

乳腺癌调强放射治疗影像引导锥形束CT 匹配区域选择对靶区精度的影响及临床应用

陈国泉 房建南 杨瑾 李欢 王玺先 郭再仁 马玉家 石俊田 黄晓波
(中山大学孙逸仙纪念医院肿瘤放疗科 广州 510120)

摘要 探究乳腺癌调强放射治疗影像引导锥形束CT(Cone-beam CT, CBCT)匹配区域的选择对靶区精度的影响,为临床应用提供参考。回顾性分析2020年1月至10月乳腺癌保乳术后行放疗患者22名,比较入组病例不同匹配框对靶区匹配精度的影响,设置胸骨组(对照组1)、胸椎组(对照组2)与胸骨胸椎+靶区组(研究组)3种不同匹配区域进行配准,每组测量记录匹配误差、CBCT与定位CT靶区术腔边界金属夹位移数据。共获得匹配误差与靶区金属夹位移数据各528组,对所得数据采用独立样本非参数检验分析并计算3组金属夹的3D矢量距离。胸骨组与研究组匹配误差除旋转误差X轴方向差异有统计学意义,其余方向差异均无统计学意义($p>0.05$),胸椎组与研究组的匹配误差均无统计学意义($p>0.05$)。胸骨组与研究组靶区金属夹在X、Y、Z三个方向位移分别为:(1.59±1.61) mm与(1.23±1.19) mm ($p=0.045$)、(1.65±1.44) mm与(1.89±1.52) mm ($p=0.006$)、(1.13±1.18) mm与(1.37±1.31) mm ($p=0.999$);胸椎组与研究组靶区金属夹在X、Y、Z三个方向的位移分别为:(1.51±1.83) mm与(1.23±1.19) mm ($p=0.002$)、(1.69±1.84) mm与(1.89±1.52) mm ($p<0.001$)、(0.91±1.28) mm与(1.37±1.31) mm ($p=0.003$)。三组靶区金属夹3D矢量距离分别为:(3.16±1.92) mm、(3.62±1.92) mm、(2.52±1.53) mm。乳腺癌调强放疗CBCT自动配准最佳匹配区域应包括胸骨、胸椎与患侧靶区,术腔放置金属夹能提高乳腺癌放疗靶区匹配精准度。

关键词 乳腺肿瘤/调强放射疗法,摆位误差,CBCT匹配区域,自动配准

中图分类号 TL72

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0035

引用该文:

陈国泉,房建南,杨瑾,等.乳腺癌调强放射治疗影像引导锥形束CT匹配区域选择对靶区精度的影响及临床应用[J].辐射研究与辐射工艺学报,2023,41(6):060301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0035.

CHEN Guoquan, FANG Jiannan, YANG Jin, *et al.* Effects of automatic registration range settings of cone-beam computed tomography (CBCT) on target volume accuracy and clinical applications for breast cancer[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, 41(6): 060301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0035.



Effects of automatic registration range settings of cone-beam computed tomography (CBCT) on target volume accuracy and clinical applications for breast cancer

基金资助:“2023年度广州市基础研究计划市校(院)联合资助项目”(2022A03J01189)资助

第一作者:陈国泉,男,1995年1月出生,2017年6月于中山大学新华学院获学士学位,从事肿瘤放射物理学研究,放射治疗师

通信作者:黄晓波,博士,副主任医师, E-mail: huangxbo@mail.sysu.edu.cn

收稿日期:初稿 2023-05-16; 修回 2023-07-02

Supported by "2023 Guangzhou Municipal Basic Research Program Joint Funding Project between the City and Universities (Institutes)" (2022A03J01189)

First author: CHEN Guoquan (male) was born in January 1995, and obtained his bachelor's degree from Xinhua College of Sun Yat-sen University in June 2017. Now he is a radiation therapist, and engaged in radiotherapy physics for tumor research

