

用标准模型校准环境仪表的研究

李朝栋 毛利战 黄清波

(核工业放射性勘查计量站, 石家庄, 050002)

对现有的找矿模型校准环境仪表的可能性进行了试验研究。从 15 个模型的测量结果看, 不同类型环境仪表相差 2%—3%, 从谱图上看, 模型谱比点源有更宽的能量范围, 尤其是在 600 keV 以下的低能散射占有较大份额, 更接近于环境谱。通过 15 个模型给出了各种仪表的校准公式, 并在野外典型场地进行了测量。模型校准环境仪表是经济可行的。

关键词 标准模型 闪烁探测器 γ 照射量率

在环境辐射调查中, 天然辐射一直是为人们所关注的重点。天然辐射主要来源于自然界存在的铀系和钍系元素及 ^{40}K 的 γ 射线。除 ^{40}K 是单能(1461 keV) γ 射线外, 铀、钍系元素都具有非常复杂的 γ 能谱。此外, 近似均匀分布在地质体中的天然放射性元素, 其高能 γ 射线在穿过地表层中, 由于连续发生康普顿散射, 不同程度地损失原始能量而形成连续谱, 更增加了环境辐射谱的复杂性。

以往测定 γ 辐射的环境仪表大都采用点源(^{226}Ra , ^{137}Cs , ^{60}Co 等)在实验室进行校准, 这与天然环境 γ 辐射场在谱质上有很大差异。如果能在野外找到一个已知剂量率的近似无限源的场地, 用以校准环境仪表, 就可避免能谱上差异所造成的影响, 提高仪器的校准精度。

国际原子能机构(IAEA)曾介绍用标准模型校准环境仪表的方法^[1]。许多国家已经着眼于利用地质勘查的标准模型, 使其服务于环境监测工作。如美国的大江克欣校准站, 建立了技术测定中心(GJ/TMC), 主要任务就是利用其原有的校准设施——标准系列模型, 进行环境测量技术的开发及提供标准化方法^[2]。

1 模型照射量率的理论计算

1.1 地表天然放射性核素含量与照射量率的换算系数

早在 1906 年间就开始了有关换算系数的研究, 到 60 年代末已经发表了不少研究报告, 但数据波动很大, 到 1968 年贝克等采用了新的计算方法和核数据, 才使铀、钍和钾的换算系数值渐趋稳定^[3]。IAEA 于 1976 和 1989 年两次公布了依钾、铀和钍衰变数据及光子质量衰减系数计算的、天然 γ 辐射体均匀分布的平面无限土壤介质上方 1 m 处的理论照射量率值(参看表 1)。同时还指出根据轻便、汽车和航空能谱仪测定的放射性元素含量, 可以评价其在地表水平

收稿日期: 1993-10-20 收到修改稿日期: 1993-11-02

所造成的辐射照射量^[1,4]。

表 1 天然 γ 辐射体在均匀分布平面无限土壤介质上方 1 m 处的理论照射量率值
Table 1 Theoretical gamma ray exposure rates 1 m above a infinite soil medium plane with evenly distributed natural gamma ray emitters

现场放射性元素含量	照射量率/ $\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$	
	IAEA(1976)No174	IAEA(1989)No309
1%K	1.50	1.50
1(ppm)eU	0.60	0.65
1(ppm)eTh	0.30	0.29

注:因采用原文中发表的换算系数,不便换算新单位,这里 $1\text{R}=2.58\times 10^{-4}\text{A}\cdot\text{S}\cdot\text{kg}^{-1}$, $1\text{ppm}=10^{-6}$ 。

1.2 标准模型的计算照射量率

由地表中天然放射性核素含量换算成地面上照射量率的换算系数(以下称换算系数),评价地面照射量率时,要保证有如下假定条件:(1)由均质的土壤和空气两介质构成无限大平面;(2)铀和钍系元素各自与子体处于放射性平衡状态;(3)铀系、钍系和⁴⁰K 在地表中是均匀分布的。

