



中华人民共和国国家标准

GB/T 16140—2018
代替 GB/T 16140—1995

水中放射性核素的 γ 能谱分析方法

Determination of radionuclides in water by gamma spectrometry

2018-02-06 发布

2018-09-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布



目 次

前言	I
1 范围	1
2 γ 能谱仪	1
3 γ 能谱仪的刻度	2
4 样品制备	4
5 测量	5
6 γ 能谱分析方法	5
7 结果表述	7
附录 A (资料性附录) 适于作能量刻度的 γ 放射性核素	8
附录 B (规范性附录) γ 能谱分析的探测下限	9
附录 C (资料性附录) 水中可能存在的 γ 放射性核素	10

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准代替 GB/T 16140—1995《水中放射性核素的 γ 能谱分析方法》。

本标准与 GB/T 16140—1995 相比,主要技术变化如下:

- 修改了高纯锗 γ 能谱仪的性能指标要求;
- 修改了活度浓度的计算公式和不确定度的计算方法;
- 修改了能量刻度源和效率刻度源的有关参数和要求;
- 修改了附录 C 中的主要核素及其参数数据。

本标准由中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会提出并归口。

本标准起草单位:中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所、上海市疾病预防控制中心、江苏省疾病预防控制中心。

本标准主要起草人:徐翠华、赵力、高林峰、杨小勇、任天山、李文红、周强。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为:

- GB/T 16140—1995。

水中放射性核素的 γ 能谱分析方法

1 范围

本标准规定了使用高纯锗(HPGe) γ 能谱仪测定水中 γ 放射性核素的方法。

本标准适用于在实验室测量水样品中 γ 射线能量大于40 keV且活度不低于0.4 Bq的放射性核素。

2 γ 能谱仪

2.1 γ 能谱仪的组成

本标准推荐的谱仪系统主要包括探测器、多道脉冲幅度分析器(简称多道分析器,MCA)、数据存储器、永久数据存储设备、屏蔽室和其他电子学设备。

2.2 探测器

高纯锗(HPGe)探测器的灵敏体积一般在 $50\text{ cm}^3\sim 150\text{ cm}^3$ 之间,对 ^{60}Co 1 332.5 keV γ 射线的能量分辨力(FWHM)应不大于2.5 keV,低噪声电荷灵敏前置放大器应和探测器组装在一起。

2.3 屏蔽室

探测器应置于厚度至少10 cm铅当量的铅或钢铁作屏蔽物质的外辐射屏蔽室中,屏蔽室内壁距探测器灵敏体积表面的距离至少13 cm。当铅制屏蔽室内壁与探测器的距离小于25 cm时,在屏蔽室的内表面应有原子序数逐渐递减的多层内屏蔽。内屏蔽从外向里依次衬有厚度不小于1.6 mm的镉或锡、不小于0.4 mm的铜以及厚度为2 mm~3 mm的有机玻璃,以减少不同材料产生的特征X射线的影响。

2.4 高压电源

高压电源在0 V~5 000 V、 $1\text{ }\mu\text{A}\sim 100\text{ }\mu\text{A}$ 范围内连续可调。稳定度优于0.1%,纹波电压不大于0.01%。

2.5 谱放大器

应与前置放大器和多道分析器相匹配。

2.6 数据获取和存储设备

2.6.1 多道分析器

利用单独的多道分析器或计算机软件控制下的模-数转换器(ADC)执行 γ 能谱仪的数据获取功能。对于高分辨 γ 能谱仪,多道分析器不少于8 192道。

2.6.2 数据存储器

数据存储器要有足够的数据存储和将谱数据的任一部分向一个或多个内、外终端设备(I/O)传输的能力,这些终端设备可以是打印机、硬盘、移动存储设备、USB、串或并接计算机接口。

2.7 数据处理系统

应配有用于 γ 能谱分析的各种常规程序,具备能量刻度、效率刻度、谱光滑、寻峰、峰面积计算和重峰分析等功能。

2.8 测量容器

根据测量样品的体积和探测器的形状、大小选择不同形状和尺寸的测量容器。容器应由天然放射性核素含量低、无人工放射性污染的材料制成。

3 γ 能谱仪的刻度

3.1 刻度前的准备

3.1.1 γ 能谱仪的调试

按照使用说明书的要求安装和调试整个 γ 能谱仪系统,使之处于正常工作状态。MCA 应调节到能覆盖所关心的能区。对于能区为 40 keV~2 000 keV 的情况,应调节系统增益使 ^{137}Cs 661.6 keV 光峰处于全谱的近约三分之一处。

