

环境辐射测量与评价

任天山 等著



原子能出版社

环境辐射测量与评价

任天山 等著

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

环境辐射测量与评价/任天山等著. —北京:原子能出版社, 2005. 8

ISBN 7-5022-3397-0

I. 核… II. 任… III. 辐射量测量 IV. TL81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 045071 号

内 容 简 介

《环境辐射测量与评价》一书选录了任天山研究员撰写(其中五篇为合作撰写)的、在国内外发表的 37 篇学术论文,分“ γ 能谱分析技术与应用”、“氡及其子体的测量与评价”、“环境中的氚”和“辐射监测与评价”等四部分,按时间顺序编排。这些论文反映了我国从事环境放射性污染监测的科技人员在不同时期对环境辐射问题的关注和他们为提高环境放射性监测水平和评价质量所做的不懈努力;可供从事环境辐射监测和评价的研究人员和相关专业的研究生参考,具有一定学术参考价值。

环境辐射测量与评价

出版发行	原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100037)
责任编辑	鲍世宽
责任印制	丁怀兰
印 刷	保定市印刷厂
经 销	全国新华书店
开 本	850 mm×1168 mm 1/32
字 数	506 千
印 张	14.5
版 次	2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5022-3397-0
印 数	1~500 定 价 40.00 元

版权所有 侵权必究(如有缺页、倒装,请与出版社联系调换)
网址:<http://www.aep.com.cn>



任天山

1936年8月31日生于河南济源,1962年7月毕业于南开大学物理系核物理专业。先后任职于北京放射卫生防护所和卫生部工业卫生实验所从事辐射测量和评价研究。1981年至1983年、1989年至1990年和1996年4月至8月分别在美国DOE EML、澳大利亚ARL和日本名古屋大学从事环境辐射测量、评价和核素转移模式化研究。现为研究员(退聘),国家核事故医学应急专家组成员,清华大学工物系、重庆大学理学院客座教授,EML荣誉成员。发表科技论文80余篇。其中在国外期刊发表28篇。正式出版著作4部、编译4部。研究成果中获省、部级以上奖励者8项,其中国家级奖励者2项。

前 言

自 1945 年 7 月 16 日美国在其本土新墨西哥州进行了人类历史上第一次原子弹试验以后,相继在内华达、比基尼、埃尼威塔克等核试验场进行了数以百计的大气层核试验。前苏联在 1949 年进行第一次核试验后也相继进行了数以百计的大气层核试验。在这个大背景下,我国于上世纪 50 年代中后期在几个城市开始进行以美苏核试验放射性落下灰对我国国土的污染和健康影响为目的的环境放射性污染监测,1965 年卫生部在我国建立了由 40 多个监测站构成的全国放射性污染监测网。

几十年来本人一直从事环境辐射监测和评价方面的探索与研究。从大气沉降灰、空气气溶胶、环境辐射水平测量等日常工作开始,探索实际工作中遇到的诸如放射性落下灰剂量计算、钴源室顶 γ 漏射线的空气散射等问题。我和同事们一起在测量条件改进方面,研制成功反符合流气式低本底 β 计数器、塑料薄膜闪烁低本底计数器、荧光玻璃剂量测读仪和塑料反符合低本底 γ 谱仪等;在实验室 γ 能谱分析技术方面,探索了 NaI(Tl)环境 γ 能谱的解谱方法,成功地将逆矩阵解谱方法投入实际应用;在谱分析软件方面,以 SAMPO 为基础开发了峰形函数可选、使用方便、可用于 Ge 谱和 NaI(Tl)谱的自动解谱软件,研发出了基于点源多点表征的体样品源效率刻度模式和软件。在就地 γ 能谱技术方面,以 NaI(Tl)就地谱刻度方法为基础,研究了高分辨 Ge 就地 γ 能谱的点源刻度技术,并成功地实际应用于放射性核素 ^{232}Th 、 ^{235}U 和点状分布情况下的就地核素识别、活度分析与剂量计算。在课题研究方面,先后牵头完成了“核电站放射性流出物在环境中的行为和处理(为 75 攻关课题)”、“核试验下风向酒泉地区居民剂量回顾调查(卫生部课题)”、“长江水系元素背景值

