

## ArcCheck探测螺旋断层放疗误差的敏感性

闫冰<sup>1</sup>, 吴爱林<sup>2</sup>, 薛旭东<sup>1</sup>, 张红雁<sup>1</sup>, 吴爱东<sup>1</sup>

1. 中国科学技术大学附属第一医院/安徽省立医院放疗科, 安徽 合肥 230001; 2. 中国科学技术大学附属第一医院西区/安徽省肿瘤医院放疗科, 安徽 合肥 230001

**【摘要】目的:**针对螺旋断层放疗(HT)系统,分析ArcCheck验证患者计划通过率对治疗床运动速度误差、机架旋转周期误差、机架起始角度误差、多叶准直器叶片开启时间误差的敏感性。**方法:**选取9例行HT的鼻咽癌患者计划,由自编程序生成与原计划相对应的误差计划。应用点剂量及Gamma分析,计算得出上述误差的临床可检测误差值。**结果:**所有患者的原计划采用3%/2 mm、2%/1 mm标准时的平均Gamma通过率分别为97.49%±1.08%、73.38%±4.31%。应用3%/2 mm通过率标准时,可检测的最小误差分别为治疗床运动速度:-1.58%、1.38%(上下限阈值),机架旋转周期:-1.68%、1.31%(上下限阈值),机架起始角度误差:2.50°,多叶准直器叶片开启时间:1.62%。而应用2%/1 mm标准时,检测精度得到提升,可检测的最小误差分别为治疗床运动速度:-0.69%、1.27%,机架旋转周期:-0.69%、0.69%,机架起始角度误差:2.06°,多叶准直器叶片开启时间:0.52%。**结论:**ArcCheck与电离室测量点剂量联用与单独使用ArcCheck Gamma通过率相比并未表现出明显优势,ArcCheck可以检测出临床相关的照射误差,更为严格的Gamma通过率标准可以明显提高误差计划的检测精度。

**【关键词】**鼻咽癌;螺旋断层放疗;ArcCheck;质量保证;Gamma分析

**【中图分类号】**R318;R815.2

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2021)06-0666-06

## Sensitivity of ArcCheck to detect dose delivery errors in helical tomotherapy

YAN Bing<sup>1</sup>, WU Ailin<sup>2</sup>, XUE Xudong<sup>1</sup>, ZHANG Hongyan<sup>1</sup>, WU Aidong<sup>1</sup>

1. Department of Radiation Oncology, the First Affiliated Hospital of University of Science and Technology of China/Anhui Provincial Hospital, Hefei 230001, China; 2. Department of Radiation Oncology, the First Affiliated Hospital of University of Science and Technology of China (West District)/Anhui Provincial Cancer Hospital, Hefei 230001, China

**Abstract: Objective** To measure the passing rates of helical tomotherapy (HT) plan with ArcCheck, and to explore the sensitivity of ArcCheck to detect the errors which are introduced in couch movement, gantry rotation period, gantry starting angle and leaf open time. **Methods** The plans of 9 patients with nasopharyngeal carcinoma who underwent HT were analyzed. For each patient, error plan corresponding to the original plan was generated using a self-compiled program. Point dose and Gamma analysis were used for calculating clinically detectable errors. **Results** The average Gamma passing rates of the 9 original HT plans were 97.49%±1.08% and 73.38%±4.31% under the criteria of 3%/2 mm and 2%/1 mm, respectively. When adopting the criterion of 3%/2mm, the detectable errors were -1.58% and 1.38% (upper and lower thresholds) for couch movement, -1.68% and 1.31% (upper and lower thresholds) for gantry rotation period, 2.50° for gantry starting angle, 1.62% for leaf open time. When adopting the criterion of 2%/1mm, the detection accuracy was improved, and the corresponding minimum detectable errors were -0.69% and 1.27% for couch movement, -0.69% and 0.69% for gantry rotation period, 2.06° for gantry starting angle, and 0.52% for leaf open time, respectively. **Conclusion** Compared with ArcCheck only, the combination of ion chamber measurements with ArcCheck do not improve error detection accuracy. ArcCheck can be used to detect clinically relevant dose delivery errors. Selecting more strict criteria for Gamma passing rate calculation can significantly improve the detection accuracy of error plan.