满足上述条件下,地表照射量率 D_Q 可由下式计算

$$D_Q = K_K \cdot Q_K + K_U \cdot Q_U + K_T \cdot Q_T \quad (1)$$

式中 K_K, K_U, K_T 分别为钾、铀、钍的换算系数; Q_K, Q_U, Q_T 分别为地表中钾、铀和钍的含量。这样,只要能知道模型的天然放射性元素含量,即可算出模型总照射量率。这种计算照射量率的方法,一般称为三成分法^[5,6]。

2 校准设施和仪器

2.1 校准设施

使用的校准设施主要是核工业放射性勘查计量站所拥有的、建在河北省石家庄市大郭村机场的 5 个“AP”型航空模型,以及设在石家庄市核工业航测遥感中心院内的 10 个“Y”型地面模型。对边长为 7 m 的正六边形航空模型中的铀模型 AP-U,进行了现场测定,以考查其均匀性。在 196 个测点中,除模型边缘及外部测点外,在模型内部 133 个有效测点的平均空气吸收剂量率为 $(13.1 \pm 0.6) \times 10^{-8} \text{Gy/h}$ 。从测量结果看,相对标准偏差约为 4%,可认为模型中在 10 m 直径的圆形范围内的 γ 辐射场是比较均匀的,适宜作为校准环境仪器的标准场。

2.2 车载辐射环境评价系统

为了观察现场 γ 辐射谱的变化,并快速的估计放射性元素含量及照射量率,及时地进行现场比较、设计和组装了一套车载辐射环境评价系统(以下称 FJCS)。

2.2.1 车载辐射环境评价系统的组成 FJCS 全部设备安装在一辆中型面包车上。它由供电、测量和数据处理三部分组成。供电部分包括蓄电池组和不停电电源,也可直接和外部交流电源相接。测量部分包括 NaI(Tl)闪烁探测器(有作为行进测量的固定在汽车上的 $102\text{mm} \times 102\text{mm} \times 406\text{mm}$ 大型方晶体组件和作为定点测量的带有 20 m 屏蔽电缆的 $\phi 75 \times 75$ 标准晶体组件),以及多道分析器(有 CANBERRA 35' 型 4096 道分析器,和由 EG&G ORTEC 组件与 IBM-286 微机组成的 8192 道微机多道系统)。数据处理部分包括 IBM-286 微机、AR-3240 型

打印机和 HP-7470A 型双色描图仪。

2.2.2 FJCS 的软件功能 FJCS 可根据测量数据同时计算出天然核素⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th 的现场含量或比活度, 以及照射量率或吸收剂量率, 并可立即打印出测量结果及 γ 能谱图; FJCS 的探测器在环境测量中采用微机软件稳谱程序, 不必外加稳峰源, 所以测定结果不受稳峰源的影响; FJCS 的设计考虑了定点和行进测定两种工作方式, 随时可用磁盘记录数据, 行进测量的采样时间可自由选择; FJCS 还有一个人工核素信息库, 必要时可自动搜寻和分析人工核束。

2.2.3 FJCS 的数据处理方法

(a) 现场钾、铀、钍含量的计算方法

测定现场钾、铀、钍含量时, FJCS 是以窗式谱仪的形式实现, 选取钾(1370—1570 keV), 铀(1660—1860 keV), 钍(2400—2800 keV) 三个能窗。这时放射性元素含量与窗计数率的关系如下式:

$$n_{i,j} = S_{i,j} \cdot Q_j \quad (2)$$

式中: $n_{i,j}$ 是元素 j 在能窗 i 中的计数率; $S_{i,j}$ 是元素 j 在能窗 i 中的灵敏度; Q_j 是元素 j 在地表中的含量。

根据系统在模型上校准确定的 $S_{i,j}$, 和现场测定的计数率 $n_{i,j}$, 即可计算出元素含量 Q_j 。

(b) 现场照射量率的计算方法

除前述通过换算系数的三成分法外, 主要采用能谱照射量率变换算子法, 也称为 $G(E)$ 函数法。它可从测定的振幅分布 $n(E, E_0)$, 不必经过复杂的能谱展开, 直接通过 $G(E)$ 函数求出照射量率^[7]。其计算公式如下:

$$D(E_0) = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} n(E, E_0) \cdot G(E) dE \quad (3)$$

式中 $D(E_0)$ 为入射能量 E_0 的 γ 射线引起的照射量率; E_{\max} , E_{\min} 分别为 γ 测量的能量上、下限, 通常 $E_{\min} = 40$ keV, $E_{\max} = 3.0$ MeV。

