

DOI: 10.12025/j.issn.1008-6358.2024.20241059

· 短篇论著 ·

乳腺癌改良根治术后两种调强放疗技术的甲状腺辐射剂量学评价



孙丽云, 沈 磊, 张顺康, 卢 月, 陈 刚*

上海交通大学医学院附属第九人民医院黄浦分院放疗科, 上海 200011

〔摘要〕 **目的** 比较左乳腺癌改良根治术后调强放疗 (IMRT) 和容积旋转调强放疗 (VMAT) 中甲状腺辐射剂量学特点。**方法** 选择 2021 年 12 月至 2023 年 5 月在上海交通大学医学院附属第九人民医院黄浦分院放疗科接受左乳腺癌改良根治术后辅助放疗的 30 例患者, 分别采用 IMRT 和 VMAT, 靶区处方剂量均为 50 Gy/25 次。比较 2 种计划的靶区剂量学参数, 以及危及器官剂量体积限量 (V_x , x 表示受照剂量) 和平均剂量 (D_{mean}) 等。**结果** VMAT 靶区适形度优于 IMRT ($P<0.001$)。与 VMAT 相比, IMRT 中心脏 V_5 、 V_{10} 、 D_{mean} 和右肺 V_5 、右侧乳腺 D_{mean} 较小, 左肺 V_{20} 较大 ($P<0.001$)。IMRT 与 VMAT 中左侧甲状腺 V_5 、 V_{10} 差异无统计学意义; IMRT 中左侧甲状腺及全甲状腺 V_{20} 、 V_{30} 、 V_{40} 、 D_{mean} 和右侧甲状腺 V_{10} 、 D_{mean} 均小于 VMAT ($P<0.001$)。**结论** IMRT 和 VMAT 技术均能满足临床辐射剂量学要求, 其中采用 IMRT 患者的甲状腺受照剂量更小, 且 IMRT 更适用于心脏条件要求高的患者。

〔关键词〕 甲状腺; 乳腺癌; 调强放疗; 容积旋转调强放疗; 辐射剂量学**〔中图分类号〕** R 737.9 **〔文献标志码〕** A

Thyroid dosimetry evaluation of two intensity-modulated radiotherapy techniques after modified radical mastectomy for breast cancer

SUN Liyun, SHEN Lei, ZHANG Shunkang, LU Yue, CHEN Gang*

Department of Radiation Oncology, Huangpu Branch, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200011, China

〔Abstract〕 **Objective** To compare the dosimetric characteristics of thyroid between intensity-modulated radiotherapy (IMRT) and volumetric modulated arc therapy (VMAT) in patients with left-sided breast cancer after modified radical mastectomy. **Methods** Thirty patients with left-sided breast cancer who underwent adjuvant radiotherapy after modified radical mastectomy at the Huangpu Branch of the Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, from December 2021 to May 2023, were selected as the study subjects, and IMRT and VMAT were used with a target prescription dose of 50 Gy/25 times. The target dose parameters of the two plans, including the mean dose (D_{mean}) and the dose-volume limit for organs at risk (V_x , x represents dose), were compared. **Results** The conformity index of VMAT was higher than that of IMRT ($P<0.001$). Compared with VMAT, IMRT plan significantly reduced the V_5 、 V_{10} 、 D_{mean} of heart, the V_5 of right lung and the D_{mean} of right breast, while it significantly increased the V_{20} of left lung ($P<0.001$). There was no statistically significant difference in V_5 and V_{10} of the left thyroid between IMRT and VMAT. However, the V_{20} 、 V_{30} 、 V_{40} 、and D_{mean} of left and whole thyroid, and the V_{10} and D_{mean} of right thyroid were significantly lower in IMRT than those in VMAT ($P<0.001$). **Conclusions** Both IMRT and VMAT plans can meet the clinical dosimetric requirements, among which IMRT has lower thyroid exposure dose and is more suitable for patients with high cardiac requirements.

