

· 论 著 ·

研究用 X 射线生物学辐照仪的放射防护评价与管理*

廖永华¹, 张 静², 梁志成², 陈盛强^{2△}

(1. 广州医科大学基础医学院科研共享平台, 广东 广州 511436; 2. 广州协和检测服务有限公司 510510;
3. 广州医科大学卫生管理学院, 广东 广州 511436)

[摘要] 目的 对某校科研共享平台的研究用生物学辐照仪建设项目, 进行职业病危害和放射防护评价分析。方法 2019—2021 年, 以 X 射线生物学辐照仪作为研究对象, 根据《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》(HJ1157-1993)、《职业性外照射个人监测规范》(GBZ128-2019) 和《电离辐射防护与辐射源安全标准》(GB18871-2002) 等国家法律法规文件要求, 采用现场调查、收集资料和现场检测的方法, 对职业性危害因素和预防措施进行综合评价分析。结果 仪器外表面 5 cm 周围检测点的剂量当量率最高为 0.13~0.44 $\mu\text{Sv/h}$, 最大个人剂量值为 0.21 mSv/a, 放射工作人员职业体检未发现异常, 以上结果均未达到规定的安全限值。结论 仪器的自屏蔽放射防护设施和管理措施满足防护要求, 使用单位应继续按照环保法规加强放射防护工作, 切实保障放射工作人员及公众的辐射安全和健康。

[关键词] 生物学辐照仪; 辐射监测; 个人剂量; 放射防护; 辐射安全

DOI:10.3969/j.issn.1009-5519.2023.05.001 中图分类号:R144

文章编号:1009-5519(2023)05-0721-04 文献标识码:A

Radiation protection evaluation and management of X-ray biological irradiators for research*

LIAO Yonghua¹, ZHANG Jing², LIANG Chengzhi², CHEN Shengqiang^{2△}

(1. Scientific research sharing platform, School of Basic Medical Sciences, Guangzhou Medical University, Guangzhou, Guangdong 511436, China; Guangzhou Concord Testing Services CO., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510510, China; 3. School of Health Management, Guangzhou Medical University, Guangzhou, Guangdong 511436, China)

[Abstract] **Objective** To evaluate and analyze the occupational hazards and radiation protection of the construction project of biological irradiator for research of this university's scientific research sharing platform. **Methods** From 2019 to 2021, the X-ray biological irradiator was taken as the research object. According to the requirements of national laws and regulations, such as The Technical Code for Radiation Dose Rate Measurement(HJ1157-1993), The Code for Personal Monitoring of Occupational External Exposure(GBZ128-2019) and The Safety Standard for Protection against Ionizing Radiation and Radiation Sources(GB18871-2002), the occupational hazard factors and preventive measures were comprehensively evaluated and analyzed by means of on-site investigation, data collection and on-site detection. **Results** The maximum dose equivalent rate of the detection points around 5 cm of the external surface of the instrument was 0.13-0.44 $\mu\text{Sv/h}$, and the maximum personal dose was 0.21 mSv/a. No abnormality was found in the occupational physical examination of the radiation staff, and the above results did not reach the specified requirements safety limit. **Conclusion** The self-shielding radiation protection facilities and management measures of the instrument meet the protection requirements. The user should continue to strengthen the radiation protection work in accordance with the environmental protection regulations, and effectively protect the radiation safety and health of the radiation staff and the public.

[Key words] Biological irradiator; Radiation monitoring; Personal dose; Radiation protection; Radiation safety

* 基金项目:国家自然科学基金项目(31771327);广东省自然科学基金面上项目(2022A1515010414)。

作者简介:廖永华(1974—),本科,高级实验师,主要从事科研共享平台大型仪器管理工作。△ 通信作者, E-mail: chenshengq66@163.com。

生物学辐照仪是肿瘤学、免疫学、细胞治疗和动物模型构建等生物医学研究前沿领域的关键设备之一,是电离辐射技术在生物医学研究中的重要应用^[1-2]。随着生物医学研究的发展,研究用生物学辐照仪在科研机构 and 高等学校不断增多,使用人员不断增多,辐射安全防护问题务必高度重视。

