第 42 卷 第 2 期　　辐射研究与辐射工艺学报　J. Radiat. Res. Radiat. Process.　　Vol.42, No.2
2024 年 4 月　　www.fs.sinap.ac.cn　　April 2024

蒙特卡罗模拟机架和多叶准直器误差对旋转放疗剂量的影响

张若辉[1]　郜玉兰[2]　白文文[1]　孟慧鹏[3]　王克强[4]　迟子锋[1]

[1]（河北医科大学第四医院放射治疗科　石家庄 050011）

[2]（河北省人民医院内镜诊疗科　石家庄 050051）

[3]（天津市第一中心医院放疗中心　天津 300384）

[4]（天津大学精仪学院生物医学工程　天津 300072）

摘要　研究在常规直线加速器实施快速旋转调强放疗（IMAT）治疗过程中，内置多叶准直器（MLCs）和机架旋转误差对放疗剂量的影响。随机选择7例脑胶质瘤患者，并在常规直线加速器Varian 23EX上设计IMAT计划，对MLCs和机架分别引入不同大小误差。通过不一致指数和剂量体积直方图（DVH）评估引入误差对IMAT放疗临床剂量的影响。对于单侧MLCs随机误差，当MLCs随机误差达2 mm时计划靶体积平均剂量（PTV-D_{mean}）增加了约2.7%。当MLCs一侧外扩MLC-1 mm、MLC-2 mm、MLC-rnd时导致其PTV-D_{mean}平均偏差分别为1.12%、2.15%和1.15%，晶体的平均剂量偏差分别为5.25%、9.97%和5.49%。对于MLC两组叶片分别偏移±2 mm时导致PTV平均剂量的最大偏差为0.8%，晶体和脑干的最大剂量和平均剂量分别增加了11.4%、15.8%和1.99%、1.07%。引入机架角度误差，计划靶体积最小剂量（PTV-D_{min}）和PTV-D_{mean}最大剂量分别降低了2.75%和0.35%。导致危及器官（OAR）的DVH的剂量学偏差变化较大，尤其对于晶体当机架偏差为（−2°）时晶体的最大剂量和平均剂量分别偏高达16.9%和38.5%。机架和MLCs误差对OAR的受量均产生较大剂量偏差。随机误差导致的MLCs剂量偏差受叶片位移误差的大小以及在特定弧段处的射束子野权重影响，MLCs误差（−2 mm或+2 mm）时产生的剂量偏差最大。机架旋转误差对靶区PTV剂量分布的影响不大，但是对于OAR会产生较大的剂量偏差。

关键词　旋转调强放射治疗，多叶准直器（MLC）误差，机架误差，剂量偏差

中图分类号　R815.6，R734.2

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0068

引用该文：

张若辉, 郜玉兰, 白文文, 等. 蒙特卡罗模拟机架和多叶准直器误差对旋转放疗剂量的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, **42**(2): 020302. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0068.

ZHANG Ruohui, GAO Yulan, BAI Wenwen, *et al*. Monte Carlo simulation of errors in gantry angle and multi-leaf collimators on intensity modulated arc therapy radiation dose[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, **42**(2): 020302. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0068.

基金资助："河北省精准医学联合基金培育项目"（H2021206174）资助

第一作者：张若辉，男，1983年12月出生，2010年于燕山大学生物医学工程专业获得硕士学位，主要从事放射物理学及辐射防护方向相关研究工作，放疗物理师

通信作者：迟子锋，正高级工程师，E-mail: chizf216@126.com；白文文，副主任医师，E-mail: baiwenwen2006@126.com

收稿日期：初稿 2023-11-15；修回 2024-01-16

Supported by "Hebei Precision Medicine Joint Fund Cultivation Project " (H2021206174)

First author: ZHANG Ruohui (male) was born in December 1983, and obtained his master's degree in biomedical engineering from Yanshan University in 2010. He is primarily engaged in research on radiation physics and radiation protectiona as a radiation therapist

Corresponding author: CHI Zifeng, senior engineer, E-mail: chizf216@126.com; BAI Wenwen, associate chief physician, E-mail: baiwenwen2006@126.com

Received 15 November 2023; accepted 16 January 2024

Monte Carlo simulation of errors in gantry angle and multi-leaf collimators on intensity modulated arc therapy radiation dose

ZHANG Ruohui[1] GAO Yulan[2] BAI Wenwen[1] MENG Huipeng[3] WANG Keqiang[4] CHI Zifeng[1]

[1](*Department of Radiation Oncology, The Fourth Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050011, China*)

[2](*Department of Endoscopy, Hebei General Hospital, Shijiazhuang 050051, China*)

[3](*Radiotherapy Center, Tianjin First Central Hospital, Tianjin 300384, China*)

[4](*Biomedical Engineering Department, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

ABSTRACT This study aimed to investigate the impact of conventional linear accelerator errors in the gantry angle and multi-leaf collimators (MLCs) on the intensity-modulated arc therapy (IMAT) radiation dose for brain tumors. Seven typical planning datasets of patients with brain tumors were randomly selected and retreated using the IMAT conventional linear accelerator Varian 23EX. Random and system errors were introduced to modify these plans while maintaining the remaining treatment information. The dose-volume parameters of the target and critical organs were compared and analyzed. The results showed that for random single-sided MLCs errors, if a group of errors was moved outward by 2 mm, the planning target volume (PTV)-D_{mean} increased by approximately 2.7%. If one side of the MLCs expanded outward with MLC-1, MLC-2, and MLC-rnd, the mean deviations of PTV-D_{mean} were 1.12%, 2.15%, and 1.15%, respectively, and the D_{mean} deviations of the lenses were 5.25%, 9.97%, and 5.49%, respectively. The maximum deviation of PTV-D_{mean} because of the deviation of two sets of leaves caused by system errors (±2 mm) was 0.8%, and maximum dose and D_{mean} of the lens and brainstem increased by 11.4%, 15.8% and 1.99%, 1.07%, respectively. By introducing a gantry angle error, the maximum doses of PTV-D_{min} and-D_{mean} reduced by 2.75% and 0.35%, respectively. An incorrect gantry position results in significant changes in the dosimetric deviation of the OAR dose-volume histogram, especially for the lens. Note that the maximum and mean dose deviations of a patient's lens if the gantry deviation (–2°) were 16.9% and 38.5% higher than those of the reference plan, respectively. The dose deviation caused by random errors of the MLCs leaves was influenced by the actual size of the random displacement errors of the leaves and weight of the beam subfield at a specific arc segment. The maximum dose deviation occurs if MLCs move to the maximum simulation error (±2 mm). The gantry rotation error had no significant impact on the target area PTV dose distribution; however, it had a significant dose deviation for the OAR.