〔Key Words〕 thyroid; breast cancer; intensity-modulated radiotherapy; volumetric modulated arc therapy; radiation dosimetry

调强放疗 (intensity-modulated radiotherapy, IMRT) 是目前乳腺癌根治术后放疗的常用技术, 其在确保靶区适形度和均匀性的前提下, 较三维

适形放疗 (three-dimensional conformal radiotherapy, 3D-CRT) 能进一步降低正常组织 (如肺、心脏) 的受照剂量^[1]。容积旋转调强放疗 (volumetric

〔收稿日期〕 2024-09-26 **〔接受日期〕** 2024-11-11**〔基金项目〕** 上海市黄浦区临床研究类科研项目 (HLM202114). Supported by Clinical Research Project of Shanghai Huangpu District (HLM202114).**〔作者简介〕** 孙丽云, 硕士, 主治医师. E-mail: ssunliyun@163.com

*通信作者 (Corresponding author). Tel: 021-23308990, E-mail: fodeng73@163.com

modulated arc therapy, VMAT) 是一种更高效的形式, 近年来应用逐渐增多。

对于乳腺癌根治术后腋窝淋巴结转移的患者, 常需要照射锁骨上区。由于锁骨上靶区毗邻甲状腺, 患者接受锁骨上靶区照射后甲状腺功能减退风险增加^[2-3]。因此, 甲状腺作为危及器官 (organ at risk, OAR), 乳腺癌根治术后放疗中须慎重考虑其受照剂量。IMRT 和 VMAT 对 OAR 的保护各具优势^[4-6], 但目前国内外对两种计划治疗过程中甲状腺辐射剂量学相关研究很少。因此, 本研究旨在比较 IMRT 和 VMAT 中甲状腺剂量学特点, 为临床实践中更好地保护乳腺癌放疗 OAR 提供依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性选择于 2021 年 12 月至 2023 年 5 月在上海交通大学医学院附属第九人民医院黄浦分院放疗科接受左乳腺癌改良根治术后辅助放疗的 30 例患者作为研究对象。患者年龄为 38~68 岁, 中位年龄为 51 (47.8, 58.3) 岁。纳入标准: (1) 经病理诊断为浸润性乳腺癌, 分期为 pT₁₋₃N₀₋₃M₀; (2) 均接受乳腺癌改良根治术, 未行乳房重建手术; (3) 无放疗禁忌证, Karnofsky 功能状态评分 > 90 分。排除标准: (1) 右侧或双侧乳腺癌; (2) 乳腺癌复发再治疗; (3) 有甲状腺疾病或既往甲状腺手术史。

1.2 CT 检查 所有患者均借助体位固定装置 Civo P109444-PSR-2C-30 臂托按治疗体位固定。采用荷兰飞利浦公司 Brilliance 16 排大孔径 CT 模拟定位机扫描定位, 扫描范围为头端至舌骨体平面、尾端至上腹部, 层厚 5 mm, 连续扫描。完成放疗定位后, 将图像传输到 Eclipse 11.0 治疗计划系统。

1.3 靶区和 OAR 勾画 参考美国放射治疗肿瘤协作组 (RTOG) 指南^[7], 由同一位临床经验丰富的放疗科医生在 CT 图像上完成靶区及 OAR 的勾画。全甲状腺勾画区域包括甲状腺左、右叶及峡部; 肿瘤临床靶区 (clinical target volume, CTV) 包括患侧胸壁, 锁骨上、下区及内乳淋巴结区域; 在 CTV 基础上, 向前、后、内、外各外扩 5 mm, 上、下界各外扩 1 cm, 勾画计划靶区 (planning target volume, PTV)。其中, 后界除内

乳区附近外不包括肺组织, 胸壁前界包括皮肤。

1.4 放疗计划设计 通过 Eclipse 治疗计划系统用每例患者的同一套 CT 图像设计 IMRT 和 VMAT 计划, 靶区处方剂量为 50 Gy/25 次。根据各个射野方向、靶区形状沿靶区长轴设置相同中心点, 并采用相同函数进行优化。所有计划均采用 6 mV X 射线, 实施时, 皮肤表面覆盖 0.5 cm 厚补偿膜。

1.4.1 IMRT 采用 7 野逆向动态调强, 射野角度为 2 个切线野、1 个 0°野, 另外 4 个射野由上、下方切线野分别增加和减小 10°~20°生成。计划系统剂量率选取 400 mU/min, 剂量计算网格选取 2.5 mm。

1.4.2 VMAT 采用双弧照射技术, 在常规切线野角度 ±60°范围内顺时针或逆时针旋转照射, 最大剂量率为 600 mU/min。剂量采用各向异性分析算法 (anisotropic analytical algorithm, AAA) 计算, 并通过勾画剂量成形结构 (dose shaping structure, DSS) 优化剂量热点与冷点。

