

## VSI型射波刀质量保证及剂量学数据特征的单中心研究

王琳<sup>1</sup>, 张建平<sup>1</sup>, 徐本华<sup>1</sup>, 李小波<sup>1,2</sup>

1. 福建医科大学附属协和医院放疗科, 福建 福州 350001; 2. 福建医科大学医学技术与工程学院, 福建 福州 350001

**【摘要】目的:**研究总结 VSI 型射波刀临床剂量学数据特征及质量保证测试规程。**方法:**结合运行后相关经验,对福建医科大学附属协和医院于 2017 年 6 月安装的 VSI 型射波刀临床调试数据与参考数据进行回顾性对比分析。除离轴比,其余剂量学参数采集均基于 PTW 60019 探测器。**结果:**自动质量保证测试与端到端测试均需综合离心率、三维误差值及总误差值 3 方面因素。可变准直器质量保证可选辐射变色胶片法和高空间分辨率探测器法,而基线测量推荐使用前者。源轴距为 650、800、1 000 mm,固定准直器所有孔径其输出因子测量值和参考值的平均偏差分别为 -1.27%、-0.21% 和 0.70%,其中 5.0 mm/7.5 mm 准直器偏差分别为 -5.10%/-2.67%、-2.08%/-1.41% 和 -1.12%/0.06%。Iris 以上数字分别对应为 -1.88%、-0.74%、0.09%; -8.61%/-3.53%、-4.38%/-1.97%、-1.34%/-0.33%。两类准直器水表面处所有孔径的组织模体比平均测量值分别为 -6.22%(Fixed)和 -4.81%(Iris),且均小于参考值;除 Iris 5.0 mm 和 7.5 mm,其他类型及孔径的离轴比测量值均呈现肩部和底部正偏差现象,且准直器孔径越大越明显。TRS 277 报告标定结果比 TRS 398 小约 2%。**结论:**在临床调试与验收过程中应充分了解两类准直器尤其小准直器的特性,选择合适的调试规程和工具。

**【关键词】**VSI 型射波刀;剂量学;数据特征;质量保证;临床调试

**【中图分类号】**R318;R811.1

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2018)12-1392-07

## Single center study of clinical dosimetry data characteristics and quality assurance of VSI CyberKnife

WANG Lin<sup>1</sup>, ZHANG Jianping<sup>1</sup>, XU Benhua<sup>1</sup>, LI Xiaobo<sup>1,2</sup>

1. Department of Radiation Oncology, Fujian Medical University Union Hospital, Fuzhou 350001, China; 2. College of Medical Technology and Engineering, Fujian Medical University, Fuzhou 350001, China

**Abstract: Objective** To study and summarize the clinical dosimetry data characteristics and quality assurance commissioning procedure of VSI CyberKnife. **Methods** Combining the practical operating experience, a comparative analysis was carried out retrospectively on clinical commissioning data and reference data from VSI CyberKnife which installed in Fujian Medical University Union Hospital in June 2017. Except for off-center ratios, the clinical dosimetry data were obtained by PTW 60019 detector. **Results** Three factors, namely eccentricity, three-dimensional error and the total error, were comprehensively considered in automatic quality assurance and end-to-end test. Both radiochromic film and equivalently high spatial resolution detector were available for the quality assurance of Iris collimator, but the use of radiochromic film was strongly recommended when the baseline set of measurement was done. At source-axis distance of 650, 800 and 1 000 mm, the average deviation between measurements and reference values for output factors across all apertures in Fixed collimator were -1.27%, -0.21% and 0.70%, respectively. And for 5.0 mm/7.5 mm collimator, the deviations were -5.10%/-2.67%, -2.08%/-1.41% and -1.12%/0.06%, respectively. For Iris apertures, the corresponding deviations were -1.88%, -0.74%, 0.09%; -8.61%/-3.53%, -4.38%/-1.97% and -1.34%/-0.33%, respectively. At the surface of water, the mean values of tissue phantom ratios of two types of collimators were -6.22% (Fixed) and -4.81% (Iris), respectively, both less than reference values. Except for 5.0 mm and 7.5 mm Iris collimators, the measurement values of off-center ratios for those two types of collimators had a tendency that the shoulder and bottom of curves toward positive deviation, and that the deviation was more obvious with the increase of collimator sizes. The output of dose calibration of TRS 277 was about 2% smaller than that of TRS 398. **Conclusion** In commissioning and acceptance procedures of CyberKnife, the user should fully understand the characteristics of two types of collimators especially for smaller collimators, and then select the appropriate commissioning procedures and tools.

