

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

刘志强,魏玺仪,安永伟,刘婷婷,牛瑞军,赵林,高力英
甘肃省肿瘤医院放射治疗科,甘肃 兰州 730050

【摘要】目的:分析EBT3胶片对X射线的响应特性,研究一种应用EBT3胶片的剂量校准新方法,并探讨使用剂量校准新方法完成调强放射治疗剂量验证的方法及过程。**方法:**胶片剂量校准时,引入净光密度,将胶片扫描后的像素值转化为净光密度,再由净光密度转换为剂量值的校准。运用该方法验证了1例用于测试治疗计划系统计算精度的调强放射治疗计划。**结果:**EBT3胶片对MV级X射线的剂量响应呈非线性关系。通过引入净光密度这一新的剂量校准方法可以很好地去除由胶片和扫描过程引入的误差。使用这一新的胶片剂量校准方法进行剂量验证,结果显示在3 mm/3%条件下,Gamma通过率大于98%。**结论:**使用EBT3胶片剂量校准新方法能更精确地得到胶片测量的剂量分布,使胶片测量更为方便,该方法可以在临床推广使用。

【关键词】调强放射治疗;EBT3胶片;剂量校准;剂量验证;净光密度

【中图分类号】R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2019)09-1013-05

A new dose calibration method using EBT3 film for dose verification in intensity-modulated radiotherapy

LIU Zhiqiang, WEI Xiyi, AN Yongwei, LIU Tingting, NIU Ruijun, ZHAO Lin, GAO Liying

Department of Radiation Oncology, Gansu Provincial Cancer Hospital, Lanzhou 730050, China

Abstract: Objective To study the response characteristics of EBT3 film to X-ray irradiation, research a new dose calibration method using EBT3 film, and investigate the method and process of applying the proposed dose calibration method for dose verification in intensity-modulated radiotherapy. **Methods** A physical quantity, net optical density (netOD), was introduced during film dose calibration. The netOD transformed from the pixel value obtained after film scanning was converted to the calibration of dose value. Finally, the proposed method was used to validate an example of intensity-modulated radiotherapy plan for testing the calculation accuracy of treatment planning system. **Results** The dose response of EBT3 film to MV X-ray was nonlinear. The deviation due to the film and the scanning process was well removed by the dose calibration method with the introduction of netOD. The results of using the proposed dose calibration method for dose verification showed that the Gamma passing rate was above 98% based on the gamma criteria of 3%/3 mm. **Conclusion** The new dose calibration method using EBT3 film which can make the calculation of the dose distribution in film measurement more accurate and the film measurement more convenient can be used in clinical practice.

Keywords: intensity-modulated radiotherapy; EBT3 film; dose calibration; dose verification; net optical density

前言

自20世纪90年代调强放射治疗(Intensity-Modulated Radiotherapy, IMRT)技术诞生开始,其剂

量验证一直是临床质量保证工作的一个重要环节。剂量验证一般采用点剂量测量和面剂量分布测量,且这两种方式互为补充。最近研发的EBT型免冲洗胶片就是为了更好地进行IMRT的剂量验证,该胶片既能提供较高的空间分辨率,又免去了冲洗的过程,因此可以简化经典胶片在剂量验证的流程,提高工作效率^[1-2]。目前已有很多研究使用EBT系列免冲洗胶片来完成IMRT剂量验证^[3-4]。胶片校准方法是找到胶片的像素值与剂量之间的对应关系,然而这种方法步骤繁多且会引入更多误差,因此本研究试图引入一种新的更简便的方法来校准胶片。

【收稿日期】2019-03-10

【基金项目】甘肃省自然科学基金(145RJZA178)

【作者简介】刘志强,硕士,工程师,研究方向:肿瘤放射物理,E-mail: 412849489@qq.com

【通讯作者】高力英,硕士生导师,主任医师,研究方向:临床肿瘤放射与治疗,E-mail: lygaolanzhou@163.com

1 材料与方法

1.1 EBT 胶片和扫描仪

EBT 系列胶片具有很多优势,包括较高的空间分辨率、很弱的能量依赖性以及较高的水等效性(即由辐射场的改变而引入的误差非常小)^[5]。基于这些优势,EBT 胶片非常适用于 IMRT 剂量验证^[6]。本研究采用 EBT 系列胶片的第三代 EBT3 (批号: 02261503)。较前几代胶片,EBT3 胶片有很大的改进,如均匀度高于 EBT2,结构对称,免除了扫描时需要考虑胶片的正反情况,表面涂有防牛顿环涂层等。此外,本研究的扫描仪使用 EPSON Express 10000XL 平板文档扫描仪。

