

# 国内常见环境 $\gamma$ 辐射监测仪性能评价

韦应靖, 黄亚雯, 杨慧梅, 万进举, 李强, 张庆利

中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006

中图分类号: TL81 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2014)02-0175-03

**摘要:** 目的 对国内常见的用于环境监测的  $\gamma$  辐射监测仪性能进行测试和评价。方法 根据检定规程 JJG 521-2006, 使用中国辐射防护研究院放射性计量站的 X 和  $\gamma$  参考辐射装置, 测试环境  $\gamma$  辐射监测仪性能。结果 对于测试的 25 种不同型号环境  $\gamma$  监测仪, 有 5 种型号仪器相对固有误差超出了检定规程规定范围。抽检 18 种不同型号的环境  $\gamma$  辐射监测仪能量响应, 所有仪器能量响应不能满足检定规程 JJG 521-2006 要求。结论 所有仪器辐射性能都不能满足检定规程 JJG 521-2006 要求。

**关键词:** 重复性; 相对固有误差; 能量响应; 角响应

DOI:10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2014.02.031

随着核能的广泛应用, 放射性环境和接触电离辐射人数越来越多, 工作人员的辐射防护和安全备受关注。国家环保部门要求, 一切从事辐射(放射)工作单位都必须设立或聘请环境辐射监测机构来执行环境核辐射监测<sup>[1]</sup>。其中环境核辐射监测是指为估计或控制核设施周围一定范围的环境辐射水平或放射性物质污染程度以及公众集体剂量当量而进行的监测。在环境核辐射监测中, 辐射剂量监测仪的性能关系到仪器能否提供可靠、准确、及时的信息, 让工作人员免受伤害。对于环境  $\gamma$  辐射监测用剂量率仪, 国内外有多种, 主要有三种类型: 高气压电离室型、闪烁体型和计数管型。随着辐射监测市场的扩大, 我国市场上使用的环境辐射监测仪种类较多。中国辐射防护研究院放射性计量站根据现有的辐射计量实验条件, 对国内部分常见的环境辐射监测仪表性能进行了测试, 结果如下。

## 1 评价依据和设备

**1.1 环境监测用剂量仪性能要求** 测量环境  $\gamma$  辐射的剂量率仪, 其量程范围应满足: 低量程:  $1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-5}$  Gy/h; 高量程:  $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2}$  Gy/h<sup>[2]</sup>。环境监测用 X、 $\gamma$  辐射空气比释动能(吸收剂量)率仪检定规程(JJG 521-2006)中规定<sup>[3]</sup>, 环境辐射监测仪主要辐射性能应满足表 1 中要求。

**1.2 测试设备** 目前, 对于环境仪表在极低剂量率条件下的校准, 国内技术还不是很成熟。“十二五”期间, 环境保护部提出联合清华大学将在中国锦屏地下

实验室共建“超低本底测量实验室”。但是, 至今国内尚没有环境水平  $\gamma$  辐射标准实验室, 对我国环境监测仪表研发和性能测试都带来了很大不便。目前, 国内的  $\gamma$  辐射计量机构, 在防护水平  $\gamma$  参考辐射装置上增加距离或加铅衰减器, 扩展辐射场剂量率下限, 用于校准环境  $\gamma$  辐射监测仪。

表 1 环境辐射监测仪主要性能要求

主要辐射性能	影响量的变化范围	技术要求
相对固有误差	有效测量范围	$\pm 15\%$
重复性	有效测量范围	$30\%$
能量响应	50 keV ~ 1.5 MeV	$\pm 30\%$
角响应	662 keV	相对 <sup>137</sup> Cs $\pm 20\%$
	59/60 keV	$\pm 30\%$
	90° ~ 120°和 -90° ~ -120°	$\pm 50\%$

