

CN9300206

CNIC-00565

IAE-0097

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

就地 HPG γ 谱仪的刻度及应用

CALIBRATION AND APPLICATION
OF A HPG γ GAMMA SPECTROMETER FOR
IN-SITU MEASUREMENTS

(In Chinese)



原子能出版社

中国核情报中心
China Nuclear Information Centre

CNIC-00565

IAE-0097

就地 HPGe γ 谱仪的刻度及应用

肖雪夫 岳清宇

(中国原子能科学研究院,北京)

摘 要

介绍了用于就地测量 γ 谱仪的刻度方法和技术,对一台可便携式 HPGe γ 谱仪进行了刻度。给出了该谱仪用于就地测量的放射性核素比活度刻度因子 (N_T/A) 和空气吸收剂量率刻度因子 (N_T/\dot{D}),对刻度因子的不确定度进行了估计。在核设施周围环境中进行了就地测量并与其它方法的测量结果进行了比对。

**CALIBRATION AND APPLICATION
OF A HPGe CAMMA SPECTROMETER FOR
IN-SITU MEASUREMENTS**

(In Chinese)

Xiao Xuefu Yue Qingyu

(China Institute of Atomic Energy, Beijing)

ABSTRACT

The principle and methods of the calibration for an in-situ γ spectrometer are introduced. The calibration for a portable HPGe γ spectrometer has been completed. The N_f/A (peak count rate per unit activity in soil) and N_f/\dot{D} (peak count rate per unit absorbed dose rate in the air) are listed. The uncertainties of the calibration factors are estimated. The in-situ measurements have been carried out in surroundings near the nuclear facilities and the data are compared with those measured by other methods.

引 言

六十年代初,美国保健与安全实验室(HASL)的 Beck 等人利用 γ 谱仪进行就地测量环境土壤中放射性核素的浓度及其在空气中产生的吸收剂量率的方法和技术的研究工作^[1-4]。

采用就地测量的方法,可测定土壤中天然放射性核素(如²³⁸U、²³²Th 和⁴⁰K)和人工放射性沉降物(如¹³⁷Cs、¹⁴⁴Ce、¹³¹I 等)^[5-11]的比活度及其在探测器处产生的空气吸收剂量率;可以用来测量环境中氡浓度及其子体的变化情况^[7];也能对核设施的气态流出物和核电站反应堆的烟羽进行分析^[8-9],结合高压电离室,监视动力堆的环境;该方法和技术尤其可用于引起环境污染的紧急情况,正如许多国家在 1986 年苏联切尔诺贝利核事故后的环境监测所表明的那样, γ 谱仪对环境中的裂变产物作快速就地测量是非常有价值的^[10]。因此, γ 谱仪就地测量的方法和技术在辐射防护、环境保护、地质勘探、地球物理考察、核动力等方面,得到了广泛的应用。

准确刻度是谱仪应用的重要环节之一。

1 实验装置

用于就地测量的 γ 谱仪系统由三部分构成:HPGe γ 探测器装置,多道脉冲幅度分析器和数据记录、数据处理设备,见图 1。

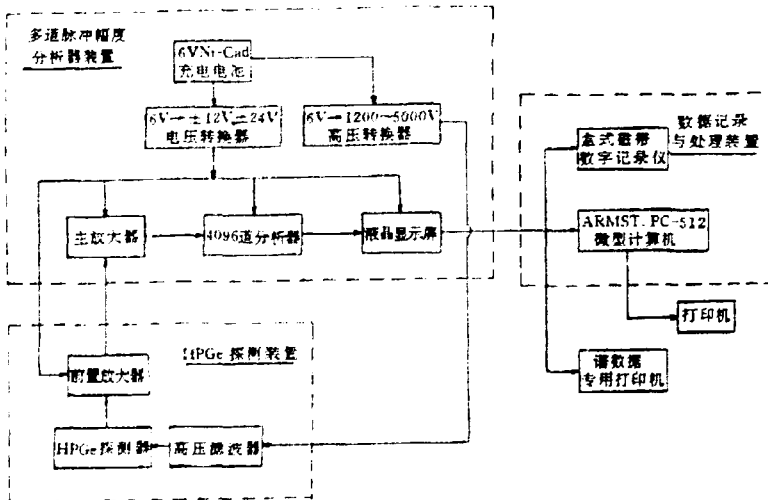


图 1 用于就地测量的 HPGe γ 谱仪方框图

探测器装置由 P 型准圆柱形 HPGe 晶体、容量 10 L 的冷却液氮罐以及前置电荷灵敏放大器和高压过滤器组成。HPGe 晶体的活性区直径为 45~50 mm,长 56 mm,密封于壁厚 1.8

mm 真空铝壳中,入射窗为 0.5 mm 厚的铝箔;对⁶⁰Co 的 1332.5 keV γ 射线的相对探测效率为 19.5%,半高宽为 2.3 keV。分析器装置是由美国 CANBERRA 公司生产的 S-10 系列 4096 道智能多道脉冲幅度分析器。 γ 谱数据记录设备为一台专用盒式磁带记录仪(Model 5421M)和一台专用谱数据打印机。ARMSTRAT PPC-512 微型计算机主要用作谱数据处理设备。 γ 谱分析软件由中国原子能科学研究院编制^[11]。

2 刻度的原理及公式

陆地 γ 辐射场由初级 γ 光子和次级 γ 光子两部分组成,它们与土壤中放射性核素的比活度、核素在土壤中的分布以及土壤的化学组分、土壤的湿度(包括水的含量)等因素有关^[5-11]。当上述因素不变时,土壤中任何一种放射性核素或其子体(若有子体存在,假定与母体处于放射性平衡)所发射的某一种能量的初级 γ 光子,在地面上高 1m 处探测器测量的全能峰计数率与土壤中该核素的比活度以及与该核素在距离地面 1m 处的空气中产生的 γ 辐射吸收剂量率有确定的比例关系,这种比例关系,可用下面等式表示^[5]:

$$(N_t/A) = (N_0/\phi)(N_t/N_0)(\phi/A) \quad (1)$$

$$(N_t/D) = (N_0/\phi)(N_t/N_0)(\phi/D) \quad (2)$$

式中, A 为土壤中放射性核素的比活度。对于天然放射性核素, A 是指它们在单位重量土壤中的活度值, Bq/kg; 对于沉降的放射性裂变产物和活化产物, A 是指它们在单位面积土壤上的沉积量, Bq/m²。

D 为地面上 1 m 处的空气吸收剂量率, nGy/h。

(N_t/A) 为比活度刻度因子,即土壤中单位比活度放射性核素发射能量为 E 的 γ 光子的全能峰计数率, cpm/(Bq/kg)或 cpm/(Bq/m²)。

(N_t/D) 为空气吸收剂量率刻度因子,即单位空气吸收剂量率的能量为 E 的 γ 光子产生的全能峰计数率, cpm/(nGy/h)。

(N_0/ϕ) 为探测效率,即沿探测器对称轴入射的单位注量率的能量为 E 的 γ 射线束产生的全能峰计数率, cpm/[γ s/(cm²·s)]。

(N_t/N_0) 为角响应校正因子,即考虑现场测量条件下, 2π 立体角度内入射的 γ 射线角校正因子,无量纲。

(ϕ/A) 为土壤中单位比活度的放射源,在距离地面 1m 处的能量为 E 的初级 γ 光子注量率, [γ s/(cm²·s)]/(Bq/kg)或 [γ s/(cm²·s)]/(Bq/m²)。

(ϕ/D) 为在探测器处产生单位空气吸收剂量率的能量为 E 的初级 γ 光子注量率, [γ s/(cm²·s)](nGy/h)。

式(1),(2)中,所有的因子都是入射 γ 光子能量 E 的函数,因子 (ϕ/A) 、 (ϕ/D) 和 (N_t/N_0) 也依赖于土壤中放射性核素的分布、土壤的组分和密度等因素, (N_t/N_0) 不仅与入射 γ 光子的能量、放射源的几何分布有关,而且还与探测器的形状和结构有关。 (ϕ/A) 、 (ϕ/D) 是在一定的假设条件下,由计算得到; (N_0/ϕ) 由刻度实验得到; (N_t/N_0) 由刻度实验测量并通过数值积分计算得到。

