· 放射治疗 ·

加速器运行误差对宫颈癌容积旋转调强放疗的剂量学影响

李光俊 李衍龙 袁青青 王大奖 王强 肖江洪 柏森
610041 成都,四川大学华西医院肿瘤中心放疗科(李光俊、王强、肖江洪、柏森);410011 长沙,中南大学湘雅二医院肿瘤科(李衍龙);430072 武汉大学物理科学与技术学院(袁青青);430071 武汉大学中南医院放疗科(王大奖)
通信作者:柏森,Email:baisen@scu.edu.cn
DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2018.11.005

【摘要】 **目的** 研究加速器机架旋转角度、准直器到位和多叶光栅(MLC)叶片到位等误差对宫颈癌容积旋转调强放疗(VMAT)的剂量学影响。**方法** 选取 10 例已行 VMAT 的宫颈癌计划,提取 Pinnacle^3 V9.2 计划系统(美国 Philips 公司)中每个临床计划的 plan.Trail 文件,使用 Matlab 编写的程序读取并修改每个控制点运行参数,从而模拟加速器运行误差。通过各引入误差的计划与原计划的剂量比较,评估加速器各参数运行误差对 VMAT 的剂量学影响及主要的影响因素。**结果** 在引入机架旋转角度误差、准直器到位误差和两侧 MLC 叶片同向偏移误差中,PTV 各剂量限值的最大变化分别为 0.16%、0.46% 和 0.57%,危及器官(OAR)各剂量限值的最大变化分别为 0.38%、-1.32% 和 -0.44%。引入两侧 MLC 叶片反向或相向运动误差,其幅度为 ±0.5、±1 和 ±2 mm 时,导致 PTV 各剂量限值变化的最大值分别为 2.11%、3.04% 和 6.03%,各 OAR 平均剂量变化的最大值分别为 2.17%、3.92% 和 7.97%,且 PTV 和 OAR 各剂量限值与 MLC 反向或相向运动误差呈强线性相关($t=21.201\sim90.562$,$P<0.05$)。引入各参数实际执行误差值时,PTV 和 OAR 各剂量限值的最大变化分别为 0.16% 和 1.30%,适形指数(CI)和均匀性指数(HI)基本不变。**结论** 执行宫颈癌 VMAT 计划时,两侧 MLC 叶片反向或同向运动误差相比机架旋转角度误差、准直器到位误差和 MLC 叶片同向偏移误差对 VMAT 剂量学影响更加显著,因此,应加强对加速器质控尤其 MLC 叶片到位误差的质量控制以提高放疗的精度。

【关键词】 剂量学; 容积旋转调强; 直线加速器; 到位精度
基金项目:国家自然科学基金(81472807);四川省卫计委科研项目(16PJ321)

The dosimetric impacts of accelerator operation error on the volumetric modulated arc therapy for cervical cancer *Li Guangjun, Li Yanlong, Yuan Qingqing, Wang Dajiang, Wang Qiang, Xiao Jianghong, Bai Sen*

Radiotherapy Department of Cancer Center of West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China (Li GJ, Wang Q, Xiao JH, Bai S); Department of Oncology, The Second Xiangya Hospital of Central South University, Changsha 410011, China (Li YL); School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China (Yuan QQ); Department of Radiation Oncology, Zhongnan Hospital of Wuhan University, Wuhan 430071, China (Wang DJ)
Corresponding author: Bai Sen, Email: baisen@scu.edu.cn

【**Abstract**】 **Objective** To investigate the dosimetric effect of accelerator gantry rotation angle errors, collimator and multileaf collimator (MLC) leaf position errors on volumetric-modulated arc therapy (VMAT) for cervical cancer. **Methods** A total of 10 patients with cervical cancer were selected. The plan.Trail file of each clinical plan was extracted from the Pinnacle^3 V9.2 planning system of USA Philips, then the operating parameters of tach control point were read and modified by Matlab programs, and thus the operating error of the accelerator was simulated. **Results** In this paper, it was discovered that systematic accelerator gantry rotation angle errors, systematic collimator position errors and systematic MLC shift errors which led to the maximum changes of the PTV dose limit were 0.16%, 0.46% and 0.57%, respectively, and the maximum changes of the dose limit of organs at risk (OAR) were 0.38%, -1.32%