本实验室在环境  $\gamma$  辐射监测仪性能评价中, 主要使用了中国辐射防护研究院放射性计量站按照 GB/T 12162.1<sup>[4]</sup> 要求建立的 X 射线(防护水平)参考辐射装置和  $\gamma$  射线(防护水平)参考辐射装置。辐射装置的辐射场特性如表 2 所示。由于这两套装置提供的最小剂量当量率为 10  $\mu$ Gy/h, 为了测量部分环境监测仪对较低剂量率的辐射响应, 在中国辐射防护研究院低本底铁室中, 使用便携式  $\gamma$  参考辐射装置, 对部分仪器的低剂量率响应特性进行了测试。中国辐射防护研究院低本底铁室环境本底剂量率约为 30 nGy/h, 通过对便携式  $\gamma$  参考辐射装置换装不同活度的<sup>241</sup>Am、<sup>137</sup>Cs 和<sup>60</sup>Co放射源, 可提供 100 nGy/h ~ 10  $\mu$ Gy/h 的  $\gamma$  辐射场。

表 2 测试设备辐射场特性

装置名称	能量范围	剂量率范围	相对扩展不确定度
X 射线(防护水平) 参考辐射装置	12 ~ 250 keV	10 $\mu$ Gy/h ~ 1 Gy/h	$U = 4.0\%$ ( $k=2$ )
$\gamma$ 射线(防护水平) 参考辐射装置	662 keV	10 $\mu$ Gy/h ~ 100 mGy/h	$U = 4.6\%$ ( $k=2$ )

## 2 仪器辐射性能测量结果

选取 25 种不同型号的环境  $\gamma$  辐射监测仪,对其性能进行测试,所选仪器型号、探测器类型和剂量率测量范围如表 3 中所示。在性能评价中选取的同一型号仪器数量有限,可能存在所选仪器不具有代表性的情况,在此以统计时的仪器测量结果为准。在数据统计时,如果测量同一型号的仪器数量大于 1 台,最后以其各台测量值的平均值作为最终评价结果。评价的仪器中,部分是测量周围剂量当量率的,在校准这些环境监测用周围剂量当量率监测仪时,使用了 GB/T 12162.3 中的转换系数  $h_k^*$  (10) [5]。下面将分别给出各种型号辐射监测仪的辐射特性测试结果。

**2.1 重复性** 重复性项测量时,在相同条件下连续测量 20 次,相邻两次读数的时间间隔不小于仪器时间常数 3 倍。最后仪器重复性以单次测量的相对标准偏差  $V$  表示:

$$V = \frac{1}{\bar{K}} \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{20} (\dot{K}_i - \bar{K})^2} \quad (1)$$

式中  $\dot{K}_i$  为被检仪器空气比释动能率测量值,  $\bar{K}$  为其算术平均值。

在几十  $\mu$ Gy/h 的辐射场中测量仪器重复性,25 种不同型号环境  $\gamma$  辐射监测仪的重复性测量结果如表 3 所示。由表 3 可知所有仪器重复性优于 5%,满足 JJG 521-2006 中规定仪器重复性应  $\leq 30\%$  的要求。

**2.2 相对固有误差** 在确定参考条件下,仪器对某一被测量在指定参考辐射下的指示值的相对误差,被定义为相对固有误差  $I$ :

$$I(\%) = \frac{\dot{K}_i - \dot{K}_t}{\dot{K}_t} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $\dot{K}_i$  为被检仪器测量值;  $\dot{K}_t$  为被测量约定真值。

在对各种型号环境  $\gamma$  辐射监测仪相对固有误差测量中,主要使用的是  $\gamma$  参考辐射装置。由于  $^{137}\text{Cs}$  参考辐射可提供的剂量率范围为 10  $\mu$ Gy/h ~ 100 mGy/h,因此,大部分测量相对固有误差的剂量率范

