

# 基于 ArcCHECK 模体的 VMAT 计划验证及摆位误差对剂量验证的影响

沈浩, 夏兵

中国医科大学附属第一医院放疗科, 辽宁 沈阳 110001

**【摘要】目的:**探究 ArcCHECK 模体在旋转容积调强技术 (VMAT) 计划验证中的应用, 并利用软件模拟摆位误差对剂量验证的影响。**方法:**随机收集 45 例 VMAT 计划, 分别选取胸部肿瘤、乳腺癌和宫颈癌各 15 例, 将 ArcCHECK 模体实测的剂量分布与计划系统计算的结果进行对比分析, 分别探究在阈值 10% 下, 3%/3 mm 和 2%/2 mm 时, Gamma 分析与 DTA 分析下相对剂量 (RD) 与绝对剂量 (AD) 的通过率。利用 SUNnuclear 公司 Sunpatient 软件将计划系统计算的剂量分布与实际测量的剂量分布进行对比, 并利用软件模拟旋转误差, 分别旋转  $\pm 0.5^\circ$ 、 $\pm 1^\circ$ 、 $\pm 1.5^\circ$ 、 $\pm 2^\circ$ , 将旋转后的剂量分布与计划系统计算剂量分布对比, 得到旋转误差下的计划验证通过率; 同样利用软件模拟平移误差, 分别向 X、Y 方向平移  $\pm 1$ 、 $\pm 2$ 、 $\pm 3$ 、 $\pm 5$  mm 后进行剂量分布对比, 得到平移误差下的计划验证通过率。**结果:**当阈值选择 10%、3%/3 mm 时, Gamma 分析时, RD 与 AD 下各部位的通过率基本达到 95% 及以上, DTA 分析时, RD 和 AD 下各部位的通过率基本达到 90% 及以上。当阈值选择 10%、2%/2 mm 时, 各部位肿瘤 VMAT 计划的验证通过率无论在 Gamma 还是 DTA 分析时, RD 和 AD 的平均通过率只有 80% 左右。存在误差时, 旋转误差大于等于  $1^\circ$  时, 各部位肿瘤 VMAT 计划验证在两种分析方法下通过率的单因素方差分析结果显示  $P < 0.05$ ; X 方向和 Y 方向平移误差大于等于 3 mm 时, 单因素方差分析结果显示  $P < 0.05$ 。**结论:**ArcCHECK 模体能很好地应用于 VMAT 计划的验证, 阈值选择 10%、3%/3 mm 时, 胸部肿瘤、乳腺癌和宫颈癌验证通过率均能达到 95% 及以上; 阈值选择 10%、2%/2 mm 时通过率均有大幅度下降, 仅有 80% 左右。旋转误差大于等于  $1^\circ$  时对计划验证通过率有显著影响, 差异具有统计学意义, 同样 X 方向或 Y 方向平移误差大于等于 3 mm 时, 两种分析方法下的计划验证通过率均有显著差异。

**【关键词】**ArcCHECK; 旋转容积调强技术; 剂量验证; Gamma 分析; DTA 分析; 摆位误差

**【中图分类号】**R811.1

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2020)04-0431-08

## VMAT plan verification based on ArcCHECK phantom and the effects of setup error on dose verification

SHEN Hao, XIA Bing

Department of Radiotherapy, the First Affiliated Hospital of China Medical University, Shenyang 110001, China

**Abstract: Objective** To explore the application of ArcCHECK phantom in volumetric modulated arc therapy (VMAT) plan verification, and to simulate the effects of setup error on dose verification by software. **Methods** A total of 45 VMAT plans were randomly collected, including 15 cases of chest tumors, 15 cases of breast cancer and 15 cases of cervical cancer. The dose distribution measured by ArcCHECK phantom was compared with the calculated result of planning system for analyzing the passing rates of relative dose (RD) and absolute dose (AD) under Gamma analysis and DTA analysis with the threshold at 10%, 3%/3 mm and 2%/2 mm. The Sunpatient software from SUNnuclear was used to compare the dose distribution calculated by planning system with the measured dose distribution and to simulate rotation errors by rotating  $\pm 0.5^\circ$ ,  $\pm 1^\circ$ ,  $\pm 1.5^\circ$ ,  $\pm 2^\circ$ , respectively. The passing rate of plan verification under rotation errors was obtained by comparing the dose distribution after rotation and the dose distribution calculated by planning system. The software was also used to simulate translation errors. The passing rate of plan verification under translation errors was obtained by comparing the dose distribution after shifting  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ ,  $\pm 3$ ,  $\pm 5$  mm to the X and Y directions, respectively, and the calculated results. **Results** When the threshold was selected at 10%, 3%/3 mm, the passing rate of RD and AD in VMAT plans for different cancer was basically up to or higher than 95% in Gamma analysis and 90% in DTA analysis. When