KEYWORDS Intensity modulated arc therapy (IMAT), Multi-leaf collimators (MLCs) errors, Gantry errors, Dose deviations

CLC R815.6, R734.2

在放射治疗时，对患者投照过程中可能会引入系统和随机两类误差。随机误差会造成危及器官于治疗射野内或靶区部分于射野外；而系统误差会使靶区治疗边缘剂量不足或过高，影响靶区剂量准确性导致复发率提高[1]。与传统调强放射治疗（Intensity modulated radiotherapy，IMRT）技术相比，旋转放射治疗（Intensity modulated arc therapy，IMAT）在治疗计划设计和投照实施方面更加复杂。由于旋转误差导致的位置偏差，如机架和多叶光栅准直器（Multi-leaf collimators，MLCs）走位误差会随着源皮距的增大而逐渐放大，投照剂量偏差也会随之增大，所以对于单中心照射多靶点或者偏中心的计划，旋转误差会对靶区剂量造成更大影响。因而MLCs和机架位置的任何误差将直接影响靶区和周围危及器官（Organs at risk，OAR）的剂量，且剂量影响可发生于肿瘤区的任何地方。因此，机架和MLCs位置精度，对常规直线加速器实施IMAT精确放疗具有重要作用[2]，是直线加速器设备质控的主要研究内容[3]。机架和MLCs位置误差对IMRT技术和立体定向体部放疗（Stereotactic body radiation therapy，SBRT）技术以及容积旋转调强放射治疗（Volumetric modulated arc therapy，VMAT）等技术的剂量影响已有报道[4–6]，但以上研究采用基于分析模型的常规算法来模拟投照误差。该算法受不均匀组织剂量计算精度的限制，尤其在低密度和表浅区域因侧向电子失衡而导致计算

偏差增大[7]，通常不能准确地反映机架和MLCs误差对投照剂量的影响。基于此，本研究在Monaco治疗计划系统中采用MC算法对入组患者设计IMAT计划，通过引入MLCs位置误差以及机架旋转误差，确定机架和MLCs走位误差对放疗剂量的影响，为常规直线加速器实施IMAT精确治疗提供质量保证。

1 材料与方法

1.1 患者数据和IMAT计划设计

1.1.1 病例选择

在河北医科大学第四医院自2016年1月至2018年6月收治的脑胶质瘤患者中随机选择7例进行回顾性研究。其中男性4例，女性3例，年龄25~65岁（中位43岁），肿瘤多位于大脑半球，靶区直径为2~6 cm。患者研究内容数据的使用经过河北医科大学第四医院伦理审查委员会同意，伦理批准编号：2019MEC028，入组患者均签署了CT数据临床研究知情同意书。勾画计划靶体积（Planning target volume，PTV）和OAR(包括脑干、患侧晶体、左右视神经、视交叉和脊髓等)。

1.1.2 计划制定

在Monaco计划系统采用X线虚拟蒙特卡罗(X-ray voxel Monte Carlo，XVMC)算法优化对所有患者设计IMAT计划，计划设计参数为：单弧长度为358°，每4°一个控制点，小机头和治疗床角度均为0°，射束采用6 MV光子线，模拟临床剂量为30 Gy/10次，单次剂量3 Gy，要求30 Gy剂量包绕的PTV体积达95%(D_{95})，PTV的110%处方剂量的体积V_{110}<10%，脊髓最大量≤22 Gy，脑干≤27 Gy，视神经和视交叉≤26 Gy。在常规直线加速器Varian 23EX上设计IMAT计划，照射剂量率采用恒定值500 MU/min，机架固定旋转速率为6 °/s。正如Guan等[8]所报道，计算网格大小对机架和MLC误差模拟精度及优化时间影响显著。本文在优化时采用最小方差≤0.5%，计算网格采用最小计算体积元计算网格(2 mm×2 mm)[9]。

1.2 模拟计划的误差引入及评估

对入组患者分别在Monaco治疗计划系统中设计IMAT计划，并将其定义为参考计划(Plan reference，Pr)。然后将Pr（由90个控制点组成，这些控制点包含了MLCs、机架的位置以及每个特定弧段要投照的MU数）导出，并通过内部开发软件对所有Pr分别引入MLCs和机架误差[10]，具体引入方式如下：(1)IMAT执行过程中MLCs可能出现的随机误差：一侧叶片扩大开放2 mm(MLC-2 mm)、1 mm(MLC-1 mm)及随机打开(0~2 mm)(MLC-rnd)；(2)IMAT执行过程中MLCs可能出现的系统误差：两组叶片沿相同方向移动相同的距离±1 mm和±2 mm；(3)IMAT执行过程中机架旋转可能出现的系统误差：机架角度偏差±0.5°、±1°、±2°和可能出现的随机角度偏差(−2° ~ +2°)。误差引入后，则每一患者将生成14个计划，然后将这些放疗计划参数信息导入到Monaco计划系统，重新计算剂量分布，并将其定义为模拟计划(Plan simulated，Ps)。通过DVH图对靶区（PTV接收的最小剂量(Minimum dose，D_{min})和平均剂量(Mean dose，D_{mean}))和OAR(包括脑干、视神经、脊髓)的受量进行比较和分析。通过公式(1)评估参考计划和模拟误差计划不一致指数(Percentage deviation，PD)，评估机架误差和MLCs误差对IMAT放疗剂量的影响，进而为常规直线加速器实施IMAT治疗技术提供合理的机架旋转误差和MLCs走位误差提供临床质控建议。

$$\mathrm{PD} = \frac{D_{\mathrm{simu}} - D_{\mathrm{refer}}}{D_{\mathrm{refer}}} \times 100\% \tag{1}$$