2.3 用于现场测量的环境仪表

环境仪表主要是由中国辐射防护研究院提供的高压充氩电离室 HGL-1 系统, 和带有塑料闪烁体的 FT-620 型环境 γ 照射量率计各一台, 这些仪表已在中辐院用 ²²⁶Ra 源进行过校准和修正。

在 1992 年 11 月还邀请河北省环保局放射性管理监测站, 出动 FT-620 和 SG-102 各一台, 在 15 个被研究模型上进行了核对测定。

3 体源和点源的比较

3.1 模型测量结果的比较

从 15 个模型的测量结果(表 2)可见, 不同类型的环境仪表经点源校准和各项修正后, 结果基本一致。例如用 ²²⁶Ra 点源校准的高压电离室 HGL-1 和用多种点源校准的 FJCS 系统的 $G(E)$ 函数法, 两种结果只相差 1.5%, 即

$$D_H = 1.015 D_g + 0.07 \quad (10^{-8} \text{Gy/h})$$

D_H 和 D_g 分别为用 HGL-1 和 FJCS 测定的剂量率。

表2 校准模型剂量率测定值

Table 2 Data of dose rate measurement on a calibration pad

模型代号	剂量率测定值/ $10^{-8}\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$				
	HCL-1	FT-620	SG-102	FJCS-三成分法	FJCS-G(E)法
UY-1	146.6	147.6	144.1	169.4	144.1
UY-2	16.84	15.60	15.91	18.18	16.26
AP-U	12.75	12.91	12.32	14.12	12.88
TY-1	114.5	113.7	112.3	133.6	112.3
TY-2	17.91	16.13	16.85	19.03	16.86
AP-T	13.52	13.44	12.48	15.03	13.16
MY-1	117.2	115.7	115.5	136.2	114.6
MY-2	13.05	11.66	11.25	12.47	12.37
AP-P	20.45	19.89	19.73	21.93	20.40
KY-1	10.64	9.57	9.15	9.12	10.08
KY-2	10.20	10.06	8.83	8.72	10.09
AP-K	8.93	8.54	7.45	7.14	8.58
BY-1	3.99	3.50	2.98	3.82	3.93
BY-2	3.34	3.06	2.17	2.95	3.29
AP-B	2.75	1.80	0.95	1.62	1.82

在模型上不同类型仪器测定结果和用三成分法计算结果($D_Q, 10^{-8}\text{Gy/h}$)间的关系,可由下面方程表达:

$$D_Q = 1.196 D_g - 1.71$$

$$D_Q = 1.175 D_H - 1.95,$$

$$D_Q = 1.170 D_F - 0.95,$$

$$D_Q = 1.185 D_S - 0.64,$$

式中 D_F, D_S 分别为用 FT-620 和 SG-102 测定的剂量率值。从上述方程与图 1 所示的回归曲线比较,二者存在着良好的线性和相关关系。

3.2 照射量率分布谱的比较

为了研究各种点源和体源(模型)辐射谱的差别,采用 FJCS 作为主要工具,除测定各种模型的资料外,还对中国原子能院的 ^{226}Ra , ^{60}Co 和 ^{137}Cs 点源标准场进行了测定。测定结果列于表 3,表 3 中点源的理论值是根据源强和测距计算的,模型值是依三成分法计算确定的。而测定值是 FJCS 系统在相应位置上用 G(E)函数法测定的。表中还列出了利用不同源校准 FJCS 系统的公式。各种

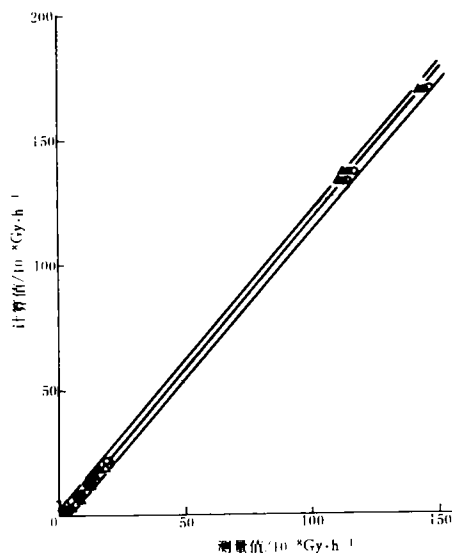


图1 剂量率理论计算值和现场测量值的关系

Fig. 1 The relationship between the exposure dose-rates obtained from theoretical calculation and on-site measurement

