

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2023.07.002

医学放射物理

## 一种新型热塑膜定位器在放疗体位固定中的摆位精度和剂量精度

朱远湖<sup>1,2</sup>, 余广南<sup>3</sup>, 王学涛<sup>2</sup>, 谭翔<sup>2</sup>, 朱琳<sup>2</sup>, 何强<sup>2</sup>, 简婉薇<sup>2</sup>, 张白霖<sup>2</sup>, 孟皓宇<sup>2</sup>, 甄鑫<sup>1</sup>

1. 南方医科大学生物医学工程学院, 广东 广州 510515; 2. 广州中医药大学第二附属医院放射治疗区, 广东 广州 510006; 3. 中山大学附属第六医院数字医院建设处, 广东 广州 510655

**【摘要】目的:**研究放疗热塑膜固定中有无热塑膜定位器的摆位时间差异、体位精度差异和剂量精度差异。**方法:**随机选取需应用热塑膜固定的放疗患者3例, 每个病人有一半的治疗次数不使用定位器, 有一半的治疗次数使用定位器。记录摆位时间、MVCT扫描匹配后的三维方向摆位误差、三维空间矢量位移误差和剂量精度误差, 应用 $2.5\sum+0.7\sigma$ 来计算计划靶区(PTV)外扩边界。**结果:**无热塑膜定位器组和有热塑膜定位器组的误差在X轴方向分别为6.90(2.85, 12.10) mm和2.60(1.45, 8.10) mm( $P=0.007$ ), Y轴方向分别为9.30(4.05, 16.15) mm和5.00(2.60, 9.50) mm( $P=0.002$ ), Z轴方向分别为3.40(2.05, 4.10) mm和1.90(1.30, 3.65) mm( $P=0.017$ )。无热塑膜定位器组和有热塑膜定位器组在X、Y、Z轴的PTV外扩边界分别为9.15、14.62、2.15 mm和6.50、7.04、2.97 mm。**结论:**热塑膜定位器在热塑膜固定中的应用能够减少放疗患者三维空间摆位误差, 并且减少PTV外扩边界。

**【关键词】**放射治疗; 体位固定; 热塑膜; 定位器

**【中图分类号】**R318; R811.1

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2023)07-0801-07

## Positioning accuracy and dose accuracy in radiotherapy using a novel positioner for thermoplastic immobilization

ZHU Yuanhu<sup>1,2</sup>, SHE Guangnan<sup>3</sup>, WANG Xuetao<sup>2</sup>, TAN Xiang<sup>2</sup>, ZHU Lin<sup>2</sup>, HE Qiang<sup>2</sup>, JIAN Wanwei<sup>2</sup>, ZHANG Bailin<sup>2</sup>, MENG Haoyu<sup>2</sup>, ZHEN Xin<sup>1</sup>

1. School of Biomedical Engineering, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China; 2. Department of Radiation Therapy, The Second Affiliated Hospital of Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou 510006, China; 3. Department of Digital Hospital Construction, The Sixth Affiliated Hospital, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510655, China

**Abstract: Objective** To investigate the differences in positioning time, positional accuracy, and dose accuracy between the use and non-use of thermoplastic film positioners in radiotherapy immobilization. **Methods** Three patients requiring thermoplastic immobilization for radiotherapy were enrolled, with half of the treatments using a thermoplastic film positioner and the other half without. The positioning time, three-dimensional directional positioning errors after MVCT scanning matching, three-dimensional spatial vector displacement errors, and dose accuracy errors were recorded. The PTV margin was calculated using  $2.5\sum+0.7\sigma$ . **Results** The errors of no-positioner group and positioner group were 6.90 (2.85, 12.10) mm versus 2.60 (1.45, 8.10) mm in the X-axis direction ( $P=0.007$ ), 9.30 (4.05, 16.15) mm versus 5.00 (2.60, 9.50) mm in the Y-axis direction ( $P=0.002$ ), 3.40 (2.05, 4.10) mm versus 1.90 (1.30, 3.65) mm in the Z-axis direction ( $P=0.017$ ), respectively. The PTV margins in the X, Y and Z axes were 9.15, 14.62, 2.15 mm in no-positioner group, and 6.50, 7.04, 2.97 mm in positioner group, respectively. **Conclusion** The application of positioners in thermoplastic immobilization can reduce the three-dimensional spatial positioning errors and minimize PTV margin.