**【收稿日期】**2019-11-21

**【作者简介】**沈浩, 硕士, 研究方向: 放疗物理学与剂量学, E-mail: shenhao\_91@163.com

**【通信作者】**夏兵, 研究方向: 放疗物理学与剂量学, E-mail: xia6581@sohu.com

the threshold was selected at 10%, 2%/2 mm, the average passing rates of RD and AD in VMAT plan for different cancer were only about 80% whether in Gamma analysis or DTA analysis. When the rotation error was greater than or equal to  $1^\circ$ , the one-way ANOVA on the passing rate of VMAT plan verification by two analysis methods showed that the  $P$  value was less than 0.05. When the translation errors in X and Y directions were greater than or equal to 3 mm, one-way ANOVA showed that the  $P$  values were also less than 0.05. **Conclusion** ArcCHECK phantom can be well applied to VMAT plan verification. With the threshold at 10%, 3%/3 mm, the passing rate of the verification of VMAT plans for chest tumors, breast cancer and cervical cancer is up to or higher than 95%, but the passing rate is dropped to about 80% when the threshold was set at 10%, 2%/2 mm. The rotation error which is greater than or equal to  $1^\circ$  has a significant effect on the passing rate of plan verification, with statistical differences. When the translation errors in X or Y directions are greater than or equal to 3 mm, there are significant differences in the passing rate of plan verification between two analysis methods.

**Keywords:** ArcCHECK; volumetric modulated arc therapy; dose verification; Gamma analysis; DTA analysis; setup error

## 前言

随着放疗技术的快速发展,调强放疗技术无论是静态调强技术(IMRT)还是旋转容积调强技术(VMAT)已经普遍应用到日常的放射治疗中。VMAT一定程度上可以提高剂量的均匀性并且能够有效减少治疗时间,但VMAT计划较为复杂,其剂量分布与剂量率、机架旋转速度、准直器角度及多叶光栅位置有关<sup>[1-3]</sup>。这些参数在治疗的过程中不断变化,从而达到正常组织与肿瘤组织之间的高剂量梯度和适形度,一些因高剂量梯度造成的潜在剂量误差无论对肿瘤组织还是正常组织都具有不利影响<sup>[2]</sup>,因而质量控制与保证在高精度和复杂的治疗计划中显得额外重要。过去的几十年中,众多的测量设备得到应用,简化了放疗计划的质量控制流程。二维的测量设备主要有 MatriXX (IBA, Germany) 和 MapCHECK, 三维的测量设备主要有 ArcCHECK (Sun Nuclear, USA) 和 Delta4 (ScandiDos, USA)<sup>[4]</sup>。国内外多家医院和机构对上述质控设备的应用进行了报道<sup>[5-6]</sup>。本文应用 ArcCHECK 模体实际测量 VMAT 计划剂量分布图,然后与 TPS 计算得到的剂量分布图进行比较,并模拟摆位误差(旋转误差与平移误差)对通过率的影响。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究对象

选择医师与物理师共同确认后的 VMAT 治疗计划 45 例,其中胸部肿瘤(肺癌,食管癌,胸腺瘤)15 例,乳腺癌 15 例(保乳术后),宫颈癌 15 例。

### 1.2 设备与软件

加速器为医科达公司 Synergy 型号加速器,主要使用 6 MeV X 射线,40 对多叶光栅,叶片厚度 1 cm,最高剂量率 600 MU/min。计划系统(TPS)为 Raystation,验证模体选择 Sun Nuclear 公司的

ArcCHECK,它是一种三维测量放射剂量分布的质控系统,圆柱形等效水模体及 1 386 个半导体探测器组成,每个探测器间距 10 mm,模体中心有一个直径为 15 cm 的固态均质心,用以满足多种剂量测定的配件使用,如电离室或其他半导体探头。ArcCHECK 中有两个倾斜计测量轴的旋转,同时有温度传感器监测半导体探头周围温度,探头测量的剂量每隔 50 ms 更新一次,没有时间和剂量的限制,分析对比软件使用 Sun Nuclear 公司的 Patient。

### 1.3 ArcCHECK 校准

本底校验模体后,校验 ArcCHECK 模体摆位,利用两个长条射野,分别是机架角度  $0^\circ$  时,射野大小  $(2 \times 20)$  cm<sup>2</sup>, 100 MU, Patient 软件记录,观察并调整 X 轴方向的对称性;机架角度为  $90^\circ$  时,射野  $(2 \times 20)$  cm<sup>2</sup>, 100 MU, Patient 软件记录,观察并调整 Y 轴方向的对称性;最后设置  $(10 \times 10)$  cm<sup>2</sup> 射野, 100 MU, Patient 软件记录校验中心处剂量,如有偏差,及时调整校正。

### 1.4 VMAT 计划测量与 QA

所有计划均在计划系统 Raystation 上设计优化完成,使用 6 MV X 射线,剂量率 600 MU/min,计算网格大小为 0.4 cm。计划中包括单双全弧或部分弧,全弧中 90 个控制点,MLC 运动速度设为 0.5 cm/s,靶区覆盖均达到处方剂量的 95% 及以上。计划均传输至 MOSAIQ 系统,QA 计划在计划系统上设计完成,将 RTPlan 与 RTDose 文件导出保存至相应的文件夹。

