

封面设计:余兴光

书号:ISBN—7—5027—3664—6/X·43

定价:7.50元

海洋放射性监测方法

陈进兴 编著

海洋出版社

1993, 北京

内 容 简 介

本书是从海洋放射性监测的实际需要出发，总结作者30多年从事放射化学教学和科研工作的基础上编写成的。全书分为三大部分共十章：第一部分为放射性监测中的核基础知识；第二部分为放射性监测中的放射化学分离方法；第三部分为海洋中主要放射性核素的分析测定方法，这是本书的重点内容。本书对从事海洋放射性监测、放射分析化学和环境放射性监测等方面的教学和科技人员有较高的实用价值，对其他有关人员也有一定参考意义。

(京)新登字087号

海洋放射性监测方法

陈进兴 编著

*

海洋出版社出版（北京市复兴门外大街1号）

厦门大学印刷厂印刷

开本：787×1092 1/32 印张：7.06 字数：140千字

1993年7月第一版 1993年7月第一次印刷

印数：1—800册

*

ISBN 7-5027-3664-6/X·43 定价：7.50元

责任编辑：张长户

作者简介

陈进兴，男，1933年7月出生在福建省南安县溪美镇彭美村的一个贫苦农家。1955年考入南京大学化学系，1958年被江苏省政府和南京大学选送到北京大学放射化学专业学习。1959年5月提前毕业，并留南大任助教15年。1974年调到(厦门)国家海洋局第三海洋研究所搞科研工作。1979年晋升为助理研究员，1986年晋升为副研究员。已编著出版《放射化学实验》、



作者照于1990年10月

(南京大学印刷厂1965年印)、《核技术在海洋研究中的应用》(南京大学出版社1990年出版)、《海洋放射性监测方法》(海洋出版社1993年出版)、《陈进兴论文集》(海洋出版社1993年出版)、《海洋监测规范》(主编者之一，海洋出版社1991年出版)等五本专著，并写完《海洋放射性同位素地球化学行为及其应用》(1990年完稿，海洋出版社待出版)。在全国20多种高、中级科学刊物上发表近70篇科学论文。现为全国核学会同位素学会理事，《同位素》杂志编委。先后被收入《科技咨询服务人名录》(光明日报出版社1987年出版)、《中国科学技术专家名人咨询通讯录》(同济大学出版社1992年出版)、《中国当代地球科学家大辞典》(北京大学出版社1994年出版)、《中国当代高级科技人才系列词典》(中国华侨出版社1993年出版)、《泉州市志》(1993年出版)、《南安县志》(1989年出版)、《南安今古》(1991年出版)、《历代南安籍作者介绍》(1991年出版)等书志中。

序 言

1984年我为《同位素技术在水利工程中的应用》作序时，曾说：“同位素技术可用于下列领域：地下水运动、弥散和储量的勘测；地表水流速和流量的测量；湖泊、水库和水动力学研究；河流、港口泥沙运动和沉积的测定；以及冰雪水文和环境保护等”。

后来我才知道陈进兴同志从70年代末开始即已从事海水、海洋生物和沉积物中的 ^{60}Co 、 ^{65}Zn 的测定，大陆架沉积物中 ^{226}Ra 的测定及其在地质年代学中的应用，以及其沉积速率及分布的研究，利用 ^{210}Pb 测定沉积速率和沉积物的年龄等等。

1989年陈进兴同志编著的《核技术在海洋研究中的应用》时，我曾对编写大纲提出过一些一孔之见。他写完该书请我作序时，我又在异国多时，他等不及只得出版发行了。

现在他又要我为他编著的《海洋放射性监测方法》作序。我从事同位素科学技术多年，也重视其应用，故亦乐于为之效劳，亦算还清欠他的这笔债吧。至于编著如何，有书为证，就不用我饶舌了。

