

SRS MapCHECK 与 EDOSE 在立体定向放疗计划剂量验证中的对比

袁玲, 刘颖, 徐瑶瑶, 张红利, 张晓鹏, 王鑫, 石兴源
广州医科大学附属第五医院放疗科, 广东 广州 510700

【摘要】目的:使用 SRS MapCHECK 和 EDOSE 对立体定向放疗(SRT)计划进行剂量验证,并比较它们的验证结果。**方法:**首先比较两种系统在不同方野(2 cm×2 cm、4 cm×4 cm、6 cm×6 cm、10 cm×10 cm)的 γ 通过率(3%/3 mm),然后选择29例 SRT 计划,分析两种系统在不同 γ 标准下的绝对剂量通过率,最后分析 EDOSE 建立的4种不同物理模型对 SRT 计划剂量验证的影响。**结果:**SRS MapCHECK 在所有方野和29例 SRT 计划的绝对剂量 γ 通过率均高于 EDOSE,两者的验证结果有统计学差异($P<0.05$);SRS MapCHECK 及 EDOSE 在29例 SRT 计划的 γ 通过率(2%/2 mm)分别是为98.60%±2.14%和96.53%±2.41%。基于 EDOSE 的不同物理模型验证结果有统计学差异,平均 γ 通过率(2%/2 mm)偏差为1.8%~5.1%。**结论:**SRS MapCHECK 和 EDOSE 系统均满足 SRT 计划剂量验证的要求,且 SRS MapCHECK 的剂量验证通过率优于 EDOSE;不同的 EDOSE 物理模型对 SRT 计划剂量验证有影响。

【关键词】立体定向放疗;SRS MapCHECK;EDOSE; γ 通过率;剂量验证

【中图分类号】R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2022)01-0023-05

Comparison of dose verification by SRS MapCHECK versus EDOSE for stereotactic radiotherapy

YUAN Ling, LIU Ying, XU Yaoyao, ZHANG Hongli, ZHANG Xiaopeng, WANG Xin, SHI Xingyuan

Department of Radiotherapy, the Fifth Affiliated Hospital of Guangzhou Medical University, Guangzhou 510700, China

Abstract: Objective To carry out dose verification for stereotactic radiotherapy (SRT) using SRS MapCHECK and EDOSE, and to compare the results of dose verification between SRS MapCHECK and EDOSE. **Methods** The gamma passing rate (3%/3 mm) for different square fields (2 cm×2 cm, 4 cm×4 cm, 6 cm×6 cm, 10 cm×10 cm) using SRS MapCHECK and EDOSE for dose verification were compared, and then, 29 SRT plan were selected to analyze the absolute dose passing rate between SRS MapCHECK and EDOSE at different gamma criteria. Finally, the effects of 4 different physical models established in EDOSE system on the dose verification for SRT plan were analyzed. **Results** The gamma passing rates of absolute dose obtained by SRS MapCHECK in all square fields and 29 cases of SRT plan were higher those of EDOSE, and the verification results between two systems were statistically different ($P<0.05$). The gamma passing rates (2%/2 mm) of SRS MapCHECK and EDOSE for 29 cases of SRT plan were 98.60%±2.14% and 96.53%±2.41%, respectively. The verification results among different EDOSE physical models were statistically different, and the deviation of average gamma passing rate (2%/2 mm) was 1.8%-5.1%. **Conclusion** Both SRS MapCHECK and EDOSE satisfy the requirements of dose verification for SRT plan, but the passing rate of dose verification of SRS MapCHECK is higher than that of EDOSE. The dose verification for SRT plan can be affected by different EDOSE physical models.

Keywords: stereotactic radiotherapy; SRS MapCHECK; EDOSE; gamma passing rate; dose verification

前言

近年来,立体定向放疗(Stereotactic Radiotherapy, SRT)是放射技术的热点之一,包括立体定向外科手术(Stereotactic Radiosurgery, SRS)^[1]和

立体定向体放疗(Stereotactic Body Radiotherapy, SBRT)^[2-3],具有分次剂量大、射野面积小、剂量梯度陡峭等特点^[4],对直线加速器的机械质量控制和剂量验证设备的探测精度有很高的要求^[5-6]。美国 Sun Nuclear公司专门为 SRT 计划开发了一套剂量验证设备:SRS MapCHECK 系统,该系统是由1 013个半导体组成的二维矩阵平板,是目前市面上空间分辨率较高的矩阵探测器,相邻半导体之间物理间距为2.47 mm,整个平板的探测面积为77 mm×77 mm^[7-8]。广州瑞多思医疗公司开发的 EDOSE 剂量验证系统直接利用直

