

· 临床研究 ·

鼓式扫描仪线性特征对放疗验证胶片信息数字化质量的影响

柳 杰¹, 刘 海², 王彩莲¹, 周 娴²¹东南大学附属中大医院肿瘤科, 江苏 南京 210009; ²南京中医药大学附属第81医院放疗科, 江苏 南京 210002

[摘要] 目的:通过实验测试鼓式扫描仪(rotating drum image scanner)线性特征的改变对验证胶片信息数字化质量以及治疗计划验证的影响,为临床正确使用扫描设备、准确获取剂量数据以及精确评估治疗计划提供质量保证。方法:使用黑度校准胶片对鼓式扫描仪的线性进行测试,通过调整相关参数,观察线性特征的改变,随机选取10例螺旋断层调强放射治疗计划患者,测试研究扫描仪不同线性状态下的扫描质量以及对治疗计划验证的影响。结果:拟合优度检验,6 ms曝光模型与8 ms曝光模型调整决定系数分别为 $R^2_{6ms, adjusted}=0.999$ 、 $R^2_{8ms, adjusted}=0.997$;相对于6 ms曝光模型,8 ms曝光模型通过率降低约12%[(96.27±2.15)% vs. (84.34±4.18)%, $t=15.22$, $P<0.001$]。结论:光密度值的低密度区域随线性特征的改变产生较大变化。在胶片信息数字化过程中,应正确设置各项参数,定期检测维护扫描仪线性及其他指标,为放射治疗提供质量保证。

[关键词] 鼓式扫描仪;线性;光学密度;调强放疗;质量保证

[中图分类号] R814.3

[文献标志码] A

[文章编号] 1007-4368(2020)11-1692-05

doi: 10.7655/NYDXBNS20201122

放疗计划验证是调强放射治疗(intensity modulated radiation therapy, IMRT)中不可或缺的环节,直接或间接地承担着计划系统计算、治疗设备精度、空间位置以及辐射剂量的验证任务。胶片因其固有的剂量学特性及空间分辨率等优势被广泛地运用于调强放疗验证环节中^[1-2],尤其是自显影胶片的使用,排除了暗室显影环节等因素的干扰^[3],提高了胶片信息数字化的可靠性和准确度^[4]。胶片信息数字化过程受诸多因素的影响,例如胶片的生产批次和保存环境、胶片放置的方向、胶片显影稳定性、扫描参数设置及扫描方法选取等^[5]。在临床应用中,使用胶片剂量仪对IMRT剂量验证的结果进行评估,常用的指标有 γ (γ value)因子通过率、DTA(distance to agreement)、NAT(normalization agreement test)等。对于 γ 因子通过率,一般要求标准: $\Delta DTA=3$ mm, $\Delta DD=3\%$ ^[6-7],在如此严格的要求下,任何环节出现一点点误差,都会影响最终的评估结果并给治疗计划的通过与否带来误判,影响患者的正常治疗。因此,需要对胶片剂量仪验证流程的每个环节进行严格质量控制。本研究针对鼓式扫描仪线性特征进行实验,旨在比较分析不同曝光时间对光密度值的影响,同时比较了用两种条件建立的扫描值-光密度值标准曲线分析胶片计划验证剂量 γ 通过率以及等剂量曲线。

1 对象和方法

1.1 对象

随机选取10例行螺旋断层IMRT计划的患者,治疗计划物理参数(治疗准直宽度、螺距比及调制因子^[8-10])各不相同,治疗时间在2017年9—12月,其中鼻咽癌治疗计划3例,肺癌治疗计划2例,脑转移瘤治疗计划2例,前列腺癌治疗计划2例,转移性肝脏肿瘤治疗计划1例。本研究经医院伦理委员会批准,所有患者知情同意。

使用仪器:HI-ART型螺旋断层放疗系统、LAP激光定位灯、Philips Brilliance CT模拟定位机、Gaf-Chromic EBT³自显影胶片、Tomo Phantom验证模体、ArcCHECK半导体矩阵、电离室AISL(Standing Imaging, 美国)、Vidar DosimetryPro Advantage型鼓式扫描仪等。