**Keywords:** nasopharyngeal carcinoma; helical tomotherapy; ArcCheck; quality assurance; Gamma analysis

**【收稿日期】**2021-02-10

**【基金项目】**国家自然科学基金(11805198);安徽省自然科学基金(1808085QH281);安徽省学术和技术带头人后备人选科研基金项目(2020H230)

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

**【通信作者】**吴爱东,博士,正高级工程师,研究方向:放射物理,E-mail: flkaidongwu@163.com

## 前言

螺旋断层放疗(Helical Tomotherapy, HT)系统是目前最先进的放疗设备之一,其独创的设计将6 MV加速器安装于类似CT的滑环之上,同时保持治疗床沿轴向螺旋匀速前进可实现360°螺旋式照射,配合

二进制 64 叶片气动多叶准直器 (Multi-Leaf Collimator, MLC) 使得其与常规直线加速器相比具有调制能力强、靶区周围剂量跌落快等优点, 能在给予肿瘤区域足够高致死剂量的同时最大程度地降低对周围关键器官或正常组织的损伤<sup>[1]</sup>。由于 HT 系统独特的动态方式及其功能结构的复杂性, 因此在照射过程中, MLC 需要调制上万个子野且需要机架旋转与治疗床及 MLC 保持同步, 错误的 MLC 开合时间或同步将直接影响患者的治疗剂量分布, 因此与传统直线加速器相比, HT 对治疗计划的验证提出了更高的要求<sup>[2]</sup>。传统的 Tomotherapy 计划质量保证 (Quality Assurance, QA) 是把胶片夹在 Cheese 模体中间平面内, 并在模体中央插入指形电离室, 通过分析胶片 Gamma 通过率及指形电离室的绝对剂量偏差来确定治疗计划是否满足临床需求, 这一方法相对繁琐耗时。目前, 越来越多的医院采用三维验证设备取代胶片实施治疗计划 QA, 可以大大简化整个 QA 流程<sup>[3-6]</sup>。因此, 本研究通过模拟治疗计划执行过程中机器可能出现的误差, 验证 ArcCheck 三维探测器对这些误差检测的灵敏度, 以期为 HT 系统的 QA 提供一定的参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器和设备

ArcCheck 是 Sun Nuclear 公司生产的三维剂量验证系统, 由 1 386 个 N 型半导体探头以 1 cm 螺距螺旋分布于圆柱型 PMMA 模体内, 探头距模体表面 2.9 cm, 通过测量射线的入射和出射剂量来验证患者的治疗计划<sup>[7]</sup>。ArcCheck 腔体中心处插入带有 PTW0.6cc 指形电离室的有机玻璃插件, 用于绝对点剂量的验证。根据 ArcCheck 使用手册要求, 在使用 ArcCheck 验证 HT 时, 选择 TomoTherapy 模式且应用测量不确定度选项。其中, TomoTherapy 模式指 ArcCheck 不会对测量数据进行后期处理及校准, 包括角度计算、射野尺寸、角度校准及非均匀修正; 测量不确定度选项指由于受 ArcCheck 测量中 1% 不确定度的影响, 软件会将该剂量误差带入剂量对比中。

### 1.2 TOMO DQA (Delivery Quality Assurance) 计划设计

选取 9 例在中国科学技术大学附属第一医院 (安徽省立医院) 放疗科行 HT 的鼻咽癌患者, 所有患者均在 Tomotherapy 计划系统上完成计划设计。上述所有治疗计划射野宽度 2.5 cm, 调制因子 2.2~2.6, 螺距 0.43, 且均符合临床靶区处方剂量和危及器官剂量限量的要求。利用 TOMO DQA 软件将计划移植至 ArcCheck 模体, 移动模体保证靶区位于模体中心, 剂量网格选取为 fine, 重新计算模体内的三维剂量分