2 结果与讨论

2.1 MLCs位置误差对放疗剂量影响

表1显示了MLCs误差导致某患者参考计划和模拟计划对PTV及OAR的剂量差异。图1显示了MLCs误差对7例患者PTV的D_{min}平均剂量偏差，图1(a)为随机误差导致的剂量偏差，图1(b)为系统误差导致的剂量偏差。对于单侧MLCs随机误差，当叶片外移误差为最大2 mm时会导致靶区和危及器官受过剂量照射，导致剂量偏高。对PTV-D_{min}和PTV-D_{mean}分别增加了约3.6%和2.7%，与理论结果一致。对于7例患者其模拟计划分别将MLCs一侧外扩MLC-1 mm、MLC-2 mm、MLC-rnd时，导致PTV-D_{mean}平均偏差分别为(1.12±0.24)%、(2.15±0.46)%和(1.15±0.25)%。

晶体为对射线较为敏感的串行器官，同时由

于其体积较小和绝对受照剂量较低，MLC误差会导致患者的剂量差异显著增高，在放疗实施过程中应尤其注意。

表1　MLC模拟误差导致PTV及OAR与参考计划剂量偏差

Table 1　MLC errors leading to dose deviation for PTV and OAR with reference plan　　$\bar{x}\pm s$

误差	一侧叶片 Oneside			两侧叶片 Twosides			
Error	1 mm	2 mm	0~2 mm	−2 mm	−2 mm	1 mm	2 mm
PTV D_{max}	1.50±0.47	2.34±0.82	1.14±0.59	0.05±0.38	0.41±0.53	0.19±0.39	0.11±0.43
PTV D_{min}	3.00±0.94	4.83±2.33	3.00±1.09	−0.95±2.30	−0.07±1.53	−0.22±1.26	−0.93±2.25
PTV D_{ave}	1.12± 0.24	2.15± 0.46	1.15±0.25	−0.20±0.06	−0.03±0.07	−0.07±0.14	−0.27±0.28
脑干D_{max} Brainstem D_{max}	1.53 ±0.47	2.89 ±1.01	1.52 ±0.43	−0.49±0.93	−0.36±0.72	−0.08±0.64	−0.14±1.03
晶体D_{max} Lens D_{max}	4.37±2.45	8.07±3.23	5.31±3.18	1.90±6.99	0.58±3.16	0.44±4.49	0.40±7.88
视神经D_{max} Optic nerve D_{max}	2.65±1.24	4.98±1.92	2.75±1.20	−0.13±2.60	0.61±2.26	−0.30±1.09	−0.40±2.06

本研究显示机架和MLCs叶片误差对其剂量影响较为显著，与参考计划相比，其最大剂量(Dose maximum，D_{max})增高了12.4%。尽管绝对剂量仅从0.36 Gy(参考值)增加到0.41 Gy，但其平均受量增加了约16%。而由MLC-1 mm、MLC-2 mm、MLC-rnd导致的晶体的平均剂量偏差分别为(5.25±2.10)%、(9.97±4.89)%和(5.49±2.70)%。在所有患者计划中，脑干的最大剂量D_{max}和平均剂量D_{mean}的最大偏差分别增加了约7.2%和5.31%。通常，对于MLCs叶片的打开(1 mm或2 mm)会导致器官受照体积增加[11]，故其平均受照剂量也会相应增加。表1中列出了某患者引入MLCs各种随机和系统模拟误差后导致的靶区剂量及危及器官剂量变化。图2中列出了由MLCs随机误差导致的所有每个患者PTV和OAR的模拟平均剂量百分比差异。

对于两组叶片分别偏移(±2 mm和±1 mm)的系统误差引起的剂量偏差，如图3所示。对于患者PTV-D_{min}和PTV-D_{mean}的最大偏差分别约为3.95%和−0.8%，而对于PTV-D_{mean}的平均偏差为(−0.27±0.28)%。当MLCs的误差为±2 mm在两个方向达最大时，脑干的最大剂量和平均剂量与参考计划相比偏差分别为1.99%和1.07%，而晶体的最大剂量和平均剂量与参考计划相比分别增加了11.4%和15.8%超过了临床极限受照剂量。

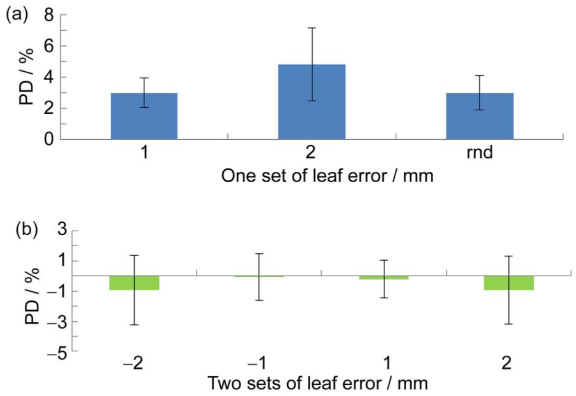
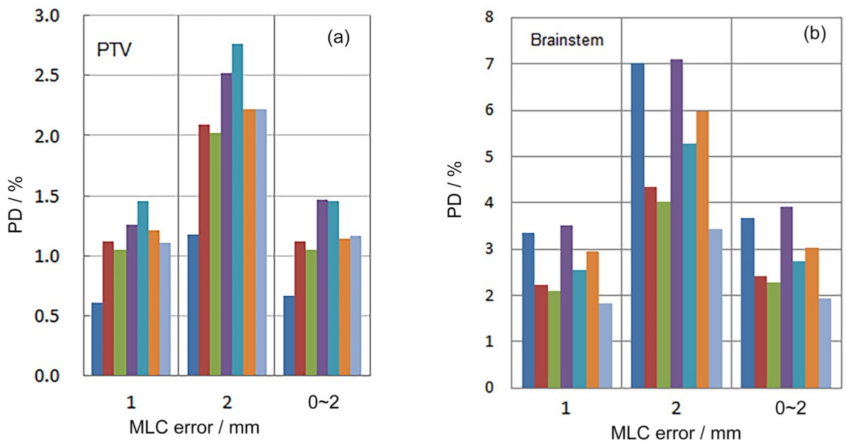