研究中的放射性同位素定年技术(中科院课题)”、“稳定同位素在大气传输研究中的应用(国际合作)”、“我国环境与食物氟研究(卫生部课题)”等课题,获得了 10 项省、部级以上科技成果奖,在国内外学术期刊上发表科技论文约 90 篇。

《环境辐射测量与评价》一书选录了本人撰写的(其中五篇为合作撰写)、在国内外发表的 37 篇学术论文,分“ γ 能谱分析技术与应用”、“氡及其子体的测量与评价”、“环境中的氟”和“辐射监测与评价”四部分,按时间顺序编排。这些论文反映了我国从事环境放射性污染监测的科技人员在不同时期对环境辐射问题的关注和为提高环境放射性污染监测水平和评价质量所做的不懈努力,对于从事环境辐射监测和评价的研究人员和相关专业的学生,具有参考意义和资料价值。

仅以此书献给在不同时期、以不同方式支持、关心、帮助我们的领导、同事、朋友和家人。

任天山

2005 年 4 月 5 日

目 录

一、 γ 能谱分析技术与应用	(1)
1 NaI(Tl) γ 谱仪光峰效率曲线的数学拟合	(3)
2 γ 能谱全能峰的简化高斯函数拟合	(9)
3 NaI(Tl) γ 能谱不用矩阵求逆的非线性最小二乘拟合法	(23)
4 土壤中铀、钍、镭、钾及铯 137 的 γ 能谱分析	(36)
5 Applications of a Semi-empirical Ge(Li) Detector Calibration Technique for Large Volume Samples	(45)
6 NaI(Tl)—塑料探测器反符合屏蔽低本底 γ 谱仪	(65)
7 野外 γ 能谱测量技术和应用	(83)
8 本征锗野外 γ 谱仪的刻度	(95)
9 切尔诺贝利核事故后环境放射性污染的 γ 能谱分析	(105)
10 环境 γ 能谱的计算机分析	(118)
11 反应堆回路水中短寿命 γ 放射性核素的在线分析	(127)
12 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 计年在湖泊沉降物年代学研究中的应用	(138)
13 低水平特征放射性核素的识别和干扰因素剔除	(148)
二、氡及其子体的测量与评价	(173)
14 室内氡及其短寿命子体的测量方法	(175)
15 北京地区室内氡水平及影响因素	(186)
16 室内换气率的测定	(197)
17 被动式活性炭室内氡累积探测器的研究	(204)
18 Indoor Radon Measurements in the Shenzhen Region of the People's Republic of China	(215)
19 室内氡的特性	(228)
20 典型居室内氡子体的特性	(240)
21 金属丝网筛上氡子体 α 粒子计数效率的确定	(246)
22 室内氡的来源、水平和控制	(256)

三、环境中的氡	(273)
23 我国自来水氡浓度及其变化	(275)
24 中国环境水氡浓度及其变化	(283)
25 中国地表水和地下水氡浓度	(299)
26 我国食物和环境氡所致居民剂量	(322)
四、辐射监测与评价	(335)
27 宇宙射线电离量的测定和几种探测器对宇宙射线的响应	(337)
28 Population Doses from Terrestrial Gamma Exposure in China	(345)
29 建筑材料放射性和室内 γ 辐射水平	(356)
30 关于建筑材料防护标准的探讨	(367)
31 美国内华达州核试验对犹他州居民辐射剂量贡献 再评价中的回顾技术	(374)
32 ^{239}Pu 在土壤中的转移模式	(385)
33 Methodology of Retrospective Investigation on External Dose of the Downwind Area in Jiuquan Region, China	(395)
34 Comparative Health Risk Assessment of Nuclear Power and Coal Power in China	(406)
35 日本 JCO 临界事故的辐射监测	(422)
36 应急情况下基于测量数据的剂量计算模式	(434)
37 突发事件情况下食物与水的监测和评价	(443)

