

低剂量率X射线辐射质的建立与仪器校准

李梦宇^{1,2} 赵 瑞² 屈冰冰^{1,2} 鲁平周^{1,2} 宋 飞^{1,2} 李云飞² 付 林¹ 吴金杰²

1(成都理工大学 成都 610059)

2(中国计量科学研究院 北京 100029)

摘要 辐射环境监测仪器的校准是评价仪器性能、保证量值准确可靠的重要方式。为了解决剂量仪表在低剂量率条件下的量值溯源问题,在X射线辐射场中通过进一步增加附加过滤的方式,建立了55 kV、70 kV、100 kV、170 kV和240 kV参考辐射质并测量其能谱,运用序蒙特卡罗程序EGS(Electron Gamma Shower)模拟各辐射质的能谱,计算出辐射质半值层及平均能量,模拟能谱与实测能谱的平均能量相对偏差不超过1.6%。利用大体积球形电离室完成参考点处空气比释动能率的测量,并对常用的辐射环境监测仪器进行了校准。结果表明:随着附加过滤的增加,剂量率逐渐减少,所建立的辐射质剂量率范围为606~4 451 nGy·h⁻¹,不确定度为6.0%($k=2$);高气压电离室、6150AD剂量率仪校准测量结果不确定度为7.0%($k=2$)。

关键词 低剂量率, X射线, 能谱模拟, 校准因子, 不确定度

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.060403

Establishment of low-dose rate X-ray radiation quality and calibration of the instruments

LI Mengyu^{1,2} ZHAO Rui² QU Bingbing^{1,2} LU Pingzhou^{1,2} SONG Fei^{1,2}

LI Yunfei² FU Lin¹ WU Jinjie²

1(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

2(National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract [Background] Calibration is an important way to assess the performance of radiation monitoring instruments and to ensure their accuracy and reliability for measurement. [Purpose] This study aims to solve the traceability problem of dose meters at low dose rate. [Methods] First of all, reference radiation masses of 55 kV, 70 kV, 100 kV, 170 kV, 240 kV were established and their energy spectra were measured by adding additional filtering to the X-ray radiation field. Then, the energy spectrum of each radiative mass was simulated by the EGS (Electron Gamma Shower) program to obtain the radiative mass half-value layer and the average energy. Finally, the kerma rate at the reference point was measured by using a large volume spherical ionization chamber, followed by calibration of conventional radiation environmental monitoring instruments. [Results & Conclusions] The results showed that the relative deviation between the simulated energy spectra and measured spectra does not exceed 1.6% and the dose rate decreases with more additional filtration. The established dose rates for the radiation masses ranged from 606 nGy·h⁻¹ to 4 451 nGy·h⁻¹ the uncertainty is 6.0% ($k=2$). The uncertainty of the calibration measurement results of the high-pressure ionization chamber 6150AD dose rate meter is 7.0% ($k=2$).

Key words Low dose rate, X-ray, Energy spectrum simulation, Calibration factor, Uncertainty

第一作者: 李梦宇, 男, 1997年出生, 2019年毕业于天津理工大学中环信息学院, 现为硕士研究生, 研究领域为X射线计量研究

通信作者: 吴金杰, E-mail: wujj@nim.ac.cn

收稿日期: 2022-01-03, 修回日期: 2022-04-06

First author: LI Mengyu, male, born in 1997, graduated from Zhonghuan Information College Tianjin University of Technology in 2019, master student, focusing on X-ray measurement

Corresponding author: WU Jinjie, E-mail: wujj@nim.ac.cn

Received date: 2022-01-03, revised date: 2022-04-06

2021年,国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)发布了最新版《国际核电状况与前景》^[1]报告,强调核电在缓解气候变化和实现可持续发展方面的作用。核能作为一种安全、清洁、可靠的能源,对于国家发展有着重要作用,核与辐射安全更是国家安全的重中之重,截止2020年10月,我国共建成了近161个国控辐射环境自动监测站,在45个重要核设施周围开展了工作。自动站环境监测类仪器主要包括高气压电离室、NaI(Tl)谱仪和LaBr₃谱仪^[2]等。

