·技术研究·

应用锥形束 CT 研究鼻咽癌容积弧形调强放射治疗的摆位误差

尹文晶[1]，孙 颖[1]，迟 峰[1]，方键蓝[1]，郭 蕊[1]，林爱华[2]，祁振宇[1]，马 骏[1*]
(1. 中山大学肿瘤防治中心//华南肿瘤学国家重点实验室放射治疗科，广东 广州 510060；2. 中山大学公共卫生学院，广东 广州 510080)

摘 要：【目的】应用锥形束 CT(CBCT)研究鼻咽癌容积弧形调强放射治疗(VMAT)分次间和分次内的摆位误差，为制订临床靶区(CTV)外的计划靶区(PTV)边界提供依据。【方法】于 2010 年 10 月至 2012 年 1 月共 17 例接受 VMAT 治疗的鼻咽癌患者前瞻性的纳入研究。所有患者分别于每日常规摆位后、摆位纠正后(校位阈值 2 mm)、每周放射治疗后行 CBCT 并与计划 CT 匹配，获取分次间及分次内的摆位误差。通过 $M_{PTV} = 2.5\Sigma + 0.7\sigma$($M_{PTV}$：PTV 边界；$\Sigma$：系统误差；$\sigma$：随机误差)计算 M_{PTV}。【结果】靶区各方向的体位校正前、校正后和分次内的绝对平均误差(mm)分别为 1.1 ~ 1.2、0.6 ~ 0.7 和 0.4 ~ 0.6，相应的 Σ 为 0.9 ~ 1.3、0.4 ~ 0.5 和 0.2 ~ 0.4，σ 为 0.7 ~ 0.9、0.7 和 0.5 ~ 0.7。分次间和分次内三维(3D)位移随时间逐渐增加且有统计学差异($P = 0.004$、0.009)。靶区各方向总的 M_{PTV}(包括纠正前和分次内误差)为 3.4 ~ 4.0 mm，纠正后的边界(包括纠正后和分次内误差)为 1.7 ~ 2.3 mm。【结论】鼻咽癌 VMAT 放疗计划设计时应采用 VMAT 照射技术相关的 M_{PTV}。摆位误差随着治疗时间逐渐增大。

关键词：锥形束断层扫描；摆位误差；计划靶区；鼻咽癌；容积旋转放射治疗
中图分类号：R73 **文献标志码**：A **文章编号**：1672-3554(2012)05-0678-05

Analysis of Inter-fraction and Intra-fraction Setup Error of Nasopharyngeal Carcinoma Patients Treated with Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT) with Cone Beam CT

YIN Wen-jing[1], SUN Ying[1], CHI Feng[1], FANG Jian-lan[1], GUO Rui[1], LIN Ai-hua[2], QI Zhen-yu[1], MA Jun[1*]
(1.State Key Laboratory of Oncology in Southern China//Department of Radiation Oncology, Cancer Center, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510060; 2. School of Public Health, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510060, China)

Abstract：【Objective】To evaluate the inter-fraction and intra-fraction setup error during the treatment with cone beam computer tomography (CBCT) and provide theoretical basis for clinical target volume-planning target volume (CTV-PTV) margins for nasopharyngeal carcinoma patients treated with volumetric-modulated arc therapy (VMAT).【Methods】Seventeen consecutive NPC patients treated with VMAT were prospectively enrolled for the study between October 2010 and January 2012. For each patient, three CBCT scans were obtained after conventional positioning, online correction with 2 mm tolerance daily and VMAT delivery weekly, and the scans were registered to the planning CT to determine inter-fraction and intra-fraction errors. The M_{PTV} were calculated with the recipe, $V_{Margin} = 2.5\Sigma + 0.7\sigma$ (Σ, systematic error; σ, random error).【Results】The average absolute errors of the pre-correction, post-correction, and intra-fraction error were 1.1–1.2 mm, 0.6–0.7 mm and 0.4–0.6 mm in the three dimensions. The corresponding Σ were 0.9–1.3 mm, 0.4–0.5 mm and 0.2–0.4 mm, σ were 0.7–0.9 mm, 0.7 mm and 0.5–0.7 mm. Gradual increases in both inter-fraction and intra-fraction three-dimensional (3D) displacement were observed with time and treatment ($P = 0.004$, $P = 0.009$). The total M_{PTV} accounting for pre-correction and intra-fraction error were 3.4–4.0 mm and margins accounting for post-correction and intra-fraction error were 1.7–2.3 mm.【Conclusions】 VMAT irradiation technology personalized M_{PTV} should be adopted for the design of VMAT plan. Displacement increased as a function of time.

