

胸腺瘤放射治疗中体位固定设备的优选分析

韩江涛 孙朔 王越 李雪珊 谭跃 张威

杜咏雪 蒋天宇 李谭谭 郇福奎 万宝

(国家癌症中心 国家肿瘤临床医学研究中心 中国医学科学院北京协和医学院肿瘤医院放疗科 北京 100021)

摘要 分析在胸腺瘤放射治疗中头颈肩架、胸腹平架和颈胸一体架固定装置对胸腺瘤患者的体位固定效果。回顾性分析2018年01月至2025年02月在本中心行放射治疗的胸腺瘤患者,比较其摆位误差的差异,并结合患者基线特征构建线性混合模型(Linear mixed model, LMM),分析影响摆位误差的潜在因素。研究共纳入253例患者。LMM分析显示在头脚(Y)方向上以颈胸一体架组为参照,头颈肩架组误差数据平均增大1.869 mm ($p < 0.001$),胸腹平架组误差平均增大1.324 mm ($p = 0.009$)。腹背(Z)方向上以头颈肩架组为参照,胸腹平架组的误差数据平均增大0.578 mm ($p = 0.023$)。M1分期在Z方向上比M0分期的误差数据平均增大0.731 mm ($p = 0.031$)。颈胸一体架在Y方向固定精度最优,M分期是腹背方向摆位误差的独立影响因素,该几何优势能否转化为危及器官的剂量学获益仍需剂量学研究验证。

关键词 胸腺瘤,放射治疗,固定装置,摆位误差

中图分类号 TL13

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0056

CSTR:32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2026-0056

引用该文:

韩江涛,孙朔,王越,等.胸腺瘤放射治疗中体位固定设备的优选分析[J].辐射研究与辐射工艺学报,XXXX,XX(X):XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0056.

HAN Jiangtao, SUN Shuo, WANG Yue, *et al.* Optimization analysis of immobilization devices in radiotherapy for thymoma[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, XXXX, XX(X): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0056.



Optimization analysis of immobilization devices in radiotherapy for thymoma

HAN Jiangtao SUN Shuo WANG Yue LI Xueshan TAN Yue ZHANG Wei

DU Yongxue JIANG Tianyu LI Tantan HUAN Fukui WAN Bao

(Department of Radiation Oncology, National Cancer Center; National Clinical Research Center for Cancer; Cancer Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100021, China)

ABSTRACT Analysis of the positioning immobilization effects of head-neck-shoulder mask, thoracic-abdominal board, and neck-thorax integrated mask immobilization devices in radiotherapy for thymoma patients. A retrospective analysis was conducted on patients with thymoma who underwent radiotherapy at our center from January 2018 to February 2025, comparing differences in setup errors, and a Linear Mixed Model (LMM) was

第一作者:韩江涛,男,2000年10月出生,2022年于山东第一医科大学获理学学士学位,现于中国医学科学院肿瘤医院廊坊院区从事放射治疗技术等方面的工作

通信作者:万宝,副主任技师, E-mail: wanbao888888@163.com

收稿日期:初稿 2026-05-11; 修回 2026-09-08

First author: HAN Jiangtao (male) was born in October 2000, and obtained a bachelor's degree from Shandong First Medical University in 2022. Currently working at the Langfang Campus of Cancer Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences, engaged in radiotherapy technology and related fields

Corresponding author: WAN Bao, associate chief technologist, E-mail: wanbao888888@163.com

Received 11 May 2026; accepted 08 September 2026

constructed incorporating patient baseline characteristics to analyze potential factors influencing setup errors. A total of 253 patients were included in the study. LMM analysis showed that in the superior-inferior (*Y*) direction, using the neck-thorax integrated mask group as the reference, the setup error in the head-neck-shoulder mask group increased by an average of 1.869 mm ($p < 0.001$), and the setup error in the thoracic-abdominal board group increased by an average of 1.324 mm ($p = 0.009$). In the anterior-posterior (*Z*) direction, using the head-neck-shoulder group as the reference, the setup error in the thoracic-abdominal board group increased by an average of 0.578 mm ($p = 0.023$). M1 stage was associated with an average increase in setup error of 0.731 mm in the *Z* direction compared with M0 stage ($p = 0.031$). The neck-thorax integrated mask demonstrated the highest immobilization accuracy in the *Y* direction, and M stage had a significant effect in the anterior-posterior direction independent of the immobilization device. Whether this geometric advantage can be translated into dosimetric benefits for organs at risk still requires verification through dosimetric studies.

