

论著·临床研究

doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2023.09.019

网络首发 [https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1097.r.20230328.1115.012.html\(2023-03-28\)](https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1097.r.20230328.1115.012.html(2023-03-28))乳腺癌保乳术后 IMRT 和 3DCRT 的剂量学比较^{*}董晓庆,胡 杰,林 清[△]

(同济大学附属第十人民医院放射治疗科,上海 200072)

[摘要] **目的** 比较调强放疗(IMRT)技术和三维适形放疗(3DCRT)技术在乳腺癌保乳术后放疗的剂量学差异。**方法** 选取 2017 年 8 月至 2019 年 9 月在该院行保乳术后放疗的乳腺癌患者 80 例,同一影像分别设计 IMRT 和 3DCRT 计划,对比评估靶区均匀性指数(HI)、适形度指数(CI)、2%、98%靶区体积所受照射剂量(D_2 、 D_{98}),以及患侧肺、健侧肺、心脏、脊髓和乳头的剂量。**结果** 与 3DCRT 技术相比,IMRT 技术下全乳计划靶区(PTV)、瘤床加量计划靶区(PTVb)的 HI 降低,CI 升高,PTV 扣除 PTVb 区域(PTV-PTVb)的 D_2 、PTV-PTVb 中接近处方剂量 1.1 倍的体积(V_{55})降低 [V_{55} :145.10(100.84,227.25) cm^3 vs. 247.84(183.35,353.12) cm^3],差异均有统计学意义($P<0.05$)。与 3DCRT 技术相比,IMRT 技术下患侧肺 3 000、2 000 cGy 照射的体积百分比(V_{30} 、 V_{20})和平均剂量(D_{mean})降低,心脏 4 000 cGy 照射的体积百分比(V_{40})、 V_{30} 和 D_{mean} 降低,乳头的最大剂量(D_{max})、 D_{mean} 降低,脊髓的 D_{max} 升高,差异均有统计学意义($P<0.05$)。**结论** 与 3DCRT 技术相比,IMRT 技术在乳腺癌保乳术后放疗中更能提高靶区均匀性和适形度,降低靶区高剂量区体积,更好地保护危及器官。

[关键词] 乳腺癌;调强放射治疗;三维适形放射治疗;剂量学;危及器官**[中图法分类号]** R737.9 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2023)09-1373-06Dosimetric comparison between IMRT and 3DCRT after breast-conserving surgery for breast cancer^{*}DONG Xiaoping, HU Jie, LIN Qing[△]

(Department of Radiotherapy, Tenth People's Hospital of Tongji University, Shanghai 200072, China)

[Abstract] **Objective** To compare the dosimetric difference between intensity-modulated radiotherapy (IMRT) and three dimensional conformal radiotherapy (3DCRT) after breast conserving surgery for breast cancer. **Methods** A total of 80 cases of patients with breast cancer after conserving surgery in the hospital from August 2017 to September 2019 were selected. IMRT and 3DCRT plans were designed for the same image. The homogeneity index (HI), conformal index (CI), doses received by 2% and 98% of the planning target volume (D_2 , D_{98}) were compared and evaluated, as well as the doses of the ipsilateral lung, the contralateral lung, the heart, the spinal cord and the nipple. **Results** Compared with the 3DCRT technology, the HI of the whole breast planning target volume (PTV) and tumor bed boost planning target volume (PTVb) decreased and the CI increased under the IMRT technology, the D_2 of PTV-PTVb, and the volume (V_{55}) of the PTV-PTVb, which was close to 1.1 times of the prescribed dose, decreased [V_{55} :145.10 (100.84,227.25) cm^3 vs. 247.84 (183.35,353.12) cm^3], the differences were statistically significant ($P<0.05$). Compared with the 3DCRT technology, the volume percentage receiving 3 000 cGy and 2 000 cGy (V_{30} , V_{20}), and the mean dose (D_{mean}) of ipsilateral lung decreased. The volume percentage receiving 4 000 cGy (V_{40}), V_{30} and D_{mean} of heart, the maximum dose (D_{max}) and D_{mean} of nipple decreased, D_{max} of spinal cord increased under the IMRT technology, the differences were statistically significant ($P<0.05$). **Conclusion** Compared with 3DCRT technology, IMRT technology can increase the homogeneity and conformability of the target, reduce the volume of high-dose area in the target area and better protect organ at risk in the radiotherapy after breast conserving surgery for breast cancer.

