

TQA数据趋势与TomoTherapy输出稳定性的联系

陈济鸿,张秀春,柏朋刚,陆军,陈文娟,陈开强,李奇欣,胡彩容,林金勇
福建省肿瘤医院/福建医科大学附属肿瘤医院放疗科,福建 福州 350014

【摘要】目的:探讨TomoTherapy Quality Assurance(TQA)数据趋势与螺旋断层放疗(Helical Tomotherapy, HT)系统输出的联系。**方法:**回顾性分析了本院HT系统近3年内TQA各个模块的参数和数据趋势,探讨其与HT系统的静态输出剂量和输出能量(D_{20}/D_{10})变化的相关性。**结果:**楔形阶梯静态模块的z轴偏移参数与HT的静态输出剂量的相关性最强($r=0.883$, $P<0.01$)。基本剂量测定模块的出口检测器平整度值对能量变化最敏感($r=0.902$),其次是楔形阶梯静态模块的能量差异($r=0.897$)和楔形阶梯螺旋模块的能量差异($r=0.852$),灵敏度分别为 2.3×10^{-4} 、 3.1×10^{-4} 和 5.7×10^{-4} 。**结论:**TQA有助于用户追踪HT输出剂量和能量变化,及早进行必要的机器维护或剂量校准。

【关键词】螺旋断层放疗;TQA;静态输出剂量;射线质

【中图分类号】R318;R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2020)09-1120-04

Correlation between TQA data trends and output of helical tomotherapy

CHEN Jihong, ZHANG Xiuchun, BAI Penggang, LU Jun, CHEN Wenjuan, CHEN Kaiqiang, LI Qixin, HU Cairong, LIN Jinyong
Department of Radiation Oncology, Fujian Cancer Hospital/Fujian Medical University Cancer Hospital, Fuzhou 350014, China

Abstract: Objective To discuss the relationship between tomotherapy quality assurance (TQA) data trends and output of helical tomotherapy (HT). **Methods** The correlations between static output and output energy variation (D_{20}/D_{10}) were determined based on the retrospective analysis on the parameters and data trends of each module of TQA of HT in recent 3 years. **Results** The offset parameter of z axis in step-wedge static module had the best correlation with the static output of HT ($r=0.883$, $P<0.01$). The exit detector flatness in basic dosimetry module was the most sensitive to energy changes ($r=0.902$), followed by energy differences in step-wedge static module ($r=0.897$) and energy differences in step-wedge helical module ($r=0.852$), and their sensitivities were 2.3×10^{-4} , 3.1×10^{-4} and 5.7×10^{-4} , respectively. **Conclusion** TQA can help user to monitor the changes in the output and energy of HT, thereby carrying out necessary maintenance and dosimetric validation earlier.

Keywords: helical tomotherapy; tomotherapy quality assurance; static output; beam quality

前言

螺旋断层放疗(Helical Tomotherapy, HT)是当今最为先进的调强放疗(IMRT)技术之一^[1]。与常规直线加速器相比,HT独特的螺旋束流照射模式使它具有显著的物理和剂量学优势,在靶区比较复杂、范围较大的肿瘤如鼻咽癌、全脑全脊髓肿瘤等的治疗上具有一定剂量学优势^[2-5]。

同时,HT的精密性和复杂性使得完整的质控过程显得更为重要^[6-7]。AAPM TG-148报告给出了一

个HT系统质量保证(Quality Assurance, QA)的指导^[8],然而整个过程十分耗时繁琐,甚至影响到治疗时间。TOMO公司提供了一个较为便捷的机器QA软件—TomoTherapy Quality Assurance(TQA)。TQA软件利用机载的探测器和剂量检测系统来收集系统程序运行的数据,然后上传服务器进行数据的自动分析^[9]。TQA适用于监测系统性能改变,以便及早提示实施维护或剂量测定验证。本研究旨在回顾性研究TQA参数和TOMO输出剂量、输出能量稳定性之间的联系。

1 资料和方法

1.1 静态输出剂量和射线质测量

如图1a所示,将等效固体水(上面是厚度为0.5 cm的固体水;下面是厚度为5 cm的固体水,其中电离室中心位于这块固体水的1 cm处)和A1SL电离室

【收稿日期】2020-04-15

【基金项目】福建省卫生健康科技项目(2017-ZQN-15, 2018-ZQN-19, 2017-CX-8)

