DOI: 10.3969/j.issn.1005-8982.2026.04.004
文章编号： 1005-8982（2026）04-0019-07

乳腺肿瘤专题·论著

乳腺癌改良根治术后调强放疗的精细化调整*

解小丽，翟小娟，朱玉宏，韦又芳，方敏，张风华
[中山市小榄人民医院(中山市第五人民医院)肿瘤科，广东 中山 528415]

摘要：目的 探讨乳腺癌改良根治术后调强放疗计划系统（TPS）参数设置的影响。**方法** 回顾性分析2022年8月—2023年5月在中山市小榄人民医院行左侧乳腺癌改良根治术后调强放疗的14例患者。在放疗TPS中，对同一患者放疗计划的3个参数即最小子野面积（MSA）、最小机器跳数（MMU）和最大子野数（MNOS）先后设置不同数值，比较数值改变引起的剂量学参数［计划靶区的100%处方剂量覆盖体积（$V_{100\%}$）和110%处方剂量覆盖体积（$V_{110\%}$）、适形度指数（CI）、均匀性指数，危及器官中左肺接受5 Gy的肺体积、左肺接受20 Gy的肺体积（LV_{20}）、左肺接受30 Gy的肺体积、左肺平均剂量，右肺接受5 Gy的肺体积（RV_5）、右肺平均剂量，心脏接受30 Gy的组织体积、心脏平均剂量，脊髓最高值Cord］及执行参数计划执行时长的变化。**结果** 与初始计划（MSA=4 cm²）相比，MSA≥9 cm²时总机器跳数（OMU）降低（$P<0.05$）；MSA≥16 cm²时计划执行时长降低（$P<0.05$）；MSA≥49 cm²时ONOS降低（$P<0.05$）；MSA≥64 cm²时$V_{100\%}$降低（$P<0.05$）。与初始计划（MMU=5）相比，MMU≥12时ONOS降低（$P<0.05$）；MMU≥15时$V_{110\%}$和RV_5升高（$P<0.05$），计划执行时长降低（$P<0.05$）；MMU≥20时LV_{20}升高（$P<0.05$），$V_{100\%}$和OMU降低（$P<0.05$）；MMU≥25时CI降低（$P<0.05$），Cord升高（$P<0.05$）。其他MNOS与初始计划（MNOS=56）的ONOS和计划执行时长比较，差异均有统计学意义（$P<0.05$）；ONOS和计划执行时长的变化与MNOS的大小变化一致。**结论** 在满足计划评估的前提下，乳腺癌改良根治术后调强放疗时适当调整TPS的参数值有利于提高执行效率。MSA最高可达49 cm²，MMU最高可达12，MNOS与执行时长密切相关，应谨慎设置。

关键词： 乳腺癌；最小子野面积；最小机器跳数；最大子野数
中图分类号： R737.9 **文献标识码：** A

Refined intensity-modulated radiotherapy planning after modified radical mastectomy for breast cancer*

Xie Xiao-li, Zhai Xiao-juan, Zhu Yu-hong, Wei You-fang, Fang Min, Zhang Feng-hua
[Department of Oncology, Xiaolan People's Hospital of Zhongshan (The Fifth People's Hospital of Zhongshan), Zhongshan, Guangdong 528415, China]

Abstract: Objective To study the influence of treatment planning system (TPS) parameters on intensity-modulated radiotherapy (IMRT) after modified radical mastectomy for breast cancer. **Methods** A retrospective analysis was conducted on 14 patients receiving IMRT after modified radical mastectomy for left breast cancer at our hospital from August 2022 to May 2023. For each patient, three parameters in the radiotherapy TPS, including minimum segment area (MSA), minimum monitor unit (MMU), and maximum number of segments (MNOS), were sequentially set to different values. The changes in dosimetric parameters resulting from these adjustments were compared, including the volume receiving 100% of the prescribed dose ($V_{100\%}$), the volume receiving 110% of the prescribed dose ($V_{110\%}$), the conformity index (CI), and the homogeneity index (HI) of the planning target, the left

收稿日期：2025-01-14
* 基金项目：广东省医学科研基金（No：A2024506）
［通信作者］张风华，E-mail：zhangfenghua11@163.com。

lung volume receiving 5 Gy (LV_5), 20 Gy (LV_{20}), and 30 Gy (LV_{30}), the mean left lung dose (LD_{mean}), the right lung volume receiving 5 Gy (RV_5), the mean right lung dose (RD_{mean}), the heart volume receiving 30 Gy (HV_{30}), the mean heart dose (HD_{mean}), and the maximum spinal cord dose (Cord). Additionally, changes in the plan execution time were evaluated. **Results** Compared with the initial plan (MSA = 4 cm^2), the overall monitor units (OMU) decreased with MSA ⩾ 9 cm^2 (P < 0.05), plan execution time decreased with MSA ⩾ 16 cm^2 (P < 0.05), the overall number of segments (ONOS) decreased with MSA ⩾ 49 cm^2 (P < 0.05), and V100% decreased with MSA ⩾ 64 cm^2 (P < 0.05). Compared with the initial plan (MMU = 5), ONOS decreased with MMU ⩾ 12 (P < 0.05), V110% and RV_5 increased and plan execution time decreased with MMU ⩾ 15 (P < 0.05), LV_{20} increased and $V_{100\%}$ and OMU decreased with MMU ⩾ 20 (P < 0.05), CI decreased and Cord increased with MMU ⩾ 25 (P < 0.05). Compared with the initial plan (MNOS = 56), changes in ONOS and plan execution time for other MNOS settings were all statistically significant (P < 0.05). The variations in ONOS and plan execution time were consistent with the changes in MNOS values. **Conclusion** Within the constraints of acceptable plan evaluation, appropriately adjusting TPS parameters during IMRT after modified radical mastectomy for breast cancer can improve plan execution efficiency. The maximum values for MSA and MMU can reach 49 and 12, respectively, while MNOS is closely correlated with plan execution time and should be set cautiously.

