

## 扫描式质子放疗系统自动化束斑测量与分析方法的设计和应用

刘志鹏<sup>1</sup>, 单超<sup>1</sup>, 潘灵婧<sup>1</sup>, 王宇翔<sup>1</sup>, 王远远<sup>1</sup>, 卢晓明<sup>1,2</sup>

1. 中国科学技术大学附属第一医院离子医学中心(合肥离子医学中心), 安徽 合肥 230088; 2. 中国科学技术大学离子医学研究所, 安徽 合肥 230088

**【摘要】目的:**针对具有录像功能的闪烁体探测器 Lynx-PT 和笔形束扫描(PBS)质子放疗系统,设计一种质子束斑测量与分析方法,为 PBS 质子放疗系统的临床调试、束流建模和周期性质控测量提供可靠、高效的解决方案。**方法:**配置 PBS 质子放疗系统和 Lynx-PT 的相关参数,设计数据预处理和束斑分析流程,将两种数据处理流程嵌入自研软件(SpotCheck),实现从束斑采集到数据预处理再到束斑特性分析的全流程自动化。**结果:**SpotCheck 输出的束斑尺寸结果与现有商业化软件(myQA, 比利时 IBA 公司)以及厂商的现场验收测量结果均保持一致,能成功识别所有束斑录像文件的数据质量问题,并将质子束流占用时间从 4 d 缩短至 0.5 d。**结论:**本文方法的束斑尺寸计算结果准确、束斑采集速度快、数据处理流程自动化程度高,极大提升了 PBS 质子放疗系统临床调试和束流建模的效率。

**【关键词】**质子放疗;笔形束扫描;临床调试;束斑分析;Lynx-PT

**【中图分类号】**R318;TP317.4

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2022)10-1217-08

## Design and application of automated spot measurement and analysis method for scanning proton radiation therapy system

LIU Zhipeng<sup>1</sup>, SHAN Chao<sup>1</sup>, PAN Lingjing<sup>1</sup>, WANG Yuxiang<sup>1</sup>, WANG Yuanyuan<sup>1</sup>, LU HsiaoMing<sup>1,2</sup>

1. Hefei Ion Medical Center, the First Affiliated Hospital of University of Science and Technology of China, Hefei 230088, China; 2. Ion Medical Research Institute, University of Science and Technology of China, Hefei 230088, China

**Abstract: Objective** To design a method for automated proton spot measurement and analysis based on video scintillation detector Lynx-PT and pencil beam scanning (PBS) proton radiation therapy system, which can offer a reliable and efficient solution for PBS proton radiation therapy system commissioning, beam modeling, and routine quality assurance measurements. **Methods** Configuration items of PBS proton radiation therapy system and Lynx-PT were set up based on the spot acquisition requirements, and a data preprocessing workflow and a spot analysis workflow were designed and embedded in the self-developed software (SpotCheck) to realize the automation of spot acquisition, data preprocessing and spot analysis. **Results** The spot sizes calculated by SpotCheck were consistent with the results from a commercial software package (myQA, IBA, Belgium) and manufacturer's on-site acceptance data. By SpotCheck, all the video data quality events were successfully recognized, and the measurement duration was significantly reduced from 4 days to 0.5 day. **Conclusion** The proposed method can provide accurate spot sizes, rapid spot acquisition and highly automated data processing, greatly improving the quality and efficiency of clinical commissioning and beam modeling.

**Keywords:** proton radiation therapy; pencil beam scanning; clinical commissioning; spot analysis; Lynx-PT

### 前言

质子放疗因其能量沉积路径有布拉格峰特性,

束流在到达特定深度前释放很少的能量,而到达特定深度后则释放其全部能量;因此,相较于传统光子放疗,质子放疗可显著提高肿瘤区域的照射剂量,同时降低周边正常组织器官的照射剂量,对于肺癌、宫颈癌、头颈部癌、中枢神经系统恶性肿瘤等诸多癌症的治疗具有明显的剂量学优势<sup>[1-6]</sup>。目前质子放疗系统主要分为散射式和扫描式两种,相较于散射式质子系统,扫描式质子系统具有更高的束流利用效率,针对不同病人定制准直器和补偿器,且具有更好的

**【收稿日期】**2022-05-06

**【作者简介】**刘志鹏,硕士研究生,工程师,研究方向:放疗设备质控和 QA 自动化系统开发, E-mail: liuzhipeng@himc.org.cn

**【通信作者】**卢晓明,博士,教授,研究方向:医学物理, E-mail: hm-lu@himc.org.cn

剂量分布<sup>[7-9]</sup>。扫描式质子放疗设备的束流能量范围跨度较大,可从数十 MeV 至数百 MeV,在设备调试、建模的过程中需要跨越多个能量档,从多个束流射出角度采集大量质子束斑图像<sup>[10-13]</sup>。

整个束斑测量和分析流程主要分为束斑采集、数据预处理和束斑特性分析。为提升束斑采集效率,Eley 等<sup>[14]</sup>设计一种连续束斑图像采集方法,该方法基于 Lynx-PT 闪烁体探测器和自定义的束流计划(能量区间为 70~240 MeV,出束能量间隔 10 MeV),在束流计划执行期间,使用该探测器的录像模式进行多个不同能级束斑的连续采集,其原理是利用 ProBeam 质子系统在束流能量切换时产生的约 1 s 的束流中断间隔和 1.875 Hz 的图像采样频率产生时间差,使不同能量的束斑图像帧之间生成空白图像帧,以空白帧为能量区分标识,实现录像中的所有能级和对应束斑帧的映射与合并。该方法避免了质子系统在 Machine QA 模式下分次请求不同能量束流的系统准备时间,但同时也引入了 Lynx-PT 设备录像模式中由采样间隙所导致的束斑信号丢失的问题。在实际使用中,Lynx-PT 的采样间隙不同于探测器连续采样的死区时间(Dead Time),是随机出现的,且间隔时