1.2 胶片扫描和像素值提取

胶片照射后遮光保存 24 h 后开始扫描,扫描仪应经过至少 2 h 的预热,使光源设备达到性能稳定。设置扫描参数时,应关闭扫描软件的图像增强功能,并选择 72dpi 的扫描精度,保存为 48 位 RGB 彩色 tiff 格式;扫描时,注意保持胶片的长边方向和扫描仪的灯管运动方向垂直;扫描完成后,从保存的 tiff 图像中提取红色通道的像素值进行分析。

1.3 胶片的剂量校准

从照射过的胶片中直接读出其像素值,只有得到像素值与剂量之间一一对应的关系,才能从胶片中读出剂量,因此需要对胶片进行校准。常规校准方法是建立像素值和绝对剂量之间的对应关系曲线,由读取的像素值确定测量剂量^[7]。然而这种方法很不可靠,很容易受到一些因素的影响,如扫描仪的光源强度和探测器灵敏度等的影响,因此本研究引入净光密度(net Optical Density, netOD),将像素值转换为 netOD,从而得到 netOD 和绝对剂量之间一一对应的关系,这样去除由于扫描仪光源强度和探测器灵敏度的变化等因素引入的误差。由胶片的像素值得到 netOD^[8]:

$$\text{netOD} = \log_{10} \frac{PV_{\text{unexp}} - PV_{\text{backg}}}{PV_{\text{exp}} - PV_{\text{backg}}} \quad (1)$$

其中, PV_{unexp} 、 PV_{exp} 、 PV_{backg} 分别表示未曝光、曝光和不透光黑色纸板的像素值。由上式可以看出,在扫描过程中,曝光和未曝光的胶片中均包含了由扫描仪引入的误差,但是两个 PV 值相减就可抵消这些误差,使测量剂量只和 netOD 相关,排除扫描仪的影响。

胶片的 netOD 和剂量之间的关系并不是线性关系,而是随着剂量的增加,其光密度逐渐趋于饱和状态,这类似于放射生物学中的辐射粒子击中 DNA 的单靶单击模型^[9]:

$$\text{netOD}(D) = OD_{\text{max}}(1 - e^{-mD}) \quad (2)$$

其中, OD_{max} 为胶片的饱和光密度; m 为斜率系数,描述胶片对射线能量的因子,不同 m 值代表不同的射线种类或射线能量。胶片校准时,分别用若干个已知剂量的射线照射胶片,测量胶片的像素值,并转换为 netOD,由已知剂量和得到的 netOD,用最小二乘法拟合数据,即可得到 OD_{max} 和 m 值,并得到 netOD 与剂量之间的关系。

1.4 计划剂量验证

固体水模体经 CT 扫描导入治疗计划系统(Eclipse, V8.9)。将一例用于测试治疗计划系统计算准确度的 IMRT 计划移植到模体上,机架角归 0°,计算剂量,以 DICOM-RT 格式导出等中心处的冠状位剂量平面的 RTDOSE 文件,作为剂量验证时与测量剂量相比较的参考剂量分布。将 EBT3 胶片按照照射野大小裁剪为合适的尺寸,放入密封遮光的信封中,尽量减少可见光的照射。模体在加速器(Varian 600CD)治疗床上进行摆位,胶片放入验证计划设计的位置,调取计划进行照射。验证前加速器的多叶准直器到位精度和绝对剂量等参数需经过严格校准。

1.5 胶片处理

完成照射的胶片经扫描仪扫描后以 tiff 的格式保存。剂量分析时,提取红色通道数据(像素值),并转换为 netOD 的二维分布图。由于校准胶片时已由式(2)得到了 netOD 与剂量之间的关系,而式(2)可以转化为式(3):

$$D = -\frac{1}{m} \ln \left(1 - \frac{\text{netOD}}{OD_{\text{max}}} \right) \quad (3)$$

可以由已经得到的 netOD 二维分布图及式(3)得到实际射野剂量的二维分布图。在进行提取 EBT3 胶片的红色通道像素值转换为 netOD,以及由 netOD 转换为剂量的过程中,本研究采用 Matlab 软件并通过编写程序代码来实现。