Keywords: left breast cancer; minimum segment area; minimum monitor unit; maximum number of segments

乳腺癌严重威胁女性身心健康[1-2]。近年来，影像学、基因学的发展有助于乳腺癌的诊断、分期及预后评估[3-5]。目前，手术和放疗是治疗乳腺癌的主要手段[6]。改良根治术在切除肿瘤的同时可以最大程度地保留乳房形态，现已广泛应用于临床[7]。适形调强放疗技术（intensity-modulated radiotherapy treatment, IMRT）因降低肺和心脏损伤已成为乳腺癌根治术后放疗常用手段[8-10]。在制订IMRT放疗计划时，计划系统（treatment planning system, TPS）参数设置会影响剂量准确度和计算效率[11-13]。本研究以14例左侧乳腺癌改良根治术后IMRT放疗患者为研究对象，在Pinnacle³ TPS中将3个参数先后设置不同的数值，观察分析放疗计划的剂量变化和执行参数改变。

1 资料与方法

1.1 病例资料

选取2022年8月—2023年5月在中山市小榄人民医院行左侧乳腺癌改良根治术后调强放疗患者为研究对象。纳入标准：①病理学证实为左侧乳腺癌；②接受改良根治术；③术后有放疗指征且接受规范治疗；④未合并其他疾病。剔除标准：①术后切缘阳性；②因各种原因未能完成全部放疗。最终选择14例患者为研究对象。年龄33～65岁，中位年龄46岁。本研究经医院医学伦理委员会批准（No：2023-0035）。

回顾性分析这14例患者的放疗计划。所有研究对象前期全部采用荷兰Philips公司专用大孔径Big Bore CT进行定位，患者仰卧、双手抱头，行热塑体膜固定，扫描范围从颈部的环状软骨至健侧乳腺皱褶下5 cm，同时包括全部肺组织，层厚和层间距均⩽3 mm。定位图像传送至美国Elekta公司提供的Monaco工作站，由同一位医师进行勾画。靶区、危及器官（organs at risk, OAR）和正常组织的勾画遵循放射治疗肿瘤协作组（Radiation Therapy Oncology Group, RTOG）标准。临床靶区（clinical target volume, CTV）包括患侧胸壁和锁骨上区域，计划靶区（plan target volume, PTV）由CTV外扩5 mm形成。OAR包括左肺、右肺、心脏、脊髓和患侧肱骨头。处方剂量50 Gy，常规照射，2 Gy/d，共25次。

1.2 TPS数据初始设置与方案设计

计划设计采用一体化调强放疗，左侧乳腺癌改良根治术后的胸壁和淋巴引流区同时照射7个射野。OAR要求：左肺接受5 Gy的肺体积（LV_5）<65%，左肺接受20 Gy的肺体积（LV_{20}）<28%，左肺接受30 Gy的肺体积（LV_{30}）<20%，左肺平均剂量（LD_{mean}）<15 Gy；右肺平均剂量（RD_{mean}）<3 Gy，右肺接受5 Gy的肺体积（RV_5）<5%；心脏接受30 Gy的组织体积（HV_{30}）<10%，心脏平均剂量（HD_{mean}）<10 Gy；脊髓最大剂量Cord<35 Gy；左侧肱骨头最大剂量Hum<50Gy，或V_{50}<1%。

采用荷兰Philips公司提供的Pinnacle³ 16.2 TPS进行计划设计。计算参数设置如下：剂量网格（dose grid, DG）4 mm，通量网格（fluence grid, FG）4 mm，最

大迭代次数25。初始计划的最小子野面积(minimum segment area, MSA) 4 cm^2，最小机器跳数(minimum monitor units, MMU)5，最大子野数(maximum number of segments, MNOS)56。当该初始计划满足靶区要求时，逐步修改上述3个参数，并记录相关数据做对比研究。具体步骤如下：首先保存原始计划、拷贝。第一组数据：保持MMU和MNOS初始数值(分别为5和56)不变，然后将MSA修改为9 cm^2，其余计划参数和优化条件不变，并计算、保存。重复上述步骤，依次将MSA设为16、25、36、49、64、81、100 cm^2，计算、保存。第二组数据获得过程参考第一组，保持初始计划中的MSA和MNOS不变(分别为4 cm^2和56)，然后将MMU依次设置为8、10、12、15、20、25和30，各数值参考初始计划中频数较高的MMU。第三组数据获得过程同样参考第一组，保持MSA和MMU不变(分别为4 cm^2和5)，将MNOS依次设置为42、49、63、70、77和84，总子野数按照射野数的倍数进行设置，最大数值参考初始计划中全部射野的MNOS，经统计该数值为12，故12×7=84。同一患者共有22个计划。见表1。

