

## Varian Edge加速器射野外辐射剂量水平与铅防护用品的防护效果

王海洋,皮一飞,郭跃信

郑州大学第一附属医院放射治疗部, 河南 郑州 450052

**【摘要】目的:**研究 Varian Edge 加速器不同工作状态下射野外辐射剂量水平以及铅防护用品的防护效果。**方法:**利用实验测量的方法,研究加速器在不同工作能量、不同线束均整状态、使用不同防护用品,测量距射野边缘不同距离及不同深度下辐射剂量水平的变化情况。**结果:**射野外辐射剂量随距射野边缘距离增加(5~40 cm)近似呈指数规律下降,距射野边缘 20 cm 范围内低能量射束(6 MV、6 MV FFF)的辐射剂量低于高能射束(10 MV、10 MV FFF)的辐射剂量,且随测量深度增加(1~2 cm)而降低。非均整模式下射野外剂量测量结果低于均整模式射束。在相同能量条件下,铅防护用品的防护效果与线束的均整状态无关。对高能射束的防护效果要优于低能射束且随深度增加防护效果迅速下降。深度为 1 cm,射束能量 10 MV FFF,距射野边缘 5~30 cm 条件下,防护效果最强,射野外辐射剂量水平降低 50% 以上。测量深度为 2 cm,射束能量为 6 MV FFF,距离射野边缘 5~30 cm 的条件下,防护效果最差,仅能降低 10% 以下。**结论:**在实现临床目标的前提下,治疗过程中若无铅防护用品进行保护,推荐采用低能非均整模式进行计划设计;若使用铅防护用品进行保护,可以采用高能非均整模式射束,此时铅防护用品效果最佳,射野外浅层器官所受剂量最低,可有效降低二次肿瘤发生几率。

**【关键词】**射野外辐射剂量水平;铅防护用品;二次肿瘤;放疗计划设计

**【中图分类号】**R815

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2020)08-0982-07

## Out-of-field dose distributions of different beams from Varian Edge accelerator and protection effects of lead protective equipments

WANG Haiyang, PI Yifei, GUO Yuexin

Department of Radiation Oncology, the First Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China

**Abstract: Objective** To study the out-of-field dose distributions of different beams from Varian Edge accelerator under different working conditions and to investigate the protection effects of lead protective equipments. **Methods** When different energy levels, flattening filter-free (FFF) or flattening filter (FF) mode, and different protective equipments were adopted, the variations of the dose distributions at different distances from the edge of the beam field and at different depths of measurement were determined by experimental measurements. **Results** The out-of-field dose distributions were approximately exponentially decreasing with increasing distance from the edge of the beam field (5-40 cm). Within 20 cm from the edge of the beam field, the irradiation dose of low-energy beams (6 MV, 6 MV FFF) was lower than that of high-energy beams (10 MV, 10 MV FFF), and the irradiation dose was decreased with the increase of the depth of measurement (1-2 cm). FFF mode had more obvious effects on reducing the out-of-field dose distributions as compared with FF mode. Under the same energy condition, the protective effect of lead protective equipments was independent on FF or FFF mode. The protection against high-energy beams was better than that against low-energy beams, and the protective effect was decreased rapidly with the increase of the depth of measurement. When the depth of measurement was 1 cm, the protective effect was the strongest for the condition of 10 MV FFF beams and 5-30 cm from the edge of the beam field, and the reduction of out-of-field doses was larger than 50%. When the depth of measurement was 2 cm, the protective effect was the worst for the condition of 6 MV FFF beams and 5-30 cm from the edge of the beam field, and only a reduction of 10% was achieved. **Conclusion** Under the premise of achieving clinical goals, if no lead protective equipments were applied during the treatment, it is recommended to adopt low-energy FFF beams. If lead protective equipments were used for protection, high-energy FFF beams can be adopted, and at that time, the protective effect of lead protective equipments is the best,

**【收稿日期】**2020-02-26

**【基金项目】**河南省科技计划项目(182102310578)

**【作者简介】**王海洋,硕士,工程师,研究方向:放射物理技术,E-mail: wangsea0371@163.com

**【通信作者】**郭跃信,硕士,主任技师,肿瘤放射治疗,E-mail: guoyx0371@126.com

and the shallow organs out of the field are irradiated by the lowest dose, which can greatly reduce the probability of secondary cancer.