3.1.2 样品源与刻度源容器要求

准备测量几何条件能准确重复的样品源和刻度源容器。容器应具有良好的密封性,以保证不会污染工作环境和人员。样品源容器和刻度源容器应相同。

3.1.3 用于能量刻度的系列标准源

3.1.3.1 刻度源的能量范围应覆盖所需能量区间(通常为 40 keV~2 000 keV),适于作能量刻度的发射单能或多能 γ 射线的核素可参见附录 A。

3.1.3.2 用于能量刻度的刻度源,其外表面应无放射性污染,其活度应使特征峰的每秒计数达到 100。

3.1.4 制备或购置用于效率刻度的系列刻度源(或标准源)

3.1.4.1 效率刻度源的核素选取取决于拟采用的 γ 能谱分析方法。当采用效率曲线法求解样品中核素的活度时,可采用附录 A 中所列的发射单能或多能 γ 射线的核素;当采用相对比较法时,刻度源的核素要与样品中的核素一一对应。

3.1.4.2 效率刻度源的体积、形状、基质等主要物理化学特性以及容器应与待测样品相同。

3.1.4.3 制备效率刻度源的标准溶液应由国家法定计量部门认定或可溯源到国家法定计量部门的计量基准。标准溶液活度的标准偏差绝对值应 $\leq 3.5\%$,刻度源的活度在 40 Bq~10 000 Bq 之间。

3.1.4.4 效率刻度源由模拟基质加特定核素的标准溶液制备而成,它应满足核素含量准确、稳定,容器密封等要求。本标准推荐以二次蒸馏水作为水样品模拟基质并采取适当措施以减少壁吸附。配置好的体刻度源的不均匀性正负偏差应 $\leq 2\%$ 。

3.2 能量刻度

3.2.1 高纯锗 γ 能谱仪的能量-道址转换系数,对能区为 40 keV~2 000 keV,8 192 道的谱仪可调到每道约 0.25 keV。

3.2.2 能量刻度至少应包括 4 个能量均匀分布在所需刻度能区的刻度点。将特征 γ 射线能量和相应的全能峰峰位道址在直角坐标纸上作图或对数据作最小二乘法直线或抛物线拟合,并给出能量刻度系数和表达式。高纯锗 γ 能谱仪的非线性不应超过 0.5%。

3.2.3 能量刻度完成以后,应经常注意能量-道址关系的变化。如果斜率和截距的变化不超过 0.5%,则

用已有的刻度数据,否则应重新刻度。

3.3 效率刻度

3.3.1 效率刻度测量(包括刻度源能谱测量和模拟基体本底能谱测量)时的谱仪状态应与能量刻度时相同。刻度源(包括本底测量时的容器)与探测器的相对几何位置应是严格可重复的。

3.3.2 根据刻度的精度要求确定刻度的全能峰计数,一般要求每个特征峰全能峰的累积计数不应小于10 000。在较短半衰期核素进行长时间测量时,如果测量活时间大于核素半衰期的5%,则应对计数作衰变校正。

3.3.3 γ 射线全吸收峰探测效率 ϵ 用式(1)计算:

$$\epsilon = \frac{R_{\text{net}}}{R_{\gamma}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

ϵ —— γ 射线全吸收峰探测效率;

R_{net} ——所考虑的全能峰的净计数率,单位为计数每秒(计数/s);

R_{γ} ——已作过衰变校正的该能量 γ 射线的发射率,单位为光子数每秒(光子数/s),且有式(2)。

$$R_{\gamma} = A \times I \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

A ——核素每秒的衰变数(放射性活度),单位为贝可(Bq);

I ——该能量 γ 射线的发射概率。

3.3.4 以 γ 射线能量为横坐标, γ 射线全吸收峰探测效率为纵坐标,用计算机软件对实验数据作对数最小二乘法拟合求效率曲线,在40 keV~2 000 keV范围内效率曲线可用式(3)表示:

$$\ln(\epsilon) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i (\ln E_{\gamma})^i \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

ϵ —— γ 射线全吸收峰探测效率;