图1　MLCs随机误差(a)和系统误差(b)对靶区D_{min}平均值的影响

Fig. 1　Influence of MLCs random error (a) and system error (b) on the mean D_{min} value of the target area



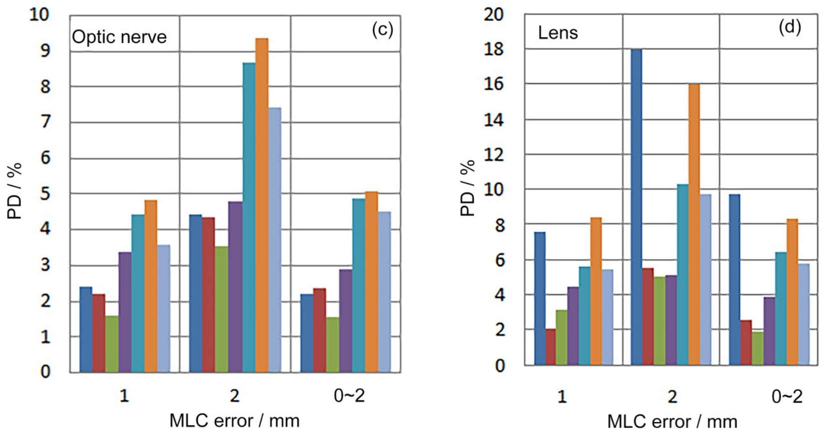


图2 MLCs随机误差导致患者PTV（a）和OAR（（b）~（d））的D_{mean}受量差异
Fig. 2 Randomized errors in MLCs lead to differences in D_{mean} dose for patients with PTV (a) and OAR ((b)~(d))

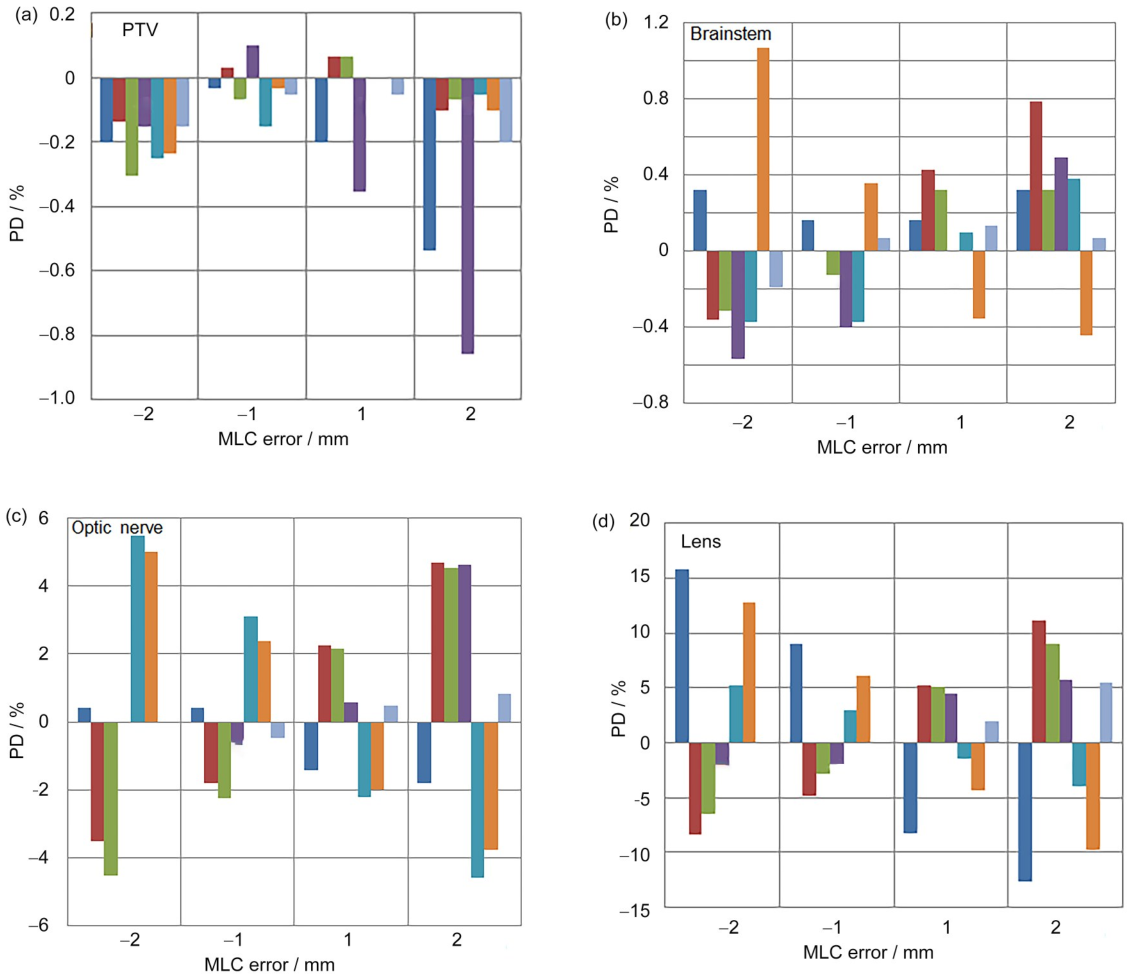


图3 MLCs系统误差导致患者PTV（a）和OAR（（b）~（d））的D_{mean}受量差异
Fig. 3 Differences in D_{mean} dosage of patients with PTV (a) and OAR ((b)~(d)) caused by MLCs system errors

