

## ArcCheck的剂量学特性测量及其对VMAT计划的验证

王涛<sup>1</sup>,程秀艳<sup>2</sup>,郭跃信<sup>1</sup>

1. 郑州大学第一附属医院放射治疗部, 河南 郑州 450000; 2. 河南省肿瘤医院放疗科, 河南 郑州 450000

**【摘要】目的:**对ArcCheck的剂量学特性进行测量,分析ArcCheck的剂量学特性曲线,探讨ArcCheck能否满足临床使用的要求。**方法:**分别测量ArcCheck的重复性、能量响应、角度响应和剂量率响应。**结果:**归一后ArcCheck的重复性为 $0.9906 \pm 0.0090$ 。能量响应分析表明经过直线回归后的常数项为-0.2575,标准差为0.1215;回归系数为1.4643,标准差为 $5.3687 \times 10^{-4}$ 。角度响应的曲线符合探测器表面的模体材料厚度变化。剂量率的变化对探头的测量结果影响很小。**结论:**ArcCheck模体探测器的剂量学特性满足临床使用的要求,可以对容积弧形调强计划进行验证。

**【关键词】**剂量学特性;ArcCheck;线性;剂量率响应;容积调强放射治疗

**【中图分类号】**R811.1

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2019)03-0277-05

### Measurement of the dosimetric characteristics of ArcCheck and its application in VMAT plan verification

WANG Tao<sup>1</sup>, CHENG Xiuyan<sup>2</sup>, GUO Yuexin<sup>1</sup>

1. Department of Radiotherapy, the First Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China; 2. Department of Radiotherapy, He'nan Cancer Hospital, Zhengzhou 450000, China

**Abstract: Objective** To measure the dosimetric characteristics of ArcCheck and analyze the dosimetric characteristic curves of the detector for determining whether ArcCheck can meet the clinical requirements. **Methods** The reproducibility, energy response, angle response and dose-rate response of ArcCheck were measured. **Results** The normalized reproducibility of ArcCheck was  $0.9906 \pm 0.0090$ . The analysis of energy response showed that after linear regression, the constant term was -0.2575, with a standard deviation of 0.1215, while the regression coefficient was 1.46431, with a standard deviation of  $5.36872 \times 10^{-4}$ . The curve of angle response accorded with the variations in the thickness of the superficial materials. Moreover, the changes in dose rate had trivial effects on the measurement. **Conclusion** The dosimetric characteristics of ArcCheck meet the clinical requirements, and ArcCheck can be applied in the verification of VMAT plan.

**Keywords:** dosimetric characteristic; ArcCheck; linearity; dose rate response; volumetric modulated arc therapy

### 前言

肿瘤放射治疗技术的快速发展使得医用电子直线加速器越来越广泛地应用于放射治疗。三维适形放疗、调强放疗、图像引导放疗等新技术的应用对放射治疗的质量保证/质量控制不断提出新的要求<sup>[1]</sup>。容积调强放射治疗技术(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT)作为一种新的调强放疗实现方式,越来越多地应用于肿瘤的放射治疗。VMAT技术的

复杂程度对治疗前的质量保证和剂量验证要求也越来越高。传统的胶片验证方法费时费力,也比较浪费资源。三维半导体矩阵在VMAT计划的验证上相对比较简便,已广泛应用于VMAT计划的剂量验证<sup>[2]</sup>。本研究旨在对三维半导体矩阵ArcCheck模体探测器的剂量学特性进行测量,对其性能进行分析,从而为放射治疗提供指导。

### 1 材料与方法

#### 1.1 材料

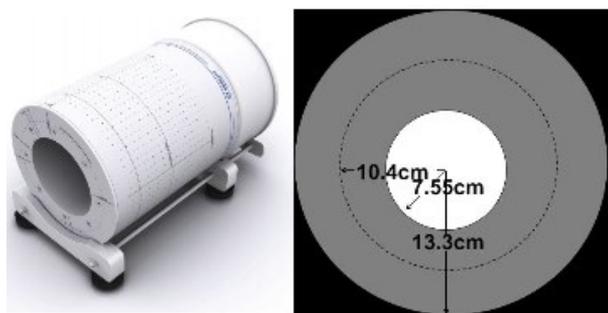
本研究采用Varian Eclipse计划系统、美国Varian RapidArc直线加速器和螺旋形半导体探测器阵列ArcCheck及其配套的SNC Patient V6.1.1剂量分析软件。ArcCheck螺旋形半导体探测器阵列(图1a)