生物学辐照仪是利用电离辐射的生物效应原理,通过较高能量的具有电离辐射效应的射线照射生物体,瞬间产生大量高活性的自由基和水合电子等氧化活性基团,破坏细胞膜结构、蛋白质变性、糖链断裂和核酸损伤等^[3],从而使被照射的生物体受到不可恢复的损伤和破坏,达到生物学的目的。

X 射线生物学辐照仪的工作原理:通过仪器内置的高压发生器,将 220 V 的普通电压转换成 160 kV 或 225 kV 的高电压,仪器特制的球管在高电压的作用下产生 X 射线,在铅屏蔽的腔体内,对研究对象进行辐照。应用领域:小动物辐照、放疗剂量研究、移植免疫、免疫抑制治疗、细胞凋亡或老化、抗辐射研究、诱变育种、食品辐照、抗辐射药物、辐射增敏药物研究等^[4-6]。适合的样品类型:微生物、细胞、小鼠、大鼠、血液、生物材料、生物制品等。

本研究根据当前的环保法规和采取合理的辐射防护管理措施,对 X 射线生物学辐照仪(美国 Rad Source 公司)的使用和辐射防护情况进行监测、分析和安全评价,为同类仪器的使用者和管理,提供有益的参考。具体报道如下。

1 材料与方法

1.1 仪器

1.1.1 生物学辐照仪结构 全铅块屏蔽系统,橱柜式 X 射线辐照系统,系统包括带有可调放射量计器转盘、触摸屏控制板、射线束过滤结构、杂射线滤出装置、易操作触控技术和闭环冷却系统等^[7]。

1.1.2 生物学辐照仪配置参数 球管最高电压 160 kV、仪器功率 4.2 kW、Ⅲ类、最大功率时球管电流 25 mA、高压发生器 160 kV、辐照腔体尺寸 43.2 cm×43.2 cm×38.1 cm,90% 射线能量穿透力。

1.1.3 生物学辐照仪特点 利用低散射高密度的碳化硼材料制造出反射体装置 RAD+^[8],将穿透样品的射线反射向样品,补偿样品边缘和下部的照射剂量,而其本身对射线几乎无吸收,有效提高样品接受照射的剂量均一性,减小因高度差异而造成的样品上下部的剂量差异,射线水平均一性达到 95% 以上;垂直均一性(以双层细胞培养板为例)达到 90% 以上。

高通量局部照射模块可同时对 6 只小鼠进行局部照射,并保证剂量的均一性。组合式局部照射铅盒主要用于小鼠的局部辐照。铜合金过滤片可以根据

不同的样品灵活调整剂量率。分割式鼠笼将动物分割开来,避免相互影响,容易清洁和使用,最多可容纳 14 只小鼠。专业过滤鼠笼提供过滤条件的照射环境,避免实验样品的污染问题安全性设计。

1.2 方法

1.2.1 辐照室内不同位置的剂量值表监测 仪器: RadCal Accu-Dose+ 多功能 X 射线检测器,10X6-0.6 高剂量率探头(剂量率范围:200 nGy/s 至 1.17 Gy/s、剂量范围:1 μGy 至 5 kGy、能量依赖性:±5%,40 keV 至 1.33 MeV),均由美国 Radcal 公司生产。方法:生物学辐照室的使用可根据实验设计需要,选择不同的照射条件,如位置(6 层)、放射量计器转盘、铜合金过滤片(3 片)和反射体,本机投入使用前进行了不同位置的剂量值检测。条件:160 kV、25 mA、0.3 mm 铜合金过滤片。

1.2.2 工作场所周围剂量当量率检测 环境 X-γ 剂量率仪,仪器型号: 主机 6150AD6/H+探头 6150AD-b/H(测量范围:主机 1 μSv/h 至 1 000 mSv/h,探头 5 nSv/h 至 99.9 μSv/h;能量响应:主机 45 keV 至 2.6 MeV,探头 20 keV 至 7 MeV),由德国 Automess 公司生产。方法:按照《环境 γ 辐射剂量率测量技术规范》(HJ 1157-1993)中的监测方法和布点原则的要求,结合现场条件,共计布设监测点位 9 个,每个点位读取 5 个数,测量到达的各个表面 5 cm 处的周围剂量当量率,分为辐照仪关机、正常工作两种状态测量数据,每年至少监测 1 次。

