

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2026.02.003

医学放射物理

超声引导前列腺癌放疗中的剂量学研究

成坚强,李凤菊,赵凤菊,牛瑞军,魏玺仪,陶娜,贾怀琳,卢亚琼,张春林,董方
甘肃省肿瘤医院放疗科,甘肃兰州730050

【摘要】目的:基于超声引导前列腺癌放疗,研究分次间和分次内治疗过程中靶区和危及器官的放疗剂量差异。**方法:**选取2020~2024年期间甘肃省肿瘤医院放疗科收治的36例前列腺癌患者进行回顾性分析,依据超声引导方式不同分为以下两类,三维分次间超声引导和四维实时分次内超声引导,分析靶区和危及器官不同摆位误差的受量情况。**结果:**三维超声引导451个分次间摆位误差中,误差值最大为5.8 mm,最小为4.8 mm,三维方向摆位误差X轴方向 (-0.31 ± 2.50) mm、Y轴方向 (0.48 ± 2.39) mm和Z轴方向 (-0.12 ± 2.02) mm之间差异无统计学意义($P>0.05$)。四维实时超声引导45个分次内的前列腺摆位误差最小值为0.1 mm,三维方向摆位误差最大值分别为2.8 mm(右)、2.6 mm(左)、3.2 mm(脚)、2.4 mm(头)、1.9 mm(后)和1.6 mm(前),三维方向摆位误差平均值分别为1.2 mm(右)、1.1 mm(左)、1.6 mm(脚)、1.2 mm(头)、1.2 mm(后)和1.5 mm(前)。统计发现,摆位误差X轴方向 (0.21 ± 2.30) mm、Y轴方向 (-0.36 ± 2.15) mm和Z轴方向 (-0.18 ± 2.07) mm之间差异无统计学意义($P>0.05$)。三维方向摆位偏移不同的距离,偏移3 mm以上对靶区剂量覆盖影响显著,偏移2 mm以上对计划的 γ 通过率3 mm/3%影响显著,通过率均低于95%。头脚方向偏移对膀胱、盆骨剂量影响较显著,前后方向对直肠剂量影响较显著,阴茎受量在三维方向上并无显著性差异($P>0.05$)。**结论:**通过分析前列腺癌超声引导放疗靶区和危及器官受照剂量情况,3 mm以内的前列腺移动不管是在靶区处方剂量覆盖还是危及器官受量方面,统计差异较小。偏移超过3 mm后,靶区处方剂量覆盖显著降低,危及器官受量有显著差异,此项研究为临床医生靶区外扩提供一定的参考意义。

【关键词】前列腺癌;放射治疗;超声引导;剂量学

【中图分类号】R318;R815

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2026)02-0155-07

Dosimetric analysis of ultrasound-guided radiotherapy for prostate cancer

CHENG Jianqiang, LI Fengju, ZHAO Fengju, NIU Ruijun, WEI Xiyi, TAO Na, JIA Huailin, LU Yaqiong, ZHANG Chunlin, DONG Fang
Department of Radiation Oncology, Gansu Provincial Cancer Hospital, Lanzhou 730050, China;

Abstract: Objective To analyze the differences in irradiation doses delivered to target areas and organs-at-risk (OAR) during interfraction and intrafraction treatments of ultrasound-guided radiotherapy for prostate cancer. **Methods** A retrospective analysis was conducted on 36 prostate cancer patients admitted to Department of Radiation Oncology, Gansu Provincial Cancer Hospital from 2020 to 2024. According to ultrasound guidance modalities, they were divided into interfraction guidance with three-dimensional ultrasound and intrafraction guidance with four-dimensional real-time ultrasound. The doses received by target areas and OAR were analyzed in relation to different setup errors. **Results** The maximum and minimum setup errors in 451 interfractions guided by three-dimensional ultrasound were 5.8 mm and 4.8 mm, respectively, and the setup errors along the X-, Y-, and Z-axes were (-0.31 ± 2.50) , (0.48 ± 2.39) , and (-0.12 ± 2.02) mm, respectively, without significant inter-axis differences ($P>0.05$). The minimum prostate setup error in the 45 intrafractions guided by four-dimensional real-time ultrasound was 0.1 mm. In terms of three-dimensional setup errors, the maximum values were 2.8 mm (Right), 2.6 mm (Left), 3.2 mm (Inferior), 2.4 mm (Superior), 1.9 mm (Posterior), and 1.6 mm (Anterior), respectively; while the average values were 1.2 mm (Right), 1.1 mm (Left), 1.6 mm (Inferior), 1.2 mm (Superior), 1.2 mm (Posterior), and 1.5 mm (Anterior), respectively. The setup errors along the X-, Y-, and Z-axes were (0.21 ± 2.30) , (-0.36 ± 2.15) , and (-0.18 ± 2.07) mm, respectively, without significant inter-axis differences ($P>0.05$). For varying three-dimensional displacements, displacements exceeding 3 mm significantly affected the dose coverage of the target areas, whereas displacements over 2 mm exerted a remarkable effect on the gamma passing rate 3 mm/3% of the treatment plan, with