[Key words] breast cancer; intensity-modulated radiotherapy; three-dimensional conformal radiation therapy; dosimetry; organs at risk

^{*} 基金项目:同济大学附属第十人民医院临床研究培育项目(05.12.20613)。 作者简介:董晓庆(1984—),工程师,硕士,主要从事肿瘤放射物理研究。 [△] 通信作者, E-mail: linqing.linda@163.com。

乳腺癌是全球女性发病率最高的肿瘤^[1], 目前在我国其发病率呈逐年上升趋势, 已跃居我国女性恶性肿瘤发病率之首。手术是乳腺癌患者的首选治疗方式, 其中改良根治术(modified radical mastectomy, MRM)与保乳手术(breast conservation surgery, BCS)为主要手术类型。欧美国家 50% 以上的 I、II 期乳腺癌患者接受 BCS, 但我国仅约 30% 的患者接受 BCS^[2]。放疗可使约 2/3 的患者避免术后局部复发, 对提高患者整体生存率, 降低局部复发率和远处转移率具有重要作用^[3]。CORRADINI 等^[4]研究保乳术后放疗的有效性, 结果表明保乳术后行放疗肿瘤的局部控制率和患者生存率会提高。李平等^[5]总结, 近年来保乳术后放疗取得多方面的进展, 尤其是放疗技术, 目前包含常规放疗(two dimensional radiotherapy, 2DRT)、三维适形放疗(three dimensional conformal radiotherapy, 3DCRT)、调强放疗(intensity modulated radiotherapy, IMRT)和容积旋转调强(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT)技术。由于科技的发展, 美国国家综合癌症网络(NCCN)乳腺癌治疗指南对乳腺癌术后放疗技术的推荐也在不断演变, 并在 2016 年首次将 IMRT 技术纳入 NCCN 乳腺癌治疗指南^[6]。保乳术后放疗采用不同放疗技术会产生剂量差异。为此, 本研究比较 IMRT 技术与 3DCRT 技术条件下乳腺癌保乳术后放疗剂量的优劣, 为临床选择合适的放疗技术提供参考。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取 2017 年 8 月至 2019 年 9 月在本院行保乳术后放疗的乳腺癌患者 80 例, 年龄 27~88 岁, 中位年龄 58.5 岁; 左侧乳腺癌 40 例, 右侧乳腺癌 40 例。采用第 8 版 TNM 分期标准进行术后分期, 其中 T₁N₀M₀ 患者 74 例, T₂N₀M₀ 患者 6 例。本研究经本院伦理委员会审核通过, 所有受试者均知情同意。

1.2 方法

1.2.1 仪器设备

放疗设备为 Synergy 直线加速器(瑞典医科达公司)和大孔径 20 排 CT 模拟定位系统 SOMATOM(德国西门子公司), 放疗计划设计系统为 Pinnacle9.11(荷兰飞利浦公司)。

1.2.2 计划基准影像获取

所有患者行大孔径 20 排 CT 模拟定位系统扫描获取计划基准影像。患者取仰卧位并以乳腺托架进行位置固定。乳腺托架平置, 双上臂上举, 外展 120°, 双手与头顶交叉。CT 扫描电压 120 kV, 电流 60 mA, 扫描层厚 5 mm。扫描范围上界为双侧乳突连线, 下界为乳腺下界以下 5~7 cm, 外侧包括完整胸廓。将患者 CT 图像传输至放疗计划设计系统。

