

自显影胶片剂量测量系统的测量性能

张辉, 张辉, 王平全, 杨竣凯, 李凡, 张亚楠
中国计量科学研究院, 北京 100029

【摘要】目的:通过黑化时间、剂量测量范围、剂量分辨率和剂量响应不均匀性等主要剂量测量性能的研究测试,确定基于EBT3系列胶片的自显影胶片剂量测量系统的适用条件和胶片读取时间。**方法:**对3张胶片分别授予不同的剂量,在辐照后不同时刻读取自显影胶片的光密度值,分析并确定黑化时间对剂量测量结果的影响及不同授予剂量对黑化时间的影响;通过吸收剂量-光密度值曲线确定自显影胶片剂量测量范围;通过两组剂量相差0.01 Gy的平均光密度值获得自显影胶片剂量测量系统的剂量测量分辨率;通过辐照整张胶片和裁剪胶片的方式评价自显影胶片的剂量响应不均匀性。**结果:**相对于辐照终止时刻的光密度值,4 h的光密度值变化分别为1.69%(2 Gy)、2.53%(4 Gy)和2.13%(8 Gy),24 h的光密度值变化分别为2.91%(2 Gy)、3.31%(4 Gy)和3.20%(8 Gy),48 h的光密度值变化分别为2.91%(2 Gy)、3.31%(4 Gy)和3.96%(8 Gy)。0.1~10.0 Gy内自显影胶片剂量测量系统给出的光密度值与水吸收剂量呈线性关系,10.0~30.0 Gy内自显影胶片剂量测量系统的光密度值与水吸收剂量呈非线性关系,但仍具有一一对应关系。辐照剂量相差0.01 Gy的两组光密度值平均值相差0.004;整张胶片方式不均匀性测量结果为2.2%,裁剪胶片方式不均匀性测量结果为2.8%。**结论:**辐照后24 h可作为自显影胶片EBT3的读取时刻,且授予剂量与黑化时间无关;自显影胶片剂量测量系统在0.1~10.0 Gy内可用于单点剂量测量和剂量分布测量,10.0~30.0 Gy内可用于单点剂量测量。自显影胶片剂量测量系统剂量测量分辨率好于0.01 Gy。为避免散射射线影响,建议采用裁剪胶片的方式测试胶片剂量响应的不均匀性。

【关键词】自显影胶片;黑化时间;剂量测量范围;剂量测量分辨率;剂量响应不均匀性

【中图分类号】R811.1;TH89

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2024)05-0541-07

Measurement performance of Gafchromic film dosimeter

ZHANG Hui, ZHANG Hui, WANG Pingquan, YANG Junkai, LI Fan, ZHANG Ya'nan
National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

Abstract: Objective To determine the applicable conditions and the film reading time of Gafchromic EBT3 film dosimeter through the research and test of the measurement performance such as blackening time, dosimetry range, dosimetry resolution and dose response non-uniformity. **Methods** Three Gafchromic films were exposure to different doses, and the optical densities were read at different moments after irradiation for analyzing and confirming the effects of blackening time on dose measurement and different doses on blackening time. The absorbed dose-optical density curve was used to determine Gafchromic film dosimetry range. The Gafchromic film dosimetry resolution was obtained by calculating the average optical densities of two groups with a dose difference of 0.01 Gy. The dose response non-uniformity of Gafchromic film was evaluated by irradiating the whole film and the cutting film. **Results** Relative to the optical density at the termination moment of irradiation, the optical density changes at 4 h were 1.69% (2 Gy), 2.53% (4 Gy) and 2.13% (8 Gy); the changes at 24 h were 2.91% (2 Gy), 3.31% (4 Gy) and 3.20% (8 Gy); and the changes at 48 h were 2.91% (2 Gy), 3.31% (4 Gy) and 3.96% (8 Gy). The optical density given by Gafchromic film dosimeter within 0.1 to 10.0 Gy had a linear relationship with the absorbed dose, while the optical density of Gafchromic film dosimeter within 10.0 to 30.0 Gy had a nonlinear relationship with the absorbed dose, but there was still a one-to-one correspondence. The difference of the average optical densities of two groups was 0.004 when the inter-group dose difference was 0.01 Gy. The non-uniformity was 2.2% for the whole film and 2.8% for the cutting film. **Conclusion** Gafchromic EBT3 film reading time can be set at 24 h after irradiation, and the dose is independent of blackening time. Gafchromic film dosimeter can be used for point dosimetry and dose distribution

