

乳腺癌螺旋断层放射治疗与调强放射治疗的剂量学研究及临床剂量实测比较

沈奕晨, 王为, 张松方, 屠永清, 查元梓, 蒋马伟
上海交通大学医学院附属新华医院肿瘤科, 上海 200092

【摘要】目的:利用螺旋断层放射治疗技术与传统医用直线加速器对乳腺癌放疗中重要正常组织与靶区剂量-体积参数进行剂量学比较。同时,在剂量学研究基础上进行临床实际吸收剂量测量验证各种技术间临床应用的优势与劣势。**方法:**选取10例T₁N₀M₀期乳腺癌保乳术后行乳腺靶区放射治疗病人(无锁骨上照射区域),处方剂量为50 Gy/25次,利用螺旋断层放射治疗定角调强技术、螺旋断层放疗技术与医用直线加速器调强技术,比较乳腺癌靶区剂量和正常组织剂量的优劣。评估靶区剂量与适形度指数(CI)、均匀性指数(HI)和正常组织剂量-体积参数,进行剂量学比较。同时,利用热释光剂量仪在乳腺癌病人表皮进行实测剂量,比较3种技术处理由于病人呼吸运动对表面剂量的影响,及评估时间因素对治疗效率的影响。**结果:**10例乳腺癌病人采用定角调强技术、螺旋断层放疗技术与医用直线加速器调强技术PTV HI分别为0.15±0.01、0.06±0.01和0.20±0.15($P<0.001$);CI分别为0.76±0.00、0.81±0.03和0.74±0.04($P>0.05$);心脏平均剂量分别为4.12±0.87、3.82±0.53、6.33±2.49 Gy($P<0.001$),左前降支最大剂量分别为20.38±5.66、13.34±3.78、34.56±4.12 Gy($P<0.001$),患侧肺组织平均剂量分别为6.78±1.33、7.22±2.34、12.76±2.10 Gy($P<0.001$)。患者6个实测剂量点的吸收剂量3种技术比较有统计学意义($P<0.001$)。**结论:**从综合靶区覆盖、正常组织剂量-体积参数、剂量实测与治疗效率等方面比较,螺旋断层放射治疗的定角调强技术相对于其他两种技术而言有低剂量范围小、靶区覆盖佳、解决治疗中呼吸运动影响等优势,推荐使用该技术用于乳腺癌病人放射治疗。

【关键词】乳腺癌;螺旋断层放射治疗;调强放射治疗;定角调强技术;热释光剂量仪

【中图分类号】R737.9;R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2018)03-0269-06

Dosimetry study and measured dose comparison of Tomotherapy and intensity-modulated radiotherapy for breast cancer

SHEN Yichen, WANG Wei, ZHANG Songfang, TU Yongqing, ZHA Yuanzi, JIANG Mawei

Department of Oncology, Xinhua Hospital Affiliated to Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200092, China

Abstract: Objective To evaluate the dosimetry differences in dose-volume parameters of the breast and normal tissues in Tomotherapy and conventional Linac for breast cancer, and verify the advantages and disadvantages of various technologies by performing absorbed dose measurement based on dosimetry study. **Methods** Three radiotherapy treatment plans, namely TomoDirect intensity-modulated radiotherapy (IMRT), TomoHelical and IMRT, were designed for 10 patients receiving breast-conserving surgery for breast cancer (T₁N₀M₀), with a prescribed dose of 50 Gy/25 F and without supraclavicular irradiation area. The dose of target areas and normal tissues, conformity index, homogeneity index, and dose-volume parameters of normal tissues were compared to evaluate the advantages and disadvantages of different technologies. Meanwhile, the dose of surface target was measured with thermoluminescent dosimeter for comparing the effects of respiratory motion on surface dose and assessing the effects of time factor on treatment efficiency. **Results** In TomoDirect IMRT, TomoHelical, IMRT plans for breast cancer in 10 patients, the homogeneity index of planning target volume was 0.15±0.01, 0.06±0.01 and 0.20±0.15, respectively ($P<0.001$); conformity index was 0.76±0.00, 0.81±0.03 and 0.74±0.04, respectively ($P>0.05$). For the organs-at-risk, the mean dose of the heart was (4.12±0.87), (3.82±0.53) and (6.33±2.49) Gy, respectively ($P<0.001$); the maximum dose of left anterior descending artery was (20.38±5.66), (13.34±3.78) and (34.56±4.12) Gy, respectively ($P<0.001$); and the mean dose of the ipsilateral lung