【作者简介】陈济鸿,博士,工程师,主要研究方向为肿瘤放射治疗, E-mail: whuhandaxue@163.com

【通信作者】张秀春, E-mail: tongzhangxiuchun@126.com

(Standard Imaging Inc., Middleton, WI)放置于TOMO治疗床上,按程序要求摆位,执行静态输出剂量测量计划(机架角度0°、照射野为40 cm×5 cm),记录剂量仪读数,计算吸收剂量,并与标称值比较计算偏差(2%以内),选取2016年1月~2018年8月的数据进行分析。

本研究中,固体水下20和10 cm处的吸收剂量比值 D_{20}/D_{10} 被用来监测HT的能量变化。如图1b所示,将等效固体水和A1SL电离室放置于TOMO治疗床上,按程序要求摆位,执行静态输出剂量测量计划(机架角度0°、照射野为40 cm×5 cm),其中一个电离室用来测量不同深度(10和20 cm)的输出剂量,另外一个电离室作为参考来监测1.5 cm处输出剂量的波动。2018年1月~2018年8月连续8个月的时间内,每周测量 D_{20}/D_{10} 。

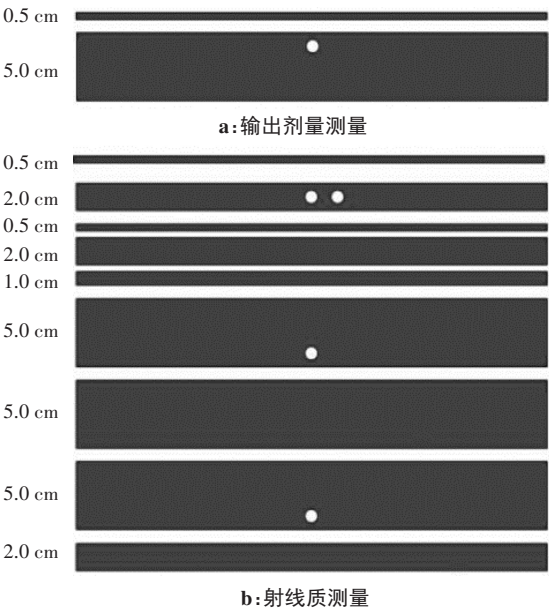


图1 输出剂量测量示意图和射线质测量示意图
Fig.1 Schematic diagrams of output dose measurement and beam quality measurement

1.2 TQA 参数与静态输出剂量稳定性的相关性

每月定期执行TQA工具中的8个模块:基本剂量测定(Basic Dosimetry)、空气扫描(Airscan)、日常QA(Daily QA)、楔形阶梯静态(Step-Wedge Static)、楔形阶梯螺旋(Step-Wedge Helical)、加速器纵向对齐(LINAC Longitudinal Alignment)、加速器横向对齐(LINAC Transverse Alignment)和射野宽度(Field Width)。

基本剂量测定模块采用旋转差异程序评估射束输出、能量和横向射野形状。空气扫描模块可以根据相同的日常空气扫描数据评估铅门的旋转稳定性。日常QA模块通过一个5 min旋转程序实施一系

列诊断测试。楔形阶梯静态模块和楔形阶梯螺旋模块监测能量、输出、铅门准直、治疗床速度、绿色激光对齐和检测器反应一致性。加速器横向对齐模块采用多叶准直器棒舌和凹槽程序,以测试加速器与多叶准直器的对齐情况。加速器纵向对齐模块测试加速器光子源与铅门准直之间的对齐情况。射野宽度模块通过地形程序测量纵轴射野形状。

其中楔形阶梯静态模块和楔形阶梯螺旋模块需要利用铝制阶梯模体。如图2所示,将铝制阶梯定位在治疗床台面上,治疗床的速度为1.5 mm/s,随着治疗床的移动,光子束通过不同厚度的阶梯时会发生不同程度的衰减,以此计算加速器参数的变化。

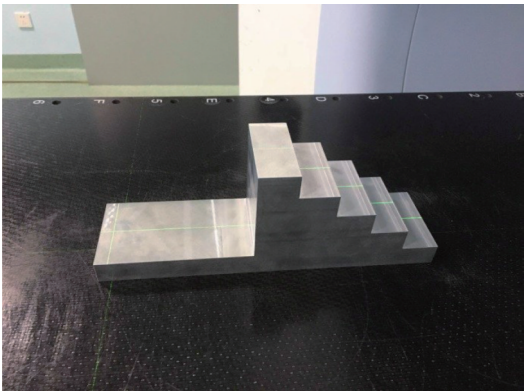


图2 铝制阶梯模体
Fig.2 Step phantom made of aluminum

对每个TQA模块中的参数与当日的静态输出剂量进行Pearson相关性分析,选取2016年1月~2018年8月的数据进行分析。

1.3 TQA 参数与能量变化的相关性

2018年1月~2018年8月,与能量密切相关的3个模块:基本剂量测定、楔形阶梯静态和楔形阶梯动态也同期每周测量一次。分析这3个模块的TQA参数与百分深度剂量(Percentage Depth Dose, PDD)比值的相关性,当 $|r|$ 超过0.8时进行线性拟合并作图。