Corresponding author: HUANG Xiaobo, doctoral degree, associate chief physician, E-mail: huangxbo@mail.sysu.edu.cn

Received 16 May 2023; accepted 02 July 2023

CHEN Guoquan FANG Jiannan YANG Jin LI Huan WANG Xixian GUO Zairen MA Yujia
SHI Juntian HUANG Xiaobo

(Department of Radiotherapy, Sun Yat-sen Memorial Hospital, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510120, China)

ABSTRACT To explore the influence of cone-beam computed tomography (CBCT) matching reference point selection on target accuracy in intensity-modulated radiotherapy (IMRT) for breast cancer and aimed to provide a reference for clinical application. We conducted a retrospective analysis on breast cancer patients who underwent postoperative radiotherapy between January 2020 and October 2020. CBCT images for image-guided radiotherapy, different matching reference points, and the location of computed tomography (CT) image registration were used to divide patients into the sternum (control group 1), thoracic (control group 2), and sternum-thoracic + target (team) groups. CBCT alignment was confirmed by three different registration methods. After matching, the matching error and spatial displacement of the metal clip at the boundary of the operative cavity in CBCT and target CT were measured and recorded. A total of 528 sets of matching errors and spatial displacement data of metal clips in the target area were obtained for 22 enrolled patients. Independent sample nonparametric tests were used to analyze the significant differences in the three groups of data, and the distance of metal clips in the three groups was calculated. The matching errors of the sternum and study groups were statistically significant, except for the rotation error in the direction of the X -axis ($p>0.05$). There were no statistically significant differences in the matching error between the thoracic vertebra and the study groups ($p>0.05$). After the sternum group was matched with the study group, the displacements of the metal clips in the target area of CBCT and CT in the X , Y , and Z directions were as follows: (1.59±1.61) mm and (1.23±1.19) mm ($p=0.045$), (1.65±1.44) mm and (1.89±1.52) mm ($p=0.006$), and (1.13±1.18) mm and (1.37±1.31) mm ($p=0.999$), respectively. The thoracic vertebra group was matched with the study group, and the displacements of the metal clips in the target area of CBCT and CT in the X , Y , and Z directions were as follows: (1.51±1.83) mm and (1.23±1.19) mm ($p=0.002$), (1.69±1.84) mm and (1.89±1.52) mm ($p<0.001$), and (0.91±1.28) mm and (1.37±1.31) mm ($p=0.003$), respectively. Moreover, the 3D vector distances of metal clips in the three groups were (3.16±1.92) mm, (3.62±1.92) mm, and (2.52±1.53) mm, respectively. The selection of optimal reference points for IMRT CBCT automatic registration of breast cancer should simultaneously include the sternum, thoracic vertebra, and target area of the affected side. Placement of a metal silver clip in the intraoperative cavity can improve the matching accuracy of the target area of breast cancer radiotherapy.

KEYWORDS Breast tumor/intensity modulated radiotherapy, Position error, Matching reference points, Automatic registration

CLC TL72

与三维适形放疗相比，乳腺癌全乳调强放射治疗(Intensity modulated radiotherapy, IMRT)技术对放疗体位精度有着更高要求，提高摆位精度能够保证肿瘤靶区照射剂量，保护心肺等危及器官，降低放疗毒副作用^[1-2]，改善患者预后生存质量。乳腺癌放疗行图像引导锥形束CT(Cone-beam CT, CBCT)是提高放疗精度的有效方法，但CBCT匹配区域中该以解剖结构靠近乳房靶区的胸骨还是以受呼吸运动影响较小的胸椎为主尚少有报道。本实验探究乳腺癌IMRT CBCT匹配区域的选择对靶区匹配精度的影响，为乳腺癌精准放疗提供参考。