【收稿日期】2021-07-21

【基金项目】广州市科技计划项目(201905010004)

【作者简介】袁玲,硕士,研究方向:放射物理,E-mail: 1210710050@qq.com

【通信作者】石兴源,研究方向:肿瘤治疗,E-mail: 18549183@qq.com

线加速器自带的电子射野影像系统(Electron Portal Imaging Device, EPID)采集射线的信号,生成EPID影像,并转换成剂量分布^[9]。以Varian Trilogy自带的EPID设备为例,共有1 024×768个有效像素点,有效探测面积为400 mm×300 mm,相邻探测点的间距为0.39 mm,空间分辨率几乎仅次于胶片的探测器。可见,SRS MapCHECK系统和EDOSE系统均适用于SRT计划的剂量验证^[10],本研究拟针对基于多叶光栅(Multi-Leave Collimator, MLC)的SRT计划,比较这两种系统的优缺点。

1 资料和方法

1.1 病例资料

选取2019年3月~2020年11月期间29例行SRT的患者,其中脑转移14例,原发肺癌3例,肺转移10例,肝转移1例,胸膜转移1例。患者年龄为13~77岁,中位年龄55岁,平均年龄46.79岁。

1.2 实验材料与设备

1.2.1 设备材料 电子直线加速器(美国Varian公司Trilogy)6 MV FFF光子线,自带一套非晶硅平板探测器(美国Varian公司IAS1000)。治疗计划系统为Eclipse 13.6。

SRS MapCHECK(美国Sun Nuclear公司)剂量验证系统包括MapCHECK平板探测器、StereoPHAN模体和SNC Patient分析软件。在剂量验证之前,将SRS MapCHECK插入StereoPHAN模体,并在Philips Brilliance Big Bore CT模拟机行CT扫描,扫描参数为120 kV、350 mAs;最后CT图像经网络传输至Eclipse TPS,患者的治疗计划移植到此CT图像,即可开展下一步的剂量验证工作。

EDOSE剂量验证系统(广州瑞多思医疗有限公司,EDOSE V5.0)有一套虚拟圆柱形模体的CT图像(电子密度为1.00 g/cm³,直径28 cm,高度28 cm),将此CT图像导入Eclipse TPS,并移植患者的治疗计划,生成验证所需的计划剂量在虚拟模体深度为14 cm处XY平面的累积剂量。

1.2.2 校准剂量验证设备 根据国家规程对Varian Trilogy直线加速器进行刻度^[11-12],然后按美国医学物理学家学会(AAPM)的TG-142和TG-58号报告对Trilogy加速器的EPID设备进行质量控制^[13-14]。

首先,采用三维水箱验证直线加速器的射线平坦度和对称性,测量中心轴百分深度剂量与射野中心轴的离轴比曲线,使得离轴比曲线的平坦度和对称性在误差范围内。具体操作步骤为:采用IBA三维水箱结合CC13指形电离室(2个)及其他配套工具,将静电计固定于加速器出射线位置2 m以上的位置;调节水箱的水

平(使探头在水箱中水平运动的深度偏差在1 mm内);调节运动偏差(探头沿中心轴,即AB和GT方向上运动偏差在1 mm内);设置探头零点位置,修正电离室的测量深度;水面SSD为100 cm时,测量中心轴百分深度剂量,再开10 cm×10 cm的射野,测量电离室位于水下10 cm时的射野中心轴的离轴比曲线。

然后,采用IQA质控软件(广州瑞多思医疗有限公司)将EPID升高至SSD100 cm处,开10 cm×10 cm的射野,对在6 MV FFF射线100 MU时获取的剂量影像进行平坦度和对称性分析,保证EPID测量得到的平坦度和对称性与三维水箱数据一致(误差范围内)。