1.6 剂量学比较

将验证测量的剂量分布和验证计划导出的参考剂量文件同时导入 OmniPro-Imrt(IBA, V1.4)对比分析两者的 Gamma 通过率^[10],完成剂量验证。

2 结果

胶片剂量校准实验中照射的剂量、像素值以及由式(1)计算的 netOD 如表 1 所示。

表中的不透光黑纸板表示为在剂量达到饱和状态时胶片的像素值,为理想状态。因此实际操作时使用一块黑色不透光的纸板扫描得到其像素值。其

表1 胶片剂量校准的剂量、像素值及净光密度

Tab.1 Dose, pixel value and net optical density of film dose calibration

参数	胶片序号										不透光黑板纸
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
剂量/cGy	0	50	100	150	200	300	400	600	800	1 000	+∞
像素值	0.637	0.550	0.485	0.436	0.396	0.337	0.292	0.230	0.189	0.163	0.011
净光密度	0.000	0.065	0.121	0.168	0.211	0.283	0.348	0.457	0.546	0.615	1.000

净光密度理论上为1,实际中并不能够得到。图1显示了胶片 netOD 和剂量之间的关系,蓝线为实验测量的结果,红线为根据式(2)拟合的结果。由拟合结果可以看出,本研究选择的拟合公式非常合理,相关系数 R^2 达到0.998 99。

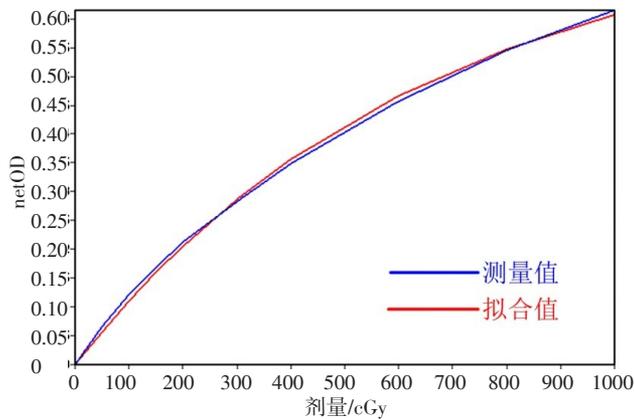


图1 胶片的剂量响应特性

Fig.1 Dose response curve of EBT3 film

验证计划共计4个射野,图2显示了一个射野的剂量验证结果。图2a~c分别为计划剂量分布、测量剂量分布和两个剂量分布对比。图2c中X轴方向上的剂量 Profile,红色代表计划剂量,绿色代表测量剂量。图2d为两个剂量分布的Gamma对比结果。表2则显示了4个射野的Gamma通过率,通过条件分别设为3 mm/3%和2 mm/2%,分别研究剂量>0%和>5%的情况。从结果可以看出,在所验证的4个射野中,在3 mm/3%的条件下,Gamma通过率均大于98%,即使在更为严苛的条件下(2 mm/2%),Gamma通过率也能接近95%。

3 讨论

剂量验证设备由最早的慢感光胶片发展到二维探测器阵列,再到三维测量设备,已经有了长足的发展。使用慢感光胶片来执行剂量验证时,可以提供非常高的空间分辨率,不足之处是需要冲洗胶片,而