布, 并将剂量及治疗计划按照 DICOM RT 标准导入至 SNC patient 软件作为参考剂量。

### 1.3 Tomotherapy 照射误差模拟与测量

每一个 DQA 计划都是由 XML 及 sinogram 两个治疗文件组成, 其中 XML 定义了治疗计划的射野宽度、机架旋转周期、机架起始角度、治疗床运动速度等参数, sinogram 文件定义了照射期间 MLC 每个叶片的开闭时间。为模拟治疗过程中的系统误差, 将 XML 及 sinogram 文件导入至自编程序 (Matlab2014b) 中, 分别模拟机架旋转周期偏差  $\pm 1\%$ 、 $\pm 2\%$ 、 $\pm 3\%$ 、 $\pm 4\%$ , 治疗床运动速度偏差  $\pm 1\%$ 、 $\pm 2\%$ 、 $\pm 3\%$ 、 $\pm 5\%$ , 机架起始角度偏差  $1^\circ$ 、 $3^\circ$ 、 $5^\circ$ , MLC 叶片开启时间 (Leaf Open Time, LOT) 延长 1%、2%、3%、4% 及 MLC 32、42 号叶片被卡住情况 (即在照射期间 32 及 42 号叶片一直处于打开状态), 每一位患者原始 DQA 计划由自编程序自动生成上述 25 种误差计划所对应的 XML 及 sinogram 文件, 同时将每种误差计划所对应的文件通过 Tomotherapy 的 calibration procedure 程序导入数据服务器。计划修改步骤中值得注意的是机架旋转周期、治疗床运动速度、MLC 运动在整个计划照射期间三者相互同步, 治疗床运动速度及 MLC 开合时间均由机架旋转时间定义, 因此修改机架旋转周期需要同步修改治疗床运动速度及 sinogram, 从而保证治疗床运动速度及 sinogram 与原计划相同。

将 ArcCheck 置于治疗床上, 并按照患者的无误差 DQA 计划摆位。使用 MVCT 行影像引导, 从而减少摆位误差对 DQA 的影响。由于 Tomotherapy 在照射结束后均会将床返回至初始摆位位置, 因此对同一患者的所有误差计划均不再重新摆位, 从而保证患者原计划与误差计划测量时模体位置一致, 以避免摆位不确定度对整个实验的影响。

### 1.4 结果分析

将 ArcCheck 模体中电离室测量的误差计划的绝对剂量与相应患者无误差计划测量的绝对剂量进行比较, 当误差绝对值大于 3% 且行配对  $t$  检验具有统计学意义时, 认为该误差可通过点剂量检测。

Gamma 分析是将误差计划测量结果与其相应患者原计划计算得到的模体剂量分布进行比较, 其中剂量阈值 10%, 采用全局归一, 通过率标准分别取 3%/2 mm 和 2%/1 mm。统计所有患者原计划以及误差计划的平均验证通过率, 并利用高斯函数拟合原计划及误差计划的平均通过率, 生成误差图<sup>[8]</sup>, 依照最大值归一化误差图, 并以临床常用的 90% Gamma 通过率为误差阈值, 计算得出 ArcCheck 在机架旋转周期、机架起始角度、治疗床运动速度、MLC 叶片开启时间上的临床可检测误差阈值。以治疗床运动速度误差为例, 误差图的具体计算方法为: 对于 9 例计划, 分别统计出无

误差计划通过率及 $\pm 1\%$ 、 $\pm 2\%$ 、 $\pm 3\%$ 、 $\pm 4\%$ 每一种误差情况的误差均值 $\bar{x}$ ,利用Matlab软件中的数据拟合工具箱,采用高斯函数拟合不同误差情况下的误差均值 $\bar{x}$ 。以90% Gamma通过率为阈值,根据拟合函数计算可检测误差的最小值 $E_{\min}$ 和误差最大值 $E_{\max}$ ,如图1所示。

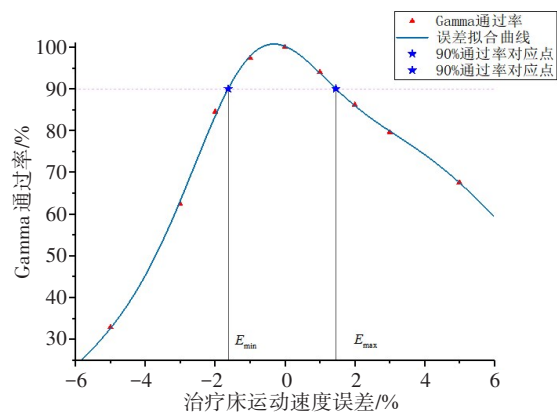


图1 误差图(高斯拟合曲线用于计算在90%通过率下的误差值)  
Fig.1 Error curve (Gaussian fitting curve is used to calculate the errors at 90% Gamma passing rate)

2 结果

所有患者的原计划采用3%/2 mm、2%/1 mm的平均Gamma通过率分别为97.49% $\pm$ 1.08%、73.38% $\pm$ 4.31%,满足AAPM-TG218规定的误差标准。

