

Machine Performance Check束流均匀性改变对Portal Dosimetry计划剂量验证的影响

姚凯宁,王若曦,吴昊,弓健,刘卓伦,张健,冯仲苏,杜乙

北京大学肿瘤医院暨北京市肿瘤防治研究所放疗科/恶性肿瘤发病机制及转化研究教育部重点实验室,北京 100142

【摘要】目的:探究Machine Performance Check (MPC)系统束流均匀性变化对Portal Dosimetry(PD)计划验证的影响,为临床MPC均匀性的阈值设定和电子影像系统(EPID)的校准频率提供参考。**方法:**选取本中心EDGE加速器上首次治疗患者26例和10 cm×10 cm方野1例,制定治疗计划和验证计划。在MPC束流均匀性偏差增大的情况下,分别在EPID校准前和校准后执行验证计划,并在计划系统PD模块中分析,统计对比图像剂量和 γ 通过率。本研究还列出EDGE加速器一年间MPC束流均匀性的结果。**结果:**MPC 1年的统计结果显示束流均匀性偏差的升高趋势明显并且速度加快,表明EPID存在设备老化现象。EPID校准前后验证计划的图像剂量和 γ 通过率的对比结果表明不同能量方野计划在影像板中心附近的剂量差异为1%~2%,临床射野计划由于复杂性提高,剂量差异最大可以达到10%。EPID校准后的 γ 通过率高于校准前。**结论:**EPID探测器的一致性改变对PD计划剂量验证有一定影响,提示临床MPC均匀性阈值为2%时能够对PD计划剂量验证起到预警作用,EPID应在MPC重新采集基线之前校准,以保证验证计划的质量,保证患者放疗的安全性。

【关键词】计划剂量验证;束流均匀性;Machine Performance Check;电子射野影像系统;Portal Dosimetry

【中图分类号】R811

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2022)04-0397-07

Effects of beam uniformity changes of Machine Performance Check on Portal Dosimetry plan dose verification

YAO Kaining, WANG Ruoxi, WU Hao, GONG Jian, LIU Zhuolun, ZHANG Jian, FENG Zhongsu, DU Yi

Key Laboratory of Carcinogenesis and Translational Research (Ministry of Education/Beijing), Department of Radiotherapy, Peking University Cancer Hospital & Institute, Beijing 100142, China

Abstract: Objective To explore the effects of beam uniformity changes of Machine Performance Check (MPC) on Portal Dosimetry (PD) plan verification, thereby providing references for the threshold setting of MPC uniformity and the calibration frequency of electronic portal imaging device (EPID). **Methods** Twenty-six patients treated on the EDGE accelerator for the first time, and a case of 10 cm×10 cm square field were selected to make treatment and verification plans. With the increasing deviation of MPC beam uniformity, verification plans were executed before and after EPID calibration. The image dose and gamma passing rate were analyzed and compared in PD module. The MPC beam uniformity of the EDGE accelerator in one year was also listed. **Results** MPC statistical results for one year showed that beam uniformity deviation had a clear upward trend and the speed was accelerating, which indicated that there was equipment aging in EPID. The comparison of image doses and gamma passing rates of verification plans before and after EPID calibration revealed that the dose difference near the center of image plate was from 1% to 2% for the square field plans of different energies. Due to the increased complexity of the clinical plans, the maximum dose difference reached 10%. Gamma passing rate after EPID calibration was higher than that before calibration. **Conclusion** Uniformity change of EPID detector has a certain effect on PD plan dose verification, which suggests that when the clinical MPC uniformity threshold is 2%, it can play an early warning role for plan dose verification. EPID should be calibrated before the MPC baseline is re-acquired, thereby ensuring the quality of verification plans and guaranteeing the safety of radiotherapy.

Keywords: plan dose verification; beam uniformity; Machine Performance Check; electronic portal image device; Portal Dosimetry

【收稿日期】2021-11-20

【基金项目】北京市自然科学基金(1202009, 1212011);国家重点研发计划(2019YFF01014405);国家自然科学基金(12005007);北京市属医院科研培育计划项目(PX2019042)

【作者简介】姚凯宁,助理工程师,研究方向:放射治疗物理学,E-mail: kainingyao@163.com

【通信作者】杜乙,高级工程师,研究方向:医学物理,E-mail: yi.du@hotmail.com

前言

随着调强技术以及多叶光栅 (Multileaf Collimator, MLC) 等先进技术和设备的应用, 放射治疗的精准性不断提高, 但同时治疗计划的复杂性也随之增加, 因此治疗计划的剂量验证尤为重要^[1-2]。已有文献证明电离室、胶片、电离室/半导体矩阵等工具可用于计划剂量验证^[3-6], 但是存在测量效率低, 受患者数量限制的问题, 而 Portal Dosimetry (PD) 剂量验证方式由于其准确性高、操作方便等特点, 目前在临床中的应用较为广泛^[7-9]。PD 计划剂量验证依赖于加速器机载电子影像系统 (Electronic Portal Imaging Device, EPID)。

