

Clinac iX和Trilogy加速器束流匹配计划验证分析

王广善, 刘桂梅, 李晓波, 李祥勇, 张旭

首都医科大学附属北京胸科医院放射治疗科, 北京 101149

【摘要】通过对束流匹配的加速器进行计划设计,比较计划参数,验证交叉执行的差异及通过率,验证束流匹配的可行性及可靠性。选取头颈、胸部和腹盆部共15例病例,分别设计Clinac iX和Trilogy两个不同治疗机的三维适形计划(3D-CRT);另选头颈、胸部和腹盆部共15例病例,分别设计两个不同治疗机的调强计划(IMRT)。比较相同计划类型不同治疗机的计划差异,评价指标包括靶区PTV的 $D_{98\%}$ 、 $D_{2\%}$ 、 D_{max} ,晶体 D_{max} 、脑干 D_{max} 、左右肺 V_{5Gy} 、双肺 V_{20Gy} 、脊髓 D_{max} 、膀胱 $D_{50\%}$ 、小肠 D_{2cc} 、股骨头 V_{40Gy} 等危及器官及治疗机跳数MU。并对治疗机执行计划进行点剂量和面剂量验证。PTV的 $D_{98\%}$ 、 $D_{2\%}$ 、 D_{max} 剂量差异最大平均值标准差分别为 $-0.52\%\pm 0.30\%$ 、 $0.53\%\pm 0.45\%$ 、 $-0.55\%\pm 0.17\%$,危及器官剂量差异最大平均值为膀胱 $D_{50\%}$ ($0.94\%\pm 0.84\%$);Clinac iX和Trilogy治疗机执行所有计划的最大绝对剂量偏差分别为2.36%和-2.80%。MatriXX和PV的 γ 验证通过率结果平均值分别在97.00%和96.00%以上,Clinac iX最小值为95.40%,Trilogy最小值为95.90%。两台经过束流匹配的治疗机之间交换执行计划的剂量学偏差在临床可接受的范围内,各项参数能精准执行,必要时可以在两台治疗机之间交换执行计划,保证病人放疗疗程完整。

【关键词】加速器;束流匹配;交叉执行;计划验证; γ 分析

【中图分类号】R811.1;R730.55

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2021)01-0015-06

The verification analysis of beam-matched plans between Clinac iX and Trilogy linacs

WANG Guangshan, LIU Guimei, LI Xiaobo, LI Xiangyong, ZHANG Xu

Department of Radiation Oncology, Beijing Chest Hospital Affiliated to Capital Medical University, Beijing 101149, China

Abstract: A beam-matched plan was designed firstly for the two linacs. Then the parameters of the plan were compared, the differences and γ pass rate of the swapping treatment was identified, with an aim to verify the possibility and reliability of beam matching. 15 cases including g head & neck, thorax and pelvis were selected to design two 3D-CRT plans with Clinac IX and Trilogy respectively. Another 15 cases containing head & neck, thorax and pelvis were selected to design two IMRT plans with Clinac iX and Trilogy respectively. The same type of plan was compared in different machines. Evaluation parameters include PTV $D_{98\%}$, $D_{2\%}$, D_{max} and OAR (Organ At Risk) (lens D_{max} , brain stem D_{max} , left or right lung V_{5Gy} , two lungs V_{20Gy} , spinal cord D_{max} , bladder $D_{50\%}$, small intestine D_{2cc} , femoral head V_{40Gy} , et al) and MU. Absolute and relative dosimetry were derived when plan were delivered on accelerators. The maximum average number and standard deviation of PTV $D_{98\%}$, $D_{2\%}$, D_{max} and OAR (bladder $D_{50\%}$) were $-0.52\%\pm 0.30\%$, $0.53\%\pm 0.45\%$, $-0.55\%\pm 0.17\%$, $0.94\%\pm 0.84\%$ respectively. The maximum absolute dosimetric deviations of Clinac iX and Trilogy executing plans were 2.36% and -2.80%. The average γ pass rate of planar verification of MatriXX and PV were greater than 97.00% and 96.00% respectively. The minimum for iX and TR were 95.40% and 95.90% respectively. Because various parameters were accurately delivered, the dosimetric deviation of swapping plans between beam-matched machines was clinically acceptable. If necessary, it was feasible to shift patients to other plans without any modification and re-planning between two beam-matched linacs to ensure integrity of patient's treatment course.

