

## 基于两种旋转调强全骨髓照射新技术的研究

解传滨, 徐寿平, 曲宝林, 俞 伟, 鞠忠建, 葛瑞刚, 巩汉顺, 徐 伟, 王小深, 丛小虎  
解放军总医院放疗科, 北京 100853

**【摘 要】目的:**探讨 RapidArc(RA)容积旋转调强放射治疗与螺旋断层放射治疗(Helical Tomotherapy, HT)两种旋转调强技术在全骨髓照射中的可行性及剂量学差异。**方法:**选取 8 例行全身扫描的患者,采用 Eclipse 10.0 计划系统自动勾画模块进行靶区勾画并予以适当修改后外放 3 mm 生成照射靶区,分别设计 RA 与 HT 两种旋转调强计划,处方剂量为 12 Gy/10 F。通过剂量体积直方图(DVH)、等剂量曲线等参数评价和比较两种治疗计划靶区及危及器官的剂量分布,并评估机器跳数(MU)和出束时间。剂量验证采用 SunNuclear ArcCHECK 系统,通过分析各部位剂量验证通过率评估各自临床实施的安全性及准确性。**结果:**靶区剂量分布上两种方法均能达到较好的覆盖度且具有类似的适形度( $0.54 \pm 0.05$  vs  $0.52 \pm 0.07$ ,  $P=0.45$ ),而靶区剂量均匀性 HT 具有明显的优势(RA/HT 的 HI 值分别为  $0.19 \pm 0.02$  vs  $0.13 \pm 0.02$ ,  $P=0.00$ )。在危及器官的保护上,除全脑、口腔、腮腺以及小肠和直肠外,HT 均表现出一定的优势。RA/HT 两组计划的平均机器跳数和出束时间分别为 2566 MU/12293 MU、568 s/875 s。头颈、胸腹、盆腔三部分的计划验证的通过率分别为  $98.9\% \pm 1.9\%$  /  $94.3\% \pm 1.5\%$ 、 $98.4\% \pm 1.8\%$  /  $96.5\% \pm 1.2\%$ 、 $97.4\% \pm 2.1\%$  /  $94.1\% \pm 1.9\%$ 。**结论:**两种旋转调强技术均能较好地实现全骨髓照射且实现射野间的无缝衔接,且 RA 具有更高的射线利用率,均可应用于全骨髓的临床照射。

**【关键词】**全骨髓照射; 容积旋转调强治疗; 螺旋断层治疗; 剂量学

**【DOI 编码】**doi:10.3969/j.issn.1005-202X.2015.02.004

**【中图分类号】**R733.3

**【文献标识码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2015)02-0168-06

## Dosimetric Comparison of Total Marrow Irradiation Based on Two Intensity Modulated Arc Therapy

XIE Chuan-bin, XU Shou-ping, QU Bao-lin, YU Wei, JU Zhong-jian, GE Rui-gang, GONG Han-shun, XU Wei, WANG Xiao-shen, CONG Xiao-hu

Department of Radiotherapy, PLA General Hospital, Beijing 100853, China

**Abstract:** Objective To study the feasibility and dosimetric characteristics of RapidArc (RA) and Tomotherapy (HT) in total marrow irradiation (TMI) for hematologic malignancies. Methods The kVCT data collected from 8 patients were retrospectively designed and analyzed for RA and HT. Total bone marrow was contoured as clinical target volume excluding the cubitus and hand parts, then plus a 3.0 mm margin as planning target volume. The prescription dose was 12 Gy in 10 fractions. The plans were evaluated by isodose-curves, dose volume histograms, dose homogeneity indexes, total MU and treatment times. SunNuclear ArcCHECK system was used for dose verification. The safety and accuracy of clinical delivery were evaluated by the quality assurance of plans. Results The two techniques can well achieve the target coverage. The conformity indices of RA and HT were  $0.54 \pm 0.05$  and  $0.52 \pm 0.07$  ( $P=0.45$ ) respectively, but the HT plans have a visible advantage over the RA plans in the dose uniformity of target. The homogeneity indexes were  $0.19 \pm 0.02$  and  $0.13 \pm 0.02$  ( $P=0.00$ ) respectively. HT showed better in sparing of the organs at risk than RA except for the whole brain, mouth, parotid gland, small intestine and rectum. The MU and treatment delivery time of RA and HT were 2566 MU/568 s and 12293 MU/875 s respectively. The  $\gamma$ -analysis passing rates for head-neck, chest-abdomen, pelvic parts were  $98.9\% \pm 1.9\%$ ,  $98.4\% \pm 1.8\%$ ,  $97.4\% \pm 2.1\%$  for RA plans and  $94.3\% \pm 1.5\%$ ,  $96.5\% \pm 1.2\%$ ,  $94.1\% \pm 1.9\%$  for HT plans. Conclusion The two methods of IMAT using RA and HT can both improve the quality of