1 材料与方法

1.1 病例选择

入组标准为：(1)乳腺癌保乳术后患者；病理确诊为乳腺癌，按照美国癌症联合委员会乳腺癌临床病理分期第七版分期为pTis-2N0M0^[3]；(2)依从性好，可配合完成摆位；(3)瘤床术腔标记有手术金属夹。回顾性选取2020年1月至10月于中山大学孙逸仙纪念医院肿瘤放疗科患者共22名，年龄24~68岁(中位数45.5岁)，其中左侧12例，右侧10例，BMI指数19.1~27.9 kg/m²(平均值22.11 kg/m²)。入组患者平均术腔标记金属夹4个。

1.2 体位固定与模拟定位

入组患者均采用仰卧位聚氨酯发泡胶固定，患者平躺并后仰，双臂上举过头。使用西门子 SOMATOM Definition AS 大孔径 CT 模拟机进行 CT 定位，在乳房下 2~3 cm 体表处选择左右与中间三个 CT 定位点并使用铅点标记，同时在体膜相应位置划线作为 CT 扫描零层面，采集定位 CT 影像用于医生勾画靶区与作为 CBCT 验证时匹配图像。扫描条件为：层厚 5 mm，管电压 120 kV，扫描范围从第 6 颈椎上缘至第 2 腰椎下缘，行平扫与增强双影像扫描。扫描完成后使用二氧化碳激光治疗仪标记体表 CT 点。

1.3 靶区勾画与计划设计

将扫描影像上传至医科达 Monaco 治疗计划系统，由高年资放疗医生在 Monaco(版本 5.11.03)系统上参照欧洲放射肿瘤学会(European Society for Therapeutic Radiology and Oncology, ESTRO)乳腺癌靶区勾画指南勾画瘤床、临床靶区、计划靶区以及危及器官心脏、肺部以及双侧乳腺。入组患者放疗方案为逆向优化多野调强计划全乳大分割照射 42.56 Gy，分 16 次光子线照射加 8~10 Gy 瘤床加量照射。靶区勾画完成由物理师在医科达 Monaco 计划系统上进行计划设计，以 5~7 个切线野设计放疗方案。使用医科达 infinity 直线加速器 6 MV 光子线或 9 MeV 电子线实施放射治疗。

1.4 匹配验证与数据收集

入组患者由同一组放射治疗师进行摆位，于治疗前按照体表 CT 点摆位，然后移床到治疗靶区处并使用医科达直线加速器配备的 X 射线容积成

像(X-ray volume imaging, XVI)影像系统进行 CBCT 扫描，扫描参数：管电压 120 kV，管电流 600 mA，重建层厚 3 mm，FOV 42.6 cm。将扫描图像与定位图像按照胸骨组(对照组 1)、胸椎组(对照组 2)与胸骨胸椎+靶区组(研究组)按灰度值(平移+旋转)算法自动模式进行配准，匹配结果以匹配区域内胸骨或胸椎体的重合度作为标准，只有匹配重合度符合临床摆位误差要求方可进行测量两图像的金属夹距离。

1.5 靶区金属夹距离测量与匹配框设置

金属夹距离的测量方法为移动金属夹 X、Y、Z 三个方向，使得当次治疗 CBCT 影像上靶区金属夹与 CT 影像的靶区金属夹位置完全重合，X、Y、Z 方向的位移即为靶区金属夹的位移数值。当术腔内有多个金属夹时，以基底部金属夹为测量基准。胸骨组匹配区域上至颈部静脉切迹，下包括第十胸椎下缘，前至胸部皮肤表面，后至第十胸椎前缘，左右分别包括胸骨端关节面处。椎体组匹配范围上至第二胸椎上缘，下至第十胸椎下缘，前至第十胸椎前缘，后至背部皮肤表面，左右范围与胸骨组相同。研究组匹配范围上至锁骨中段，下至第十胸椎下缘，前至患侧乳晕皮肤表面，后至背部皮肤表面，左右范围为患侧乳房最外侧至健侧胸椎椎弓根外缘，如图 1 所示。