同样以 EPID 作为探测器监测加速器性能的还有 MPC (Machine Performance Check) 系统^[10-11]。MPC 是瓦里安 TrueBeam 系列加速器内置的参数检测程序, 可利用 EPID 质控加速器的剂量输出一致性 (Beam Output Change) 和束流均匀性 (Beam Uniformity Change)^[12]。束流均匀性可以提示探测器、滤波系统 (Filter System) 和束流偏转的改变。统计本中心的 MPC 数据发现, 加速器出现了 MPC 束流均匀性偏差异常增大的现象, 分析原因大致有两种: 一是束流改变 (包括绝对剂量、束流对称性和测量深度改变); 二是设备老化 (即 EPID 探测器间一致性变差)。我们通过利用三维水箱测量加速器束流, 排除了束流改变的可能, 说明引起 MPC 束流均匀性变化的原因是设备老化。

由上述可知: PD 计划验证和 MPC 均以 EPID 作为探测器, 并且 MPC 束流均匀性改变提示探测器间的一致性变差。本研究以 PD 验证计划的结果为指标, 探究 MPC 束流均匀性变化对 PD 计划验证的影响, 为临床 MPC 均匀性的阈值设定和 EPID 的校准频率提供参考, 充分发挥 MPC 的监测作用, 保证 PD 计划剂量验证的准确性。本研究还将列出本中心 EDGE 加速器一年间 MPC 束流均匀性的结果作为参考。

1 材料与方法

1.1 设备选择

MPC 是瓦里安 TrueBeam 系列加速器独有的, 本研究选择 EDGE 加速器作为数据采集的机器, 该加速器配置的 EPID 型号为 aSi1200, 影像板尺寸为 43 cm×43 cm, 像素数量为 1 280×1 280, 分辨率可达到 0.34 mm, 允许最大剂量率为 2 400 MU/min, 因此支持非均整 (Flattening Filter Free, FFF) 束流的测量和计划验证^[13]。MPC 束流均匀性的计算公式

如下^[14]:

$$\text{MPC束流均匀性} = 100\% \times$$

$$\left(\text{Max}_{\substack{X \leq x \leq X \\ -Y \leq y \leq Y}} (\text{Ratio}(x, y)) - \text{Min}_{\substack{X \leq x \leq X \\ -Y \leq y \leq Y}} (\text{Ratio}(x, y)) \right) \quad (1)$$

$$X = Y = \frac{13.3}{2} \text{ cm}$$

其中, x 和 y 代表加速器的铅门位置, X 和 Y 代表铅门大小 (为了减少铅门位置的影响, MPC 仅测量射野 13.3 cm×13.3 cm 的区域)。束流均匀性代表射野中间 80% 区域内输出剂量的最大差值, 是与基线对比的相对值, 根据国际标准阈值设置为 2%^[15]。

1.2 EPID 校准

EPID 的校准包含暗野 (Dark Field) 校准、泛野 (Flood Field) 校准以及绝对剂量校准^[16]。校准时首先进行暗野校准, 旨在消除暗电流对探测器电路的影响, 对于所有能量, 暗野校准是统一的。泛野校准在暗野校准后进行, 利用暗野校准的结果, 多次出束采集探测器的结果同时得到一条校准曲线, 根据坏点个数决定是否接受该曲线, 目的是调整探测器的响应一致, 不同能量需要分开校准。绝对剂量校准在前两个校准的基础上进行, 主要是将 EPID 的剂量 (Calibration Unit, CU) 与加速器的剂量 (Monitor Unit, MU) 对应起来, TrueBeam 加速器是 1 CU=100 MU 的对应关系, 不同能量需要分开校准。校准后 EPID 采集图像的计算公式如下^[17]:

$$I(a, b) = \left(\frac{I_{\text{raw}}(a, b) - \text{DF}(a, b)}{\text{FF}(a, b)} \right) \text{FF}_{\text{mean}} \quad (2)$$

其中, $I(a, b)$ 为 EPID 采集的二维图像, $I_{\text{raw}}(a, b)$ 为 EPID 采集的原始图像, $\text{DF}(a, b)$ 为暗野图像, $\text{FF}(a, b)$ 为泛野图像, FF_{mean} 为泛野图像的平均值。

1.3 病例选择

随机选取 2020 年 12 月~2021 年 2 月期间在瓦里安 EDGE 加速器上首次治疗的患者 26 例以及 10 cm×10 cm 的方野计划 1 例 (能量分别为 6 MV、10 MV、6 FFF MV、10 FFF MV), 所有计划均在瓦里安 Eclipse15.6 版本上完成, 治疗部位包括头部、颈部、胸部和盆部等, 计划类型均为调强计划 (容积旋转调强或固定野调强), 射野个数为 2~4 个。计划设计完成并经医生确认后, 物理师制定 PD 验证计划。

