

高分辨率半导体矩阵的剂量学特性

郑人川¹, 陈阿龙², 陈立新², 肖德涛¹

1. 南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 中山大学肿瘤防治中心/华南肿瘤学国家重点实验室, 广东 广州 510060

【摘要】目的:研究一种新的高分辨率探测器矩阵的临床剂量学特性。**方法:**使用泛野校准法,在直线加速器6 MV光子线下对矩阵进行一致性校准。测量矩阵的短期和长期稳定性、剂量线性、剂量率响应、射野大小依赖性,并与电离室的测量结果进行比较。测量相应能量下矩阵的表面等效厚度,测量射野离轴比曲线并且与三维水箱测量结果进行了比较。设计一组条形野,以及一组由不同大小方野形成的组合野,使用探测器矩阵和 Mapcheck 进行测量,并与治疗计划系统计算结果进行比较。**结果:**归一后矩阵的短期重复性标准偏差为0.075%,最大偏差为0.14%;长期重复性标准偏差为0.69%,最大偏差为0.92%。剂量线性经直线回归后的 $R^2=1.000\ 0$;在40~600 MU/min 剂量率范围内矩阵中心探头变化范围为0.62%;与指形电离室相比,在25 cm方野时射野输出因子偏差为1.2%,3 cm方野时为4.4%。在10 cm深度处校准时矩阵测量的离轴比曲线与三维水箱测量结果相对吻合,误差在2%以内;矩阵的表面等效厚度约为0.4~0.5 cm;在3%/3 mm和2%/2 mm标准下,Super Matrix和 Mapcheck 测量方野组合野计划的 γ 通过率分别为100.0%、98.8%和99.6%、97.5%。测量MLC条形野计划的 γ 通过率分别为99.1%、94.4%和99.4%、94.4%。**结论:**Super Matrix具有良好的剂量学特性,满足临床质量控制的基本要求。

【关键词】Super Matrix; 半导体; 剂量学; 质量控制

【中图分类号】R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2021)11-1343-06

Dosimetric characteristics of a high-resolution semiconductor matrix

ZHENG Renchuan¹, CHEN Along², CHEN Lixin², XIAO Detao¹

1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China; 2. State Key Laboratory of Oncology in South China/Sun Yat-sen University Cancer Center, Guangzhou 510060, China

Abstract: Objective To investigate the clinical dosimetric characteristics of a novel high-resolution detector matrix, Super Matrix. **Methods** The consistency calibration for the matrix was carried out under the 6 MV photon beam of linear accelerator using flood-field calibration method. The properties of the matrix including short-term and long-term stabilities, dose linearity, response at different dose rates and field size dependence were measured, and then the measurement results were compared with those obtained by ionization chamber. The surface equivalent thickness of the matrix was measured under the corresponding energy, and the off-axis ratio curve of the field was measured and then compared with the measurement results of three-dimensional water tank. A set of strip fields and a group of combined field which was composed of square fields of different sizes were designed, and the measurement results obtained by detector matrix and Mapcheck were compared with TPS calculation value. **Results** After normalization, the standard deviations of the short-term and long-term repeatabilities of the matrix were 0.075% and 0.69%, with the maximum deviation of 0.14% and 0.92%, respectively. The dose linearity $R^2=1.000\ 0$ after linear regression. The deviation of the probe at the center of the matrix was 0.62% in the dose rate range of 40 to 600 MU/min. Compared with the results obtained by thimble ionization chamber, the deviation of output factor was 1.2% in 25 cm square field and 4.4% in 3 cm square field. The off-axis ratio curve of the matrix measurements was closely matched the measurement results of three-dimensional water tank, when the matrix was calibrated at the depth of 10cm, and the deviation was within 2%. The surface equivalent thickness of the matrix was about 0.4 to 0.5 cm. Under the standards of 3%/3mm and 2%/2 mm, the gamma passing rates of combined field plans based on Super Matrix and Mapcheck measurements were 100.0%, 98.8%, and 99.6%, 97.5%, respectively, and the gamma passing rates of MLC strip field plans

【收稿日期】2021-05-15

【基金项目】广东省食管癌研究所科技计划(M201813)

【作者简介】郑人川, 硕士, 研究方向: 医学物理, E-mail: zhengrenc@163.com

【通信作者】肖德涛, E-mail: 13307478601@189.cn

were 99.1%, 94.4%, and 99.4%, 94.4%, respectively. **Conclusion** Super Matrix has good dosimetric characteristics to meet the basic requirements of clinical quality control.