and −0.44%, respectively. When the systematic MLC gap width errors were ±0.5, ±1 and ±2 mm, respectively, the maximum changes of PTV dose were 2.11%, 3.04% and 6.03%, respectively, while the maximum changes of the OAR average dose were 2.17%, 3.92% and 7.97%, respectively. Furthermore, the dose limits of PTV and OAR showed a strong linear correlation with MLC open or close errors (t = 21.201 ~ 90.562, P < 0.05). If actual errors of each parameter of accelerator were introduced, the maximum changes of PTV and OAR dose limits were 0.16% and 1.30%, respectively, and conformity index (CI) and homogeneity index (HI) were barely changed. **Conclusions** No significant effect was found for systematic accelerator gantry rotation angle errors, systematic collimator position errors and systematic MLC shift errors for cervical cancer VMAT patients. However, there is a high sensitivity to dose distribution for MLC open or close errors. Therefore, it is necessary to pay more attention on the quality control of the accelerator running in particular MLC position errors to ensure the therapeutic accuracy.

【**Key words**】 Dosimetry; Volumetric modulated arc therapy; Linear accelerator; Position accuracy

Fund programs: National Natural Science Foundation of China (81472807); The Science and Technology Project of the Health Planning Committee of Sichuan (16PJ321)

与传统调强放疗(IMRT)技术相比,容积旋转调强放疗(VMAT)技术能显著降低治疗时间,提高治疗效率,且具有不低于 IMRT 的计划质量,现已广泛应用于临床肿瘤放疗中[1-3]。在 VMAT 执行过程中不仅多叶光栅(MLC)的位置在连续变化,同时还伴有机架角度和输出剂量率的改变[2],因此该技术复杂度较高,在实施时加速器机架旋转角度、MLC 叶片位置、输出剂量等参数运行误差均可能影响患者的实际受照剂量。本研究通过 10 例宫颈癌患者的 VMAT 计划,研究加速器各参数的运行误差对宫颈癌 VMAT 的剂量学影响,并分析主要的影响因素。

资料与方法

1. 材料:本研究采用荷兰 Philips 公司的 Pinnacle^3 V9.2 治疗计划系统,VMAT 计划由 SmartArc 优化模块生成;瑞典 Eleka Synergy 加速器,MLC 由 40 对等中心宽度为 1 cm 的叶片组成。

2. 病例选择:选取四川大学华西医院已收治的 10 例行 VMAT 的宫颈癌病例,年龄为 37 ~ 74 岁,平均年龄 47.2 岁;根据美国癌症联合会(AJCC)第 6 版宫颈癌分期标准,Ⅰ期 4 例,Ⅱ期 4 例,Ⅲ期 2 例。患者接受放疗剂量为全盆腔淋巴引流区 50 Gy,单次治疗剂量为 2 Gy,1 次/d,5 次/周,共 25 次完成整个疗程。所有病例 VMAT 计划均由 2 个 359°弧形旋转照射野组成,控制点间隔为 4°,采用的光子束能量为 6 MV。

3. 加速器运行误差模拟:提取 Pinnacle^3 V9.2 计划系统中每个临床计划的 plan.Trail 文件,使用 Matlab 编写程序读取并修改每个控制点机架角度、准直器位置或 MLC 叶片位置等信息,从而模拟加速器各参数运行误差。①机架旋转角度误差:对临床计划的每个控制点分别引入顺时针 0.5°和 1°的机架角度误差,每个病例产生 2 个含有不同机架角度误差信息的计划。②准直器到位误差:对临床计划的每个控制点分别引入两侧准直器反向或相向运动误差,其幅度为 ±1 和 ±2 mm,子野面积增大或减小;对临床计划的每个控制点分别引入准直器同向偏移误差,其幅度为 1 和 2 mm,子野面积不变,每个病例产生 6 个含有不同准直器位置误差信息的计划。③MLC 叶片到位误差:对临床计划的每个控制点分别引入两侧 MLC 叶片反向或相向运动误差,其幅度为 ±0.5、±1 和 ±2 mm,子野面积增大或减小;对临床计划的每个控制点分别引入 MLC 叶片同向偏移误差,其幅度为 1 和 2 mm,子野面积不变,每个病例产生 8 个含有不同 MLC 叶片位置误差信息的计划。④治疗中日志文件记录的各参数的实际误差值:对临床计划的每个控制点分别引入执行临床计划时记录在加速器日志文件中对应控制点的机架角度、准直器位置、MLC 叶片位置和输出剂量的实际值,每个病例产生 1 个含有各参数实际运行误差信息的计划,每个病例产生 17 个含不同参数信息的计划,共计 180 个计划。