1.4 试验方法

每个临床计划治疗前需完成计划剂量验证, 即在没有患者的情况下, 在 EDGE 加速器上执行验证计划, 同时通过 EPID 进行全程的剂量测量^[18-19], 并在计划系统的 Portal Dosimetry 模块中分析实测图像与预测图像的 γ 通过率^[20], γ 分析标准为 3 mm/3% 和

2 mm/2%, 剂量阈值为10%。在MPC均匀性已经超出阈值的情况下, 本研究中所有患者均执行两次验证计划, 第一次是在EPID校准之前, 第二次是在EPID校准之后, 对比两次测量的图像剂量以及 γ 通过率。通过分析EPID校准前后图像和 γ 分析的差异, 探究MPC的束流均匀性改变对PD计划验证的影响。

1.5 数据处理及统计学方法

采用SPSS 25.0进行统计学分析, 数据不符合正态分布, 采用相关样本非参数检验, $P<0.05$ 表示差异具有统计学意义。数据图表采用SigmaPlot 10.0 软件完成。

2 结果

2.1 本中心MPC束流均匀性结果

2020年1月~12月EDGE加速器MPC均匀性结果如图1所示, 可以看出束流均匀性有系统性升高现象。但自2020年5月以来, 升高趋势明显并且速度加快(升高周期约为6~8周), 当超过设定阈值2%时, 物理师便在束流无误的情况下重新设定MPC基线以保证MPC可以正常工作。另外从图1中还可以看出, FFF束流均匀性的变化较常规束流大, 这可能与FFF束剂量随射束角度转向的变化较大有关^[12]。

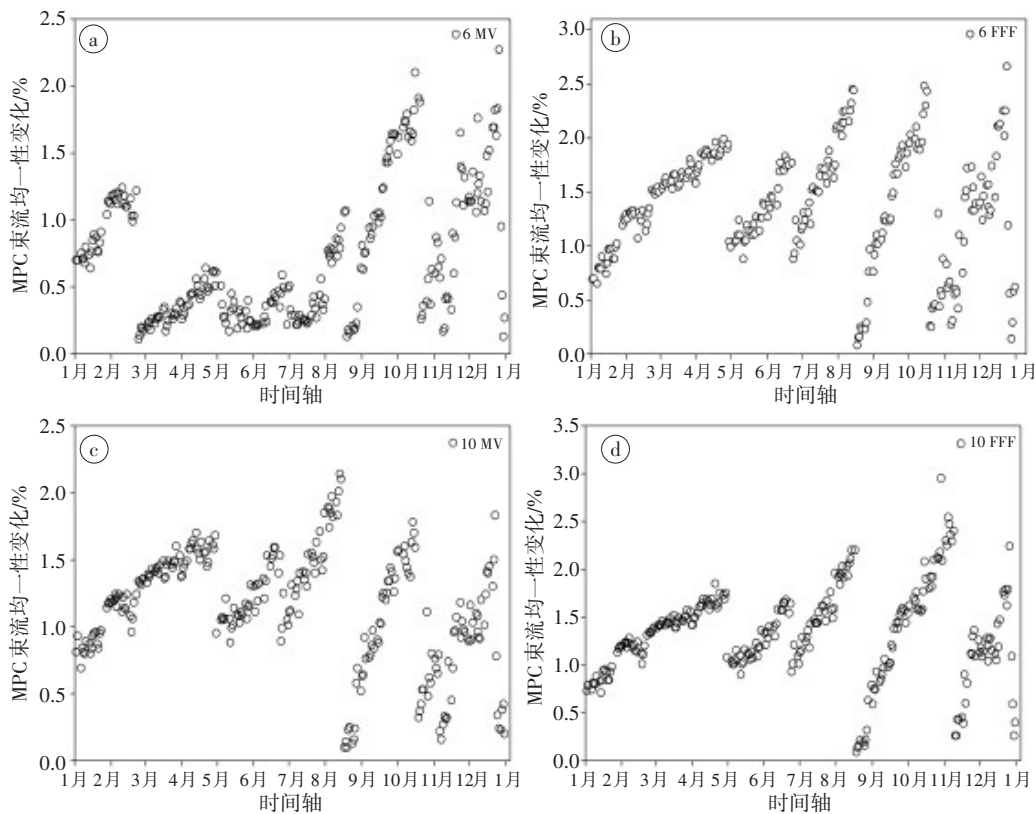


图1 2020年1月~12月MPC束流均匀性的变化

Figure 1 Changes in MPC beam uniformity from January to December in 2020

图a~d分别代表6 MV、6 FFF MV、10 MV以及10 FFF MV 能量

2.2 EPID校准前后图像剂量对比

2.2.1 方野计划的结果 4个方野计划能量分别为6 MV、6 FFF MV、10 MV和10 FFF MV, EPID图像校准前后的剂量见图2(每个能量分别包含inplane和crossplan两个方向, 比较的均为图像中心的Profile), 可以看出校准后EPID测量的剂量在影像板中心附近高于校准前。定量分析校准前后的剂量差异(图3), 发现各能量在影像板中心附近的剂量差异均为1%~2%, 说明EPID校准对其剂量测量有一定的影响。

