·诊治分析·

# 深吸气屏气下四种放疗技术在左侧乳腺癌患者心脏亚结构中的剂量学比较

李明，方家，丁叔波

**【摘要】目的**　比较深吸气屏气（DIBH）条件下不同放疗技术对左侧乳腺癌患者心脏及其亚结构的剂量学影响。**方法**　本研究为回顾性研究。纳入 2022 年 1 月至 2025 年 5 月金华市中心医院收治的左侧乳腺癌患者 85 例，为每例患者设计四种放疗计划：三维适形放疗（3D-CRT）、动态调强放疗（dIMRT）、容积旋转调强放疗（VMAT）及非共面容积旋转调强放疗（nVMAT）。比较各计划中心脏及其亚结构的剂量学参数。**结果**　四种技术对心脏及亚结构的剂量影响差异均有统计学意义（均 $P < 0.05$），nVMAT 在剂量学指标上表现最佳，其次为 VMAT、dIMRT，3D-CRT 最差。临床分期Ⅲ期与蒽环类化疗史是左心室剂量升高的独立危险因素（均 $P < 0.05$），左前降支（LAD）剂量同时受蒽环类化疗史与放疗技术影响（均 $P < 0.05$）。虽然所有患者全心脏剂量均达标，但在表现最优的 nVMAT 技术下仍有 45.9%的计划 LAD 或瓣膜剂量超标。**结论**　在 DIBH 条件下，nVMAT 在心脏亚结构保护中具有潜在优势，但部分患者仍需更精细的优化策略。

**【关键词】**　左侧乳腺癌；放射治疗；深吸气屏气；心脏亚结构；剂量学比较

doi:10.3969/j.issn.1671-0800.2026.08.010

**【中图分类号】**　R737.9　**【文献标志码】**　A　**【文章编号】**　1671-0800(2026)08-0870-05

乳腺癌是女性高发的恶性肿瘤，放疗作为乳腺癌保乳术及改良根治术后核心的辅助治疗，可显著降低局部复发率[1]。在左侧乳腺癌放疗时，由于心脏与胸壁靶区邻近，射线容易照射心脏引发放射性心脏损伤（RIHD），其潜伏期长达 5 ～ 20 年，包括心肌病变、冠心病等并发症，占远期非肿瘤性死亡原因的 40%以上。既往研究显示心脏受照射剂量每增加 1 Gy，重大心脏疾病发生率增加 7.4%[2]，因此精准降低心脏及其亚结构照射剂量至关重要。心脏亚结构放射敏感性差异明显，左心室、左前降支（LAD）、瓣膜及窦房结是 RIHD 主要靶器官。研究显示，LAD 受照剂量＞ 30 Gy 时冠心病风险增加 2.8 倍，瓣膜受照剂量＞ 10 Gy 时瓣膜狭窄发生率升高 3 倍[3]。由于传统放疗仅关注全心脏剂量，难以真实反映各亚结构真实受照射情况，而且三维适形放疗（3D-CRT）、动态调强放疗（dIMRT）、容积旋转调强放疗（VMAT）及非共面容积旋转调强放疗（nVMAT）等先进技术联合吸气屏气（DIBH）的横向对比研究较少[4]。目前已报道的研究存在明显不足，仅 30%纳入精细亚结构分析，80%以上为 1 ～ 2 种技术对比[5-6]，且缺乏统一的亚结构剂量执行标准，仅靠全心脏剂量控制时约 20%的患者可能出现 LAD 或瓣膜受照剂量超标，所以临床亟须大样本多技术模拟的对比研究[7]。本研究在 DIBH 条件下系统比较四种放疗技术对心脏核心与精细亚结构剂量差异，为亚结构剂量约束提供依据，现报道如下。

## 1　资料与方法

1.1　一般资料　本研究为回顾性研究。纳入 2022 年 1 月至 2025 年 5 月金华市中心医院收治的符合入组标准的 85 例左侧乳腺癌术后行 DIBH 技术放疗的患者。纳入标准：（1）符合《中国抗癌协会乳腺癌诊治指南与规范（2021 年版）》[8]；（2）临床分期Ⅰ～Ⅲ期；（3）保乳术或改良根治术后需行辅助放疗；（4）心肺功能基本正常，无严重心脏病；（5）可配合 DIBH 训练；（6）有完整的定位 CT 及临床资料。排除标准：（1）既往接受胸部放疗史；（2）放疗过程中未能完成 DIBH 或治疗依从性差；（3）放疗方案中断或更改者。四种放疗计划均来源于同一患者，属于重复测量设计，样本量计算基于重复测量方差分析模型。采用 G*Power 3.1 软件进行估算[9]。根据既往文献及预实验数据，以全心脏平均照射剂量（$D_{mean}$）作为主要效应指标进行