【收稿日期】2025-03-21

【基金项目】甘肃省科技计划项目(24JRRA1151);甘肃省卫生行业科研计划(GSWSKY2022-18)

【作者简介】成坚强,硕士,工程师,研究方向:放射物理,E-mail: chengjqzlyy@163.com

【通信作者】董方,主任医师,研究方向:放射治疗,E-mail: dfpaulinekeyan@163.com

passing rates below 95%. The head-foot directional deviations had a significant effect on the irradiation doses delivered to the bladder and pelvic bones, whereas the anterior-posterior directional deviations had a pronounced effect on the rectal dose. No significant difference was observed in the three-dimensional penis dose. **Conclusion** The analysis of the radiation doses delivered to the target areas and OAR in ultrasound-guided radiotherapy for prostate cancer shows that prostate displacement within 3 mm rarely affects the prescription dose coverage in the target area and the exposure to the OAR, while the displacement exceeding 3 mm results in significant reduction in prescription dose coverage in the target areas, and statistically significant differences in radiation doses received by the OAR. This study provides certain reference significance for clinicians to determine the target area margins.

Keywords: prostate cancer; radiotherapy; ultrasound-guided; dosimetry

前言

放射治疗是治疗肿瘤的手段之一,影像的获取在放射治疗计划和放疗管理中扮演着关键角色^[1]。有许多能引起治疗偏差的因素,依据不同的验证和修正方法,放疗偏差可以分为分次间和分次内,分次间的不确定性包括危及器官(OARs)的充盈状态,分次内的运动包括呼吸、心跳和胃肠蠕动等。目前,大多数的直线加速器都配置机载影像验证系统,包括二维探测器或者三维的CBCT,不足之处是扫描过程会对患者产生额外的电离辐射并且图像对比度较差。目前,肿瘤放射治疗是前列腺癌的根治手段之一,并发症主要是放射性直肠炎和膀胱炎。为了降低并发症的发生率,利用SBRT技术治疗前列腺癌已成为主流趋势^[2-5]。SBRT治疗前列腺癌,单次剂量大,治疗时间长。因此,分次内放疗前列腺的运动可能会导致靶区欠量或者OARs受量超量。研究表明,患者排气、肛门收缩、呼吸运动以及不自主运动均可引起靶区位置的变化^[6]。因此,实时监测前列腺癌分次内运动、及时干预和修正靶区位置对于前列腺癌的精准放疗起着关键作用。本文就前列腺癌患者利用超声引导进行放射治疗展开剂量学研究,探讨超声引导在前列腺癌放疗中发挥的作用。

1 资料与方法

1.1 病例资料

回顾性分析2020年10月~2024年9月期间甘肃省肿瘤医院放疗科收治的前列腺癌放疗患者36例,年龄56~78岁,中位年龄62岁。患者病理分期根据NCCN分期指南,局限期低危患者17例,局限期中危患者19例,病理类型主要为腺癌。以上患者均实施外照射调强放疗,其中5例SBRT患者应用经会阴四维实时超声图像引导(Transperineal Ultrasound, TPUS)技术,放疗剂量为45 Gy/9次,评估前列腺癌放疗中分次内的运动。其余31例为常规分割模式,放疗剂量为50~70 Gy/25~28次,采用超声引导技术进

行辅助摆位,收集超声引导分次间的摆位数据。伦理审批编号:A202207010048;A202412060100。

1.2 影像数据获取

本研究中,患者CT扫描前,饮用500 mL水,0.5 h后行CT模拟定位,以便充盈膀胱,患者定位之前嘱咐其排空直肠。采用Philips Brilliance CT BigBore大孔径CT模拟定位机进行定位,患者采取仰卧位,平躺于超声专用体架上,双腿置于体架上,制作模具固定。利用超声探头采集超声影像,手动调整探头的高度和角度,直到获得清晰的前列腺及周围器官的结构图像,固定探头,记录探头位置的相关数据。调节CT扫描床至预设等中心位置,做铅点标记,记录床板对线数值,获取超声图像,待超声图像获取完毕后,进行CT扫描。

1.3 靶区勾画

临床医生根据欧洲放射治疗协会(GEC-ESTRO)的推荐标准进行计划靶区以及OARs的勾画,CT扫描图像和超声图像通过放疗网络传送至AFC工作站,在两套图像坐标一致的情况下,经行CT图像和超声图像的粗配准,粗配准依据CT定位空间三维坐标数据,然后根据影像重合程度,高年资医师通过调整三维坐标数据进行局部精细配准。配准完毕后,医生在超声图像上经行前列腺靶区临床靶区(GTV)的勾画,结束后将图像传送至Monaco计划系统,然后进行OARs勾画。OARs勾画包括直肠、膀胱、盆骨和股骨头等,靶区处方剂量和OARs剂量根据指南规范给量。

