

## PBS 质子治疗系统快速日检 QA 方案的应用研究

郑仁超<sup>1</sup>, 卢晓光<sup>2</sup>, 吴韦清<sup>1</sup>, 肖志平<sup>1</sup>, 刘飞<sup>1</sup>, 胡广原<sup>1</sup>, 袁响林<sup>1</sup>

1. 华中科技大学同济医学院附属同济医院肿瘤科, 湖北 武汉 430030; 2. 深圳清华大学研究院精准放射诊疗技术研发中心, 广东 深圳 518057

**【摘要】目的:**通过分析 IBA Sphinx Compact 设备在迈胜紧凑型笔形束扫描质子治疗系统上的日检 QA 测量结果, 评价该方案在质子治疗中的临床应用价值。**方法:**采用 Sphinx Compact 设备对迈胜 S250i 质子治疗系统进行连续 30 d 的日检 QA 测量, 分析测量结果。**结果:**30 d 内摆位激光灯与影像中心平均偏差为  $(0.42 \pm 0.27)$  mm; 高能 and 低能笔形束的近端及远端深度误差均在 0.50 mm 以内; 测量的所有光斑位置偏差不超过 1.00 mm, 尺寸偏差不超过 7.5%; 影像中心与射束中心偏差不超过 0.75 mm; 矩形射野平坦度相对偏差在 0.5% 左右; 方野输出剂量偏差在 1.0% 以内。**结论:**Sphinx Compact 设备能准确并快速测量 AAPM TG-224 号报告推荐的质子系统日检 QA 项目, 提供实用且高效的解决方案, 具有很好的临床实用价值。

**【关键词】**Sphinx Compact; 笔形束扫描; 质子治疗系统; 日检 QA

**【中图分类号】**R318; R811.1

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2024)10-1206-05

### Application of rapid daily quality assurance for pencil beam scanning proton therapy system

ZHENG Renchao<sup>1</sup>, LU Xiaoguang<sup>2</sup>, WU Weiqing<sup>1</sup>, XIAO Zhiping<sup>1</sup>, LIU Fei<sup>1</sup>, HU Guangyuan<sup>1</sup>, YUAN Xianglin<sup>1</sup>

1. Department of Oncology, Tongji Hospital Affiliated to Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430030, China; 2. Research and Development Center of Precision Radiation Diagnosis and Treatment Technology, Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China

**Abstract: Objective** To analyze the daily quality assurance (QA) measurement results of IBA Sphinx Compact device on the Mevion compact pencil beam scanning proton therapy system for evaluating its clinical application value in proton therapy. **Methods** The daily QA measurement of Mevion S250i proton therapy system was carried out with Sphinx Compact device for 30 consecutive days, and the measurement results were analyzed. **Results** The average deviation between the positioning laser and the image center was  $(0.42 \pm 0.27)$  mm in 30 days. All of the proximal and distal depth errors of the high- and low-energy pencil beams were within 0.50 mm. The position deviation of all the spots measured did not exceed 1.00 mm, and the size deviation was less than 7.5%. The deviation between the image center and the beam center was not more than 0.75 mm. The relative deviation of the flatness of the rectangular field was about 0.5%. The deviation of the output dose of the square field was within 1.0%. **Conclusion** The proton system daily QA measurement items recommended by AAPM TG-224 report can be accurately and rapidly measured with Sphinx Compact device. The device is a practical and efficient daily QA tool with high practical value in clinic.