KEYWORDS Thymoma, Radiotherapy, Immobilization device, Setup error

CLC TL13

胸腺瘤是前纵隔最常见的上皮性肿瘤，约占成人所有纵隔肿瘤的20%，大约有38%的患者患有重症肌无力^[1-3]。对于不能手术切除的肿瘤，放射治疗是其主要的治疗手段之一^[4-5]。不完全切除后的术后放疗（Postoperative radiotherapy, port）可以预防或推迟术后复发，并提高局部晚期患者的生存率^[6]。在胸腺瘤放射治疗中，精确的定位和照射至关重要。摆位误差会显著影响计划靶区的剂量覆盖，同时增加危及器官的受照剂量^[7]。因此，采用患者位置可重复性高的固定装置是实现精准放疗的重要措施之一。在放射治疗临床实践中，固定装置的选择首先取决于靶区的上下界范围。胸腺瘤常为跨颈胸交界区域的病灶，目前临床在各类固定装置的选择中尚缺乏明确的循证依据和量化的摆位误差对比数据，不同中心间的选择更多依赖于经验习惯。因此，本研究旨在分析在胸腺瘤放射治疗中，头颈肩架、胸腹平架和颈胸一体架三类固定装置结合热塑膜对患者的体位固定效果，丰富放射治疗医师在胸腺瘤治疗时固定装置的选择，并为临床治疗决策及临床靶体积（Clinical target volume, CTV）外扩提供一定依据。

1 材料与方法

1.1 入组标准

回顾性纳入2018年01月至2025年02月在本中心行调强放射治疗的胸腺瘤患者。纳入标准：（1）患者病理证实为胸腺瘤；（2）所有患者在治疗前均签署《放射治疗知情同意书》；（3）具有完

整的基线与随访临床资料记录。排除标准：（1）患者整个疗程图像验证次数小于5次；（2）患者因病情进展等因素未完成放射治疗疗程。本研究经中国医学科学院肿瘤医院伦理委员会审批通过（审批号：26/267-5991），已申请知情同意豁免。

1.2 体位固定和CT模拟定位

CT扫描条件均为：电压120 kV，电流200 mAs，扫描层厚为3 mm。需要增强扫描的患者，行检查前了解其过敏史，并签署知情同意书。通过留置针快速注射碘造影剂碘海醇（300 mgI/mL），总量60~80 mL。扫描上界至第六颈椎，下界至膈下水平。头颈肩架固定装置的患者采用头颈肩架及头颈部热塑膜（科莱瑞迪，广州）进行固定。患者以仰卧位躺在定位床上，根据患者的颈部长度、颈围等情况选择适合患者的塑料头枕。定位人员调整头部，使其两侧外耳孔处于同一水平线，机房顶部激光灯以确保患者正中矢状线与纵轴激光线一致。使用热塑头颈肩面罩对患者进行固定，并在面罩上标注定位中心线。胸腹平架固定装置的患者根据患者颈椎生理曲度选择合适的头枕，仰卧位，双手环抱肘部后置于额前（左侧手臂贴于额前，右侧手臂在上）。调整患者至合适位置，依据激光线在患者体表画十字摆位中心线，体中线需延长至脐部以确保患者腹背侧位置。使用胸部热塑膜（科莱瑞迪，广州）对患者进行固定，依据治疗区域在热塑体膜上标记出定位中心。颈胸一体架固定装置的患者取仰卧位，身体放松情况下暴露上身，双臂自然外展120°左右，手臂上举将手臂和手置于臂托和腕托

上，轻握固定杆。根据激光线在患者体表画摆位线，体中线延长至脐部。使用颈胸部热塑膜（科莱瑞迪，广州）对患者进行固定，依据治疗区域在热塑体膜上标记出定位中心。随后患者进行CT定位扫描（Philips Brilliance Big Bore，飞利浦公司或者Siemens SOMATOM Definition AS 40，西门子公司，德国），嘱咐患者需平静呼吸。

1.3 计划设计及配准

将获得的CT定位图像传输至Pinnacle治疗计划系统，医生进行靶区及危及器官勾画，物理师进行放疗计划设计。治疗计划和CT定位图像通过Mosaik系统分别传输至Elekta Synergy直线加速器和XVI主机。位置验证频次为治疗第一周连续扫描5次，随后每周1次。患者治疗过程中采用的图像引导放射治疗技术（Image guide radiation therapy, IGRT）为锥形束计算机断层扫描（Cone beam computed tomography, CBCT），XVI系统可将用于治疗计划设计的CT定位图像和CBCT重建图像进行在线配准。采用自动灰度配准，首先以胸骨、胸椎等刚性结构进行对齐，再依据前纵隔软组织及靶区位置进行手动微调，随后逐层观察靶区是否有脱靶的情况。由同一治疗师记录左右（Lateral, X）、头脚（Longitudinal, Y）和腹背（Vertical, Z）方向上的误差数据。