目前的实验室检定校准方法均是在较高剂量率下进行,使得环境辐射仪器在测量微弱放射性辐射时可能会引入较大误差。在实施环境监测或辐射事故预警网络时,有必要监测环境剂量当量率(低至500 nSv·h⁻¹),其仅为自然背景辐射产生的贡献(约100 nSv·h⁻¹)的几倍。为保证环境辐射监测仪器溯源的有效性,必须创造一个低剂量率水平辐射条件^[3],解决全国环境辐射监测计量仪表的量值溯源问题,提供仪器校准测试,保障国内放射性环境监测量值的准确与统一。根据ISO 4037-1^[4]标准,通常利用X光机在不同辐射质下完成仪器能量响应的测量评价。目前,具备环境水平监测仪器校准能力的主要有德国联邦物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)、日本国家计量院(National Metrology Institute of Japan, NMIJ)和中国计量科学研究院(National Institute of Metrology, NIM)。PTB在地下490 m的矿井下建立低本底实验室,并建立低剂量率 γ 辐射参考辐射场,可实现在(10~300) nGy·h⁻¹环境辐射监测仪器的响应研究。NIMJ通过增加附加过滤的方式建立低空气比释动能率系列,可实现20 μ Gy·h⁻¹的辐射剂量率水平校准^[5]。参考辐射场剂量率大小受到放射源强度、距

离远近、屏蔽材料的影响,可通过增加源与探测器的距离、增加附加过滤等方法降低参考辐射场剂量率。对于增加测量距离的方法,会导致射束在通过的路径上进一步衰减,且容易受到温度气压影响,使得能谱发生改变。本文通过进一步增加附加过滤的方式,利用蒙特卡罗模拟方法得到X射线能谱,建立了5个低剂量率X射线参考辐射质,并计算得到辐射质的半值层和平均能量^[6]。采用大体积空腔电离室完成空气比释动能率的测量,对常见的仪器进行校准测量^[7],并对测量结果进行不确定度分析^[8]。

1 低剂量率参考辐射质的建立

1.1 X射线辐射装置的组成及能谱测量

X射线参考辐射装置主要由X射线光机、限束光阑、X射线过滤装置、定位系统等组成^[9](图1)。其中光管型号为COMET MXR-320/26,靶材为钨靶,靶倾角为20°。管电压调节范围为(15~320) kV,管电流调节范围为(0~22.5) mA。主要特点为温度漂移小、管电压可调节范围大、性能稳定,能够达到X射线空气比释动能率测量的精度要求^[10]。过滤装置主要由过滤盘、附加过滤片及驱动装置组成^[11],线性定位系统主要由升降平台、横纵向导轨及激光准直系统组成。

建立的低剂量率X射线辐射质,其附加过滤片厚度参数见表1。选用CANBERRA-BE2020高纯锗(HPGe)作为能谱测量探测器,采用液氮冷却,其优点是能量分辨率较高,能分辨复杂的能谱。实验测量能谱如图2所示,受到环境、准直器、屏蔽材料散射影响,100 kV、170 kV、240 kV出现康普顿散射峰。

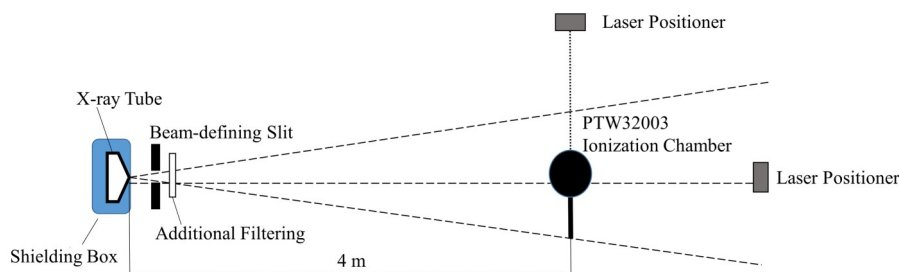


图1 X射线参考辐射装置
Fig.1 X-ray reference radiation device

1.2 过滤X射线能谱模拟

本文建立的低剂量率X射线辐射质,基于低空气比释动能率系列,在此基础上继续添加附加过滤,以降低剂量率水平。为了进一步了解辐射场特性,

通常需要采用蒙特卡罗模拟方法对X射线能谱进行模拟研究。EGS(Electron Gamma Shower)是一套能模拟动能范围在1 keV~10 GeV内的光子和正负电子于物质中运输过程的MC(Monte Carlo)程序^[12],