**Keywords:** radiotherapy; positioning; thermoplastic film; positioner

**【收稿日期】**2023-02-19

**【基金项目】**国家自然科学基金(81874216); 广东省基础与应用基础研究基金(2022A1515011410); 广州市基础研究计划基础与应用基础研究项目(81874216); 广州市科技计划项目(202102010264)

**【作者简介】**朱远湖, 工程师, 研究方向: 肿瘤放射物理学、肿瘤放射治疗技术等, E-mail: 1275841716@qq.com

**【通信作者】**甄鑫, 博士, 教授, 研究方向: 肿瘤放射物理学、医学图像处理、医学人工智能等, E-mail: xinzheng@smu.edu.cn

前言

放射治疗是肿瘤治疗的三大手段之一,用各种不同能量的高能射线照射肿瘤,抑制和杀灭癌细胞,从而达到肿瘤治疗的效果。放射治疗的主要流程:CT定位、靶区勾画、放疗计划设计、计划验证、位置验证和放疗计划执行。治疗过程中,采用高能射线照射患者的肿瘤区域,被高能射线照射的癌细胞会停止复制或者灭活。放射治疗在杀死肿瘤细胞的同时,对周围正常组织细胞也有破坏作用,使患者的正常组织或器官受损,即出现放射治疗的副作用,所以放疗前需精算放疗剂量,严格控制放疗剂量,在满足治疗效果的基础上最大程度降低放疗剂量,减少临近健康组织受照射剂量,最大程度减轻放疗副作用<sup>[1-3]</sup>。

调强放射治疗的临床靶区(CTV)包括肿瘤组织和潜在的受侵组织,计划靶区(PTV)是CTV的外扩,包含CTV,同时包含摆位误差、设备误差、患者体内器官运动等误差<sup>[4]</sup>。放射治疗前,需要定制与该患者外周轮廓相匹配的特定形状的热塑膜,热塑膜固定能够有效防止患者在治疗过程中发生身体移动,保证肿瘤靶区不偏移从而保证放疗的精确性<sup>[5]</sup>。热塑膜固定简单实用,容易实施,制作方法是將体膜放置到70℃左右的水中,体膜软化后覆盖到患者的身体上并固定热塑膜,待热塑膜冷却固化形成与该患者的外周轮廓相适应的定型热塑膜,固化后的热塑膜能够束缚患者避免体位移动。每次放射治疗前,均需将热塑膜再次固定到患者身体上。为了保证放疗精确,每次热塑膜固定在患者身体上的位置应保持不变,即确保摆位精准<sup>[6]</sup>。热塑膜固定是放疗体位固定方式中重要的一种,拥有其他固定方式无法比拟的优势,是肿瘤放射治疗技术中不可或缺的体位固定技术,但同时也具备其自身的缺点,即极其依赖人体体表骨性标志,人体体表骨性标志的明显与否直接决定着热塑膜的定位效果和重复性。因此,本研究设计出热塑膜定位器,通过试验对比有热塑膜定位器组与无热塑膜定位器组的摆位时间、摆位误差和PTV外扩边界,验证热塑膜定位器的有效性,寻找

能够克服热塑膜缺点的有效方案<sup>[7]</sup>。

1 材料与方法

1.1 病例资料

随机选取广东省中医院放射治疗区的放疗热塑膜固定患者3例,其中头颈肩膜固定1例,体膜固定2例。每个病例均有一半治疗次数安装定位器,有一半治疗次数没有安装定位器,3例病例共治疗70次,TOMO的MVCT共70次,其中35次没有安装定位器作为无定位器组,35次安装了定位器作为有定位器组。

热塑膜、固定板均由康倍特公司生产。热塑膜定位器的主体为PS材料的中空圆锥体,底部安装有医用硅胶材料,圆锥体底圆直径2 cm,圆锥体高2 cm。

1.2 试验设备

IBA的DOSE1+FC65-G;德国西门子24层大孔径四维CT模拟定位机;广州康倍特头颈肩膜和体膜,搭配碳纤维固定板;Pinnacle、Eclipse、Radix放疗计划系统,Oncentra放疗靶区勾画系统;美国瓦里安Edge立体定向放射外科直线加速器,美国安科瑞TOMO螺旋断层放射治疗系统。

1.3 热塑膜摆位原理

无定位器热塑膜摆位流程如图1所示。图1a:将1和2安装合为一体,3位置固定;图1b:形成1-2合体并安装在3上;图1c:形成1-2-3合体。1和3设计有扣合结构所以相对位置固定,但是1和2扣合结构不明显或者没有扣合结构所以相对位置不确定,2和3扣合结构不明显或者没有扣合结构所以相对位置不确定,导致1、2、3这3个组件每次组装形成的1-2-3合体不能保持一致性,即无法保证安装的精确性和重复性。如图2所示,图2a、2b、2c分别是3个不同视角的传统热塑膜体位固定效果图,能够发现由于患者缺乏体表骨性标志而导致患者与固定板和热塑膜的相对位置不确定,难以准确重复摆位。如图3所示,图3a、3b、3c分别是简易热塑膜定位器的3个不同视角,中空设计能够有效降低射线的阻挡,减少定位器对CT图像质量和放疗剂量的影响。

