DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2022.08.003

医学放射物理

左侧乳腺癌保乳术后深吸气屏气模式下Hybrid-IMRT和Hybrid-VMAT的剂量学比较

史亚滨[1,2],黄嵘[3],高艳[2],陈洪涛[2],徐逸[4],陈伟思[2],梁晓敏[2],郑芳[2]
1.汕头大学医学院,广东 汕头 515041; 2.深圳市人民医院(暨南大学第二临床医学院,南方科技大学第一附属医院)肿瘤放疗科,广东 深圳 518020; 3.北京大学深圳医院影像科,广东 深圳 518036; 4.深圳市第三人民医院感染二科,广东 深圳 518112

【摘要】目的:在深吸气屏气(DIBH)模式下比较适形混合调强(Hybrid-IMRT)和适形混合旋转容积调强(Hybrid-VMAT)对左侧乳腺癌保乳术后的剂量学差异,为治疗计划选择提供参考。**方法:**选取26名左侧乳腺癌保乳术后的患者分别设计Hybrid-IMRT和Hybrid-VMAT计划,通过体积剂量直方图比较两种计划的靶区和危及器官的剂量。**结果:**Hybrid-VMAT计划PTV的D_{90}、D_{98}及HI优于Hybrid-IMRT计划($P<0.05$)。Hybrid-IMRT计划GI优于Hybrid-VMAT计划($P<0.05$),但对于PTV的D_2、D_{mean}及CI,两种计划没有明显差异($P>0.05$)。Hybrid-IMRT计划患侧肺V_5、V_{20}、V_{30}及D_{mean}优于Hybrid-VMAT计划($P<0.05$);Hybrid-IMRT计划心脏的V_{10}、D_{mean}优于Hybrid-VMAT计划($P<0.05$),但V_{30}、V_{40}比较,差异无统计学意义($P>0.05$);Hybrid-IMRT计划对侧乳腺D_{mean}、V_5优于Hybrid-VMAT计划($P<0.05$),但D_{max}比较,差异无统计学意义($P>0.05$);两种计划的脊髓剂量均满足临床剂量要求,但Hybrid-IMRT计划的脊髓D_{max}低于Hybrid-VMAT计划($P<0.05$)。**结论:**两种混合计划均能满足临床剂量要求,但Hybrid-IMRT计划可以明显降低危及器官的受照剂量。

【关键词】乳腺癌;深吸气屏气;混合调强;混合旋转容积调强;剂量学
【中图分类号】R737.9;R811.1 **【文献标志码】**A **【文章编号】**1005-202X(2022)08-0936-05

Dosimetric comparison between Hybrid-IMRT and Hybrid-VMAT using deep inspiration breath-hold technique for left-sided breast cancer after breast-conserving surgery

SHI Yabin[1,2], HUANG Rong[3], GAO Yan[2], CHEN Hongtao[2], XU Yi[4], CHEN Weisi[2], LIANG Xiaomin[2], ZHENG Fang[2]
1.Shantou University Medical College, Shantou 515041, China; 2.Department of Radiation Oncology, Shenzhen People's Hospital (the Second Clinical Medical College, Ji'nan University; the First Affiliated Hospital of Southern University of Science and Technology), Shenzhen 518020, China; 3. Department of Radiology, Peking University Shenzhen Hospital, Shenzhen 518036, China; 4. the Second Department of Infectious Disease, the Third People's Hospital of Shenzhen, Shenzhen 518112, China