2.1 治疗床运动速度误差对Gamma通过率的影响

添加治疗床运动误差后,所有的误差计划点剂量及Gamma通过率均出现不同程度的下降,治疗床运

动速度正向误差即治疗床运动速度增加时点绝对剂量减少,反之点剂量增加,如表1所示。以点剂量阈值3%作为误差检测条件并行配对 $t$ 检验,发现仅当治疗床运动速度降低5%时,误差才被检测出( $P<0.05$ )。利用高斯函数拟合不同标准的治疗床误差计划通过率,3%/2 mm、2%/1 mm两条曲线拟合精度 $R^2$ 分别为0.999、0.998,如图2所示。通过归一化拟合曲线,在两种Gamma通过率标准(3%/2 mm和2%/1 mm)下对应的治疗床运动误差,ArcCheck可检测的上下限阈值分别为-1.58%、1.38%和-0.69%、1.27%。

表1 9例DQA计划引入治疗床运动误差后的点剂量偏差及Gamma通过率(%,  $\bar{x} \pm s$ )

Tab.1 Point dose deviations and Gamma passing rates for 9 DQA plans with and without couch movement errors (%, *Mean* $\pm$ *SD*)

治疗床运动 误差/%	点剂量偏差	Gamma通过率	
		3%/2 mm	2%/1 mm
-5	3.13 $\pm$ 1.05	32.03 $\pm$ 6.69	13.27 $\pm$ 3.85
-3	1.69 $\pm$ 0.67	60.80 $\pm$ 6.64	24.76 $\pm$ 3.08
-2	1.03 $\pm$ 0.49	82.41 $\pm$ 3.67	38.69 $\pm$ 3.95
-1	0.46 $\pm$ 0.35	94.96 $\pm$ 1.81	60.46 $\pm$ 5.38
0	0.00 $\pm$ 0.00	97.49 $\pm$ 1.08	73.39 $\pm$ 4.31
1	-0.81 $\pm$ 0.49	91.66 $\pm$ 2.03	67.95 $\pm$ 3.44
2	-1.27 $\pm$ 0.59	84.06 $\pm$ 5.20	63.69 $\pm$ 6.86
3	-1.69 $\pm$ 1.01	77.61 $\pm$ 7.64	58.85 $\pm$ 8.14
5	-2.65 $\pm$ 2.11	65.86 $\pm$ 8.41	49.95 $\pm$ 7.98

治疗床负方向误差代表治疗床变慢,正方向误差代表治疗床运动速度变快

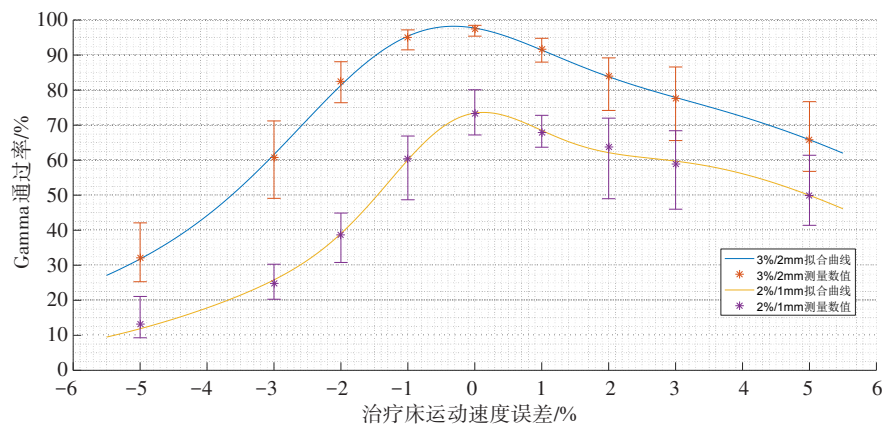


图2 不同通过率标准下治疗床运动速度误差与Gamma通过率拟合曲线(误差棒代表最大及最小通过率)  
Fig.2 Fitting curve of Gamma passing rates under different Gamma criteria with and without couch movement errors (the error bar shows maximum and minimum passing rates)

2.2 机架旋转周期误差对Gamma通过率及绝对剂量的影响

采用不同通过率标准的平均Gamma通过率及点

剂量偏差如表2所示,在所测量的8个误差计划中,点剂量偏差均未达到3%检测阈值。拟合3%/2 mm、2%/1 mm通过率标准下的Gamma通过率,两条曲线



拟合精度  $R^2$  分别为 0.998, 0.999, 如图 3 所示。对于机架旋转周期误差, 归一化误差图曲线后, 采用 3%/2 mm 标准时, ArcCheck 可检测的上下限阈值为 -1.68% 和 1.31%; 采用 2%/1 mm 标准时, ArcCheck 可检测的上下限阈值为 -0.69% 及 0.69%。