**Keywords:** out-of-field dose distribution; lead protective equipment; secondary cancer; radiotherapy planning

前言

受益于放疗技术的不断进步,尤其是调强放疗、图像引导放疗、自适应放疗、质子重离子放疗等新治疗手段的出现与推广<sup>[1-4]</sup>,越来越多的患者获得更高的生存期望<sup>[5]</sup>。对于放射治疗射野外辐射剂量诱发二次肿瘤的情况也获得越来越多的关注与研究<sup>[6-7]</sup>。相较于使用千伏能量级别的X射线与利用钴-60进行体外放射治疗而言,直线加速器具备更高能量、更高剂量率、更高安全系数、且操作便易等诸多优点,因此在现代放射治疗中应用更为广泛<sup>[8]</sup>。直线加速器治疗射野外的散射射线主要来自以下3部分:(1)治疗射束在患者体内的散射射线;(2)治疗机头和空气中的散射射线;(3)治疗机头中的漏射射线<sup>[8-11]</sup>。图1为直线加速器治疗射野外辐射剂量主要来源示意图。患者体内散射射线较难屏蔽,但机头部分产生的散射线和漏射线应当予以防护,因为这些射线对肿瘤治疗无益处且可能引起患者发生二次肿瘤风险。铅材料电子密度较高,对于漏射线和散射线有较强的吸收与衰减本领,同时铅材料较软易于加工,因此常用于制作患者与放射工作人员防护材料<sup>[12]</sup>,但是在放射治疗过程中应用较少。本研究采用试验测量的方法,研究 Varian Edge加速器在出束状态下应用铅防护用品(眼晶体防护、甲状腺防护、乳腺防护、性腺防护,由江苏义倍医疗科技股份有限公司提供)对射野外有害射线的防护效果<sup>[13]</sup>。

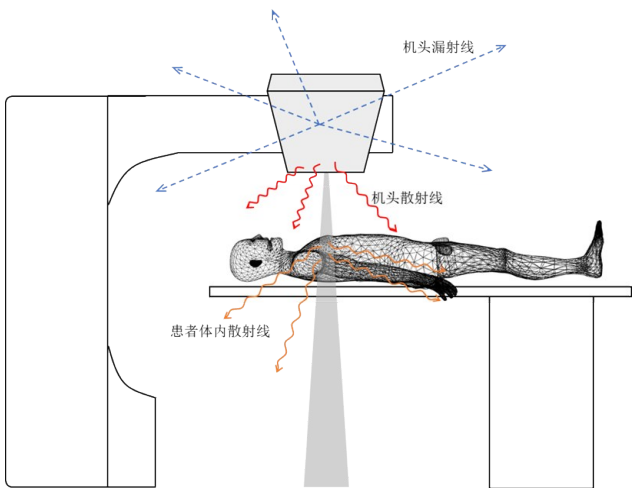


图1 直线加速器治疗射野外辐射剂量主要来源示意图  
Fig.1 Main sources of out-of-field radiation dose in linear accelerator treatment

1 材料与方法

1.1 实验仪器

本研究使用郑州大学第一附属医院放射治疗部新安装的美国 Varian 公司 Edge 加速器,射束能量有 6 MV、10 MV、6 MV 非均整模式(Flattening Filter Free, FFF)、10 MV FFF,最大剂量率分别为 600、600、1 400、2 400 MU/min。德国 IBA DOSE 1 剂量仪,电离室型号为 IBA FC-65 指型电离室,敏感体积 0.65 cm<sup>3</sup>,典型灵敏度 21 nC/Gy。足量厚度为 1 cm 或 2 cm 且面积为 30 cm×30 cm 的德国 SP34 固体水。铅防护用品有效铅当量均为 2 mm Pb,其中眼晶体防护用品有效尺寸约为 5.5 cm×2.5 cm,甲状腺防护用品有效尺寸约为 20 cm×8.5 cm,乳腺防护用品有效尺寸约为 14.5 cm×14.5 cm,性腺防护用品有效尺寸约为 10 cm×19 cm。

1.2 实验测量方法

加速器机架、准直器置于 0°,记录机房温度、气压、湿度等参数。在加速器治疗床上摆放固体水,使“十”字激光线与固体水中心标记线对齐。电离室放置固体水中心处并固定,连接静电计。升床至源皮距 100 cm 处。记录机房温度、气压、湿度等参数并输入静电计,对本底值进行校准,不同能量下选择对应的校准系数。加速器、固体水、探测器等摆放位置示意图与实际图如图 2 所示。

设置加速器射束能量分别为 6 MV、6 MV FFF、10 MV、10 MV FFF,射野 10 cm×10 cm,最大剂量率,机器跳数 200 MU,无辐射防护用品条件下,放置测量电离室于深度 1 cm 处、T 方向(床尾方向)距离射野边缘分别为 5、10、15、20、25、30、35、40 cm 处,多次测量,记录电离室读数剂量值。分别放置眼晶体、甲状腺、乳腺与性腺铅防护用品于图 2 所示位置测量防护后结果。电离室放置距模体表面深度为 2 cm,重复上述测量步骤。