【收稿日期】2017-08-24

【基金项目】上海市促进市级医院临床技能与临床创新3年行动计划项目(16CR2014A)

【作者简介】沈奕晨, 硕士, 医学物理师, 主要研究方向: 肿瘤放射治疗, E-mail: shenyichen@xinhumed.com.cn

【通信作者】蒋马伟, 博士, 主任医师, 主要研究方向: 肿瘤放射治疗, E-mail: jiangmawei@xinhumed.com.cn

was (6.78 ± 1.33) , (7.22 ± 2.34) and (12.76 ± 2.10) Gy, respectively ($P < 0.001$). The absorbed dose at 6 measurement points also showed statistical significances ($P < 0.001$). **Conclusion** Compared with the other two technologies, TomoDirect IMRT had the advantages of small low-dose region, better dose coverage and reducing the effects of respiration motion. TomoDirect IMRT is recommended for patients with breast cancer.

Keywords: breast cancer; Tomotherapy; intensity-modulated radiotherapy; TomoDirect intensity-modulated radiotherapy; thermoluminescent dosimeter

前言

乳腺癌外照射放射治疗是早期乳腺癌治疗的标准组成部分,其长期局控和生存率都有很好的临床数据支持^[1]。传统三维适形(3DCRT)乳腺癌放射治疗会产生相关副反应(如皮肤炎症、肺炎、心脏损伤)。急性与晚期反应的出现是由于3DCRT靶区均匀性相对较差、剂量热点偏高、肺组织与心脏组织受照剂量偏高所引起的^[2]。通常,3DCRT的剂量热点控制在110%以内,但有时由于照射靶区的要求以及同步加量所产生的不均匀性会导致热点上升到处方剂量120%以上^[2]。同时,由于射野角度与适形技术的限制,肺组织与心脏的剂量相对较高,造成后续副反应风险因素上升。调强放射治疗(IMRT)技术有效改善了乳腺癌治疗靶区的均匀性及降低了正常组织(如肺和心脏)的受照剂量^[3]。多项研究表明在较特殊的乳腺癌病例放射治疗上(如左侧乳腺与淋巴引流区照射、部分乳腺照射、双侧乳腺照射、同步术后乳腺癌瘤床加量照射等),IMRT技术的运用有其剂量学优势^[4]。然而,IMRT技术在乳腺癌治疗上应用的不确定性在于治疗过程中,患者的呼吸导致靶区近皮肤区域造成欠剂量^[5]。螺旋断层放射治疗(TomoTherapy, Accuray, Madison, WI, USA)可以做到靶区高覆盖、高均匀性,最好地保护周围正常组织,同时配备有MV级螺旋CT可以做到在线图像引导(IGRT)位置纠正^[9-10]。TomoDirect™(TD-IMRT)技术是一种在Tomotherapy上实现定角度照射的频率调强方式^[11-12]。最新文献检索显示,Tomotherapy和TD-IMRT技术均有应用于乳腺癌的临床治疗^[13-15]。TD-IMRT技术在治疗模式上相较传统加速器IMRT与TomoHelical技术能降低患侧肺组织剂量,同时减少靶区表浅欠剂量现象。目前尚未见乳腺癌TD-IMRT、TomoHelical和IMRT技术的剂量学比较的报道,也未有研究涉及3种技术在临床实测剂量上的靶区剂量验证。

1 材料与方法

1.1 临床病例

研究病例为在上海交通大学医学院附属新华医院肿瘤科进行放疗的10例乳腺癌T₁N₀M₀保乳术后患者(无锁骨上照射区域)。患者分组为加速器IMRT治疗与Tomotherapy治疗,处方剂量为50 Gy/25次(2 Gy/d, 5次/周)。患者年龄45~70岁(中位年龄52岁),其中在Tomotherapy螺旋断层治疗设备上使用TomoDirect™(TD-IMRT)和TomoHelical两种技术。