表 1　TPS的参数设置

第一组			第二组			第三组		
MSA/cm^2	MMU	MNOS	MSA/cm^2	MMU	MNOS	MSA/cm^2	MMU	MNOS
4	5	56	4	5	56	4	5	56
9	5	56	4	8	56	4	5	42
16	5	56	4	10	56	4	5	49
25	5	56	4	12	56	4	5	63
36	5	56	4	15	56	4	5	70
49	5	56	4	20	56	4	5	77
64	5	56	4	25	56	4	5	84
81	5	56	4	30	56			
100	5	56						

1.3　计划评估

分3类评估所得结果，即PTV剂量变化、OAR剂量变化及执行参数变化。PTV剂量变化评估以下参数：$V_{100\%}$（PTV的100%处方剂量覆盖体积）、$V_{110\%}$（PTV的110%处方剂量覆盖体积）、适形度指数（conformity index, CI）、均匀性指数(homogeneity index, HI)。OAR剂量变化评估参数包括：左肺（LV_5、LV_{20}、LV_{30}、LD_{mean}）、右肺（RV_5、RD_{mean}）、心脏（HV_{30}、HD_{mean}）和脊髓最大剂量Cord。执行参数包括总机器跳数（overall MUs, OMU）、事实总子野数（overall number of segment, ONOS）及计划执行时长Time。其中，CI、HI和计划执行时长分别按以下公式计算：

$$CI=(V_{t,ref} \div V_t) \times (V_{t,ref} \div V_{ref})$$

$V_{t,ref}$是指处方剂量所包绕的靶区体积，V_t是指靶区的体积，V_{ref}是处方剂量所包绕的全部空间体积。CI值越趋近1说明适形度越好。

$$HI=(D_2-D_{98}) \div D_{50}$$

D_2为2%靶区吸收剂量的最小值，D_{98}为98%靶区吸收剂量的最大值，D_{50}为50%靶区吸收剂量的平均值。HI越趋近0说明均匀性越好。

根据KATHRYN等[14]的研究，计划执行时长一般由3部分组成：机架运行时长T^G、叶片运行时长T^{MLC}和射线出束照射时长T^{MU}。各部又分别包含机械运动时间和迟滞准备时间。结合本研究实际执行设备美国ELEKTA公司Precise系列加速器的具体参数，最后得出下式：

$$计划执行时长=0.17 \times spacing+d \div 2+MU \div 8.92+3.1 \times (N^{seg}-N^B)+76.2$$

Spacing指机架角度间隔，d指每个子野的最大叶片运行距离的总和，MU指总机器跳数，N^{seg}指计划的事实子野数，N^B指射野数。因为d无法获取，综合考虑用N^{seg}代替。结合本研究，MU指OMU，N^{seg}指ONOS，$N^B=7$。

1.4　统计学方法

数据分析采用SPSS 26.0统计软件。计量资料以均值±标准差（$\bar{x} \pm s$）表示，比较用方差分析，进一步两两比较用LSD-t检验。$P<0.05$为差异有统计学意义。

2　结果

2.1　MSA变化的影响

各MSA组的$V_{110\%}$、CI、HI、RV_5、RD_{mean}、Cord、LV_5、LV_{20}、LV_{30}、LD_{mean}、HV_{30}、HD_{mean}比较，经方差分析，差异均无统计学意义（$P>0.05$）。各MSA组的$V_{100\%}$、OMU、ONOS、计划执行时长比较，经方差分析，差异均有统计学意义（$P<0.05$）。与初始计划（MSA=4 cm^2）相比，MSA≥9 cm^2时OMU降低（$P<0.05$）；MSA≥16 cm^2时计划执行时长降低（$P<0.05$）；MSA≥49 cm^2时ONOS降低（$P<0.05$）；MSA≥64 cm^2时$V_{100\%}$降低（$P<0.05$）。见表2。