1.3 铅防护用品防护效果计算

将累积剂量的衰减比例作为防护效果的指标。计算公式如下:

$$\text{Protect Value} = \frac{D_{\text{No Protect}} - D_{\text{With Protect}}}{D_{\text{No Protect}}} \times 100\%$$

其中, $D_{\text{No Protect}}$ 为不使用防护用品测量的累积剂量数值, $D_{\text{With Protect}}$ 为使用铅防护用品进行防护之后得到的

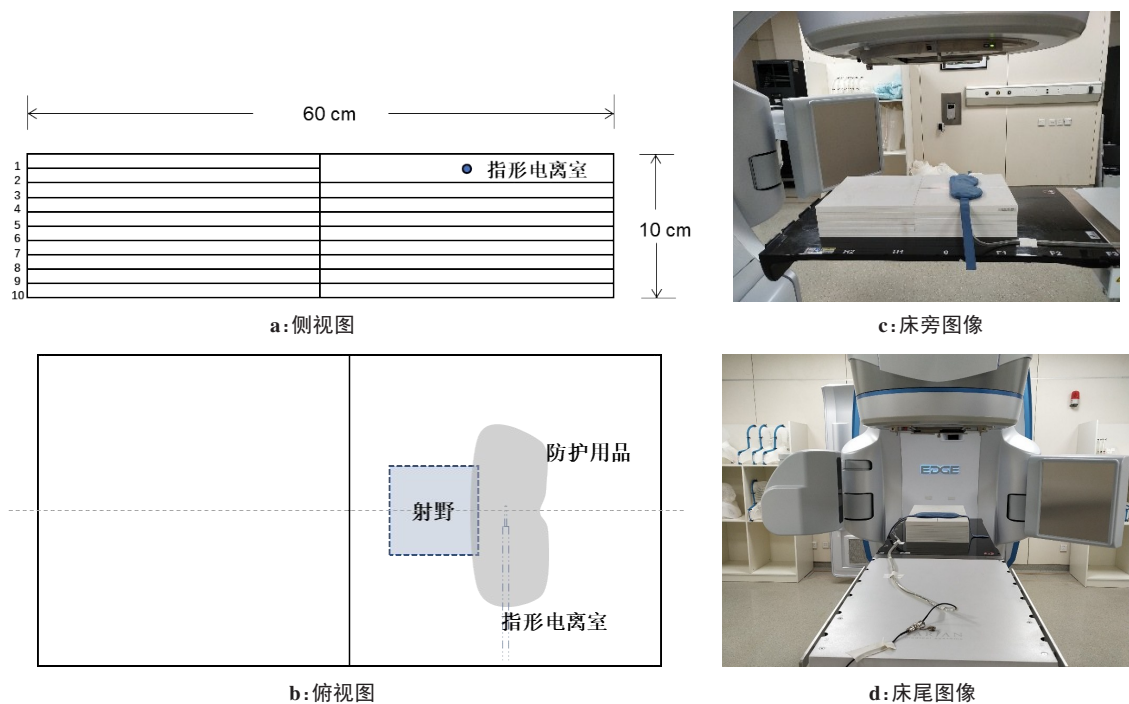


图2 加速器、固体水、探测器等摆放位置示意图与实际图  
Fig.2 Relative positions of linear accelerator, solid water and detector

测量结果。计算结果值越大说明有更多的有害射线被阻挡,此时铅防护用品的防护效果较强。

## 2 结果

### 2.1 射野外辐射剂量水平比较

加速器能量 6 MV、6 MV FFF、10 MV、10 MV FFF,加速器跳数 200 MU、最大剂量率,分别使用眼晶体、甲状腺、乳腺与性腺铅防护用品,距射野边缘 5、10、15、20、25、30、35、40 cm,测量深度 1 和 2 cm 时的测量结果,如图 3、图 4 所示。射野外辐射剂量水平随距射野边缘距离增加近似呈指数下降。距射野边缘为 40 cm 时,其辐射剂量接近于 2 mGy。20 cm 范围内低能量光子(6 MV、6 MV FFF) 的辐射剂量低于高能光子(10 MV、10 MV FFF)的辐射剂量。不同射线非均整模式下辐射剂量约为均整模式下辐射剂量的 1/2,非均整模式射束对于降低射野外剂量具有积极作用。整体而言,无防护用品条件下,1 cm 深度处的射野外辐射剂量高于 2 cm 处,而加入铅防护用品后 1 cm 深度处的射野外辐射剂量低于 2 cm 处,铅防护用品可以显著降低射野外辐射剂量水平,尤其是对浅层器官保护效果更佳。