1.2 方法

1.2.1 DQA(delivery quality assurance)计划制定

患者按预定体位行CT扫描,获取的影像经DICOM接口传至IMRT计划系统Tomo PS,按照病情资料勾画靶区及正常组织并制定治疗计划,在DQA Station中调用DQA数字矩阵,将治疗计划移植到矩阵上,用红激光灯定位矩阵,经过计算得到可以执行的DQA数字计划,选取感兴趣点作为点剂量验证数

据,选取感兴趣层面作为胶片平面剂量验证数据。

1.2.2 DQA计划的执行

在IMRT操作工作站上选取验证计划,使用红激光灯对Tomo Phantom模体进行摆位,将Gaf Chromic EBT³自显影胶片夹放于模体两半球中间,利用绿激光灯标记好4点位置以及胶片的正方向,连接参考电离室,执行每例患者的验证计划出束照射,在用胶片进行剂量验证的同时用参考电离室监测靶区感兴趣点的剂量,使得点剂量的偏差 $\leq 2\%$ 。相同条件下,用ArcCHECK半导体矩阵进行以上相同患者DQA计划的剂量验证。

1.2.3 胶片刻度

EBT³自显影胶片在射线照射下会形成相应的灰度,灰度值和射线强度之间有对应关系。设定恒定剂量率,标准大小射野(5 cm \times 5 cm),设定不同出束时间,再测量相应的电荷量并转换成相应的剂量。

1.2.4 胶片扫描条件及扫描仪线性测试

本研究使用Film Analyzer软件驱动Vidar Dosimetry Pro Advantage扫描胶片。胶片扫描仪使用红色LED光源,波长接近Gaf Chromic EBT³胶片最大吸收峰,最大可扫描尺寸为35.6 cm \times 43.2 cm。

设置扫描条件:扫描分辨率72 dpi(dots per inch),深度位数为16 bit,预热时间为30 min。计划验证胶片扫描需在透光度趋于稳定时(8~12 h后)进行^[11-12]。

设定Vidar鼓式扫描仪LED灯扫描曝光时间参数为变量,其他参数不变。本研究中曝光时间参数设定为6 ms及8 ms,在两档参数下分别扫描黑度校准胶片与计划验证胶片,用获取的校准胶片图像做扫描仪线性测试。

1.2.5 DQA测试

将计划验证胶片图像导入TomoPS的DQA Station,与验证计划的计算剂量进行DQA测试。利用SNC Patient软件收集ArcCHECK半导体矩阵测量的数据,与验证计划的计算剂量进行DQA测试。

1.2.6 数据分析

光学密度用来定量描述胶片黑的程度,它定义为光密度值(optical density, OD)= $\lg(I_0/I_t)$,其中 I_0 表示入射光强度, I_t 表示光线透过强度。将扫描仪线性测试数据保存为校准曲线文档,以OD为横坐标、扫描值(scan value, SV)为纵坐标建立坐标系,观察其线性表现,使用统计学方法分析其线性;用TOMO系统自带软件绘制出EBT³胶片的剂量响应

曲线;采用 γ 分析法以及等剂量曲线等剂量学比较方法对胶片数据与计算剂量进行比较分析;将DQA计划的RT-PLAN和RT-DOSE两个文件用DICOM传输工具导入到SNC Patient软件中^[13],设置 γ 分析通过标准(3 mm/3%),将ArcCHECK测量结果与计算结果进行对比分析得到 γ 通过率。

1.3 统计学方法

使用SPSS 19.0统计软件对各档参数下各组数据作处理,结果以均数 \pm 标准差($\bar{x} \pm s$)表示,采用线性回归分析建立回归方程,分析残差及拟合优度检验,比较采用配对 t 检验,以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 扫描仪线性的比较

以OD为横坐标、SV为纵坐标的校准曲线示意图见图1。观测可见,8 ms曝光参数下,在OD < 0.35 、SV $< 1\ 000$ 情况下,校准曲线失去原有线性;6 ms曝光参数下线性保持较好,延长线趋势指向原点。