2.2 机架位置误差对放疗剂量影响

表2显示了机架误差导致某患者参考计划和模拟计划之间对PTV及OAR的剂量差异。引入机架角度误差后，PTV-D_{min}和PTV-D_{mean}与参考计划相比分别降低了2.75%和0.35%，如图4和图5所示。

表2　机架模拟误差导致PTV及OAR与参考计划剂量偏差

Table 2　Gantry errors leading to dose deviation for PTV and OAR with reference plan　$\bar{x}\pm s$

误差	机架 Gantry						
Error	−2°	−1°	−0.5°	0.5°	1°	2°	−2° ~ 2°
PTV D_{max}	0.03± 0.26	0.09 ±0.27	0.17 ±0.39	0.20 ±0.35	0.34 ±0.37	0.12 ±0.40	0.28 ±0.28
PTV D_{min}	0.03±1.84	0.36±1.41	0.57±1.05	0.56±0.75	0.69±0.53	0.54±1.17	0.78±1.25
PTV D_{ave}	−0.01±0.11	0.02±0.15	0.04±0.16	−0.03±0.17	−0.01±0.15	−0.02±0.13	0.09±0.13
脑干 D_{max} Brainstem Dmax	0.12±0.51	0.44±0.44	0.34±0.34	−0.20±0.33	−0.03±0.44	0.28±0.42	0.30±1.01
晶体 D_{max} Lens Dmax	−0.43±9.05	−1.24±4.32	−1.11±3.78	−0.16±4.69	−0.58±7.51	0.84±13.08	-1.41±4.31
视神经 D_{max} Optic nerve Dmax	0.52±1.88	0.13±1.78	−0.08±1.72	−1.33±2.13	−0.87±2.27	−0.90±2.89	0.71±1.15

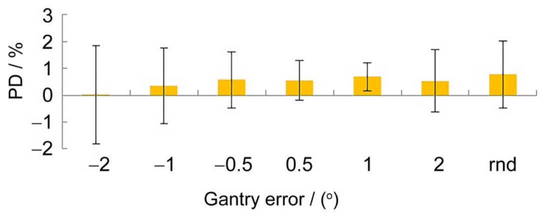


图4　机架角度误差对靶区最小剂量平均的影响

Fig. 4　Effects of gantry angle error on minimum mean dose in the target area

在评估的所有机架误差内，PTV-D_{mean}的最大平均偏差为−(0.09±0.13)%。通过表2可以看出，由于机架位置错误导致PTV剂量及OAR的剂量学偏差变化较大，尤其对于晶体。一例患者在机架偏差为(−2°)时，晶体的最大剂量偏差与参考计划相比其剂量偏高16.9%，绝对剂量由0.177 Gy增加至0.207 Gy。当引入机架误差为−2°时，某患者晶体平均剂量比参考剂量增加了38.5%，而绝对剂量仅增加约0.11 Gy，从0.278 Gy增加到0.385 Gy。对于脑干D_{max}和D_{mean}剂量，引入误差后所接受的剂量分别增高2.38%和5.5%，如图5所示。

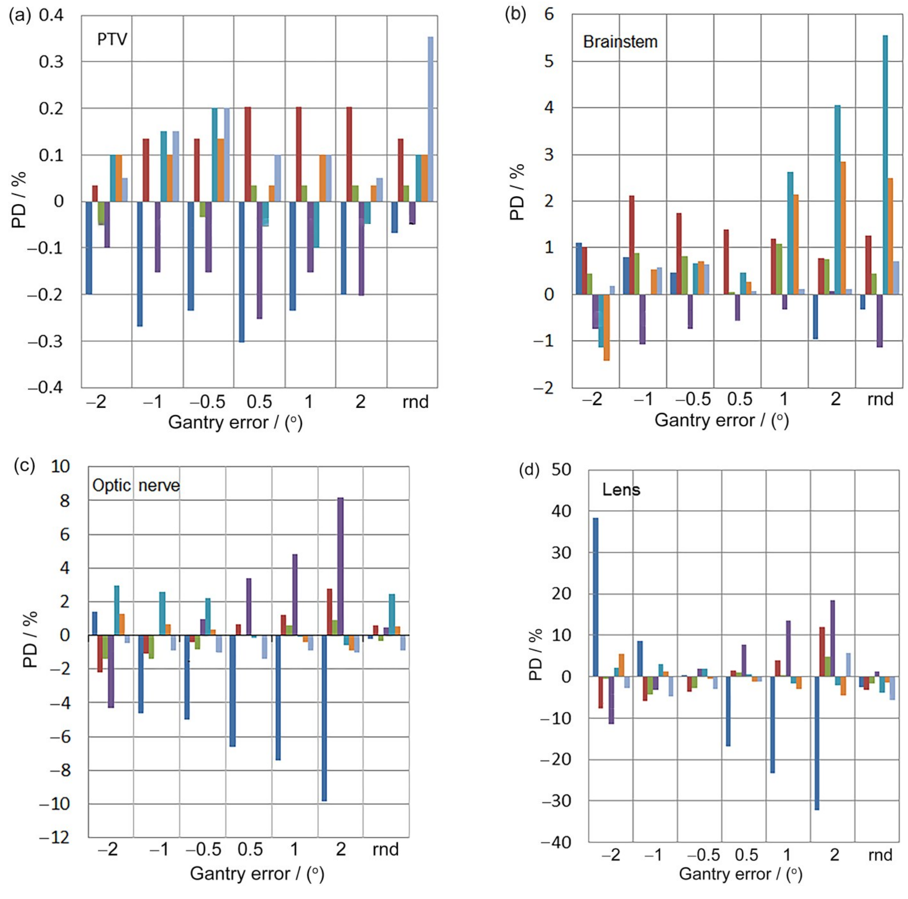


图5　机架走位误差对患者的PTV(a)和OAR((b)~(d))的D_{mean}百分比差异

Fig. 5　D_{mean} percentage difference between patient's PTV (a) and OAR ((b)~ (d)) due to gantry positioning error

