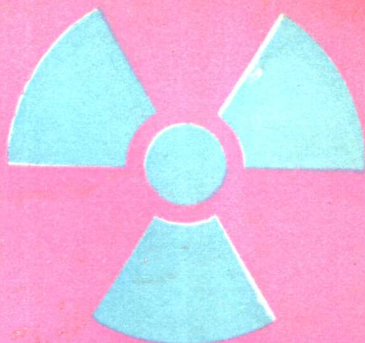




环境放射学



吴成祥 李彦 著
中国环境科学出版社

环境放射学

吴成祥 李彦 著

中国环境科学出版社

1991

内 容 简 介

本书介绍了核放射学的基本概念和基础知识,阐述了环境放射性与人体的关系,核放射性的环境标准,环境放射学的物理测量及核素分析,环境放射性的管理以及放射性污染的监测、评价和防治等。本书后面还附有样品中放射性核素的测定实验,供使用者参考。

本书可供从事环境保护中放射性研究的工作人员和大专院校有关专业的师生参考使用。

中国环境科学出版社出版

北京崇文区北岗子街8号

北京三环印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经售

1991年5月 第 一 版 开本 787×1092 1/32

1991年5月 第一次印刷 印张 7 1/4

印数 1—1 600 字数 161千字

ISBN 7-80010-729-9/X·389

定价: 4.20元

前 言

提起“核辐射”，人们常常会产生原子弹爆炸、核电站事故、核放射线引起的遗传病变等一系列令人恐怖的联想，让人谈虎色变。目前，越来越使人焦虑的能源危机，当今世界核军备竞赛的降温，加快了核能和平利用的进程。在我国，和平利用核能的事业刚刚起步，人们日益关心核辐射对环境、对人体的影响，迫切需要了解核放射性知识。

实际上，自地球形成以来，生物出现以前和以后，一直存在着核辐射现象，生物和非生物都一直受着各种射线的辐照。适当的辐照非但无害、反而有益于生物，这一点实际上已被自然进化的历史默默地、缓慢地证明，而现代科学则让这一漫长的过程浓缩，让我们能在较短的时间里洞察这一切。

各种放射线是怎样产生的？它们怎样作用于人体和环境？怎样测量核辐射？怎样利用它们又怎样防止它们的危害？这些，正是本书要尝试回答的问题。

本书的前面是核放射学的基本概念和基础知识。接着的内容是环境放射性与人体的关系，核放射的环境标准，环境放射学的物理测量及核素分析，环境放射性的管理以及放射性污染的监测、评价和防治等。在本书的后面，还附有环境样品中放射性核素的测定实验，供读者参照。

环境放射学是研究各种辐射源对环境、特别是对人本身的影响，以及如何控制这一影响的科学。它的研究对象是人

类生存环境中的各种放射源及其分布特点、变化规律，以及核放射对人和主要环境要素的影响。它是环境科学与核放射学相交叉的新兴学科，是环境科学的重要组成部分。这一新的学科正处在不断发展之中，完美而准确地绘出这个学科大厦的蓝图是很困难的，当然，这也是编写本书的一个意图。此外，为适应环境保护事业发展的需要，提高从事环境放射性工作人员的技术水平，也是编写此书的目的。

限于作者的水平，本书一定存有不少缺陷。对此，我们热切期待读者和专家们的批评指正。

作 者

1989 年 4 月

目 录

第一章 环境放射学基础	(1)
第一节 放射性和同位素	(1)
第二节 放射性衰变类型	(1)
第三节 放射性核素的衰变规律	(6)
第四节 电离辐射与物质的相互作用	(27)
第二章 环境辐射学中的基本物理量和单位	(51)
第一节 辐射场的物理量和单位	(51)
第二节 吸收剂量及单位	(52)
第三节 γ 射线的吸收剂量	(53)
第四节 照射量及单位	(54)
第五节 辐射防护中应用的照射量和单位	(56)
第三章 环境中的放射性	(62)
第一节 天然辐射源	(62)
第二节 人工放射性	(74)
第三节 环境放射性物质进入人体的途径	(80)
第四节 环境放射性对人群所致的辐射剂量	(82)
第四章 环境辐射的物理测量	(95)
第一节 辐射探测器	(95)
第二节 放射性的测量	(99)
第三节 放射性核素的 γ 能谱分析测量	(109)
第四节 地表 γ 辐射剂量率的测定	(120)
第五章 环境介质中放射性核素的分析测定	(122)
第一节 放射化学概论	(122)
第二节 环境样品中放射性核素的测定	(134)