表1 附加过滤厚度测量结果
Table 1 Results of additional filtering thickness measurement

管电压 Tube voltage / kV	吸收片厚度 Sheet thickness / mm			
	Pb	Sn	Cu	Al
55	—	—	2.51	4.88
70	—	—	5.35	3.58
100	—	4.41	1.39	3.57
170	2.93	6.03	2.09	3.55
240	7.33	2.33	1.97	3.57

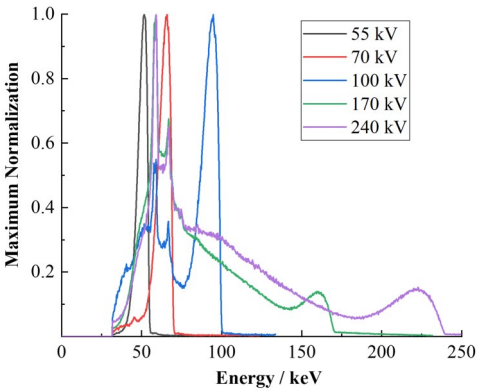


图2 不同辐射质下的测量能谱
Fig.2 Energy spectra of measurement under different radiation qualities

模拟实验首先建立X射线光机模型,分别模拟管电压为55 kV、70 kV、100 kV、170 kV和240 kV下辐射质的能谱,粒子数设置为 1.0×10^{10} ,电子的截止能量 $E_{\text{CUT}}=0.512$ MeV,光子的截止能量为 $P_{\text{CUT}}=0.001$ MeV,统计误差小于1%,其他数据采用默认值。

模拟实验结果的光子数进行最大归一化处理,

表2 模拟谱与实验谱平均能量
Table 2 Average energy of simulated and measured spectra

管电压 Tube voltage / kV	模拟谱平均能量 Mean energy of simulated spectrum / keV	实验谱平均能量 Mean energy of experimental spectrum / keV	相对偏差 Relative deviation / %
55	49.8	50.4	1.2
70	63.8	62.8	-1.6
100	91.4	92.0	0.7
170	153.2	154.1	0.6
240	215.7	214.3	-0.7

1.3 X射线半值层的计算与有效能量

X射线辐射场的辐射特性^[14]通常由能谱和半值层(Half Value Layer, HVL)表示,半值层是指单能X光束穿过物质时,强度减弱到一半所需物质的厚度,满足衰减式(2):

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad (2)$$

由于所建立的辐射质规范过滤较重,大部分光子在穿过过滤材料时被吸收,使得到达收集面的光子数分布不均匀,故数据统计涨落现象较明显。在绘制能谱图时,为消除统计涨落带来的影响,采用并道处理方法,默认所有管电压下能谱设置道址为200道,通过减少道址数实现并道,55 kV、100 kV下设置为100道,70 kV、240 kV下为50道,170 kV为25道,得到其合适的道宽,各管电压下能谱图如图3所示。

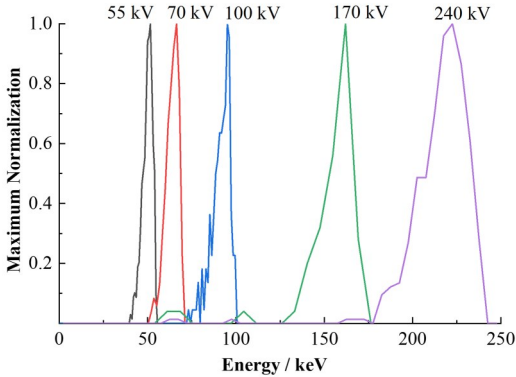


图3 各辐射质的能谱图
Fig.3 Energy spectra of various radiation qualities

根据式(1),整理模拟与测量能谱数据,得到不同辐射质的平均能量,平均能量计算结果如表2所示,可以看出,平均能量相对偏差不超过1.6%,表明实际测量结果与模拟结果符合较好。

$$\bar{E} = \frac{\int_0^{E_{\text{max}}} \varphi_E E dE}{\int_0^{E_{\text{max}}} \varphi_E dE} \quad (1)$$

