

## kV X 射线治疗设备质量控制现状

冯泽臣<sup>1</sup>, 王子涵<sup>1</sup>, 马永忠<sup>1</sup>, 徐辉<sup>2</sup>, 马桥<sup>3</sup>, 李海亮<sup>4</sup>

1. 北京市疾病预防控制中心, 北京 100013; 2. 中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所, 北京 100088;  
3. 四川省疾病预防控制中心, 四川 成都 610044; 4. 山东第一医科大学 (山东省医学科学院) 预防医学科学学院  
(放射医学研究所), 山东 济南 250062

**摘要:** kV X 射线治疗是第一种放射治疗方式, 在 Co-60 治疗机和电子直线加速器发明之前广泛用于治疗多种形式的肿瘤包括深部肿瘤, 之后逐渐被替代。kV X 射线治疗设备需要的空间和屏蔽低, 在治疗皮肤病变和浅层肿瘤方面仍具有应用价值, 特别是近年来 kV X 射线用于疤痕疙瘩治疗以及电子近距离设备的出现用于腔内、术中和浅表放射治疗, kV X 射线治疗又逐渐兴起。kV X 射线治疗设备的质量控制是确保患者治疗效果和安全的关键, 本文对 kV X 射线治疗设备质量控制现状进行综述, 为 kV X 射线治疗设备质量控制检测标准的制订提供参考。

**关键词:** kV X 射线治疗; 电子近距离治疗; 质量控制; 调试; 参考剂量学

中图分类号: R812 文献标识码: R 文章编号: 1004-714X(2024)04-0466-06

## Current status of quality control of kV X-ray radiotherapy equipment

FENG Zechen<sup>1</sup>, WANG Zihan<sup>1</sup>, MA Yongzhong<sup>1</sup>, XU Hui<sup>2</sup>, MA Qiao<sup>3</sup>, LI Hailiang<sup>4</sup>

1. Beijing Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100013 China; 2. National Institute for Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100088 China; 3. Sichuan Center for Disease Control and Prevention, Chengdu 610044 China; 4. School of Preventive Medicine Sciences & Institute of Radiation Medicine, Shandong First Medical University & Shandong Academy of Medical Sciences, Jinan 250062 China

**Abstract:** kV X-ray radiotherapy was the primary mode of radiotherapy widely used to treat many types of cancer, including deep tumors, before the invention of the Co-60 therapy machine and the electron linear accelerator, which gradually replaced kV X-ray radiotherapy. kV X-ray radiotherapy equipment requires less space and shielding, and still has application value in the treatment of skin lesions and superficial tumors. Especially in recent years, kV X-ray has been used in the treatment of keloid, and electronic brachytherapy equipment has been used in intracavitary, intraoperative, and superficial radiotherapy. Therefore, kV X-ray radiotherapy has seen renewed application. The quality control of kV X-ray radiotherapy equipment is the key to ensure the treatment effect and safety of patients. This paper reviews the current status of quality control of kV X-ray radiotherapy equipment and provides a reference for the formulation of quality control assessment standards for kV X-ray radiotherapy equipment.

**Keywords:** kV X-ray radiotherapy; Electronic brachytherapy; Quality control; Commissioning; Reference dosimetry

**Corresponding author:** LI Hailiang, E-mail: 15588865615@163.com

X 射线在医疗应用根据使用的能量分为 MV X 射线和 kV X 射线。MV X 射线用于放射治疗, 因为它们容易穿透组织照射深部肿瘤并可以保护周围的其他正常组织; kV X 射线主要用于成像, 例如计算机断层扫描(CT), 普通 X 射线摄影、乳腺 X 射线摄影、牙科 X 射线摄影和血管造影等<sup>[1]</sup>。kV X 射线穿透力更低, 组织成份对其更敏感, 它们用于治疗通常限于皮肤癌等疾病。在 Co-60 治疗机和电子直线加

