·论 著·

局部进展期直肠癌短程放疗中一体化CT-linac与常规直线加速器工作流程的等效性比较：一项回顾性队列研究

王佳栋，陆 维，李乾永，陆 敏，章 真

复旦大学附属肿瘤医院放疗中心，复旦大学上海医学院肿瘤学系，上海200032

［摘要］ **背景与目的：**对于局部进展期直肠癌，短程放疗（short-course radiotherapy，SCRT）已成为近年来的研究热点，与巩固免疫化疗联合应用后表现出潜在优势。本研究旨在通过回顾性队列设计，比较一体化CT直线加速器（一体化CT-linac）流程与传统流程在局部进展期直肠癌SCRT中摆位精度上的差异，评估两者的临床等效性。**方法：**本研究为回顾性队列研究，纳入2023年1月—2025年10月于复旦大学附属肿瘤医院放疗中心接受SCRT（25 Gy/5次）的局部进展期直肠癌患者，按治疗流程分为一体化流程组和传统流程组。一体化流程组采用联影uRT-linac 506c系统完成定位、计划及治疗，每日行扇形束计算机断层扫描（fan beam computed tomography，FBCT）图像引导放疗（image-guided radiation therapy，IGRT）；传统流程组采用西门子SOMATOM Definition AS CT机定位联合瓦里安EDGE加速器治疗，每日行锥形束计算机断层扫描（cone beam computed tomography，CBCT）图像引导。记录两组在腹背（vertical，VRT）、头脚（longitudinal，LNG）、左右（lateral，LAT）3个平移方向及偏转角（yaw rotation，YAW）、俯仰角（pitch rotation，PITCH）、翻滚角（roll rotation，ROLL）3个旋转方向的摆位误差，采用线性混合效应模型及Hodges-Lehmann方法进行等效性分析，预设平移等效界值为±2 mm，旋转等效界值为±1°。本研究通过复旦大学附属肿瘤医院伦理委员会审查（2201250-16）。**结果：**共60例患者纳入本研究，其中一体化流程组30例，传统流程组30例。在平移方向上，VRT、LNG、LAT的HL中位数差分别为-0.030 mm、-0.020 mm、0.020 mm，三维矢量误差HL中位数差为-0.018 mm，其95% CI均完全落入±2 mm范围内。旋转方向上，YAW、PITCH、ROLL的HL中位数差分别为0.090°、-0.300°、-0.200°，95% CI均位于±1°内。两种流程在所有方向的摆位精度均达到临床等效性标准。**结论：**联影uRT-linac 506c系统一体化放疗流程在局部进展期直肠癌SCRT中的摆位精度与传统流程具有临床等效性，同时在缩短治疗周期和降低相关医疗负担方面具有潜在价值，提示其在特定的临床场景中具备进一步应用与评估的价值。

［关键词］ 直肠癌；短程放疗；一体化直线加速器；摆位误差；图像引导放射治疗；等效性研究

中图分类号：R735.37 **文献标志码：**A

DOI: 10.19401/j.cnki.1007-3639.2026.06.008

基金项目：无。

利益冲突：所有作者均声明无利益冲突。

伦理批件：2201250-16。

知情同意：不涉及。

引用本文：王佳栋, 陆维, 李乾永, 等. 局部进展期直肠癌短程放疗中一体化CT-linac与常规直线加速器工作流程的等效性比较:一项回顾性队列研究[J]. 中国癌症杂志, 2026, 36(6): 603-610.

CC协议：CC BY-NC-ND 4.0。

Funding: No.

Conflicts of interest: All authors declare no conflicts of interest.

Ethical approval: 2201250-16.

Informed consent: Not applicable.

Cite this article: WANG J D, LU W, LI Q Y, et al. Workflow equivalence comparison between integrated CT-linac and conventional linear accelerator for short-course radiotherapy of locally advanced rectal cancer: a retrospective cohort study [J]. Chin Oncol, 2026, 36(6): 603-610.

CC license: CC BY-NC-ND 4.0.

Workflow equivalence comparison between integrated CT-linac and conventional linear accelerator for short-course radiotherapy of locally advanced rectal cancer: a retrospective cohort study WANG Jiadong, LU Wei, LI Qianyong, LU Min, ZHANG Zhen (Department of Radiation Oncology, Fudan University Shanghai Cancer Center; Department of Oncology, Shanghai Medical College, Fudan University, Shanghai 200032, China)