**基金项目：**　金华市科技计划项目公益类项目（2024-4-068）

**作者单位：**　321000 金华，金华市中心医院

**通信作者：**　丁叔波，Email：jhyyys@163.com

样本量估算（因其为放疗剂量学研究中最常用且稳定的评价指标），不同技术间的效应量 f 取 0.25（中等效应量），设检验水准 $\alpha$=0.05，检验效能（1–$\beta$）=0.80，组内相关系数设为 0.5，测量次数为 4。计算结果显示所需最小样本量为 44 例，本研究最终纳入 85 例患者，样本量满足统计学要求。纳入患者基线资料见表 1。本研究获得金华市中心医院医学伦理审查委员会批准[（研）2022-伦理审查-234]，免除知情同意。

1.2　放疗技术模拟方案设计　所有患者采用腹部压迫式 DIBH 技术行胸部 CT 定位（层厚 5 mm），屏气时间≥35 s，图像传输至靶区勾画系统。由同一名高年资物理师统一设计四种放疗计划。靶区定义严格遵循国际辐射单位与测量委员会（ICRU）相关报告标准：临床靶区（CTV）根据手术方式确定，保乳术后患者 CTV 为全乳腺+瘤床区域，改良根治术后患者 CTV 为胸壁+区域淋巴结（包括锁骨上下淋巴结/内乳淋巴结）；计划靶区（PTV）在 CTV 基础上均匀外扩 5 mm，但前后界缩至皮下 3 mm，以减少皮肤和胸壁正常组织受量[10]。处方剂量设定为 50 Gy/2 Gy/25f；保乳术后患者瘤床区域同步加量至 60 Gy/25f。计划优化目标为 95%的 PTV 体积能够达到处方剂量，同时保证剂量分布均匀性，剂量不均匀性指数（HI）≤0.15，靶区适形度指数（CI）≥0.80，危及器官剂量控制参考国际通用的剂量限制标准[11]。技术方案：3D-CRT 采用常规切线野联合辅助野照射方式；dIMRT 采用多野固定角度调强技术优化剂量分布；VMAT 采用双弧容积旋转照射；nVMAT 在 VMAT 基础上增加非共面弧照射以进一步优化心脏及亚结构剂量分布。所有计划均基于统一剂量约束及优化目标完成，以保证不同技术之间的可比性，其他放疗参数（如源皮距、射线能量等）保持一致。

1.3　危及器官勾画与剂量学指标定义　由 2 名高年资医师参照 RTOG 指南勾画心脏及亚结构[12]，采用 *Kappa* 检验进行一致性验证。核心亚结构：左心室、右心室、LAD（前室间沟外扩 0.5 cm）；精细亚结构：二尖瓣、三尖瓣、主动脉瓣、肺动脉瓣、窦房结（上腔静脉与右心房交界处外扩 0.5 cm）；全心脏含心房、心室、心包及冠状动脉主干。通过 DVH 提取参数：$D_{mean}$、最大剂量（$D_{max}$）及 V5 ～ V40，重点关注瓣膜及窦房结 V10、V20。

1.4　统计方法　采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析。

表 1　左侧乳腺癌患者一般资料分布情况（$n$=85）

| 指标 | 例数 | 构成比（%） |
|---|---|---|
| 年龄（岁） | | |
| ≤45 | 30 | 35.3 |
| 46 ～ 60 | 40 | 47.1 |
| ＞ 60 | 15 | 17.6 |
| 体质量指数（kg/m²） | | |
| 正常 | 50 | 58.8 |
| 超重 | 30 | 35.3 |
| 肥胖 | 5 | 5.9 |
| 临床分期 | | |
| Ⅰ期 | 32 | 37.6 |
| Ⅱ期 | 37 | 43.5 |
| Ⅲ期 | 16 | 18.8 |
| 病理类型 | | |
| 浸润性导管癌 | 68 | 80.0 |
| 浸润性小叶癌 | 17 | 20.0 |
| 手术方式 | | |
| 保乳手术 | 50 | 58.8 |
| 改良根治术 | 35 | 41.2 |
| 蒽环类化疗史 | | |
| 有 | 39 | 45.9 |
| 无 | 46 | 54.1 |
| 心血管危险因素 | | |
| 有 | 22 | 25.9 |
| 无 | 63 | 74.1 |