1.5 计划评估 放疗计划完成后, 对靶区剂量学参数进行评价。用靶区适形指数 (conformity index, CI) 评估靶区适形度。 $D_{95\%}$ 表示 95% PTV 接受的最低剂量; $V_{110\%}$ 表示接受大于 110% 处方剂量照射的区域 (剂量热点区域)。记录平均剂量 (D_{mean}) 和靶区均匀性指数 (homogeneity index, HI), 其中, $HI = D_{5\%}/D_{95\%}$ 。为了统一评价, 所有 PTV 剂量体积直方图 (dose and volume histogram, DVH) 归一到 95% 靶区体积达到处方剂量。设置全甲状腺 $D_{mean} < 30 \text{ Gy}$ ^[8]。其他 OAR 剂量体积限量 (V_x) 定义为接受一定剂量 (x) 照射的器官体积比: 患侧肺 $V_{20} < 30\%$ 、 $D_{mean} < 15 \text{ Gy}$, 健侧肺 $V_5 < 20\%$, 心脏 $V_5 < 40\%$ 、 $D_{mean} < 8 \text{ Gy}$, 健侧乳腺 $D_{mean} < 5 \text{ Gy}$ 。

1.6 统计学处理 采用 SPSS 19.0 统计软件处理数据, 服从正态分布的连续变量以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 组间比较进行配对 t 检验; 不符合正态分布的数据以 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示, 组间比较采用秩和检验。检验水准 (α) 为 0.05。

2 结果

2.1 靶区辐射剂量学特点 结果 (表 1) 显示:

VMAT 靶区适形度优于 IMRT ($P<0.001$) ; 两种 PTV 的 HI、 $D_{95\%}$ 、 D_{mean} 和 $V_{110\%}$ 差异均无统计学意义。患者锁骨上靶区同一横断面的剂量分布图 (图 1) 显示: VMAT 和 IMRT 在 95% 处方剂量时的覆盖范围相近。

2.2 其他 OAR 辐射剂量学特点 结果 (表 2) 显示:

两种放疗计划的 OAR 辐射剂量学参数均满足临床要求。接受 IMRT 患者的心脏 V_5 、 V_{10} 、 D_{mean} , 健侧乳腺 D_{mean} , 健侧肺 V_5 小于接受 VMAT 患者 ($P<0.001$) , 患侧肺 V_{20} 大于接受 VMAT 患者 ($P<0.001$) 。两种计划患侧肺 D_{mean} 差异无统计学意义。

表 1 两种放疗计划的靶区辐射剂量学特点比较

Table 1 Dosimetric comparison of the 2 radiation treatment plans for targets

$n=30$

Parameter	IMRT	VMAT	t	P
CI	0.656 ± 0.793	0.792 ± 0.059	- 13.950	<0.001
HI	0.121 ± 0.007	0.115 ± 0.015	1.952	0.061
$D_{95\%}/\text{Gy}$	50.192 ± 0.477	50.104 ± 0.353	1.328	0.195
$D_{\text{mean}}/\text{Gy}$	52.006 ± 0.824	52.143 ± 0.809	- 0.810	0.424
$V_{110\%}/\%$	1.482 ± 0.603	1.276 ± 0.756	1.485	0.148

IMRT: intensity-modulated radiotherapy; VMAT: volumetric modulated arc therapy; CI: conformity index; HI: homogeneity index; $D_{95\%}$: the lowest dose received by 95% planning target volume; D_{mean} : mean dose; $V_{110\%}$: the volume of dose hot spot.