Key words: cone-beam computed tomography; setup error; planning target volume; nasopharyngeal carcinoma; volumetric modulated arc therapy

[J SUN Yat-sen Univ(Med Sci),2012,33(5):678-682]

收稿日期：2012-03-02
基金项目：国家自然科学基金(81071835)；卫生部临床学科重点项目(2010178)；广东省科技计划项目(2009B030801016)；珠江学者(2010)
作者简介：尹文晶，硕士，研究方向：肿瘤放射治疗，E-mail：wenjing1342@163.com；*通信作者，马骏，E-mail：majun2@mail.sysu.edu.cn

放射治疗是鼻咽癌的主要治疗手段，摆位误差是放射治疗不可避免的问题。在无法每日检测及纠正这种误差的情况下，临床上通常将临床靶区(clinical target volume，CTV)外放一定的间距形成计划靶区(planning target volume，PTV)，以补偿摆位误差带来的剂量学影响。调强放射治疗(intensity modulated radiation therapy，IMRT)以其剂量学的优势成为鼻咽癌放疗的主要方式[1-2]。静态调强由于治疗时间长会使病人的不自主运动增多，容积弧形调强放射治疗(volumetric-modulated arc therapy，VMAT)作为一种新的调强方式既可以保证剂量优势又可以大大缩短治疗时间[3]。锥形束断层扫描(cone-beam computed tomography，CBCT)可以在线监测及矫正患者治疗时的体位，减小摆位误差和边界[4]，为鼻咽癌精确放疗提供质量保证。目前国内外尚无针对鼻咽癌 VMAT 摆位误差的报道。本研究试图通过 CBCT 测量及纠正鼻咽癌 VMAT 摆位误差，寻找适合 VMAT 技术的靶区边界，为临床计划靶区的合理设计提供参考。

1　材料与方法

1.1　患者资料

前瞻性的收集中山大学肿瘤防治中心 2010 年 10 月至 2011 年 10 月收治的接受 VMAT 的初诊鼻咽癌病人共 17 例，所有病例均经病理确诊且无远处转移。其中男性 14 例，女性 3 例；中位年龄 43 岁(范围为 35 ~ 66 岁)；按世界病理组织分型，所有病例均为Ⅱ/Ⅲ型。按国际抗癌协会(UICC)标准(2009)确定 TNM 分期，其中 T1、T2、T3、T4 人数分别为 2、6、9、0 例，N0、N1、N2、N3 人数分别为 4、7、5、1 例，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ期患者人数分别为 2、2、12、1 例。

1.2　治疗方法

所有患者采用根治性 VMAT。采用热塑性面颈肩膜(Civco Medical Solutions，Kolona，USA)固定患者于仰卧体位。螺旋 CT 扫描定位，扫描图像传输到 Monaco(version 2.02)治疗计划系统。靶区定义参照 ICRU50 和 ICRU62 号文件，PTV 由计划系统自动向 CTV 三维方向上外扩 3 mm 生成。处方剂量 PTVnx(包括鼻咽大体肿瘤和咽后淋巴结)为 70 Gy，PTV1(包括临床高危区)为 60 Gy，PTV2(包括临床低危区和颈部预防照射区)为 56 Gy。采用同期加速推量放疗，分割次数为 33 次，每周照射 5 次。VMAT 实施采用医科达公司的 PreciseBeam VMAT® 加速器。III/IV 期病人均接受以顺铂为基础的同期化疗。