1.6 统计学方法

使用 SPSS22.0、GraphPad Prism8.0 统计软件对所得的数据进行统计分析，并采用独立样本非参数检验分析不同匹配框金属夹的重复性， $p < 0.05$ 为差异有统计学意义。



图 1 乳腺癌患者 CBCT 不同匹配框配准范围的图例与体位固定装置(a、b、c 分别为胸骨组、胸椎组、研究组)
Fig.1 Illustration of registration range of different matching frames for CBCT of breast cancer patients and position fixation device (a, b, c are sternum group, thoracic group, and research group)

2 结果与讨论

2.1 不同CBCT匹配摆位误差比较

22例入组患者共获得匹配数据528组。研究组与对照组1、2线性摆位误差与旋转摆位误差如表1

所示。由表1可见，研究组的平移误差与旋转误差均小于对照组1、2，但三组的平移误差差异均无统计学意义，只有胸骨组与研究组旋转误差X轴方向差异有统计学意义($p=0.034$)，其余方向差异均无统计学意义。

表1 22例乳腺癌IMRT患者线性摆位误差与旋转误差在三种不同匹配框的比较
Table 1 Comparison of IMRT linear placement and rotation errors in three different matching box of 22 patients with breast cancer ($\bar{x}\pm s$)

项目 Project	胸骨组 Sternum group	胸椎组 Thoracic group	胸骨胸椎+靶区组 Research group	p值* p value*
平移误差 Linear error / mm				
X轴 X-axis (Left-right)	2.57±1.80	2.49±1.90	2.31±1.79	0.434 ^a 、0.999 ^b 、0.990 ^c
Y轴 Y-axis (The head and foot)	2.91±2.05	2.79±2.31	2.75±2.13	0.999 ^a 、0.987 ^b 、0.792 ^c
Z轴 Z-axis (The abdomen and back)	2.58±2.08	2.63±2.29	2.34±1.88	0.869 ^a 、0.999 ^b 、0.999 ^c
旋转误差 Rotation error / (°)				
R _x 轴 R _x (Pitch)	0.86±0.64	0.76±0.60	0.69±0.55	0.034 ^a 、0.812 ^b 、0.460 ^c
R _y 轴 R _y (Roll)	0.85±0.62	0.77±0.60	0.80±0.56	0.999 ^a 、0.976 ^b 、0.658 ^c
R _z 轴 R _z (Yaw)	0.72±0.58	0.75±0.64	0.66±0.55	0.971 ^a 、0.505 ^b 、0.999 ^c

注：*a、b、c分别代表胸骨组与研究组、胸椎组与研究组、胸骨组与胸椎组的比较。

Note: *a, b, and c represent sternum group versus study group, thoracic group versus study group, and sternum group versus thoracic group, respectively.

2.2 靶区金属夹位移数据比较

每组共测得匹配后的CBCT图像靶区金属夹与定位CT图像金属夹的位移数据528组，3组测得靶

区金属夹在X、Y、Z方向的距离如表2所示。胸椎组与研究组在X、Y、Z轴方向差异均有统计学意义($p<0.05$)，胸骨组与研究组在Z轴方向差异无统计学意义，其余方向差异有统计学意义($p<0.05$)。

表2 22例乳腺癌IMRT患者CBCT影像与定位CT影像靶区金属夹位移在三种不同匹配区域的比较
Table 2 Comparison of IMRT CBCT imaging and CT imaging target positioning metal clip displacement in three different matching box of 22 patients with breast cancer ($\bar{x}\pm s$) mm

项目 Project	胸骨组 Sternum group	胸椎组 Thoracic group	胸骨胸椎+靶区组 Research group	p值* p value*
X轴 X-axis (Left-right)	1.59±1.61	1.65±1.44	1.13±1.18	0.045 ^a 、0.002 ^b 、0.952 ^c
Y轴 Y-axis (The head and foot)	1.51±1.83	1.69±1.84	0.91±1.28	0.006 ^a 、<0.001 ^b 、0.817 ^c
Z轴 Z-axis (The abdomen and back)	1.23±1.19	1.89±1.52	1.37±1.31	0.999 ^a 、0.003 ^b 、<0.001 ^c

注：*a、b、c分别代表胸骨组与研究组、胸椎组与研究组、胸骨组与胸椎组的比较。

Note: *a, b, and c represent sternum group versus study group, thoracic group versus study group, and sternum group versus thoracic group, respectively.

