

图像引导下前列腺癌放疗固定装置的摆位误差与临床因素相关性分析

郭旋^{1,2}, 刘洋¹, 熊燕¹, 刘鏢水¹, 宋婷², 李云飞¹

¹中山大学肿瘤防治中心//华南肿瘤学国家重点实验室//肿瘤医学协同创新中心, 广东 广州 510060; ²南方医科大学生物医学工程学院, 广东 广州 510515

摘要:目的 通过量化分析4种固定装置在前列腺癌放疗中的摆位误差, 评估其精度差异并探讨影响因素, 为临床选择最优固定方案提供依据。方法 回顾性分析中山大学肿瘤防治中心2016年5月~2024年5月240例进行图像引导放疗的前列腺癌患者, 按固定装置分为4组: 1.2 m真空袋组、1.8 m真空袋组、Orfit架组和个体化俯卧板组, 60例/组。所有患者每次治疗前行锥形束CT(CBCT)扫描, 采用X射线容积成像仪(XVI)系统灰度配准获取RL、SI、AP三维方向的摆位误差。对所有患者进一步按有无淋巴结照射(各120例)、年龄(<65岁, $n=80$; ≥ 65 岁, $n=160$)以及BMI分层(BMI<24 kg/m², $n=120$; BMI ≥ 24 kg/m², $n=120$)进行亚组分析。结果 4组在三维方向的摆位误差差异有统计学意义($P<0.05$)。个体化俯卧板组RL(0.02 \pm 0.25)cm、SI(0.01 \pm 0.32)cm方向误差最小, 但AP方向误差最大(-0.28 \pm 0.36)cm。淋巴结照射组在AP方向的误差(-0.22 \pm 0.36cm)高于无淋巴结组(-0.01 \pm 0.43 cm)($P<0.001$)。BMI与SI方向误差呈负相关($R=-0.45$, $P<0.001$), 与年龄相关性无统计学意义($P>0.05$)。结论 个体化俯卧板在RL/SI方向的精度优势具有显著临床意义, 但AP方向的系统误差问题亟待解决。对于接受淋巴结照射或BMI较低的患者群体, 应当特别关注SI方向的摆位精度控制。本研究为前列腺癌精准放疗的固定装置选择和个体化治疗方案优化提供了更高级别的循证依据。

关键词:前列腺癌; 固定装置; 摆位误差; BMI

Analysis of setup errors and their correlation with clinical factors in image-guided radiotherapy for prostate cancer using different immobilization devices

GUO Xuan^{1,2}, LIU Yang¹, XIONG Yan¹, LIU Biaoshui¹, SONG Ting², LI Yunfei¹

¹Sun Yat-sen University Cancer Center, State Key Laboratory of Oncology in South China, Collaborative Innovation Center for Cancer Medicine, Guangzhou 510060, China; ²School of Biomedical Engineering, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China

Abstract: Objective To quantitatively analyze setup errors of 4 immobilization devices in precision radiotherapy for prostate cancer, their accuracy differences, and the factors affecting their setup precisions. **Methods** We conducted a retrospective analysis of 240 prostate cancer patients undergoing image-guided radiotherapy at Sun Yat-sen University Cancer Center from May, 2016 to May, 2024. According to the immobilization devices used, the patients were divided into 1.2 m vacuum bag group ($n=60$), 1.8 m vacuum bag group ($n=60$), Orfit frame group ($n=60$), and customized prone board group ($n=60$). All the patients received pre-treatment cone-beam CT (CBCT) scans, and setup errors in the right-left (RL), superior-inferior (SI), and anterior-posterior (AP) directions were obtained through XVI system grayscale registration. Further subgroup analyses were performed based on patient stratifications by lymph node irradiation status ($n=120$ each), age (<65 years, $n=80$; ≥ 65 years, $n=160$), and BMI (BMI<24 kg/m², $n=120$; BMI ≥ 24 kg/m², $n=120$). **Results** The setup errors differed significantly among the 4 groups in three-dimensional directions ($P<0.05$). The customized prone board group showed minimal errors in the RL (0.02 \pm 0.25 cm) and SI (0.01 \pm 0.32 cm) directions, but demonstrated the largest error in the AP direction (-0.28 \pm 0.36 cm). The patients with lymph node irradiation had significantly greater AP directional errors (-0.22 \pm 0.36 cm) than those without (-0.01 \pm 0.43 cm; $P<0.001$). BMI showed a negative correlation with SI directional errors ($R=-0.45$, $P<0.001$), while age was not significantly correlated with the setup errors ($P>0.05$). **Conclusion** The customized prone board demonstrates clinically significant advantages for its high setup accuracies in RL and SI directions in spite of its systematic AP directional errors. The setup accuracy in the SI direction is especially important for patients with lymph node irradiation or low BMI. Our findings provide quantitative evidence for immobilization device selection and individualized optimization of precision radiotherapy for prostate cancer.

Keywords: prostate cancer; immobilization devices; setup errors; body mass index

前列腺癌在我国呈现显著的疾病负担加重趋势。

收稿日期: 2025-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(82472117); 国家自然科学基金青年项目(82303954)

Supported by Youth Program of National Natural Science Foundation of China (82303954); Supported by National Natural Science Foundation of China (82472117).