围为 10  $\mu$ Gy/h 至仪器最大量程。实验室选取 25 种环境  $\gamma$  辐射监测仪测量相对固有误差,在 10  $\mu$ Gy/h 至仪器最大量程的剂量率范围内,相对固有误差测量结果如表 3 中所示。从表 3 可知,大部分仪器的相对固有误差在  $\pm 10\% \sim \pm 15\%$  之间,有 4 种仪表相对固有误差  $\leq \pm 10\%$ 。其中有 5 种型号仪器的相对固有误差  $> \pm 15\%$ ,超过了 JJG 521-2006 中规定的范围。从这 5 种仪器测量结果数据可知,其相对固有误差大主要是由于仪器存在系统误差造成的。

另外,在中国辐射防护研究院低本底铁室内,使用便携式  $\gamma$  参考辐射装置测试了 SI31、TCS172B、PEG-NAI 三种型号的仪器。测试结果表明,在 100 nGy/h ~ 10  $\mu$ Gy/h 的剂量率范围内,SI31 和 TCS 172B 型监测仪的相对固有误差  $\leq \pm 15\%$ ,PEG-NAI(主机为 MPR 200)型监测仪的相对固有误差  $\leq \pm 25\%$ 。

表 3 各类环境  $\gamma$  辐射监测仪重复性和相对固有误差测量结果

序号	仪器 型号	探测器 类型	测量范围 ( $\mu$ Sv/h)	统计 台数	重复性		相对固有误差	
					$\leq 5\%$	$\leq \pm 10\%$	$\leq \pm 15\%$	$> \pm 15\%$
1	2241 + 44 - 10 <sup>1)</sup>	NaI	0.01 ~ 100	1	√		√	
2	TCS-172B <sup>1)</sup>	NaI	0.01 ~ 30	1	√		√	
3	SI31 <sup>1)</sup>	高压 电离室	0 ~ 100000	1	√		√	
4	FH40G + FHZ672E <sup>1)</sup>	塑料闪 烁体	0.01 ~ 100	3	√		√	
5	FJ 1200	NaI	0.01 ~ 200	22	√	√		
6	BS9511	NaI	0.03 ~ 100 <sup>2)</sup>	2	√		√	
7	BS9521	NaI	0.01 ~ 2500	1	√		√	
8	SC-3605	NaI	0.01 ~ 10000	2	√	√		
9	BH3103B	NaI	0.01 ~ 100 <sup>2)</sup>	5	√		√	
10	QH-2012	NaI	0.01 ~ 200	1	√	√		
11	PEG-NAI	NaI	0.01 ~ 200	1	√		√	
12	FD3013H	NaI	0.01 ~ 200	11	√		√	
13	JB4000	NaI	0.01 ~ 200	11	√		√	
14	JB4000(A)	NaI	0.01 ~ 200	6	√		√	
15	JW 3104B	NaI	0.01 ~ 100 <sup>2)</sup>	1	√		√	
16	JW3104	NaI	0.01 ~ 100 <sup>2)</sup>	1	√		√	
17	XH-2020	NaI	0.01 ~ 1500	14	√		√	
18	DH8000	NaI	0.01 ~ 200	1	√		√	
19	RM-2030	NaI	0.01 ~ 200	2	√			√
20	FD3013B	NaI	0.01 ~ 200	14	√			√
21	FJ428G	NaI	0.01 ~ 100 <sup>2)</sup>	1	√			√
22	DM 5200	NaI	0.01 ~ 200	1	√			√
23	MH 8200	GM 管	0.01 ~ 100000	1	√	√		
24	netEGM100	GM 管	0.1 ~ 10000	1	√		√	
25	BY211A	GM 管	0.1 ~ 100000	1	√			√