【收稿日期】2024-01-06

【基金项目】中国计量科学研究院重点领域基本业务费项目(AKYZD1908-2)

【作者简介】张辉, 硕士研究生, 研究方向: 辐射剂量测量与计量, E-mail: zhanghui8882022@163.com

【通信作者】张辉, 硕士生导师, 研究方向: 电离辐射计量, E-mail: zhanghui@nim.ac.cn

measurement within 0.1 to 10.0 Gy, and point dosimetry within 10.0 to 30.0 Gy. The dosimetry resolution of the Gafchromic film dosimeter is better than 0.01 Gy. To avoid the effect of scattered rays, the cutting film is recommended for testing dose response non-uniformity.

Keywords: Gafchromic film; blackening time; dosimetry range; dosimetry resolution; dose response non-uniformity

前言

准确测量授予肿瘤区域的剂量及病灶区域的剂量分布与放射治疗效果直接相关,治疗前需要进行绝对剂量测量及其它质量保证措施^[1]。随着放射治疗技术和治疗计划剂量验证设备的进展,验证方式逐渐从二维发展到三维,胶片剂量计因具有空间分辨率高的固有优势在治疗前的计划剂量验证中扮演着重要角色^[2],其中自显影胶片剂量计具有组织等效性好^[3]、能量依赖性小^[4]、免冲洗^[5]、全色显影速度快^[6],可一次获得二维剂量分布结果以及便于长期保存和分析等优势^[7],简化了传统银盐胶片的剂量验证流程,提高工作效率^[8-9],与配套的扫描设备共同构成自显影胶片剂量测量系统(以下简称胶片测量系统),成为剂量分布测量一种实用工具,在放射治疗计划验证及质量保证方面得到广泛应用。

目前已有针对自显影胶片的剂量准确性、重复性以及剂量线性的研究^[10-11],但研究局限于EBT2系列胶片,同时对其剂量测量性能的研究并不全面。作为剂量测量系统的探测器,自显影胶片的剂量测量性能主要包括黑化时间、剂量测量范围、剂量测量分辨率和剂量响应不均匀性等,通过对自显影胶片上述测量性能开展相关研究,能确定自显影胶片的适用条件和胶片读取时间,保证临床应用中质量控制结果的准确性。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 自显影胶片 自显影胶片的外照射治疗(External Beam Therapy, EBT)系列胶片被认为是目前适用于调强放射治疗(Intensity-Modulated Radiotherapy, IMRT)剂量验证的剂量计^[7],并成为放射治疗质控的重要手段之一。本实验采用EBT系列胶片的第三代系列胶片EBT3,该系列胶片通过在透明胶片基一侧涂感光材料而制成,用于记录辐射剂量信息,自显影胶片通过活性层的不饱和烃微晶粒在受到电离辐射时会发生聚合作用而显影测量吸收剂量,显影颜色深度与吸收剂量大小成正比。可以通过测量自显影胶片的光密度值测量吸收剂量^[12],表达式为:

$$OD = \lg \frac{I_0}{I} \quad (1)$$

其中,OD为光密度值; I_0 是经过自显影胶片前的光的强度; I 是经过自显影胶片后的光的强度。由于 $\frac{I_0}{I}$ 与吸收剂量呈指数关系,因此光密度值与吸收剂量呈线性关系,为自显影胶片广泛应用于剂量测量奠定了可靠的理论基础^[13]。相比EBT2系列胶片,EBT3系列胶片优势明显,例如EBT3系列胶片(以下简称胶片)具有对称的两层塑料膜结构,塑料膜外表面加入非常小的硅颗粒,使胶片层和平板扫描仪玻璃扫描窗之间形成约为可见光波长10倍的距离,有效阻止平板扫描仪扫描时牛顿环效应的产生,同时对称结构也可使胶片在扫描过程中无需区分正反面^[14],其结构见图1。