表 2 9 例 DQA 计划引入机架旋转周期误差后的点剂量偏差及 Gamma 通过率(%,  $\bar{x} \pm s$ )

Tab.2 Point dose deviations and Gamma passing rates for 9 DQA plans with and without gantry rotation errors (%,  $Mean \pm SD$ )

机架旋转周期误差/%	点剂量偏差	Gamma 通过率	
		3%/2 mm	2%/1 mm
-4	1.31±0.51	50.28±6.55	20.55±4.84
-3	0.64±1.40	64.48±7.40	27.98±5.32
-2	0.25±0.91	83.52±1.71	39.52±2.82
-1	-0.28±0.84	93.73±1.74	58.18±4.34
0	0.00±0.00	97.49±1.08	73.39±4.31
1	-1.05±0.76	88.78±4.26	61.70±3.97
2	-1.74±0.87	83.05±4.41	56.45±8.65
3	-2.21±1.02	75.50±5.00	53.17±9.50
4	-2.99±1.35	68.68±7.30	48.78±11.10

机架旋转周期负方向误差代表机架旋转周期减少, 正方向误差代表机架旋转周期变长

2.3 机架起始角度对 Gamma 通过率及绝对剂量的影响

机架旋转起始误差计划分别选取起始角度误差 1°、3°、5°, 点剂量偏差均未达到 3% 检测阈值。点剂量及采用不同通过率标准的平均 Gamma 通过率如表 3 所示。通过插值分析, 机架起始误差在 3%/2 mm 及 2%/1 mm 两种通过率标准下, ArcCheck 可检测的阈值分别为 2.50°、2.06°。

2.4 MLC 误差对 Gamma 通过率的影响

点剂量并未检测出 LOT 偏差 1%、2%、3%、4% 这 4 种误差计划, 仅能检测出 32、42 叶片持续开启这两种误差计划(表 4)。通过插值分析, MLC 误差在 3%/2 mm 及 2%/1 mm 两种通过率标准下, ArcCheck 可检测的阈值分别为 1.62%、0.52%。

3 讨论

HT 区别于传统直线加速器, 其在治疗期间机架旋转周期、治疗床运动速度、二元 MLC 运动三者之间相互同步, 从而获得更高的剂量调制能力, 因此对其治疗计划实施 QA 是十分必要的。考虑到目前 DQA 计划中常使用胶片及电离室分别测量平面剂量及点剂量, 过程比较繁琐, 使用三维探测器可以简化上述验证流程, 并且在检测 HT 计划某些误差方面具有比

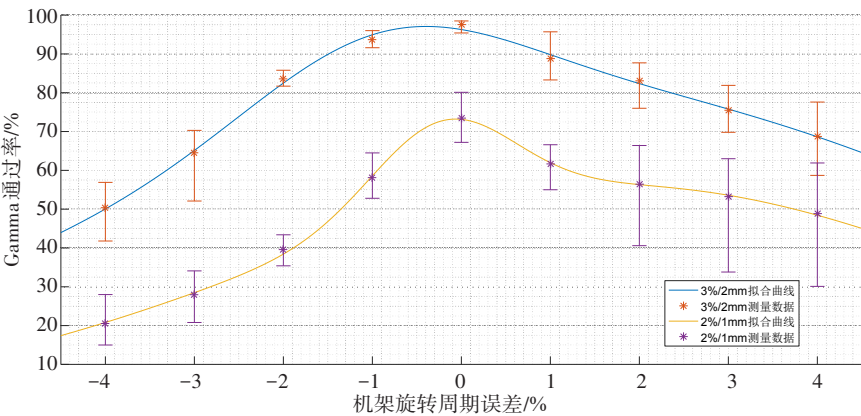


图 3 不同 Gamma 通过率标准下机架旋转速度与 Gamma 通过率拟合曲线(误差棒代表最大及最小通过率)  
Fig.3 Fitting curve of Gamma passing rates under different Gamma criteria with and without gantry rotation errors (The error bar shows maximum and minimum passing rates)