表2 MSA变化的参数比较 （n=14，$\bar{x} \pm s$）

MSA	$V_{100\%}$/%	OMU	ONOS	计划执行时长/s	$V_{110\%}$/%	CI	HI	RV_5
4 cm^2	92.58 ± 1.54	708.71 ± 141.22	53.92 ± 2.99	356.79 ± 21.07	10.55 ± 9.52	0.56 ± 0.06	0.26 ± 0.07	4.03 ± 3.79
9 cm^2	92.17 ± 1.70	586.57 ± 113.23	55.50 ± 0.76	352.43 ± 13.94	10.28 ± 10.27	0.57 ± 0.06	0.26 ± 0.06	4.24 ± 3.79
16 cm^2	91.83 ± 1.86	511.79 ± 77.76	55.14 ± 1.02	342.86 ± 9.59	11.27 ± 10.27	0.57 ± 0.07	0.27 ± 0.07	4.75 ± 4.33
25 cm^2	91.75 ± 1.85	467.50 ± 62.30	53.86 ± 2.24	332.93 ± 13.53	10.46 ± 8.87	0.58 ± 0.07	0.27 ± 0.07	5.51 ± 5.09
36 cm^2	91.36 ± 2.38	435.14 ± 53.82	52.29 ± 3.02	323.86 ± 14.56	10.55 ± 9.12	0.56 ± 0.06	0.28 ± 0.07	5.64 ± 5.07
49 cm^2	91.06 ± 2.18	390.00 ± 39.00	47.00 ± 3.13	299.50 ± 14.55	9.01 ± 8.52	0.56 ± 0.07	0.29 ± 0.07	5.71 ± 5.04
64 cm^2	90.41 ± 2.47	360.71 ± 31.40	41.64 ± 2.92	277.14 ± 12.642	8.74 ± 8.93	0.56 ± 0.06	0.30 ± 0.08	5.86 ± 5.10
81 cm^2	89.23 ± 3.85	335.29 ± 20.27	37.07 ± 3.19	257.79 ± 12.62	8.66 ± 8.0	0.54 ± 0.06	0.33 ± 0.10	5.63 ± 5.65
100 cm^2	88.89 ± 3.26	316.07 ± 17.15	32.29 ± 4.61	238.43 ± 17.814	9.87 ± 11.9	0.52 ± 0.06	0.35 ± 0.11	4.73 ± 4.60
F值	3.816	42.653	124.315	118.191	0.129	0.749	2.003	0.296
P值	0.001	0.000	0.000	0.000	0.998	0.648	0.052	0.966

MSA	RD_{mean}/Gy	Cord/Gy	LV_5/%	LV_{20}/%	LV_{30}/%	LD_{mean}/Gy	HV_{30}/%	HD_{mean}/Gy
4 cm^2	2.12 ± 0.35	34.96 ± 2.68	61.25 ± 5.82	26.45 ± 1.59	19.11 ± 1.74	14.95 ± 0.11	7.52 ± 2.64	10.27 ± 2.38
9 cm^2	2.15 ± 0.38	34.65 ± 2.94	62.22 ± 6.89	26.43 ± 1.54	18.96 ± 1.73	14.94 ± 0.14	7.70 ± 2.78	10.32 ± 2.45
16 cm^2	2.20 ± 0.42	34.82 ± 2.55	62.59 ± 6.57	26.59 ± 1.57	19.05 ± 1.69	15.01 ± 0.15	7.59 ± 2.66	10.29 ± 2.26
25 cm^2	2.22 ± 0.44	35.14 ± 2.48	62.94 ± 7.09	26.48 ± 1.35	19.02 ± 1.66	14.97 ± 0.11	7.60 ± 2.56	10.45 ± 2.38
36 cm^2	2.23 ± 0.43	34.72 ± 2.03	62.74 ± 7.11	26.69 ± 1.46	19.19 ± 1.71	15.01 ± 0.10	7.78 ± 2.37	10.40 ± 2.27
49 cm^2	2.23 ± 0.45	34.78 ± 2.23	62.73 ± 6.25	26.86 ± 1.39	19.28 ± 1.66	15.04 ± 0.15	7.89 ± 2.55	10.36 ± 2.23
64 cm^2	2.23 ± 0.48	34.72 ± 2.62	61.53 ± 6.33	27.07 ± 1.38	19.38 ± 1.64	15.05 ± 0.15	8.09 ± 2.61	10.11 ± 1.96
81 cm^2	2.20 ± 0.47	34.68 ± 2.48	61.27 ± 6.21	27.35 ± 1.39	19.48 ± 1.60	15.08 ± 0.14	8.22 ± 2.83	9.80 ± 1.75
100 cm^2	2.16 ± 0.44	35.26 ± 2.21	60.81 ± 6.72	27.61 ± 1.59	19.75 ± 1.74	15.09 ± 0.17	8.86 ± 2.61	9.74 ± 1.81
F值	0.119	0.129	0.206	1.136	0.325	0.067	0.360	0.119
P值	0.998	0.998	0.989	0.345	0.955	1.000	0.939	0.998

2.2 MMU变化的影响

各MMU组的HI、LV_5、LV_{30}、LD_{mean}、RD_{mean}、HV_{30}、HD_{mean}比较，经方差分析，差异均无统计学意义（P >0.05）。各MMU组的$V_{100\%}$、$V_{110\%}$、CI、LV_{20}、RV_5、OMU、Cord、ONOS和计划执行时长比较，经方差分析，差异均有统计学意义（P <0.05）。与初始计划（MMU=5）相比，MMU≥12时ONOS降低（P <0.05）；MMU≥15时$V_{110\%}$、RV_5升高（P <0.05），计划执行时长降低（P <0.05）；MMU≥20时LV_{20}升高（P <0.05），$V_{100\%}$、OMU降低（P <0.05）；MMU≥25时CI降低（P <0.05），Cord升高（P <0.05）。见表3。