第六章 环境放射性管理、监测及评价	(142)
第一节 环境放射性管理	(142)
第二节 环境放射性监测	(145)
第三节 环境放射性监测评价	(148)
第四节 辐射污染的环境标准	(149)
第七章 放射性污染的防治	(161)
第一节 放射性废物的特征和分类	(161)
第二节 放射性废水的处理	(164)
第三节 放射性气体、气溶胶的处理和净化	(169)
第四节 放射性浓缩废液的贮存与固化	(171)
第五节 放射性固体废物的处理和处置	(176)
第六节 放射性废物的综合利用	(183)
附录 环境样品中放射性核素的测定实验	(189)

第一章 环境放射学基础

第一节 放射性和同位素

自然界里所有的物质都是由各种元素组成的。迄今为止，已发现了一百多种元素。其中绝大多数是天然元素，只有少数是用人工方法形成的。

有些元素的原子核不稳定，在不受外界因素（温度、压力等）影响下，能够自发地改变核结构，而转变成另一种核，这种现象称为核衰变。在发生核衰变的同时，不稳定核总是伴随着放射出带电或不带电的粒子，这种衰变称为放射性衰变。能够产生放射性衰变的元素，称为放射性元素。原子核放射出来的各种粒子的现象称为核辐射。

原子序数相同，而中子数不同的原子，它们在化学元素周期表中占有同一位置，因此它们互称同位素。组成同位素的原子核称为核素。如氢的同位素由氢、氘和氚三种核素组成的。氢和氘的核稳定，称为稳定性核素；氚的核不稳定，称为放射性核素。

应用核反应方法人工制造出来的放射性核素，称为人工放射性核素，以区别于自然界中存在的天然放射性核素。

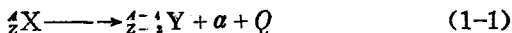
第二节 放射性衰变类型

放射性核素在衰变过程中，可放射出不同种类的射线，

据此，衰变类型可以分为 α 衰变、 β 衰变、 β^+ 衰变、电子俘获和 γ 衰变等等。

一、 α 衰变

放射性核素的核放射出 α 粒子的衰变，称为 α 衰变。 α 粒子的质量和氦核相等，带有二个质子和二个中子，并带有 2 个单位正电荷，实际上 α 粒子就是氦核。因此，放射性核素在发生 α 衰变后，它的子体核素的质量数 A 降低 4 个单位，原子序数即质子数降低 2 个单位。如果用 X 代表母体核素， Y 代表子体核素，则 α 衰变可用下式表示：



式中的 Q 为衰变能，其值为母体核的质量与子体核和 α 粒子总质量的差值。

有的放射性核素，放射出来 α 粒子的能量单一。但在伴有 γ 射线的 α 衰变中，常放射出不只一种能量的 α 粒子。例如 ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ 衰变时伴有 γ 射线 ($E_\gamma = 0.188\text{MeV}$)，其 α 粒子能量就有两种，一种能量为 4.78MeV (占总强度的 95%)，另一种能量为 4.60MeV (占总强度的 5%)。图 1-1 就是它的衰变图。

α 粒子的能量 E_α 和半衰期 $T_{1/2}$ 有关，一般是半衰期长的能量小，半衰期短的能量大。在同一个天然放射系内，各个 α 衰变核素的 E_α 和 $T_{1/2}$ 之间有如下关系：

$$\ln E_\alpha = a - b \ln T_{1/2} \quad (1-2)$$

式中的 a 和 b 是常数。

人工放射性核素的 α 衰变没有上述关系。 α 粒子的能量范围大部分处在 $4-8\text{MeV}$ 之间。进行 α 衰变的天然放射性核素，原子序数绝大部分大于 82。