Correspondence to: LU Wei E-mail: 94281196@qq.com

［**Abstract**］**Background and purpose:** For locally advanced rectal cancer (LARC), short-course radiotherapy (SCRT) has emerged as a research hotspot in recent years and has shown potential advantages when combined with consolidation immunochemotherapy. This study employed a retrospective cohort design to compare the setup accuracy between an integrated CT-linear accelerator workflow and a conventional workflow in SCRT for LARC, and to evaluate their clinical equivalence. **Methods：** This was a retrospective cohort study that enrolled patients with LARC who received short-course radiotherapy (SCRT, 25 Gy in 5 fractions) at the Radiation Therapy Center of Fudan University Shanghai Cancer Center between January 2023 and October 2025. Patients were divided into an integrated workflow group and a conventional workflow group according to the treatment procedure. In the integrated workflow group, simulation, treatment planning, and radiotherapy delivery were all performed on the United Imaging uRT-linac 506c system, with daily fan-beam computed tomography (FBCT)-based image-guided radiation therapy (IGRT). In the conventional workflow group, patients underwent computed tomography simulation with a Siemens (SOMATOM Definition AS) scanner followed by radiotherapy on a Varian EDGE linear accelerator, with daily cone-beam computed tomography (CBCT)-based IGRT. This study was approved by the Ethics Committee of Fudan University Shanghai Cancer Center (2201250-16). Setup errors were recorded in three translational directions: vertical (VRT), longitudinal (LNG), and lateral (LAT) and three rotational directions: YAW, PITCH, and ROLL. Equivalence was assessed using Hodges-Lehmann (HL) median difference estimation. Predefined equivalence margins were ±2 mm for translational errors and ±1° for rotational errors. **Results：** A total of 60 patients were enrolled in this study, including 30 patients in the integrated workflow group and 30 patients in the conventional workflow group. For translational directions, the HL median differences for VRT, LNG, and LAT were -0.030 mm, -0.020 mm, and 0.020 mm, respectively. The HL median difference for three-dimensional vector error was -0.018 mm. All 95% confidence intervals fell entirely within the ±2 mm equivalence margin. For rotational directions, the HL median differences for YAW, PITCH, and ROLL were 0.090°, -0.300°, and -0.200°, respectively, with all 95% confidence intervals within the ±1° margin. Clinical equivalence in setup accuracy was demonstrated across all directions. **Conclusion：** The integrated radiotherapy workflow using the United Imaging uRT-linac 506c demonstrates clinical equivalence in setup accuracy compared with the conventional workflow for SCRT in patients with LARC. In addition, this integrated approach shows potential advantages in reducing treatment duration and alleviating treatment-related financial burden, suggesting its applicability in selected clinical settings.

［**Key words**］Rectal cancer; Short-course radiotherapy; Integrated linear accelerator; Setup error; Image-guided radiotherapy; Equivalence study

结直肠癌作为在中国高发且具有重要公共卫生意义的消化道恶性肿瘤，其发病率呈持续攀升趋势，疾病负担不断加重[1]。中低位局部进展期直肠癌因其深部解剖特殊位置、周围结构复杂及盆腔器官高度密集的特点，对患者生活质量和生命健康产生严重不利的影响，在治疗策略制定与治疗精度控制方面尤具挑战[2]。短程放疗（short-course radiotherapy，SCRT）近年来逐渐受到关注，尤其是巩固免疫化疗与SCRT联合应用后，在肿瘤降期与病理学完全缓解（pathological complete response，pCR）率方面表现出潜在优势[3-4]。与传统长程放化疗相比，SCRT具有周期短、等待时间短、资源利用效率高等特点，但因其单次剂量较大，对摆位精度与影像引导技术的依赖更为显著。为确保剂量递送的准确性与治疗安全性，国家癌症中心指南明确推荐SCRT患者每日接受锥形束计算机断层扫描（cone beam computed tomography，CBCT）图像引导[5]。

联影uRT-linac 506c系统将诊断级扇形束CT与医用直线加速器进行同床同轴整合（一体化CT-linac），可实现定位、靶区勾画、计划优化及治疗实施在同一机房内的连续完成[6]。该设备所提供的影像对比度、均匀性与CT值准确性相比于CBCT具有更高的质量，低剂量扫描模式在日常验证中不仅能满足软组织分辨率的临床要求，还可有效地降低患者辐射剂量[7]。其CT值可直接转化成电子密度信息，无需额外的图像处理步骤，可直接用于剂量计算。其一体化“一站式（All-in-one）”模式理论上可减少患者在多设备间流转所引起的体位变化、心理压力，降低因等待时间过长导致的解剖偏移风险，并显著提升工作流效率。相比之下，传统直线加速器所依赖的CBCT在软组织分辨率、噪声控制及伪影抑制方面存在天然局限，通常需经过图像处理后方可用于计划设计，且图像引导时可能影响匹配精度，进而对摆位误差产生潜在影响[8-9]。

本研究基于局部进展期直肠癌患者的实际临床数据，通过对比两套流程在平移与旋转方向的摆位误差，旨在评估一体化CT-linac是否能够在摆位精度上达到与传统流程相当的临床效果，从而为SCRT在各类医疗资源条件下的推广与应用提供循证医学依据。

