·临床研究·

体位固定辅助装置优化在直肠癌仰卧位容积旋转调强放疗中的应用价值

刘现珍 岳海振 李俊禹 率胜胜 任国超 王海涛 陈文奇 周舜*

（北京大学肿瘤医院放疗科，北京 100142）

【摘要】 目的 探讨“固定头枕”联合“去膝垫”简化体位固定方案对直肠癌仰卧位容积旋转调强放疗（volumetric modulated arc therapy, VMAT）摆位精度的优化作用，以及对计划靶区（planning target volume, PTV）外扩边界的收窄效益。**方法** 回顾性选取2020年12月至2025年12月在我院接受盆腔VMAT的直肠癌患者53例，根据体位固定辅助装置的不同划分为3组：A组（n=15）采用“非固定头枕+膝垫”固定方案；B组（n=18）采用“固定头枕+膝垫”固定方案；C组（n=20）采用“固定头枕+去膝垫”固定方案。共获取159分次摆位锥形束计算机断层扫描（cone-beam computed tomography, CBCT）数据，收集6个轴向[升降平移（Vrt）、进出平移（Lng）、左右平移（Lat）、进出倾斜（Pitch）、左右转动（Roll）、旋转偏航（Rtn）]的摆位误差，采用单因素方差分析（ANOVA）比较3组患者的个体系统误差m_i，采用非参数Mann-Whitney U检验比较3组的个体随机误差σ_i。以平移绝对值>5.00 mm或旋转绝对值>2.00°作为摆位异常的判定标准，通过卡方检验分析异常摆位的发生率，利用外扩边界经典公式Margin=2.5Σ+0.7σ计算3个平移轴向上的外扩边界。**结果** 单因素方差分析显示，3组患者的个体系统误差在Vrt轴向（F=15.89，P<0.01）和Roll轴向（F=3.87，P=0.03）上的差异有统计学意义，C组的个体系统误差均值最逼近零位（Vrt轴向为–0.28 mm，Roll轴向为0.01°）。在群体系统误差Σ方面，C组在Lng轴向（C组1.14 mm *vs.* A组1.79 mm *vs.*B组1.98 mm）和Lat轴向（C组1.43 mm *vs.* A组1.54 mm *vs.*B组2.84 mm）的离散度显著低于A、B两组。非参数Mann-Whitney U检验显示，C组在Pitch轴向上的个体随机误差明显低于A组（Z=–2.47，P=0.01），B组与其他两组无统计学差异。异常摆位分析显示，C组的异常摆位发生率仅为3.33%，显著低于A组的31.11%和B组的22.22%（χ^2=14.87，P<0.01）。在外扩边界方面，C组在Vrt、Lng、Lat轴向上的外扩边界分别收窄至3.58 mm、5.65 mm和6.47 mm，最高比A组收窄了35.50%。**结论** 直肠癌仰卧位VMAT中，采用“固定头枕且去除膝垫”的简化体位固定方案可通过稳定脊柱动力链与触发膝关节“旋锁”锁定机制，显著提高摆位几何重复性，有效收窄PTV外扩边界并保护危及器官，推荐作为盆腔放疗的标准化方案。

【关键词】 直肠癌；容积旋转调强放疗；体位固定装置；摆位精度；锥形束计算机断层扫描；摆位误差

【中图分类号】 R73；R81 **【文献标识码】** A **【DOI】** 10.11876/mimt202604011

Clinical value of optimizing immobilization auxiliary devices in volumetric modulated arc therapy for rectal cancer in the supine position

*Liu Xianzhen, Yue Haizhen, Li Junyu, Shuai Shengsheng, Ren Guochao, Wang Haitao, Chen Wenqi, Zhou Shun**

(Department of Radiotherapy, Peking University Cancer Hospital, Beijing 100142, China)

【Abstract】 Objective To evaluate the clinical efficacy of an optimized pelvic immobilization protocol—combining a locked headrest with knee wedge removal—on setup accuracy and planning target volume (PTV) margins in rectal cancer patients

收稿日期：2026-08-06

基金项目：国家重点研发计划（2023YFF0613501）；北京市自然科学基金资助项目（1202009）

第一作者：刘现珍，女，本科，主管治疗师，研究方向：盆腔精确放疗摆位技术与质量保证

通信作者：周舜，男，硕士研究生，高级工程师，研究方向：放疗流程管理与质控

undergoing VMAT in the supine position. **Methods** We retrospectively analyzed 159 fractions of cone-beam CT (CBCT) registration data from 53 patients with rectal cancer treated with pelvic volumetric modulated arc therapy (VMAT) between December 2020 and December 2025. Patients were assigned to three cohorts: Group A (n=15) used the "non-fixed headrest + knee wedge" fixation scheme; Group B (n=18) used the "locked headrest + knee wedge" fixation scheme; Group C (n=20) used the "locked headrest + knee wedge removed" fixation scheme. Six-dimensional(Vrt, Lng, Lat, Pitch, Roll, Rtn) setup errors were collected. One-way ANOVA with LSD post-hoc tests and Mann-Whitney U tests were employed to compare individual systematic errors and random errors among the groups. Abnormal setup was defined as any linear shift >5.00 mm or rotation >2.00°. PTV margins in three translational directions were determined using the van Herk formula (Margin = 2.5Σ + 0.7σ). **Results** One-way ANOVA revealed significant differences in systematic Vrt (F = 15.89, P<0.01) and Roll (F = 3.87, P = 0.03) bias among the three groups with Group C demonstrating systematic means closest to the absolute zero center (Vrt: −0.28 mm, Roll: 0.01°). Group C achieved the lowest group systematic error (Σ) in Lng (1.14 mm *vs.* 1.79 mm in Group A and 1.98 mm in Group B) and Lat directions (1.43 mm *vs*. 1.54 mm in Group A and 2.84 mm in Group B). For random errors, Group C achieved significantly smaller Pitch rotational variation compared to Group A (Z =−2.47, P = 0.01). The abnormal setup rate in Group C was 3.33%, significantly lower than 31.11% in Group A and 22.22% in Group B (χ^2= 14.87, P<0.01). PTV margins for Group C in the Vrt, Lng, and Lat directions were safely contracted to 3.58 mm, 5.65 mm, and 6.47 mm, respectively, with the maximum narrowing of 35.50% compared to Group A. **Conclusion** The optimized pelvic immobilization protocol utilizing a locked headrest and removing the knee wedge significantly enhances the geometric reproducibility of VMAT setups for rectal cancer by stabilizing the spinal kinetic chain and engaging the knee screwing-home mechanism. This cost-free approach effectively compresses PTV margins and enhances organ-at-risk (OAR) sparing, making it highly recommended as a standardized protocol for supine pelvic radiotherapy.