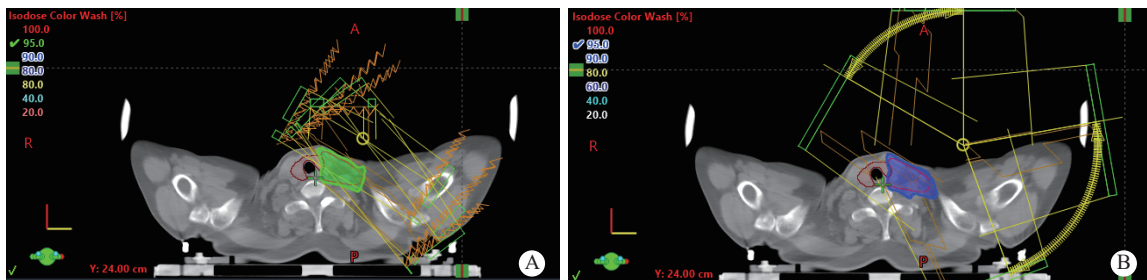


图 1 两种放疗计划锁骨上靶区的剂量分布

Figure 1 Isodose distributions in supraclavicular area in 2 radiation treatment plans

A: Intensity-modulated radiotherapy plan; B: Volumetric modulated arc therapy plan. Areas in green and blue represent areas receiving 95% dose.

表 2 两种放疗计划中危及器官辐射剂量学参数比较

Table 2 Dosimetric comparison of 2 radiation treatment plans for organs at risk

$n=30$

Parameter	IMRT	VMAT	t	P
Left lung				
$V_{20}/\%$	24.72 ± 1.51	23.11 ± 1.51	- 8.819	<0.001
$D_{\text{mean}}/\text{Gy}$	13.37 ± 0.78	13.56 ± 0.88	- 1.184	0.246
Right lung $V_3/\%$	15.69 ± 1.58	17.07 ± 1.78	- 7.470	<0.001
Heart				
$V_5/\%$	25.01 ± 4.56	33.04 ± 4.72	- 13.467	<0.001
$V_{10}/\%$	13.77 ± 2.35	21.01 ± 2.04	- 17.715	<0.001
$V_{20}/\%$	6.72 ± 1.00	6.93 ± 1.17	- 1.753	0.090
$V_{30}/\%$	4.66 ± 0.92	4.75 ± 0.99	- 0.462	0.648
$V_{40}/\%$	2.75 ± 1.01	2.48 ± 1.00	1.979	0.057
$D_{\text{mean}}/\text{Gy}$	5.74 ± 1.05	6.88 ± 0.61	- 11.345	<0.001
Right breast $D_{\text{mean}}/\text{Gy}$	2.49 ± 0.88	3.28 ± 0.87	- 5.044	<0.001

IMRT: intensity-modulated radiotherapy; VMAT: volumetric modulated arc therapy; D_{mean} : mean dose; $V_5, 10, 20, 30, 40$: the volume irradiated with 5, 10, 20, 30, 40 Gy, respectively.

2.3 甲状腺辐射剂量学特点比较 患者甲状腺体积为 $5.03\sim 23.52\text{ cm}^3$ ，平均体积为 $(11.40\pm 0.96)\text{ cm}^3$ 。结果（表3）显示：接受IMRT患者患侧甲状腺 V_{20} 、 V_{30} 、 V_{40} 和 D_{mean} ，健侧甲状腺 V_{10} 、 D_{mean} 和全甲状腺 V_{10} 、 V_{20} 、 V_{30} 、 V_{40} 和 D_{mean} 均小于接受VMAT患者（ $P<0.001$ ）。无接受

IMRT患者甲状腺受照剂量大于26 Gy；接受VMAT患者中甲状腺受照剂量大于26 Gy者占23.3%（7/30）。接受IMRT患者甲状腺 V_{30} 均小于50%。DVH结果（图2）显示：同一辐射剂量时，VMAT计划的甲状腺 V_x 大于IMRT计划。

表3 两种放疗计划的甲状腺辐射剂量学参数比较
Table 3 Dosimetric comparison of 2 radiation treatment plans for thyroid

