·临床研究·

# 非均整模式下左侧早期乳腺癌保乳术后动态与静态调强放疗技术的剂量学对比研究

范亚明* 刘爽 年峰 张琦 李新宇

（蚌埠市第三人民医院放射治疗科，蚌埠 233000）

**【摘要】 目的** 比较6 MV光子束非均整模式（flattening filter free, FFF）下左侧早期乳腺癌保乳术后动态调强（dynamic intensity modulated radiotherapy, dIMRT）与不同最小子野面积（the minimum segment area, MSA）参数下静态调强（static intensity modulated radiotherapy, sIMRT）放疗技术的剂量学差异。**方法** 回顾性收集2024年3月至2025年3月在蚌埠市第三人民医院接受放射治疗的12例左侧早期乳腺癌女性患者的临床影像与治疗资料，应用联影放射治疗计划系统（uTPS）采用FFF模式为每例患者设计dIMRT和sIMRT计划，sIMRT计划的MSA分别为0.3、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、8.0和10.0 $cm^2$，每例患者得到10个计划，处方剂量为50 Gy，常规分割照射2 Gy/次，5次/周。比较不同计划的靶区剂量分布、危及器官（organs at risk, OARs）剂量受量以及计划执行效率和γ通过率。**结果** dIMRT的95%处方剂量的体积（$V_{95}$）、平均剂量（$D_{mean}$）、均匀性指数（HI）均略优于sIMRT，107%处方剂量的体积（$V_{107}$）、最大剂量（$D_{max}$）具有明显优势，dIMRT心脏的$D_{mean}$明显优于sIMRT，差异均具有统计学意义（$P<0.05$）；dIMRT skin 0～2、skin 2～5、skin 5～8的$D_{mean}$优于sIMRT，但是差异无统计学意义（$P>0.05$）；dIMRT的机器跳数（monitor units, MU）明显比sIMRT高，但是治疗时间节省了约25%，差异具有统计学意义（$P<0.05$）；在1 mm/1%评判标准下，dIMRT的γ通过率略低于sIMRT，且当MSA≤5.0 $cm^2$时，差异具有统计学意义（$P<0.05$）。**结论** 基于联影平台FFF模式下的左侧早期乳腺癌保乳术后调强放疗中，dIMRT在靶区剂量分布、OARs剂量受量以及计划执行效率等方面优于sIMRT，建议在类似设备与临床条件下倾向于选择dIMRT进行计划设计。

**【关键词】** 乳腺癌；非均整模式；静态调强；动态调强；剂量学

**【中图分类号】** R730.55；R818 **【文献标识码】** A **【DOI】** 10.11876/mimt202601009

# Dosimetric analysis of dynamic and static IMRT in flattening filter free mode for left-sided early-stage breast cancer conserving surgery

*Fan Yaming*, Liu Shuang, Nian Feng, Zhang Qi, Li Xinyu*

*(Department of Radiotherapy, the Third People's Hospital of Bengbu, Bengbu 233000, China)*

**【Abstract】 Objective** To compare the dosimetric differences between dynamic intensity-modulated radiotherapy (dIMRT) and static intensity-modulated radiation therapy (sIMRT) with varying minimum segment area (MSA) parameters, using 6 MV flattening filter-free (FFF) photon beams for left-sided early-stage breast cancer patients after breast-conserving surgery. **Methods** A retrospective study was conducted using clinical imaging and treatment data from twelve female patients with left-sided early-stage breast cancer, who were treated at the Third People's Hospital of Bengbu from March 2024 to March 2025. Each patient received dIMRT and sIMRT(MSA values of 0.3, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 8.0, and 10.0 $cm^2$ were applied) plans in FFF mode using treatment planning system of United Imaging. The prescription dose was 50 Gy, delivered at 2 Gy per time, 5 times per week. Plan comparisons included the dose distribution in the target volume, dose to organs at risk (OARs), skin dose (skin 0 ~ 2, skin 2 ~ 5,

**基金项目：**蚌埠市科技创新指导类项目（2025ZD0004）；蚌埠医科大学科技项目（2024byzd484）

**第一作者：**范亚明，男，硕士研究生，工程师，研究方向：医用放射线设备

skin 5 ~ 8), plan efficiency [monitor units (MUs), delivery time], and gamma passing rates (1 mm/1% criteria). **Results** dIMRT demonstrated slightly superior target coverage ($V_{95}$, $D_{mean}$, HI) and significantly improved $V_{107}$ and $D_{max}$ compared to sIMRT ($P<0.05$). The $D_{mean}$ of heart was significantly lower in dIMRT ($P<0.05$). The $D_{mean}$ of skin doses were reduced in dIMRT ($P>0.05$). Although dIMRT required higher MUs, it reduced delivery time by 25% ($P<0.05$). γ passing rates under 1 mm/1% criteria were marginally lower for dIMRT (MSA ≤ 5.0 $cm^2$, $P<0.05$). **Conclusion** For early-stage left-sided breast cancer patients receiving IMRT after breast-conserving surgery under the FFF mode on the United Imaging platform, dIMRT demonstrates superiority over sIMRT in terms of target dose distribution, dose sparing of OARs, and delivery efficiency. It is therefore recommended that dIMRT be preferentially considered for treatment planning under similar equipment and clinical conditions.