E_{γ} ——相应的 γ 射线能量,单位为千电子伏(keV);

a_i ——拟合常数。

高纯锗(HPGe) γ 能谱仪的典型效率曲线如图1所示。

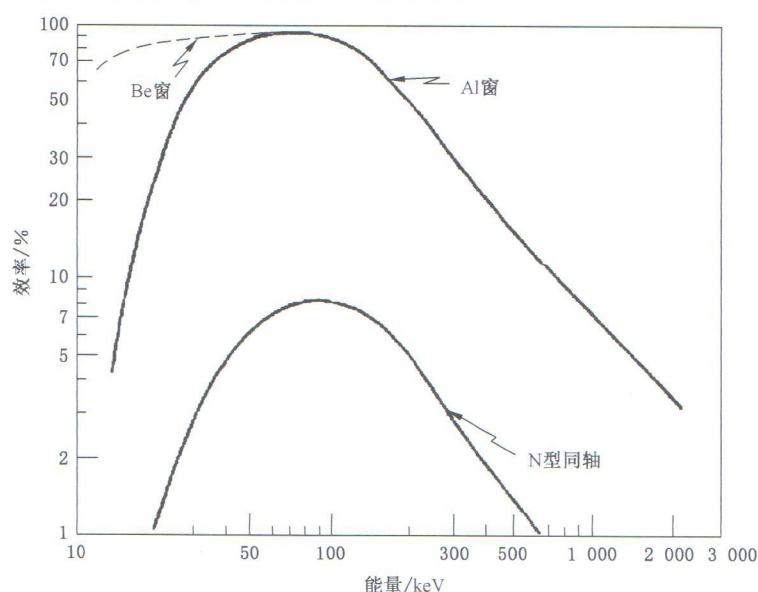


图1 高纯锗 γ 能谱仪的一组典型效率曲线

3.3.5 γ 射线全吸收峰探测效率确定以后,如果探测器的分辨力、测量的几何条件和系统配置等没有变化,则不必再刻度。

4 样品制备

4.1 一次测量所需水样的量

一次测量所需水样的量 V_{LLD} 由式(4)计算:

$$V_{LLD} = \frac{LLD}{AC \cdot r} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

V_{LLD} ——一次测量所需用满足“探测下限”的水量,单位为升(L);

LLD —— γ 能谱系统的探测下限(见附录 B),单位为贝可(Bq);

AC ——样品中核素的预计活度浓度,单位为贝可每升(Bq/L);

r ——预处理过程中核素回收率。

如果要求作 N 个平行样,需要的总水量为 $N \cdot V_{LLD}$ 升。

4.2 水样的直接测量

当水样中的放射性核素活度浓度大于 1 Bq/L 时,可以直接量取体积大于 400 mL 的样品于测量容器内,密封待测,否则应进行必要的预处理。

4.3 水样品的预处理

4.3.1 淡水的预处理

4.3.1.1 河水、井水等淡水样品的制备可使用蒸发浓缩、离子交换、沉淀分离等方法。

4.3.1.2 淡水样品蒸发浓缩法的操作程序如下:

- 将所采样品转移至蒸发容器(如瓷蒸发皿或烧杯)中;
- 使用电炉或沙浴加热蒸发容器,在 70 ℃ 下蒸发,避免碘等易挥发元素在蒸发过程中的损失。当液体量减少一半时,加入剩余样品,继续浓缩但注意留出少量样品洗涤所用容器;
- 液体量很少时,将其转移至小瓷蒸发皿中浓缩。使用过的容器用少量蒸馏水或部分样品洗涤,并加入浓缩液中。遇到器壁上有悬浮物等吸附时,用淀帚仔细擦洗,洗涤合并入浓缩液;
- 将浓缩后的液体转移至测量容器,用 c) 的方法洗涤使用过的容器;
- 转移至测量容器后,如有继续浓缩的必要,可用红外灯加热,蒸发浓缩至 20 mL。在有悬浮物或析出物的情况下,沉淀后分离出水相和固相,这时应一直浓缩到水相几乎消失。塑料测量容器遇强热有时会变形,所以应注意灯和样品的距离不要太近;
- 冷却后盖上测量容器盖,注意密封(必要时使用粘合剂),即可用于测量。