胶片更好的敏感度<sup>[9-10]</sup>, 因此作为三维探测器代表之一的 ArcCheck 也越来越广泛地应用于 HT 计划的验证, 并分析其对 HT 计划验证的敏感性<sup>[11-13]</sup>。Deshpande 等<sup>[13]</sup>对 ArcCheck 验证 HT 计划的误差敏感性进行分析, 表明 ArcCheck 可以检测出与临床相关的投照误差, 但这项研究仅包括了射野宽度、治疗床运动速度、MLC 开合时间误差。Templeton 等<sup>[14]</sup>就治疗床运动速度、MLC 开合时间、机架起始角度这 3

个方面的误差对 ArcCheck 的敏感性进行研究。但上述的研究并未涉及机架旋转周期误差及 ArcCheck 中心点剂量的敏感性等问题。  
HT 计划是由射野宽度、机架旋转周期、机架起始位置、治疗床运动速度、MLC 正弦图等参数所定义。在治疗过程中, 这些参数通过时间相互同步, 因此区别于直线加速器, HT 系统需要额外检查治疗床与机架之间的同步性。根据 AAPM TG148 号报告

表3 9例DQA计划引入机架起始角度误差后的点剂量偏差及Gamma通过率(%,  $\bar{x} \pm s$ )

Tab.3 Point dose deviations and Gamma passing rates for 9 DQA plans with and without gantry starting position errors (%, *Mean* $\pm$ *SD*)

机架起始角度 误差/ $^{\circ}$	点剂量偏差	Gamma 通过率	
		3%/2 mm	2%/1 mm
0	0.00 $\pm$ 0.00	97.49 $\pm$ 1.08	73.39 $\pm$ 4.31
1	-1.05 $\pm$ 0.76	88.78 $\pm$ 4.26	61.70 $\pm$ 3.97
3	-1.74 $\pm$ 0.87	83.05 $\pm$ 4.41	56.45 $\pm$ 8.65
5	-2.21 $\pm$ 1.02	75.50 $\pm$ 5.00	53.17 $\pm$ 9.50

表4 9例DQA计划引入MLC误差后的点剂量偏差及Gamma通过率(%,  $\bar{x} \pm s$ )

Tab.4 Point dose deviations and Gamma passing rates for 9 DQA plans with and without MLC errors (%, *Mean* $\pm$ *SD*)

叶片开启时间误差	点剂量偏差	Gamma 通过率	
		3%/2 mm	2%/1 mm
0%	0.00 $\pm$ 0.00	97.49 $\pm$ 1.08	73.39 $\pm$ 4.31
1%	0.08 $\pm$ 1.30	91.91 $\pm$ 3.49	59.25 $\pm$ 7.74
2%	0.80 $\pm$ 1.05	86.43 $\pm$ 5.19	48.63 $\pm$ 9.35
3%	1.63 $\pm$ 0.95	79.05 $\pm$ 5.96	41.28 $\pm$ 12.75
4%	2.36 $\pm$ 0.87	71.86 $\pm$ 9.48	31.64 $\pm$ 11.46
32叶片持续开启	3.23 $\pm$ 0.69	22.08 $\pm$ 11.22	7.81 $\pm$ 5.15
42叶片持续开启	64.24 $\pm$ 42.97	20.00 $\pm$ 10.96	6.70 $\pm$ 5.34

推荐,同步性检查包括:机架角度、治疗床运动速度均匀性以及机架每旋转一周治疗床前进距离的准确性<sup>[15]</sup>。针对同步性检查的3种情况,本研究选择每种情况分别模拟,分别是:(1)通过修改机架起始角度模拟同步性检查中机架角度误差;(2)修改治疗床运动速度模拟治疗床运动速度误差;(3)在保持叶片开合时间及治疗床运动速度不变的情况下,修改机架旋转周期模拟同步性检查中的旋转周期误差。Deshpande等<sup>[16]</sup>在放疗计划系统中模拟这3种误差发现,对于鼻咽癌HT计划,当治疗床运动速度误差大于1%,机架起始角度误差大于2°,机架旋转周期误差大于0.5 s时,误差计划在剂量学上与原始计划相比会出现剂量学偏差。本次测量研究发现对于这3种误差,在3%/2 mm、全局归一、剂量阈值10%、90% Gamma通过率下,ArcCheck的可检测误差上下限阈值分别为:治疗床运动速度-1.58%、1.38%,机架运动周期-1.68%、1.31%,机架起始角度2.5°。根据Deshpande等<sup>[16]</sup>的结果,在大于90%通过率的情况下,测量计划在剂量学上基本符合无偏差要求,证明ArcCheck在临床上可满足HT的QA要求。