计量资料以均数±标准差表示，组间比较前采用 Shapiro-Wilk 检验评估正态性。多组比较采用重复测量方差分析，进行 Mauchly 球形性检验，若不满足球形性假设，则采用 Greenhouse-Geisser 校正。组间两两比较采用 Bonferroni 法进行校正。临床因素与剂量参数的相关性采用 *Pearson* 相关分析（连续变量）或独立样本 *t* 检验（二分类变量）。将单因素分析中 $P$ ＜ 0.10 的变量纳入多元线性回归模型，采用强行进入法（Enter），分析影响心脏亚结构剂量的独立危险因素。回归模型评估共线性[方差膨胀因子（VIF）＜ 5]及残差正态性。$P$ ＜ 0.05 表示差异有统计学意义。

## 2　结果

2.1　四种放疗技术对全心脏的剂量影响　四种技术下全心脏剂量参数差异均有统计学意义（均 $P$ ＜ 0.05）。Mauchly 球形度检验结果显示，全心脏 $D_{mean}$ 违反球形度假设（$W$=0.623，$P$ ＜ 0.05），采用 Greenhouse-Geisser 校正后，差异仍有统计学意义（$F$=28.347，$P$ ＜ 0.05）。nVMAT 的全心脏 $D_{mean}$ 均低于其他 3 种技术（均 $P$ ＜ 0.05）。与 3D-CRT 相比，

VMAT、nVMAT 均显著降低全心脏 $D_{mean}$（均 $P < 0.05$），nVMAT 降低幅度最大，见表 2。

2.2　不同放疗技术对心脏各亚结构的剂量影响　各心脏亚结构剂量参数在不同技术间差异均有统计学意义（均 $P < 0.05$）。在左心室、LAD 及心脏瓣膜等关键亚结构中，nVMAT 的 $D_{mean}$ 最低，VMAT 次之，dIMRT 与 3D-CRT 相对较高。其中 LAD 剂量差异最为显著，nVMAT 较 3D-CRT 明显降低（$P < 0.05$），见表 3 ～ 4。

2.3　临床因素与剂量学参数的相关性　多项临床因素与心脏及亚结构剂量存在相关性，见表 5。将 $P <$

表 2　四种技术方案下全心脏的剂量学参数对比

| 指标 | 3D-CRT | dIMRT | VMAT | nVMAT | *F* 值 | *P* 值 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $D_{mean}$（Gy） | 8.21±0.49 | 7.51±1.71 | 6.98±1.28 | 4.32±0.45 | 28.347 | ＜ 0.05 |
| $D_{max}$（Gy） | 43.08±0.91 | 41.21±1.02 | 39.83±1.19 | 38.89±1.00 | 17.458 | ＜ 0.05 |
| V5（%） | 36.52±2.89 | 32.15±3.11 | 28.62±2.98 | 19.77±1.91 | 22.987 | ＜ 0.05 |
| V10（%） | 22.11±1.36 | 18.73±1.49 | 16.39±1.44 | 9.48±1.45 | 42.563 | ＜ 0.05 |
| V20（%） | 13.38±1.24 | 11.32±1.40 | 9.35±1.55 | 5.24±1.33 | 37.045 | ＜ 0.05 |
| V30（%） | 9.23±1.12 | 7.12±3.26 | 6.18±2.37 | 3.58±1.23 | 14.876 | ＜ 0.05 |
| V40（%） | 4.73±0.82 | 3.85±0.99 | 3.26±0.93 | 1.85±0.34 | 6.189 | ＜ 0.05 |

注：$D_{mean}$ 为平均照射剂量，$D_{max}$ 为最大照射剂量，3D-CRT 为三维适形放疗，dIMRT 为动态调强放疗，VMAT 为容积旋转调强放疗，nVMAT 为非共面容积旋转调强放疗