**【收稿日期】**2018-09-20

**【作者简介】**王涛, 硕士, 主管技师, 研究方向: 辐射剂量学, E-mail: ttwangtt@sina.cn

**【通信作者】**郭跃信, 硕士, 主任技师, 研究方向: 放射物理, E-mail: 13838081115@126.com

共有 1 386 个探测器,分别植入距离 ArcCheck 模体中心均为 10.4 cm 的 22 块呈正 22 边形排列的印刷电路板上,每块电路板上等距离分布 3 列探测器进行三维剂量验证<sup>[3]</sup>。所采用的探测器为 Sun Nuclear SunPoint<sup>®</sup>Diode Detectors,探测器横截面和灵敏体积分别为 0.64 mm<sup>2</sup>、0.000 019 cm<sup>3</sup>,临床上被证明为是最小、最稳定、最适合做复杂调强计划质量保证的探测器。ArcCheck 模体是中空的圆柱体,内直径为 15.1 cm,外直径为 26.6 cm(图 1b),中空部分可插入测量使用的套件。



a: ArcCheck 螺旋形半导体探测器阵列  
b: ArcCheck 模体

图 1 三维半导体矩阵 ArcCheck 及其内部结构

Fig.1 Three-dimensional semiconductor matrix ArcCheck and its internal structure

### 1.2 ArcCheck 模体探测器剂量学特性的测量

**1.2.1 重复性** 射野大小为 27 cm×25 cm,机架角与机头角度均为 0°,6 MV X 线,剂量率为 400 MU/min,机器跳数为 100 MU,在加速器物理模式下出束,使用 SNC Patient V6.1.1 剂量分析软件记录模体探测到的绝对剂量,重复测量 20 次。

**1.2.2 能量响应** 射野大小为 27 cm×25 cm,机架角与机头角度均为 0°,6 MV X 线,剂量率为 400 MU/min,机器跳数分别为 5、10、15、20、25、30、40、50、60、70、80、90、100、200、300、400、500、600 MU,在加速器物理模式下出束,重复测量 3 次取平均。利用 Excel 2003 办公软件进行线性度计算。

**1.2.3 角度响应** 射野大小为 27 cm×25 cm,6 MV X 线,剂量率为 400 MU/min,机器跳数为 100 MU,机头角度为 0°,机架角从 180°开始 15°等间隔测量一周至 195°,在加速器物理模式下出束,重复测量 3 次取平均。

**1.2.4 剂量率响应** 射野大小为 27 cm×25 cm,机架角与机头角度均为 0°,6 MV X 线,机器跳数为 100 MU,在加速器物理模式下出束,剂量率分别为 100、200、300、400、500、600 MU/min,重复测量 5 次取平均值。

### 1.3 VMAT 计划验证的测量

选取郑州大学第一附属医院自 2015 年 8 月到 2016 年 8 月的 150 例病人(其中宫颈癌、食管癌和鼻咽癌各 50 例)的 VMAT 计划进行三维剂量验证,将 ArcCheck 置于加速器治疗床上,对 ArcCheck 进行本底校准、矩阵校准和绝对剂量校准。在加速器临床模式下,按照模体验证计划出束。将测量结果与治疗计划进行比较,取最大剂量点为归一点,去除剂量值小于归一点剂量 10% 的点,采用绝对剂量结合等剂量距离差别的计算方法,分别取 3%/3 mm 和 2%/2 mm 标准得到每个计划的通过率。

### 1.4 统计学处理

数据的处理采用 SPSS 18.0 统计学软件,曲线的获取采用 Excel 2003 办公软件。

## 2 结果

### 2.1 重复性

以 20 次测量所得的模体顶部正中探头的绝对剂量的平均值归一,得到重复性的变化曲线(图 2)。统计软件分析得出 20 次测量值归一后的平均值为 0.990 6,标准差为 0.009 0。

