随治疗时间变化而引起的体型改变,这是导致头脚方向误差较大的主要因素。通过实际治疗过程的模拟发现,摆位误差对患者的 GTV 的剂量学影响不明显,而对患者 PTV 的剂量学参数影响较大,明显降低计划靶区的最小剂量和 95% PTV 体积的处方剂量限值要求,导致肿瘤靶区照射剂量不足,进而可能会造成肿瘤的局部复发。图像引导也可提高计划靶区适形度和剂量的均匀性。摆位误差改变了患者体内剂量的分布,与标准计划相比,这些误差对肿瘤周围正常组织如双肺、心脏和脊髓照射剂量的影响差异无统计学意义,但在模拟计划中脊髓 D_{max} 平均值高于标准计划的相应值,其中有 4 例患者脊髓最大受量超过 45 Gy 的耐受剂量限值,这表明部分患者的实际治疗等中心朝脊髓方向有较大的偏移,导致脊髓受量超高,这在调强放疗中是必

表 2 2 套 IMRT 计划的靶区剂量分布、适形度和剂量均匀性比较 ($\bar{x} \pm s$)

治疗患者 计划数	GTV (Gy)				PTV (Gy)				CI	HI	
	D_{min}	D_{max}	D_{mean}	$D_{5\%}$	$D_{95\%}$	D_{max}	D_{min}	D_{mean}			
标准 计划	21	64.9 ± 2.2	70.2 ± 2.3	67.7 ± 1.7	68.5 ± 1.6	64.1 ± 0.1	71.2 ± 2.3	51.1 ± 12.3	67.0 ± 1.2	0.74 ± 0.10	1.07 ± 0.02
模拟 计划	21	62.2 ± 7.9	70.3 ± 2.3	67.6 ± 1.7	68.5 ± 1.5	60.7 ± 2.7	71.4 ± 2.1	42.0 ± 12.0	66.3 ± 1.0	0.69 ± 0.08	1.13 ± 0.07
t 值		-1.56	0.51	-0.67	-0.09	5.32	-0.44	4.33	2.63	3.43	-3.91
P 值		>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	<0.05	>0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

须要避免的问题。这与高超等^[4]报道的用二维电子射野影像系统分析食管癌三维适形放疗时摆位误差对治疗剂量影响的情况相类似。

摆位误差不仅表现为靶区三维方向上的平移,还表现为靶区的旋转。有学者研究认为体部放疗中旋转造成的剂量分布改变很小,可以忽略^[5-6]。潘建基等^[7]研究发现,鼻咽癌调强放疗中旋转误差大于 3°时,可导致靶区照射剂量降低和周边的正常器官照射剂量升高,其中周围正常器官的误照比靶区漏照更为明显。本研究未具体探讨旋转误差对胸段食管癌调强放疗剂量的影响,但在实际摆位治疗时,为减少旋转误差对治疗剂量的影响,要求当患者任何一方向旋转角度≥3°时,需重新摆位并扫描通过后再实施调强放疗。

国际辐射单位与测量委员会(ICRU) 24 号报告指出,靶区剂量偏离 5% 就可能使原发灶失控或并发症增加^[8]。在胸段食管癌调强放疗中,由于分次间摆位的可重复性差、误差偏大,最终会对肿瘤受照剂量产生较大影响,因此,调强放疗前,有必要利用 kV-CBCT 系统进行摆位误差校正,进一步降低摆位误差,提高肿瘤靶区及周围器官受照剂量的准

确性。

参 考 文 献

[1] 戴建荣,胡逸民. 图像引导放疗的实现方式. 中华放射肿瘤学杂志,2006,15(2): 132-135.

[2] Bragg CM, Conway J, Robinson MH. The role of intensity modulated radiotherapy in the treatment of parotid tumors. Int J Radiat Oncol Biol Phys,2002,53(3):729-738.

[3] Feuvrel L, Noël G, Mazon JJ, et al. Conformity index: A review. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2006, 64(2):333-342.

[4] 高超,王澜,迟子峰,等. 食管癌三维适形放疗中摆位误差对剂量学影响的研究. 中华放射肿瘤学杂志,2009,18(4): 270-273.

[5] Fu W, Yang Y, Li X, et al. Dosimetric effects of patient rotational setup errors on prostate IMRT treatments. Phys Med Biol,2006,51(20):5321-5331.

[6] Cao M, Lasley F, Fakiris A, et al. Evaluation of rotational errors in treatment setup of stereotactic body radiotherapy (SBRT) of lung cancer. Med Phys,2011,38(6): 3616.

[7] 潘建基,潘才住,陈传本,等. 摆位系统误差对鼻咽癌调强放疗剂量的影响. 中华放射肿瘤学杂志,2007,16(5):394-396.

[8] 胡逸民. 肿瘤放射物理学. 北京:原子能出版社,1999: 612-615.

(收稿日期:2011-11-23)

· 读者 · 作者 · 编者 ·

关于中华医学会系列杂志投稿网址的声明

为维护广大读者和作者的权益以及中华医学会系列杂志的声誉,防止非法网站假冒我方网站诱导作者投稿、并通过骗取相关费用非法获利,现将中华医学系列杂志稿件管理系统网址公布如下,请广大作者加以甄别。

1. “稿件远程管理系统”网址

中华医学会网站(<http://www.cma.org.cn>)首页的“业务中心”栏目、中华医学会杂志社网站(<http://www.medline.org.cn>)首页的“稿件远程管理系统”以及各中华医学会系列杂志官方网站接受投稿。作者可随时查阅到稿件处理情况。

2. 编辑部信息获取

登录中华医学会杂志社网站(<http://www.medline.org.cn>)首页,在《中华医学会系列杂志一览表》中可查阅系列杂志名称、编辑部地址、联系电话等信息。

3. 费用支付

中华医学会系列杂志视杂志具体情况,按照有关规定,酌情收取稿件处理费和版面费。稿件处理费作者在投稿时支付;版面费为该稿件通过专家审稿并决定刊用后才收取。

欢迎投稿,并与编辑部联系。

特此声明。

(中华医学会杂志社)