

## Octavius 1600SRS 三维剂量验证系统临床可行性测试

周杨<sup>1</sup>, 刘懿梅<sup>2</sup>, 谭宇鸿<sup>3</sup>, 张俊<sup>2</sup>, 陈美宁<sup>2</sup>, 邓小武<sup>2</sup>, 彭应林<sup>2</sup>

1. 中南大学湘雅医学院附属株洲医院肿瘤放疗中心, 湖南 株洲 412000; 2. 中山大学肿瘤防治中心/华南肿瘤学国家实验室/肿瘤医学协同创新中心放疗科, 广东 广州 510060; 3. 广东医科大学附属东莞第一医院医学装备部, 广东 东莞 523000

**【摘要】目的:**通过模体实验对PTW Octavius 1600SRS 三维剂量验证系统进行临床应用前性能测试, 评估其对立体定向放射治疗(SBRT)计划进行剂量验证的可行性。**方法:**选用PTW Octavius 1600SRS 体模的CT图像, 模拟勾画7个球形靶区, 中心靶区(PTV<sub>0</sub>)直径大小为3 cm, 其余各靶区直径大小分别为1.0 cm(2个)、1.5 cm(2个)和2.0 cm(2个), 各靶区中心点距PTV<sub>0</sub>中心点距离为3~6 cm。设置PTV<sub>0</sub>的中心点为计划中心, 在治疗计划系统中制定SBRT计划(Plan<sub>0</sub>), 处方剂量为8 Gy×3 F。实验分别对Plan<sub>0</sub>引入临床常见偏差, 包括叶片MLC位置偏差(1、2、3 mm)、计划中心点(ISO)位置偏差(1、2、3 mm)和机架位置偏差(0.5°、1.0°、2.0°), 并生成相应的偏差计划。使用1600SRS验证系统分别对原计划和偏差计划进行测量, 比较两者 $\gamma$ 通过率和靶区覆盖率的差别, 以评估系统对放疗剂量偏差的敏感性。另外, 对6例临床SBRT计划进行治疗前剂量验证, 并与EPID验证结果进行比较, 以评估其临床计划验证性能。**结果:**1600SRS验证系统对MLC偏差检测非常敏感, 当MLC出现1 mm偏差时, 其 $\gamma$ 通过率与各靶区覆盖率均出现显著下降, 且随着MLC偏差变大, 其下降越明显。当MLC出现3 mm偏差时, (3 mm/3%)和(2 mm/3%)的 $\gamma$ 通过率分别从99.6%和98.0%下降至92.8%和81.7%, 7个靶区体积的覆盖率( $V_{95\%}$ )平均下降(58.8±6.8)%。1600SRS对机架旋转偏差和ISO平移误差检测亦敏感, 在机架旋转出现2°偏差或ISO出现3 mm偏差时, 其(2 mm/2%)的 $\gamma$ 通过率分别从95.1%下降至89.5%或86.2%。另外, 6例临床SBRT放疗计划的(2 mm/3%) $\gamma$ 通过率平均为(95.5±1.5)%。**结论:**Octavius 1600SRS能敏感地检测出SBRT计划中MLC到位偏差、机架旋转角度偏差与ISO偏差, 能较好地应用于SBRT计划的治疗前剂量验证。

**【关键词】**三维剂量验证系统; Octavius 1600SRS; 立体定向放射治疗; 剂量验证;  $\gamma$ 通过率

**【中图分类号】**R318; R811

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2022)11-1321-08

## Feasibility of three-dimensional dose verification using Octavius 1600SRS

ZHOU Yang<sup>1</sup>, LIU Yimei<sup>2</sup>, TAN Yuhong<sup>3</sup>, ZHANG Jun<sup>2</sup>, CHEN Meining<sup>2</sup>, DENG Xiaowu<sup>2</sup>, PENG Yinglin<sup>2</sup>

1. Tumor Radiotherapy Center, Zhuzhou Hospital Affiliated to Xiangya School of Medicine, Central South University, Zhuzhou 412000, China; 2. Department of Radiation Oncology, Sun Yat-sen University Cancer Center/State Key Laboratory of Oncology in South China/Collaborative Innovation Center for Cancer Medicine, Guangzhou 510060, China; 3. Department of Medical Equipment, the First Dongguan Affiliated Hospital of Guangdong Medical University, Dongguan 523000, China

**Abstract: Objective** To carry out performance test on PTW Octavius 1600SRS before clinical application through phantom experiment, and to evaluate the feasibility of dose verification for stereotactic body radiation therapy (SBRT) plan using PTW Octavius 1600SRS. **Methods** Seven spherical target areas, including a central target area (PTV<sub>0</sub>) with a diameter of 3.0 cm, 2 target areas with a diameter of 1.0 cm, 2 target areas with a diameter of 1.5 cm and 2 target areas with a diameter of 2.0 cm, were delineated in the CT image of the phantom in PTW Octavius 1600SRS. The distance from the center point of each target area to the center point of PTV<sub>0</sub> was from 3 to 6 cm. With the central point of PTV<sub>0</sub> as the planning center, the SBRT plan (Plan<sub>0</sub>) was designed in the treatment planning system, and its prescribed dose was 8 Gy×3 F. The experiment simulated and set the MLC position deviations (1, 2, 3 mm), the plan isocenter point (ISO) position deviations (1, 2, 3 mm) and the gantry rotation deviations (0.5°, 1.0°, 2.0°) for Plan<sub>0</sub>, and the corresponding deviation plans were generated. The 1600SRS