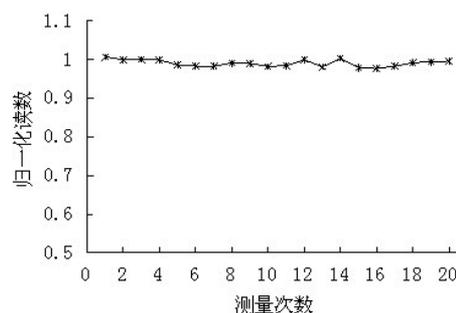


图 2 重复性的曲线

Fig.2 Curve of reproducibility

### 2.2 能量响应

对机器跳数为 5~600 MU 时所测得的模体顶部正中探头的绝对剂量做直线回归(图 3),得到拟合的回归方程为:

$$Y = -0.257 5 + 1.464 3X \tag{1}$$

其中, X 为机器跳数; Y 为模体顶部正中探头的吸收剂量;常数项为 -0.257 5,标准差为 0.121 5。回归系数反映了 ArcCheck 的能量响应,其标准差为 5.368 7E-4。在机器跳数为 5~600 MU 时,探头依然具有十分良好的线性度。

### 2.3 角度响应

在 ArcCheck 模体上集成所有 1 386 个探测器的 22 块印刷电路板(在横断面上呈正 22 边形分布)。考

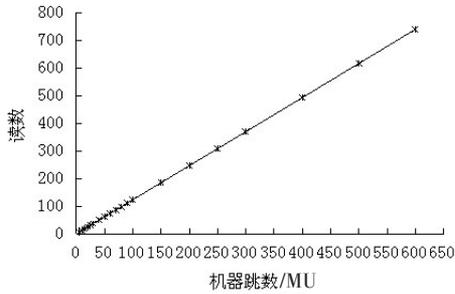


图3 能量响应的曲线  
Fig.3 Curve of energy response

考虑左右对称性,对 ArcCheck 顶部左侧纵轴方向上的 21 个探测器在 180°~195°内的测量值求平均,以模体测量的最大值归一,得到角度响应的曲线(图4)。

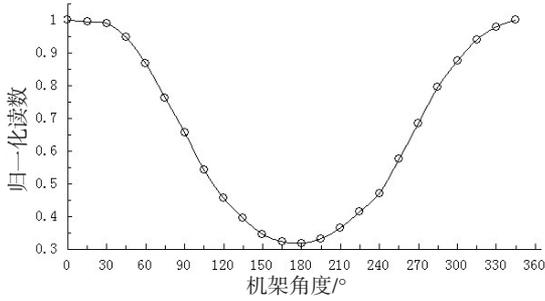


图4 角度响应的曲线  
Fig.4 Curve of angle response

### 2.4 剂量率响应

将测量得到的不同剂量率的模体顶部正中探头的绝对剂量以治疗时常用的剂量率(400 MU/min)归

一,得到剂量率响应的曲线(图5)。归一化读数的平均值为0.997 5,标准差为0.005 5。

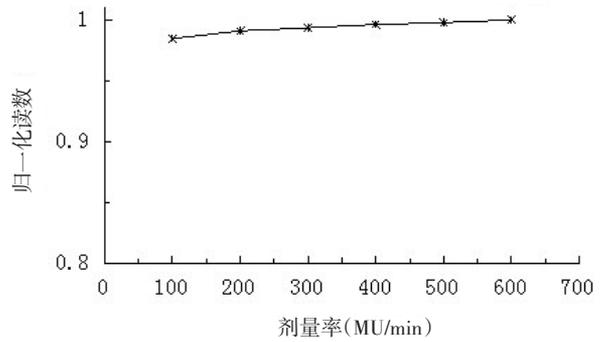


图5 剂量率响应的曲线  
Fig.5 Curve of dose-rate response

### 2.5 计划剂量验证

VMAT 计划的剂量验证计划过程如图6所示。导入 ArcCheck 模体(模体的 CT 图像由郑州大学第一附属医院的 TomoTherapy 的 MVCT 扫描得到),将患者的治疗计划移植入 ArcCheck 模体中,得出模体的 VMAT 计划。