### 1.5 分析方法

计划通过率分析方法分别测试了 Gamma 分析方法与 DTA 分析方法下的相对剂量通过率和绝对剂量通过率,阈值分别设置了 10%、3%/3 mm 和 10%、2%/2 mm。将 QA 计划中的 RTPlan 与 RTDose 文件导入至 Patient 软件与实测的进行对比分析。利用 Patient 软件自带旋转和平移功能模拟测量摆位的旋转误差和平移误差,旋转角度分别选择  $\pm 0.5^\circ$ 、 $\pm 1^\circ$ 、 $\pm 1.5^\circ$ 、 $\pm 2^\circ$ ,

平移分别在 X、Y 方向平移±1、±2、±3、±5 cm,对比分析此时的通过率,阈值条件均为 10%、3%/3 mm。统计软件为 Excel 2010,数据分析软件为 SPSS 19.0,对各组摆位误差的通过率数据进行单因素方差分析并进行两两比较(LSD 分析)判断差异的显著性, $P<0.05$ 为差异具有统计学意义。

## 2 结 果

### 2.1 不同部位肿瘤 VMAT 计划的剂量验证通过率分析

表 1 Gamma 分析方法下不同部位 VMAT 计划在不同阈值条件下的平均通过率(%)  
Tab.1 Average passing rate of the verification of VMAT plans for different cancer by Gamma analysis at different thresholds (%)

阈值	胸部肿瘤		乳腺癌		宫颈癌	
	相对剂量	绝对剂量	相对剂量	绝对剂量	相对剂量	绝对剂量
3%/3 mm, 10%	97.7±1.6	94.0±5.7	97.3±2.4	97.5±2.0	98.7±1.1	97.2±2.5
2%/2 mm, 10%	89.4±5.1	81.6±13.3	87.6±6.8	87.8±5.4	88.8±8.4	83.5±10.1

表 2 DTA 分析方法下不同部位 VMAT 计划在不同阈值条件下的平均通过率(%)  
Tab.2 Average passing rate of the verification of VMAT plans for different cancer by DTA analysis at different thresholds (%)

阈值	胸部肿瘤		乳腺癌		宫颈癌	
	相对剂量	绝对剂量	相对剂量	绝对剂量	相对剂量	绝对剂量
3%/3 mm, 10%	95.6±2.4	90.4±8.1	94.8±3.3	94.8±3.1	96.7±2.1	93.3±5.1
2%/2 mm, 10%	86.5±5.9	77.1±15.4	84.1±7.1	84.0±6.0	84.2±10.4	78.4±12.1

图 1a、图 1b、图 1c 分别为胸部肿瘤、乳腺癌和宫颈癌患者中的 1 例 VMAT 计划的实际测量剂量分布图和计划系统计算的剂量图对比情况(阈值均 3%/3 mm、10%,相对剂量),左侧为实际测量的剂量图,右侧为计划系统计算的剂量分布图,Gamma 分析方法下通过率均能达到一个较高水平,满足临床需求。

### 2.2 旋转误差对 VMAT 计划剂量通过率的影响

考虑旋转误差时,统计在阈值条件选择 3%/3 mm、10%时的 VMAT 计划剂量验证通过率,分析旋转误差对通过率的影响。不同部位 VMAT 计划旋转误差下通过率如图 2 所示。当旋转角度小于等于 0.5°时,计划剂量验证通过率大于 90%;当旋转角度大于等于 1°时,计划验证通过率均低于 90%。不同误差下整体 VMAT 计划剂量通过率呈现金字塔形,无误差时,剂量验证通过率最高,随着顺时针和逆时针方向的旋转误差逐渐增加,通过率逐渐减小。