1.2.3 个人剂量监测 热释光剂量仪 RGD-3D 型号,探测器: 氟化锂(LiF)(Mg、Cu、P)(玻璃管),由北京海阳博创公司生产;方法:按照《职业性外照射个人监测规范》(GBZ 128-2019)中的个人剂量计规范佩戴,每个季度送检 1 次,不间断监测。

1.2.4 放射工作人员的职业体检 每年进行 1 次体检,体检单位为广东省职业病防治院。

1.2.5 评价标准

1.2.5.1 辐照室内不同位置的剂量值 此为辐照工作时的实际测量数据,为仪器独有,无通用参考标准。

1.2.5.2 职业照射和公众照射剂量限值 根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)附录 B 规定,应对任何工作人员职业照射水平进行控制:(1)由审管部门决定的连续 5 年的年平均有效剂量(但不可作任何追溯性平均)20 mSv;(2)任何一年中的有效剂量 50 mSv。公众成员个人受到照射连续 5 年平均有效剂量的估计值不超过 1 mSv^[9]。

辐照仪工作场所周围剂量和外照射个人剂量均以此标准作为评价。由于研究用生物学辐照仪暂时没有专门的标准,也不能参考诊疗用 X 光机和血液辐

照仪标准。

1.2.5.3 放射工作人员体检标准 参照《放射工作人员的体检》(GBZ 98-2017)^[10]的要求。

1.2.6 辐射安全防护和管理措施

1.2.6.1 屏蔽措施 该 X 射线辐照仪属自屏蔽设备,具有较好的辐射防护能力,采用全封闭射线防护外壳,辐照室铅当量为 12.7 mm,主照射面(下方)铅当量 20 mm;设备出厂表面 5 cm 处剂量率限值为 1.0 $\mu\text{Sv/hr}$,达到国家安全标准。

1.2.6.2 安全应急措施 设备采用门机安全联锁和故障报警功能,当样品进出口安全门未关闭时,X 射线不能启动。运行时安全门异常打开时,X 射线会自动切断。机器开机时会进行自检,如果有异常情况,设备不会允许启动辐射程序。如有特殊情况,通过“STOP”键可随时停止照射。防止操作人员误开等。

1.2.6.3 完善警示标识 设备安装有工作指示灯,在工作场所张贴电离辐射警告标志及其中文警示说明,设备 1 m 处划有警戒线。为辐射工作人员配备个人剂量计、辐射防护服和剂量监测仪器等。

1.2.6.4 设立辐射安全管理小组 指定专职管理人员负责辐射安全管理。

1.2.6.5 加强制度建设 制定操作规程、岗位职责、人员培训制度、辐射事故应急制度、辐射防护和安全保卫制度和登记等。

1.2.6.6 重视应急演练 定期开始应急演练,及时修订辐射事故应急预案,确保应急预案处置程序实用、可操作、应急联系方式可用,有效防范辐射事故^[11]。

1.2.6.7 环境安全监测 定期开展辐射工作场所周围环境辐射水平监测,确保公众安全。

1.2.6.8 个人剂量检测 按规范佩戴个人剂量计,定期送检,最长送检周期不超过 3 个月。

1.2.6.9 辐射防护安全知识和操作技术培训 放射

工作人员定期参加辐射防护安全知识培训并通过考试,强化操作技术培训,严格按照仪器的操作规程工作,防止人为因素造成辐射事故。

1.2.6.10 落实辐射防护三原则 包括辐射实践正当化、辐射防护最优化、剂量当量限值^[12]。

1.2.6.11 完善个人健康档案 包括个人剂量档案、职业健康体检等。

1.2.6.12 落实汇报制度 编制年度《核技术利用安全和防护状况年度评估报告》并上报环保部门。

2 结 果

2.1 辐照室内不同位置的剂量值表 生物学辐照仪是球管通电后产生射线,样品放入辐照室内接受非接触式辐照,放射源没有与辐照对象直接接触。辐照室内有 6 层位置、3 层铜片,可根据实际需要调整照射剂量率,为开展科研实验设置条件提供参考。辐照室内不同位置的剂量参考值,见表 1。