**Keywords:** Sphinx Compact; pencil beam scanning; proton therapy system; daily quality assurance

### 前言

自 1946 年 R. Wilson 首次提出质子治疗的理念, 伴随着计算机技术和影像技术的不断进步, 质子治

疗在近年来从只针对科研走向社会专业治疗, 目前已被公认为最先进的放疗方法<sup>[1-3]</sup>。随着科技的进步, 质子治疗系统已从最初的被动散射模式发展到如今主流的笔形束扫描(Pencil Beam Scanning, PBS)模式, PBS 系统在充分利用质子特性的前提下, 对打出的质子进行更精准的控制, 治疗过程中产生的中子更少, 对复杂形状的肿瘤照射更精准, 同时配合多角度旋转机架和多功能六维床, 可实现复杂的调强质子治疗(Intensity-Modulated Proton Therapy, IMPT), 大大提升疗效<sup>[4-7]</sup>。

**【收稿日期】**2024-05-12

**【基金项目】**湖北省科技计划项目(2023BCB096)

**【作者简介】**郑仁超, 硕士, 主管技师, 研究方向: 放射物理, E-mail: marszrc@outlook.com

**【通信作者】**卢晓光, 博士, 副主任技师, 研究方向: 放射物理, E-mail: luxg@tsinghua-sz.org

由于质子治疗系统越来越复杂,各类错误报告越来越多,后果也越来越严重,完善质子治疗系统的质量保证(Quality Assurance, QA)体系具有重要意义和必要性<sup>[8-11]</sup>。QA的根本目标是确保将正确的剂量传递给患者相应肿瘤体积内,在可能的最低副作用情况下达到最佳的治愈率。针对质子治疗系统的复杂性和不确定性,国际组织和机构以各种报告形式提出大量指导性建议,以美国医学物理师协会AAPM TG-224号报告为代表,为质子治疗系统建立比光子治疗系统更详尽的QA流程<sup>[12]</sup>。

在诸多QA流程中,确保机器运行的工作参数是治疗需要的起始参数是重要一环。各治疗中心都采用定期QA的质检制度,其要点是确保各参数短时间和长时间的稳定度,通常将QA分为日检、周检、月检、年检和不定期QA。对于PBS质子治疗系统而言,除了必要的电气及安全联锁检查,等中心、输出剂量、束斑、同能量射束的深度线性等参数都是日检QA必须检查的项目。然而对于治疗机构而言,使用传统设备逐项完成日检QA检测需要耗费相当长时间,不但会增加工作人员受照射活化物辐射剂量,也对人员操作和治疗机房机时安排提出挑战<sup>[13-17]</sup>。

为解决上述问题,比利时IBA公司(Ion Beam Applications SA, Belgium)设计了一款用于PBS质子治疗系统日检QA的Sphinx Compact设备,它能极大缩短日检QA时间,减少工作人员受辐射剂量,降低QA操作难度,保证更多患者治疗时间。本研究通过分析Sphinx Compact设备在PBS质子治疗系统上的测量结果,评价该方案在日检QA中的应用价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 迈胜 S250i 质子治疗系统

武汉同济医院配置的单室紧凑型PBS质子治疗系统(S250i, Mevion Medical Systems, USA)是国内首台,其加速器半径仅0.9 m,重量仅17 t,是现今最小的医用质子加速器;它配备HYPERSCAN超高速PBS系统,利用安装在190°旋转机架上的超导同步回旋加速器,提供标称能量为230 MeV的脉冲质子束,出束精度在1 mm以内,能提供IMPT,其系统构造如图1所示。

### 1.2 Sphinx Compact 日检QA设备

Sphinx Compact设备是紧凑完整的PBS治疗系统日检QA的解决方案,配备一个20 cm×20 cm的0.2 mm高分辨率探测器,安装在便携式框架上,带有可移动的塑料模块,可分区域检查特定质子能量、扩展布拉格峰值(Spread-Out Bragg Peak, SOBP)剖面曲线和机器输出剂量,还可以进行X射线/质子等中

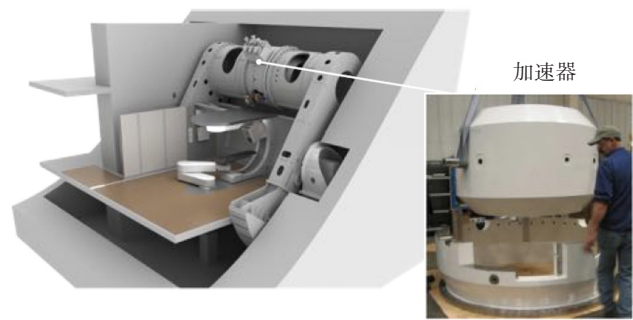


图1 迈胜 S250i 质子治疗系统  
Figure 1 Mevion S250i proton therapy system

心符合性、质子光斑位置和大小(sigma 常数)以及原始质子束能量的每日PBS QA测试,并能通过“转换”剖面对SOBP质子束的平坦度进行分析,全面支持AAPM TG-224协议。结合集成的myQA软件,只需按编辑好的射野图出束测量一次,就可全面分析机器参数,确保质子设备正常可靠运转(图2)。