注: 1) 为国外产品; 2) 测量单位为  $\mu$ Gy/h。

表 4 各类环境  $\gamma$  辐射监测仪能量响应测量结果

序号	仪表型号	辐射质平均能量( keV)								抽检 台数
		662	211	185	149	109	87	60	48	
1	TCS -172B	1.00	1.03	0.98	1.03	0.95	0.90	0.65	0.27	1
2	SI31	1.00	1.07	1.10	1.29	1.44	1.31	0.38	0.04	1
3	FH40G + FHZ672E	1.00	0.88	0.76	0.64	0.59	0.44	0.34	-	2
4	FJ428G	1.00	1.42	1.45	1.51	1.48	1.42	1.42	1.48	1
5	SC -3605	1.00	1.20	1.16	1.10	1.00	0.81	0.66	0.41	2
6	RM -2030	1.00	0.96	0.85	0.64	0.47	0.84	1.49	0.99	1
		1.00	0.81	0.65	0.56	0.42	0.40	0.40	0.44	1
7	QH -2012	1.00	1.14	-	0.71	-	-	0.57	-	1
8	PEG -NAI	1.00	1.92	1.70	1.38	1.06	1.00	1.28	1.42	1
9	netEGM100	1.00	0.81	-	-	0.94	0.95	0.94	0.25	1
10	JB4000	1.00	1.61	1.22	0.76	0.66	0.72	0.76	0.79	2
11	JB4000( A)	1.00	1.69	1.32	0.92	0.50	0.36	-	-	1
12	JW 3104B	1.00	1.39	1.42	1.46	1.42	1.33	0.93	-	1
13	JW3104	1.00	1.24	1.22	1.26	1.27	1.18	0.88	-	1
14	XH -2020	1.00	1.28	1.17	1.15	1.36	1.58	0.86	-	1
15	DH8000	1.00	0.72	0.61	0.42	0.30	0.39	0.17	0.39	1
16	BH3103B	1.00	0.89	0.87	0.76	0.71	0.60	0.51	0.26	1
17	BS9521	1.00	0.88	0.67	0.66	0.74	0.76	1.32	0.73	1
18	FD3013B	1.00	3.62	3.71	4.32	4.53	4.62	6.84	4.38	3

2.3 能量响应 仪器测量值与辐射场约定真值的比值随辐射能量的变化为仪器的辐射能量响应。在能量响应测量中使用了 X 射线 L 系列和<sup>137</sup>Cs 参考辐射场。通过对 18 种不同型号的环境  $\gamma$  辐射监测仪能量响应特性测试 ,按<sup>137</sup>Cs 归一后的能量响应如表 4 所示。从表 4 可知 ,在 50 ~ 662 keV 范围内 ,没有仪器

能满足 JJG 521 -2006 中规定能量响应变化极限不超过  $\pm 30\%$  的要求。如果以辐射防护用 X、 $\gamma$  监测仪的技术性能要求评价<sup>[6]</sup> ,在 80 ~ 662 keV 范围内 ,能量响应变化极限不超过  $\pm 40\%$  的仪器 ,有 TCS -172B、SC -3605、netEGM 100、JW 3104、BH 3103B、BS 9521 六种 ,只占到总量的 1/3。其中个别仪器能量响应特别差 ,例如 ,FD 3013B 抽检 3 台 ,个体之间能量响应差别较大 ,同一能量点 ,不同仪器之间响应最大可相差 1 倍多 ,部分低能量点响应偏高将近 7 倍; DH 8000 型仪器对低能射线响应普遍偏低 ,部分能量点偏低将近 6 倍。如果这类仪器在复杂辐射场中使用 ,特别是低能辐射占比例较大的辐射场 ,测量的数值将会严重偏离真实情况 ,将对辐射评价带来严重影响。

2.4 角响应 仪器测量值与辐射场约定真值的比值随辐射入射角的变化为仪器的角响应。在角响应测量中使用了<sup>137</sup>Cs 参考辐射场。实验室选择 4 种型号的环境  $\gamma$  辐射监测仪 ,测量了 0° ~  $\pm 90^\circ$  入射角的角响应特性 ,按 0° 入射角归一后的测试结果如表 5 所示。从表 5 中可以看出 ,在 0° ~ 90° 入射角入射时 ,所有仪器对 662 keV 射线角响应都满足 JJG 521 -2006 中规定的不超过  $\pm 20\%$  要求。同时用平均能量为 65 keV 的 N -80 辐射场 ,测量了 1 台仪器的角响应特性 ,从表 5 可以看出 ,在 0° ~  $\pm 90^\circ$  入射角入射时 ,其角响应超过了 JJG 521 -2006 中规定的  $\pm 30\%$  要求。