使用SPSS软件对两组数据做线性回归分析,发现随着OD增加,SV不断增大,随OD值的变化呈正相关线性关系,建立线性回归方程,分别得到: $y=16\ 138.25x+466.81$ (6 ms曝光)和 $y=15\ 408.30x-2\ 900.76$ (8 ms曝光),方程显示6 ms曝光模型的线性趋势更趋向于坐标原点。残差统计分析,Residual Minimum(6 ms vs. 8 ms): -610.88 vs. $-1\ 191.34$; Residual Maximum(6 ms vs. 8 ms): 353.31 vs. $3\ 075.34$; Residual SD(6 ms vs. 8 ms): 284.20 vs. 970.84 ; Std. Residual最大绝对值(6 ms vs. 8 ms): 2.09 vs. 3.07 ,表明相比8 ms曝光模型,6 ms曝光模型的数据更符合正态分布,且8 ms曝光模型的标准残差最大绝对值3.07大于默认值3,存在奇异值。模型拟合优度检验,6 ms曝光模型与8 ms曝光模型复相关系数分别为 $r_{6ms}=0.999$ 、 $r_{8ms}=0.998$,决定系数分别为 $R^2_{6ms}=0.999$ 、 $R^2_{8ms}=0.997$,调整决定系数分别为 $R^2_{6ms, adjusted}=0.999$ 、 $R^2_{8ms, adjusted}=0.997$,决定系数 $R^2_{6ms} > R^2_{8ms}$,表明6 ms曝光模型的直线拟合优于8 ms曝光模型。

2.2 剂量学比较

2.2.1 等剂量曲线

等剂量曲线比较结果见图2。剂量归一至100%等剂量曲线为2 Gy时,8 ms曝光模型在相对高剂量区域内(>1 Gy, 50%等剂量曲线),TPS计算曲线与DQA实测曲线吻合较好,在相对低剂量区域(<0.666 Gy, 33.3%等剂量曲线),TPS计算曲线与