n=30				
Parameter	IMRT	VMAT	<i>t</i>	<i>P</i>
Left thyroid				
$V_5/\%$	100.00	100.00		
$V_{10}/\%$	99.93 ± 0.22	100.00	- 1.821	0.079
$V_{20}/\%$	63.91 ± 6.34	73.52 ± 5.10	- 8.487	<0.001
$V_{30}/\%$	44.71 ± 5.22	53.03 ± 5.40	- 13.783	<0.001
$V_{40}/\%$	26.80 ± 3.47	35.92 ± 9.93	- 5.799	<0.001
$V_{50}/\%$	10.52 ± 4.86	10.44 ± 4.80	1.173	0.250
$D_{\text{mean}}/\text{Gy}$	28.67 ± 0.84	29.42 ± 0.53	- 5.406	<0.001
Right thyroid				
$V_5/\%$	100.00	100.00		
$V_{10}/\%$	5.36 ± 2.66	87.50 ± 5.37	- 81.238	<0.001
$D_{\text{mean}}/\text{Gy}$	9.61 ± 1.51	14.23 ± 2.04	- 8.824	<0.001
Whole thyroid				
$V_5/\%$	100.00	100.00		
$V_{10}/\%$	43.57 ± 7.70	91.46 ± 5.02	- 25.666	<0.001
$V_{20}/\%$	23.29 ± 5.55	31.79 ± 6.50	- 11.008	<0.001
$V_{30}/\%$	17.69 ± 5.11	23.67 ± 4.82	- 6.439	<0.001
$V_{40}/\%$	11.26 ± 2.85	15.70 ± 5.49	- 4.828	<0.001
$V_{50}/\%$	4.32 ± 2.03	4.17 ± 1.77	0.666	0.511
$D_{\text{mean}}/\text{Gy}$	19.02 ± 1.84	24.42 ± 2.51	- 11.780	<0.001

IMRT: intensity-modulated radiotherapy; VMAT: volumetric modulated arc therapy; D_{mean} : mean dose; $V_{5, 10, 20, 30, 40, 50}$: the volume irradiated with 5, 10, 20, 30, 40, 50 Gy, respectively.

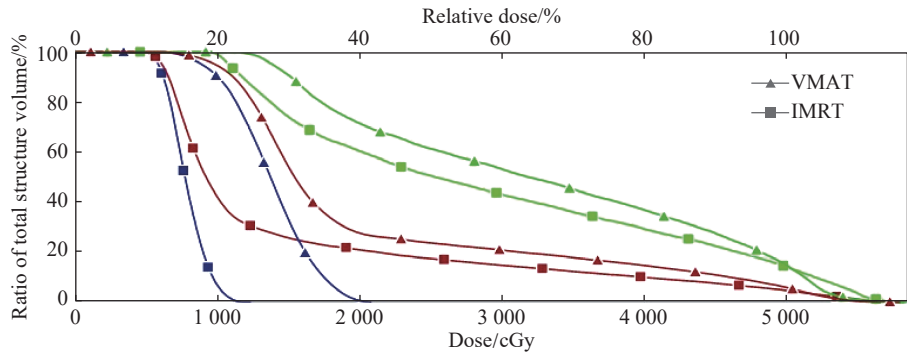


图2 甲状腺辐射剂量体积直方图

Figure 2 Dose and volume histogram of the thyroid

Green line represents left thyroid; red line represents the whole thyroid; blue line represents right thyroid.

3 讨论

放疗是乳腺癌局部治疗的重要手段。已有大型随机研究^[9]和荟萃分析^[10]证实 T_{3~4} 或 N_{2~3} 期乳腺癌改良根治术后行辅助放疗可降低局部复发率,并转化成生存获益。随着生存期延长,乳腺癌患者放疗后的生活质量成为临床关注热点。甲状腺作为人体最大的内分泌腺,其由放疗导致的损伤不容忽视^[11]。

Akin 等^[12]的研究中,乳腺癌术后放疗接受 3D-CRT 及锁骨上区照射的 122 例患者的平均甲状腺体积为 16.7 cm³,甲状腺平均受照剂量为 22.5 Gy;其中接受剂量大于 26 Gy 的患者占比为 44%,认为这部分患者存在放疗后甲状腺功能异常风险。因此,在提高乳腺癌靶区剂量覆盖率和均一性的同时,还应考虑放疗危及甲状腺的潜在风险。不同于 IMRT 的固定机架角,VMAT 可以从切线野的任意一边,沿机架角拉出一定弧度,从而缩短治疗时间^[13]。

本研究显示,VMAT 具有较 IMRT 更优的靶区适形度和相近的 PTV 处方剂量覆盖范围、剂量均匀性,但心脏暴露增加,与以往研究^[14-15]结果相似。《乳腺癌放射治疗指南(中国医师协会 2020 版)》^[8]要求评估甲状腺 D_{mean} 至少小于 30 Gy,本研究中 2 种计划在此剂量限制下,均达到目标参数要求。IMRT 中全甲状腺 D_{mean} 为 (19.02±1.84) Gy,且无患者接受大于 26 Gy 的甲状腺辐射剂量;而 VMAT 计划中全甲状腺 D_{mean} 为 (24.42±2.51) Gy,其中剂量大于 26 Gy 者占 23.3%,表明 IMRT 较 VMAT 能进一步降低甲状腺平均剂量。