**【Key words】** Breast cancer; Flattening filter free(FFF); Static intensity modulated radiotherapy(sIMRT); Dynamic intensity modulated radiotherapy(dIMRT); Dosimetry

2020年全球癌症登记数据显示，乳腺癌在所有癌症中的占比高达11.7%[1]，已成为全球最常见的恶性肿瘤，严重威胁着女性健康。目前，乳腺癌已经成为我国女性发病率最高的恶性肿瘤之一。相较于创伤面大、治疗恢复时间长的根治手术[2]，保乳手术不仅最大程度地保留了乳房组织，而且展现出更优的预后，已成为早中期乳腺癌治疗的首选方法[3]。

乳腺癌术后放疗是降低肿瘤复发风险、延长生存期的有效手段之一。临床上乳腺癌常规放疗通常采用剂量分布均匀的均整（flattening filter, FF）模式，而非均整（flattening filter free, FFF）模式将均整器更换为薄铜片，具有高剂量率、高能量、强穿透力、治疗时间短等优点[4]，适用于乳腺癌切线野放疗，同时低能X射线的增加可提高靠近皮肤浅层靶区的剂量。根据多叶准直器（multi-leaf collimator, MLC）的运动模式[5]，逆向调强放射治疗（intensity modulated radiotherapy, IMRT）分为静态调强（static intensity modulated radiotherapy, sIMRT）和动态调强（dynamic intensity modulated radiotherapy, dIMRT），相较于sIMRT，dIMRT通过调节MLC运动速度实时进行剂量调节从而实现剂量分布优化，可有效提高靶区剂量、改善靶区适形性和均匀性、减少危及器官（organs at risk, OARs）受量、提高肿瘤局部控制率[6-7]。

目前关于sIMRT和dIMRT的剂量学研究主要集中于医科达Monaco、瓦里安Eclipse[8]、瑞速RayStation等国外治疗计划系统（treatment planning system, TPS）和直线加速器的FF模式。本研究基于国产联影uRT-linac 506c直线加速器，比较6 MV光子束FFF模式（剂量率1 200 MU/min）下左侧早期乳腺癌保乳术后dIMRT与不同最小子野面积（the minimum segment area, MSA）参数下sIMRT放疗技术的剂量学差异，探讨国产放疗设备FFF模式下乳腺癌保乳术后IMRT不同计划方案的优劣，为临床应用提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料收集

回顾性收集2024年3月至2025年3月在蚌埠市第三人民医院行术后IMRT放射治疗的12例左侧早期乳腺癌患者的临床资料。患者均为女性，年龄为29 ~ 57岁，中位年龄为44岁。纳入标准：年龄18 ~ 80岁；经术后病理确诊为原发性左侧乳腺癌，依据美国癌症联合委员会（American Joint Committee on Cancer, AJCC）第8版乳腺癌TNM分期标准，界定为早期乳腺癌（0期、Ⅰ期）；术后切缘病理分析均无残留且符合放射治疗标准。排除标准：妊娠及哺乳期女性；接受乳房重建患者；放射治疗禁忌证患者。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 CT模拟定位

患者采用乳腺托架固定，取仰卧位，上肢上举置于手臂托架中。于手术瘢痕位置、引流口、患侧胸壁与乳腺褶皱下2 cm处等位置实施铅点标记。自由平静呼吸训练后，体表标记激光等中心点。利用uRT-linac 506c的诊断级CT进行模拟定位，扫描层厚为5 mm，范围从下颌骨至肋膈角下5 cm处。扫描后医学数字成像与通信（digital imaging and

communications in medicine, DICOM）格式图像文件自动归档储存于TPS系统。

**1.2.2** 靶区勾画

所有患者均由同一名主治医师严格遵循欧洲放射肿瘤学会（European Society of Radiotherapy Oncology, ESTRO）乳腺癌术后照射靶区勾画指南勾画临床靶区（clinical target volume, CTV）、计划靶区（planning target volume, PTV）和OARs，再由同一名主任医师审核确认。OARs包括：左肺（Lung_L）、右肺（Lung_R）、右乳腺（Breast_R）、心脏（Heart）、冠状动脉左前降支（left anterior descending coronary artery, LAD），以及皮下0～2 mm、2～5 mm、5～8 mm环状轮廓减去PTV外扩1 cm后生成的skin 0～2、skin 2～5、skin 5～8。患者皮下感兴趣区域（region of interest, ROI）分布见图1。

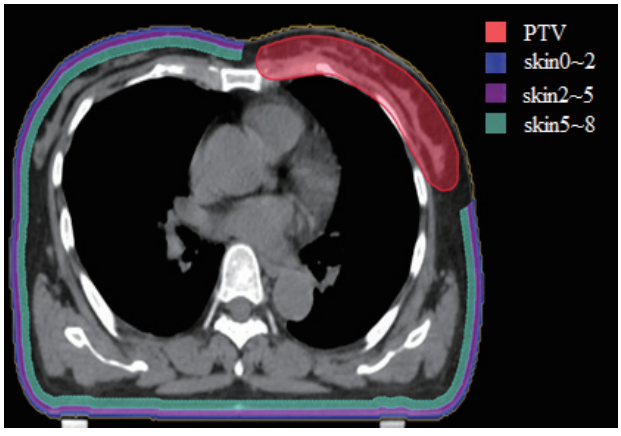



**图1** 患者皮下ROI分布

注：ROI为感兴趣区域；PTV为计划靶区；Skin 0～2为皮下0～2 mm环状轮廓减去PTV外扩1 cm；Skin 2～5为皮下2～5 mm环状轮廓减去PTV外扩1 cm；Skin 5～8为皮下5～8 mm环状轮廓减去PTV外扩1 cm。