速器发明之前, kV X 射线治疗也广泛用于治疗多种形式的肿瘤包括深部肿瘤。虽然用 kV X 射线治疗深部肿瘤具有挑战性, 但用 kV X 射线进行放射治疗仍然有一些优势。kV X 射线的产生比 MV X 射线的产生复杂性小得多, 用于临床的 MV 直线加速器设计复杂, 成本高。操作直线加速器的能力和空间要求高于操作 kV X 射线设备, 直线加速器需要具有 2 m 厚的混凝土墙的屏蔽以保护工作人员; kV X 射线只需要

几毫米的铅屏蔽。基于以上优势,近年来 kV X 射线在皮肤科疤痕疙瘩的治疗上得到了广泛应用,特别是电子近距离设备的研发应用于腔内、术中和浅表放射治疗, kV X 射线治疗又逐渐兴起。不论使用 MV X 射线还是 kV X 射线进行治疗,设备的质量控制是确保患者治疗效果和安全的重要内容,针对 MV X 射线治疗已有多项现行有效的质量控制检测行业标准, kV X 射线治疗尚缺少行业标准,本文对 kV X 射线治疗设备质量控制现状进行综述,为 kV X 射线治疗设备质量控制检测标准的制订提供参考。

## 1 kV X 射线治疗设备现状

kV X 射线治疗设备的主要厂家和型号包括美国 Sensus SRT-100、英国 Xstrahl 系列 (Gulmay medical 和 Pantak 均合并到 Xstrahl)、德国 Womed 系列、瑞典医科达 Esteya、美国 XOFT Axxent Electronic Brachytherapy System (已被医科达收购)、德国蔡司 INTRABEAM 和英国 Ariane Medical Papillon 50。

目前在国内取得医疗器械注册的分别为美国 Sensus SRT-100、注册产品名称“X 射线放射治疗系统”,用于对皮肤原发性恶性上皮细胞癌和疤痕疙瘩进行浅层治疗;德国蔡司的 INTRABEAM、注册产品名称“放射外科手术系统”,用于术中放疗;美国 XOFT Axxent Electronic Brachytherapy System,注册产品名称“X 射线近距离治疗系统”,注册的施源器为宫颈和球囊,用于妇科腔内治疗和乳腺部位治疗。

万斌等<sup>[2]</sup>总结了近距离放射治疗系统的技术与设备的发展过程及应用现状,将近距离治疗设备分为高剂量率近距离放射治疗机、术中放射治疗机和微型 X-Ray 近距离放射治疗机 3 类,其中高剂量率近距离放射治疗机主要为 Ir-192 放射源治疗,术中放射治疗机涉及的 kV X 射线治疗设备为德国蔡司 INTRABEAM,微型 X-Ray 近距离放射治疗机涉及的为 XOFT Axxent 微型 X-Ray 近距离治疗机。Ramachandran<sup>[3]</sup>将 SRT-100、Esteya、XOFT Axxent、INTRABEAM 和 Ariane Medical Papillon 50 归类为电子近距离治疗设备,而 Eaton<sup>[4]</sup>认为 SRT-100 接近于传统的 Xstrahl 100、Xstrahl 150 kV X 射线治疗设备。美国近距离治疗学会<sup>[5]</sup>在电子近距离治疗共识中提及的电子近距离治疗设备为 Esteya、XOFT Axxent 和 INTRABEAM。