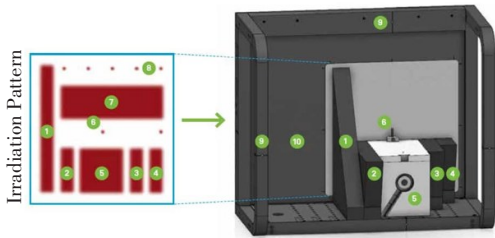


图2 Sphinx Compact的功能设计  
Figure 2 Functional design of Sphinx Compact  
1:扩展布拉格峰;2:能量(高);3:能量(中);4:能量(低);5:输出(PPC05);  
6:等中心和X光一致性;7:均匀性;8:束斑;9:激光对准;10:电子射野影像系统探测器

### 1.3 日检QA测量

在对武汉同济医院S250i质子治疗系统进行连续多日多项监测,确定系统基线状态后,通过指定束斑输出的位置、能量及机器跳数(Monitor Unit, MU),编辑日检QA的射野图。依据TG-224报告要求,SOBP并非日检项目,所以改设1区为200 MeV同能量等间距排列的4个光斑,分析同能量光斑在不同深度的线性变化;设置2区和4区分别为200 MeV和100 MeV能量的均匀矩形射野,分析高能和低能射线的深度线性;设置5区为120 MeV能量均匀方野,利用模块内置PPC05电离室测量输出剂量,通过设置区域内光斑分布和MU,将参考输出剂量调至1 Gy;设置6区为205 MeV单能光斑,分析等中心位置;设置7区为207 MeV能量均匀矩形射野,分析相对平坦度;设置8区分别为175、150和125 MeV能量的单能光斑,分析不同能量光斑特性。

使用时分别在机架角为0°和90°下,将 Sphinx Compact设备置于治疗床上并按要求连接电缆及网线。在治疗床各向0°条件下将激光灯与设备刻度线对齐,并将等中心对准设备中央标记小球,然后采用kV-X射线进行摆位校准,校准位置后通过MyQA软件启动设备并测量背景。设备进入待测量状态后,执行编辑好的射野图进行出束测量,完成后分析各项测量结果。

1.4 结果分析

保存首日测量结果为参考基准,连续进行30 d测量,分析测量可靠性及稳定性。

2 结果

2.1 位置验证结果

图3为90°机架角下设备的摆位示意。拍摄正交kV-X影像对小球位置进行验证,并利用治疗床纠正摆位误差,验证激光灯与二维影像中心的重合度(图4)。纠正摆位完成后,再次拍摄2D影像验证,若位置准确则进行出束准备。按照武汉同济医院质子加速器系统验收协议,接受等中心激光灯位置精度容差为2 mm。在连续30 d测试中,设备在3个方向上的平均摆位误差分别为X轴(0.18±0.13) mm、Y轴(0.20±0.15) mm、Z轴(0.23±0.14) mm,三维方向的平均摆位误差为(0.42±0.27) mm,测量通过率100%,验证了激光灯与二维影像中心重合度良好,定位准确。