Abstract: Objective To compare the dosimetric differences between hybrid intensity-modulated radiotherapy (Hybrid-IMRT) and hybrid volumetric modulated arc therapy (Hybrid-VMAT) using deep inspiration breath-hold (DIBH) technique for left-sided breast cancer after breast-conserving surgery, thereby providing reference for treatment plan selection. **Methods** Two kinds of treatment plans, namely Hybrid-IMRT plan and Hybrid-VMAT plan, were designed for 26 patients with left-sided breast cancer after breast-conserving surgery. The dose-volume histogram was used to compare the doses to target areas and organs-at-risk between Hybrid-IMRT plan and Hybrid-VMAT plan. **Results** Compared with Hybrid-IMRT plan, Hybrid-VMAT plan was superior in D_{90}, D_{98} and homogeneity index of planning target area ($P<0.05$), but inferior in GI ($P<0.05$), and there was no significant difference in D_2, CI and D_{mean} between two plans ($P>0.05$). Hybrid-IMRT plan was advantageous over Hybrid-VMAT plan in terms of the V_5, V_{20}, V_{30} and D_{mean} of the ipsilateral lung ($P<0.05$), and the V_{10}, D_{mean} of the heart ($P<0.05$). However, there was no significant difference between two plans in the V_{40} and V_{30} of the heart ($P>0.05$). Hybrid-IMRT plan was superior to Hybrid-VMAT plan in the D_{mean} and V_5 of contralateral breast ($P<0.05$), but the difference in D_{max} was trivial ($P>0.05$). The spinal dose of the two plans met the clinical dose requirements, while the spinal D_{max} of Hybrid-IMRT plan was much less than that of Hybrid-VMAT plan ($P<0.05$). **Conclusion** Both of the two hybrid plans meet the clinical dose requirements, but Hybrid-IMRT plan can

【收稿日期】2022-04-01
【基金项目】广东省医学科研基金(B2021395)
【作者简介】史亚滨,硕士研究生,主要从事放射医学物理研究,E-mail: 236212481@qq.com
【通信作者】黄嵘,主任医师,主要从事放射诊断研究,E-mail: huangrong_sz@qq.com

significantly reduce the radiation dose to organs-at-risk.
Keywords: breast cancer; deep inspiration breath-hold; hybrid intensity-modulated radiotherapy; hybrid volumetric modulated arc therapy; dosimetry

前 言

近年来,乳腺癌的发病率呈逐年上升趋势,并成为女性最常见的恶性肿瘤之一,乳腺癌保乳术后进行放疗是其治疗的主要方式[1-2]。随着放疗技术和放疗设备的发展,三维适形(Three-Dimensional Conformal Radiotherapy, 3DCRT)、静态调强(Static Intensity-Modulated Radiotherapy, sIMRT)、动态调强(Dynamic Intensity-Modulated Radiotherapy, dIMRT)及旋转容积调强(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT)等先进的技术被应用到乳腺癌放疗中。

放疗过程中,患侧肺、心脏、健侧乳腺等正常组织会受到照射。为降低靶区周边正常组织的照射剂量,深吸气屏气(Deep Inspiration Breath-Hold, DIBH)技术被应用到乳腺癌放疗中。有研究表明DIBH技术会增加心脏到胸壁的距离,减少照射野内肺叶的实际体积,降低患侧肺和心脏受照射剂量[3-5]。本研究利用光学体表监测系统(Optical Surface Monitoring System, OSMS)在DIBH模式下对每位病例分别设计适形混合调强(Hybrid-IMRT)计划和适形混合旋转容积调强(Hybrid-VMAT)计划,对靶区、心脏、患侧肺和对侧乳腺等危及器官进行剂量学分析,对比两种治疗计划的剂量学差异。

1 材料与方法

1.1 病例选择

选取2020年7月~12月深圳市人民医院肿瘤放疗科收治的左侧乳腺癌保乳术后患者30例。排除4例因屏气时间不够及其他原因无法配合DIBH治疗的患者;其余26例患者平均年龄(44.31±5.53)岁,AJCC第八版乳腺癌分期为0-IIA期$T_{is-2}N_0M_0$,心肺功能正常,KPS评分≥80,照射范围为患侧胸壁。

入组标准包括:(1)左侧乳腺癌保乳术后患侧上肢经训练可充分上抬外展;(2)可配合呼吸门控;(3)DIBH时间>30 s;(4)无支气管炎、哮喘等呼吸系统疾病。

排除标准包括:(1)对呼吸门控恐惧,无法配合呼吸控制;(2)训练后,患侧上肢仍无法充分上抬外展;(3)DIBH时间<30 s;(4)患有支气管炎、哮喘等其他呼吸系统疾病。

1.2 体位固定及CT模拟定位

CT定位扫描前,患者进行DIBH训练,确保患者DIBH时间>30 s。所有患者均使用真空垫进行体位固定,双手上举置于头顶。铅丝标记患侧乳腺范围,激光灯标记等中心位置,贴好铅点。采用德国Siemens SOMTOM Definition AS 64排大孔径CT模拟机,扫描范围上至下颌骨下缘,下至乳腺皮肤褶皱下10 cm(第10胸椎水平),层厚5 mm。所有患者均采集自由呼吸(Free Breath, FB)和DIBH两组CT图像。