表 5 部分环境  $\gamma$  辐射监测仪角响应测量结果

序号	仪器型号	参考 辐射	入射角(°)													抽检 台数
			90	75	60	45	30	15	0	-15	-30	-45	-60	-75	-90	
1	SC -3605	<sup>137</sup> Cs	0.99	0.98	0.98	0.98	0.99	1.01	1.00	1.00	0.99	0.98	0.98	0.98	0.99	1
2	JW3104	<sup>137</sup> Cs	1.08	1.08	1.06	1.04	1.02	1.00	1.00	1.02	1.03	1.06	1.06	1.08	1.09	1
3	BH3103B	<sup>137</sup> Cs	1.05	1.05	1.04	1.02	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.03	1.05	1.06	1.07	1
4	netEGM100	<sup>137</sup> Cs	0.97	0.98	0.94	0.90	0.93	0.96	1.00	0.99	0.98	0.98	0.90	1.03	0.87	1
		N -80	0.80	0.58	0.51	0.88	0.97	0.93	1.00	0.84	0.83	0.75	0.72	0.83	0.48	

3 总结

中国辐射防护研究院放射性计量实验室 ,根据现有的辐射计量条件 ,依据 JJG 521 -2006 测试了 25 种环境  $\gamma$  监测仪的固有误差、重复性 ,以及其中部分仪器的能量响应和角响应特性。由于条件限制 ,大部分仪器没有在 10  $\mu$ Gy/h 以下辐射场中测试 ,没能给出仪器在 100 nGy/h ~ 10  $\mu$ Gy/h 剂量率范围内的相对固有误差。但是根据 18 种型号仪器的能量响应测量结果 ,得知所有仪器的能量响应特性不能满足 JJG 521 -2006 要求。因此 ,对于测试的所有类型的环境

监测用 X、 $\gamma$  剂量率仪器 ,都无法满足 JJG 521 -2006 要求。根据测试结果 ,在此提出如下三点说明: ① 目前国内使用的环境 X、 $\gamma$  剂量率仪种类较多 ,性能也相差较大。用户不能盲目相信仪器使用说明书中给出的性能指标 ,需经测试满足要求后 ,再确定购买或投入使用。② 由于环境  $\gamma$  监测仪器的性能普遍比较差 ,环境辐射监测机构需要加强辐射监测人员的培训 ,提高专业知识和技术技能 ,以确保辐射监测人员监测的数据准确、可靠。③ 建议国内辐射监测仪器研发单位投入更多的人力和财力 ,研发出性能比较好的环境辐射监测仪器 ,以满足我国环境监测仪器市场需求。

# 环境 $\gamma$ 剂量率仪的比对与结果分析

梁军<sup>1</sup>, 陈祺<sup>2</sup>, 韦显周<sup>2</sup>, 尚兵<sup>3</sup>

1. 广西百色市卫生监督所 广西 百色 533000; 2. 广西居里安检测技术有限公司;

3. 中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所

中图分类号: TL81 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2014)02-0178-03

**摘要:** 目的 对常用的  $\gamma$  剂量率测量装置进行比对测量, 以了解不同测量装置的测量原理与效果, 及时发现问题, 改进和完善测量方法, 保证测量数据的质量。方法 采用  $^{137}\text{Cs}$  标准源, 选择已知的高照射量率的标准照射条件和普通室内外环境进行实验室和现场比对。结果 高照射量率的标准条件下, 各台仪器测量值与参考值的符合率  $\geq 94\%$ , 各点与参考值的  $\text{RPD} \leq 8\%$ ; 低照射量率的环境条件下, 各点与均值的  $\text{RPD} < 15\%$ 。结论 选用的 3 类 7 台不同型号的  $\gamma$  剂量率的比对结果有较好的可靠性和可比性。