**【收稿日期】**2014-11-10

**【基金项目】**国家自然科学基金(11105225); 解放军总医院科技创新苗圃基金(13KMM09)

**【作者简介】**解传滨(1983-),男,物理师,硕士。研究方向:医学物理和肿瘤精确放疗。Tel:010-66936275; E-mail:xiechuanbin2003@163.com。

**【通信作者】**徐寿平, E-mail: shouping\_xu@yahoo.com。

TMI and achieve the smoothing distribution of dose between the beams. And the delivery efficiency of RA is better than that of HT. Two IMAT techniques are promising and can be put into clinic implementation of TMI.

**Key words:** total marrow irradiation; volumetric arc therapy; tomotherapy; dosimetry

## 前言

作为骨髓移植或造血干细胞移植的预处理方案,全身照射(TBI)广泛用于一些急慢性白血病、恶性淋巴瘤以及全身转移的晚期恶性肿瘤的治疗<sup>[1-2]</sup>。传统照射方法由于正常器官受量过大带来了较多的并发症。近年螺旋断层放射治疗技术(Tomotherapy, HT)作为一种新型旋转调强治疗技术,开始用于全身照射,以其高度的靶区适形度和均匀性及对正常器官的最大限度保护克服了传统方法的不足<sup>[3]</sup>,但由于该设备价格昂贵,能开展的单位极少,并且由于其较长的出束时间带来的过度机器损耗及患者治疗体位的移动给临床的实施带来了挑战。而新兴的容积旋转调强放疗技术(Volumetric Arc Therapy, VMAT)在普通加速器上实现了旋转调强的治疗方式,同时配合影像引导,实现了治疗的高效性和准确性,使其在全身照射的临床应用成为可能。本研究拟对 RapidArc(RA)在全身照射应用中的剂量学特性进行初步的临床分析,并与 Tomotherapy(HT)全身照射技术进行对照研究,为临床应用标准的选择提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 临床病例与定位方法

选取 8 例于 2012 年 6 月至 2013 年 6 月在解放军总医院接受全身 CT 扫描的患者图像,其中男性 5 例,女性 3 例。所有患者均采用仰卧位,S 型头颈肩-热塑体模一体板固定,扫描范围自头顶至股骨中段,扫描层厚为 5 mm。

### 1.2 靶区定义与处方剂量

患者靶区要求包括除前臂和手以外的所有骨髓,应用 Eclipse 10.0 计划系统自动勾画模块进行全身骨骼定义生成,以此作为 CTV,将 CTV 外放 3 mm 且不出皮肤内收 2 mm 边界生成 PTV。正常器官包括全脑、眼球、晶体、口腔、腮腺、肺、心脏、肝脏、胃、小肠、肾脏、膀胱、直肠等。另外,将外轮廓 Body 排除 PTV 作为正常组织,定义为 NT(Normal Tissue)。处方剂量为 12 Gy/10 F。

### 1.3 计划设计

#### (1) RA 治疗计划的设计

采用瓦里安 Eclipse 10.0 计划系统、Clinac X 直线加速器 6 MV X 线对病例制定容积旋转调强计划,采用单弧 330°多中心衔接的方法。为了实现对靶区更好的旋转覆盖,机头旋转 90°并根据实际情况设定 Y 轴方向铅门宽度,而 X 轴铅门采用动态调强推荐宽度 15 cm。为避免射野衔接处冷热点的出现,各相邻射野

重叠不低于 2 cm,照射弧角度设定为顺时针 195°~165°,逆时针 165°~195°<sup>[4]</sup>,并采用顺-逆-顺相接的方式以提高计划的实施效率<sup>[5]</sup>。

#### (2) HT 治疗计划的设计

将勾画完成的患者图像及轮廓数据通过 DICOM RT 网络传输至 Hi.Art 4.0.4 计划工作站,进行统一的靶区、正常器官分组以及优先级排序,并将晶体等重要器官设置成射野全屏蔽状态。考虑计划实施效率的问题,铅门宽度选择 5 cm,螺距(Pitch)选用 0.43,根据计划优化情况适当调整调制因子(Modulate Factor, MF)以保证机架旋转周期在 17 s~19 s 之间。