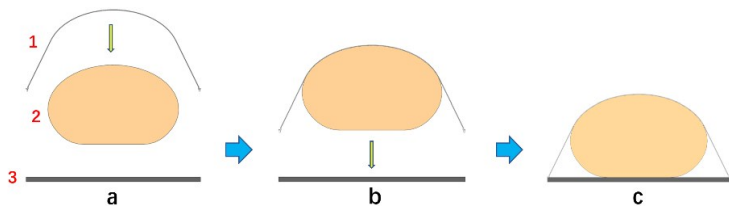


图1 无定位器热塑膜摆位流程图  
Figure 1 Flowchart of thermoplastic immobilization without a positioner  
1:热塑膜;2:人体躯干;3:固定板

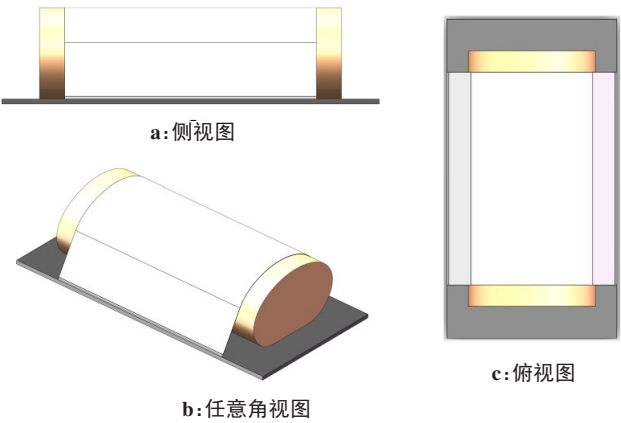


图2 传统热塑膜体位固定效果图  
Figure 2 Immobilization using the traditional thermoplastic film

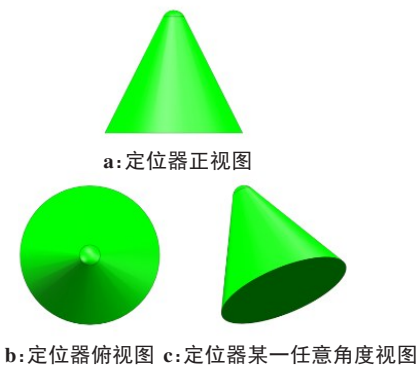


图3 简易热塑膜定位器  
Figure 3 Simple positioner for thermoplastic immobilization

有定位器热塑膜摆位流程如图4所示。图4a:将4和2安装合为一体,3位置固定;图4b:形成4-2合体,3位置固定;图4c:将1安装在4-2合体上,3位置固定;图4d:形成4-2-1合体,将4-2-1合体安装在3上合为一体,3位置固定;图4e:形成4-2-1-3合体;图4f: 4-2-1-3合体,热塑膜透视视图模式。1和3有扣合结构所以相对位置固定,1和4有扣合结构所以相对位置固定,2和4有固定安装点所以相对位置固定,所以1、2、3、4整体两两相对位置固定,1、2、3、4这4个组件每次组装形成的4-2-1-3合体能够保持一致性,即保证了安装的精确性和重复性。图5为应用定位器后的热塑膜体位固定效果图,可见定位器的使用能够留下组装记忆,确定每个组件的相互位置关系,保证每一次摆位的重复性和准确性。图6为扣合热塑膜后的定位器剖视图,可见热塑膜是形成了定位器形状的凸起,该凸起能够与定位器紧密扣合。

1.4 试验过程

试验一:如图7所示,采用CT模体测量热塑膜定位器对CT图像质量的影响。如图8所示,首先用CT扫描没有安装定位器的模体,获取模体CT影像,然后在模体表面安装定位器,以相同的CT扫描条件扫描模体,获取安装有定位器的模体CT影像,对比两组CT影像的差异。

试验二:如图9所示,采用医用直线加速器 Edge

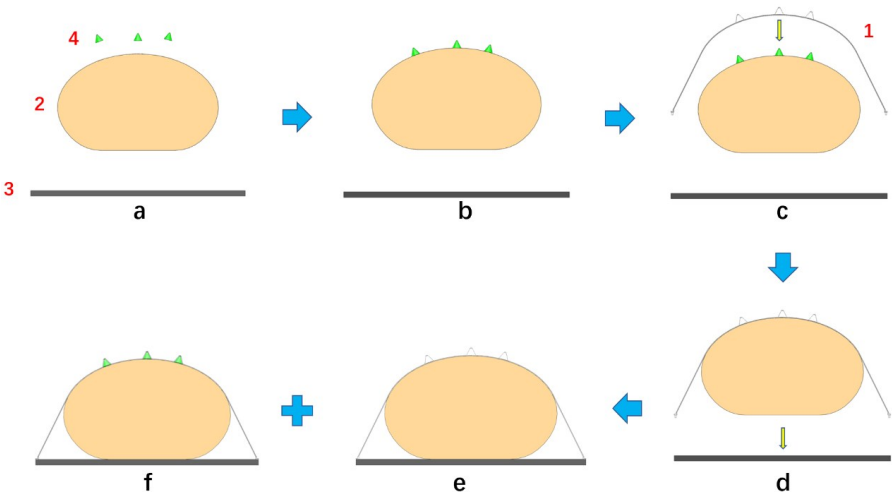


图4 有定位器热塑膜摆位流程图  
Figure 4 Flowchart of thermoplastic immobilization with a positioner  
1:热塑膜;2:人体躯干;3:固定板;4:定位器