1.4 统计分析

数据采用SPSS 27.0软件进行分析。计数资料以频数（*n*）表示，临床特征中的计量资料以中位数（范围）或平均值±标准差（Mean±SD）表示。摆位误差数据以Mean±SD表示。采用线性混合模

型（Linear mixed model, LMM）分析摆位误差的影响因素。以患者ID为随机截距，CBCT采集次序为重复变量，重复协方差类型设定为一阶自回归（AR（1））以校正个体内多次测量的时间相关性。以X、Y和Z方向上的摆位误差为因变量，固定效应包括性别、年龄、身体质量指数（Body mass index, BMI）、固定装置类型、T分期、N分期、M分期和CTV体积构建模型，分类变量的两两比较采用估计边际均值及Bonferroni校正。在固定装置类型与BMI、T分期、N分期、M分期及CTV体积间逐一检验交互效应，剔除不显著交互项。对于主效应模型中整体检验显著但Bonferroni校正后两两比较未达显著水平的因子，本研究进一步将其作为等级协变量纳入模型，以评估其效应的线性趋势及结果稳健性。双侧*p*<0.05为差异具有统计学意义。

摆位误差由系统误差（ Σ ）和随机误差（ σ ）构成^[8-9]。将所有患者个体摆位误差均值的平均值作为系统误差的总体均值。根据Van Herk M公式^[10-11]计算CTV至PTV的外扩边界值，见式（1）。

$$MPTV = 2.5\Sigma + 0.7\sigma \tag{1}$$

式中： Σ 为个体均值的标准差， σ 为个体标准差的均方根，MPTV为外扩边界值。

2 结果

2.1 患者临床特征

研究共纳入253例患者，采用3种固定方式的患者数量分别为头颈肩架71例，胸腹平架155例，颈胸一体架27例。患者临床特征见表1。

表1 患者临床特征
Table 1 Clinical characteristics of patients

项目 Items	头颈肩架组 Head and neck shoulder mask group	胸腹平架组 Thoraco abdominal flat board group	颈胸一体架组 Cervicothoracic integrated mask group
年龄 Age	55(25~73)	52(22~77)	56(24~78)
性别 Gender			
男 Male	39	98	17
女 Female	32	57	10
身体质量指数 Body mass index	24.7(2.8)	24.6(3.2)	23.9(3.4)
T分期 T stage			
T1	30	68	4
T2	11	21	7

续表

项目	头颈肩架组	胸腹平架组	颈胸一体架组
Items	Head and neck shoulder mask group	Thoraco abdominal flat board group	Cervicothoracic integrated mask group
T3	23	51	11
T4	7	15	5
N分期 N stage			
N0	59	135	13
N1	3	10	6
N2	8	8	8
N3	1	2	0
M分期 M stage			
M0	63	140	23
M1	8	15	4
CTV 体积/cm ³ CTV volume	147.3(121.5)	104.4(101.3)	274.5(207.2)
图像验证总次数	578	1328	268
Total number of image validations			

2.2 摆位误差分布

三组患者在X方向上的误差累积分布函数(Cumulative distribution function, CDF)曲线较为一致且以0为对称中心快速上升,提示误差整体分布集中,未见明显方向性偏移,80%以上的误差

数据在±3 mm以内。Y方向上三组患者CDF曲线差异明显,颈胸一体架组在±3 mm误差范围内累积百分比上升迅速。Z方向头颈肩架组CDF曲线较胸腹平架组及颈胸一体架组具有明显负方向偏移,见图1。