2.3 讨论

Mijnheer等[12]建议TPS剂量计算精确度应保持在±3%以内，以保证实际投照剂量误差控制在±5%以内，若剂量偏差超过此范围，则可能会影响肿瘤反应和晚期毒性[13]。因此，必须尽可能减少治疗链中的不确定性以改善治疗效果。郭伟等[14]基于AAPM-TG218号报告对调强计划进行分类剂量验证，并建立了河南省肿瘤医院的调强计划实施剂量验证的流程和限值范围，为其单位临床剂量测量工作提供了指导。考虑到MLCs走位精度和机架旋转精度是影响IMAT实施投照精度的重要的参数，因而在实施IMAT治疗时，除了对MLCs采用常规的MLCs质量控制方法以保证将剂量误差控制在允许范围内[15]，还应考虑机架旋转影响[16]。

MLCs位置准确性的重要性在国内外研究文献中已有报道[4,17-18]。程燕铭等[4]通过5例鼻咽癌计划MLCs叶片走位精度对IMRT和VMAT计划放疗剂量的影响进行了报道，研究显MLCs的系统误差对鼻咽癌IMRT计划的剂量分布有显著影响，尤其是VMAT计划，MLCs外扩2 mm时最大误差可达8.68%，与本研究显示MLC-2 mm误差时晶体的平均剂量偏差为9.97%，几乎一致。Mu等[19]通过对5个IMRT原始计划分别引入系统误差（±0.5 mm和±1 mm）和随机误差（−2~2 mm）构建参考计划与原始计划进行剂量学对比分析，研究结果显示，MLCs叶片位置系统误差较随机误差对IMRT放疗的剂量影响较大，最大剂量偏差可达13%。Latifi等[20]在MRI引导的直线加速器（ViewRay Inc.，Mountain View，CA，USA）上对原始MLC升级为高速MLC后，通过端到端IMRT研究证明：叶片平均误差在1 mm时在高剂量低梯度区域的平均和最大点剂量误差超出了临床可接受范围，分别为2.5%和4.6%。游涛等[21]在Varian Eclipse治疗计划系统中通过32例前列腺癌患者研究了IMRT治疗时高分辨MLCs位置偏移对治疗剂量影响，显示随着MLCs偏移量的增加剂量偏差更加显著。为减少因MLCs位置偏移引起的患者照射剂量偏差，对MLCs实施质量控制时应保证其位置偏移控制在0.3 mm以内。上述文献采用基于分析模型的常规剂量算法，进行误差模拟。由于患者体内组织不均匀性的影响和不同MLCs效应的影响[22]，例如：泄漏辐射和凹凸槽效应影响[23]，常规剂量算法通常无法准确模拟误差剂量分布，进而导致对肿瘤和关键器官错误的剂量预测分布[24]。MC算法被认为是最精确的剂量计算方法，因为它可以准确地模拟通过加速器和患者体内的粒子传输。

基于以上原因，本研究采用蒙特卡罗算法在Monaco治疗计划系统中通过修改7个脑肿瘤入组患者的IMAT放疗计划，模拟了MLCs走位和机架旋转系统误差和随机误差，研究了常规直线加速器实施IMAT治疗，机架和MLCs走位误差对临床放疗剂量的影响。研究显示，两类误差对OAR的受量均产生较大剂量偏差。由图2所示，当MLCs叶片在0~2 mm之间随机移动，MLCs叶片误差导致的剂量偏差要比MLC-1 mm略小或稍大，具体取决于叶片随机位移误差的实际大小，以及在特定弧段处的射束子野权重。由图3可知，脑干、视神经、晶体等OAR随不同MLCs误差大小影响显示出相似的剂量趋势，表明MLCs位置偏移量的变化对PTV和OAR剂量的影响至关重要。当MLCs移动到最大模拟误差（−2 mm或+2 mm）时，对所有组织产生的剂量偏差最大。IMAT治疗采用等中心照射，治疗等中心点通常位于PTV的中心，因而当MLCs移动时，任何OAR都有可能被MLCs阻挡或被光束直接照射，从而减少或增加器官受照剂量。对于患者4，当MLCs移至+2 mm时导致靶区剂量不足而产生的PTV的剂量偏低，最大可达0.85%。与其他入组病例相比，分析其原因为该患者PTV的体积相对较小。由于MLCs移动导致射野从PTV的中心移开了2 mm，因此所接收的剂量比参考计划略小。

当实施VMAT旋转照射时，由于采取了等中心治疗技术治疗，且等中心点位于PTV的中心，相对于源皮距照射技术（治疗等中心位于患者表皮）可以显著减少因机架角度引起的剂量偏差[25]。两类机架误差研究结果显示：机架旋转误差对靶区PTV剂量分布的影响不大，剂量偏差在0.35%以内，但是对于OAR会产生较大的剂量偏差。正如笔者前期研究显示，所有放疗计划在优化过程中均需在靶区剂量和OAR受量两者之间寻找最优结合点，在提高靶区剂量的同时尽最大可能降低OAR受照剂量，以满足临床剂量学的最优要求[26]。在实施IMAT计划优化过程中，Monaco将整个治疗弧长分为多个控制点，并通过MLCs叶片子野优化，确定各个机架角度的最优通量图或子野权重设置。但是，当机架角度发生变化时，模拟计划通常直接通过这些OAR计算剂量，因此会产生相

对较大的剂量偏差。因而机架旋转误差，会对外围OAR的投照剂量引起显著变化，而对中心靶区剂量PTV影响较小。Low等[27]的研究表明：对于6 MV光子束而言，当机架角度误差为2°时，OAR剂量偏差最大可达40%。该结论与本文研究结果相吻合，当机架角度误差为−2°时，晶体相对于参考计划其剂量偏差可达38.5%。

