

螺旋断层与固定野调强放射治疗对左侧乳腺癌保乳术后患者心脏亚结构的剂量学保护效应及近期疗效

郭艺航¹, 冯庆², 王立鹏¹, 张漫玉¹, 苏小强²
(唐山中心医院, 1 肿瘤科; 2 放射治疗科, 河北 唐山 063000)

【摘要】目的: 探讨螺旋断层放射治疗(TOMO)与固定野调强放射治疗(IMRT)对左侧乳腺癌保乳术后患者心脏亚结构的剂量学保护效应及近期疗效。**方法:** 选取 86 例左侧乳腺癌保乳术后大分割放疗患者为研究对象, 依据治疗方式不同分为 TOMO 组和 IMRT 组, 每组各 43 例。比较两组患者术后瘤床区影像学改变、靶区及危及器官剂量参数、超声心动图指标及毒副反应发生情况。**结果:** 放疗后 6 个月, TOMO 组患者靶区覆盖率 V95% 高于 IMRT 组 ($P<0.05$); 剂量适形度指数(CI) 高于 IMRT 组且更接近于 1 ($P<0.05$); 剂量均匀性指数(HI) 低于 IMRT 组 ($P<0.05$); 心脏和左心室的剂量学参数最大剂量(Dmax)、平均剂量(Dmean)、V5 Gy、V20 Gy 高于 IMRT 组 ($P<0.05$); 心脏的 V30 Gy 高于 IMRT 组 ($P<0.05$); 左前降支(LAD) Dmax、Dmean、V20 Gy 低于 IMRT 组 ($P<0.05$); 同侧肺脏 Dmean 及 V20 Gy 低于 IMRT 组 ($P<0.05$), 对侧肺脏与对侧乳腺 Dmean 及 V5 Gy 高于 IMRT 组 ($P<0.05$); 肱骨头(患侧) Dmean 与 V20 Gy 低于 IMRT 组 ($P<0.05$); LVEF 水平高于 IMRT 组 ($P<0.05$)。两组患者毒副反应发生情况比较, 差异无统计学意义 ($P>0.05$)。**结论:** 与 IMRT 相比, 左侧乳腺癌大分割放疗中 TOMO 靶区剂量质量更优, 可降低 LAD、同侧肺及肱骨头剂量, 但也在一定程度上增加了心脏整体及对侧结构剂量。

【关键词】 乳腺癌; 螺旋断层放射治疗; 固定野调强放射治疗; 剂量学参数; 心脏亚结构
【中图分类号】 R730.55; R737.9 **【文献标志码】** A

A comparative study of the dosimetric protection of cardiac substructures and short-term treatment outcomes between helical tomotherapy and fixed-field intensity-modulated radiation therapy in large-fraction radiotherapy following breast-conserving surgery for left-sided breast cancer

GUO Yi-hang¹, FENG Qing², WANG Li-peng¹, ZHANG Man-yu¹, SU Xiao-qiang²
(1. Department of Oncology; 2. Department of Radiation Therapy, Tangshan Central Hospital, Tangshan 063000, Hebei, China)

【Abstract】Objective: To investigate the dose-protective effects on cardiac substructures of Tomotherapy (TOMO) versus Intensity-Modulated Radiation Therapy (IMRT) with fixed fields during large-field radiotherapy following breast-conserving surgery for left-sided breast cancer, and to compare their short-term efficacy differences. **Methods:** A retrospective analysis of clinical data from 86 patients who underwent large-field radiotherapy after breast-conserving surgery for left-sided breast cancer. Patients were categorized by treatment modality into the TOMO group ($n=43$) and the IMRT group ($n=43$). The postoperative changes in the tumor bed region, target volume and organ at risk dose parameters, echocardiographic indicators, and the incidence of adverse reactions were compared between the two groups. **Results:** At 6 months post-radiotherapy, the TOMO group had a higher V95% coverage of the target volume than the IMRT group, a higher Conformity Index (CI) than the IMRT group that was closer to 1, and a lower Homogeneity Index (HI) than the IMRT group ($P<0.05$). In the TOMO group, the dosimetric parameters for the heart and left ventricle [maximum dose (Dmax), mean dose (Dmean), V5 Gy, and V20 Gy] were all higher than those in the IMRT group, and the V30 Gy for the heart was higher than that in the IMRT group ($P<0.05$). In the TOMO group, the Dmax, Dmean, and V20 Gy of the left anterior descending artery (LAD) were lower than those in the IMRT group ($P<0.05$). In the TOMO group, the Dmean and V20 Gy of the ipsilateral lung were lower

than those in the IMRT group ($P < 0.05$), while the Dmean and V5 Gy of the contralateral lung and contralateral breast were higher than those in the IMRT group ($P < 0.05$). The Dmean and V20 Gy of the humeral head (affected side) were lower than those in the IMRT group ($P < 0.05$), the LVEF level in the TOMO group was higher than that in the IMRT group ($P < 0.05$). There was no statistically significant difference in the incidence of adverse reactions between the two groups ($P > 0.05$).