图3 90°机架角下模体摆位示意图  
Figure 3 Diagram of the phantom setup as gantry at 90°

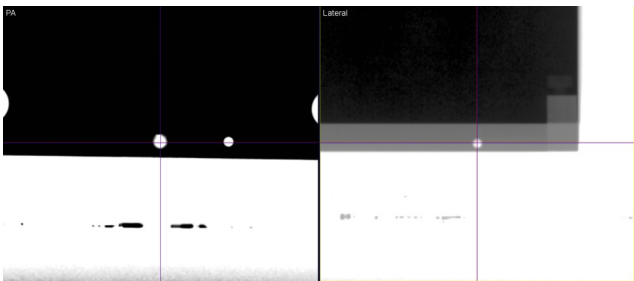


图4 中央标记小球正侧位2D-kV影像  
Figure 4 Anteroposterior and lateral 2D-kV image of the center fiducial point

2.2 单次测量剂量分布以及多次测量结果

图5为设计照射野的单次测量剂量分布图。该平面剂量以中心点束斑剂量进行归一,并按设定区域自动分析测量值与参考值之间的偏差。经过30 d连续测量,各项分析结果如表1所示。统计结果显示连续多日测量预设的射野图,各项结果符合预期, Sphinx Compact设备测量稳定性好,质子加速器系统运行状态也很稳定。除表1所示各项参数之外,该设备还能分析光斑的扭曲度和光斑强度等非主要参数,在此不详细阐述。

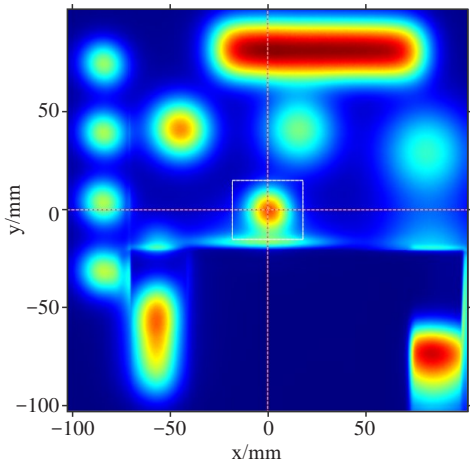


图5 单次测量平面剂量分布  
Figure 5 Plane dose of a single measurement

3 讨论

近年来,随着计算机和影像技术的迅速发展,开启了肿瘤精准放疗时代。为提高治疗精度,质子治疗也从传统的被动散射模式发展为当今主流的PBS模式。PBS使用电子引导扫描系统和偏转磁铁,可精确控制几毫米宽质子束的位置和射程,从而在肿瘤体积内传递高度靶向的辐射剂量,实现精准IMPT<sup>[18-22]</sup>。由于质子治疗中存在的诸多不确定性,高端的技术也对设备的精准度和稳定性提出更高的要求,治疗系统的QA尤为重要。为保证治疗的精准性,射野输出剂量、特定能量射束布拉格峰、光斑、等中心等诸多物理参数都被要求在日检QA中进行检查。按照传统做法,执行这些QA检查所需要的测量设备多,每次出束也只能检查上述某一项参数,检查完所有项目需要耗费大量的时间和精力,严重影响工作效率<sup>[23-25]</sup>。