2.2.2 临床计划的结果 26例临床病例的分析结果和方野较为一致, 此处仅展示1个病例的结果(图4)。该病例所选用能量为6 FFF MV, 3个射野在影像板中心处的测量结果均匀性: EPID校准后影像板中线附近的测量剂量高于校准前。定量分析结果如图5所示, 射野1和2的剂量差异大于10%, 射野3的剂量差异稍小但也有5%。上述结果表明EPID校准对治疗前计划剂量验证的结果影响较大。

2.3 临床计划的 γ 通过率

按每个临床病例的射野数, 分别统计26例患者

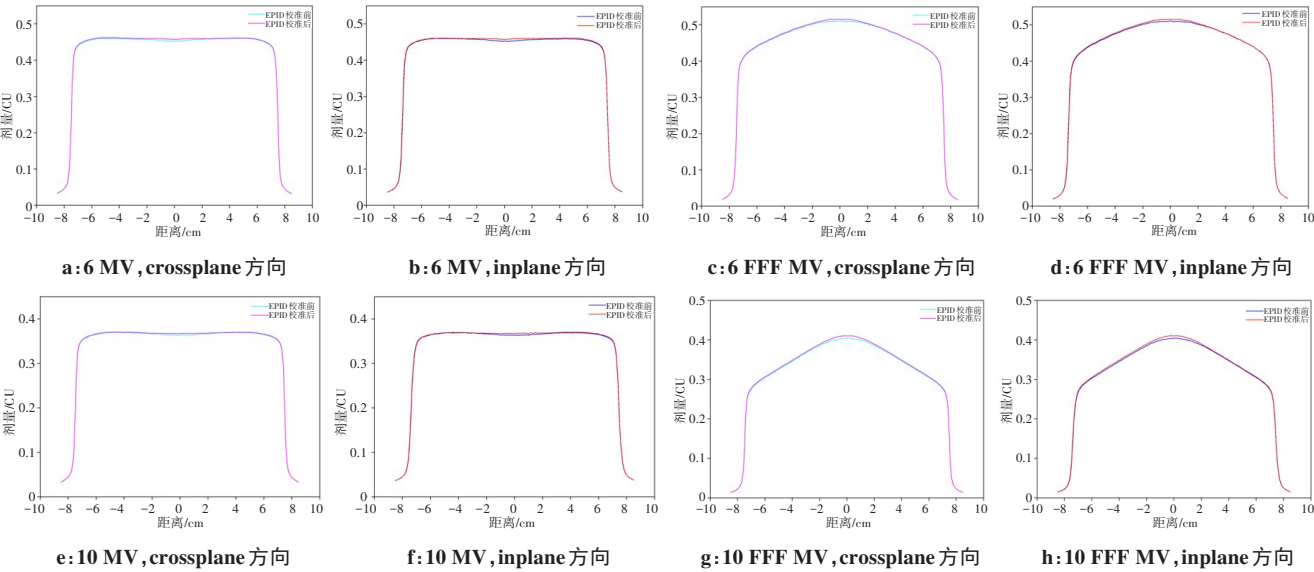


图2 EPID校准前后方野计划的结果

Figure 2 Comparison of square field plans before and after EPID calibration

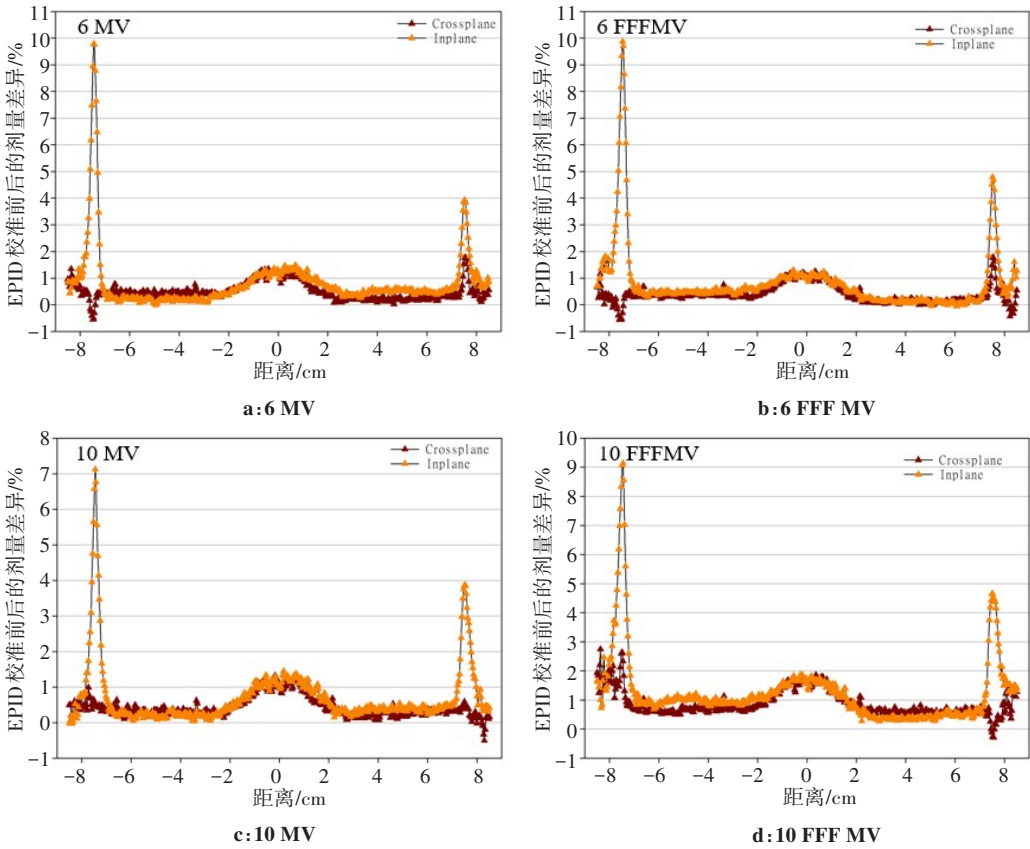


图3 EPID校准前后方野计划剂量差异

Figure 3 Dose differences of square field plans before and after EPID calibration

的射野1~4,结果如表1所示,在3 mm/3%标准下,除射野4外,其余3个射野EPID校准后的 γ 通过率略大于校准前,且差异有统计学意义($P<0.05$)。在2 mm/2%标准下,射野1、2、3校准前后差异继续增大($P<0.05$),射野4无差异。图6为EPID校准前后 γ 通过率分布图,以上结果表明EPID的校准对验证计划 γ 通过率有影