**Keywords:** VSI CyberKnife; dosimetry; data characteristics; quality assurance; clinical commissioning

**【收稿日期】**2018-07-21

**【基金项目】**福建省科技厅引导性项目(2016Y0044)

**【作者简介】**王琳,助理工程师,从事肿瘤放射物理工作,E-mail: 403787663@qq.com

**【通信作者】**李小波,副主任医师,从事肿瘤放射物理工作,E-mail: lixiaobo2004@126.com

## 前言

立体定向放射外科(SRS)和立体定向放射治疗(SBRT)因其能更好地减少正常组织受量而越来越多地被应用于颅内和颅外肿瘤治疗<sup>[1]</sup>。射波刀产生的是单能6 MV无均整射束,KUCA机械臂搭载小型加速器可在空间自由旋转和位移,进而产生非等中心射束。它可实现包括前列腺、肺、脑、脊柱、肝脏、胰腺及肾等部位肿瘤的高精度、非手术治疗<sup>[2-7]</sup>。全自动、实时肿瘤追踪和运动管理系统的应用,进一步提高实时治疗剂量分布的准确度。与前4代系统相比,VSI型在硬件方面增加了可变次级准直器系统(Iris),大大减少了治疗时间。在计划系统方面,界面更友好化、集成化,功能多元化,快捷工具增多,新增顺序优化算法(Sequential),大幅减少计划设计时间及更高的剂量率(高达1 000 MU/min)等<sup>[8]</sup>。目前共有5种型号射波刀广泛应用于临床(第6代M6型还没有被广泛应用),除VSI型,前4代的临床调试和质量保证均已被研究并公开<sup>[9-12]</sup>。

福建医科大学附属协和医院于2017年正式安装VSI型射波刀。本研究主要目的是总结VSI型射波刀剂量学数据特征和质量保证测试规程,主要包括自动质量保证(AQA)测试、端到端(End to End, E2E)测试、可变准直器质量保证(Iris QA),组织模体比(TPR)、射野离轴比(OCR)和次级准直器的输出因子(OF)等剂量学特征,绝对剂量标定等。

## 1 材料与方法

### 1.1 射波刀子系统的精度保证

(1)AQA测试:AQA测试是一种定向可重复性测试,检查治疗机械手臂的机械手控制和成像系统的可靠性。首先,打开AQA模体,放入丙烯酸球;其次,对放置有丙烯酸球的AQA模体按射波刀系统要求的扫描条件执行CT扫描;然后,设计AQA执行计划;之后,取出丙烯酸球放入钨球,将标记好的EBT3胶片(规格:Kit Film Auto QA Toll)装入AQA模体并执行计划;最后,扫描胶片并分析结果,具体见后续结果部分。

(2)E2E测试:E2E测试是一项打靶测试,旨在验证射波刀系统从模拟定位到治疗执行所有阶段的几何打靶精度。基本过程同AQA测试类似,在设计计划时需注意70%剂量线中心与模体质心尽量重合(小于0.1 mm)。5种追踪方式所用的EBT3胶片规格具体为:六维颅骨追踪—金标追踪和Synchrony系统—Box Film Ball Cube II;Xsight脊柱追踪—Box Film Mini Ball Cube;Xsight肺部追踪系统—Kit XLT

Phantom Film。

(3)Iris QA测试:Iris QA测试旨在验证Iris射野大小的可重复性。此测试有以下3个步骤:安装鸟笼及胶片固定附件、初始化Iris QA软件和执行Iris QA测量。Iris QA软件的初始化是本测试的关键,其结果与胶片的批次及扫描仪型号相关。除此之外,初始化时需保证胶片放置和扫描方向的一致性,且对每个Iris孔径拍摄4次,在每次拍摄之间调整Iris大小。

其他子系统的精度保证如影像中心精度、追踪系统(TLS)精度等,其操作较简单,本文不再讨论。

### 1.2 临床剂量学数据特征

(1)TPR:所有剂量学数据采集须保证射束与水面垂直。选用PTW 60019探测器、PTW MP3水箱,源轴距(SAD)为800 mm,测量深度为0、3、5、8、10、13、15、20、30、50、100、150、200、250、300 mm。测量时注意测毕0 mm,不可接着测3 mm,以避免水面张力引起的误差。为提高测量数据的准确性,每个准直器每个深度需测3次取平均值,最后补测一遍15 mm深度处的TPR。对于Iris 5~10 mm准直器,需从300 mm深度处测起,切记测量过程中不可改变射野大小。

(2)OF:选用PTW 60019探测器、PTW MP3水箱,依次测量SAD等于650、800、1 000 mm,水下15 mm,处机器输出200 MU的各个准直器的读数,每个准直器读取5遍,取平均值。对于Iris,每次测量后需切换准直器孔径大小,以减小射野重复性造成OF的变化。对于5.0、7.5、10.0 mm小野,至少测量10组数据取平均值。OF以60 mm Fixed、SAD为800 mm、水下15 mm测量值归一。