### 1.4 剂量验证

两组计划的剂量验证采用 SunNuclear ArcCHECK 模体及 SNC Patient 验证分析软件(Version 6.2),分头颈、胸腹、盆腔三部分分别予以验证。为避免模体高密度组件引起图像伪影,研究中 ArcCHECK 验证模体的图像采集在 HT 治疗机的 MVCT 上完成。通过 Cheese 密度模体采集 MVCT 图像数据得到并建立其灰度-密度校准曲线,从而用于验证计划的剂量计算。

### 1.5 物理参数与剂量学评估

靶区剂量学评估包括靶区覆盖度( $D_{95}, V_{100}$ )、近似最大剂量  $D_1$ 、近似最小剂量  $D_{99}$ 、平均剂量  $D_{mean}$  以及剂量分布的均匀性和适形度。均匀性和适形度分别用均匀性指数(Homogeneity Index, HI)和适形度指数(Conformity Index, CI)表示。HI 的计算公式为<sup>[6]</sup>:

$$HI = \frac{D_5 - D_{95}}{D_T}$$

式中, $D_5$  为 5% 的靶区体积所受到的照射, $D_{95}$  为 95% 的靶区体积所受到照射剂量, $D_T$  为处方剂量,计算结果越接近 0 表明均匀性越好。

CI 的计算公式为:

$$CI = \frac{PTV_{ref}}{V_{PTV}} \times \frac{PTV_{ref}}{V_{95}}$$

式中, $PTV_{ref}$  为 95% 处方剂量所包绕的 PTV 的体积, $V_{PTV}$  为 PTV 的体积, $V_{95}$  为 95% 处方剂量所包绕的体积,计算结果越接近 1 表明适形度指数越高。

各重要器官通过 DVH 以及等剂量曲线分布情况对计划做出评估并比较分析两组计划各器官的平均剂量。最后通过出束时间、机器跳数以及各部位的验证通过率,评估计划实施效率及其可行性和准确性。

### 1.6 统计方法

应用 SPSS18.0 统计软件对两组计划剂量学参数行配对 t 检验, $P < 0.05$  为有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 两组计划剂量学比较结果

#### (1) 等剂量曲线评估

通过对等剂量曲线的评估发现,两种技术均能在对靶区进行较好覆盖的同时实现对各危及器官的保护,特别是在较复杂的靶区分布层面,HT 体现出了更好的靶区适形度。而在颅顶部,由于 HT 计划选择较大射野宽度所导致的靶区剂量纵向延伸造成了脑顶叶受量较 RA 有明显增加,如图 1a 所示。这种现象在口腔及肺尖部位也得到了相同的体现,这在图 2 所示的冠状位等剂量曲线分布图中能够更清楚地观察到。而在图 1c 所示眼球下缘层面的等剂量曲线分布情况可明显地看到,HT 计划的下眼眶区域有明显欠量,这是由于为了满足对晶体保护的特定要求,计划设计选用了屏蔽模式,由此带来了低剂量的延伸进而造成上下眼眶部分的靶区欠量,这种现象在 RA 治疗计划里是观察不到的。

#### (2) DVH 评估

通过对 DVH 的比较分析发现,两种技术均能实现处方剂量对靶区超过 95% 的覆盖,HT 计划较 RA 靶区剂量更陡直,体现出了更好的剂量均匀性。而对于非靶区组织,RA 计划总体要低于 HT 计划,特别是 0 Gy~4 Gy 的低剂量区域以及 6 Gy~12 Gy 的高剂量区域。在各危及器官的 DVH 评估上,HT 在眼球及晶体的保护上占有绝对优势,晶体最大剂量较 RA 计划下降了近 50%。而在腮腺的避让上,两种照射技术各有优缺点,主要体现在以近 50% 处方剂量 (6 Gy) 为分界的高剂量区域以及低剂量区域两个部分,在高剂量区域 RA 占有一定优势,而在低剂量区域其受照体积却高于 HT。这在左右肺的 DVH 中也得到了相同体现。在口腔、全脑的 DVH 比较中,RA 明显优于 HT 计划,特别是在口腔剂量限定上 RA 占有绝对优势。而在心脏、直肠等与靶区相邻较远或者呈并行排列的器官,HT 明显地降低了受照体积,如图 3 所示。