间超过 0.5 s,这可能是由其软、硬件系统性能限制所导致。采样间隙引发束斑质量问题的原理如图 1 所示:当某个能量的束流时间完全落入采样间隙内,则引发束斑的缺失;当某个能量的束流时间与采样间隙部分重合时,该能量束流的部分质子通量无法被采集,导致曝光欠量。对于人为引发的其他束斑质量问题,如由于光圈的不当设置而造成的所有能级束斑的曝光过量或曝光欠量等,也缺少必要的的数据质量控制手段。物理师需要自行调阅录像,在每一帧图像中核查束斑的数量是否与束流计划的能级数量相等,束斑曝光状态是否过量或欠量,因而占用大量临床调试时间。本研究从实际临床应用出发,在马里兰质子中心设计的连续采集束斑方法的基础上进行优化,针对上述数据质量问题配套增加束斑录像数据质量判断方法,并结合常用的束斑分析算法,基于 LabVIEW 软件开发环境,以自研软件(SpotCheck)为载体,形成一套从束斑采集到数据质量控制再到束斑分析的自动化解决方案,从而进一步提升质子临床调试、束流建模和周期性质控测量的效率。

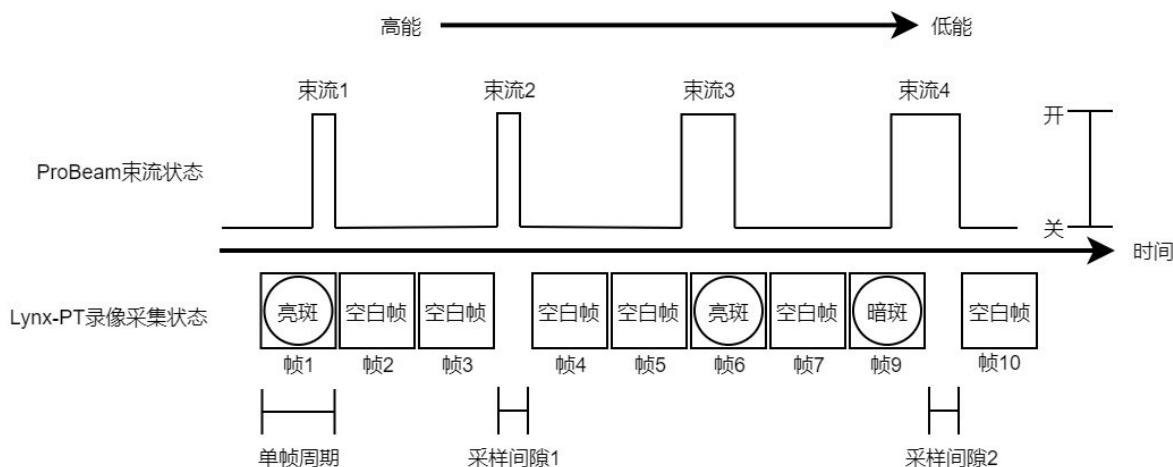


图 1 Lynx-PT 系统特性(采样间隙)引发的束斑录像质量问题原理示意  
Figure 1 Diagram of video data quality issues induced by Lynx-PT system limitation (sampling interval frames)

## 1 材料和方法

### 1.1 硬件设备

**1.1.1 质子放疗系统 ProBeam** 合肥离子医学中心所配置的瓦里安 ProBeam 质子放疗系统为笔形束点扫描型放疗设施,该系统拥有 4 个治疗仓,其中 3 个为旋转机架治疗仓。通过选能器系统,从回旋加速器引出的质子束流能量从 70 MeV 到 244 MeV 连续可调。该系统在治疗仓的机头配有插槽,可选配 3 种不同厚度的射程位移器。治疗仓机头引出的束流在空

气中等中心位置的束斑尺寸为 3~6 mm。

**1.1.2 闪烁体探测器 Lynx-PT** IBA 公司的商业化产品 Lynx-PT 闪烁体探测器已被多家质子医疗机构应用于临床调试、科学研究、周期性质控等<sup>[15-18]</sup>。相较于剂量感应胶片,闪烁体探测器的使用更方便快捷,在保证质子束斑信息实时获取的同时,其探测器的分辨率和相对剂量探测精度也满足束斑测量的需要<sup>[19]</sup>。该设备的有效探测截面大小为 30 cm×30 cm,成像分辨率为 0.5 mm,可利用其装配的 CCD 照相机

对穿过闪烁屏的质子照射通量进行快速成像,生成的图片像素为10 bit(0-1 023 cnt),曝光强度可通过光圈进行调节。该设备的图像采集方式可分为照相模式和录像模式。照相模式下可通过调节设备曝光时