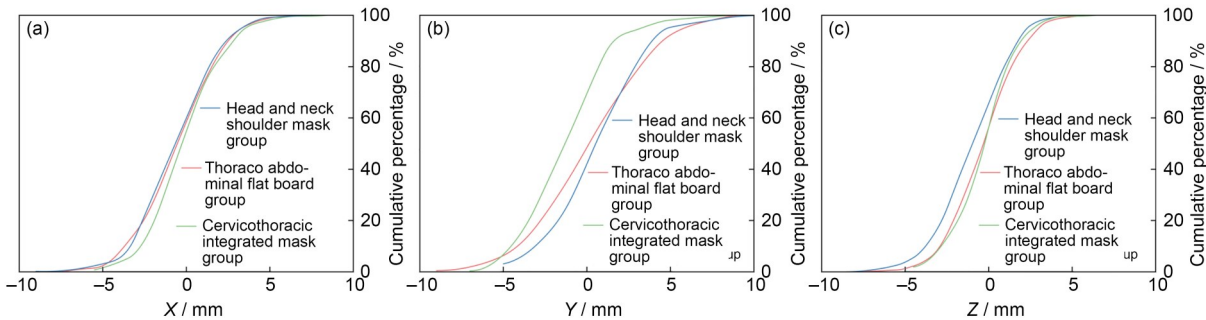


图1 三组患者平移方向摆位误差累计百分比图(彩色见网络版):(a)X方向;(b)Y方向;(c)Z方向
Fig.1 Cumulative frequency plot of translational setup errors for the three groups (color online):
(a) X direction; (b) Y direction; (c) Z direction

2.3 线性混合效应模型分析

对所有自变量进行主效应分析,并检验固定装置与各因子之间的交互项,结果均未发现统计学显著的交互效应($p > 0.05$),因此最终模型未纳入交互项。表2汇总了3个方向上摆位误差影响因素的主效应结果。由表2可见,固定装置类型对X方向上的摆位误差影响未达显著($p = 0.17$),对Y方向($p < 0.001$)和Z方向($p = 0.026$)上的误差数据显示显著。N分期($p = 0.048$)和M分期($p = 0.031$)在Z方向上显示显著。其余固定效应

在3个方向上均未显示统计学显著关联($p > 0.05$)。

表3展示了不同固定装置类型对Y方向上误差数据间的成对比较结果。由表3可见,在Y方向上以颈胸一体架组为参照,头颈肩架组的误差数据平均增大1.869 mm(95% CI: 0.768 ~ 2.969, $p < 0.001$),胸腹平架组的误差平均增大1.324 mm(95% CI: 0.254 ~ 2.394, $p = 0.009$)。头颈肩架与胸腹平架之间无显著差异(差值 = 0.544 mm, 95% CI: -0.134 ~ 1.223, $p = 0.162$)。

表2 线性混合效应模型分析结果
Table 2 Linear mixed-effects model results

因变量 Dependent variable	性别 Gender	年龄 Age	身体质量指数 Body mass index	固定装置类型 Immobilization device type	T分期 T stage	N分期 N stage	M分期 M stage	CTV 体积 /cm ³ CTV volume
摆位误差(X) Setup error (X)	0.759	0.840	0.163	0.170	0.860	0.164	0.181	0.551
摆位误差(Y) Setup error (Y)	0.075	0.845	0.072	0.001	0.719	0.172	0.142	0.283
摆位误差(Z) Setup error (Z)	0.498	0.865	0.426	0.026	0.179	0.048	0.031	0.816

表3 Y方向上误差数据(mm)的固定装置类型成对比较结果
Table 3 Pairwise comparison results of fixture types for error data (mm) in the Y-direction

固定装置类型(I) Immobilization device type (I)	固定装置类型(II) Immobilization device type (II)	平均值差值(I-II) Mean difference (I-II)	显著性 p-value	差值的95%置信区间 95% Confidence interval of the difference	
				下限 Lower limit	上限 Upper limit
头颈肩架组 Head and neck shoulder mask group	胸腹平架组 Thoraco abdominal flat board group	0.544	0.162	-0.134	1.223
	颈胸一体架组 Cervicothoracic integrated mask group	1.869*	<0.001	0.768	2.969
胸腹平架组 Thoraco abdominal flat board group	头颈肩架组 Head and neck shoulder mask group	-0.544	0.162	-1.223	0.134
	颈胸一体架组 Cervicothoracic integrated mask group	1.324*	0.009	0.254	2.394
颈胸一体架组 Cervicothoracic integrated mask group	头颈肩架组 Head and neck shoulder mask group	-1.869*	<0.001	-2.969	-0.768
	胸腹平架组 Thoraco abdominal flat board group	-1.324*	0.009	-2.394	-0.254

注：*,存在显著性差异;显著性结果采用 Bonferroni 校正。

Note: *, indicates statistical significance; p-values were adjusted using the Bonferroni correction.