1.4 计划设计

使用医科达Monaco 5.11计划系统进行计划设计,采用容积旋转调强放射治疗(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT),采用6 MV X射线,计划采用一个射野两个全弧的计划方案。根据指南规范,在确保靶区剂量覆盖度的前提下,尽可能保护OARs,以减少正常组织并发症的发生率。计划设计完毕,传输至网络系统,对计划进行验证,待计划验证通过后,在直线加速器上执行超声引导治疗。

1.5 治疗实施

每次治疗实施前,对超声影像采集系统进行QA,确保X、Y、Z三维方向坐标轴和激光线偏差不超过1 mm。校准完毕后,超声引导系统将加速器等中心点作为参考点,以加速器治疗坐标为参考,检测前列腺靶区在X、Y、Z三维方向的位置偏差。采用医科达Infinity加速器进行治疗,治疗前使用超声引导修正摆位误差,治疗中使用医科达Infinity加速器配套的Clarity超声引导系统实时监测前列腺的运动轨迹,三维方向的容差值均设置为3 mm,持续时间为5 s。在此过程中,Clarity超声引导系统实时监测前列腺靶区位置,将实时影像与CT定位影像进行融合配准,

计算当前时刻前列腺位置与定位时的位置偏差,作为放疗中前列腺靶区的位置偏移量。

1.6 统计学方法

采用SPSS 26.0进行统计学分析,确认数据样本符合正态分布后,计量数据以均数±标准差表示,采用独立样本 t 检验, $P<0.05$ 为差异有统计学意义,利用Origin 8制作图表。

2 结果

分别采集超声和CT图像,然后将二者融合后勾画靶区和OARs,见图1。

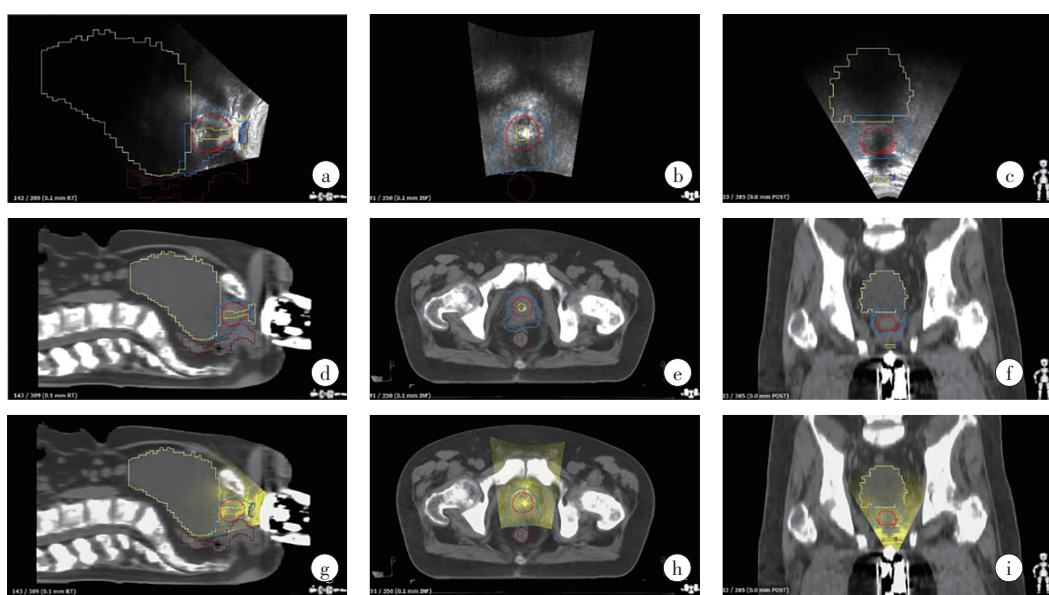


图1 超声与CT图像融合勾画靶区和OARs

Figure 1 Target area and organs-at-risk delineated in ultrasound images fused with CT images

图1a~c是矢状面、冠状面和横断面超声影像;图1d~f是矢状面、冠状面和横断面CT影像;图1g~i是矢状面、冠状面和横断面超声和CT融合配准后的影像

图2统计31例常规分割模式前列腺癌患者451个分次间的摆位误差情况。其中,床左移最大位移为5.6 mm,床右移最大位移为5.2 mm;进床最大位移为5.8 mm,出床最大位移为5.1 mm;升床最大位移为4.8 mm,降床最大位移为5.3 mm。统计发现,摆位误差X轴方向(-0.31 ± 2.50) mm、Y轴方向(0.48 ± 2.39) mm和Z轴方向(-0.12 ± 2.02) mm之间差异无统计学意义($P>0.05$)。

表1统计5例前列腺癌患者45个分次内的摆位误差情况。各分次内前列腺位移最小值为0.1 mm,统计发现,摆位误差X轴方向(0.21 ± 2.30) mm、Y轴方向(-0.36 ± 2.15) mm和Z轴方向(-0.18 ± 2.07) mm之间差异无统计学意义($P>0.05$)。