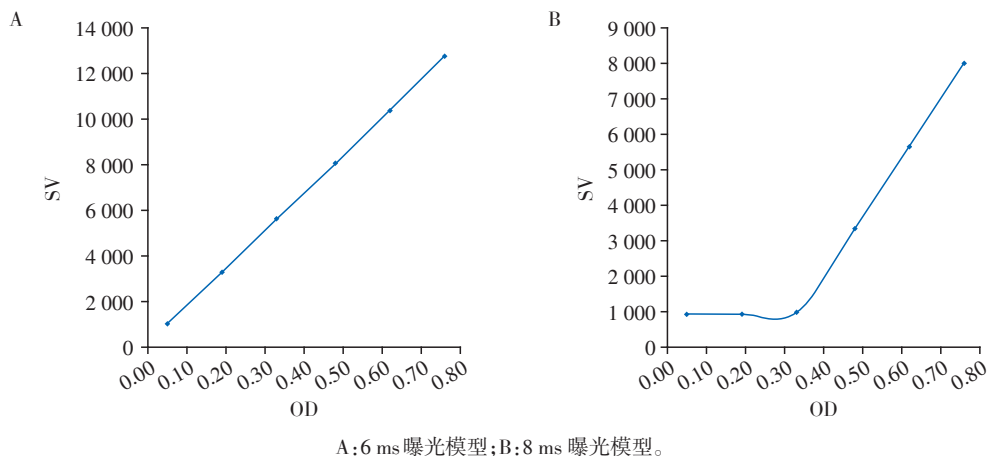


图1 线性比较

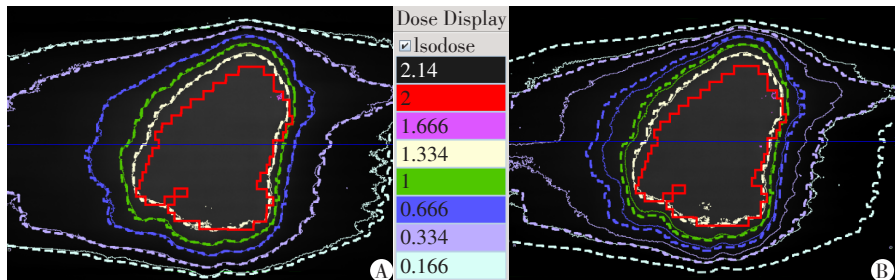


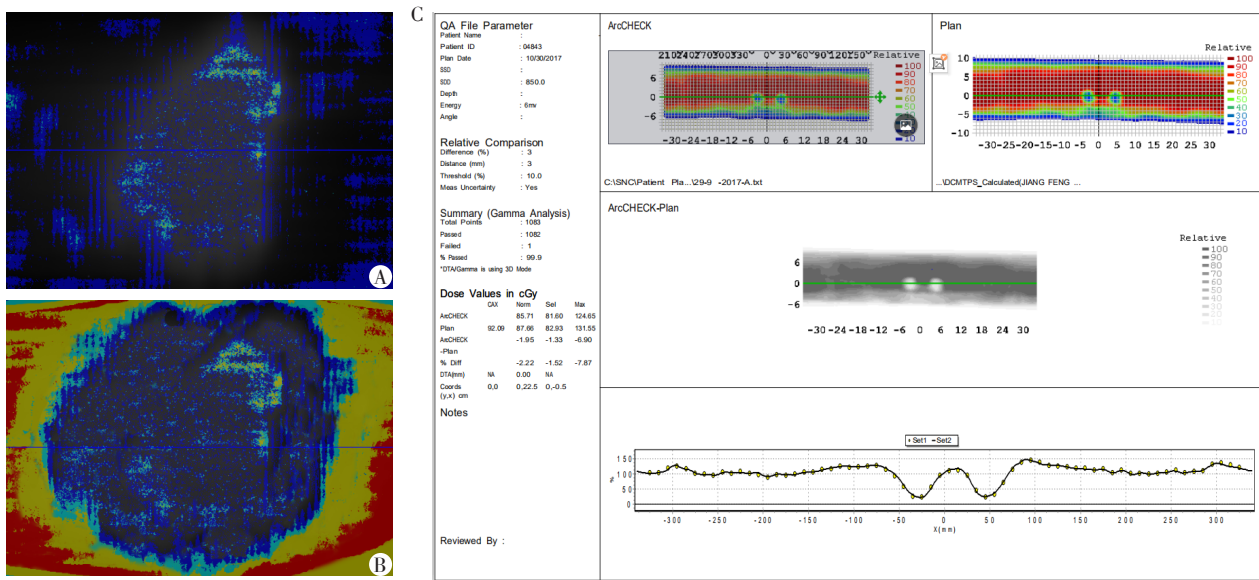
图2 等剂量曲线比较

DQA 实测曲线有较明显分离。6 ms 曝光模型无论高、低等剂量曲线,两者都显示出较高的一致性。

2.2.2 计划验证 γ 分析的比较

图3为计划验证 γ 分布比较示意图,黑、蓝及绿色等冷色调区域表示剂量误差在允许范围内,黄、

红色表示剂量误差超过设定允许范围。计划验证通过率详值见表1。相对于6 ms 曝光模型,8 ms 曝光模型通过率降低约 12% [$(96.27 \pm 2.15)\%$ vs. $(84.34 \pm 4.18)\%$, $t=15.22$, $P < 0.001$], ArcCHECK 通过率 $(99.75 \pm 0.26)\%$, 与6 ms 曝光模型更为接近。



A: 6 ms 曝光模型; B: 8 ms 曝光模型; C: ArcCHECK 半导体矩阵剂量验证分析图。

图3 γ 分布比较

表1 10例验证计划的 γ 分析验证通过率 (%)

计划序号	6 ms 曝光	8 ms 曝光	ArcCHECK
1	97.80	85.92	99.5
2	94.25	81.44	99.8
3	98.02	90.05	100.0
4	94.13	79.26	99.3
5	97.28	85.50	100.0
6	98.84	91.22	99.4
7	96.17	85.20	99.9
8	92.01	78.36	100.0
9	96.60	83.10	99.5
10	97.58	83.36	99.8
平均值	96.27±2.15	84.34±4.18	99.75±0.26