【Key words】 Rectal cancer; Volumetric modulated arc therapy; Immobilization device; Setup accuracy; Cone-beam computed tomography; Setup error

容积旋转调强放疗（volumetric modulated arc therapy, VMAT）现已成为局部晚期直肠癌多学科综合治疗的核心手段，但其高度适形的陡峭剂量梯度对分次间摆位精度提出了极其严苛的要求[1-4]。直肠癌靶区邻近小肠、膀胱等对剂量敏感的空腔脏器，微小的平移或旋转偏差均可能导致靶区漏照或危及器官（organ at risk, OAR）超量受照[5-6]。虽然临床常规采用仰卧位盆部热塑膜固定，但腹部组织松弛与下肢活动度大常引入复位变异，而体位固定辅助装置的优化与量化质控长期被临床忽视[7]。

在盆腔肿瘤放疗固定中，下肢膝关节固定装置的应用存在较大争议。临床常用的硬质海绵膝垫不仅缺乏插槽索引化锁定，而且高频反复使用易发生塑性形变，导致分次间下肢屈曲度不一致，进而影响腹股沟体表标记线的稳定性，从而引入额外的系统误差[8-9]。同时，远端颈部头枕的固定状态对骨盆姿态的间接干预常被低估。根据全脊柱动力链（spinal kinetic chain）原理，颈部不自主移动引起的颈椎生理曲度变异会沿胸、腰椎向下传导，导致骨盆产生代偿性俯仰（Pitch）和横滚（Roll）旋转偏差[10-11]。目前，探讨固定头枕联合去除膝垫简化方案对盆腔放疗摆位精度及外扩边界（Margin）的协同优化效应的研究还鲜有报道[12]。

鉴于此，本研究通过回顾性分析，系统对比3种不同体位固定辅助装置方案，量化评估“固定头枕”联合“去膝垫”简化体位固定方案对直肠癌仰卧位VMAT患者个体系统误差、个体随机误差、异常摆位以及计划靶区（planning target volume, PTV）外扩边界的质控效果，旨在为建立标准化的盆腔放疗固定协议提供循证依据[13-14]。

1 资料与方法

1.1 研究对象

回顾性选取2020年12月至2025年12月在我院放疗科行盆腔VMAT的直肠癌患者53例。其中，男性37例，年龄59～70岁，中位年龄65岁；女性

16 例，年龄 55 ~ 68 岁，中位年龄 61 岁。采用控制变量实验设计，根据体位固定辅助装置的不同将 53 例患者划分为 3 组：A 组（n=15）采用“非固定头枕+膝垫”固定方案；B 组（n=18）采用“固定头枕+膝垫”固定方案；C 组（n=20）采用“固定头枕+去膝垫”固定方案。

纳入标准：①经病理确诊为直肠腺癌；②需行盆腔新辅助或辅助放疗（剂量为 1.8 Gy/f × 25 f，共计 45 Gy）；③无盆腔手术史或髋关节置换史。排除标准：①伴有严重颤抖、癫痫或精神障碍无法配合者；②体部皮肤破损无法承受盆膜挤压者。

本研究为回顾性数据分析，仅使用临床常规放射治疗过程中记录的离线图像配准与摆位误差数据，不涉及任何前瞻性干预或额外影像采集，不影响患者的临床治疗与预后。根据本院伦理委员会相关规定，本研究免除伦理审查、免除患者知情同意。所有患者个人隐私信息在数据分析前均已进行去标识化和脱敏处理。

1.2 仪器与设备

SOMATOM Sensation Open 型大孔径 CT 模拟定位机（德国 Siemens 公司）；LAP 三维外激光定位灯系统（德国 LAP 公司）；Varian Eclipse v15.6 计划系统及 Varian Unique 医用直线加速器（美国 Varian 公司，配备机载 OBI 影像系统）；Orfit 碳纤维一体化定位底板（比利时 Orfit 公司）及盆部热塑膜。

1.3 膜具制作与 CT 定位

定位前 1 小时嘱患者排空膀胱及肠道并饮水 500 mL，保持膀胱充盈一致性[9]。所有患者采用仰卧体位。A、B 组患者双膝下放置硬质海绵膝垫，双脚自然平放；C 组患者去除膝垫，双腿伸直平贴于体板。A 组患者头部放置常规 C 型头枕（不与体板插槽固定）；B、C 组患者头部放置 C 型头枕，根据患者身高调整位置，并将头枕通过自制固定器固定在定位板的卡槽内，见图 1。