▲—FJCS 值; ●—SG-102; ○—HCL-1; ◆—FT-620。

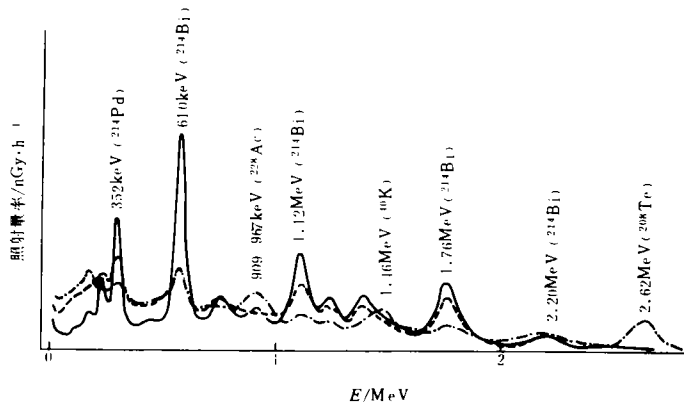


图2 点源、体源和环境 γ 照射量率谱比较

Fig.2 The comparison of γ exposure rate spectrum from point source, body source and environment
 ----铀模型 γ 照射量率谱; —— ^{226}Ra 点源 γ 照射量率谱; - - - 中法院草坪的 γ 照射量率谱。

源照射量率谱示于图2。

表3 点源和模型校准的比较

Table 3 Comparison of calibration by source with pads

核素	距离/m	测定值/nGy·h ⁻¹	理论值/nGy·h ⁻¹	校准公式
^{226}Ra	7.5	126.6	135.4	$D_{\text{Ra}} = 1.06D_g + 2.9$
	4.0	454.2	490.4	
	2.8	948.3	1011.0	
^{60}Co	7.5	1021.0	1018.0	$D_{\text{Co}} = 1.01D_g - 22.3$
	5.3	2070.8	2068.6	
	3.4	5046.2	5093.4	
$^{137}\text{Cs-1}$	7.5	1719.8	1738.3	$D_{\text{Cs-1}} = 0.97D_g + 82.3$
	5.8	2950.8	2953.1	
	4.5	5049.7	4965.7	
$^{137}\text{Cs-2}$	4.5	28.6	31.6	$D_{\text{Cs-2}} = 1.04D_g + 5.2$
	1.8	186.1	202.2	
	1.0	633.5	660.1	
AP-U		128.8	141.2	$D_m = 1.13D_g - 9.3$
AP-M		204.0	219.3	
AP-T		131.6	150.3	
AP-K		85.9	71.4	
AP-B		18.2	16.2	

3.3 野外测量结果的比较

为了进一步比较野外环境谱的测量结果,用表3给出的对FJCS校准的公式进行计算,测量地点分别为核工业航测遥感中心门球场、河北省石家庄市黄壁庄航空动态测试带、河北省承