1.3 靶区勾画

将CT图像传至Eclipse13.1(Varian)治疗计划系统,由同一主治医师进行靶区和危及器官勾画,经上级医师审核。本研究中所有患者均已将肿瘤切除,无锁上淋巴结转移。因此,只勾画临床靶区(Clinical Target Volume, CTV)和计划靶区(Planning Target Volume, PTV)。临床医师根据RTOG标准勾画出CTV,PTV在CTV基础上向内、外、后方向外扩0.5 cm,上下方向各外扩1.0 cm,前界在皮下0.3 cm处[6]。

1.4 计划设计

使用美国瓦里安(Varian)公司Eclipse13.1计划系统和TrueBeam直线加速器,6 MV X线,剂量率600 MU/min,计算网格0.25 cm,各向异性分析算法(Anisotropic Analytical Algorithm, AAA)算法进行Hybrid-IMRT和Hybrid-VMAT计划设计。其中3DCRT与IMRT和VMAT所占处方剂量的比例为4:1[7-8]。3DCRT计划使用2野,采用切患侧肺组织最少的射野角度,形成切线野(图1a)。适形野的多叶准直器(Multileaf Collimator, MLC)在皮肤表面扩开2 cm距离,确保靶区在照射野范围内。IMRT计划采用4野计划,其中1野和2野采用与3DCRT射野相同的角度,3野和4野在1野和2野的基础上分别提高或降低15°~20°(图1b)[9]。调整小机头角度和铅门大小,通过射野方向观(Beam Eyes View, BEV)确保照射野将整个PTV包括在内,锁定铅门(图1c)。VMAT计划射野为180°双弧,与3DCRT两野角度相同(图1d),其中VMAT计划设计利用Eclipse的Avoidance Sectors功能使机器在整条弧中间50°不出束,两侧各有65°的出束角度。

给予PTV处方剂量50 Gy,2 Gy/次,25次,瘤床补量不计算在内。要求100%处方剂量包绕95%PTV的体积;危及器官剂量限值:患侧肺V_5<50%、V_{20}<20%、V_{30}<20%,心脏D_{mean}<500 cGy,脊髓D_{max}<4 000 cGy,对

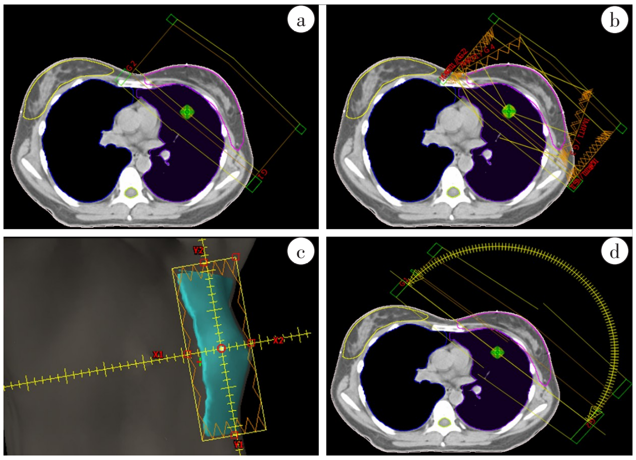

图1 两种混合计划射野布置

Figure 1 Field arrangements of two hybrid plans

a:3DCRT照射野;b:Hybrid-IMRT照射野;c:小机头铅门锁定;d:Hybrid-VMAT照射野

侧乳腺V_5<1%。

先设计3DCRT计划,以3DCRT为基础计划分别设计IMRT和VMAT计划,IMRT和VMAT计划占总处方剂量的20%。所有患者均设计Hybrid-IMRT和Hybrid-VMAT混合计划,这两种混合计划优化条件一致。