作者简介: 郭旋, 硕士, 技师, E-mail: guoxuan@sysucc.org.cn

通信作者: 李云飞, 工程师, E-mail: liyfl@sysucc.org.cn

流行病学数据显示, 虽然我国前列腺癌年龄标准化发病率(7.8/10万)显著低于西方国家(美国16.7/10万, 法国5.1/10万), 但病死率却明显偏高(中国14.5% vs 美国8%)^[1,2]。全球疾病负担研究(GBD)显示, 1997~2017年间我国前列腺癌发病率增速位居全球前列^[3]。值得注意的是, 该疾病具有显著的年龄相关性, 约80%的患者确诊年龄超过50岁, 其中60~80岁为高发年龄段^[4]。放射治疗是前列腺癌综合治疗的重要手段, 其疗效与治疗

相关毒性密切相关。特别是对于老年患者,放疗耐受性往往是限制治疗实施的关键因素^[5]。研究表明,精准的体位固定技术可显著降低胃肠和泌尿系统毒性发生率(RR=0.62, 95% CI: 0.51~0.75)^[6],这对于改善患者治疗依从性和生活质量具有重要意义。

与头颈部肿瘤相比,盆腔放疗面临若干独特的挑战:靶区周围重要器官(如膀胱、直肠、小肠)的解剖变异度大;脏器充盈状态和肠蠕动可导致显著的靶区位移(平均3~5 mm)^[7];老年患者体位保持能力通常较差。这些因素共同导致盆腔放疗的摆位误差显著大于其他部位($P<0.01$)^[8]。图像引导放疗(IGRT)技术的应用为这一难题提供了解决方案。锥形束CT(CBCT)通过三维解剖成像可实现亚毫米级的摆位验证精度^[9]。研究表明,采用灰度配准的CBCT引导可将系统误差控制在1 mm以内(95% CI: 0.8~1.2 mm)^[10]。然而,尽管已有研究探讨了固定装置对摆位误差的影响,但多数研究存在以下不足:缺乏对多种固定装置(如真空袋、Orfit架、个体化俯卧板)的系统性比较;针对中国人群,尤其是老年患者群体的数据较为有限;对BMI、淋巴结照射等临床因素与摆位误差的相关性分析不够深入^[11-13]。基于此,本研究创新性地系统评估了4种常用固定装置在前列腺癌放疗中的摆位精度差异,并结合中国人群(特别是老年患者)的特征,深入分析了BMI、淋巴结照射等临床因素的影响,旨在为个体化固定方案的选择提供更全面、更贴合临床实际的循证依据,最终服务于精准放疗目标的实现。

1 资料和方法

1.1 患者资料

本研究为一项回顾性研究。通过医院病历系统,连续筛选2016年5月~2024年5月在中山大学肿瘤防治中心接受图像引导放疗,并使用4种固定装置(1.2 m真空袋、1.8 m真空袋、Orfit架、个体化俯卧板)之一的前列腺癌患者。为保障各组样本量均衡并实现有效比较,我们按固定装置类型进行分组,并从每组中连续纳入最先完成治疗的60例患者,最终共纳入240例患者进行摆位误差及临床因素相关性分析。4组患者的固定装置选择基于不同治疗时期的临床常规、医生偏好及设备可用性,而非随机分配。为评估并控制潜在的选择偏倚,我们对四组患者的基线资料(包括年龄、BMI、临床分期、风险分层及淋巴结照射情况)进行了系统比较,结果显示,各组在这些关键特征上无统计学差异(均 $P>0.05$,表1),表明组间具有可比性。患者中位年龄为65岁(范围:33~80岁),BMI范围18.7~32.5 kg/m²。纳入标准包括:接受根治性放疗;采用大分割放疗技术;放疗照射范围涵盖前列腺及盆腔淋巴结引流区(包括髂内、髂外及骶前淋巴结);排除标准:术后放疗、常规分割、未包含淋巴结引流区及临床资料不完整的病例。患者临床分期(依据AJCC第8版)显示T3期占58%,T4期占42%;根据D'Amico风险分层,中危占35%、高危占65%。所有患者均采用容积调强弧形治疗(VMAT)技术,处方剂量为67.5~70 Gy,分次治疗次数为25~28次,所有患者均未使用金标标记或SpaceOAR水凝胶间隔物。放疗期间,所有患者均联合新辅助或辅助内分泌治疗(ADT),无患者接受同步化疗。本研究经中山大学肿瘤防治中心伦理委员会批准(伦理批号:B2025-129-01),并豁免知情同意。

表1 4组患者基线资料比较

Tab.1 Comparison of baseline characteristics of the patients in the 4 groups (n=60)

Metric	1.2 m vacuum bag	1.8 m vacuum bag	Orfit board	Individualized prone	χ^2/F	P
Age (year, Mean \pm SD)	64.2 \pm 7.8	65.1 \pm 8.2	63.8 \pm 6.9	65.5 \pm 7.5	0.78	0.505
BMI (kg/m ² , Mean \pm SD)	24.1 \pm 2.8	23.8 \pm 3.1	24.3 \pm 2.9	23.9 \pm 3.0	0.38	0.769
Clinical stage [n (%)]					2.15	0.542
T3	36 (60.0)	33 (55.0)	35 (58.3)	35 (58.3)		
T4	24 (40.0)	27 (45.0)	25 (41.7)	25 (41.7)		
Risk stratification [n (%)]					1.08	0.782
Intermediate risk	22 (36.7)	20 (33.3)	19 (31.7)	23 (38.3)		
High risk	38 (63.3)	40 (66.7)	41 (68.3)	37 (61.7)		
Lymph node irradiation [n (%)]	32 (53.3)	30 (50.0)	28 (46.7)	30 (50.0)	0.74	0.864

Continuous data were compared using one-way (ANOVA); categorical data were compared using the chi-square test(χ^2 test).