VMAT 计划 ArcCheck 剂量验证所得的剂量分布与 TPS 计算结果的比较分析如图7所示。其中, ArcCheck 模体比较的是圆柱体摊开后的二维剂量分布图,这相当于将圆柱形的模体从一个位置剪开,摊成一个平面再与计划里的相同平面的剂量分布进行比较。

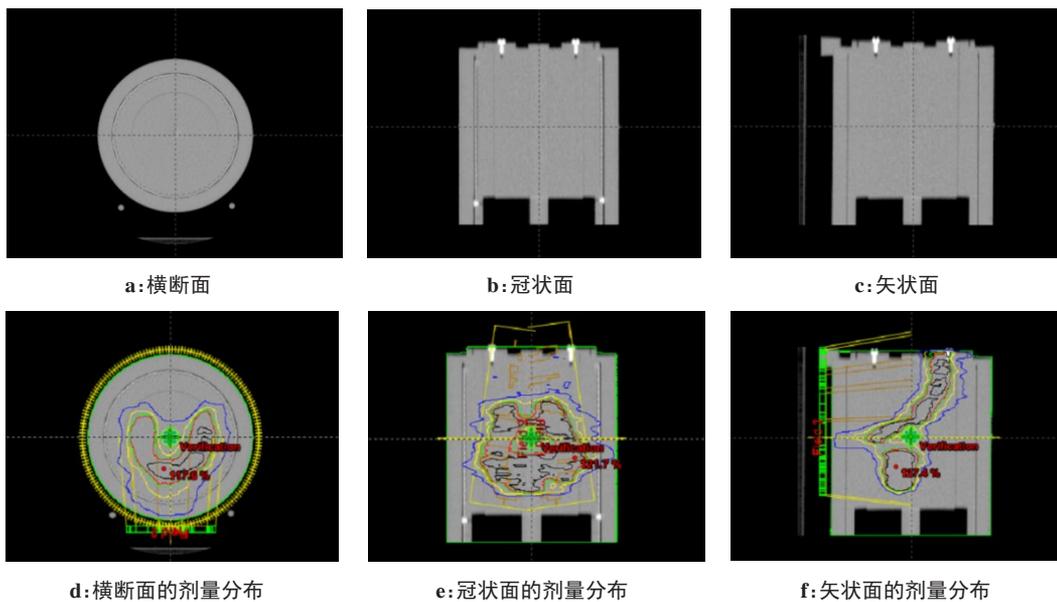


图6 ArcCheck 模体验证计划示意图

Fig.6 ArcCheck phantom for VMAT plan verification

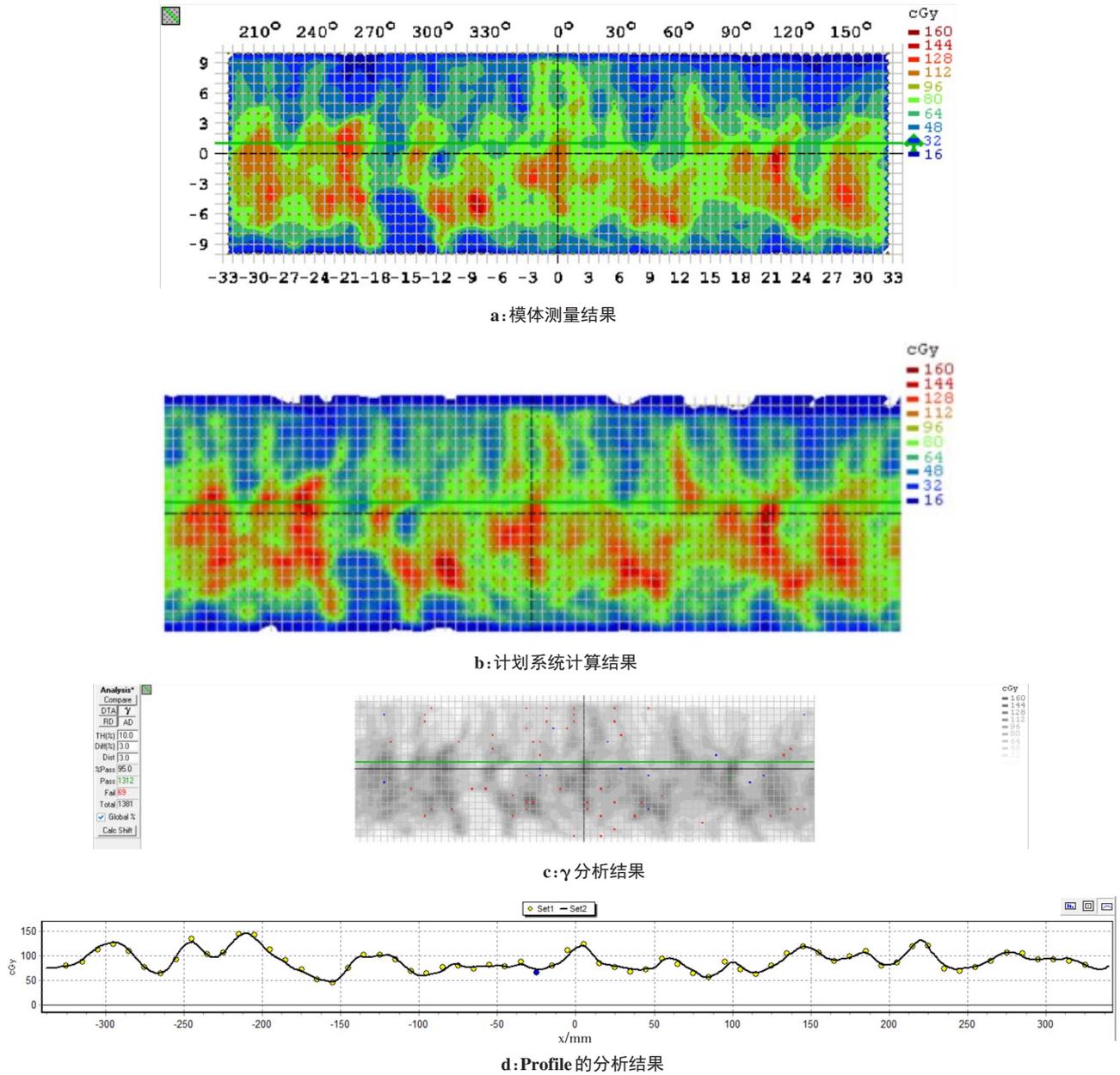


图7 ArcCheck 剂量验证分析示意图  
 Fig.7 Analysis of ArcCheck dose verification

150 例患者 VMAT 计划的通过率为:(1)3%/3 mm 标准的通过率均值为 98.227%,标准差为 2.3159;(2)2%/2 mm 标准的通过率均值为 92.442%,标准差为 6.999 8。

### 3 讨论

VMAT 计划的高度复杂性决定了其在计划执行前必须进行准确的剂量验证,以保证计划可以准确实施。三维半导体矩阵 ArcCheck 可以直接获得三维的剂量分布,方便快捷。只有保证 ArcCheck 模体探测器的剂量学特性满足临床使用的要求,才可以使用 ArcCheck 对 VMAT 计划进行剂量验证。本研究的结果表明:ArcCheck 模体探测器的剂量学特性良好,满足临床使用的要求。

ArcCheck 的剂量学特性中,重复性偏差为  $0.990 6 \pm 0.009 0$ ,反映了 ArcCheck 的稳定性,而 ArcCheck 的稳定性很大程度上取决于其采用的硅探测器。硅探测器连续重复 15 次测量,每次机器跳数 60 MU,探测器的响应变化为  $\pm 0.15\%$ <sup>[4]</sup>。距标定 9 个月后,采用该型探测器的 MapCheck 的探测器响应变化为  $\pm 0.2\%$ <sup>[5]</sup>。部分研究也证明采用 SunPoint Diode Detector 的探测器阵列的稳定性比空气电离室阵列好<sup>[6-8]</sup>。