1.5 治疗计划评价指标

分析对比Hybrid-IMRT和Hybrid-VMAT两种混合调强技术PTV的D_{90}、D_{98}、D_5、D_2、D_{mean}(D_x为x%靶体积接受的照射剂量);同时对PTV的适形度指数(Conformity Index, CI)、均匀性指数(Homogeneity Index, HI)和剂量梯度指数(Gradient Index, GI)进行比较。计算公式如下。

$$CI=\frac{V_{t,ref}}{V_t}\times\frac{V_{t,ref}}{V_{ref}} \quad (1)$$

其中,$V_{t,ref}$为95%的处方剂量包绕的靶区体积;V_t为PTV的总体积;V_{ref}为95%的处方剂量曲线包绕的总体积[10-11]。CI越接近1表明靶区的适形度越好。

$$HI=\frac{D_5-D_{95}}{D_p} \quad (2)$$

其中,D_5为5%的PTV体积接受的照射量;D_{95}为95%的PTV体积接受的照射量;D_p为处方剂量。HI越接近0表明靶区的均匀性越好。

$$GI=\frac{V_{50\%}}{V_P} \quad (3)$$

其中,$V_{50\%}$为50%处方剂量曲线包绕的体积;V_p为处方剂量曲线包绕的体积。GI越小表明剂量在靶区以外的部分跌落越快,对正常组织保护越好[12]。

比较分析患侧肺V_5、V_{20}、V_{30}及D_{mean},心脏V_{10}、V_{30}、V_{40}及D_{mean},对侧乳腺V_5、D_{max}及D_{mean},脊髓D_{max}。

1.6 统计学方法

采用SPSS 25软件对数据进行统计学分析。服从正态分布数据采用配对样本t检验,连续变量以均数±标准差表示;不服从正态分布数据采用非参数秩和检验,以中位数表示。P<0.05表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 PTV剂量参数分析

由表1可知,26例乳腺癌保乳术后患者的Hybrid-IMRT及Hybrid-VMAT计划均可满足临床剂量学要求,乳腺靶区95%以上PTV体积达到处方剂量的标准。具体病例的剂量体积直方图见图2。

表1 两种不同混合计划PTV剂量参数比较($\bar{x}\pm s$)

Table 1 Comparison of PTV dose parameters between two different hybrid plans (*Mean*±*SD*)

参数	Hybrid-IMRT	Hybrid-VMAT	*P*值
D_{90}/cGy	5 075.13±45.46	5 021.57±74.96	<0.001
D_{98}/cGy	4 744.76±214.30	4 840.20±127.45	0.001
D_2/cGy	5 467.60±86.60	5 441.30±70.08	0.070
D_{mean}/cGy	5 233.31±61.57	5 241.29±63.03	0.158
HI	0.11±0.04	0.08±0.02	<0.001
CI	0.72±0.07	0.73±0.05	0.256
GI	2.14±0.31	2.20±0.37	0.035

Hybrid-VMAT计划PTV的D_{90}、D_{98}及HI优于Hybrid-IMRT计划,差异有统计学意义(P<0.05),Hybrid-IMRT计划GI优于Hybrid-VMAT计划,差异有统计学意义(P<0.05),但对于PTV的D_2、D_{mean}及CI,两种计划没有明显差异(P>0.05)。

2.2 危及器官的剂量学比较

由表2可知,Hybrid-IMRT计划的患侧肺V_5、V_{20}、V_{30}和D_{mean}均优于Hybrid-VMAT计划,差异有统计学意义(P<0.05)。Hybrid-IMRT计划在心脏V_{10}、D_{mean}上明显优于Hybrid-VMAT计划,差异有统计学意义(P<0.05)。Hybrid-IMRT计划在对侧乳腺V_5、D_{mean}上优于Hybrid-VMAT计划,差异有统计学意义(P<0.05);Hybrid-IMRT计划对侧乳腺D_{max}虽低于Hybrid-VMAT计划,但差异无统计学意义(P>0.05)。Hybrid-IMRT计划脊髓D_{max}明显低于计划,差异有统计学意义(P<0.05)。