1 资料和方法

1.1 临床资料

本研究纳入2023年1月—2025年10月于复旦大学附属肿瘤医院放射治疗中心接受SCRT（25 Gy/5次）的局部进展期直肠癌患者。本研究纳入标准为：① 经病理学检查确诊为局部进展期直肠癌；② 无远处转移；③ 均为首次放化疗；④ Karnofsky评分≥70分。排除标准为：① 具有其他恶性肿瘤病史患者；② 具有中枢神经系统疾病等依从性差的患者；③ 放疗过程中因摆位误差超出允许范围而行体位复位的患者；④ 放疗采用其他图像引导放疗（image-guided radiation therapy，IGRT）方式的患者。按照实际接受的治疗流程将患者分为一体化流程组与传统流程组。在此基础上采用随机数表法分别从两组符合纳入标准的患者中各随机抽取纳入研究。数据来源于医院信息系统（hospital information system，HIS）和放疗计划系统（radiation treatment planning system，TPS）的客观记录，主要为患者单次治疗周期的摆位误差数据，不存在主观回忆偏倚及失访偏倚，且关键变量无缺失。本研究经复旦大学附属肿瘤医院伦理委员会审查批准（2201250-16）。

1.2 加速器质控

全组所使用模拟机、加速器与机载影像系统均严格按照质量控制规范执行。治疗床机械精度每月校准1次，激光定位系统每日检查，确保治疗流程长期稳定运行，最大限度地减少因设备偏移带来的系统误差。

1.3 放疗流程设计

全组患者均采用仰卧位，双上肢置于胸前，使用头枕与踝托进行基础固定。该体位设计兼顾舒适度与重复性，有助于减少因体位变动导致的摆位误差，为后续影像引导提供稳定基础。

一体化流程组采用联影uRT-linac 506c系统进行定位与治疗。患者首先接受扇形束计算机断层扫描（fan beam computed tomography，FBCT）完成定位，CT定位扫描范围：上界自第2~3腰椎水平，下界至股骨上中1/3段，扫描层厚3 mm。待靶区和危及器官等自动勾画完成后，系统自动生成初始治疗计划。若摆位标记和治疗中心点之间存在偏差，可在线复位并在患者体表画线标记。治疗计划经医师及物理师现场审核并进行必要的修正，以完成治疗计划。考虑患者体位可能会受到上述流程耗时的影响，故治疗前采用Pelvis-LowDose FBCT扫描模式验证图像采集，扫描参数：管电压120 kV，管电流70 mAs。将采集的治疗图像与定位图像进行自动配准，感兴趣区包括骨盆区域周围的刚性骨骼解剖结构（尽可能将股骨头和小转子排除），放射治疗师与医师进行修正以确保靶区在计划靶区内，记录腹背（vertical，VRT）、头脚（longitudinal，LNG）、左右（lateral，LAT）以及偏转角（yaw rotation，YAW）、俯仰角（pitch rotation，PITCH）、翻滚角（roll rotation，ROLL）的误差数值，随后纠正治疗。后续每次治疗前均使用Pelvis-LowDose FBCT图像引导。两名放射治疗师人工审核，其中一名为从业年限10年以上的主管技师，首选骨性配准，在自动配准的基础上，两人共同逐层检查软组织配准情况，以确保精准治疗。

传统流程组采用传统定位流程，使用西门子SOMATOM Definition AS CT机完成初次定位，CT定位扫描范围：上界自第2~3腰椎水平，下界至股骨上中1/3段，扫描层厚3 mm。由医师与医学物理师完成靶区勾画、计划优化及剂量验证。随后患者至常规模拟机进行复位，并采用瓦里安EDGE加速器执行治疗计划，且每日行CBCT图像引导，扫描协议选择Pelvis模式，管电压125 kV，管电流1 080 mAs，配准要求同一体化流程组。

1.4 评价标准

本研究为两独立样本等效性研究，主要评价指标为放疗摆位误差，该指标为患者实际治疗体位与模拟定位确定的理想体位之间的位移偏差。等效界值的设定综合参考临床指南、既往文献及SCRT的剂量学特点。根据国家癌症中心发布的相关指南[5]，直肠癌放疗中平移方向摆位误差的临床可接受阈值为<5 mm，旋转误差为<3°。临床可接受阈值主要反映单次治疗摆位误差尚可接受的安全边界，而等效性研究中的等效界值用于判断两种治疗流程之间的差异是否小到不足以产生具有临床意义的影响。

为避免SCRT等效性判定稀释临床安全边际，本研究在上述临床阈值基础上进一步收紧等效界值，预设平移方向（VRT、LNG、LAT）的等效界值为±2 mm，旋转方向（YAW、PITCH、ROLL）的等效界值为±1°，约为指南推荐最大容