除 D_{mean} 外,接受甲状腺 $V_{10\sim50}$ 辐射剂量也是评估放疗后甲状腺功能减退风险的重要参考因素。Tunio 等^[16]的前瞻性研究显示,中位随访 52 个月时,20 例乳腺癌术后进行放疗(包含锁骨上区)的患者中, $V_{30}>50\%$ 者甲状腺功能减退风险增加。此外,有研究^[17]认为, V_{30} 与促甲状腺激素(thyroid stimulating hormone, TSH)的峰值水平相关。因此, V_{30} 对该类患者甲状腺功能异常有潜在预测价值。本研究结果显示,IMRT 中左侧

及全甲状腺 $V_{20\sim40}$ 小于 VMAT,且接受 IMRT 患者的甲状腺 V_{30} 均小于 50%。而且,本研究中,接受 VMAT 患者的健侧甲状腺受照剂量高于接受 IMRT 患者,与既往研究^[18-19]结果相似,提示 VMAT 对健侧甲状腺的保护作用不及 IMRT。原因可能是 IMRT 为固定角度切线野照射,可以更好地避开对侧甲状腺、对侧乳腺及肺;而 VMAT 是以靶区为中心的半弧形动态旋转照射,机架旋转时连续出束,弧内均为照射范围。

本研究中,两种计划的患侧甲状腺 V_5 、 V_{10} 均达到或接近 100%,这可能与计划本身的多射野及锁骨上靶区紧贴甲状腺有关,使散射线、漏射线增多,表明两种计划在低剂量区对甲状腺的保护欠精准。多项研究^[20-22]认为,低剂量照射可能增加继发性癌症发生风险。因此,IMRT 和 VMAT 计划的调适能力仍需进一步优化。另有研究^[23]显示,甲状腺体积越小,乳腺癌根治患者放疗后甲状腺功能减退发生率越大。这提示甲状腺体积可能也是放疗后甲状腺功能异常的预测因子,精确测量甲状腺体积对评估辐射剂量学分布有重要意义。增强 CT 扫描中,甲状腺长度 3.6~6 cm、宽度 1.5~2 cm、深度 1~2 cm^[24],本研究 CT 平扫结果与之一致。但是,仍建议勾画甲状腺轮廓前进行增强 CT 扫描。

对于左侧乳腺癌根治术后放疗,评估心脏放射损伤非常重要。有研究^[25]发现,心脏 D_{mean} 与缺血性心脏病发病率存在剂量效应关系,减小 D_{mean} 可降低由放射性心脏损伤引起的死亡事件风险。van den Bogaard 等^[26]的回顾性研究纳入 910 例乳腺癌放疗患者,发现心脏 V_5 是放射性心脏损伤关键影响因素。有关放疗心脏毒性的 CSCO 指南要求左侧乳腺癌放疗时心脏 $D_{\text{mean}}<8$ Gy、 $V_5<40\%$ ^[27]。本研究显示,与 VMAT 相比,IMRT 对心脏 V_5 、 V_{10} 及 D_{mean} 控制较好。

综上所述,IMRT 和 VMAT 均能满足临床剂量学要求。IMRT 对甲状腺的保护作用总体优于 VMAT,且更适合需要心脏保护的患者,但两者低剂量区甲状腺受照体积仍较大,提示有必要优化技术及方案,增强放疗中甲状腺剂量限制。本研究仅涉及常规分割的照射方式,且缺乏甲状腺

功能基线和长期随访数据,未来须探讨大分割等模式对甲状腺辐射剂量学参数的影响,同时加强随访,以分析辐射剂量对甲状腺功能的长期影响及IMRT、VMAT优化效果。

伦理声明 本研究经上海交通大学医学院附属第九人民医院黄浦分院伦理委员会批准(2021-KY-2),患者签署知情同意书。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献 孙丽云:研究设计、实施,数据分析、文章撰写;沈磊:研究实施;张顺康、卢月:数据收集;陈刚:研究指导、文章修改。