1.2 CT定位、计划靶区(PTV)和危及器官(OAR)勾画

所有病例都仰卧于乳腺固定托架(Qfix_Quest)上,体表做标记线用于治疗时的体位重复,在标记线交叠处放置金属标记点,乳腺组织及手术瘢痕用金属线标记。治疗计划图像由16排大孔径飞利浦CT(Bigbore™)定位获取,层厚3 mm。所有靶区及正常组织均在Oncentra上勾画。乳腺癌外照射临床靶区(CTV)为整个乳腺组织,由于IMRT计划为避免皮肤剂量过高,PTV为CTV外扩5 mm且离皮肤5 mm区域。OAR勾画肺、心脏、对侧乳腺、左前降支。外轮廓为TPS自动勾画,皮肤为外轮廓内收2 mm区域。

1.3 临床剂量实测

1.3.1 热释光剂量计(Thermoluminescent Dosimeter, TLD) TLD-700LiF用于乳腺癌患者治疗中实测吸收剂量。TLD剂量计直径4.5 mm,厚度0.8 mm。同批次首次使用的TLD在吸收剂量实测前,需进行剂量标定处理。剂量标定过程中,在加速器下首先在水箱中机器等中心点使用电离室测量机器100 MU对应的绝对吸收剂量值。随后,将TLD在相同条件、位置下进行照射,使用TLD读取热释光计发光读数,从而得到剂量与发光读数对应线性函数(图1),获取临床上所需要的实际吸收剂量^[13-14]。

1.3.2 TLD的方向 依赖性TLD的方向依赖性定义为剂量计与辐射入射角度的变化响应。导致这种特性的参数为剂量计的结构构成、物理尺寸及入射辐射能量的大小。本研究所用的TLD为与校准剂量计相同的几何形状构成,因此测量不会受TLD的方向依赖性影响,可用于Tomotherapy。

1.4 乳腺癌IMRT、TomoHelical、TomoDirect治疗计划比较

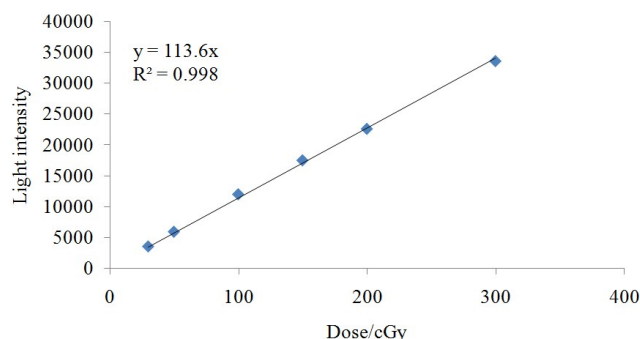


图1 TLD 发光强度读数对应吸收剂量曲线

Fig.1 Curve of light intensity read by thermoluminescent dosimeter (TLD) and corresponding dose

运用 TomoHelical 与 TomoDirect 技术在 Tomotherapy 5.0.5.18 计划系统上利用卷积剂量计算算法完成螺旋断层放疗计划设计。TomoHelical 技术为螺旋断层放射治疗技术,其主要工作原理为模拟螺旋断层 CT 技术的螺旋步进式放射治疗技术。TomoDirect 技术为第 3 代 Tomotherapy HD 设备上特有的射线机头定角步进式放射治疗技术。两种技术的差异在于 TomoHelical 的照射角度更多照射方式更灵活,但低剂量区的范围较大造成不必要的照射。TomoDirect 技术解决了射线角度多造成的低剂量范围大的劣势,实现射线入射方向确定,利用治疗床的步进实现与 TomoHelical 相同治疗范围的结果。TomoHelical 技术计划参数为:射野宽度 2.512 cm,螺距 0.287,调强因子 2.0 和 Fine 计算网格 (1.96 mm×1.96 mm×层厚)。TomoDirect 技术计划参数为:射野宽度 2.512 cm,螺距 0.251(此为推荐对于射野宽度的螺距参数),调强因子 2.0 和 Fine 计算网格 (1.96 mm×1.96 mm×层厚)。除 TomoHelical 外,乳腺癌 IMRT 计划为 6 个乳腺切线射野角度都选取危及器官受照剂量最小的方向。对于 TomoDirect 技术与 IMRT 技术,考虑到乳腺癌患者在治疗过程中的呼吸运动,避免靶区漏照射低剂量的产生, TomoDirect 技术在射野侧外放 3 个 MLC 叶片,而 IMRT 技术则在治疗计划系统上虚拟勾画一个厚度为 1.5 cm 的 Flash 以确保呼吸运动引起的误差。