表4展示了不同固定装置类型在Z方向上误差数据间的成对比较结果。由表4可见,在Z方向上以头颈肩组为参照,胸腹平架组的误差数据平均增大 0.578 mm (95% CI: 0.059 ~ 1.097, $p = 0.023$)。颈胸一体架组与头颈肩架组之间无显著差异 (差值 = 0.490 mm, 95% CI: -0.363 ~ 1.342, $p = 0.502$)。颈胸一体架组与胸腹平架组之间无显著差异 (差值 = -0.088 mm, 95% CI: -0.918 ~ 0.741, $p = 1.000$)。

主效应模型中N分期提示显著 ($p=0.048$), 估

计边际均值分析显示组间无显著性差异,将N分期作为等级协变量进行敏感性分析,结果显示,其线性趋势不显著 ($p=0.810$),综合N分期因子及协变量主模型分析结果,N分期在Z方向上未被视为摆位误差的独立影响因素。表5展示了不同M分期对Z方向上误差数据间的成对比较结果。由表5可见,M1分期在Z方向上比M0分期的误差数据平均增大 0.731 mm (95% CI: 0.065 ~ 1.397, $p = 0.031$)。

表4 Z方向上误差数据(mm)的固定装置类型成对比较结果
Table 4 Pairwise comparison results of fixture types for error data (mm) in the Z-direction

固定装置类型(I) Immobilization de- vice type (I)	固定装置类型(II) Immobilization device type (II)	平均值差值(I-II) Mean difference (I-II)	显著性 <i>p</i> -value	差值的95%置信区间	
				95% Confidence interval of the difference	
				下限 Lower limit	上限 Upper limit
头颈肩架组 Head and neck shoulder mask group	胸腹平架组 Thoraco abdominal flat board group	-0.578*	0.023	-1.097	-0.059
	颈胸一体架组 Cervicothoracic inte- grated mask group	-0.490	0.502	-1.342	0.363
胸腹平架组 Thoraco abdominal flat board group	头颈肩架组 Head and neck shoul- der mask group	0.578*	0.023	0.059	1.097
	颈胸一体架组 Cervicothoracic inte- grated mask group	0.088	1.000	-0.741	0.918
颈胸一体架组 Cervicothoracic in- tegrated mask group	头颈肩架组 Head and neck shoul- der mask group	0.490	0.502	-0.363	1.342
	胸腹平架组 Thoraco abdominal flat board group	-0.088	1.000	-0.918	0.741

注：*,存在显著性差异;显著性结果采用 Bonferroni 校正。
Note: *, indicates statistical significance; *p*-values were adjusted using the Bonferroni correction.

表5 Z方向上误差数据(mm)的M分期成对比较结果
Table 5 Pairwise comparison results of m-stages for error data (mm) in the Z-direction

M分期(I) M stage (I)	M分期(II) M stage (II)	平均值差值(I-II) Mean difference (I-II)	显著性 <i>p</i> -value	差值的95%置信区间	
				95% Confidence interval of the difference	
				下限 Lower limit	上限 Upper limit
0	1	-0.731*	0.031	-1.397	-0.065
1	0	0.731	0.031	0.065	1.397

注：*,存在显著性差异;显著性结果采用 Bonferroni 校正。
Note: *, indicates statistical significance; *p*-values were adjusted using the Bonferroni correction.

2.4 靶区外放边界

三个方向上胸腺瘤患者头颈肩架组靶区外放边界分别为：4.7 mm、6.2 mm、4.9 mm；胸腹平

架组靶区外放边界分别为：5.3 mm、7.1 mm、4.8 mm；颈胸一体架组靶区外放边界分别为：5.3 mm、6.2 mm、4.5 mm。三类固定装置三个方向上的系统和随机误差如表6所示。

表6 胸腺瘤患者不同固定方式下的靶区外放边界(mm)
Table 6 PTV margins derived from different immobilization methods for thymoma patients (mm)

	头颈肩架组 Head and neck shoulder mask group			胸腹平架组 Thoraco abdominal flat board group			颈胸一体架组 Cervicothoracic integrated mask group		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Mean±SD	0.3±2.4	1.5±2.9	-0.6±2.2	-0.1±2.4	1.1±3.4	0.1±2.1	0.3±2.2	-0.3±2.6	0.1±1.9
Σ	1.3	1.8	1.5	1.6	2.0	1.5	1.7	1.9	1.4
σ	2.1	2.4	1.7	1.9	3.0	1.5	1.5	2.0	1.4
MPTV	4.7	6.2	4.9	5.3	7.1	4.8	5.3	6.2	4.5

3 讨论与结论

3.1 讨论

胸部肿瘤的病理类型复杂，主要包括100多种不同的亚型，包括心脏、肺、胸腺和胸膜肿瘤^[12]。胸部肿瘤主要好发于肺部、纵隔、胸膜、胸腺等部位，其中胸腺瘤和胸腺癌（thymic carcinomas, tc）较为罕见^[13]，仅占有恶性肿瘤的0.2%~1.5%。导致在临床上难以确定病理分期和选择最佳治疗策略^[14-16]。