1.3　XVI 图像获取、匹配

XVI 图像的获取基于医科达公司的千伏级 CBCT 系统。图像的采集参数：机架逆时针扫描角度为 100° ~ 260°，电压电流为 100 kV/10 mA，S20 准直器，f0 的过滤板，共 361 帧图像。每次常规摆位后行 CBCT 扫描，若任一方向平移误差 > 2 mm，则予以在线纠正，纠正后再次行 CBCT 扫描。每周再行一次放疗后 CBCT 扫描。摆位误差为 CBCT 与计划 CT 图像的等中心点在左右 (medial-lateral，ML)、头尾(superior-inferior，SI)、前后(anterior-posterior，AP)方向的平均误差及绕 ML(pitch)、SI(roll)、AP(yaw)方向的旋转误差。图像匹配由医科达 XVI 软件的自动骨匹配程序完成。图像的匹配区域包括肿瘤、周围骨组织及重要的危及器官。

1.4　摆位误差的确定及边界计算

分别记录摆位纠正前、校位后和治疗后的 ML、SI 和 AP 方向的平移和旋转误差。摆位纠正前的误差为放疗分次间误差；摆位纠正后的误差则为残余误差；治疗结束时与纠正摆位后的误差值之差为放疗分次内移位。

计算绝对误差的平均值和标准差；计算三维位移值[6]($F=\sqrt{X^2+Y^2+Z^2}$，F 代表三维位移值，X 代表 ML 方向的误差值，Y 代表 SI 方向的误差值，Z 代表 AP 方向的误差值)。计算所有病人平均误差的平均值、系统误差(所有病人平均误差的标准差 Σ)、随机误差(所有病人标准差的均方根 σ)、总的系统误差($\Sigma_{总}=\sqrt{\Sigma^2_{分次间}+\Sigma^2_{分次内}}$)和总的随机误差($\sigma_{总}=\sqrt{\sigma^2_{分次间}+\sigma^2_{分次内}}$)。按照 Van Herk[7] 提出的 M_{PTV} 计算公式($M_{PTV}=2.5\Sigma+0.7\sigma$，保证至少 90%病人获得 95%的处方剂量)计算误差纠正前、纠正后、分次内和总的 M_{PTV}。目前国内外尚无旋转误差摆位边界的计算公式。

1.5　统计学方法

采用 SPSS 16.0 软件进行统计分析。整个治疗时间等分为三个阶段(前 11 次、中 11 次、后 11 次放疗)，采用单因素重复测量设计的方差分析方法分析各方向的分次间、分次内的绝对误差和三维位移值随时间的变化趋势，采用 LSD (least significance difference)法进一步行组间比较。统计

学意义以双侧检验、P <0.05 为标准。

2 结 果

2.1 分次间及分次内误差

17 例患者共获取 CBCT 扫描 650 次，其中纠正前 CBCT 扫描 393 次(占总治疗次数的 70.1%)，纠正后 CBCT 扫描 161 次（占总治疗次数的 28.7%)，治疗后 CBCT 扫描 107 次(占总治疗次数的 19.1%)，中位次数为 36 次。VMAT 治疗时间为 5.6 ~ 9.4 min，中位时间为(7.2 ± 1.2)min。

纠正前平移误差在 ML、SI 和 AP 方向 > 2 mm 的次数分别为 59（16.2%)、67（17.1%）和 59 (15.0%)；摆位纠正后各方向的误差均小于 2 mm；分次内误差 > 2 mm 的次数分别为 1（1.1%)、1 (1.1%)和 5(4.7%)。纠正前旋转误差在绕 ML、SI 和 AP 方向 > 2°的次数分别为 22（5.6%)、51 (13.0%)和 19 (4.8%)；纠正后>2°的次数分别为 22 (5.6%)、48 (1.4%)和 17 (12.2%)；分次内误差仅绕 ML 方向 > 2°且仅发生 1 次。各方向的平移误差与旋转误差值无明显相关性。各方向纠正前、纠正后及分次内的绝对误差的平均值和标准差见表 1。摆位误差的分布情况详见表 2。