2.2 工作场所周围剂量当量率 2019—2021 年的生物学辐照仪工作场所周围剂量当量率检测数据,见表 2。生物学辐照仪关机状态下,仪器外表面 5 cm 周围剂量当量率分别为 0.152~0.158 $\mu\text{Sv/h}$ 、0.11~0.13 $\mu\text{Sv/h}$ 、0.12~0.14 $\mu\text{Sv/h}$;开机状态时(工况:160 kV,25 mA),仪器外表面 5 cm 周围剂量当量率为 0.148~0.291、0.08~0.12、0.13~0.44 $\mu\text{Sv/h}$ 。

按最保守估计,工作人员年工作时间取 2 000 h,则年有效剂量最大值为 0.88 mSv,满足该标准的剂量限值要求,也低于审管部门提出的剂量约束值(5 mSv/a)。检测数据表明,本单位使用的生物学辐照仪在正常工作状态下,设备表面外 5 cm 周围剂量当量率均符合上述标准的相关限值要求。说明该生物辐照仪的辐射防护设备与设施的有效性,其正常运行对周围环境产生的影响符合辐射环境保护的要求。

表 1 辐照室内不同位置的剂量值表

位置	默认剂量率(Gy/min)	达到一定剂量所需时间(s)									
		1 Gy	2 Gy	3 Gy	4 Gy	5 Gy	6 Gy	7 Gy	8 Gy	9 Gy	10 Gy
Level 1	1.265	47	95	142	190	237	285	332	379	427	474
Level 2	1.396	43	86	129	172	215	258	301	344	387	430
Level 3	1.900	32	63	95	126	158	189	221	253	284	316
Level 4	2.746	22	44	66	87	109	131	153	175	197	218
Level 5	4.345	14	28	41	55	69	83	97	110	124	138
Level 6	8.020	7	15	22	30	37	45	52	60	67	75

2.3 个人剂量监测结果分析 统计 2019—2021 年个人剂量监测数据,见表 3。根据个人剂量监测报告,

在 2019、2020 和 2021 年 3 年中,年最大个人剂量值为 0.21 mSv,工作人员的个人剂量值均远低于国家

标准(20 mSv)和管理限值(5 mSv),符合《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)的要求。

表 2 近 3 年工作场所周围剂量当量率检测数据($\mu\text{Sv/h}$)

序号	监测方位	2019 年			2020 年			2021 年		
		关机	开机	对比	关机	开机	对比	关机	开机	对比
1	仪器顶部	0.16	0.16	0.00	0.12	0.09	-0.03	0.13	0.17	0.04
2	入料门正上方	0.15	0.20	0.05	0.11	0.09	-0.02	0.12	0.19	0.07
3	入料门正下方	0.15	0.29	0.14	0.11	0.08	-0.03	0.12	0.44	0.32
4	入料门正左方	0.16	0.23	0.07	0.11	0.09	-0.02	0.12	0.13	0.01
5	入料门正右方	0.15	0.19	0.04	0.11	0.08	-0.03	0.12	0.19	0.07
6	仪器正面前下部	0.15	0.17	0.01	0.11	0.12	0.01	0.13	0.18	0.05
7	仪器后方	0.16	0.15	-0.01	0.11	0.11	0	0.13	0.15	0.02
8	仪器左侧面	0.16	0.25	0.09	0.12	0.09	-0.03	0.14	0.19	0.05
9	操作位	0.16	0.15	-0.01	0.13	0.09	-0.04	0.12	0.17	0.05

注:以上数据均未扣除宇宙射线的贡献;现场检测时,仪器探头均指向射线装置,巡测后选择周围剂量当量率最高处定点检测,每个检测点位读取 5 个数据,取其修正后的平均值作为测量结果;表中距离仅作参考。