表3 MMU变化的参数比较 （n=14，$\bar{x} \pm s$）

MMU	$V_{100\%}$/%	V_{110}/%	CI	LV_{20}/%	RV_5/%	Cord/Gy	OMU	ONOS
5	92.58 ± 1.54	10.55 ± 9.52	0.56 ± 0.07	26.45 ± 1.59	4.03 ± 3.79	34.96 ± 2.68	708.71 ± 140.22	52.93 ± 2.99
8	92.44 ± 1.69	10.81 ± 9.33	0.56 ± 0.06	26.63 ± 1.46	5.46 ± 3.50	34.87 ± 2.88	723.64 ± 138.42	52.79 ± 2.94
10	92.53 ± 1.74	14.97 ± 8.60	0.55 ± 0.06	26.81 ± 1.38	6.97 ± 4.38	35.25 ± 2.72	740.14 ± 144.54	51.71 ± 3.62
12	92.27 ± 1.84	17.42 ± 9.08	0.55 ± 0.05	26.78 ± 1.64	8.72 ± 6.30	35.52 ± 3.04	733.86 ± 172.93	46.21 ± 7.04
15	91.56 ± 2.22	19.85 ± 9.09	0.54 ± 0.06	26.91 ± 1.61	9.46 ± 8.18	36.14 ± 3.12	685.79 ± 210.05	35.21 ± 9.92
20	89.32 ± 2.47	20.01 ± 10.87	0.51 ± 0.08	27.71 ± 1.32	10.16 ± 8.73	36.78 ± 4.73	591.64 ± 144.56	23.71 ± 5.81
25	86.80 ± 3.66	23.70 ± 15.86	0.49 ± 0.06	27.96 ± 1.66	9.74 ± 7.51	37.81 ± 4.48	507.86 ± 157.73	15.86 ± 5.39
30	81.44 ± 5.05	18.39 ± 8.57	0.46 ± 0.07	28.18 ± 1.63	14.00 ± 9.73	40.23 ± 5.28	446.15 ± 104.41	11.46 ± 2.43
F值	27.873	2.745	3.823	2.541	2.851	3.213	7.279	130.445
P值	0.000	0.012	0.001	0.019	0.009	0.004	0.000	0.000

续表 3

MMU	计划执行时长/s	HI	LV_5	LV_{30}	LD_{mean}/Gy	RD_{mean}/%	HV_{30}/%	HD_{mean}/Gy
5	356.79 ± 21.07	0.26 ± 0.07	61.25 ± 5.82	19.11 ± 1.74	14.95 ± 0.81	2.12 ± 3.55	7.52 ± 2.64	10.27 ± 2.38
8	358.00 ± 20.54	0.26 ± 0.07	62.74 ± 5.86	19.12 ± 1.73	15.10 ± 0.76	2.30 ± 4.41	7.48 ± 2.76	10.47 ± 2.46
10	356.00 ± 26.15	0.26 ± 0.06	64.02 ± 6.61	19.18 ± 1.64	15.23 ± 0.80	2.43 ± 4.92	7.42 ± 2.81	10.61 ± 2.50
12	335.50 ± 43.62	0.28 ± 0.07	65.59 ± 5.90	19.13 ± 1.63	15.33 ± 0.85	2.54 ± 5.74	7.50 ± 2.92	10.88 ± 2.48
15	290.29 ± 58.84	0.28 ± 0.08	66.73 ± 6.86	19.14 ± 1.61	14.57 ± 0.30	2.58 ± 5.99	7.67 ± 2.79	10.92 ± 2.52
20	238.36 ± 36.21	0.30 ± 0.07	67.67 ± 8.02	19.64 ± 1.54	15.53 ± 0.73	2.56 ± 7.97	8.00 ± 2.93	11.10 ± 2.42
25	200.71 ± 36.86	0.32 ± 0.08	67.09 ± 0.57	20.03 ± 1.45	15.65 ± 0.87	2.51 ± 6.86	8.14 ± 3.41	10.98 ± 2.65
30	178.23 ± 20.23	0.35 ± 0.13	66.61 ± 9.71	20.11 ± 1.35	15.55 ± 0.88	2.66 ± 6.56	8.728 ± 3.61	10.94 ± 2.73
F 值	60.028	2.042	1.344	0.991	1.003	1.217	0.205	0.180
P 值	0.000	0.057	0.238	0.442	0.434	0.300	0.984	0.988

2.3　MNOS变化的影响

各 MNOS 组的 $V_{100\%}$、$V_{110\%}$、CI、HI、OMU、LV_5、LV_{20}、LV_{30}、LD_{mean}、Cord、RV_5、R_{mean}、HV_{30}、HD_{mean} 比较，经方差分析，差异均无统计学意义（$P>0.05$）。各 MNOS 组的 ONOS 和计划执行时长比较，经方差分析，差异均有统计学意义（$P<0.05$）。其他 MNOS 与初始计划（MNOS=56）的 ONOS 和计划执行时长比较，差异均有统计学意义（$P<0.05$）；ONOS 和计划执行时长的变化与 MNOS 的大小变化一致。见表 4。