(3)OCR:选用PTW 60018二极管探测器、PTW MP3水箱,SSD等于800 mm,水下15、50、100、200、300 mm。Fixed只拉0°和90°的Profile即可。鉴于Iris的独特结构,OCR需取测量4个角度数据即0°、90°、15°和105°。

### 1.3 绝对剂量标定

射波刀输出剂量校准为1 MU=1 cGy的标准条件定义为:SAD为800 mm,使用60 mm圆形准直器,水下15 mm处(一般为最大剂量点)。本中心采用IAEA TRS 398号报告<sup>[13]</sup>进行射波刀输出剂量校准。选用PTW 31010电离室(灵敏体积半径2.75 mm,长度6.50 mm)和PTW UNIDOS<sup>webline</sup>剂量仪进行绝对量的标定。射波刀射束为非均整射束,因此电离室的杆效应可能会影响结果,输出剂量测量时使用的电离室灵敏长度应小于1 cm<sup>[14]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 AQA测试

AQA测试旨在验证钨球质心和射野中心在三维方向(R-L、A-P、S-I)上的重合性。扫描胶片并利用AQA软件分析结果如图1。Image A和Image B分析结果分别给出钨球(Shadow)和射野(Beam)的离心率及两者

中心在两个方向的偏移量。利用离心率可判断Shadow和Beam边缘接近圆的程度,防止意外操作造成的错误。利用Image A、Image B给出的中心在三维方向上的偏移量可计算出射野整体的径向误差(每个方向上三维误差的算术平方根)。一般要求每个方向上偏移误差不超过0.548 mm,总体径向误差不超过0.950 mm。

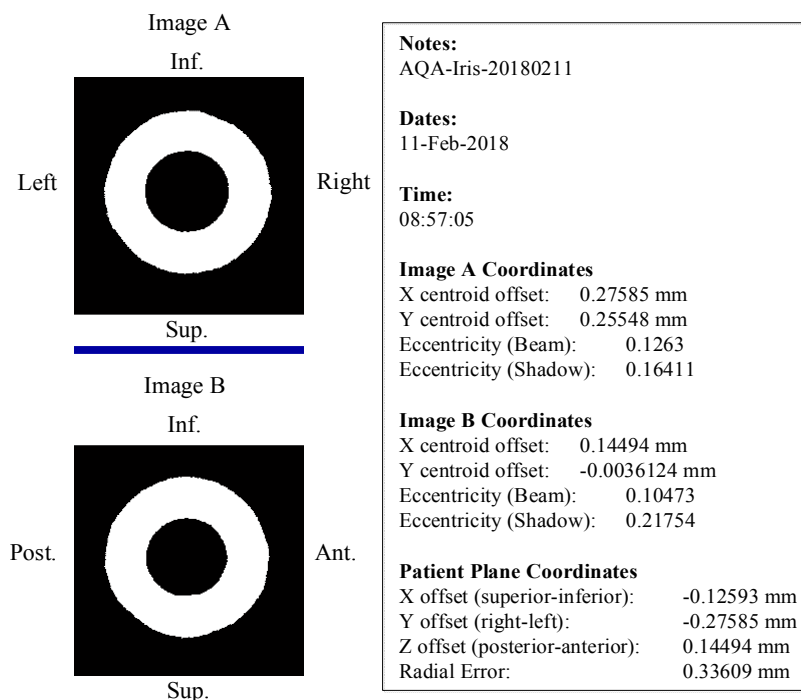


图1 AQA结果分析图

Fig.1 Analysis of automatic quality assurance

### 2.2 E2E测试

E2E属面剂量分析,三维方向上误差是丙烯酸模体和实际70%剂量线包绕剂量区域的直径之差,如图2(脊柱追踪为例)。射野径向误差为三维每个方向上误差的算术平方根。一般要求静态追踪方式每个方向上偏移误差不超过0.548 mm,径向误差不超过0.950 mm;动态追踪方式分别不超过0.866 mm和1.500 mm。表1所示为我中心5种追踪方式的E2E统计结果。

### 2.3 Iris QA测试

Iris QA在于验证准直器12个射野大小的重复性。每个准直器孔径大小的基线值对于Iris QA测试有重要意义。为减小随机误差和偶然误差,每个射野需重复测量4(n)次取平均值,表2为我中心Iris QA基线测量值。由表2可知,实际孔径大小并不一定与标称值相等。