但是我倒想添个蛇足。海洋、长江、黄河都对之作过一些同位素水文工作，可惜很不够，尤其对于黄河及流域更是不足。

中国科学院化学部委员 肖伦
1992年3月 于原子能科学研究院

前 言

海洋中蕴藏着非常丰富的生物资源和矿物资源，它是人类的天然宝库。开发利用各种海洋资源，就必须保护海洋环境不受污染和破坏。

核能的发现和利用与电能一样，都是人类科学史的伟大成就。它既可用于军事方面，也可用于和平建设方面，既能造福于人类，也会对人类产生一些不良影响。在利用核能的过程中，多少都会产生一些危害环境和人类健康的放射性物质，特别是当今世界上几个核大国进行长期的核武器试验，造成全球性放射性污染，加上各国的核电站、核潜艇以及其它核设施所产生的放射性废物。都会通过各种途径最终绝大部分都将归入海洋，对海洋环境产生不良影响。为了了解海洋环境中放射性的污染水平，必须找到一些切实可行的分析监测方法。

此书总结我们30多年从事放射化学教学和科研工作经验编写成的。其中大部分内容是我们的科研成果，也收入国内外部分科研成果。本书的主要特色是适用性，是理论与实践相结合，提高和普及相结合。即：既有一定的基础理论，又有大量的实际分析监测方法；既有较高水平的能谱分析法，又有带普及型的一般放射化学分析法；既有较复杂的多核素联合测定法，又有较简单的单核素测定法。

全书分为三大部分共十章，第一部分为放射性监测中的核基础知识，主要介绍放射性衰变定律、衰变类型和放射性强度单位，放射性的各种测量技术及测量中的质量控制和数据处理；第二部分为放射性监测中的放射化学分离法，包括放射化学分离中的基本概念，放射化学分析中常用的分离方

法和放射性样品源的制备及标准放射源的选用；第三部分为海洋中主要放射性核素的测定，这是全书的重点部分，它包括样品的采集和预处理，总放射性强度的测定，单核素的测定，多核素的化学联测法和谱仪联测法。本书共编入25个实测项目，这些项目都是从海洋放射性监测的实际需要出发。

本书在编写和出版过程中，得到中国科学院学部委员肖伦教授的热情指导和南安县王家镇及黄剑锋两位副县长的大力支持。本书的出版还得到以黄其土为经理的南安县电力公司和以李新华为站长的南安县新蓝水电站提供资助，在此特向他们表示衷心感谢。

由于作者水平有限，书中错误之处，敬请读者指正。

作者 陈进兴

1991年11月于(厦门)国家海洋局
第三海洋研究所

几点说明

1. 所用化学试剂未加说明者均为分析纯。
2. 所用“水”指蒸馏水或去离子水。
3. 程序中指的pH值，除有注明外，均用精密的或广泛的pH试纸测定。

目 录

第一部分	放射性监测中的核基础知识	
第一章	放射性衰变规律和衰变类型	
1.1	放射性衰变规律.....	1
1.2	放射性衰变类型.....	2
1.3	放射性强度单位和放射性比度单位.....	3
第二章	放射性强度的测量	
2.1	单核素放射性强度的测量.....	6
2.2	多核素放射性强度的测量.....	7
2.3	多核素谱仪测量法.....	7
第三章	放射性测量中的质量控制、数据处理 和结果表示	
3.1	质量控制.....	10
3.2	数据处理.....	11
3.3	测量结果和误差表示法.....	14
第二部分	放射性监测中常用的放射化学分离法	
第四章	放射化学分析中的一些基本概念	
4.1	放射化学的基本内容.....	17
4.2	放射化学的主要特点.....	17
4.3	载体、无载体、反载体和清扫剂.....	17
4.4	放射性纯度及去污因子.....	18
4.5	化学回收率和放化回收率.....	19
第五章	放射化学分析中常用的分离方法	
5.1	共沉淀法.....	21
5.2	离子交换法.....	23
5.3	萃取法.....	28