3 讨论

乳腺癌保乳术后进行放疗是乳腺癌治疗的重要

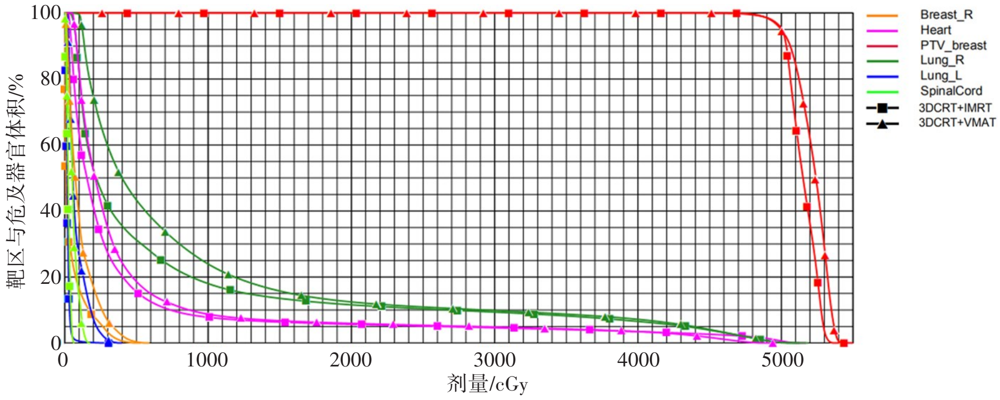

图2　两种混合计划的DVH图

Figure 2 DVH of two hybrid plans

表2　不同混合计划危及器官剂量参数比较

Table 2 Comparison of organs-at-risk dose parameters between different hybrid plans

危及器官	参数	Hybrid-IMRT	Hybrid-VMAT	P值
患侧肺	V_5/%	44.24±6.00	61.62±9.97	<0.001
	V_{20}/%	19.11±3.33	20.57±3.34	<0.001
	V_{30}/%	15.51±2.95	16.29±2.82	<0.001
	D_{mean}/cGy	1 107.32±151.00	1 342.11±167.03	<0.001
心脏	V_{10}/%	6.88（4.99, 11.13）	8.82（5.41, 14.52）	0.019
	V_{30}/%	1.97（1.33, 3.64）	1.93（1.39, 3.93）	0.065
	V_{40}/%	0.85（0.53, 2.06）	1.12（0.52, 2.09）	0.206
	D_{mean}/cGy	426.05±151.41	581.03±213.29	<0.001
对侧乳腺	V_5/%	0.057（0, 3.00）	0.54（0, 3.81）	<0.001
	D_{max}/cGy	771.65（410.00, 2 389.90）	828.60（480.23, 2 251.38）	0.052
	D_{mean}/cGy	102.00（77.60, 165.73）	185.80（131.30, 244.71）	<0.001
脊髓	D_{max}/cGy	54.48±16.27	280.11±104.96	<0.001

组成部分[13]，先进的治疗技术保证了乳腺癌患者更好的治疗效果和更高的生存率。但是，放疗对心脏、肺、对侧乳腺及脊髓等正常组织造成损伤。因此，最近的研究都集中在了呼吸控制的新技术的应用上，特别是DIBH技术。DIBH技术可以降低因呼吸运动产生的靶区移动，更重要的是它可以明显减少危及器官特别是肺和心脏的受照射体积，降低靶区周边正常组织的照射剂量[14-15]，因此，本研究均采用了DIBH技术。

本研究的两种混合调强计划方案中，在适形野满足靶区处方剂量80%覆盖的基础上，IMRT计划和VMAT计划对适形野的靶区进行补量。对于PTV的D_{90}、D_{98}及HI，Hybrid-VMAT计划明显优于Hybrid-IMRT计划，差异有统计学意义（P<0.05）；对于CI和D_2，差异无统计学意义（P>0.05）；但Hybrid-IMRT的GI优于Hybrid-VMAT计划，差异有统计学意义（P<0.05）。两种混合计划的剂量分布均能满足临床治疗要求，其中Hybrid-VMAT计划在靶区剂量对比上要稍优于Hybrid-IMRT计划。

本研究中Hybrid-IMRT计划在提高靶区均匀性的同时，显著降低了患侧肺和心脏的受照射体积，与Bi等[16]、Karpf等[17]和Gortman等[18]结果一致。Hybrid-IMRT计划患侧肺V_5、V_{20}、V_{30}、D_{mean}均低于Hybrid-VMAT计划，差异有统计学意义（P<0.05）。Santos等[19]表明患侧肺的剂量是影响乳腺癌患者放疗后生存率的重要因素；同时患侧肺V_5的受照射剂量是造成放射性肺炎的主要原因[20-21]。本研究中，与Hybrid-VMAT计划相比，Hybrid-IMRT计划在患侧肺的V_5、D_{mean}中有明显优势，此结果与刘洋等[22]研究结论一致。Hybrid-IMRT计划在心脏V_{10}、D_{mean}上优于Hybrid-VMAT计划，差异有统计学意义（P<0.05）；但心脏V_{30}和V_{40}的比较差异不明显，无统