计算 (ϕ/A) 、 (ϕ/D) 时假定,新沉积的人工放射性核素在土壤表面呈平面源分布($a/\rho = 0$);随着时间的推移,沉降的核素向土壤深部渗透,在土壤中随深度呈指数分布($0 < a/\rho < \infty$);天然放射性核素在土壤中呈均匀分布($a/\rho = 0$)。 a/ρ 是核素随土壤深度的分布参数, cm^2/g ; ρ 是土壤密度($\rho = 1.6 \text{ g/cm}^3$); a 是张弛长度的倒数,即放射性核素的活度减少到 e^{-1} 的土壤深度, cm^{-1} 。

表1、表2分别列出了核试验沉降灰和核设施可能排放的一些典型人工放射性核素主要分支比 γ 射线的 (ϕ/A) 、 (ϕ/D) 值,天然放射性核素 ^{238}U 系、 ^{232}Th 系和 ^{40}K 主要分支比 γ 射线的 (ϕ/A) 、 (ϕ/D) 值列于表3中。

表1 ϕ/A 土壤中典型落下灰放射性核素单位比活度在地面上1m的初级 γ 光子注量率
($\gamma \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}) / (\text{Bq/m}^2)$)

核素	E (keV)	γ 分支比	$(a/\rho), \text{cm}^2/\text{g}$					
			0.0625	0.206	0.312	0.625	6.25	∞ (平面)
^{137}Cs	133.5	.1110	1.81(-6)	4.40(-6)	5.65(-6)	8.04(-6)	1.56(-5)	1.96(-5)
^{134}Cs	145.4	.4840	8.15(-6)	1.97(-5)	2.52(-5)	3.58(-5)	6.87(-5)	8.61(-5)
^{131}I	364.5	.8120	1.85(-5)	4.18(-5)	5.23(-5)	7.15(-5)	1.28(-4)	1.57(-4)
^{125}Sb	427.9	.2940	7.06(-6)	1.58(-5)	1.97(-5)	2.67(-5)	4.74(-5)	5.78(-5)
^{140}La	487.0	.4590	1.15(-5)	2.54(-5)	3.16(-5)	4.27(-5)	7.52(-5)	9.14(-5)
^{106}Ru	497.1	.8870	2.24(-5)	4.94(-5)	6.11(-5)	8.29(-5)	1.46(-4)	1.77(-4)
^{104}Ru	511.9	.2070	5.27(-6)	1.16(-5)	1.44(-5)	1.95(-5)	3.41(-5)	4.14(-5)
^{130}Ba	535.3	.2420	6.29(-6)	1.38(-5)	1.71(-5)	2.31(-5)	4.03(-5)	4.89(-5)
^{125}Sb	601.5	.1720	4.76(-6)	1.04(-5)	1.28(-5)	1.72(-5)	2.99(-5)	3.62(-5)
^{137}Cs	604.7	.9760	2.62(-5)	5.76(-5)	7.04(-5)	9.45(-5)	1.64(-4)	1.99(-4)
^{103}Ru	610.3	.0564	1.52(-6)	3.30(-6)	4.08(-6)	5.47(-6)	9.49(-6)	1.15(-5)
^{106}Ru	621.9	.0980	2.65(-6)	5.76(-6)	7.12(-6)	9.54(-6)	1.65(-5)	2.00(-5)
^{137}Cs	661.7	.8521	2.36(-5)	5.10(-5)	6.29(-5)	8.40(-5)	1.45(-4)	1.75(-4)
^{90}Zr	724.2	.4410	1.27(-5)	2.71(-5)	3.24(-5)	4.44(-5)	7.59(-5)	9.16(-5)
^{91}Zr	756.7	.5450	1.60(-5)	3.40(-5)	4.17(-5)	5.54(-5)	9.44(-5)	1.14(-4)
^{93}Nb	765.8	.9979	2.94(-5)	6.25(-5)	7.67(-5)	1.02(-4)	1.73(-4)	2.08(-4)
^{137}Cs	795.9	.8540	2.55(-5)	5.41(-5)	6.65(-5)	8.78(-5)	1.49(-4)	1.79(-4)
^{140}La	815.8	.2360	7.12(-6)	1.56(-5)	1.84(-5)	2.44(-5)	4.13(-5)	4.96(-5)
^{54}Mn	834.8	.9998	3.04(-5)	6.42(-5)	7.85(-5)	1.04(-4)	1.75(-4)	2.11(-4)
^{140}La	1596.5	.9540	3.68(-5)	7.29(-5)	8.76(-5)	1.13(-4)	1.83(-4)	2.17(-4)
^{60}Co	1173.2	.9990	3.41(-5)	6.98(-5)	8.47(-5)	1.11(-4)	1.83(-4)	2.19(-4)
^{22}Na	1274.5	.9994	3.53(-5)	7.17(-5)	8.67(-5)	1.13(-4)	1.85(-4)	2.21(-4)
^{60}Co	1332.5	.9998	3.59(-5)	7.25(-5)	8.77(-5)	1.14(-4)	1.87(-4)	2.22(-4)

表 2 ϕ/D —土壤中落下灰辐射源在地面上 1m 处初级 γ 光子注量率与空气吸收剂量之比
(γ s/cm² · s)/(μ Gy/h)

核素	能量 (keV)	(a/ρ) , cm ² /g					
		0.0625	0.206	0.312	0.625	6.25	∞ (plane)
¹⁴⁴ Ce	133.5	9.99(-2)	1.41(-1)	1.58(-1)	1.79(-1)	2.35(-1)	2.79(-1)
¹⁴⁴ Ce- ¹⁴⁴ Pr	133.5	3.99(-2)	5.62(-2)	6.28(-2)	7.15(-2)	9.52(-2)	1.10(-1)
¹⁴¹ Ce	145.4	1.22(-1)	1.56(-1)	1.72(-1)	1.95(-1)	2.53(-1)	2.88(-1)
¹³¹ I	364.5	5.02(-2)	6.00(-2)	6.46(-2)	7.13(-2)	8.68(-2)	9.11(-2)
¹²⁵ Sb	427.9	1.57(-2)	1.99(-2)	2.12(-2)	2.34(-2)	2.79(-2)	3.01(-2)
¹⁴⁰ La	487.0	5.36(-3)	6.63(-3)	7.10(-3)	7.85(-3)	9.37(-3)	9.99(-3)
¹⁴⁰ Ba- ¹⁴⁰ La	487.0	4.34(-3)	5.37(-3)	5.74(-3)	6.35(-3)	7.57(-3)	8.08(-3)
¹³⁷ Ru	497.0	4.72(-2)	5.69(-2)	5.94(-2)	6.49(-2)	7.63(-2)	8.12(-2)
¹²⁶ Ru- ¹²⁶ Rh	511.9	2.66(-2)	3.19(-2)	3.36(-2)	3.66(-2)	4.30(-2)	4.57(-2)
¹⁴² Ba	537.3	3.43(-2)	4.26(-2)	4.47(-2)	4.87(-2)	5.71(-2)	6.15(-2)
¹⁴⁰ Ba- ¹⁴⁰ La	537.3	2.37(-3)	2.92(-3)	3.11(-3)	3.42(-3)	4.06(-3)	4.32(-3)
¹³⁷ Sb	603.5	1.06(-2)	1.31(-2)	1.38(-2)	1.50(-2)	1.76(-2)	1.88(-2)
¹³³ Cs	604.7	1.70(-2)	2.02(-2)	2.14(-2)	2.33(-2)	2.70(-2)	2.87(-2)
¹³⁷ Ru	615.3	3.20(-3)	3.80(-3)	3.95(-3)	4.28(-3)	4.97(-3)	5.28(-3)
¹³⁷ Ru	621.9	1.34(-2)	1.58(-2)	1.65(-2)	1.80(-2)	2.08(-2)	2.21(-2)
¹³⁷ Cs	661.7	4.29(-2)	5.01(-2)	5.29(-2)	5.74(-2)	6.61(-2)	6.97(-2)
⁹⁵ Zr	724.2	1.79(-2)	2.07(-2)	2.16(-2)	2.36(-2)	2.69(-2)	2.84(-2)
⁹⁵ Zr- ⁹⁵ Nb	724.2	5.40(-3)	6.35(-3)	6.69(-3)	7.24(-3)	8.25(-3)	8.73(-3)
⁹⁵ Zr	755.7	2.25(-2)	2.60(-2)	2.73(-2)	2.95(-2)	3.35(-2)	3.52(-2)
⁹⁵ Zr- ⁹⁵ Nb	755.7	6.80(-3)	7.96(-3)	8.36(-3)	9.03(-3)	1.03(-2)	1.08(-2)
⁹⁵ Nb	765.8	3.96(-2)	4.59(-2)	4.82(-2)	5.21(-2)	5.90(-2)	6.21(-2)
⁹⁵ Zr- ⁹⁵ Nb	765.8	2.70(-2)	3.15(-2)	3.31(-2)	3.57(-2)	4.05(-2)	4.28(-2)
¹³⁶ Cs	795.9	1.66(-2)	1.92(-2)	2.01(-2)	2.17(-2)	2.45(-2)	2.58(-2)
¹⁴⁰ La	815.8	3.32(-3)	3.92(-3)	4.11(-3)	4.43(-3)	5.15(-3)	5.43(-3)
¹⁴⁰ Ba- ¹⁴⁰ La	815.8	2.68(-3)	3.18(-3)	3.35(-3)	3.62(-3)	4.16(-3)	4.39(-3)
⁵⁴ Mn	834.8	3.72(-2)	4.34(-2)	4.56(-2)	4.91(-2)	5.52(-2)	5.83(-2)
¹⁴⁰ La	1596.5	1.71(-2)	1.90(-2)	1.97(-2)	2.07(-2)	2.28(-2)	2.37(-2)
¹⁴⁰ Ba- ¹⁴⁰ La	1596.5	1.39(-2)	1.54(-2)	1.59(-2)	1.67(-2)	1.84(-2)	1.91(-2)
⁶⁰ Co	1173.2	1.37(-2)	1.56(-2)	1.63(-2)	1.74(-2)	1.94(-2)	2.03(-2)
²² Na	1274.5	3.01(-2)	3.37(-2)	3.52(-2)	3.74(-2)	4.09(-2)	4.27(-2)
⁶⁰ Co	1332.5	1.44(-2)	1.62(-2)	1.69(-2)	1.80(-2)	1.98(-2)	2.06(-2)