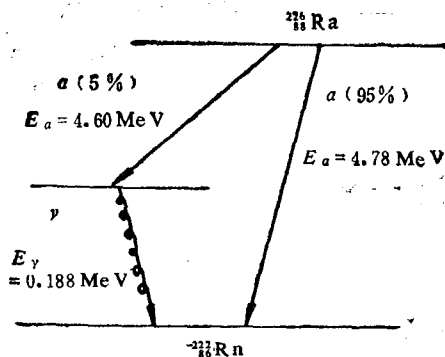
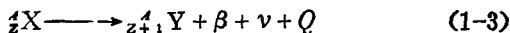


图 1-1 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 衰变图

二、 β 衰变

放射性核素的核里有一个中子转变成一个质子，并放射出 β 粒子的过程，称为 β 衰变。 β 粒子实际上就是电子。通常把核内放射出来的电子称为 β 粒子或 β 射线，以区别于核外电子。发生 β 衰变后，子体核内多了一个质子，故原子序数增加一个单位，但总的原子质量数没有改变。 β 衰变可用下式表示：



式中的 ν 为中微子。

β 粒子的能量可以从 0 到最大值，形成一个连续的能谱。

许多 β 衰变的放射性核素，只放射 β 粒子，而不伴有其它射线。如 $^{14}_6\text{C}$ 、 $^{32}_{15}\text{P}$ 、 $^{35}_{16}\text{S}$ 等。但有更多的 β 衰变放射性核素，常伴有 γ 射线。如 $^{137}_{55}\text{Cs}$ 、 $^{60}_{27}\text{Co}$ 等。其衰变图如图 1-2 所

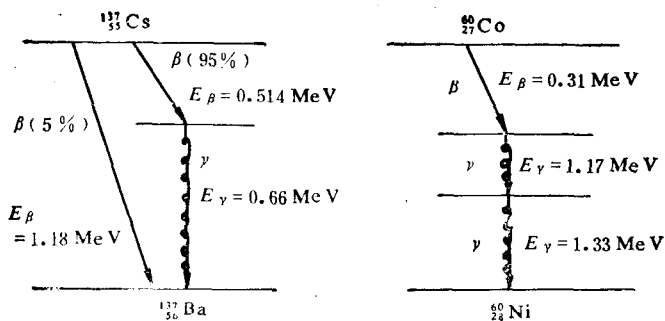


图 1-2 $^{137}_{55}\text{Cs}$ 和 $^{60}_{27}\text{Co}$ 的衰变图

示。

三、 β^+ 衰变

放射性核素的核内一个质子转变成一个中子，并放射出 β^+ 粒子的过程，称 β^+ 衰变。 β^+ 粒子实质上是正电子。

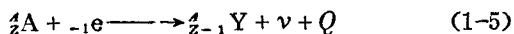
β^+ 衰变时伴随着放射出中微子。衰变后的子体和母体的质量数相同，只是原子序数 Z 减少一个单位。衰变公式如下：

$${}_Z^AX \longrightarrow {}_{Z-1}^AY + \nu + Q \quad (1-4)$$

β^+ 粒子的性质，除了所带电荷与 β 粒子相反外，其它基本与 β 粒子相同。 β^+ 粒子也是连续能谱。 β^+ 粒子与物质作用时，能与物质中的电子相结合，而转化为电磁辐射，即变成光子。

四、电子俘获

放射性原子核俘获一个核外绕行电子而使核内的一个质子转变成中子和中微子的过程称为电子俘获。核外电子能级按能量增加的顺序可分成 K、L、M、N、O、P...等若干层次，由于 K 层电子离核最近，被核俘获的几率比其它各层电子要大，所以有时也称这种核衰变为 K 电子俘获。电子俘获可用下式表示。



由上式可知，电子俘获的衰变过程只放出一个中微子，所以具有单一的能量。

能够满足产生 β^+ 衰变的条件，均能满足产生电子俘获的条件。所以许多产生电子俘获的放射性核素同时能产生 β^+ 衰变，如 ${}_{11}^{22}\text{Na}$ ， ${}_{30}^{65}\text{Zn}$ 等。也有一些放射性核素能同时产生电子俘获和 β 衰变，如 ${}_{19}^{40}\text{K}$ ；还有少数放射性核素能同时产生电子俘获， β^+ 衰变和 β 衰变，如 ${}_{29}^{64}\text{Cu}$ 。