**1.2.3** 计划设计

基于联影放射治疗计划系统（uTPS）进行IMRT计划设计，射线源采用uRT-linac 506c FFF模式下6 MV X射线，为每位患者设计两种调强计划即dIMRT和sIMRT。所有计划均由同一名物理师优化设计，根据靶区位置和大小，采用切线野的布野方式，设置个性化的照射野角度，照射野数均为6个，剂量率为1 200 MU/min。dIMRT计划为默认优化参数，迭代次数为30，最大子野个数为36；sIMRT计划MSA分别为0.3、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、8.0和10.0 $cm^2$，记为MSA 0.3、MSA 1.0、MSA 2.0、MSA 3.0、MSA 4.0、MSA 5.0、MSA 6.0、MSA 8.0和MSA 10.0，其他优化参数均保持相同，其中，迭代次数为30，最小子野跳数为4 MU/次，最大子野个数为60。以上10个计划的PTV处方剂量均为50 Gy，常规分割照射2 Gy/次，5次/周。50 Gy、2 Gy/（次·d）、5次/周，OARs限值要求：左肺$V_5$<50%、$V_{20}$<30%，右肺和右乳腺$V_5$<10%，心脏$V_{30}$<40%、$V_{40}$<30%、平均剂量（$D_{mean}$）<8 Gy，脊髓最大剂量（$D_{max}$）<40 Gy。优化完成后按照95%的PTV达到处方剂量进行剂量归一，再由同一名物理师审核通过后方可纳入计划评估。

**1.2.4** 计划评估

（1）PTV评估参数：$V_{95}$（$V_a$表示a%的处方剂量覆盖靶区的体积）、$V_{107}$、最大剂量（$D_{max}$）、平均剂量（$D_{mean}$）、适形性指数（conformity index, CI）、均匀性指数（homogeneity index, HI）。$CI=(V_{Tref}/V_T)\times(V_{Tref}/V_{ref})$，其中，$V_{Tref}$为PTV内处方等剂量线即50 Gy包绕的体积，$V_T$为PTV的体积，$V_{ref}$为处方等剂量线即50 Gy包绕的区域体积，CI值越接近1说明适形性越好。$HI=(D_2-D_{98})/D_{50}$，其中，$D_x$表示PTV x%体积接受的剂量，HI值越接近0说明靶区剂量均匀性越好。

（2）ROI评估参数：左肺的$V_{30}$、$V_{20}$、$V_5$、$D_{mean}$，右肺、右乳腺、心脏、LAD、skin 0～2、skin 2～5以及skin 5～8的$D_{mean}$。

（3）机器治疗跳数（monitor unit, MU）和实际治疗时间（直线加速器实际执行放疗的时间，不包括机架旋转时间）。

（4）剂量验证及分析方法：选用IBA公司的MatriXX电离室矩阵和MiniPhantom模体进行剂量验证。将sIMRT和dIMRT计划分别移植到MiniPhantom模体的CT图像上，通过uPWS获得机架角度归零多野合成验证计划并导出等中心处冠状面的剂量分布文件。通过myQA patients对各验证计划的γ通过率进行分析。分析标准采用1 mm/1%和3 mm/3%。

**1.3** 统计学方法

应用SPSS 20.0软件对数据进行统计学分析，数据以均数 ± 标准差（$\bar{x} \pm s$）描述。不同计划之间的参数差异符合正态分布采用配对样本$t$检验，否则采

用非参数 Wilcoxon 秩和检验。为减少假阳性事件发生，采用错误发现率（false discovery rate, FDR）校正法对本研究所有组间比较的 $P$ 值进行校正。经 FDR 校正后的 $P$ 值 <0.05 被认为差异具有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 靶区剂量比较

dIMRT 与不同 MSA 参数下 sIMRT 的靶区剂量学参数比较见表 1。由表 1 可知，dIMRT 的 $V_{95}$、HI 均略优于 sIMRT，差异具有统计学意义（$P$ <0.05）；dIMRT 的 $V_{107}$、$D_{max}$ 具有明显优势，差异具有统计学意义（$P$ <0.05）。dIMRT 与 sIMRT 的 CI 相近，差异无统计学意义（$P$ >0.05）。不同 MSA 参数的 sIMRT 的 $V_{95}$、$D_{max}$、$D_{mean}$、CI、HI 等剂量学参数差异不大，而 MSA 为 3.0 ~ 5.0 $cm^2$ 时 sIMRT 的 $V_{107}$ 明显优于其他 MSA 参数的 sIMRT。如图 2 所示，为某例患者 dIMRT 与 sIMRT–MSA1.0 计划的剂量分布图对比，对比发现 dIMRT 在高剂量区优势明显。