表 3 个人剂量检测结果(mSv)

管理人员	2019 年	2020 年	2021 年
技术人员 1	0.20	0.21	0.07
技术人员 2	0.20	0.21	0.07

注:检测结果已经扣除本底值。

2.4 放射员职业健康体检报告 放射工作人员职业健康体检生化项目、甲状腺功能 3 项、微核检测等未见异常。体检结果未发现电离辐射作业的职业禁忌及疑似职业病。

3 讨论

生物学辐照装置主要包括以下 3 类^[13-14]: (1)同位素 γ 射线辐照仪:技术成熟、操作简单、稳定可靠,但辐射源较昂贵,定期更换,环保要求高,常用辐照源为 ^{60}Co 或 ^{137}Cs ; (2)电子加速器:剂量率高、能量利用率高、辐照时间短,主要用于较大剂量辐照,运行技术、成本要求较高; (3)X 射线辐照仪:利用高电压发生装置产生高电压作用在 X 射线球管上输出具有电离作用的 X 射线,具有安全性高、成本低、剂量精确和安全的自屏蔽功能。按照当前的发展趋势,X 射线生物学辐照仪将会逐步取代前两者。

根据近 3 年的各项跟踪监测结果显示,本项目的生物学辐照仪在正常工作状态下产生 X 射线,通过采取足够厚的铅板防护,穿透防护体的次级射线,且经过多次衰减能量很弱,没有漏射线,自屏蔽效果良好,对周围环境的辐射剂量测值较低,对于周围环境的影响较小,符合国家辐射安全防护标准^[15]。工作人员的个人剂量计监测数据也远低于国家限值和管理限值,职业体检也未发现异常。因此,仪器的自屏蔽措施能最大限度地保证操作人员和公众的安全。

在生物学辐照活动中,除了加强辐射防护安全的硬件设施和制度建设外,也要加强辐射安全文化建设。辐射安全文化即电离辐射应用单位的安全文化,是独立于法律和制度之外确保辐射安全应用的一种观念或意识形态^[16],在生物学辐照仪的使用培训和实践操作教学中,嵌入“辐射防护三原则”、安全观念和意识等,以文化的形式内化于心、外化于行,转化成使用人员的主动安全行为,确保辐射防护安全。

在生物学辐照活动中,也要加强辐射动物伦理学探讨。动物实验是医学研究中必不可少的手段,对于医学的发展有着不可或缺的重要作用^[17],人类在辐射应用中的辐射防护安全行为,从本质上来看是伦理学的一部分,动物因人类的生命科学研究而接受辐照时,受到的痛苦,涉及动物伦理学问题,所以开展辐照动物实验要在符合相关动物福利伦理规定进行,开展辐射动物伦理的审查,尊重实验动物的生命。

总之,依法依规,采取积极有效的辐射防护和管理措施,是确保在生物学研究中开展生物辐照活动安全的重要保证。

参考文献

[1] 陶嫦娟,周凌,张鹏,等. 基于小动物精准放疗辐照仪(SARRP)的放射性脑损伤模型建立[J]. 肿瘤学杂志,2021,27(6):459-465.

[2] 于亚婷,段斯亮,马新博,等. 辐照剂量对肿瘤细胞活性及肿瘤融合细胞疫苗效果的影响[J]. 实用医学杂志,2018,34(4):527-530.

[3] 强永刚. 医学辐射防护学[M]. 北京:高等教育出版社,2013:48-56. (下转第 729 页)

中的应用[J]. 生物产业技术, 2018, 67(5): 93-97.