**【收稿日期】**2022-06-21

**【基金项目】**国家自然科学基金(12005316); 中华国际医学交流基金会肿瘤精准放疗星火计划(2019-N-11-20); 广州市科技计划项目(202206010154, 202206010180)

**【作者简介】**周杨, 硕士, 工程师, 研究方向: 肿瘤放射物理, E-mail: zhouyang1231219@126.com

**【通信作者】**彭应林, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 肿瘤放射物理, E-mail: pengyl@sysucc.org.cn; 刘懿梅, 硕士, 主管技师, 研究方向: 肿瘤放射剂量, E-mail: liuym1@sysucc.org.cn

verification system was used to measure the original plan and the deviation plans, and compare the difference of Gamma passing rate and target area coverage between the planned dose and the measured dose for evaluating the sensitivity of the system to radiotherapy dose deviation. In addition, pre-treatment dose verification using PTW Octavius 1600SRS was carried out in 6 cases of clinical SBRT plans, and then the results were compared with EPID verification results for evaluating its performance in clinical plan verification. **Results** The 1600SRS verification system was very sensitive to MLC position deviation. When a 1 mm deviation occurred in MLC, the gamma passing rate and the coverage rate of each target area were decreased significantly, and with the increase of MLC position deviation, the decrease was more obvious. When a 3 mm deviation occurred in MLC, the gamma passing rate decreased from 99.6% to 92.8% (3 mm/3%), and from 98.0% to 81.7% (2 mm/3%); and the coverage rates of 7 target areas ( $V_{98\%}$ ) was decreased by  $(58.8\pm6.8)\%$  on average. The 1600SRS was also sensitive to gantry rotation deviation and ISO translation error. When there was a  $2^\circ$  deviation in gantry rotation or a 3 mm deviation in ISO, the gamma passing rate (2 mm/2%) was decreased from 95.1% to 89.5% or 86.2%, respectively. The average gamma passing rate (2 mm/3%) in 6 cases of clinical SBRT plans was  $(95.5\pm1.5)\%$ . **Conclusion** Octavius 1600SRS can detect MLC position deviation, gantry rotation deviation and ISO position deviation in SBRT plan sensitively, and can be used in pre-treatment dose verification for SBRT plan.

**Keywords:** three-dimensional dose verification system; Octavius 1600SRS; stereotactic body radiation therapy; dose verification; Gamma passing rate

## 前言

放射治疗在肿瘤临床治疗中已获得广泛认可,其作用和地位日益突出,已成为恶性肿瘤治疗的主要治疗手段<sup>[1]</sup>。立体定向放射治疗(Stereotactic Body Radiation Therapy, SBRT)是针对小体积肿瘤放疗,使用小野集数照射、射束多、剂量分布集中的一种放疗技术手段,具有肿瘤控制率高、治疗周期短等优势<sup>[2-3]</sup>。SBRT具有分次数少、单次剂量大、剂量率高和等效生物剂量高等特点,且计划靶区外边缘剂量跌落迅速,可更好地保护靶区周围的正常组织器官<sup>[4-6]</sup>。但是,SBRT技术在实际治疗过程中受机架旋转角度、多叶准直器(MLC)到位精度以及等中心(ISO)偏差等多因素影响,小的偏差会导致较大剂量学差异,甚至会带来致命的影响<sup>[7-9]</sup>。因此先进的SBRT技术用于肿瘤高适形照射,需要高效和准确的质量保证(QA)措施和设备。SBRT计划剂量学验证带来了几个独特的挑战,如包含小射野的高度调制的VMAT/IMRT计划、多靶区计划以及包含非共面射束的治疗计划。Octavius 1000SRS内置二维(2D)电离室阵列被称为小野剂量测量的优秀探测器,特别是用于验证SBRT<sup>[10-11]</sup>。2D阵列探测器通过插入Octavius 4D体模中以执行三维(3D)剂量验证。然而,1000SRS的测量面积被限制在11 cm×11 cm,因此对于头部多个靶点的剂量验证来说非常有限。最新的Octavius 1600SRS阵列探测器具有相同的探测特性,且剂量测量面积扩大到15 cm×15 cm,可以将所有靶点包括在测量体积中,以提供所有靶区的剂量学信息。然而新设备投入临床使用前需进行临床测试,故本研究将通过模体实验,模拟SBRT计划放疗

执行中常见临床偏差,用1600SRS系统测量偏差计划剂量并分析其测量结果,以测试和验证其检出SBRT计划偏差的能力,从而评估其临床可行性,为临床应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 Octavius 1600SRS 剂量验证系统

Octavius 1600SRS 剂量验证系统主要由3大部分组成:PTW Octavius 4D体模、2D阵列探测器(Detector 1600SRS)和VeriSoft (Version8.0, PTW-Freiburg, Germany)剂量分析软件。2D阵列探测器通过插入Octavius 4D体模中以执行3D剂量验证,在VeriSoft软件中将测量剂量重建为3D体积剂量并与计划剂量进行比较。Detector 1600SRS是由1 521支充液型电离室组成(尺寸:2.3 mm×2.3 mm×0.5 mm),其灵敏体积为0.003 cc,所有电离室等间距排成矩阵,其中心探测区域为6.5 cm×6.5 cm,相邻两个电离室中心间距为2.5 mm,外部探测区域为15 cm×15 cm,相邻两个电离室间距为5 mm,如图1所示。1600SRS可以测量的剂量率区间为0.2~24.0 Gy/min,根据这款矩阵的特点,它主要应用在SBRT和SRS病人多个靶点的剂量验证和小射野质量保证等工作。

### 1.2 Octavius 1600SRS 校准

Octavius 1600SRS测量系统由探测器、旋转单元、控制单元和倾斜仪等部分组成,实验装置连接如图2所示。实验选用具有高剂量率(FFF)出束功能的加速器(Infinity, ELEKTA),80对MLC,叶片厚度0.5 cm,能量为6 MV(FFF),最高剂量率1 400 MU/min。

角度校准:1600SRS探测器插入旋转单元可与机

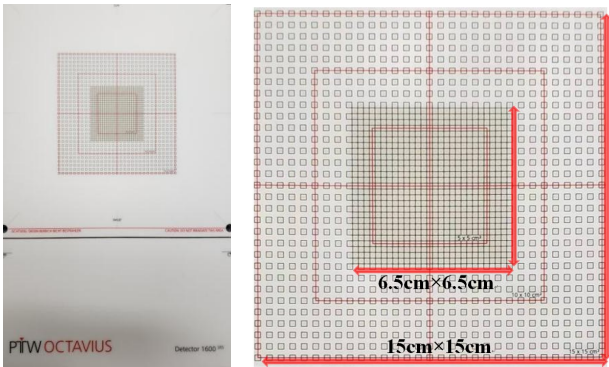


图1 PTW Octavius Detector 1600电离室分布示意图  
Figure 1 PTW Octavius Detector 1600 ionization chamber layout