**表 1** dIMRT 与不同 MSA 参数下 sIMRT 的靶区剂量学参数比较（$\bar{x} \pm s$）

| 组别 | $V_{95}$（%） | $V_{107}$（%） | $D_{max}$（%） | $D_{mean}$（Gy） | CI | HI |
|---|---|---|---|---|---|---|
| dIMRT | 99.91 ± 0.05 | 6.98 ± 3.53 | 54.82 ± 0.32 | 51.81 ± 0.10 | 0.88 ± 0.02 | 0.08 ± 0.01 |
| MSA 0.3 | 99.85 ± 0.07* | 10.42 ± 3.89* | 55.34 ± 0.46* | 51.94 ± 0.12* | 0.72 ± 0.02 | 0.09 ± 0.01* |
| MSA 1.0 | 99.84 ± 0.07* | 10.49 ± 4.30* | 55.37 ± 0.47* | 51.95 ± 0.13* | 0.87 ± 0.02 | 0.09 ± 0.01* |
| MSA 2.0 | 99.85 ± 0.07* | 10.64 ± 4.62* | 55.45 ± 0.67* | 51.96 ± 0.14* | 0.87 ± 0.02 | 0.09 ± 0.01* |
| MSA 3.0 | 99.84 ± 0.07* | 10.02 ± 3.86* | 55.41 ± 0.56* | 51.94 ± 0.13* | 0.87 ± 0.02 | 0.09 ± 0.01* |
| MSA 4.0 | 99.84 ± 0.08* | 10.15 ± 3.77* | 55.43 ± 0.41* | 51.93 ± 0.12* | 0.87 ± 0.02 | 0.09 ± 0.01* |
| MSA 5.0 | 99.85 ± 0.07* | 10.20 ± 4.20* | 55.44 ± 0.52* | 51.94 ± 0.14* | 0.87 ± 0.02 | 0.09 ± 0.01* |
| MSA 6.0 | 99.84 ± 0.07* | 10.84 ± 4.06* | 55.33 ± 0.47* | 51.96 ± 0.13* | 0.87 ± 0.02 | 0.09 ± 0.01* |
| MSA 8.0 | 99.85 ± 0.07* | 10.83 ± 4.52* | 55.52 ± 0.59* | 51.96 ± 0.16* | 0.87 ± 0.02 | 0.09 ± 0.01* |
| MSA 10.0 | 99.83 ± 0.08* | 10.75 ± 4.39* | 55.51 ± 0.48* | 51.96 ± 0.14* | 0.87 ± 0.02 | 0.09 ± 0.01* |

注：dIMRT 为动态调强；MSA 为最小子野面积；sIMRT 为静态调强；$V_{95}$ 为 95% 处方剂量所占的靶区体积；$V_{107}$ 为 107% 处方剂量所占的靶区体积；$D_{max}$ 为靶区最大剂量；$D_{mean}$ 为靶区平均剂量；CI 为适形性指数；HI 为均匀性指数；*表示与 dIMRT 组进行比较时，经 FDR 校正后的 $P$ 值 <0.05。