Keywords: Super Matrix; semiconductor; dosimetry; quality control

前言

在放射治疗中，调强放射治疗(Intensity-Modulated Radiation Therapy, IMRT)和容积旋转放射治疗(Volumetric-Modulated Arc Therapy, VMAT)已成为国内外主流的放射治疗技术^[1-3]。与常规的放疗技术相比,IMRT和VMAT技术结合高精度的多叶光栅(Multi-Leaf Collimate, MLC)叶片使得高剂量分布区与靶区的适形度更好,然而治疗计划设计和执行过程也更复杂,存在许多不确定性,MLC叶片到位精度、机架旋转角度等出现微小偏差可能导致靶区剂量分布的偏差,因此在治疗前需要进行严格质量控制和剂量验证^[4-5]。目前常用的剂量验证设备主要包括 Mapcheck(Sun Nuclear 公司, 美国)这一类型的半导体矩阵,以及 Matrixx(IBA 公司, 比利时)这一类型的电离室矩阵。这些类型矩阵探测器之间的间距相对较大,一般在 7~10 mm 之间。因此,在部分治疗计划剂量验证中,由于探测器的数目不够充分或体积平均效应可能会影响验证结果的准确性^[6-7]。

在本研究中,笔者将针对一款高分辨率半导体探测器矩阵(Super Matrix, 瑞多思, 中国)进行研究,该矩阵目前正在逐步商用的过程中。由于该矩阵在临床应

用并不多,也未见相关剂量学特性的测试报道,因此本研究比较全面地评估其临床剂量学特性,期待在临床研究和临床应用方面有较好的帮助和启示。

1 材料与方法

1.1 实验设备

该矩阵主要由非晶硅半导体探测器组成,矩阵装置长 315 mm、宽 470 mm、高 24 mm,有效测量面积为 28.9 cm×28.9 cm,矩阵共有 2 048×2 048 个非晶硅半导体阵列探测器,探测器相互间距为 0.14 mm。玻璃体层面就是非晶硅探测器层面,厚度为 0.7 mm。矩阵及其结构如图 1 所示。不同于常规的电子射野影像系统(Electronic Portal Imaging System, EPID),该矩阵中没有荧光层。每个半导体探测器包含一个灵敏光电二极管和一个薄膜晶体管(Thin Film Transistor, TFT),当 X 射线入射时,在光电二极管的本征层产生电子空穴对,并且在外加电压作用下储存在光电二极管本身电容中。在采集图像信号期间,光电管不断充电,经过一段时间的采集后,逐行改变 TFT 的控制电压,使储存光电管的电信号送到数据输出线,经放大后由计算机转为数字图像信号。