许误差的40.0%与33.3%。该设定在保证统计等效性判定可行性的同时，兼顾了SCRT对精准度的更高临床要求，具有一定的保守性。

放疗摆位误差采用绝对误差界值（mm或°）作为判断标准[10-11]。通过调取影像采集及治疗计划系统中的计算机扫描与计划设计记录，并结合问询方式补充获取靶区勾画等关键时间节点，对两组患者自定位扫描至首次治疗完成的全过程用时进行统计。

1.5　统计学处理

使用SPSS统计23.0和R 4.5.2进行数据分析，对于重复测量的数据采用线性混合效应模型进行组间比较，设患者为随机效应、组别/时相/交互项为固定效应，对所有固定效应参数，均报告回归系数β及其95% CI，$P<0.05$为差异有统计学意义。另采用Hodges–Lehmann（HL）方法计算中位数差及其95% CI。HL估计值以“一体化流程组−传统流程组”为差值方向，正值表示一体化流程组偏大，负值表示偏小。除VRT、LNG、LAT、YAW、PITCH和ROLL共6个方向外，另计算三维矢量误差（$V=\sqrt{LAT^2+LNG^2+VRT^2}$），并采用相同方法进行等效性判定。统计检验的显著性水平设为双侧$P<0.05$，主要等效性结论依据HL中位数差的95% CI是否完全落入预设等效界值范围作出。线性混合效应模型分析涉及多个方向及多个固定效应检验，相关P值未进行多重比较校正，因此该部分$P<0.05$仅表示名义统计学显著性，相关结果作为探索性发现解释。

2　结　　果

2.1　基线资料

本研究回顾性分析80例局部进展期直肠癌患者，最终纳入60例，患者纳入和排除标准流程图见图1。最终纳入一体化流程组30例，其中男性20例、女性10例，年龄35~69岁；传统流程组30例，其中男性21例、女性9例，年龄37~70岁。两组患者在性别、年龄及体能状态等基线特征方面差异均无统计学意义（$P>0.05$）。所有关键变量（摆位误差、治疗流程）及基线变量（年龄、性别等）均无缺失（缺失率：0%）。本研究为等效性比较研究，主要评价两组摆位误差的一致性与临床等效性，而非探讨暴露与疾病结局之间的因果关联；且主要结局为连续型摆位误差，而非二分类事件，故采用HL中位数差、回归系数及其95% CI进行报告，未计算RR值。鉴于本研究样本量较小、分组变量有限，且主要基线特征已在正文中呈现，故未另设基线特征表。

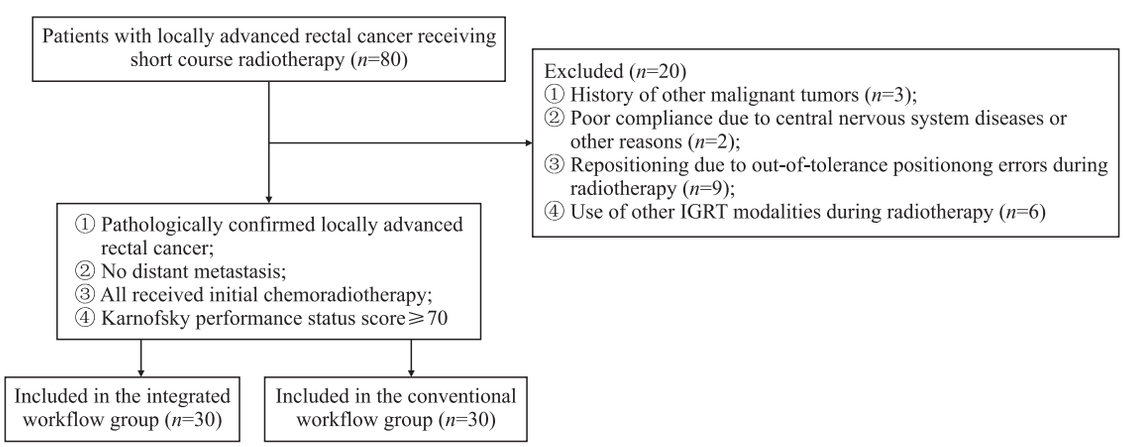


图1　患者纳入和排除标准流程图

Fig. 1　Flowchart of patient inclusion and exclusion criteria

2.2　平移方向等效性

在平移方向上，两种放疗流程的摆位误差均表现为接近零的小幅差异。VRT、LNG和LAT的HL中位数差分别为-0.030、-0.020和0.020 mm，其95% CI分别为-0.100~0.030 mm、-0.070~0.020 mm和-0.030~0.080 mm（P=0.277、P=0.293、P=0.468）。上述置信区间均完全落入预设等效界值±2 mm范围内，提示两流程在平移3个方向的摆位精度具有临床等效性（表1）。

三维平移矢量误差的HL中位数差为-0.018 mm（95% CI：–0.079~0.055 mm，P=0.647），同样完全位于±2 mm等效界值范围内，

表1 两种放疗流程摆位误差的HL中位数差、95% CI与等效性分析结果

Tab. 1 Median HL differences in setup errors between two radiotherapy workflows, with 95% CI and results of equivalence testing