表3 土壤中天然放射性核素比活度刻度因子及在地面
1m 高处的空气吸收剂量率刻度因子

核素	E (keV)	N_0/ϕ cpm/(γ s/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)	N_1/N_0	ϕ/A ($\gamma\%$ / $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)/ (Bq/kg)	N_2/A cpm/(Bq/ kg)	ϕ/D (γ s/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$) (nGy/h)	N_3/D cpm/ (nGy/h)
^{238}U 系	106.1	729	0.711	1.19(-4)	6.17(-2)	2.76(-4)	1.43(-1)
	241.9	555	0.748	3.00(-4)	1.25(-1)	6.95(-4)	2.89(-1)
	295.1	462	0.767	8.35(-5)	2.96(-1)	1.94(-3)	6.87(-1)
	351.9	393	0.779	1.73(-3)	5.30(-1)	4.02(-3)	1.23
	609.3	237	0.801	2.70(-3)	5.13(-1)	6.27(-3)	1.19
	865.4	219	0.804	9.54(-5)	1.68(-2)	2.21(-4)	3.89(-2)
	768.4	192	0.810	3.23(-4)	5.02(-2)	7.49(-4)	1.16(-1)
	934.0	160	0.819	2.30(-4)	3.01(-2)	5.34(-4)	7.00(-2)
	1120.3	136	0.830	1.18(-3)	1.33(-1)	2.74(-3)	3.99(-1)
	1238.1	124	0.837	4.94(-4)	5.13(-2)	1.15(-3)	1.19(-1)
	1377.7	112	0.846	3.55(-4)	3.36(-2)	8.25(-4)	7.82(-2)
	1401.5	111	0.847	3.45(-4)	3.21(-2)	8.02(-4)	7.47(-2)
	1509.2	103	0.854	2.04(-4)	1.79(-2)	4.72(-4)	4.15(-2)
	1729.6	91.1	0.868	3.04(-4)	2.40(-2)	7.06(-4)	5.58(-2)
	1764.5	89.4	0.870	1.60(-3)	1.24(-1)	3.72(-3)	2.89(-1)
	1847.4	85.7	0.876	2.19(-4)	1.64(-2)	5.09(-4)	3.87(-2)
	2204.1	72.9	0.897	5.66(-4)	3.70(-2)	1.31(-3)	8.57(-2)
2447.7	66.2	0.912	1.86(-4)	1.12(-2)	4.31(-4)	2.60(-2)	
^{232}Th 系	129.0	791	0.628	9.02(-5)	4.48(-2)	1.38(-4)	6.86(-2)
	209.4	633	0.730	1.56(-4)	7.21(-2)	2.37(-4)	1.10(-1)
	238.6	562	0.747	1.74(-3)	7.30(-1)	2.65(-3)	1.11
	240.8	557	0.748	1.56(-4)	6.50(-2)	2.38(-4)	9.92(-2)
	270.3	501	0.759	1.60(-4)	6.08(-2)	2.43(-4)	9.24(-2)
	277.3	489	0.762	1.04(-4)	3.88(-2)	1.58(-4)	5.89(-2)
	306.0	455	0.768	1.46(-4)	5.10(-2)	2.23(-4)	7.79(-2)
	328.1	419	0.774	1.59(-4)	5.16(-2)	2.42(-4)	7.85(-2)
	338.4	407	0.776	5.94(-4)	1.88(-1)	9.05(-4)	2.86(-1)
	463.1	306	0.791	2.41(-4)	5.81(-2)	3.68(-4)	8.88(-2)
	510.6	279	0.795	4.51(-4)	1.00(-1)	6.88(-4)	1.53(-1)
	583.0	247	0.799	1.96(-3)	3.87(-1)	2.98(-3)	5.89(-1)
	727.3	202	0.807	4.83(-4)	7.87(-2)	7.36(-4)	1.20(-1)
	755.3	195	0.809	8.65(-5)	1.36(-2)	1.32(-4)	2.08(-2)
	772.3	191	0.810	7.83(-5)	1.21(-2)	1.19(-4)	1.84(-2)
	794.8	186	0.811	3.10(-4)	4.68(-2)	4.72(-4)	7.12(-2)
	835.6	178	0.813	2.27(-4)	3.29(-2)	3.45(-4)	4.89(-2)
	860.3	173	0.815	3.02(-4)	4.26(-2)	4.61(-4)	6.50(-2)
	911.2	164	0.818	2.09(-3)	2.80(-1)	3.18(-3)	4.29(-1)
	964.6	156	0.821	4.29(-4)	5.49(-2)	6.54(-4)	8.38(-2)
969.0	155	0.821	1.29(-3)	1.64(-1)	1.87(-3)	2.51(-1)	
1588.2	98.5	0.859	3.44(-4)	2.91(-2)	5.24(-4)	4.43(-2)	
2614.4	62.3	0.921	4.46(-3)	2.56(-1)	6.80(-3)	3.90(-1)	
^{40}K	1460.8	106	0.851	9.74(-4)	8.79(-2)	2.33(-2)	2.10

3 HPGe γ 谱仪的刻度及结果

3.1 刻度源

刻度实验所用 γ 辐射源见表 4。

表 4 HPGe γ 谱仪系统刻度所用标准源

核素	E (keV) ^a	分之比 ^b	活度 (Bq)	不确定度 (%)	活度标准测量机构
²⁴¹ Am	59.5364	0.357	162.07 (1990.3.12)	5.0	中国原子能科学院
¹³⁷ Ba	80.989	0.342	0.111 (1986.3.8)	2.0	日本广岛大学
¹⁵² Gd	97.4315 103.63	0.276 0.196	13.911 (1989.6.12)	3.0	中国原子能科学院
¹⁵² Eu	121.7758 244.286 344.286 778.920 964.110 1112.075 1408.002	0.284 0.0751 0.266 0.1298 0.145 0.136 0.208	1.32867 (1983.10.16)	3.5	中国计量科学院
¹³⁷ Cs	661.660	0.8521	3.404 (1983.8.12)	3.0	中国计量科学院
⁶⁰ Co	1173.237 1332.501	0.9990 0.999824	6.028 (1983.7.25)	3.0	中国计量科学院
²²⁸ Ra	1764.49 2204.09	0.159 0.0499	0.1140(mg) (1984.6.14)	2.0	中国计量科学院