和指型电离室测量热塑膜定位器的高能X线阻挡能力,评估定位器对放疗剂量的影响。测量条件为:直线加速器大机架角度为0°,小机头角度为0°,10 cm×10 cm方型照射野,单次剂量为100 MU,剂量率为

500 MU/min,对固体水模进行照射,用指型电离室探测辐射剂量,记录读数<sup>[8-9]</sup>。然后在固体水表面安装热塑膜定位器,以同样的条件进行照射,记录读数,对比两组读数的差异。



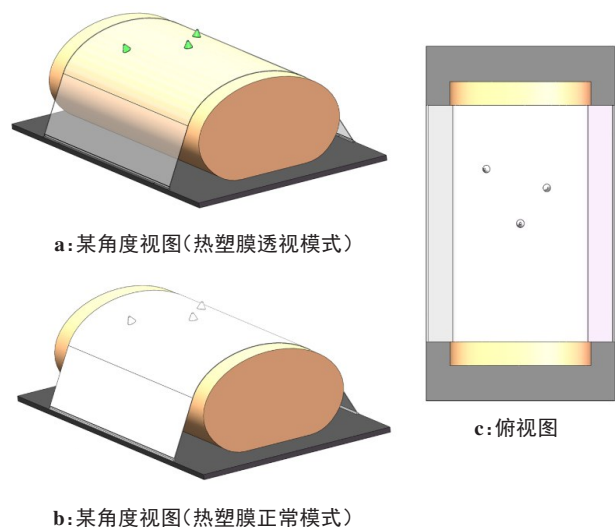


图 5 应用定位器的热塑膜体位固定效果图

Figure 5 Immobilization using the thermoplastic film with a positioner

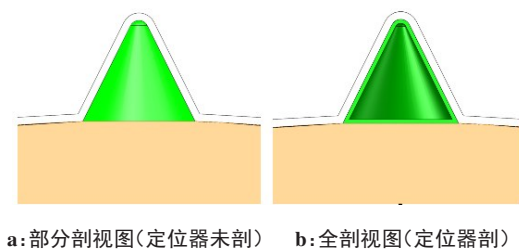


图 6 简易定位器结构图

Figure 6 Structure of a simple positioner



图 7 模体检测 CT 图像质量

Figure 7 CT image quality detection using the phantom

试验三:如图 10 所示,采用 CT 扫描,病人安装热塑膜定位器后再安装热塑膜,这样形成身体表面和热塑膜定位器形状的热塑膜。将 CT 图像传导至医生工作站进行靶区勾画,靶区勾画完成后进行计划设计,计划设计完成并且医生确认计划,将计划传导 TOMO 进行放疗计划执行,TOMO 的每一次放疗均需行放疗前 MVCT 位置验证。为进一步减少试验变量,增加试验的可对比性,同一个病人有一半的治疗次数安装定位器,另一半的治疗次数不安装定位器,对比两组数据的差异。