3 结论

对于脑瘤患者，其病灶和危及器官距离通常较近，IMAT靶区高剂量区域与视神经和晶体保护区域间剂量跌落梯度较大，所以与机架角度误差对放疗剂量分布的精度影响而言，多叶准直器的位置误差更显著。其次，由于IMAT计划子野控制点形状与IMRT计划优化形成的子野控制点形状相比，其子野控制点形状多为长条形。因此，当多叶准直器产生叶片走位偏差时，相对于机架旋转误差，会对患者靶区剂量和周围危及器官受量产生较大影响，而对于脑干、视神经和晶体，模拟计划和参考计划之间的最大剂量差异值很小，几乎可以忽略不计。因此，当前设备制造商对直线加速器MLCs和机架精度允许的误差极限设置为（±1 mm/±1°）[28]，该限值也适用于常规直线加速器实施的IMAT治疗。对新型直线加速器在非均整模式和部分弧旋转调强对放疗剂量与γ验证通过率的影响已有报道[29−30]，但新型直线加速器机架和MLC偏差，对放疗剂量的影响应引入相应射束误差模型进一步研究。为了进一步提高IMAT的治疗质量，保证其治疗精度，建议对MLCs和机架实施定期校准和精准质控以保证其误差范围位于临床允许误差范围以内。

作者贡献声明 张若辉完成本研究模拟计算、实验设计和数据分析，论文初稿的写作，参考文献分析；白文文和迟子锋指导了理论计算和实验方案的设计，对论文进行了最后的审阅和定稿；郜玉兰和孟慧鹏对入组患者的筛选、放疗方案的制定以及对数据进行了分析；王克强参与了实验设计和实验结果分析，对论文进行了校对。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

1 Gibbons J P. The physics of radiation therapy[M]. 6th ed. New York: Wolters Kluwer, 2020.

2 Bai W, Gao Y, Zhang R H, *et al*. Evalutaion of Two Detector Arrays for CDR-CAS-IMAT Pretreatment Quality Assurance[J]. Medical Physics, 2020, **47**(6): e503-e504. DOI: 10.1002/mp.14316.

3 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 医用电子加速器试验和周期检验规程: GB/T 19046—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. National Standardization Administration of China Medical electron accelerator testing and periodic inspection procedures: GB/T 19046—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.

4 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 Yanming, HU Cairong, YIN Xiaojuan, *et al*. Dosimetric sensitivity with MU and MLC errors in IMRT versus VMAT plan for nasopharyngeal carcinoma[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2017, **26**(10): 1199-1203. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 1004-4221.2017. 10.019.

5 郑佳俊, 翟振宇, 孙丽. 瓦里安高分辨率多叶准直器叶片位置误差对肺肿瘤立体定向放疗剂量学影响[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2021, **30**(9): 930-935. DOI: 10.3760/cma.j.cn113030-20210417-00189.

ZHENG Jiajun, ZHAI Zhenyu, SUN Li. Dosimetric effect of Varian high-definition multi-leaf collimator leaf position error on stereotactic body radiation therapy for lung tumors[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2021, **30**(9): 930-935. DOI: 10.3760/cma. j. cn113030-20210417-00189.

6 张皓嘉, 游士虎, 金海洁, 等. 加速器机架旋转加速度约束条件对VMAT计划的影响研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2021, **41**(9): 659-664. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2021.09.004.

ZHANG Haojia, YOU Shihu, JIN Haijie, *et al*. Effects of gantry acceleration limitations on VMAT plans[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2021, **41**(9): 659-664. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 0254-5098.2021.09.004.

7 孔栋, 惠琳, 孔旭东, 等. 基于蒙特卡罗算法研究补偿膜

下空腔的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2021, **39**(4): 040303. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2021. rrj. 39. 040303.
KONG Dong, HUI Lin, KONG Xudong, *et al*. Evaluation of the effects of cavity under bolus using the Monte Carlo algorithm[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2021, **39**(4): 040303. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021.rrj.39.040303.

8 Shangguan D H, Yan W H, Wei J X, *et al*. Sample size adaptive strategy for time-dependent Monte Carlo particle transport simulation[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(4): 58. DOI: 10.1007/s41365-023-01202-6.

9 郭栓栓, 姜仁伟, 丁秋娥, 等. 网格精度对不同肿瘤放疗计划影响[J]. 中华肿瘤防治杂志, 2017, **24**(20): 1465-1468. DOI: 10.16073/j.cnki.cjcpt.2017.20.013.
GUO Shuanshuan, JIANG Renwei, DING Qiue, *et al*. Effects of mesh accuracy on radiotherapy plan for different cancers[J]. Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment, 2017, **24**(20): 1465-1468. DOI: 10.16073/j.cnki.cjcpt.2017.20.013.

10 Esposito A, Silva S, Oliveira J, *et al*. Primo software as a tool for Monte Carlo simulations of intensity modulated radiotherapy: a feasibility study[J]. Radiation Oncology, 2018, **13**(1): 91. DOI: 10.1186/s13014-018-1021-2.

11 杨继明, 马敏, 吴勇, 等. 动态多叶准直器精度对调强放疗的剂量学影响和容差研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2021, **30**(11): 1167-1172. DOI: 10.3760/cma.j.cn113030-20200811-00414.
YANG Jiming, MA Min, WU Yong, *et al*. Tolerance and dosimetric study of multi-leaf collimator leaf position accuracy for dynamic intensity-modulated radiotherapy [J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2021, **30**(11): 1167-1172. DOI: 10.3760/cma. j. cn113030-20200811-00414.

12 Mijnheer B J, Battermann J J, Wambersie A. What degree of accuracy is required and can be achieved in photon and neutron therapy? [J]. Radiotherapy and Oncology, 1987, **8**(3): 237-252. DOI: 10.1016/S0167-8140(87)80247-5.