### 2.4 TPR

所有TPR数值均归一到各自准直器的15 mm深度

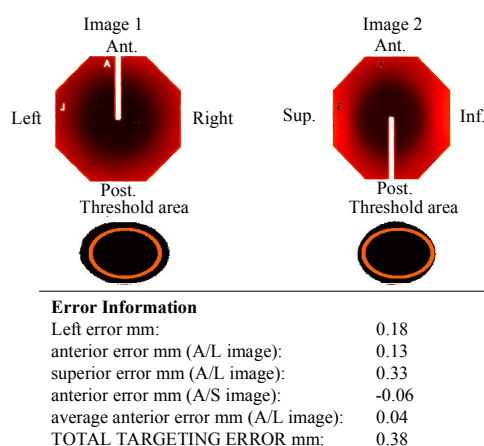


图2 E2E结果分析图

Fig.2 Analysis of end-to-end (E2E) test results

处,图3为Iris 7.5、12.5、20.0、30.0、40.0、60.0 mm孔径的实测和参考TPR。对于5.0 mm和7.5 mm准直器,在表浅处(水下0~13 mm)Fixed测量数据与参考数据的偏差小于Iris,且水面处两类准直器为负偏差(即测量

表1 E2E统计结果( $\bar{x} \pm s$ )  
Tab.1 E2E statistical results ( $Mean \pm SD$ )

Tracking system	Error/mm			
	Anterior/Posterior	Left/Right	Superior/Inferior	Precision
6D skull	0.22±0.15	0.18±0.34	0.15±0.32	0.55±0.14
Xsight spine	0.04±0.18	0.09±0.16	0.23±0.40	0.50±0.11
Fiducial	0.02±0.09	0.10±0.14	0.23±0.23	0.31±0.21
Synchrony	0.07±0.15	0.11±0.22	0.29±0.75	0.76±0.31
Xsight lung	-0.75±0.08	-0.67±0.20	0.37±0.06	1.07±0.16

表2 Iris QA 基线测量值( $n=4$ , mm)  
Tab.2 Baseline measurement of Iris quality assurance ( $n=4$ , mm)

Statistics	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	50.0	60.0
Mean	4.67	7.09	9.58	12.06	14.74	19.52	24.51	29.56	34.38	39.32	49.19	59.06
Standard deviation	0.08	0.05	0.15	0.16	0.09	0.05	0.14	0.09	0.04	0.09	0.15	0.09

数值小于参考数值);非水表面的表浅处,Fixed为负偏差,而Iris反之。对于大于等于10.0 mm的准直器,表浅处Fixed的测量数据略大于Iris。当深度超过150 mm时,以30.0 mm准直器为界,准直器小于等于30.0 mm,其Fixed测量数据与参考数据的偏差小于Iris;准直器大于30.0 mm,两类准直器数据基本相同。两类准直器所有测量数据均在参考数据误差范围内。

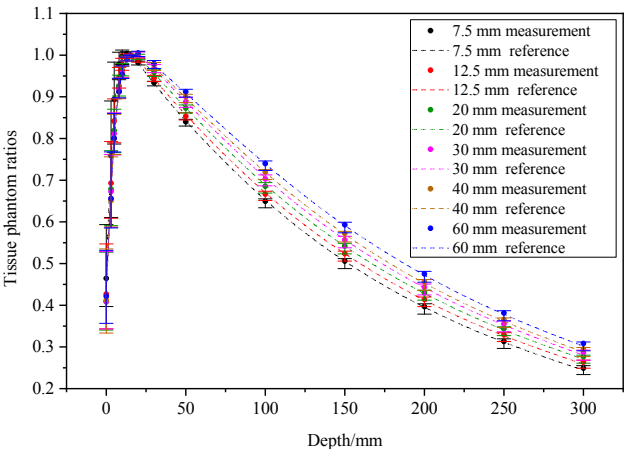


图3 Iris实测与参考TPR对照图  
Fig.3 Tissue phantom ratios disagreement of Iris between measurements and reference values

2.5 OF

选用PTW 60019探测器,依次测量SAD等于650、800、1 000水下15 mm各个准直器的OF。两类

准直器所有OF均以SAD为800 mm,60.0 mm Fixed准直器归一,见图4和图5。

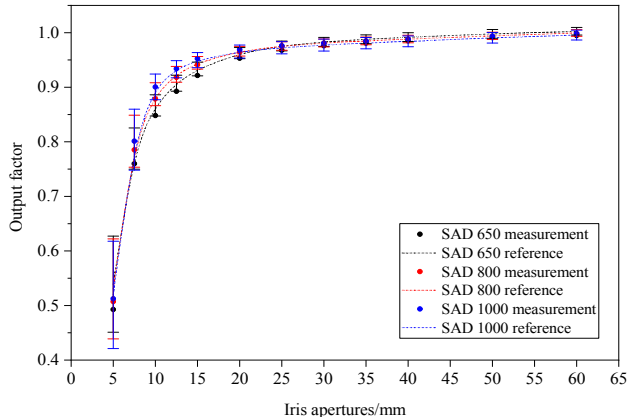


图4 Iris实测与参考OF对照图  
Fig.4 Output factor (OF) disagreement of Iris between measurements and reference values  
SAD: Source-axis distance