图2 实验装置图  
Figure 2 Experimental devices

架同步旋转,在机架角度为0°时按ISO进行摆位,启动 Octavius 4D 模体的角度修正功能并旋转机架,倾斜仪监测机架旋转的实时角度,控制单元使用监测数据控制旋转单元进行旋转,使得射线束始终垂直入射到探测器上,消除电离室对射线入射角度的依赖性。

剂量校准:首先用剂量仪(Unidose E, PTW)、指形电离室(PTW30013, 0.6 cc)(PTW, Freiburg, Germany)和固体水(40 cm×40 cm)对加速器 6 MV(FFF)的输出量进行剂量校准,并记录当天输出量。其次,对 1600SRS 探测器进行照射预热。预热后,在相同条件下对其进行剂量校准,并获得对应的校准文件。

1.3 测试计划设计

模体CT导入:将 Octavius 4D 系统提供的均匀体模 CT 图像数据导入 Monaco (Version5.1, ElektaAB) 治疗计划系统中,根据制造商的建议,Octavius 4D 体模的相对于水的电子密度被指定为 1.016 g/cm³。

靶区模拟勾画:选取模体中心位置作为 CT-Mark 点,然后在 TPS 中进行靶区模拟勾画,模拟勾画 7 个球形靶区,中心靶区(PTV<sub>0</sub>)直径大小为 3 cm,中心点为 (0, 0, 0),其余各靶区直径大小分别为 1.0 cm (2 个)、1.5 cm (2 个)、2.0 cm (2 个),各靶区中心点距 PTV<sub>0</sub> 中心点距离为 3~6 cm,具体如图 3 所示,靶区体积等参数详见表 1。针对上述靶区,设计 1 个 SBRT 计划(Plan<sub>0</sub>),处方为:8 Gy×3 F。

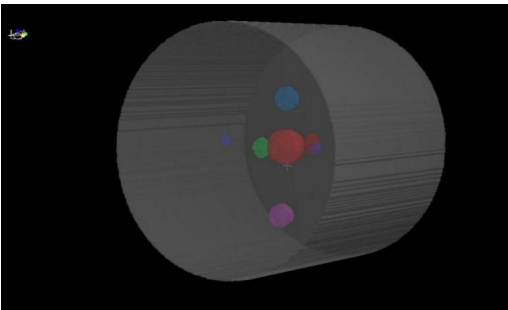


图3 靶区空间位置图  
Figure 3 Spatial locations of target areas

表 1 1600SRS 均匀模体内 7 个靶区位置关系  
Table 1 Position relationship of 7 target areas in 1600SRS phantom

项目	PTV <sub>0</sub>	PTV <sub>X1L</sub>	PTV <sub>X1R</sub>	PTV <sub>Y1.5I</sub>	PTV <sub>Y1.5S</sub>	PTV <sub>Z2D</sub>	PTV <sub>Z2U</sub>	PTV <sub>sum</sub>
靶区体积/cm <sup>3</sup>	15.2	0.4	0.5	1.8	1.8	4.5	4.3	31.5
最大直径/cm	3.0	1.0	1.0	1.5	1.5	2.0	2.0	-
离中心距离/cm	0	3	6	4	5	6	4	-

PTV<sub>0</sub>为等中心处的靶区;PTV<sub>X1L</sub>为位于等中心左侧(Left)直径为 1 cm 大小的靶区;PTV<sub>X1R</sub>为位于等中心右侧(Right)直径为 1 cm 大小的靶区;PTV<sub>Y1.5I</sub>为位于等中心脚方向(Inferior)直径为 1.5 cm 大小的靶区;PTV<sub>Y1.5S</sub>为位于等中心头方向(Superior)直径为 1.5 cm 大小的靶区;PTV<sub>Z2D</sub>为位于等中心后背方向(Posterior)直径为 2 cm 大小的靶区;PTV<sub>Z2U</sub>为位于等中心前方向(Anterior)直径为 2 cm 大小的靶区;PTV<sub>sum</sub>为所有靶区的并集体积

偏差计划设计:(1)基于 Plan<sub>0</sub>实验分别设置 MLC 的整体位置误差为 1、2、3 mm,并生成对应偏差

计划为 Plan<sub>MLC1</sub>、Plan<sub>MLC2</sub> 和 Plan<sub>MLC3</sub>; (2)基于 Plan<sub>0</sub>实验分别设置机架位置偏差(Gantry)的整体位置误差



为 0.5°、1°、2°,并生成对应偏差计划为 Plan<sub>G0.5</sub>、Plan<sub>G1</sub>和 Plan<sub>G2</sub>。(3)基于 Plan<sub>0</sub>实验分别设置计划 ISO 的整体位置误差为 1、2、3 mm,并生成对应偏差计划为 Plan<sub>ISO1</sub>、Plan<sub>ISO2</sub>和 Plan<sub>ISO3</sub>。

1.4 测试计划剂量测量和验证分析

使用 Octavius 1600SRS 验证系统对原 SBRT 计划(Plan<sub>0</sub>)和偏差计划(Plan<sub>i</sub>)分别进行测量和数据采集。测量完成后,为了评估测量剂量和计划剂量之间的剂量学一致性,将测量结果与原计划的 QA 计划剂量结果进行比较,在 VeriSoft 软件中采用 γ 通过率分析两者之间差异<sup>[12]</sup>。γ 通过率标准分别选择(1 mm/1%)、(2 mm/2%)、(2 mm/3%)和(3 mm/3%),阈值标准为 10%。

采用 VeriSoft 软件对测量剂量的 3D 剂量重建,以比较测量与计划之间的靶区剂量体积直方图(Dose Volume Histogram, DVH)的差别。比较的 DVH 参数包括 95% 处方剂量所覆盖的靶区体积(V<sub>95%</sub>)、98% 处方剂量所覆盖的靶区体积(V<sub>98%</sub>)、95% 体积所对应的剂量(D<sub>95%</sub>)和 98% 体积所对应的剂量(D<sub>98%</sub>)。进一步计算不同误差因素的不同误差大小的各靶区覆盖率的变化差值比,其中靶区覆盖率变化差值比(Coverage Deviation Rate, CDR)为:

$$CDR = \frac{C_0 - C_i}{C_0} \times 100\%$$

其中,C<sub>0</sub>为原计划(Plan<sub>0</sub>)的靶区覆盖剂量学参数;C<sub>i</sub>为设置的偏差计划(Plan<sub>i</sub>)的靶区覆盖剂量学参数。