4.3.2 海水的预处理

4.3.2.1 本标准推荐磷钼酸铵-二氧化锰吸附分离法。向酸性样品中加入磷钼酸铵,搅拌吸附钼,其滤液呈碱性后,加入二氧化锰粉末并搅拌,则锰、铁、钴、锌、铅、铋、钨、铀等元素的放射性核素被吸附。

4.3.2.2 试剂及仪器如下:

- 浓盐酸;
- 浓氨水;
- 磷钼酸铵;

- d) MnO_2 (100 目~200 目);
- e) 搅拌器;
- f) 过滤装置(和测量盘直径大体相同)和布氏漏斗;
- g) 抽滤装置;
- h) pH 计或 pH 试纸。

4.3.2.3 海水样品的操作程序如下:

- a) 每升样品中加入浓盐酸 1 mL,使样品呈酸性;
- b) 把样品转移到搪瓷或塑料容器或烧杯中。盛过样品液体的容器用 3 mol/L 盐酸(以 20 mL 为宜)洗涤,洗液并入样品溶液中;
- c) 以 1 L 样品中加入磷钼酸铵粉末 0.5 g 的比例加入磷钼酸铵搅动 30 min,放置过夜;
- d) 上清液用倾斜法,转移至其他容器中,沉淀用装有滤纸的漏斗或布氏漏斗分离,用 0.1 mol/L 盐酸溶液洗涤。用抽滤装置尽可能去除沉淀中的水分,滤液、洗涤液均加入到溶液中去;
- e) 向分离出铯的上清液上加氨水,pH 值调节到 8.0~8.5;
- f) 以 1 L 溶液加入 MnO_2 粉末 2 g 的比例加入 MnO_2 搅动 2 h,放置过夜;
- g) 上清液用倾斜法倾出倒掉。沉淀用装有滤纸的漏斗或布氏漏斗过滤,用少量水洗沉淀。使用抽滤装置除去沉淀中的水分。将载有 MnO_2 的滤纸放到 d) 中得到的磷钼酸铵沉淀之上转移到测量容器中;
- h) 测量容器的盖盖好密封后,即可测量。

5 测量

- 5.1 测量(本底测量和样品测量)时相对探测器的几何条件和谱仪状态应与刻度时完全一致。
- 5.2 由于电子仪器的限制,对全谱每秒计数率超过 1 000 的测量应采取适当措施予以避免。
- 5.3 应测量模拟基基本底谱和空样品盒本底谱。
- 5.4 测量时间应按要求的计数误差控制。

6 γ 能谱分析方法

6.1 全能峰面积确定

根据所用 γ 能谱系统的硬、软件的配置情况选用相应的解谱方法确定谱中各特征峰的峰位和全能峰面积。确定样品谱、刻度源谱中各特征峰的面积可用函数拟合法、逐道最小二乘拟合法和全能峰面积法。求刻度源全能峰净面积时,应将刻度源全能峰计数减去相应模拟基基本底计数;求样品谱中全能峰净面积时,应扣除相应空样品盒本底计数。

6.2 根据 γ 射线全吸收峰探测效率求核素活度浓度

6.2.1 适用于没有待测核素效率刻度源可以利用的情况。

6.2.2 在重峰干扰不严重的情况下,根据效率曲线或效率曲线的拟合函数求出各相应能量 γ 射线的 γ 射线全吸收峰探测效率值,然后用式(5)计算水样中核素的活度浓度:

$$AC = \frac{R_{\text{net}}}{\epsilon \times V \times I \times DF} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

AC——水样中核素的活度浓度,单位为贝可每升(Bq/L);

R_{net} ——所考虑的全能峰的净计数率,单位为计数每秒(计数/s);

- ϵ —— γ 射线全吸收峰探测效率；
 V ——被测样品的体积，单位为升(L)；
 I ——该能量 γ 射线的发射概率；
 DF ——放射性核素衰变校正因子。

6.2.3 核素活度浓度的合成标准不确定度 $u_c(AC)$ 计算见式(6)：

$$u_c(AC) = \sqrt{\frac{u^2(R_{\text{net}})}{\epsilon^2 \times V^2 \times I^2 \times DF^2} + AC^2 \times \left[\frac{u^2(\epsilon)}{\epsilon^2} + \frac{u^2(V)}{V^2} + \frac{u^2(I)}{I^2} + \frac{u^2(DF)}{DF^2} \right]} \quad \dots\dots (6)$$