图3统计36例超声引导前列腺癌放疗中,三维方向摆位偏移不同距离时4种OARs受量的差异统计结果。图3a~c统计膀胱 D_{2cc} 在三维方向摆位偏移不同距离的剂量差异。图3a、c图结果显示,左右、前后计划偏移不同距离,膀胱 D_{2cc} 剂量在不同偏移量中无统计学差异。图3b结果显示,向头移动3 mm(S-3)、4 mm(S-4)和5 mm(S-5),膀胱 D_{2cc} 受照射剂量均显著高于初始计划(Origin),两组差异有统计学意义。向脚移动4 mm(I-4)和5 mm(I-5),膀胱 D_{2cc} 受照射剂量有降低的趋势。图3d~f统计直肠 D_{2cc} 在三维方向摆位偏移不同距离的剂量差异。图3d、e结果显示,左右、头脚计划移动不同距离时,直肠 D_{2cc} 剂量差异无统计学意义($P>0.05$)。图3f显示,向前移动4 mm

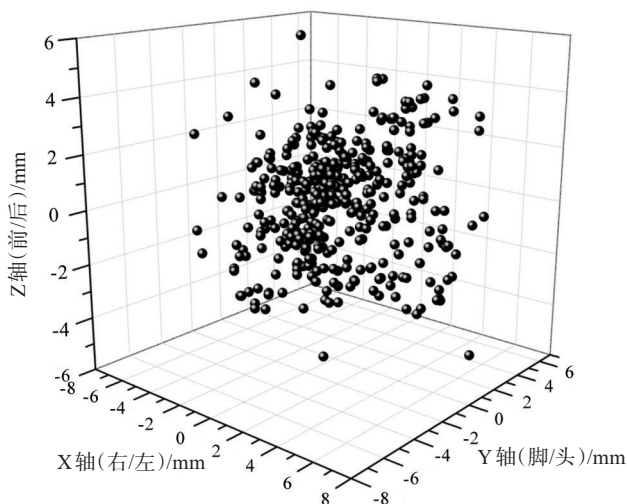


图2 31例前列腺癌患者451个分次间位移比较
Figure 2 Comparison of 451 interfractional displacements in 31 patients with prostate cancer

表1 5例前列腺癌患者45个分次内位移比较(mm)
Table 1 Comparison of 45 intrafractional displacements in 5 patients with prostate cancer (mm)

位移	右	左	脚	头	后	前
最大值	2.8	2.6	3.2	2.4	1.9	1.6
最小值	0.1	0.3	0.2	0.5	0.2	0.4
平均值	1.2	1.1	1.6	1.2	1.2	1.5
中位值	0.9	1.0	1.6	1.1	1.2	1.3

(A-4)和5 mm(A-5),直肠 D_{2cc} 受照射剂量均低于初始计划(Origin)。向后移动5 mm(P-5),直肠 D_{2cc} 受照射剂量高于初始计划(Origin),两组差异有统计学意义($P < 0.05$)。图3g~i统计阴茎 D_{2cc} 在三维方向摆位偏移不同距离的剂量差异。左右、头脚和前后计划移动不同距离,阴茎 D_{2cc} 剂量无统计学差异。头向移动时,随着移动距离的增加,阴茎 D_{2cc} 剂量有降低的趋势,脚向移动时,随着移动距离的增加,阴茎 D_{2cc} 剂量有升高的趋势。图3j~l统计盆骨 D_{2cc} 在三维方向摆位偏移不同距离的剂量差异。左右、前后移动不同距离,盆骨 D_{2cc} 剂量无统计学差异。图3k结果显示,头向移动不同距离,盆骨 D_{2cc} 剂量无统计学差异,但有降低的趋势。脚向移动3 mm(I-3)、4 mm(I-4)和5 mm(I-5),盆骨 D_{2cc} 受照射剂量均高于初始计划(Origin),两组差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图4统计超声引导前列腺癌放疗中,三维方向摆位偏移不同距离靶区处方剂量覆盖度差异统计结果。结果显示,随着偏移距离的增加,靶区处方剂量覆盖度均呈现下降的趋势。其中,向前方向偏移对

靶区剂量覆盖度影响最大,向前偏移5 mm,靶区覆盖度由原来的96.5%降至82%。向左方向偏移对靶区剂量覆盖度影响最小,向左偏移5 mm,靶区覆盖度由原来的96.5%降至91%。各个方向上偏移1 mm,靶区覆盖度均有所下降,但差异没有统计学意义。各个方向上偏移3 mm及以上,靶区覆盖度均明显下降,除了向后方向外,其余方向靶区覆盖度均低于95%。

图5统计超声引导前列腺癌放疗中,三维方向摆位偏移不同距离时计划 γ 通过率差异统计结果。图5统计三维方向计划偏移不同距离的 γ 通过率。图5a,b图结果显示,向左和向右移动1 mm,向头和向脚移动1 mm,初始计划(Origin)组和偏移计划组的 γ 通过率差异无统计学意义,向右移动2 mm,左右和头脚各移动3、4和5 mm,计划通过率逐渐降低,与初始计划(Origin)组比,偏移计划组差异具有统计学意义($P < 0.05$),最低通过率可降至25%。图5c图结果显示,向前和向后移动1 mm,向后移动2 mm,原计划组和偏移计划组的 γ 通过率无统计学差异($P > 0.05$)。向前偏移2、3、4和5 mm计划的通过率逐渐降低,与初始计划(Origin)组比,偏移计划组差异具统计学意义($P < 0.05$)。向后偏移3、4和5 mm计划的通过率逐渐降低,与初始计划(Origin)组相比,偏移计划组差异有统计学意义($P < 0.05$)。