Sphinx Compact日检QA设备可以很好地解决上述问题,它将诸多测量模块都集成在一起,只需要执行一次设计好的射野图,就能完成所有AAPM TG-224



表1 测量统计结果  
Table 1 Statistical results of measurements

检测项目	$G=0^{\circ}$	$G=90^{\circ}$	容差	通过率/%	
能量	200 MeV 射束远端射程偏差	(0.14±0.11) mm	(0.17±0.12) mm	1 mm	100
	200 MeV 射束近端深度偏差	(0.16±0.12) mm	(0.17±0.14) mm	1 mm	100
	200 MeV 射束跌落区宽度偏差	(0.13±0.05) mm	(0.12±0.06) mm	1 mm	100
	100 MeV 射束远端射程偏差	(0.28±0.19) mm	(0.23±0.21) mm	1 mm	100
	100 MeV 射束近端深度偏差	(0.26±0.16) mm	(0.24±0.19) mm	1 mm	100
	100 MeV 射束跌落区宽度偏差	(0.18±0.10) mm	(0.16±0.09) mm	1 mm	100
光斑	200 MeV 光斑位置偏差	(0.47±0.38) mm	(0.49±0.35) mm	2 mm	100
	200 MeV 光斑尺寸偏差	(2.53±2.15) %	(2.67±2.09) %	10 %	100
	175 MeV 光斑位置偏差	(0.44±0.41) mm	(0.45±0.35) mm	2 mm	100
	175 MeV 光斑尺寸偏差	(3.22±2.79) %	(3.14±2.68) %	10 %	100
	150 MeV 光斑位置偏差	(0.50±0.32) mm	(0.48±0.34) mm	2 mm	100
	150 MeV 光斑尺寸偏差	(3.31±2.69) %	(3.23±2.71) %	10 %	100
	125 MeV 光斑位置偏差	(0.55±0.42) mm	(0.57±0.45) mm	2 mm	100
	125 MeV 光斑尺寸偏差	(4.07±3.25) %	(4.13±3.36) %	10 %	100
其他	X 影像与射束中心偏差	(0.47±0.22) mm	(0.49±0.25) mm	1 mm	100
	射野平坦度相对偏差	(0.34±0.11) %	(0.38±0.19) %	2 %	100
	方野输出剂量一致性	(0.69±0.33) %	(0.62±0.31) %	2 %	100

号报告建议的日检 QA 参数的测量,大大缩短日检 QA 时间,极大提高工作效率,也能显著降低工作人员在 QA 过程中因材料活化导致的受辐射剂量。本研究中,30 d 连续测量结果可靠性好且稳定性高,平均日检 QA 耗时少于 30 min(包括设备摆位和数据比对处理)。

日检 QA 作为质子放疗临床 QA 中必不可少的一环,其核心目的是保证质子治疗系统当日的运行状态与设备基线保持在容差范围内,即保证系统当日能准确执行 TPS 设计的治疗方案。虽然 Sphinx Compact 设备能完成诸多参数测量,但日检 QA 的测量结果只能作为判断系统当日稳定性的参考依据,诸如绝对输出剂量、束斑形态和位置、激光灯系统精度、能量精度及 S250i 特有的自适应多叶光栅精度等参数指标仍然需利用其他设备在周检或月检 QA 中进行测量。另外,虽然该设备兼容性极好,但适配不同的质子治疗系统使用时,需根据特定系统编写不同的测量射野图,测量的特征射束也不尽相同。由于本研究中使用 S250i 质子治疗系统具有独特的束流降能机制,其质子能谱为离散分布,只能生成特定能量的质子束,所以选择测量的射束能量与其他 PBS 系统略有差异;并且,由于是在输运系统终端通过物理降能,中低能射束的光斑也较大,所以通过改

变或删除光斑输出坐标,在射野图设计中放弃了第 3 区中能光斑,以免与低能光斑重合影响结果分析,同理,第 8 区 125 MeV 光斑位置也进行了适当调整。

4 结 论

Sphinx Compact 设备能准确并全面测量 AAPM TG-224 号报告推荐的质子系统日检 QA 测量项目,提供实用且高效的解决方案,具有很好的临床实用价值。

【参考文献】

[1] 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.

[2] 谷晓芳. 关于质子治疗系统临床评价要求的探讨[J]. 中国医疗器械杂志, 2017, 41(2): 137-139.  
Gu XF. Discussion on clinical evaluation of proton radiotherapy system [J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2017, 41(2): 137-139.

[3] Saini G, Shukla R, Sood KS, et al. Role of proton beam therapy in current day radiation oncology practice[J]. Asian J Oncol, 2020, 6(3): 97-106.

[4] Wilson LJ, Pirlpesov F, Moskvina V, et al. Proton therapy delivery method affects dose-averaged linear energy transfer in patients[J]. Phys Med Biol, 2021, 66(7): 074003.

[5] Gao M, Mohiuddin MM, Hartsell WF, et al. Spatially fractionated (GRID) radiation therapy using proton pencil beam scanning (PBS): feasibility study and clinical implementation[J]. Med Phys, 2018, 45 (4): 1645-1653.