参考文献

- [1] JAGSI R, GRIFFITH K A, MORAN J M, et al. Comparative effectiveness analysis of 3D-conformal radiation therapy versus intensity modulated radiation therapy (IMRT) in a prospective multicenter cohort of patients with breast cancer[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2022, 112(3): 643-653.
- [2] ETTALHAOUI L, DEBREUVE-THÉRESETTE A, NGUYEN T D, et al. Prospective evaluation of radiation-induced thyroid disorders after breast and supraclavicular irradiation[J]. *Cancer Radiother*, 2023, 27(5): 376-386.
- [3] 程 蕾, 季永领, 杜向慧. 乳腺癌放疗对甲状腺功能影响的研究进展[J]. *肿瘤学杂志*, 2018, 24(8): 818-822. CHENG L, JI Y L, DU X H. Research progress of the influence of radiotherapy on thyroid function in patients with breast cancer[J]. *Pract Oncol J*, 2018, 24(8): 818-822.
- [4] ZOPE M K, PATIL D B, FATIMA U, et al. Volumetric-modulated arc therapy versus intensity-modulated radiotherapy on the left-sided chest wall and locoregional nodes irradiation in treating postmastectomy breast cancer patients[J]. *J Indira Gandhi Inst Med Sci*, 2021, 7(1): 57-63.
- [5] JEULINK M, DAHELE M, MEIJNEN P, et al. Is there a preferred IMRT technique for left-breast irradiation?[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2015, 16(3): 5266.
- [6] ALSAIHATY Z, ABDUL MANAN H, SABARUDIN A, et al. Hybrid treatment planning for chest wall irradiation utilizing three-dimensional conformal radiotherapy (3DCRT), intensity-modulated radiation therapy (IMRT), and volumetric modulated arc therapy (VMAT): a systematic review[J]. *Cureus*, 2024, 16(5): e59583.
- [7] WHITE J, TAI A, ARTHUR D, et al. Breast cancer atlas for radiation therapy planning: consensus definitions[EB/OL]. [2024-09-08]. <https://www.onco-hdf.fr/app/uploads/2019/05/BreastCancerAtlas1.pdf>.
- [8] 中国医师协会放射肿瘤治疗医师分会. 乳腺癌放射治疗指南(中国医师协会2020版)[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2021, 30(4): 321-342. Radiation Oncology Physicians Branch of Chinese Medical Doctor Association. Guidelines for radiotherapy of breast cancer (Chinese Medical Doctor Association 2020 edition)[J]. *Chin J Radiat Oncol*, 2021, 30(4): 321-342.
- [9] Early Breast Cancer Trialists' Collaborative Group (EBCTCG). Radiotherapy to regional nodes in early breast cancer: an individual patient data meta-analysis of 14 324 women in 16 trials[J]. *Lancet*, 2023, 402(10416): 1991-2003.
- [10] HENNEQUIN C, BELKACÉMI Y, BOURGIER C, et al. Radiotherapy of breast cancer[J]. *Cancer Radiother*, 2022, 26(1-2): 221-230.
- [11] SOLMUNDE E, FALSTIE-JENSEN A M, LORENZEN E L, et al. Breast cancer, breast cancer-directed radiation therapy and risk of hypothyroidism: a systematic review and meta-analysis[J]. *Breast*, 2023, 68: 216-224.
- [12] AKIN M, ERGEN A, UNAL A, et al. Irradiation doses on thyroid gland during the postoperative irradiation for breast cancer[J]. *J Cancer Res Ther*, 2014, 10(4): 942-944.
- [13] CHANG J S, CHANG J H, KIM N, et al. Intensity modulated radiotherapy and volumetric modulated arc therapy in the treatment of breast cancer: an updated review[J]. *J Breast Cancer*, 2022, 25(5): 349-365.
- [14] 马长春, 张武哲, 伍方财, 等. 左侧乳腺癌改良根治术后放疗三种技术的比较[J]. *中国医学物理学杂志*, 2014, 31(4): 4993-4998. MA C C, ZHANG W Z, WU F C, et al. Dosimetric comparison of post modified radical mastectomy radiotherapy plans using 3 different techniques for left-sided breast cancer[J]. *Chin J Med Phys*, 2014, 31(4): 4993-4998.
- [15] KARPF D, SAKKA M, METZGER M, et al. Left breast irradiation with tangential intensity modulated radiotherapy (t-IMRT) versus tangential volumetric modulated arc therapy (t-VMAT): trade-offs between secondary cancer induction risk and optimal target