Direction of metrics	Median difference of HL (observation to control)	95% CI	Equivalence margin	Equivalent	*P* value
VRT/mm	-0.030	-0.100, 0.030	±2 mm	Yes	0.277
LNG/mm	-0.020	-0.070, 0.020	±2 mm	Yes	0.293
LAT/mm	0.020	-0.030, 0.080	±2 mm	Yes	0.468
3D vector/mm	-0.018	-0.079, 0.055	±2 mm	Yes	0.647
YAW/°	0.090	-0.010, 0.160	±1°	Yes	0.253
PITCH/°	-0.300	-0.620, 0.180	±1°	Yes	0.230
ROLL/°	-0.200	-0.500, 0.000	±1°	Yes	0.090

进一步支持整体平移误差等效。

2.3 旋转方向等效性

在旋转方向方面，YAW、PITCH和ROLL的HL中位数差分别为0.090°、-0.300°和-0.200°，95% CI分别为-0.010～0.160°、-0.620～0.180°和-0.500～0.000°（表1，*P*=0.253、*P*=0.230、*P*=0.090）。所有置信区间均位于预设等效界值±1°内，提示两流程在YAW、PITCH与ROLL 3个旋转自由度上的摆位误差亦具有临床等效性。平移与旋转方向误差箱线图见图2。

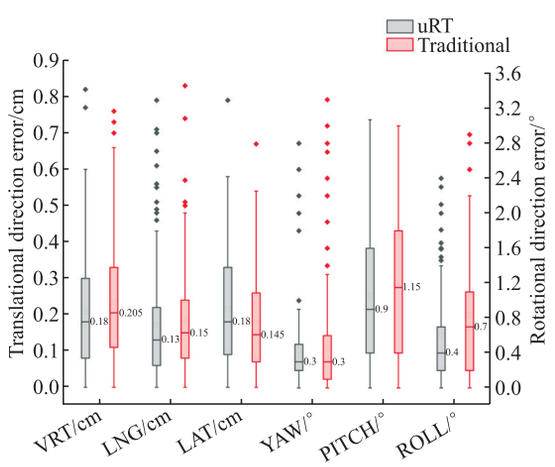


图2 平移与旋转方向误差箱线图

Fig. 2 Boxplots illustrating translational and rotational setup errors

2.4 线性混合效应模型总体分析

线性混合效应模型分析结果显示，各方向误差在一体化流程组与传统流程组之间总体差异均无统计学意义（*P*>0.05）；在时相效应方面，VRT和LNG方向误差随放疗时相的变化差异有统计学意义（*P*<0.05），但在上述两个方向，组别与时相的交互效应差异无统计学意义。在PITCH方向观察到名义显著的组别与时相交互效应（*P*=0.002），提示两组在该方向误差随时间变化的趋势存在差异，LAT方向的组别与时相交互效应接近显著性，但差异无统计学意义（*P*=0.054）。由于上述分析未进行多重比较校正，相关结果应作为探索性发现解释，不作为两种流程临床等效性判定的主要依据（表2）。

表2 不同方向放疗误差的线性混合效应模型分析结果

Tab. 2 Linear mixed-effects model analysis of radiotherapy setup errors across different directions

Direction	Effect	*F* value	*P* value
VRT	Group	1.43	0.235
	Time	2.541	0.041
	Group × time	0.208	0.934
LNG	Group	0.144	0.705
	Time	3.06	0.018
	Group × time	0.511	0.728
LAT	Group	3.055	0.084
	Time	0.487	0.487
	Group × time	2.365	0.054
YAW	Group	0.039	0.845
	Time	0.568	0.568
	Group × time	0.395	0.812
PITCH	Group	0.786	0.378
	Time	0.748	0.748
	Group × time	4.508	0.002
ROLL	Group	2.969	0.090
	Time	0.059	0.059
	Group × time	0.260	0.903

2.5 固定效应参数估计

在PITCH方向，时相1时两组差异有统计学意义（β=-0.753，95% CI: -1.343～-0.163，*P*=0.013）；在LAT方向，时相3时两组差异有统计学意义（β=0.135，95% CI: 0.030～0.240，*P*=0.012）。其余方向各效应回归系数的95% CI均跨越0，差异无统计学意义（表3）。两组放疗流程时间对比见表4。

表3　线性混合效应模型固定效应参数估计

Tab. 3　Estimates of fixed effects in the linear mixed model

Direction	Effect	*B* value	95% CI	*P* value
VRT	Group	-0.028	-0.113, 0.057	0.513
LNG	Group	-0.038	-0.119, 0.043	0.354
LAT	Group	-0.021	-0.095, 0.054	0.585
YAW	Group	-0.012	-0.288, 0.264	0.934
PITCH	Group	-0.014	-0.431, 0.403	0.947
ROLL	Group	-0.107	-0.492, 0.278	0.585
LAT	Group × time#	0.135	0.030, 0.240	0.012
PITCH	Group × time*	-0.753	-1.343, -0.163	0.013