^a取自文献[8]

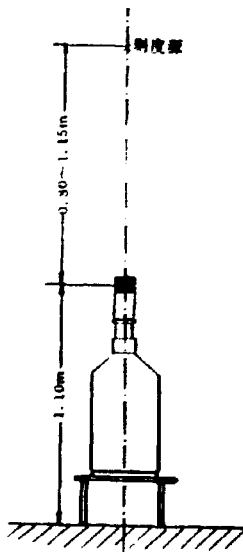


图 2 探测效率刻度实验示意图

3.2 探测效率(N_0/ϕ)的刻度

为了方便操作和减少地面散射的影响,探测器被固定在一木质刻度台上,根据 γ 辐射源活度的强弱,使其距探测器晶体几何中心分别为 0.80 m、1.00 m、1.15 m,以使 γ 射线束近似平行于探测器的轴线入射,见图 2。

在上述条件下,用不同能量的 γ 辐射源进行刻度。由计算机分析处理得到相应的全能峰净计数率 N_0 (cpm)。

γ 光子注量率根据公式:

$$\phi_E = \frac{S_0 \eta_E}{4\pi r^2} \cdot e^{-(\mu/\rho)_a r} \quad (3)$$

其中, S_0 是 γ 辐射源的活度, Bq。

η_E 是 γ 辐射源发射能量为 E 的初级 γ 光子的分支比。

ϕ_E 是放射性活度为 S_0 的 γ 辐射源在探测器灵敏中心点处的能量为 E 的初级 γ 光子注量率, $\gamma/s/(cm^2 \cdot s)$ 。

r 是辐射源到探测器灵敏中心的距离, cm。

$(\mu/\rho)_a$ 是空气质量衰减系数, cm^2/g 。

ρ 是空气密度, 本文假定 ρ 为一常数 (0.001204 g/cm^3).

探测器晶体的灵敏中心与入射 γ 光子的能量有关, 本文采用文献[13]的半经验公式, 对不同能量的入射 γ 光子, 计算了探测器晶体表面到灵敏中心的距离, 以此对源到探测器几何中心的距离进行修正.

计算初级 γ 光子注量率时, 对聚四氟乙烯探测器端帽和铝箔入射窗的吸收, 都进行了修正. 对于薄膜源, 由于聚乙烯薄膜对 γ 光子的吸收很小, 予以忽略. ^{241}Am 源和液体 ^{152}Gd 源, 对其透射窗的吸收影响也作了相应的考虑.

由实验得到的 N_0 和计算求得的 ϕ_0 , 得出一组平行探测器对称轴入射的不同能量初级 γ 光子的探测效率响应 (N_0/ϕ).

对这组实验数据 (N_0/ϕ) 及其对应的能量, 用下面对数多项式进行最小二乘法进行拟合:

$$\ln(Y/Y_0) = \sum B_i \cdot [\ln(E/E_0)]^i, i = 0, 1, \dots, 8 \quad (4)$$

其中, E 是初级 γ 光子的能量, keV.

$$E_0 = 1 \text{ keV}$$

$$Y = (N_0/\phi), \text{cpm}/[\gamma\text{s}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$$

$$Y_0 = 1 \text{cpm}/[\gamma\text{s}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$$

B_i 是拟合系数.

为了便于探测效率 (N_0/ϕ) 值的外推, 鉴于当 γ 光子能量大于 200 keV 时, (N_0/ϕ) 值随能量 E 在双对数坐标图上呈直线展布趋势, 用以下函数进行最小二乘法拟合:

$$\ln(Y/Y_0) = B_0 + B_1 \cdot \ln(E/E_0) \quad (5)$$

式中, B_0, B_1 为拟合系数.

(N_0/ϕ) 的实验值和拟合曲线见图 3.

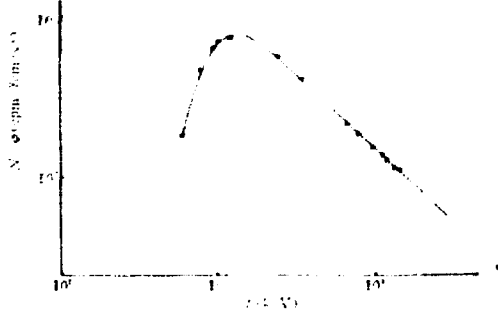


图 3 全能峰探测效率曲线

$$E \geq 200 \text{ keV}, \ln(Y/Y_0) = 11.3583 - 0.9183 \ln(E/E_0),$$

$$Y_0 = 1 \text{cpm}/\text{r} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, E_0 = 1 \text{keV}$$

3.3 角响应校正因子 (N_i/N_0) 的刻度

由于探测器结构和晶体形状的影响, 探测器对 γ 射线并非各向同性, 需要作角响应校正. 对于同轴圆柱形 HPGc 晶体, 通常认为其水平方向是对称的, 在就地测量中, 半无限大土壤空间内放射性核素发射的 γ 光子, 是以 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围入射到探测器 (天空散射光子除外),

角响应校正因子可由下式确定:

$$(N_i/N_0) = \frac{1}{\phi} \int_0^1 R(\omega) \frac{d\phi}{d\omega} d\omega \quad (6)$$

其中, $d\phi/d\omega = \phi(\omega)$ 是土壤中的放射性核素发射能量为 E 的初级 γ 光子在地面上高 1m 处的注量率角分布。

$R(\omega)$ 是任一能量的平行 γ 光子束沿与探测器对称轴成不同角度 θ 入射的全能峰计数率, 用同一能量的平行 γ 光子束沿探测器对称轴入射的全能峰计数率归一后的拟合函数, 以下称之为相对角响应因子。

确定相对角响应因子 $R(\omega)$ 刻度实验如图 4 所示。保持源到探测器晶体几何中心的距离不变, 在源和探测器晶体几何中心的连线与探测器对称轴线的夹角为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内, 每隔 15° 测出不同能量入射 γ 光子的全能峰净计数率 $N(\theta)$ (cpm), 用沿探测器入射窗轴线入射的同一能量 γ 光子的全能峰净计数率 N_0 归一, 得

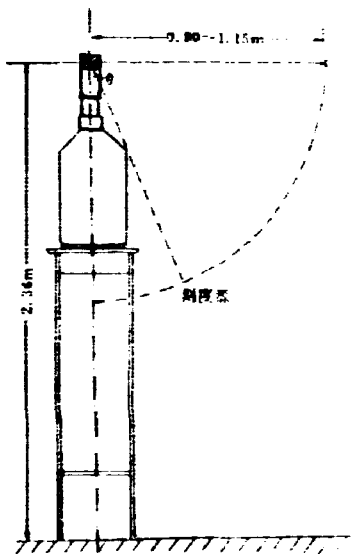


图 4 相对角响应因子刻度实验示意图

到若干组不同能量入射 γ 光子的相对角响应因子的实验值 $N(\theta)/N_0$, 用最小二乘法分别对各能量入射 γ 光子的相对角响应因子的实验值, 按余弦多项式函数进行拟合:

$$R(\omega) = \sum C_i \cdot (\omega)^i, \quad i = 0, 1, \dots, 6 \quad (7)$$

式中, $\omega = \cos\theta$, C_i 是拟合系数, 部分拟合曲线 $R(\omega)$ 绘于图 5。

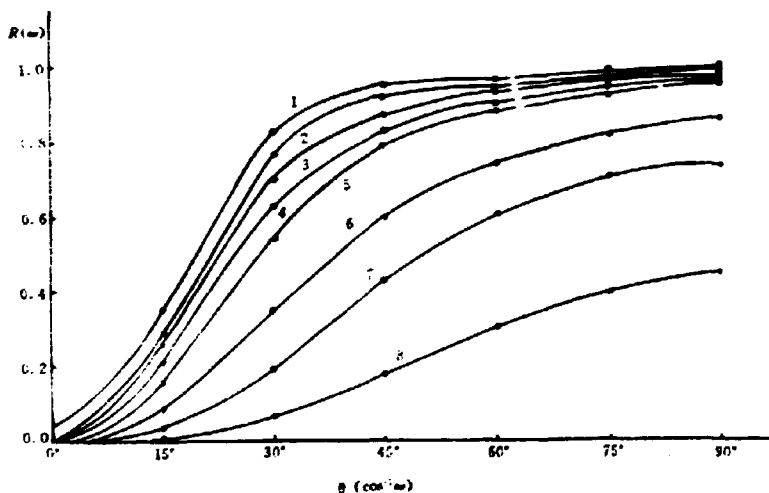


图 5 相对角响应因子 $R(\omega)$ 拟合曲线

1—2204.1 keV, 2—1408.0 keV, 3—1173.2 keV, 4—778.9 keV,
5—344.7 keV, 6—121.7 keV, 7—97.4 keV, 8—59.5 keV.

从图 5 可以看出, 不同能量入射 γ 光子的相对角响应因子 $R(\omega)$ 值, 都随入射角 θ 的增大而增加的。这主要是液氘罐、液氮以及探测器真空室的柱形钢壁对入射 γ 光子的部分吸收

所致;HPGe 晶体对不同角度入射的 γ 光子呈现不同的有效灵敏体积,探测器晶体的铝封装外壳和聚四氟乙烯端帽对 γ 光子的吸收,也都有一定程度的影响。

根据公式(5),采用辛卜生法在积分限 $\omega = 0 \sim 0.99999$ 上进行数值积分,得到放射性核素在土壤中呈不同分布参数(α/ρ_0)的角响应校正因子(N_i/N_0),结果绘于图6。

从图6可看到,由于探测器入射窗朝上的结构,在环境 γ 辐射能区范围内,其角响应校正因子(N_i/N_0)均小于1,一般在0.3~0.9之间。

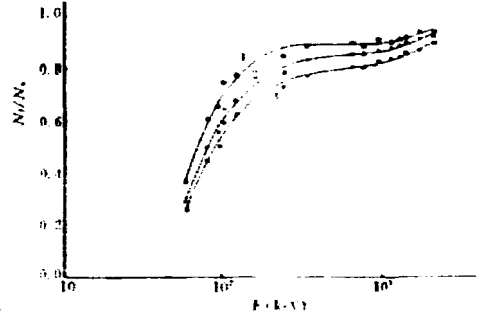


图6 角响应校正因子拟合曲线

1— $\alpha/\rho_0 = \infty$; 2— $\alpha/\rho_0 = 0.312$; 3— $\alpha/\rho_0 = 0$ 。

3.4 刻度因子(N_i/A)和(N_i/D)

通过理论计算和刻度实验,分别得到因子(ϕ/A)、(ϕ/D)和(N_0/ϕ)、(N_i/N_0)的值,利用公式(1)、(2),便得到该谱仪就地测量土壤中的放射性核素的比活度刻度因子(N_i/A)及其在地面上高1m处产生的空气吸收剂量率刻度因子(N_i/D)。结果列于表3、表5和表6。

3.5 刻度因子(N_i/A)和(N_i/D)的不确定度估计

由公式(1)、(2)和公式(3),放射性核素比活度刻度因子(N_i/A)和空气吸收剂量率刻度因子(N_i/D)的不确定度由以下各不确定度分项:

$$\Delta(N_i/A) = \Delta S_0 + \Delta V_0 + \Delta \eta + 2\Delta r + \Delta(N_i/N_0) + \Delta(\phi/A) \quad (8)$$

$$\Delta(N_i/D) = \Delta S_0 + \Delta V_0 + 2\Delta r + \Delta \eta + \Delta(N_i/N_0) + \Delta(\phi/D) \quad (9)$$

其中, $\Delta(N_i/A)$ 、 $\Delta(N_i/D)$ 分别为比活度刻度因子和吸收剂量率刻度因子的总不确定度。

ΔS_0 为辐射活度的不确定度。

ΔV_0 为进行探测效率刻度时,能量为E的全能峰净计数率的统计误差。

$\Delta \eta$ 为 γ 辐射源发射能量为E的 γ 光子的分支比的不确定度。

Δr 为源到探测器灵敏中心距离的不确定度。

$\Delta(N_i/N_0)$ 为角响应校正因子的不确定度。

$\Delta(\phi/A)$ 、 $\Delta(\phi/D)$ 分别为因子(ϕ/A)和(ϕ/D)的不确定度。

式(8)、(9)中,忽略了计算机的解谱误差项和空气质量衰减系数的不确定度项。式中各不确定度分项按其数值评定方法归纳为A、B两类,其数值及数据来源列于表7中。

总不确定度按下面公式计算^[13]:

$$U = k \left\{ \sum_j [A_j^2 + \frac{1}{3} B_j^2] \right\}^{1/2} \quad (10)$$

式中,k为置信因子,本文取k=3。

当 $E \geq 200$ keV 时,刻度因子(N_i/A)和(N_i/D)的总不确定度为 $\pm 9\%$;当 $E < 200$ keV 时,刻度因子(N_i/A)和(N_i/D)的总不确定度为 $\pm 13\%$ 。

表 5 N_i/A ——土壤中人工放射性核素比活度刻度因子 $\text{cpm}/(\text{Bq}/\text{kg})$

核素	E (keV)	分支比	$a/\rho \text{cm}^2/\text{g}$					
			0.0625	0.206	0.312	0.625	6.25	∞ (平面)
^{144}Ce	133.5	0.111	9.47(-4)	2.39(-3)	3.13(-3)	4.58(-3)	9.48(-3)	1.23(-2)
^{141}Ce	145.4	0.484	4.44(-3)	1.11(-2)	1.45(-2)	2.11(-2)	4.32(-2)	5.52(-2)
^{131}I	364.5	0.812	5.65(-3)	1.31(-2)	1.66(-2)	2.31(-2)	1.30(-2)	5.32(-2)
^{125}Sb	427.9	0.254	1.88(-3)	4.32(-3)	5.44(-3)	7.51(-3)	1.37(-2)	1.69(-2)
^{140}La	487.0	0.459	2.74(-3)	6.22(-3)	7.80(-3)	1.07(-2)	1.94(-2)	2.38(-2)
^{103}Ru	497.0	0.887	5.23(-3)	1.19(-2)	1.49(-2)	2.04(-2)	3.68(-2)	4.52(-2)
^{106}Ru	511.9	0.207	1.20(-3)	2.72(-3)	3.41(-3)	4.66(-3)	8.40(-3)	1.03(-2)
^{140}Ba	537.3	0.2439	1.37(-3)	3.10(-3)	3.87(-3)	5.29(-3)	9.49(-3)	1.16(-2)
^{125}Sb	600.5	0.178	9.44(-4)	2.11(-3)	2.63(-3)	3.57(-3)	6.36(-3)	7.78(-3)
^{134}Cs	604.7	0.9756	5.15(-3)	1.15(-2)	1.43(-2)	1.95(-2)	3.47(-2)	4.24(-2)
^{103}Ru	610.3	0.0564	2.96(-4)	6.61(-4)	8.24(-4)	1.12(-3)	1.99(-3)	2.43(-3)
^{106}Ru	621.9	0.0985	5.10(-4)	1.14(-3)	1.41(-3)	1.92(-3)	3.41(-3)	4.16(-3)
^{137}Cs	661.7	0.8521	4.30(-3)	9.51(-3)	1.18(-2)	1.60(-2)	2.82(-2)	3.44(-2)
^{95}Zr	724.2	0.441	2.13(-3)	4.68(-3)	5.79(-3)	7.80(-3)	1.36(-2)	1.66(-2)
^{95}Zr	756.7	0.545	2.58(-3)	5.63(-3)	6.97(-3)	9.36(-3)	1.63(-2)	1.98(-2)
^{95}Nb	765.8	0.9979	4.71(-3)	1.02(-2)	1.27(-2)	1.70(-2)	2.95(-2)	3.59(-2)
^{134}Cs	795.9	0.8544	3.96(-3)	8.57(-3)	1.06(-2)	1.42(-2)	2.46(-2)	2.98(-2)
^{140}La	815.8	0.236	1.08(-3)	2.34(-3)	2.88(-3)	3.85(-3)	6.66(-3)	8.07(-3)
^{54}Mn	834.8	0.99975	4.53(-3)	9.76(-3)	1.20(-2)	1.61(-2)	2.77(-2)	3.36(-2)
^{140}La	1596.5	0.954	3.18(-3)	6.41(-3)	7.73(-3)	1.00(-2)	1.64(-2)	1.96(-2)
^{60}Co	1173.2	0.9990	3.79(-3)	7.93(-3)	9.68(-3)	1.27(-2)	2.14(-2)	2.58(-2)
^{22}Na	1274.5	0.99937	3.67(-3)	7.59(-3)	9.24(-3)	1.21(-2)	2.02(-2)	2.42(-2)
^{60}Co	1332.5	0.99982	3.60(-3)	7.41(-3)	9.00(-3)	1.18(-2)	1.96(-2)	2.35(-2)