2.6 OCR

小准直器(5.0 mm和7.5 mm)剂量跌落迅速,半影区测量值与参考值的偏差较大,Iris较Fixed更明显。随着准直器孔径的增加,OCR肩部测量值与参考值的正偏差越来越明显,最大达到约2%,而其半影区与小准直器相比小测量值与参考值更加接近。图6和图7分别为Iris、Fixed准直器5、10、15、25、35、50 mm孔径水下15 mm的OCR。



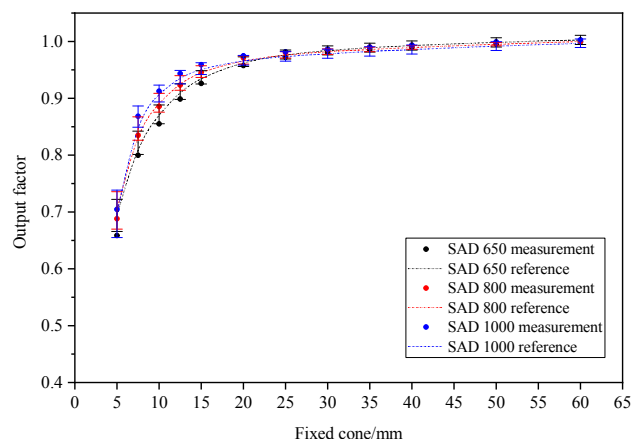


图5 Fixed实测与参考OF对照图

Fig.5 OF disagreement of Fixed between measurements and reference values

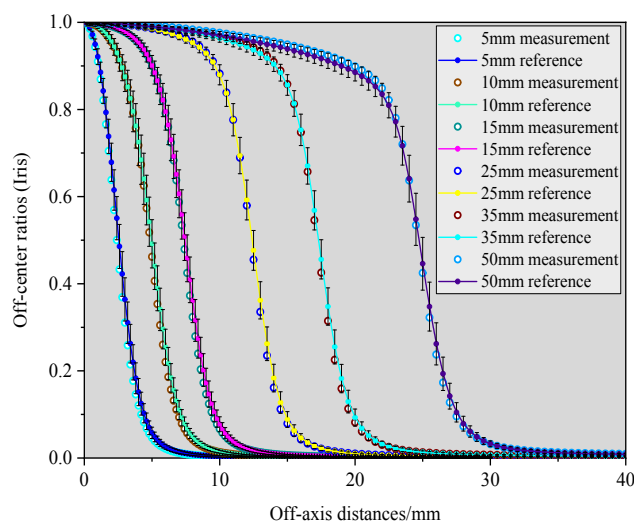


图6 Iris实测与参考OCR对照图

Fig.6 Off-center ratios disagreement of Iris between measurements and reference values

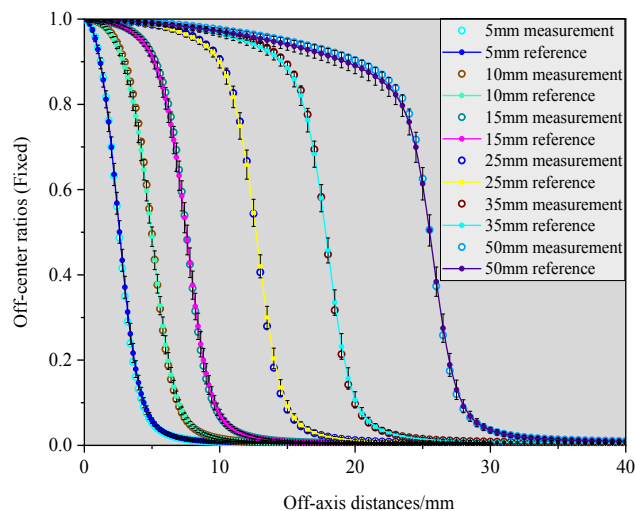


图7 Fixed实测与参考OCR对照图

Fig.7 Off-center ratios disagreement of Fixed between measurements and reference values

## 2.7 绝对剂量标定

为比较利用TRS 277报告标定与TRS 398之间的差异,我中心同时按照TRS 277报告对机器进行了绝对量标定。结果显示利用TRS 277报告标定结果比TRS 398小约2%,即如果机器按照TRS 277报告标定,则机器输出剂量比实际高约2%。

## 3 讨论

本研究主要目的是总结VSI型射波刀临床剂量学数据特征和质量保证测试规程,包括AQA、E2E测试、Iris QA、TPR、OCR、OF及绝对剂量标定。

图8a所示为尽管其余两个条件均满足,但离心率突变引起的失败案例。由图8b可知,离心率和总误差值均满足条件,而S-I方向误差绝对值超出0.548 mm,很明显Beam质心偏S方向。可通过AQA分析报告中误差值的符号确定射野中心的偏移方向,其关系为:R(-)/L(+),A(+)/P(-),I(+)/S(-),通过偏移方向可进一步检验机器每日稳定性。安科瑞公司和AAPM TG 135报告<sup>[8]</sup>推荐总误差值分别不超过0.95 mm和1.00 mm。总之AQA测试分析应将离心率、三维误差值及总误差值三者充分结合,同时满足,不应只关心总误差值而忽略其他两个因素。