现代放疗已进入高精度放疗时代,大剂量少分次成为可能。作为质控设备的探测器阵列的能量响应必须在接受大剂量照射时仍保持很好的线性度。经过直线回归后的回归系数为  $1.464 3 \pm 5.368 7 \times 10^{-4}$ ,回归系数的变化值越小,证明 ArcCheck 的能量响应越

好。本研究中机器跳数在5~600 MU时,探测器仍具有很好的能量响应。文献[5]报道 ArcCheck 所用的探测器的线性度变化为 $\pm 0.1\%$ 。半导体探测器在接受很高剂量时仍可以保持很好的线性度<sup>[9-11]</sup>。

对于大体积的靶区, ArcCheck 的角度依赖性是一个重要的影响因素<sup>[3]</sup>。本研究测量所得的探测器的角度响应的曲线符合探测器表面覆盖模体材料厚度的变化规律,与 Hrbacek 等<sup>[12]</sup>得到的结果类似,但本研究所采用的方法更为简便,可操作性更强。

VMAT 技术通过调整单弧或多弧内任意角度的多叶准直器形状和改变剂量率来实现靶区内部的剂量均匀性,因此探测器的剂量率响应也是影响 VMAT 计划剂量验证的重要因素。本研究中 ArcCheck 模体探测器的剂量率响应归一后平均值为 0.997 5, 标准差为 0.005 5, 显示出与剂量率的不相关性。Létourneau 等<sup>[4]</sup>报道 MapCheck 的电离室用 Elekta SL20 加速器测量时, 50~600 MU/min 剂量率响应平均值为 0.984。Kozelka 等<sup>[11]</sup>报道 ArcCheck 的电离室在 Varian Trilogy 和 TrueBeam 加速器测量时, 50~600 MU/min 剂量率响应为 0.987。均与本研究的测量值接近。

对于 VMAT 计划三维验证的 $\gamma$ 分析的 3%/3 mm 标准被广泛采用<sup>[13-15]</sup>, TG 119 号报告中 VMAT 的平均通过率在 Local dose 归一时 3%/3 mm 标准和 Globally dose 归一时 2%/2 mm 标准均大于 90%。Fredh 等<sup>[16]</sup>的研究认为 3%/3 mm 的标准可能不够灵敏, 无法检测到引入的误差, 认为 2%/2 mm 的标准是更好的, 但会增加发现不重要错误的风险。因此建议在病人质量保证时要明确自己想做什么检测, 找什么样的误差。Nelms 等<sup>[17]</sup>也提出目前普遍采用的 3%/3 mm 标准不足以在计划系统验收时提供最佳的调试结果, 建议采用更敏感的标准。因此本研究中患者的验证计划采用了 3%/3 mm 和 2%/2 mm 的双重标准来衡量, ArcCheck 在 150 例患者 VMAT 计划的通过率在 3%/3 mm 和 2%/2 mm 标准时分别为 98.227% 和 92.442%, 均在 90% 以上, 符合 VMAT 剂量验证的要求。易金玲等<sup>[18]</sup>报道了 ArcCheck 与胶片在鼻咽癌 VMAT 计划剂量验证的结果没有明显差异, 说明使用 ArcCheck 对复杂 VMAT 计划进行剂量验证的可行性。

ArcCheck 探测器的排列方式为螺旋形排列, 这就导致了没有任何两个探头位于任何单轴面, 但在较宽的射野中单环的纵向位移可以忽略<sup>[2]</sup>。Kozelka 等<sup>[11]</sup>采用的测量射野也为 27 cm $\times$ 25 cm, 因此尽管 ArcCheck 模体探测器的有效测量长度为 21 cm, 本研究中所采用的所有射野均为 27 cm $\times$ 25 cm。

对 ArcCheck 探测器的剂量学特性的测量证明其各项性能指标均能很好地满足临床使用的要求, 对 VMAT 计划的验证结果表明 ArcCheck 可以作为日常 VMAT 计划剂量验证的工具。