冲洗胶片过程非常耗时,且引入的误差很难避免。此外,使用胶片测量是一个离线的测量方法,即测量结果不能实时显示,因而不能马上得到验证结果。开发的新型探测器阵列能够更好地克服以上缺点,然而,目前市售的各种探测器设备,虽测量方便,却牺牲了空间分辨率,虽然有些设备能得到高分辨率的结果,但这些结果是通过插值计算得到的,和实际测量的高分辨率的临床意义并不相同。使用EBT免洗胶片来执行IMRT剂量验证更为经济,其更高的分辨率精度甚至可以满足科研需求。本研究旨在分析EBT3胶片对X射线的响应特性,并探讨使用EBT3胶片完成IMRT剂量验证的方法及过程。本研究采用EBT3胶片进行IMRT剂量验证,但此方法并不限于EBT3胶片,还适用于其他型号的免冲洗胶片。此外,基于该技术在X射线IMRT剂量验证的应用,以后有望能用于重离子治疗的剂量验证。EBT3胶片已进入常规临床IMRT剂量验证的可选项目中,相对于二维探测器阵列,具有空间分辨率高的优势^[11],尤其体现在现代放疗中的小射野测量。李君等^[12]使用EBT3及其他一些探测器测量射波刀的输出因子,发现EBT3胶片测量结果和宝石探测器的结果有很好的—致性,并和蒙特卡罗模拟结果最为接近,这和Christian等^[13]的实验结果也非常吻合。丁艳秋等^[14]对比了EBT3胶片和ArcCheck在螺旋断层放射治疗的剂量验证,发现在小靶区剂量验证中,对于剂量梯度较大的区域及低剂量区域,EBT3和ArcCheck验证的Gamma通过率有显著的统计学差异。郭跃信等^[15]使用EBT3胶片和IBA MatrX对Oncentra TPS进行验收测试时发现EBT3胶片由于具有较高的空间分辨率,可以很好地辨识射野的边缘。EBT3胶片的劣势在于无法实时读取在线验证结果,胶片显影稳定时间一般需要24 h,这一特性不太适合目前很多治疗中心需要较高的工作效率,然而,因其具有较高的空间分辨率,故常被认为是调强剂量验证的“金标准”^[16]。