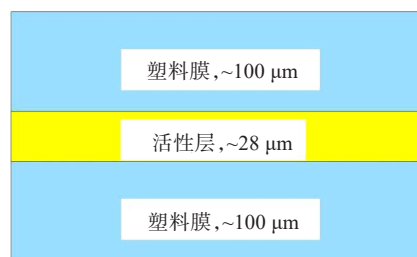


图1 EBT3系列胶片结构图

Figure 1 Structure of Gafchromic EBT3 film

1.1.2 医科达 Synergy 电子直线加速器 医科达 Synergy 电子直线加速器是一款用于治疗肿瘤的放射治疗设备,采用行波加速,在加速器终端用引出窗将电子束引出加速管直接用于治疗,或轰击加速器终端金属靶,将电子束转换为光子束后用于治疗,辐射野范围为3 cm×3 cm~40 cm×40 cm,剂量率范围为50~800 MU/min,光子束能量范围为6~25 MV,电子束能量为4~22 MeV。本研究利用中国计量科学研究院装备的该型加速器为实验提供参考辐射。

1.1.3 平板扫描仪 Epson11000XL 平板扫描仪是RGB影像扫描仪,可以分别通过红、绿、蓝这3通道同时提取胶片数据,显示由于胶片厚度的微小不均匀性产生的误差。作为透射式扫描仪,可以正反两面扫描胶片而不影响读取结果,同时该扫描仪也是EBT系列胶片厂家美国Ashland公司推荐用于EBT系列胶片扫描的设备,配合Ashland公司开发的Film

QA Pro 专用处理软件读取并分析胶片辐照后的剂量信息。

1.2 实验条件和胶片读取条件

根据放射治疗剂量刻度的要求,源皮距设置为100 cm,并根据放射治疗常用的光子束能量,光子能量设定为6 MV。胶片水平居中按同一方向放置于固体水模体内10 cm深度处,置于等中心位置,胶片实验设置见图2,为消除背散射对测量结果的影响,胶片下方的固体水模厚度为7 cm。扫描前扫描仪应经过至少2 h的预热,使光源性能达到稳定。为保证剂量信息读取过程中胶片光密度值不被软件预处理而产生偏差,设置扫描参数时,需要关闭扫描软件的图像增强功能,选择72 dpi的扫描精度,保存为48位RGB彩色tiff格式^[7];同时,为提高胶片的灵敏度,分析时使用红色通道获取胶片信息^[15]。

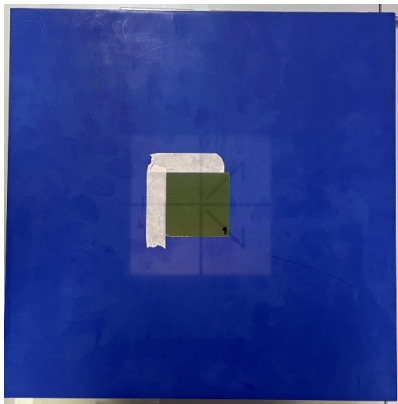


图2 胶片实验设置
Figure 2 Experimental setting of the film

1.3 黑化时间

EBT3系列胶片经X射线或紫外线照射后,颜色由浅黄色转变为黑色,与其它自显影胶片一样,EBT3系列胶片具有持续进行的黑化过程^[16-17],胶片的光密度值随时间发生变化。为保证胶片读取结果的准确性和可比性,需要确定胶片辐照后至光密度值稳定的时间。作为胶片重要的剂量测量性能之一,并为了保证其它性能研究的准确性,首先开展黑化时间的研究测试,同时为研究吸收剂量与黑化时间的关系,在放射治疗常用剂量范围内选择2、4和8 Gy作为授予胶片的水吸收剂量。根据加速器的校准要求,辐射野设置为10 cm×10 cm,胶片裁剪为10 cm×10 cm,共3张,并在辐照后0、4、8、12、16、20、24、30、36、42和48 h等时刻分别读取3张胶片的光密度值,感兴趣区(Region of Interest, ROI)为影像中心1 cm×1 cm的区域^[18],根据胶片光密度值变化情况确定最佳读取