加热热塑膜至软化，拉伸并锁紧盆膜扣，自然冷却成型。在膜具、患者耻骨联合前部及两侧等中心对应体表画出十字形标记线。行 CT 模拟定位扫描，扫描范围自 L_2 椎体上缘至股骨中段，层厚 3 mm。

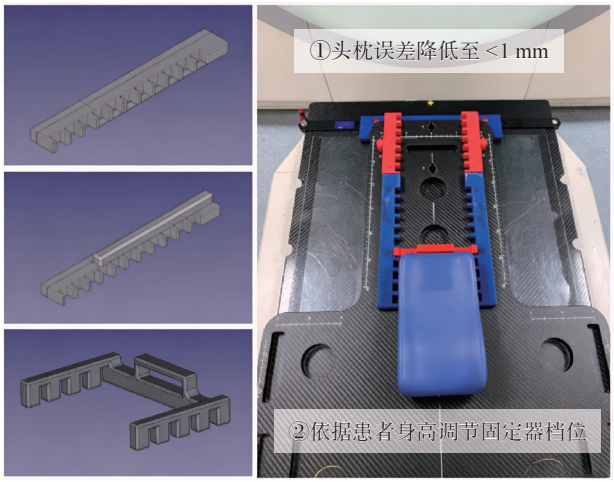


图 1 自制头枕固定器安装方式及安装精度

1.4 摆位流程与 CBCT 验证

患者每次放疗前均执行与定位时一致的充盈准备，即排空膀胱、肠道，饮水 500 mL，保持肠道充盈[15]。入治疗室后，仰卧于治疗床板上。治疗师将体表/膜具标记线与加速器室三维红外激光线对齐，扣紧盆部热塑膜。

前 3 次治疗前及后续每周 1 次治疗前执行锥形束计算机断层扫描（cone-beam computed tomography, CBCT）。本研究共采集 159 分次摆位 CBCT 数据，其中，A 组 45 分次，B 组 54 分次，C 组 60 分次。将扫描获取的三维重建断层图像与定位计划 CT 图像进行骨性自动配准，配准范围局限于盆腔骨性框架，并由医师和主管治疗师根据直肠靶区位置实施手工微调校对[16]。记录系统给出的 6 个轴向的摆位误差，包括：升降平移（Vrt）、进出平移（Lng）、左右平移（Lat）、进出倾斜（Pitch）、左右转动（Roll）、旋转偏航（Rtn）。配准完成后由系统联动床板自动纠正平移误差后行 VMAT 治疗。

1.5 观察指标

（1）个体系统误差分析：计算 53 例患者各自在 6 个轴向上的摆位误差平均值，即患者个体系统误差 m_i。各组内患者个体系统误差的标准偏差（standard deviation, SD）即定义为群体系统误差 Σ。

（2）个体随机误差分析：计算 53 例患者各自在 6 个轴向上的摆位误差标准差，即患者个体随机误差 σ_i。各组内患者个体随机误差的均方根（root

mean square, RMS）即定义为群体随机误差 σ。

（3）异常摆位（大偏差）发生率分析：本研究中心临床靶区（clinical target volume, CTV）至计划靶区（planning target volume, PTV）在Vrt、Lng、Lat轴向的外扩边界均设为5 mm，依据中心位置验证质控标准，以任意平移轴向误差绝对值 >5.00 mm 或任意旋转轴向误差绝对值 >2.00° 作为单次摆位异常即大偏差的判定标准，计算159 组分次摆位中异常摆位的发生率。

（4）PTV 外扩边界计算：群体系统误差 Σ 和群体随机误差 σ 在临床放疗中常被直接用于确定靶区外扩边界（Margin）。本研究采用 van Herk[5]提出的经典外扩边界计算公式 Margin = 2.5Σ + 0.7σ 计算 Vrt、Lng、Lat轴向的PTV外扩边界。

1.6 统计学方法

采用SPSS 26.0 软件对数据进行统计分析。经 Shapiro–Wilk 检验，符合正态分布的计量资料以均数 ± 标准差（$\bar{x} \pm s$）表示，不符合正态分布的计量资料以中位数（上四分位数，下四分位数）[$M(Q_1, Q_3)$]表示。个体系统误差组间比较采用单因素方差分析（ANOVA）检验，这与目前国内外多项盆腔放疗CBCT的研究及边界评估方法一致[17]，采用LSD 检验进行事后两两比较。效应量分析中，$0.06 < \eta^2 < 0.14$为中等效应（解释变异6% ~ 3.9%），表示组间存在中等程度的差异，具有明确的实践或临床意义；$\eta^2 \geqslant 0.14$为高等效应（解释变异6% ~ 14%），表示自变量对结果有很强的解释力，组间差异非常明显。个体随机误差组间比较采用非参数 Mann–Whitney *U* 检验。计数资料以例数（*n*）和百分率（%）表示，组间比较采用 *Fisher-Freeman-Halton* 精确卡方检验，两两比较采用 *Yates* 连续性修正卡方检验或 *Fisher* 精确概率法。以 $P<0.05$为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 患者个体系统误差的组间差异

计算3组患者各自在整个放疗疗程中的患者个体系统误差 m_1，其平均值代表体位固定辅助方案的系统性中心偏倚，其标准差即群体系统误差 Σ 则代表群体层面系统误差的离散度，见表1和图2。