不同旋转误差条件下,对剂量验证通过率进行

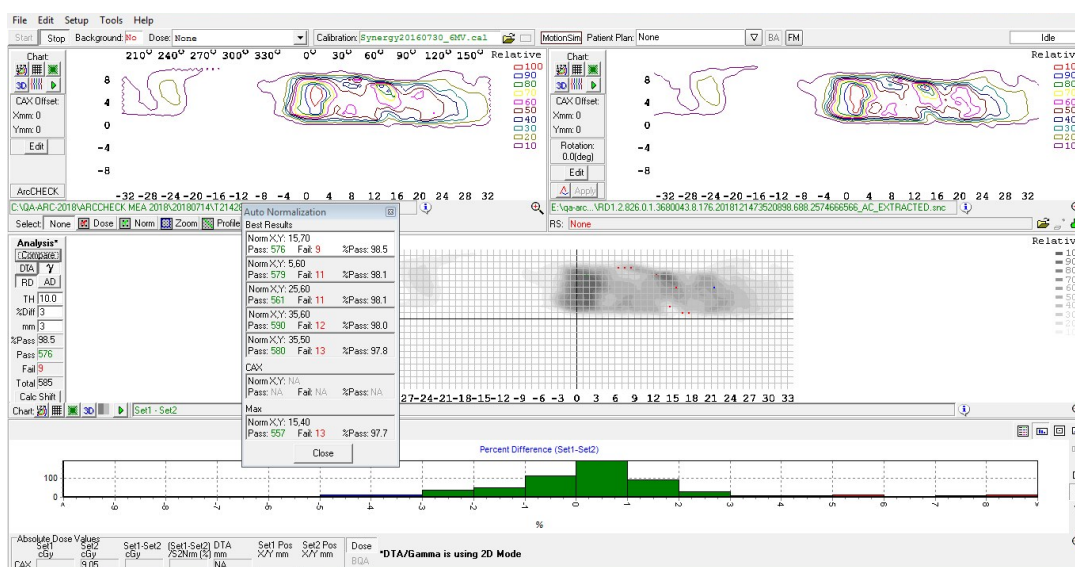
不同部位肿瘤 VMAT 计划在正常情况时, Gamma 分析方法和 DTA 分析方法下,在不同阈值设置条件下的相对剂量通过率和绝对剂量通过率的平均值分别见表 1 和表 2。在阈值选择 3%/3 mm, 10%时,各部位肿瘤的 VMAT 计划相对剂量下的 Gamma 方法或者 DTA 方法下的通过率均达到 95% 及以上;绝对剂量时,通过率在 90% 及以上。当阈值条件变为 2%/2 mm, 10%时,可以看到无论是哪种方法通过率均大幅度下降,在 80% 左右,而且波动幅度较大。

单因素方差分析并进行两两比较,不同旋转角度与零度时的通过率进行比较得到的  $P$  值如表 3 所示。由表 3 可知,当旋转误差为±0.5°时,无论是相对剂量还是绝对剂量, $P$  值均大于 0.05, Gamma 分析下的通过率无明显差异,不具有统计学意义,说明当机架旋转误差在小于等于 0.5°时对 VMAT 计划的 Gamma 分析通过率影响较小;当旋转误差大于 0.5°时, $P$  值均小于 0.05,具有统计学意义, Gamma 分析通过率有明显差异,机架旋转误差大于 0.5°时对 VMAT 计划验证影响较大。

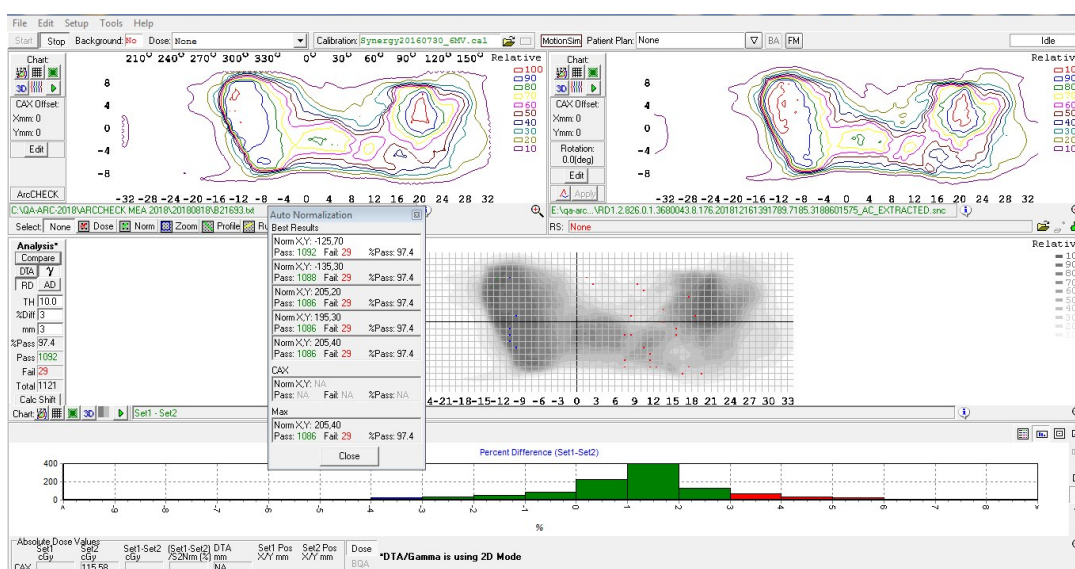
### 2.3 X 方向平移误差对 VMAT 计划剂量验证通过率的影响

考虑 X 方向平移误差时,不同部位 VMAT 计划在阈值条件选择 3%/3 mm、10%时,X 方向平移误差下通过率如图 3 所示,数据显示当 X 方向平移误差小于等于 2 mm 时,计划剂量验证通过率基本达到 90% 及以上;当 X 方向平移误差大于等于 3 mm 时,计划