Keywords: linacs; beam matching; swapping; plan verification; analysis of γ

前言

国内有机构对不同加速器的束流特性进行对比研究,发现束流特性之间的相关性,为以后束流匹配奠定了基础^[1-4]。国外很多放疗部门购买同一厂家相同系列的医用直线加速器,物理师利用模体对束流特性进行测量,对相同射线能量进行束流匹配,方便

【收稿日期】2020-07-17

【作者简介】王广善,初级技师,研究方向:放射治疗的质量控制与保证、计划设计、放疗信息化, E-mail: wang_guangshan@163.com

【通信作者】张旭,主任医师,研究方向:肺癌、食管癌、乳腺癌、纵膈肿瘤的放射治疗, E-mail: zhangxubjxk@163.com

患者治疗^[5-9]。近几年国内有放疗部门对束流匹配也做了相关研究^[10-11],尝试进行束流匹配,但数量较少。我科拥有两台瓦里安直线加速器(简称治疗机),一台为Clinac iX(简称iX),一台为高端机Trilogy(简称TR),两台同为较成熟的C系列型号,按照购置合同要求及束流匹配规程^[12-13],对两台治疗机的6 MV X射线进行束流匹配,以方便一台治疗机出现故障时能将6 MV计划切换至另一台治疗机执行,而不耽误患者治疗。本研究就两台治疗机6 MV治疗计划进行分析,验证其数据传递的一致性及计划执行的精准性。基础数据的测量、比较结果及多叶准直器(Multi-leaf Collimator, MLC) DLG (Dosimetric Leaf Gap)和透射因子已在临床使用之前全部完成,此处因篇幅原因暂未列出,对于实际病例及治疗技术的验证更具临床意义。国外及国内束流匹配加速器均取得了较好的临床应用结果^[8-11, 14-16]。

1 材料与方法

1.1 设备

iX治疗机安装于2012年,其配有6、15 MV X射线和4、6、9、12、15、18 MeV电子线,各能量剂量率均为100~600 MU/min,三级准直系统,包括X、Y钨门准直及60对千禧(Millennium)多叶准直器,其中中间40对叶片在等中心宽度为0.5 cm、两边各10对叶片在等中心的宽度为1.0 cm, Extract IGRT (Image-Guided Radiotherapy)碳纤维床板,可做三维适形、固定野调强、电子治疗。TR治疗机安装于2018年,配有6、10 MV X射线和6、9、12、15、18、22 MeV电子线,剂量率、准直系统、治疗床与iX配置相同。两台直线加速器使用同一套治疗计划系统(Treatment Planning System, TPS)Eclipse 13.6。

1.2 数据采集及测量工具

IBA DOSE1 剂量仪、CC13 电离室(灵敏体积0.125 cm³)、固体水(30×30) cm²、IBA MatriXX 二维电离室矩阵(简称Mt,空气电离室,灵敏体积0.08 cm³,面积24.4 cm×24.4 cm,1 020个电离室,相邻间距0.762 cm)及配套分析软件OmniPro IMRT、加速器自带的PortalVision平板(简称PV, aSi1000 非晶硅,面积40 cm×30 cm,分辨率1 024×768)及Portal Dosimetry图像分析软件、统计分析软件SPSS 17.0。

1.3 计划设计

病例选取,第一组:随机选取适合三维适形(3-Dimensional Conformal Radiotherapy, 3D-CRT)治疗的病例,其中头颈部病人3例、胸部10例、腹盆部2例,共15例,按照临床要求对每例患者先设计一个基于iX的

计划iX1^[17],然后将该计划的治疗机改为TR,生成另一个计划TR1。第二组:随机选取适合固定野调强(Intensity Modulated Radiation Therapy, IMRT)治疗的病例,其中头颈部病人2例、胸部9例、腹盆部4例,共15例,设计一个基于iX的调强计划iX2,然后将该计划的治疗机改为TR,生成另一个调强计划TR2。