1.5 计划评估

剂量学对比方面通过以下参数分析:PTV 的 D_{max} ;PTV 的 $D_{95\%}$;PTV 的 $D_{2\%}$;患侧肺组织的平均剂量 (D_{mean})、 V_5 、 V_{10} 、 V_{20} 、 V_{30} ;心脏 D_{mean} ;对侧乳腺 D_{mean} ;皮肤 D_{max} 。同时,对于靶区均匀性指数 (Homogeneity Index, HI) 和适形度指数 (Conformity Index, CI) 进行评估。

$$HI = \left(\frac{D_2 - D_{98}}{D_{50}} \right) \times 100\%$$

$$CI = \left(\frac{TVRI}{TV} \right) \left(\frac{TVRI}{VRI} \right)$$

其中,TVRI 为 95%处方剂量包绕的靶区体积,TV 为靶区体积,VRI 为参考等中心剂量体积。

1.6 统计学处理

通过 SPSS 20.0 比较 PTV 与 OAR 各个体积剂量参数,双侧 $P < 0.05$ 表明数据有统计学意义。

2 结果

2.1 治疗计划剂量比较

放射治疗乳腺癌剂量分布见表 1。TD-IMRT 和 TomoHelical 的靶区覆盖率优于 IMRT。PTV 的 D_{max} 与 D_2 , TD-IMRT 和 TomoHelical 优于 IMRT。TomoHelical 的 HI 与 CI 优于其他两种技术,但肺组织低剂量区域体积相对其他两种技术较大。TD-IMRT 对于肺组织的 V_5 、 V_{10} 和 D_{mean} 都优于 TomoHelical 和 IMRT 两种技术。3 种技术皮肤的 D_{max} 无明显差异。治疗效率方面,TD-IMRT 与 TomoHelical 的治疗时间相对加速定角 IMRT 技术有一定优势,存在统计学差异。

2.2 临床实测剂量

在临床剂量实测过程中,靶区范围内放置的 6 个剂量探测点,通过统计分析,TD-IMRT 和 IMRT 技术相较于 TomoHelical 表面实测吸收剂量较高,有显著统计学意义 ($P < 0.01$, 表 2)。TLD 吸收剂量相对于实际吸收剂量有 5% 左右误差偏低效应,此实测剂量可认为是表面最低实际吸收剂量。

3 讨论

不同技术在乳腺癌放射治疗中产生不同的靶区剂量均匀性和适形性^[15-16]。本研究比较新技术与传统技术上在靶区剂量与 OAR 剂量上的优劣势,结合 TLD 实测剂量分析表浅乳腺靶区剂量,为今后的临床实践选择合适的放射治疗技术提供参考。

近年来多数研究报道涉及的是不同放疗技术对 OAR 高剂量区与低剂量区的分析比较。之前的研究报道增加射野数量可以提高靶区均匀性和降低 OAR 肺和心脏的最大剂量,但是更多的正常组织接收到更多的低剂量照射^[17]。本研究中,相对其他各种技术, TomoHelical 能够降低心脏、左前降支和患侧肺组织的最大剂量,但增大 OAR 的平均剂量与低剂量体积 (V_5 , V_{10} , V_{20})。TD-IMRT 作为定角度的 Tomotherapy 新型技术,对于 OAR 在最大剂量方面相较于传统直线加速器的 IMRT 技术有效降低,同时相对于 TomoHelical 技术, OAR 的平均剂量与低剂量区也有所降低,在剂量学表现上有明显优势。在本研究中, TomoHelical 技术利用了 OAR 上

表1 3种技术放射治疗乳腺癌剂量学比较
Tab.1 Dosimetry comparison of three technologies for breast cancer