表 6 N_i/D ——空气吸收剂量率刻度因子(人工放射性核素) $\text{cpm}/(\text{nGy}/\text{h})$

核素	E (keV)	N_e/ϕ	$(n/\rho) \text{cm}^2/\text{g}$					
			0.0625	0.206	0.312	0.625	6.25	∞ (平面)
^{144}Ce	133.5	797	52.3	76.8	87.3	102	143	173
^{144}Ce - ^{144}Pr	133.5	797	20.9	30.6	34.8	40.7	57.8	68.5
^{141}Ce	145.4	801	66.3	88.2	98.8	115	159	184
^{131}I	364.5	381	15.3	18.9	20.6	23.1	29.1	30.9
^{125}Sb	427.9	329	4.19	5.44	5.88	6.56	8.08	8.86
^{140}La	487.0	292	1.28	1.62	1.75	1.97	2.41	2.60
^{140}Ba - ^{140}La	487.0	292	1.03	1.31	1.42	1.59	1.95	2.10
^{103}Ru	497.1	286	11.0	13.7	14.4	16.0	19.3	20.7
^{106}Ru - ^{106}Rh	511.9	279	6.07	7.46	7.92	8.78	10.6	11.4
^{140}Ba	537.3	267	7.49	9.55	10.1	11.2	13.4	14.6
^{140}Ba - ^{140}La	537.3	267	0.518	0.654	0.703	0.785	0.956	1.03
^{125}Sb	600.5	241	2.10	2.65	2.84	3.12	3.74	4.05
^{134}Cs	604.7	239	3.34	4.09	4.36	4.81	5.71	6.12
^{103}Ru	610.3	237	0.625	0.732	0.797	0.876	1.04	1.12
^{106}Ru	621.9	233	2.58	3.12	3.29	3.62	4.30	4.59

续表6

核素	E(keV)	N ₀ /φ	(a/ρ ₀) cm ² /g					∞(平面)
			0.0625	0.208	0.312	0.625	6.25	
¹³⁷ Cs	661.7	220	7.81	9.34	9.95	10.9	12.9	13.7
⁹⁵ Zr	724.2	203	3.00	2.57	3.79	4.15	4.83	5.13
⁹⁵ Zr- ⁹⁵ Nb	724.2	203	0.909	1.10	1.16	1.27	1.48	1.58
⁹⁵ Zr	756.7	195	3.64	4.31	4.56	4.98	5.78	6.13
⁹⁵ Zr- ⁹⁵ Nb	756.7	195	1.10	1.32	1.40	1.53	1.77	1.89
⁹⁵ Nb	765.8	193	6.35	7.52	7.96	8.70	10.1	10.7
⁹⁵ Zr- ⁹⁵ Nb	765.8	193	4.32	5.17	5.47	5.98	6.92	7.37
¹³⁴ Cs	795.9	186	2.57	3.05	3.22	3.50	4.05	4.29
¹⁴⁰ La	815.8	182	0.503	0.609	0.647	0.707	0.830	0.882
¹⁴⁰ Ba- ¹⁴⁰ La	815.8	182	0.407	0.493	0.523	0.572	0.671	0.713
⁵⁴ Mn	834.8	178	5.53	6.60	6.98	7.60	8.72	9.28
¹⁴⁰ La	1596.5	98.0	1.48	1.67	1.74	1.84	2.05	2.14
¹⁴⁰ Ba- ¹⁴⁰ La	1596.5	98.0	1.20	1.35	1.40	1.49	1.65	1.73
⁶⁰ Co	1173.2	130	1.52	1.77	1.87	2.01	2.27	2.39
²² Na	1274.5	121	3.13	3.57	3.75	4.01	4.46	4.68
⁶⁰ Co	1332.5	116	1.44	1.65	1.74	1.86	2.07	2.17

表7 刻度因子(N_t/A)和(N_t/D)各分项相对不确定度(%)

类别	A	B					
		1σ	1σ	2σ	Δ(N _t /N ₀)	Δ(φ/A)	Δ(φ/D)
不确定度							
E < 200keV	±1.5	±5	±6.5	±1	±5.5	±5	±5
E ≥ 200keV	±1	±3.5	±2.3	±1	±2	±5	±5
数据获取	统计计算	标准源证书	文献[10]	估计	计算	计算	文献[16]

4 现场测量初步应用

在中国原子能科学研究所的场区和生活区,用HPGe γ谱仪进行了就地测量实验。

测量场地的选择原则为:(1)地面开阔,至少在半径为30 m左右的范围内无建筑物或其它大的障碍物;(2)地势较平坦,无大的起伏;(3)近期内土壤未遭受大的破坏(例如:翻耕、填土等)。另外,还在三个土壤遭受破坏的测点、三个受核设施直接辐射影响的测点和一个楼顶(混凝土材料)测点上也进行了测量。

用HPGe γ谱仪测量以前,先用便携式巡测仪检测一遍,以保证测点周围地面的γ辐射场大致均匀。测量时,HPGe探测器安放在铝制的三脚架上,使其晶体几何中心距离地面的高度保持1 m。

测量时间选择为3000~4000 s活时间,个别测点为6000 s活时间。

在现场就地测量的计算中,²³⁸U系采用351.9 keV、609.3 keV、1120.3 keV和1764.5 keV的全能峰计数率,²³²Th系采用583.0 keV、911.2 keV、964.8+969.0 keV和2614.5 keV的全

能峰计数率,⁴⁰K用1460.8 keV的全能峰计数率,¹³⁷Cs用661.7 keV的全能峰计数率,其它人工放射性核素也各选用较强分支比的全能峰计数率。

用上述各全能峰净计数率除以表3、5、6中相应的(N_i/A)和(N_i/D)因子,便得到有关的放射性核素在土壤中的比活度以及该核素(或衰变系列)在地面高1m处产生的空气吸收剂量率。有两个能量分支以上参加计算的放射性核素或衰变系列,用全能峰净计数率的标准差加权平均,以使结果更为精确。

对于相近能量射线的干扰(如,²¹⁴Bi的665.4 keV对¹³⁷Cs的661.7 keV的干扰等),计算时参考干扰核素的其他分支加以修正。

本测区环境土壤中的人工放射性核素¹³⁷Cs,其深度分布参数(α/ρ_s)参照文献[6.9],对近期末遭受破坏的土壤,取 $\alpha/\rho_s = 0.45 \text{ cm}^2/\text{g}$;对翻耕过的土壤,取 $\alpha/\rho_s = 0.0625 \text{ cm}^2/\text{g}$;对混凝土建筑物表面和新鲜土壤表面,取 $\alpha/\rho_s = \infty$ 。