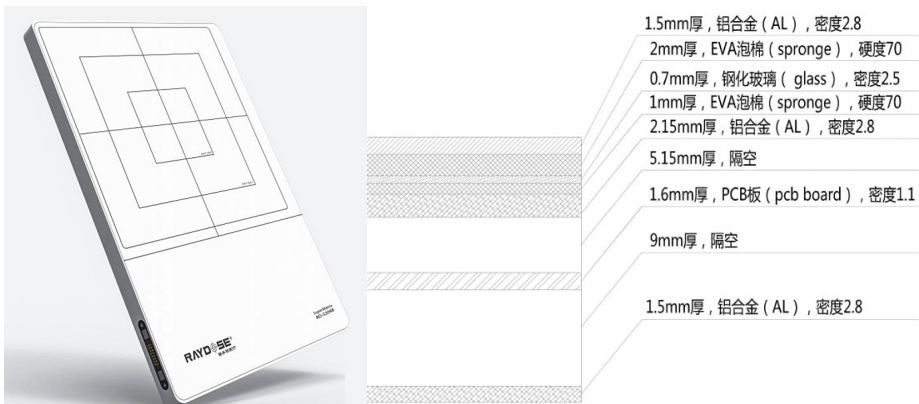


图1 探测器矩阵 Super Matrix 及其结构
Fig.1 Super Matrix and its structure

本研究所有测试均使用直线加速器(Vitalbeam, Varian 公司, 美国)6 MV 光子射线进行测量,该加速器配有 60 对 MLC 叶片,等中心层面叶片宽度为 0.5 cm,最大射野面积 40 cm×40 cm,最高剂量率 600 MU/min。采用 Varian 公司的 Eclipse15.5 治疗计划系统(Treatment Planning System, TPS)进行计划设计,计

算方法为 AXB 算法,计算网格大小为 2.0 mm。此外,采用三维水箱(IBA 公司, 瑞典)的测量数据进行离轴比曲线的比对,采用 PTW 公司的 31014 型(0.125 cm³)指形电离室进行点剂量的比对。使用的固体水材料密度为 1.045 g/cm³。

1.2 一致性校准

为了修正矩阵各探测器单元之间的差异带来的本底和灵敏度偏差,需要先对其进行一致性校准。主要是通过泛野图像(Flood-Field, FF)来进行校准^[8-10]。具体方法为:将探测器放置在加速器等中心,设置射野大小 30 cm×30 cm 以覆盖矩阵的有效探测区域。在加速器没有出束的条件下采集本底图像(Dark-Field, DF);在加速器出束的条件下采集泛野图像,由此校准每个腔室的灵敏度。校准公式为:

$$I(x,y)=\frac{I_{\text{raw}}(x,y)-DF(x,y)}{FF(x,y)-DF(x,y)}\times[FF(x,y)-DF(x,y)]_{\text{mean}}$$

其中 x,y 是像素点坐标, $DF(x,y)$ 是本底图像; $FF(x,y)$ 是泛野图像, $I_{\text{raw}}(x,y)$ 为探测器直接采集的影像灰度值, $I(x,y)$ 为经过校正后的影像灰度值。

在矩阵表面添加一定厚度的固体水材料,以便探测器获得不同的测量深度,包含矩阵表面厚度在内,分别在 0.5、5.0、7.5、10.0 以及 12.0 cm 共 5 个深度进行一致性校准。

1.3 离轴比曲线

在上述 5 个不同深度下进行一致性校准后,在源皮距(Source to Surface Distance, SSD)为 100 cm 的条件下,对应测量 10 cm 水深下 20 cm 方野的离轴比(Offset-Axis Ratio, OAR)曲线,共获得 5 组 OAR 曲线,并与相同条件下三维水箱电离室测量结果进行比对。

1.4 表面等效厚度

研究矩阵中探测器表面的等效厚度。设置 10 cm 方野,在 6 MV 光子线垂直照射条件下,出束 100 MU,保持 SSD 不变,在矩阵表面依次添加 0.5、0.8、0.9、1.0、1.1、1.2 和 1.5 cm 的固体水。每组重复测量 3 次取平均值。通过对比数据找到探测器表面的等效厚度。实验前测量加速器输出量的变化,其平均偏差小于 0.3%,确定加速器出束是稳定的。

1.5 稳定性和线性

设置 10 cm 方野,每次出束 100 MU,每隔 10 min 测量 1 次共 10 次用于观察短期稳定性;每个月测量 1 次共 6 次用于观察中长期的稳定性。设置跳数分别为 10、20、50、100、200、400、600 MU,用于测量探测器的线性。每次测量时通过电离室修正输出量偏差。

1.6 射野大小依赖性

在等中心条件下,表面添加 1 cm 固体水(有效深度为 1.5 cm),在 3~25 cm 方野范围内,用矩阵测量射野输出因子。测量时保证足够的背向散射。采用 0.125 cc 指形电离室在相同条件下测量并与之比较。