（1）系统性中心偏倚的极佳控制

在平移维度上，C 组（固定头枕+去膝垫）在Lat轴向上的个体系统误差均值被压缩至–0.12 mm，极度逼近绝对零点，显著优于 A 组的 1.42 mm（$P=0.03$）；在 Vrt 轴向上，C 组的个体系统误差均值同样极小（–0.28 mm），显著低于A 组的 –1.20 mm（$P=0.02$）和B 组的0.98 mm（$P<0.01$）。在旋转维度上，C 组在Roll轴向上的个体系统误差均值几近于零（0.01°），显著优于A 组的–0.64°（$P=0.01$）；同时C 组在Pitch 轴向上的个体系统误差均值为0.08°，亦实现最佳零位逼近。

（2）群体系统误差 Σ 的极显著收缩

数据表明，C 组的群体系统误差 Σ 在几乎所有轴向上均为3组中最低。在Lat轴向上，C 组的群体系统误差 Σ 为1.43 mm，相比B 组的2.84 mm 实现了高达50%的降幅；在Lng 轴向上，C 组的群体系统误差 Σ 为1.14 mm，相较B 组的1.98 mm和A 组的1.79 mm分别降低了42.42%和36.31%，这为大幅收窄外扩边界打下了坚实的物理基础。

（3）统计学效应量分析（η^2评估）

ANOVA 效应量分析显示，Vrt轴向上的偏 η^2 达0.39，属于高等效应，意味着升降平移方向系统性偏移变异的38.90% 可直接由体位固定辅助装置的优化所解释。而在Lat轴向上（$\eta^2=0.17$）和Roll轴向上（$\eta^2=0.13$）均表现为中等效应，证实体位固定辅助装置的优化对于纠正左右平移和左右转动偏差具有明确且不容忽视的临床干预价值。

2.2 患者个体随机误差的组间差异

为探究体位固定辅助装置对于抑制患者每分次放疗间 “无规律随机晃动”的物理稳定效果，本研究采用非参数 Mann–Whitney *U* 检验对3组患者的个体随机误差进行了多重对比，其中，B组与其他2组比较，在各轴向上差异均无统计学意义（$P>0.05$），A组与C组比较结果见图3和表2。可以看出，C 组在Pitch轴向上的个体随机误差明显低于A组，差异有统计学意义（$Z=-2.47$，$P=0.01$）。

表 1 3 组患者 6 个轴向上的个体系统误差（$\bar{x} \pm s$）

轴向	A 组（n=15）	B 组（n=18）	C 组（n=20）	F 值	P 值	两两比较（LSD 检验）
Vrt（mm）	−1.20 ± 1.38	0.98 ± 0.98	−0.28 ± 1.03	15.89	<0.01	C 组 *vs.* A 组：P=0.02；C 组 *vs.* B 组：P<0.01；A 组 *vs.* B 组：P<0.01
Lng（mm）	−0.21 ± 1.79	0.78 ± 1.98	−0.50 ± 1.14	3.06	0.06	C 组 *vs.* A 组：P=0.60；C 组 *vs.* B 组：P=0.02；B 组 *vs.* A 组：P=0.09
Lat（mm）	1.42 ± 1.54	−0.84 ± 2.84	−0.12 ± 1.43	5.14	0.01	C 组 *vs.* A 组：P=0.03, C 组 *vs.* B 组：P=0.28；B 组 *vs.* A 组：P<0.01
Pitch（°）	−0.39 ± 1.46	−0.55 ± 1.03	0.08 ± 0.70	1.77	0.18	两两比较均无统计学差异
Roll（°）	−0.64 ± 0.77	−0.09 ± 0.81	0.01 ± 0.55	3.87	0.03	C 组 *vs.* A 组：P=0.01；B 组 *vs.* A 组：P=0.03；B 组 *vs.* C 组：P=0.67
Rtn（°）	−0.18 ± 0.74	−0.20 ± 0.54	−0.23 ± 0.47	0.05	0.96	两两比较均无统计学差异

注：Vrt 为升降平移；Lng 为进出平移；Lat 为左右平移；Pitch 为进出倾斜；Roll 为左右转动；Rtn 为旋转偏航；A 组为非固定头枕＋膝垫；B 组为固定头枕＋膝垫；C 组为固定头枕＋去膝垫。