1.2 体位固定与CT扫描

所有患者在定位前均遵循统一的预处理流程:首先排空膀胱,随后在指定时间内饮用1000 mL水。医护人员

对患者进行宣教和憋尿训练,并使用膀胱扫描仪(B超测尿仪)测量尿量。仅当膀胱容量达到200~400 mL的标准时,方可进行固定装置的制作;未达标者需重新

进行肠道准备,直至符合条件。

各固定装置的制备流程如下:

1.2 m真空袋的患者采取仰卧位固定:首先将真空垫充气至可塑性状态,患者去除衣物后取仰卧位,双上肢上举并于头顶交叉固定,确保体位舒适度。随后进行真空抽气塑形处理,操作过程中需将真空袋两侧均匀包裹受试者腰部至股骨中段区域,同时严格保持患者体位与固定装置及治疗床面的空间平行关系。

1.8 m真空袋的患者采取俯卧位固定:患者去除衣物后取俯卧位置于半充气状态的真空垫上,保持平静呼吸状态,双上肢上举固定。通过体位调整实现:头部区域形成15°斜坡支撑;骨盆区域适度抬高;腹部区域采用双侧泡沫垫支撑(厚度5 cm)实现解剖学镂空。待确认体位舒适度后,实施真空抽气塑形处理。

Orfit架的患者采取俯卧位固定:患者双上肢屈曲抱头固定,腹部区域配置解剖适配型镂空腹托,盆腔部采用热塑性体膜(厚度3 mm)实施三维适形固定。通过激光定位系统校准底板双侧刻度,并在模拟定位机下验证体位,要求L3椎体至耻骨联合的解剖连线保持线性排列(偏差 $<2^{\circ}$)和骨盆旋转角度控制在 $\pm 1^{\circ}$ 范围内。最终记录所有定位参数

个体化俯卧板的患者采取俯卧位进行固定:首先将定制化真空垫装配于跨挡结构,受试者取俯卧位固定于个体化定位装置。体位调整包括:基于人体测量学参数选择头枕倾斜角度($0\sim 15^{\circ}$ 可调);精确调节前后定位刻度;上肢固定于前侧握持杆;下腹部置于解剖型腹托内。完成真空塑形后,使垫体紧密包裹并固定患者骨盆及大腿近端区域,确保体位稳定且患者主观感受舒适。同样通过激光定位系统校准底板双侧刻度,并在模拟定位机下验证体位要求L3椎体至耻骨联合的解剖连线保持线性排列(偏差 $<2^{\circ}$)和骨盆旋转角度控制在 $\pm 1^{\circ}$ 范围内。最终记录头、脚部等各固定参数。

在完成体位固定后,采用X线模拟定位机进行正位投影影像学验证,确保体轴与治疗床面的平行度误差 $<1^{\circ}$ 且骨盆旋转偏差 $<2^{\circ}$ 。随后,使用医用激光定位系统在 0° 、 90° 和 270° 三个轴向精确标记十字定位线(图1)。为最大限度减少不同技师操作带来的变异,所有参与本研究的放疗技师均接受过统一的标准化操作培训。培训内容包括:各固定装置的标准塑形流程、体位摆放的要点、以及对于固定装置操作的可重复性。所有患者的体位固定均由至少一名高年资技师(工作经验 >5 年)审核确认后,方可进行CT模拟定位。

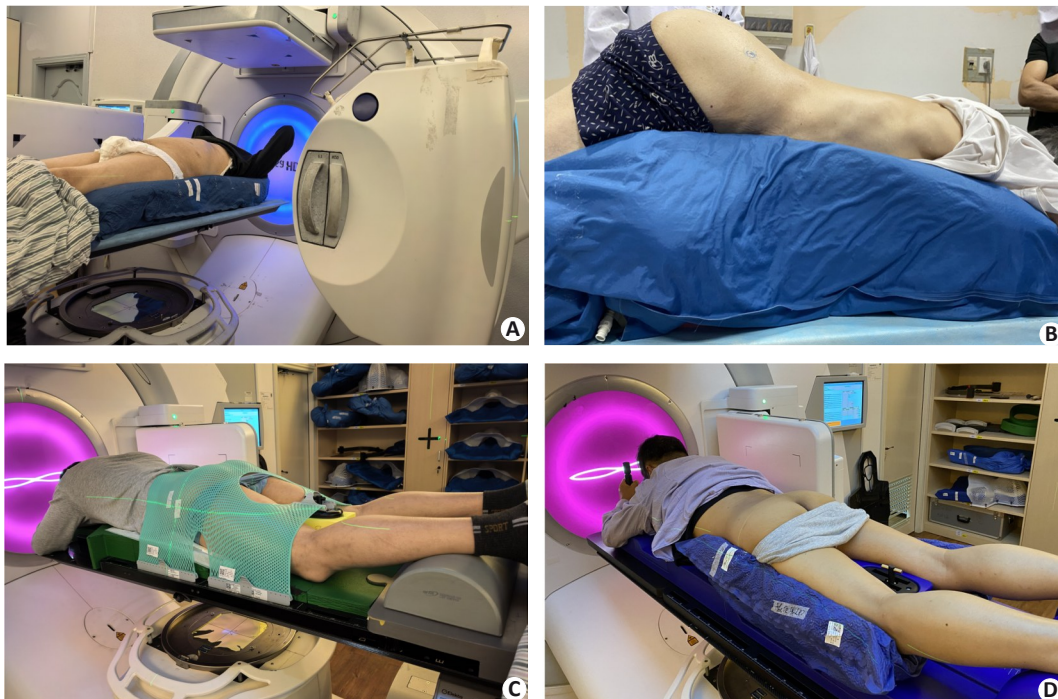


图1 4种固定装置示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the 4 types of fixation device. A: 1.2 m vacuum bag immobilization. B: 1.8 m vacuum bag immobilization. C: Orfit board immobilization. D: Individualized prone panel immobilization.