TQA参数在追踪PDD比值变化方面的灵敏度参数为 $\sigma_{PDD} = \sigma_{TQA} / m$,其中, σ_{TQA} 表示TQA参数与其拟合值残差的标准差, m 表示最佳拟合直线的斜率^[9]。当能量变化导致PDD比值变化程度小于 σ_{PDD} 时,将不能观察到TQA参数的相应统计学显著变化。因此,通过比较每个TQA参数对应的 σ_{PDD} ,可以定量比较这些TQA参数在追踪能量波动方面的灵敏性。

1.4 统计学分析

数据采用均值±标准差的形式表示,采用SPSS 19.0软件对数据进行Pearson相关性分析, $P < 0.05$ 为结果有统计学意义,线性拟合及绘图采用Origin 8.0软件。

2 结果

2.1 静态输出剂量的变化

TG148 报告要求 TOMO 的静态输出剂量偏差在 $\pm 2\%$ 以内,福建省肿瘤医院的螺旋断层与径照放射治疗系统(TOMO HD)近3年的输出剂量偏差为 $0.344\% \pm 0.280\%$ (图3),日常的静态输出剂量基本都满足要求,稳定性良好。

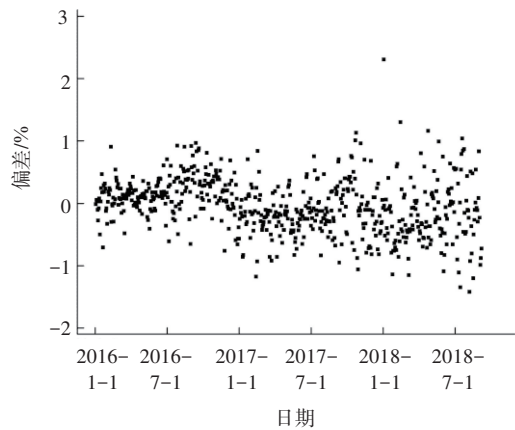


图3 TOMO HD 3年静态输出剂量测量结果
Fig.3 Static output dose measurements of TOMO HD in 3 years

2.2 TQA 参数与静态输出剂量稳定性的相关性

如表1所列,在TQA 8个模块的所有参数中,一些参数与静态输出剂量呈显著相关性($P < 0.05$)。其中楔形阶梯静态模块中的z轴偏移参数与静态输出剂量有着极强的正相关性,其次是楔形阶梯静态模块中的输出差异和日常QA模块中的J7 mm峰间能量密度差异参数,Pearson 相关系数分别为 $r = 0.883$ 、 -0.619 和 0.615 。

表1 TQA 参数与静态输出剂量的相关性
Tab.1 Correlation of TQA parameters and static output

TQA 数据(模块)	<i>r</i> 值	<i>P</i> 值
z轴偏移(楔形阶梯静态)	0.883	<0.01
输出差异(楔形阶梯静态)	-0.619	<0.01
J7 mm 峰间能量密度差异(日常QA)	0.615	<0.01
伽玛指数最大值25 mm(射野宽度)	-0.533	0.03
MLC闪烁中心差异(楔形阶梯螺旋)	0.438	0.05
峰间能量密度差异(空气扫描)	0.433	0.03

2.3 TQA 参数与能量变化的相关性

在与能量密切相关的3个TQA 模块参数中,一些参数与PDD 比值呈显著相关性($P < 0.05$), $r = 0.902$ (图4)、 0.897 和 0.852 。

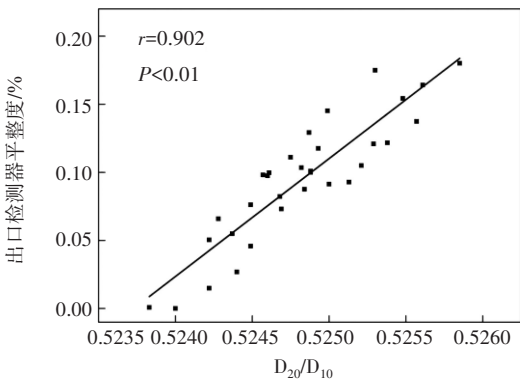


图4 出口检测器平整度(基本剂量测定)与 D_{20}/D_{10} 相关性
Fig.4 Correction between exit detector flatness (basic dosimetry) and D_{20}/D_{10}