为了检验HPGe γ 谱仪用于环境就地测量空气吸收剂量率的刻度结果,在各测点上,用高压电离室(CIAE-III)进行了环境辐射总吸收剂量率的测量,减去宇宙射线的吸收剂量率贡献(本测区,该值约为 $31.8 \text{ nGy/h}^{(1)}$),便得到环境 γ 辐射的空气吸收剂量率。把HPGe γ 谱仪测量天然放射性核素和人工放射性核素的空气吸收剂量率值求和,也得到环境 γ 辐射的空气吸收剂量率。这两组测量结果并列于表8中。由表8可知,这两种不同方法测量的环境 γ 辐射空气吸收剂量率值吻合很好,最大偏差为 $\pm 8.2\%$,一般偏差小于 $\pm 5\%$ 。由表8还可知, γ 谱仪在开阔的混凝土材料表面上进行 γ 辐射空气吸收剂量率就地测量,也能得到与高压电离室吻合较好的测量结果。

表8 HPGe γ 谱仪与高压电离室就地测量环境 γ 空气吸收剂量率结果比较(nGy/h)

测点号	HPGe γ 谱仪就地测量结果					总和	高压电离室测量结果*	误差(%)	土壤湿度(%)	土壤近期状况
	²³⁸ U系	²³² Th系	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs与其它核素						
1	10.95	21.35	21.76	1.22(¹³⁷ Cs)	55.3	55.9	-1.07	17.1	未受破坏	
2	11.99	21.06	21.46	1.11(¹³⁷ Cs)	55.7	58.1	-4.13	16.3	未受破坏	
3	10.28	22.31	20.90	1.98(¹³⁷ Cs)	55.5	58.1	-4.48	15.1	未受破坏	
4	10.92	22.14	20.15	1.89(¹³⁷ Cs)	55.1	55.4	-0.54	13.4	未受破坏	
5	11.39	23.54	20.96	1.16(¹³⁷ Cs)	57.0	54.7	+4.20	15.4	未受破坏 枯叶覆盖	
6	11.03	21.52	22.87	0.25(¹⁰⁶ Ru) 0.26(¹³⁷ Cs)	55.9	60.9	-8.21	12.7	翻耕,桧树 种花两年	
9	10.33	27.05	31.00	0.39(¹³⁷ Cs) 0.08(¹³¹ I) 0.49(¹²⁵ Sb) 0.65(⁹⁵ Nb)	69.4	72.0	-3.61	7.2	土建渣土 活动场地 原土壤遭 受破坏	
10	11.74	22.38	25.11	0.27(¹³⁷ Cs)	59.5	57.7	+3.12	-	新鲜土壤	
12	10.98	22.12	28.20	0.52(¹³⁷ Cs)	61.8	58.1	+6.37	7.3	未受破坏	
13	12.07	23.51	21.47	0.58(¹³⁷ Cs)	57.6	55.3	+4.16	25.0	未受破坏	
14	15.48	30.59	30.71	0.59(¹³⁷ Cs)	77.4	81.6	-5.15	-	未受破坏	
15	13.17	15.16	15.95	0.11(¹³⁷ Cs)	44.4	44.9	-1.11	-	混凝土	

* 高压电离室测量结果扣除了宇宙射线的吸收剂量率贡献,31.8(nGy/h)

表9 HPGe γ 谱仪就地测量结果与实验室土壤样品分析结果比较(Bq/kg)

测点号	^{238}U 系		^{232}Th 系		^{40}K		^{137}Cs		土壤	
	就地测量	室内分析	就地测量	室内分析	就地测量	室内分析	就地测量	室内分析	湿度(%)	近期状况
1	27.3 ±1.0	23.6 ±1.5	37.9 ±2.7	37.3 ±2.2	607 ±11	566 ±33	12.8 ±2.0	15.1 ±1.4	±17.1	未受破坏
2	29.7 ±1.1	24.7 ±1.5	37.2 ±2.2	39.2 ±2.1	594 ±18	565 ±33	11.6 ±1.8	15.0 ±1.2	16.3	未受破坏
4	26.4 ±0.94	26.3 ±1.5	38.1 ±2.4	41.6 ±2.4	544 ±11	559 ±34	18.9 ±1.9	20.4 ±1.6	13.4	未受破坏
5	27.9 ±1.4	24.4 ±1.3	36.8 ±2.8	37.8 ±1.9	575 ±12	535 ±29	11.9 ±2.1	6.69 ±0.78	15.4	未受破坏 枯叶覆盖
6	27.2 ±1.1	28.1 ±1.5	36.8 ±2.4	36.7 ±2.0	614 ±11	540 ±30	8.57 ±1.5	8.97 ±0.92	12.7	翻耕,种花 植树两年
7	29.9 ±5.6	26.9 ±1.5	45.6 ±3.4	40.0 ±2.1	676 ±14	602 ±35	*	20.9 ±1.5	17.3	未受破坏 厚腐殖层
8	23.3 ±0.64	21.9 ±1.5	32.7 ±1.6	35.2 ±2.3	599 ±8.7	508 ±33	*	4.76 ±0.83	10.8	未受破坏 局部污染
9	24.9 ±0.99	25.4 ±1.4	43.0 ±4.7	41.4 ±2.2	738 ±26	539 ±31	4.32 ±0.25	4.63 ±0.58	7.2	土建渣土 原土破坏
11	25.6 ±0.54	23.7 ±1.1	33.8 ±1.9	32.9 ±1.7	567 ±8.2	508 ±28	12.8 ±1.5	15.3 ±1.2	10.7	未受破坏
12	25.7 ±3.4	25.5 ±1.3	36.0 ±2.8	38.0 ±1.9	721 ±13	593 ±33	9.06 ±2.0	11.7 ±1.0	7.3	未受破坏
13	32.1 ±1.3	28.2 ±1.6	44.6 ±2.3	39.8 ±2.3	639 ±13	620 ±36	5.40 ±2.4	5.71 ±0.82	25.0	未受破坏

* 是存在直接辐射干扰的测点

就地测量的同时,按梅花五点分布法在测点采集土壤样品。取样深度为0~10 cm,土样重1kg。土样经30目过筛,烘干装盒,封存30天后,用低本底 γ 谱仪进行测量,测量结果一并列于表9。其中,HPGe γ 谱仪就地测量的放射性核素比活度值已作土壤湿度修正。

表9的结果比较表明,对天然放射性核素,两种方法给出的比活度值吻合较好, ^{238}U 系比活度值的最大偏差为±20.2%,一般偏差为±1~15%; ^{232}Th 系比活度值的最大偏差为±14%,一般偏差为±1~10%; ^{40}K 的比活度值的最大偏差为±37%,一般偏差为±3~15%。9号测点 ^{40}K 的比活度值偏差较大是表层土壤遭受破坏所致。对人工放射性核素 ^{137}Cs ,除了第7、8号两个测点,由于存在核设施直接辐射没有计算外,其余8个测点比活度值的最大偏差为±23.0%,一般偏差为±4~23%。 ^{137}Cs 的就地测量结果比实验室分析结果系统偏低,主要是 a/ρ 的取值与实际值不一致造成。

在表9中,HPGe γ 谱仪就地测量探测到的部分人工放射性核素(如 ^{134}Cs 、 ^{131}I 、 ^{106}Ru 等),实验室的土样分析未能给出结果,其原因是,(1)由核设施正常排入环境中的人工放射性核素都是受到限制的,排放量很低,地面沉积量一般都很小;(2)排入环境中的人工放射性核素一般半衰期较短,在制样过程中(30 d左右)已衰变掉;(3)排放沉降的人工放射性核素,一般分布于土壤表层,取样后与较深部土壤混合,大大降低了它的比活度。以上原因之一或全部致使土壤样品中一些人工放射性核素的比活度低于实验室分析仪器的探测限,因而未能探

测到。

图7是中国原子能科学研究院场区核设施总通风口、放射性废液处理车间附近8号测点就地测量的 γ 谱。从谱中,不仅可以清晰地分辨出十几个较强分支的天然放射性核素的特征峰,还可以清晰地分辨包括 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs 、 ^{125}Sb 、 ^{60}Co 在内的数个人工放射性核素的特征峰。 ^{137}Cs 特征峰不仅包括了核试验大气沉降和核设施排放沉降的贡献^[15],而且还有来自废液处理车间暂存库中放射性废液残渣和污染源物的直接辐射的贡献, ^{60}Co 特征峰和 ^{125}Sb 特征峰都主要来自放射性废液残渣源物的直接辐射的贡献, ^{134}Cs 的来源与 ^{137}Cs 类似。