所有患者均接受CT预扫描评估直肠排空状态,符合标准者(直肠直径 ≤ 3 cm)进入正式扫描流程。采用Philips Brilliance Big Bore 64排大孔径CT模拟定位

机进行扫描,技术参数设置为:管电压140 kV,管电流400 mAs,采集层厚0.5cm的无间隔螺旋扫描,扫描范围涵盖第1腰椎下缘至坐骨结节下缘解剖区域。获取的

增强CT图像经DICOM网络传输至Monaco 5.11治疗计划系统(TPS)。由2名具有5年以上经验的放射肿瘤医生完成靶区勾画:基于影像学可见病灶确定大体肿瘤靶区(GTV),结合ICRU 62号报告指南勾画临床靶区(CTV)以涵盖高危淋巴引流区域,并综合考虑器官运动及摆位误差等因素,按照机构标准(前/侧方5 mm,后方3 mm)外放生成计划靶区(PTV)。最终治疗计划由医学物理师和主治医师共同审核评估,以确保满足临床剂量学要求。

1.3 图像引导放射治疗(IGRT)质控流程

所有治疗分次均执行标准化的图像引导程序:为控制直肠充盈度对配准精度的影响,所有患者在每次CBCT扫描前均被要求排空直肠。若扫描图像显示直肠直径 >3 cm,则要求患者再次尝试排空后重新扫描,以确保直肠处于排空状态。膀胱充盈度的标准化通过定量饮水方案实现:定位和治疗前1小时排空膀胱,随后在30 min内匀速饮用1000 mL水。治疗前使用便携式膀胱扫描仪(BladderScan)验证尿量,确保膀胱容量维持在200~400 mL的适度充盈状态后方可进行治疗。这一严格的预处理流程旨在最大限度地减少因内部器官运动和形态变化引入的非刚性形变,从而保证灰度配准算法主要反映的是体位的刚性偏差。基于体表标记点和固定装置参考线进行初始摆位后,采用医科达XVI影像引导系统获取千伏级锥形束CT(CBCT)图像,扫描参数设置为:旋转角度范围 $\pm 180^\circ$,机架转速 $6^\circ/\text{s}$,采集时间60 s,有效扫描视野(FOV)直径45 cm \times 长度15 cm,X线参数125 kV/80 mA(脉冲宽度13 ms)。治疗计划系统(Monaco 5.11)生成的计划数据与模拟CT图像通过DICOM-RT协议传输至Elekta Infinity™直线加速器工作站。图像配准采用XVI系统内置的灰度值自动配准算法进行刚性配准。配准容积(VOI)的解剖学边界严格定义为:上界-L4椎体下缘,下界-坐骨结节下缘,前界-耻骨联合前缘,后界-尾骨后缘,外界-髌臼外缘。该算法基于整个VOI内的体素灰度信息进行三维平移和旋转的匹配计算,系统默认的配准参数(如分辨率、优化算法)在本次回顾性研究的所有病例中保持一致。精确记录每次治疗在左右(RL)、头脚(SI)和前后(AP)三个维度的摆位偏差,并最终计算各固定装置组在三维方向上的系统误差(均值, Σ)和随机误差(标准差, σ)。

1.4 统计学分析

本研究采用以下统计处理流程:总体摆位误差量化为系统误差(Σ ,群体均值)与随机误差(σ ,群体标准差)的复合指标($\Sigma \pm \sigma$)。基于Stroom等^[14]和Van等^[15]提出的放射治疗靶区外放模型,采用公式 $M \sim PTV \sim 2.5 \Sigma + 0.7\sigma$ 计算各固定装置组所需的安全边界。样本量计算基于前期预实验数据,设定效应量为0.5,显著性水平

(α)为0.05,检验效能($1-\beta$)为0.8,通过G*Power软件估算每组至少需55例患者,四组总样本量为220例。本研究实际纳入240例患者,满足统计学要求。使用SPSS 24.0(IBM Corp.)软件进行数据分析,计量资料以均值 \pm 标准差表示。数据正态性经Shapiro-Wilk检验验证后,组间比较采用参数检验(如独立样本 t 检验)或非参数检验(Mann-Whitney U检验);4种固定装置的误差差异分析采用Kruskal-Wallis H检验,并辅以Bonferroni校正进行两两比较。摆位误差与连续变量(年龄、BMI)的相关性通过Pearson或Spearman相关系数进行评估。所有统计检验均为双侧检验, $P < 0.05$ 认为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 4种固定装置间的摆位误差

4种固定装置在三维方向上的摆位误差差异均具有统计学意义($P < 0.05$)。定量分析显示:个体化俯卧板在左右(RL:0.02 \pm 0.25 cm)和头脚(SI:0.01 \pm 0.32 cm)方向上表现出最优的摆位精度,显著优于其他固定装置($P < 0.05$);然而其在前后(AP)方向的平均位移误差最大(-0.28 \pm 0.36 cm)。Orfit架在SI方向的偏差最为显著(-0.13 \pm 0.45 cm)。两两比较结果显示:在RL方向,Orfit架与1.2米真空袋的差异最大(均值差0.12 cm);SI方向以Orfit架与1.8 m真空袋的差异最为显著(均值差0.18 cm);AP方向所有比较均有统计学意义($P < 0.05$),其中个体化俯卧板与1.2 m真空袋的差异最大(均值差0.32 cm)。值得注意的是,误差超过0.5 cm的发生率在个体化俯卧板组中最高(18.33%),提示需要特别关注该装置在AP方向的固定稳定性(表2)。

2.2 配准框参数对摆位误差的影响

本研究对前列腺癌患者(淋巴结照射组120例vs无淋巴结照射组120例)进行配准框参数的对比分析。结果显示,采用较大配准框范围(上界L3椎体)的淋巴结照射组在AP方向的系统误差显著增大(-0.22 \pm 0.36 cm vs -0.01 \pm 0.43 cm, $P < 0.01$),三维方向的误差均存在统计学差异($P < 0.05$,表3)。