根据定义,TQA 参数在机器验收时被定义为0,通过计算各参数对应的 σ_{PDD} ,可以比较它们在追踪PDD 比值变化的灵敏度(表2)。

表2 TQA 参数在追踪能量变化上的灵敏性
Tab.2 Sensitivity of TQA parameters in tracking energy changes

TQA 参数(模块)	<i>r</i> 值	$\sigma_{PDD} (\times 10^{-4})$
出口检测器平整度(基本剂量测定)	0.902	2.3
能量差异(楔形阶梯静态)	0.897	3.1
能量差异(楔形阶梯螺旋)	0.852	5.7

3 讨论

HT 是一种独特的IMRT 技术,直线加速器在 360° 内的51个投射角度连续旋转出束,同时通过治疗床的移动来实现断层治疗^[10]。与常规加速器相比,HT 射野数目多,调制能力强,大大提高了靶区的适形性和均匀性,更有效地保护周围正常组织^[11]。在治疗过程中,HT 系统要求维持恒定的剂量输出率、恒定的轴向和纵向分布的形状和尺寸^[12]。由于HT 独特的物理与剂量特性,HT 的质量保证及质量控制就显得尤为重要,因此AAPM 在2010年提供了这种新型调强放疗技术的QA 指南。这些大量的质控项目能够保证HT 准确治疗病人,但却十分费时、繁琐,许多单位通过HT 机载的CT 探测器来进行一些QA 项目^[13-15],而TQA 软件使得这项工作变得更加简便易行。本研究分析了TQA 参数与HT 输出之间的联系。

根据TG148 报告,要求定期检测射线输出剂量和射线质的稳定性^[16]。本研究发现HT 的静态输出剂量与TQA 的某些参数有着显著相关性。其中,楔形阶梯静态模块中的z轴偏移参数与静态输出剂量关系最紧密。z轴偏移参数反应了治疗床的高度变化。而静态输出剂量是在机架角度为 0° 时测量的,

因此电离室的探测信号对床的高度变化(与源的距离)比较敏感,从而能够反映输出剂量的变化。其次是楔形阶梯静态模块中的输出差异参数和日常QA模块的J7 mm峰间能量密度差异参数。输出差异参数是原始输出与参考输出之间的比值,它反应了能量输出的变化;J7 mm峰间能量密度差异是根据剂量归一化检测器信号偏差所估计的铅门旋转偏差,铅门位置的偏差也影响了HT剂量的输出。

在TQA中,锥形的定义是指所有脉冲中原始出口检测器数据的平均化曲线。射线能量越高,它的锥形尖峰越朝前分布,会导致出口检测器平整度值的升高(它是测量和参考锥形束分布归一化比值的均方根)^[17]。能量差异则是测量通过不同深度铝制阶梯楔形的射束能量,可以利用在每个阶梯平台部分垂直机架角度上的衰减计算能量指标,然后将其与参考值相比较,以确定百分比差异^[18]。在本研究中,笔者发现楔形阶梯静态模块的出口检测器平整度值参数在反应能量偏移上最敏感,与Choi等^[9]的报道结果一致。但是它并不能反映能量是偏高还是偏低,仅仅显示了锥形束形状的变化,如需调整能量,仍需依赖于额外的电离室的测量^[19]。即便如此,作为PDD比值的补充,该参数在监测能量变化上仍然是很有意义的。首先,基本剂量测定可以相对高频率的测量,在监测能量的突然变化上有优势,其次,出口检测器平整度值是考虑整个锥形形状计算出来的,而PDD比值仅测量束的中央部分,锥形形状的变化也会影响剂量的分布。

TOMO的TQA工具实现了信息的综合评估,可更为有效地分析和监测机器的性能及状态,能够在不方便采用电离室的情况下监测HT输出剂量和能量的变化,为HT的质控提供帮助和参考^[20]。