**关键词:**  $\gamma$  剂量率; 比对测量; 符合率; 相对百分偏差

DOI:10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2014.02.032

便携式  $\gamma$  剂量率仪广泛用于环境、工作场所、地质勘探和高辐射势区地质填图工作的  $\gamma$  照射量率测量, 也用于医院 X 射线和  $\gamma$  射线的辐射防护的监测工作<sup>[1-2]</sup>。目前  $\gamma$  剂量率仪的种类很多, 比对测量是保证测量数据质量的一种简单易行、效果显著的测量实践<sup>[3]</sup>。本文从仪器的结构、技术参数和检定结果入手, 介绍正比计数管、加压电离室和闪烁晶体形探测器的工作原理, 同时选择标准照射场和环境现场进行高、低水平的  $\gamma$  剂量率现场比对测量。通过比较测量数据的符合率和离散度, 分析造成数据差别的原因, 以便及时发现问题, 了解影响因素, 改进和完善测量方法, 提高测量数据的可靠性和可比性。

## 1 测量装置的技术参数与原理

**1.1 仪器的基本信息** 参加本次比对的  $\gamma$  剂量率仪为常用的便携式测量装置。通常按探测器类型可分

为正比计数管型、加压电离室型和闪烁晶体型三类。表 1 是比对仪器的基本信息。比对前所有仪器均经有资质的实验室在已知活度的  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  辐射场检定, 表 2 是仪器的检定结果和校准因子  $N_c$ 。

### 1.2 工作原理

**1.2.1 正比计数管工作原理** 正比计数管 (proportional counter PC) 通常由一个细中心丝阳极 (钨丝) 和一个与其同轴的圆筒形阴极所组成 (见图 1), 这样可以提高在阳极附近的电场强度。圆筒的侧壁设有 X、 $\gamma$  射线的入射窗, 窗口材料通常为极薄的云母片或者金属铍。X、 $\gamma$  射线进入正比计数管后, 气体分子或原子发生电离, 生成离子对。初电离电子在电场作用下向中心阳极漂移过程中, 不断和气体分子或原子碰撞而损失能量, 又不断从电场获得能量, 在两个电极间施加的电压超过饱和电压时, 由于电场强度增加, 造成由电离产生的电子有足够能量在气体中进一步产生次级电离, 甚至次级电离的电子又产生新的离子对。这样由电极收集到的电荷远高于起始电离数, 而且与电极间的电压有关<sup>[4]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41273101)

作者简介: 梁军 (1965-) 男, 广西容县人, 主管医师, 主要从事职业卫生、放射卫生监测与评价工作。

## 参考文献

- [1] 国家环境保护局. GB 12379-90 环境核辐射监测规定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
- [2] 国家环境保护局. GB/T 14583-93 环境地表  $\gamma$  辐射剂量率测定规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 521-2006 环境监测用 X、 $\gamma$  辐射空气比释动能 (吸收剂量) 率仪 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2006.
- [4] 国家质量监督局. GB/T 12162. 1-2000 “用于校准剂量仪和剂量率仪以及确定其能量响应的 X 和  $\gamma$  参考辐射——第 1 部分: 辐射特性及产生方法” [S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [5] 国家质量技术监督局. GB/T 12162. 3-2004 “用于校准剂量仪和剂量率仪以及确定其能量响应的 X 和  $\gamma$  参考辐射——第 3 部分: 场所剂量仪和个人剂量计的校准及其能量响应和角响应的测定” [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 393-2003 辐射防护用 X、 $\gamma$  辐射剂量当量 (率) 仪和监测仪检定规程 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2006.

收稿日期: 2013-10-25