1.7 剂量率响应

设置 10 cm 方野,射线垂直照射。矩阵平板放在

5.0 cm 固体水上,表面添加 1 cm 固体水,矩阵放置于加速器等中心,剂量率分别为 40、60、100、200、300、400、500、600 MU/min,100 MU 剂量出束,用 0.125 cc 指形电离室在相同条件下测量并与之比较。

1.8 组合野和MLC计划剂量验证

采用 Shaper 软件(Varian 公司,美国)设计两组测试例:(1)一组由 3、5、10、15、20、25 cm 的方野形成的组合野,每个方野接受的机器跳数为 100 MU;(2)参考 TG119 号报告^[11],设计一组条形野,在 14 cm×21 cm 射野内以静态调强方式(Step and Shoot, SS)运动,每个条形野宽度为 3.0 cm,照射跳数为 100 MU。使用 Super Matrix 和临床使用的 Mapcheck 半导体矩阵对上述两个测试例进行验证。采用 γ 通过率分别比较两个矩阵测量的剂量分布与 TPS 计算的剂量分布,并采用 3%/3 mm 和 2%/2 mm 的剂量偏差和位置误差(Distance-to-Distance, DTA)标准进行比较,以全局归一方式计算剂量差异。

2 结果

2.1 OAR 曲线

采用不同深度进行校准后,使用矩阵测量射野 OAR 曲线,并与三维水箱的扫描结果比对,如图 2 所示。从结果来看,在 10 cm 深度处校准矩阵时,OAR 曲线与三维水箱结果相对更加吻合,在射野区域内(中心点 80% 范围内),其最大误差在 2% 以内,采用其他深度进行刻度时,矩阵与三维水箱扫描结果的偏差会相对增加。

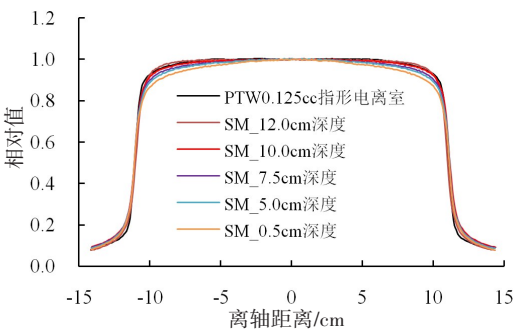


图 2 20 cm 方野下 Super Matrix 与三维水箱扫描的离轴比曲线比对结果

Fig.2 Comparison of the off-axis ratio curve measured by Super Matrix and that obtained by three-dimensional watertank on a 20 cm square field

2.2 建成效应

当添加 0.5、0.8、0.9、1.0、1.1、1.2、1.5 cm 厚度的固体水,探测器读数分别是最大读数的 97.25%、99.60%、99.94%、100%、99.89%、99.67%、98.82%,其中,添加 1.0 cm 固体水时读数最大。具体结果如图 3

所示,由于测量的百分深度剂量曲线显示该能量下最大剂量深度在1.4~1.5 cm之间,因此可计算出矩阵表面的有效后端大约在0.4~0.5 cm之间。

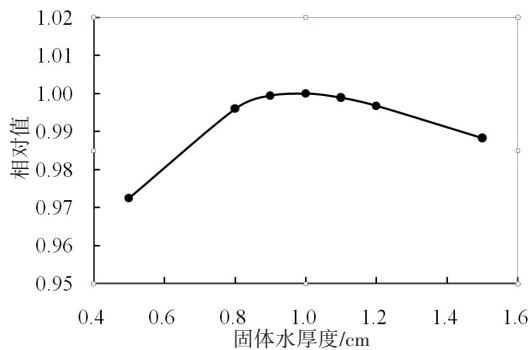


图3 Super Matrix表面添加固体水后探头的响应
Fig.3 Response of the probe after adding solid water to the surface of Super Matrix