根据 γ 通过率变化和 各靶区覆盖率的变化差值比评估 Octavius 1600SRS 剂量验证系统检测 SBRT 计划临床执行相关误差的能力。

1.5 临床 SBRT 计划治疗前验证

随机挑选在同一台加速器(Infinity, ELEKTA)上治疗且采用电子射野影像系统(Electronic Portal Imaging Device, EPID)进行剂量测量验证通过的 6 例 SBRT 计划,测试的临床计划均使用 Monaco 进行设计,计划一般资料见表 2。使用 Octavius 1600SRS 验证系统分别对 6 例临床 SBRT 计划进行剂量测量和分析,并记录 γ 通过率。

2 结果

2.1 MLC 位置偏差测试结果分析

对 3 个 MLC 偏差计划(Plan<sub>MLCi</sub>)的剂量验证结果显示,Octavius 1600SRS 剂量验证系统对 MLC 偏差检测非常敏感。MLC 出现 1 mm 偏差时,其测量的 γ 通过率与 各靶区覆盖率均出现显著下降,且随着 MLC 偏差变大,其下降越明显。当 MLC 出现 3 mm 偏差时,3 mm/3% 和 2 mm/3% 的 γ 通过率分别从

表 2 SBRT 计划一般资料  
Table 2 General data of SBRT plans

计划	肿瘤部位	处方	治疗技术	照射能量
SBRT <sub>1</sub>	脑转移瘤	5 Gy×4 F	VMAT	6FFF
SBRT <sub>2</sub>	脑转移瘤	5 Gy×4 F	VMAT	6FFF
SBRT <sub>3</sub>	肺癌	5 Gy×6 F	VMAT	6FFF
SBRT <sub>4</sub>	肺癌	5 Gy×6 F	VMAT	6FFF
SBRT <sub>5</sub>	肝癌	6.5 Gy×6 F	VMAT	6FFF
SBRT <sub>6</sub>	肝癌	6 Gy×6 F	VMAT	6FFF

99.6%和 98.0%下降至 92.8%和 81.7%,7 个靶区体积的覆盖率 V<sub>98%</sub> 平均下降(58.8±6.8)%,其中 PTV<sub>Y1.5I</sub> 下降最明显,为 64.8%。详见表 3 和图 4。

表 3 MLC 偏差计划的 γ 通过率(%)  
Table 3 Gamma passing rate of Plan<sub>MLCi</sub> (%)

偏差计划	1 mm/1%	2 mm/2%	2 mm/3%	3 mm/3%
Plan <sub>0</sub>	62.2	95.1	98.0	99.6
Plan <sub>MLC1</sub>	56.2	87.5	92.3	97.3
Plan <sub>MLC2</sub>	53.7	84.8	90.0	97.1
Plan <sub>MLC3</sub>	43.7	76.1	81.7	92.8

2.2 机架旋转角度偏差测试结果分析

对 3 个机架旋转角度偏差计划(Plan<sub>G<sub>i</sub></sub>)的剂量验证结果显示,Octavius 1600SRS 剂量验证系统对机架角度偏差检测敏感,其测量的 γ 通过率与 各靶区覆盖率均出现变化,且随着机架偏差角度的变大,其下降越明显。当机架旋转出现 2°偏差时,其 2 mm/3% 和 2 mm/2% 的 γ 通过率分别从 98.0%和 95.1%下降至 94.1%和 89.5%,7 个靶区体积的覆盖率 V<sub>98%</sub> 平均下降(0.3±0.4)%,其中 PTV<sub>Z2D</sub> 下降最明显,为 1.0%。详见表 4 与图 5。

2.3 计划 ISO 偏差测试结果分析

对 3 个 ISO 偏差计划(Plan<sub>ISO<sub>i</sub></sub>)的剂量验证结果显示,Octavius 1600SRS 剂量验证系统对 ISO 偏移检测敏感。由表 5 与图 6 可知,ISO 偏差从 0 mm 增加至 3 mm 时,偏差计划的 γ 通过率均发生一定程度的下降。当 ISO 平移 3 mm 时,其 2 mm/3%和 2 mm/2% 的 γ 通过率分别从 98.0%和 95.1%下降至 94.0%和 86.2%。7 个靶区体积的 V<sub>98%</sub> 覆盖率平均下降(0.1±0.1)%,变化不明显。