时刻,同时将结果作为后续实验读取胶片的时间。

1.4 剂量测量范围

剂量测量范围是决定胶片适用条件的重要测量性能之一。胶片接受的剂量通过光密度值反映,通过吸收剂量与光密度值的校准曲线获得准确的剂量结果^[19]。放射治疗中胶片主要用于剂量分布测量,为准确评价辐射野范围,在辐射野测量中胶片的剂量响应应与被测辐射野的剂量范围呈线性关系,同时根据放射治疗单次剂量增加的趋势,为确定胶片在较高剂量条件下的剂量响应,在胶片说明书推荐的0.2~10.0 Gy基础上,本研究将授予剂量的上限设定为30 Gy,辐射野设置为10 cm×10 cm,胶片裁剪为5 cm×5 cm,授予胶片的水吸收剂量分别为0、0.1、0.3、0.5、1.0、2.0、4.0、8.0、10.0、15.0、20.0和30.0 Gy。在胶片光密度值稳定后(以黑化时间的实验结果作为光密度值稳定时间)读取胶片中心1 cm×1 cm的ROI的光密度值,确定胶片剂量测量范围。

1.5 剂量测量分辨率

剂量测量分辨率指胶片最小可测量的吸收剂量,是胶片剂量测量系统的一项重要测量性能,该性能是临床应用中保证靶区与周围正常组织之间界限明确的前提。实验前将胶片裁剪成5 cm×5 cm,共10张,并分为A、B两组(各5张胶片),辐射野设置为10 cm×10 cm,由于实验用加速器的剂量刻度结果为0.759 Gy/100 MU,并根据放射治疗对半影区域的评价要求,A组胶片接受的水吸收剂量为1 Gy,B组接受的水吸收剂量为1.01 Gy。根据黑化时间的结果,辐照后在胶片光密度值达到稳定状态时读取胶片中心位置1 cm×1 cm的ROI光密度值,确定胶片的剂量分辨率。

1.6 剂量响应不均匀性

作为剂量分布测量的手段之一,胶片的剂量响应不均匀性(胶片不同区域响应的相对变化)是剂量分布测量结果可靠的保证和前提,是胶片剂量测量的重要性能之一。为评价胶片的不均匀性,根据胶片的尺寸和辐射野的半影参数,辐射野设置为3 cm×3 cm,将整张胶片分12个区域,尽可能覆盖胶片的有效面积,依次进行照射,根据Hartmann等^[20]研究,胶片的相对不均匀性与吸收剂量没有相关性,因此水吸收剂量设定为2 Gy,实际照射结果见图3。辐照后在胶片光密度值达到稳定状态时读取胶片不同区域中心1 cm×1 cm的ROI的光密度值,确定胶片的不均匀性。考虑到整张胶片依次辐照时可能存在散射线的影响,为确定散射线对不均匀性结果的影响,将整张胶片裁剪为12张尺寸均为5 cm×5 cm的胶片,在其它条件不变的情况下,分别辐照12张胶片。



图3 整张胶片测试不均匀性实际照射结果
Figure 3 Actual irradiation results for testing non-uniformity across the whole film

2 结果

2.1 黑化时间

辐照后胶片的光密度值随时间增加存在上升趋势,以辐照后 0 h 的光密度值为参考,4 h 时相对变化分别为 1.69%(2 Gy)、2.53%(4 Gy)和 2.13%(8 Gy); 24 h 时相对变化为 2.91%(2 Gy)、3.31%(4 Gy)和 3.20%(8 Gy), 48 h 时相对变化为 2.91%(2 Gy)、3.31%(4 Gy)和 3.96%(8 Gy)。尽管相对于辐照后 24 h 的结果,授予水吸收剂量为 8 Gy 的胶片在 48 h

后的光密度值相对增加了 0.24%,但考虑读取区域选取和数据处理软件算法的影响,该变化仍在允许范围内,结果显示随时间增加,胶片黑化过程趋缓,光密度值逐渐稳定(图 4)。

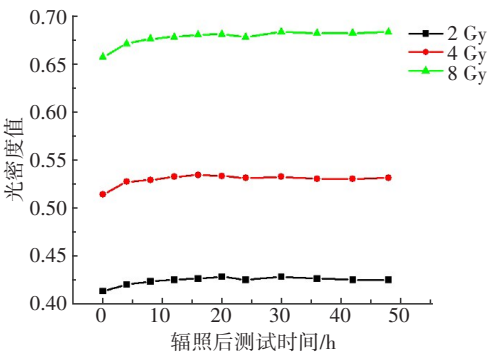


图4 胶片光密度值随时间的变化
Figure 4 Change of the optical density of the film with time

光密度值变化与不同吸收剂量关系的结果见表 1,其中光密度值变化为辐照后测试时间 t 得到的光密度值与 t 之后的 4 h 或 6 h 测试的光密度值之差。结果表明吸收剂量不同时,随黑化时间增加光密度值的变化趋势相同,即黑化时间与辐照剂量无关。