2.3 稳定性

稳定性变化曲线如图4和图5所示。其中短期稳定性的标准偏差为0.075%,最大偏差为0.14%;长期稳定性的标准偏差为0.69%,最大偏差为0.92%。

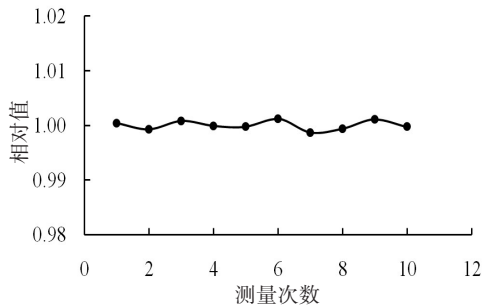


图4 Super Matrix短期稳定性曲线
Fig.4 Short-term stability of Super Matrix

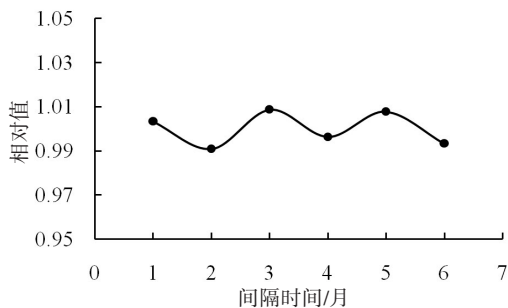


图5 Super Matrix长期稳定性曲线
Fig.5 Long-term stability of Super Matrix

2.4 剂量线性

对机器跳数与测量值做线性拟合,结果如图6所示, $R^2=1.000\ 0$,拟合曲线所得理论值与实测值的偏差 $<0.04\%$ 。

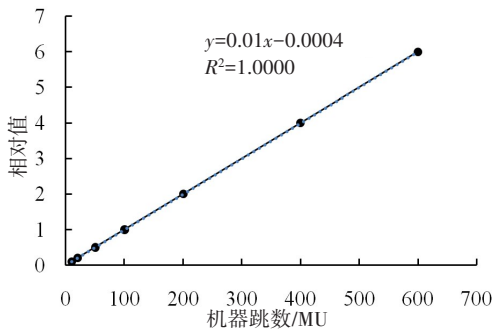


图6 剂量线性测量结果
Fig.6 Measurement result of dose linearity

2.5 剂量率响应

矩阵与电离室的剂量率响应测量结果如图7所示,两组数据均以600 MU/min 剂量率测量值归一。可见在不同剂量率条件下,矩阵中心探头变化范围为0.62%,与电离室相比,剂量率越小,偏差越大。

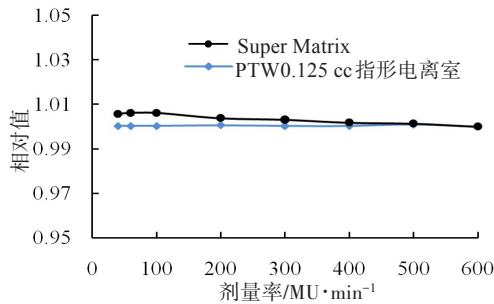


图7 Super Matrix和指形电离室剂量率响应
Fig.7 Response at different dose rates of Super Matrix and thimble ion-chamber

2.6 射野大小依赖性

图8显示矩阵测量3~25 cm方野的输出因子结果,按10 cm方野归一。与电离室测量结果比较后可以看出,射野越大,测量结果的偏差越来越大,25 cm方野处的偏差为1.2%左右;而当射野越来越小的时候,矩阵测量结果的偏差也越来越小,3 cm方野时偏差为4.4%左右。整个曲线的形状比电离室测量结果明显陡峭。

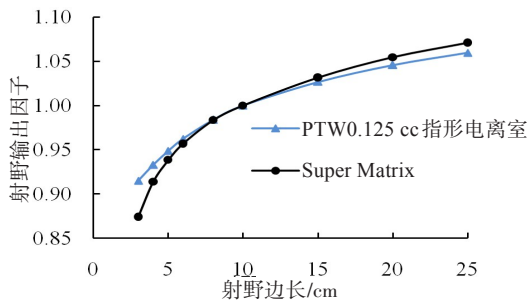


图8 Super Matrix和指形电离室的射野输出因子
Fig.8 Output factor of Super Matrix and thimble ion-chamber

2.7 组合野和MLC计划剂量验证

在 3%/3 mm 标准下 , Super Matrix 和 Mapcheck 测量方野组合野计划的 γ 通过率分别为 100.0%、98.8%;在 2%/2 mm 标准下分别为 99.6%、97.5%。在 3%/3 mm 标准下 , Super Matrix 和 Mapcheck 测量