2.3 PTV靶区外放边界值比较

由表2可得到4种固定装置在3个方向上的系统误差和随机误差,利用靶区外扩公式将其外放值计算出来,结果如表4所示。个体化俯卧板在RL和SI方向上的靶区外放边界均比其他3组要小,特别是SI方向上,其外放边界(0.58 cm)与1.8 m真空袋(1.11 cm)相比减小了约52%;而在AP方向上4组需外扩的边界都相差不多。从临床经验来看,前列腺癌患者的典型外扩边界是0.5 cm,向后0.3 cm,这与个体化俯卧板得出结果相接近。对于有无淋巴结而言,我们选取个体化60例患者

表2 4种固定装置在三维方向上的摆位误差及两两比较

Tab.2 Positioning errors of the 4 fixing devices in 3-dimensional directions and pairwise comparisons (cm, Mean±SD)

Direction/devices	1.2 m vacuum bag	1.8 m vacuum bag	Orfit board	Individualized prone panel	P
R-Ldirection	0.05±0.28	0.05±0.23	-0.05±0.28* ^{ΔO}	0.02±0.25	<0.001
S-Idirection	-0.06±0.36* [▲]	0.03±0.30	-0.13±0.45* [▲]	0.01±0.32	<0.001
A-Pdirection	0.03±0.24 ^{Δ*}	-0.10±0.42 [▲]	-0.02±0.21* [▲]	-0.28±0.36 ^O	<0.001
≥0.5 cm (%)	15.0%	11.67%	13.33%	18.33%	-

RL: Right-Left direction; SI: Superior-Inferior direction; AP: Anterior-Posterior direction; ^OP<0.05 vs 1.2 m vacuum bag; *P<0.05 vs 1.8 m vacuum bag; ^ΔP<0.05 vs Orfit board; [▲]P<0.05 vs individualized prone panel; no statistical difference is indicated.

表3 有无淋巴结(配准框大/小)在三维方向的摆位误差

Tab.3 Positioning errors in 3 directions in patients with or without lymph node irradiations (cm, Mean±SD)

Direction	R-L	S-I	A-P
Have lymph nodes	-0.04±0.30	0.003±0.35	-0.22±0.36
No lymph nodes	0.002±0.29	-0.075±0.47	-0.01±0.43
t	2.14	3.46	4.27
P	0.033	0.001	<0.001

表4 4种固定装置之间PTV靶区外放比较

Tab.4 Comparison of M_{PTV} among the 4 fixation methods (cm)

Direction/devices		R-L	S-I	A-P
1.2 m vacuum bag	Σ	0.20	0.29	0.18
	σ	0.21	0.25	0.17
	M _{PTV}	0.64	0.9	0.57
1.8 mvacuum bag	Σ	0.13	0.19	0.35
	σ	0.08	0.91	0.14
	M _{PTV}	0.81	1.11	0.97
Orfit board	Σ	0.23	0.35	0.19
	σ	0.20	0.28	0.27
	M _{PTV}	0.71	1.07	0.66
Individualized prone panel	Σ	0.15	0.20	0.26
	σ	0.06	0.12	0.05
	M _{PTV}	0.41	0.58	0.69
Individualized prone panel	Σ	0.22	0.20	0.28
	σ	0.07	0.07	0.09
	M _{PTV}	0.59	0.55	0.77
With lymph nodes	Σ	0.18	0.37	0.32
	σ	0.07	0.07	0.13
	M _{PTV}	0.51	0.97	0.88
Withoutlymph nodes	Σ	0.22	0.20	0.28
	σ	0.07	0.07	0.13
	M _{PTV}	0.51	0.97	0.88

Σ represents the standard deviation of systematic errors, σ represents the root mean square of random errors; M_{PTV} stands for margin of the planning target volume.

进行靶区外扩分析,发现除了RL方向无淋巴结外扩数值比有淋巴结小以外,其余均比有淋巴结的数值要大。

2.4 年龄、BMI与摆位误差的相关性分析

本通过分析全部240例患者的摆位数据,系统评估了年龄和BMI对三维方摆位误差的影响。数据显示,年龄≥65岁组(n=160与<65岁组(n=80)在RL(0.01±0.25 cm vs 0.02±0.23 cm)、SI(0.03±0.33 cm vs -0.01±0.30 cm)和AP(-0.17±0.35 cm vs -0.14±0.32 cm)方向的摆位误差均无统计学差异(P>0.05)。Pearson相关性分析进一步证实,年龄与三维方向误差无显著相关性(|r|≤0.05,P>0.05)。然而,BMI分层分析显示,BMI<24 kg/m²组(n=120)在SI方向的误差(-0.13±0.31 cm)显著大于BMI≥24 kg/m²组(0.02±0.27 cm)(t=4.18,P<0.001),且BMI与SI方向误差呈负相关(r=-0.45,P<0.001)。值得注意的是,两组在RL和AP方向的误差差异无统计学意义(P>0.05,表5)。

表5 年龄、BMI与摆位误差的相关性分析

Tab.5 Correlation analysis of age, BMI with setup errors (cm, Mean±SD)

Variable	Group	n	RLError	SIError	APError	Statistical method	Statistic	P
Age (year)	<65	80	0.02±0.23	-0.01±0.30	-0.14±0.32	Independent t-test	t=1.02	0.310
	≥65	160	0.01±0.25	0.03±0.33	-0.17±0.35			
BMI (kg/m ²)	<24	120	-0.01±0.21	-0.13±0.31	-0.09±0.32	Independent t-test	t=4.18	<0.001*
	≥24	120	-0.03±0.22	0.02±0.27	-0.20±0.29			
Correlation analysis	Age		r=0.03	r=0.02	r=-0.04	Pearson correlation		>0.05
	BMI		R=-0.12	r=-0.45	r=-0.10	Pearson correlation		<0.001*

*indicates P<0.01 for intergroup comparison; RL: Right-Left direction; SI: Superior-Inferior direction; AP: Anterior-Posterior direction; BMI cutoff value follows the Asian standard of 24 kg/m².