式中：

$u(R_{\text{net}})$ ——全能峰净计数率的标准不确定度；

$\frac{u(\epsilon)}{\epsilon}$ ——探测效率的相对标准不确定度；

$\frac{u(V)}{V}$ ——被测样品体积的相对标准不确定度；

$\frac{u(I)}{I}$ ——发射概率的相对标准不确定度；

$\frac{u(DF)}{DF}$ ——放射性核素衰变校正因子的相对标准不确定度。

6.2.4 净计数率 R_{net} 和计数不确定度 $u(R_{\text{net}})$ 的计算见式(7)、式(8)：

$$R_{\text{net}} = R_s - \left(R_b \times \frac{n_s}{n_b} \right) = \frac{C_s - (C_b \times n_s / n_b)}{t_s} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$u(R_{\text{net}}) = \frac{\sqrt{C_s + (C_b \times n_s^2 / n_b^2)}}{t_s} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中：

R_s ——全能峰净计数率，单位为计数每秒(计数/s)；

R_b ——本底计数率，单位为计数每秒(计数/s)；

C_s ——全能峰计数；

C_b ——本底计数；

n_s ——全能峰的道数；

n_b ——本底扣除的道数；

t_s ——样品源测量时间，单位为秒(s)。

6.3 相对比较法求解核素活度浓度

6.3.1 适用于有待测核素效率刻度源的情况。

6.3.2 在获取了效率刻度源和样品的 γ 能谱并求解出其中各特征光峰的全能峰面积之后，按式(9)计算各个刻度源的刻度系数 K_{ji} ：

$$K_{ji} = \frac{S_j}{A_{jis}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中：

K_{ji} ——各个刻度源的刻度系数；

S_j ——第 j 种核素效率刻度源的活度，单位为贝可(Bq)；

A_{jis} ——第 j 种核素效率刻度源的第 i 个特征峰的计数率，单位为计数每秒(计数/s)。

6.3.3 被测样品中第 j 种核素的活度浓度可用式(10)计算：

$$AC_j = \frac{K_{ji}(A_{ji} - A_{jih})}{V \cdot DF_j} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中:

A_{ji} ——样品谱中第 j 种核素的第 i 个特征峰的计数率,单位为计数每秒(计数/s);

A_{jih} ——本底谱中第 j 种核素的第 i 个特征峰的计数率,单位为计数每秒(计数/s);

V ——被测样品的体积,单位为升(L);

DF_j ——放射性核素 j 的衰变校正因子。

6.3.4 样品中核素活度浓度的总不确定度的主要来源是计数统计误差、标准源误差、样品体积误差、衰变校正误差等,合成不确定度可根据误差传递原理由式(6)进行误差合成求出。

6.4 干扰和影响因素

6.4.1 当两种或两种以上核素发射的 γ 射线能量相近,全能峰重叠或不能完全分开时,彼此形成干扰;在核素的活度相差很大或能量高的核素在活度上占优势时,对活度较小、能量较低的核素的分析也带来干扰。数据处理时应尽量避免利用重峰进行计算以减少由此产生的附加分析不确定度。

6.4.2 复杂 γ 能谱中,曲线基底和斜坡基底对位于其上的全能峰分析构成干扰;只要有其他替代全能峰,就不应利用这类全能峰。

6.4.3 级联 γ 射线在探测器中产生级联加和现象。增加样品源(或刻度源)到探测器的距离,可减少级联加和的影响。

6.4.4 应将全谱每秒计数率限制到小于 1 000,使随机符合相加损失降到 1% 以下。

6.4.5 应使效率刻度源的密度与被分析样品的密度相同或尽量接近,以避免或减少密度差异的影响。

6.5 核素识别

根据 γ 能谱中能峰的能量、各能峰的相对关系、核素的特征能量和其他参数以及被测样品的属性等识别核素。水中可能存在的主要核素的 γ 射线能量、半衰期和发射概率列在附录 C 中。

7 结果表述

7.1 常规测量结果报告可根据要求报告样品中超过探测下限的所有核素的以 Bq/L 为单位的活度浓度及计数不确定度 $[AC \pm u(R_{\text{net}})]$,对于低于探测下限的核素其活度浓度以“小于 LLD”表示。

7.2 γ 能谱分析的探测下限计算见附录 B。

附 录 A
(资料性附录)