1.4 计划验证

对每一个计划设计点剂量验证计划和面剂量验证计划,对每一个验证计划在各自的治疗机下执行,分别验证点剂量和面剂量。利用DOSE1剂量仪、CC13电离室和固体水采集点剂量;由MatriXX平面矩阵和PV平板分别独立进行面剂量验证。然后两台治疗机交叉执行计划,再次进行点剂量和面剂量验证。平面剂量验证采用 γ 通过率分析法,选择3 mm/2%比较标准。

1.5 统计学方法

对所得数据采用SPSS17.0软件进行分析,数据用均数±标准差表示,两组结果采用配对样本 t 检验, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 计划比较结果

Eclipse计划系统自带计划评估及计划比较功能。图1为Eclipse计划比较界面,从3个不同层面可以看出二者剂量分布几乎相同。将每个病例iX1和TR1、iX2和TR2做对比,按照本研究的方案设计读取计划中的指标值,在剂量分布方面比较两计划之间的差异,比较的计划参数包括靶区PTV的 $D_{98\%}$ 、 $D_{2\%}$ 、 D_{max} 和危及器官的相关指标,计算结果列于表1、表2、表3。两个计划相同指标的评价方法按公式 $(TR1-iX1)/iX1 \times 100\%$ 或 $(TR2-iX2)/iX2 \times 100\%$ 得出。

在PTV剂量方面, $D_{98\%}$ 、 $D_{2\%}$ 、 D_{max} 剂量差异最大平均值标准差分别为 $-0.52\% \pm 0.30\%$ 、 $0.53\% \pm 0.45\%$ 、 $-0.55\% \pm 0.17\%$,均小于1.00%,表现出非常好的一致性。危及器官的受量差异最大平均值出现在腹盆部IMRT计划的膀胱 $D_{50\%}$,其值为 $0.94\% \pm 0.84\%$,小于1.00%。两个束流匹配计划的靶区和危及器官剂量学差异能够达到临床可接受的范围,与部位和技术类型没有相关性。

2.2 计划验证结果

将模体中测量点剂量与TPS同一位置的点剂量进行比较,以TPS为基准计算百分比偏差。8种组合方式点剂量验证结果列于图2。数据显示,iX治疗机执行iX1、iX2、TR1、TR2剂量偏差百分比平均值及标准差分别为 $1.35\% \pm 0.61\%$ 、 $1.23\% \pm 0.53\%$ 、 $1.21\% \pm 0.40\%$ 、