- [9] SHAW W. Increased urinary excretion of a 3-(3-hydroxyphenyl)-3-hydroxypropionic acid (HPHPA), an abnormal phenylalanine metabolite of Clostridia spp. in the gastrointestinal tract, in urine samples from patients with autism and schizophrenia [J]. *Nutr Neurosci*, 2010, 13(3): 135-143.
- [10] GALL W E, BEEBE K, LAWTON K A, et al. alpha-hydroxybutyrate is an early biomarker of insulin resistance and glucose intolerance in a nondiabetic population [J]. *PLoS One*, 2010, 5(5): e10883.
- [11] LANDAAS S, PETTERSEN J E. Clinical conditions associated with urinary excretion of 2-hydroxybutyric acid [J]. *Scand J Clin Lab Invest*, 1975, 35(3): 259-266.
- [12] PU J, LIU Y, ZHANG H, et al. An integrated meta-analysis of peripheral blood metabolites and biological functions in major depressive disorder [J]. *Mol Psychiatry*, 2021, 26(8): 4265-

4276.

- [13] ASHOURI R, FANGMAN M, BRIELMAIER J, et al. Nutritional supplementation of naturally occurring vitamin D to improve hemorrhagic stroke outcomes [J]. *Front Neurol*, 2021, 12: 670245.
- [14] LIU J, LI N, ZHU Z, et al. Vitamin D enhances hematoma clearance and neurologic recovery in intracerebral hemorrhage [J]. *Stroke*, 2022, 6: 101161.
- [15] CENIK B, PALKA J M, THOMPSON B M, et al. Desmosterol and 7-dehydrocholesterol concentrations in post mortem brains of depressed people: The role of trazodone [J]. *Transl Psychiatry*, 2022, 12(1): 139.
- [16] KIM-HAN J S, KOPP S J, DUGAN L L, et al. Perihematomal mitochondrial dysfunction after intracerebral hemorrhage [J]. *Stroke*, 2006, 37: 2457-2462.

(收稿日期: 2022-05-23 修回日期: 2022-11-18)

(上接第 724 页)

- [4] 陈滑维, 张圣福, 何海涛. 不同辐照仪对大鼠下颌骨放射性颌骨坏死模型建立的影响 [J]. *华西口腔医学杂志*, 2021, 39(5): 524-530.
- [5] 李洁, 吴轶群, 陈富民, 等. 基于 RS2000 辐照仪建立大鼠放射性口腔黏膜炎模型的实验研究 [J]. *中国口腔颌面外科杂志*, 2021, 19(6): 500-505.
- [6] 于亚婷, 段斯亮, 马新博, 等. 辐照剂量对肿瘤细胞活性及肿瘤融合细胞疫苗效果的影响 [J]. *实用医学杂志*, 2018, 34(4): 527-530.
- [7] 申晓康, 俞成山, 张子民, 等. 新型高剂量 X 射线管研究 [J]. *原子能科学技术*, 2015, 49(4): 755-758.
- [8] MURPHY M K, KAMEN J. Deciding between an X-ray and ¹³⁷Cs irradiator-it's not just about energy spectra [J]. *Rad Res*, 2019, 192(5): 493-506.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电离辐射防护与辐射源安全基本标准: GB 18871-2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [10] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 放射工作人员健康要求 GBZ 98-2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

- [11] 侯细荣. 血液辐照仪周围环境辐射水平测量结果分析与建议 [J]. *化学工程与装备*, 2021(5): 252-253.
- [12] ICRP. Recommendations of the international commission on radiological protection [M]. ICRP Publication 26. Oxford: Pergamon Press, 1977: 112-119.
- [13] 倪波, 朱方炜, 孟中华, 等. 血液辐照仪的辐射剂量检测 [J]. *环境与职业医学*, 2013, 16(4): 290-294.
- [14] 王宏芳, 马永忠, 万玲, 等. 血液辐照仪的辐射剂量学研究 [J]. *中国医学装备*, 2015, 12(1): 25-27.
- [15] 郑祖安, 刘飞, 钟伟伟, 等. X 射线生物辐照仪剂量学探讨 [J]. *中国辐射卫生*, 2016, 25(4): 401-405.
- [16] 张巍, 于夕荣. 医疗机构辐射安全文化综合评价的实证研究 [J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2016, 36(2): 133-138.
- [17] 庄文欣, 刘宗昱, 付文玉, 等. 医学院校实验动物伦理学问题的思考 [J]. *西北医学教育*, 2014, 22(2): 329-332.

(收稿日期: 2022-05-24 修回日期: 2022-10-12)