适于作能量刻度的 γ 放射性核素

适于作能量刻度的发射单能或多能 γ 射线的核素见表 A.1。

表 A.1 适于作能量刻度的发射单能或多能 γ 射线的核素

核素	半衰期	主要 γ 射线能量 keV	γ 射线发射概率 %
^{210}Pb	22.3a	46.5	4.25
^{241}Am	432.6a	59.5	35.78
^{109}Cd	461.4d	88.0	3.626
^{57}Co	271.8d	122.1	85.51
^{141}Ce	32.5d	145.4	48.29
^{51}Cr	27.7d	320.1	9.87
^{137}Cs	30.018a	661.7	84.99
^{54}Mn	312.13d	834.8	99.97
^{22}Na	2.60a	1 274.5	99.94
^{88}Y	106.63d	898.0	93.90
		1 836.1	99.32
^{60}Co	5.271a	1 173.2	99.85
		1 332.5	99.98
^{152}Eu	13.522a	121.8	28.41
		344.3	26.59
		964.1	14.50
		1 112.1	13.41
		1 408.0	20.85

附 录 B
(规范性附录)
γ 能谱分析的探测下限

B.1 γ 能谱的探测下限(lower limit of detection,或 LLD)是在给定置信度情况下该系统可以探测到的最低活度。

B.2 探测下限可以近似表示为式(B.1)：

$$LLD \approx (K_{\alpha} + K_{\beta})S_0 \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

- K_{α} ——与预选的错误判断放射性存在的风险几率 α 相应的标准正态变量的上限百分位数值；
- K_{β} ——与探测放射性存在的预选置信度 $(1-\beta)$ 相应的值；
- S_0 ——样品净放射性的标准偏差,单位为贝可(Bq)。

如果 α 和 β 值在同一水平上,则 $K_{\alpha}=K_{\beta}=K$,探测下限近似表示为式(B.2)：

$$LLD \approx 2KS_0 \dots\dots\dots (B.2)$$

如果总样品放射性与本底接近,则可进一步简化,见式(B.3)：

$$LLD \approx 2\sqrt{2}KS_b = 2.83K/t_b\sqrt{N_b} \dots\dots\dots (B.3)$$

式中：

- S_b ——本底计数率的标准偏差,单位为计数每秒(计数/s)；
- t_b ——本底谱测量时间,单位为秒(s)；
- N_b ——本底谱中相应于某一全能峰的本底计数。

对于不同的 α 和 β 值, K 值如表 B.1 所列。

表 B.1 对应于不同 α 和 $1-\beta$ 值的 K 值

α	$1-\beta$	K	$2\sqrt{2}K$
0.01	0.99	2.327	6.59
0.02	0.98	2.054	5.81
0.05	0.95	1.645	4.66
0.10	0.90	1.282	3.63
0.20	0.80	0.842	2.38
0.50	0.50	0	0

B.3 式(B.3)中探测下限是以计数率为单位。考虑到核素特性、探测效率、用样量,可计算以活度浓度表示的探测下限,见式(B.4)：

$$LLD \cong \frac{2KS_0}{\eta \cdot r \cdot V} \dots\dots\dots (B.4)$$

式中：

- LLD ——探测下限,单位为贝可每升(Bq/L)；
- η ——所考虑核素的 γ 射线全吸收峰绝对效率；
- r ——所考虑核素的预处理回收率,％；
- V ——所考虑核素的用样量,单位为升(L)。

附 录 C
(资料性附录)