4. 剂量学参数评估:所有计划均以 95% PTV 满足处方剂量进行归一,使用剂量体积直方图评估靶区和危及器官(OAR)的剂量分布。靶区受量的评估指标包括:$D_{98\%}$、$D_{95\%}$、$D_{2\%}$、D_{mean}、适形度指数(conformity index, CI)和均匀性指数(homogeneity index, HI),其中 $CI = (TV_{RI}/TV) \times (TV_{RI}/V_{RI})$,$HI = (D_{2\%} - D_{98\%})/D_{mean}$,$TV_{RI}$为处方剂量线包绕的 PTV 体积,$V_{RI}$为处方剂量线包绕的所有体积,$TV$ 为 PTV 体积,$D_{2\%}$、$D_{98\%}$和 D_{mean}分别为 PTV 所接受最大剂量、最小剂量和中位剂量[4]。OAR 受量的评估指

标包括：膀胱、直肠和小肠的 V_{50} 和 D_{mean}。

5. 统计学处理：采用 Origin 9.1 绘制图表。采用 SPSS 23.0 软件对数据进行线性回归分析，比较斜率即描述每单位误差所引起的剂量变化，R^2 越大表示线性关系越强，$P<0.05$ 为差异有统计学意义。

结　果

1. 临床治疗计划剂量学参数：本研究中 10 例临床计划 PTV 的 $D_{98\%}$、$D_{95\%}$、$D_{2\%}$ 和 D_{mean} 各剂量限值的平均值和标准差分别为（49.3 ± 0.4）、（50.1 ± 0.3）、（53.9 ± 0.6）和（52.2 ± 0.4）Gy，CI 和 HI 分别为 0.865 ± 0.040 和 0.087 ± 0.010；膀胱的 V_{50} 和 D_{mean} 各剂量限值平均值和标准差分别为（35.2 ± 0.4）% 和（41.9 ± 3.7）Gy；直肠的 V_{50} 和 D_{mean} 分别为（20.9 ± 10.4）% 和（38.9 ± 10.0）Gy；小肠的 V_{50} 和 D_{mean} 分别为（8.7 ± 4.3）% 和（25.0 ± 6.3）Gy。

2. 机架旋转角度系统误差：0.5° 和 1° 的机架角度误差导致所有计划的 PTV 各剂量限值和各危及器官剂量限值变化均在 1.0% 内，CI 和 HI 均基本不变（图 1）。

3. 准直器到位系统误差：两侧准直器反向或相向运动误差，其幅度为 ±1 和 ±2 mm，子野面积增大或减小时，导致 PTV 各剂量限值变化范围分别为 −0.17% ~0.33% 和 −0.43% ~0.46%，各 OAR 剂量限值变化范围分别为 −0.55% ~0.32% 和 −1.32% ~0.57%，CI 和 HI 基本不变。两侧准直器反向或相向运动误差对 PTV 和 OAR 剂量影响呈强线性相关性（$t=6.900$ ~ 49.315，$P<0.05$），剂量变化范围为（0.15 ~0.46）%/mm，R^2 值最小为 0.970（表 1）。两侧准直器同向偏移误差，其幅度为 1 和 2 mm，子野面积不变时，PTV 各剂量限值和各 OAR 剂量限值变化范围分别为 −0.21% ~0.03% 和 −0.66% ~ −0.08%，CI 和 HI 基本不变（图 2）。