表 1 鼻咽癌病人体位纠正前后及分次内的绝对误差

Table 1 Absolute error of pre-, post-correction and intra-fraction error for patients with nasopharyngeal carcinoma ($\bar{x} \pm s$)

	Pre-correction error	Post-correction error	Intra-fraction error
ML/mm	1.1 ± 1.0	0.6 ± 0.5	0.4 ± 0.3
SI/mm	1.2 ± 0.9	0.7 ± 0.6	0.6 ± 0.4
AP/mm	1.1 ± 0.9	0.7 ± 0.5	0.5 ± 0.6
pitch /(°)	0.9 ± 0.7	0.9 ± 0.6	0.4 ± 0.4
roll /(°)	1.1 ± 0.8	1.1 ± 0.8	0.4 ± 0.3
Yaw/(°)	0.7 ± 0.6	0.7 ± 0.6	0.3 ± 0.2

ML: medial-lateral; SI: superior-inferior; AP: anterior-posterior; SD: standard deviation of absolute error. n = 17.

2.2 摆位误差随治疗时间的变化趋势

采用单因素重复测量设计的方差分析法分析各方向的分次间及分次内绝对误差和 3D 位移随时间的变化趋势，结果显示 AP 方向的分次间绝对误差逐渐增加且有统计学意义(P = 0.011)；AP 和 SI 方向的分次内绝对误差逐渐增加，但差异无统计学意义(P 值分别为 0.051 和 0.078)；分次间和分次内三维位移逐渐增加且有统计学差异（P = 0.004，P = 0.009)，如图 1。采用 LSD 方法对三维位移值行组间比较，结果显示后 11 次放疗的分次间三维位移（2.5 mm）高于前 11 次放疗的位移(2.2 mm)，差异有统计学差异(P = 0.001)；后 11 次放疗的分次内三维位移值(1.2 mm)亦高于前 11 次(0.8 mm，P = 0.01)。各方向的旋转误差随治疗时间无明显变化趋势。

2.3 纠正前、纠正后和分次内 M_{PTV}

纠正后 M_{PTV} 明显低于纠正前 M_{PTV}；分次内 M_{PTV} 亦低于纠正前 M_{PTV}，详见表 3。总的 M_{PTV}(包括纠正前和分次内误差)在 ML、SI 和 AP 方向为 4.0 mm、3.4 mm 和 3.4 mm；CBCT 在线纠正后，其值(包括纠正后和分次内误差）降低为 1.7 mm、2.3 mm 和 2.2 mm。

表 2 各方向体位纠正前后和分次内误差的分布情况

Table 2 The distribution of the pre-, post-correction and intra-fraction error in each dimension