综上, kV X 射线治疗设备可分为使用传统 X 射线管的设备和电子近距离治疗设备。传统 kV X 射线

治疗分为低能量和中能量范围,用于两种不同类型的放射治疗即“浅层”和“深层”,国际和国外组织 (IAEA、AAPM、瑞士、加拿大)<sup>[6-9]</sup>定义低能 X 射线为 10~100 kV,中能 X 射线为 100~300 kV。SRT-100、Xstrahl 系列、Womed 系列使用传统 X 射线管,这些设备中浅层 X 射线治疗设备的 kV 范围一般为 50~100 kV,源皮距为 15~25 cm;深层 X 射线治疗设备会包含浅层 X 射线治疗设备的能量段,可设置的 kV 可达到 300 kV,源皮距为 25~50 cm。近距离放射治疗是指使用一个或多个放射源,放射源处于靶区内部或者靠近靶区的放射治疗<sup>[10]</sup>,一些 kV X 射线设备使用微型 X 射线源可实现比传统 kV X 射线治疗设备更近的源皮距,这些设备称为电子近距离治疗设备,包括 Esteya、XOFT Axxent、INTRABEAM 和 Papillon 50,可进行浅表放射治疗、术中放射治疗和腔内放射治疗。其中瑞典医科达 Esteya 主要用于皮肤疾病的近距离治疗,德国蔡司 INTRABEAM 主要用于术中近距离放射治疗, Xoft Axxent 使用的微型 X 射线源接近于高剂量率近距离治疗机的放射源主要用于腔内治疗采用球囊施源器时也可用于术中放射治疗,英国 Ariane Medical 的 Papillon 50 主要用于直肠癌治疗, INTRABEAM、Xoft Axxent 和 Papillon 50 均有平面施源器可用于皮肤疾病的近距离治疗。各类 kV X 射线治疗设备见图 1。

英国 16 年的调查<sup>[11]</sup>, 49 家机构 (73% 的放疗机构)配置有 58 台 kV X 射线治疗设备, 75% 的设备为英国 Xstrahl 系列, 8 台为电子近距离治疗设备。近年来,我国在用 SRT-100 和 INTRABEAM 均达到几十台, SRT-100 主要为皮肤病医院及整形医院用于疤痕疙瘩的治疗, INTRABEAM 主要为术中放射治疗;北京地方医院在用 SRT-100 共 4 台<sup>[12]</sup>, INTRABEAM 共 3 台。

## 2 kV X 射线治疗设备调试和质量控制

医疗机构对于 kV X 射线治疗设备调试和质量控制的流程是在购置取得医疗器械注册的设备安装完成后进行验收检测 (Acceptance), 查验设备指标与厂商声称或标准、规范要求的符合性,完成验收检测后开始进行调试 (Commissioning),调试需要采集更多的设备数据,并模拟临床治疗进行验证,在调试过程中制定质量保证计划、建立基线,后续进行周期性测试。

kV X 射线治疗设备在进行医疗器械注册时要满



注：传统 kV X 射线治疗设备：A. SRT-100、B. Xstrahl 系列、C. Womed 系列；电子近距离治疗设备：D. Esteya、E. INTRABEAM、F. Xofigo Axxent、G. Papillon50。

图 1 kV X 射线治疗设备  
Figure 1 kV X-ray radiotherapy equipment

足 GB 9706.208—2021<sup>[10]</sup> 医用电气设备第 2~8 部分：能量为 10 kV~1 MV 治疗 X 射线设备的基本安全和基本性能专用要求。放射诊疗设备在医疗机构的使用要满足《放射诊疗管理规定》，在办理《放射诊疗许可证》时要提交验收检测报告，每年进行状态检测，定期进行稳定性检测。验收检测、状态检测和稳定性检测的检测项目和周期会通过制定卫生行业标准来规定。卫生行业标准 GBZ 131—2017<sup>[13]</sup> 医用 X 射线治疗放射防护要求中有一部分内容为质量控制检测要求，现 GBZ 131—2017 被 GBZ 121—2020<sup>[14]</sup> 放射治疗放射防护要求替代，GBZ 121—2020 中没有 kV X 射线治疗设备质量控制内容，对于 kV X 射线治疗设备质量控制在卫生行业标准中尚缺失。

加拿大医学物理学家组织 (Canadian Organization of Medical Physicists, COMP) 发布了 kV X 射线治疗设备质量控制导则，给出了日检、周检、月检和年检的检测项目和要求<sup>[9]</sup>。澳大利亚物理学家和医学工程师学院 (The Australasian College of Physical Scientists and Engineers in Medicine, ACPSEM) 对 kV X 射线治疗设备的调试、参考剂量学、日检、月检和年检项目和要求提出了推荐<sup>[15]</sup>。美国医学物理学会 (American Association of Physicists in Medicine, AAPM) 的 2 个工作组分别对电子近距离机在浅表治