5.4	电化学法.....	31
5.5	其他分离法.....	35
第六章	放射性样品源的制备和放射性标准源的选用	
6.1	放射性样品源的制备.....	38
6.2	放射性标准源的选用.....	39
第三部分	海洋中主要放射性核素的监测	
第七章	样品的采集和预处理	
7.1	海水样品的采集和预处理.....	42
7.2	海洋生物样品的采集和预处理.....	43
7.3	海洋沉积物的采集和预处理.....	44
第八章	总放射性强度的测定	
8.1	总 α 放射性的测定.....	46
8.2	总 β 放射性的测定.....	50
第九章	单核素的测定	
9.1	天然放射性核素的测定.....	54
一.	U的测定.....	54
二.	Th的测定.....	63
三.	^{226}Ra 的测定.....	68
四.	^{222}Rn 的测定.....	75
五.	^{40}K 的测定.....	80
9.2	活化产物的测定.....	85
一.	^3H 的测定.....	85
二.	^{14}C 的测定.....	91
三.	^{55}Fe 和 ^{59}Fe 的测定.....	99
四.	^{60}Co 的测定.....	105
五.	^{65}Zn 的测定.....	113
9.3	裂变产物的测定.....	120

一.	^{90}Sr 的测定.....	120
二.	^{137}Cs 的测定.....	130
三.	^{106}Ru 的测定.....	135
四.	^{131}I 的测定.....	144
9.4	超铀元素的测定.....	148
一.	^{239}Pu 的测定.....	148
二.	^{241}Am 的测定.....	154
第十章	多核素联合测定	
10.1	多核素化学联合测定.....	162
一.	U、Th和 ^{226}Ra 的联合测定.....	162
二.	^{54}Mn 、 ^{60}Co 和 ^{65}Zn 的联合测定.....	171
三.	^{90}Sr 和 ^{137}Cs 的联合测定.....	182
四.	^{226}Ra 和 ^{210}Pb 的联合测定.....	187
10.2	多核素谱仪联测法.....	192
一.	^{54}Mn 、 ^{59}Fe 、 ^{60}Co 和 ^{65}Zn - γ 能谱法 联合测定.....	192
二.	亚铁氰化钴吸附- γ 能谱法同时测定 海水中多种核素.....	196
三.	^{234}U 、 ^{238}U 、 ^{230}Th 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 和 ^{231}Pa α 谱仪联合测定.....	201

第一章 放射性衰变规律及衰变类型

1.1 放射性衰变规律

一、衰变定律

放射性核素每一个核的衰变并非同时发生，而是有先有后，所以是一个统计过程。实验证明，在时间间隔为 t 到 $t + \Delta t$ 内，衰变的数目 ΔN 是和 Δt 及在该时刻尚未衰变的总核素 N 成正比，即 $\Delta N \propto N \Delta t$

写成等式为：

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N \quad (1)$$

$t = 0$ 时未衰变核的总数为 N_0 ，则得

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

上式就是衰变定律的数学表达式，其中 λ 为衰变常数。此式说明放射性核数是按时间的指数函数进行衰变的。

二、衰变率、衰变常数、半衰期和平均寿命

1. 衰变率：单位时间内有多少核发生衰变称为衰变率（或放射性强度），其表达式为：

$$-\frac{dN}{dt}$$

将(2)式微分得衰变率为：

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

可见放射性强度（衰变率）也是以指数进行衰减。

2. 衰变常数(λ): 在单位时间内每一个核的衰变几率。每一种放射性核素都有它固定的衰变常数, λ 值大的放射性核素衰变得快, λ 值小的衰变得慢。 λ 的因次为 $[s]^{-1}$ 。例如 ^{226}Ra 的 $\lambda = 1.38 \times 10^{-11}/s$; 而 ^{108}Ag 的 $\lambda = 4.734 \times 10^{-8}/s$ 。

3. 半衰期 ($T_{\frac{1}{2}}$):

$$t = T_{\frac{1}{2}} \text{ 时, } N = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}}$$

解此式, 得

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (4)$$

4. 平均寿命 ($\bar{T}$): 母体原子在衰变前的平均存在时间。

由(2)式可求 $\bar{T}$ 和 λ 的关系为:

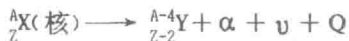
$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