【参考文献】

- [1] MACKIE T R, HOLMES T, SWERDLOFF S, et al. Tomotherapy: a new concept for the delivery of dynamic conformal radiotherapy[J]. Med Phys, 1993, 20(6): 1709-1719.
- [2] WIDESOTT L, PIERELLI A, FIORINO C, et al. Intensity-modulated proton therapy versus helical tomotherapy in nasopharynx cancer: planning comparison and NTCP evaluation[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2008, 72(2): 589-596.
- [3] 徐英杰, 胡志辉, 黄鹏, 等. TomoDirect技术在全脑全脊髓放疗中的应用[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2015, 35(6): 445-448.
XU Y J, HU Z H, HUANG P, et al. Application of TomoDirect for craniospinal irradiation[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2015, 35(6): 445-448.
- [4] 崔迪, 戴相昆, 马林, 等. 鼻咽癌螺旋断层放疗与常规加速器调强放疗的剂量学比较[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2008, 17(3): 169-173.
CUI D, DAI X K, MA L, et al. A dosimetric comparison between helical tomotherapy and linear accelerator-based intensity modulated radiation therapy for nasopharyngeal carcinoma[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2008, 17(3): 169-173.
- [5] 沈奕晨, 王为, 张松方, 等. 乳腺癌螺旋断层放射治疗与调强放射治疗的剂量学研究及临床剂量实测比较[J]. 中国医学物理学杂志, 2018, 35(3): 269-274.
SHEN Y C, WANG W, ZHANG S F, et al. Dosimetry study and measured dose comparison of Tomotherapy and intensity modulated radiotherapy for breast cancer[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2018, 35(3): 269-274.
- [6] BINNY D, MEZZENGA E, LANCASTER C M, et al. Investigating output and energy variations and their relationship to delivery QA results using statistical process control for helical tomotherapy[J]. Phys Med, 2017, 38: 105-110.
- [7] MEZZENGA E, CAGNI E, BOTTI A, et al. Pre-treatment and *in-vivo* dosimetry of Helical Tomotherapy treatment plans using the dosimetry check system[J]. J Instrum, 2014, 9(4): C04039.
- [8] 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.
- [9] CHOI H H, HO J P, YANG B, et al. Correlation between TQA data trends and Tomo HD functional status[J]. J Appl Clin Med Phys, 2014, 15(2): 345-349.
- [10] JERAJ R, MACKIE T R, BALOG J, et al. Radiation characteristics of helical tomotherapy[J]. Med Phys, 2004, 31(2): 396-404.
- [11] YANG B, WONG W K, GENG H, et al. Filmless methods for quality assurance of Tomotherapy using Arc Check[J]. Med Phys, 2017, 44(1): 7-16.
- [12] FENWICK J D, TOMÉ W A, JARADAT H A, et al. Quality assurance of a helical tomotherapy machine[J]. Phys Med Biol, 2004, 49(13): 2933-2953.
- [13] CHEN Q, WESTERLY D, FANG Z, et al. TomoTherapy MLC verification using exit detector data[J]. Med Phys, 2012, 39(1): 143-152.
- [14] DE VONDEL I V, TOURNEL K, VERELLEN D, et al. A diagnostic tool for basic daily quality assurance of a tomotherapy Hi *Art machine[J]. J Appl Clin Med Phys, 2009, 10(4): 2972.
- [15] WOOTEN H O, GODDU S M, RODRIGUEZ V, et al. The use of exit detector sinograms to detect anatomical variations for patients extending beyond the TomoTherapy field of view: a feasibility study[J]. Med Phys, 2012, 39(10): 6407-6419.
- [16] LOBB E C. Performance evaluation of the RITG148+ set of TomoTherapy quality assurance tools using RTQA2 radiochromic film[J]. J Appl Clin Med Phys, 2016, 17(4): 254-267.
- [17] KLEIN E E, HANLEY J, BAYOUTH J, et al. Task Group 142 report: quality assurance of medical accelerators[J]. Med Phys, 2009, 36(9): 4197-4212.
- [18] ALTHOF V, HAAREN P, WESTENDORP R, et al. A quality assurance tool for helical tomotherapy using a step-wedge phantom and the on-board MVCT detector[J]. J Appl Clin Med Phys, 2012, 13(1): 148-163.
- [19] SHIMIZU H, SASAKI K, IWATA M, et al. Rotational output and beam quality evaluations for helical tomotherapy with use of a third-party quality assurance tool[J]. Radiol Phys Technol, 2016, 9(1): 53-59.
- [20] REYNAERT N, DEMOL B, CHAROY M, et al. Clinical implementation of a Monte Carlo based treatment plan QA platform for validation of Cyberknife and Tomotherapy treatments[J]. Phys Med, 2016, 32(10): 1225-1237.

(编辑:薛泽玲)