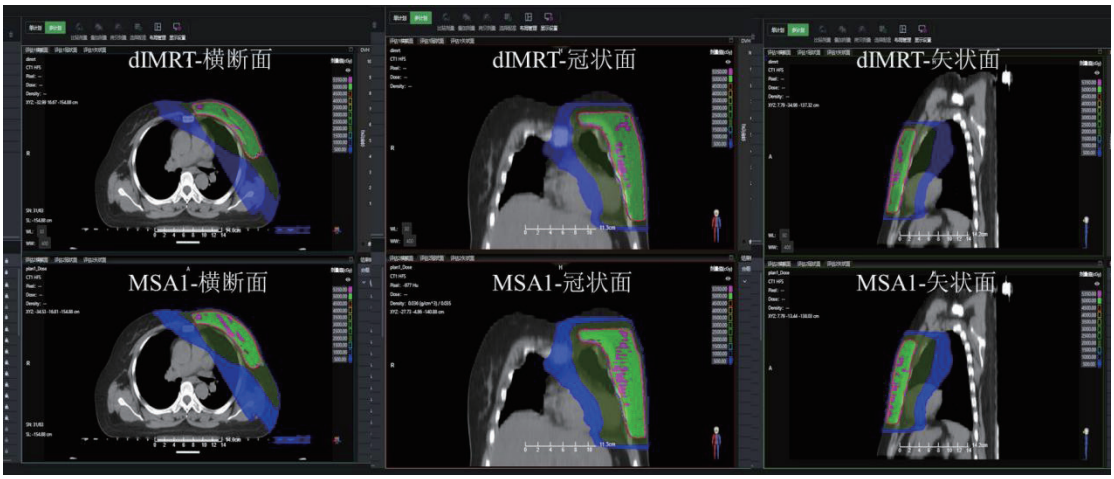



**图 2** 某例患者 dIMRT 与 sIMRT–MSA1.0 计划的剂量分布图对比

### 2.2 ROI 剂量分析

dIMRT 与不同 MSA 参数下 sIMRT 的 ROI 剂量学参数比较见表 2。由表 2 可知，dIMRT 左肺的 $V_{30}$、$V_{20}$、$V_5$ 与 sIMRT 没有差异，左肺、右乳腺以及 LAD 的 $D_{mean}$ 低于 sIMRT，而右肺的 $D_{mean}$ 高于 sIMRT，差异均无统计学意义（$P$ >0.05）；dIMRT 心脏的 $D_{mean}$ 明显优于不同 MSA 参数的 sIMRT，差异具有统计学意义（$P$ <0.05）；dIMRT skin 0 ~ 2、skin 2 ~ 5、skin 5 ~ 8 的 $D_{mean}$ 均比 sIMRT 低约 4 cGy，差异无统计学意义（$P$ >0.05）。如图 3 所示，为某例患者 dIMRT 与 sIMRT–MSA1.0 计划的剂量体积直方图（dose and volume histogram, DVH）对比，由图可见，dIMRT 的 OARs 剂量略优。

**表 2** dIMRT与不同MSA参数下sIMRT的ROI剂量学参数比较（$\bar{x} \pm s$）

| 组别 | Lung_L | | | | Lung_R | Breast_R |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $V_{30}$（%） | $V_{20}$（%） | $V_5$（%） | $D_{mean}$（cGy） | $D_{mean}$（cGy） | $D_{mean}$（cGy） |
| dIMRT | 13.90 ± 4.13 | 20.82 ± 5.12 | 41.08 ± 7.25 | 1027.18 ± 207.34 | 56.79 ± 33.19 | 163.15 ± 50.00 |
| MSA 0.3 | 13.89 ± 4.11 | 21.03 ± 5.70 | 41.11 ± 7.41 | 1041.65 ± 218.29 | 54.88 ± 33.33 | 165.52 ± 53.28 |
| MSA 1.0 | 13.88 ± 4.13 | 20.98 ± 5.66 | 41.17 ± 7.42 | 1042.30 ± 219.29 | 55.39 ± 32.99 | 165.86 ± 53.61 |
| MSA 2.0 | 13.87 ± 4.11 | 20.99 ± 5.59 | 41.17 ± 7.40 | 1042.31 ± 217.56 | 55.43 ± 33.00 | 165.67 ± 53.25 |
| MSA 3.0 | 13.90 ± 4.11 | 20.99 ± 5.56 | 41.10 ± 7.44 | 1041.65 ± 218.29 | 55.47 ± 32.00 | 165.95 ± 53.64 |
| MSA 4.0 | 13.87 ± 4.13 | 20.91 ± 5.57 | 41.09 ± 7.42 | 1040.31 ± 218.44 | 55.50 ± 33.05 | 165.16 ± 51.53 |
| MSA 5.0 | 13.89 ± 4.16 | 21.01 ± 5.68 | 41.10 ± 7.45 | 1041.70 ± 220.31 | 55.68 ± 33.85 | 164.23 ± 52.06 |
| MSA 6.0 | 13.95 ± 4.10 | 21.05 ± 5.61 | 41.10 ± 7.42 | 1043.87 ± 218.65 | 55.59 ± 33.23 | 165.25 ± 52.67 |
| MSA 8.0 | 13.88 ± 4.13 | 20.97 ± 5.63 | 41.18 ± 7.38 | 1042.92 ± 218.71 | 55.35 ± 33.50 | 164.21 ± 50.85 |
| MSA 10.0 | 13.88 ± 4.15 | 21.00 ± 5.76 | 41.07 ± 7.53 | 1042.49 ± 222.97 | 55.31 ± 33.67 | 163.79 ± 50.40 |

| 组别 | Heart | LAD | Skin 0～2 | Skin 2～5 | Skin 5～8 |
|---|---|---|---|---|---|
| | $D_{mean}$（cGy） | $D_{mean}$（cGy） | $D_{mean}$（cGy） | $D_{mean}$（cGy） | $D_{mean}$（cGy） |
| dIMRT | 568.06 ± 105.98 | 2 419.08 ± 740.22 | 143.99 ± 26.76 | 170.65 ± 26.92 | 176.57 ± 25.47 |
| MSA 0.3 | 582.56 ± 115.94* | 2 529.99 ± 241.05 | 147.80 ± 29.86 | 174.70 ± 26.93 | 181.22 ± 25.96 |
| MSA 1.0 | 585.52 ± 116.38* | 2 525.07 ± 834.12 | 147.82 ± 30.16 | 174.68 ± 26.83 | 181.22 ± 25.99 |
| MSA 2.0 | 585.74 ± 114.87* | 2 565.04 ± 819.14 | 147.53 ± 30.30 | 174.37 ± 26.82 | 180.94 ± 26.02 |
| MSA 3.0 | 585.85 ± 115.81* | 2 556.57 ± 800.10 | 147.44 ± 30.39 | 174.20 ± 26.74 | 180.76 ± 25.92 |
| MSA 4.0 | 584.85 ± 116.54* | 2 537.56 ± 802.63 | 147.35 ± 30.25 | 174.04 ± 26.73 | 180.40 ± 25.89 |
| MSA 5.0 | 583.42 ± 116.59* | 2 546.21 ± 818.99 | 147.11 ± 30.27 | 173.72 ± 26.69 | 180.30 ± 25.86 |
| MSA 6.0 | 583.73 ± 113.94* | 2 548.21 ± 833.70 | 147.29 ± 29.91 | 174.05 ± 26.21 | 180.61 ± 25.22 |
| MSA 8.0 | 585.41 ± 114.69* | 2 566.30 ± 810.44 | 147.25 ± 30.30 | 173.99 ± 26.49 | 176.57 ± 25.47 |
| MSA 10.0 | 586.66 ± 115.80* | 2 570.30 ± 834.34 | 147.33 ± 30.53 | 174.00 ± 26.67 | 180.62 ± 25.76 |