Parameters		TD-IMRT	TomoHelical	IMRT	P value
PTV	D _{max} /Gy	52.0±0.8	51.4±0.5	54.1±1.1	<0.001
	D ₉₈ /Gy	47.8±0.2	48.3±0.7	47.3±0.5	0.047
	D ₂ /Gy	51.5±0.4	50.9±0.8	53.8±0.9	<0.001
HI		0.15±0.01	0.06±0.01	0.20±0.15	<0.001
CI		0.76±0.00	0.81±0.03	0.74±0.04	0.343
Heart	D _{max} /Gy	46.7±4.8	36.5±4.4	38.3±8.2	<0.001
	D _{mean} /Gy	4.10±0.87	3.80±0.53	6.30±2.50	<0.001
	V ₅ /%	8.7±4.3	36.2±5.9	10.4±6.3	<0.001
	V ₁₀ /%	6.50±5.40	10.20±4.42	8.70±8.30	<0.001
	V ₂₀ /%	6.2±1.9	1.8±0.6	6.7±3.8	<0.001
	V ₃₀ /%	4.8±2.9	0.1±0.2	2.1±1.7	<0.001
LAD	D _{max} /Gy	20.4±5.7	13.3±3.8	34.6±4.1	<0.001
	D _{mean} /Gy	5.5±1.2	3.4±1.0	14.7±5.3	<0.001
Ipsilateral lung	D _{max} /Gy	49.8±3.1	40.8±5.1	49.8±1.9	<0.001
	D _{mean} /Gy	6.8±1.3	7.2±2.3	12.8±2.1	<0.001
	V ₅ /%	12.8±4.4	55.8±13.3	75.8±10.3	<0.001
	V ₁₀ /%	10.7±4.8	23.4±7.7	41.2±10.3	<0.001
	V ₂₀ /%	10.2±4.4	7.3±2.3	15.2±3.2	<0.001
Contralateral lung	D _{mean} /Gy	0.5±0.3	2.4±0.3	0.5±0.2	0.331
Contralateral breast	D _{mean} /Gy	0.5±0.1	3.88±0.3	0.52±0.2	0.432
Skin	D _{max} /Gy	50.8±1.5	50.0±0.4	50.9±1.1	0.553
Time/s		658±132	722±162	921±102	<0.001

TD-IMRT: TomoDirect intensity-modulated radiotherapy; IMRT: Intensity-modulated radiotherapy; PTV: Planning target volume; HI: Homogeneity index; CI: Conformity index; LAD: Left anterior descending artery

表2 TLD实测剂量点结果 (cGy)
Tab.2 TLD measurement point results (cGy)

No. of points	TD-IMRT		TomoHelical		IMRT	
	TLD	Absorbed dose	TLD	Absorbed dose	TLD	Absorbed dose
1	21 378	188	20 116	177	21 445	188
2	21 877	192	19 887	174	21 367	188
3	21 045	185	20 087	176	21 312	187
4	22 117	195	19 777	174	22 087	194
5	21 215	186	19 912	175	22 876	201
6	22 887	201	20 335	179	22 114	194

1: Left side of breast target; 2: Right side of breast target; 3: Nipple; 4: Nipple by 2 cm; 5: Body side of the intersection; 6: Centre of the breast target

directional block 和 complete block 技术,尽可能地降低低剂量区范围与 OAR 低剂量区范围(V_5 , V_{10} , V_{20}),但相对于 TD-IMRT 技术效果仍不具备优势。对于乳腺癌放疗关注的对侧乳腺组织剂量限制方面,TD-IMRT 技术与传统加速器 IMRT 技术相比基本相同,其平均剂量在 0.5 Gy,而 TomoHelical 技术的对侧乳腺组织的平均剂量高达 3.88 Gy,明显高于另两种技术。IMRT 相对于其他两种技术,在靶区最高剂量与靶区均匀性上有一定劣势,但在 OAR 的剂量基本符合乳腺癌放疗要求。TomoHelical 技术则在热点控制、靶区均匀性与适形性方面有着一定优势,与其他研究报道相同^[17]。

有研究表明降低低剂量体积可以通过减少射野角度数量及调整射野角度与 OAR 位置关系来解决^[18-19]。本研究中,TD-IMRT 与 IMRT 技术都是以传统三维适形乳腺切线射野角度为基础,尽量减少射野通路范围和尽量减少患侧肺组织与心脏组织的照射。同时由于射野角度的数量直接决定这两种技术的照射时间,IMRT 计划在 step-by-step 模式的 Elekta 直线加速器上进行,所以治疗时间上明显较多(平均照射时间 921 s)。在 Tomotherapy 机器上进行的两种技术治疗时间上相近,治疗效率均比较高(TD-IMRT 平均治疗时间为 658 s, TomoHelical 平均治疗时间为 722 s)。