水中可能存在的 γ 放射性核素

水中可能存在的 γ 放射性核素见表 C.1。

表 C.1 水中可能存在的 γ 放射性核素

γ -能量 keV	核素	半衰期 ^a	发射概率 ^b %
46.5	²¹⁰ Pb	22.3a	4.25
59.5	²⁴¹ Am	432.6a	35.78
59.5	²³⁷ U	6.75d	34.5
63.3	²³⁴ Th	L	4.8
80.1	¹⁴⁴ Ce	284.893d	1.36
81.0	¹³³ Ba	10.540a	32.9
81.0	¹³³ Xe	5.247d	38
86.5	¹⁵⁵ Eu	4.753a	30.7
88.0	¹⁰⁹ Cd	461.4d	3.626
91.1	¹⁴⁷ Nd	10.98d	27.9
92.4	²³⁴ Th	L	2.8
92.8	²³⁴ Th	L	2.8
105.3	¹⁵⁵ Eu	4.753a	21.1
106.1	²³⁹ Np	2.356 5d	27.2
121.8	¹⁵² Eu	13.522a	28.41
122.1	⁵⁷ Co	271.80d	85.51
123.1	¹⁵⁴ Eu	8.601a	40.4
127.2	¹⁰¹ Rh	3.3a	68
133.5	¹⁴⁴ Ce	284.893d	11.09
136.0	⁷⁵ Se	119.79d	58.2
136.5	⁵⁷ Co	271.80d	10.71
140.5	⁹⁹ Mo	2.747 9d	89.6
140.5	^{99m} Tc	6.006 7h	88.5
143.8	²³⁵ U	703.8E6a	10.96
145.4	¹⁴¹ Ce	32.508d	48.29
151.2	^{85m} Kr	4.480h	75
162.7	¹⁴⁰ Ba	12.753d	6.26
163.9	^{131m} Xe	11.930d	1.98

表 C.1 (续)

γ -能量 keV	核素	半衰期 ^a	发射概率 ^b %
165.9	¹³⁹ Ce	137.641d	79.9
181.1	⁹⁹ Mo	2.747 9d	6.01
185.7	²³⁵ U	703.8E6a	57.2
186.2	²²⁶ Ra	1 600a	3.533
192.4	⁵⁹ Fe	44.495d	2.918
196.3	⁸⁸ Kr	2.84h	26
198.0	¹⁰¹ Rh	3.3a	73
228.2	¹³² Te	3.204d	88
233.2	^{133m} Xe	2.19d	10
238.6	²¹² Pb	L	43.6
241.0	²⁰⁴ Ra	L	4.12
249.8	¹³⁵ Xe	9.14h	90
256.2	²²⁷ Th	L	6.8
264.7	⁷⁵ Se	119.79d	58.9
277.4	²⁰⁸ Tl	L	2.4
279.2	²⁰⁴ Hg	46.594d	81.48
279.5	⁷⁵ Se	119.79d	24.99
293.3	¹⁴³ Ce	33.039h	42.8
295.2	²¹⁴ Pb	L	19.3
300.1	²¹² Pb	L	3.18
302.9	¹³³ Ba	10.540a	18.34
304.9	¹⁴⁰ Ba	12.753d	4.3
304.9	^{85m} Kr	4.480h	14
320.1	⁵¹ Cr	27.703d	9.87
325.2	¹⁰¹ Rh	3.3a	11.8
328.8	¹⁴⁰ La	1.678 50d	20.8
333.0	¹⁹⁶ Au	6.183d	22.9
338.3	²²⁸ Ac	L	11.3
340.6	¹³⁶ Cs	13.16d	42.2
344.3	¹⁵² Eu	13.522a	26.59
351.9	²¹⁴ Pb	L	37.6
355.7	¹⁹⁶ Au	6.183d	87
356.0	¹³³ Ba	10.540a	62.05

表 C.1 (续)

γ -能量 keV	核素	半衰期 ^a	发射概率 ^b %
364.5	¹³¹ I	8.023 3d	81.2
391.7	¹¹³ Sn	115.09d	64.97
402.6	⁸⁷ Kr	76.3m	50
411.8	¹⁹⁸ Au	2.694 4d	95.54
427.9	¹²⁵ Sb	2.758 55a	29.2
463.4	¹²⁵ Sb	2.758 55a	10.36
477.6	⁷ Be	53.282d	10.52
487.0	¹⁴⁰ La	1.678 50d	46.1
497.1	¹⁰³ Ru	39.254d	91
510.7	²⁰⁸ Tl	L	9
511.0	²² Na	2.602 7a	179.8
514.0	⁸⁵ Kr	10.752a	0.435
514.0	⁸⁵ Sr	64.850d	98.5
529.6	⁸³ Br	2.40h	1.2
531.0	¹⁴⁷ Nd	10.98d	13.1
537.3	¹⁴⁰ Ba	12.753d	24.39
554.3	⁸² Br	35.30h	70.8
556.6	¹⁰² Rh	207.0d	2
569.3	¹³⁴ Cs	2.064 8a	15.38
569.7	²⁰⁷ Bi	32.9a	97.76
583.2	²⁰⁸ Tl	L	30
600.6	¹²⁵ Sb	2.758 55a	17.55
602.7	¹²⁴ Sb	60.20d	98.3
604.7	¹³⁴ Cs	2.064 8a	97.62
609.3	²¹⁴ Bi	L	46.1
610.3	¹⁰³ Ru	39.254d	5.76
614.4	^{108m} Ag	418a	89.8
619.1	⁸² Br	35.30h	43.4
635.9	¹²⁵ Sb	2.758 55a	11.19
637.0	¹³¹ I	8.023 3d	7.26
657.8	^{110m} Ag	249.78d	94.38
661.7	¹³⁷ Cs	30.018a	84.99
667.7	¹³² I	2.295h	98.7