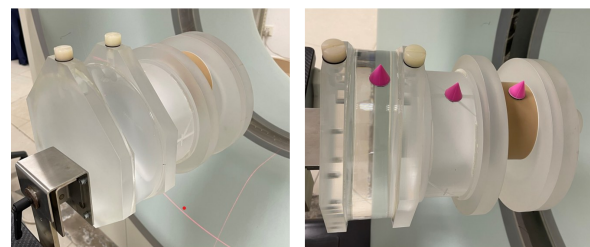


图 8 模体有无定位器的图像质量检测

Figure 8 Image quality detection using the phantom with or without a positioner

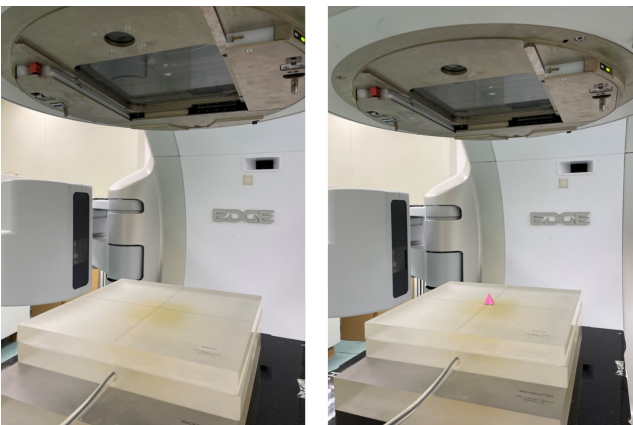


图 9 定位器对高能 X 线阻挡力的测量

Figure 9 Measurement of the blocking power of high-energy X-rays by a positioner

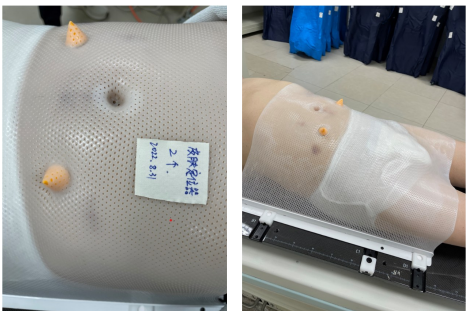


图 10 安装了定位器的放疗 CT 定位

Figure 10 Radiotherapy CT positioning with a positioner

1.5 摆位时间

放疗前的每一次摆位是放疗过程中的重要一环,摆位时间直接影响放疗的效率和直线加速器的使用效率,尽可能压缩放疗摆位时间是一个重要的课题<sup>[10]</sup>。为了判定热塑膜定位器是否可以节省摆位时间,无定位器组和有定位器组的每次放疗摆位时间都被记录下来。摆位时间的记录规则为病人躺下

治疗床开始计算,到两个放疗技术员一致认为激光线对好治疗标记点为止。

1.6 统计学方法

采用 Spyder 软件进行统计学分析,使用 Shapiro-Wilk 进行正态性分布检验,符合正态性分布的计量资料用均数±标准差表示;不符合正态性分布的计量资料用  $M(Q1, Q3)$  表示,采用 Mann-Whitney  $U$  检验分析。设定显著性水平为 0.05,根据公式  $[2.5\Sigma+0.7\sigma]$  计算 PTV 外扩边界<sup>[11-14]</sup>。  $P<0.05$  为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 试验一结果

如表 1 所示,加了定位器的 CT 扫描,其质量切片结果的 row 测量值处于正常参考范围内,与无定位器

的测量结果差异很小。如表 2 所示,加了定位器组的 CT 扫描,其质量噪声结果 kV Step 测量值处于正常参考范围内,与无定位器组的测量结果差异很小。如表 3 所示,加了定位器的 CT 扫描,其质量 MTF 结果的 wire in plastics 测量值处于正常参考范围内,与无定位器组的测量结果差异很小。

表 1 质量切片结果  
Table 1 Quality slice results

row	无定位器	有定位器
row1 测量值(参考范围:1.53±0.5)	1.38	1.35
row2 测量值(参考范围:1.44±0.5)	1.32	1.34
row3 测量值(参考范围:1.41±0.5)	1.32	1.28
row4 测量值(参考范围:1.29±0.5)	1.29	1.32
row5 测量值(参考范围:1.38±0.5)	1.39	1.34

表 2 质量噪声结果  
Table 2 Quality noise results

kV Step	Sigma/HU			Voltage/kV		
		无定位器	有定位器		无定位器	有定位器
kV Step1	测量值(参考范围:10.53±1.05)	10.53	10.54	测量值(参考范围:119.8±12.0)	119.8	119.8
kV Step2	测量值(参考范围:9.78±0.98)	9.84	9.86	测量值(参考范围:139.8±14.0)	139.8	139.8

表 3 质量 MTF 结果  
Table 3 Quality MTF results

wire in plastics	row	无定位器	有定位器
wire in plastics; 2*4.8 mm(from 6*4.8); S80s	row1 测量值(参考范围:5.19±0.52)	4.83	5.02
wire in plastics; 1*5 mm(from 1*5); S80s	row1 测量值(参考范围:5.11±0.51)	4.90	4.70
wire in plastics; 2*1.2 mm(from 24*1.2); B75h	row1 测量值(参考范围:9.12±0.91)	9.13	9.13

2.2 试验二结果

无定位器组的单次照射剂量测量结果是 977.4 mGy,有定位器的单次照射剂量测量结果是 962.8 mGy。定位器的使用会带来剂量折损,通过计算得出,对于有定位器正位阻挡的照射野,该射野最大放疗剂量折损率为 1.49%。

2.3 试验三结果

2.3.1 摆位误差比较 如图 11 所示,图 11a 和图 11b 能够直观发现有定位器组的三维空间矢量位移误差较无定位器组的要小。如表 4 所示,有定位器组的 3 个方向线性摆位误差小于无定位器组( $P<0.05$ )。

2.3.2 PTV 外扩边界比较 如表 5 所示,相较于无定位器组,有定位器组在 X 轴和 Y 轴上的摆位误差和 PTV 外扩边界明显减小,在 Z 轴上的摆位误差和 PTV

外扩边界相差不大。

2.3.3 摆位时间比较 按照规则记录每次摆位时间,对无定位器组和有定位器组的摆位时间进行统计学分析,两组的摆位时间分别为  $(1.2\pm0.1)$  min 和  $(1.4\pm0.1)$  min,差异有统计学意义( $P=0.003$ )。