间进行束流的一次性成像采集;录像模式下可设定帧率,对束流进行连续帧采集。其质子束斑的成像效果如图2所示。

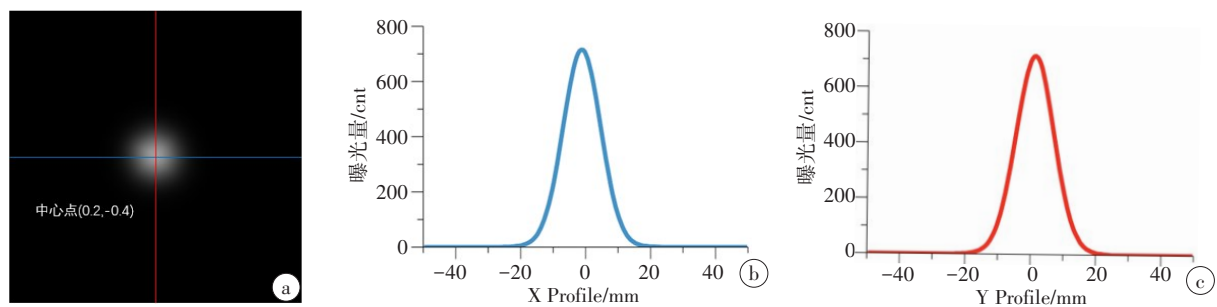


图2 基于Lynx-PT设备的ProBeam系统70 MeV能量束斑成像(a)及其profiles(b,c)  
Figure 2 70 MeV spot image and related profiles of the ProBeam system acquired by Lynx-PT

1.2 参数配置

在束斑采集前须对笔形束扫描(Pencil Beam Scanning, PBS)质子放疗系统和Lynx-PT探测器进行配置,使束斑录像文件中的束斑能级分布、束斑曝光强度满足临床调试和束流建模的需要。PBS质子放疗系统可通过计划文件直接配置出束方式,依照能量从高到低的顺序选择出束能级并设定各能级束流的位置和机器跳数(MU)。Lynx-PT则采用录像模式,帧频率设置为1.875 Hz。考虑到录像采集过程中无法改变其光圈的大小,可利用设备曝光量与照射质子通量的良好线性关系,对质子系统不同能量下束流的MU进行迭代优化,使每个预设能级的最大束斑曝光量趋于一致,同时伴随调整Lynx-PT的光圈大小,使每个束斑的曝光强度在合理的范围内。鉴于ProBeam质子系统在低能范围束流引出效率低,增大MU会造成束流时间的延长,增加Lynx-PT不规则采样间隙出现的概率。因此,在提升束流曝光强度的过程中,应优先改变光圈大小,再适量增加束流的MU。完成对束流计划文件和Lynx-PT的参数设置后,可将Lynx-PT放置于治疗仓机头下方的不同位置,通过设备配套软件Lynx-2D对束斑进行采集。

1.3 数据预处理

完成束斑采集后需从Lynx-2D软件中将录像文件以DICOM格式导出,并进行相关的数据预处理。其主要内容是对录像文件中同能级的相邻跨帧束斑进行叠加,并与束流计划中的预设能级一一映射。由于束斑采集过程中Lynx-PT设备特性限制以及人为因素的引入,需针对束斑录像的数据质量进行检测。检测项目分为束斑的缺漏、束斑曝光过量和束斑曝光欠量。整个检测过程穿插在数据的预处理流

程中(图3)。在第1步中,对DICOM格式的录像文件进行解析,将所有图像帧的像素信息(灰度值cnt)转化为多个二维数组;接着提取每个二维数组最大灰度值,将最大值与曝光上限阈值进行比较,判断是否出现曝光饱和。在第2步中,比较每一帧图像的最大灰度值与计数阈值,进行有效帧判断,将所有图像帧分为有效帧(含有束斑图像信息的帧)和空白帧(只含有背景噪声的帧);然后将单个空白帧或连续空白帧作为不同能级束斑的识别标志,合并所有相邻的有效帧,使每个能级仅含有一张束斑图像;最后检索合并后束斑图像的最大灰度值,并与曝光下限阈值进行比较,判断是否存在曝光欠量。在第3步中,对束斑图像和束流计划中预设的能级进行映射,并判断合并后的束斑数量是否与预设能级数量匹配。整个数据预处理流程由SpotCheck自动执行,数据质量分析结果在软件的数据预处理面板展示(图4)。

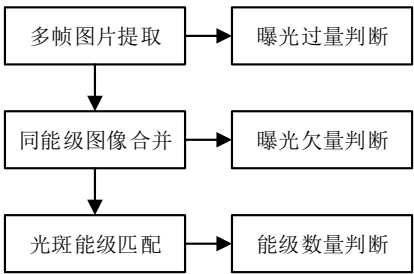


图3 数据预处理流程  
Figure 3 Data preprocessing workflow

1.4 束斑特性分析

SpotCheck在完成数据预处理流程后,将自动执行束斑特性分析流程,该流程和各步骤对应的可配



置算法选项如图 5 所示。具体步骤有:(1)图像插值,为可选步骤,可将 0.5 mm 分辨率的束斑图像分辨率提升至 0.1 mm。(2)计算所有不同能级束斑的中心点位置。鉴于 Lynx-PT 所采集的图像已经过配套采集软件的降噪和平滑处理<sup>[19]</sup>,且 ProBeam 系统的束斑具有明显的高斯特征,束斑图像中的最大灰度值位置可近似等效为束斑中心点位置,或将束斑最大灰度值 80% 的等值线圆环的形态学中心等效为束斑中心点。基于图像灰度值的质心法作为求解束斑中心的常用算法之一也被纳入软件功能模块中<sup>[14, 20-21]</sup>。(3)提取束斑的 profile。基于已求得的中心点位置,寻找束斑图像中对应的像素位置,基于该像素点坐