式中: φ_E 为粒子注量; E 为能量。

式中: N 为穿过物质层后的光子注量; N_0 为穿过物质层前的光子注量; x 是穿过物质层的厚度, m ; μ 为X射线在该物质中的线减弱系数, m^{-1} 。对于单能X射线,满足式(3)关系:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\ln 2}{\text{HVL} \cdot \rho} \quad (3)$$

式中: $\frac{\mu}{\rho}$ 为质量衰减系数,指单位质量物质对X射线的衰减程度, $\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$; ρ 为吸收片密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

有效能量定义为具有其相同HVL的单能X射线的能量,随着附加过滤的增大,X射线能谱也逐渐硬化,X射线有效能量与平均能量可近似等效一致,故本次实验将平均能量等效为有效能量处理。实验半值层用铜(Cu)表示,由美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)数据库整理得到铜的质量衰减系数与不同能量单能X射线之间的关系,如图4所示;通过拟合得到在(55~240) keV下铜的质量衰减系数,查表可得铜的密度 ρ 为 $8.96\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,计算出各辐射质对应的半值层,如表3所示。

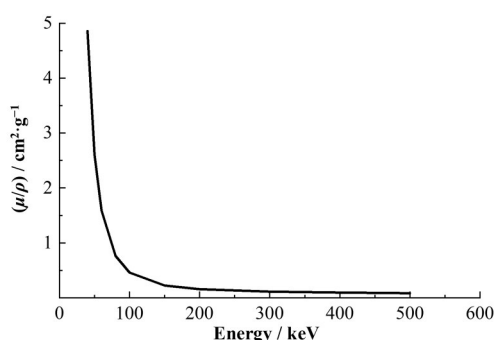


图4 铜的衰减曲线图

Fig.4 Attenuation curve of copper

表3 各辐射质半值层
Table 3 Half-value layer of radiation qualities

管电压 Tube voltage / kV	有效能量 Effective energy / keV	衰减系数 Attenuation coefficient / $\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$	第一半值层 First half-value layer / mm (Cu)
55	50.4	2.74	0.28
70	62.8	1.42	0.54
100	92.0	0.59	1.31
170	154.1	0.20	3.87
240	214.3	0.16	4.83

2 辐射场剂量率的测量与仪器的校准

2.1 X射线空气比释动能率的测量

对于较低剂量率的测量,通常采用大体积球型电离室作为标准探测器,主要原因是其灵敏度高、稳定性好,且角响应可忽略不计。为了达到电子平衡,通常将电离室放置在均匀辐射场中,使有效探测体积被辐射场全覆盖,根据光机发散角及限束光阑、探测器尺寸的大小及辐射场特性(距离焦斑4 m处

95%均匀辐射野大小为36 cm)要求,本实验将参考点设置于距离X射线焦斑4 m处,使用PTW-32003电离室进行空气比释动能率的测量,其公式为:

$$\dot{K} = N_K \cdot I \cdot K_{T,P} \quad (4)$$

式中: N_K 为电离室刻度因子, $\text{Gy}\cdot\text{C}^{-1}$; I 为测量电流, pA; $K_{T,P}$ 为温度气压修正。通过调节光机管电流等参数,最终所建立的X射线参考辐射质的空气比释动能率测量结果如表4所示。

表4 低剂量率X射线空气比释动能率测量结果
Table 4 Result of low-dose rate X-ray air kerma rate measurement

管电压 Tube voltage / kV	空气比释动能率 Air kerma rate / $\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$
55	605.5
70	657.6
100	634.2
170	1 231.8
240	4 450.8