表 C.1 (续)

γ -能量 keV	核素	半衰期 ^a	发射概率 ^b %
722.9	^{108m} Ag	418a	90.8
723.3	¹⁵⁴ Eu	8.601a	20.05
727.3	²¹² Bi	L	6.74
739.5	⁹⁹ Mo	2.747 9d	12.12
756.7	⁹⁵ Zr	64.032d	54.38
765.8	⁹⁵ Nb	34.991d	99.808
772.7	¹³² I	2.295h	75.6
773.7	^{131m} Te	30.0h	38.9
776.5	⁸² Br	35.30h	83.5
777.9	⁹⁹ Mo	2.747 9d	4.28
795.9	¹³⁴ Cs	2.064 8a	85.53
810.8	⁵⁸ Co	70.83d	99.45
815.8	¹⁴⁰ La	1.678 50d	23.72
818.5	¹³⁶ Cs	13.16d	99.7
834.8	⁵⁴ Mn	312.13d	99.974 6
845.5	⁸⁷ Kr	76.3m	7.3
852.2	^{131m} Te	30.0h	21
860.6	²⁰⁸ Tl	L	4.7
873.2	¹⁵⁴ Eu	8.601a	12.17
884.7	^{110m} Ag	249.78d	74
889.3	⁴⁶ Sc	83.788d	99.983 3
898.0	⁸⁸ Y	106.626d	93.9
911.2	²²⁸ Ac	L	26.6
937.5	^{110m} Ag	249.78d	34.51
964.1	¹⁵² Eu	13.522a	14.5
969.0	²²⁸ Ac	L	16.2
1 001.0	^{234m} Pa	L	0.837
1 004.7	¹⁵⁴ Eu	8.601a	17.86
1 048.1	¹³⁶ Cs	13.16d	80
1 063.7	²⁰⁷ Bi	32.9a	74.58
1 099.3	⁵⁹ Fe	44.495d	56.59
1 112.1	¹⁵² Eu	13.522a	13.41
1 115.5	⁶⁵ Zn	244.06d	50.6

表 C.1 (续)

γ -能量 keV	核素	半衰期 ^a	发射概率 ^b %
1 120.3	²¹⁴ Bi	L	15.1
1 120.5	⁴⁶ Sc	83.788d	99.986
1 121.3	¹⁸² Ta	114,43d	34.9
1 131.5	¹³⁵ I	6.57h	22.6
1 173.2	⁶⁰ Co	5,271a	99.85
1 189.1	¹⁸² Ta	114,43d	16.2
1 216.1	⁷⁶ As	1,077 8d	3.42
1 260.4	¹³⁵ I	6.57h	28.7
1 274.4	¹⁵⁴ Eu	8,601a	34.9
1 274.5	²² Na	2,602 7a	99.94
1 291.6	⁵⁹ Fe	44,495d	43.21
1 293.6	⁴¹ Ar	1,823 7h	99.1
1 332.5	⁶⁰ Co	5,271a	99.982 6
1 368.6	²⁴ Na	14,957 4h	99,993 5
1 384.3	^{110m} Ag	249,78d	24.7
1 408.0	¹⁵² Eu	13,522a	20.85
1 460.8	⁴⁰ K	1,265E9a	10.66
1 505.0	^{110m} Ag	249,78d	13.16
1 596.2	¹⁴⁰ La	1,678 50d	95.4
1 678.0	¹³⁵ I	6.57h	9.6
1 691.0	¹²⁴ Sb	60.20d	47.79
1 764.5	²¹⁴ Bi	L	15.4
1 836.1	⁸⁸ Y	106.626d	99.32
^a 半衰期为“L”者是天然衰变系列长寿命母体核素的衰变子体。			
^b 发射概率定义为核素每次衰变发射该能量 γ 光子的个数。			