表1 不同辐照剂量,不同黑化时间间隔下光密度值变化
Table 1 Changes of optical density under different radiation doses and different blackening time intervals

辐照后测试时间/h	时间间隔/h	光密度值变化		
		吸收剂量 2 Gy	吸收剂量 4 Gy	吸收剂量 8 Gy
0	4	0.007	0.013	0.014
4	4	0.003	0.002	0.005
8	4	0.002	0.002	0.002
12	4	0.001	0.003	0.002
16	4	0.002	0.001	0.001
20	4	0.003	0.002	0.003
24	4	0.003	0.001	0.005
30	6	0.002	0.002	0.001
36	6	0.001	0.000	0.000
42	6	0.000	0.001	0.001

2.2 剂量测量范围

根据辐照后 24 h 的胶片光密度值,获得了不同剂量范围内吸收剂量与光密度值的感光曲线(图 5~7)。

在 0.1~1.0 Gy 内线性拟合曲线的 $R^2=0.993$,在 1.0~10.0 Gy 内线性拟合曲线的 $R^2=0.994$,结果表明在 1.0~10.0 Gy 和 0.1~1.0 Gy 内的吸收剂量和胶片光密度值不仅具有较好的拟合结果^[21],同时在 0.1~10.0 Gy

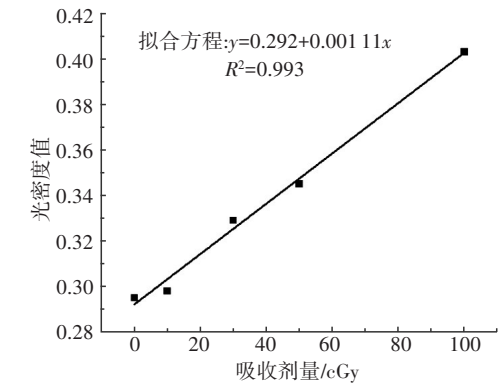


图5 0.1~1.0 Gy吸收剂量与光密度值线性拟合结果

Figure 5 Linear fitting results of absorbed dose within 0.1 to 1.0 Gy and optical density

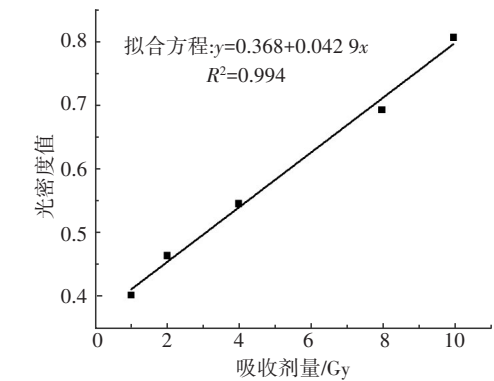


图6 1.0~10.0 Gy吸收剂量与光密度值线性拟合结果

Figure 6 Linear fitting results of absorbed dose within 1.0 to 10.0 Gy and optical density

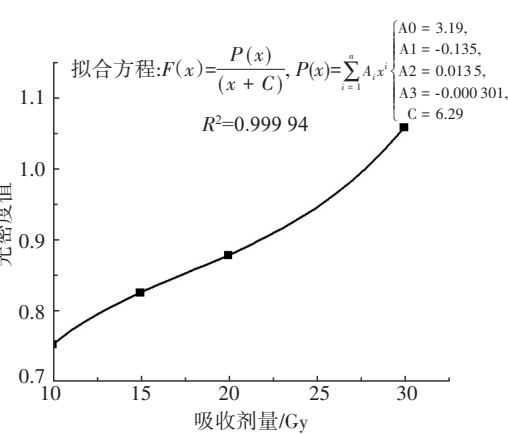


图7 10.0~30.0 Gy吸收剂量与光密度值高次拟合结果

Figure 7 High order fitting results of absorbed dose within 10.0 to 30.0 Gy and optical density