Group represented the main effect of group. Group × time represented the interaction effect between group and time. #: indicated the interaction effect at time 3; *: Indicated the interaction effect at time 1

3　讨　　论

SCRT联合巩固化疗在局部进展期直肠癌的治疗中提供了新的治疗选择[3]，其具有治疗周期短、总体成本低等特点，特别适用于医疗资源相对有限的地区。由于腹盆腔肿瘤易发生位移，靶区脱靶及危及器官剂量超限的风险随之增加[12]，SCRT大分割放疗需要精准的影像引导。IGRT的应用提高了剂量输送至肿瘤的准确性，有助于保护周围正常组织，提高肿瘤的控制率[13]。在此背景下，本研究探讨联影uRT-linac 506c系统一体化CT直线加速器在SCRT的应用价值，并通过与常规放疗流程的比较，为局部进展期直肠癌的精准放疗提供参考。

本研究基于一体化CT直线加速器与常规直线加速器两种流程，对60例局部进展期直肠癌患者进行放射治疗时的摆位误差进行对比。结果显示，两种模式在整体摆位精度上具有临床等效性。胡轶雯等[11]研究亦表明All-in-one一体化流程对直肠癌可实施精准放疗，同时减少患者转运次数及等待时间。此外，FBCT具有更快的扫描速度、更少运动伪影的产生且CT值更准确，进一步缩短了治疗前准备过程，从而有助于减少摆位偏差[6]。邓金慧等[14]通过对40例乳腺癌患者的研究也表明FBCT在时间效率上具有优势。崔健淳等[15]通过50例盆腔肿瘤研究表明光学体表引导系统可减少摆位误差，一体化流程与其联合应用有望更好地实施精准放疗。本研究样本量估算方面，前期对两组各8例患者行前置实验，同时参照我中心既往关于直肠癌图像引导放疗摆位误差的研究[5, 11, 15]，平移方向摆位误差的标准差约为1.5 mm。在双侧显著性水平α=0.05、把握度（1−β）=80%、等效界值Δ=±2的条件下，基于两独立样本等效性检验的样本量估算公式：$n=\frac{2(Z1-\alpha+Z1-\beta)^2\sigma^2}{\Delta^2}$，每组所需样本量约为9例。考虑回顾性研究中潜在数据缺失及分析稳定性需求，最终确定每组纳入30例患者。

表4　两组放疗流程时间对比

Tab. 4　Comparison of treatment workflow times between the integrated workflow and conventional workflow groups

Group	Positioning and repositioning/min	Target delineation/min	Treatment planning/min	Image guidance and treatment/min	Total time/min
uRT-linac 506c (*n*=30)	3.12 ± 0.71	13.86 ± 2.94	7.18 ± 1.47	3.92 ± 0.88	28.08 ± 3.62
Traditional (*n*=30)	6.34 ± 1.18	17.92 ± 3.74	12.87 ± 2.36	5.21 ± 1.02	42.34 ± 4.79

本研究亦存在若干局限。首先，本研究为回顾性单中心研究，患者并非随机分组，而是依据实际接受的治疗流程纳入不同组别，因此存在一定的选择偏倚。尽管两组在已纳入分析的基线特征方面具有可比性，但仍不能完全排除未测量混杂因素的影响。其次，本研究存在潜在的信息偏倚。两组摆位误差虽均来源于临床系统的客观记录，但由于影像获取方式、配准条件及具体流程不同，测量结果仍可能受到方法学差异的影响。再次，本研究为单中心研究，研究对象及设备平台相对单一，宏观真实性有限，研究结论在其他中心的可推广性仍需进一步验证。此外，统计学部分采用的线性混合效应模型分析涉及多个方向及多个固定效应检验，相关*P*值未进行多重比较校正，可能增加Ⅰ类错误风险，因此其中观察到的名义统计学显著性结果应视探索性发现谨慎解读。

联影uRT-linac 506c系统配置的诊断级FBCT，相比于CBCT在软组织分辨能力及低对比度密度分辨率方面具有明显优势[16]。国外研究报道显示相对于其他成像方式，FBCT可减少IGRT配准的不确定性，尤其是对于被软组织包围的肿瘤[17]。FBCT的优势有助于治疗团队更清晰地识别靶区与危及器官，降低配准的不确定性。