Conclusion: Compared with IMRT, TOMO delivers superior dose quality to the target volume in high-dose fractionation radiotherapy for left-sided breast cancer. It reduces doses to the left anterior descending artery, ipsilateral lung, and humeral head, but also increases overall cardiac dose and dose to contralateral structures to some extent.

【Key words】 Breast cancer; Helical-tomography-guided radiotherapy; Fixed-field intensity-modulated radiotherapy; Dosimetric parameters; Cardiac substructures

乳腺癌位居女性恶性肿瘤发病率首位。随着早期诊断技术的发展,保乳手术联合术后放疗已成为早期乳腺癌标准治疗策略之一,其在降低患者疾病局部区域复发风险的同时,有助于乳房外形保留^[1-2]。但左侧乳腺癌患者因心脏、冠状动脉解剖邻近胸壁,术后放疗中的放射性心脏损伤风险较高。调强放疗(intensity-modulated radiotherapy, IM-RT)通过逆向优化算法调控靶区剂量分布,确保肿瘤靶区处方剂量的同时,减少邻近危及器官辐射暴露^[3]。螺旋断层放射治疗(TomoTherapy treatment System, TOMO)则融合了CT成像与直线加速器技术,基于CT影像引导实现360°调强断层照射,在多种肿瘤放疗治疗中表现出较优的剂量适形性和靶区覆盖能力^[4-5]。目前,针对左侧乳腺癌保乳术后放疗患者,TOMO、IMRT两种模式对其心脏亚结构的剂量学保护效应比较研究仍较为有限。本研究旨在探讨大分割放疗中TOMO与IM-RT对左侧乳腺癌保乳术后患者心脏亚结构的剂量学保护效应及近期疗效。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取2020年9月至2025年2月唐山中心医院收治的86例左侧乳腺癌保乳术后大分割放疗患者为研究对象,依据治疗方式分为TOMO组和IM-RT组,每组各43例。本研究经医院伦理委员会批准,患者及其家属知情同意。两组患者一般资料比较,差异无统计学意义($P > 0.05$)。见表1。纳入标准:(1)术后病理确认为原发性左侧乳腺癌,AJCC分期0~Ⅱ期;(2)接受左侧乳腺癌保乳手术,术中肿瘤病灶完全切除,切缘阴性;(3)年龄18~75岁,美国东部肿瘤协作组体能状态评分为0或1分;(4)术后实施大分割放疗方案;(5)临床资料完整。排除标准:(1)术前接受过新辅助化疗(包括内分泌、免疫治疗等);(2)肿瘤同时存在于双侧乳腺;(3)合并其他器官原发性癌;(4)既往接受过胸部区域放射治疗,或放疗区域伴皮肤溃疡、感染等;(5)放疗过程中因严重并发症导致治疗中断或计划变更;(6)患有严

重心脏疾病(如心肌梗死病史、心力衰竭、严重心律失常等)。

表1 两组患者一般资料比较 $[\bar{x} \pm s, n(\%)]$

资料	TOMO组($n=43$)	IMRT组($n=43$)	t/χ^2 值	P 值
年龄(岁)	52.75±8.14	53.46±7.63	0.417	0.678
体质量指数(kg/m ²)	23.91±3.04	23.75±2.98	0.232	0.817
肿瘤最大径(cm)	2.17±0.62	2.20±0.56	0.235	0.814
临床分期			0.262	0.877
0期	4(9.30)	3(6.98)		
I期	21(48.84)	23(53.49)		
Ⅱ期	18(41.86)	17(39.53)		
浸润性导管癌/其他	36(83.72)	37(86.05)	0.091	0.763
	/7(16.28)	/6(13.95)		
激素受体状态				
ER阳性	32(74.42)	34(79.07)	0.261	0.610
PR阳性	30(69.77)	32(74.42)	0.231	0.631
HER2阳性	10(23.26)	8(18.60)	0.281	0.596
全乳CTV体积(cm3)	594.26±103.71	601.09±114.08	0.290	0.772