标分别提取束斑在 X 方向上和 Y 方向上的一维 profile 数据。(4)计算束斑尺寸,基于上一步提取的 profile,可使用最小二乘法进行一维高斯拟合,分别求出 X 和 Y 方向上的束斑尺寸( $\sigma_x$ 和 $\sigma_y$ ),也可通过计算被提取 profile 的半峰全宽(FWHM)再除以 2.35 转化为 $\sigma_x$ 和 $\sigma_y$ <sup>[22]</sup>。(5)计算束斑对称性,基于已求得的两个方向上的束斑尺寸,通过式(1)计算不同能量束斑的对称性。束斑特性分析的数据处理流程结束后,所有计算结果将在束斑分析面板中展示(图 6)。

$$\text{Symmetry} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{\sigma_x + \sigma_y} * 100\%$$

(1)

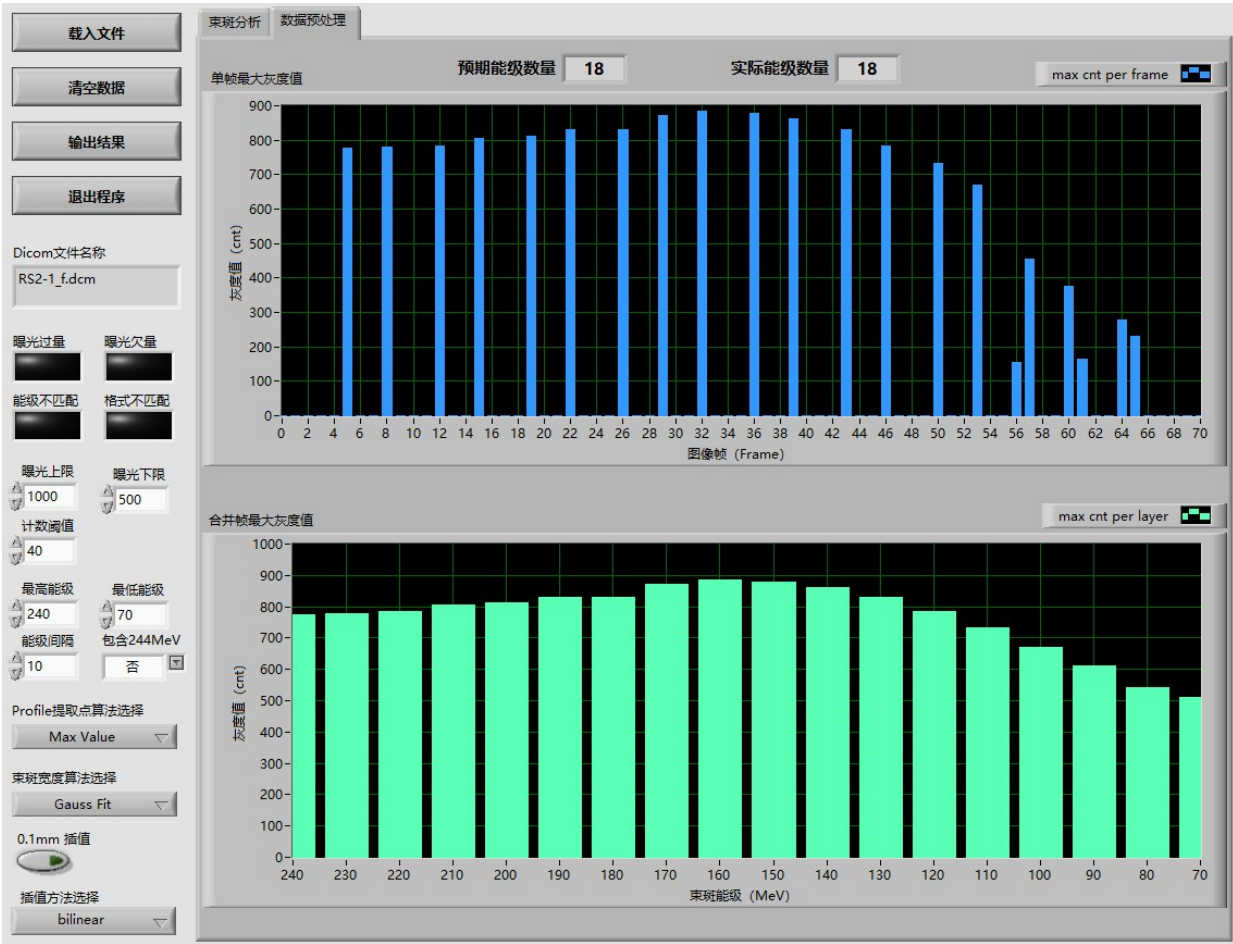


图 4 SpotCheck 数据预处理显示面板

Figure 4 SpotCheck data preprocessing panel

右上蓝色柱状图展示录像文件中每一帧图像的最大灰度值,右下绿色柱状图展示同能量束斑图像合并后的束斑最大灰度值,左侧为告警展示和软件参数配置项

**2 结果**

在临床调试阶段,为评价该方法的可靠性,将 SpotCheck 的束斑尺寸计算结果分别与 IBA 商业化软件平台 myQA 的计算结果以及质子设备厂商的现场验收

数据进行两组比对验证。在第一组验证中,验证数据选取空气中等中心位置上 8 个机架角度下(相互间隔 45°)的 Lynx-PT 束斑图像,基于 myQA 软件和 SpotCheck 软件的计算结果,统计各能级束斑的 SigmaX 和 SigmaY 的平均值和标准差。结果如图 7 所示,SpotCheck 束斑尺