### 2.2 辐射防护用品防护效果比较

将累积剂量的衰减比例作为防护效果的指标,眼晶体、甲状腺、乳腺与性腺铅防护用品的防护效果如图 5、图 6 所示。从图中可以看出,在相同能量条件下,铅防护用品的防护效果与射线使用均整或非均

整模式无关,对高能射束条件下射野外有害射线的防护效果要优于低能射束。随深度增加防护效果迅速下降,深度为 1 cm 时,射束能量 10 MV FFF,距射野边缘 5~30 cm 条件下,防护效果最强,可降低 50% 以上;深度为 2 cm 时,射束能量为 6 MV FFF,距离射野边缘 5~30 cm 条件下,防护效果最差,仅能降低 10% 以下。整体而言防护效果与能量和距离存在相近的变化趋势,即在靠近射野边缘一定距离范围内(5~25 cm)防护效果呈现轻微正弦变化,总体效果趋于稳定,但不同种类防护用品之间的防护效果无明显的差异。

## 3 讨论

放射治疗过程中射野外辐射剂量可能诱发二次肿瘤<sup>[14-15]</sup>,研究如何减少射野外辐射剂量对于提高患者的治疗效果具有积极意义。已有研究表明使用铅围裙防护用品可以大幅度减少电子线放疗的辐射剂量<sup>[16]</sup>。TG-158 报告对铅防护用品在屏蔽机头散射和准直器散射光子方面的良好效果进行了讨论<sup>[7]</sup>。本文着重研究在放射治疗过程中铅防护用品的防护效果。

关于铅防护用品的放置位置,为保证治疗效果,严禁放置在射野边缘,以免阻挡治疗射束从而造成治疗区域内处方剂量不足。本研究选取电离室距射野边缘(T 方向)5 cm 处并间隔一定距离进行逐点测量,此目的主要是考虑在治疗过程中,患者头脚方向