3 讨论

放射治疗的目的在于通过提高靶区剂量和减少靶区周围正常组织放射损伤从而不断提高治疗的局部控制率,进一步提高生存率和改善生存质量。调强放射治疗技术相比常规放疗,有很多优势,其结果能达到靶区剂量最大、靶区周围正常组织受照射量最小、靶区定位和照射更准确,同时靶区内的剂量分布最均匀。临床结果显示,调强放射治疗明显增加肿瘤的局部控制

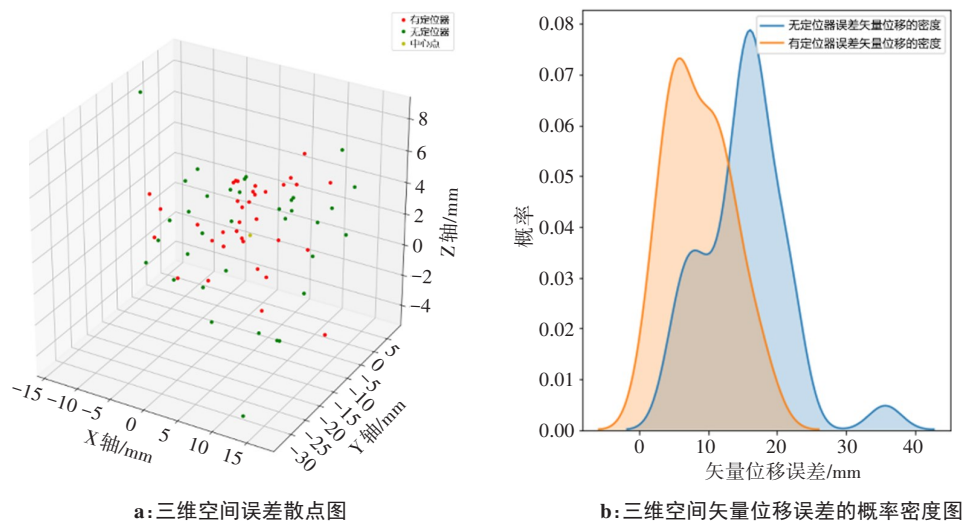


图 11 三维空间矢量位移误差对比

Figure 11 Comparison of three-dimensional spatial vector displacement errors

表 4 线性摆位误差的比较[M(Q1, Q3)]

Table 4 Comparison of linear set-up errors [M(Q1, Q3)]

坐标轴	无定位器组/mm	有定位器组/mm	P 值
X 轴	6.90(2.85, 12.10)	2.60(1.45, 8.10)	0.007
Y 轴	9.30(4.05, 16.15)	5.00(2.60, 9.50)	0.002
Z 轴	3.40(2.05, 4.10)	1.90(1.30, 3.65)	0.017

表 5 摆位误差和 PTV 外扩边界(mm)

Table 5 Set-up errors and PTV margins (mm)

项目	无定位器组			有定位器组		
	X 轴	Y 轴	Z 轴	X 轴	Y 轴	Z 轴
系统误差(Σ)	2.41	4.13	0.40	1.73	1.75	0.82
随机误差(σ)	4.47	6.14	1.65	3.11	3.82	1.32
PTV	9.15	14.62	2.15	6.50	7.04	2.97

率,减少正常组织的损伤,因此调强放射治疗技术,能达到很高的治疗增益比,可实施“手术”式的高度适形照射<sup>[15-17]</sup>。但该技术也带来了亟待解决的问题:(1)由于放射治疗是以分次照射方式进行的,只有精准的体位固定技术,才能使调强技术有的放矢,才能最大限度地减少肿瘤复发的可能,但现有体位固定技术每次定位误差较大,难以保证患者治疗体位的重复性,导致定位的误差直接影响治疗的准确性;(2)体位固定既要避免患者治疗过程中发生非自主移动,又要兼顾治疗时患者的舒适性。调强放射治疗往往治疗时间较长,易导致患者在治疗过程中发生非自主性身体移动,引起肿瘤靶区及危及器官的移动,使其偏离调强照射野之外,造成肿瘤的欠剂量或危及器官的过剂量照射<sup>[18-19]</sup>。

由于调强放射治疗对位置精度的高要求,从而催生了放疗图像引导技术,该技术能够较好地提高放疗

精度,但是由于以下原因:(1)设备缺陷:目前服役的很多直线加速器并没有图像引导功能,但是具备调强放射治疗的功能;(2)时间成本:病患太多,具备图像引导的设备,除了TOMO治疗,其他放疗设备很难做到每人每次放疗前都扫一次CT;(3)辐射伤害:CT图像引导方便且精准,是图像引导的主流,但是CT扫描是有辐射伤害的。因此,放疗图像引导技术的出现并不会使放疗精准摆位技术失去意义。