2.4 临床计划测试结果

结果显示 1600SRS 和 EPID 的验证结果没有差别,2 mm/3% 的 γ 通过率分别为(95.5±1.5)%和(96.3±2.8)%,见表 6。

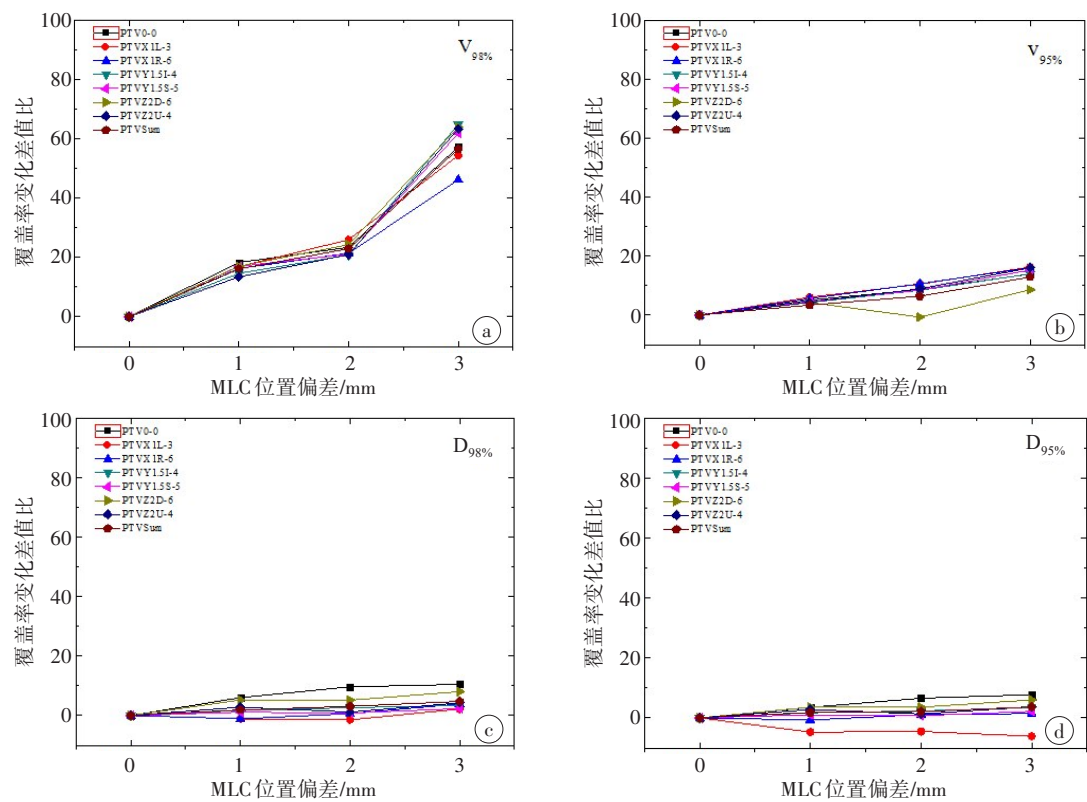


图4 MLC位置偏差对各靶区剂量参数的影响

Figure 4 DVH parameter variations caused by MLC position deviations

a:MLC位置偏差对靶区覆盖率 $V_{98\%}$ 的影响;b:MLC位置偏差对靶区覆盖率 $V_{95\%}$ 的影响;c:MLC位置偏差对靶区覆盖率 $D_{98\%}$ 的影响;d:MLC位置偏差对靶区覆盖率 $D_{95\%}$ 的影响

表4 机架偏差计划的 $\gamma$ 通过率(%)  
Table 4 Gamma passing rates of Plan<sub>Gi</sub> (%)

偏差计划	1 mm/1%	2 mm/2%	2 mm/3%	3 mm/3%
Plan <sub>0</sub>	62.2	95.1	98.0	99.6
Plan <sub>G0.5</sub>	61.3	95.4	98.1	99.5
Plan <sub>G1</sub>	60.5	94.6	97.7	99.5
Plan <sub>G2</sub>	53.9	89.5	94.1	98.8

3 讨论

SBRT 目前被广泛应用于脑转移瘤、非小细胞肺癌、原发性肝癌等病种的放射治疗中<sup>[13-16]</sup>,与常规放射治疗相比,其具有分次数少、分割剂量大、靶区内等效生物剂量高、靶区外剂量跌落迅速等特点,因此在掌握好病种适应证的同时也应对加速器的质量保证、质量控制与放疗计划剂量验证提出更高要求<sup>[17]</sup>。3D剂量验证系统作为质量控制与剂量测量的重要工具,在加速器质控和SBRT计划剂量验证中已广泛使用<sup>[18-20]</sup>。本研究探讨一种新型3D液体电离室探测器阵列Octavius 1600SRS临床应用的可行性。研究采用模体实验模拟影响计划执行精度的MLC位置精度、机架到位精度和摆位ISO的偏差,通过实际测量

结果比较以检测Octavius 1600SRS对上述误差的检出能力。同时对临床计划进行测量并与高分辨率的EPID测量结果进行比较,以评估其用于治疗前SBRT计划验证的临床可行性。

有研究证实MLC误差会影响IMRT计划。Oliver等<sup>[21]</sup>使用基于DVH的指标,对MLC偏差带来的影响进行评估,发现MLC整体发生0.6 mm的偏差,PTV的平均剂量发生2%的变化,因此测量设备能否准确检测出计划的MLC位置误差至关重要。Heilemann等<sup>[22]</sup>用Delta4(Scandidos, Uppsala, 瑞典)和Octavius Seven27(PTW, Freiburg, 德国)阵列测量MLC误差,使用 $\gamma$ 分析可以有效检测出MLC偏差,但又指出用Delta4和Seven27阵列测量的数据不能检测到PTV剂量分布的临床显著变化。针对SBRT计划,Patrick等<sup>[23]</sup>采用Octavius 1000SRS(PTW, Freiburg, 德国)对MLC位置偏差的影响进行测量,发现对于1.6 cm×1.6 cm的射野,引入0.8 mm误差时, $\gamma$ 通过率下降4.5%(1 mm/3%),且随着MLC位置误差的增大, $\gamma$ 通过率下降幅度也增大。对于4 cm×4 cm的射野,当MLC误差为2.5 mm时,其 $\gamma$ 通过率下降14%左右。本研究采用Octavius 1600SRS测量MLC的偏差,不仅可以采用常规的 $\gamma$ 通过率分析其测量结果以