4. MLC 叶片到位系统误差：两侧 MLC 叶片反向或相向运动误差，其幅度为 ±0.5、±1 和 ±2 mm，子野面积增大或减小时，导致 PTV 各剂量限值变化的最大值分别为 2.11%、3.04% 和 6.03%，各 OAR 平均剂量变化的最大值分别为 2.17%、3.92% 和 7.97%，CI 减小的最大值分别为 0.051、0.232 和 0.453，HI 增大的最大值分别为 0.004、0.006 和 0.015。两侧 MLC 叶片反向或相向运动误差对靶区和 OAR 的剂量影响呈强线性相关性（$t=21.201$ ~ 90.562，$P<0.05$），剂量变化范围为（2.49 ~12.19）%/mm，R^2 值均 >0.994（表 1）。两侧 MLC 叶片同向偏移误差，其幅度为 1 和 2 mm，子野面积不变时，导致 PTV 各剂量限值变化的最大值分别为 0.25% 和 0.57%，OAR 各剂量限值变化的最大值分别为 0.13% 和 0.44%，CI 和 HI 基本不变（图 3）。

5. 治疗中各参数误差：在引入各参数实际执行误差的情况下，PTV 和 OAR 各剂量限值最大变化分别为 0.16% 和 1.30%，CI 和 HI 基本不变。

讨　论

加速器运行误差如准直器、机架旋转角度和 MLC 叶片到位等误差有不同程度的剂量学影响[5-6]。本研究模拟机架旋转角度误差的结果显示，随着机架旋转角度误差增加，PTV 各剂量限值变化和各 OAR 剂量限值变化的总体趋势变大。0.5° 机架角度误差导致 PTV 各剂量限值的最大变化为 0.11%，对 VMAT 剂量有较小的影响，在 Bai 等[5]研究中提到 0.5° 的机架旋转角度误差对剂量的影响可以忽略。两侧准直器反向或相向运动误差导致 PTV 各剂量限值和各 OAR 剂量限值总体变化呈线性变化趋势，且对 VMAT 剂量学影响不明显。

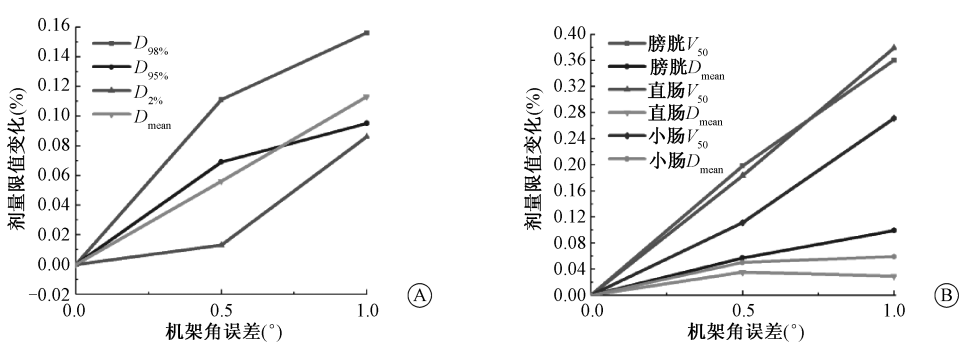


图 1　机架角系统误差引起的剂量限值变化　A. 计划靶区；B. 危及器官

Figure 1　The dosimetric effect of systematic accelerator gantry rotation angle errors　A. PTV; B. OAR