表 4　MNOS 变化的参数比较　（$n=14$，$\bar{x} \pm s$）

MNOS	ONOS	计划执行时长/s	$V_{100\%}$/%	$V_{110\%}$/%	CI	HI	OMU	LV_5/%
42	40.71 ± 1.20	305.43 ± 15.64	92.01 ± 2.06	11.08 ± 9.75	0.54 ± 0.06	0.27 ± 0.08	642.71 ± 116.38	62.04 ± 5.99
49	48.07 ± 1.91	335.64 ± 18.75	92.44 ± 1.73	10.21 ± 9.77	0.56 ± 0.06	0.26 ± 0.08	697.36 ± 142.50	61.88 ± 6.20
56	52.93 ± 2.99	356.79 ± 21.07	92.58 ± 1.54	10.55 ± 9.52	0.56 ± 0.06	0.26 ± 0.07	708.71 ± 141.22	61.25 ± 5.82
63	60.93 ± 2.49	386.86 ± 20.13	92.37 ± 1.72	8.71 ± 8.67	0.57 ± 0.06	0.26 ± 0.07	731.07 ± 149.612	62.14 ± 6.66
70	67.57 ± 1.78	415.21 ± 21.72	92.57 ± 1.52	9.20 ± 9.21	0.57 ± 0.06	0.26 ± 0.07	759.36 ± 159.61	62.24 ± 6.87
77	75.00 ± 2.57	442.14 ± 22.21	92.56 ± 1.52	9.58 ± 9.64	0.58 ± 0.06	0.26 ± 0.07	783.21 ± 148.39	62.29 ± 6.51
84	83.38 ± 0.96	474.92 ± 14.48	92.59 ± 1.64	7.96 ± 8.44	0.57 ± 0.05	0.24 ± 0.08	783.62 ± 129.54	63.36 ± 6.47
F 值	773.287	131.555	0.217	0.185	0.535	0.167	1.798	0.131
P 值	0.000	0.000	0.970	0.980	0.780	0.985	0.108	0.992

MNOS	LV_{20}/%	LV_{30}/%	LD_{mean}/Gy	Cord/Gy	RV_5/%	RD_{mean}/Gy	HV_{30}/%	HD_{mean}/Gy
42	26.77 ± 1.60	19.27 ± 1.68	15.12 ± 0.79	35.28 ± 2.91	3.83 ± 3.81	2.10 ± 0.37	7.59 ± 2.67	10.32 ± 2.34
49	26.60 ± 1.61	19.16 ± 1.71	15.03 ± 0.81	35.06 ± 2.60	4.21 ± 3.97	2.14 ± 0.37	7.47 ± 2.69	10.24 ± 2.34
56	26.45 ± 1.59	19.11 ± 1.74	14.95 ± 0.81	34.96 ± 2.68	4.03 ± 3.79	2.12 ± 0.35	7.52 ± 2.64	10.27 ± 2.38
63	26.42 ± 1.55	18.99 ± 1.71	14.95 ± 0.84	34.64 ± 3.19	4.53 ± 4.28	2.16 ± 0.38	7.59 ± 2.77	10.21 ± 2.36
70	26.43 ± 1.53	18.98 ± 1.70	14.96 ± 0.86	34.38 ± 3.08	4.30 ± 3.89	2.16 ± 0.39	7.54 ± 2.44	10.28 ± 2.40
77	26.43 ± 1.60	18.96 ± 1.75	14.96 ± 0.87	34.05 ± 2.96	4.80 ± 4.22	2.39 ± 0.39	7.43 ± 2.82	10.26 ± 2.41
84	26.50 ± 1.72	18.81 ± 1.72	15.05 ± 0.90	34.20 ± 2.95	3.98 ± 2.40	2.17 ± 0.38	7.37 ± 2.78	10.40 ± 2.36
F 值	0.092	0.107	0.078	0.350	0.106	0.081	0.012	0.009
P 值	0.997	0.995	0.998	0.908	0.996	0.998	1.000	1.000

3　讨论

近年来有不少学者研究 TPS 参数设置对放疗计划的影响，从 DG、FG 到 MSA、MMU 和 MNOS 等，这些研究结果对临床有很大意义。目前已知，对头颈部计划推荐以下参数组合：DG 4 mm，FG 2 mm，MSA 5 cm^2，MMU 5[15]。胸部计划如肺癌建议采用 DG 4 mm，

若PTV与OAR位置接近，则改为3 mm。腹部计划如宫颈癌在DG<3 mm时计算效率明显降低，>4 mm时影响计算精度，且适当增大MNOS可以提高计划质量[16]；胃癌计划建议将MSA从4 cm^2提高至15或20 cm^2，可以提高计划质量和治疗效率[17]。也有学者认为TPS参数的设置需考虑计划的复杂程度，头颈部计划如鼻咽癌、喉癌等面临OAR种类多、体积小、距离较近、串联结构较多等问题，从实际执行精确度考虑，串联结构易受计算网格变化的影响，应取较小值，即DG≤3 mm；胸腹部计划串联结构少，并联结构较多，受影响较小，推荐DG 4 mm[18]。

左乳腺结构周围OAR属串联结构的是脊髓，并联结构包括双侧肺、心脏、食管、气管、肱骨头等。乳腺癌属于胸部计划，该计划一般体积较大，形状不规则，与OAR距离较近，并联结构较多，故采用Pinnacle^{3}系统默认的DG 4 mm和匹配模式的FG 4 mm对所有计划进行计算、优化。