疗、腔内和术中放射治疗发布了报告，讨论了电子近距离治疗设备的特性、调试、临床流程和质量保证<sup>[16-17]</sup>。

国内外学者的一些研究大都是针对某一型号的 kV X 射线治疗设备的性能测试和调试。李兆斌等<sup>[18]</sup> 利用蔡司公司提供的水箱、剂量仪、电离室等，测量术中立体定向放射外科系统 INTRABEAM 的临床数据。欧阳斌等<sup>[19]</sup> 采用专用水箱、平板电离室和静电计等测量仪器，对 INTRABEAM 系统 X 射线源和不同球形施源器深度剂量率，x、y 平面剂量分布各向同性进行了测量。张绍刚和林海磊等<sup>[20-21]</sup> 采用 PTW 2962 有机玻璃 (PMMA) 模体和 PTW 34013 平板电离室对 SRT-100 低能 X 线治疗机的水模体表面的吸收剂量率、重复性、积分剂量线性、射野输出因数、射野中心轴百分深度剂量 (percentage depth dose, PDD) 和射野对称性进行了测试，其采用有机玻璃 (PMMA) 模体测得的 PDD 数据在临床应用值得注意，Hill 等<sup>[22]</sup> 研究了在使用不同材料模体测量时的影响，提出 PMMA 模体不适宜做 kV X 射线治疗设备 PDD 测量。

Garcia-Martinez 等<sup>[23]</sup> 对医科达 Esteya 使用免冲洗胶片测量了均整度、对称性、半影，使用奥利科剂量仪测量了 kV 和半值层 HVL，使用 PTW34013 和固体水模体测量了 0~10 mm 的百分深度剂量，使用 PTW34013 型平板电离室测量参考剂量和线性，为 Esteya 的调试提供了详细的方法学。Candela-Juan 等<sup>[24]</sup>



同样对医科达 Esteya 的调试和周期性测试的检测项目、设备和检测方法进行了详细的描述,参考剂量学分别使用 A20 型平板电离室空气中测量和 PTW 34013 型平板电离室固体水模体表面测量 2 种方法,周期性测试使用了由厂家提供的专用的二极管质量保证工具。Sheu 等<sup>[25]</sup>对 SRT-100 的调试进行了报道,并比较了不同电离室测量的参考剂量差异。Aspradakis 等<sup>[26]</sup>对 Womed T-200 进行了验收检测和调试,测量了泄漏辐射、半值层 HVL、参考剂量、线性、均整度、对称性。Jordan<sup>[27]</sup>在水模体和塑料等效水中测量了百分深度剂量,并与 BJR 25 的数据进行了比较。Xiong 等<sup>[28]</sup>报道了 Xstrahl 150 的特性和百分深度剂量。Sethi 等<sup>[29]</sup>对 INTRABEAM 的调试、质量控制测试等进行了多中心的回顾。

对于 kV X 射线治疗,尽管剂量给予很简单,但线束质量、参考剂量和相对剂量的确定并不简单,在调试和质量控制过程中要选取适当的模体和测量方法。kV X 射线治疗调试中百分深度剂量的测量,如果不能直接测量,推荐使用 BJR 25<sup>[27]</sup>中的数据。