内吸收剂量与光密度值呈线性关系,即胶片在0.1~10.0 Gy内具有线性响应。根据10.0~30.0 Gy内的光密度值,采用3次拟合, R^2 为0.999 94,说明在吸收剂量大于10.0 Gy时,吸收剂量与光密度值不再保持线

性关系。由于胶片响应是否饱和可通过拟合曲线的切线斜率判断,对10.0~30.0 Gy的拟合函数求导,结果见图8,10.0~30.0 Gy内拟合函数的一阶导数结果均不为0,说明10.0~30.0 Gy内吸收剂量与光密度值间仍然存在一一对应关系。

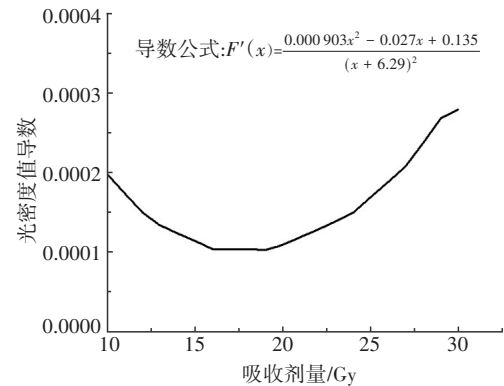


图8 10.0~30.0 Gy内拟合曲线导数

Figure 8 Derivative of fitting curve within 10.0 to 30.0 Gy

2.3 剂量测量分辨率

辐照后24 h的A、B两组胶片光密度值的结果见表2,A组胶片光密度值的方差为0.014 1,B组胶片光密度值的方差为0.022 7,因此可采用两组胶片光密度值的平均值计算光密度值的变化。A组胶片光密度值的平均值为0.395,B组胶片光密度值的平均值为0.399,光密度值变化为0.004,对应的吸收剂量差值为0.01 Gy,因此胶片剂量测量系统可以区分0.01 Gy的吸收剂量。

表2 A组与B组胶片光密度值

Table 2 Optical density of group A and group B

A组胶片		B组胶片	
胶片编号	光密度值	胶片编号	光密度值
1	0.403	1	0.390
2	0.388	2	0.408
3	0.396	3	0.395
4	0.392	4	0.392
5	0.394	5	0.409

2.4 剂量响应不均匀性

读取辐照后24 h的胶片光密度值,辐照后整张胶片不同区域ROI的光密度值见表3,由于方差可度量随机变量和其数学期望(即平均值)之间的偏离程度,因此采用整张胶片不同区域的光密度值方差评

价胶片的剂量响应不均匀性,结果表明整张胶片不均匀性为2.2%。

表3 整张胶片不均匀性测量光密度值
Table 3 Optical density measurement for analyzing the non-uniformity of the whole film

整张胶片不同区域编号	光密度值
1	0.445
2	0.442
3	0.438
4	0.438
5	0.438
6	0.433
7	0.429
8	0.425
9	0.425
10	0.421
11	0.420
12	0.417

裁剪后的胶片在模体内分次照射,12张胶片光密度值读取结果见表4。根据罗曼诺夫斯基准则(Romanowski Test),显著度 α 为0.05时,12张辐照胶片的光密度值结果不存在粗大误差,所有数据均有效,采用12张辐照胶片的光密度值方差评价胶片的不均匀性,结果为2.8%。

表4 裁剪胶片不均匀性测量光密度值
Table 4 Optical density measurement for analyzing the non-uniformity of the cutting film

胶片编号	光密度值
1	0.444
2	0.425
3	0.457
4	0.451
5	0.446
6	0.428
7	0.456
8	0.453
9	0.453
10	0.454
11	0.459
12	0.426

3 讨论

尽管相比于二维探测器阵列和三维测量设备,胶片测量作为离线测量方法不能马上得到验证结果,但胶片具有较高的空间分辨率,是执行放射治疗剂量验证时更为经济的选择,胶片的验证结果更被认为是IMRT剂量验证的“金标准”^[22]。