#### (3) 剂量学参数统计结果

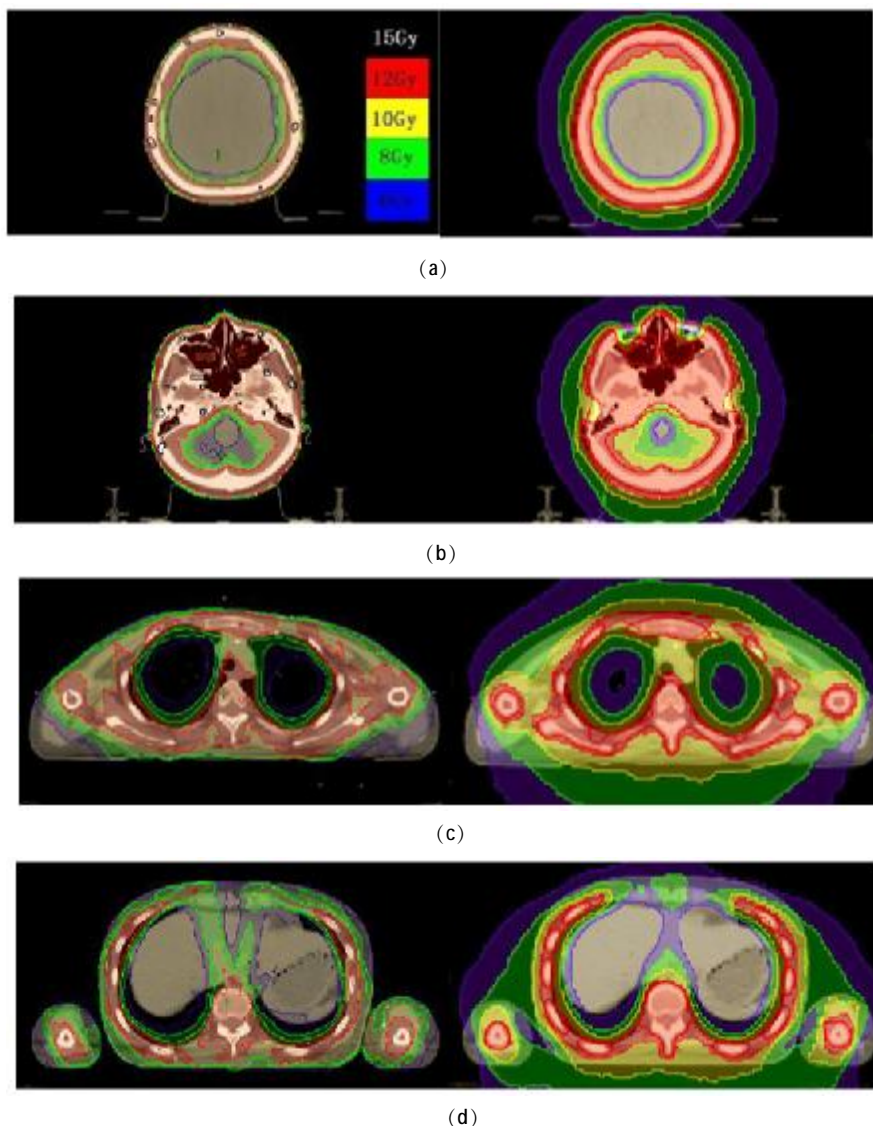


图 1 轴位等剂量曲线分布图

Fig.1 The Transverse Dose Distribution For Two Groups of Radiotherapy Plans. The Left is RA Plan and The Right is HT Plan



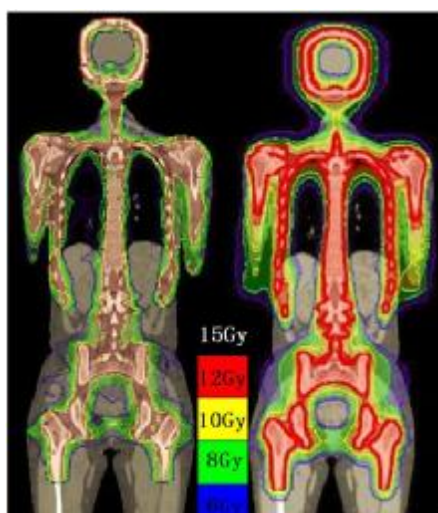


图2 冠状位等剂量曲线分布图

Fig.2 The Coronal Dose Distribution For Two Groups of Radiotherapy Plans. The Left is RA Plan and The Right is HT Plan