13 Dische S, Saunders M I, Williams C, *et al*. Precision in reporting the dose given in a course of radiotherapy[J]. Radiotherapy and Oncology, 1993, **29**(3): 287-293. DOI: 10.1016/0167-8140(93)90146-Y.

14 郭伟, 毛荣虎, 李兵, 等. 基于AAPM-TG218报告对调强放疗计划剂量验证容差和干预限值的初步研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2021, **30**(8): 817-821. DOI: 10.3760/cma.j.cn113030-20200330-00146.
GUO Wei, MAO Ronghu, LI Bing, *et al*. Preliminary study of tolerance limits and action limits of IMRT plan dose verification based on AAPM-TG218 report[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2021, **30**(8): 817-821. DOI: 10.3760/cma.j.cn113030-20200330-00146.

15 Boyer A, Biggs P, Galvin J, *et al*. AAPM Report No. 72: Basic applications of mutileaf collimators[R]. Madison: Medical Physics Publishing, 2001. DOI: 10.37206/71.

16 Klein E E, Hanley J, Bayouth J, *et al*. Task Group 142 report: quality assurance of medical accelerators[J]. Medical Physics, 2009, **36**(9): 4197-4212. DOI: 10.1118/1.3190392.

17 Saito M, Sano N, Shibata Y, *et al*. Comparison of MLC error sensitivity of various commercial devices for VMAT pre-treatment quality assurance[J]. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 2018, **19**(3): 87-93. DOI: 10.1002/acm2.12288.

18 Feng A H, Chen H, Wang H, *et al*. Effect of MU-weighted multi-leaf collimator position error on dose distribution of SBRT radiotherapy in peripheral non-small cell lung cancer[J]. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 2020, **21**(12): 74-83. DOI: 10.1002/acm2.13061.

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

20 Latifi K, Lotey R, Feygelman V. On the MLC leaves alignment in the direction orthogonal to movement[J]. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 2021, **22**(6): 268-273. DOI: 10.1002/acm2.13267.

21 游涛, 陈飞, 龚筱钦. 瓦里安加速器高分辨多叶准直器位置偏移对前列腺癌调强放射治疗剂量分布的影响[J]. 现代医药卫生, 2015, **31**(22): 3380-3381. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5519.2015.22.005.
YOU Tao, CHEN Fei, GONG Xiaoqin. Influence of position deviation of Varian accelerators high definition multi leaf collimator on dose distribution in intensity modulated radiotherapy of prostate cancer[J]. Journal of Modern Medicine & Health, 2015, **31**(22): 3380-3381. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5519.2015.22.005.

22 张若辉, 白文文, 李润霄, 等. 食管癌不同直线加速器静态调强放疗的剂量学比较[J]. 中华肿瘤防治杂志, 2017, **24**(1): 38-43. DOI: 10.16073/j. cnki. cjcpt. 2017.

01.008.

ZHANG Ruohui, BAI Wenwen, LI Runxiao, *et al*. Comparison of IMRT treatment of esophageal carcinoma in different linac vendor[J]. Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment, 2017, **24**(1): 38-43. DOI: 10.16073/j.cnki.cjcpt.2017.01.008.

23 陈车, 陈睿, 陆治江, 等. 多叶准直器角度改变对左侧全乳大分割放疗瘤床推量的剂量学影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2023, **41**(4): 040302. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0141.

CHEN Che, CHEN Rui, LU Zhijiang, *et al*. Dosimetric effect of multi-leaf collimator angle change on the left-sided breast hypofractionated radiotherapy with simultaneous integrated boost[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, **41**(4): 040302. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0141.

24 Oderinde O M, du Plessis F C P. Sensitivity analysis of the integral quality monitoring system® using Monte Carlo simulation[J]. Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2017, **2017**: 7025281. DOI: 10.1155/2017/7025281.

25 Kraft J, van Timmeren J E, Mayinger M, *et al*. Distance to isocenter is not associated with an increased risk for local failure in LINAC-based single-isocenter SRS or SRT for multiple brain metastases[J]. Radiotherapy and Oncology, 2021, **159**: 168-175. DOI: 10.1016/j.radonc.2021.03.022.

26 Zhang R, Bai W, Zhang Q, *et al*. Constant dose rate and constant angular spacing intensity modulated arc therapy (CDRCASIMAT) using multi-criteria dose plan optimization for cervical cancer: feasibility of selective sparing of organs at risk[J]. Medecal Physics. 2019, **46**(6): e662. DOI: 10.1002/mp.13589.

27 Low D A, Zhu X R, Purdy J A, *et al*. The influence of angular misalignment on fixed-portal intensity modulated radiation therapy[J]. Medical Physics, 1997, **24**(7): 1123-1139. DOI: 10.1118/1.598015.

28 Nelms B E, Chan M F, Jarry G, *et al*. Evaluating IMRT and VMAT dose accuracy: practical examples of failure to detect systematic errors when applying a commonly used metric and action levels[J]. Medical Physics, 2013, **40**(11): 111722. DOI: 10.1118/1.4826166.

29 袁青青, 李衍龙, 王大奖, 等. 加速器运行误差对盆腔肿瘤容积旋转调强放疗计划剂量验证的影响[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2020, **29**(9): 779-783. DOI: 10.3760/cma.j.cn113030-20181015-00522.

YUAN Qingqing, LI Yanlong, WANG Dajiang, *et al*. Impact of accelerator operating errors on γ passing rate during dose verification of volumetric modulated arc therapy for pelvic tumors[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2020, **29**(9): 779-783. DOI: 10.3760/cma.j.cn113030-20181015-00522.

30 郭逸潇, 胡金炎, 李洋, 等. 常规分割非均整模式部分弧旋转调强计划剂量验证的分析[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2021, **39**(6): 060303. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021.rrj.39.060303.

GUO Yixiao, HU Jinyan, LI Yang, *et al*. Analysis on dosimetric verification of flattening filter free conventional segmentation partial arc RapidArc plans[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2021, **39**(6): 060303. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021.rrj.39.060303.