核素作电子俘获后，除了有些核素因子体核处于激发态而放射出 γ 射线外，核并不放射出任何易于探测的射线。但它却有次级辐射能够被探测。现以 K 电子俘获为例来说明次级辐射的来源。当 K 电子被俘获后，K 壳层即少了一个电子，此时比 K 壳层能级更高的绕行电子如 L 电子，有可能跃迁到 K 壳层来填补这个空位，而将两壳层的能级差转变为 X 射线放射出来。这种过剩的能量也可能不以 X 射线放射出来，而将它传递给另一个 L 电子，使之摆脱核的引力成为自由电子放射出来，这种电子称为俄歇电子。X 射线和俄歇电子都是电子俘获衰变后产生的次级辐射，它们的能量都是单一的。所以通过对次级辐射的探测，就能判断电子俘

获的发生。

五、 γ 衰变

γ 衰变是放射性核素的原子核从较高能级跃迁到较低能级或基级时所放射出来的电磁辐射。这种跃迁对于核的原子序数和原子质量数均无影响，所以称为同质异能跃迁。

γ 衰变通常伴有 α 射线、 β 射线或其它射线，如图1-1和图1-2所示。电子俘获衰变时有的也伴有 γ 射线放出。 γ 射线的能量是单色的，它的大小差不多等于两个能级之差。 γ 衰变时可能有两组和两组以上能量的 γ 射线存在。例如， ^{60}Co 的 γ 衰变就有两组。

产生 γ 衰变的核，还能以发射内转换电子的方式，从较高的激发态回到较低的激发态或基态，把能量交给绕行电子，使之脱离原子而放射出来，核并不放射 γ 射线。内转换电子的能量也是单色的。

第三节 放射性核素的衰变规律

对于任何一种放射性物质，每个核在单位时间内，都有一个固定衰变率。在一切可能达到的温度、压力下，也不管该元素的物理或化学状态如何，它们的衰变规律是一致的。

一、半衰期

为了求得放射性核素的衰变与时间的关系，取一定量的氡，在开始时氡的活度为 m ，经过3.825天后，测得氡的活度为 $\frac{1}{2}m$ ，又经过3.825天，测得氡的活度为 $\frac{1}{4}m$ ，再经

过 3.825 天，测得氡的活度为 $1/8m$ 。氡的活度将按着这样的规律继续减少。即：每经过 3.825 天，氡的活度就减少到原来的一半。则 3.825 天就是氡的半衰期。图 1-3 描述了氡的活度与时间的关系。

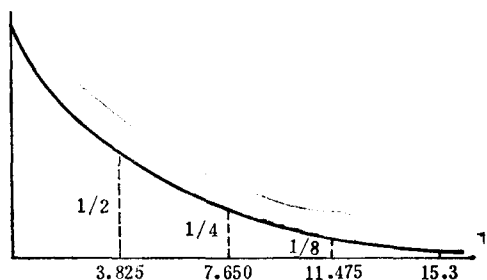


图 1-3 氡的活度与时间的关系曲线

任何放射性核素由于衰变使其活度衰减到一半时所经过的时间，称为半衰期，通常以 $T_{1/2}$ 表示。它是表示放射性核素特征的物理量，不同的放射性核素有不同 的半衰期。例如：

$^{226}_{88}\text{Ra}$ 的半衰期 $T_{1/2} = 1617$ 年

$^{222}_{86}\text{Rn}$ 的半衰期 $T_{1/2} = 3.825$ 天

半衰期长表示放射性核素衰变得慢，半衰期短表示该放射性核素衰变得快。

二、衰变公式和衰变常数

从半衰期的实验可以看出，放射性核素的每一个核衰变并不是同时发生，而是有先有后。放射性核素在单位时间内衰变的原子核数 $-\Delta N/\Delta t$ 与该时间尚未衰变的总原子核数