### 3 kV X 射线治疗设备参考剂量学

参考剂量学是在参考条件下对设备的输出剂量进行测量,在实际中习惯称为绝对剂量测量,是调试和质量控制最重要内容。

国外多个组织发布了传统 kV X 射线治疗设备参考剂量学的测量方法报告,包括国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)<sup>[6]</sup>、AAPM<sup>[7]</sup>、英国医学物理与工程研究所<sup>[30]</sup>(Institute of Physics and Engineering in Medicine, IPeM)、瑞士放射生物学和医学物理学学会(Swiss Society of Radiobiology and Medical Physics, SSRMP)<sup>[9]</sup>。参考剂量学的测量分为基于空气比释动能校准因子和基于水吸收剂量校准因子。10~100 kV X 射线推荐的参考测量深度为表面,100~300 kV X 射线推荐的参考测量深度为水下 2 cm。10~100 kV X 射线基于空气比释动能校准因子需在空气中测量后依据辐射质(半值层)对应的水空气质能吸收系数比和反散射因子的修正得到水表面的吸收剂量,测量推荐使用平板电离室。100~300 kV X 射线基于空气比释动能校准因子在水下 2 cm 测量后再依据辐射质(半值层)对应的水空气质能吸收系数比修正,因测量在水中不需再进行反散射因子修正,测量推荐使用指形电离室。基于水吸收剂量校准因子需考虑 IAEA TRS398<sup>[6]</sup>中的不同射野

尺寸和辐射质的修正因子。不同的参考剂量学方案的测量条件和修正因子略有差别, Rosenschöld 等<sup>[31]</sup>比较了不同的参考剂量学方案最终测量结果的影响,总体是能达到一致的。由于具备 IAEA TRS398<sup>[6]</sup>中水吸收剂量标准的实验室较少尚处于发展阶段,英国大多采用 IPeM 的参考剂量学方案,美国和欧洲其他国家采用 AAPM 方案为主。我国对于 kV X 射线治疗水平剂量计的校准目前是基于空气比释动能<sup>[32]</sup>,建议 kV X 射线治疗设备参考剂量学使用 AAPM 方案。

除 AAPM 一个工作组对电子近距离治疗设备 INTRABEAM 的剂量学考虑发布了报告<sup>[33]</sup>,其他电子近距离治疗设备的参考剂量学目前主要以厂家提供的方法为主。

### 4 结 论

传统的 kV X 射线治疗设备分为低能 X 射线(浅层)和中能 X 射线(深层),除参考剂量学测量条件不同外其他质量控制项目和要求基本一致。而电子近距离治疗有的用于术中放射治疗,有的模仿后装近距离放射源治疗方式,当采用平面施源器时又可实现类似传统低能 X 射线的治疗方式,这些设备应用情景和结构不同、绝对剂量测量方法和质量控制测试内容均存在很大差异。综上,kV X 射线治疗设备应根据设备特点和应用分别制定质量控制检测规范。

**利益冲突** 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展,排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

**作者贡献声明** 冯泽臣负责提出研究方向、设计论文框架及起草论文;王子涵、马永忠、徐辉、马桥负责文献调研及资料收集;李海亮负责设计研究思路及审核论文

### 参考文献

- [1] Breikreutz DY, Weil MD, Bazalova-Carter M. External beam radiation therapy with kilovoltage x-rays[J]. *Phys Med*, 2020, 79: 103-112. DOI: 10.1016/j.ejmp.2020.11.001.
- [2] 万斌,姚进. 近距离放射治疗系统的研究进展[J]. *中国医疗设备*, 2021, 36(7): 155-160. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1633.2021.07.035.
- [3] Wan B, Yao J. Research progress of brachytherapy system[J]. *China Med Devices*, 2021, 36(7): 155-160. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1633.2021.07.035. (in Chinese)
- [4] Ramachandran P. New era of electronic brachytherapy[J]. *World J Radiol*, 2017, 9(4): 148-154. DOI: 10.4329/wjr.v9.i4.148.
- [5] Eaton DJ. Electronic brachytherapy—current status and future