计学意义(P>0.05)。Sakyanun等[23]研究表明心脏D_{mean}每增加1 Gy,心血管意外的发生概率增加7.4%。对于对侧乳腺V_5、D_{mean},Hybrid-IMRT计划优于Hybrid-VMAT计划,差异有统计学意义(P<0.05),但D_{max}比较,差异无统计学意义(P>0.05)。此外,Hybrid-IMRT计划的脊髓剂量低于Hybrid-VMAT计划,差异有统计学意义(P<0.05)。

本研究结果表明对于左侧乳腺癌保乳术后且无淋巴结转移的患者,Hybrid-IMRT计划在靶区剂量分布上虽次于Hybrid-VMAT计划,但两种计划均满足临床要求。Hybrid-IMRT计划可以显著降低患侧肺、心脏及对侧乳腺等危及器官的受照射剂量,降低放疗毒副反应发生率,建议优先考虑采用Hybrid-IMRT技术进行计划设计。

【参考文献】

[1] 赫捷, 陈万青, 李霓, 等. 中国女性乳腺癌筛查与早诊早治指南(2021, 北京)[J]. 中国肿瘤, 2021, 30(3): 161-191.
He J, Chen WQ, LI N, et al. China guideline for the screening and early detection of female breast cancer(2021, Beijing)[J]. China Cancer, 201, 30(3): 161-191.

[2] 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(2019年版)[J]. 中国癌症杂志, 2019, 29(8): 609-680.
Breast Cancer Professional Committee of China Anti-Cancer Association. Guidelines and norms for diagnosis and treatment of breast cancer by Chinese Anti-cancer Association (2019)[J]. China Oncology, 2019, 29(8): 609-680.

[3] 胡皓, 李敏儿, 肖光莉. 深吸气屏气技术在左侧乳腺癌术后放疗中的应用(附41例)[J]. 现代肿瘤医学, 2020, 28(13): 2318-2322.
Hu H, Li ME, Xiao GL. Implementing deep inspiration breath hold (DIBH) in clinical practice: a dosimetric comparison for left-sided breast cancer (41 cases)[J]. Journal of Modern Oncology, 2020, 28 (13): 2318-2322.

[4] Chi F, Wu S, Zhou J, et al. Dosimetric comparison of moderate deep inspiration breath-hold and free-breathing intensity-modulated radiotherapy for left-sided breast cancer[J]. Cancer Radiother, 2015, 19(3): 180-186.

[5] Browne P, Beaton NR, Sharma H, et al. Identifying breast cancer patients who gain the most dosimetric benefit from deep inspiration breath hold radiotherapy[J]. J Med Radiat Sci, 2020, 67(4): 294-301.

[6] 张磊, 李浦, 杨一威, 等. 双侧乳腺癌同步放疗设计中多射野中心及固定钨门技术的应用[J]. 中国医学物理学杂志, 2019, 36(4): 373-378.
Zhang L, Li P, Yang YW, et al. Application of double-isocenter and fixed-jaw technology in radiotherapy for bilateral breast cancer[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2019, 36(4): 373-378.

[7] 田源, 马攀, 门阔, 等. 基于VMAT的乳腺癌保乳术后全乳混合调强技术的建立与评价[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2016, 25(7): 728-732.
Tian Y, Ma P, Men K, et al. Development and evaluation of whole breast irradiation with volumetric modulated arc therapy-based hybrid intensity-modulated radiotherapy after breast conserving surgery for breast cancer[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2016, 25(7): 728-732.

[8] 张庆怀, 张彦秋, 杨森, 等. CRT+VMAT技术在左侧乳腺癌保乳术后放射治疗中的剂量学研究[J]. 肿瘤学杂志, 2018, 24(5): 518-522.
Zhang QH, Zhang YQ, Yang S, et al. Dosimetric study of conformal radiation therapy and volumetric-modulated arc therapy (CRT+VMAT) plan in patients with breast cancer after breast-conserving surgery[J]. Journal of Chinese Oncology, 2018, 24(5): 518-522.