本研究发现机架旋转周期及起始角度误差对中

心点剂量的影响较小。对于治疗床运动速度、MLC叶片开合时间这两种误差情况,ArcCheck与电离室测量点剂量联合使用与单独使用ArcCheck分析Gamma通过率相比也并未表现出明显优势。Alharthi等<sup>[17]</sup>利用ArcCheck验证肺癌SBRT计划时也证实了点剂量与ArcCheck联用并没有明显获益,但同时也指出使用点剂量验证可保证治疗安全及避免极限误差。

AAPM-TG218号报告推荐临床Gamma通过率标准应采用3%/2 mm、全局归一、剂量阈值10%、以90% Gamma通过率作为临床通过标准,但同时也推荐选择更为严格的通过率标准,如2%/1 mm或1%/1 mm用于检测局部微小偏差或检测设备是否存在系统性偏差等<sup>[18]</sup>。基于此报告,本研究选取3%/2 mm的Gamma通过率标准时,选择90%作为误差检测标准;选取2%/1 mm通过率标准时,由于在临床计划验证过程中针对2%/1 mm并未有通用通过率标准用于判断计划是否通过,一般可采用AAPM-TG218号报告所推荐的方法,即选取20例患者数据建立通过率标准,而在本研究中由于仅考虑引入误差后通过率的变化,因此在数据处理上采用曲线拟合的方法,并按照最大值进行归一后按照90%作为误差检测标准,选择更为严格的Gamma标准可以明显提高误差计划的检测精度,即治疗床运动误差、机架旋转周期误差、机架起始角度误差、MLC开闭误差的检测精度均有所提高。

靶区分布在ArcCheck模体中的位置同样会影响Gamma通过率指数。Neilson等<sup>[19]</sup>指出利用ArcCheck行HT计划验证时,不应将靶区置于探测器阵列上而是应该将其至于模体中心处,这是由于靶区位于探测器阵列上会使得Gamma分析时归一点剂量提高,错误放大验证时的通过率。考虑到上述原因,对本研究中所有鼻咽癌HT计划进行验证时,均将靶区中心置于验证模体中心位置。但由于靶区置于中心位置处,鼻咽部靶区、颈部靶区距离模体边缘探测器的距离不同,这导致ArcCheck展开后的剂量分布图中高剂量区域与治疗计划中的高剂量区域并非一致,也就很难将测量点与靶区及危及器官建立联系。而TG218号报告指出,临床计划QA不仅仅只关心Gamma通过率,更应该分析不通过点的位置分布以及临床相关性<sup>[17]</sup>,因此在后续工作中将利用3DVH软件逐项分析误差计划对各个靶区及危及器官的影响。本研究并未利用计划系统模拟ArcCheck的最小可检测误差对治疗计划的影响,但根据Deshpande等<sup>[16]</sup>的研究结果,最小可检测误差对鼻咽癌HT计划PTV的影响均小于5%,可以满足临床应用。

综上所述,在鼻咽癌HT计划验证中,仅使用指形电离室验证点剂量判断计划是否通过是不严谨的,点剂量与ArcCheck联用并未明显获益,由于ArcCheck可以检测计划执行中一定大小的各项机械误差,具有操作简便、节约检测成本等优点,可作为除胶片外HT计划验证的另一选择。