1.2 方法

1.2.1 螺旋CT定位 患者仰卧于乳腺托架上,双侧上肢外展上举扶杆,于体表标记激光定位线,控制每日治疗摆位误差(3 mm以内)。使用16排螺旋CT扫描仪模拟定位,扫描范围为环状软骨水平(即环甲膜)→膈肌下缘(约平第10胸椎下界),扫描层厚、层间距均为2.5 mm。扫描时,患者保持平静浅快呼吸模式,尽量避免深吸气、咳嗽等,减少对定位精准度的干扰。采集的CT图像传送至放射治疗计划系统(treatment planning system, TPS)。

1.2.2 靶区勾画 由资深放射肿瘤科医师完成,在TPS系统中进行。靶区勾画标准:(1)瘤床靶区依术中植入钛夹位置、术后血清肿范围、术前影像异常信号区域界定;(2)临床靶区(clinical target volume, CTV)涵盖全部左侧乳腺腺体组织,前界距皮肤表面约5 mm以避免皮肤反应区,后界止于胸大肌筋膜前缘,内界达胸骨旁,外界至腋中线或背阔肌前缘。若患者存在腋窝淋巴结转移,需勾画区域淋巴结引流区;(3)计划靶区(planning target volume, PTV)在临床靶区基础上,考虑到摆位误差、器官运

动因素,三维方向各外扩 5~8 mm。朝向体表方向参照皮肤轮廓修正;朝向肺侧则依呼吸运动评估结果调整。在危及器官方面,重点明确心脏及亚结构、对侧乳腺、双肺、甲状腺、食管、脊髓、肱骨头等。所有危及器官均须明确解剖边界,后续将依据其剂量约束条件优化。

1.2.3 处方剂量与危及器官限量 两组患者均接受大分割放疗,PTV 处方剂量为 42.56 Gy,分 16 次照射,2.66 Gy/次,1 次/d。全乳照射完成后,对瘤床靶区(PGTVt)行局部加量照射,加量处方剂量为 9.6 Gy,分 4 次照射,2.4 Gy/次。PTV 与 PGTVt 序贯进行,1 次/d,每周连续照射 5 d,总疗程为 4 周。对于腋窝淋巴结阳性、需行淋巴引流区预防或根治性照射者,淋巴引流区 PTV 采用同步整合加量技术,处方剂量同样为 42.56 Gy/16 次。危及器官剂量约束方面,心脏平均受照剂量(Dmean)≤8 Gy,左前降支最大受照剂量(Dmax)≤30 Gy;双侧肺组织 V20 限制在<20%;脊髓 Dmax≤45 Gy;食管 Dmax≤35 Gy。所有放疗计划,均需确保靶区处方剂量覆盖充分,并最大限度降低周围正常组织受照剂量。

1.2.4 放疗计划 TOMO 组基于螺旋断层放疗系统完成,患者 CT 定位图像、勾画靶区与危及器官结构集成至 TOMO 放疗计划系统。采用螺旋断层照射模式实施,照射野宽度可选 2.5 cm 或 5.0 cm,螺距 0.287~0.430,调制因子 2.5~3.8。优化阶段优先保障靶区处方剂量的充分覆盖,同时维持剂量均匀性指数(homogeneity index, HI)≤1.15 且适形度指数(conformity index, CI)≥0.85,在此基础上,加重危及器官的优化权重。计划设计完成后,采用三维剂量验证系统进行剂量验证,若实测与计划剂量偏差不超过 3%,则验证通过。若验证未通过,则需重新优化,直至验证合格,方可进入治疗阶段。IMRT 组患者基于医用直线加速器执行,采用调强放疗技术设计。将 CT 模拟定位图像、靶区及危及器官解剖结构数据等导入调强放疗计划系统,进行三维重建,计算剂量。计划设计采用固定野调强模式,设置 5~7 个共面或非共面照射野,照射方向以切线野为主导,结合辅助射野优化。计划优化采用逆向算法,精细化调控各射野通量图,确保处方剂量覆盖 95% PTV 体积,HI≤1.15,CI≥0.85。在危及器官保护方面,控制全心脏及各亚结构剂量,兼顾双肺、脊髓等正常组织限量要求。计划优化完成后,经二维电离室矩阵或电子射野影像系统验证,偏差 3%以内为合格。