注：dIMRT为动态调强；MSA为最小子野面积；sIMRT为静态调强；Lung_L为左肺；Lung_R为右肺；Breast_R为右乳腺；Heart为心脏；LAD为冠状动脉左前降支；Skin 0～2为皮下0～2 mm环状轮廓减去PTV外扩1 cm；Skin 2～5为皮下2～5 mm环状轮廓减去PTV外扩1 cm；Skin 5～8为皮下5～8 mm环状轮廓减去PTV外扩1 cm；$V_{30}$为30 Gy所占的体积；$V_{20}$为20 Gy所占的体积；$V_5$为5 Gy所占的体积；$D_{mean}$为平均剂量；*表示与dIMRT组进行比较时，经FDR校正后的$P$值<0.05。

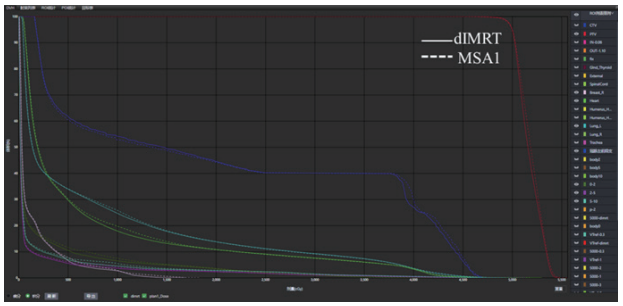



**图 3** 某例患者dIMRT与sIMRT–MSA1.0计划的DVH对比

注：DVH为剂量体积直方图。

### 2.3 治疗相关参数比较

dIMRT与不同MSA参数下sIMRT的治疗相关参数比较如表3所示。由表可知，dIMRT的MU为826.57 ± 111.14，明显比sIMRT高约200，然而治疗时间节省了约25%，差异具有统计学意义（$P$<0.05）。采用机架角度归零多野合成验证方法，在3 mm/3%评判标准下，120个计划的γ通过率均大于98%，满足临床要求；而在1 mm/1%评判标准下，sIMRT明显优于dIMRT，且MSA≤5 $cm^2$时，差异具有统计学意义（$P$<0.05）。

**表 3** dIMRT 与不同 MSA 参数下 sIMRT 的治疗相关参数比较

| 组别 | MU | 治疗时间（min） | 1 mm/1% 评判标准下的 γ 通过率（%） |
|---|---|---|---|
| dIMRT | 826.57 ± 111.14 | 2.54 ± 0.17 | 72.65 ± 10.46 |
| MSA 0.3 | 626.14 ± 54.10* | 3.59 ± 0.32* | 80.33 ± 8.65* |
| MSA 1.0 | 625.05 ± 56.20* | 3.59 ± 0.35* | 79.15 ± 9.34* |
| MSA 2.0 | 624.43 ± 51.30* | 3.53 ± 0.28* | 78.77 ± 8.86* |
| MSA 3.0 | 626.35 ± 54.75* | 3.52 ± 0.29* | 78.64 ± 9.68* |
| MSA 4.0 | 625.78 ± 52.19* | 3.52 ± 0.29* | 78.31 ± 9.71* |
| MSA 5.0 | 628.61 ± 50.67* | 3.54 ± 0.29* | 78.35 ± 10.05* |
| MSA 6.0 | 628.86 ± 54.51* | 3.55 ± 0.30* | 77.66 ± 10.40 |
| MSA 8.0 | 626.31 ± 51.00* | 3.55 ± 0.30* | 77.41 ± 9.97 |
| MSA 10.0 | 629.90 ± 46.03* | 3.54 ± 0.31* | 77.45 ± 10.05 |

注：dIMRT 为动态调强；MSA 为最小子野面积；sIMRT 为静态调强；MU 为机器跳数；*表示与 dIMRT 组进行比较时，经 FDR 校正后的 $P$ 值 <0.05。

## 3 讨论

乳腺癌保乳术后辅助放疗，不仅能够显著降低肿瘤局部复发率，而且可保留绝大部分乳房外形，已成为早期乳腺癌治疗的首选方式。随着乳腺癌术后放疗患者生存率的不断提高，放疗放射性损伤并发症日益凸显，特别是放射性肺炎、放射性心脏损伤[9]、放射性皮肤损伤[10]以及放射性骨骼损伤等，放射性损伤并发症的发病概率与 OARs 的平均放射剂量有直接关系[11]。