2.3 靶区金属夹3D矢量距离比较

对胸骨组、胸椎组与研究组所测得的金属夹X、Y、Z方向的距离按照计算公式 $d = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2}$ 计算金属夹的3D矢量距离^[4]，其中， d_x 、 d_y 、 d_z 分别代表金属夹X、Y、Z方向的位移。 d 可作为评估靶区匹

配精度的另外一个参数指标， d 越小代表靶区重复性越高。胸骨组、胸椎组与研究组靶区金属夹3D矢量距离分别为： (3.16 ± 1.92) mm、 (3.62 ± 1.92) mm、 (2.52 ± 1.53) mm，胸骨组、胸椎组与研究组3D矢量距离 ≤ 3 mm的比例分别为：59.38%、47.37%和73.33%。图2为三组靶区金属夹的3D矢量距离频

数分布。图3为三组靶区金属夹的3D矢量距离柱状图。

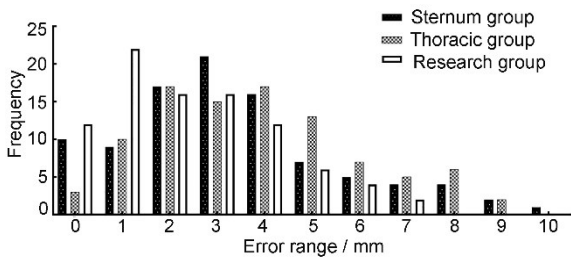


图2 22例乳腺癌IMRT患者三种匹配区域靶区金属夹的3D矢量距离频数分布

Fig.2 3D vector distance frequency distribution of metal clips in the target area of three matching frames in 22 breast cancer IMRT patients

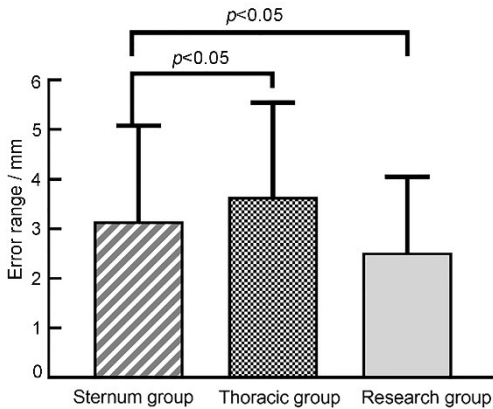


图3 22例乳腺癌IMRT患者三种匹配区域靶区金属夹的3D矢量距离柱状图

Fig.3 3D vector distance histogram of metal clips in the target area of three matching frames in 22 breast cancer IMRT patients

2.4 讨论

本研究以胸骨、胸椎以及靶区为配置参考点设置不同的匹配框进行配准，通过测量配准后靶区术腔金属夹位移数据作为评估匹配精度的指标，探究乳腺癌放疗图像引导CBCT匹配区域的选择。通过研究发现，CBCT匹配区域的选择决定了靶区的匹配精度，同时发现不同CBCT匹配区域之间匹配误差差异不存在统计学意义，但其靶区金属夹位移数据差异却有统计学意义，这提示临床工作中需注意匹配误差与靶区匹配精度的相关性，对匹配后靶区精度进行有效的评估。

本研究结果提示：乳腺放疗CBCT图像引导以胸骨为匹配点的配准精度略高于胸椎，但单纯以胸骨或胸椎为匹配点均不是最优设置，最优匹配区域应包括胸骨、胸椎以及患侧靶区。匹配后靶区金属夹重复性可作为评估靶区匹配精度的指标，