1.3 观察指标

(1)影像学疗效^[6]:放疗结束后 6 个月对患者进行影像学随访(乳腺 MRI 动态增强扫描),将瘤床区影像学改变分为完全纤维化改变(原瘤床区域无异常强化灶,术后改变区呈无强化,或仅轻微线状、条索状强化)、部分纤维化改变(瘤床区片状、不规则强化,但范围较基线缩小,或者强化程度有所减弱)、可疑强化灶(瘤床区新发结节状、团块状强化,或原有强化灶继续增大,需穿刺活检明确是否出现局部复发)。(2)靶区剂量学参数:基于剂量体积直方图,获取两组 PTV 相关剂量学指标,采集最大剂量(Dmax)、最小剂量(Dmin)、平均剂量(Dmean)参数,记录两组 V95%具体数值。剂量均匀性采用 HI 评估,HI=(D2%-D98%)/D50%,该值愈趋近于 0 代表剂量分布愈均匀。剂量适形度则通过 CI 评估,CI=(Vt,ref/Vt)×(Vt,ref/Vref),其中 Vt 为 PTV 总体积,Vref 为接受≥95%处方剂量总体积,Vt,ref 代表接受≥95%处方剂量靶区体积,CI 值愈接近 1 代表剂量分布与靶区形态适形程度越高。(3)心脏及心脏亚结构剂量参数:评估心脏整体及各亚结构受照剂量,重点观察的亚结构包括左心室、右冠状动脉、左前降支(left anterior descending artery, LAD)、左右心房。心脏整体层面剂量学指标包括最大剂量(Dmax)、平均剂量(Dmean)以及接受≥5 Gy、20 Gy 和 30 Gy 剂量的体积百分比(V5Gy、V20Gy、V30Gy)。LAD 剂量学指标包括 Dmean、Dmax 及 V20Gy;左心室剂量学指标包括 Dmean、Dmax、V5Gy 和 V20Gy;右冠状动脉剂量学指标包括 Dmean 与 Dmax;左、右心房剂量学指标包括 Dmean 值。(4)其他危及器官剂量学指标:评估其他关键危及器官照射剂量,涉及对侧乳腺、双肺、脊髓、食管、甲状腺、患侧肱骨头等结构。对侧乳腺评估指标包括 Dmean 和 V5Gy;同侧肺脏剂量学指标包括 Dmean、V5Gy、V20Gy;对侧肺脏剂量学指标包括 Dmean 及 V5Gy;脊髓剂量学指标包括 Dmax;患侧肱骨头剂量学指标包括 Dmean 及 V20Gy;食管剂量学指标包括 Dmean 与 Dmax;若甲状腺位于照射野内,则记录其 Dmean 和 Dmax。(5)超声心动图检查指标:放疗前及放疗结束后 6 个月,采用超声心动图测定左心室射血分数(left ventricular ejection fraction, LVEF)、左心室短轴缩短率(fractional shortening, FS)及舒张早期充盈峰速度(E 峰)与舒张晚期充盈峰速度(A 峰)的比值(ratio of early to late diastolic mitral flow velocity, E/A)等心功能参数。(6)毒副反应发生情况:参照肿瘤放射治疗协作组(radiation therapy oncology

group,RTOG)^[7]放射损伤分级标准评价。

1.4 统计学分析

采用 SPSS27.0 软件对数据进行处理与分析。计量资料符合正态分布且方差齐性,以($\bar{x} \pm s$)表示,组间比较行独立样本 t 检验;计数资料以 $[n(\%)]$ 表示,组间比较行独立样本 χ^2 检验;等级资料比较行秩和检验, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组患者影像学疗效比较

放疗后 6 个月,TOMO 组患者瘤床区呈完全纤维化改变者 15 例,部分纤维化改变者 28 例;IMRT 组完全纤维化改变者 13 例,部分纤维化改变者 29 例,出现可疑强化灶者 1 例。两组患者影像学疗效比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。

2.2 两组患者靶区剂量学参数比较

TOMO 组患者靶区覆盖率 V95% 高于 IMRT 组,差异有统计学意义($P<0.05$);TOMO 组患者 CI 值高于 IMRT 组且更接近于 1;HI 值低于 IMRT 组,差异均有统计学意义($P<0.05$)。见表 2。