E2E测试实质上属面剂量分析,即70%等剂量线所包绕辐射区域的面积与丙烯酸球面积之差,体现在二维空间即70%等剂量线所包绕辐射区域直径与丙烯酸球直径(31.75 mm)之差。安科瑞公司和AAPM TG 135报告均推荐静态追踪和动态追踪的总误差值分别不超过0.95 mm和1.50 mm,实际临床调试时应尽量保证精度在0.3~0.7 mm<sup>[15-16]</sup>,同时三维方向绝对误差值两类追踪模式应分别小于0.548 mm和0.866 mm。

由表2可知,Iris准直器实际孔径大小并不一定与其对应的标称值相等,因此Iris QA基线测试对Iris准直器的质量保证有重要意义。其常用方法有辐射变色胶片法和高空间分辨率探测器法<sup>[17-18]</sup>:前者通过扫描辐射变色胶片确认其孔径大小,不同批次和规格的胶片需重新初始化Iris QA软件,操作较为繁琐,但结果准确度较高;后者利用高分辨率探测器通过测对应孔径的OF和基线比较,从而验证其稳定性,操作简单、节约时间,但对操作的重复性要求较高。

Russo等<sup>[19]</sup>在不同探测器对射波刀小野OF测量研究中指出,PTW 60019微型钻石探测器测量Fixed和Iris的OF与硅二极管探测器相比分别低0.79%和0.63%,且PTW 60019测量结果更接近经蒙卡修正的二极管探测器测量值。我中心选用PTW 60019探测器用于测量OF。

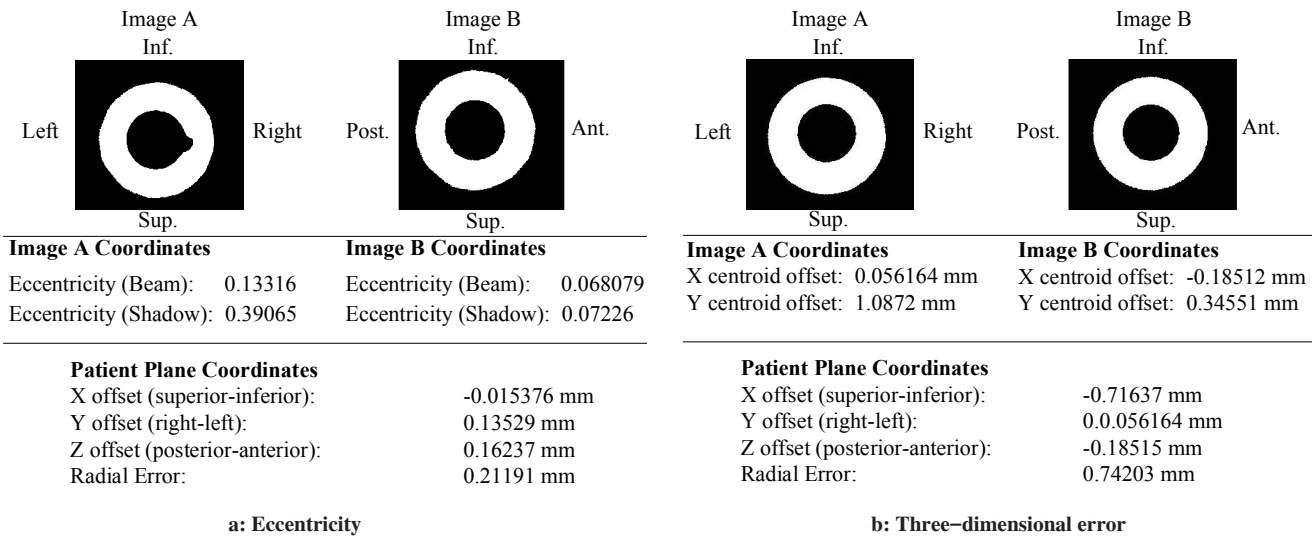


图8 错误AQA测试案例

Fig.8 Error test case of automatic quality assurance

测量结果表明 Iris 的 OF 偏差大于 Fixed 且小野更加明显,故在实际临床计划时,条件允许的情况下优先使用 Fixed 小野准直器。其二,由图 4 和图 5 可知,两类准直器随 SAD 的增加,每个准直器的 OF 与参考值的偏差由负偏差转为正偏差,SAD 为 800 mm 时偏差最小,故实际测量时,SAD 为 800 mm 时 OF 值应保证偏差最小。