表 3　四种技术方案下心脏核心亚结构的剂量学参数对比

| 指标 | 3D-CRT | dIMRT | VMAT | nVMAT | *F* 值 | *P* 值 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 左心室 $D_{mean}$（Gy） | 9.33±3.11 | 7.62±2.84 | 6.86±2.51[a] | 5.35±1.43[ab] | 12.789 | ＜ 0.05 |
| 左心室 V30（%） | 8.75±2.56 | 6.82±2.31 | 5.89±2.15[a] | 4.78±1.32[ab] | 9.695 | ＜ 0.05 |
| 右心室 $D_{mean}$（Gy） | 7.82±2.81 | 6.70±1.95 | 6.12±1.73[a] | 4.95±1.21[ab] | 10.258 | ＜ 0.05 |
| 右心室 V20（%） | 6.92±1.84 | 5.30±1.62 | 4.85±1.50[a] | 3.22±1.10[ab] | 8.892 | ＜ 0.05 |
| LAD $D_{mean}$（Gy） | 28.92±4.65 | 22.32±4.09 | 18.73±3.82[a] | 15.63±3.22[ab] | 15.612 | ＜ 0.05 |
| LAD V30（%） | 58.32±22.12 | 55.58±21.31 | 50.35±19.50[a] | 34.68±20.18[ab] | 7.798 | ＜ 0.05 |

注：与 3D-CRT 组比较，a$P < 0.05$；与 VMAT 组比较，b$P < 0.05$。$D_{mean}$ 为平均照射剂量，3D-CRT 为三维适形放疗，dIMRT 为动态调强放疗，VMAT 为容积旋转调强放疗，nVMAT 为非共面容积旋转调强放疗

表 4　不同放疗技术方案下心脏精细亚结构的剂量学参数对比

| 指标 | 3D-CRT | dIMRT | VMAT | nVMAT | *F* 值 | *P* 值 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 二尖瓣 $D_{mean}$（Gy） | 11.33±2.84 | 9.22±2.42 | 8.62±2.10[a] | 6.22±1.55[ab] | 14.189 | ＜ 0.05 |
| 二尖瓣 V20（%） | 8.92±2.13 | 7.10±1.84 | 6.55±1.69[a] | 4.10±1.33[ab] | 11.806 | ＜ 0.05 |
| 三尖瓣 $D_{mean}$（Gy） | 10.82±2.60 | 8.73±2.31 | 8.10±2.12[a] | 5.85±1.40[ab] | 13.585 | ＜ 0.05 |
| 三尖瓣 V20（%） | 8.30±1.95 | 6.83±1.73 | 6.20±1.62[a] | 3.83±1.22[ab] | 10.912 | ＜ 0.05 |
| 主动脉瓣 $D_{mean}$（Gy） | 12.44±3.09 | 10.32±2.84 | 9.73±2.51[a] | 7.10±1.82[ab] | 12.698 | ＜ 0.05 |
| 主动脉瓣 V20（%） | 9.53±2.42 | 7.95±2.10 | 7.32±1.93[a] | 4.53±1.45[ab] | 9.805 | ＜ 0.05 |
| 肺动脉瓣 $D_{mean}$（Gy） | 11.75±2.92 | 9.62±2.60 | 9.00±2.31[a] | 6.55±1.60[ab] | 11.258 | ＜ 0.05 |
| 肺动脉瓣 V20（%） | 8.76±2.23 | 7.22±1.95 | 6.84±1.82[a] | 4.21±1.30[ab] | 8.887 | ＜ 0.05 |
| 窦房结 $D_{mean}$（Gy） | 9.84±2.53 | 8.22±2.10 | 7.65±1.92[a] | 5.65±1.32[ab] | 10.592 | ＜ 0.05 |
| 窦房结 V20（%） | 7.82±2.31 | 6.30±1.84 | 5.73±1.69[a] | 3.60±1.23[ab] | 9.698 | ＜ 0.05 |

注：与 3D-CRT 组比较，a$P < 0.05$；与 VMAT 组比较，b$P < 0.05$。$D_{mean}$ 为平均照射剂量，3D-CRT 为三维适形放疗，dIMRT 为动态调强放疗，VMAT 为容积旋转调强放疗，nVMAT 为非共面容积旋转调强放疗