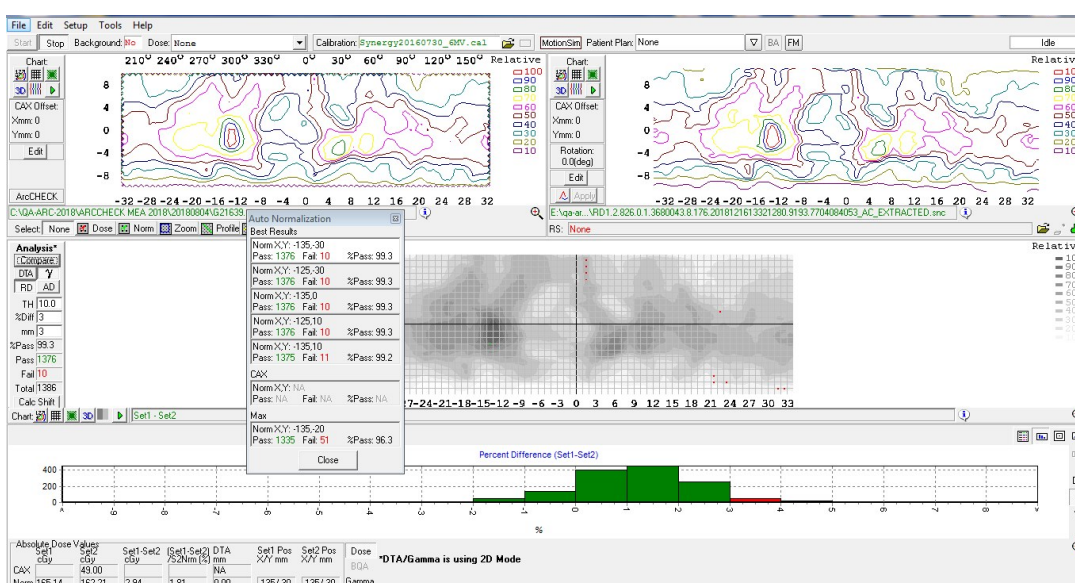




a: 胸部肿瘤



b: 乳腺癌



c: 宫颈癌

图1 VMAT计划Gamma分析下QA示例

Fig.1 Examples of QA reports of Gamma analysis on VMAT plans

左半部分为实际测量剂量分布,右半部分为计算剂量分布

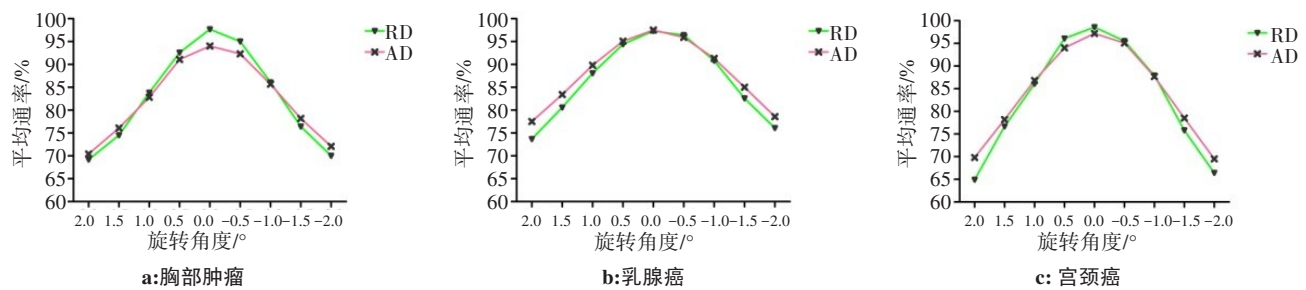


图2 旋转误差下不同部位肿瘤 VMAT 计划剂量验证通过率曲线图

Fig.2 Passing rates of the dose verification of VMAT plans for different cancer with rotation errors

RD: 相对剂量; AD: 绝对剂量

表3 旋转误差对各部位肿瘤 VMAT 计划 Gamma 通过率影响的方差分析结果

Tab.3 Results of variance analysis on the effects of rotation errors on the Gamma passing rates of VMAT plans for different cancer

旋转角度	胸部肿瘤		乳腺癌		宫颈癌	
	绝对剂量	相对剂量	绝对剂量	绝对剂量	相对剂量	绝对剂量
2°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.5°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1°	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000
0.5°	0.255	0.350	0.301	0.256	0.461	0.041
-0.5°	0.571	0.578	0.753	0.464	0.357	0.186
-1°	0.001	0.009	0.021	0.004	0.002	0.000
-1.5°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-2°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

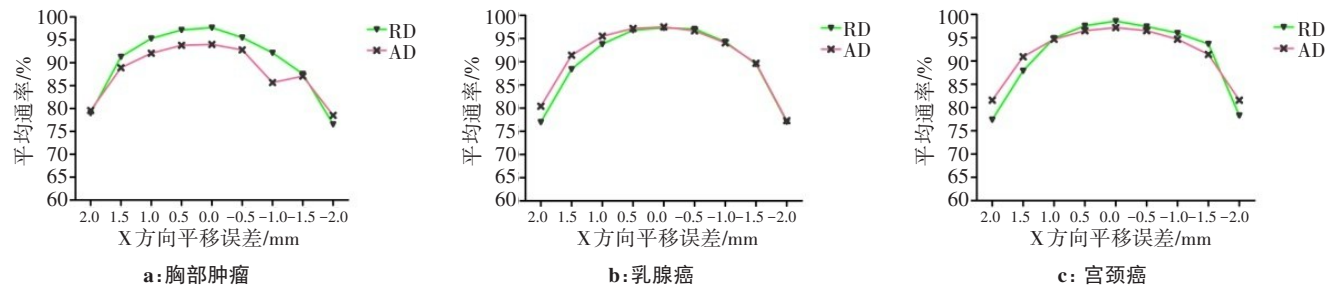


图3 X轴平移误差下不同部位肿瘤 VMAT 计划剂量验证通过率曲线图

Fig.3 Passing rates of the dose verification of VMAT plans for different cancer with X-directional translation errors