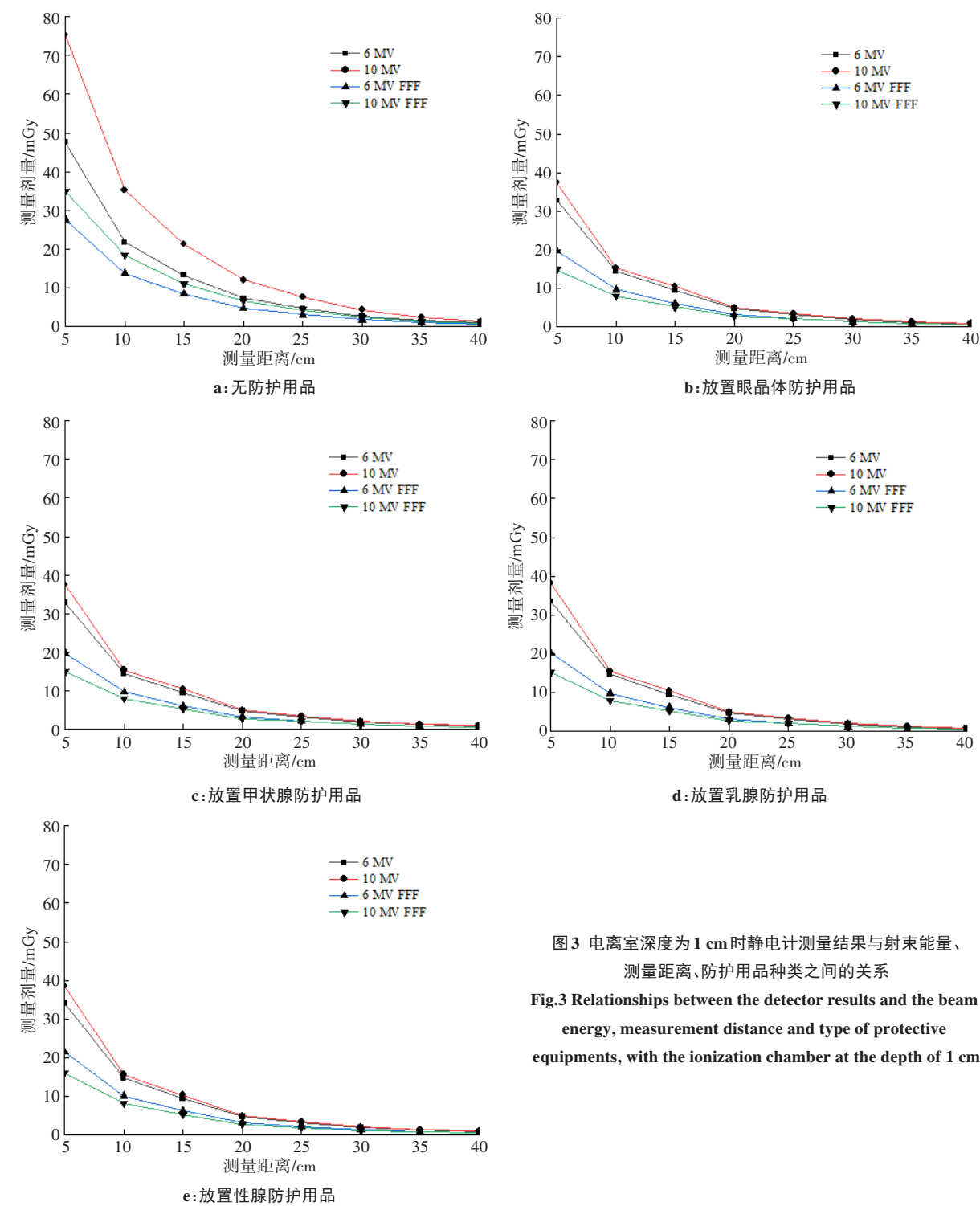


图3 电离室深度为1 cm时静电计测量结果与射束能量、测量距离、防护用品种类之间的关系

Fig.3 Relationships between the detector results and the beam energy, measurement distance and type of protective equipments, with the ionization chamber at the depth of 1 cm

与加速器 GT 方向一致,而需防护的眼晶体、甲状腺、乳腺、性腺等也都沿 GT 方向分布,这使得模拟实验与临床治疗相一致。

关于不同深度处的辐射防护效果,使用防护用品后 1 cm 深度处的辐射剂量小于 2 cm 处,主要原因是较浅深度时机头与准直器散射的光子导致射野外累积剂量占射野外总剂量比例较高,但铅防护用品对于病人体内散射光子没有防护效果,因此随着测量深度的增加,机头与准直器所致散射线被人体阻

挡而不断减弱,患者体内散射部分的光子贡献的剂量占比增加,所以辐射防护用品的防护效果随深度不断减弱。

关于辐射防护用品的防护效果,对高能射束(10 MV、10 MV FFF)条件下射野外有害射线的防护效果要优于低能射束(6 MV、6 MV FFF)。深度为 1 cm,射束能量 10 MV FFF,距离射野边缘 5~30 cm 的范围内,防护效果最强,可降低 50% 以上,与 Kry 等<sup>[17]</sup>、Taylor 等<sup>[18]</sup>研究结果接近。但深度为 2 cm,射束能量为 6