[9] 魏世鸿, 陶娜, 欧阳水根, 等. 左侧乳腺癌根治术后IMRT和3D-CRT放疗技术剂量学比较[J]. 中华肿瘤防治杂志, 2019, 26(12): 855-860.
Wei SH, Tao N, Ouyang SG, et al. Dosimetric comparison of IMRT and 3D-CRT radiotherapy for left-sided breast cancer after radical surgery[J]. Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment, 2019, 26(12): 855-860.

[10] 唐成琮, 吴恒, 艾秀清, 等. 左侧乳腺癌保留乳房术后调强放疗两种呼吸模式剂量学研究[J]. 中华肿瘤防治杂志, 2019, 26(19): 1462-1467.
Tang CQ, Wu H, Ai XQ, et al. Dosimetric study on two respiratory modes of patients with left breast cancer after breast conserving surgery [J]. Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment, 2019, 26 (19): 1462-1467.

[11] Balaji K, Balaji Subramanian S, Sathiya K, et al. Hybrid planning techniques for hypofractionated whole-breast irradiation using flattening filter-free beams[J]. Strahlenther Onkol, 2020, 196(4): 376-385.

[12] Paddick I, Lippitz B. A simple dose gradient measurement tool to complement the conformity index[J]. J Neurosurg, 2006, 105(Suppl): 194-201.

[13] Castaneda SA, Strasser J. Updates in the treatment of breast cancer with radiotherapy[J]. Surg Oncol Clin N Am, 2017, 26(3): 371-382.

[14] Pandeli C, Smyth LM, David S, et al. Dose reduction to organs at risk with deep-inspiration breath-hold during right breast radiotherapy: a treatment planning study[J]. Radiat Oncol, 2019, 14(1): 223.

[15] Cao N, Kalet AM, Young LA, et al. Predictors of cardiac and lung dose sparing in DIBH for left breast treatment[J]. Phys Med, 2019, 67: 27-33.

[16] Bi S, Zhu R, Dai Z. Dosimetric and radiobiological comparison of simultaneous integrated boost radiotherapy for early stage right side breast cancer between three techniques: IMRT, hybrid IMRT and hybrid VMAT[J]. Radiat Oncol, 2022, 17(1): 60.

[17] 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.

[18] Gortman AM, Aherne NJ, Amalaseelan J, et al. Long-term outcomes of patients with conserved breast cancer treated with adjuvant hypofractionated prone breast intensity-modulated radiation therapy [J]. J Med Imaging Radiat Oncol, 2020, 64(6): 845-851.

[19] Santos AM, Marcu LG, Wong CM, et al. Risk estimation of second primary cancers after breast radiotherapy[J]. Acta Oncol, 2016, 55 (11): 1331-1337.

[20] Chung Y, Yoon HI, Kim YB, et al. Radiation pneumonitis in breast cancer patients who received radiotherapy using the partially wide tangent technique after breast conserving surgery[J]. J Breast Cancer, 2012, 15(3): 337-343.

[21] Jo IY, Kay CS, Kim JY, et al. Significance of low-dose radiation distribution in development of radiation pneumonitis after helical-tomotherapy-based hypofractionated radiotherapy for pulmonary metastases[J]. J Radiat Res, 2014, 55(1): 105-112.

[22] 刘洋, 冯革, 张振勇, 等. VMAT和IMRT在早期右侧乳腺癌保乳术后放射治疗中的比较剂量学研究[J]. 现代肿瘤医学, 2020, 28(12): 2117-2121.
Liu Y, Feng G, Zhang ZY, et al. Comparative dosimetric study of VMAT and IMRT in radiation therapy for early right breast cancer after breast conserving surgery[J]. Journal of Modern Oncology, 2020, 28(12): 2117-2121.

[23] Sakyanun P, Saksornchai K, Nantavithya C, et al. The effect of deep inspiration breath-hold technique on left anterior descending coronary artery and heart dose in left breast irradiation[J]. Radiat Oncol J, 2020, 38(3): 181-188.

(编辑:谭斯允)