如表1所示,对表征靶区覆盖度的 $V_{95}$ 、 $D_{95}$ 进行统计分析发现,RA组稍高于HT组,但无统计学意义( $P=0.14$ , $P=0.39$ ),但 $D_1$ 值比HT组超出了7%,且这种差异有明显的统计学意义( $P=0.00$ ),同时这种差异也体现在靶区剂量的均匀性指数HI的分析上,表明HT组靶区均匀性更好,当然这种优势也带来了其靶

区平均剂量 $D_{mean}$ 更接近处方剂量值。

对各危及器官统计数据对比分析发现,HT在对眼球及晶体保护上占有明显优势( $P=0.00$ )。而RA组左右腮腺平均剂量比HT组分别减少了0.2 Gy、0.4 Gy,差异无统计学意义( $P=0.72/0.46$ )。RA组口腔和全脑的平均剂量较HT组有了明显的降低( $P=0.00$ 、 $0.04$ ),而HT组双肺平均剂量较RA组降低了近10%( $P=0.01$ )。心脏、肝脏以及肾脏等器官的保护上,HT同样得到了较RA偏低的平均剂量,但无统计学意义,如表2所示。

## 2.2 实施效率

RA组与HT组8例患者计划的平均出束时间分别为568 s、875 s,平均机器跳数分别为2566 MU、12 293 MU。

## 2.3 剂量验证

对两组计划分别进行3 mm/3%(Gamma分析法)的定量分析,如表3所示,各部位Gamma通过率( $\gamma \leq 1$ )均在94%以上,且在RA组表现出了更好的结果。

## 3 讨论

全身照射(TBI)是一种有别于常规照射的大野照射技术,由于治疗过程复杂,剂量实施精确性较差,重要危及器官接受到较高剂量的照射。随着放疗技术的发展,调强放射治疗技术开始应用于全身照射,实现

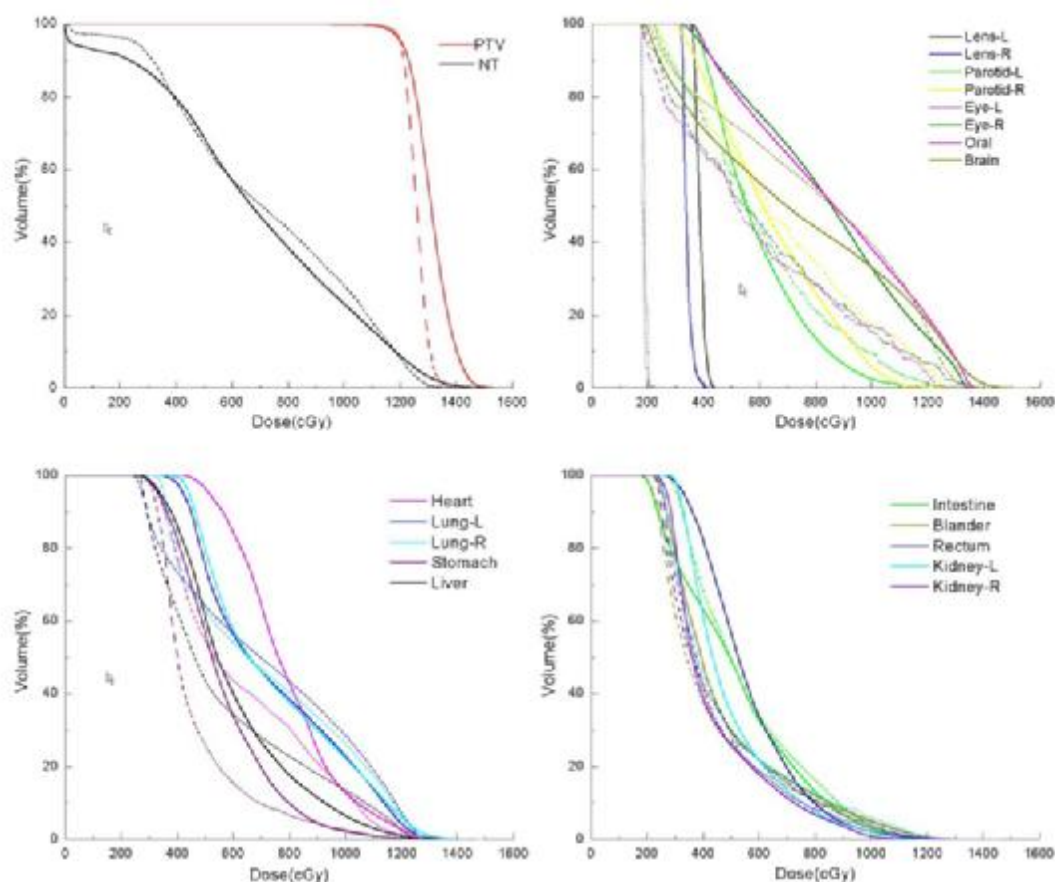


图3 患者两组计划DVH比较

Fig.3 The Comparison of DVH For RA Plan (solid line) and HT Plan (dotted line)