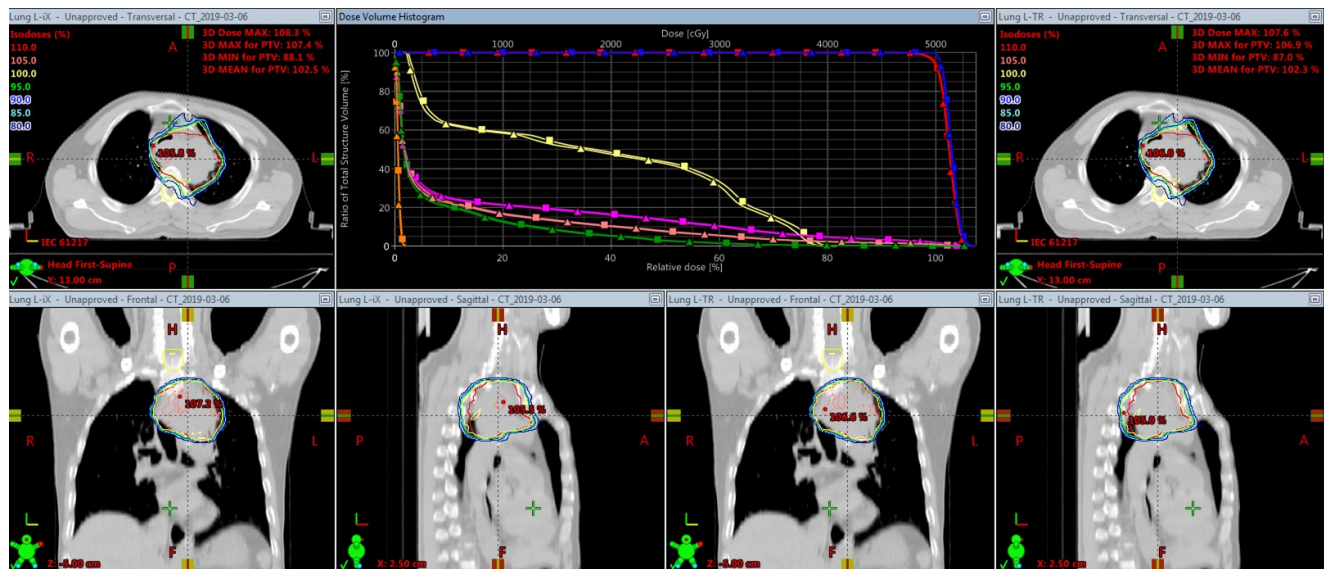


图1 同一病例不同治疗机计划DVH及层面剂量比较

Fig.1 Comparison of DVH and dose levels in different treatment machine plans of the same case

表1 头颈部iX和TR治疗机计划PTV和危及器官剂量差异比较(% , $\bar{x} \pm s$)

计划类型	PTV D _{98%}	PTV D _{2%}	PTV D _{max}	左晶体D _{max}	右晶体D _{max}	脑干D _{max}	脊髓D _{max}	MU
3D-CRT	-0.52±0.30	-0.38±0.12	-0.55±0.17	-0.42±2.14	-0.66±2.97	-0.77±0.77	-0.77±0.77	-0.31±0.28
IMRT	-0.40±0.63	-0.35±0.82	-0.08±0.25	-0.22±2.48	-0.56±2.36	-0.62±0.85	-0.62±0.85	-0.28±0.37

表2 胸部iX和TR治疗机计划PTV和危及器官剂量差异比较(% , $\bar{x} \pm s$)

计划类型	PTV D _{98%}	PTV D _{2%}	PTV D _{max}	左肺V _{5 Gy}	右肺V _{5 Gy}	双肺V _{20 Gy}	双肺V _{5 Gy}	脊髓D _{max}	心脏V _{30 Gy}	MU
3D-CRT	-0.36±0.23	-0.08±0.34	-0.11±0.38	0.54±0.41	0.20±0.38	-0.55±0.76	0.92±0.74	0.93±0.24	0.41±0.39	-0.37±0.43
IMRT	0.02±0.50	0.05±0.61	-0.05±0.77	0.84±0.65	0.79±0.55	0.54±0.62	0.93±0.44	0.71±0.04	0.29±0.69	-0.20±0.40

表3 腹盆部iX和TR治疗机计划PTV和危及器官剂量差异比较(% , $\bar{x} \pm s$)

计划类型	PTV D _{98%}	PTV D _{2%}	PTV D _{max}	膀胱D _{50%}	小肠D _{2 cc}	直肠D _{50%}	脊髓D _{max}	左股骨头V _{40 Gy}	右股骨头V _{40 Gy}	MU
3D-CRT	-0.21±0.63	-0.34±0.35	-0.38±0.46	0.11±0.30	-0.16±0.21	0.01±0.05	-0.01±0.03	-0.86±0.26	0.08±0.24	0.93±0.16
IMRT	0.41±0.40	0.53±0.45	0.40±0.75	0.94±0.84	0.34±0.38	0.45±0.83	0.00±0.00	0.15±0.31	0.08±0.18	0.12±0.45

1.66%±0.44%，最大偏差 2.36%。TR 治疗机执行 TR1、TR2、iX1、iX2 计划通过率平均值及标准差分别为 -1.06%±0.75%、-1.26%±0.60%、-1.36%±0.67%、-0.87%±0.67%，最大偏差-2.80%。对以上 8 种治疗机与计划的组合分别编号 A1、A5、A4、A8、A3、A7、A2、A6，见图 2。A1 和 A2、A3 和 A4、A5 和 A6、A7 和 A8 分别进行两样本配对 t 检验，P 值分别 0.006、0.010、0.026、0.039，差异有统计学意义。