最后,EDOSE根据TPS在虚拟圆柱形模体上计算的方野剂量的三维分布提取百分深度剂量信息,推算虚拟圆柱形模体其他厚度的平面剂量(对于直径为28 cm的圆柱形模体,为厚度14 cm所在平面)。接下来进行EDOSE剂量验证系统的物理建模(此模型命名为M_0),具体操作如下:将Varian Trilogy直线加速器的治疗床远离射线照射区域,EPID板调整到等中心平面,在6 MV FFF模式下,利用EDOSE系统分别用采集2 cm×2 cm、4 cm×4 cm、6 cm×6 cm、10 cm×10 cm方野的基于EPID的剂量分布;然后Eclipse TPS模拟生成上述相同照射条件下的TPS剂量分布,在EDOSE系统中,匹配EDOSE剂量分布与TPS剂量分布,调整模型参数,使得它们的百分深度剂量曲线、离轴曲线(Profile)和输出因子(Scp)尽可能重合。Dose二维治疗前模型假定EPID为均匀的水模体,EPID采集的信号定义为水模体中心层面的剂量,通过提取TPS的百分深度剂量信息将水模体中心层面的剂量换算到圆柱形模体中心层面的平面剂量。其中EPID的剂量^[15]分布表示为:

$$D_{ij}^{\text{EPID}} = T_{ij}^{\text{EPID}} \otimes K_1^{\text{EPID}}(d_{ij}^{\text{EPID}}) \quad (1)$$

虚拟模体中平面剂量分布 D_{ij} 表示为:

$$D_{ij} = a' \cdot P_{ij} \otimes {}^{-1}K_1(d_{ij}) \otimes K_2(d_{ij}) \otimes K_3(d_{ij}) \cdot f(r_{ij}) \quad (2)$$

其中:

$$K_1(d_{ij}) = (1 - c_1) \exp(-\mu_1 d_{ij}) + c_1 \exp(-\mu_2 d_{ij}) \quad (3)$$

$$K_2(d_{ij}) = (1 - c_2) \exp(-\mu_1 d_{ij}) + c_2 \exp(-\mu_2 d_{ij}) \quad (4)$$

$$K_3(d_{ij}) = \exp(-\mu_3 d_{ij}) \quad (5)$$

$$f(r_{ij}) = 1 + c_r \exp\left[-(r_{ij} - \varepsilon)^2 / (2\sigma^2)\right] \quad (6)$$

式中, $K_1(d_{ij})$ 为EPID的散射核; (d_{ij}) 为虚拟模体散射核;虚拟卷积核 $K_3(d_{ij})$ 和高斯分布函数 $f(r_{ij})$ 对相对剂量进行修正。参数 μ_1 、 μ_2 分别描述散射核靠近原点中心快速跌落部分、远处拖尾缓慢下降部分;参数 c_1 、 c_2 分别为EPID散射核与虚拟模体散射核的系数;参数 c_r 为高斯分布函数的系数。通过调整这4个参数(μ_2 、 c_1 、 c_2 、 c_r)来调整模型计算虚拟模体中心层面的剂量分布。

SRS MapCHECK 系统的校准过程如下:首先进行 SRS MapCHECK 探测器的矩阵刻度,然后将它插入 StereoPHAN 模体中,调整治疗床使得探测器的中心与机械等中心重合,6 MV FFF 能量的 5 cm×5 cm 方野出束 200 MU,在 MapCHECK 系统中输入 TPS 模拟计算得到的探测器中心点剂量,即可完成校准工作。

1.3 不同方野的剂量验证

方野的剂量验证是考察验证设备及系统可靠性的第一步,是开展患者治疗计划验证的前提。本实验利用 Eclipse TPS,在 EDOSE 虚拟圆柱形体模中设计一些方野(2 cm×2 cm、4 cm×4 cm、6 cm×6 cm)的单野照射计划,以体模中心为计划中心,能量为 6 MV FFF,机架角度和准直器角度均为 0°,每个方野的机器跳数均为 100 MU,计算剂量并导出体模等中心平面的剂量分布(TPS 剂量分布);然后将 Varian Trilogy 直线加速器的治疗床远离射线照射区域,EPID 板调整到等中心平面,执行上述方野的计划,EDOSE 系统获取它们的剂量分布(EDOSE 剂量分布);最后在 EDOSE 系统中比较分析 TPS 剂量分布与 EDOSE 剂量分布的绝对剂量 γ 通过率(3%/3 mm)。同样利用 Eclipse TPS,以 StereoPHAN 模体的 MapCHECK 探测器中心为计划中心,设计上述方野的计划,按上述相同的照射条件计算剂量并导出 RD 剂量文件,Varian Trilogy 直线加速器执行计划,MapCHECK 系统采集剂量分布,SNC Patient 软件导入 RD 剂量文件,设置坐标,获取等中心平面的 TPS 剂量分布,与 MapCHECK 剂量分布进行比较,计算两者的绝对剂量 γ 通过率(3%/3 mm)。