本研究初始计划中的参数设置参考上述胃癌和头颈部计划中的MSA和MMU数值，分别为4 cm^2和5，MNOS的设置参考了KATHRYN等[14]研究头颈部计划时的参数设置方法和规律，为56（7×8）。放疗计划评估是临床实践中的重要环节，其中剂量覆盖、剂量冷热和OAR保护是核心共识[19]，对于常规分割的IMRT计划，剂量覆盖要求PTV>93%处方剂量的体积百分比；剂量热点≤115%处方剂量，理想计划一般要求≤110%；OAR的受照剂量不超过耐受剂量且尽可能低，但要特别注意比肿瘤组织还重要的一级器官，可以根据器官的优先等级进行综合评估。

左乳癌放疗计划中脊髓、双肺和心脏都是一级器官，综合评估时对PTV的剂量覆盖要求降低至90%；靶区内>100%处方剂量的区域即$V_{110\%}$为热点区域，占比应尽可能小。本研究中当MSA>64 cm^2、MMU≥15时，剂量覆盖已不满足要求，剂量热点区域占比明显升高，这些数值不建议考虑。此外，随着MSA逐渐升高，计划质量并没有提高，PTV的$V_{100\%}$逐渐降低，HI和CI亦无明显变化，这一点与王继平等[17]在研究中提到的胃癌计划不一致。笔者分析这是因为胃癌属腹部计划，体积相对较小，形状较规则，其中的一级器官相对较少（只有脊髓），与OAR（双肾、肝脏、小肠）的距离较远，综合考虑时PTV的优先级较高，故增大MSA可以带来较大收益。

放射性肺损伤和放射性心脏损伤是胸部肿瘤的常见并发症。有研究表明，肺和心脏的剂量体积参数可分别预测放射性肺炎和心包积液的风险[20]，且肺的V_5、V_{20}和均值剂量均与放射性肺损伤的发生相关[21]。本研究中MSA和MNOS的改变不会对肺和心脏的体积参数发生明显影响，但增大MMU会使LV_{20}和RV_5随之增高，且MMU≥15时差异有统计学意义，换言之，增大了放射性肺损伤发生的概率，故这些数值不可取。

此外MNOS的变化没有对PTV造成明显影响也与CHIN等[18]在研究中提到的宫颈癌计划不一致。笔者分析这仍然与计划中PTV的优先级有关。宫颈癌计划中没有一级器官，OAR（直肠、小肠、膀胱和股骨头）均为并联器官，PTV的优先级处于最高位，增加MNOS增益明显。

除以上评估要素外，放疗执行效率也需考虑。有研究认为患者长时间处于射线环境下时，机房内部散射和机器漏射会使次生肿瘤的发生概率增大[22-25]。因此本研究将治疗时长纳入评估范围。通过前述计划执行时长的计算方法可知执行参数OMU和ONOS的实际意义体现于计划执行时长。本研究中增加MSA和MMU均使计划执行时长降低，而MNOS的大小变化与计划执行时长的改变一致，因此在进行参数设置时需谨慎。

当MSA逐渐增大时，PTV的$V_{100\%}$持续降低，是因为缺少小面积子野对靶区的“精细雕刻”从而造成覆盖率下降。但在临床实际放疗工作中，除了关注剂量变化，还应考虑剂量准确度的问题。有研究认为，当计划中存在大量小面积子野时，会造成较大的剂量偏差，这是因为小面积子野存在侧向电子失衡的问题，这种问题导致TPS很难精确计算剂量，小子野数目越多产生的剂量偏差越大。同时多叶准直器的凹凸槽效应会导致数量较多的小子野产生更多的漏射线可能。此外，当MMU取值较小时，加速器的准直器输出因子很难处理MU数量很少的子野，直接影响计划的实施效率，因此在放疗TPS设置参数时MSA和MMU都不宜选取较小的数值[26]。MNOS减小容易产生剂量热点[18]，增大时会造成计划执行时长延长，实际照射时会提高患者移动的机会，进而降低生物响应[27]，所以实际选取时应谨慎。

综合考虑，在不影响计划评估的前提下，乳腺癌IMRT治疗时TPS参数值可以适当增大，以提高执行效率，但MSA不宜>49 cm^2，MMU不宜>12，MNOS与执行效率密切相关，应谨慎设置。

参 考 文 献：

[1] SIEGEL RL, MILLER KD, WAGLE NS, et al. Cancer statistics, 2023[J]. CA Cancer J Clin, 2023, 73(1): 17-48.

[2] HAN B F, ZHENG R S, ZENG H M, et al. Cancer incidence and mortality in China , 2022[J]. J Natl Cancer Cent, 2024, 4(1): 47-53.

[3] 马鑫, 张盛敏, 施霞. 超声造影特征联合NLR、TSR诊断乳腺癌腋窝淋巴结转移的价值[J]. 中国现代医学杂志, 2024, 34(23): 27-32.

[4] 何旻, 巢琳, 华亦汇. 乳腺癌改良根治术胡血清sEC、s-CD105水平与复发转移的相关性分析[J]. 中国现代医学杂志, 2024, 35(5): 95-99.

[5] 胡学丽, 范先成. 乳腺癌组织miR-92a、KLF4 mRNA的表达及与临床病理参数、预后的关系[J]. 中国现代医学杂志, 2022, 32(6): 74-79.