相对剂量采用 MatriXX 平面矩阵和 PV 平板两种验证工具独立验证，它们在使用之前均经过校正和刻度，保证其准确性。γ 分析采用 3 mm/2% 标准，MatriXX 矩阵对 iX 和 TR 治疗机验证的结果列于图 3，iX 治疗机执行 iX1、iX2、TR1、TR2 计划通过率平均值及标准差分别为 97.93%±0.96%、97.29%±1.07%、99.02%±0.99%、98.40%±0.76%，最小值为 95.40%。TR 治疗机执行 TR1、TR2、iX1、iX2 计划通过率平均

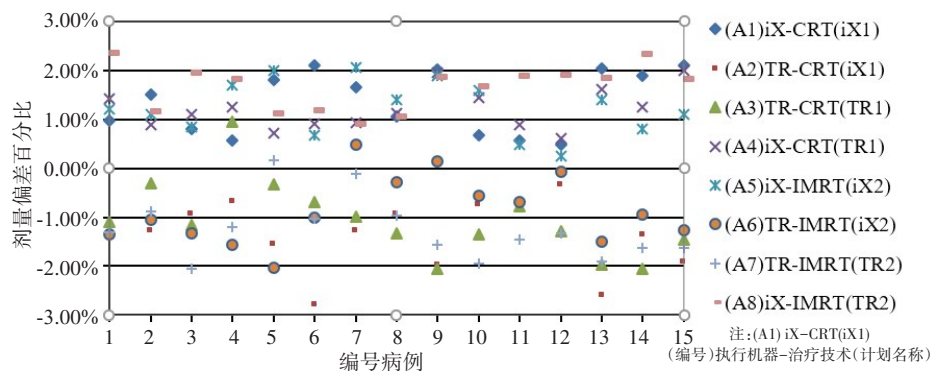


图2 iX与TR治疗机执行本机及交叉执行计划绝对剂量验证结果

Fig.2 Absolute dose verification results of local and cross execution plans of Linac iX and TR

值及标准差为 $97.81\% \pm 0.86\%$ 、 $97.47\% \pm 0.80\%$ 、 $98.33\% \pm 0.92\%$ 、 $98.25\% \pm 0.81\%$ ，最小值为 95.90% 。对以上8种治疗机与计划的组合分别编号B1、B5、B4、B8、B3、B7、B2、B6，见图3。B1和B2、B3和B4、B5和B6、B7和B8分别做两样本配对 t 检验， P 值分别为 0.012 、 0.009 、 0.006 、 0.009 ，差异有统计学意义。

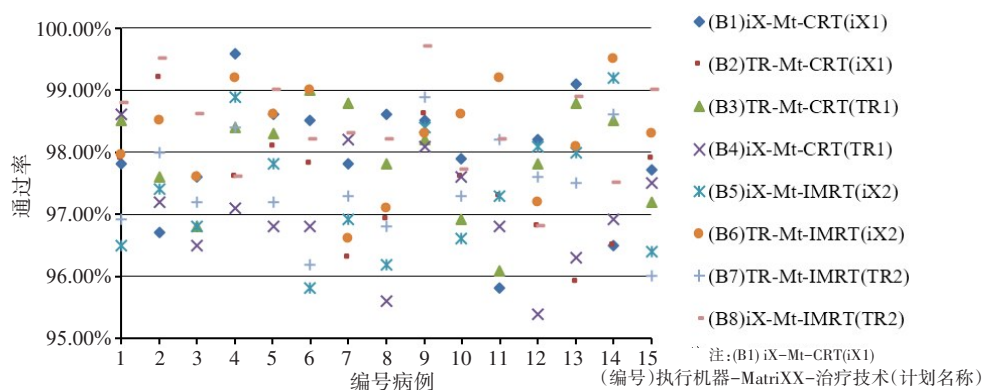


图3 MatriXX对iX与TR治疗机执行本机计划及交叉执行计划相对剂量验证结果

Fig.3 MatriXX's local plan and cross plan relative dose verification results for Linac iX and TR