一、 γ 能谱分析技术与应用

1 NaI(Tl) γ 谱仪光峰效率 曲线的数学拟合

任天山 林莲卿

在用 γ 能谱仪进行定量分析的时候,预先求得 γ 谱仪的光峰效率与 γ 射线能量的关系即预先求得谱仪的光峰效率曲线,往往是实现 γ 能谱定量分析的先决条件。关于 NaI(Tl)的光峰效率曲线的实验获得有很多报告^[1~3]。而得到一定完整的实验光峰效率曲线的先决条件是有足够多的 γ 标准源,其 γ 射线的能量分布应覆盖所感兴趣的整个能量区间,每种 γ 射线的核参数应准确知道,而且这些 γ 标准源应有较长的半衰期。实际获得这样一套 γ 标准源是不容易的。本实验在于找出 NaI(Tl) γ 谱仪光峰效率曲线拟合的数学方法。以便在只有若干个 γ 标准源的情况下,根据少数几个光峰效率— γ 能量的实验点,用分析的方法,以实际上可以接受的精度建立光峰效率曲线,或计算某一给定能量 γ 射线所对应的光峰效率

1 光峰效率曲线的实验获取

标准源是中国科学院原子能研究所提供的 γ 系列参考源。

以足够的统计精度,在每道 5 keV 的条件下,测量 γ 系列标准源,获得一套标准 γ 能谱,在 IN-90 电子计算机上用 B SPEC-B PE-KT 程序对 γ 谱逐个进行处理,求得在两种边界道选取情况下 13 种 γ 能量的光峰面积,然后用 B EFFI 计算它们的光峰效率,实验求得

原载于:中华放射医学与防护杂志,1979,1(2):50~53

的光峰效率曲线如图 1、图 2 所示。

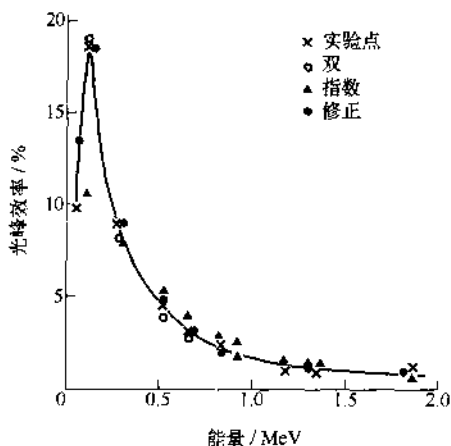


图 1 实验与拟合点比较

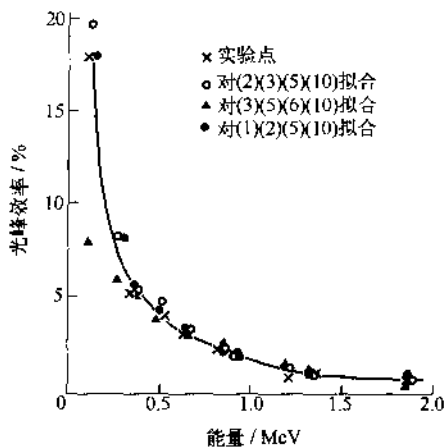


图 2 修正指数函数拟合

如图所示, ^{60}Co 的 γ 射线 1.173 MeV 和 1.333 MeV 所对应的效率较低,这是因为我们所用的程序解重叠峰能力差。 ^{88}Y 的 1.836 MeV 能量的 γ 效率偏高,原因不详,因此该三点在拟合效率评价中不予讨论。