表 1 两种旋转调强全骨髓照射技术计划中靶区剂量学情况

Tab.1 The Dose Distribution of PTV For RA and HT Plans

Parameters	RA Plans	HT Plans	t	p
V <sub>95</sub> (%)	98.87±0.22	98.59±0.33	1.74	0.14
D <sub>95</sub> (Gy)	12.09±0.11	12.04±0.07	0.93	0.39
D <sub>99</sub> (Gy)	11.45±0.21	11.24±0.17	1.88	0.11
D <sub>1</sub> (Gy)	14.83±0.36	13.79±0.16	8.07	0.00
D <sub>mean</sub> (Gy)	13.24±0.21	12.86±0.18	3.59	0.01
HI	0.19±0.02	0.13±0.02	7.88	0.00
CI	0.54±0.05	0.52±0.07	0.83	0.45

表 2 两种旋转调强全骨髓照射计划中各危及器官平均剂量情况

Tab.2 The Mean Dose of OARs For RA and HT Plans

Organs	RA Plans(Gy)	HT Plans(Gy)	t	p
Left Eye	7.57±0.31	5.96±0.21	6.79	0.00
Right Eye	7.27±0.78	5.75±0.56	5.48	0.00
Left Lens	3.54±0.25	1.96±0.17	10.95	0.00
Right Lens	3.45±0.19	1.99±0.15	15.15	0.00
Left Parotid Gland	7.08±0.87	7.28±1.41	-0.40	0.72
Right Parotid Gland	7.36±0.82	7.74±1.33	-0.84	0.46
Oral Cavity	7.08±0.94	8.31±0.81	-2.18	0.00
Brain	7.76±0.39	8.23±0.18	-2.81	0.04
Left Lung	8.04±0.46	7.30±0.30	3.72	0.01
Right Lung	8.06±0.38	7.36±0.27	4.30	0.01
Heart	7.01±1.23	6.44±0.38	1.30	0.25
Stomach	5.26±0.56	4.23±0.30	4.54	0.01
Liver	6.34±0.52	5.94±0.33	3.71	0.01
Left Kidney	5.07±0.45	4.80±0.12	1.70	0.15
Right Kidney	5.01±0.58	4.77±0.23	1.55	0.18
Small Intestine	5.77±0.58	6.04±0.41	-1.62	0.17
Bladder	5.42±0.65	4.88±0.52	3.54	0.02
Rectum	4.82±0.67	5.10±0.95	-1.40	0.22
NT	7.12±0.45	7.45±0.43	-2.10	0.09

表 3 两种旋转调强全骨髓计划各部位验证通过率统计(100%)

Tab.3 The  $\gamma$ -analysis Passing Rates For Three Parts of RA and HT Plans(100%)

Parts	RA Plans	HT Plans
Head-Neck	98.9±1.9	94.3±1.5
Chest-Abdomen	98.4±1.8	96.5±1.2
Pelvic parts	97.4±2.1	94.1±1.9

了靶向化的全骨髓照射方式。Aydogan 等<sup>[7]</sup>建立了基于常规加速器静态调强技术的全骨髓调强治疗方法,处方剂量为 12.0 Gy,按照头、胸、腹三个部位分别设计 9 野调强计划。结果显示靶区剂量分布的适形度较好,危及器官的受量较常规方法有了显著降低,但是需要多中心多计划衔接来完成,设计过程较为复杂,且相邻计划的衔接处剂量分布不均匀,有冷热点的出现。江波<sup>[8]</sup>等<sup>[8]</sup>提出应用常规加速器完成全身照射旋转平移调强治疗,并进行了相应地模拟实验;其结果显示,90%的靶区体积达到处方剂量 12.0 Gy,而在正常