RD: 相对剂量; AD: 绝对剂量

验证的通过率均低于90%。随着X方向平移误差逐渐增加,通过率逐渐减小。

不同X方向平移误差条件下,对剂量验证通过率进行单因素方差分析并进行两两比较,不同平移长度与零时的通过率进行比较得到的P值如表4所示。由表4可知,当X方向平移误差小于等于2 mm时,无论是相对剂量还是绝对剂量,P值均大于0.05,Gamma分析下的通过率无明显差异,不具有统计学意义,说明当X方向平移误差在小于等于2 mm时,对VMAT计划的Gamma

分析通过率影响较小;当X方向平移误差大于2 mm时,P值均小于0.05,具有统计学意义,Gamma分析通过率有明显差异,X方向平移误差在大于2 mm时,对VMAT计划验证影响较大。

2.4 Y方向平移误差对VMAT计划剂量通过率的影响

Y方向平移误差时,不同部位VMAT计划在阈值条件选择3%/3 mm、10%时,Y方向平移误差下通过率如图4所示。数据显示当Y方向平移误差小于等于2 mm

表4 X方向平移误差对各部位肿瘤VMAT计划Gamma通过率影响的方差分析结果  
Tab.4 Results of variance analysis on the effects of X-directional translation errors on the  
Gamma passing rates of VMAT plans for different cancer

X方向平移/mm	胸部肿瘤		乳腺癌		宫颈癌	
	绝对剂量	相对剂量	绝对剂量	绝对剂量	相对剂量	绝对剂量
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.013	0.036	0.000	0.000	0.000	0.001
2	0.397	0.411	0.064	0.154	0.202	0.166
1	0.964	0.980	0.770	0.815	0.734	0.709
-1	0.451	0.621	0.903	0.593	0.665	0.711
-2	0.032	0.144	0.113	0.017	0.364	0.181
-3	0.000	0.005	0.000	0.000	0.096	0.002
-5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

时,计划剂量验证通过率基本达到90%及以上;当Y方向平移误差大于等于3 mm时,计划验证的通过率均低于90%。随着Y方向平移误差逐渐增加,通过率逐渐减小,整体结果与X方向平移误差相似。

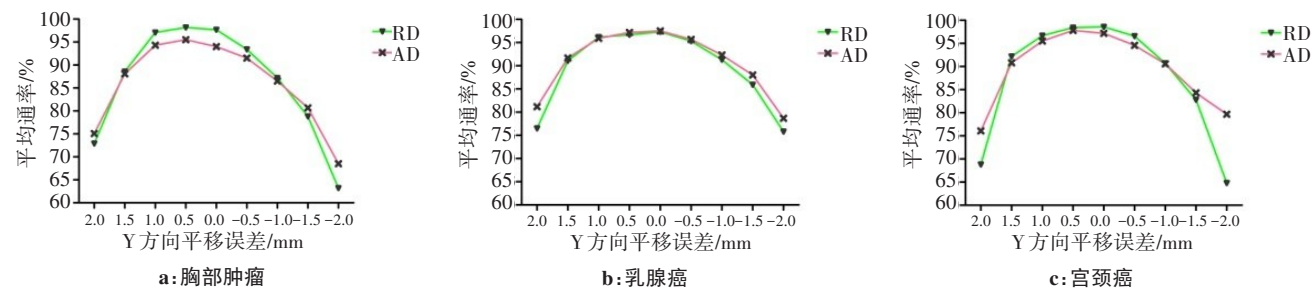


图4 Y方向平移误差下不同部位肿瘤VMAT计划剂量验证通过率曲线图

Fig.4 Passing rates of the dose verification of VMAT plans for different cancer with Y-directional translation errors

RD:相对剂量;AD:绝对剂量

Y方向平移误差条件下,对剂量验证通过率进行单因素方差分析并进行两两比较,不同平移长度与零时的通过率进行比较得到的 $P$ 值如表5所示。由表5可知,当Y方向平移误差小于等于2 mm时,无论是相对剂量还是绝对剂量, $P$ 值均大于0.05,Gamma分析下的通过率无明显差异,不具有统计学意义,说明当Y方向平移误差在小于等于2 mm时对VMAT计划的Gamma分析通过率影响较小;当Y方向平移误差大于2 mm, $P$ 值均小于0.05,具有统计学意义,Gamma分析通过率有明显差异,Y方向平移误差大于2 mm对VMAT计划验证影响较大。DTA方法下数据分析结果与Gamma分析方法下的结果相似,具体数据不再列出。