N 成正比, 即

$$-\frac{\Delta N}{\Delta t} \propto N$$

如果写成等式, 则为

$$-\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N \quad (1-6)$$

式中 λ 是个比例常数, 称为衰变常数。 λ 的物理意义是: 单位时间内每一个原子核衰变的几率。即在单位时间内衰变的原子核数是原有原子核数的几分之几。因此, 衰变常数 λ 表示各种不同放射性核素的相对衰变速度, 和半衰期一样, 它也是反映各种不同放射性核衰变的特征量。不同的放射性核素有不同衰变常数 λ 。例如:

$${}_{88}^{226}\text{Ra} \quad \lambda_{\text{Ra}} = 1.359 \times 10^{-11} \text{s}^{-1}$$

$${}_{88}^{222}\text{Rn} \quad \lambda_{\text{Rn}} = 2.0974 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$$

说明 ${}^{222}\text{Rn}$ 比 ${}^{226}\text{Ra}$ 衰变得快。

如果将公式(1-6)进一步计算, 便得出

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-7)$$

式中:

N_0 ——时间 $t=0$ 时的放射性核素的原子核数;

N ——时间 t 时未衰变的原子核数 (剩余的原子核数);

λ ——该核素的衰变常数;

e ——常数 ($e \approx 2.718$);

t ——时间。

由这个公式可求出在任何时间未衰变的原子核数。

三、半衰期 $T_{1/2}$ 与衰变常数 λ 的关系

半衰期 $T_{1/2}$ 是任何放射性核素的原子核素因衰变而减

少到原来的一半所需要的时间，即

$$N = \frac{1}{2} N_0 \quad t = T_{1/2}$$

代入公式(1-7)则得出

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda t}$$

两边取对数，则

$$\lambda T_{1/2} = \ln 2$$

即

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1-8)$$

这就是它们的关系。

在实际工作中，有时还会遇到平均寿命这个概念。通常用 $\bar{T}$ 表示。它的数值为 λ 的倒数。

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{0.693} \quad (1-9)$$

它的物理意义是，放射性核素的原子核在衰变前平均生存的时间。

四、放射性核素的活度及其单位

公式(1-7)只说明了放射性核素的原子核数目 N 随时间发生改变的规律。在实际应用中，对未衰变的放射性核素的原子数目并不感兴趣。因此，要引入新的物理量——活度。活度的意义是在时间间隔 dt 内发生自发核转变的核数目 dN 与 dt 的比值，用 A 表示，即：

$$A = \frac{dN}{dt}$$

将公式(1-7)代入上式，可得

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

令 $A_0 = \lambda N_0$, 则

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1-10)$$

显然公式(1-10)与(1-7)具有相同的形式。这两个公式都是说明核衰变规律的基本公式。

通常用探测器来测量射线的多少, 探测器在单位时间内的读数与活度成正比。

放射性活度的专用单位是 Becquerel, 通常用符号 Bq 来表示。放射性核素的核每秒钟衰变一次, 则该放射性核素的放射性活度为 1Bq。

应当指出, 活度相同的两种放射源, 只表示这两种放射源在每秒钟内所发生的核衰变数目相同, 并不表示所放出的射线数目相同。例如 ^{60}Co 衰变时, 放出一个 β 粒子和两个 γ 射线; 而 ^{32}P 衰变时, 只放射出 β 粒子。可见 ^{60}Co 和 ^{32}P 的放射性活度相同时, 它们所放射出的射线数目并不相同, ^{60}Co 比 ^{32}P 多放射出两个 γ 射线。

另外, 还需介绍一下“比活度”的概念。这个概念在环境放射性管理和监测中经常应用。其意义是: 单位质量或体积内所含有的放射性活度。单位是 $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1} (\text{l}^{-1})$ 。

五、放射性衰变系

放射性核素发生衰变后, 有的子体是稳定性核素。也有子体不是稳定核素, 它还继续衰变, 直到最后成为稳定性核素为止。这样最初由一个母体核素, 经过衰变产生一系列子体核素, 就成为一个放射系。

天然放射系有三个: 铀镭系、钍系和锕系。这些核素