其三,3 种测量条件下,12.5~60.0 mm Iris 准直器 OF 值比 Fixed 小约 0.5%~0.6%;对于 5.0 mm 准直器,偏差最大超过 30%,具体见表 3。因此。临床计划设计准直器选择时 Iris 孔径应比 Fixed 孔径大一些,如此靶区的适形度会更好,而且避免使用 Iris 7.5 mm 及 5.0 mm 准直器。

表3 3种SAD条件下OF值及偏差

Tab.3 OF and percentage disagreement at different SAD values

Collimator size/mm	650 mm SAD			800 mm SAD			1 000 mm SAD		
	Fixed	Iris	Deviation/%	Fixed	Iris	Deviation/%	Fixed	Iris	Deviation/%
5.0	0.659	0.493	33.670	0.688	0.507	35.664	0.705	0.513	37.488
7.5	0.800	0.760	5.243	0.835	0.785	6.313	0.868	0.801	8.368
10.0	0.855	0.848	0.810	0.886	0.879	0.763	0.913	0.900	1.335
12.5	0.899	0.893	0.681	0.923	0.918	0.559	0.943	0.934	1.014
15.0	0.926	0.922	0.500	0.946	0.941	0.472	0.959	0.952	0.702
20.0	0.958	0.953	0.457	0.971	0.965	0.671	0.975	0.969	0.600
25.0	0.972	0.968	0.446	0.980	0.975	0.538	0.982	0.976	0.582
30.0	0.980	0.976	0.455	0.986	0.981	0.523	0.986	0.981	0.581
35.0	0.986	0.981	0.493	0.990	0.985	0.551	0.990	0.985	0.535
40.0	0.989	0.985	0.464	0.993	0.988	0.536	0.994	0.988	0.579
50.0	0.995	0.991	0.454	0.998	0.993	0.478	0.999	0.993	0.578
60.0	0.999	0.995	0.445	1.000	0.998	0.182	1.003	0.999	0.445

Deviation=(Fixed<sub>OF</sub>-Iris<sub>OF</sub>)/ Fixed<sub>OF</sub>

利用 PTW 60019 微型钻石探测器测量 TPR 表明:水表面处(水下 0 mm)两类准直器所有孔径大小 TPR 测量值均比参考值小,偏差值最小分别为-4.7%(Fixed)、-0.61%(Iris),最大为-8.08%(Fixed)、-6.22%

(Iris), 平均为-6.22%(Fixed)、-4.81%(Iris), 负值表示负偏差即测量值比参考值小。随着测量深度的增加, 测量值与参考值之间的偏差逐渐缩小, 在最大点15 mm处最小; 当测量深度继续增加时, 两者之间的偏差又继续增大且为正偏差。

5.0、7.5、10.0 mm孔径大小的准直器, 随测量深度的增加, Iris与Fixed准直器TPR测量值之差与Fixed准直器TPR的比值以15 mm深度为界由正变负: 平均正偏差为0.84%, 负偏差为-0.17%。35、40、50、60 mm孔径大小的准直器情形与小野刚好相反, 且平均负偏差为-0.83%, 正偏差为0.12%。其余准直器两者测量值基本相等, 无明显差异。

OCR除Iris准直器5.0 mm和7.5 mm, 其他类型及孔径的OCR测量值均呈现肩部和底部正偏差现象, 且准直器孔径越大越明显; 半影区虽然测量值均小于参考值, 但均落在参考线上; 由于OCR属于相对值测量, 半影区这一现象并不会影响治疗计划的质量。Iris小准直器OCR测量值均小于参考值。所有孔径所有深度条件下, Iris平均偏差为4.34%, Fixed为3.72%。综上, 临床计划设计时应尽量选用中间孔径准直器, 尤其表浅和深部肿瘤。

利用IAEA TRS 398报告进行射波刀绝对剂量标定其核心为射束品质转换因子 $K_Q$ 的确定。由于TRS 398报告绝对剂量标定条件为10 cm×10 cm方野, 且常用电离室关于射线质的 $K_Q$ 计算值给出也基于此条件。而射波刀为圆形野, 需计算射波刀10 cm×10 cm等效方野的射线质。具体射波刀 $K_Q$ 确定流程如下: ①计算射波刀60 mm孔径的等效方野; ②测量射波刀等效方野射线质TPR<sub>20,10,CK</sub>(测量条件为SAD等于1 000 mm); ③推算射波刀等效的参考方野(10 cm×10 cm)TPR<sub>20,10,CK</sub>值; ④查特定电离室TPR<sub>20,10</sub>- $K_Q$ 表推算特定电离室射波刀射野的 $K_Q$ 值。此外, 本中心研究结果显示利用TRS 277报告标定结果比TRS 398小约2%, 即如果机器按照TRS 277报告标定, 那么机器输出剂量比实际高约2%。对于高适形剂量的SBRT来说, 2%的绝对剂量误差是不能忽视的, 尤其对重要器官与靶区有黏连或者距离很近的病例, 2%的绝对剂量误差可能会对正常组织造成不可修复的损伤。

综上所述, VSI型射波刀由于可变准直器(Iris)的搭载大幅提高了其临床和物理性能, 与此同时, 也增加了其临床调试和质量保证的难度。在临床调试与验收过程中应充分了解两类准直器的特性, 尤其小准直器, 选择合适的调试规程和工具, 最终保证临床剂量方案得以高度适形、精准的实施, 服务广大患者。

## 【参考文献】

[1] RUEB D, PÖHLMANN L, GRAU S, et al. Long-term follow-up after stereotactic radiosurgery of intracranial acoustic neuroma[J].