- [6] Liang X, Lin A, Tang S, et al. Proton PBS plan design and robustness evaluation for head and neck cancer[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2014, 90(S1): S944.
- [7] Tran LT, Chartier L, Bolst D, et al. Characterization of proton pencil beam scanning and passive beam using a high spatial resolution solid-state microdosimeter[J]. *Med Phys*, 2017, 44(11): 6085-6095.
- [8] Zhu XR, Li YP, Mackin D, et al. Towards effective and efficient patient-specific quality assurance for spot scanning proton therapy[J]. *Cancers (Basel)*, 2015, 7(2): 631-647.
- [9] Kase Y, Yamashita H, Numano M, et al. A revision of proton machine quality assurance for wobbling-proton-beam therapy[J]. *Radiol Phys Technol*, 2013, 6(2): 444-452.
- [10] Grevillot L, Moreno JO, Fuchs H, et al. Implementation of sphinx/lynx as daily QA equipment for scanned proton and carbon ion beams[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2023, 24(4): e13896.
- [11] Rana S, Eckert C, Tesfamichael B. Feasibility study of utilizing sphinx compact for quality assurance in uniform scanning proton therapy[J]. *Phys Med*, 2023, 113: 102468.
- [12] 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.
- [13] Bizzocchi N, Fracchiolla F, Schwarz M. A simple PMMA phantom for daily QA energy checks in proton therapy[J]. *Phys Med*, 2016, 32(S3): 204.
- [14] Wang SY, Song YT, Feng HS, et al. Design of a personnel safety interlock system for proton therapy[J]. *Nucl Sci Tech*, 2021, 32(4): 39.
- [15] Penfold SN. Radiation shielding assessment of high-energy proton imaging at a proton therapy facility[J]. *Med Phys*, 2022, 49(8): 5340-5346.
- [16] Depuydt T. Proton therapy technology evolution in the clinic: impact on radiation protection[J]. *Ann ICRP*, 2018, 47(3/4): 177-186.
- [17] Agosteo S. Radiation protection constraints for use of proton and ion accelerators in medicine[J]. *Radiat Prot Dosimetry*, 2009, 137(1/2): 167-186.
- [18] Schaub SK, Bowen SR, Nyflot MJ, et al. Intensity-modulated proton therapy using dose-painting pencil beam scanning for high-risk hepatocellular carcinoma.[J]. *J Clin Oncol*, 2020, 38(S4): 558.
- [19] Zhu XR, Zhang XD, Palmer M, et al. Technological advancements and outlook in proton therapy[M]//Frank SJ, Zhu XR. Proton therapy. Philadelphia: Elsevier, 2021: 215-220.e5.
- [20] McKeever MR, Sio TT, Gunn GB, et al. Reduced acute toxicity and improved efficacy from intensity-modulated proton therapy (IMPT) for the management of head and neck cancer[J]. *Chin Clin Oncol*, 2016, 5(4): 54.
- [21] Chung C, Trofimov A, Adams J, et al. Comparison of 3D conformal proton therapy, intensity-modulated proton therapy, and intensity-modulated photon therapy for retroperitoneal sarcoma[J]. *Sarcoma*, 2022, 2022: 5540615.
- [22] Jie AW, Marignol L. Pro-con of proton: dosimetric advantages of intensity-modulation over passive scatter for thoracic malignancies[J]. *Tech Innov Patient Support Radiat Oncol*, 2020, 15: 37-46.
- [23] Rana S, Bennouna J, Samuel EJ, et al. Development and long-term stability of a comprehensive daily QA program for a modern pencil beam scanning (PBS) proton therapy delivery system[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2019, 20(4): 29-44.
- [24] Su Z, Hsi W, Forthomme J, et al. Evaluations of a flat-panel based compact daily quality assurance device for proton pencil beam scanning (PBS) system[J]. *Phys Med*, 2020, 80: 243-250.
- [25] Jeong S, Yoon M, Son J, et al. Increased efficiency of range verification in routine QA for pencil-beam scanning proton therapy[J]. *J Korean Phys Soc*, 2018, 73(7): 983-989.

(编辑:谭斯允)