PV对iX和TR治疗机的IMRT计划再次做独立验证，结果列于图4，iX治疗机执行iX2、TR2计划通过率平均值及标准差分别为 $96.92\% \pm 0.60\%$ 、 $96.97\% \pm 0.49\%$ ，最小值为 96.20% 。TR治疗机执行iX2、TR2计划通过率平均值及标准差为 $97.40\% \pm 0.63\%$ 、 $97.28\% \pm 0.80\%$ ，最小值为 95.90% 。对以上4种治疗

机与计划的组合分别编号C1、C4、C2、C3见图4。C1和C2、C3和C4分别做两样本配对 t 检验， P 值分别为 0.009 、 0.008 。

3 讨论和结论

本科室在安装 Trilogy 的同时并与 Clinac iX 进行

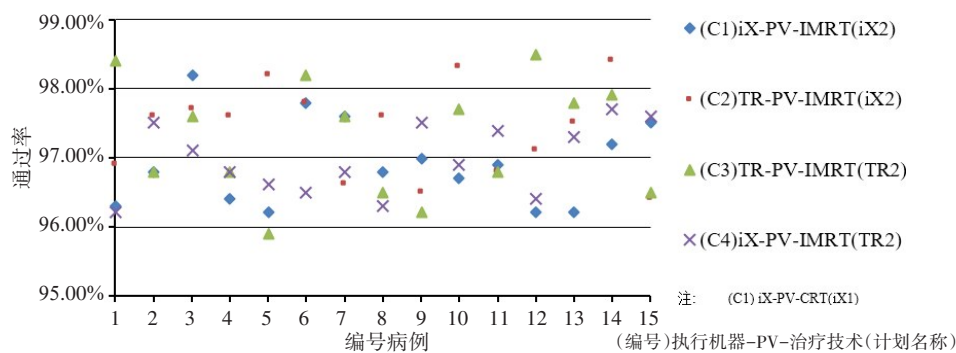


图4 PV对iX与TR治疗机执行本机计划及交叉执行计划相对剂量验证结果

Fig.4 PV's local plan and cross plan relative dose verification results for Linac iX and TR

束流匹配调试。束流匹配的最大优点在于,其中一台治疗机突然故障停机时,患者可以随时切换到另一台治疗机继续治疗,而不需重新设计计划,保证患者治疗疗程完整。另外,同一系列的加速器在束流匹配后,若其中一台治疗机故障,另一台可以作为参考,查看参数设置,互换零件,极大地提高了维修效率,为临床治疗争取时间。

有研究表明,剂量传递过程中5%的差异就会导致肿瘤控制率10%~20%的变化和正常组织20%~30%出现放射副作用的可能性^[18]。有研究者提出必须满足剂量处方点的误差 $\leq 3.5\%$,整个计划靶区其他点的剂量误差 $\leq 5\%$,才能满足患者靶区剂量的准确^[19]。从计划质量的比较来看,剂量分布剂量曲线重叠。因为在TR调试过程中,束流参数要一一匹配精准,比如射线质 D_{20}/D_{10} 相差0.20%、射线对称性小于1.00%等。另一方面,同一套计划系统Eclipse13.6也保证了算法与建模的一致性,保证基础数据准确无误,治疗计划便符合预期结果。Seonghee等^[14]同样对束流匹配的60例不同部位的治疗计划进行比较,得到的结果是PTV和危及器官剂量差异都在1.00%以内。Krishnappan等^[15]对6个未做束流匹配但同一生产厂商的加速器进行计划比较发现,选取的病例使用3D-CRT、IMRT和容积旋转弧形治疗的计划最大剂量偏差为2.60%,平均偏差小于1.90%,并且剂量偏差与使用技术类型没有相关性。

图2数据表明,两台治疗机在执行所有计划方面均能准确地传递MU和调制参数,iX和TR的点剂量偏差均值都小于3.00%,差异有统计学意义($P<0.05$),两台治疗机对计划的执行略有不同,但差异在可接受范围内。iX实际测量剂量比TPS计算偏高,TR实际测量剂量比TPS计算偏低。原因可能来自两方面,一是治疗机本身方形射野输出剂量准确,执行计划时剂量率、MLC等调制参数共同配合下剂量传递引入误差;二是受温度、湿度、气压等因素影响的验证工具的精度及摆位误差。Amin等^[20]在研究用于测量束流匹配加速器输出剂量的电离室系统稳定性和一致性中发现,不确定的来源主要来自于测量摆位、刻度测量和实际测量之间的温度差异,这些因素综合产生了0.6%的测量不确定度。Ashokkumar等^[9]对3台束流匹配的加速器进行了剂量学研究,验证结果在 $\pm 3\%$ 的容差值以内。