对于胸腺瘤放射治疗，目前临床上常采用头颈肩架、胸腹平架和颈胸一体架三类固定方式，而针对胸腺瘤治疗的不同的固定方式差异和推荐的CTV外放边界很少被报道。在本研究中，采用线性混合模型分析了头颈肩架、胸腹平架及颈胸一体架的摆位误差的影响因素。三组固定装置下的误差累积百分比图显示，X方向上的CDF曲线较为一致，提示误差整体分布集中，Y方向上三组患者CDF曲线差异明显，颈胸一体架组在±3 mm误差范围内累积百分比上升迅速，提示该组在Y方向上误差分布集中且误差一致性较好。Z方向头颈肩架组的CDF曲线较胸腹平架组及一体架组具有明显的负方向偏移，提示该组在Z方向存在一定的系统性误差。这可能是胸腺瘤治疗靶区位于头颈热塑面罩下部区域，肩部位位置重复性会导致头颈部热塑面罩发生一定形变，而摆位中心通常设于该区域，易受其影响，进而影响摆位一致性，导致Z方向上的系统性偏差。体位固定方式是影响摆位精度的重要因素之一。为确保放射治疗的精确性，应充分考虑分次间和分次内患者的体位重复性，包括身体各部位可能产生的自主或非自主生理运动因素而产生的不确定性^[17-19]。胸腺瘤三类固定方式不同方向的误差结果表明，LMM分析结果显

示，在X方向上所有固定效应均无统计学显著关联（ $p>0.05$ ）。其中固定装置类别对摆位误差的影响具有明显的方向特异性，在Y方向上对摆位误差的主效应显著（ $p<0.001$ ），经Bonferroni校正的两两比较结果显示，颈胸一体架组的误差显著小于头颈肩架组和胸腹平架组，这表明颈胸一体架组在Y方向上较另外两组具有更优的固定精度。这可能是由于采用头颈肩架和胸腹平架两种固定方式的胸腺瘤患者颈肩部及上肢部分存在较大的位置随机性和动态幅度，而采用颈胸一体架固定方式结合体表标记线可进一步提高患者两侧腋窝和上肢位置的重复性，一定程度上降低了由“耸肩”或“肩部下垂”引起的体位不稳定性，降低因肩颈位置的不确定性对胸骨位置的影响。其中胸腹平架组患者在Y轴上的随机误差最大（3.0 mm），这可能是因为治疗过程中采用胸腹平架固定的患者在保持双臂位置时缺乏胸锁关节处刚性限位，导致分次内双臂位置变化进而引入了不确定性。在Z方向上，头颈肩架组的误差显著小于胸腹平架组（ $p=0.023$ ），这可能与胸腹平架固定方式对上肢缺乏刚性支撑、更易受上肢位置重复性影响有关，而热塑膜覆盖范围较大，对胸腹部贴合度要求较高，受呼吸运动影响更明显。热塑膜的形变可能导致其表面标记点漂移，进而影响Z方向上的定位精度。LMM显示，M分期在Z方向上表现出独立的显著效应（ $p=0.031$ ），M1分期的胸腺瘤患者的误差数据显著大于M0分期的患者，这一差异可能与M1胸腺瘤患者常因肿瘤侵袭或远处转移导致恶病质及短期内体重显著下降有关，使得胸部轮廓形态学改变和仰卧位时腹背侧体表间隙增大，进而导致热塑膜在Z方向的物理贴合度及体位约束力下降。建议在临床实际治疗过程中增加M1患者的IGRT次数，并依据个体情况采用个体化固定方式以提高治疗精度。但考虑到该亚组分析中样本量