表 5　临床因素与剂量学参数的关系

| 临床因素 | 剂量参数 | 统计方法 | 统计量 | *P* 值 |
|---|---|---|---|---|
| 年龄 | 全心脏 $D_{mean}$ | *Pearson* 相关 | $r$=0.318 | ＜ 0.10 |
| 蒽环类化疗史 | 左心室 $D_{mean}$ | *t* 检验 | $t$=3.215，$df$=83 | ＜ 0.10 |
| 蒽环类化疗史 | LAD $D_{mean}$ | *t* 检验 | $t$=2.986，$df$=83 | ＜ 0.10 |
| 临床分期（Ⅲ期 *vs* Ⅰ～Ⅱ期） | 左心室 V30 | *Pearson* 相关 | $r$=0.359 | ＜ 0.10 |
| 临床分期（Ⅲ期 *vs* Ⅰ～Ⅱ期） | 窦房结 $D_{mean}$ | *Pearson* 相关 | $r$=0.335 | ＜ 0.10 |
| 心血管危险因素 | 左心室 $D_{mean}$ | *t* 检验 | $t$=2.108，$df$=83 | ＜ 0.10 |
| 体质量指数 | 全心脏/亚结构剂量参数 | *Pearson* 相关 |  | ＞ 0.05 |

注：$D_{mean}$ 为平均照射剂量，$D_{max}$ 为最大照射剂量，LAD 为左前降支

0.10 的变量（年龄、蒽环类化疗史、临床分期、心血管危险因素）纳入多因素线性回归模型（进入法）。结果显示，临床分期及蒽环类化疗史为左心室剂量升高的独立影响因素，而LAD剂量受化疗史及放疗技术影响（均 $P < 0.05$），见表 6。

2.4　剂量达标情况分析　在总计 340 个放疗计划中，虽然所有患者的全心脏 $D_{mean}$ 均控制在推荐范围（< 10 Gy）内，但仍有相当比例的计划 LAD 剂量超过建议限制（LAD $D_{mean}$ > 16 Gy）。由于 3D-CRT 技术的局限性，其 LAD 平均剂量（28.92±4.65）Gy 远高于 16 Gy 的限值，导致该技术下的全部计划均未能满足 LAD 剂量约束。按技术方案分层统计显示，基于正态分布模型估算，各技术组中出现LAD剂量超标的计划数量分别为：dIMRT 组 80 例（94.1%）、VMAT 组 65 例（76.5%）、nVMAT 组 39 例（45.9%）。尽管 nVMAT 表现最优，但仍有近半数计划 LAD 剂量超过 16 Gy。

## 3　讨论

随着乳腺癌患者生存期的延长，RIHD逐渐成为影响其远期预后的一个颇为重要的因素[13]。以往研究提示，仅依赖全心脏剂量难以全面反映心脏损伤风险。不同心脏亚结构对放射线敏感性存在差异，它们所接受到的照射剂量和特定类型的心脏事件之间存在着紧密的关联。近些年来，相关研究更是不断凸显出心脏亚结构剂量评估的重要性[12,14]。因此，单纯控制全心脏剂量向心脏亚结构精细化剂量评估转变，已然成为左侧乳腺癌放疗优化的重要方向。

本研究在DIBH条件下，对四种放疗技术进行了系统比较。结果显示，不同技术在全心脏及各亚结构剂量学参数方面差异均具有统计学意义（均 $P < 0.05$），且呈现出稳定的保护梯度。其中，nVMAT可显著降低全心脏及关键亚结构受照剂量，如全心脏 $D_{mean}$ 较 3D-CRT 降低近一半，LAD 相关剂量参数亦明显下降[15]。这提示在 DIBH 提供解剖学优势的基础上，nVMAT技术可进一步强化心脏关键结构的保护效果。

不同放疗技术的剂量学差异与其物理学特性密切相关。3D-CRT 主要采用固定切线野设计，心脏避让能力有限，部分关键亚结构剂量仍处于较高水平，难以满足精准放疗需求[16]。dIMRT 在一定程度上改善剂量分布，但优化幅度有限[17]。VMAT 通过连续弧形照射提高剂量适形性，同时降低部分心脏剂量负荷。而 nVMAT 通过引入非共面入射角度，进一步优化射线路径，尤其适用于心脏与靶区毗邻或需覆盖内乳区的患者[18]。值得注意的是，本研究发现即便全心脏剂量均达标，仍存在相当比例的关键亚结构计划剂量超限的现象。其中，3D-CRT 组全部计划均未能满足 LAD 剂量约束，而 nVMAT 组虽已将超标比例降至 45.9%，但仍未能完全规避这一风险。这提示仅依赖全心脏剂量评估可能存在剂量超限的情况[19]，放疗计划制定过程中应加强对关键亚结构的独立评估与约束[20]。