- directions[J]. *Br J Radiol*, 2015, 88(1049): 20150002. DOI: [10.1259/bjr.20150002](https://doi.org/10.1259/bjr.20150002).
- [5] Tom MC, Hepel JT, Patel R, et al. The American Brachytherapy Society consensus statement for electronic brachytherapy[J]. *Brachytherapy*, 2019, 18(3): 292-298. DOI: [10.1016/j.brachy.2018.10.006](https://doi.org/10.1016/j.brachy.2018.10.006).
- [6] International Atomic Energy Agency. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy[R]. Vienna: IAEA, 2024.
- [7] Ma CM, Coffey CW, DeWerd LA, et al. AAPM protocol for 40-300 kV x-ray beam dosimetry in radiotherapy and radiobiology[J]. *Med Phys*, 2001, 28(6): 868-893. DOI: [10.1118/1.1374247](https://doi.org/10.1118/1.1374247).
- [8] Aspradakis MM, Buchillier T, Kohler G, et al. SSRMP Recommendations No 9: Reference dosimetry in low and medium energy x-ray beams[J]. *Z Med Phys*, 2023, 33(4): 601-617. DOI: [10.1016/j.zemedi.2022.12.003](https://doi.org/10.1016/j.zemedi.2022.12.003).
- [9] Furstoss C. COMP report: CPQR technical quality control guidelines for kilovoltage X ray radiotherapy machines[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2018, 19(2): 18-21. DOI: [10.1002/acm2.12228](https://doi.org/10.1002/acm2.12228).
- [10] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB 9706.208—2021 医用电气设备 第2-8部分: 能量为10kV至1MV治疗X射线设备的基本安全和基本性能专用要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 9706.208—2021 Medical electrical equipment Part2-8: Particular requirements for the basic safety and essential performance of therapeutic X-ray equipment operating in the range 10kV to 1 MV[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [11] Palmer AL, Pearson M, Whittard P, et al. Current status of kilovoltage (kV) radiotherapy in the UK: Installed equipment, clinical workload, physics quality control and radiation dosimetry[J]. *Br J Radiol*, 2016, 89(1068): 20160641. DOI: [10.1259/bjr.20160641](https://doi.org/10.1259/bjr.20160641).
- [12] 冯泽臣, 马永忠, 王宏芳, 等. 北京地方所属外照射放射治疗设备输出剂量调查分析[J]. *中国辐射卫生*, 2021, 30(2): 123-128. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2021.02.001](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2021.02.001).
- Feng ZC, Ma YZ, Wang HF, et al. Output dose investigation and analysis of external beam radiotherapy in Beijing[J]. *Chin J Radiol Health*, 2021, 30(2): 123-128. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2021.02.001](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2021.02.001). (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GBZ 131—2017 医用X射线治疗放射防护要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- National Health and Family Planning Commission of PRC. GBZ 131—2017 Requirements for radiological protection in medical X-ray therapy[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [14] 国家卫生健康委员会. GBZ 121—2020 放射治疗放射防护要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- National Health Commission of the People's Republic of China. GBZ 121—2020 Requirements for radiological protection in radiotherapy[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)
- [15] Hill R, Healy B, Butler D, et al. Australasian recommendations for quality assurance in kilovoltage radiation therapy from the Kilovoltage Dosimetry Working Group of the Australasian College of Physical Scientists and Engineers in Medicine[J]. *Australas Phys Eng Sci Med*, 2018, 41(4): 781-808. DOI: [10.1007/s13246-018-0692-1](https://doi.org/10.1007/s13246-018-0692-1).
- [16] Fulkerson RK, Perez-Calatayud J, Ballester F, et al. Surface brachytherapy: Joint report of the AAPM and the GEC-ESTRO Task Group No. 253[J]. *Med Phys*, 2020, 47(10): e951-e987. DOI: [10.1002/mp.14436](https://doi.org/10.1002/mp.14436).
- [17] Thomadsen BR, Biggs PJ, Cardarelli GA, et al. Electronic intracavitary brachytherapy quality management based on risk analysis: the report of AAPM TG 182[J]. *Med Phys*, 2020, 47(4): e65-e91. DOI: [10.1002/mp.13910](https://doi.org/10.1002/mp.13910).
- [18] 李兆斌, 熊霏, 黄国锋. 术中光子立体定向放射治疗的质量保证和质量控制[J]. *中国医学物理学杂志*, 2019, 36(10): 1157-1161. DOI: [10.3969/j.issn.1005-202X.2019.10.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-202X.2019.10.008).
- Li ZB, Xiong F, Huang GF. Quality assurance and quality control for intraoperative photon-based stereotactic body radiotherapy[J]. *Chin J Med Phys*, 2019, 36(10): 1157-1161. DOI: [10.3969/j.issn.1005-202X.2019.10.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-202X.2019.10.008). (in Chinese)
- [19] 欧阳斌, 王振宇, 黄伯天, 等. 低能光子线术中放射治疗系统的剂量学特性分析和潜在临床应用[J]. *中华肿瘤防治杂志*, 2015, 22(23): 1837-1842. DOI: [10.16073/j.cnki.cjcpt.2015.23.011](https://doi.org/10.16073/j.cnki.cjcpt.2015.23.011).
- Ouyang B, Wang ZY, Huang BT, et al. Dosimetry characteristics of a low energy photon intra-operative radiotherapy system and its potential in clinical application[J]. *Chin J Cancer Prev Treat*, 2015, 22(23): 1837-1842. DOI: [10.16073/j.cnki.cjcpt.2015.23.011](https://doi.org/10.16073/j.cnki.cjcpt.2015.23.011). (in Chinese)
- [20] 林海磊, 张绍刚. SRT-100 低能 X 线治疗机的输出量检测及其质量保证[J]. *医疗装备*, 2017, 30(1): 17-22. DOI: [10.3969/j.issn.1002-2376.2017.01.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-2376.2017.01.010).
- Lin HL, Zhang SG. Output measurement and quality assurance of SRT-100 low-energy X-ray therapy machine[J]. *Chin J Med Device*, 2017, 30(1): 17-22. DOI: [10.3969/j.issn.1002-2376.2017.01.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-2376.2017.01.010). (in Chinese)
- [21] 张绍刚, 杜海燕, 周振杰. 低能 X 射线输出量的测算与质量保证[J]. *计量技术*, 2018(6): 14-16. DOI: [10.3969/j.issn.1000-0771.2018.06.04](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0771.2018.06.04).
- Zhang SG, Du HY, Zhou ZJ. Output measurement and quality assurance of low energy X-ray[J]. *Metro Sci Technol*, 2018(6): 14-16. DOI: [10.3969/j.issn.1000-0771.2018.06.04](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0771.2018.06.04). (in Chinese)
- [22] Hill R, Kuncic Z, Baldock C. The water equivalence of solid phantoms for low energy photon beams[J]. *Med Phys*, 2010, 37(8): 4355-4363. DOI: [10.1118/1.3462558](https://doi.org/10.1118/1.3462558).
- [23] Garcia-Martinez T, Chan JP, Perez-Calatayud J, et al. Dosimetric characteristics of a new unit for electronic skin brachytherapy[J]. *J*