不均衡, 统计学效能较为有限, 因此该单一维度的显著性结果尚需在更大样本的研究队列中进行验证。

对于胸腺瘤患者而言, 由于肿瘤主要位于前纵隔, 呼吸运动对治疗精度的影响较为突出, 外扩范围过大可能会引起靶区周围正常组织受到不必要的照射; 过小可能会造成靶区的漏照脱靶, 降低肿瘤的局部控制率, 影响治疗效果^[20]。由于胸腺瘤在放射治疗中会受到呼吸运动等生理因素影响, 且靶区邻近心脏、肺和食管等重要危及器官, 临床上在靶区勾画和计划设计时会在CTV的基础上外放一定的边界形成计划靶体积(Planning target volume, PTV)。外扩边界对提高胸腺瘤调强放射治疗的精准性、确保靶区剂量覆盖并限制危及器官剂量^[21-23]。本研究计算得到的三类固定方式在X、Y、Z方向的CTV外扩边界分别为: 头颈肩架组(4.7 mm、6.2 mm、4.9 mm)、胸腹平架组(5.3 mm、7.1 mm、4.8 mm)、颈胸一体架组(5.3 mm、6.2 mm、4.5 mm), 其中胸腹平架组在Y方向上所需要的外扩边界最大, 颈胸一体架组在Y和Z方向上均表现出较小的外放边界。其中胸腺瘤患者采用颈胸一体架固定的患者三个方向上的随机误差(X: 0.3 mm±2.2 mm, Y: -0.3 mm±2.6 mm, Z: 0.1 mm±1.9 mm)均优于采用头颈肩架和胸腹平架的误差。这表明在胸腺瘤患者临床模拟定位过程中, 固定装置的选择需要进一步考量。

本研究仍存在一些局限性。研究数据基于单一治疗中心, 在代表性上略有不足, 各组样本量受限临床适应症客观差异而不均衡, 可能引入混杂因素, 通过构建固定装置与各临床因素的交互项进行检验, 交互项均未达显著水平($p > 0.05$), 提示固定装置的效应未因分期分布差异而发生显著改变。但受限颈胸一体架组样本量, 未进行进一步亚组分析, 未来将获取更大的样本量进行多中心验证。本中心所涉及的治疗设备未安装六维床误差校正功能, 对于前纵隔胸腺瘤这一前后扁、上下长的靶区, 旋转方向的微小旋转即可引起靶区前后界明显位移, 可能导致靶区前界欠量或心脏受量增加。因本中心图像引导系统仅记录平移数据, 旋转误差未被纳入, 未来将在具备六维数据后重点评估, 并进一步分析摆位误差差异所转化的临床剂量学获益。

3.2 结论

固定装置类型是影响胸腺瘤放疗摆位误差的主要因素, 且效应方向特异: 颈胸一体架在Y方向固定精度最优, 头颈肩架在Z方向略优于胸腹平架。M分期是腹背方向摆位误差的独立影响因素, 提示在临床摆位中应加强对该类人群Z方向的误差监测与校正。该毫米级几何优势能否转化为危及器官剂量学获益, 仍需后续剂量学研究加以论证。

作者贡献声明 韩江涛参与数据处理与分析及论文的撰写; 孙朔、王越、李雪珊、谭跃、张威、杜咏雪、蒋天宇、李谭谭、邹福奎提出了论文修改意见, 并对论文部分内容进行了修改; 万宝负责研究思路设计、实验方案制定及论文整体修改。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

- 1 Oramas D M, Moran C A. Thymoma: Histologically a heterogenous group of tumors[J]. *Seminars in Diagnostic Pathology*, 2022, **39**(2): 99-104. DOI: 10.1053/j.semdp.2021.06.002.
- 2 Sustar S, Moran C A. Thymoma classification: current status and future trends[J]. *American Journal of Clinical Pathology*, 2006, **125**(4): 542-554. DOI: 10.1309/cav8rnu5tknacknc.
- 3 Zhang Y, Lin D, Aramini B, *et al.* Thymoma and thymic carcinoma: surgical resection and multidisciplinary treatment[J]. *Cancers*, 2023, **15**(7): 1953. DOI: 10.3390/cancers15071953.
- 4 Rimmer A, Yao X P, Huang J, *et al.* Postoperative radiation therapy is associated with longer overall survival in completely resected stage II and III thymoma: an analysis of the international thymic malignancies interest group retrospective database[J]. *Journal of Thoracic Oncology*, 2016, **11**(10): 1785-1792. DOI: 10.1016/j.jtho.2016.06.011.
- 5 Gao L T, Wang C L, Fang W T, *et al.* Outcome of multimodality treatment for 188 cases of type B3 thymoma[J]. *Journal of Thoracic Oncology*, 2013, **8**(10): 1329-1334. DOI: 10.1097/JTO.0b013e31829ceb50.
- 6 Süveg K, Putora P M, Joerger M, *et al.* Radiotherapy for thymic epithelial tumours: a review[J]. *Translational Lung Cancer Research*, 2021, **10**(4): 2088-2100. DOI: 10.21037/tlcr-20-458.
- 7 陈立明, 付娟, 张艳龙, 等. 基于锥形束CT的直肠癌患