1.4 SRT 计划的剂量验证

29 例基于 MLC 的 SRT 计划均由 Eclipse V13.6 TPS 设计,使用 6 MV FFF 能量,3~6 个非共面弧,铅门大小均大于 3 cm×3 cm,分次剂量为 6~12 Gy,治疗次数为 1~7 次。在 Eclipse V13.6 TPS 中,以 EDOSE 虚拟圆柱形模体的中心为计划中心,将 29 例 SRT 计划分别移植到该模体中,计算剂量并导出它们在等中心平面的剂量分布(TPS 剂量分布),按上述验证方野剂量的摆位条件,Varian Trilogy 直线加速器执行 29 例 SRT 计划,EDOSE 系统获取它们的剂量分布(EDOSE 剂量分布),最后在 EDOSE 系统中分析每一个计划的 TPS 剂量分布图与 EDOSE 剂量分布的绝对剂量 γ 通过率, γ 标准有 3%/3 mm、3%/2 mm、3%/1 mm、2%/2 mm、2%/1 mm、1%/1 mm。同样利用 Eclipse TPS,以 StereoPHAN 模体中的 MapCHECK 探测器中心为计划中心,将 29 例 SRT 计划分别移植到模体中,计算剂量并导出 RD 剂量文件,Varian Trilogy 直线加速器执行计划,MapCHECK 系统采集剂量剂量分布,SNC Patient 软件从 RD 文件中获取等中心平面的 TPS 剂量分布,与 MapCHECK 剂量分布进行比较,计算两者的绝对剂量 γ 通过率, γ 标准有 3%/3 mm、

3%/2 mm、3%/1 mm、2%/2 mm、2%/1 mm、1%/1 mm。

1.5 不同物理模型对 EDOSE 剂量验证的影响

EDOSE 系统是通过射线追踪和迭代算法方法,将 EPID 采集的影像转换为虚拟圆柱形体模表面的射野通量,再结合物理师建立的机器物理模型,通过筒串卷积算法得到模体等中心平面的剂量分布。可见,物理师建立的物理模型能否准确地反映直线加速器的物理性能,对生成模体等中心平面的剂量分布有很大的影响。EDOSE 系统主要通过调整 4 个参数(μ_2 、 c_1 、 c_2 、 c_r),使得 EDOSE 系统的物理模型尽可能地吻合加速器的物理性能。而这 4 个参数有许多不同的组合,受个人知识与经验等主观因素的影响,不同物理师可能会建立不同的 EDOSE 物理模型,造成同一计划的剂量验证结果也可能不一样。为此,广州医科大学附属第五医院的 3 名物理师独立地建立各自的 EDOSE 物理模型(分别命名为 M_1、M_2、M_3),与本文第 1.2 节介绍的物理模型 M_0,一共 4 个不同的物理模型。在 EDOSE 系统中,分别对 29 例 SRT 计划计算基于不同物理模型的 γ 通过率(3%/3 mm、3%/2 mm、2%/2 mm)。

1.6 统计学分析

使用 SPSS V26.0 软件对 29 个 SRT 计划的 EDOSE 系统的 γ 通过率与 MapCHECK 系统的 γ 通过率进行配对 t 检验, $P<0.05$ 表示结果有统计学差异;以 M_0 模型的 γ 通过率为基准,对它与其余模型的 γ 通过率行配对 t 检验, $P<0.05$ 表示结果有统计学差异。

2 结果

2.1 方野的剂量验证结果比较

SRS MapCHECK 对方野 2 cm×2 cm、4 cm×4 cm、6 cm×6 cm、10 cm×10 cm 的绝对剂量 γ 通过率(3%/3 mm)均为 100%;EDOSE 系统的绝对剂量 γ 通过率(3%/3 mm)稍低,但均大于 91%,且随着方野面积的增大, γ 通过率增加。详见表 1。