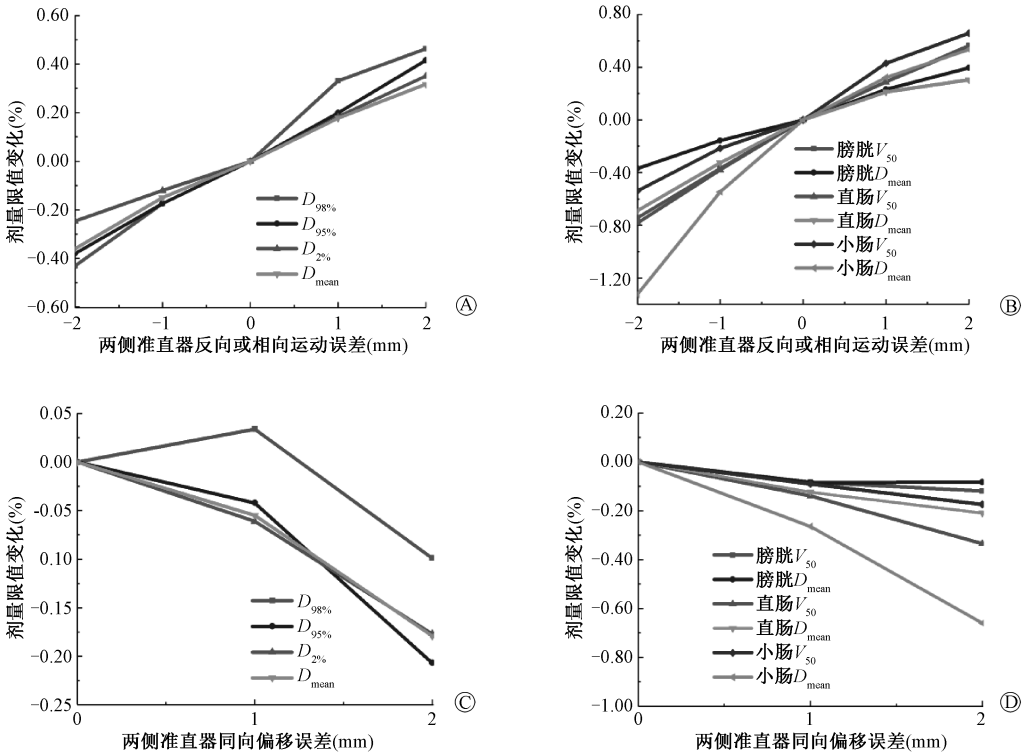


图 2　准直器到位系统误差引起的剂量限值变化　A、C. 计划靶区；B、D. 危及器官

Figure 2　The dose change for the collimator position errors　A, C. PTV; B, D. OAR

表 1　两侧准直器和 MLC 叶片反向或相向运动误差的剂量影响

Table 1　The dosimetric effect of collimator and MLC banks shifted in opposing directions

参数	准直器				MLC 叶片			
	剂量变化(%/mm)	R^2 值	t 值	P 值	剂量变化(%/mm)	R^2 值	t 值	P 值
PTV								
$D_{98\%}$ (Gy)	0.23	0.993	15.021	0.001	2.83	0.994	21.201	<0.001
$D_{95\%}$ (Gy)	0.20	0.999	49.315	<0.001	2.49	0.996	24.984	<0.001
$D_{2\%}$ (Gy)	0.15	0.996	19.270	<0.001	2.59	0.994	21.188	<0.001
D_{mean} (Gy)	0.17	0.998	25.446	<0.001	2.64	0.996	23.824	<0.001
膀胱								
V_{50} (%)	0.33	0.997	23.889	<0.001	10.22	0.997	27.853	<0.001
D_{mean} (Gy)	0.19	0.998	30.960	<0.001	2.84	0.998	40.750	<0.001
直肠								
V_{50} (%)	0.33	0.996	18.203	<0.001	8.67	0.999	42.603	<0.001
D_{mean} (Gy)	0.25	0.976	7.790	0.004	3.42	0.998	40.085	<0.001
小肠								
V_{50} (%)	0.30	0.995	18.007	<0.001	12.19	0.998	53.234	<0.001
D_{mean} (Gy)	0.46	0.970	6.900	0.006	3.90	1.000	90.562	<0.001

注：MLC. 多叶光栅

本研究表明，相比 MLC 叶片同向运动误差，两侧 MLC 叶片反向或相向运动误差对 PTV 和各 OAR 的剂量影响明显，且呈强线性关系。这与 Oliver 等[6]研究结果一致，其研究，两侧 MLC 叶片同向、相向和反向运动误差导致 PTV70(D_{mean})剂量变化分别为 −0.66、−3.39 和 2.77 Gy/mm，R^2 值分别为 0.977、0.998 和 1.00。程燕铭等[7]研究鼻咽癌对 MLC 叶片位置误差的剂量学敏感性发现，PTV 和 OAR 剂量学对两侧 MLC 同向、反向和相向运动误差的敏感性依次递增。李成强等[8]研究 10 例鼻咽癌病例得出，2 mm 范围内的 MLC 叶片随机误差及同向偏移误差的剂量学影响无统计学意义，2 mm