根据匹配后靶区金属夹重复性显示，胸骨的匹配精度总体上要略高于胸椎，但包括胸骨、胸椎以及患者靶区的研究组靶区匹配精度是最高的。胸部摆位误差主要由心肺运动导致。胸骨匹配精度高于胸椎，可能与胸骨更靠近乳房靶区，以及两者相对呼吸运动的位置变化一致有关。

林荫光等^[5]研究乳腺癌术后放疗患者平静呼吸下胸壁运动发现患者胸壁靶区最大位移方向为Z轴。Sande等^[6]报道，胸部肿瘤肺癌由于呼吸运动影响会导致分次照射剂量发生偏差，对于分次2 Gy照射剂量最大偏差达7.8%；李鑫等^[7]报道，通过呼吸训练可改善呼吸波形，减少呼吸幅度，平稳的呼吸模式可以提高 γ 通过率和胸部SBRT的计划精准度。胸骨解剖位置与乳房靶区相近，两者相对于肺部与心脏的运动空间位移基本一致，因此，其受呼吸运动导致的摆位误差相近；闵现华等^[8]报道，中央型肺癌图像引导放射治疗中应以靠近肿瘤靶区的气管隆突为主要匹配参考，因其与原发性肿瘤一样受呼吸运动影响，与肿瘤的位置动态变化一致。而胸椎解剖位置与乳腺解剖位置较远，与心肺的相对位置与乳腺有较大的差异；姚春萍等^[9]报道乳腺癌术后放疗配合自主呼吸控制技术可有效地减少呼吸运动造成的靶区位移。人体仰卧位状态下受重力影响，胸椎受呼吸运动的影响较小，而靠近靶区则具有更高的运动动态一致性，因此，胸骨匹配精度要略优于胸椎，但最优CBCT匹配框应同时包括胸骨、胸椎与患侧靶区。

匹配误差与靶区匹配精度的关系无相关性。即不同匹配区域所得的匹配误差无统计学意义，但不代表靶区匹配精度差异也是无统计学意义的。本研究中，研究组与对照组1、2的匹配平移误差与旋转误差除与对照组1在X轴旋转误差差异有统计学意义外，其余方向差异均无统计学意义；但研究组与对照组1、2的靶区金属夹的位移数据除与对照组1在Z轴方向差异无统计学意义外，其他方向差异均有统计学意义，研究组的靶区金属夹的3D矢量距离最小。这提示选择不同匹配区域所得到的匹配误差可能无差异，但实际上靶区匹配精度可能大相径庭。自动配准时，算法对匹配范围内的所有像素点进行特征相似性比较，通过数学最优化搜索校准使得两幅图像得到重复性最高，而平移方向与旋转方向的校准数据则为摆位误差^[10]。呼吸运动、心脏搏动与分次内乳腺形变等

这些因素都会局部的改变乳腺肿瘤靶区的位置从而改变靶区剂量学分布^[11-12]，但因匹配范围大导致局部位置的改变对匹配误差的影响不大。匹配区域设置对匹配误差的影响，黄伯天等^[13]、彭应林等^[14]与曹泓立等^[15]等在头颈部、肺癌与宫颈癌CBCT引导放疗图像匹配范围的研究中有相同研究报告，即匹配范围的不同会影响匹配误差，但匹配误差与靶区匹配精度的一致性尚少有报道。本研究以靶区金属夹位置重复性为匹配后靶区精度的评估指标，用于评估匹配后靶区位置的匹配精度。乳腺癌术腔放置金属夹可作为影像引导CBCT靶区匹配精度的参照点，以提高乳腺放疗图像引导的匹配精度^[16]，匹配误差与靶区精度不存在必然性，匹配精度评估应以靶区金属夹重复效果为准。