组织的保护上与传统的 TBI 相比危及器官剂量降低了 18.1%~57.5%。但是该技术的治疗长度主要取决于治疗床沿长轴方向上的移动距离。而以旋转调强方式为主的螺旋断层调强治疗和容积旋转调强治疗以其对较复杂病灶治疗实施的准确性和高效性得到了广泛的应用和推广,国内外已有相关单位尝试应用这两种技术进行全骨髓照射的实施并进行了相应的研究,结果显示旋转调强放疗技术在全骨髓照射中有着明显的剂量学优势<sup>[9-10]</sup>。但对于两种旋转调强全骨髓照射技术在相同病例样本中进行对照研究却鲜有报道。

本研究所用病例资料均从以往数据库中选取采用相同定位装置进行全身扫描的患者图像,其中 6 例进行过全身照射,而其他 2 例是进行过全中枢照射。由于本研究主要进行剂量学的评价分析,所以对患者具体情况未作详细了解,而是主要关注了图像扫描范围是否满足本研究要求。在靶区勾画过程中参照相关研究<sup>[4]</sup>,主要包括了颅顶到股骨中段除前臂与手以外的所有骨骼,股骨中段以下部分及手臂由于无重要危及器官,在临床应用中一般可采用常规加速器进行接野照射的方式来完成,但在实际应用中对于接野处剂量学特点应该予以关注,特别是应用 HT 时由于在纵轴方向的剂量“延伸”现象导致其靶区边缘剂量半影分布与普通加速器有所不同,这也就给临床的实际操作带来了更高的要求。当然在保证前臂以及手较好固定前提下,在旋转调强计划设计过程中完全可以将其包绕进去,这样可以进一步提高临床实施效率。

对两组计划进行比较发现,在靶区剂量分布上 HT 还是占有了明显优势,但是由于其铅门宽度选择了 5 cm 的规格,其剂量分布在纵轴方向产生了明显的剂量拖延现象。这种拖延既表现在靶区纵向边缘高剂量延伸所造成的相关危及器官受照剂量增加,也表现在由于对某些重要器官的保护所带来的低剂量延伸所造成的纵轴方向靶区的欠量,如晶体低剂量的延伸造成了上下眼眶所在靶区的明显剂量欠量。在实际临床应用中对于类似毗邻关系的靶区与危及器官病例类型,治疗参数的选择应该将这种剂量延伸予以考虑。如在下咽癌 HT 与 IMRT 计划剂量学研究中笔者发现腮腺受照剂量会随着所选铅门宽度增加而出现明显的受照剂量增加,而采用 1 cm 铅门宽度才得到了与 IMRT 类似的腮腺保护效果,却会明显地增加计划的出束时间<sup>[11]</sup>。

计划设计上由于全骨髓靶区最大宽度接近 40 cm,为了实现 RA 照射野在旋转过程中对靶区较高的覆盖度从而提高其调制能力,临床中将机头进行了 90°的旋转设置,使得最大开度为 40 cm 的 y 轴铅门与旋转弧的切线方向垂直,从而实现了单弧照射即可达到较好剂量分布的效果。但是由于多叶光栅(MLC)运动方向(x 轴)的铅门宽度在旋转调强过程中最大只能开到 15 cm,为了实现对照射靶区长度的全覆盖,只能通过增加照射中心的方法,这势必给患者的

治疗摆位带来挑战,但同时也给整个治疗过程增加了体位校对的机会。而 HT 治疗计划只能有一个中心,仅凭治疗前单次影像配准很难保证整个治疗过程患者体位的准确性,而较长靶区一般要求多次影像引导以实现综合确定校位偏差可能。有相关单位在类似较长靶区治疗过程中采用在适当节点进行治疗中断,并通过再生后续计划进行重新摆位校准,以实现对患者体位的及时误差校对。但是在此过程中带来的中断前后剂量衔接不确定性尚待进一步商榷。

对两组计划进行验证分析发现,HT 组 Gamma 通过率总体比 RA 组偏低,尤其在头颈及盆腔部。这是因为 HT 的验证摆位是以标示虚拟中心的绿激光灯为基准通过平移治疗床到治疗位置,此过程存在由于床自身重力造成的 2 mm~3 mm 沉降<sup>[12]</sup>,虽在验证实施前予以 MVCT 图像配准,但这种影响依然无法消除,而在头颈及盆腔部的验证中是按照计划预读距离(30 cm~45 cm)平移治疗床将模体送达验证摆位初始位置,此过程势必导致治疗床到位精度所致偏差的存在。而 RA 计划验证实施中每次中心摆位都进行了模体位置的校对和调整,从而最大限度地降低了摆位误差对通过率的影响。对于以往研究中采用 EDR2 胶片对 HT 计划进行验证所发现的“螺旋”效应<sup>[13]</sup>,在本研究中没有得到明显体现,虽然计划采用了较大的射野宽度(5 cm)和螺距值(0.43),这是因为 ArcCHECK 模体的探测器矩阵分辨率较低(1 cm),不足以显示类似胶片所能呈现的剂量信息。