2.2 29 例 SRT 计划的剂量验证结果比较

SRS MapCHECK 系统在 29 例 SRT 计划的绝对剂量 γ 通过率均高于 EDOSE 系统,具有统计学意义($P<0.05$),两者的 γ 通过率(3%/3 mm、2%/2 mm、1%/1 mm)分别相差 0.14%±0.26%、2.07%±2.27%、15.25%±10.6%。详见表 2。

表 1 SRS MapCHECK 与 EDOSE 的方野绝对剂量 γ 通过率比较(%)
Table 1 Comparison of gamma passing rate of absolute dose for square fields between SRS MapCHECK and EDOSE (%)

系统	2 cm×2 cm	4 cm×4 cm	6 cm×6 cm	10 cm×10 cm
SRS MapCHECK	100.00	100.00	100.00	100.00
EDOSE	91.47	92.37	94.16	97.54

表 2 SRS MapCHECK 与 EDOSE 的 29 例病例绝对剂量 γ 通过率比较(%, $\bar{x} \pm s$)

Table 2 Comparison of gamma passing rate of absolute dose for 29 cases between SRS MapCHECK and EDOSE (%, *Mean* \pm *SD*)

系统	3%/3 mm	3%/2 mm	3%/1 mm	2%/2 mm	2%/1 mm	1%/1 mm
SRS MapCHECK	99.76 \pm 0.39	99.45 \pm 0.89	96.94 \pm 2.67	98.60 \pm 2.14	93.34 \pm 5.04	87.25 \pm 7.61
EDOSE	99.62 \pm 0.33	98.55 \pm 1.17	89.95 \pm 4.54	96.53 \pm 2.41	83.62 \pm 6.45	72.00 \pm 8.78
<i>P</i> 值	0.013	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000

2.3 4 个不同物理模型对 EDOSE 剂量验证结果的影响

以物理模型 M_0 为基准,其它 3 个模型与 M_0 均有统计学意义($P<0.05$),平均 γ 通过率(2%/2 mm)的偏差分别是 5.1%(M_1 vs M_0)、1.8%(M_2 vs M_0)和 1.8%(M_3 vs M_0)。详见表 3。

表 3 EDOSE 的 4 个模型的比较

Table 3 Comparison among 4 EDOSE physical models

模型	μ_2	c_1	c_2	c_t	γ (3%/3 mm)		γ (3%/2 mm)		γ (2%/2 mm)	
					<i>Mean</i> \pm <i>SD</i>	<i>P</i> 值	<i>Mean</i> \pm <i>SD</i>	<i>P</i> 值	<i>Mean</i> \pm <i>SD</i>	<i>P</i> 值
M_0	0.35	-0.000 160	0.000 10	0.00	99.62 \pm 0.33%	-	98.54 \pm 1.16%	-	96.60 \pm 2.42%	-
M_1	0.38	0.000 040	0.000 40	0.05	98.25 \pm 1.90%	0.000	94.45 \pm 4.36%	0.000	91.48 \pm 6.42%	0.000
M_2	0.28	-0.000 130	0.000 10	0.00	98.88 \pm 1.13%	0.000	97.37 \pm 2.12%	0.001	94.84 \pm 3.41%	0.000
M_3	0.40	0.000 001	0.000 38	0.00	98.86 \pm 1.17%	0.000	97.33 \pm 2.20%	0.001	94.83 \pm 3.51%	0.001

3 讨论

为保证放疗的实施安全,所有调强放疗计划在用于患者治疗之前,均需在直线加速器上对其剂量分布进行验证。当计划剂量验证的 γ 通过率(3%/3 mm)大于 90%时,该计划才能用于治疗^[16-17]。SRT 技术具有分次剂量大、剂量梯度陡、射野面积小的特点,在小体积的肿瘤,特别是靶区与危及器官距离较小的肿瘤中的应用越来越广泛,对剂量验证设备的能量响应灵敏度、稳定性、空间分辨率等方面提出了极高的要求^[18-19],本研究使用的 SRS MapCHECK 系统采用半导体探测器,灵敏体积小且响应灵敏,很适合 SRT 计划的剂量验证。EDOSE 系统的探测器即为直线加速器自带的 EPID 设备,已有文献证实 EPID 设备在剂量验证方面的可行性,EPID 的空间分辨率极高,仅次于胶片,能量响应灵敏,能满足 SRT 计划验证的要求。