周颖娟等^[17]使用标准片来对扫描仪进行校准,

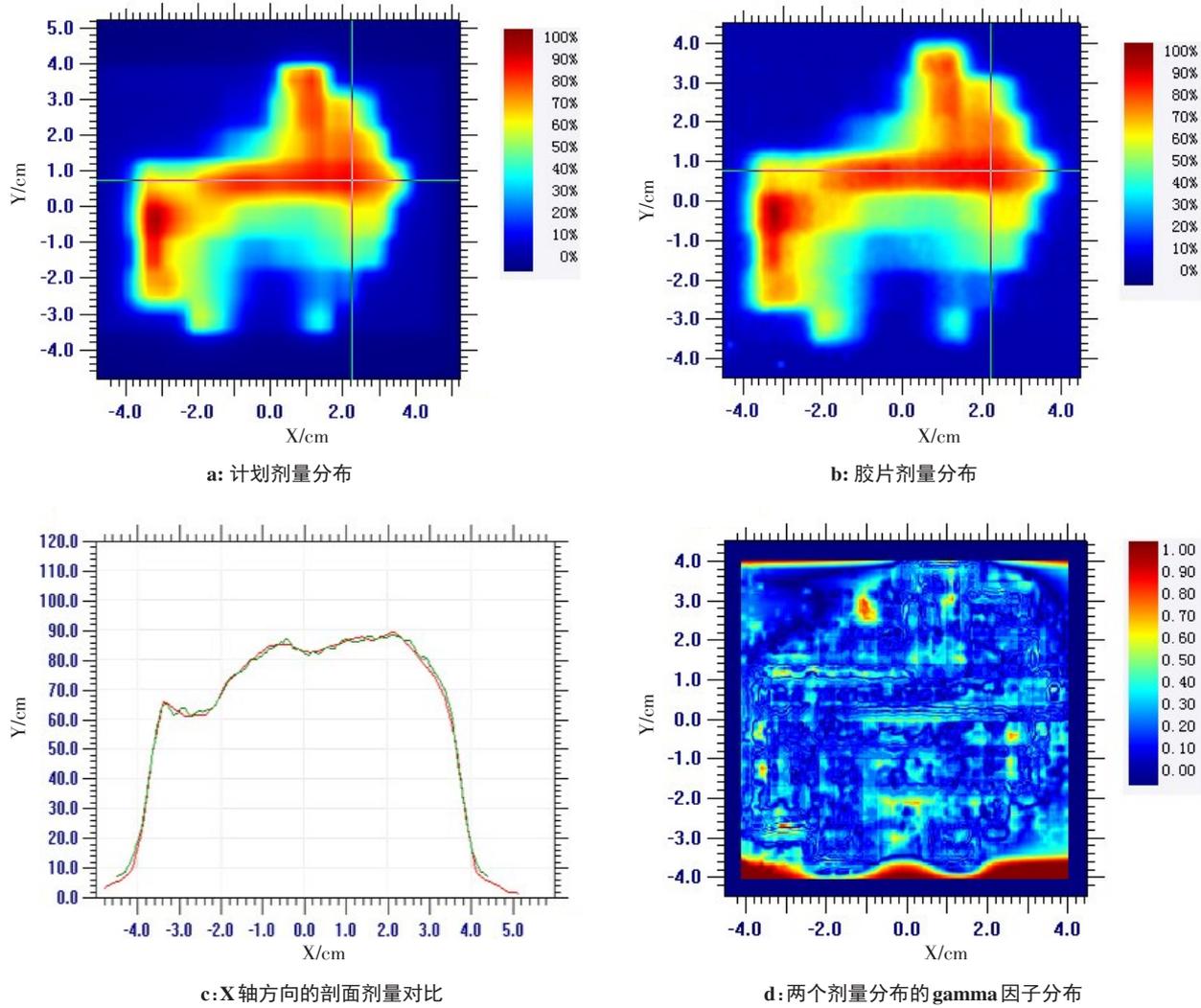


图2 1例IMRT计划的验证结果

Fig.2 Verification result of a IMRT plan

表2 各射野的Gamma通过率(%)

Tab.2 Gamma passing rate of each field (%)

射野	3 mm/3%		2 mm/2%	
	剂量>5%	剂量>0%	剂量>5%	剂量>0%
F1	99.88	98.74	99.36	96.57
F2	99.52	99.12	97.22	91.82
F3	99.80	99.78	97.92	96.62
F4	98.32	98.32	93.26	92.89
平均通过率	99.38±0.72	98.99±0.62	96.94±2.61	94.48±2.49

确定扫描仪的模数转换值和吸光值之间的确定关系,再使用阶梯照射胶片确定胶片光密度和剂量之间的关系,这是使用胶片实现IMRT剂量验证的标准方法,此方法需要标准片校准扫描仪。由于标准片的获取困难,并且扫描仪的校准也需花费一定的时间,因此本研究采用了新的校准方法。本研究引入

物理量netOD以去除扫描仪灯管光强的差异,即不需要使用标准片来校准扫描仪。本研究中扫描仪需要充分预热,待其性能稳定即可扫描胶片。使用式(1)可以将由扫描仪引入的误差全部消除,因此只需一次校准即可,然而当使用下一批次的胶片时,必须要重新建立校准曲线。关于EBT3胶片的操作细节详见参考文献[18]。

扫描EBT3胶片时,很容易引入误差,如扫描时间、胶片放置方向以及胶片的不均匀度等都会给最终的剂量测量带来误差^[19-20]。图2d显示,在对比图的边缘处存在Gamma>1的区域,这是由于EBT3胶片在裁剪时非常容易变形,甚至分层开裂,尽管在扫描时胶片上压了一层玻璃片来保证胶片的平整,但是还是会引入剂量误差。因此在分析Gamma因子时,本研究分别分析了整个范围内(剂量>0%)和剂量>5%的区域的Gamma因子,即可有效排除由于胶片边缘的不平整引入的剂量误差。由表2可以看出排除

边缘区域相比不排除边缘区域的 Gamma 通过率更高。

Matlab 软件可以提供强大的矩阵运算功能。本研究使用 Matlab 软件,从扫描的胶片中提取红色通道的数据,并保存为一个二维数组;将每一个像素值转化为 netOD,再转换为剂量值,并保存为 ASCII 文件,导入剂量对比软件。经过这样的数据处理,就可以不需要再次从软件中输入校准曲线,即可完成剂量校准,从而减小操作过程中引入的误差。

综上所述,使用 EBT3 胶片执行 IMRT 剂量验证时,采用将像素值转化为 netOD,再由 netOD 校准剂量的方法,可以去除耦和在扫描过程中的扫描仪的一些误差,更方便地得到胶片测量剂量的结果,可以在临床推广使用;然而这一方法并不能消除不同批次的胶片的差异,当使用下一批次的胶片时,必须重新建立校准曲线。