本研究存在以下不足：(1)本研究属于回顾性研究，可能存在选择性偏倚，同时入组的样本量不够大，因此需要进一步扩大样本量研究证实本结论；(2)靶区金属夹可能存在位移的情况，对于术后等待放疗时间较长的患者可能会使得金属夹离靶区位置较远，影响匹配后评估精度，本研究未对此做进一步评估；(3)术腔不同方位的金属夹相对于靶区位置精度不一致，包括最上层、最下层、最侧以及最近胸壁层，当有多个金属夹时本研究以基底部位金属夹为主，其他方位的金属夹对实验结果的影响未讨论。

3 结论

乳腺癌术后IMRT影像引导CBCT匹配区域的选择应同时包括胸骨、胸椎与患侧靶区，在肿瘤靶区术腔中放置金属夹可有效地提高影像引导的匹配精度，可作为匹配后靶区精度的评估指标，需注意匹配误差与靶区匹配精度不存在相关性。

作者贡献声明 陈国泉、房建南辅助试验设计与论文撰写，杨瑾、李欢、王玺先、郭再仁协助入组病例数据采集与整理，马玉家、石俊田负责数据分析方法与论文修改指导，黄晓波负责入组患者的筛选、放疗方案的制定以及论文最后的审阅和定稿。全体作者均阅读并同意最终的文稿。

参考文献

1 Trivedi S J, Choudhary P, Lo Q, *et al.* Persistent reduction in global longitudinal strain in the longer term

after radiation therapy in patients with breast cancer[J]. *Radiation Therapy and Oncology*, 2019, **132**: 148-154. DOI: 10.1016/j.radonc.2018.10.023.

2 Jacobse J N, Duane F K, Boekel N B, *et al.* Radiation dose-response for risk of myocardial infarction in breast cancer survivors[J]. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, 2019, **103**(3): 595-604. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2018.10.025.

3 Egner J R. AJCC cancer staging manual[J]. *Journal of the American Medical Association*, 2010, **304**(15): 1726. DOI: 10.1001/jama.2010.1525.

4 Cheo T, Loh Y, Chen D, *et al.* Measuring radiotherapy setup errors at multiple neck levels in nasopharyngeal cancer (NPC): a case for differential PTV expansion[J]. *Radiation Therapy and Oncology: Journal of the European Society for Therapeutic Radiology and Oncology*, 2015, **117**(3): 419-424. DOI: 10.1016/j.radonc.2015.09.032.

5 林荫光, 陈森, 卢秀, 等. 乳腺癌术后放疗患者平静呼吸下胸壁运动和器官受照剂量的变化[J]. *广西医学*, 2021, **43**(21): 2530-2534. DOI: 10.11675/j.issn.0253-4304.2021.21.05.

LIN Yinguang, CHEN Sen, LU Pang, *et al.* Changes in chest wall movement and organ radiation dose among postoperative radiotherapy patients with breast cancer during normal respiration[J]. *Guangxi Medical Journal*, 2021, **43**(21): 2530-2534. DOI: 10.11675/j.issn.0253-4304.2021.21.05.

6 Sande E P S, Acosta Roa A M, Hellebust T P. Dose deviations induced by respiratory motion for radiotherapy of lung tumors: impact of CT reconstruction, plan complexity, and fraction size[J]. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 2020, **21**(4): 68-79. DOI: 10.1002/acm2.12847.

7 李鑫, 李坚, 卢建杰, 等. 呼吸运动模式对胸部肿瘤SBRT剂量分布影响的研究. *肿瘤预防与治疗*, 2022, **35**(1): 36-42. DOI:10.3969/j.issn.1674-0904.2022.01.006.

LI Xin, LI Jian, LU Jianjie, *et al.* Effect of respiratory movement patterns on dose distribution of SBRT in thoracic tumors [J]. *Journal of Cancer Control and Treatment*, 2022, **35**(1): 36-42. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0904.2022.01.006.