表 2 两组患者靶区剂量学参数比较($\bar{x} \pm s$)				
参数	TOMO 组($n=43$)	IMRT 组($n=43$)	t 值	P 值
Dmax(cGy)	42.75±1.08	43.11±1.16	1.489	0.140
Dmin(cGy)	38.46±1.34	37.98±1.41	1.618	0.109
Dmean(cGy)	40.62±0.47	40.50±0.55	1.088	0.280
CI	0.83±0.07	0.79±0.05	3.049	0.003
HI	0.10±0.03	0.13±0.04	3.934	<0.001
靶区覆盖率 V95%(%)	98.49±1.73	97.61±1.84	2.285	0.025

2.3 两组患者心脏及心脏亚结构剂量学参数比较

心脏整体和左心室 TOMO 组患者 Dmax、Dmean、V5 Gy、V20 Gy 均高于 IMRT 组($P<0.05$);LAD TOMO 组患者 Dmax、Dmean、V20 Gy 均低于 IMRT 组($P<0.05$)。见表 3。

2.4 两组患者其他危及器官剂量学指标比较

同侧肺脏 TOMO 组患者 Dmean 及 V20 Gy 均低于 IMRT 组;对侧肺脏 Dmean 及 V5 Gy 均高于 IMRT 组;对侧乳腺 Dmean 及 V5 Gy 均高于 IMRT 组;肱骨头(患侧)Dmean 与 V20 Gy 均低于 IMRT 组,差异均有统计学意义($P<0.05$)。见表 4。

2.5 两组超声心动图检查指标水平比较

放疗后 6 个月,TOMO 组患者 LVEF 水平高于 IMRT 组,差异有统计学意义($P<0.05$)。见表 5。

2.6 两组患者毒副反应发生情况比较

两组患者毒副反应发生情况比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。见表 6。

表 3 两组患者心脏及心脏亚结构剂量学参数比较($\bar{x} \pm s$)

参数	TOMO 组($n=43$)	IMRT 组($n=43$)	t 值	P 值
心脏整体				
D _{max} (cGy)	38.86±4.83	36.03±5.05	2.656	0.010
D _{mean} (cGy)	6.69±1.19	5.71±1.41	3.483	0.001
V5 Gy(%)	42.74±7.33	38.05±8.20	2.796	0.006
V20 Gy(%)	5.67±1.24	4.83±1.17	3.231	0.002
V30 Gy(%)	3.46±1.01	2.80±0.85	3.279	0.002
左心室				
D _{max} (cGy)	35.83±6.09	32.93±5.41	2.335	0.022
D _{mean} (cGy)	5.86±1.13	4.91±1.20	3.779	<0.001
V5 Gy(%)	39.45±8.14	34.14±7.06	3.232	0.002
V20 Gy(%)	9.23±2.15	7.56±2.20	3.560	0.001
LAD				
D _{max} (cGy)	29.50±4.23	33.17±5.05	3.653	<0.001
D _{mean} (cGy)	15.09±2.96	17.28±3.17	3.311	0.001
V20 Gy(%)	29.77±5.88	34.80±6.49	3.766	<0.001
右冠状动脉				
D _{max} (cGy)	3.94±0.89	3.66±0.93	1.426	0.158
D _{mean} (cGy)	15.38±3.34	14.49±3.01	1.298	0.198
心房				
左心房 D _{mean} (cGy)	4.70±1.30	4.52±1.06	0.704	0.484
左心房 D _{mean} (cGy)	3.29±0.95	3.05±0.90	1.203	0.233

表 4 两组患者其他危及器官剂量学指标比较($\bar{x} \pm s$)

指标	TOMO 组($n=43$)	IMRT 组($n=43$)	t 值	P 值
同侧肺脏				
D _{mean} (cGy)	10.78±1.82	11.80±2.11	2.400	0.019
V5 Gy(%)	48.23±6.53	47.96±6.44	0.193	0.847
V20 Gy(%)	19.63±3.07	21.45±3.30	2.648	0.010
对侧肺脏				
D _{mean} (cGy)	1.73±0.52	1.48±0.41	2.476	0.015
V5 Gy(%)	5.26±1.47	4.41±1.09	3.046	0.003
对侧乳腺				
D _{mean} (cGy)	2.57±0.73	2.23±0.62	2.328	0.022
V5 Gy(%)	8.01±1.91	7.25±1.44	2.083	0.040
脊髓				
	9.51±2.20	9.80±1.83	0.665	0.508
食管				
D _{mean} (cGy)	4.23±1.11	4.49±1.02	1.131	0.261
D _{max} (cGy)	16.74±3.83	17.52±2.96	1.057	0.294
甲状腺				
D _{mean} (cGy)	9.51±1.88	10.04±1.45	1.464	0.147
D _{max} (cGy)	26.94±7.11	28.10±6.61	0.784	0.436
肱骨头(患侧)				
D _{mean} (cGy)	13.24±3.04	15.06±3.17	2.717	0.008
V20 Gy(%)	25.26±5.17	28.09±6.28	2.281	0.025