从实验结果来看,SRS MapCHECK 系统在 29 例 SRT 计划的绝对剂量 γ 通过率(3%/3 mm、3%/2 mm、2%/2 mm)均大于基于 EPID 的 EDOSE 系统,均满足 AAPM TG-218 号报告^[20]计划验证要求,且两者通过率具有统计学差异,本研究认为第一个原因是 EDOSE 的物理模型差异造成的。EDOSE 软件根据 EPID 测量得到的剂量结合式(1)和(2)计算出虚拟模体等中心层面的剂量,通过调整参数 μ_2 、 c_1 、 c_2 、 c_t 来确定 EPID 与虚拟模体的卷积核,参数的设置会影响计算公式的卷积核,

进而影响计算得到的虚拟模体中心层面的剂量结果,这可能导致推算得到的剂量与 TPS 计算得到的剂量存在一定差异。第二个原因是 EDOSE 剂量验证系统依赖 EPID 采集的图像信息并非是直接测量得到的绝对剂量,而是通过采集直线加速器出束时引起的电信号,生成 EPID 图像再转换成剂量分布,最后与 TPS 计算的计划剂量分布进行对比。在信号传输和转化过程中,EPID 的剂量响应特性会对剂量和剂量率的响应产生一定误差^[21-22],增加 EDOSE 剂量验证系统推算得到的虚拟模体中心层面的剂量结果误差,进而导致 γ 通过率降低。第三个原因是 EPID 设备的机械偏差,有文献表明 EPID 在不同机架角度时会有不同的机械偏差,若偏差 1 mm 时,对测度距离 1 mm 的 γ 通过率有影响,若偏差 2 mm,则对测度距离 2 mm 以下的 γ 通过率有影响,以此类推。

为了保证使用 EPID 进行剂量验证的可靠性和准确性,需要加强 EPID 的质量控制,定期采用 IQA 质控软件采集 EPID 集合数据或者发现同批测试的验证计划通过率均降低时需要检查机械运动、稳定性、图像质量等项目。在临床应用中,物理模型的建立受人为因素影响较大,在应用某一物理模型进行治疗计划验证前,必须反复验证。EDOSE 计划验证系统的最优物理模型应与直线加速器的物理性能相吻合,使得 TPS 计算得到的验证计划与机器实施出束的剂量相同,保证剂量的准确性。最优模型的建立需要严格执行设备的质控,采集大量的数据,找到最优的参数组合,使得 EDOSE 的物

理模型计算得到的结果与实际剂量相同。

本研究通过采用SRSSMapCHECK和EDOSE剂量验证软件结合EPID采集设备对不同方野及29例SRT计划进行绝对剂量验证比较,发现在临床实际应用中,SRS MapCHECK与EDOSE各有优势,均可用于验证SRT计划。SRS MapCHECK通过1 013个N型半导体探测器直接采集SRT计划剂量,不需要考虑剂量和剂量率的响应以及图像与剂量转化的问题,只需要保证探测设备的准确连接和精确摆位,就可以直接得到剂量验证结果。EDOSE软件是基于EPID采集的射线信号来计算剂量验证通过率的,其中EPID在放疗中具有良好的剂量和剂量率线性,且具有很好的重复性,没有角度响应,无需设备连接和摆位,自动化程度高,操作简单方便,节省验证时间,但需定时对EPID的响应特性、稳定性等项目进行检测校准。在EPID各项性能符合标准的情况下,EDOSE剂量验证软件需要结合实际使用的直线加速器及自带的EPID的特性建立合适的物理模型便可用于计划剂量验证。本研究病例数较少,并未单独将SBRT计划及SRS计划、对于单中心多靶点计划及单中心单靶点的计划计划分类进行剂量验证比较。

未来工作将采集更多病例并对病例进行分类,且进行多种设备验证比较,并从计划验证通过率的原理上分析多种设备对于SBRT、SRS计划的优劣,为临床选择合适的验证设备提供依据,为SRT计划的准确性提供保障。