在相对剂量验证方面,本研究采用比较严格的3 mm/2%的 γ 分析标准,图3和图4的数据表明,MatriXX和PV验证通过率结果平均值分别在97%和96%以上,iX最小值95.40%,TR最小值95.90%,这和

国外一些研究得到了一致的结果^[8-9,14],结果经过 t 检验,差异有统计学意义($P<0.05$),说明交换执行计划确实存在统计学意义上的差异,造成这种差异的原因有很多,比如两台治疗机的MLC运动精度、剂量率控制等。Oliver等^[21]报道,由于1 mm的随机MLC到位误差,剂量传递的最大变化约为1.21%。最终测量结果是很多因素综合产生的,但差异甚微,可以接受。两种独立的验证方式均有力地证明了束流匹配的可靠性与可行性。分析中发现PV通过率偏低,并且比MatriXX通过率低,这与MLC叶片间隙漏射线比叶片透射线多关系密切,对于所有射野机头角度都为0°的计划,每个射野MLC叶片间隙漏射线叠加,PV平板分辨率很高,能响灵敏,因此通过率低的区域出现在MLC叶片间隙处。如果每个计划中的每个射野机头角度不同,则可减弱MLC叶片间隙漏射线对通过率的影响。Seonghee等^[14]利用EPID对束流匹配的60例不同部位的治疗计划进行验证,2%/2 mm和2%/3 mm标准下的 γ 通过率分别高于93%和97%。全面的束流特性、计划差异和预治疗验证结果均在可接受的临床范围内,和TPS计算展示了很好的一致性。

两台经过束流匹配的治疗机之间交换执行头颈、胸部和腹盆计划的剂量学分析在临床可接受的范围内。这些结果为在繁忙的临床环境中通过与束流匹配的治疗机交换治疗患者提供了重要的质控保证,而无需重新设计计划。虽然两台匹配束流的加速器交叉执行计划可行可靠,但每台治疗机有独立的束流数据,日常治疗时计划必须在对应的治疗机上执行,以免不可预料的错误发生。只有在治疗机故障等万不得已的时刻,才采取交叉治疗的方案,治疗前必须做锥形束计算机断层扫描,并与计划CT进行比较,以匹配最佳治疗区域。另外,交叉实施之前,必须确保计划匹配的验证^[16]。

【参考文献】

- [1] 刘建军,许志勇,陈东辉,等.新旧两台医用电子加速器的性能比较[J].中国辐射卫生,2004,13(3):210-211.
LIU J J, XU Z Y, CHEN D H, et al. Comparison between a new China-made and a secondhand imported medical electron accelerator[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2004, 13(3): 210-211.
- [2] 葛瑞刚,徐寿平,解传滨,等. Elekta和Varian医用直线加速器束流特性的比较研究[J].中国医学装备,2016,13(7):12-16.
GE R G, XU S P, XIE C B, et al. Comparison of the beam characteristics between Elekta and Varian medical linear accelerator[J]. China Medical Equipment, 2016, 13(7): 12-16.
- [3] 方春峰,徐伟,宋圆源,等.两台医科达直线加速器匹配后束流特性比较[J].中国医学物理学杂志,2020,37(1):1-6.
FANG C F, XU W, SONG Y Y, et al. Comparison of beam