表 5 两组超声心动图检查指标水平比较($\bar{x} \pm s$)

指标	TOMO 组($n=43$)	IMRT 组($n=43$)	t 值	P 值
LVEF(%)				
放疗前	65.24±3.20	65.40±4.05	0.203	0.839
放疗后 6 个月	63.11±3.08	61.43±3.73	2.277	0.025
FS(%)				
放疗前	35.72±3.04	35.83±3.35	0.159	0.874
放疗后 6 个月	34.66±2.96	33.97±3.17	1.043	0.300
E/A 比值				
放疗前	1.19±0.18	1.17±0.15	0.560	0.577
放疗后 6 个月	1.15±0.13	1.11±0.14	1.373	0.173

表 6 两组患者毒副反应发生情况比较

毒副反应	TOMO 组(<i>n</i> =43)	IMRT 组(<i>n</i> =43)	Z 值	P 值
急性放射性皮炎(例)			0.015	0.988
0 级	6	5		
I 级	27	29		
II 级	10	9		
III 级	0	0		
IV 级	0	0		
急性放射性食管炎(例)			0.224	0.823
0 级	31	30		
I 级	11	12		
II 级	1	1		
III 级	0	0		
IV 级	0	0		
急性放射性肺炎(例)			0.903	0.367
0 级	38	35		
I 级	4	6		
II 级	1	2		
III 级	0	0		
IV 级	0	0		
急性放射性心脏损伤(例)			0.832	0.405
0 级	41	39		
I 级	2	4		
II 级	0	0		
III 级	0	0		
IV 级	0	0		
晚期放射性肺损伤(例)			0.812	0.417
0 级	41	39		
I 级	1	3		
II 级	1	1		
III 级	0	0		
IV 级	0	0		
晚期放射性心脏损伤(例)			1.018	0.309
0 级	42	40		
I 级	1	2		
II 级	0	1		
III 级	0	0		
IV 级	0	0		
晚期放射性皮肤损伤(例)			0.334	0.739
0 级	39	38		
I 级		4		
II 级		1		
III 级		0		
IV 级		0		

3 讨论

IMRT 通过逆向优化计算的方式,对病灶实施 CT 定位,随后将影像资料传入计划系统,由系统勾画靶区,输入处方剂量和危及器官剂量限值,确定入射方向、照射野等,进一步计算优化得到最接近于目标函数的计划方案^[8-9]。和传统三维适形放疗相比,IMRT 的应用明显改善靶区剂量均匀性,并在降低心脏、肺脏及其它邻近危及器官受照剂量方面展现出一定的优势^[10]。TOMO 联合 CT 螺旋扫描与直线加速器放疗,是一种新型图像引导下的调强放疗治疗技术,在环形机架上安装直线加速器(6 MV),围绕治疗床 360°旋转出束,机架角度改变过

程中叶片位置也发生改变,具有适形度良好、剂量均匀、陡峭剂量梯度等优势^[11]。对于保乳术后放疗患者,综合评估不同放疗技术的应用效果和安全性,制定精准个性化治疗方案,对改善预后具有重要意义。

本研究放疗后 6 个月结果显示,在剂量分布方面,TOMO 组患者 CI 值高于 IMRT 组且更接近于 1($P<0.05$);HI 值低于 IMRT 组($P<0.05$)。其中 CI 是量化描述处方剂量与靶区形态二者吻合度的参数,其愈接近 1 代表二者越趋于一致;而 HI 则是衡量靶区剂量分布均匀程度的参数,其值越小则提示剂量分布越均匀^[12]。本组数据反映出在靶区适形性、剂量均匀性方面 TOMO 具有更明显的优势,可能归因于 TOMO 的基本技术特点,其采用的是螺旋断层照射,在治疗过程中,围绕患者机架作 360°的连续旋转,并借助多叶光栅精准调控射束强度,相较于 IMRT 剂量梯度和靶区适形能力均更强。吉维等^[13]研究指出,与 IMRT 与三维适形放疗比较,TOMO 凭借其高度调制的旋转射束,适形度、均匀性均更优,且剂量梯度更陡。Cheng 等^[14]在乳腺癌患者中的比较研究也发现,TOMO 靶区覆盖率、剂量均匀性均优于 IMRT。同时,本研究也观察到,TOMO 组患者靶区覆盖指标 V95%高于 IMRT 组($P<0.05$),进一步说明 TOMO 剂量覆盖优势。