3 讨 论

当IMRT飞速发展之际,放疗设备的各项物理性能及参数须达到更高精度才能保证放射肿瘤学的基本原则,对相关设备的质量提出了更高要求^[14-15],而严格的个体化治疗计划剂量学验证作为放射治疗的质控环节,具有举足轻重的作用^[16]。使用ArcCHECK 半导体矩阵进行剂量验证摆位方便,通过分析软件能快速得到 γ 通过率,相对使用胶片验证剂量的方法节省了时间,但是由于受矩阵间距的制约,其剂量验证精度不如胶片,特别是在剂量梯度变化较大区域或者低剂量区,需要用胶片去进行复核验证。采用胶片验证法时,数据分析比较的结果较大程度上受到胶片数字化过程的影响,除人为因素外,胶片扫描仪的工作性能是决定分析结果能否客观体现验证质量的重要因素^[17]。

Vidar 扫描仪主要由光源、光漫射平板、胶片传动装置、光线准直系统、反光镜、聚焦透镜、图像传感器、模数转换器、图像保存和处理单元、计算机接口等部分组成。随着使用时间的推移,扫描仪机械精度逐步下降,电气元件性能指标也逐步偏离其基准值。前者主要体现于扫描空间精度上,后者则体现于扫描线性及均匀性上,两者正常工作是扫描质量的重要保证。当扫描仪光源及图像传感器性能偏离至一定程度,扫描仪呈现出线性改变,此时需要对扫描仪的照明曝光参数进行调整补偿以恢复至正常线性范围。本研究通过设置扫描仪照明曝光参数模拟相关部件的衰变老化,在对10例Tomotherapy螺旋断层放疗计划的验证过程中,通过分析鼓式扫描仪的线性特征,并结合等剂量曲线以及 γ 分析等剂量学分析,发现扫描仪线性变化可导致较大

的验证剂量误差。线性特征变化主要表现为:8 ms曝光条件下低OD值(本研究中OD<0.35)区域彻底失去线性,而OD>0.35区域虽保留线性响应,但相较于6 ms曝光条件,偏差呈现非等比例改变。实验中所用EBT³胶片本底OD值经测试为0.3~0.4(依胶片批次、扫描仪设置略有浮动),8 ms曝光条件下胶片本底OD值部分区域线性响应不佳。在计划验证环节中表现为:①胶片测量绝对剂量相对于计划计算绝对剂量的偏差逐步增大,需对测量剂量重新归一后才能将两者的离轴剂量曲线并拢。此现象并非储存不当导致胶片(同批次)性能改变,而是胶片刻度校准曲线在扫描仪当前线性下出现了较大误差。②配准高、低剂量区时顾此失彼,高/低剂量区对准后低/高剂量区产生偏差,并且呈现出越往剂量两端(高、低)偏差越大的趋势。分析原因,是由于线性变化伴随线性方程式斜率的改变,偏差表现为非等比例改变。③上述情况临床上表现为系统误差,即验证对象群体而非随机出现。出现以上情况,应及时检测扫描仪线性,更改曝光参数,使之恢复较好的线性响应,在此基础上重新刻度胶片校准曲线。

扫描仪经使用后,各项性能会有所改变,变化的时间和程度易受使用频率、操作方法、元器件质量以及工作环境等因素的影响。验证胶片数字化过程中,工作人员较关注胶片储存条件、胶片工作方向、扫描参数等因素,而对扫描仪性能状态往往有所疏漏,这可能导致最终的验证数据产生系统误差^[18-19],为此工作人员需付出时间与精力分析排查,对临床工作带来较大干扰。针对扫描仪线性,在日常质量控制上,对较新且工作稳定的扫描仪推荐检测频率为每半年检测,使用年久或稳定性下降的建议每季度检测以维护扫描仪线性,同时注意观察扫描均匀性及几何畸变等其他指标。使用过程中,应注意特殊部件的防尘与维护,环境条件较恶劣的单位可使用防尘罩,长时间不用应及时关闭电源以降低扫描仪光源和图像传感器等部件的损耗老化,维护设备的正常性能,为放射治疗提供有效的质量保证。

[参考文献]

[1] 胡逸民. 肿瘤放射物理学[M]. 北京:原子能出版社, 1999:89-93
[2] ROBAR J L, CLARK B G. A practical technique for verification of three-dimensional conformal dose distributions in stereotactic radiosurgery[J]. Med Phys, 2000, 27(5): 978-987
[3] 徐寿平, 邓小武, 戴相昆, 等. 螺旋断层放疗系统调强放