1.2.3 靶体积与危及器官勾画

同一副主任医师勾画靶区, 主任医师审核。全乳腺临床靶区(clinical target volume primarily breast,

CTVpbr): 上界为可触及的乳腺上界, 一般不超过胸锁关节; 下界为 CT 图像可见乳腺脚端最下层; 前界为皮下 0.5 cm, 疤痕处酌情; 后界为胸大肌腹侧表面; 内界为胸骨旁; 外界为腋中线、乳腺反折及胸外侧动脉。瘤床加量区(clinical target volume primarily boost, CTVpbo): 以银夹、血清肿、术前铅靶、疤痕金属线为标志和象限勾画, 外放 0.5~1.0 cm 为 CTVpbo。计划靶区在各临床靶区(clinical target volume, CTV)基础上外扩 0.5 cm, 其中前界不外扩, 仍然取皮肤表面下 0.5 cm, 分别命名为全乳腺计划靶区(planning target volume, PTV)和瘤床加量计划靶区(planning target volume boost, PTVb)。危及器官包括左右肺、心脏、脊髓及乳头。

1.2.4 计划设计和优化

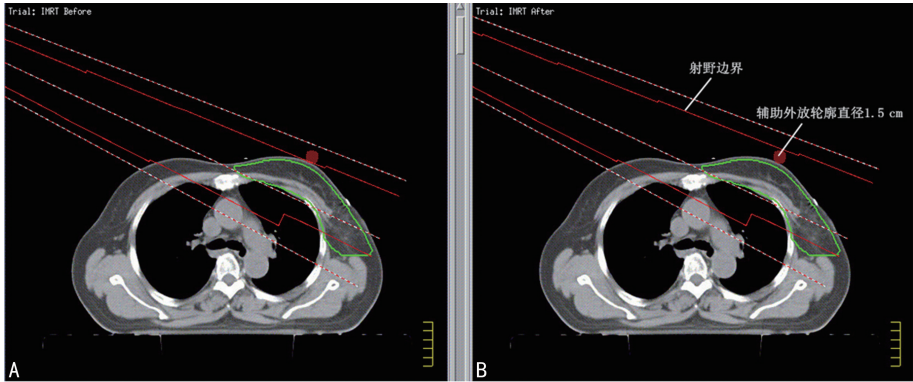
同一患者 CT 图像分别行 IMRT 技术(同期加量, 全乳腺剂量为 5 040 cGy/28 F, 瘤床 5 992 cGy/28 F)和 3DCRT 技术(序贯加量, 全乳腺剂量为 5 000 cGy/25 F, 然后对瘤床加量, 剂量为 1 000 cGy/5 F)。两种计划均要求 95% 的靶区体积达到 95% 的处方剂量。IMRT 计划设定为 7 野调强, 以对穿切线为基准, 根据患者胸廓情况和靶区的不同设置偏差 2°~4° 的两个对穿主野, 然后根据主野角度各布置 2 个往 0° 方向靠拢的调强野, 调强野与最近切线野夹角分别为 6° 和 12°, 此外为调整靶区剂量均匀度设置一个 0° 射野。考虑患者呼吸运动, 计划优化好后将除 0° 射野外的其他射野每个子野多叶光栅(multi-leaf collimator, MLC)按照辅助轮廓在皮肤一侧外放 1.5 cm(图 1、2), 重新计算剂量后再评估计划。3DCRT 计划对 CTVpbr 根据勾画靶区形状确定内外切线野的入射角度, 给予两个对穿切线野, 射野在皮肤外外放 1.5 cm。同时为避免靶区高剂量热点, 在每个切线野方向分别给予 2~3 个子野。对瘤床区给予两个垂直的楔形射野[0°、90°(左乳)或者 270°(右乳)]。IMRT 技术和 3DCRT 技术下的左乳保乳患者等剂量线分布示例见图 3。

1.2.5 计划评估参数

参考国际辐射单位与测量委员会(International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU)83 号报告设定剂量学评估参数。靶区评估: (1)PTV、PTVb 的 2%、98% 靶区体积所受照剂量(D₂、D₉₈)、均匀性指数(homogeneity index, HI)及适形度指数(conformity index, CI)。HI=(D₂-D₉₈)/D₅₀, 其中 D₅₀ 是 50% 靶区体积所受照剂量, HI 取值范围 0~1, HI 越接近 0, 说明靶区均匀性越好。CI=(TV_{Ri}/TV)×(TV_{Ri}/V_{Ri})^[7], 其中 TV_{Ri} 为处方剂量线所包绕的靶区体积, TV 为靶区体积, V_{Ri} 为处方剂量线所包绕的体积, CI 取值范围 0~1, CI 取值越接近 1, 说明靶区适形度越好。(2)PTV 扣除 PTVb 区域(planning target volume-planning target volume boost, PTV-PTVb)的 D₂ 及 PTV-PTVb 中接近处方