2 效率曲线拟合的数学模型

2.1 简单指数模型

以简单指数函数

$$\eta = ae^{-bE} \quad (1)$$

拟合光峰效率曲线,其中 a, b 是待定常数, η 是光峰效率, E 是 γ 射线能量 (MeV)。

$$\ln \eta = \ln a - bE \quad (2)$$

$$Y = A + BX \quad (3)$$

$$\text{式中, } Y = \ln \eta, A = \ln a, B = -b \quad (4)$$

对式(3)作最小二乘处理,求得:

$$\left. \begin{aligned} B &= \frac{\sum X \sum Y - n \sum XY}{(\sum X)^2 - n \sum X^2} \\ A &= \frac{\sum XY \sum X - \sum Y \sum X^2}{(\sum X)^2 - n \sum X^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

通过实验求得的效率曲线,算出 B, A 后可得:

$$a = e^A \quad b = -B$$

2.2 双曲线模型

$$\eta = a + \frac{b}{E}$$

式中, η 与 E 意义同前。

先对上式作线性处理:令 $X = \frac{1}{E}$, 上式可得:

$$\eta = a + bx \quad (6)$$

对式(6)作最小二乘处理,求得式(6)中的 a 及 b 。

2.3 修正指数模型

假定能量 $E_1, E_2 (E_2 > E_1)$ 处的光峰效率由下式决定:

$$\left. \begin{aligned} \eta_1 &= a_1 e^{b_1 E_1} \\ \eta_2 &= a_1 e^{b_1 E_2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

则有:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \frac{\eta_2}{\exp b_1 E_2} \\ b_1 &= \frac{1}{E_2 - E_1} \ln \frac{\eta_2}{\eta_1} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

能量 $E_3, E_4 (E_4 > E_3)$ 处用式(7)计算效率为

$$\begin{aligned} \eta'_3 &= a_1 \exp b_1 E_3 \\ \eta'_4 &= a_1 \exp b_1 E_4 \end{aligned}$$

设它们与探测效率之差分别为 T, W , 用一指数修正项来描述。

$$T = f_3 - f'_3 = a_2 \exp b_2 E_3$$

$$W = f_4 - f'_4 = a_2 \exp b_2 E_4$$

用类似式(8)方法求 a_2, b_2

$$\eta = \begin{cases} a_1 \exp b_1 E & (E \leq E_2) \\ a_1 \exp b_1 E + a_2 \exp b_2 E & (E > E_2) \end{cases}$$

3 拟合结果

拟合结果示于表1及图1。修正指数拟合中拟合点的选取对拟合效果影响如表2及图2所示。

拟合函数取如下形式:

双曲线模型:

$$\eta = -0.00431 + \frac{0.019975}{E}$$

修正指数模型:

$$\eta = 0.328 \exp(-4.943E) + 0.038 \exp(-1.020E)$$

指数模型:

$$\eta = 0.129\,56e^{-1.818E}$$

表1 光峰效率与指数、双曲线拟合结果

编号	γ 能量/ MeV	实测 效率	双 曲 拟 合		指 数 拟 合		修正指数拟合	
			效率	相对偏 差/%	效率	相对偏 差/%	效率	相对偏 差/%
1	0.122	0.1833	0.1879	+2.5	0.104	-42	0.1833	0
2	0.279	0.0879	0.0789	-10.3	0.0782	-11	0.0879	0
3	0.511	0.0445	0.0388	-12.8	0.0512	+15	0.0466	+9
4	0.662	0.0300	0.0281	-6.3	0.0389	+30	0.0300	0
5	0.835	0.0227	0.0206	-9.2	0.0284	+29	0.0203	-10
6	0.898	0.0194	0.0186	-4.1	0.0125	+30	0.0181	-7
7	1.275	0.00112	0.0107	-4.5	0.0128	+14	0.0112	0
8	1.333	0.00891	0.00993	+11	0.0115	+28	0.0106	+13.5
9	1.836	0.00823	0.00501	-39	0.0046	-39	0.0730	-11.3