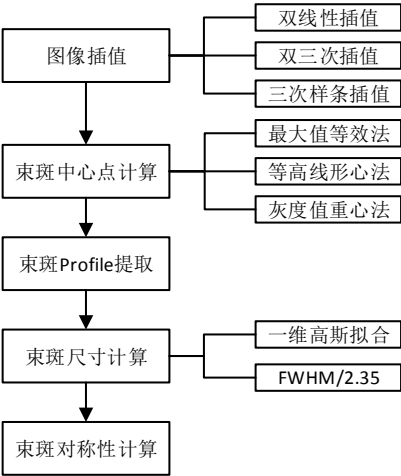


图5 束斑分析流程和配套数据处理算法  
Figure 5 Spot analysis workflow and related data processing algorithms

寸的计算结果总体略微偏大, SigmaX的最大差值出现在 150 MeV, 偏差 0.06 mm, 偏差百分比为 1.59%。SigmaY的最大差值出现在 200 MeV, 偏差 0.07 mm, 偏差百分比为 1.83%, SpotCheck 的 SigmaY 标准差在中、高能量区间略高于 myQA 的 SigmaY 标准差。在第二组验证中, SpotCheck 分析的数据和第一组验证中使用的数据相同, 质子设备厂商提供的现场验收数据则基于该公司自研的束斑影像采集系统(IAS)和束斑分析程序。结果如图 8 所示, SpotCheck 束斑尺寸的计算结果总体略微偏小, SigmaX的最大差值出现在 230 MeV, 偏差-0.06 mm, 偏差百分比为-1.74%。SigmaY的最大差值出现在 230 MeV, 偏差-0.07 mm, 偏差百分比为-1.89%。SpotCheck 的 SigmaX 标准差在低能和高能量区间略小于厂商验收数据的 SigmaX 标准差。

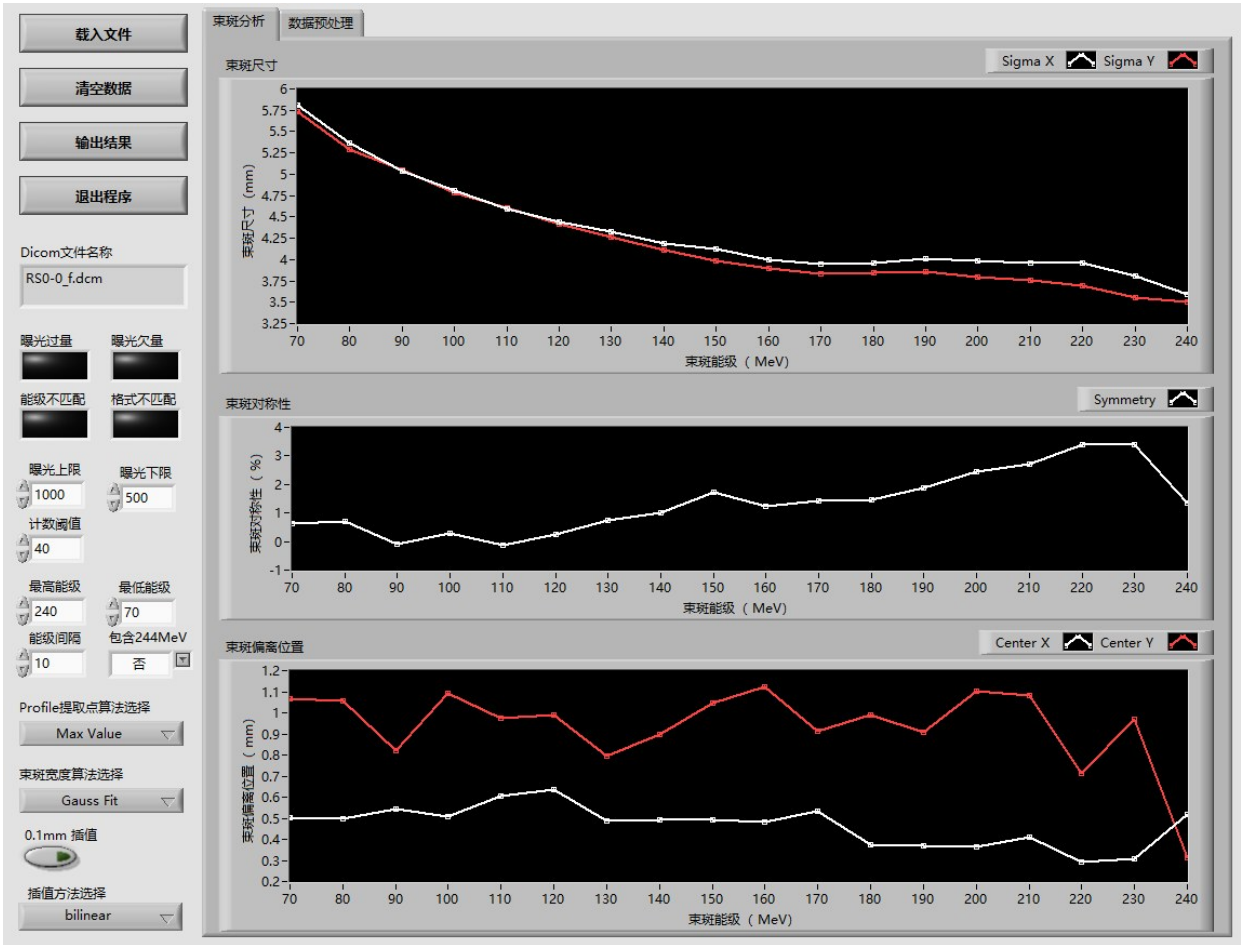


图6 束斑分析显示面板  
Figure 6 Spot analysis panel

右上方折线图展示各能级束斑的 SigmaX 和 SigmaY, 右中折线图展示各能级束斑的对称性, 右下的折线图展示束斑中心在 X 和 Y 方向上的坐标位置, 左侧为告警展示和软件参数配置项