3 讨论

图像引导放射治疗(IGRT)在前列腺癌治疗中发挥着关键作用,能够显著降低放疗引发的直肠、生殖泌尿系统等毒性反应的发生率,这主要得益于其提高了放疗靶位的精确性^[16,17]。然而,这种精确性受到多种因素的综合影响,包括摆位的重复性、患者自主呼吸运动、内部脏器运动、以及年龄、BMI、淋巴结照射范围等临床因素。研究表明,在盆腹腔肿瘤放疗中,头脚(SI)和前后(AP)方向的摆位误差通常较大,而左右(RL)方向误差相对较小。具体而言,SI方向误差多分布在5~7 mm, AP方向在3~5 mm, RL方向在2~4 mm之间^[18,19]。本研究结果与此相符,4种固定装置的SI和AP方向误差均大于RL方向,且在两两比较中,RL方向的误差始终最小。这提示在放疗摆位过程中,应特别关注SI和AP方向的误差控制,以进一步提高放疗的精准性。

本研究系统比较了4种固定装置的摆位误差。结果显示,个体化俯卧板在RL和SI方向上展现了最优的精度,但在AP方向却出现了最大的平均位移误差。此外,该装置在RL和AP方向发生 ≥ 0.5 cm误差的比例相对较高,提示这两个方向,尤其是AP方向,是其在临床应用中的稳定性短板,需给予更多关注。在彭庆国^[20]等人的研究中,采用仰卧位真空垫固定时,胸腹部位处于开放的状态,由于人体下腹皮肤松弛,皮下脂肪丰富,且受呼吸运动影响较大,患者憋尿多少也不好控制,都影响到摆位的准确度和重复性,特别是肥胖患者,大大增加了摆位的难度,影响了放疗的精确性。在临床应用中,不同固定装置各有优缺点。真空垫固定对于年老体弱和体重较轻的患者具有一定的优势,其舒适性较好,且定位过程相对简单。然而,真空垫在使用过程中容易变形漏气,导致固定装置的沉降,影响摆位的重复性和精确性^[21,22]。相比之下,Orfit架和个体化俯卧板虽然在患者俯卧位时舒适性稍差,但由于其设计特点,能够更好地减少小肠和膀胱的受照体积,且CT定位标记点位于骨盆区域,相对位移较少,重复性较好。此外,个体化俯卧板在靶区外扩边界的研究中表现出明显优势,其在RL和SI方向上的靶区外放边界均小于其他3组,尤其是SI方向,与1.8米真空袋相比减小了近52%。这表明个体化俯卧板在提高放疗精准性方面具有显著潜力,但仍需进一步优化其在AP方向的固定效果。因此,在使用个体化俯卧板时,应特别注意患者的呼吸控制和腹部压迫情况,以减少AP方向上的位移误差。

值得注意的是,除固定装置外,前列腺本身的解剖学因素也可能对摆位误差产生影响。从泌尿外科视角看,前列腺体积增大可能导致其在盆腔内的活动度增加;此外,前列腺与直肠前壁之间的解剖距离(通常以直

肠前壁厚度作为替代指标)是反映两者毗邻关系的重要参数。直肠的充盈状态、蠕动及内容物变化会直接作用于前列腺,导致其主要在AP方向上发生位移^[23]。本研究虽然未直接测量前列腺体积和直肠前壁厚度,但所有患者均严格执行了定位和治疗前排空直肠的预处理流程(要求直肠直径 ≤ 3 cm),旨在最大限度地减少由直肠可变因素引起的靶区位移^[24]。本研究中个体化俯卧板组在AP方向出现较大系统误差,可能与俯卧位时腹部受压、腹腔内容物对前列腺的间接推挤作用有关,这在一定程度上也受到了前列腺-直肠解剖关系的影响。未来研究可进一步纳入这些解剖参数,以更全面地揭示摆位误差的成因。

摆位误差不仅受固定装置和解剖因素的影响,还与图像配准精度及配准时选取的图像特征密切相关^[25,26]。研究表明,选择不同的配准范围和配准方法会对摆位误差产生显著影响^[27,28]。在实际临床操作中,需要在图像配准精度和配准效率之间找到平衡,合理确定配准框的大小和位置。本研究采用灰度配准方法,结果显示有淋巴结照射的患者其位移误差更大,尤其在SI方向上。这可能与以下因素有关:首先,扩大配准框范围会增加图像配准的容积和计算时间,进而增加患者保持体位的难度;其次,长期的治疗分次中,机械压缩作用可能导致固定装置产生累积性形变;最后,大范围配准可能引入更多非刚性形变因素(如肠蠕动、膀胱充盈变化),干扰刚性配准算法的准确性。因此,在临床实践中,建议根据实际靶区范围个性化设置配准框参数,定期检测固定装置的形变情况,并对治疗周期长的患者考虑中期重新定位。本研究中,无淋巴结照射患者在SI、AP方向上的PTV外放边界反而略大,这可能与无淋巴结照射组患者的个体差异、或样本量在亚组分析中相对不足导致的随机误差有关,值得在后续研究中扩大样本量进一步探讨。