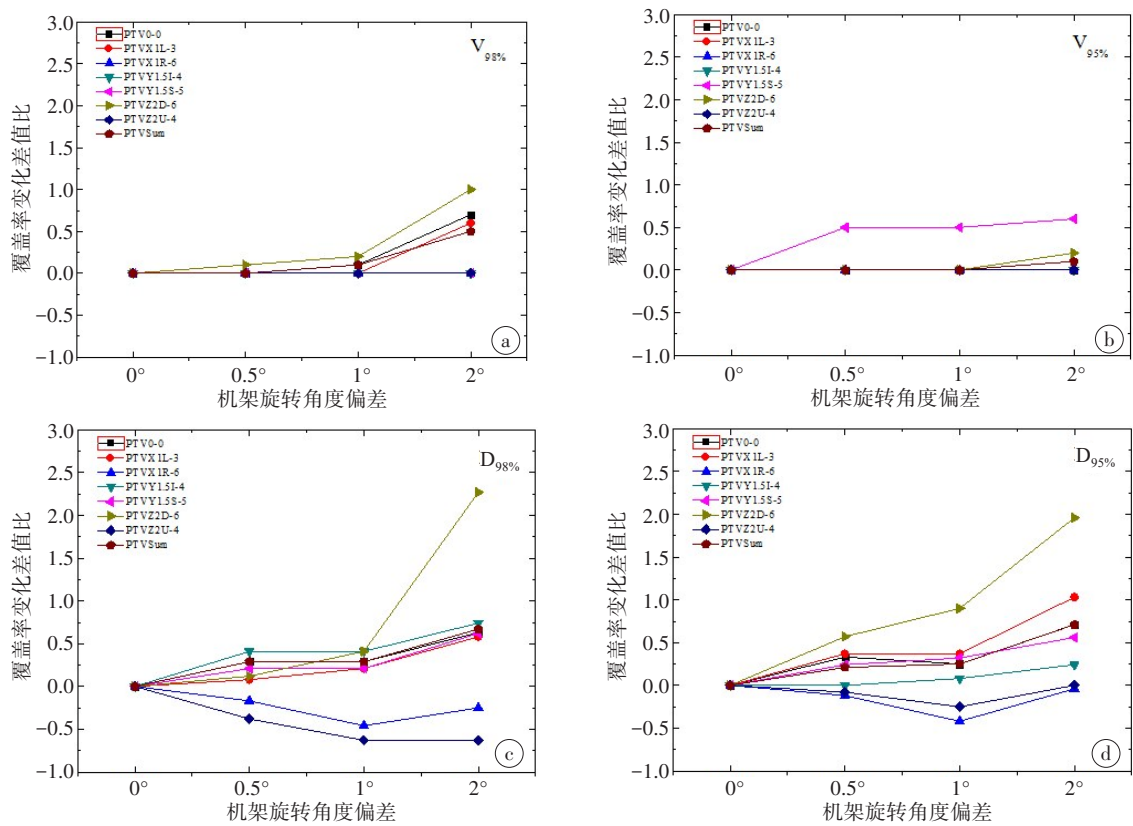


图5 机架旋转角度偏差对各靶区剂量参数的影响

Figure 5 DVH parameter variations caused by gantry rotation deviations

a: 机架旋转角度偏差对靶区覆盖率  $V_{98\%}$  的影响; b: 机架旋转角度偏差对靶区覆盖率  $V_{95\%}$  的影响; c: 机架旋转角度偏差对靶区覆盖率  $D_{98\%}$  的影响; d: 机架旋转角度偏差对靶区覆盖率  $D_{95\%}$  的影响

表5 等中心偏差计划的 $\gamma$ 通过率(%)

Table 5 Gamma passing rates of Plan<sub>ISOi</sub> (%)

偏差计划	1 mm/1%	2 mm/2%	2 mm/3%	3 mm/3%
Plan <sub>0</sub>	62.2	95.1	98.0	99.6
Plan <sub>ISO1</sub>	60.0	91.6	96.4	98.5
Plan <sub>ISO2</sub>	59.4	88.9	95.0	98.0
Plan <sub>ISO3</sub>	56.4	86.2	94.0	97.4

反映整体剂量学差别,也可通过 VeriSoft 对测量文件进行三维剂量重建获取测量 DVH 数据,并与计划 DVH 比较,以评估具体靶区与危及器官的剂量学参数差别。本研究发现当 MLC 发生 1 mm 的位置偏差时,其  $\gamma$  通过率会明显下降,且 PTV 的覆盖率也会明显减小,  $V_{98\%}$  平均降低大于 10%。当 MLC 出现 3 mm 偏差时, (3 mm/3%) 和 (2 mm/3%) 的  $\gamma$  通过率分别从 99.6% 和 98.0% 下降至 92.8% 和 81.7%, 7 个靶区体积的覆盖率  $V_{98\%}$  平均下降 (58.8±6.8)%。这表明 Octavius 1600SRS 可以敏感地识别 SBRT 计划中 MLC 的位置偏差,且不仅可以从  $\gamma$  通过率反映出来,还提供 DVH 的剂量学指标评估。

Zhu 等<sup>[24]</sup>研究指出对于同一探测器在机架固定 0° 时测量与机架旋转进行剂量测量,两者的测量结果最大能产生约 10% 的响应误差。另外, TG218 号报告也建议实际角度测量,这种方法最能真实模拟患者接受的剂量,可以执行实际治疗计划的射野参数,包括 MU、机架角、准直器角度、铅门和 MLC 位置等<sup>[25]</sup>。Octavius 1600SRS 三维剂量测量系统在测量时将平板矩阵插入与加速器同步旋转模体中,使得射束始终垂直于电离室探头,消除电离室对射线入射角度的依赖性,以实现实际角度测量。机架角度到位精度直接影响计划执行的精度,因此本课题设置了机架角度偏差,用以检测 Octavius 1600SRS 对机架角度误差的敏感性。研究结果显示其对机架角度偏差检测敏感,其测量的  $\gamma$  通过率与各靶区覆盖率均出现变化,且随着机架偏差角度的变化越大,其下降越明显。当机架旋转出现 2° 偏差时, (2 mm/3%) 和 (2 mm/2%) 的  $\gamma$  通过率分别从 98.0% 和 95.1% 下降至 94.1% 和 89.5%。Li 等<sup>[26]</sup>采用 Arccheck 和 Delta4 分别对旋转误差进行测量,在 2° 偏差时, (2 mm/3%) 和 (2 mm/2%) 的  $\gamma$  通过率分别平均下降 12.1% 和 14.5% (Arccheck), 5.0% 和 7.0% (Delta4), 其中 Delta4 的实验结果与本研究相近。