3 讨论

3.1 束斑采集与分析效率

束流建模是质子医疗系统临床调试的重要工作

组成。束流模型的建立, 除纵向积分深度剂量曲线外, 还需要不同高度平面的束斑 profile 构造出三维扫描点的剂量分布形态。瓦里安的质子计划系统在建

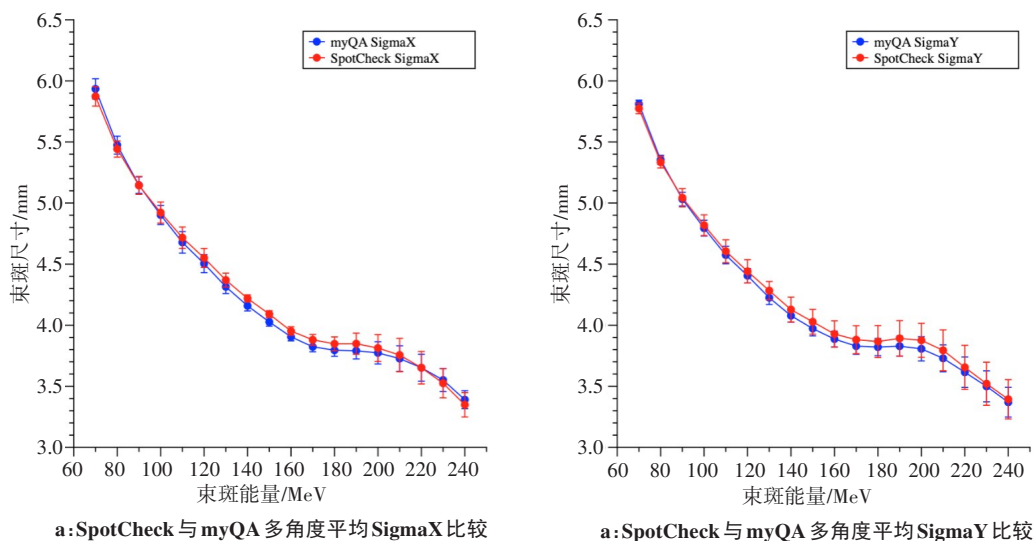


图 7 SpotCheck 与 myQA 基于相同 Lynx-PT 测量数据的束斑尺寸计算结果比较(空气中中心位置)

Figure 7 Comparison between SpotCheck and myQA calculated results based on the same Lynx-PT data set (in air at isocenter)

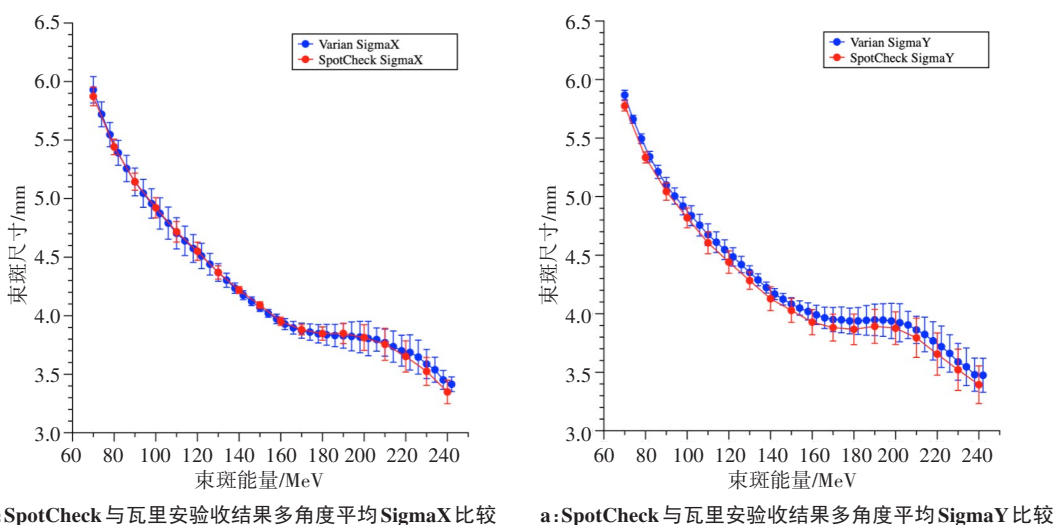


图 8 SpotCheck 束斑尺寸分析结果与瓦里安现场验收数据的比较(空气中中心位置)

Figure 8 Comparison between SpotCheck calculated spot sizes and Varian on-site acceptance data (in air at isocenter)

模过程中需要提供机器可调能量范围内距离等中心不同位置平面上的束斑 Xprofile 和 Yprofile 数据。基于数据建模和临床调试的实际需要,合肥离子医学中心 5 号治疗室的束斑测量内容如表 1 所示,累计采集有效束斑 1 585 个。若使用传统单能束斑采集方法,ProBeam 系统每次从束流请求到束流完成耗时约 1 min,除去 Lynx-PT 设备摆位耗时,仅束斑采集和存储过程累计耗时约 27 h,至少占用 4 d 的束流时间。每次变更能量时,需人工更改质子系统的 MU 参数或更改 Lynx-PT 的光圈大小,手动操作频繁且重复性高。若使用连续采集方法,PBS 质子放疗系统执行一次束流计划可投射 19 个能级的束斑(70~240 MeV,间距 10 MeV,另补充最高能级 244 MeV),无需手动改变 MU 参数或光圈大小。配合使用 SpotCheck 软件进行录像数据质量控制,将录像文件导入软件即