MLC 条形野计划的 γ 通过率分别为 99.1%、94.4%;在 2%/2 mm 标准下分别为 99.4%、94.4%。图 9~12 分别为 Super Matrix 和 Mapcheck 测量剂量分布分别与 TPS 计算剂量分布的对比曲线。

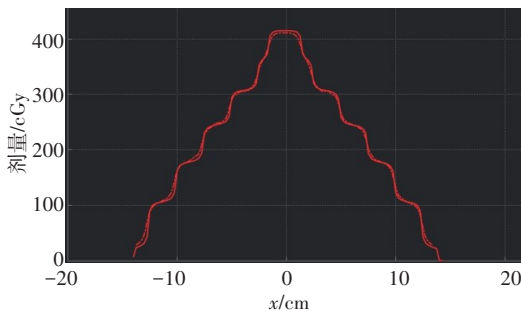


图9 Super Matrix测量与TPS计算的方野组合野计划剂量分布曲线
Fig.9 Profile curve of the dose distribution in combined field plans measured by Super Matrix and calculated by TPS
实线为TPS计算剂量分布,虚线为Super Matrix测量剂量分布

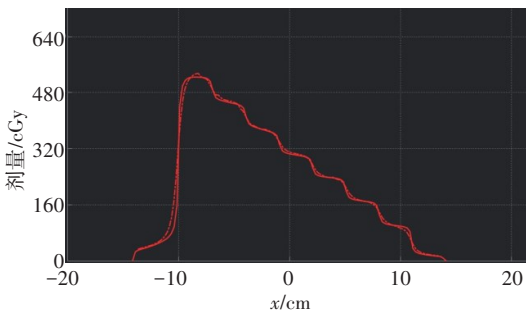


图10 Super Matrix测量与TPS计算的条形野计划剂量分布曲线
Fig.10 Profile curve of the dose distribution in strip field plans measured by Super Matrix and calculated by TPS
实线为TPS计算剂量分布,虚线为Super Matrix测量剂量分布

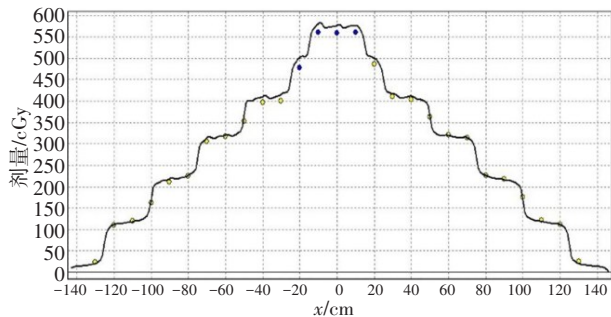


图11 Mapcheck测量与TPS计算方野组合野剂量分布曲线
Fig.11 Profile curve of the dose distribution in combined field plans measured by Mapcheck and calculated by TPS

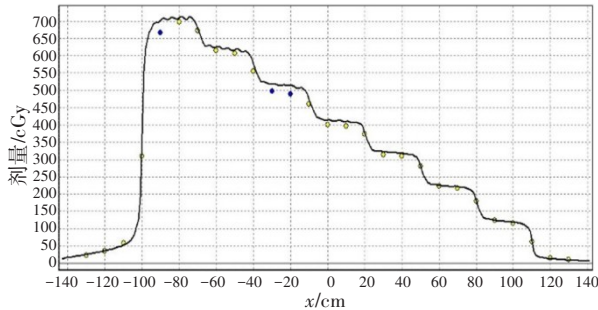


图12 Mapcheck测量与TPS计算条形野剂量分布曲线
Fig.12 Profile curve of the dose distribution in strip field plans measured by Mapcheck and calculated by TPS