1.2 放射性衰变类型

放射性衰变的种类很多(如 α 衰变、 β 衰变、 β^+ 衰变、电子俘获及 γ 衰变等), 这里仅介绍在海洋放射性监测中常用的三种, 即 α 衰变、 β 衰变和 γ 衰变。

一、 α 衰变

放射性核素的核放射出 α 粒子、而变成另一新核素的变化过程称 α 衰变。 α 粒子实际上就是氦核 ^4_2He , 它的性质与氦核相等, 由2个质子和2个中子组成, 带有2个正电荷。因此, α 衰变可用下式表示:



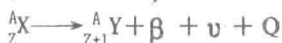
式中 ν 为中微子, Q 为衰变能, Q 值为母体核的质量和子核素、 α 粒子、中微子的总质量的差数。

一种核素放出的 α 粒子的能量是单一的。伴随有 γ 射线

的 α 衰变常常放出不只一种能量的 α 粒子。例如 ^{226}Ra 衰变时就伴有0.188兆电子伏的 γ 射线，并放出4.78兆电子伏(占总强度的95%)和4.60兆电子伏(占总强度5%)的两种 α 粒子。

二、 β 衰变

不稳定原子核里的一个中子转变成一个质子并放射出 β 粒子的过程称 β 衰变。 β 粒子的质量为 0.000549μ ，带有一个单位 e 的负电荷，实际上 β 粒子就是电子(或负电子)。因此有的将 β 粒子写成 β^- 粒子，以区别 β^+ 。其衰变形式为：



式中 ν 为中微子， Q 为衰变能， Q 值可由母体核的质量和子核素、 β 粒子、中微子的总质量的差数求出。

原子核 β 衰变时，有不伴随其他射线的，如 ^{14}C 、 ^{32}P 、 ^{90}Sr 等。但是有更多 β 衰变有 γ 射线放出，如 ^{60}Co 衰变时，除放出 β 粒子外，还伴随放出两种能量的 γ 射线。

三、 γ 衰变

γ 射线是原子核从较高能级跃迁到较低能级或基级(核平常所处的最低能级)时所放射的电磁辐射。 γ 衰变对于核原子序数和原子质量数都没有影响，所以称为同质异能跃迁。

和 β 射线不同， γ 射线和内转换电子的能量都是单一的。一个核衰变可能放出几种不同能量的 γ 射线。如 ^{131}I 衰变时，同时放出7组不同能量的 γ 射线。

1.3 放射性强度单位及放射性比度单位

一、放射性强度(放射量)单位

放射性强度(放射量)是量度放射性物质的一种物理量，它以放射性物质在单位时间内发生的核衰变数目(核衰变数/秒或核衰变数/分)表示。放射性物质在单位时间内发生的

核衰变数目越多，其放射性物质的放射性强度（放射量）就越大。

表示放射性强度的常见单位是“居里”，（其符号为Ci）。它的定义是1居里为每秒钟核衰变 3.7×10^{10} 次。但现在采用国际通用单位“贝可”（其符号为Bq），其单位为1次核衰变/秒。

$$1 \text{ 居里} = 3.7 \times 10^{10} \text{ 贝可}, \text{ 即 } 1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}.$$

放射性强度与放射性物质质量的换算：

$$Q = 1.036 \times 10^5 A T_{1/2}, \quad (T_{1/2} \text{ 以年为单位})$$

$$= 2.849 \times 10^2 A T_{1/2}, \quad (T_{1/2} \text{ 以天为单位})$$

$$= 1.184 \times 10^1 A T_{1/2}, \quad (T_{1/2} \text{ 以小时为单位})$$

$$= 1.961 \times 10^{-1} A T_{1/2}, \quad (T_{1/2} \text{ 以分为单位})$$

$$= 3.293 \times 10^{-3} A T_{1/2}, \quad (T_{1/2} \text{ 以秒为单位})$$

式中：Q为放射性核素的重量(g)；

A为放射性核素的原子量；

$T_{1/2}$ 为放射性核素的半衰期。

二、放射性比度单位

在实际工作中常以放射性比度表示放射性含量，放射性比度单位分为重量比度和体积比度两种，重量比度为单位重量(g或kg)中所含放射性强度(如Bq/g或Bq/kg)，体积比度为单位体积(mL或L)所含放射性强度(如Bq/mL或Bq/L)。