3 讨论

由于VMAT计划的多参数变化特性导致其计划

更容易发生错误,导致剂量的不准确性<sup>[7-9]</sup>,对其剂量的验证和质控工作显得尤为重要。目前很多商用的质控设备得以广泛应用,传统的二维矩阵如MatriXX、MapCHECK等<sup>[10-12]</sup>,但由于VMAT计划在执行过程中机架旋转、MLC叶片运动、剂量率变化等,因此需要三维验证。二维矩阵在验证旋转计划时往往具有角度的依赖性<sup>[13]</sup>,造成较大误差,导致验证结果的不准确性。ArcCHECK是一种圆柱体的半导体探测器,有较高的灵敏度、重复性和剂量相应线性度好等优点,能很好地应用于旋转计划的剂量验证<sup>[5,14-15]</sup>。

本文研究利用ArcCHECK对45例不同部位的VMAT计划进行了剂量分布的验证,整体结果显示,应用Gamma分析或者DTA分析方法在阈值选择10%、3%/3 mm时,相对剂量或者绝对剂量下的通过率均大于90%,相对剂量条件下通过率更高可达到

表5 Y 方向平移误差对各部位肿瘤 VMAT 计划 Gamma 通过率影响的方差分析结果

Tab.5 Results of variance analysis on the effects of Y-directional translation errors on the Gamma passing rates of VMAT plans for different cancer

Y 方向平移/mm	胸部肿瘤		乳腺癌		宫颈癌	
	绝对剂量	相对剂量	绝对剂量	绝对剂量	相对剂量	绝对剂量
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.031	0.036	0.041	0.009	0.035	0.000
2	0.956	0.411	0.702	0.474	0.527	0.296
1	0.816	0.980	0.830	0.900	0.947	0.689
-1	0.330	0.621	0.498	0.404	0.505	0.113
-2	0.012	0.144	0.050	0.019	0.010	0.000
-3	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000
-5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

95%及以上。胸部肿瘤(本文中包括肺癌、食管癌、胸腺瘤)主要危及器官有肺、心脏和脊髓,肺部所受 $V_5$ 、 $V_{20}$ 、 $V_{mean}$ 剂量是临床上主要评估放射性肺炎的参考指标,当旋转误差大于等于 $1^{\circ}$ 时,会对肺部所受剂量造成一定影响,因此剂量的准确性对这些指标的影响较大。宫颈癌的靶区多数较长,超出了 ArcCHECK 模体 21 cm 的长度,因此剂量分布图会不完整,这样造成边缘剂量的不准确性<sup>[16]</sup>,但测量结果可以看出多数剂量的误差发生在剂量分布图的边缘,而不是靶区范围内,因此对计划质量的影响较小。乳腺癌计划的靶区虽然均靠近体表,但乳腺癌患者的生存周期相对较长。肺部、心脏和冠脉等器官的受量关乎到患者治疗后的生活质量,而旋转误差和平移误差会带来危及器官剂量上的影响,进而造成一些并发症<sup>[17]</sup>,因此计划质量的控制尤为重要。由图 1 中 3 个案例分析可以看出,剂量的误差主要集中在靶区边缘位置,靶区的剂量分布较准确。本研究主要通过 ArcCHECK 模体测量出的宏观上的剂量分布评价 VMAT 计划情况,整体通过率较高,但各个危及器官的受量是否准确未知,以后的验证工作还应该结合 DVH 方法,不但要宏观地分析剂量分布通过率情况,还要加强对危及器官受量的分析情况<sup>[18-22]</sup>。放疗治疗计划的质量控制不仅是剂量上的控制,摆位误差的控制也十分重要,本研究结果显示旋转误差大于等于 $1^{\circ}$ 时,平移误差大于等于 3 mm 时, Gamma 通过率均迅速降低,差异具有显著性,因此治疗过程中同样要密切关注摆位误差。

未来工作应增加样本量进一步探究 VMAT 计划的通过率情况,并重点针对未通过的计划进行探究,发现影响剂量误差的因素,为放疗计划的准确性提供保障。

【参考文献】

[1] GILLES M, LISE S, RODOLFE V, et al. Assessment of combined use of ArcCHECK detector and portal dosimetry for delivery quality assurance of head and neck and prostate volumetric-modulated arc therapy[J]. J Appl Clin Med Phys, 2018, 19(6): 133-139.

[2] ARISTOPHANOUS M, SUH Y, CHI P C, et al. Initial clinical experience with ArcCHECK for IMRT/VMAT QA[J]. J Appl Clin Med Phys, 2016, 17(5): 1-14.

[3] 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.

[4] HO S J, HUN-J S, SEUNG K C, et al. Dosimetric verification by using the ArcCHECK system and 3DVH software for various target sizes[J]. PLoS One, 2015, 10(3): e0119937.