- characteristics after beam matching in two Elekta linacs [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2020, 37(1): 1-6.
- [4] 王大奖, 鲍志荣, 蒋大振, 等. 两种直线加速器射野剂量学特性测试分析[J]. 中国医疗设备, 2019, 34(5): 61-64.
- WANG D J, BAO Z R, JIANG D Z, et al. Analysis of beam dosimetric characteristics of two linear accelerators [J]. China Medical Devices, 2019, 34(5): 61-64.
- [5] BHANGLE J R, SATHIYA NARAYANAN V K, KUMAR N K, et al. Dosimetric analysis of beam-matching procedure of two similar linear accelerators[J]. J Med Phys, 2011, 36(3): 176-180.
- [6] BEYER G P. Commissioning measurements for photon beam data on three TrueBeam linear accelerators, and comparison with Trilogy and Clinac 2100 linear accelerators [J]. J Appl Clin Med Phys, 2013, 14(1): 273-288.
- [7] GAGNEUR J D, EZZELL G A. An improvement in IMRT QA results and beam matching in linacs using statistical process control [J]. J Appl Clin Med Phys, 2014, 15(5): 190-195.
- [8] KRISHNAPPAN C, RADHA C A, SUBRAMANI V, et al. Is the dose distribution distorted in IMRT and RapidArc treatment when patient plans are swapped across beam-matched machines? [J]. J Appl Clin Med Phys, 2016, 17(5): 111-123.
- [9] ASHOKKUMAR S, GANESH K M, RAMALINGAM K, et al. Dosimetric validation of volumetric modulated arc therapy with three 6 MV beam-matched linear accelerators [J]. Asian Pac J Cancer Prev, 2017, 18 (12): 3439-3444.
- [10] 徐利明, 李长虎, 李承军. IMRT计划在不同加速器上互换执行的可能性[J]. 中国医疗设备, 2014, 29(12): 122-124.
- XU L M, LI C H, LI C J. Research on the feasibility of exchanging IMRT plans between two accelerators with different MLC leaf widths[J]. China Medical Devices, 2014, 29(12): 122-124.
- [11] 郭跃信, 王海洋, 马阳光, 等. TrueBeam与Trilogy加速器光子束匹配分析[J]. 中国医学装备, 2016, 13(7): 9-12.
- GUO Y X, WANG H Y, MA Y G, et al. Analysis of beam matching between TrueBeam and Trilogy linac accelerators [J]. China Medical Equipment, 2016, 13(7): 9-12.
- [12] SJÖSTRÖM D, BJELKENGREN U, OTTOSSON W, et al. A beam-matching concept for medical linear accelerators [J]. Acta Oncol, 2009, 48(2): 192-200.
- [13] Varian Medical Systems. Clinac iX accelerator specifications [EB/OL]. Palo Alto: Varian Medical Systems, 2005.
- [14] SEONGHEE K, JIN-BEOM C, KEUN-YONG E, et al. Possibility of interchanging patients for beam-matched linear accelerators from the same vendor [J]. J Korean Phys Soc, 2019, 75(8): 628-635.
- [15] KRISHNAPPAN C, RADHA C A, BALAJI K, et al. Evaluation of beam matching accuracy among six linacs from the same vendor [J]. Radiol Phys Technol, 2018, 11(4): 423-433.
- [16] XU Z Z, GREGORY W, LEE S, et al. Assessment of beam-matched linacs quality/accuracy for interchanging SBRT or SRT patient using VMAT without re-planning [J]. J Appl Clin Med Phys, 2019, 20(1): 68-75.
- [17] International Commission on Radiation Units and Measurements. Prescribing, recording and reporting photon-beam intensity modulated radiation therapy (IMRT) ICRU Report 83 [J]. J ICRU, 2010, 10(1).
- [18] CHETTY I J, CURRAN B, CYGLER J E, et al. Report of the AAPM Task Group No.105: issues associated with clinical implementation of Monte Carlo-based photon and electron external beam treatment planning [J]. Med Phys, 2007, 34(12): 4818-4853.
- [19] WAMBERSIE A. What accuracy is required and can be achieved irradiation therapy (review of radiobiological and clinical data) [J]. Radiochimica Acta, 2001, 89(4): 255-264.
- [20] AMIN M, NORRLINGER B, HEATON R. Performance of a device design for the measurement of matched linac beam output [C]//World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering. Beijing, 2013: 1168-1171.
- [21] OLIVER M, GAGNE I, BUSH K, et al. Clinical significance of multi-leaf collimator positional errors for volumetric modulated arc therapy [J]. Radiother Oncol, 2010, 97(3): 554-560.

(编辑:陈丽霞)