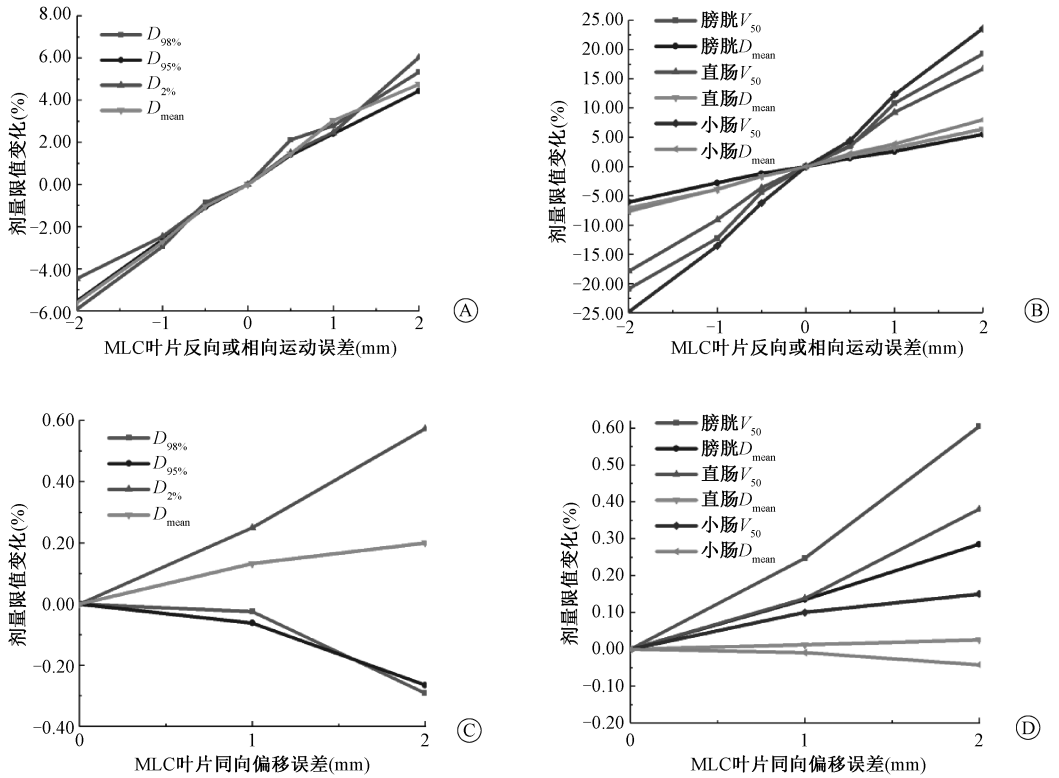


图 3 MLC 叶片到位系统误差引起的剂量限值变化 A、C. 计划靶区;B、D. 危及器官

Figure 3 The dose change for the MLC leaf position errors A, C. PTV; B, D. OAR

MLC 叶片反向运动误差导致 PGTV($D_{95\%}$)、脊髓($D_{0.1\,cc}$)、脑干($D_{0.1\,cc}$)和左右腮腺(D_{mean})受量显著增加(t = 8.97、6.16、9.22、7.12、4.25, P < 0.05)。因此,应针对 MLC 叶片到位误差进行独立地质量检测和质控。

此外,两侧 MLC 叶片反向或相向运动误差对各器官的剂量影响各不相同,PTV、膀胱、直肠和小肠的 V_{50} 和 D_{mean} 变化趋势相同,但小肠 V_{50} 变化相对直肠较大,这可能受 PTV 与各 OAR 的相对位置关系、形状体积、处方剂量限值等因素影响。