本研究结果表明 3 种不同技术均提供了充足的靶区覆盖性,与其他文献研究有相似结论^[20-23]。TD-IMRT 与 TomoHelical 较医用直线加速器 IMRT 技术在靶区均匀性、OAR 的体积-剂量有一定优势。同时实测吸收剂量的实验结果,由于 TD-IMRT 在计划过程中可以使用外放 2~3 条 MLC 叶片的功能,其相较于 TomoHelical 技术可以很好地解决呼吸运动在乳腺癌调强技术中的影响,避免了治疗过程中由于呼吸运动造成表浅靶区低剂量。在乳腺癌放射治疗中,呼吸运动会造成靶区活动度加大,使得在调强技术的运用时造成靶区低剂量区的产生^[24]。考虑到这方面研究的欠缺,本研究除了在 3 种技术剂量学水平上比较外,我们利用热释光剂量仪进行临床实测剂量,获取不同照射技术情况下乳腺表皮组织吸收剂量。由于呼吸运动的影响在乳腺癌治疗中特别是调强技术的运用上有一定不确定因素^[5],而 Tomotherapy 整个治疗都是调强技术,所以与传统直线加速器调强照射乳腺癌一样有着不确定性。本研究通过热释光剂量仪进行评估,由于 TD-IMRT 与传统直线加速器 IMRT 技术都有考虑到呼吸运动在表浅靶区的剂量影响,都在靶区外外放了足够余量的 MLC。本研究结果显示,在制定治疗计划的过程中都进行皮肤限

量的情况下,TD-IMRT 与 IMRT 两种技术相对于 TomoHelical 近表浅靶区欠剂量问题较少,实际照射过程中患者体表剂量较接近靶区处方剂量。由于呼吸运动不确定性,本研究在体表利用热释光剂量仪实测剂量结果认为是呼吸运动影响下的表浅靶区剂量。在今后的研究中,设想利用人体仿真模型进行剂量模拟,在人体仿真模型内部乳腺癌表浅靶区位置进行剂量模拟实测,更深入地研究乳腺癌放射治疗调强技术方面器官运动造成的剂量学影响。

4 结 论

在乳腺癌放射治疗方面,TD-IMRT 技术相对于其他两种技术,其靶区剂量均匀性、适形性和呼吸运动影响及 OAR 的最大剂量与平均剂量均有剂量学优势。本研究结果建议有条件的医疗机构可利用 Tomotherapy 螺旋断层放疗的定角 TD-IMRT 技术开展乳腺癌放射治疗。

【参考文献】

- [1] CLARKE M, COLLINS R, DARBY S, et al. Early Breast Cancer Trialists Collaborative Group. Effects of radiotherapy and of differences in the extent of surgery for early breast cancer on local recurrence and 15-year survival: an overview of the randomized trials [J]. *Lancet*, 2005, 366: 2087-2106.
- [2] BUCHHOLZ T A, GURGOZE E, BRICE W S, et al. Dosimetric analysis of intact breast irradiation in off-axis planes [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 1997, 39(1): 261-267.
- [3] KESTIN L L, SHARPE M B, FRAZIER R C, et al. Intensity modulation to improve dose uniformity with tangential breast radiotherapy: initial clinical experience [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2000, 48(5): 1559-1568.
- [4] HONG L, HUNT M, CHUI C, et al. Intensity-modulated tangential beam irradiation of the intact breast [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 1999, 44(5): 1155-1164.
- [5] HARSOLIA A, KESTIN L, GRILLS I, et al. Intensity-modulated radiotherapy results in significant decrease in clinical toxicities compared with conventional wedge-based breast radiotherapy [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2007, 68(5): 1375-1380.
- [6] MCDONALD M W, GODETTE K D, BUTKER E K, et al. Long-term outcomes of IMRT for breast cancer: a single-institution cohort analysis [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2008, 72(4): 1031-1040.
- [7] PIGNOL J P, OLIVOTTO I, RAKOVITCH E, et al. A multicenter randomized trial of breast intensity-modulated radiation therapy to reduce acute radiation dermatitis [J]. *J Clin Oncol*, 2008, 26(13): 2085-2092.
- [8] MUKESH M B, BARNETT G C, WILKINSON J S, et al. Randomized controlled trial of intensity-modulated radiotherapy for early breast cancer: 5-year results confirm superior overall cosmesis [J]. *J Clin Oncol*, 2013, 31(36): 4488-4495.
- [9] COON A B, DICKLER A, KIRK M C, et al. Tomotherapy and multi-field intensity-modulated radiotherapy planning reduce cardiac doses in left-sided breast cancer patients with unfavorable cardiac anatomy [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2010, 78(1): 104-110.
- [10] BEAVIS A W. Is Tomotherapy the future of IMRT? [J]. *Br J Radiol*,