【参考文献】

- [1] LEKSELL L. Stereotactic radiosurgery [J]. J Neurol Neurosurg Psychiatry, 1983, 46(9): 797-803.
- [2] CHANG E L. Stereotactic body radiation therapy [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2005, 63(2): 643.
- [3] TRIFILETTI D M, CHAO S T, SAHGAL A, et al. Stereotactic radiosurgery and stereotactic body radiation therapy [M]. Cham: Springer, 2019.
- [4] ARISTU J J, CIÉRVIDE R, GURIDI J, et al. Stereotactic radiation therapy [J]. An Sist Sanit Navar, 2009, 32 Suppl 2(1): 61-71.
- [5] LECHNER W, WESOLOWSKA P, AZANGWE G, et al. A multinational audit of small field output factors calculated by treatment planning systems used in radiotherapy [J]. Phys Imaging Radiat Oncol, 2018, 5: 58-63.
- [6] FOGLIATA A, LOBEFALO F, REGGIORI G, et al. Evaluation of the dose calculation accuracy for small fields defined by jaw or MLC for AAA and Acuros XB algorithms [J]. Med Phys, 2016, 43(10): 5685-5694.
- [7] 杨晶, 梁志文, 刘洪源, 等. SRS MapCHECK 半导体矩阵探测器的校准及临床计划质量保证应用评估 [J]. 中国医学装备, 2020, 17(6): 29-33.
- [8] YOUNG J, LIANG Z W, LIU H Y, et al. Calibration and assessment of the SRS MapCHECK diode matrix detector and the application of clinical treatment plan QA [J]. China Medical Equipment, 2020, 17(6): 29-33.
- [9] LASSOT M, DREZET L, SALOMON O, et al. 67 Study of a new detector for stereotactic treatments: the SRS MapCheckTM [J]. Phys Med, 2019, 68(1): 41.
- [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] POPPE B, DJOUGUELA A, BLECHSCHMIDT A, et al. Spatial resolution of 2D ionization chamber arrays for IMRT dose verification: single-detector size and sampling step width [J]. Phys Med Biol, 2007, 52(10): 2921-2935.
- [12] International Atomic Energy Agency. IAEA Technical Reports Series No.398. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy. An International code of practice, second edition [R]. Vienna: IAEA, 1997.
- [13] International Atomic Energy Agency. IAEA Technical Reports Series No.277. Absorbed dose determination in photon and electron beam. An international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water [R]. Vienna: IAEA, 2000.
- [14] 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.
- [15] HERMAN M G, BALTER J M, JAFFRAY D A, et al. Clinical use of electronic portal imaging: report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 58 [J]. Med Phys, 2001, 28(5): 712-737.
- [16] 朱金汉, 陈立新, 新光华, 等. 基于电子射野影像装置的容积调强弧形治疗二维剂量验证研究 [J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2012, 21(6): 550-553.
- [17] ZHU J H, CHEN L X, JIN G H, et al. The study of two-dimensional dosimetric verifications of volumetric intensity-modulated arc therapy based on electronic portal imaging devices [J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2012, 21(6): 550-553.
- [18] 张喜乐, 杨瑞杰, 李君, 等. 立体定向调强放射治疗剂量验证结果分析 [J]. 中华放射医学与防护杂志, 2019, 39(9): 680-685.
- [19] ZHANG X L, YANG R J, LI J, et al. Analysis of dosimetric verification results of stereotactic body radiotherapy [J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2019, 39(9): 680-685.
- [20] 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.
- [21] BENEDICT S H, YENICE K M, FOLLOWILL D, et al. Stereotactic body radiation therapy: the report of AAPM Task Group 101 [J]. Med Phys, 2010, 37(8): 4078-4101.
- [22] PLMANS H, ANDREO P, HUQ M S, et al. Dosimetry of small static fields used in external photon beam radiotherapy: summary of TRS-483, the IAEA-AAPM international code of practice for reference and relative dose determination [J]. Med Phys, 2018, 45(11): e1123-e1145.
- [23] 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): 53-83.
- [24] WINKLER P, GEORG D. An intercomparison of 11 amorphous silicon EPIDs of the same type: implications for portal dosimetry [J]. Phys Med Biol, 2006, 51(17): 4189-200.
- [25] 孙彦泽, 苗利, 殷旭君, 等. 非晶硅电子射野影像装置的性能研究 [J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2012, 30(3): 178-182.
- [26] SUN Y Z, MIAO L, YIN X J, et al. Research on the performance of amorphous silicon electronic field imaging device [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2012, 30(3): 178-182.

(编辑:谭斯允)