3 讨论

稳定性和剂量学线性是探测器是否满足临床应用的最重要的两个剂量学指标。目前常用的剂量验证设备主要有半导体矩阵(例如 Mapcheck, Sunnuclear 公司, 美国)、电离室矩阵(例如 Matrixx, IBA 公司, 比利时)以及 EPID。上述探测器的剂量学特性有不少相关报道^[7, 12]。从本研究结果来看,所研究的矩阵类似上述探测器,也具有好的测量稳定性和剂量学线性。满足临床剂量学测量的基本条件。

由于矩阵的各个探测器灵敏度之间存在差异,使用前需要进行一致性校准。该矩阵类似 EPID,也是高分辨率的矩阵,因此无法用传统的校准方式逐个探头进行校准。此处借鉴了 EPID 的“泛野”校准法。由于不同深度下的“泛野”内,其剂量或多或少存在“隆起”和“凹陷”部分,并非处处均匀,使得图像

的校准存在差异。在本研究中,测试了不同深度下的一致性校准对 OAR 曲线测量的影响。从结果来看,在 10 cm 深度处刻度后,获得结果与三维水箱的测量结果更接近。这与 Greer 等^[9]对 EPID 的研究结果类似。这也提示:对这一类高分辨率探测器进行泛野修正的基础上,需要采用其他的方法,例如相应的数学方法作进一步修正,才能获得更准确的测量结果^[13]。

本研究采用剂量学方法测定了 6 MV 光子线下探测器表面的等效厚度,研究结果显示在 0.4~0.5 cm 之间。因此,在使用该矩阵进行射野或计划的剂量测量时,可添加一定厚度的等效水材料,尽量避免在建成区内测量,还可以减少部分电子污染。如果使用了其他能量的光子线,需要重新评估该矩阵的表面等效厚度。

从剂量率响应的研究结果来看,随着剂量率的增加,矩阵的剂量响应呈下降趋势,但总体的偏差小

于1%。因此,该矩阵运用于可变剂量率的治疗技术,例如VMAT剂量验证方面,能够满足临床要求。此外,该剂量学特性也类似EPID的相关特性,但表现相对更好一些。例如Chatelain等^[14]报道的EPID在100~600 MU/min剂量率范围内,其探测器的剂量响应随剂量率增加而下降了1.4%。Kavuma等^[15]研究的结果显示,在100~600 MU/min剂量率范围内,不同EPID的最大灵敏度变化范围大致为1%~1.8%,对于不同射野大小的依赖性来说,从图8可以看出,其偏差趋势是“两头”偏差越来越大。即相对于某固定值,射野越小或越大,其偏差越来越大。这主要是由于非晶硅探测器的低能“过响应”引起:射野越小,低能散射线少,响应低,因此测量结果更加偏小;反之,射野越大,低能射线多,响应越高,测量结果更加偏大^[16]。类似EPID在剂量测量中的临床应用,同样需要采用相应方法对射线依赖性进行修正。例如,采用一定的数学方法,如卷积函数进行修正,就可使得相应的偏差降低到0.5%以内^[17]。

Mapcheck是目前临床剂量验证中最常用的验证设备,以往的研究表明Mapcheck在IMAT计划预处理质量保证方面具有优势^[18-19],因此本研究采用Mapcheck与Super Matrix进行对比。从测量结果来看,基于Super Matrix测量的两组测试例的剂量分布与治疗计划系统计算的剂量分布符合性较好,与Mapcheck测量结果对比,两者几乎无差别。当然,这只是针对两组简单的测试例,至于能否运用于临床计划,这有待于对实际病例计划验证的研究。

从剂量学特性的研究结果来看,该矩阵具备了临床应用的基本条件。由于其有超高的空间分辨率,因此有望作为一个独特的工具应用于剂量学的质量保证。但类似于EPID的剂量学特性,也存在一些明显的缺陷,例如低能“过响应”的特性。在开展更广泛的临床应用前,还需要对相应的修正方法进行更深入的研究,这也是下一步即将开展的研究工作。