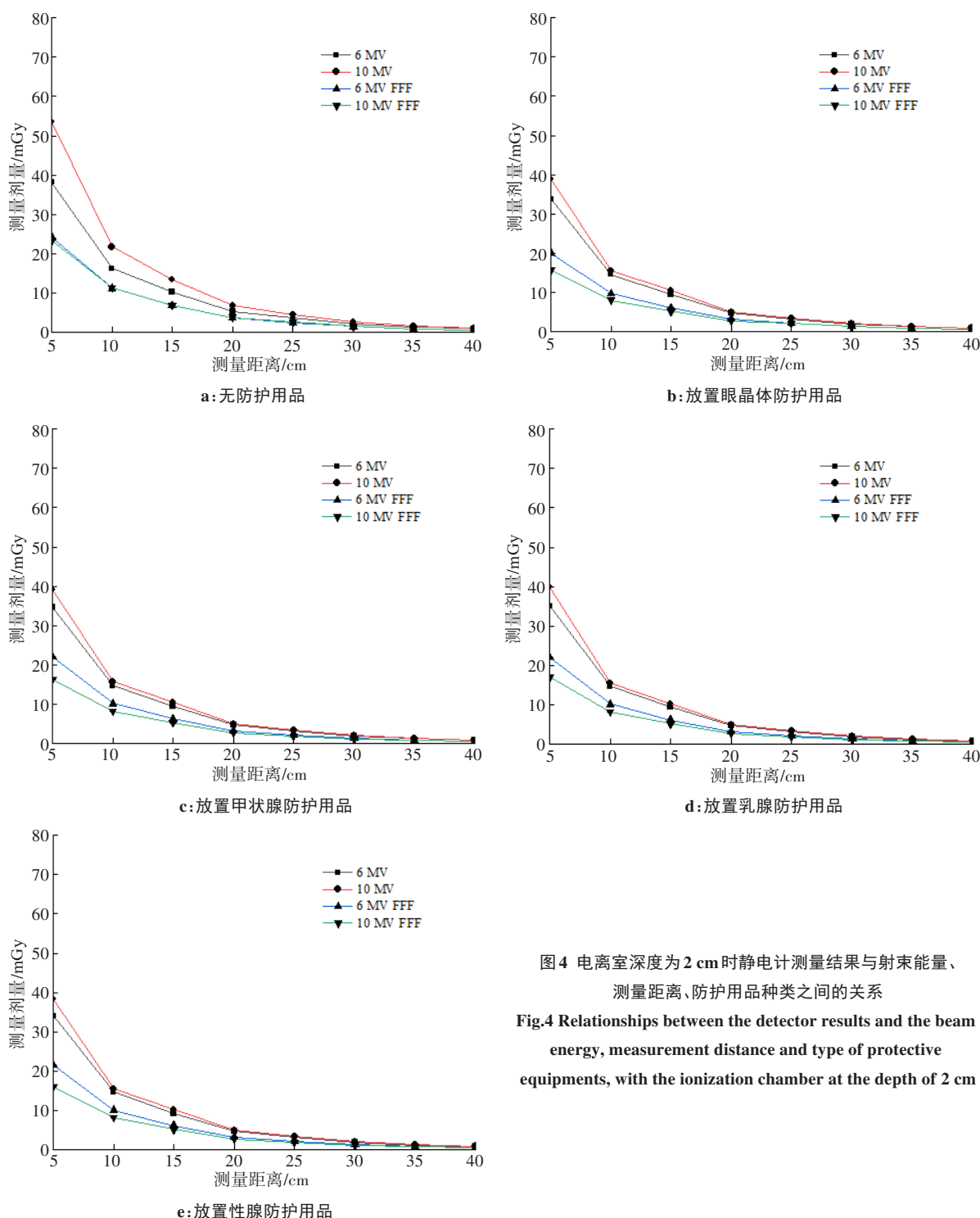


图4 电离室深度为2 cm时静电计测量结果与射束能量、测量距离、防护用品种类之间的关系  
Fig.4 Relationships between the detector results and the beam energy, measurement distance and type of protective equipments, with the ionization chamber at the depth of 2 cm

MV FFF,距离射野边缘5~30 cm的范围内,防护效果最差,仅降低10%以下。因此对于使用6 MV的低能射线,深度大于2 cm的正常组织,使用该类型的防护用品意义不大。但对于浅层需要保护的正常组织例如眼晶体、甲状腺、腮腺、性腺等推荐使用防护用品,可以达到显著的防护效果。

本研究结果证明,使用铅防护用品时,高能射束10 MV FFF有助于减少射野外辐射剂量。此结果基于Varian公司最新的全数字化Edge加速器平台,在此数字化平台上还有TrueBeam加速器和VitalBeam

加速器,相应的结果在这两台加速器上也有参考价值。Wijesooriya<sup>[19]</sup>在TrueBeam机器上的测量得到相似的结论。因此对于有铅防护用品保护的患者,剂量师或物理师在进行放疗计划设计时可以考虑适当使用较高能量的FFF模式。

由于测量时间有限,本研究仅使用固体水进行模拟测量,未来本研究将扩展到仿真人体模型测量,蒙特卡洛数值模拟方案相结合的方式,研究实际治疗条件下射野外的剂量水平与防护方法。