3 讨论

目前二维X线透视、电磁导航、光学体表和图像引导放射治疗(IGRT)是现代放射治疗技术准确实施的重要依据。使用皮肤标记或骨骼解剖定位前列腺放疗可能足以提供相对均匀的全盆腔放疗剂量,但当使用缩小边缘、剂量递增或SBRT放疗时,这些标记往往不可靠^[7]。与X射线定位相比,植入型的四维电磁导航定位器具有较高的定位精度,但给患者带来了额外的创伤和辐射^[8]。且有研究报道,95%的植入金标或电磁导航粒子在植入后会发生5 mm内的移动^[9]。此外,值得注意的是,植入金标或电磁导航粒子发生移动后,前列腺癌靶区的位置确认会变得比较困难。有创技术无法直接获取前列腺组织信息,限制了其在前列腺癌放疗中的应用。经会阴超声(Trans-Perineal UltraSound, TPUS)实时追踪系统提供一种分次内靶区运动的监测方法。其软组织分辨率较高,非侵入性,无需任何额外的电离辐射和剂量暴露,易被患者接受并开展临床应用^[10-11]。研究表明,在局部麻醉下进行的徒手超声引导下的经会阴穿刺活检技术,该技术准确性高,患者舒适,不良事件低,最大限度地减少对一次性材料的需求^[12]。本

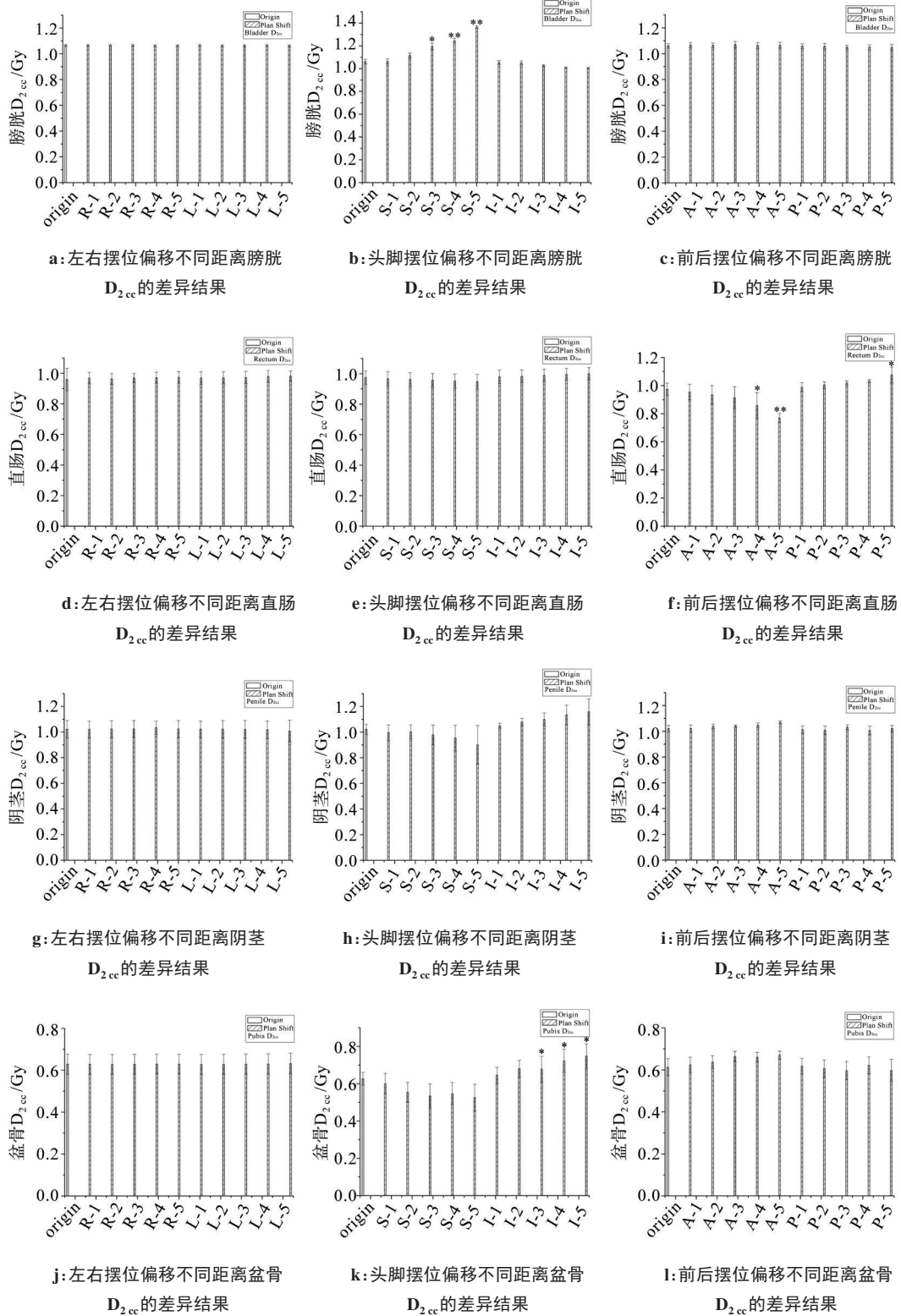


图3 三维方向摆位偏移不同距离4种危及器官受照剂量差异分析

Figure 3 Analysis of dose difference of 4 organs-at-risk with different three-dimensional setup errors