## 4 结论

HT 与 RA 技术都能较好地实现全骨髓照射且获得射野间的无缝衔接,但在靶区与重要器官的剂量分布上,HT 因束流调制能力较强而存在较为明显的优势,而容积旋转调强放射治疗射线利用率更高。

## 【参考文献】

- [1] Harousseau JL. Multiple myeloma in the elderly: when to treat, when to go to transplant[J]. *Oncology*, 2010, 24(11): 992-998.
- [2] Burnett A, Wetzler M, Lowenberg B. Therapeutic advances in acute myeloid leukemia[J]. *Clin Oncol*, 2011, 29(5): 487-494.
- [3] Schultheiss T, Liu A, Wong J, et al. Total marrow and total lymphatic irradiation with helical tomotherapy [J]. *Med Phys*, 2004, 31: 1845.
- [4] Lulent A, Mete Y, Gulbin O, et al. Total marrow irradiation with rapidarc volumetric arc therapy[J]. *Radiat Oncol Biol Phys*, 2011, 81(2): 592-599.
- [5] 解传滨, 徐寿平, 俞伟, 等. 容积旋转调强放射治疗技术行全骨髓照射的可行性研究[J]. *中国医学装备*, 2014, 11(12): 118-121.  
Xie CB, Xu SP, Yu W, et al. The feasibility study on total marrow irradiation with rapid ARC volumetric arc therapy [J]. *China Medical Equipment*, 2014, 11(12): 118-121.
- [6] Bahas D, KoIotas C, Geramani K, et al. A conformal index (COIN) to evaluate implant quality and dose specification in brachytherapy[J]. *Radiat Oncol Biol Phys*, 1998, 40(2): 515-524.
- [7] Aydogan B, Mundt AJ, Roeske JC. Linac-based intensity modulated total marrow irradiation(IM-TMI) [J]. *Technol Cancer Res Treat*, 2006, 5(5): 513-519.
- [8] 江波. 基于常规加速器的全身调强放疗方法[D]. 北京: 北京协和医学院肿瘤医院, 2010: 6-12.  
Jiang B. Study of a linac-based intensity modulated method for total body irradiation[D]. Beijing: Cancer Hospital of Peking Union Medical College, 2010: 6-12.
- [9] Jeffrey Y, Rosenthal J, Liu A, et al. Image-guided total-marrow irradiation using helical tomotherapy in patients with multiple myeloma and acute leukemia undergoing hematopoietic cell transplantation[J]. *Radiat Oncol Biol Phys*, 2009, 73(1): 273-279.
- [10] Corvo R, Zeverino M, Vagge S, et al. Helical tomotherapy targeting total bone marrow after body irradiation for patients with relapsed acute leukemia undergoing an allogeneic stem cell transplant [J]. *Radiother Oncol*, 2011, 98: 382-386.
- [11] 解传滨, 徐寿平, 葛瑞刚, 等. 下咽癌静态调强放疗与两种射野宽度设计螺旋断层治疗的剂量学研究[J]. *中国医学物理学杂志*, 2011, 28(6): 2967-2970.  
Xie CB, Xu SP, Ge RG, et al. Dosimetric comparison of step-and-shoot intensity modulated Radiation therapy and helical tomotherapy with different jaw widths for hypopharyngeal carcinoma [J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2011, 28(6): 2967-2970.
- [12] 徐寿平, 邓小武, 戴相昆, 等. 螺旋断层放疗系统调强放疗验证[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2008, 17(5): 395-397.  
Xu SP, Deng XW, Dai XK, et al. Treatment verification of helical tomotherapy intensity modulated radiation therapy[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2008, 17(5): 395-397.
- [13] 解传滨, 徐寿平, 鞠忠建, 等. 二维电离室阵列与 EDR2 胶片在螺旋断层治疗计划剂量验证中的应用比较[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2011, 20(4): 330-333.  
Xie CB, Xu SP, Ju ZJ, et al. A comparison between two-dimensional ion chamber array and EDR2 film for intensity modulated planning of helical tomotherapy[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2011, 20(4): 330-333.