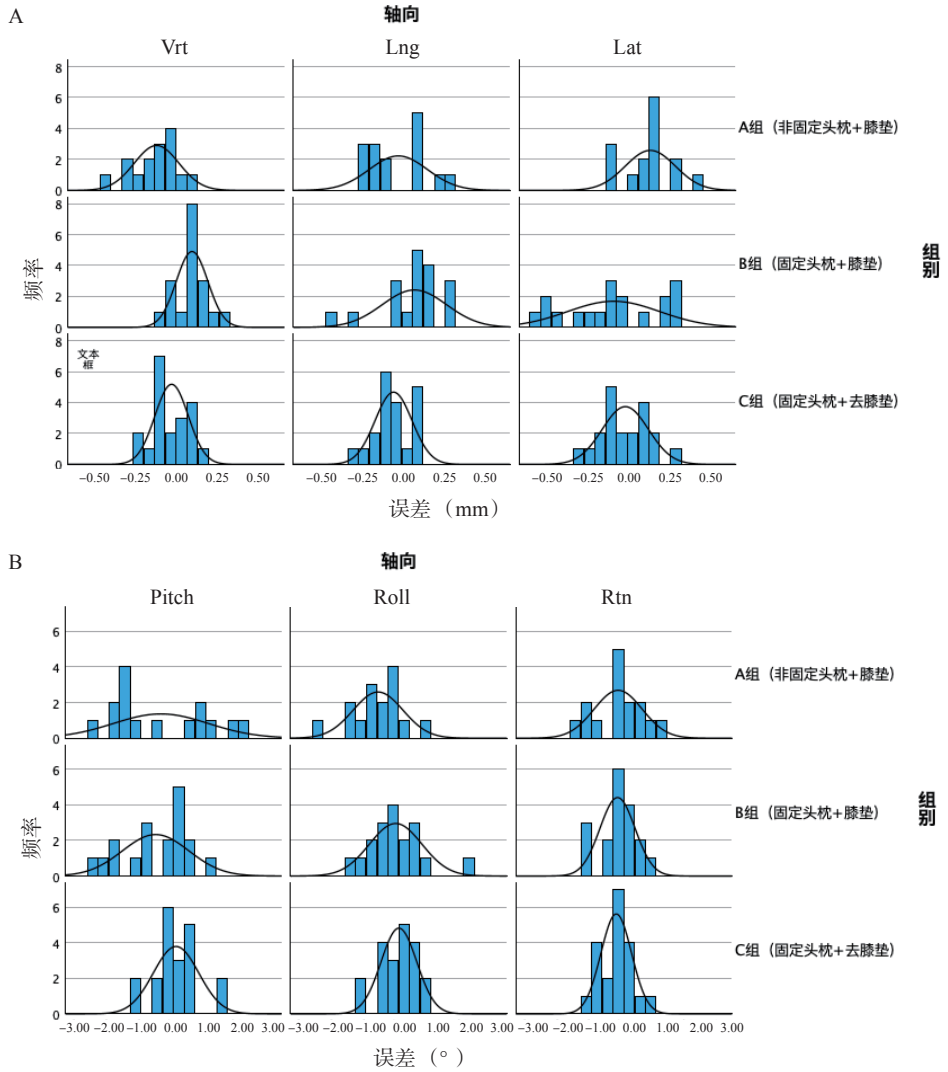


图 2 3 组患者个体系统误差分布 A 为 3 组患者个体系统误差在平移维度上的分布；B 为 3 组患者个体系统误差在旋转维度上的分布

注：Vrt 为升降平移；Lng 为进出平移；Lat 为左右平移；Pitch 为进出倾斜；Roll 为左右转动；Rtn 为旋转偏航。

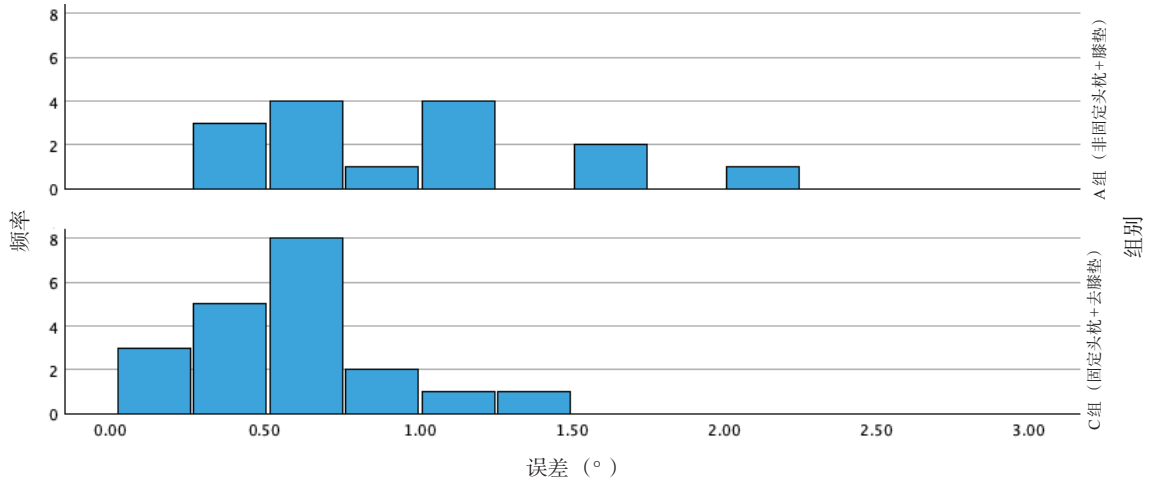


图3 A组与C组Pitch轴向上个体随机误差概率密度直方图

表2 A组与C组患者6个轴向上的个体随机误差［$M(Q_1, Q_3)$］

轴向	A组（n=15）	C组（n=20）	Z值	P值
Vrt（mm）	0.06（0.06，0.10）	0.06（0.06，0.10）	–0.97	0.33
Lng（mm）	0.26（0.06，0.31）	0.21（0.15，0.26）	–0.55	0.58
Lat（mm）	0.10（0.06，0.15）	0.11（0.06，0.20）	–0.08	0.93
Pitch（°）	0.95（0.65，0.16）	0.56（0.36，0.73）	–2.47	0.01
Roll（°）	0.58（0.35，0.66）	063（0.38，0.79）	–0.77	0.44
Rtn（°）	0.49（0.33，0.69）	0.40（0.18，0.69）	–1.14	0.26

注：Vrt为升降平移；Lng为进出平移；Lat为左右平移；Pitch为进出倾斜；Roll为左右转动；Rtn为旋转偏航；A组为非固定头枕+膝垫；B组为固定头枕+膝垫C组为固定头枕+去膝垫。

2.3 异常摆位发生率的组间差异

本研究采用高标准的双重质控限制标准定义“异常摆位（大偏差）”，即单次摆位CBCT配准结果中，任意一个平移轴向的误差绝对值>5.00 mm或任意一个旋转轴向的误差绝对值>2.00°。在采集到的159分次CBCT数据中，3组异常摆位发生率及卡方两两比较结果见表3。3组分次放疗异常摆位发生率存在显著差异（χ^2=14.87, P<0.01）。两两比较显示，A组与B组间差异无统计学意义（P=0.36），C组的异常摆位发生率仅为3.33%，显著低于A组的31.11%（P<0.01）和B组的22.22%（P<0.01）。