由于存在黑化时间,胶片辐照后的光密度值会随时间发生变化,且黑化过程会持续很长时间,为保证结果的可比性,将辐照后24 h的结果作为参考,辐照后以周/月/年计读取光密度值时,将其修正至辐照后24 h的光密度值。本研究发现在10.0~30.0 Gy内也可以获得关于吸收剂量与光密度值一一对应的感光曲线,但两者不存在线性关系,因此胶片在超过规定量程部分不适用于剂量分布的测量,否则无法有效区分剂量梯度的变化,但可应用于单点剂量的测量。考虑胶片的生产过程导致不同批次胶片间必然存在差异,因此吸收剂量与光密度值感光曲线适用于同型号同批次的胶片;与扫描仪配套的Film QA Pro中拟合感光曲线的拟合公式只有4种选择,经常导致具有较差拟合度的感光曲线出现,因此推荐获取胶片光密度值后自行拟合感光曲线。在Sankar等^[23]研究胶片剂量响应不均匀性时,采用整张胶片依次辐照的方式,同时采用极差法评价均匀性,剂量响应变化高达8%左右,这种峰-谷值的比较方法过于严格,建议采用方差的方法。本研究采用方差方法评价胶片剂量响应不均匀性为2.8%,不利于剂量分布的测量。

基于EBT3系列胶片的胶片剂量测量系统的剂量测量范围和剂量测量分辨率可以满足放射治疗剂量及其分布的测量要求,未来可进一步提高剂量响应的均匀性和剂量响应范围,在保证结果准确性的同时满足单次大剂量照射的放射治疗技术剂量分布验证和质量控制要求。

4 结论

黑化时间测试结果表明辐照后4 h内胶片的光密度值变化较大,辐照24~48 h内光密度值趋于稳定,考虑读取数据的可操作性,可选择辐照后24 h作为胶片的读取时刻;测试结果表明胶片黑化时间与授予的水吸收剂量无关。通过在0.1~30.0 Gy内建立的吸收剂量与光密度值感光曲线,分析胶片在不同剂量范围内吸收剂量与光密度值间关系。0.1~10.0 Gy内胶片的吸收剂量与光密度值间保持线性关系,该剂量范围内可采用胶片进行辐射野剂量分布和点剂量的测量;10.0~30.0 Gy内胶片的吸收剂量与光密度

值间不再保持线性关系,但吸收剂量与光密度值间存在一一对应关系,因此在10.0~30.0 Gy内,胶片可用于单点剂量测量。胶片剂量测量系统的剂量测量分辨率好于0.01 Gy,可满足放射治疗剂量分布测量的要求。整张胶片和裁剪胶片两种方式的不均匀性测试结果分别为2.2%和2.8%,由于整张胶片方式的测试结果存在散射线影响,建议采用裁剪胶片的方式测试胶片剂量响应的不均匀性。