[6] Mutebi M, Anderson BO, Duggan C, et al. Breast cancer treatment: a phased to implementation[J]. Cancer, 2020, 126(10): 2365-2378.

[7] CHEN J C, LI Y M, FISHER J L, et al. Modified radical mastectomy in *de nemo* stage IV inflammatory breast cancer[J]. Ann Surg Oncol, 2022, 29(11): 6681-6688.

[8] TORRES M A, GOGINENI K, HOWARD D H. Intensity-modulated radiation therapy in breast cancer patients following the release of a choosing Wisely recommendation[J]. J Natl Cancer Inst, 2020, 112(3): 314-317.

[9] DAS MAJNCAR S K, AMRITT A, DHAI S S, et al. A dosimetric study comparing 3D-CRT vs. IMRT vs. VMAT in left-side breast cancer patients after mastectomy at a tertiary care centre in eastern India[J].Cureus, 2022, 14(3): e23568.

[10] 刘梦岚, 吉维, 赵彪, 等. 左乳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, 2011, 31(11): 73-78.

[11] 陈飞虎, 李一江, 柏晗, 等. 宫颈癌放疗中计算网格尺寸对物理剂量和生物剂量的影响[J]. 中国医学物理学杂志, 2020, 37(8): 971-976.

[12] 王君, 乌晓礼. Pinnacle3计划系统计算网格对肺癌靶区及危及器官的剂量学影响[J]. 智慧健康, 2022, 04.008: 26-28.

[13] 戴宛庭, 李向斌, 全红, 等. 网格精度对肝癌立体定向放射治疗计划的剂量学影响[J]. 中国医学物理学杂志, 2021, 38(9): 1057-1060.

[14] KATHRYN M, DARREN K, ARUM G, et al. A study of IMRT planning parameters on planning efficiency, delivery efficiency, and plan quality[J]. Medical Physics, 2013, 10(6): 061704.

[15] 谢陈, 汪代杰, 张红艳, 等. 调强计划中计算网格大小对剂量与计算时间的影响[J]. 医学工程技术, 2018, 33(9): 86-88.

[16] 王琳婧, 张国前, 雷怀宇, 等. 直接机器参数优化模式下不同子野数目对宫颈癌调强计划的影响[J]. 中国医学物理学杂志, 2017, 34(7): 708-711.

[17] 王继平, 杨志勇, 吕文天, 等. 不同子野面积参数对胃癌静态调强放疗计划的影响研究[J]. 医疗卫生装备, 2022, 43(2): 41-46.

[18] CHIN L O, JOHAN P C, SURESH S, et al. Impact of the calculation resolution of AAA for small fields and RapidArc treatment plans[J]. Medical Physics, 2011, 38(8): 4471-4479.

[19] 岳金波, 张烨, 章文成, 等. 放疗医生评估放疗计划中国专家共识[J]. 中华肿瘤防治杂志, 2024, 31(8): 453-470.

[20] BEUKEMA J C, KAWAGUCHI Y, SIJTSEMA N M, et al. Can we safely reduce the radiation dose to the heart while compromising the dose to the lungs in oesophageal cancer patients[J]. Radiother Oncol, 2020, 149: 222-227.

[21] PAN W Y, BIAN C, ZOU G L, et al. Combing NLR, V20 and mean lung dose to predict radiation induced lung injury in patient with lung cancer treated with intensity modulated radiation therapy and chemotherapy [J]. Oncotarget, 2017, 8(46): 81387- 81393.

[22] NEWHAUSER W D, DURANTE M. Assessing the risk of second malignancies after modern rodiotherapy[J]. Nat Rev Cancer, 2011, 11(6): 438-448.

[23] THOMAS F D, TORUNN I Y, HARALD P. Assessing second cancer risk after primary cancer treatment with photon or proton radiotherapy[J].Cancer, 2020, 126(15): 3397-3399.

[24] MARCU L G, SANTOS A, BEZAK E. Risk of second primary cancer after breast cancer treatment[J].Eur J Cancer Care, 2014, 23(1): 51-64.

[25] SUA L F, OSORIO A E, VALERIA Z R, et al. Developmeng of a sencond primary lung cancer following a primary breast cancer: a case series[J]. J Investig Med High Impact Case Rep, 2024, 12: 1-13.

[26] 刘良友, 杨涛, 丛小虎, 等. 两套商用治疗计划系统中VMAT计划质量及其验证的对比研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2018, 35(11): 1241-1245.

[27] ABO-MADYAN Y, AZIZ M H, SCHENICER F, et al. Second cancer risk after 3D-CRT, IMRT and VMAT for breast cancer[J]. Radiother Oncol, 2014, 110(3): 471-476.

（童颖丹　编辑）

本文引用格式：解小丽, 翟小娟, 朱玉宏, 等. 乳腺癌改良根治术后调强放疗的精细化调整[J]. 中国现代医学杂志, 2026, 36(4): 19-25.

Cite this article as: XIE X L, ZHAI X J, ZHU Y H, et al. Refined intensity-modulated radiotherapy planning after modified radical mastectomy for breast cancer[J]. China Journal of Modern Medicine, 2026, 36(4): 19-25.