- coverage[J]. *Radiat Oncol*, 2019, 14(1): 156.
- [16] TUNIO M A, ASIRI M A, BAYOUMI Y, et al. Is thyroid gland an organ at risk in breast cancer patients treated with locoregional radiotherapy? Results of a pilot study[J]. *J Cancer Res Ther*, 2015, 11(4): 684-689.
- [17] HACIISLAMOGLU E, CANYILMAZ E, GEDIK S, et al. Effect of dose constraint on the thyroid gland during locoregional intensity-modulated radiotherapy in breast cancer patients[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2019, 20(7): 135-141.
- [18] 袁美芳, 杨毅, 赵玉涛, 等. 左乳癌根治术后 sIMRT 和 VMAT 对对侧乳腺和对侧肺的剂量学研究[J]. *临床医学研究与实践*, 2020, 5(29): 20-22.
- YUAN M F, YANG Y, ZHAO Y T, et al. Dosimetric study of contralateral breast and contralateral lung with sIMRT and VMAT after radical resection of left breast cancer[J]. *Clin Res Pract*, 2020, 5(29): 20-22.
- [19] REDAPI L, ROSSI L, MARRAZZO L, et al. Comparison of volumetric modulated arc therapy and intensity-modulated radiotherapy for left-sided whole-breast irradiation using automated planning[J]. *Strahlenther Onkol*, 2022, 198(3): 236-246.
- [20] XIA C X, QIN L, WANG Y Z, et al. Risk factors and specific cancer types of second primary malignancies in patients with breast cancer receiving adjuvant radiotherapy: a case-control cohort study based on the SEER database[J]. *Am J Cancer Res*, 2022, 12(6): 2744-2756.
- [21] ABO-MADYAN Y, AZIZ M H, ALY M M, et al. Second cancer risk after 3D-CRT, IMRT and VMAT for breast cancer[J]. *Radiother Oncol*, 2014, 110(3): 471-476.
- [22] ASHBY O, BRIDGE P. Late effects arising from volumetric modulated arc therapy to the breast: a systematic review[J]. *Radiography*, 2021, 27(2): 650-653.
- [23] JOHANSEN S, REINERTSEN K V, KNUTSTAD K, et al. Dose distribution in the thyroid gland following radiation therapy of breast cancer—a retrospective study[J]. *Radiat Oncol*, 2011, 6: 68.
- [24] 赵旭冉, 王淑莲. 乳腺癌术后放疗甲状腺功能减退的研究现状[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2020, 29(9): 804-808.
- ZHAO X R, WANG S L. Research progress on hypothyroidism after radiotherapy in breast cancer[J]. *Chin J Radiat Oncol*, 2020, 29(9): 804-808.
- [25] STRUIKMANS H, PETOUKHOVA A, SCHREUR J H M, et al. Is the risk of ischemic heart disease in women after radiotherapy for breast cancer nowadays still (linearly) associated with the mean heart dose?[J]. *Acta Oncol*, 2024, 63: 175-178.
- [26] VAN DEN BOGAARD V A B, VAN LUIJK P, HUMMEL Y M, et al. Cardiac function after radiation therapy for breast cancer[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2019, 104(2): 392-400.
- [27] 梅婷, 范丽, 叶挺, 等. 2023 年 CSCO 指南更新解读: 放疗相关心脏毒性[J]. *实用肿瘤杂志*, 2023, 38(6): 513-518.
- MEI T, FAN L, YE T, et al. Update and interpretation of 2023 CSCO guidelines for radiation-related cardiotoxicity[J]. *J Pract Oncol*, 2023, 38(6): 513-518.

[本文编辑] 孙梦瑶, 姬静芳

引用本文

孙丽云, 沈磊, 张顺康, 等. 乳腺癌改良根治术后两种调强放疗技术的甲状腺辐射剂量学评价[J]. *中国临床医学*, 2024, 31(6): 959-965.

SUN L Y, SHEN L, ZHANG S K, et al. Thyroid dosimetry evaluation of two intensity-modulated radiotherapy techniques after modified radical mastectomy for breast cancer[J]. *Chin J Clin Med*, 2024, 31(6): 959-965.