## 【参考文献】

- [1] 马一栋,李明焕,于金明.肿瘤精确放疗新技术的比较[J].中华肿瘤防治杂志,2010,17(23):1995-1998.  
MA Y D, LI M H, YU J M. Comparison of advanced radiotherapy delivery techniques[J]. Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment, 2010, 17(23): 1995-1998.
- [2] 徐寿平,王连元,戴相昆,等.螺旋断层放疗系统原理及其应用[J].医疗卫生装备,2008,29(12):100-102.  
XU S P, WANG L Y, DAI X K, et al. Principle and application of helical tomotherapy[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2008, 29(12): 100-102.
- [3] 丛小虎,徐寿平,解传滨,等. Tomotherapy系统五年质控结果及其模式的转变[J].中国医疗器械杂志,2016,40(5):380-385.  
CONG X H, XU S P, XIE C B, et al. Results of five-year quality control program and the change of QA mode for helical tomotherapy machine[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2016, 40(5): 380-385.
- [4] FONTAINE J, TAECSH F, DJIBO-SIDIKOU A, et al. Evaluation of delivery analysis software (Accuray), comparison to Delta 4 phantom[J]. Phys Med, 2018, 56: 7-8.
- [5] YUE Q, LI R, YANG J, et al. Systematic analysis of the ArcCheck diode arrays for tomotherapy delivery verification[J]. Int J Med Phys Clin Eng Radiat Oncol, 2014, 3(4): 218.
- [6] CHANG K H, KIM D W, CHOI J H, et al. Dosimetric comparison of four commercial patient-specific quality assurance devices for helical tomotherapy[J]. J Korean Phys Soc, 2020, 76(3): 257-263.
- [7] 姜仁伟,郭栓栓,陈舒婷,等.利用ArcCheck在实际机架角与零机架角的IMRT剂量验证结果比较[J].中华放射肿瘤学杂志,2017,26(1):66-68.  
JIANG R W, GUO S S, CHEN S T, et al. A comparative study of ArcCHECK measurements at actual and zero degree gantry angles for dose verification of intensity-modulated radiotherapy[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2017, 26(1): 66-68.
- [8] STEERS J M, FRAASS B A. IMRT QA: selecting gamma criteria based on error detection sensitivity[J]. Med Phys, 2016, 43(4): 1982-1994.
- [9] 程晓龙,陈祥,刘吉平,等.基于EBT3胶片的不同病种及治疗方式的螺旋断层治疗计划剂量验证[J].科学技术与工程,2019,19(18):118-122.  
CHENG X L, CHEN X, LIU J P, et al. Dose verification of tomotherapy plan based on EBT3 film in different diseases and treatments[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(18): 118-122.
- [10] WERLÉ F, DEHAYNIN N, NIEDERST C, et al. Detecting anomalies in a deliberately biased tomotherapy plan: comparison of two patient-specific quality assurance processes involving ArcCheck® and Gafchromic® EBT3 films[J]. Cancer/Radiothérapie, 2017, 21(8): 749-758.
- [11] 陈济鸿. ArcCheck在鼻咽癌HT计划剂量验证中的应用[J].医疗装备,2018,31(13):1-3.  
CHEN J H. Application of ArcCheck in dose verification of nasopharyngeal carcinoma HT plan[J]. Medical Equipment, 2018, 31(13): 1-3.
- [12] 解传滨,徐寿平,徐伟,等.运用ArcCHECK实施旋转调强全骨髓照射超长靶区的计划验证[J].中国医疗器械杂志,2015,39(1):68-71.  
XIE C B, XU S P, XU W, et al. Patient-specific dose verification method using ArcCHECK for total marrow irradiation with intensity modulated arc therapy [J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2015, 39(1): 68-71.
- [13] DESHPANDE S, GEURTS M, VIAL P, et al. Sensitivity evaluation of two commercial dosimeters in detecting helical tomotherapy treatment delivery errors[J]. Phys Med, 2017, 37: 68-74.
- [14] TEMPLETON A K, CHU J C, TURIAN J V. The sensitivity of ArcCheck-based gamma analysis to manufactured errors in helical tomotherapy radiation delivery[J]. J Appl Clin Med Phys, 2015, 16(1): 32-39.
- [15] LANGEN K M, PAPANIKOLAOU N, BALOG J, et al. QA for helical tomotherapy: report of the AAPM Task Group 148a[J]. Med Phys, 2010, 37(9): 4817-4853.
- [16] DESHPANDE S, GEURTS M, VIAL P, et al. Clinical significance of treatment delivery errors for helical tomotherapy nasopharyngeal plans-a dosimetric simulation study[J]. Phys Med, 2017, 33: 159-169.
- [17] ALHARTHI T, POGSON E M, ARUMUGAM S, et al. Pre-treatment verification of lung SBRT VMAT plans with delivery errors: toward a better understanding of the gamma index analysis[J]. Phys Med, 2018, 49: 119-128.
- [18] MIFTEN M. TH-A-BRC-03: AAPM TG218: measurement methods and tolerance levels for patient-specific IMRT verification QA[J]. Med Phys, 2016, 43 (6 Part 43): 3852-3853.
- [19] NEILSON C, KLEIN M, BARNETT R, et al. Delivery quality assurance with ArcCheck[J]. Med Dosim, 2013, 38(1): 77-80.

(编辑:谭斯允)