Transitional	Pre-correction			Post-correction			Intra-fraction		
error/mm	ML	SI	AP	ML	SI	AP	ML	SI	AP
$\bar{x} \pm s$	−0.2 ± 1.5	−0.9 ± 1.2	0.8 ± 1.2	0.0 ± 0.7	−0.4 ± 0.8	0.3 ± 0.8	0.1 ± 0.5	−0.2 ± 0.7	−0.3 ± 0.7
Range	−5.2 ~ 5.0	−4.8 ~ 2.0	−2.9 ~ 4.2	−2.0 ~ 1.8	−2.0 ~ 2.0	−1.9 ~ 2.0	−1.5 ~ 2.1	−2.4 ~ 1.8	−2.8 ~ 0.7
Σ,σ	1.3,0.9	0.9,0.9	1.0,0.7	0.4,0.7	0.5,0.7	0.5,0.7	0.2,0.5	0.4,0.7	0.4,0.7
Rotational	Pre-correction			Post-correction			Intra-fraction		
error/(°)	pitch	roll	yaw	pitch	roll	yaw	pitch	roll	yaw
$\bar{x} \pm s$	−0.7 ± 0.8	−0.1 ± 1.4	−0.2 ± 0.9	−0.7 ± 0.8	−0.1 ± 1.3	−0.1 ± 0.9	−0.1 ± 0.5	0.1 ± 0.5	0.0 ± 0.4
Range	−3.5 ~ 2.1	−4.4 ~ 2.9	−4.0 ~ 2.8	−3.0 ~ 1.8	−3.0 ~ 2.9	−3.0 ~ 2.7	−2.8 ~ 1.4	−1.2 ~ 1.5	−1.5 ~ 0.9
Σ,σ	0.7,0.6	0.9,1.1	0.7,0.7	0.7,0.6	0.9,1.0	0.6,0.7	0.2,0.5	0.2,0.5	0.2,0.4

ML: medial-lateral; SI: superior-inferior; AP: anterior-posterior; SD: standard deviation; Σ: systematic error; σ: random error

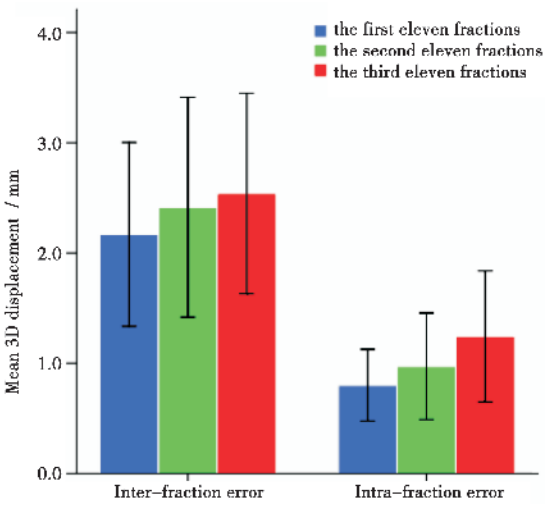


图 1　分次间和分次内三维位移随治疗时间的变化趋势

Fig.1　Inter-fraction and intra-fraction three dimensional setup variation as a function of time

Error bars represent one standard deviation

表 3　各方向的 M_{PTV}

Table 3　The M_{PTV} in each transitional direction

	ML/mm	SI/mm	AP/mm
Pre-correction	3.8	3.0	3.0
Post-correction	1.4	1.8	1.6
Intrafraction	0.9	1.5	1.5
Total without CBCT correction	4.0	3.4	3.4
Total with CBCT correction	1.7	2.3	2.2

ML：medial-lateral；SI：superior-inferior；AP：anterior-posterior

3　讨　论

头颈肿瘤的摆位误差包括分次间误差和分次内误差。分次间摆位误差的主要来源包括人体各部分的相对运动、固定设备的不可靠性、摆位依据的激光灯、光距尺的误差以及治疗床、模拟机和 CT 床的差别。头颈肿瘤分次内摆位误差由于其位置的特殊性使其受呼吸及心跳等引起肿瘤明显移位的生理活动的影响小，故主要来源于治疗过程中患者的体位移动所导致的误差。