相较于传统 FF 模式，FFF 射束的剂量率大大增加，在治疗效率提高的同时机头漏射和散射较少，有利于保护正常组织，减少辐射诱变的二次癌症的发生，而且其剂量分布形状与乳腺癌弓形靶区相适应。沈文同等[12]通过研究左侧乳腺癌保乳术后正向调强计划，验证了 FFF 模式在靶区均匀性、平均剂量以及治疗效率等方面更具优势。唐华南等[13]进一步研究发现，左侧乳腺癌 IMRT 计划中，FFF 模式下靶区的 $V_{95}$，CI，心脏、左前降支、右侧乳腺、肝脏的 $D_{mean}$，左侧肺的 $V_5$ 等剂量参数以及治疗效率均优于 FF 模式。

钟胜河等[14]研究发现，在 FF 模式下的乳腺癌保乳术后放疗中，最小子野面积对 sIMRT 计划的靶区和 OARs 剂量参数影响很小，dIMRT 的靶区 CI、HI 优于 sIMRT，但是 dIMRT 的 OARs 受量高于 sIMRT，且执行时间较长。Fodil 等[6]对 FF 模式下 27 例头颈部癌、前列腺癌、宫颈癌的 IMRT 计划进行研究，发现与 sIMRT 相比，dIMRT 提供了更好的靶区覆盖、CI 和 HI，同时缩短了治疗时间。总之，dIMRT 在靶区剂量参数方面具有明显的优势，但是在 OARs 及皮肤受量、治疗效率和 γ 通过率等方面需要进一步研究。

sIMRT 和 dIMRT 在优化过程中受最大子野数、最小子野 MU 及 MSA 等关键参数的影响。sIMRT 采用步进（step and shoot）照射模式，剂量分布由一系列静态子野叠加而成，通过不同形状和大小的子野来逼近理想的剂量分布。而 dIMRT 则通过 MLC 叶片的连续运动与剂量率的实时调节来实现强度调制，其子野是连续变化的，对离散子野数量的依赖较低。为减少因技术原理导致的临床参数差异，在本研究中 dIMRT 采用较少的最大子野数（36 个），而 sIMRT 则设置较多的最大子野数（60 个）以提供更多的自由度。另外，为平衡剂量调制能力与加速器出束稳定性及剂量分布可靠性，最小子野 MU 统一设定为 4。针对 sIMRT 特有的 MSA 参数，本研究选取左侧早期乳腺癌保乳术后患者为研究对象，对 dIMRT 与 9 种不同 MSA 参数的 sIMRT 计划进行了全面的剂量学指标比较。考虑到多重比较可能带来的假阳性风险，采用 FDR 方法对统计显著性进行了校正，以增强研究结论的可靠性。

比较不同计划靶区剂量的结果显示，uPWS 在进行 sIMRT 计划优化时，MSA 参数调节范围在 0.3 ~ 10.0 $cm^2$，靶区剂量分布不受 MSA 的影响，而 dIMRT 靶区的 $V_{95}$、$V_{107}$、$D_{max}$、$D_{mean}$、HI 等参数均优于 sIMRT（$P$ <0.05）。这是由于 sIMRT 的 MLC 到达指定位置后才开始出束，照射野边缘存在散射、漏射，且剂量分布容易出现阶梯变化，最终导致靶区内容易出现高剂量区，而 dIMRT 的 MLC 的子野是连续变化的，因此子野剂量分布更平滑，靶区内高剂量区较少，剂量分布更均匀。比较不同计划 OARs 剂量的结果显示，dIMRT 心脏的 $D_{mean}$ 优于 sIMRT（$P$ <0.05），skin 0 ~ 2、skin 2 ~ 5、skin 5 ~ 8 的 $D_{mean}$ 也优于 sIMRT，但差异无统计学意义（$P$ >0.05），由于 sIMRT 与 dIMRT 的区别在于出束时 MLC 运动方式不同，这主要影响射野内剂量分布，而对射野外散射区域影响较小，因此心脏、skin 0 ~ 2、skin 2 ~ 5、skin 5 ~ 8 在切线野射野内部的 ROI 剂量分布存在差异，且 dIMRT 的辐射剂量较小。而左肺、右乳腺以及 LAD 等远离切线野或者进入射野较少的区域的 OARs 受到的影响较小，差

异无统计学意义（$P$>0.05）。比较各计划治疗相关参数的结果显示，dIMRT的MU明显比sIMRT高约200，但是治疗时间节省了约25%，差异具有统计学意义（$P$<0.05），当加速器剂量率为1 200 MU/min时，加速器的治疗时间由MLC的运动时间决定，sIMRT模式下MLC的运动时间较长，约占总治疗时间的90%以上，相较于dIMRT需要更多的治疗时间。单个患者的治疗时间减少，不仅能够减少器官运动带来的剂量误差，而且可以增加加速器每天治疗的患者数量。Wang等[15]研究发现，机架角度对MatriXX的剂量分布存在一定影响，为排除机架角度对验证剂量的影响，本文采用机架角度归零多野合成的验证方法，在3 mm/3%评判标准下，120个计划的γ通过率均大于98%，均满足临床要求[16]；在1 mm/1%评判标准下，dIMRT的γ通过率明显低于sIMRT，当MSA为0.3 ~ 5.0 cm²时差异具有统计学意义（$P$<0.05），与先前研究结果一致[17]。对于sIMRT，随着MSA尺寸的不断变大，γ通过率逐渐变小，造成这一结果的原因是γ验证的剂量偏差来源包括子野的叶片位置误差、剂量率波动、半影效应等，而TPS剂量计算算法存在一定的模型简化假设：对于小子野，算法对叶片透射、漏射的修正模型能够较好地匹配实际物理过程，计算剂量与实测剂量的偏差较小；对于大子野，算法通常假设子野内的剂量分布是均匀的，但在实际出束时，大子野的剂量分布会受到MLC叶片的半影叠加、剂量率场的空间不均匀性等影响，导致计算剂量与实测剂量的偏差增大[18]。这种TPS模型与临床实际不匹配的问题，在1 mm/1%的严格评判标准下会进一步凸显，表现为γ通过率下降。而dIMRT还受到MLC实际响应时间、走位精度以及验证设备射线响应等因素的影响[19]。