本研究还探讨了BMI和年龄与摆位误差的相关性。结果显示,BMI与SI方向误差呈显著负相关($R=-0.45, P<0.001$),即BMI越小,SI方向上的摆位误差越大。这一发现与李雅宁^[29]等在宫颈癌放疗中的结论相一致,但本研究也发现BMI与RL、AP方向的误差无显著相关性。其原因可能在于,BMI较低的患者往往皮下脂肪较少,肌肉力量较弱,对体位固定的支撑性差,且更易受到呼吸、肠道蠕动等内部因素的影响,从而导致SI方向的不稳定性增加^[30,31]。另一方面,本研究中年龄与摆位误差未显示显著相关性,这可能与样本量及患者个体差异有关。然而,不容忽视的是,相关研究表明随着年龄增长,患者的体力、耐力及配合能力可能下降,理论上会增加摆位误差及放疗毒副反应风险^[32-35]。因此,对

于老年患者群体的体位固定与管理仍应给予足够关注。

本研究的局限性:首先,本研究为单中心回顾性分析,存在其固有的局限性。更重要的是,由于我们的纳入标准要求所有患者均接受盆腔淋巴结引流区照射,这导致本研究队列主要由高危或局部晚期前列腺癌患者构成。因此,本研究关于固定装置精度比较的结论,可能更直接地适用于需要大范围照射的高危患者群体。对于接受单纯前列腺照射或低中分次剂量(常规分割)的低中危早期前列腺癌患者,其靶区范围更小、治疗时间更短,固定装置的摆位误差特征及最优选择是否与本研究的结论一致,尚需进一步的研究验证。未来将通过前瞻性研究设计,纳入不同风险分层和放疗方案的患者,以提供更具有普适性的证据。

综上所述,前列腺癌放疗中摆位误差和前列腺靶区移位是客观存在且不可避免的,它们与治疗设备和校位系统的稳定性、放疗技术员的技术经验和责任心以及患者本身的诸多因素以及前列腺局部的解剖学特性有关^[36]。本研究结果表明,个体化俯卧板在RL和SI方向上的固定效果较好,但在AP方向上仍需改进。对于需要调整配准框大小的患者,应更加注意细节调整。此外,对于体重较大或较轻以及年龄较大的患者,应更加关注其体位的舒适性和变化性。本研究对摆位误差的量化分析及靶区外放边界的计算具有明确的临床指导意义:提升摆位效率与优化工作流程:本研究明确了不同固定装置的误差特点,如个体化俯卧板在RL/SI方向的高精度,可减少在这些方向上反复进行CBCT扫描和手动校正的次数,从而显著缩短每次治疗的摆位时间,提高治疗效率,尤其在患者量大的中心获益更为明显。实现个体化与精准化的靶区外放:研究结果为制定个体化的计划靶区(PTV)外放边界提供了直接依据。例如,采用个体化俯卧板时,SI方向的外放边界可较传统真空袋减小近52%(0.58 cm vs 1.11 cm)。这意味着在保证靶区覆盖的前提下,能显著缩小照射体积,更有力地保护膀胱、直肠等危及器官,有望降低放疗相关毒性,直接服务于精准放疗的目标。指导临床决策与资源优化:本研究为临床选择最优固定装置提供了高级别证据。对于需兼顾效率和精度的临床情境(如接诊量大或BMI较低的患者),可优先推荐在关键方向上精度更高的装置,从而实现医疗资源的优化配置。

随着我国逐渐步入人口老龄化社会,前列腺癌的疾病负担将进一步加重。因此,在未来肿瘤防控中,应重点关注前列腺癌的精准放疗,优化固定装置的设计和使用,提高图像配准的精度和效率,同时加强对患者的个体化管理和监测,最终实现提高疗效、降低毒副作用、优化医疗资源使用的综合目标,改善患者的治疗效果和生活质量。

Declaration of interests: The authors declare no competing interests.

参考文献:

- [1] Raychaudhuri R, Lin DW, Montgomery RB. Prostate cancer: areview[J]. JAMA, 2025, 333(16): 1433-46.
- [2] 李 星, 曾晓勇. 中国前列腺癌流行病学研究进展[J]. 肿瘤防治研究, 2021, 48(1): 98-102.
- [3] Zhai Z, Zheng Y, Li N, et al. Incidence and disease burden of prostate cancer from 1990 to 2017: Results from the Global Burden of Disease Study 2017[J]. Cancer, 2020, 126(9): 1969-78.
- [4] Tan EH, Burn E, Barclay NL, et al. Incidence, prevalence, and survival of prostate cancer in the UK[J]. JAMA Netw Open, 2024, 7(9): e2434622.
- [5] Moll M, Nechvile E, Kirisits C, et al. Radiotherapy in localized prostate cancer: a multicenter analysis evaluating tumor control and late toxicity after brachytherapy and external beam radiotherapy in 1293 patients[J]. Strahlenther Onkol, 2024, 200(8): 698-705.
- [6] Inui S, Ueda Y, Ohira S, et al. Comparison of interfractional setup reproducibility between two types of patient immobilization devices in image-guided radiation therapy for prostate cancer[J]. J Med Phys, 2018, 43(4): 230-5.
- [7] 曹 飞, 赵永亮, 李 明, 等. 宫颈瘤放疗仰、俯卧位固定下的摆位误差及剂量学差异探讨[J]. 现代肿瘤医学, 2019, 27(21): 3862-5.
- [8] 赵丰雨, 杜德成. 锥形束CT用于盆腔肿瘤放射治疗摆位中的效果分析[J]. 影像研究与医学应用, 2021, 5(4): 225-6.
- [9] Chen H, Liu YD, Qin SB, et al. Optical surface management system and BladderScan for patient setup during radiotherapy of postoperative prostate cancer[J]. Biomed Res Int, 2024, 2024: 3573796.
- [10] 丘敏敏, 钟嘉健, 李 敏, 等. 鼻咽癌调强放疗摆位不同配准方式对实际剂量学的影响[J]. 中国医疗设备, 2020(11): 94-7, 101.
- [11] Anand M, Parikh A, Shah SP. Comparison of thermoplastic masks and knee wedge as immobilization devices for image-guided pelvic radiation therapy using Cone Beam Computed Tomography[J]. Indian J Cancer, 2020, 57(2): 182-6.
- [12] Wang L, Chen Z, Li X, et al. Setup errors in radiotherapy for prostate cancer: A retrospective analysis of Chinese patients with different immobilization techniques[J]. Cancer Manag Res. 2020; 12: 12439-12447.
- [13] Inui S, Ueda Y, Ohira S, et al. Impact of body mass index on setup reproducibility in image-guided radiotherapy for prostate cancer[J]. J Appl Clin Med Phys, 2021, 22(3): 214-21.
- [14] Stroom JC, Heijmen BJ. Geometrical uncertainties, radiotherapy planning margins, and the ICRU-62 report[J]. Radiother Oncol, 2002, 64(1): 75-83.
- [15] Van HM, Remeijer P, Lebesque JV. Errors and margins in radiotherapy[J]. Semin Radiat Oncol, 2004, 14(1): 52-64.
- [16] Serizawa I, Kozuka T, Soyano T, et al. Clinical and dosimetric comparison between non-image guided radiation therapy and fiducial-based image guided radiation therapy with or without reduced margin in intensity modulated radiation therapy for prostate cancer[J]. Adv Radiat Oncol, 2024, 9(10): 101612.
- [17] Mirzaei M, Gill S, Sabet M, et al. Treatment efficiency and quality improvement via double imaging modality (DIM) versus single

