

# 总谱能量法确定环境 $\gamma$ 辐射场照射率

罗达玲 关祖杰 赖锡安 张纯祥

(物理学系)

## 摘 要

本文介绍用带微型计算机的 NaI(Tl)  $\gamma$  谱仪测定环境 $\gamma$ 辐射场照射率的总谱能量法。在野外现场标定谱仪。用最小二乘法确定转换关系。微型计算机及时处理谱数据。测量快速而准确。 $\gamma$  谱仪与高压电离室的测量结果符合得很好。

## 一、前 言

辐射场总照射率的测量对辐射环境调查及核企业、核设施周围环境监察具有重要意义。采用基于总计数的 $\gamma$ 辐射仪,是测量照射率最为简便的方法。但它的测量误差较大。目前已较多使用高压电离室测量,它具有对 $\gamma$ 射线能量响应好,测量灵敏度高的优点。但用高压电离室不能确定单个核素的照射率。

所谓总谱能量法,是采用体积较大的NaI(Tl)晶体 $\gamma$ 谱仪所测得的现场 $\gamma$ 能谱,求出单个核素照射率的同时,通过其总谱能量来量度辐射场的总照射率的方法。谱能量是指在所选取的能区内计数率与该道所对应能量乘积之和。Beck<sup>[1]</sup>曾提到过这种方法。本文对此进行了一些探讨和实践,得到比较满意的结果。

## 二、基本原理

对单能 $\gamma$ 射线而言,空气中某点的照射量 $X$ 与同一点上的能量注量 $\Psi$ 具有如下关系:

$$X = \Psi \cdot (\mu_{en}/\rho) \cdot \frac{e}{w} \quad (1)$$

式中,  $(\mu_{en}/\rho)$  为给定的单能 $\gamma$ 射线在空气中的质能吸收系数;  $e$  为电子电荷;  $w$  表示平均电离能。实际的辐射场均为非单能的,光子具有谱分布,照射量应由(1)式对全粒子能谱积分。即

本文于1985年3月收到

$$X = \int_0^{\infty} \Psi_E (\mu_{en}/\rho) \frac{c}{w} dE \quad (2)$$

而式中,  $\Psi_E$ 表示能量为 $E$ 的光子的能量注量, 它是光子通量的微分分布 $\Phi_E$ 与能量 $E$ 之乘积。

$$\Psi_E = \Phi_E \cdot E \quad (3)$$

从以上关系式, 不难得到照射率 $\dot{X} = \frac{dX}{dt}$ 有如下关系式:

$$\dot{X} \propto \int_0^{\infty} \varphi_E \cdot (\mu_{en}/\rho)_E \cdot E \cdot dE \quad (4)$$

式中,  $\varphi_E = \frac{d\Phi_E}{dt}$ , 将粒子注量率, 即通量密度 (粒子数 $\cdot$ 米 $^{-2}$  $\cdot$ 秒 $^{-1}$ )。

对能量在几百keV到几个MeV的光子, 空气中质能吸收系数 $\mu_{en}/\rho$ 随能量 $E$ 变化很小 (如图1)<sup>(2)</sup>。并且, 体积较大的NaI(Tl)晶体对入射的低能 $\gamma$ 光子全吸收几率很大。而天然地表 $\gamma$ 辐射场中, 离地面1米高处 $\gamma$ 光子的通量和照射率有较确定的能量分布 (图2)<sup>(3)</sup>, 它不会因土壤中U、Th和K的实际比例改变而变化。从能量分布图可看出, 离地面1米处照射率的80%以上是能量在100keV到2MeV的 $\gamma$ 光子的贡献。因此, “潜能量”是天然 $\gamma$ 辐射照射率的合理量度。

大体积NaI(Tl)晶体探测 $\gamma$ 光子能量的精度很高。虽然NaI(Tl)晶体对较高能量的 $\gamma$ 光子探测效率会降低, 但这种降低会由于能量大于1MeV后,  $\mu_{en}/\rho$ 随能量稍有减小 (见图1)而有所补偿。