综上所述，在左侧早期乳腺癌保乳术后FFF模式下调强放疗过程中，dIMRT在靶区剂量分布、OARs剂量受量以及执行效率等方面优于sIMRT。dIMRT能够在提供良好治疗效果的同时最大限度地减少患者因治疗时间长造成的不适，临床上值得推广。

## [ 参 考 文 献 ]


[1] Sung H, Ferlay J, Siegel R L, et al. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. CA Cancer J Clin, 2021,71(3): 209–249.

[2] 中华医学会外科学分会乳腺外科学组. 中国乳腺癌改良根治术临床实践指南（2022版）[J]. 中国实用外科杂志, 2022, 42(2): 128–131.

[3] Speers C, Pierce L J. Postoperative radiotherapy after breast–conserving surgery for early–stage breast cancer: a review[J]. JAMA Oncol, 2016, 2(8): 1075–1082.

[4] 雷占全. 非均整模式与均整模式下儿童肾母细胞瘤容积调强放疗的剂量学研究[J]. 医疗卫生装备, 2024, 45(4): 70–73.

[5] 张盟蒙. 多叶光栅控制系统架构研究综述[J]. 现代仪器与医疗, 2023, 29(3): 66–72.

[6] Fodil N E, Abdelhakem M M, Yahia G A , et al. Evaluation of dynamic multi–leaf collimator (MLC) versus fixed MLC for intensity modulated radiotherapy (IMRT) using the agility 160–leaf collimator[J]. Asian Pacific Journal of Cancer Prevention, 2024, 25(7): 2467–2474.

[7] Srivastava A K, Mishra A, Manna S, et al. Evaluation of tumor control probability and normal tissue complication probability in IMRT and VMAT: a comparative study for assessment of efficacy of radiotherapy plans in tumors of the thorax[J]. Journal of Cancer Research and Therapeutics, 2025, 21(1): 131–136.

[8] 陈荣耀, 胡俊峰. 基于Eclipse计划系统在左侧乳腺癌术后RapidArc与dIMRT放疗技术剂量学对比研究[J]. 现代仪器与医疗, 2023, 29(6): 75–80, 86.

[9] 王鑫, 张烨, 王奇峰, 等. 放射性心脏损伤的研究进展[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2024, 33(11): 1007–1015.

[10] 魏金龙, 赵钦, 吕进财, 等. 放射性皮肤损伤的研究进展[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2024, 33(11): 1024–1032.

[11] 朱斌, 程冬, 刘文敏, 等. 左侧乳腺癌保乳术后辅助放疗中的心脏保护方法[J]. 中国医疗设备, 2023, 38(4): 166–169, 175.

[12] 沈文同, 张毅斌, 贾亚军, 等. 3FFF线束与常规2FF线束设计左侧乳腺癌保乳术后正向调强计划的比较研究[J]. 医学理论与实践, 2021, 34(24): 4238–4241, 4244.

[13] 唐华南, 王磊, 傅玉川, 等. 非均整模式与均整模式下乳腺癌保乳术后调强放疗的剂量学研究[J]. 中国医疗设备, 2023, 38(3): 45–50.

[14] 钟胜河, 胡洪波, 黎建绪. 早期乳腺癌保乳术后动态与静态调强放疗技术的剂量学对比分析[J]. 广西医学, 2020, 42(11): 1377–1380, 1393.

[15] Wang S, Zheng Y. Evaluation and improvement of angular response for a commercial 2D detector array for patient–specific QA[J]. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 2023, 24(9): e14106.

[16] 蔡丹婷. 基于ArcCheck模体放疗计划的验证与分析[J]. 现代仪器与医疗, 2024, 30(3): 29–33

[17] 范亚明, 郁家文, 年峰, 等. MatrixX两种剂量验证方法在乳腺癌动静态调强放疗计划剂量验证中的对比研究[J]. 现代仪器与医疗, 2025, 31(1): 63–69.

[18] Westerhoff J M, Daamen L A, Christodouleas J P, et al. Safety and tolerability of online adaptive high–field magnetic resonance–guided radiotherapy[J]. JAMA Netw Open, 2024, 7(5): e2410819.

[19] 杨彦举, 方应涛, 高大地, 等. uRT–TPS和Monaco–TPS对同一直线加速器在多癌种放射剂量计算方面差异的比较[J]. 中国癌症杂志, 2024, 34(1): 82–89.