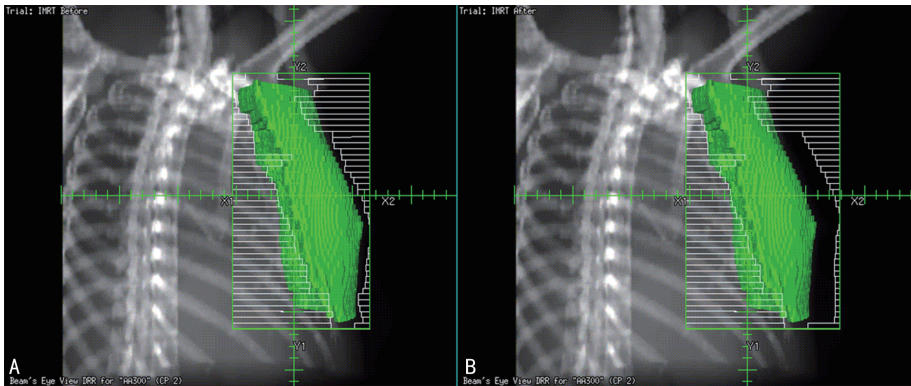
剂量 1.1 倍的体积(V_{55})。危及器官评估:(1)患侧肺和健侧肺接受 3 000、2 000、1 000、500 cGy 照射的体积百分比(V_{30} 、 V_{20} 、 V_{10} 、 V_5),平均剂量(D_{mean});(2)心

脏接受 4 000、3 000 cGy 照射的体积百分比(V_{40} 、 V_{30}), D_{mean} ; (3)脊髓的最大剂量(D_{max}); (4)乳头的 D_{max} 和 D_{mean} 。