*代表P<0.05,**代表P<0.01;origin表示原始计划,L-1~L-5表示向左偏移1~5 mm距离,R-1~R-5表示向右偏移1~5 mm距离,S-1~S-5表示头向偏移1~5 mm距离,I-1~I-5表示脚向偏移1~5 mm距离,A-1~A-5表示向前偏移1~5 mm距离,P-1~P-5表示向后偏移1~5 mm距离

研究采用医科达Clarity超声系统,利用TPUS技术监测前列腺癌放疗中分次内的运动,统计前列腺的运动误差,评估这一技术在前列腺放疗分次内运动的

安全性和有效性。

本研究发现,分次间超声引导摆位误差头脚方向大于左右和前后方向,分次内前列腺位移动头脚方

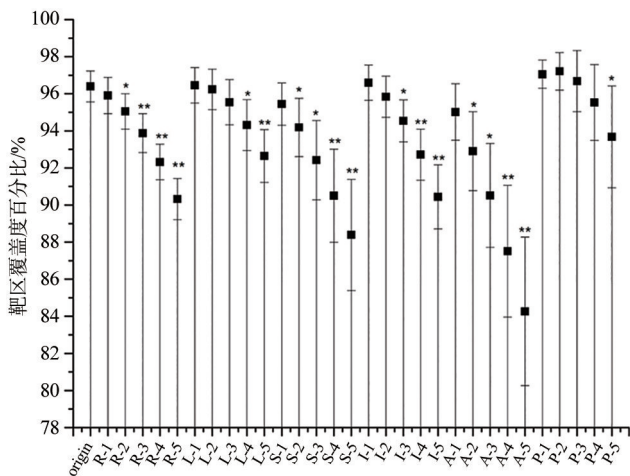


图4 三维方向摆位偏移不同距离靶区剂量覆盖度差异分析
Figure 4 Analysis of dose coverage in target areas with different three-dimensional setup errors

*代表 $P < 0.05$, **代表 $P < 0.01$

向大于左右和前后方向。本研究中,分次间最大位移为 5.8 mm,分次内最大位移为 3.2 mm,此研究结果位移值偏小于以往研究^[13-14],这可能和病人治疗时长有关。本研究中患者均采用 VMAT 技术进行剂量照射,出束时间在 3 min 左右,而采用 IMRT 技术进行照射,出束时间在 6 min 左右。随着治疗时间的延长,患者不自主运动频率明显增大,前列腺运动位移更大,治疗风险更高。

本研究结果显示,当计划在三维方向偏移 3 mm 以内时,处方剂量能覆盖 90% 以上的靶区,质控计划位移 1 mm 时,γ 通过率均可保持 95% 以上。分次内前列腺位移大都在 3 mm 以内,这就表明 3 mm 外放边界可以克服治疗过程中靶区移动带来的剂量偏差,这与常规外放 5 mm 边界相比,在保证靶区剂量的同时,将较少的正常组织引入照射区域,可有望降

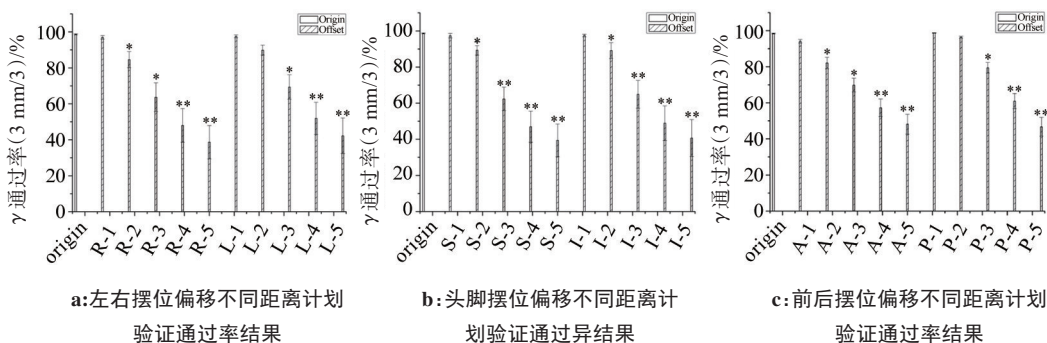


图5 三维方向摆位偏移不同距离γ通过率差异分析
Figure 5 Analysis of gamma passing rate with different three-dimensional setup errors