【参考文献】

- [1] ALHAZMI A, GIANOLI C, NEPL S, et al. A novel approach to EPID-based 3D volumetric dosimetry for IMRT and VMAT QA [J]. *Phys Med Biol*, 2018, 63(11): 115002.
- [2] JEONG Y, OH J G, KANG J K, et al. Three-dimensional dose reconstruction-based pretreatment dosimetric verification in volumetric modulated arc therapy for prostate cancer[J]. *Radiat Oncol*, 2020, 38(1): 60-67.
- [3] SZCZUREK L, JUSZKAT R, SZCZUREK J, et al. Pre-treatment 2D and 3D dosimetric verification of volumetric arc therapy. A correlation study between gamma index passing rate and clinical dose volume histogram[J]. *PLoS One*, 2019, 14(8): e0221086.
- [4] LI G, ZHANG Y, JIANG X, et al. Evaluation of the ArcCHECK QA system for IMRT and VMAT verification[J]. *Phys Med*, 2013, 29(3): 295-303.
- [5] YI X, LU W L, DANG J, et al. A comprehensive and clinical-oriented evaluation criteria based on DVH information and gamma passing rates analysis for IMRT plan 3D verification[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2020, 21(8): 47-55.
- [6] LETOURNEAU D, GULAM M, YAN D, et al. Evaluation of a 2D diode array for IMRT quality assurance[J]. *Radiother Oncol*, 2004, 70(2): 199-206.
- [7] 李承军, 张爱华, 王陆洲, 等. Mapcheck的剂量学质量保证[J]. *中国医学物理学杂志*, 2010, 27(3): 1833-1836.
- [8] LI C J, ZHANG A H, WANG L Z, et al. Dosimetric quality assurance for Mapcheck[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2010, 27(3): 1833-1836.
- [9] PARSAEI H, EL-KHATIB E, RAJAPAKSHE R. The use of an electronic portal imaging system to measure portal dose and portal dose profiles[J]. *Med Phys*, 1998, 25(10): 1903-1909.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] EZZELL G A, BURMEISTER J W, DOGAN N, et al. IMRT commissioning: multiple institution planning and dosimetry comparisons, a report from AAPM Task Group 119[J]. *Med Phys*, 2009, 36(11): 5359-5373.
- [13] ANVARI A, AGHAMIRI S M, MAHDAVI S R, et al. Dosimetric properties of fluoroscopic EPID for transit dosimetry[J]. *J Radiother Pract*, 2015, 14(1): 27-34.
- [14] WARKENTIN B, STECIW S, RATHEE S, et al. Dosimetric IMRT verification with a flat-panel EPID[J]. *Med Phys*, 2003, 30(12): 3143-3155.
- [15] CHATELAIN C, VETTERLI D, HENZEN D, et al. Dosimetric properties of an amorphous silicon EPID for verification of modulated electron radiotherapy[J]. *Med Phys*, 2013, 40(6): 061710.
- [16] KAVUMA A, GLEGG M, CURRIE G, et al. Assessment of dosimetrical performance in 11 Varian a-Si500 electronic portal imaging devices[J]. *Phys Med Biol*, 2008, 53(23): 6893-6909.
- [17] TYNER E, MCCLEAN B, MCCAVANA P, et al. Experimental investigation of the response of an EPID to an unflattened photon beam from an Elekta precise linear accelerator[J]. *Med Phys*, 2009, 36(4): 1318-1329.
- [18] ZHU J H, CHEN L X, CHEN A L, et al. Fast 3D dosimetric verifications based on an electronic portal imaging device using a GPU calculation engine[J]. *Radiat Oncol*, 2015, 10: 85.
- [19] 谢家存, 韩倩, 雄建超, 等. 基于Mapcheck2的调强放疗计划剂量验证分析[J]. *中国实用医刊*, 2018, 45(2): 1-3.
- [20] XIE J C, HAN Q, LUO J C, et al. Dosimetric verification analysis for intensity modulated radiation therapy based on Mapcheck2 [J]. *Chinese Journal of Practical Medicine*, 2018, 45(2): 1-3.
- [21] JIMENEZ-MELGUIZO M, ESPINOSA M, MONTES J, et al. Response of the ArcCHECK (R) device at 6 MV and 15 MV for VMAT and IMRT quality control[J]. *Med Phys*, 2020, 80: 373-382.

(编辑:薛泽玲)