本研究进一步比较了一体化放疗流程（All-

in-one）与传统流程在时间效率方面的差异。All-in-one流程可借助预设勾画模板及自动计划模块，在约28 min内完成从定位至治疗实施的全过程。与传统流程相比，在整体流程用时方面具有一定的缩短优势。需要指出的是，在实际临床就医过程中，不同步骤之间的等待时间并未纳入本研究的统计范围。传统放疗流程中，由于定位、计划设计及治疗分别依赖不同部门的人力与设备系统，放疗计划在各环节间的衔接往往需要1~3 d，甚至数周才能完成。一体化流程可减少转运次数、降低误差累积。此外，540°机架旋转设计，在提高设备与患者之间的碰撞规避效率的同时，在治疗效率上亦具有优势[18]。当连续出现摆位误差偏大的情况时，还可及时联合临床医师与医学物理师重新评估并实施All-in-one流程。得益于一体化CT的设计，该系统能够在较短时间内完成误差评估与修正。

一体化CT的设计理念及其工作流程创新，为初创阶段的放疗中心提供了一种兼顾功能拓展与成本控制的可行方案。相较于同时配置常规直线加速器与独立CT模拟机的模式，该系统在设备投入和资源配置方面更具优势，并可在开展常规放疗的同时支持在线自适应放疗。然而，随着临床应用的深入，其潜在局限性亦逐渐显现。在患者数量增加的情况下，由于All-in-one流程在单例患者上的时间消耗高于常规加速器，设备治疗时段易出现紧张，从而对整体治疗效率产生消极的影响。

此外，当患者规模达到一定水平后，配置独立CT模拟机具有现实意义。一体化直线加速器所配备的CT机可进一步聚焦在线自适应放疗等高附加值应用，从而提高整体系统的临床效益。在体位与空间限制方面，70 cm的CT孔径虽可满足大多数患者的定位需求，但对于乳腺癌、肺癌等需双上肢上举的治疗体位，仍存在一定的碰撞风险，提示在临床实践中需加强体位设计与安全评估。此外，传统CT扫描模式下的辐射剂量问题亦值得关注。已有研究表明，重复高剂量CT扫描可能增加患者的额外辐射负担[19]。因此，除首次定位图像采集外，在图像引导及随访过程中优先采用低剂量CT模式，可能是降低患者累积剂量、提升整体治疗安全性的合理策略。

综上所述，联影uRT-linac 506c系统加速器所支持的一体化放疗流程在临床应用中显示出良好的可行性。该流程在保证治疗效果不劣于传统放疗流程的前提下，有望在设备配置与运行效率方面降低医疗机构的整体运营成本。同时，对于局部进展期直肠癌患者，一体化流程在缩短整体治疗周期及减轻相关经济负担方面也具有一定潜力。

第一作者：

王佳栋（ORCID: 0009-0005-9815-5450），放疗技师。

通信作者：

陆维（ORCID: 0009-0003-2935-7302），放疗主管技师，复旦大学附属肿瘤医院放疗科技术组副组长，E-mail: 94281196@qq.com。

作者贡献声明：

王佳栋：实施研究，数据收集与分析，论文撰写与修订。陆维：研究构思与设计，流程指导，论文关键修改。李乾永、陆敏：数据汇总与数据分析，审核论文。章真：提出研究方向，流程指导。

［参 考 文 献］

［1］ ZHENG R S, ZHANG S W, ZENG H M, et al. Cancer incidence and mortality in China, 2016[J]. J Natl Cancer Cent, 2022, 2(1): 1-9.

［2］ LIN Y, LIN H M, XU Z B, et al. Comparative outcomes of preoperative chemoradiotherapy and selective postoperative chemoradiotherapy in clinical stage T3N0 low and mid rectal cancer[J]. J Investig Surg, 2019, 32(7): 679-687.

［3］ 王雅琪, 申丽君, 万觉锋, 等. 短程放疗联合CAPOX和PD-1单抗用于局部进展期直肠癌全程新辅助治疗的前瞻性多中心随机二期临床研究(TORCH): 单中心初步结果分析[J]. 中华胃肠外科杂志, 2023, 26(5): 448-458.
WANG Y Q, SHEN L J, WAN J F, et al. Short-course radiotherapy combined with CAPOX and PD-1 inhibitor for the total neoadjuvant therapy of locally advanced rectal cancer: The preliminary single-center findings of a prospective, multicentre, randomized phase II trial (TORCH)[J]. Chin J Gastrointest Surg, 2023, 26(5): 448-458.

［4］ XIA F, WANG Y Q, WANG H, et al. Randomized phase II trial of immunotherapy-based total neoadjuvant therapy for proficient mismatch repair or microsatellite stable locally advanced rectal cancer (TORCH)[J]. J Clin Oncol, 2024, 42(28): 3308-3318.

［5］ 国家癌症中心, 国家肿瘤性疾病医疗质量控制中心, 放疗质量控制专家委员会. kV-CBCT图像引导放疗临床应用实践指南[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2025, 34(6): 520-537.
National Cancer Center, National Tumor Diseases Medical Quality Control Center, Radiation Therapy Quality Control Expert Committee. Guidelines for clinical application of kV-CBCT image-guided radiotherapy [J]. Chin J Radiat Oncol, 2025, 34(6): 520-537.