2.4 3个平移轴向上的PTV外扩边界

由于治疗过程中肠道蠕动及膀胱移位产生一致性生理变异参数，本研究采用本中心大样本加权随机生理误差进行修正，设σ_{Vrt}=3.0 mm，σ_{Lng}=4.0 mm，σ_{Lat}=3.6 mm。计算得出3个平移轴向上的PTV外扩边界，见表4。

表3 3组分次放疗异常摆位发生率［n（%）］

分组	总摆位次数	异常摆位发生率	χ^2值	P值	两两比较
A组	45	14（31.11）			A组*vs.* B组：P=0.36
B组	54	12（22.22）	14.87	<0.01	A组*vs.* C组：P<0.01
C组	60	2（3.33）			B组*vs.* C组：P<0.01
总计	159	28（17.61）			

注：A组为非固定头枕+膝垫；B组为固定头枕+膝垫；C组为固定头枕+去膝垫。

计算结果表明，在Vrt轴向上，C组的外扩边界仅为3.58 mm，较A组的5.55 mm收窄了35.50%；在Lng轴向上，C组的外扩边界仅为5.65 mm，较B组的7.75 mm和A组的7.28 mm均有显著收缩；在Lat轴向上，B组的外扩边界高达9.62 mm，而C组骤降至6.47 mm，收窄了32.74%。最终，C组的临床外扩边界可以由A组的7.28 mm全面收缩至6.47 mm，达成了在保证靶区剂量覆盖度的同时，大幅降低周边小肠、结肠及膀胱等OAR受照剂量的临床物理质控目标。

3 讨论

3.1 头枕固定对脊柱动力链及骨盆Pitch倾角的传导控制机制

虽然在传统的盆腔/前列腺癌放疗研究中，多数学者将注意力聚焦在骨盆局部的固定膜具如热塑膜、真空垫上，但本研究表明，远端颈部头枕的固定方案，对处于盆腔段的直肠复位精度具有显著的传导效应。人体解剖学和脊柱生物力学研究[10]亦

表 4 3个平移轴向上的PTV外扩边界（mm）

分组	轴向	群体系统误差 Σ	群体随机误差 σ	外扩边界	临床外扩边界
A 组	Vrt	1.38	3.00	5.55	7.28
	Lng	1.79	4.00	7.28	
	Lat	1.54	3.60	6.37	
B 组	Vrt	0.98	3.00	4.55	9.62
	Lng	1.98	4.00	7.75	
	Lat	2.84	3.60	9.62	
C 组	Vrt	1.03	3.00	3.58	6.47
	Lng	1.14	4.00	5.65	
	Lat	1.43	3.60	6.47	

注：PTV为计划靶区；A组为非固定头枕+膝垫；B组为固定头枕+膝垫；C 组为固定头枕+去膝垫；Vrt为升降平移；Lng为进出平移；Lat为左右平移。

证实，颈椎、胸椎、腰椎与骨盆是一个高度连动的“脊柱动力链（spinal kinetic chain）”。

当采用A 组的“非固定头枕”时，由于每次患者摆位纵向位置的轻微变异，头枕会在体板上发生Lng轴向移动。当头枕位置产生偏差，导致患者颈椎曲度发生强迫性改变时，该曲度改变会通过韧带和椎间盘向下传导至胸、腰椎。这种胸、腰段张力的变化，将迫使下腰椎生理曲度代偿性变平或变陡，从而直接改变骨盆在治疗床板上的贴合度和骨盆自身的俯仰角度，即引发显著的Pitch轴向摆位旋转误差（系统离散度达1.46°）。而在B、C 组中，当头枕锁死于床板固定卡槽内时，患者的颈枕接触面被强制约束在恒定纵向坐标处，这确保了患者脊柱的自然平展（neutral spine position），极大地阻断了头颈部不自主移动导致的骨盆Pitch 倾角偏转，这与Elsner 等[10]关于“保持全脊柱中立、防止胸椎张力代偿”的物理生物力学研究结论高度吻合。

3.2 去除海绵膝垫对消除分次间变异和稳定体表标记线的生物力学机制

本研究的另一核心创新点在于，量化证实了在已固定头枕的前提下，去除非必要的海绵膝垫，摆位精度不仅没有降低，反而在平移、旋转误差及异常大偏差上获得了多维度的质控提升。这一现象可从人体膝关节运动学、韧带拉伸锁死机制以及临床体表标志物稳定性等层面得到深度的生物力学解释。

首先，从膝关节运动学角度来看，当去除膝垫使双下肢完全平展伸直（C组）时，患者的膝关节将处于解剖学上的“锁定”或“扣锁”状态，即旋锁机制（screwing–home mechanism）。在这种全伸直体位下，膝关节的前交叉韧带、后交叉韧带、内侧副韧带与外侧副韧带以及后关节囊等刚性与弹性约束结构将全部被拉伸至最大张力状态。此时，胫骨平台与股骨髁发生机械性锁死，彻底限制了小腿相对于大腿的内外旋及前后平移。相反，当在膝下叠加硬质海绵膝垫（A、B组）时，双膝关节被迫处于半屈曲状态（15° ~ 30° 弯曲）。在此姿态下，上述膝关节的交叉韧带、副韧带及后关节囊均处于松弛与松放状态，导致胫股关节的空间约束力骤降，下肢的自由旋转度与平移自由度显著增加。这种小腿及髋关节的无规律晃动与外旋，会依次向上经由股骨头传递至骨盆，直接引发骨盆分次间在Pitch与Roll轴向上产生无规律的摆动。本研究中A、B 两组Pitch轴向的个体系统误差标准差分别高达1.46° 和1.03°，这表明在仍保留膝垫的情况下，仅单一锁定头枕无法有效降低分次间的大偏差发生率。C 组的异常摆位发生率显著低于A 组和B 组，充分证实了锁定头枕联合去除膝垫的“一加一减”优化方案在纠正平移和旋转复合大偏差上的极佳控制效能。