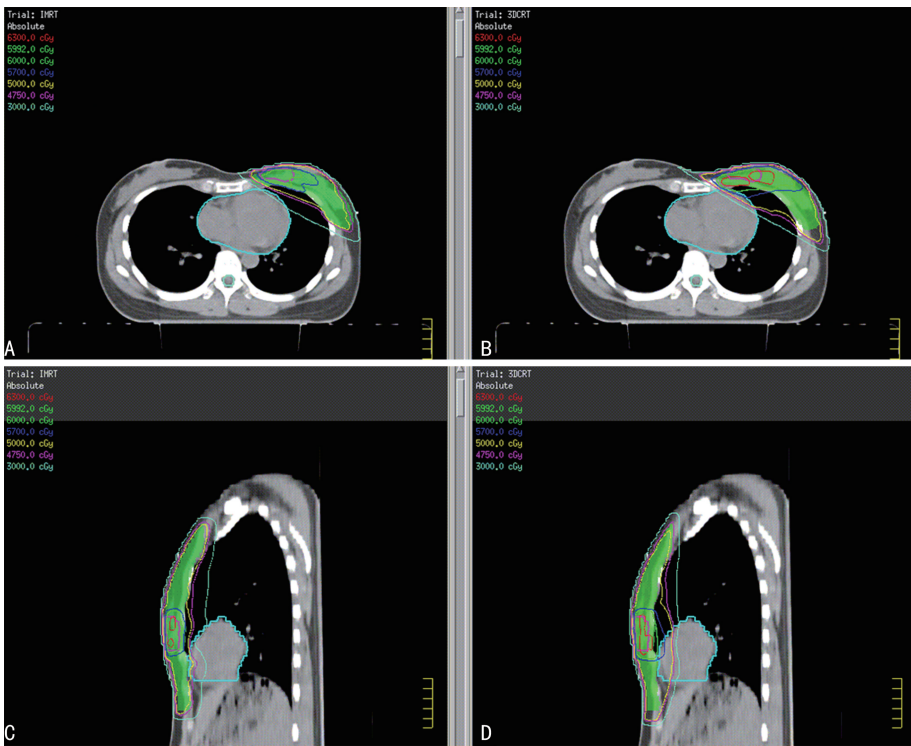
A:外放前射野;B:外放后射野。

图 1 调强射野边界外放 1.5 cm 示意图



A:未拉开 MLC 时射野形状;B:拉开 MLC 时射野形状。

图 2 子野 MLC 部分外放示意图



A:IMRT 横断位;B:3DCRT 横断位;C:IMRT 矢状位;D:3DCRT 矢状位。

图 3 左侧保乳乳腺癌患者的 IMRT 和 3DCRT 技术剂量分布示例

1.3 统计学处理

采用 SPSS21.0 软件进行数据统计分析,非正态分布计量资料以 $M(Q_1,Q_3)$ 表示,组间比较行 Wilcoxon 秩和检验,以 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 靶区剂量学评估

PTV:IMRT 技术下的 D_2 、HI 较 3DCRT 技术下低, D_{98} 、CI 较 3DCRT 技术下高,两种技术下各参数比较差异均有统计学意义($P<0.05$)。PTVb:IMRT 技术下的 D_2 、 D_{98} 、HI 较 3DCRT 技术下低,CI 较 3DCRT 技术下高,两种技术下各参数比较差异均有统计学意义($P<0.05$)。PTV-PTVb:IMRT 技术下的 D_2 和 V_{55} 较 3DCRT 技术下低,差异均有统计学意

义($P<0.05$)。见表 1。

2.2 危及器官剂量学比较

患侧肺:IMRT 技术下的 V_{30} 、 V_{20} 、 D_{mean} 较 3DCRT 技术下低,IMRT 技术下的 V_{10} 、 V_5 较 3DCRT 技术下高,差异均有统计学意义($P<0.05$)。健侧肺:IMRT 技术下与 3DCRT 技术下的 V_{30} 、 V_{20} 、 V_{10} 比较,差异均无统计学意义($P<0.05$);IMRT 技术下的 V_5 、 D_{mean} 较 3DCRT 技术下低,差异均有统计学意义($P<0.05$)。对于心脏,IMRT 技术下 V_{40} 、 V_{30} 、 D_{mean} 较 3DCRT 技术下低;对于乳头,IMRT 技术下的 D_{max} 、 D_{mean} 较 3DCRT 技术下低;对于脊髓,IMRT 技术下的 D_{max} 较 3DCRT 技术下高,但不超出脊髓限量,差异均有统计学意义($P<0.05$)。见表 2。

表 1 乳腺癌 IMRT 和 3DCRT 技术下治疗靶区剂量比较[$n=80,M(Q_1,Q_3)$]

项目	IMRT	3DCRT	P
PTV			
D_2 (cGy)	6 172.00(6 114.25,6 242.00)	6 364.50(6 284.00,6 419.50)	<0.001
D_{98} (cGy)	4 720.00(4 671.00,4 783.00)	4 685.00(4 643.00,4 741.00)	0.017
HI	0.27(0.26,0.28)	0.31(0.29,0.32)	<0.001
CI	0.67(0.61,0.71)	0.56(0.51,0.59)	<0.001
PTVb			
D_2 (cGy)	6 270.80(6 228.00,6 356.25)	6 424.50(6 356.00,6 470.75)	<0.001
D_{98} (cGy)	5 765.00(5 702.98,5 849.00)	5 849.00(5 719.50,5 978.50)	0.001
HI	0.08(0.07,0.09)	0.09(0.07,0.11)	0.014
CI	0.57(0.47,0.63)	0.39(0.32,0.43)	<0.001
PTV-PTVb			
D_2 (cGy)	5 713.00(5 604.00,5 771.65)	6 099.00(6 018.00,6 179.00)	<0.001
V_{55} (cm ³)	145.10(100.84,227.25)	247.84(183.35,353.12)	<0.001

表 2 乳腺癌 IMRT 和 3DCRT 技术下危及器官剂量比较[$n=80,M(Q_1,Q_3)$]