可获得数据质量分析结果,避免人工核查数十帧束斑图像,可将整个束斑采集过程压缩至 0.5 d。最后,该软件极大提升了束斑特性分析效率,无需使用 myQA 软件手动执行对录像文件的逐帧处理分析,可直接获得录像文件中所有能级束斑的尺寸,避免数十小时的重复分析工作。

### 3.2 数据质量控制效果

在束斑采集过程中发现使用 SpotCheck 软件的数据质量控制方法可准确识别出束斑采集过程中出现的束斑曝光过量、曝光欠量、个别能级束斑缺失等现象,典型的数据质量问题如图 9a~c 所示。不同于束斑采集缺漏造成的异常空白帧序列,PBS 质子放疗系统偶尔会自发性产生能量切换的不规律延时,产生异常数量的空白帧序列,如图 9d 所示,SpotCheck 软件仍可正确识别此种情况下所有能级的束斑。



表 1 建模束斑采集分类

Table 1 Spot acquisition and classification for beam modeling

编号	能量范围/MeV	距等中心位置/cm	射程位移器厚度/cm	治疗机架角度/°	束斑采集数
1	70~244	-20, -10, 0, 10, 20	0	0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315	760
2	70~244	-20, -10, 0, 10, 20	2	0, 90, 270	285
3	70~244	-20, -10, 0, 10, 20	3	0, 90, 270	285
4	90~244	-20, -10, 0, 10, 20	5	0, 90, 270	255

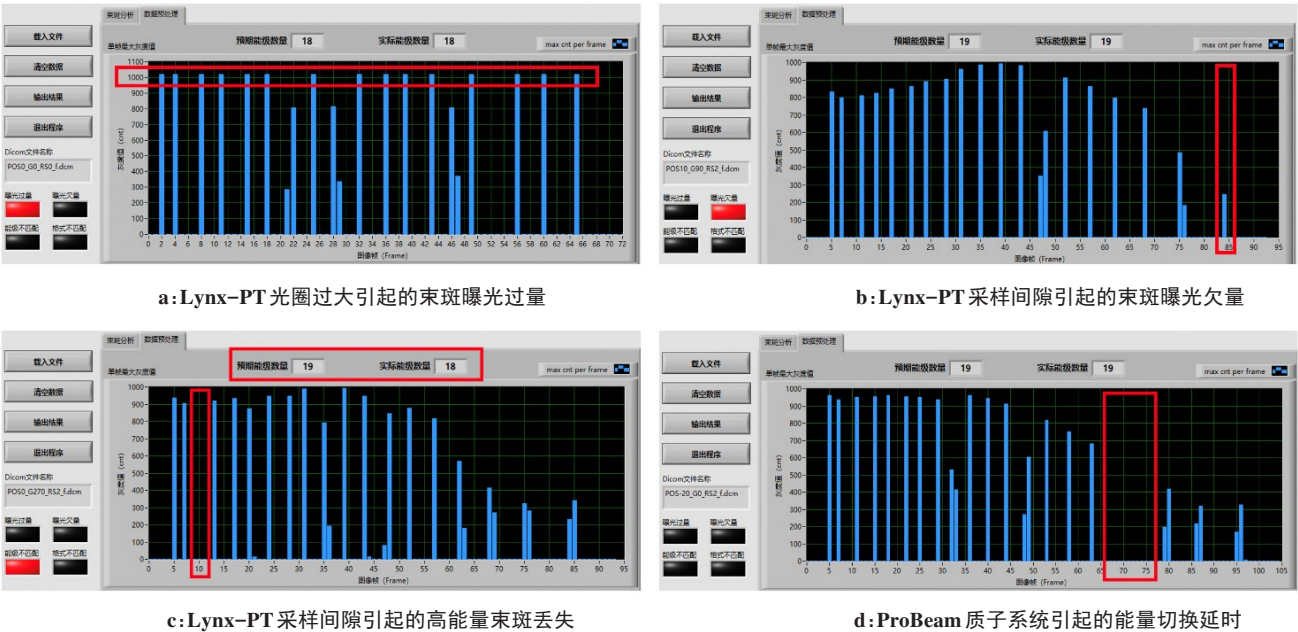


图 9 SpotCheck 软件对不同录像数据质量问题的定位分析结果

Figure 9 Video data quality issue identification by SpotCheck in different scenarios

4 结 论

针对 PBS 质子放疗系统和 Lynx-PT 设备特性所设计的束斑测量与分析方法可快速完成在同一机架角度下多个能级束斑的采集,准确分析出束斑尺寸、对称性等参数。将数据预处理和束斑特性分析流程嵌入软件后极大提升了该方法的自动化程度。其数据质量控制功能可及时定位束斑采集过程中由人为操作疏漏或 Lynx-PT 采样间隙所引入的束斑数据质量问题,避免人工数据质量检查造成的疏漏。在完成所有质子治疗室的临床调试工作后,可继续进行质子束斑的周期性质量保证方法和流程设计,并嵌入 SpotCheck,提升质子系统质控的自动化程度。

【参考文献】

[1] 侯俊,方春锋,田飞燕,等.原发性肝癌质子调强与光子螺旋断层放射治疗计划质量评估[J].实用癌症杂志,2021,36(9):1457-1462.  
Hou J, Fang CF, Tian FY, et al. Evaluation of plan quality for IMPT and HT in primary liver cancer[J]. The Practical Journal of Cancer, 2021, 36(9): 1457-1462.  
[2] 田广伟,李楠,李光.质子射线与光子射线治疗肺癌的剂量学比较:meta分析[J].中国肺癌杂志,2013,16(5):252-260.