其次，去除膝垫消除了由辅助装置长期塑性疲劳形变带来的高度不确定性，并有效解决了“体表标记线形变干涉”的经典质控难题。直肠癌放疗体表标记线多画在腹股沟及大腿上段。当膝垫高度产生分次间变异时，由于皮肤牵拉形变，体表线会相对体内靶区发生解剖位移，治疗师若强行用外激光对齐发生形变的体表线，反而会人为放大体内实际摆位误差，B组在Lat轴向上的群体系统误差 Σ 高达2.84 mm。C组双腿平直紧贴体板，消除了下肢

曲度波动的干扰，使Lat轴向上的群体系统误差 Σ 降至1.43 mm。此外，de Kruijf 等[18]和McCullough等[19]的研究也指出，基于固定底板卡槽的索引化（indexing）辅助装置固定能有效引导治疗师进行高重复性的体位复位，消除无规则的物理形变并保障患者体位姿态的可追溯性。Ghosh 等[8]的研究证明简化固定在纵向大偏差控制上优于复杂盆腔膜阻碍（$P = 0.003$）；Anand 等[20]和Udayashankar 等[21]也证实盆腔热塑膜结合下肢平直或分腿简化方案，其摆位精度和摆位一致性并不劣于叠加复杂海绵膝垫的传统方案，且消除了海绵老化的形变风险。舒适且展平的肢体姿态可最大程度降低对抗性肌张力代偿，从而证实了“去除非必要辅助、物理锁定必要辅助”的简化质控准则。

3.3 PTV 外扩边界优化与OAR受照剂量缩小的临床增益

在高精度放疗中，PTV外扩边界的大小直接影响周边OAR的受照体积。在直肠癌VMAT 中，小肠、结肠和膀胱常与直肠CTV 紧密贴邻或部分重叠。外扩边界每增加1 ~ 2 mm，高剂量区内的小肠受照体积如V_{15}、V_{30}将呈指数级增加，显著提升放射性肠炎或膀胱炎的风险[2, 5]。

得益于C组在群体系统误差 Σ 上的卓越控制，其在Vrt、Lng、Lat轴向的外扩边界分别收缩至3.58 mm、5.65 mm和6.47 mm，这就允许计划物理师在治疗计划系统（treatment planning system, TPS）中建立更加适形的剂量包络线，将临床外扩边界收窄至6.50 mm 以内，优于A、B 组的7.28 mm 和9.62 mm。这种基于物理质控优化的“窄边界放疗”可从源头上收紧受照OAR的剂量体积直方图（dose volume histogram, DVH）曲线，对控制急性与晚期放疗毒副反应、保障患者生存质量具有明确的临床增益，实现了物理摆位质控向临床剂量学毒性控制的高效转化，具有极高的临床实用效益。同时，配合高频次CBCT图像引导及完善的质量控制程序，能有效保障靶区覆盖度并大幅降低关键正常器官的受照剂量，确保调强治疗计划的精确递送[22–24]。

3.4 本研究的局限性与展望

本研究仍存在一定的局限性。首先，受限于单中心回顾性研究设计，各组样本量较小。在统计学层面，分组样本量偏低可能导致部分摆位轴向的检验效能不足，增大了假阴性的发生概率。这在一定程度上解释了为何某些空间旋转误差（如Rtn轴向）虽在数值上呈现出向C组优化的趋势，但未能达到统计学上的显著性差异。其次，样本规模也限制了针对患者身体质量指数（body mass index, BMI）、脂肪厚度及解剖变异等潜在混杂因素的深层亚组分层分析。尽管本研究通过对159分次CBCT的三维追踪，在一定程度上补偿了患者个体的日间变异性，但未来仍亟待开展多中心、大规模的前瞻性临床研究，并结合严格的样本量估算与统计效能分析，以进一步论证该简化体位固定方案的剂量学获益及在远期临床毒副反应上的控制效果。

4 结论

直肠癌仰卧位VMAT中，采用“固定头枕且去除膝垫”的简化体位固定方案，能通过稳定全脊柱动力链与触发膝关节“旋锁”锁定机制，显著提高分次间摆位复位的几何重复性。该方案能将左右平移（Lat）和进出平移（Lng）的群体系统误差 Σ 分别控制在1.43 mm 和1.14 mm，使进出倾斜（Pitch）的无规律随机晃动即个体随机误差显著受控（$P = 0.01$），并成功将异常摆位发生率控制在3.33%（$P < 0.01$）。3个平移轴向上建议的临床外扩边界可安全收拢在6.50 mm 以内，有效降低了相邻小肠和膀胱的受照剂量。综上所述，该简化体位固定方案在不增加设备成本、精简治疗师摆位步骤的前提下，实现了摆位物理精度向OAR剂量学保护的高效转化，具有一定的临床标准化推广价值。

利益冲突：作者声明没有利益冲突。

[参 考 文 献]

[1] Bray F, Laversanne M, Sung H, et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. CA: A Cancer Journal for Clinicians, 2024, 74(3): 229–263.

[2] Nijkamp J, de Jong R, Sonke J J, et al. Target volume shape variation during irradiation of rectal cancer patients in supine position: comparison with prone position[J]. Radiotherapy and Oncology, 2009, 93(2): 285–292.