在心脏及心脏亚结构剂量学参数方面,本研究结果显示,在心脏整体层面,TOMO 组患者 Dmax、Dmean 及 V5、V20、V30 高于 IMRT 组($P<0.05$),与此同时左心室各项剂量指标也呈现相同的趋势,提示在心脏整体及左心室照射剂量控制方面,IMRT 表现出更佳的剂量学特性。而对于心脏关键分支 LAD,TOMO 组患者 Dmax、Dmean 及 V20 低于 IMRT 组($P<0.05$)。此外,两组患者右冠状动脉、左右心房剂量学参数比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。上述剂量学特征表现与 TOMO、IMRT 物理实现方式相关,IMRT 为固定野照射,射束角度相对固定,主要集中于患侧胸壁、乳腺区域,虽能一定程度上避让对侧正常结构,但射束路径受到明显限制,能量分布缺乏灵活调制能力,不能有效规避照射紧贴胸壁走行的心脏结构,尤其是 LAD(前室间沟区域),易导致局部高剂量沉积^[15]。而 TOMO 为螺旋断层照射模式,机架 360°旋转,通过多叶光栅逐层调制射束强度,在空间上射束全域分布,丰富了入射角度,增强了能量的均衡分布,减少了单一方向射束权重。Zureick 等^[16]研究显示,LAD 所受最大剂量是影响左心室射血分数,导致心肌应变能力下降的重要预测因子,反映了局部高剂量对于关键亚结构损伤的不良影响。本研究放疗后 6 个月超声心动图结果也显示,TOMO 组患者 LVEF 水平高于 IM-

RT 组($P<0.05$)。LAD 供血区域占比高达左心室心肌血流量的 40%~50%, 本研究中 TOMO 组患者 LAD 更低的剂量指标为心功能保留提供基础。

在其他危及器官剂量学参数方面, 本研究结果显示, TOMO 技术可有效降低左前降支、同侧肺脏、患侧肱骨头照射剂量, 但同时心脏整体、左心室、对侧肺脏、对侧乳腺受照剂量均有所增加。IMRT 依赖于固定野切线照射, 路径较为集中, 致使对侧肺脏、对侧乳腺处于直接照射范围之外, 主要辐射来源于散射线, 剂量控制效果较佳, 但因射束角度有限, 当靶区靠近胸腔或形态不规则时, 同侧肺脏中高剂量区(V20)规避存在较大的困难。相较之下, TOMO 射束可从多个角度穿透人体, 这种照射方式将集中于切线方向的剂量分散, 进而优化剂量分布, 使高剂量区适应靶区形态, 减少同侧肺等邻近危及器官中高剂量照射(V20)。此外, 由于 TOMO 射束路径多元, 穿过不同组织时能量逐步衰减, 使得与靶区距离较远的器官例如肱骨头亦得到更好的保护^[17]。然而 TOMO 旋转照射特性也决定了其对对侧正常组织不可避免产生一定的低剂量照射, 对侧肺脏、对侧乳腺均产生低剂量辐照, 主要体现在 V5 水平升高。在脊髓、食管、甲状腺等指标方面, 两组患者比较, 差异无统计学意义($P>0.05$), 提示对于上述远离靶区的器官, TOMO 与 IMRT 均能保持安全范围剂量。两组患者治疗期间均未观察到Ⅲ级及以上严重毒副反应, 且两组患者急性放射性皮炎、食管炎、肺炎、心脏损伤及晚期放射性肺损伤、心脏损伤、皮肤损伤发生情况比较, 差异无统计学意义($P>0.05$), 说明安全性良好。

综上, 与 IMRT 相比, 左侧乳腺癌大分割放疗中 TOMO 靶区剂量质量更优, 可降低 LAD、同侧肺及肱骨头剂量, 但也在一定程度上增加了心脏整体及对侧结构剂量。

参考文献

[1] 李艺贤, 黄明全, 王海燕, 等. 带蒂胸外侧动脉穿支皮瓣与乳房成形术在早期乳腺癌保乳整形中的应用效果比较[J]. 中国普通外科杂志, 2025, 34(5): 953—962.