- Contemp Brachytherapy*, 2014, 6(1): 45-53. DOI: [10.5114/jcb.2014.40770](#).
- [24] Candela-Juan C, Niatetski Y, Ouhib Z, et al. Commissioning and periodic tests of the Esteya® electronic brachytherapy system[J]. *J Contemp Brachytherapy*, 2015, 7(2): 189-195. DOI: [10.5114/jcb.2015.51523](#).
- [25] Sheu RD, Powers A, Lo YC. Commissioning a 50 – 100 kV X-ray unit for skin cancer treatment[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2015, 16(2): 161-174. DOI: [10.1120/jacmp.v16i2.5182](#).
- [26] Aspradakis MM, Zucchetti P. Acceptance, commissioning and clinical use of the Womed T-200 kilovoltage X-ray therapy unit[J]. *Br J Radiol*, 2015, 88(1055): 20150001. DOI: [10.1259/bjr.20150001](#).
- [27] Jordan TJ. Central axis depth dose data for use in radiotherapy[J]. *Br J Radiol*, 1996, 25: 62-109.
- [28] Xiong ZY, Zhong YC, Banks TI, et al. Machine characterization and central axis depth dose data of a superficial x-ray radiotherapy unit[J]. *Biomed Phys Eng Express*, 2023, 9(1): 015005. DOI: [10.1088/2057-1976/aca611](#).
- [29] Sethi A, Gros S, Brodin P, et al. Intraoperative radiation therapy with 50 kV x-rays: A multi-institutional review[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2024, 25(3): e14272. DOI: [10.1002/acm2.14272](#).
- [30] Aukett RJ, Burns JE, Greener AG, et al. Addendum to the IPEMB code of practice for the determination of absorbed dose for x-rays below 300 kV generating potential (0.035 mm Al-4 mm Cu HVL)[J]. *Phys Med Biol*, 2005, 50(12): 2739-2748. DOI: [10.1088/0031-9155/50/12/001](#).
- [31] Rosenschöld PMA, Nilsson P, Knöös T. Kilovoltage x-ray dosimetry - An experimental comparison between different dosimetry protocols[J]. *Phys Med Biol*, 2008, 53(16): 4431-4442. DOI: [10.1088/0031-9155/53/16/014](#).
- [32] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. JJG 912—2010 治疗水平电离室剂量计检定规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. JJG 912—2010 Verification regulation of ion chamber dosimeters used in radiotherapy[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [33] Culberson WS, Davis SD, Kim GGY, et al. Dose-rate considerations for the INTRABEAM electronic brachytherapy system: report from the American association of physicists in medicine task group no. 292[J]. *Med Phys*, 2020, 47(8): e913-e919. DOI: [10.1002/mp.14163](#).