[5] THIYAGARAJAN R, NAMBIRAJ A, SINHA S N, et al. Analyzing the performance of ArcCHECK diode array detector for VMAT plan [J]. Rep Pract Oncol Radiother, 2015, 21(1): 50-56.

[6] BEDFORD J L, LEE Y K, WAI P, et al. Evaluation of the Delta4 phantom for IMRT and VMAT verification[J]. Phys Med Biol, 2009, 54(9): 167-176.

[7] ELLEFSON S T, CULBERSON W S, BEDNARZ B P, et al. An analysis of the ArcCHECK-MR diode array's performance for ViewRay quality assurance[J]. J Appl Clin Med Phys, 2017, 18(4): 161-171.

[8] 张俊俊, 邱小平, 李奇欣, 等. ArcCHECK 系统在鼻咽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, 2014, 31(5): 5136-5138.

ZHANG J J, QIU X P, LI Q X, et al. Dosimetric verification of volumetric modulated arc therapy in nasopharyngeal carcinoma using ArcCHECK system[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2014, 31(5): 5136-5138.

[9] MATUSZAK M M, YAN D, GRILLS I, et al. Clinical applications of volumetric modulated arc therapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2010, 77(2): 608-616.

[10] PADANNAYIL N M, KOCHUNNY A K, PUZHAKKAL N, et al. Study of impacts of different evaluation criteria on gamma pass rates in VMAT QA using MatriXX and EPID[J]. Pol J Med Phys Eng, 2017, 23(4): 99-107.

[11] ANVARA M V, ATTILI A, CIOCCA M, et al. Quality assurance of



- carbon ion and proton beams: a feasibility study for using the 2D MatriXX detector[J]. *Phys Med*, 2016, 32(6): 831-837.
- [12] BAILEY D W, SPAANS J D, KUMARASWAMY L K, et al. The MapCHECK measurement uncertainty function and its effect on planar dose pass rates[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2016, 17(2): 165-173.
- [13] 易金玲, 金献测, 周永强, 等. 鼻咽癌IMRT与VMAT治疗的计划与剂量验证比较研究[J]. *中国医学物理杂志*, 2013, 30(1): 3859-3865.
- YI J L, JIN X C, ZHOU Y Q, et al. Comparative study on planning and dose verification of IMRT and VMAT in nasopharyngeal carcinoma[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2013, 30(1): 3859-3865.
- [14] 吴爱林, 吴爱东, 耿国星, 等. PTW729和ArcCHECK探测器在调强放射治疗剂量验证中的应用[J]. *中国医学物理学杂志*, 2016, 33(5): 473-477.
- WU A L, WU A D, GENG G X, et al. Application of PTW729 and ArcCHECK detectors in dose verification of intensity modulated radiation therapy[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2016, 33(5): 473-477.
- [15] CUEVAS F T, FERNANDEZ P D. Quality assurance of dosimetric parameters with varying gantry angle with ArcCHECK[J]. *Phys Med*, 2016, 32(3): 331.
- [16] 蔡勇君, 柏朋刚, 方卫宁, 等. 94例容积旋转调强治疗宫颈癌ArcCHECK验证研究[J]. *医疗装备*, 2013, 26(8): 36-38.
- CAI Y J, BAI P G, FANG W N, et al. Investigation of 94 patients' dosimetric verification of volumetric modulated arc therapy for cervical carcinoma using ArcCHECK[J]. *Chinese Journal of Medical Device*, 2013, 26(8): 36-38.
- [17] 张俊俊. 基于ArcCHECK模体研究摆位误差对调强放疗计划验证的影响[D]. 衡阳: 南华大学, 2015.
- ZHANG J J. Study on the influence of placement error on the verification of intensity-modulated radiotherapy plan based on ArcCHECK[D]. Hengyang: Nanhua University, 2015.
- [18] MOHAMED A B, ALSHEHRI Y S, ALHADAB A, et al. DVH analysis using a transmission detector and model-based dose verification system as a comprehensive pretreatment QA tool for VMAT plans: clinical experience and results[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2019, 20(11): 80-87.
- [19] LOW C, TOYE W, PHUNG P, et al. Patient-specific quality assurance protocol for volumetric modulated Arc therapy using dose volume histogram[J]. *J Med Phys*, 2018, 43(2): 112-118.
- [20] SAITO M, KADOYA N, SATO K, et al. Comparison of DVH-based plan verification methods for VMAT: arcCHECK-3DVH system and dynalog-based dose reconstruction[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2017, 18(4): 206-214.
- [21] KADOYA N, SAITO M, OGASAWARA M, et al. Evaluation of patient DVH-based QA metrics for prostate VMAT: correlation between accuracy of estimated 3D patient dose and magnitude of MLC misalignment[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2015, 16(3): 179-189.
- [22] ZHEN H, NELMS B E, TOME W A. Moving from gamma passing rates to patient DVH-based QA metrics in pretreatment dose QA[J]. *Med Phys*, 2011, 38(10): 5477-5489.

(编辑:黄开颜)