- 者放疗中实际吸收剂量探讨[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2020, **38**(5): 050301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2020.rj.38.050301.
- CHEN Liming, FU Juan, ZHANG Yanlong, *et al.* Actual absorbed dose in radiotherapy of patients with rectal cancer based on cone-beam CT[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2020, **38**(5): 050301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2020.rj.38.050301.
- 8 Stroom J C, de Boer H C J, Huizenga H, *et al.* Inclusion of geometrical uncertainties in radiotherapy treatment planning by means of coverage probability[J]. International Journal of Radiation Oncology*Biophysics, 1999, **43**(4): 905-919. DOI: 10.1016/S0360-3016(98)00468-4.
- 9 Hugo G D, Yan D, Liang J. Population and patient-specific target margins for 4D adaptive radiotherapy to account for intra- and inter-fraction variation in lung tumour position[J]. Physics in Medicine and Biology, 2007, **52**(1): 257-274. DOI: 10.1088/0031-9155/52/1/017.
- 10 van Herk M. Errors and margins in radiotherapy[J]. Seminars in Radiation Oncology, 2004, **14**(1): 52-64. DOI: 10.1053/j.semradonc.2003.10.003.
- 11 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]. International Journal of Radiation Oncology*Biophysics, 2000, **47**(4): 1121-1135. DOI: 10.1016/S0360-3016(00)00518-6.
- 12 Nicholson A G, Tsao M S, Beasley M B, *et al.* The 2021 WHO classification of lung tumors: impact of advances since 2015[J]. Journal of Thoracic Oncology, 2022, **17**(3): 362-387. DOI: 10.1016/j.jtho.2021.11.003.
- 13 Lindenmann J, Fink-Neuboeck N, Pichler M, *et al.* Stage-based treatment for thymoma in due consideration of thymectomy: a single-center experience and comparison with the literature[J]. World Journal of Surgical Oncology, 2015, **13**(1): 303. DOI: 10.1186/s12957-015-0718-z.
- 14 Ried M, Marx A, Götz A, *et al.* State of the art: diagnostic tools and innovative therapies for treatment of advanced thymoma and thymic carcinoma[J]. European Journal of Cardio-Thoracic Surgery, 2016, **49**(6): 1545-1552. DOI: 10.1093/ejcts/ezv426.
- 15 Smit E F. Thymic malignancies[J]. Annals of Oncology, 2008, **19**: vii309-vii312. DOI: 10.1093/annonc/mdn471.
- 16 Markowiak T, Hofmann H S, Ried M. Classification and staging of thymoma[J]. Journal of Thoracic Disease, 2020, **12**(12): 7607-7612. DOI: 10.21037/jtd-2019-thym-01.
- 17 Chandra R A, Keane F K, Voncken F E M, *et al.* Contemporary radiotherapy: present and future[J]. Lancet, 2021, **398**(10295): 171-184. DOI: 10.1016/S0140-6736(21)00233-6.
- 18 van der Merwe D, Christaki K. IAEA support to radiotherapy dosimetry[J]. Acta Oncologica, 2020, **59**(5): 493-494. DOI: 10.1080/0284186X.2020.1726457.
- 19 朱小杨, 王明. 放疗过程中剂量学变化研究: 基于 KV-CBCT 左侧乳腺癌根治术后图像[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2015, **33**(3): 030203. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2015.rj.33.030203.
- ZHU Xiaoyang, WANG Ming. Dosimetric study on intensity-modulated radiotherapy plans-based on kilovoltage cone beam computed tomography images from left-sided breast cancer patients receiving modified radical mastectomy[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2015, **33**(3): 030203. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2015.rj.33.030203.
- 20 Engelsman M, Damen E M F, De Jaeger K, *et al.* The effect of breathing and set-up errors on the cumulative dose to a lung tumor[J]. Radiotherapy and Oncology, 2001, **60**(1): 95-105. DOI: 10.1016/S0167-8140(01)00349-8.
- 21 Gagliardi G, Constine L S, Moiseenko V, *et al.* Radiation dose-volume effects in the heart[J]. International Journal of Radiation Oncology*Biophysics, 2010, **76**(3): S77-S85. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2009.04.093.
- 22 Ell P, Martin J M, Cehic D A, *et al.* Cardiotoxicity of radiation therapy: mechanisms, management, and mitigation[J]. Current Treatment Options in Oncology, 2021, **22**(8): 70. DOI: 10.1007/s11864-021-00868-7.
- 23 成媛, 李政欢, 陈宥霖, 等. 发泡胶固定的乳腺癌放疗摆位误差和计划靶区体积范围[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2022, **40**(5): 050302. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0027.
- CHENG Yuan, LI Zhenghuan, CHEN Youlin, *et al.* Setup error and planning target volume boundary in foam-immobilized radiotherapy for breast cancer[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2022, **40**(5): 050302. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0027.