【参考文献】

- [1] SANKAR A, NEHRU R M, AYYANGAR K M, et al. Comparison of Kodak EDR2 and Gafchromic EBT film for intensity-modulated radiation therapy dose distribution verification[J]. Med Dosim, 2007, 31(4): 273-282.
- [2] 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.
- [3] VALERIA C B, MASSIMO P, GIULIANA R, et al. Dosimetric characterization and use of GAFCHROMIC EBT3 film for IMRT dose verification[J]. J Appl Clin Med Phys, 2013, 14(2): 158-171.
- [4] 高兴旺, 祁振宇, 张罗生, 等. 二维半导体探测器阵列与免洗放射性铬胶片在调强放射治疗计划剂量验证中的应用比较[J]. 中国肿瘤, 2008, 17(8): 690-693.
GAO X W, QI Z Y, ZHANG L S, et al. Comparison of applying a 2-D diode detector array and radiochromic film in dosimetry verification of intensity modulated radiation therapy[J]. China Cancer, 2008, 17(8): 690-693.
- [5] 沈文同, 涂彥, 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 W T, TU Y, WANG J H, et al. Dosimetric verification of the intensity modulated radiation therapy[J]. Radiation Protection, 2007, 27(5): 257-263.
- [6] FIANDRA C, RICARDI U, RAGONA R, et al. Clinical use of EBT model Gafchromic film in radiotherapy[J]. Med Phys, 2006, 33(11): 4314-4319.
- [7] 于海容, 刘洋, 孙静, 等. 放射治疗用胶片剂量测量方法验证[J]. 医疗装备, 2017, 30(18): 45-46.
YU H R, LIU Y, SUN J, et al. Radiotherapy film dose measurement method verification[J]. Medical Equipment, 2017, 30(18): 45-46.
- [8] DEVIC S, SEUNTJENS J E, PODGORSK E B, et al. Precise radiochromic film dosimetry using a flat-bed document scanner[J]. Med Phys, 2005, 32(7): 2245-2253.
- [9] SPIELBERGER B, SCHOLZ M, KRÄMER M, et al. Calculation of the X-ray film response to heavy charged particle irradiation[J]. Phys Med Biol, 2002, 47(22): 4107.
- [10] LOW D A, HARMS W B, MUTIC S, et al. A technique for the quantitative evaluation of dose distributions[J]. Med Phys, 1998, 25(5): 656-661.
- [11] HANUŠOVÁ T, HORÁKOVÁ I, KONIAROVÁ I. IMRT plan verification with EBT2 and EBT3 films compared to PTW 2D-ARRAY seven29 [J]. Radiat Phys Chem, 2017, 140: 365-369.
- [12] 李君, 杨瑞杰, 张喜乐, 等. 不同探测器测量射波刀输出因子比较分析[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2017, 26(11): 1322-1326.
LI J, YANG R J, ZHANG X L, et al. Comparison of different detectors in output factor measurement for the CyberKnife system[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2017, 26(11): 1322-1326.
- [13] CHRISTIAN F, MARCO F, FRANCESCA ROMANA G, 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.
- [14] 丁艳秋, 吴伟章, 朱夫海, 等. ArcCHECK 和 EBT3 胶片应用于螺旋断层放射治疗剂量验证的比较研究[J]. 中国医学装备, 2015(9): 31-35.
DING Y Q, WU W Z, ZHU F H, et al. The comparison research on application on ArcCHECK and EBT3 film in dose verification of tomotherapy planning[J]. China Medical Equipment, 2015, 12(9): 31-35.
- [15] 郭跃信, 马阳光, 王海洋, 等. 核通 Oncentra 治疗计划系统的剂量学性能测试验证[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2015, 24(6): 726-727.
GUO Y X, MA Y G, WANG H Y, et al. Verification of dosimetry performance test for nucletron Oncentra treatment planning system[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2015, 24(6): 726-727.
- [16] 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.
- [17] 周颖娟, 黄劲敏, 邓小武. 用放射性铬胶片进行调强放疗剂量验证的研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2007, 16(4): 307-312.
ZHOU Y J, HUANG S M, DENG X W. Radiochromic film in the verification of intensity modulated radiation therapy [J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2007, 16(4): 307-312.
- [18] PEET S C, WILKS R, KAIRN T, et al. Technical note: calibrating radiochromic film in beams of uncertain quality[J]. Med Phys, 2016, 43(10): 5647.
- [19] ALAND T, KAIRN T, KENNY J. Evaluation of a Gafchromic EBT2 film dosimetry system for radiotherapy quality assurance[J]. Australas Phys Eng Sci Med, 2011, 34(2): 251.
- [20] SORRIAUX J, KACPEREK A, ROSSOMME S, et al. Evaluation of Gafchromic® EBT3 films characteristics in therapy photon, electron and proton beams[J]. Phys Med, 2013, 29(6): 599-606.

(编辑:谭斯允)