响,校准后的通过率有所提高。

3 讨论

MPC作为一种多参数质控软件,能够进行加速器参数的监测以及性能的反映^[21-22]。本中心EDGE加速器的MPC结果显示束流均匀性偏差出现异常升

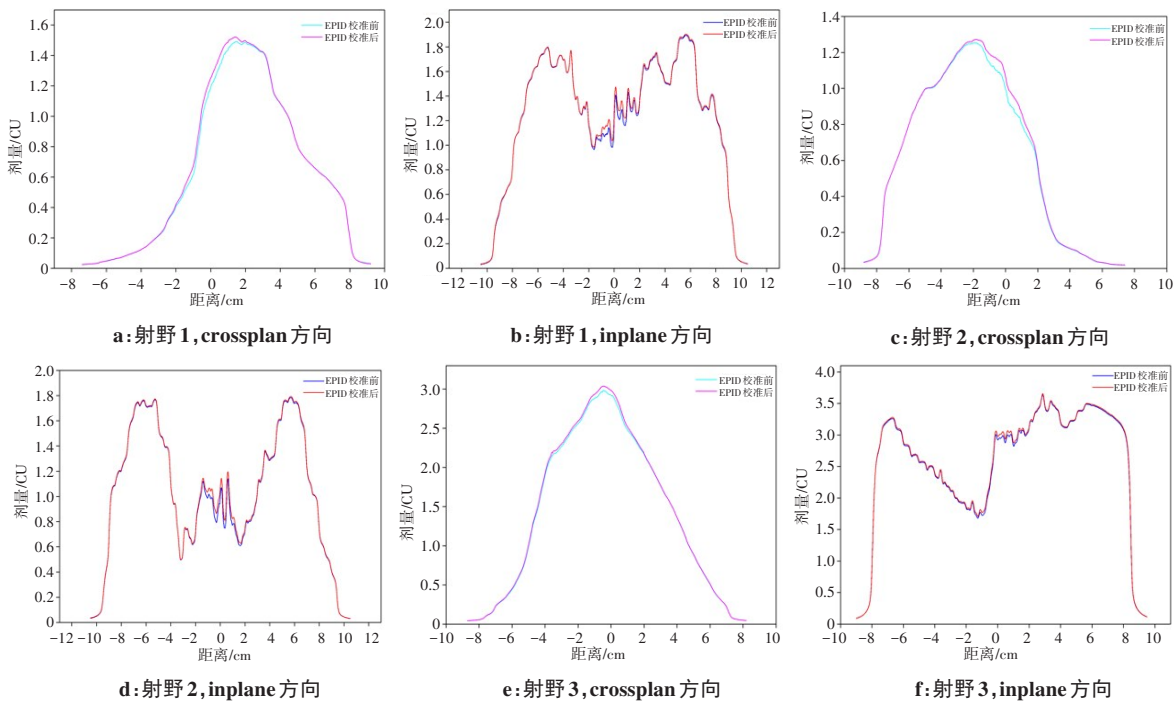


图 4 EPID 校准前后单个临床计划结果

Figure 4 Comparison of one clinical plan before and after EPID calibration

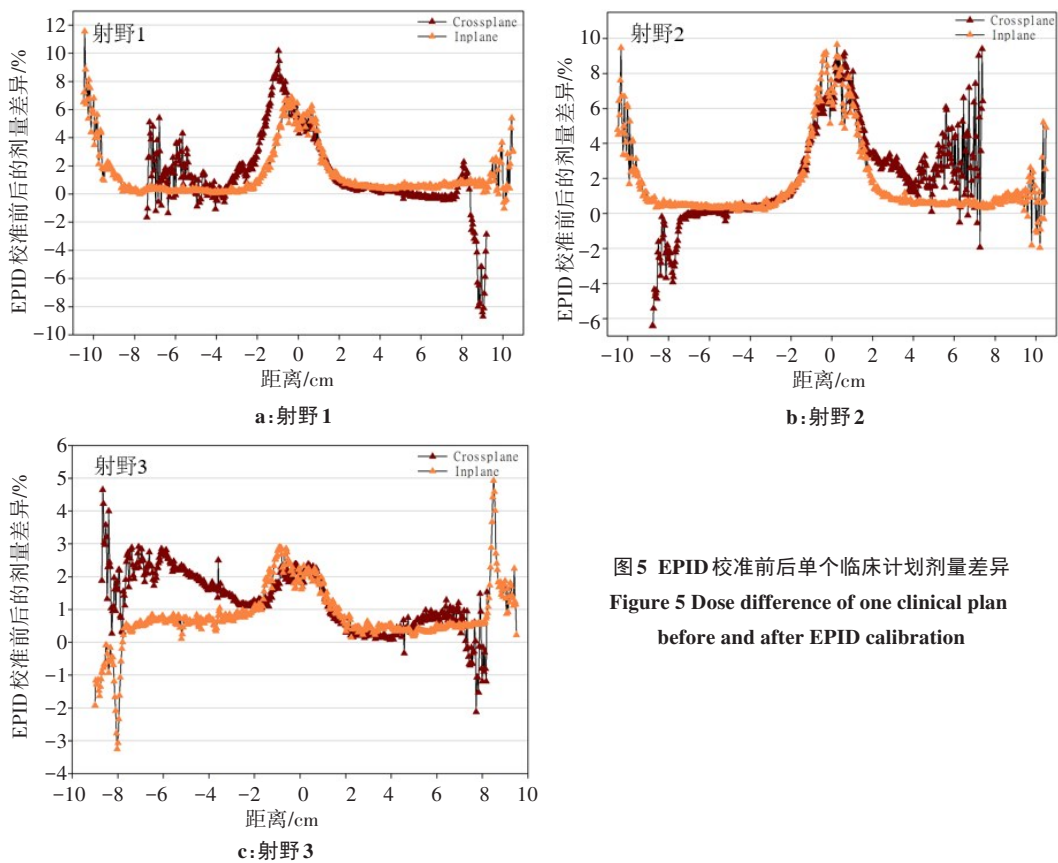


图 5 EPID 校准前后单个临床计划剂量差异

Figure 5 Dose difference of one clinical plan before and after EPID calibration

高,与系统性偏差(一般在0.5%以内)不同的是^[12, 23],EDGE加速器的均匀性偏差幅度更大(>3%),并且超出阈值的速度加快。经三维水箱精确测量后证明加速器束流不存在问题,即探测器是造成该现象的原因,主要问题可能是EDGE加速器自装机以来大分割

治疗的患者居多,具有射野面积小,照射剂量大等特点,并且每位患者均利用EPID做治疗前的计划验证^[24-25],因此导致设备老化,EPID影像板中心处的探测器出现过响应现象。由于诸多因素的限制,EPID探测器更换较困难,因此需要根据均匀性的改变来

表1 EPID校准前后临床验证计划 γ 通过率($\bar{x} \pm s, \%$)

Table 1 Gamma passing rates of clinical verification plans before and after EPID calibration ($Mean \pm SD, \%$)

| γ 分析标准 | 射野 | 校准前 | 校准后 | z 值 | P 值 |
|---------------|----|------------------|------------------|-------|--------|
| 3 mm/3% | 1 | 99.70 \pm 0.50 | 99.88 \pm 0.22 | -2.67 | 0.008 |
| | 2 | 99.78 \pm 0.42 | 99.98 \pm 0.05 | -2.89 | 0.004 |
| | 3 | 99.60 \pm 0.71 | 99.80 \pm 0.46 | -2.04 | 0.041 |
| | 4 | 100 \pm 0.00 | 100 \pm 0.00 | 0.00 | 1.000 |
| 2 mm/2% | 1 | 98.31 \pm 1.50 | 99.30 \pm 0.98 | -3.58 | <0.001 |
| | 2 | 98.75 \pm 1.14 | 99.70 \pm 0.37 | -3.85 | <0.001 |
| | 3 | 98.39 \pm 1.65 | 99.40 \pm 1.21 | -2.38 | 0.018 |
| | 4 | 100 \pm 0.00 | 100 \pm 0.00 | 0.00 | 1.000 |