热塑膜定位技术是放疗精准摆位技术中的一种,热塑膜主要分为头膜、头颈肩膜、体膜,头膜用于固定头部,头颈肩膜用于固定头部、颈部和肩部,体膜用于固定躯干和四肢。热塑膜的固定效果和重复性取决于固定部位有无体表骨性标志及其是否明显,固定的部位不同,对应的体表骨性标志不同。头膜固定效果和重复性最好,是因为头部体表骨性标志很多而且明显,有鼻梁、鼻尖、颧骨凸起、眉弓、下颌骨边线等,使得头膜凹凸明显、立体感强。相比头膜,头颈肩膜固定效果和重复性整体会差一些,头颈肩膜的头部固定效果和重复性跟头膜差不多,但是颈部、肩部的固定效果和重复性会比较差,是因为颈部和肩部的体表骨性标志少且不明显,同时肩膀的活动性较大。体膜的固定,按照病人的睡姿区分主要分为仰卧位固定和俯卧位固定,按照固定部位区分主要分为胸部段固定和腹部段固定。对于仰卧位固定,胸腹部前侧的体表骨性标志有肋弓、髂骨、髂窝、耻骨联合、肚脐等,这些体表骨性标志主要集中在腹部段,胸部段缺乏体表骨性标志,所以仰卧位胸段体膜固定的效果和重复性不好。另外,这些体表骨性标志的明显程度取决于病人的肥胖度,病人越瘦则越明显,病人越胖则越不明显,所以病人越胖,不管是胸部段还是腹部段,体膜的固定效果和重复性都不好。对于俯卧位固定,由于胸腹部背侧即背部和臀部缺乏体表骨性标志,所以不管是胸部段固定还是腹部



段固定,不管病人是胖还是瘦,体膜的固定效果和重复性都不好<sup>[20-21]</sup>。

综上所述,目前的热塑膜固定方式,特别是头颈肩膜和体膜,其固定效果和重复性较差,摆位效率较低,摆位误差较大,热塑膜固定技术亟待进一步的技术革新。面对现有热塑膜固定的临床痛点,本研究设计了热塑膜定位器,能够解决由于缺乏体表骨性标志而导致的固定效果和重复性较差的问题。该发明能够牢牢吸附于人体表面,不易脱落,人为形成人造体表骨性标志。具体过程如下,先在人体皮肤上标记好定位点,在标记的点上放置皮肤定位器,将软化的热塑膜放置在人体上,待热塑膜冷却固化后,凸起的皮肤定位器会在热塑膜上形成凹陷,此轮廓便是重复摆位的关键,之后的每次摆位,只需要在原有皮肤标记点上,再次安装皮肤定位器,然后再将体膜放置到患者身上,通过皮肤定位器与凹陷的配合形成定位,快速精确安装热塑膜,保证每次放疗摆位时,减少体膜摆位误差。皮肤定位器进行热塑膜定位时,皮肤定位器能够模拟人体体表骨性标志在热塑膜定位中的作用,使得热塑膜定位不再过度依赖人体体表骨性标志。经试验一发现,热塑膜定位器在CT模拟定位时的使用并不会带来伪影,对CT图像质量没有影响,不会影响放疗医生的靶区勾画。经试验二发现,热塑膜定位器对高能X线的阻挡能力很弱,可知定位器的使用对放疗剂量的影响可忽略不计。经试验三发现,有定位器组对比无定位器组,热塑膜定位器在热塑膜固定中的应用能够减少放疗患者三维空间摆位误差,同时能够减少PTV外扩边界。两组病例的摆位时间差异不大。热塑膜定位器的使用,在没有提高放疗摆位时间的情况下,显著提高热塑膜摆位精度,减少摆位误差,使得热塑膜固定的调强放射治疗的靶区剂量精度得到更好的保障,能够增大放疗靶区剂量和准确性,从而增强肿瘤的致死率,提高放疗疗效。另外,由于三维空间PTV外扩边界的减少,降低肿瘤周围正常组织和器官的受照射剂量,从而减轻放疗的副作用,提高放疗的治疗增益比。

综上所述,热塑膜定位器的使用不会影响CT图像的质量,对放疗总剂量的影响微乎其微,同时具有使用简单、安全可靠、定位效果好、准确度高和效率高的优点,临床使用价值显著,经济实惠,值得广泛推广使用。

## 【参考文献】

- [1] Goffman TE, Glatstein E. Intensity-modulated radiation therapy[J]. Rad Res, 2002, 158(1): 115-117.
- [2] 于金明, 邢力刚. 中国肿瘤放射治疗学的现状与展望[J]. 肿瘤防治杂志, 2003, 10(1): 13-16.  
Yu JM, Xing LG. Current status and prospect of radiation oncology in China[J]. Journal of Cancer Prevention and Treatment, 2003, 10(1): 13-16.
- [3] Miah A, Clarke P, Harrington K, et al. The role of intensity modulated radiotherapy in the treatment of sinonasal tumors[J]. Skull Base, 2009, 19(1): A306.
- [4] Noghreian VV, Nasser S, Anvari K, et al. Evaluation of set-up errors