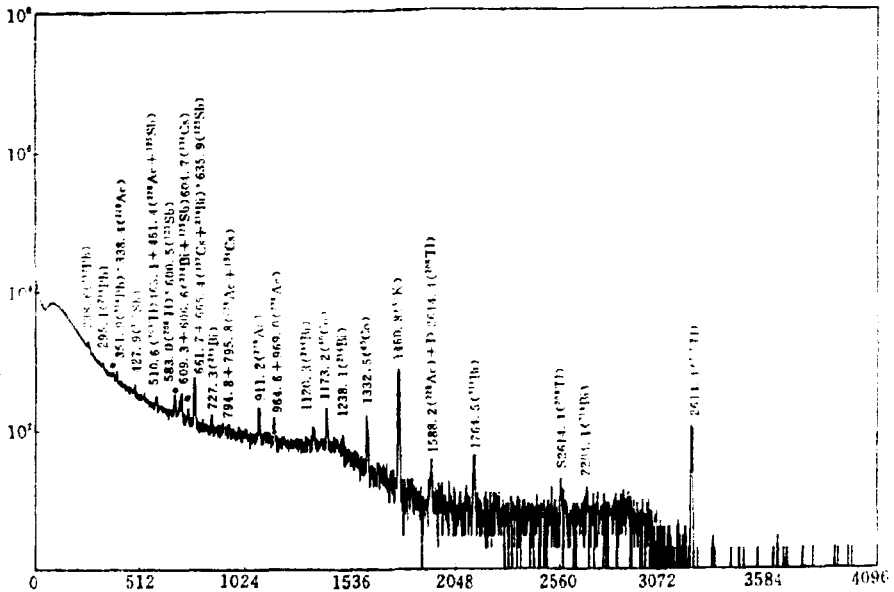


图7 现场就地测量 γ 谱

由于存在核设施中源物的直接辐射,不能简单地应用表5、表6中的比活度刻度因子(N_i/A)和空气吸收剂量率刻度因子(N_i/D)进行计算。但对天然放射性核素,仍可按前述方法对它们在土壤中的比活度以及所产生的空气吸收剂量率贡献进行准确的估计。利用这一点,在测点上同时用高压电离室进行测量,由高压电离室测量的总吸收剂量率减去土壤中天然放射性核素和宇宙射线对空气吸收剂量率的贡献,得到核设施周围环境中由人工放射性核素产生的附加空气吸收剂量率值。如能结合采用文献[9,17]中的铅屏蔽技术和测量

方法,开展进一步的工作,可以得到有关来自土壤、惰性气体烟羽和核设施中放射性核素对测量点空气吸收剂量率贡献的更详细资料。

5 结束语

a. 本工作针对天然放射性核素和大多数核设施可能排放的人工放射性核素计算的因子(ϕ/A)和(ϕ/D),不仅用于本工作的HPGe γ 谱仪的刻度,也可用于其它就地测量 γ 谱仪系统的刻度。

b. 通过刻度实验,以好于13% ($K=3$)的不确定度给出了本HPGe γ 谱仪系统用于环境就地测量的比活度刻度因子(N_i/A)和吸收剂量率刻度因子(N_i/D)。

c. 在核设施周围的就地测量结果,与其它方法的测量结果吻合较好。空气吸收剂量率的测量,HPGe γ 谱仪的测量结果与高压电离室的测量结果在 $\pm 10\%$ 偏差范围内吻合。放射性核素比活度的测量,HPGe γ 谱仪就地测量的结果与实验室土样分析结果, ^{238}U 系一般在 $\pm 15\%$ 偏差范围内吻合, ^{232}Th 系一般在 $\pm 10\%$ 偏差范围内吻合, ^{40}K 一般在 $\pm 15\%$ 偏差范围内吻合, ^{137}Cs 一般在 $\pm 23\%$ 偏差范围内吻合。

d. 当环境中除了来自土壤中人工放射性核素的辐射外,同时还存在核设施中相同的人工放射性核素的直接辐射时,表5和表6中人工放射性核素的(N_i/A)和(N_i/D)因子失效,但表3中天然放射性核素的(N_i/A)和(N_i/D)因子仍然有效。可以同时结合高压电离室进行测量,可得到环境中人工放射性核素产生的附加空气吸收剂量率的定量值

中国原子能科学研究院的金花同志参与了刻度方案的讨论并为本文的修改提出了宝贵的意见,姚历农、王新林同志热情地为本次刻度实验提供了部分刻度源,土壤样品的分析得到了李瑞香、朱文虎、甘霖同志的大力协助,在此,谨向上述同志们表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] H. L. Beck, W. J. Condon, W. M. Lowder Spectrometric Techniques for Measuring Environmental Radiation USAEC Report HASL-150, October, 1964.
- [2] W. M. Lowder, W. J. Condon, H. L. Beck. Field Spectrometric Investigations of Environmental Radiation in the U. S. A. The Natural Radiation Environment, ch. 35(J. A. S. Adams, W. M. Lowder, Editors) Univ. of Chicago press, Chicago, 1964
- [3] W. M. Lowder, H. L. Beck, W. M. Condon, Spectrometric Determination of Dose Rates from Natural and Fallout Gamma-Radiation in the United States, 1962-1963, Nature, 1964, 202, 745~749
- [4] H. L. Beck, W. M. Lowder, B. G. Bennett, W. J. Condon, Further Studies of External Environmental Radiation, USAEC Report HASL-170, 1966, March
- [5] H. L. Beck, J. Decampo, C. Gogolak. In Situ Ge(Li) and NaI(Tl) Gamma-ray Spectrometry, USAEC Report HASL-258, 1972, September
- [6] J. Nemeth, E. Lovranich, E. Urbanich, etc. Calibration of a HP-Germanium Detector for Rapid In-situ Determination of Environmental Radioactivity, OEFZS-4461, ST-160/88, 1988, August
- [7] R. R. Finck and B. R. R. Perason, In Situ Ge(Li)-Spectrometric Measurements of Gamma-Radiation from Radon Daughters Under Different Weather Conditions
- [8] 任天山. 切尔诺贝利核事故的核素释放特点和场外环境监测. 辐射防护, 1988, 8(4~5)
- [9] Eiji Sakai, Hiromi Terada, Masaki Kalagiri, In-situ Gamma-ray Measurement Using Ge(Li) Detector, IJEE, FNu, Vol. NS-23

No. 1. 1976, 726~733

- [10] E. Brown, R. B. Firestone and V. S. Shirley. Table of Radiactive Isotope, 1986
- [11] 杨胤. 环境土壤就地 γ 能谱分析. 辐射防护通讯, 1985, 4, 1~7
- [12] Ren Tianshan and K. M. Miller. Application of a Semi-empirical Ge(Li) Detector Calibration for Large Volume Samples. EML-409, 1983. 19.
- [13] 伍清宇. 环境辐射场剂量率测量及其不确定度估计. 环保通讯, 1987. 4. 16.
- [14] 伍清宇、金花. 低大气层宇宙射线分布测量. 辐射防护, 1988, 8(6), 401
- [15] 张永兴等. 中国原子能科学研究院辐射环境质量评价. 中国原子能科学研究院年报
- [16] 潘自强、罗国栋. 环境本底辐射测量和剂量评价, 1986, 6
- [17] Norman H. Cutshall and Ingvar L. Larsen. Calibration of a Portable Intrinsic Ge γ -ray Detector Using Point Sources and Testing for Field Application. H. P. Vol. 51, No. 1(July), 1986, 53~56

就地 HPGe γ 谱仪的刻度及应用

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社激光照排中心排版

北京市海淀区三环快速印刷厂印刷

☆

开本787×1092 $^{1/16}$ ·印张1·字数15千字

1992年2月北京第一版·1992年2月北京第一次印刷

ISBN7-5022-0572-1

TL·392

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT



This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

ISBN7-5022-0572-1
TL-329

P.O.Box 2103

Beijing, China

China Nuclear Information Centre