本研究引入临床计划执行过程中各参数实际误差值,导致 PTV 和各 OAR 剂量限值最大变化分别为 0.20% 和 0.13%。Bai 等[5]研究表明,引入幅度 <2 mm 的随机 MLC 叶片到位误差导致 IMRT 计划中 PTV70($D_{95\%}$)和脊髓($D_{0.1\,cc}$)的剂量变化分别为 −0.35% 和 0.37%,没有造成明显的剂量学影响。Oliver 等[6]研究表明,采用高斯分布模拟机架角度、机器 MU 和 MLC 叶片随机误差,导致 PTV、膀胱和直肠的等效均匀剂量最大变化分别为 −0.080%/°、−0.014%/% 和 0.387%/mm。Rangel 和 Dunscombe[9]研究指出,采用高斯分布模拟随机 MLC 叶片位置误差对前列腺 IMRT 计划中 CTV、膀胱和直肠的剂量影响可以忽略。显然,引入加速器实际执行过程中产生的误差对剂量学的影响趋近于随机误差。但加速器的传感器或 MLC 系统等故障[10]以及加速器校准误差和状态变化都将导致加速器日志文件无法准确地记录加速器各参数运行误差,因此应加强加速器日常 QA 工作。

1°机架角度误差、2 mm 准直器到位误差和临床计划执行时各参数误差导致 PTV 和 OAR 各剂量限值变化均 <1.4%,但 MLC 叶片反向或相向运动误差导致 PTV 和各 OAR 平均剂量变化高达 3.90%/mm。这与 Vieillevigne 等[11]研究结果一致,其研究,对于 <3°的准直器、床和机架旋转误差造成的平均或最大剂量偏差均 <2%,然而,1 mm 的 MLC 叶片反向运动误差导致前列腺和头颈病例的直肠、膀胱和腮腺的平均剂量分别改变了 6.5%、5.5% 和 8.3%,脊髓的最大剂量变化了 5.6%。而影响 MLC 叶片到位精度的主要因素是机械设定和 MLC 系统的控制,如叶片到位的重复性、叶片校准误差、光野射野的一致性和机器控制的准确性等[12-13],不同机架角度将影响 MLC 叶片到位重复性的精度,在机架零度时叶片到位重复性明显好于其他角度,在机架旋转过程中由于重力影响和 MLC 的

校准误差影响 MLC 到位精度[12]。在美国医学物理学家协会(AAPM)于 2009 年公布的 142 号报告中指出,对于 IMRT 技术,MLC 叶片位置误差应该控制在 1 mm 以内[14]。但随着 VMAT 技术的不断发展,对 MLC 叶片容差有更高的要求。Chang 等[15]研究指出,VMAT 技术的叶片位置误差应该控制在 0.5 mm 内。Mohammadi 和 Bezak[16]研究要求 MLC 叶片位置误差应该控制在 ±0.3 mm 内。因此应针对 MLC 叶片到位精度进行独立地质量检测和质控,以确保 MLC 叶片位置误差在 0.5 mm 内。

综上所述,在执行宫颈癌 VMAT 计划时,机架旋转角度系统误差、准直器到位系统误差、MLC 叶片同向偏移误差和引入各参数实际运行误差对宫颈癌 VMAT 剂量学的影响不明显,而两侧 MLC 叶片反向或相向运动误差对宫颈癌 VMAT 剂量学有显著的影响。因此,为确保 VMAT 计划实施过程中剂量递送的准确性,应加强加速器日常 QA 工作和定期地对机架旋转角度、准直器到位和 MLC 叶片到位等误差的质量控制,并且针对 MLC 叶片到位精度进行独立地质量检测。

利益冲突　本人与本人家属、其他研究者无可能影响研究结果的财务关系,在此对研究的独立性和科学性予以保证

作者贡献声明　李光俊负责实验构思、收集文献、数据分析和论文撰写;李衍龙、袁青青和王大奖收集文献、数据采集和数据分析;王强和肖江洪负责实验构思、拟定写作思路及数据分析指导;柏森负责指导论文的撰写和修改

参 考 文 献

[1] Sharfo AW, Voet PW, Breedveld S, et al. Comparison of VMAT and IMRT strategies for cervical cancer patients using automated planning[J]. Radiother Oncol, 2015, 114(3): 395-401. DOI: 10.1016/j.radonc.2015.02.006.