2.2 6150AD-5/H+6150AD b/H剂量率仪的校准

6150AD-5/H+6150AD b/H是一款测量 γ 、X射线辐射的便携式仪表,采用大体积的塑料闪烁体探头^[15],能量测量范围为45 keV~2.6 MeV,可测量瞬时剂量率、平均剂量率、累积剂量。校准因子是评价仪器测量准确性的重要指标,为了检测计量仪器精度是否在误差范围内,必须对计量仪器进行校准。实验中,将6150AD-5/H+6150AD b/H剂量仪固定在参考点处,通过激光定位使其与X射线光束、光阑中心处于同一条直线上。经测量得到在各个辐射质下的周围剂量当量 $H^*(10)$,参照GB/T 12162-3《用于校准剂量仪和剂量率仪及确定其能量响应的X和 γ 参考辐射》中对剂量率与剂量当量的转化系数 $h_k^*(10)$,计算得到6150AD-5/H+6150AD b/H的校准因子如表5所示。

表5 6150AD-5/H+6150AD b/H校准因子
Table 5 Calibration factors of 6150AD-5/H+6150AD b/H

管电压 Tube voltage / kV	6150AD-5/H+ 6150AD b/H / $\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$	校准因子 Calibration factor
55	529	1.14
70	530	1.24
100	575	1.10
170	1 169	1.05
240	4 226	1.05

2.3 高气压电离室校准

对于环境辐射监测仪器,最常见的是充氩气的高气压电离室。实验所用的高气压电离室是GE

Reuter-Stokes生产的最新一款 γ 辐射检测仪表,主要用于低剂量水平 γ 辐射探测和测量,由高压电离腔、DAQ 主板、静电计等组成,测量范围为 $(0\sim1)\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ 。表6为高压电离室的在低剂量率X射线辐射质下的校准情况。可以看出,高压电离室在低能段响应较差,主要原因是电离室外壁较厚,导致低能光子无法进入电离室,使得读数偏低。随着管电压增加,响应逐渐增强,当能量最大时,校准因子基本趋于1,这与高压电离室在 ^{137}Cs γ 射线下的响应相吻合。

表6 高压电离室校准因子
Table 6 Calibration factors of high pressure ionization chamber

管电压 Tube voltage / kV	高压电离室 High-pressure ionization chamber / $\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$	校准因子 Calibration factor
55	26.01	23.3
70	243.1	2.70
100	452.2	1.40
170	986.9	1.25
240	4 512.9	0.99

表7 参考辐射场剂量率测量不确定度
Table 7 Uncertainty of dose rate measurement in reference radiation field

项目 Item	A类 Type A / %	B类 Type B / %
标准探测器校准因子 Calibration factor of standard detector	—	2.8
电离电流 Ionization current	0.5	0.1
定位 Position	0.5	0.1
温度气压 Temperature and pressure	0.1	0.1
仪器长期稳定性 Long-term stability of the instrument	—	0.6
合成相对标准不确定度 Combined relative standard uncertainty	3.0	
相对扩展不确定度 Relative expanded uncertainty	6.0($k=2$)	

表8 环境监测仪器校准结果不确定度
Table 8 Uncertainty of calibration results of environmental monitoring instruments

项目 Item	A类 Type A / %	B类 Type B / %
辐射场剂量率测量 Measurement of radiation field dose rate	—	3.0
仪器读数 Instrument reading	1.2	—
定位 Position	—	0.6
辐射场不均匀性 Inhomogeneity of radiation field	—	0.3
散射辐射 Scattered radiation	—	0.5
相对扩展不确定度 Relative expanded uncertainty	7.0($k=2$)	

3 结语

本文依托中能X射线光机,通过增加附加过滤的方式,利用CANBERRA-BE2020高纯锗(HPGe)探测器和EGS蒙特卡罗程序分别得到5个辐射质的实测谱和模拟谱,计算得到能谱平均能量、各辐射质

2.4 测量结果不确定度分析

受到环境、仪器本身等因素影响,测量结果往往存在一定误差,实验得到的数据为一个近似的估计值,为了表示近似程度的误差范围,引入测量不确定度(Uncertainty of Measurement),不确定度主要分为A类和B类^[16]。A类为测量过程中数据的统计涨落所引起的不确定度,通常用贝塞尔公式进行计算得到,其公式为:

$$u_A = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \frac{\frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