德市避暑山庄、山西省太原市晋祠后山和中国辐射防护研究院常年监测对比点等 21 个测点。测量结果列于表 4。

表 4 野外现场测定数据
Table 4 Data of in-situ measurement

测点数	理论剂量率	校准后剂量率/nGy·h ⁻¹				
	$D_q/nGy \cdot h^{-1}$	D_m	D_{Ra}	D_{Cs-2}	D_{Co}	D_{Cs-1}
D1-1	75.3	73.7	80.9	81.0	51.9	153.1
D1-2	75.8	73.9	81.0	81.1	52.0	153.2
D1-3	77.0	79.2	86.0	85.9	56.8	157.8
D1-4	66.0	66.1	73.8	74.0	45.1	146.6
D2-1	64.7	63.1	70.9	71.2	42.4	144.0
D2-2	62.1	62.3	70.1	70.5	41.7	143.3
D3-1	56.4	55.6	63.9	64.4	35.7	137.6
D3-2	55.4	54.0	62.4	63.0	34.3	136.3
D1	52.7	55.7	64.0	64.5	35.3	137.7
D2	51.9	54.8	62.1	63.7	35.0	137.0
D3	51.6	54.3	62.7	63.3	34.6	136.6
D4	53.6	55.5	63.7	64.3	35.6	137.5
D5	56.1	57.2	65.3	65.9	37.1	139.0
D21	56.5	58.0	66.1	66.6	37.8	139.7
D22	59.8	59.8	67.8	68.2	39.4	141.2
D23	57.7	57.9	66.0	66.5	37.7	139.6
JC1	412.1	423.9	409.5	400.7	364.7	452.0
JC2	405.4	423.0	408.7	399.8	363.9	451.2
bx1	52.6	56.5	64.7	65.2	36.5	138.4
bx2	44.8	47.2	56.0	56.7	28.2	130.5
bx3	63.8	67.7	75.2	75.5	46.5	148.0
平均 D	1.0	1.02 ±	1.14 ±	1.15 ±	0.69 ±	2.29 ±
偏差 D_q		0.03	0.07	0.08	0.07	0.45

4 讨论

根据上面测量结果,得到初步结论:

(1)用模型校准环境仪表和用点源校准,在结果上二者有良好的线性和相关性。说明标准模型是校准环境仪表的理想辐射场。用模型校准环境仪表是经济可行的。

(2)模型在能谱特性上,比单能的¹³⁷Cs或⁶⁰Co源有更宽的能量分布范围,与²²⁶Ra源相比,在低能散射部分也占有较大的份额,尤其是在600 keV以下部分。因此,从谱质上看模型谱更接近于环境谱。

(3)模型含量更接近于自然界的钾、铀、钍丰度,因而结果会更精确。反之,如用强点源校准环境仪表(如表4的⁶⁰Co, ¹³⁷Cs-1),测量结果会附有较大的不确定度。

(4)模型上理论照射量率值是通过引用值计算的,由于现场条件的差异会使模型照射量率定值有偏差,今后应对模型具体条件,通过蒙特卡洛计算等方法,给模型照射量率进行合理的定值。

参 考 文 献

- 1 IAEA. Construction and Use of Calibration Facilities for Radiometric Field Equipment. Technical Reports Series, No. 309. VIENNA. 1989.
- 2 Steele WD, George DC. Field Calibration Facilities for Environmental Measurement of Radium Thorium and Potassium. GJ/TMC-01. 1986.
- 3 漆進. 地中の自然放射性核種濃度-照射線量率換算係数の推移. 保健物理, 1978, 13:197—201.
- 4 IAEA. Radiometric Reporting Methods and Calibration in Uranium Exploration. Technical Reports Series, No. 174. VIENNA. 1976.
- 5 漆進. 環境 γ 線解析用 $3\phi\times 3\phi$ NaI(Tl)シンチレータのレスポンス行列. 名古屋工業技術試験所報告, 1978, 27(12):384—397.
- 6 松田秀晴, 古川滋子, 上西時司, et al. $3\phi\times 3\phi$ NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメーターによる微弱漏洩 γ 線線量評価の新しい方法(I)保健物理, 1981, 18:135—139.
- 7 森内茂. スペクトル線量変換演算子による線量評価法とその演算子の決定. 日本原子力研究所資料, 1971, JAERI 1209.

A RESEARCH ON CALIBRATING ENVIRONMENTAL RADIOMETER THROUGH STANDARD MODEL

LI CHAODONG MAO LIZHAU HUANG QINGBO

(Survey Dose Station for Radiometric of Nuclear Industry, Shijiazhuang, 050002)

ABSTRACT

The paper presents experimental research for possibility of calibrating environmental radiometer using the existing models of mineral prospecting. The measurement results obtained from different kinds of radiometers at the 15 models has slight difference from each other 2%—3%. The spectrum range obtained from these models is larger than that from the point source. It is dominated by the scattered energy under 600 keV and much similar to the environmental spectrum. From the formulas derived from the 15 models and practice measurement at a typical site, it is concluded that to calibrate environmental radiometer using these models is possible and economical.

Key words Standard model Scintillation detector γ ray exposure rate