项目	IMRT	3DCRT	P
患侧肺			
V_{30} (%)	18.58(16.32,20.05)	21.95(18.04,23.94)	<0.001
V_{20} (%)	24.31(21.99,26.04)	25.89(21.42,27.87)	0.001
V_{10} (%)	34.30(32.54,36.36)	32.48(27.97,35.46)	<0.001
V_5 (%)	45.59(42.29,49.50)	44.28(38.87,48.71)	0.030
D_{mean} (cGy)	1 313.80(1 213.05,1 379.47)	1 390.45(1 181.55,1 519.47)	<0.001
健侧肺			
V_{30} (%)	0.00(0.00,0.00)	0.00(0.00,0.00)	0.317
V_{20} (%)	0.00(0.00,0.00)	0.00(0.00,0.00)	0.102
V_{10} (%)	0.00(0.00,0.00)	0.00(0.00,0.00)	0.471
V_5 (%)	0.01(0.00,0.19)	0.29(0.01,1.09)	<0.001
D_{mean} (cGy)	48.00(39.10,56.85)	80.35(56.72,95.92)	<0.001
心脏 ^a			
V_{40} (%)	2.87(1.17,3.98)	6.40(4.04,10.00)	<0.001

续表 2 乳腺癌 IMRT 和 3DCRT 技术下危及器官剂量比较[$n=80, M(Q_1, Q_3)$]

项目	IMRT	3DCRT	P
V ₃₀ (%)	5.47(3.01,6.42)	8.34(5.71,12.44)	<0.001
D _{mean} (cGy)	595.75(573.32,637.57)	754.80(614.40,1011.10)	<0.001
脊髓 D _{max} (cGy)	68.90(45.07,692.00)	52.30(43.00,63.25)	<0.001
乳头			
D _{max} (cGy)	4 477.00(4 274.50,4 639.25)	5 583.00(5 270.50,6 049.50)	<0.001
D _{mean} (cGy)	2 826.00(2 333.92,3 179.92)	3 745.45(3 223.20,4 337.15)	<0.001

^a:仅统计 40 例左侧乳腺癌患者。

3 讨 论

在乳腺癌保乳术后放疗中,有学者研究 3DCRT、IMRT、VMAT 等放疗技术条件下乳腺癌患者靶区和危及器官的剂量分布,结果显示不同治疗技术会产生不同的剂量差异^[8-10]。并且大量临床研究结果表明,IMRT 技术并不会增加乳腺癌的复发率^[11-14]。本研究结果表明,对于 PTV 和 PTVb,与 3DCRT 技术相比,同样在靶区满足 95%的处方剂量达到 95%的靶区体积情况下,IMRT 技术在均匀性、适形度更具有优势,与其他学者的研究结果相似^[15-16]。同时本文更深入地对比了 PTV-PTVb 区域高量 D₂ 及 V₅₅,IM-RT 技术明显降低乳腺区高量,这有利于降低发生乳腺组织纤维化的概率及相应的体积区域,满足患者更高的临床预后要求和美容效果。

IMRT 技术可根据肿瘤的三维形状通过调节辐射强度使辐射剂量更加精准,并通过多个子野调制辐射强度,使周围正常组织接收最小的辐射剂量。但是在乳腺癌放射治疗过程中,由于患者呼吸运动会造成靶区随胸廓的移位而移位,进而引起漏照的现象。QI 等^[17]研究自由呼吸对乳腺癌放疗的影响,器官运动最大幅度可达 0.88 cm,而一个呼吸运动周期内靶区处方剂量覆盖范围最大差异可达 5%。在使用 3DCRT 技术时,每个适形野可以在设置射野形状时将皮肤外外放 1.5 cm,减少呼吸运动带来的偏差。而 IMRT 技术则是给定优化目标,通过放疗计划设计系统自动算出每个子野,使得计划优化时射野在皮肤外无法外放。有学者在优化完乳腺癌计划后使用刷通量方法或者假组织补偿法来实现皮肤外外放^[18-20]。作者认为,通量外放方法剂量分布不直观,假组织补偿法添加假组织前后计划剂量分布差异较大。本研究采用飞利浦 Pinnacle 子野 MLC 外放方法,考虑器官最大呼吸动度 0.88 cm 和本机构测量加速器射野半影约 0.7 cm,优化结束后将 IMRT 计划每个射野子野在皮肤外 MLC 外放 1.5 cm,而在皮肤里的 MLC 不外放,然后重新计算剂量再评估计划。与既往研究不同,本研究因每个子野而异,部分外放,几乎不改变优化好的剂量分布,不会引起靶区高量,而且方法更直观,也易操作,并能保证计划真实性。本研究中 IMRT 技术既提高靶区的均匀性和适形度,同时又考虑了呼吸运动,防止靶区照射脱靶现象的发生。