荷兰学者 Hurkmans 等[7]对既往有关头颈肿瘤分次间摆位误差的研究进行文献回顾，结果发现头颈肿瘤的 Σ 和 σ 分别为 1.6 ~ 4.6 mm 和 1.1 ~ 2.5 mm，本研究发现鼻咽癌进行 VMAT 治疗时分次间 Σ 为 0.9 ~ 1.3 mm，σ 为 0.7 ~ 0.9 mm，明显低于此文献报道。Wang 等[5]则利用千伏级 CBCT 监测 22 例鼻咽癌分次间误差发现所有患者各方向的 Σ 和 σ 均为 1.1 ~ 1.3 mm；Velec 等[8]亦对 20 例头颈肿瘤于分次治疗前采用 CBCT 监测摆位误差，结果显示各方向 Σ 为 0.8 ~ 1.1 mm，σ 小于 2 mm；本研究结果与此些报道相当。分析各研究报道，结果存在差异的原因可能如下。①与体位固定装置有关。本研究采用头颈肩热塑面膜（同 Wang 等和 Velec 等）而非头颈膜[7]进行体位固定，此装置被作为提高头颈肿瘤 IMRT 放疗摆位准确性与重复性的常用必备设施[9]。②与所监测的区域有关。本研究监测误差行图像匹配时所包括的区域为鼻咽和上颈部（同 Wang 等和 Velec 等）而不包括下颈部[7]，而有研究报道下颈误差明显高于上颈误差[10]。因此，改良体位固定装置对于减小分次间摆位误差、提高放疗精准性有重要作用。

在头颈肿瘤放疗中，由于严重口腔黏膜炎所致疼痛或因皮肤外轮廓皱缩所致面罩松弛，患者在放疗实施过程中难以保持体位一致性。本研究发现，VMAT（治疗时间 5 ~ 9 min）分次内 Σ 为 0.2 ~ 0.4 mm，低于既往研究所报道的 IMRT（治疗时间 15 ~ 20 min）分次内误差值[8,11]。Hoogeman 等[12]亦报道分次内 Σ 随治疗时间延长逐渐增大。由此可见，VMAT 技术在执行时所需治疗时间较静态调强短，从一定程度上改善了治疗中患者的不自主运动，减小分次内摆位误差。

随着治疗进展肿瘤逐渐退缩且患者体质量下降，体位固定装置与体位的适形性降低，放疗精准性可能降低。Den 等[5]报道放疗后 3 周的 MPTV 明显高于放疗前 3 周。本研究发现类似的结果，分次间及分次内的三维位移随着治疗时间逐渐增大。因此，为最大程度提高治疗增益比，可在治疗后期进行必要的临床干预（如 CBCT 实时监控及校位）以提高放疗准确性。

本研究结果显示校位前旋转误差在绕 ML、SI 和 AP 方向 >2° 的次数分别为 22（5.6%）、51（13.0%）和 19（4.8%），与文献报道相当[5,13]。Guckenberger 等[13]的研究认为对于长形靶区（例如鼻咽癌靶区），即使较小的旋转误差亦会引起靶区末端明显的位置移动。Kaiser 等[14]亦认为绕 SI 方向约 3°的旋转误差会引起长约 15 cm 的靶区的末端产生 4 mm 的平移误差。因此，采用 Hex-POD 六维床与 CBCT 相结合准确监测和校正旋转误差及

其重要,针对旋转误差的扩边公式需尽快研究。

合理地设计 M_{PTV} 对充分发挥 IMRT 或 VMAT 等适形放射治疗的优势有重要作用,边界过小,容易造成遗漏复发;边界过大,导致过度治疗,不能达到有效保护正常组织的目的。Asselen 等[15]模拟缩小的 M_{PTV} 对腮腺保护的重要性,结果发现 M_{PTV} 每减小 1 mm,腮腺剂量平均降低 1.3 Gy。但是,为保证窄的 M_{PTV} 足够覆盖靶区剂量而每日行 CBCT 校正误差会带来额外受照剂量、增加工作负担,不适合临床广泛应用。本研究通过监测及校正小样本人群的摆位误差从而获取鼻咽癌 VMAT 技术误差纠正前后的个性化的 M_{PTV},这为本中心合理设计鼻咽癌 VMAT 放疗计划提供了理论依据,从而更好地保证靶区覆盖和降低正常组织不良反应。