参考文献

- [1] 环境放射性监测方法编写组, 环境放射性监测方法, 2~8; 18~19, 原子能出版社, 1977。
- [2] 中国科学院原子能研究所编, 放射性同位素应用知识, 30~60, 科学出版社, 1959。
- [3] (美)约翰.H.哈利编, 程荣林等译, 环境放射性监测技术手册, 2~5, 卫生部工业卫生实验所编印, 1976。

第二章 放射性强度的测量

2.1 单核素放射性强度的测量

放射性强度测量的目的是确定样品的放射性强度，即要求给出样品在单位时间内的衰变数。通过直接或经过校正后给出样品的绝对放射性强度称为绝对测量法，在对结果误差要求很小的情况下才用绝对测量法。一般情况都采用相对测量法。

所谓相对测量法是把已知放射性强度的标准和待测样品分别在相同条件下进行测量，从标准源的强度求出待测样品的放射性强度。本章只介绍相对测量法。在相对测量中，标准源的选择对测量结果影响很大。有关标准源的选择将在第六章第二节介绍。

所谓单核素是指所测样品源中只含一种放射性核素，不含其他核素。

一、单核素 α 辐射源的强度测量

测量 α 辐射源的强度一般可用电离室、正比计数管、液体闪烁计数器以及其它 α 测量仪器。例如我们常用国产 FJ-367通用闪烁探头配上FH-408自动定标器测量 ^{226}Ra 、 ^{210}Po 、 ^{239}Pu 等辐射源的强度。也可以用国产BH216低本底 α 、 β 测量装置或美国Canberra公司生产的2201型 α 、 β 低本底测量仪等仪器测量单核素 α 辐射源的强度。

二、单核素 β 辐射源强度的测量

在测量单核素 β 辐射源的强度时，一般可采用正比计数器和闪烁计数器等仪器进行测量。例如我们常用上述测量 α 辐射源的三种仪器来测量 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 和 ^{32}P 等 β 辐射源的强度。对于具有低能 β 辐射源（如 ^3H 、 ^{14}C 等），我们则采用

液体闪烁计数器进行测量。

三、单核素 γ 辐射源的强度测量

在测量具有相当质量（厚源）时， γ 计数具有明显优越性。也有被测量的核素唯一能测量的辐射只有 γ 射线和X射线，这种情况使 γ 计数器成为必不可少的测量方法。尤其对样品量少，担心经放化分离后被测核素的量会受损失，采用不经放化分离而直接铺样（对泥样和生物样）或蒸干后铺样（对液体样品），然后采用 γ 计数便可以消除这种担心。

用于 γ 计数的仪器有 γ 计数器，碘化钠探测器等。例如我们常用国产FJ—367通用闪烁探头配上FH—408自动定标器测量 ^{60}Co 、 ^{65}Zn 等辐射源的 γ 射线。

2.2 多核素放射性强度的测量

所谓多核素放射性总强度测量是指被测样品源中含多种 α 辐射核素或多种 β 辐射核素。简单地说，就是测量待测样品源的总 α 含量或总 β 含量，在环境（包括海洋）放射性监测中都属于常规监测项目。测量总 α 含量和总 β 含量的仪器仍然可以用本章第一节所介绍的仪器。

2.3 多核素谱仪测量法

一、 γ 能谱测量法

γ 能谱测量法对样品能够进行定性（确定样品中核素的种类）和定量（确定样品中各种核素的量）测量，而且通常不需要进行化学分离。因此 γ 能谱测量法在环境（包括海洋）监测中非常有用，它可以用来直接测定各种环境样品（水、沉积物和生物）中多种核素的含量。例如我们经常利用美国Canberra公司生产的多道 γ 能谱仪测定环境（包括海洋）样品中的 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{137}Cs 和 ^{40}K 等核素的含量，我们也用来测定样品中 ^{54}Mn 、 ^{59}Fe 、 ^{60}Co 和 ^{65}Zn 的含量。