- and determination of set-up margin in pelvic radiotherapy by electronic portal imaging device (EPID)[J]. J Radiother Pract, 2020, 19(2): 150-156.
- [5] Mileusnić D. Verification and correction of geometrical uncertainties in conformal radiotherapy[J]. Arch Oncol, 2005, 13(3-4): 140-144.
- [6] 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]. Radiother Oncol, 2015, 117(3): 419-424.
- [7] 余广南, 朱远湖, 王文辉. 一种皮肤定位器及其应用: CN106362297A[P]. 2017.  
She GN, Zhu YH, Wang WH. A kind of skin positioner and its application: CN106362297A[P]. 2017.
- [8] 唐斌, 黎杰, 王培, 等. 穿透型参考电离室在立体定向放疗的相对剂量学中的应用[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2019, 28(3): 214-216.  
Tang B, Li J, Wang P, et al. Application of penetrating reference ionization chamber in relative dosimetry of stereotactic body radiotherapy[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2019, 28(3): 214-216.
- [9] 姜瑞强, 熊靠, 黄国锋, 等. 医用直线加速器输出剂量稳定性分析[J]. 中国医学物理学杂志, 2011, 11(5): 176-177.  
Jiang RY, Xiong F, Huang GF, et al. Analysis of output dose stability of medical linear accelerator[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2011, 11(5): 176-177.
- [10] 许森奎, 方键蓝, 肖亮杰, 等. 两种体位固定方法在宫颈癌调强放射治疗中摆位固定精度的差异研究[J]. 中华肿瘤防治杂志, 2022, 29(3): 213-216.  
Xu SK, Fang JL, Xiao LJ, et al. Differences in accuracy of positional fixation between two postural fixation methods in intensity-modulated radiotherapy for cervical cancer[J]. Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment, 2022, 29(3): 213-216.
- [11] Van Herk M. Errors and margins in radiotherapy[J]. Sem Radiat Oncol, 2004, 14(1): 52-64.
- [12] Bayman E, Ataman ÖU, Kinay M, et al. How to determine margins for planning target volume (PTV): from 2D to 3D planning in radiotherapy for head and neck cancer? Portal imaging assessment for set-up errors[J]. Turk J Oncol, 2010, 25(3): 104-110.
- [13] 张英婷, 刘炳忠, 陈文芬, 等. 聚氨酯发泡胶结合翼板个体化塑形与负压真空袋固定肺癌放疗摆位精度比较[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2018, 27(3): 299-302.  
Zhang YT, Liu BZ, Chen WF, et al. Comparison of the positioning accuracy of polyurethane styrofoam combined with wing plate individualized shaping and negative pressure vacuum bag fixed lung cancer radiotherapy[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2018, 27(3): 299-302.
- [14] 许森奎, 姚文燕, 胡江, 等. 鼻咽癌发泡胶个体化塑形与标准化头枕放疗体位固定精确度比较[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2015, 24(2): 196-199.  
Xu SK, Yao WY, Hu J, et al. Comparison of individualized styrofoam for nasopharyngeal carcinoma with standardized headrest radiotherapy for postural fixation[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2015, 24(2): 196-199.
- [15] Zwicker F, Swartman B, Roeder F, et al. *In vivo* measurement of dose distribution in patients' lymphocytes: helical tomotherapy versus step-and-shoot IMRT in prostate cancer[J]. J Radiat Res, 2015, 56(2): 239-247.
- [16] Löbrich M, Rief N, Kühne M, et al. *In vivo* formation and repair of DNA double-strand breaks after computed tomography examinations[J]. P Natl Acad Sci USA, 2005, 102(25): 8984-8989.
- [17] Wiezorek T, Brachwitz T, Georg D, et al. Rotational IMRT techniques compared to fixed gantry IMRT and tomotherapy: multi-institutional planning study for head-and-neck cases[J]. Radiat Oncol, 2011, 6(1): 1-10.
- [18] Stromberger C, Kom Y, Kawgan-Kagan M, et al. Intensity-modulated radiotherapy in patients with cervical cancer. An intra-individual comparison of prone and supine positioning[J]. Radiat Oncol, 2010, 5: 1-8.
- [19] Guo M, Huang E, Liu X, et al. Volumetric modulated arc therapy versus fixed-field intensity-modulated radiotherapy in radical irradiation for cervical cancer without lymphadenectomy: dosimetric and clinical results[J]. Oncol Res Treat, 2018, 41(3): 105-109.
- [20] 曹绿英, 何侠. 适形放疗体模摆位的体会[J]. 安徽医科大学学报, 2002, 37(3): 244.  
Cao LY, He X. Experience of conformal radiotherapy body model positioning[J]. Journal of Anhui Medical University, 2002, 37(3): 244.
- [21] 肖红, 庞学利, 王希. 体部三维适形放射治疗中的有关摆位技术体会[J]. 第三军医大学学报, 2004, 26(23): 2164-2167.  
Xiao H, Pang XL, Wang X. Experience of positioning techniques in three-dimensional conformal radiotherapy of the body[J]. Journal of Third Military Medical University, 2004, 26(23): 2164-2167.

(编辑:陈丽霞)