[2] Otto K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc[J]. Med Phys, 2008, 35(1): 310-317. DOI: 10.1118/1.2818738.

[3] Verbakel WF, Cuijpers JP, Hoffmans D, et al. Volumetric intensity-modulated arc therapy vs. conventional IMRT in head-and-neck cancer: a comparative planning and dosimetric study[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2009, 74(1): 252-259. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2008.12.033.

[4] Feuvret L, Noël G, Mazeron JJ, et al. Conformity index: a review[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2006, 64(2): 333-342. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2005.09.028.

[5] Bai S, Li G, Wang M, et al. Effect of MLC leaf position, collimator rotation angle, and gantry rotation angle errors on intensity-modulated radiotherapy plans for nasopharyngeal carcinoma[J]. Med Dosim, 2013, 38(2): 143-147. DOI: 10.1016/j.meddos.2012.10.002.

[6] 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. DOI: 10.1016/j.radonc.2010.06.013.

[7] 程燕铭, 胡彩容, 阴晓娟, 等. 鼻咽癌 IMRT 和 VMAT 计划对机器跳数和 MLC 误差剂量学敏感度对比研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2017, 26(10): 1199-1203. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2017.10.019.
Cheng YM, Hu CR, Yin XJ, et al. Dosimetric sensitivity with MU and MLC errors in IMRT versus VMAT plan for nasopharyngeal carcinoma[J]. Chin J Radiat Oncol, 2017, 26(10): 1199-1203. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2017.10.019.

[8] 李成强, 陶城, 朱健, 等. 多叶准直器叶片位置误差对鼻咽癌调强放疗剂量的影响[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2015, 35(7): 544-547. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2015.07.016.
Li CQ, Tao C, Zhu J, et al. Impact of multileaf collimator position errors on simultaneous integrated boost intensity-modulated radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma[J]. Chin J Radiol Med Prot, 2015, 35(7): 544-547. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2015.07.016.

[9] Rangel A, Dunscombe P. Tolerances on MLC leaf position accuracy for IMRT delivery with a dynamic MLC[J]. Med Phys, 2009, 36(7): 3304-3309. DOI: 10.1118/1.3134244.

[10] Childress N, Chen Q, Rong Y. Parallel/opposed: IMRT QA using treatment log files is superior to conventional measurement-based method[J]. J Appl Clin Med Phys, 2015, 16(1): 5385. DOI: 10.1120/jacmp.v16i1.5385.

[11] Vieillevigne L, Molinier J, Brun T, et al. Gamma index comparison of three VMAT QA systems and evaluation of their sensitivity to delivery errors[J]. Phys Med, 2015, 31(7): 720-725. DOI: 10.1016/j.ejmp.2015.05.016.

[12] Clarke MF, Budgell GJ. Use of an amorphous silicon EPID for measuring MLC calibration at varying gantry angle[J]. Phys Med Biol, 2008, 53(2): 473-485. DOI: 10.1088/0031-9155/53/2/013.

[13] Mu G, Ludlum E, Xia P. Impact of MLC leaf position errors on simple and complex IMRT plans for head and neck cancer[J]. Phys Med Biol, 2008, 53(1): 77-88. DOI: 10.1088/0031-9155/53/1/005.

[14] Hanley J. TG142 AAPM quality assurance of medical accelerators[C]. Virginia Beach: Proceedings of 26th Annual Meeting of American College of Medical Physics, 2009.

[15] Chang CC, Lin JC, Cheng HW, et al. Dose impact of systemic MLC position error for esophagus cancer plan: volumetric modulated arc therapy versus step and shoot modulated therapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2015, 93(3): E563. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2015.07.1989.

[16] Mohammadi M, Bezak E. Evaluation of MLC leaf positioning using a scanning liquid ionization chamber EPID[J]. Phys Med Biol, 2007, 52(1): N21-33. DOI: 10.1088/0031-9155/52/1/N03.

(收稿日期: 2018-05-21)