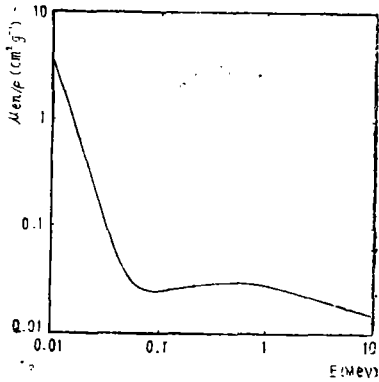


图1 空气中质量能量吸收系数随光子能量的变化

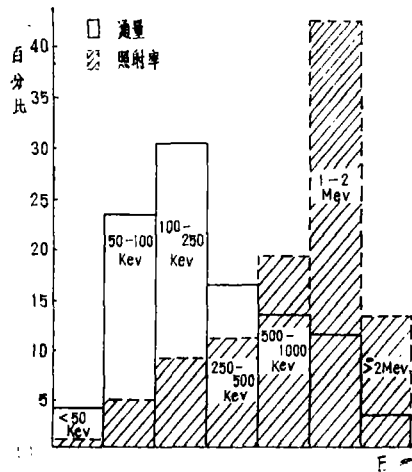


图2 天然辐射场中, 离地面1米高处通量和照射率的能量分布

从图2可看出, 能量低于100keV的 $\gamma$ 射线对照射率贡献很小。不考虑这部分射线对照射率的贡献不会引起明显误差。因此, 在现场 $\gamma$ 能量中可选取100keV (或150keV) 到3MeV能区的总谱能量来量度照射率。

### 三、标定方法

用总谱能量确定照射率, 可用如下两种方法标定NaI(Tl)野外 $\gamma$ 谱仪: 一种方法是

在实验室内,用已知活性的 $^{226}\text{Ra}$ 点源,使 $\gamma$ 射线垂直入射到 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 探测器表面,由谱仪测定的能谱求得总谱能量。同时,用高压电离室直接测得总照射率,即可求得谱能量与照射率的转换因子。这种标定方法必须进行角分布的修正。因现场测量时, $\gamma$ 射线是从各个方向射进探测器的。另一种方法,在野外现场选取若干个标定点,同时进行现场 $\gamma$ 能谱测量和高压电离室对总照射率的测定。确定谱能量和照射率的转换关系。

本工作采用现场标定方法。在广东高本底地区 and 对照地区各选取了若干标定点,高压电离室测量值中包含宇宙射线的贡献,而野外 $\gamma$ 能谱在所选能区内宇宙射线响应很小,可以忽略。我们进行海平面上本底测量的结果,也说明了这点<sup>[4]</sup>。由各标定点测得的值确定总谱能量值与照射率的转换关系可循下面两种途径:

第一种方法,从高压电离室测量值 $\dot{X}_H$ 中扣除宇宙射线的照射率 $\dot{X}_C$ ,忽略宇宙射线对所测 $\gamma$ 能谱的总谱能量值 $R(E)$ 的贡献。确定出各标定点的转换因子:

$$F = \frac{R(E)}{\dot{X}_H - \dot{X}_C} \quad (5)$$

对各点之值取平均,便找出谱仪的转换因子 $F$ 。本谱仪的 $F$ 值为 $11.99(\text{Gev}/20\text{min})/(\mu\text{R}/\text{h})$ , $\dot{X}_C = 3.3\mu\text{R}/\text{h}$ 。

第二种办法,将各标定点处高压电离室测得的总照射率值及 $\gamma$ 能谱的谱能量值输入计算机,作最小二乘法拟合,求得拟合函数:

$$\begin{aligned} \dot{X} = & 2.88 + 8.75 \times 10^{-2}R(E) - 3.63 \times 10^{-4}R(E)^2 \\ & + 0.55 \times 10^{-6}R(E)^3 \quad (\mu\text{R}/\text{h}) \end{aligned} \quad (6)$$

由 $\gamma$ 谱仪在现场测量点测得的总谱能量值 $R(E)(\text{Gev}/20\text{min})$ ,代入上式直接计算出该点的总照射率。

## 四、实验结果

本工作采用带微型计算机的 $\text{NaI}(\text{Tl})\gamma$ 能谱测量系统。所用 $\phi 75 \times 75\text{mmNaI}(\text{Tl})$ 探头加有6mm厚的塑料盖,以减少 $\beta$ 射线的贡献。测量装置已有较详细报道<sup>[5]</sup>。