Radiat Oncol, 2017, 12(1): 68.

- [2] MANABE Y, MURAI T, OGINO H, et al. CyberKnife stereotactic radiosurgery and hypofractionated stereotactic radiotherapy as first-line treatments for imaging-diagnosed intracranial meningiomas[J]. Neurol Med Chir, 2017, 57(12): 627-633.
- [3] DI FRANCO R, BORZILLO V, RAVO V, et al. Radiosurgery and stereotactic radiotherapy with cyberknife system for meningioma treatment[J]. Neuroradiol J, 2018, 31(1): 18-26.
- [4] LISCHALK J W, WOO S M, KATARIA S, et al. Long-term outcomes of stereotactic body radiation therapy (SBRT) with fiducial tracking for inoperable stage I non-small cell lung cancer (NSCLC)[J]. J Radiat Oncol, 2016, 5(4): 379-387.
- [5] HARADA Y, MIYAZAKI S. CyberKnife stereotactic radiosurgery for cholangiocarcinoma[J]. Intern Med, 2018, 57(10): 1411-1414.
- [6] QUE J, KUO H T, LIN L C, et al. Clinical outcomes and prognostic factors of cyberknife stereotactic body radiation therapy for unresectable hepatocellular carcinoma[J]. BMC Cancer, 2016, 16(1): 451.
- [7] PUATAWEEPONG P, DHANACHAI M, HANSASUTA A, et al. Clinical outcomes of periorbital tumors treated with hypofractionated stereotactic radiotherapy using CyberKnife® stereotactic radiosurgery[J]. J Neurooncol, 2018, 139(3): 679-688.
- [8] DIETERICH S, CAVEDON C, CHUANG C F, et al. Report of AAPM TG 135: quality assurance for robotic radiosurgery[J]. Med Phys, 2011, 38(6): 2914-2936.
- [9] CHANG S D, MAIN W, MARTIN D P, et al. An analysis of the accuracy of the CyberKnife: a robotic frameless stereotactic radiosurgical system[J]. Neurosurgery, 2003, 52(1): 140-147.
- [10] MURPHY M J, COX R S. The accuracy of dose localization for an image guided frameless radiosurgery system[J]. Med Phys, 1996, 23(12): 2043-2049.
- [11] YU C, JOZSEF G, APUZZO M L, et al. Measurements of the relative output factors for CyberKnife collimators[J]. Neurosurgery, 2004, 54(1): 157-162.
- [12] YU C, MAIN W, TAYLOR D, et al. An anthropomorphic phantom study of the accuracy of CyberKnife spinal radiosurgery[J]. Neurosurgery, 2004, 55(5): 1138-1149.
- [13] IAEA, WHO, PAHO, et al. Technical Reports Series No.398. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy. An international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water[C]. Vienna: IAEA, 2002.
- [14] KAWACHI T, SAITOH H, INOUE M, et al. Reference dosimetry condition and beam quality correction factor for CyberKnife beam[J]. Med Phys, 2008, 35(10): 4591-4598.
- [15] MUACEVIC A, STAEHLER M, DREXLER C, et al. Technical description, phantom accuracy, and clinical feasibility for fiducial-free frameless real-time image-guided spinal radiosurgery[J]. J Neurosurg Spine, 2006, 5: 303-312.
- [16] HO A K, FU D, COTRUTZ C, et al. A study of the accuracy of cyberknife spinal radiosurgery using skeletal structure tracking[J]. Neurosurgery, 2007, 60(ONS Suppl 1): ONS147-ONS156.
- [17] HEIDORN S C, KREMER N, FURWEGER C. A novel method for quality assurance of the Cyberknife Iris variable aperture collimator[J]. Cureus, 2016, 8(5): e618.
- [18] VANDERVOORT E, PATROCINIO H, CHOW T, et al. COMP Report: CPQR technical quality control guidelines for CyberKnife technology[J]. J Appl Clin Med Phys, 2018, 19(2): 29-34.
- [19] RUSSO S, MASI L, FRANCESCON P, et al. Multicenter evaluation of a synthetic single-crystal diamond detector for CyberKnife small field size output factors[J]. Phys Med, 2016, 32(4): 575-581.

(编辑:黄开颜)