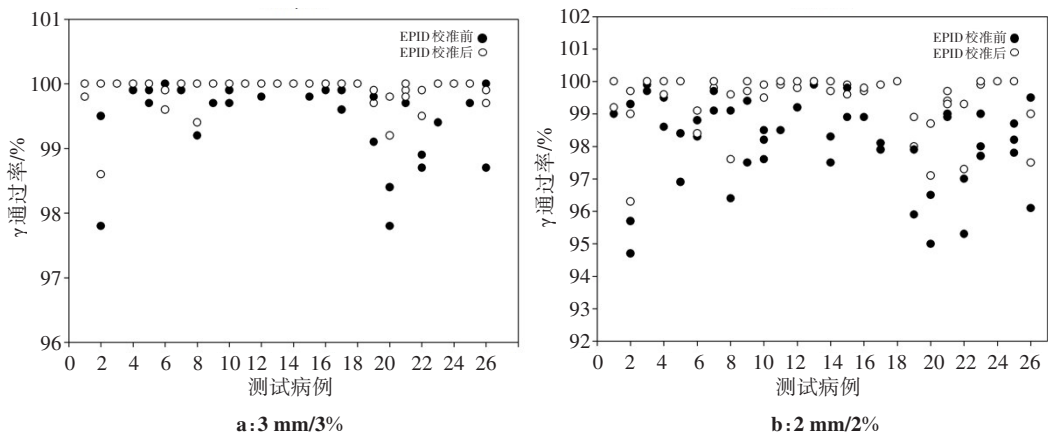


图6 EPID校准前后临床病例的 γ 通过率分布情况

Figure 6 Gamma passing rates in clinical cases before and after EPID calibration

采集 MPC 基线,以保证该软件能够继续监测加速器。

本研究还探究了 MPC 均匀性超阈值警告对 PD 计划剂量验证的意义。统计 EPID 校准前后计划验证的图像剂量和 γ 通过率,结果表明对于方野计划,EPID 校准前后不同能量的剂量差异为 1%~2%;对于临床射野计划,由于 MLC 的应用以及计划难度的增大,计划的复杂性提高,使校准前后的剂量差异最大可以达到 10%。值得注意的是,为了排除影像板边缘的影响,剂量差异只在影像板中心附近统计。从射野的角度看,不同评判标准下 EPID 校准后的 γ 通过率大于校准前,除射野 4 外,其他射野差异有统计学意义($P<0.05$)。上述结果表明 EPID 探测器间一致性的变化对 PD 计划剂量验证结果的影响较大,提示 MPC 均匀性阈值为 2% 是合理的,能够对 PD 计划剂量验证起到预警和保护作用,这也与已有文献对均匀性阈值的定义一致^[14-15],同时提示 EPID 应在 MPC 重新采集基线之前校准。

4 结 论

笔者发现本中心 EPID 出现设备老化现象,统计

分析 MPC 结果发现束流均匀性超出阈值的幅度大、速度快,且在 FFF 束流中尤为明显,经验证是由于 EPID 探测器间的一致性变差引起的。我们利用 PD 验证计划的图像剂量和 γ 通过率探究 MPC 均匀性变化对 PD 计划验证的影响,结果表明 EPID 探测器的一致性改变对 PD 计划剂量验证有一定影响,提示临床 MPC 均匀性阈值为 2% 时能够对 PD 计划剂量验证起到预警作用,EPID 应在 MPC 重新采集基线之前校准,从而保证验证计划的质量,保证患者放疗的安全性。

【参考文献】

[1] PARK J M, KIM J, PARK S Y. Modulation indices and plan delivery accuracy of volumetric modulated arc therapy[J]. J Appl Clin Med Phys, 2019, 20(6): 12-22.

[2] 李光俊, 李衍龙, 钟仁明, 等. VMAT 计划复杂性的定量评估方法探讨[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2015, 24(6): 684-687.

LI G J, LI Y L, ZHONG R M, et al. The quantitative method to evaluate the plan complexity of volumetric-modulated arc therapy[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2015, 24(6): 684-687.

[3] 周颖娟, 黄劲敏, 邓小武. 用放射性铬胶片进行调强放疗剂量验证的研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2007, 16(4): 307-312.