式中: n 为测试次数; x 为测试对象; x_i 为每次测量结果; $\bar{x}$ 为算术平均值; u_A 为A类相对标准不确定度。

B类是根据经验、证书等其他信息得到。对于环境辐射监测仪器的校准,通常不确定度来源于标准探测器测量辐射场剂量率的不确定度、仪器的定位和仪器的读数重复性等。通过实验测量及理论分析,最终不确定度分析如表7、表8所示。

半值层,实验谱平均能量与模拟谱平均能量相对偏差最大不超过1.6%,建立了55 kV、70 kV、100 kV、170 kV和240 kV共计5个参考辐射质。采用PTW 32003电离室完成所建立辐射质参考点处的空气比释动能率的测量,剂量率范围为606~4 451 $\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$,测量不确定度为6.0%($k=2$)。在低剂量率下对

6150AD-5/H+6150AD b/H 剂量率仪与高气压电离室分别进行校准测量,其测量结果不确定度为7.0% ($k=2$)。本文的研究可为辐射环境监测仪器在低剂量率条件下的校准提供参考条件,对于仪器产品开发和性能评价具有实际意义。然而,在极低剂量率条件下,受天然本底以及仪器自身性能指标的限制等因素的影响,标准探测器是无法区分天然本底计数的影响,对于辐射场的测量存在一定的不确定度,而对于辐射监测仪器也需要考虑天然本底的影响。后续可考虑在低本底实验室或者屏蔽箱体等实验条件下,进一步完善低剂量率的准确测量,为仪器的性能评价提供数据支撑。

作者贡献说明 李梦宇:调研背景,完成参考点空气比释动能测量,仪器校准实验,实验数据处理,构思并撰写论文;赵瑞:调研背景,提供理论基础,完成参考点空气比释动能测量、仪器校准实验,参与论文撰写;屈冰冰:协助实验完成,能谱数据处理;鲁平周:参考点空气比释动能数据处理;宋飞:协助实验完成,参考点空气比释动能数据处理;李云飞:提供论文思路;付林:论文完善意见;吴金杰:提供实验思路。

参考文献

- 王玉荟, 伍浩松. 国际原子能机构发布报告《国际核电状况与前景》[J]. 国外核新闻, 2021(9): 2.
WANG Yuhui, WU Haosong. International Atomic Energy Agency releases report <international nuclear power status and prospects> [J]. Foreign Nuclear News, 2021(9): 2.
- 肖无云, 毛用泽, 艾宪芸, 等. 手持式 γ 谱仪用核辐射探测器综述[J]. 核电子学与探测技术, 2008, 28(5): 974 - 977, 1023. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2008.05.027.
XIAO Wuyun, MAO Yongze, AI Xianyun, *et al.* Review of the detectors for hand-held gamma spectrometers[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, 28(5): 974 - 977, 1023. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2008.05.027.
- Kowatari M, Yoshitomi H, Nishino S, *et al.* Establishment of a low dose rate gamma ray calibration field for environmental radiation monitoring devices[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2019, 187(1): 61 - 68. DOI: 10.1093/rpd/ncz138.
- Zhang Q L, Han M C, Huang Y W, *et al.* Establishment of filtered X-ray reference radiation based on ISO4037-1: 1996 in CIRP[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2008, 45(sup5): 278 - 281. DOI: 10.1080/00223131.2008.10875842.
- 赵瑞, 吴金杰, 樊松, 等. 环境水平X射线辐射质的建立及监测仪表校准方法研究[J]. 计量学报, 2018, 39(S1): 131 - 136. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1158.2018.z1.29.
ZHAO Rui, WU Jinjie, FAN Song, *et al.* Establishment of environmental level X-ray radiation qualities and research of the calibration methods of monitoring instruments[J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(S1): 131 - 136. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1158.2018.z1.29.
- Bandalo V, Greiter M B, Brönnner J, *et al.* Iso 4037: 2019 validation of radiation qualities by means of half-value layer and Hp(10) dosimetry[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2019, 187(4): 438 - 450. DOI: 10.1093/rpd/ncz185.
- 张华, 陈志东, 徐润龙, 等. 辐射测量仪的宇宙射线响应和校准系数的陆地测算方法验证[J]. 核技术, 2021, 44(5): 050101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.050101.
ZHANG Hua, CHEN Zhidong, XU Runlong, *et al.* The verify of the terrestrial measuring method of the cosmic ray response and calibration coefficient for the radiometer [J]. Nuclear Techniques, 2021, 44(5): 050101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.050101.
- 李志强, 肖德涛, 赵桂芝, 等. 氡析出率快速测量的不确定度评定[J]. 核技术, 2017, 40(4): 040201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.040201.
LI Zhiqiang, XIAO Detao, ZHAO Guizhi, *et al.* Uncertainty evaluation of rapid measurement of radon exhalation rate[J]. Nuclear Techniques, 2017, 40(4): 040201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.040201.
- 李婷, 吴金杰, 方方, 等. 250~600 kV 段X射线参考辐射装置构建[J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36(3): 334 - 337. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.03.023.
LI Ting, WU Jinjie, FANG Fang, *et al.* The establishment of X-ray reference radiation device under the tube voltage between 250 kV and 600 kV[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, 36(3): 334 - 337. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.03.023.
- 葛双. (20~300) kV X射线参考辐射场的建立和研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2016.
GE Shuang. The establishment and study of reference radiation field in the range of (20~300) kV X-rays[D]. Hengyang: University of South China, 2016.
- 李静, 龙成章, 李胜春, 等. X射线空气比释动能(诊断水平)辐射场的研究[J]. 工业计量, 2019, 29(3): 13 - 14. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1002-1183.2018.0204.