*代表 $P < 0.05$, **代表 $P < 0.01$

低患者放疗不良反应的发生率。摆位在三维方向分别偏移 1、2、3、4 和 5 mm 时,膀胱受照剂量原计划组和偏移计划组相比在头脚方向显示出了差异性,头向移动时,膀胱 D_{2cc} 剂量逐渐增加,脚向移动时,膀胱 D_{2cc} 剂量逐渐减小,这与前列腺和膀胱的解剖关系相一致。同样的,直肠受照剂量原计划组和偏移计划组相比在前后方向显示出了差异性,向前移动时直肠 D_{2cc} 剂量逐渐减小,向后移动时,直肠 D_{2cc} 剂量逐渐增大。阴茎受照剂量在三维方向上 D_{2cc} 剂量无显著性差异,这可能与阴茎和前列腺位置相距较远有关。盆骨受照剂量在向脚方向上原计划组和偏移计划组有统计学差异,向脚移动时,盆骨 D_{2cc} 剂量逐渐增加,这与前列腺和盆骨的解剖关系相一致。此研究结果表明,前列腺靶区较小的运动可导致靶区处方剂量显著降低。2 mm 位移就可使靶区处方剂量覆盖度降至 95% 以下,也可使危及器官剂量显著升高或降低。

此外有研究结果报道,超声引导下 VMAT 对宫颈癌患者的短期和长期治疗效果良好。它还导致血清 CEA、SCC-Ag 和 CA724 水平的改善,以及直肠和膀胱平均辐射剂量的降低^[15]。在近距离插植放疗中,超声引导也发挥着关键作用^[16]。超声引导可构建 3D 模型,这为近距离插植模板的设计提供了极大的可能性^[17]。与核磁引导前列腺癌放射治疗相比,超声引导在没有核磁引导的条件时展示出了良好的效果^[18]。研究显示,与每周一次的 IGRT 相比,每日 IGRT 可能会给前列腺癌患者带来更大的获益。IGRT 与肿瘤生化控制的改善以及急性毒性的降低相关,但没有显著性差异^[19]。这说明利用 CBCT 进行前列腺放疗引导,可能与成像质量有关。研究表明,超声影像在前列腺癌放疗中靶区的勾画和摆位中发挥着关键的作用^[20]。在 HRD 后装放疗中,超声引导前列腺癌插植治疗可使患者获益^[21]。辅助结构的植入

为超声引导放疗的发展提供一种全新的方法^[22]。在随机临床试验中,与CT引导相比,MRI引导下的局限性前列腺癌SBRT显著降低了急性毒副反应^[23]。超声引导的局限性前列腺癌SBRT是否也能显著降低急性毒副反应,值得深究。

经TPUS技术采用自动超声扫描探头,可以无创提供清晰的前列腺、膀胱、直肠等软组织信息,在前列腺放疗中的应用越来越广泛。有研究表明,经TPUS技术采用高频超声扫描,提供了高分辨率的图像,可作为前列腺癌放疗的图像引导方式^[24-25]。以往研究报道,在前列腺癌大分割放射治疗中,如果没有修正运动误差,10%的患者肿瘤接受剂量不满足处方要求,可能会导致治疗失败^[26]。因此,前列腺癌分次放射治疗中,监测和修正靶区位移十分重要。前列腺癌放疗中,超声引导可显著降低患者的毒副反应,生活质量评分表明耐受性良好,多数毒副反应可在3个月内缓解^[27]。

4 结论

在前列腺癌放疗中,超声引导可以最大限度减少分次内误差,实时监控肿瘤靶区运动情况,有效提高分次间摆位重复性,保证照射精准度。超声引导系统作为一种安全、可靠的监测和修正前列腺运动系统,可在较小的肿瘤外放边界下防止肿瘤靶区漏照或正常组织接受超量照射,增加肿瘤控制的概率,降低正常组织并发症的发生率。

【参考文献】

- [1] Nolden M, Zelzer S, Seitel A, et al. The medical imaging interaction toolkit: challenges and advances: 10 years of open-source development [J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2013, 8(4): 607-620.
- [2] Seitz PK, Baumann B, Johnen W, et al. Development of a robot-assisted ultrasound-guided radiation therapy (USgRT) [J]. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2020, 15(3): 491-501.
- [3] Sekhoacha M, Riet K, Motloung P, et al. Prostate cancer review: genetics, diagnosis, treatment options, and alternative approaches [J]. *Molecules*, 2022, 27(17): 5730.
- [4] Tong X, Chen XM, Li JS, et al. Intrafractional prostate motion during external beam radiotherapy monitored by a real-time target localization system [J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2015, 16(2): 5013.
- [5] Fargier-Voiron M, Presles B, Pommier P, et al. Ultrasound versus cone-beam CT image-guided radiotherapy for prostate and post-prostatectomy pretreatment localization [J]. *Phys Med*, 2015, 31(8): 997-1004.
- [6] Hsu A, Miller NR, Evans PM, et al. Feasibility of using ultrasound for real-time tracking during radiotherapy [J]. *Med Phys*, 2005, 32(6): 1500-1512.
- [7] O'Neill AG, Jain S, Hounsell AR, et al. Fiducial marker guided prostate radiotherapy: a review [J]. *Br J Radiol*, 2016, 89(1068): 20160296.
- [8] Willoughby TR, Kupelian PA, Pouliot J, et al. Target localization and real-time tracking using the Calypso 4D localization system in patients with localized prostate cancer [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2006, 65(2): 528-534.