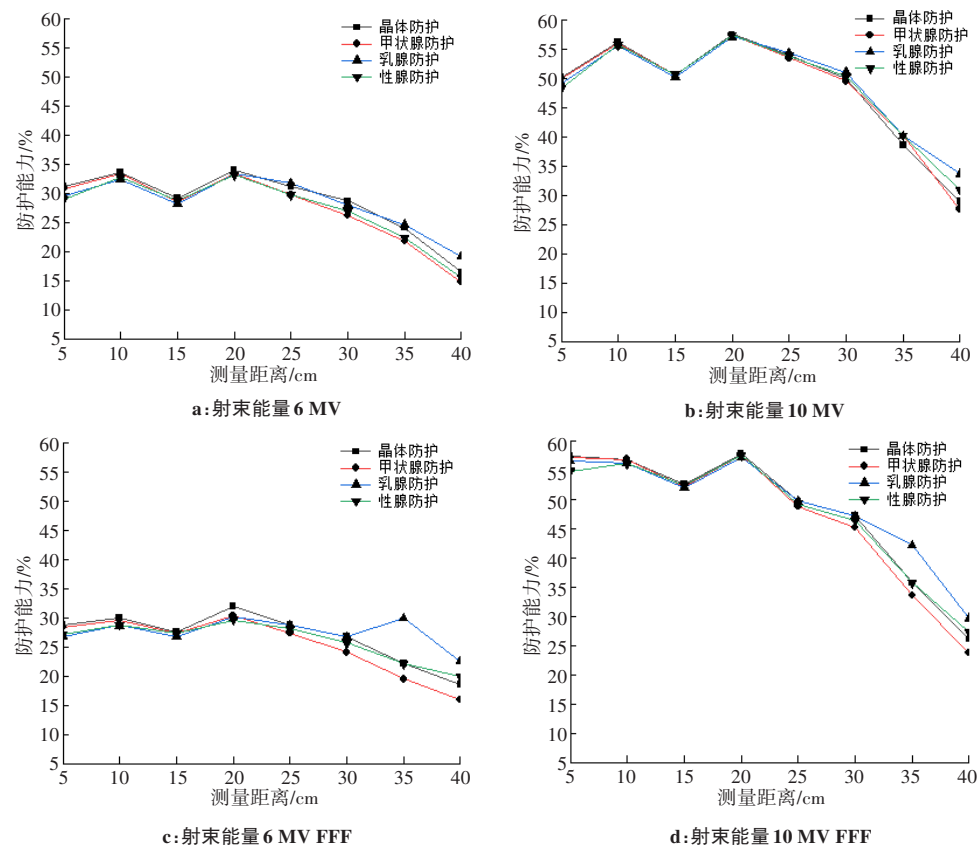


图5 电离室位于表面下1 cm时铅防护用品防护效果与射束能量、测量距离、防护用品种类间的关系

Fig.5 Relationships between the protective effect of lead protective equipments and the beam energy, measurement distance and type of protective equipments, when the ionization chamber is located at 1 cm below the surface

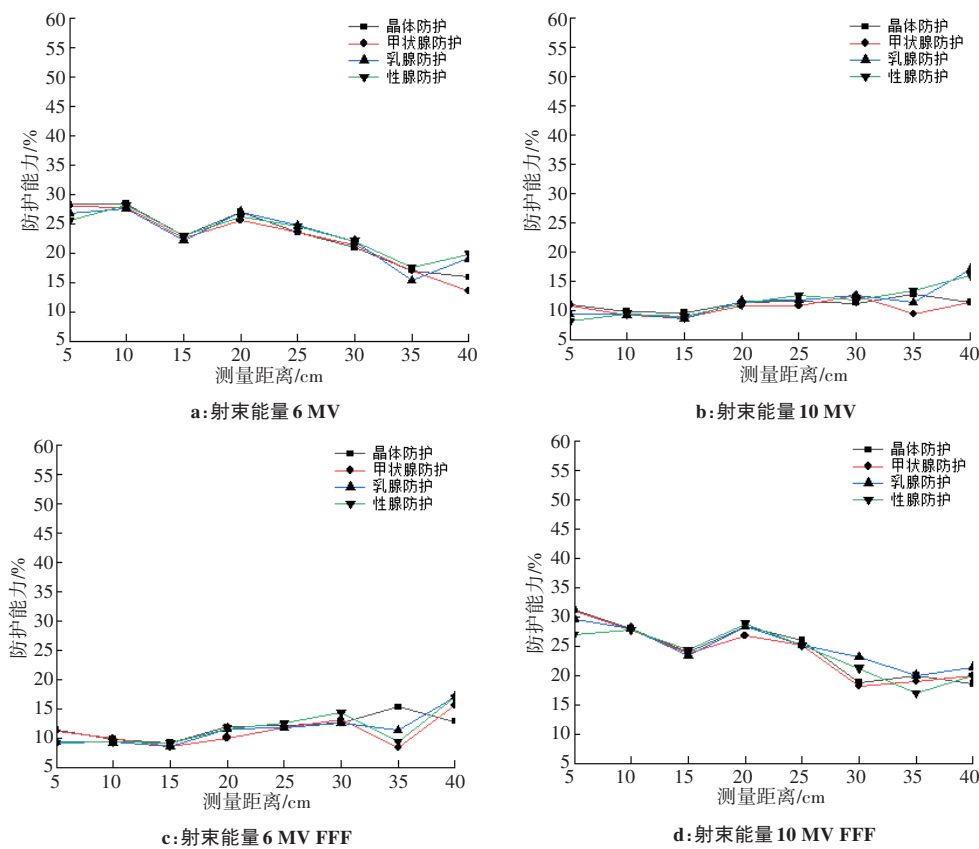


图6 电离室位于表面下2 cm时铅防护用品防护效果与射束能量、测量距离、防护用品种类间的关系

Fig.6 Relationships between the protective effect of lead protective equipments and the beam energy, measurement distance and type of protective equipments, when the ionization chamber is located at 2 cm below the surface