本研究的研究对象为早中期鼻咽癌患者,未将 T4 期患者纳入。主要原因在于本中心进行鼻咽癌 VMAT 计划优化所采用的是医科达公司的 Monaco(version 2.02)治疗计划系统,而 T4 期肿瘤体积大,侵犯范围广,目前此计划系统对 T4 期鼻咽癌还不能进行很好的计划优化,不能达到满意的剂量分布。临床上我们仅对早中期鼻咽癌患者采用 VMAT 技术治疗。

综上所述,各方向上误差纠正前后的鼻咽癌 VMAT 技术的 M_{PTV} 为 3.4 ~ 4.0 mm 和 1.7 ~ 2.3 mm,为临床鼻咽癌 VMAT 的放疗计划设计提供了理论依据。摆位误差随着治疗时间逐渐增大,放疗后期的 CBCT 在线监测具有重要意义。本研究结果对鼻咽癌 VMAT 质量控制有一定参考意义,值得进一步研究。

参考文献:

[1] Lee N, Xia P, Quivey JM, et al. Intensity-modulated radiotherapy in the treatment of nasopharyngeal carcinoma: an update of the USCF experience[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2002, 53(1): 12-22.

[2] Lin S, Pan J, Lu H, et al. Nasopharyngeal carcinoma treated with reduced-volume intensity-modulated therapy: report on the 3-years outcome of a prospective series[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2009, 75(4): 1071-1078.

[3] Otto K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc[J]. Med Phys, 2008, 35(1): 310-317.

[4] Wang J, Bai S, Chen N, et al. The clinical feasibility and effect of online cone beam computer tomography-guided intensity-modulated radiotherapy for nasopharyngeal cancer[J]. Radiother Oncol, 2009, 90(2): 221-217.

[5] Den RB, Doemer A, Kubicek G, et al. Daily image guidance with cone-beam computed tomography for head-and neck cancer intensity-modulated radiotherapy: a prospective study[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2010, 76(5): 1353-1359.

[6] Van Herk M, Remeijer P, Rasch C, et al. The probability of correct target dosage: Dose-population histograms for deriving treatment margins in radiotherapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2000, 47(4): 1121-1135.

[7] Hurkmans CW, Remeijer P, Lebesque JV, et al. Set-up verification using portal imaging; review of current clinical practice[J]. Radiother Oncol, 2001, 58(2): 105-120.

[8] Velec M, Waldron JN, O'Sullivan B, et al. Cone-beam CT assessment of interfraction and intrafraction setup error of two head-and-neck cancer thermoplastic masks[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2010, 76(3): 949-955.

[9] Hong TS, Tomé WA, Chappell RJ, et al. The impact of daily setup variations on head-and-neck intensity-modulated radiation therapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2005, 61(3): 779-788.

[10] Gilbeau L, Loncol T, Renard L, et al. Comparison of setup accuracy of three different thermoplastic masks for the treatment of brain and head and neck tumors [J]. Radiather Oncol, 2001, 58(8): 155-162.

[11] Xu F, Wang J, Bai S, et al. Detection of intra-fractional tumour position error in radiotherapy utilizing cone beam computed tomography[J]. Radiother Oncol, 2008, 89(3): 311-319.

[12] Hoogeman MS, Nuyttens JJ, Levendag PC, et al. Time dependence of intrafraction patient motion assessed by repeat stereoscopic imaging[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2008, 70(2): 609-618.

[13] Guckenberger M, Meyer J, Vordermark D, et al. Magnitude and clinical relevance of translational and rotational patient setup errors: A cone-beam CT study[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2006, 65(3): 934-942.

[14] Kaiser A, Schultheiss TE, Wong JY, et al. Pitch, roll, and yaw variations in patient positioning[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2006, 66(3): 949-955.

[15] Van Asselen B, Dehnad H, Raaijmakers CP, et al. The dose to the parotid glands with IMRT for oropharyngeal tumor: the effect of reduction of positioning margins[J]. Radiother Oncol, 2002, 64(2): 197-204.

(编辑 刘清海)