- [9] Tanyi JA, He TM, Summers PA, et al. Assessment of planning target volume margins for intensity-modulated radiotherapy of the prostate gland: role of daily inter- and intrafraction motion [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2010, 78(5): 1579-1585.
- [10] Sihono DS, Ehmann M, Heitmann S, et al. Determination of intrafraction prostate motion during external beam radiation therapy with a transperineal 4-dimensional ultrasound real-time tracking system [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2018, 101(1): 136-143.
- [11] 亓昕, 赵波, 秦尚彬, 等. 经会阴实时超声图像引导技术在前列腺癌放疗中应用 [J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2018, 27(7): 675-679.
Qi X, Zhao B, Qin SB, et al. Application of real-time transperineal ultrasound in radiotherapy of prostate cancer-4D analysis of intrafractional prostate motion [J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2018, 27(7): 675-679.
- [12] Ashouri R, Nguyen B, Archer J, et al. Micro-ultrasound guided transperineal prostate biopsy: a clinic-based procedure [J]. *J Vis Exp*, 2023(192): e64772.
- [13] Richardson AK, Jacobs P. Intrafraction monitoring of prostate motion during radiotherapy using the Clarity® Autoscan Transperineal Ultrasound (TPUS) system [J]. *Radiography (Lond)*, 2017, 23(4): 310-313.
- [14] Dang A, Kupelian PA, Cao MS, et al. Image-guided radiotherapy for prostate cancer [J]. *Transl Androl Urol*, 2018, 7(3): 308-320.
- [15] Li CX, Li J, Lu Y, et al. Observations of the effectiveness, dosage, and prognosis of intensity-modulated radiation therapy under ultrasonic guidance for cervical cancer patients [J]. *Technol Health Care*, 2024, 32(6): 4857-4868.
- [16] Yang XJ, Li C, Li Z, et al. The clinical value of ultrasound-guided sacral anesthesia in Intracavitary and/or interstitial brachytherapy for cervical Cancer [J]. *Gynecol Oncol*, 2024, 191: 31-36.
- [17] Kawamoto T, Oshima M, Murakami N, et al. Development and promotion of a 3D-printed phantom model for ultrasound-guided caudal block followed by intracavitary/interstitial brachytherapy for gynecological cancer [J]. *Brachytherapy*, 2024, 23(5): 590-594.
- [18] Alabousi M, Ghai S. Magnetic resonance imaging-guided ultrasound ablation for prostate cancer—a contemporary review of performance [J]. *Front Oncol*, 2023, 12: 1069518.
- [19] Wang SL, Tang W, Luo HL, et al. The role of image-guided radiotherapy in prostate cancer: a systematic review and meta-analysis [J]. *Clin Transl Radiat Oncol*, 2023, 38: 81-89.
- [20] Peignaux K, Créhange G, Truc G, et al. High precision radiotherapy with ultrasonic imaging guidance [J]. *Cancer Radiother*, 2006, 10(5): 231-234.
- [21] Salari K, Hazy AJ, Ye H, et al. 21 Gy single fraction prostate HDR brachytherapy: 5-year results of a single institution prospective pilot study [J]. *Brachytherapy*, 2024, 23(3): 321-328.
- [22] Feng ZW, Sun E, China D, et al. Enhancing image-guided radiation therapy for pancreatic cancer: utilizing aligned peak response beamforming in flexible array transducers [J]. *Cancers (Basel)*, 2024, 16(7): 1244.
- [23] Kishan AU, Ma TM, Lamb JM, et al. Magnetic resonance imaging-guided vs computed tomography-guided stereotactic body radiotherapy for prostate cancer: the MIRAGE randomized clinical trial [J]. *JAMA Oncol*, 2023, 9(3): 365-373.
- [24] O'Shea T, Bamber J, Fontanarosa D, et al. Review of ultrasound image guidance in external beam radiotherapy part II: intra-fraction motion management and novel applications [J]. *Phys Med Biol*, 2016, 61(8): R90-R137.
- [25] Xing L, Thorndyke B, Schreiber E, et al. Overview of image-guided radiation therapy [J]. *Med Dosim*, 2006, 31(2): 91-112.
- [26] Lovelock DM, Messineo AP, Cox BW, et al. Continuous monitoring and intrafraction target position correction during treatment improves target coverage for patients undergoing SBRT prostate therapy [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2015, 91(3): 588-594.
- [27] Ma J, Rogowski P, Trapp C, et al. Physician reported toxicities and patient reported quality of life of transperineal ultrasound-guided radiotherapy of prostate cancer [J]. *Clin Transl Radiat Oncol*, 2024, 49: 100868.

(编辑:薛泽玲)