［6］ YU L, ZHAO J, ZHANG Z, et al. Commissioning of and

preliminary experience with a new fully integrated computed tomography linac［J］. J Appl Clin Med Phys, 2021, 22(7): 208-223.

［7］ 林志悦, 许晨迪, 李宗泰, 等. 基于一体化CT直线加速器图像引导放疗的宫颈癌不同体位固定方式的对比研究［J］. 中华肿瘤防治杂志, 2023, 30(15): 932-936.
LIN Z Y, XU C D, LI Z T, et al. Comparative study of different postural fixation methods for cervical cancer based on image-guided radiotherapy with CT-linac［J］. Chin J Cancer Prev Treat, 2023, 30(15): 932-936.

［8］ HAURI P, HÄLG R A, SCHNEIDER U. Technical Note: Comparison of peripheral patient dose from MR-guided ^{60}Co therapy and 6 MV linear accelerator IGRT［J］. Med Phys, 2017, 44(7): 3788-3793.

［9］ LIU J W, YAN H, CHENG H L, et al. CBCT-based synthetic CT generation using generative adversarial networks with disentangled representation［J］. Quant Imaging Med Surg, 2021, 11(12): 4820-4834.

［10］ 何　叶, 许　青, 胡晓钰, 等. 基于CBCT影像研究胸部肿瘤放疗中手臂位置对于摆位及治疗的影响［J］. 中国癌症杂志, 2019, 29(12): 961-964.
HE Y, XU Q, HU X Y, et al. The effect of arm position on placement and treatment in chest tumor radiotherapy based on CBCT imaging［J］. Chin Oncol, 2019, 29(12): 961-964.

［11］ 胡轶雯, 许　青, 夏　凡, 等. 探讨研究一站式放疗对直肠癌精准放疗摆位误差的影响［J］. 中国医疗器械信息, 2022, 28(5): 24-26.
HU Y W, XU Q, XIA F, et al. The study of all-in-one radiotherapy on the setup error of rectal cancer precision radiotherapy［J］. Chin Med Device Inf, 2022, 28(5): 24-26.

［12］ 王伟平, 孙　帅. 国产创新一体化放射治疗设备治疗腹盆腔肿瘤的临床指南［J］. 中国医学装备, 2025, 22(7): 1-9.
WANG W P, SUN S. Clinical guidelines for domestically innovative integrated radiotherapy equipment in treating abdominal and pelvic tumor［J］. Chin Med Equip, 2025, 22(7): 1-9.

［13］ DE CREVOISIER R, LAFOND C, MERVOYER A, et al. Image-guided radiotherapy［J］. Cancer/Radiothérapie, 2022, 26(1/2): 34-49.

［14］ 邓金慧, 梁恒坡, 刘文举, 等. 乳腺癌放疗中扇形束CT和锥形束CT图像引导放疗的比较研究［J］. 实用肿瘤杂志, 2023, 38(6): 582-586.
DENG J H, LIANG H P, LIU W J, et al. Comparative study of fan-beam CT and cone-beam CT image-guided radiotherapy in breast cancer radiotherapy［J］. J Pract Oncol, 2023, 38(6): 582-586.

［15］ 崔健淳, 陆　维, 李乾永. 体表引导自动摆位在盆腔肿瘤放疗中的临床应用价值［J］. 中国癌症杂志, 2024, 34(10): 966-971.
CUI J C, LU W, LI Q Y. Clinical application value of surface-guided automatic positioning in pelvic tumor radiotherapy［J］. Chin Oncol, 2024, 34(10): 966-971.

［16］ 谷晓芳. 放射治疗用锥形束CT图像引导设备技术审评要求探讨［J］. 中国医学物理学杂志, 2018, 35(9): 993-996.
GU X F. Requirements for technical review of CBCT image-guided radiotherapy system［J］. Chin J Med Phys, 2018, 35(9): 993-996.

［17］ MORROW N V, LAWTON C A, QI X S, et al. Impact of computed tomography image quality on image-guided radiation therapy based on soft tissue registration［J］. Int J Radiat Oncol, 2012, 82(5): e733-e738.

［18］ 张楼正, 许　青, 胡伟刚, 等. 联影可旋转540°机架直线加速器在容积调强放疗计划中的效率优势分析［J］. 中国癌症杂志, 2021, 31(10): 920-926.
ZHANG L Z, XU Q, HU W G, et al. Analysis of efficiency advantage of the United Imaging Healthcare (UIH) linac 540° gantry in volume intensity-modulated radiotherapy plan［J］. Chin Oncol, 2021, 31(10): 920-926.

［19］ XIA W J, SHAN H M, WANG G, et al. Physics-/ model-based and data-driven methods for low-dose computed tomography: A survey［J］. IEEE Signal Process Mag, 2023, 40(2): 89-100.

（收稿日期：2025-12-09　修回日期：2026-04-01）
（责任编辑：王琳辉）