8 闵现华, 张义钊, 郭丽云, 等. 肺癌图像引导放射治疗中基于不同解剖标志图像配准的研究[J]. *临床医学研究与实践*, 2021, **6**(20):110-113. DOI: 10.19347/j.cnki.2096-1413.202120034.

MIN Xianhua, ZHANG Yizhao, GUO Liyun, *et al.* Study

- of image registration based on different anatomical landmarks in image-guided radiotherapy for lung cancer [J]. *Clinical Research and Practice*, 2021, **6**(20):110-113. DOI: 10.19347/j.cnki.2096-1413.202120034.
- 9 姚春萍, 于金明, 李建彬, 等. 自主呼吸控制在乳腺癌术后放疗中的应用研究[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2006, **15**(3): 211-214. DOI: 10.3760/j.issn: 1004-4221.2006.03.013.
YAO Chunping, YU Jinming, LI Jianbin, *et al.* Active breathing control in postoperative radiotherapy for breast cancer[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2006, **15**(3): 211-214. DOI: 10.3760/j.issn: 1004-4221.2006.03.013.
- 10 Sharma S D, Dongre P, Mhatre V, *et al.* Evaluation of automated image registration algorithm for image-guided radiotherapy (IGRT) [J]. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, 2012, **35**(3): 311-319. DOI: 10.1007/s13246-012-0158-9.
- 11 国兵, 李建彬, 王玮, 等. 呼吸运动对部分乳腺外照射靶区剂量学的影响[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2016, **36**(7): 496-500. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2016.07.004.
GUO Bing, LI Jianbin, WANG Wei, *et al.* The impact of respiratory motion for target dose during external-beam partial breast irradiation[J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2016, **36**(7): 496-500. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2016.07.004.
- 12 Rodríguez-Romero R, Castro-Tejero P. The influence of respiratory motion on CT image volume definition[J]. *Medical Physics*, 2014, **41**(4): 041701. DOI: 10.1118/1.4866889.
- 13 黄伯天, 张丹丹, 彭应林, 等. 图像配准条件对头颈部 CBCT 引导放疗精度影响[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2016, **25**(4): 391-394. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2016.04.019.
HUANG Botian, ZHANG Dandan, PENG Yinglin, *et al.* Impacts of registration parameters on accuracy of cone-beam computed tomography image-guided head and neck radiotherapy[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2016, **25**(4): 391-394. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2016.04.019.
- 14 彭应林, 刘松然, 黄伯天, 等. 图像配准方法对肺癌放疗图像引导摆位精度的影响[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2015, **24**(2): 184-188. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2015.02.019.
PENG Yinglin, LIU Songran, HUANG Botian, *et al.* The accuracy of image registration methods for image-guided positioning in lung cancer radiotherapy[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2015, **24**(2): 184-188. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2015.02.019.
- 15 曹泓立, 李玉胜, 裴曦, 等. 宫颈癌图像引导放疗中不同配准方法对图像配准精度的影响[J]. *中华肿瘤防治杂志*, 2021, **28**(11): 858-863. DOI: 10.16073/j.cnki.cjcp.2021.11.10.
CAO Hongli, LI Yusheng, PEI Xi, *et al.* Effects of different registration methods on image registration accuracy in image-guided radiotherapy for cervical cancer [J]. *Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment*, 2021, **28**(11): 858-863. DOI: 10.16073/j.cnki.cjcp.2021.11.10.
- 16 张爱苹, 李建彬, 王玮, 等. 保乳术后基于4DCT的0%时相及50%时相配准方式比较[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2017, **26**(11): 1280-1284. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2017.11.008.
ZHANG Aiping, LI Jianbin, WANG Wei, *et al.* A comparison of rigid and deformable image registration at end-inhale and end-exhale phases based on 4DCT images for radiotherapy after breast-conserving surgery[J]. *Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment*, 2017, **26**(11): 1280-1284. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2017.11.008.