(收稿日期:2024-02-28)

## (上接第 453 页)

- [26] Aggarwal L, Mourya A, Choudhary S. Evolution of brachytherapy applicators for the treatment of cervical cancer[J]. *J Med Phys*, 2021, 46(4): 231. DOI: [10.4103/jmp.jmp\\_62\\_21](#).
- [27] 张永侠, 袁香坤, 史福敏, 等. 局部晚期宫颈癌腔内放疗联合组织间插植的剂量学研究[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2017, 37(12): 919-923. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.12.008](#). Zhang YX, Yuan XK, Shi FM, et al. A dosimetric analysis of combined intracavitary/interstitial brachytherapy for locally advanced cervical cancer[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2017, 37(12): 919-923. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.12.008](#). (in Chinese)
- [28] Wright JD, Matsuo K, Huang YM, et al. Prognostic performance of the 2018 international federation of gynecology and obstetrics cervical cancer staging guidelines[J]. *Obstet Gynecol*, 2019, 134(1): 49-57. DOI: [10.1097/aog.0000000000003311](#).
- [29] 刘萍, 黎志强, 柳攀, 等. FIGO 2018 子宫颈癌分期III期各亚期设置合理性探讨[J]. *中国实用妇科与产科杂志*, 2021, 37(6): 669-672. DOI: [10.19538/j.fk2021060116](#). Liu P, Li ZQ, Liu P, et al. Rationality of stage III substaging in FIGO 2018 staging of cervical cancer[J]. *Chin J Pract Gynecol Obstet*, 2021, 37(6): 669-672. DOI: [10.19538/j.fk2021060116](#). (in Chinese)
- [30] Pötter R, Dimopoulos J, Georg P, et al. Clinical impact of MRI assisted dose volume adaptation and dose escalation in brachytherapy of locally advanced cervix cancer[J]. *Radiother Oncol*, 2007, 83(2): 148-155. DOI: [10.1016/j.radonc.2007.04.012](#).
- [31] Wang F, Bu LY, Wu Q, et al. Comparison of computed tomography- and magnetic resonance imaging-based target delineation for cervical cancer brachytherapy[J]. *J Contemp Brachytherapy*, 2020, 12(4): 367-374. DOI: [10.5114/jcb.2020.98117](#).
- [32] Hellebust TP. Place of modern imaging in brachytherapy planning[J]. *Cancer Radiother*, 2018, 22(4): 326-333. DOI: [10.1016/j.canrad.2018.03.005](#).
- [33] Wachter-Gerstner N, Wachter S, Reinstadler E, et al. The impact of sectional imaging on dose escalation in endocavitary HDR-brachytherapy of cervical cancer: results of a prospective comparative trial[J]. *Radiother Oncol*, 2003, 68(1): 51-59. DOI: [10.1016/s0167-8140\(03\)00083-5](#).

(收稿日期:2024-03-19)