- ZHOU Y J, HUANG S M, DENG X W. Radiochromic film in the dosimetric verification of intensity modulated radiation therapy[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2007, 16(4): 307-312.
- [4] SEKAR Y, THOELKING J, ECKL M, et al. Characterization and clinical evaluation of a novel 2D detector array for conventional and flattening filter free (FFF) IMRT pre-treatment verification[J]. Z Med Phys, 2018, 28(2): 134-141.
- [5] 张富利, 蒋华勇, 王雅捷, 等. 应用一维、二维、三维探测器阵列进行螺旋断层调强放疗计划剂量验证[J]. 中国医学物理学杂志, 2014, 31(6): 5230-5233.
- ZHANG F L, JIANG H Y, WANG Y D, et al. Evaluation of EBT3, PTW Seven29 combining octavius phantom, Delta4 for tomotherapy patient-specific quality assurance[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2014, 31(6): 5230-5233.
- [6] ZHANG J Y, WU V W, LU J Y, et al. Dosimetric verification of stereotactic body radiation therapy for lung cancer treatment plans using flattening filter-free beams[J]. Tumori, 2015, 101(6): 631-636.
- [7] 郭跃信, 裴运通, 马阳光, 等. IMRT不同剂量验证技术差异性分析[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2017, 26(6): 657-660.
- GUO Y X, PEI Y T, MA Y G, et al. A comparative analysis of Matrixx and EPID for dosimetric verification of intensity-modulated radiotherapy[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2017, 26(6): 657-660.
- [8] MIN S, CHOI Y E, KWAK J, et al. Practical approach for pretreatment verification of IMRT with flattening filter-free (FFF) beams using varian portal dosimetry[J]. J Appl Clin Med Phys, 2014, 16(1): 4934.
- [9] SHARMA D S, MHATRE V, HEIGRUJAM M, et al. Portal dosimetry for pretreatment verification of IMRT plan: a comparison with 2D ion chamber array[J]. J Appl Clin Med Phys, 2010, 11(4): 3268.
- [10] BARNES M P, GREER P B. Evaluation of the TrueBeam machine performance check (MPC) geometric checks for daily IGRT geometric accuracy quality assurance[J]. J Appl Clin Med Phys, 2017, 18(3): 200-206.
- [11] CLIVIO A, VANETTI E, ROSE S, et al. Evaluation of the machine performance check application for TrueBeam linac[J]. Radiat Oncol, 2015, 10(1): 97.
- [12] BARNES M P, GREER P B. Evaluation of the TrueBeam machine performance check (MPC) beam constancy checks for flattened and flattening filter-free (FFF) photon beams[J]. J Appl Clin Med Phys, 2017, 18(1): 139-150.
- [13] VAN ELMPT W, MC DERMOTT L, NIJSTEN S, et al. A literature review of electronic portal imaging for radiotherapy dosimetry[J]. Radiother Oncol, 2008, 88(3): 289-309.
- [14] GODDU S, SUN B, YADDANAPUDI S, et al. TU-C-BRE-02: a novel, highly efficient and automated quality assurance tool for modern linear accelerators[J]. Med Phys, 2014, 41(6): 455.
- [15] KLEIN E E, HANLEY J, BAYOUTH J, et al. Task group 142 report: quality assurance of medical accelerators[J]. Med Phys, 2009, 36(9): 4197-4212.
- [16] Portal dosimetry 13[Z]. ©2015 Varian Medical System, Inc.
- [17] GREER P B. Correction of pixel sensitivity variation and off-axis response for amorphous silicon EPID dosimetry[J]. Med Phys, 2005, 32(12): 3558-3568.
- [18] GREER P B, POPESCU C C. Dosimetric properties of an amorphous silicon electronic portal imaging device for verification of dynamic intensity modulated radiation therapy [J]. Med Phys, 2003, 30(7): 1618-1627.
- [19] 黎旦, 宾石珍, 程晶晶, 等. 非晶硅电子射野影像系统与ArcCHECK在直肠癌容积旋转调强剂量验证中的应用[J]. 中国医学物理学杂志, 2016, 33(7): 674-677.
- LI D, BIN S Z, CHENG P J, et al. A-Si EPID and Arc CHECK dosimetric verification for VMAT of rectum cancer[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2016, 33(7): 674-677.
- [20] LOW D A, HARMS W B, MUTIC S, et al. A technique for the quantitative evaluation of dose distributions[J]. Med Phys, 1998, 25(5): 656-661.
- [21] BARNES M P, GREER P B. Evaluation of the truebeam machine performance check (MPC): mechanical and collimation checks[J]. J Appl Clin Med Phys, 2017, 18(3): 56-66.
- [22] BARNES M P, POMARE D, MENK F W, et al. Evaluation of the truebeam machine performance check (MPC): OBI X-ray tube alignment procedure[J]. J Appl Clin Med Phys, 2018, 19(6): 68-78.
- [23] 赖友群. 基于MPC的VitalBeam直线加速器束流一致性与准直系统性能检测[J]. 中国医疗器械信息, 2020, 26(18): 177-180.
- LAI Y Q. Performance check of beam consistency and collimation system of the vitalbeam accelerator based on MPC[J]. China Medical Device Information, 2020, 26(18): 177-180.
- [24] ALHARTHI T, ARUMUGAM S, VIAL P, et al. EPID sensitivity to delivery errors for pre-treatment verification of lung SBRT VMAT plans[J]. Phys Med, 2019, 59: 37-46.
- [25] 姚凯宁, 王若曦, 岳海振, 等. AAA和PDIP算法在非均整模式容积调强放射治疗剂量预测方面的差异[J]. 中国医学物理学杂志, 2020, 37(4): 419-425.
- YAO K N, WANG R X, YUE H Z, et al. Differences between anisotropic analytical algorithm and portal dose image prediction algorithm in dose prediction in volumetric modulated arc therapy using flattening filter free beams[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2020, 37(4): 419-425.

(编辑:薛泽玲)