- 2004, 77(916): 285-295.
- [11] FRANCO P, CATUZZO P, CANTE D, et al. TomoDirect: an efficient means to deliver radiation at static angles with tomotherapy [J]. Tumori, 2011, 97(4): 498-502.
- [12] MURAI T, SHIBAMOTO Y, MANABE Y, et al. Intensity-modulated radiation therapy using static ports of tomotherapy (TomoDirect): comparison with the TomoHelical mode[J]. Radiat Oncol, 2013, 8(1): 68.
- [13] FURETTA C, WENG P S. Operational thermoluminescence dosimetry [Z]. Singapore: World Scientific Publishing, 1998.
- [14] PODGORSK E B. Radiation oncology physics[M]//A Handbook for Teachers and Students. Chapter 3. Vienna: IAEA, 2005.
- [15] OGLIATA A, CLIVIO A, NICOLINI G, et al. A treatment planning study using non-coplanar static fields and coplanar arcs for whole breast radiotherapy of patients with concave geometry[J]. Radiother Oncol, 2007, 85(3): 346e54.
- [16] AHUNBAY E E, CHEN G P, THATCHER S, et al. Direct aperture optimization-based intensity-modulated radiotherapy for whole breast irradiation[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2007, 67(4): 1248e58.
- [17] SCHUBERT L K, GONDI V, SENGBUSCH E W, et al. Dosimetric comparison of left-sided whole breast irradiation with 3DCRT, forward-planned IMRT, inverse-planned IMRT, helical tomotherapy, and topotherapy[J]. Radiother Oncol, 2011, 100(2): 241e6.
- [18] LANDAU D, ADAMS E J, WEBB S, et al. Cardiac avoidance in breast radiotherapy: a comparison of simple shielding techniques with intensity-modulated radiotherapy[J]. Radiother Oncol, 2001, 60(3): 247e55.
- [19] CAUDELL J J, DE LOS SANTOS J F, KEENE K S, et al. A dosimetric comparison of electronic compensation, conventional intensity modulated radiotherapy, and tomotherapy in patients with early-stage carcinoma of the left breast[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2007, 68(5): 1505e11.
- [20] HURKMANS C, CHO B, DAMEN E, et al. Reduction of cardiac and lung complication probabilities after breast irradiation using conformal radiotherapy with or without intensity modulation [J]. Radiother Oncol, 2002, 62(2): 163e71.
- [21] GONZALEZ V J, BUCHHOLZ D J, LANGEN K M, et al. Evaluation of two tomotherapy based techniques for the delivery of whole-breast intensity-modulated radiation therapy [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2006, 65(1): 284e90.
- [22] FOGLIATA A, BOLSI A, COZZI L. Critical appraisal of treatment techniques based on conventional photon beams, intensity modulated photon beams and proton beams for therapy of intact breast [J]. Radiother Oncol, 2002, 62(2): 137e45.
- [23] HONG L, HUNT M, CHUI C, et al. Intensity-modulated tangential beam irradiation of the intact breast[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 1999, 44(5): 1155e64.
- [24] FOGLIATA A, NICOLINI G, CLIVIO A, et al. On the dosimetric impact of inhomogeneity management in the Acuros XB algorithm for breast treatment[J]. Radiat Oncol, 2011, 6: 103. doi: 10.1186/1748-717X-6-103.

(编辑:黄开颜)