表2 修正指数模型拟合时拟合点选取对结果的影响

编号	γ 能量/ MeV	实测 效率	拟合(1)(2)(5)(10)		拟合(2)(3)(5)(10)		拟合(3)(5)(6)(10)	
			效率	相对偏 差/%	效率	相对偏 差/%	效率	相对偏 差/%
1	0.122	0.179	0.179	0	0.199	+11	0.0813	-55
2	0.279	0.0825	0.0825	0	0.0825	0	0.0662	-25
3	0.356	0.0535	0.0564	5.4	0.0535	0	0.0546	2
4	0.511	0.0412	0.0432	5	0.0490	19	0.0419	1
5	0.662	0.0318	0.0318	0	0.0318	0	0.0324	1.9
6	0.835	0.0227	0.0215	-5.5	0.0217	-5.6	0.0232	1.6
7	0.898	0.0211	0.0191	-9.5	0.0198	-9.4	0.0209	1
8	1.173	0.0072	0.0125	+77	0.0126	+74	0.0133	85
9	1.275	0.0110	0.0109	<1	0.0110	0	0.0112	2
10	1.333	0.00788	0.0102	30	0.0102	30	0.0102	30
11	1.836	0.00818	0.00588	-28	0.00546	-33	0.00436	-47

从所得结果可以看出:

(1) NaI(Tl) γ 能谱光峰效率—能量曲线,在一定精度要求之下,能量在 0.122~1.835 MeV 之间可以进行数学拟合。本实验中使用 $\eta = A + \frac{B}{E}$ 型双曲函数拟合,在能量 0.122~1.835 MeV 范围内最大的误差小于 $\pm 13\%$ 。而修正指数拟合效果更好。上述能量区间中拟合的最大相对偏差为 $\pm 10\%$ 。考虑到本实验所用标准源的误差为 $\pm 5\%$,所以上述拟合所用数学本身的误差并不大。

(2) 从表 2 及图 2 修正指数函数拟合系列说明,拟合点对拟合结果的影响。图中以拟合(1)(2)(5)(10)点效果最好,一般在 $\pm 5\%$ 左右,而(3)(5)(6)(10)点拟合效果最差。由于效率曲线在 122~662 keV 之间变化较快,在低能部分变化更快。在前一种情况下,这一区间取点多一些,而且把可能得到的能量最低一点包括在内,所以拟合效果好。

(3) 因此,当手头没有足够的 γ 标准源供作光峰效率曲线时,可以用数学拟合,求出效率曲线。

参 考 文 献

- 1 Crouthamel C E. applied Gamma-ray Spectrometry, p. 207~215, Oxford: Pergamon Press, 1970
- 2 Health R L. AEC Report LDO 17017, 1965
- 3 Kane W R, et al. Nucl. Instr. 1967, 56: 189~196

2 γ 能谱全能峰的简化高斯函数拟合

任天山 林莲卿

近年来,由于电子计算机的广泛应用,在 γ 能谱定量解析中常用方法是逐道最小二乘拟合法^[1]和光峰面积拟合法^[2],很多作者对这些方法已作了评述。复杂的NaI(Tl) γ 能谱由于重叠严重,较理想的解析方法是采用逐道最小二乘拟合。但是它要求有一套样品中可能含有的核素的标准 γ 能谱,这在实际上是不易获得的。本文介绍用简化高斯函数拟合NaI(Tl) γ 能谱全能峰的定量解析方法^[2],讨论影响拟合效果的若干因素。

1 原理

γ 能谱全能峰的形状近似于高斯曲线,可用高斯函数描述:

$$y = y_0 e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-x_0}{\sigma})^2} \quad (1)$$

式中, y_0 是峰顶计数, x_0 是表观峰址, y 是全能峰上对应于 x 道的计数, σ 是高斯函数的分布参数。

在峰顶附近可将式(1)按台劳级数展开并只取一级近似:

$$\text{令 } z = (x - x_0)^2$$

则

$$y = y_0 + y_0 e^{-z/2\sigma^2} \left(-\frac{1}{2\sigma^2} \right) \Big|_{z=0} z +$$