## 【参考文献】

- [1] EZZELL G A, GALVIN J M, LOW D, et al. Guidance document on delivery, treatment planning, and clinical implementation of IMRT: report of the IMRT subcommittee of the AAPM radiation therapy committee[J]. *Med Phys*, 2003, 30(8): 2089-2115.
- [2] DAWSON L A, JAFFRAY D A. Advances in image-guided radiation therapy[J]. *J Clin Oncol*, 2007, 25(8): 938-946.
- [3] KRISHNATRY R, BHATIA J, MURTHY V, et al. Survey on adaptive radiotherapy practice[J]. *Clin Oncol*, 2018, 30(12): 819.
- [4] 汪金龙, 屈卫卫, 谢树青, 等. 扫描治疗头的蒙特卡罗模型研究[J]. *中国医学物理学杂志*, 2019, 36(9): 1001-1007.  
WANG J L, QU W W, XIE S Q, et al. Investigation of a Monte Carlo model of scanning nozzle[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2019, 36(9): 1001-1007.
- [5] SMITH M A, SEIBEL N L, ALTEKRUSE S F, et al. Outcomes for children and adolescents with cancer: challenges for the twenty-first century[J]. *J Clin Oncol*, 2010, 28(15): 2625-2634.
- [6] HARRISON R. Out-of-field doses in radiotherapy: input to epidemiological studies and dose-risk models[J]. *Phys Med*, 2017, 42: 239-246.
- [7] KRY S F, BEDNARZ B, HOWELL R M, et al. AAPM TG 158: measurement and calculation of doses outside the treated volume from external-beam radiation therapy[J]. *Med Phys*, 2017, 44(10): E391-E429.
- [8] XU X G, BEDNARZ B, PAGANETTI H. A review of dosimetry studies on external-beam radiation treatment with respect to second cancer induction[J]. *Phys Med Biol*, 2008, 53(13): R193-R241.
- [9] BEZIN J V, VERES A, LEFKOPOULOS D, et al. Field size dependent mapping of medical linear accelerator radiation leakage[J]. *Phys Med Biol*, 2015, 60(5): 2103-2106.
- [10] ZHU T C, BJÄRNGÅRD B E. Head scatter off-axis for megavoltage X rays[J]. *Med Phys*, 2003, 30(4): 533-543.
- [11] CHOFOR N, HARDER D, WILLBORN K C, et al. Internal scatter, the unavoidable major component of the peripheral dose in photon-beam radiotherapy[J]. *Phys Med Biol*, 2012, 57(6): 1733-1743.
- [12] 胡盼盼, 卓维海, 孔燕, 等. 铅眼镜对介入放射工作人员眼晶状体的防护效果研究[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2014, 34(12): 927-930.  
HU P P, ZHUO W H, KONG Y, et al. Shielding effect of lead glasses on eye lens exposure in interventional radiologists[J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2014, 34(12): 927-930.
- [13] 李广民, 林志凯, 彭如臣, 等. 甲状腺-乳腺防护衣在乳腺X线摄影中降低辐射剂量的研究[J]. *中国医学物理学杂志*, 2019, 36(6): 653-657.  
LI G M, LIN Z K, PENG R C, et al. Protective effect of protective clothing on the thyroid and mammary gland in digital mammography[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2019, 36(6): 653-657.
- [14] 习勉, 梁健, 孙文钊, 等. 鼻咽癌调强放射治疗后放射诱发肿瘤发生风险的预测分析[J]. *中国医学物理学杂志*, 2016, 33(1): 6-9.  
XI M, LIANG J, SUN W Z, et al. Predicted risk of radiation-induced malignancy after intensity-modulated radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2016, 33(1): 6-9.
- [15] BRENNER D J, CURTIS R E, HALL E J, et al. Second malignancies in prostate carcinoma patients after radiotherapy compared with surgery[J]. *Cancer*, 2000, 88(2): 398-406.
- [16] 蒋绍惠, 张书旭, 王锐濠, 等. 电子线放疗患者屏蔽防护实验研究[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2016, 36(7): 517-523.  
JIANG S H, ZHANG S X, WANG R H, et al. Experimental research of shielding the patients during electron beam radiotherapy[J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2016, 36(7): 517-523.
- [17] KRY S F, TITT U, FOLLOWILL D, et al. A Monte Carlo model for out-of-field dose calculation from high-energy photon therapy[J]. *Med Phys*, 2007, 34(9): 3489-3499.
- [18] TAYLOR M L, KRON T, FRANICH R D. Assessment of out-of-field doses in radiotherapy of brain lesions in children[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2011, 79(3): 927-933.
- [19] WIJESOORIYA K. Part I: out-of-field dose mapping for 6X and 6X-flattening-filter-free beams on the TrueBeam for extended distances[J]. *Med Phys*, 2019, 46(2): 868-876.

(编辑:薛泽玲)