- imaging modality (SIM) image-guided radiotherapy for prostate cancer[J]. *Tech Innov Patient Support Radiat Oncol*, 2025, 33: 100307.
- [18] Duffton A, McNee S, Muirhead R, et al. Clinical commissioning of online seed matching protocol for prostate radiotherapy[J]. *Br J Radiol*, 2012, 85(1020): e1273-81.
- [19] Greer PB, Dahl K, Ebert MA, et al. Comparison of prostate set-up accuracy and margins with off-line bony anatomy corrections and online implanted fiducial-based corrections[J]. *J Med Imaging Radiat Oncol*, 2008, 52(5): 511-6.
- [20] 彭庆国, 尹勇, 余宁莎, 等. 三种体位固定技术在盆腔肿瘤放疗中的应用比较[J]. *中华肿瘤防治杂志*, 2015, 22(12): 974-7, 983.
- [21] Guckenberger M, Meyer J, Wilbert J, et al. Cone-beam CT based image-guidance for extracranial stereotactic radiotherapy of intrapulmonary tumors[J]. *Acta Oncol*, 2006, 45(7): 897-906.
- [22] Foster R, Meyer J, Iyengar P, et al. Localization accuracy and immobilization effectiveness of a stereotactic body frame for a variety of treatment sites[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2013, 87(5): 911-6.
- [23] Fonteyne V, Villeirs G, Speleers B, et al. Intensity-modulated radiotherapy as primary therapy for prostate cancer: report on acute toxicity after dose escalation with simultaneous integrated boost to intraprostatic lesion[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2008, 72(3): 799-807.
- [24] De Crevoisier R, Tucker SL, Dong L, et al. Increased risk of biochemical and local failure in patients with distended rectum on the planning CT for prostate cancer radiotherapy[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2005, 62(4): 965-73.
- [25] 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): 391-4.
- [26] 彭清河, 彭应林, 朱金汉, 等. 图像配准方式对宫颈癌后装自适应放射治疗图像配准精度的影响[J]. *南方医科大学学报*, 2018, 38(11): 1344-8.
- [27] Shinde P, Jadhav A, Shankar V, et al. Assessment of dosimetric impact of interfractional 6D setup error in tongue cancer treated with IMRT and VMAT using daily kV-CBCT[J]. *Rep Pract Oncol Radiother*, 2023, 28(2): 224-40.
- [28] Dekker J, Essers M, Verheij M, et al. Dose coverage and breath-hold analysis of breast cancer patients treated with surface-guided radiotherapy[J]. *Radiat Oncol*, 2023, 18(1): 72.
- [29] 李雅宁, 林承光, 杨鑫. 体质量指数对宫颈癌调强放疗摆位误差影响[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2021, 30(2): 186-90.
- [30] Price RG, Lloyd S, Wang XC, et al. Adipose tissue distribution and body mass index (BMI) correlation with daily image-guided radiotherapy (IGRT) shifts of abdominal radiation therapy patients[J]. *Cureus*, 2023, 15(6): e40979.
- [31] Mulla Z, Hashem R, AlMohamad A, et al. Effect of body mass factors on setup displacement in gynecologic tumors and subsequent effect on PTV margins[J]. *Adv Radiat Oncol*, 2022, 8(1): 101108.
- [32] 李军. 不同年龄前列腺癌患者的临床病理特征与生存状况分析[J]. *新乡医学院学报*, 2020, 37(9): 862-4.
- [33] 潘启勇, 丁秋娥, 姜仁伟, 等. 盆腔肿瘤常规放疗摆位误差分析[J]. *中国实用医药*, 2010, 5(24): 47-8.
- [34] 丁伟杰, 孙菁, 陈一兴. 肝肿瘤螺旋断层放疗中患者年龄对摆位误差的影响[J]. *肿瘤*, 2016, 36(7): 810-3.
- [35] Bossuyt E, Nevens D, Weytjens R, et al. Assessing the impact of adaptations to the clinical workflow in radiotherapy using transit *in vivo* dosimetry[J]. *Phys Imaging Radiat Oncol*. 2023, 25:100420.
- [36] 王春霞, 宋真, 李红燕, 等. 不同年龄前列腺癌患者疾病不确定感与生活质量[J]. *中国老年学杂志*, 2019, 39(1): 200-3.

(编辑:余诗诗)