Tian GW, Li N, Li G. Dosimetric comparing between protons beam and photons beam for lung cancer radiotherapy: a meta-analysis[J]. Chinese Journal of Lung Cancer, 2013, 16(5): 252-260.  
[3] 吉喆,姜玉良,王俊杰,等.质子放疗的临床应用研究进展[J].西部医学,2016,28(4):580-584.  
Ji Z, Jiang YL, Wang JJ, et al. Developments of clinical application of proton beam radiotherapy[J]. Medical Journal of West China, 2016, 28(4): 580-584.  
[4] Van De Schoot A, De Boer P, Crama KF, et al. Dosimetric advantages of proton therapy compared with photon therapy using an adaptive strategy in cervical cancer[J]. Acta Oncologica, 2016, 55(7): 892-899.  
[5] Moignier A, Gelover E, Wang D, et al. Theoretical benefits of dynamic collimation in pencil beam scanning proton therapy for brain tumors: dosimetric and radiobiological metrics[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2016, 95(1): 171-180.  
[6] 解传滨,杨涛,王子申,等.质子调强放疗技术与2中光子旋转调强放疗技术在全中枢照射中的剂量学比较[J].医疗卫生装备,2021,42(5):38-42.  
Xie CB, Yang T, Wang ZS, et al. Comparison of dosimetry between intensity modulated proton therapy and two photon intensity modulated arc therapies in cranio spinal irradiation[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2021, 42(5): 38-42.  
[7] 方春锋,侯俊,徐寿平,等.质子治疗系统原理及其应用[J].中国医学装备,2021,18(4):187-192.  
Fang CF, Hou J, Xu SP, et al. Principle and application of proton therapy system[J]. China Medical Equipment, 2021, 18(4): 187-192.  
[8] 刘世耀.质子和重离子治疗及其装置[M].北京:科学出版社,2016:164-174.  
Liu SY. The proton and heavy ions therapy and its facilities[M]. Beijing: Science Press, 2016: 164-174.

- [9] 崔相利, 张建光, 卢晓明, 等. 质子治疗技术的发展及其挑战[J]. 中国医学物理学杂志, 2022, 39(4): 404-408.  
Cui XL, Zhang JG, Lu XM, et al. Development and challenges of proton therapy[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2022, 39(4): 404-408.
- [10] Farr JB, Moyers MF, Allgower CE, et al. Clinical commissioning of intensity-modulated proton therapy systems: report of AAPM task group 185[J]. Med Phys, 2021, 48(1): e1-e30.
- [11] Langner UW, Eley JG, Dong L, et al. Comparison of multi-institutional Varian ProBeam pencil beam scanning proton beam commissioning data[J]. J Appl Clin Med Phys, 2017, 18(3): 96-107.
- [12] Shang C, Evans G, Rahman M, et al. Beam characteristics of the first clinical 360 rotational single gantry room scanning pencil beam proton treatment system and comparisons against a multi-room system[J]. J Appl Clin Med Phys, 2020, 21(9): 266-271.
- [13] 杨涛, 曲宝林, 徐寿平, 等. IBA 质子笔形束扫描系统束流性能验收测试[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2020, 29(12): 1075-1079.  
Yang T, Qu BL, Xu SP, et al. Acceptance tests of beam performance for pencil beam scanning PBS proton system of IBA[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2020, 29(12): 1075-1079.
- [14] Eley JG, Strauss DR, Langner UW. Polyenergetic data acquisition using a video-scintillator detector for scanned proton beams[J]. Int J Part Ther, 2016, 3(3): 392-397.
- [15] Placidi L, Togno M, Weber DC, et al. Range resolution and reproducibility of a dedicated phantom for proton PBS daily quality assurance [J]. Zeitschrift fur Medizinische Physik, 2018, 28(4): 310-317.
- [16] Rana S, Rosenfeld AB. Parametrization of in-air spot size as a function of energy and air gap for the ProteusPLUS pencil beam scanning proton therapy system[J]. Radiol Phys Technol, 2020, 13(4): 392-397.
- [17] Harms J, Chang CW, Zhang R, et al. Nuclear halo measurements for accurate prediction of field size factor in a Varian ProBeam proton PBS system[J]. J Appl Clin Med Phys, 2020, 21(1): 197-204.
- [18] Lin LY, Ainsley CG, Mertens T, et al. A novel technique for measuring the low-dose envelope of pencil-beam scanning spot profiles[J]. Phys Med Biol, 2013, 58: N171-N180.
- [19] Russo S, Mirandola A, Molinelli S, et al. Characterization of a commercial scintillation detector for 2-D dosimetry in scanned proton and carbon ion beams[J]. Phys Med, 2017, 34: 48-54.
- [20] Hartmann B, Telsemeyer J, Huber L, et al. Investigations of a flat-panel detector for quality assurance measurements in ion beam therapy[J]. Phys Med Biol, 2012, 57(1): 51-68.
- [21] 陈涛, 李秀芳, 魏梦雅, 等. Lynx-2D 在质子点扫描系统中的运用[J]. 核技术, 2018, 41(5): 26-31.  
Chen T, Li XF, Guo MY, et al. The application of Lynx-2D in proton spot scanning system commissioning[J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(5): 26-31.
- [22] Arjomandy B, Taylor P, Ainsley C, et al. AAPM task group 224: comprehensive proton therapy machine quality assurance[J]. Med Phys, 2019, 46(8): e678-e705.

(编辑:谭斯允)