【参考文献】

- [1] 张月美,李光俊,白龙,等. 辐射显色胶片剂量仪在放射治疗中的应用进展[J]. 中国医学物理学杂志, 2018, 35(6): 638-642.
- Zhang YM, Li GJ, Bai L, et al. Implementation and development of radiochromic film dosimeter in radiotherapy[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2018, 35(6): 638-642.
- [2] 王小深,戴相昆,陈高翔,等. 评估辐射自显影胶片非均匀性及其对螺旋断层放射治疗剂量验证的影响[J]. 中国医学物理学杂志, 2017, 34(4): 340-343.
- Wang XS, Dai XK, Chen GX, et al. Evaluation of the non-uniformity of self-developing EBT3 film and its influence on tomotherapy dose verification[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2017, 34(4): 340-343.
- [3] 沈文同,涂焱,王建华,等. 调强适形放射治疗的剂量学验证[J]. 辐射防护, 2007, 27(5): 257-263.
- Shen WT, Tu Y, Wang JH, et al. Dosimetric verification of the intensity modulated radiation therapy[J]. Radiation Protection, 2007, 27(5): 257-263.
- [4] Fiandra C, Fusella M, Giglioli FR, et al. Comparison of Gafchromic EBT2 and EBT3 for patient-specific quality assurance: cranial stereotactic radiosurgery using volumetric modulated arc therapy with multiple noncoplanar arcs[J]. Med Phys, 2013, 40(8): 082105.
- [5] 葛宁,韩栋梁,辜石勇. 辐射自显影胶片EBT2在单次曝光与多次曝光条件下的剂量学研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2015, 32(4): 595-598.
- Ge N, Han DL, Gu SY. Dosimetric study on autoradiography films EBT2 under single-exposure and multi-exposure[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2015, 32(4): 595-598.
- [6] McLaughlin WL, Al-Sheikhly M, Lewis DF, et al. Radiochromic solid-state polymerization reaction [M]//Irradiation of Polymers. Washington, DC, USA: ACS, 1996: 152-166.
- [7] 刘志强,魏玺仪,安永伟,等. EBT3胶片剂量校准新方法在调强放射治疗剂量验证中的应用[J]. 中国医学物理学杂志, 2019, 36(9): 1013-1017.
- Liu ZQ, Wei XY, An YW, et al. A new dose calibration method using EBT3 film for dose verification in intensity-modulated radiotherapy[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2019, 36(9): 1013-1017.
- [8] 陈维军. 辐射自显影胶片用于调强放疗剂量验证的可行性研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- Chen WJ. A feasibility study of IMRT dosimetric verification using radiochromic film[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [9] Fuss M, Sturtewagen E, De Wagter C, et al. Dosimetric characterization of GafChromic EBT film and its implication on film dosimetry quality assurance[J]. Phys Med Biol, 2007, 52(14): 4211-4225.
- [10] Su FC, Shi CY, Papanikolaou N. Clinical application of GAFCHROMIC EBT film for *in vivo* dose measurements of total body irradiation radiotherapy[J]. Appl Radiat Isot, 2008, 66(3): 389-394.
- [11] Devic S, Aldelaijan S, Mohammed H, et al. Absorption spectra time evolution of EBT-2 model GAFCHROMIC film[J]. Med Phys, 2010, 37(5): 2207-2214.
- [12] 徐志勇. Radiochromic胶片剂量计[J]. 国外医学(放射医学核医学分册), 2002, 26(5): 237-239.
- Xu ZY. Radiochromic film dosimetry[J]. Foreign Medical Science (Nuclear Medicine), 2002, 26(5): 237-239.
- [13] 周颖娟,黄劲敏,邓小武. 辐射显色剂量胶片的特性及其在放射医学的应用[J]. 国际肿瘤学杂志, 2007, 34(1): 28-31.
- Zhou YJ, Huang SM, Deng XW. Characteristics of radiochromic film and its applications in radiation dosimetry[J]. Journal of International Oncology, 2007, 34(1): 28-31.
- [14] Cheung T, Butson MJ, Yu PK. Independence of calibration curves for EBT Gafchromic films of the size of high-energy X-ray fields[J]. Appl Radiat Isot, 2006, 64(9): 1027-1030.
- [15] 刘志强. 使用辐射自显影胶片对重离子治癌的剂量学验证研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- Liu ZQ. A study of heavy ion radiotherapy dosimetric verification using radiochromic film[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [16] Nablo SV, Tripp EP. Low energy electron process applications[J]. Radiat Phys Chem, 1977, 9(1-3): 325-352.
- [17] Uribe RM, Barcelo M, McLaughlin WL, et al. Initial color development in radiochromic dye films after a short intense pulse of accelerated electrons[J]. Int J Rad Appl Instrum C, 1990, 35(4-6): 724-727.
- [18] McLaughlin WL, Chen YG, Soares CG, et al. Sensitometry of the response of a new radiochromic film dosimeter to gamma radiation and electron beams[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A, 1991, 302(1): 165-176.
- [19] Pai S, Das JJ, Dempsey JF, et al. TG-69: radiographic film for megavoltage beam dosimetry[J]. Med Phys, 2007, 34(6): 2228-2258.
- [20] Hartmann B, Martišíková M, Jäkel O. Technical note: homogeneity of gafchromic® EBT2 film[J]. Med Phys, 2010, 37(4): 1753-1756.
- [21] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 5版. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- Fei YT. Error theory and data processing[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [22] 梁远. 三维适形、调强放射治疗剂量验证研究进展[J]. 广西医学, 2008, 30(10): 1520-1521.
- Liang Y. Advances in dose verification of three-dimensional conformal and intensity-modulated radiotherapy[J]. Guangxi Medical Journal, 2008, 30(10): 1520-1521.
- [23] Sankar A, Kurup PG, Murali V, et al. Evaluation of gafchromic EBT film for intensity modulated radiation therapy dose distribution verification[J]. J Med Phys, 2006, 31(2): 78-82.

(编辑:谭斯允)