进一步分析显示，临床分期及蒽环类化疗史与左心室及 LAD 剂量密切相关。其中蒽环类药物的叠加效应有可能增加心脏对射线的敏感性。年龄与全心脏 $D_{mean}$ 呈正相关，可能与老年患者呼吸配合能力下降，从而影响 DIBH 实施效果有关[21-22]。上述结果提示，在临床上制定放疗方案时，应该综合考虑患者的临床特征，以实现更精准的风险分层管理。

基于本研究结果并结合既往文献[3,14]，可初步构建基于风险分层的放疗技术选择策略：高危患者建议优先采用 nVMAT 联合 DIBH，中危患者可选择 VMAT 联合 DIBH，低危患者或设备受限条件下，可考虑 dIMRT，但应严格评估心脏亚结构剂量分布[23]。

本研究仍存在一定的局限性：本研究为单中心

表 6　影响心脏亚结构剂量的多因素线性回归分析结果

| 因变量 | 自变量 | 回归系数 | 标准误 | 标化回归系数 | *P* 值 | 95%*CI* | 决定系数 | 模型 *F* 值 | 模型 *P* 值 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 左心室 $D_{mean}$ | 临床分期（III期） | 0.358 | 0.126 | 0.312 | < 0.05 | 0.109 ～ 0.607 | 0.342 | 10.568 | < 0.05 |
| | 蒽环类化疗史 | 0.416 | 0.132 | 0.348 | < 0.05 | 0.155 ～ 0.677 | | | |
| | 心血管危险因素 | 0.198 | 0.118 | 0.165 | > 0.05 | −0.035 ～ 0.431 | | | |
| LAD $D_{mean}$ | 蒽环类化疗史 | 0.391 | 0.128 | 0.335 | < 0.05 | 0.128 ～ 0.654 | 0.389 | 12.347 | < 0.05 |
| | 放疗技术（nVMAT） | −0.486 | 0.156 | −0.412 | < 0.05 | −0.792 ～−0.180 | | | |
| | 临床分期（III期） | 0.186 | 0.121 | 0.158 | > 0.05 | −0.053 ～ 0.425 | | | |

注：$D_{mean}$ 为平均照射剂量，LAD 为左前降支

回顾性研究，可能存在选择偏倚；缺乏长期随访数据，剂量学优势能否转化为临床获益尚需进一步验证；本研究结论主要适用于能够良好配合 DIBH 技术的患者人群；关于心脏亚结构的剂量限制建议仍需更多临床结局数据支持。

综上所述，在 DIBH 条件下，不同放疗技术在心脏及其亚结构剂量分布方面存在显著差异，其中 nVMAT 在心脏保护方面具有明显优势，VMAT 则表现为相对均衡的选择。临床实践中应加强对关键心脏亚结构的精细化剂量控制，并结合患者个体风险因素优化放疗技术选择，以实现肿瘤控制与心脏保护之间的最佳平衡。

**利益冲突**　所有作者声明无利益冲突

**作者贡献声明**　李明：研究设计，数据分析，论文撰写；方家：放疗计划制定，数据收集与分析；丁叔波：提供科研指导，修改论文

## 参 考 文 献

[1] Wolf J, Stoller S, Lübke J, et al. Deep inspiration breath-hold radiation therapy in left-sided breast cancer patients: A single-institution retrospective dosimetric analysis of organs at risk doses[J]. Strahlenther Und Onkol, 2023, 199(4): 379-388.

[2] Van der Vorst A, Lambrecht M, Van Aelst L, et al. Radiation-induced heart disease in breast cancer patients: A narrative review of epidemiology, risk factors, radiotherapy parameters, and prevention [J]. Strahlenther Onkol, 2025, 201(4): 368-382.

[3] Milo M L H, Thorsen L B J, Johnsen S P, et al. Risk of coronary artery disease after adjuvant radiotherapy in 29, 662 early breast cancer patients: A population-based Danish Breast Cancer Group study [J]. Radiother Oncol, 2021, 157: 106-113.

[4] 童琴,伍海彪,陈政颂,等.乳腺癌改良根治术后 3 种放疗技术的剂量学研究[J].实用医学杂志,2015,31(18):3016-3018.

[5] Semiz V, Aydin B, Gulsan D, et al. Comprehensive analysis of the role of deep inspiration breath-hold in right-sided breast cancer radiotherapy: A focus on cardiac substructures and right coronary artery[J]. J Appl Clin Med Phys, 2025, 26(9): e70216.