与 3DCRT 技术相比,IMRT 技术在降低乳腺癌放射治疗中患侧肺的高量区、心脏平均剂量及皮肤高量方面也具有一定优势。本研究中 IMRT 技术下患侧肺 V₃₀ 中位数为 18.58%,而 3DCRT 技术下中位数为 21.95%。根据文献[21]报道,V₃₀ 与放射性肺损伤独立相关,V₃₀≤18%的患者放射性肺损伤发生率为 6%,而当 V₃₀>18%时,放射性肺损伤的发生率为 24%。说明 IMRT 技术对乳腺癌放疗控制患侧肺的高量区具有一定优势。有研究报道,乳腺癌放疗心脏平均剂量每增加 1 Gy,主要冠状动脉事件的风险增加 7.4%^[22]。而本研究中 IMRT 技术下心脏的 D_{mean} 较 3DCRT 技术下小,提示对心脏保护可能有一定优势。相较其他研究,本研究进一步分析了乳头周围皮肤剂量,IMRT 技术明显降低乳头周围皮肤的最大剂量,可提高美容效果。剂量越均匀,越不容易发生急性皮肤不良反应。较 3DCRT 技术,IMRT 技术的高适形度可以通过改善剂量均匀性来减少皮肤的急慢性不良反应。并且 IMRT 技术可以控制乳头剂量在 5 000 cGy 以下,这样可能减少乳头周围皮肤不良反应的发生。

综上所述,在乳腺癌保乳术后放疗中,相较于 3DCRT 技术,子野 MLC 外放的 IMRT 技术提高了靶区均匀性和适形度,降低了靶区高剂量区体积,可更好地保护危及器官,并且考虑了呼吸运动带来的偏差。从物理剂量上看,IMRT 技术在不给危及器官带来更多不良反应的情况下可能具有肿瘤控制率更好、长期美容效果更佳和生命质量改善更好的临床优势,并且能够缩短治疗周期,方便患者的同时又节省放疗资源。

参考文献

[1] SIEGEL R L, MILLER K D, FUCHS H E, et al. Cancer statistics, 2022[J]. CA Cancer J Clin, 2022, 72(1): 7-33.

[2] 阿依努尔,阿力比亚提·艾尼. 早期乳腺癌患者保乳术联合术后放疗与乳房全切术的疗效对比[J]. 现代肿瘤医学, 2022, 30(9): 1608-1613.

[3] EBCTCG (Early Breast Cancer Trialists' Collaborative Group), MCGALE P, TAYLOR C, et al.