## 【参考文献】

- [1] 高枫. 医用电子直线加速器的性能检测与质量保证[J]. 现代医药卫生, 2006, 22(6): 797-798.  
GAO F. Examining the performance and quality assurance of linear accelerator[J]. Modern Medicine & Health, 2006, 22(6): 797-798.
- [2] LÉTOURNEAU D, PUBLICOVER J, KOZELKA J, et al. Novel dosimetric phantom for quality assurance of volumetric modulated arc therapy[J]. Med Phys, 2009, 36(5): 1813-1821.
- [3] FEYGELMAN V, ZHANG G, STEVENS C, et al. Evaluation of a new VMAT QA device, or the "X" and "O" array geometries[J]. J Appl Clin Med Phys, 2011, 12(2): 146-168.
- [4] LÉTOURNEAU 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.
- [5] JURSNIC P A, NELMS B E. A 2-D diode array and analysis software for verification of intensity modulated radiation therapy delivery[J]. Med Phys, 2003, 30(5): 870-879.
- [6] AMERIO S, BORIANO A, BOURHALEB F, et al. Dosimetric characterization of a large area pixel-segmented ionization chamber [J]. Med Phys, 2004, 31(2): 414-420.
- [7] SPEZI E, ANGELINI A L, ROMANI F, et al. Characterization of a 2D ion chamber array for the verification of radiotherapy treatments[J]. Phys Med Biol, 2005, 50(14): 3361-3373.
- [8] LI J G, YAN G H, LIU C. Comparison of two commercial detector arrays for IMRT quality assurance[J]. J Appl Clin Med Phys, 2009, 10(2): 62-74.
- [9] REYNOLDS M, FALLONE B, RATHEE S. Dose response of selected solid state detectors in applied homogeneous transverse and longitudinal magnetic fields[J]. Med Phys, 2014, 41(9): 092103.
- [10] REYNOLDS M, FALLONE B G, RATHEE S. Technical note: response measurement for select radiation detectors in magnetic fields[J]. Med Phys, 2015, 42(6): 2837-2840.
- [11] KOZELKA J, ROBINSON J, NELMS B, et al. Optimizing the accuracy of a helical diode array dosimeter: a comprehensive calibration methodology coupled with a novel virtual inclinometer[J]. Med Phys, 2011, 38(9): 5021-5032.
- [12] HRBACEK J, LANG S, KLOECK S. Commissioning of photon beams of a flattening filter-free linear accelerator and the accuracy of beam modeling using an anisotropic analytical algorithm[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2011, 80(4): 1228-1237.
- [13] LI G J, ZHANG Y J, JIANG X Q, et al. Evaluation of the ArcCHECK QA system for IMRT and VMAT verification[J]. Eur J Med Phys, 2013, 29: 295-303.
- [14] 吕梦, 张俊, 周立新, 等. 基于 TG119 报告测试病例对 VMAT 技术剂量学验证结果的初步研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2019, 28(3): 209-213.  
LÜ M, ZHANG J, ZHOU L X, et al. Preliminary study on dosimetry verification of VMAT on the basis of TG119 report [J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2019, 28(3): 209-213.
- [15] HEILEMANN G, POPPE B, LAUB W. On the sensitivity of common gamma-index evaluation methods to MLC misalignments in Rapidarc quality assurance[J]. Med Phys, 2013, 40(3): 031702.
- [16] FREDH A, SCHERMAN J B, FOG L S, et al. Patient QA systems for rotational radiation therapy: a comparative experimental study with intentional errors[J]. Med Phys, 2013, 40(3): 031716.
- [17] 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]. Med Phys, 2013, 40(11): 111722.
- [18] 易金玲, 金献测, 周永强, 等. ArcCheck 模体与胶片在鼻咽癌 VMAT 剂量验证中的比较研究[J]. 中国医疗器械杂志, 2013, 37(3): 228-231.  
YI J L, JIN X C, ZHOU Y Q, et al. Comparison of ArcCheck and film verification for VMAT in the treatment of nasopharyngeal carcinoma [J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2013, 37(3): 228-231.

(编辑:谭斯允)