- 疗验证[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2008, 17(5): 395-397
- [4] AZAM N R, CHARLES R B, BERT M C, et al. Radiochromic film dosimetry: recommendations of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 55[J]. Med Phys, 1998, 25(11): 2093-2115
- [5] 刘 海, 杭霞瑜, 李益坤, 等. OmniPro I' mRT 分析软件与平板式扫描仪在螺旋断层放疗计划验证中的应用[J]. 中国医疗设备, 2014, 29(12): 112-114, 118
- [6] MACKIE T R, HOLMES T, SWERDLOFF S, et al. Tomotherapy: a new concept for the delivery of conformal radiotherapy[J]. Med Phys, 1993, 20(6): 1709-1719
- [7] SHEPARD D M, OLIVERA G H, RECKWERDT P J, et al. Iterative approaches to dose optimization in tomotherapy[J]. Phys Med Biol, 2000, 45(1): 69-90
- [8] 文 婷, 黎 静, 张晋建, 等. 螺旋断层放疗的日常质量控制与质量保证[J]. 中国医疗设备, 2013, 28(7): 50-52
- [9] SHIMA K, TATEOKA K, SAITOH Y, et al. Analysis of post-exposure density growth in radiochromic film with respect to the radiation dose[J]. J Radiat Res, 2012, 53(2): 301-305
- [10] CASANOVA BORCA V, PASQUINO M, RUSSO G, et al. Dosimetric characterization and use of GAFCHROMIC EBT3 film for IMRT dose verification[J]. J Appl Clin Med Phys, 2013, 14(2): 4111
- [11] LOW D A, DEMPSEY J F. Evaluation of the gamma dose distribution comparison method[J]. Med Phys, 2003, 30(9): 2455-2464
- [12] NELMS B E, SIMON J A. A survey on planar IMRT QA analysis[J]. J Appl Clin Med Phys, 2007, 8(3): 2448
- [13] 吴伟章, 朱夫海, 王 勇, 等. 旋转照射剂量测量仪(ArcCHECK)在螺旋断层放疗计划剂量验证中的应用[J]. 肿瘤预防与治疗, 2014, 27(1): 20-23
- [14] 刘 海, 李益坤, 杭霞瑜, 等. 螺旋断层放疗系统物理性能的验收测试与质量保证[J]. 医疗卫生装备, 2014, 35(5): 97-102
- [15] 张宗恺, 王雅棣. 宫颈癌螺旋断层放疗中膀胱变化对自身及靶区的影响[J]. 南京医科大学学报(自然科学版), 2018, 38(3): 367-372
- [16] CROWE S B, KAIRN T, MIDDLEBROOK N, et al. Examination of the properties of IMRT and VMAT beams and evaluation against pre-treatment quality assurance results[J]. Phys Med Biol, 2015, 60(6): 2587-2601
- [17] LOW D A, DEMPSEY J F, MARKMAN J, et al. Toward automated quality assurance for intensity- modulated radiation therapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2002, 53(2): 443-452
- [18] 黄 栋, 田晓云, 刘 海, 等. 鼻咽癌螺旋断层放疗 MegaVoltage CT 引导下摆位误差分析[J]. 中国医学物理学杂志, 2016, 33(2): 204-207
- [19] 陈小君, 阳艳平, 甘庆权, 等. 放射治疗的误差分析及控制体会[J]. 广州医药, 2014, 45(1): 62-64
- [收稿日期] 2019-09-18

(上接第1680页)

- Enriched environment inhibits breast cancer progression in obese models with intact leptin signaling[J]. Endocr Relat Cancer, 2019, 26(5): 483-495
- [32] ABUZZAHAB M J, ROTH C L, SHOEMAKER A H. Hypothalamic obesity: prologue and promise[J]. Horm Res Paediatr, 2019, 91(2): 128-136
- [33] AMJAD S, BAIG M, ZAHID N, et al. Association between leptin, obesity, hormonal interplay and male infertility[J]. Andrologia, 2019, 51(1): e13147
- [34] LIU Y, YE W B, CHEN Q, et al. Resistance exercise intensity is correlated with attenuation of HbA1c and insulin in patients with type 2 diabetes: a systematic review and meta-analysis[J]. Int J Environ Res Public Health, 2019, 16(1): 140
- [收稿日期] 2020-04-22