- Effect of radiotherapy after mastectomy and axillary surgery on 10-year recurrence and 20-year breast cancer mortality: meta-analysis of individual patient data for 8 135 women in 22 randomised trials [J]. *Lancet*, 2014, 383(9935): 2127-2135.
- [4] CORRADINI S, NIYAZI M, NIEMOELLER O M, et al. Adjuvant radiotherapy after breast conserving surgery: a comparative effectiveness research study [J]. *Radiother Oncol*, 2015, 114(1): 28-34.
- [5] 李平, 李燕. 保乳术后放射治疗的研究进展 [J]. *中国普外基础与临床杂志*, 2018, 25(2): 138-142.
- [6] 吴华玲, 许赓, 蔡钢, 等. 乳腺癌保乳术后放疗两种调强技术的心肺剂量体积比较 [J]. *外科理论与实践*, 2017, 22(5): 401-406.
- [7] 袁美芳, 文晓博, 刘梦岚, 等. 左乳癌保乳术后瘤床同步推量断层螺旋照射与断层定角照射的放疗剂量学研究 [J]. *实用临床医药杂志*, 2021, 25(1): 6-9.
- [8] 沈奕晨, 王为, 张松方, 等. 乳腺癌螺旋断层放射治疗与调强放射治疗的剂量学研究及临床剂量实测比较 [J]. *中国医学物理学杂志*, 2018, 35(3): 269-274.
- [9] STELCZER G, MAJOR T, MÉSZÁROS N, et al. External beam accelerated partial breast irradiation: dosimetric assessment of conformal and three different intensity modulated techniques [J]. *Radiol Oncol*, 2019, 53(1): 123-130.
- [10] 梁文龙. 对比分析乳腺癌保乳术后常规放疗、三维适形放疗、直接子野优化调强适形放疗靶区剂量分布及危及器官受照体积的效果差异 [J]. *中外医疗*, 2020, 39(25): 16-19.
- [11] CHIO K H, AHN S J, JEONG J U, et al. Post-operative radiotherapy with intensity-modulated radiation therapy versus 3-dimensional conformal radiotherapy in early breast cancer: a randomized clinical trial of KROG 15-03 [J]. *Radiother Oncol*, 2021, 154(1): 179-186.
- [12] HÖRNER-RIEBER J, FORSTER T, HOMMERTGEN A, et al. Intensity-modulated radiotherapy (IMRT) with simultaneously integrated boost shortens treatment time and is non-inferior to conventional radiotherapy followed by sequential boost in adjuvant breast cancer treatment: results of a large randomized phase III trial (IMRT-MC2 trial) [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2021, 109(5): 1311-1324.
- [13] MENG J, HUANG W Z, MEI X, et al. Adjuvant breast inversely planned intensity-modulated radiotherapy with simultaneous integrated boost for early stage breast cancer [J]. *Strahlenther Onkol*, 2020, 196(9): 764-770.
- [14] MEATTINI I, MATTAZZO L, SAIEVA C, et al. Accelerated partial-breast irradiation compared with whole-breast irradiation for early breast cancer: long-term results of the randomized phase III APBI-IMRT-florence trial [J]. *J Clin Oncol*, 2020, 38(35): 4175-4183.
- [15] LIU H Y, CHEN X D, HE Z, et al. Evaluation of 3D-CRT, IMRT and VMAT radiotherapy plans for left breast cancer based on clinical dosimetric study [J]. *Comput Med Imaging Graph*, 2016, 54(2): 1-5.
- [16] 袁细伟, 周蓉蓉, 张子健. 早期乳腺癌保乳术后 3D-CRT 与 IMRT 的剂量学分布及皮肤损害比较 [J]. *中国医学物理学杂志*, 2017, 34(6): 574-578.
- [17] QI X S, WHITE J, RABINOVITH R, et al. Respiratory organ motion and dosimetric impact on breast and nodal irradiation [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2010, 78(2): 609-617.
- [18] 谢金莲, 覃文, 李博, 等. 乳腺癌保乳术后四种不同放疗计划模式的剂量学研究 [J]. *临床医学研究*, 2022, 7(3): 56-61.
- [19] 宾石珍, 张俊俊, 单冬勇, 等. 两种皮肤通量外扩方法在乳腺癌根治术后调强放疗计划中的剂量学比较 [J]. *中国医学物理学杂志*, 2020, 37(10): 1237-1241.
- [20] 贺慧芳, 杨雨岩, 王鹏, 等. 两种射野边界外扩方法在乳腺癌保乳术后容积旋转调强计划中的剂量学比较研究 [J]. *中国医学装备*, 2022, 19(3): 23-27.
- [21] JAIN V, BERMAN A T. Radiation pneumonitis: old problem, new tricks [J]. *Cancers*, 2017, 10(7): 222-232.
- [22] FINAZZI T, NGUYEN V T, ZIMMERMANN F, et al. Impact of patient and treatment characteristics on heart and lung dose in adjuvant radiotherapy for left-sided breast cancer [J]. *Radiat Oncol*, 2019, 14(1): 153.