[2] 魏晟, 邵国梅, 王金明, 等. 热塑体膜固定对乳腺癌保乳术后放疗摆位准确性及其影响因素分析[J]. 中南医学科学杂志, 2025, 53(4): 690—692, 745.

[3] Cao L, Ou D, Qi WX, *et al.* A randomized trial of early cardiotoxicity in breast cancer patients receiving postoperative IMRT with or without serial cardiac dose constraints[J]. International Journal of Cancer, 2025, 156(6): 1213—1224.

[4] Loap P, Uakkas A, Bouziane J, *et al.* Long-term cardiac out-

comes in breast cancer patients treated with helical tomotherapy: Evaluating the applicability of 3D-based dose constraints for intensity modulated radiation therapy [J]. International Journal of Cancer, 2025, 157(7): 1386—1394.

[5] 刘梦岚, 吉维, 赵彪, 等. 左乳腺癌保乳术后瘤床同步加量静态调强放射治疗与断层定野放射治疗的剂量学研究[J]. 中国现代医学杂志, 2022, 32(11): 73—78.

[6] Skarping I, Förrvik D, Heide-Jørgensen U, *et al.* Neoadjuvant breast cancer treatment response: tumor size evaluation through different conventional imaging modalities in the Neodense study[J]. Acta Oncologica, 2020, 59(12): 1528—1537.

[7] Randomized A, Iii P, Wong S, *et al.* Radiation Therapy oncology Group[J]. Journal of the National Cancer Institute. Monographs, 2010, 6(7): 418—418.

[8] 王园园, 赵思旭, 陈超, 等. 探索乳腺癌保乳术后 Hybrid-IMRT 计划中 3D-CRT 和 IMRT 处方权重对计划质量的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2025, 43(6): 47—57.

[9] Zaratim GRR, dos Reis RG, dos Santos MA, *et al.* Automated treatment planning for whole breast irradiation with individualized tangential IMRT fields [J]. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 2024, 25(5): e14361.

[10] Wang N, Chen L, Huang G, *et al.* Influence of minimum segment width on intensity-modulated radiotherapy plan for left-sided breast cancer after breast conserving surgery[J]. Medicine, 2023, 102(46): e36064.

[11] Zwicker F, Raether LP, Klepper R, *et al.* Long-term outcomes of helical tomotherapy in lymph node-positive breast cancer following breast-conserving surgery[J]. Anticancer Research, 2025, 45(5): 2025—2040.

[12] Chai C, Shao K, Shan G, *et al.* Dosimetric study of TrueBeam single-isocenter vs. Halcyon dual-isocenter VMAT radiotherapy plans for postoperative left-sided breast cancer [J]. BMC Cancer, 2025, 25(1): 1214.

[13] 吉维, 刘梦岚, 文晓博, 等. 左侧乳腺癌保乳术后瘤床同步推量螺旋断层放疗与容积调强放疗的剂量学研究[J]. 国际肿瘤学杂志, 2021, 48(9): 532—536.

[14] Cheng HW, Chang CC, Shiao AC, *et al.* Dosimetric comparison of helical tomotherapy, volumetric-modulated arc therapy, intensity-modulated radiotherapy, and field-in-field technique for synchronous bilateral breast cancer [J]. Medical Dosimetry, 2020, 45(3): 271—277.

[15] Berlin E, Ko K, Ma L, *et al.* Cardiac effects of modern breast radiation therapy in patients receiving systemic cancer therapy [J]. JACC: CardioOncology, 2025, 7(3): 219—230.

[16] Zureick AH, Grzywacz VP, Almahariq MF, *et al.* Dose to the left anterior descending artery correlates with cardiac events after irradiation for breast cancer [J]. International Journal of Radiation Oncology Biology Physics, 2022, 114(1): 130—139.

[17] Oshi M, Nakayama T, Ota I, *et al.* Multidimensional impact of fixed-dose subcutaneous trastuzumab-pertuzumab on oncology workflow and patient time burden in a real-world study [J]. Breast Cancer, 2026, 33(1): 288—296.