[6] Romera-Martí nez I, Cancio I O, Buxó M, et al. Heart substructure exposure during left breast cancer radiotherapy: A dosimetric comparison between hybrid VMAT and 3DCRT in free breathing and deep inspiration breath hold (DIBH)[J]. Clin Transl Oncol, 2025, 27(11): 4177-4184.

[7] 张菲菲,刘欣,李威,等.左侧乳腺癌保乳术后四种不同放疗计划心脏亚结构的剂量学研究[J].现代肿瘤医学,2024,32(10):1865-1871.

[8] 中国抗癌协会乳腺癌专业委员会. 中国抗癌协会乳腺癌诊治指南与规范(2021 年版)[J].中国癌症杂志,2021,31(10):954-1040.

[9] Faul F, Erdfelder E, Buchner A, et al. Statistical power analyses using G*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses [J]. Behav Res Methods, 2009, 41(4): 1149-1160.

[10] Chavaudra J, Bridier A. Definition of volumes in external radio therapy: ICRU reports 50 and 62[J]. Cancer Radiother, 2001, 5 (5): 472-478.

[11] Patel G, Mandal A, Shende R, et al. Radiotherapy plan evaluation indices: A dosimetrical suitability check[J]. J Cancer Res Ther, 2021, 17(2): 455-462.

[12] Finnegan R N, Quinn A, Booth J, et al. Cardiac substructure delineation in radiation therapy: A state-of-the-art review[J]. J Med Imaging Radiat Oncol, 2024, 68(8): 914-949.

[13] Nangia S. Calculation of the absolute risk of a radiation-induced acute coronary event in patients with breast cancer: A hypothesis incorporating Indian ethnicity[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2025, 125(2):371-384.

[14] Wang S J, Zhai Y R, Zhang W W, et al. Dosimetric benefit and clinical feasibility of deep inspiration breath-hold and volumetric modulated arc therapy-based postmastectomy radiotherapy for left-sided breast cancer[J]. Sci Rep, 2024, 14(1): 24638.

[15] Pollul G, Grossmann S, Karle H, et al. Improving organ dose sparing in left-sided breast cancer with yaw-limited volumetric modulated arc therapy: A dosimetric comparison to conventional and intensity modulated radiation therapy approaches[J]. J Appl Clin Med Phys, 2025, 26(5): e70041.

[16] Nuruddeen M G, A Karim N K, A/L Appalanaido G K, et al. Cardiac substructure dose distributions in node-positive and node-negative breast cancer patients undergoing 3D-CRT: Comparing the predictive accuracy of mean heart dose and mean left ventricular dose[J]. Radiat Oncol, 2025, 20(1): 65.

[17] Azeez Z A, Rao B S, Fernandes D, et al. Dosimetric comparison of intensity-modulated radiation therapy versus three-dimensional conformal radiation therapy in postmastectomy chest wall radio therapy in breast cancer[J]. J Radiat Cancer Res, 2025, 16(3): 136-142.

[18] Frengen J, Vikstrom J, Mjaaland I, et al. Locoregional breast radiotherapy including IMN: Optimizing the dose distribution using an automated non-coplanar VMAT-technique[J]. Acta Oncol, 2023, 62 (10): 1169-1177.

[19] Krishnamurthy R, Sarath M S. Rethinking the role of mean heart dose in breast cancer radiotherapy[J]. Cancer Res Stat Treat, 2025, 8(2): 162-163.

[20] Li X Y, Wu Y J, Wang Q Y, et al. Radiation-induced cardiac substructure damage and dose constraints: A review[J]. Radiat Oncol, 2025, 20(1): 94.

[21] Busschaert S L, Kimpe E, Gevaert T, et al. Deep inspiration breath hold in left-sided breast radiotherapy a balance between side effects and costs[J]. JACC CardioOncology, 2024, 6(4): 514-525.

[22] Shen J, Zhang K, Meng X Y, et al. Deep inspiratory breath-hold technique for patients with left-sided breast cancer: Dosimetric analysis, clinical evaluation, and prediction[J]. Technol Cancer Res Treat, 2025, 24: 15330338251329120.

[23] Xie Z Y, Hao S, Wu X, et al. Cardiac substructure dosimetry in postoperative breast-conserving radiotherapy: A novel 8-field IMRT approach for internal mammary node irradiation using MONACO [J]. Front Oncol, 2025, 15: 1681699.

**收稿日期：2026-02-21**

**（本文编辑：吴迪汉）**