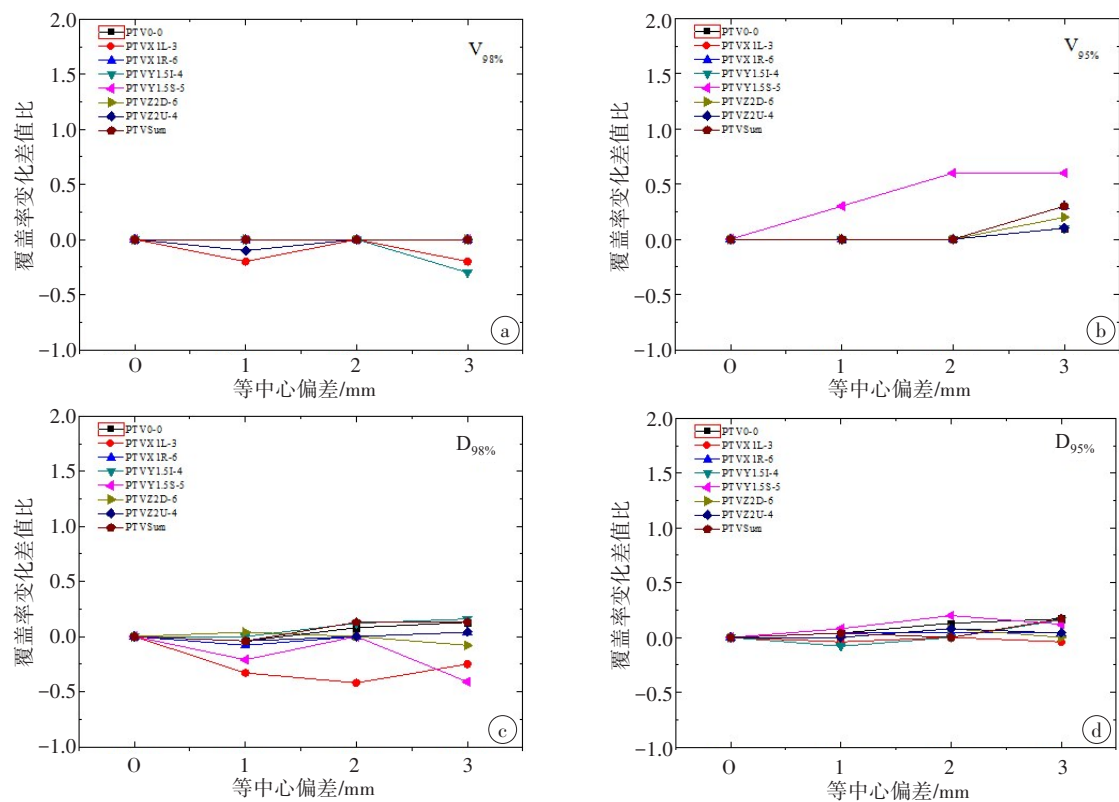


图6 等中心偏差对各靶区剂量参数的影响

Figure 6 DVH parameter variations caused by isocenter deviations

a: 等中心偏移对靶区覆盖率 $V_{98\%}$ 的影响;b: 等中心偏移对靶区覆盖率 $V_{95\%}$ 的影响;c: 等中心偏移对靶区覆盖率 $D_{98\%}$ 的影响;d: 等中心偏移对靶区覆盖率 $D_{95\%}$ 的影响

表6 两款验证设备的计划通过率(%)

Table 6 Gamma passing rates of two verification devices (%)

临床计划	Octavius 1600SRS			EPID		
	3 mm/3%	2 mm/3%	2 mm/2%	3 mm/3%	2 mm/3%	2 mm/2%
SBRT <sub>1</sub>	99.1	96.1	95.1	99.7	99.4	98.0
SBRT <sub>2</sub>	98.5	94.2	91.9	100.0	99.4	94.9
SBRT <sub>3</sub>	99.1	97.8	96.5	96.7	93.2	91.1
SBRT <sub>4</sub>	98.2	95.4	93.4	95.7	93.3	91.3
SBRT <sub>5</sub>	99.3	93.8	91.3	99.5	96.8	94.5
SBRT <sub>6</sub>	98.1	96.1	92.1	97.8	95.5	92.2
平均	98.7±0.5	95.5±1.5	93.4±2.0	98.2±1.8	96.3±2.8	93.7±2.7

SBRT 计划执行易受加速器 ISO 精度和摆位误差等因素的影响,因此测量设备对平移误差的敏感性非常重要。本研究通过设置 ISO 误差并用 Octavius 1600SRS 对偏差计划进行测量,以检测其对 ISO 平移误差的敏感性。结果显示,Octavius 1600SRS 剂量验证系统对 ISO 偏移检测敏感。ISO 从 0 mm 增加至 3 mm 时,偏差计划的  $\gamma$  通过率均发生一定程度的下降。当 ISO 平移 3 mm 时,其(2 mm/3%)和(2 mm/2%)的  $\gamma$  通过率分别从 98.0% 和 95.1% 下降至 94.0% 和

86.2%。Li 等<sup>[26]</sup>也观察到平移设置误差对复杂 VMAT 计划 QA 结果的影响,在 3 mm 偏差时, Arccheck 和 Delta4 测量的(2 mm/3%)和(2 mm/2%)的  $\gamma$  通过率的平均变化均大于 10%。

另外,从对 MLC 偏差、机架角度偏差和 ISO 偏差等因素的检查评估中发现,采用(3 mm/3%)的  $\gamma$  通过率不能准确地反映偏差大小,为精准地评估计划的剂量分布,应至少采用更严格的(2 mm/3%)的  $\gamma$  通过率进行评估。



高空间分辨率的EPID为现代放射治疗的质量保证提供了一个准确、高效的剂量测量工具。该系统可生成精确的绝对2D剂量图,用于独立的治疗前剂量学验证<sup>[27-28]</sup>。本实验进一步采用Octavius 1600SRS对6例临床SBRT计划进行测量,并与EPID的测量结果进行比较,发现两者直接的 $\gamma$ 通过率相似,这间接证明Octavius 1600SRS临床应用的可行性。

综上所述,Octavius 1600SRS能敏感地检测出SBRT计划中MLC到位偏差、机架旋转角度偏差与ISO偏差,可应用于SBRT计划的治疗前剂量验证,但应该用更严格的 $\gamma$ 通过率标准进行评估。