在广东高辐射本底地区及对照地区的三个县三十二个自然村进行现场测量结果表明,总谱能量法可给出满意的结果。表1中列出用几种方法所测得的各测量点的总照射率值。 $\dot{X}_{EF}$ 为总谱能量法中用转换因子 $F$ 的刻度法所得的值。 $\dot{X}_{EL}$ 为总谱能量法中最小二乘法求得值。 $\dot{X}_r$ 为解析 $\gamma$ 能谱得到单个核素的照射率求和后加上宇宙射线的照射率。 $\dot{X}_H$ 为高压电离室直接测得的总照射率值。

## 五、讨 论

1. 从表1所列结果看出,几种方法的结果均能较好地符合。总谱能量最小二乘法所得的值在各单个测量点都与高压电离室测量值符合得最好。对照地区 $\dot{X}_r$ 值偏低,高本底地区 $\dot{X}_{EF}$ 值偏高。 $\dot{X}_r$ 和 $\dot{X}_{EF}$ 值的确定依赖于宇宙射线的照射率,必须预先准确已知待测地区宇宙射线的照射率,而用最小二乘法则不需要。拟合函数中的非线性系数已包含了宇宙射线影响的修正。由于 $\gamma$ 谱仪与微型计算机联接使用,多道记录的谱数据直接

进入计算机内存,用计算机立即计算出谱能量和该点的照射率。

2. 总谱能量对现场 $\gamma$ 谱的谱形变化是不灵敏的。高本底地区土壤中含有大量独居石,因而钍含量很高,而对照地区钾的相对含量较高。若将高本底地区照射率最低的点(205)与对照地区的最高点(301)相比较——图3和图4分别为两点的现场NaI(Tl) $\gamma$ 能谱图——谱形明显不同。解析现场谱所得的铀、钍和钾-40在土壤中的平均含量均有几倍之差(见表2)。但两测量点的谱能量值相差不大。

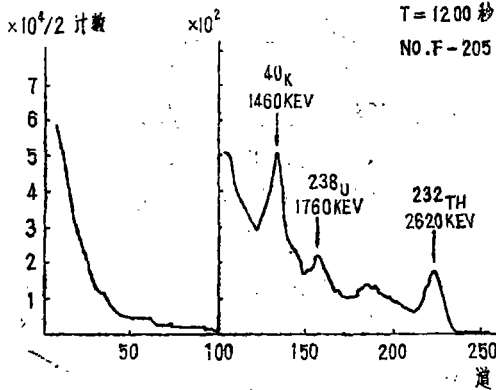


图3 高本底地区205测量点的现场NaI(Tl) $\gamma$ 谱

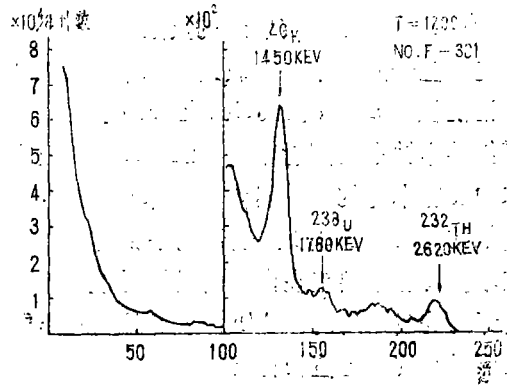


图4 对照地区301测量点的现场NaI(Tl) $\gamma$ 谱

表1 各测量点的照射率( $\mu$ R/h)