[3] Kim A, Karotki A, Presutti J, et al. The effect of prone and supine treatment positions for the pre–operative treatment

of rectal cancer on organ–at–risk sparing and setup reproducibility using volumetric modulated arc therapy［J］. Radiation Oncology, 2017, 12: 180.
［4］ Teoh M, Clark C H, Wood K, et al. Volumetric modulated arc therapy: a review of current literature and clinical use in practice［J］. The British Journal of Radiology, 2011, 84(1007): 967–996.
［5］ van Herk M. Errors and margins in radiotherapy［J］. Seminars in Radiation Oncology, 2004, 14(1): 52–64.
［6］ Nugent K, O’Neill B, Brennan V, et al. Quantification of organ motion in male and female patients undergoing long–course radiation therapy for rectal cancer in the supine position［J］. Advances in Radiation Oncology, 2023, 8(1): 101109.
［7］ The Royal College of Radiologists. On target: ensuring geometric accuracy in radiotherapy［EB/OL］.［2026–08–06］. https://www.ipem.ac.uk/media/mprf2mcw/on–target–ensuring–geometric–accuracy–in–radiotherapy.pdf.
［8］ Ghosh A K, Roy N, Chhatui B, et al. Comparison of setup errors between two immobilization techniques for image–guided pelvic radiotherapy: can an ankle fixator be used as an alternative to a thermoplastic mask for immobilization without compromising treatment?［J］. Asian Journal of Oncology, 2024, 10: 3.
［9］ Fiorino C, Reni M, Bolognesi A, et al. Set–up error in supine–positioned patients immobilized with two different modalities during conformal radiotherapy of prostate cancer［J］. Radiotherapy and Oncology, 1998, 49(2): 133–141.
［10］ Elsner K, Francis K, Hruby G, et al. Quality improvement process to assess tattoo alignment, set–up accuracy and isocentre reproducibility in pelvic radiotherapy patients［J］. Journal of Medical Radiation Sciences, 2014, 61(4): 246–252.
［11］ Zhong R, Song Y, Yan Y, et al. Analysis of which local set–up errors can be covered by a 5–mm margin for cone beam CT–guided radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma［J］. The British Journal of Radiology, 2018, 91(1088): 20160849.
［12］ Seah V, Dundas K, Hudson F, et al. Correcting rotational error in rectal cancer radiation therapy: can planning target volume margins be safely reduced?［J］. Journal of Medical Radiation Sciences, 2022, 69(4): 473–483.
［13］ Freislederer P, Batista V, Öllers M, et al. ESTRO–ACROP guideline on surface guided radiation therapy［J］. Radiotherapy and Oncology, 2022, 173: 188–196.
［14］ Essers M, Mesch L, Beugeling M, et al. Setup and intra–fractional motion measurements using surface scanning in head and neck cancer radiotherapy: a feasibility study［J］. Physics and Imaging in Radiation Oncology, 2024, 29: 100563.
［15］ Luo H, Jin F, Yang D, et al. Interfractional variation in bladder volume and its impact on cervical cancer radiotherapy: clinical significance of portable bladder scanner［J］. Medical Physics, 2016, 43(7): 4412–4419.
［16］ Jereczek–Fossa B A, Pobbiati C, Santoro L, et al. Prostate positioning using cone–beam computer tomography based on manual soft–tissue registration: interobserver agreement between radiation oncologists and therapists［J］. Strahlentherapie und Onkologie, 2014, 190: 81–87.
［17］ Patni N, Burela N, Pasricha R, et al. Assessment of three–dimensional setup errors in image–guided pelvic radiotherapy for uterine and cervical cancer using kilovoltage cone–beam computed tomography and its effect on planning target volume margins［J］. Journal of Cancer Research and Therapeutics, 2017, 13(1): 131–136.
［18］ de Kruijf W J M, Martens R J W. Reducing patient posture variability using the predicted couch position［J］. Medical Dosimetry, 2015, 40(3): 218–221.
［19］ McCullough K T, James J A, Cetnar A J, et al. Site–specific tolerance tables and indexing device to improve patient setup reproducibility［J］. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 2015, 16(3): 378–388.
［20］ Anand M, Parikh A, Shah S P. Comparison of thermoplastic masks and knee wedge as immobilization devices for image–guided pelvic radiation therapy using Cone Beam Computed Tomography［J］. Indian Journal of Cancer, 2020, 57(2): 182–186.
［21］ Udayashankar A H, Noorjahan S, Srikantia N, et al. Immobilization versus no immobilization for pelvic external beam radiotherapy［J］. Reports of Practical Oncology and Radiotherapy, 2018, 23(4): 233–241.
［22］ Rudat V, Hammoud M, Pillay Y, et al. Impact of the frequency of online verifications on the patient set–up accuracy and set–up margins［J］. Radiation Oncology, 2011, 6: 101.
［23］ Tahiri J B, Kyndt M, Dhont J, et al. A comprehensive quality assurance program for four–dimensional computed tomography in radiotherapy［J］. Physics and Imaging in Radiation Oncology, 2023, 27: 100475.
［24］ Deng J, Liu S Y, Huang Y, et al. Evaluating AAPM–TG–218 recommendations: Gamma index tolerance and action limits in IMRT and VMAT quality assurance using SunCHECK［J］. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 2024, 25(6): e14277.
［25］ Carl G, Reitz D, Schönecker S, et al. Optical surface scanning for patient positioning in radiation therapy: a prospective analysis of 1902 fractions［J］. Technology in Cancer Research and Treatment, 2018, 17: 1533033818806002.