## 【参考文献】

- [1] 李晔雄,汪华. 肿瘤放射治疗的历史与发展[J]. 中国肿瘤, 2008, 17(9): 775-779.  
Li YX, Wang H. The evolution of radiation oncology[J]. China Cancer, 2008, 17(9): 775-779.
- [2] Timmerman RD, Kavanagh BD, Cho LC, et al. Stereotactic body radiation therapy in multiple organ sites[J]. Clin Oncol, 2007, 25(8): 947-52.
- [3] Scorsetti M, Comito T, Clerici E, et al. Phase II trial on SBRT for unresectable liver metastases: long-term outcome and prognostic factors of survival after 5 years of follow-up[J]. Radiat Oncol, 2018, 13(1): 234.
- [4] Levy A, Guckenberger M, Hurkmans C, et al. SBRT dose and survival in non-small cell lung cancer: in regard to Koshy et al.[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2015, 92(4): 945-946.
- [5] Hoffman D, Dragojevi I, Hoisak J, et al. Lung stereotactic body radiation therapy (SBRT) dose gradient and PTV volume: a retrospective multi-center analysis[J]. Radiat Oncol, 2019, 14(1): 162.
- [6] Onishi H, Nagata Y, Shirato H, et al. Stereotactic body radiotherapy (SBRT, BED $\geq$ 100 Gy) for operable stage I non-small cell lung cancer: is SBRT comparable to surgery?[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2007, 69(3): S86-S87.
- [7] 袁青青,李衍龙,王大荣,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.  
Yuan QQ, Li YL, Wang DJ, et al. Impact of accelerator operating errors on  $\gamma$  passing rate during dose verification of volumetric modulated arc therapy for pelvic tumors[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2020, 29(9): 779-783.
- [8] Kim JI, Park SY, Kim HJ, et al. The sensitivity of gamma-index method to the positioning errors of high-definition MLC in patient-specific VMAT QA for SBRT[J]. Radiat Oncol, 2014, 9(1): 167.
- [9] 王宁,王彬,陈阿龙,等. IMRT计划剂量验证通过率对机架角度误差灵敏度分析[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2016, 25(12): 1327-1330.  
Wang N, Wang B, Chen AL, et al. Sensitivity of passing rates of intensity-modulated radiotherapy plans in dose verification against gantry angle errors[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2016, 25(12): 1327-1330.
- [10] Poppe B, Stelljes TS, Looe HK, et al. Performance parameters of a liquid filled ionization chamber array[J]. Med Phys, 2013, 40(8): 082106.
- [11] Markovic M, Sthakis S, Mavroidis P, et al. Characterization of a two-dimensional liquid-filled ion chamber detector array used for verification of the treatments in radiotherapy[J]. Med Phys, 2014, 41(5): 051704.
- [12] Low DA, Harms WB, Mutic S, et al. A technique for the quantitative evaluation of dose distributions[J]. Med Phys, 1998, 25(5): 656-661.
- [13] Decabooter E, Swinnen AC, Öllers MC, et al. Operation and calibration of the novel PTW 1600SRS detector for the verification of single isocenter stereotactic radiosurgery treatments of multiple small brain metastases[J]. Br J Radiol, 2021, 94(1123): 20210473.
- [14] Chang JY, Balter PA, Lei D, et al. Stereotactic body radiation therapy in centrally and superiorly located stage I or isolated recurrent non-small-cell lung cancer[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2008, 72(4): 967-971.
- [15] Newman NB, Sherry AD, Byrne DW, et al. Stereotactic body radiotherapy versus conventional radiotherapy for early-stage small cell lung cancer[J]. J Radiat Oncol, 2019, 8(2): 239-248.
- [16] 张黎,梁健,孙文钊,等. 原发性肝癌伴门静脉癌栓立体定向放射治疗的疗效分析[J]. 中山大学学报(医学科学版), 2015, 36(4): 579-584.  
Zhang L, Liang J, Sun WZ, et al. Effectiveness of stereotactic body radiotherapy for hepatocellular carcinoma with portal vein tumor thrombosis[J]. Journal of Sun Yat-sen University (Medical Sciences), 2015, 36(4): 579-584.
- [17] 林承光,邓小武,吴裕超,等. 放射治疗实施过程中的质量保证及质量控制[J]. 中国肿瘤, 2004, 13(9): 544-545.  
Lin CG, Deng XW, Wu YQ, et al. Quality assurance and quality control during radiotherapeutic process[J]. China Cancer, 2004, 13(9): 544-545.
- [18] Bedford JL, Lee YK, Wai P, et al. Evaluation of the Delta4 phantom for IMRT and VMAT verification[J]. Phys Med Biol, 2009, 54(9): N167-N176.
- [19] Templeton AK, Chu JC, Turian JV. The sensitivity of ArcCHECK-based gamma analysis to manufactured errors in helical tomotherapy radiation delivery[J]. Appl Clin Med Phys, 2015, 16(1): 4814.
- [20] Nakaguchi Y, Araki F, Ono T, et al. Validation of a quick three-dimensional dose verification system for pre-treatment IMRT QA[J]. Radiol Phys Technol, 2015, 8(1): 73-80.
- [21] 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.
- [22] Heilemann G, Poppe B, Laub W. On the sensitivity of common gamma-index evaluation methods to MLC misalignments in rapid arc quality assurance[J]. Med Phys, 2013, 40(3): 031702.
- [23] Patrick OC, Venkatakrishn S, Paul C. Detecting MLC errors in stereotactic radiotherapy plans with a liquid filled ionization chamber array[J]. Australas Phys Eng Sci Med, 2016, 39(1): 247-252.
- [24] Zhu J, Chen L, Jin G, et al. A comparison of VMAT dosimetric verifications between fixed and rotating gantry positions[J]. Phys Med Biol, 2013, 58(5): 1315-1322.
- [25] Miften M, Olch A, Mihailidis D, et al. Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: recommendations of AAPM Task Group No. 218[J]. Med Phys, 2018, 45(4): e53-e83.
- [26] Li G, Bai S, Chen N, et al. Evaluation of the sensitivity of two 3D diode array dosimetry systems to setup error for quality assurance (QA) of volumetric-modulated arc therapy (VMAT)[J]. Appl Clin Med Phys, 2013, 14(5): 13-24.
- [27] Han B, Ding A, Lu M, et al. Pixel response-based EPID dosimetry for patient specific QA[J]. Appl Clin Med Phys, 2017, 18(1): 9-17.
- [28] Nasser S, Bahreyni MH, Momenzadeh M, et al. Dosimetric verification of IMRT and 3D conformal treatment delivery using EPID[J]. Appl Radiat Isot, 2022, 182: 110116.

(编辑:黄开颜)