高本底地区				对照地区					
测量点	$\bar{X}_{EL}$	$\bar{X}_{EP}$	$\bar{X}_r$	$\bar{X}_H$	测量点	$\bar{X}_{EL}$	$\bar{X}_{EP}$	$\bar{X}_r$	$\bar{X}_H$
201	25.2	26.0	25.20	24.6	101	5.2	5.4	5.14	5.8
202	16.4	16.8	18.83	16.2	102	9.6	9.3	8.82	10.0
203	23.4	24.0	23.27	22.5	103	11.1	11.0	10.33	10.4
204	19.3	19.7	19.20	19.0	105	9.0	8.7	8.10	9.1
205	12.4	12.4	11.62	13.0	106	5.5	5.6	5.40	5.5
207	14.1	14.3	13.43	14.9	107	9.9	9.6	7.93	8.5
208	26.5	28.1	27.42	25.8	108	6.8	6.5	5.99	6.4
209	26.9	28.8	27.72	27.6	109	8.5	8.1	7.58	8.1
210	26.7	28.4	27.44	26.9	301	10.2	10.0	9.20	10.4
211	16.5	16.9	16.27	17.0	302	9.5	9.2	8.84	9.2
214	25.0	25.9	24.70	25.9	303	7.8	7.5	7.07	7.8
215	16.1	16.4	15.84	16.8	304	8.2	7.9	7.59	8.2
216	24.4	25.2	24.36	23.6	305	8.0	7.7	7.36	7.7
217	27.1	29.0	27.60	27.6	306	7.1	6.9	6.64	7.7
218	16.7	17.0	16.40	16.8	307	8.9	8.5	8.07	9.0
219	17.4	17.8	16.83	17.6	308	8.3	8.0	7.67	8.2
平均值	20.9	21.6	20.82	21.0	平均值	8.3	8.1	7.61	8.3
$\pm\sigma$	$\pm 5.2$	$\pm 5.8$	$\pm 5.67$	$\pm 4.9$	$\pm\sigma$	$\pm 1.6$	$\pm 1.5$	$\pm 1.38$	$\pm 1.9$

表 2

测量点	土壤中天然放射性核素浓度			R(E) (Gev/20min)	I( $\mu$ R/h)
	$^{238}\text{U}$ (ppm)	$^{232}\text{Th}$ (ppm)	$^{40}\text{K}$ (ppm)		
205	3.84	14.56	0.82	109.3	13.0
301	1.47	6.54	1.58	80.5	10.4

3. 为确定宇宙射线的贡献, 我们进行了海平面上的本底测量。将野外  $\gamma$  谱仪和高压电离室一起用木船运载到离恩平县海岸 1 公里以外的海面上,  $\gamma$  谱仪测定本底谱, 其总谱能量  $R(E) = 6.979 \text{Gev}/20 \text{min}$ 。按转换因子估算出照射率为  $0.581 \mu\text{R}/\text{h}$ 。从解析  $\gamma$  谱知其中铀系的照射率为  $0.227 \mu\text{R}/\text{h}$ , 钍系为  $0.198 \mu\text{R}/\text{h}$ , 钾为  $0.093 \mu\text{R}/\text{h}$  (主要来自海水和装置本身的钾, 船体、人体及周围空气中射气等的贡献)。因此宇宙射线对  $\gamma$  能谱的贡献约为  $0.074 \mu\text{R}/\text{h}$ 。这说明宇宙射线对  $\gamma$  能谱所选能区内的贡献是很小的, 一般可以忽略。高压电离室在海面上的测量值为  $3.8 \mu\text{R}/\text{h}$ 。其中扣除上述的海水, 装置本身及周围环境的贡献约  $0.5 \mu\text{R}/\text{h}$ 。宇宙射线的照射率约为  $3.3 \mu\text{R}/\text{h}$ 。这个值与广东地区宇宙射线照射率的理论值相符合。

4. 总谱能量计算比较麻烦, 但采用微型计算机及时处理谱数据, 亦能迅速、准确地计算出结果。

### 参 考 文 献

- [1] Beck, H.L., et al., HASL-258, 1972, 1.
- [2] Tait, W.H., Radiation Detection, Butterworths, London, 1980, 153.
- [3] Beck, H.L., USERDA Rep. CANF-720805-P1, 1974, 101.
- [4] 罗达玲等, 中华放射医学与防护杂志, 1985, 2, 90
- [5] 罗达玲等, 核仪器与方法, 1984, 4, 54

## Measurement of Exposure Rates of Environmental Gamma Radiation Field by Total Spectrum Energy

Luo Daling Guan Zujie Lai Xian Zhang Chunxiang

### Abstract

The method of total spectrum energy measured with NaI(Tl) gammaray spectrometer to determine exposure rates at environmental gamma radiation field is described. The spectrometer was calibrated by method of field calibration with high-pressure ionization chamber. Conversion formula of the total spectrum energy to exposure rate has been obtained by the least squares technique. The data were analyzed with a microcomputer. The values obtained with the method of total spectrum energy are in close agreement with the values measured with the ionization chamber at each measurement site.