- LI Jing, LONG Chengzhang, LI Shengchun, *et al.* Study of X-ray air specific release kinetic energy (diagnostic level) radiation field[J]. Industrial Metrology, 2019, **29** (3): 13 - 14. DOI: 10.13228/j. boyuan. issn1002-1183. 2018.0204.
- 12 段小娟, 吴金杰, 杨元第. EGSnrc 程序模拟低能 X 射线光管参数对射线能谱的影响[J]. 计量学报, 2011, **32** (S1): 51 - 53. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1158.2011.z1.14. DUAN Xiaojuan, WU Jinjie, YANG Yuandi. The affect of X-rays tube parameters simulated by EGSnrc on low-energy spectrum[J]. Acta Metrologica Sinica, 2011, **32** (S1): 51 - 53. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1158.2011.z1.14.
- 13 黄凯, 黄瑶, 鞠一, 等. EDXRF 特征谱平滑去噪方法比较[J]. 核电子学与探测技术, 2019, **39**(1): 118 - 121. HUANG Kai, HUANG Yao, JU Yi, *et al.* Comparison of EDXRF characteristics of the spectrum smoothing denoising method[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2019, **39**(1): 118 - 121.
- 14 欧向明, 赵士庵, 李明生. 标准 X 射线辐射场 RQR 半值层的测定[J]. 中国医学装备, 2009, **6**(6): 1 - 4. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8270.2009.06.001.
- OU Xiangming, ZHAO Shian, LI Mingsheng. Determination of half value layer for the X-ray diagnostic quality of RQR[J]. China Medical Equipment, 2009, **6**(6): 1 - 4. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8270.2009.06.001.
- 15 陈晓云, 徐云凤, 龙庚. 不同辐射监测设备对宇宙射线响应值的探讨[J]. 环保科技, 2021, **27**(5): 28 - 32. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0254.2021.05.007. CHEN Xiaoyun, XU Yunfeng, LONG Geng. Discussion on response values of different radiation monitoring equipments to cosmic ray[J]. Environmental Protection and Technology, 2021, **27**(5): 28 - 32. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0254.2021.05.007.
- 16 付晓君. 医用诊断 X 射线辐射源空气比释动能测量不确定度评定[J]. 影像研究与医学应用, 2019, **3**(5): 106 - 108. DOI: 10.3969/j.issn.2096-3807.2019.05.070. FU Xiaojun. Evaluation of uncertainty in measurement of air kernel energy of medical diagnostic X-ray radiation source[J]. Journal of Imaging Research and Medical Applications, 2019, **3**(5): 106 - 108. DOI: 10.3969/j.issn.2096-3807.2019.05.070.