

中华人民共和国国家标准

GB/T 16145—2022

代替 GB/T 16145—2020, GB/T 16140—2018 等

环境及生物样品中放射性核素的 γ 能谱分析方法

Gamma-ray spectrometry method for the determination of radionuclides in
environmental and biological samples

2022-12-30 发布

2023-07-01 实施



国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 方法概要	2
5 测量系统	2
6 能量刻度	3
7 效率刻度	4
8 样品的准备与测量	5
9 γ 能谱分析	7
10 不确定度评定	8
11 结果报告	8
附录 A (资料性) 能量和效率刻度用的单能和多能核素	10
附录 B (资料性) 测量低活度样品用的典型样品盒示例	11
附录 C (资料性) 样品自吸收修正方法	13
附录 D (资料性) 级联辐射引起的符合相加修正	17
附录 E (资料性) 土壤、沉积物(底泥)样品采集、制备与测量	20
附录 F (资料性) 水样品采集、制备与测量	23
附录 G (资料性) 生物样品采集、制备与测量	26
附录 H (资料性) 空气样品采集、制备与测量	29
附录 I (资料性) 生物样品的干鲜比、灰鲜比和灰化时着火的临界温度范围	32
附录 J (资料性) 样品 γ 能谱分析方法中存在的可能干扰核素及 γ 射线	34
附录 K (资料性) γ 能谱分析中不确定度评定方法举例	37
附录 L (资料性) 探测限	40
参考文献	41

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替 GB/T 16145—2020《生物样品中放射性核素的 γ 能谱分析方法》、GB/T 16140—2018《水中放射性核素的 γ 能谱分析方法》、GB/T 11743—2013《土壤中放射性核素的 γ 能谱分析方法》。本文件以 GB/T 16145—2020 为主，整合了 GB/T 16140—2018、GB/T 11743—2013 的内容。与 GB/T 16145—2020 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

——增加了“环境样品”的术语和定义(见第3章)。

本文件做了下列编辑性改动：

——将标准名称改为《环境及生物样品中放射性核素的 γ 能谱分析方法》；

——增加了“土壤、沉积物(底泥)样品采集、制备与测量”(见附录 E)；

——增加了“水样品采集、制备与测量”(见附录 F)；

——增加了“空气样品采集、制备与测量”(见附录 H)。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中华人民共和国国家卫生健康委员会提出并归口。

本文件起草单位：中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所、山东省医学科学院放射医学研究所、广东省职业病防治院、江苏省疾病预防控制中心、深圳市职业病防治院、浙江省疾病预防控制中心。

本文件主要起草人：拓飞、杨宝路、许家昂、张庆、张京、周强、林涌钦、李则书、刘彦兵、杨小勇、宣志强。

本文件所代替文件的历次版本发布情况为：

——GB/T 16140, 1995 年首次发布, 2018 年第一次修订；

——GB/T 16145, 1995 年首次发布, 2020 年第一次修订；

——GB/T 11743, 1989 年首次发布, 2013 年第一次修订。

环境及生物样品中放射性核素的 γ 能谱分析方法

1 范围

本文件规定了用高纯锗(HPGe) γ 能谱仪分析环境及生物样品中 γ 放射性核素活度浓度的方法。

本文件适用于环境及生物样品中 γ 放射性核素活度浓度的测量,类似基质样品中 γ 放射性核素活度浓度的测量参照执行。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

环境样品 environmental sample

环境系统的基本环节,环境结构的基本单元。

注:本文件所指环境样品包括水、空气、土壤、岩石等。

3.2

生物样品 biological sample

根据生物放射性检测需要采集的、具有代表性的、作为检测样品的生物物质。

注:本文件所指生物样品包括粮食作物、果蔬、茶叶、牧草、牛奶、菌菇类、家畜、家禽、指示性野生动植物等陆生动植物,海洋或淡水中的鱼、虾、蟹、藻类等水生生物,以及人和动物的毛发、组织、血液和排泄物等。

3.3

能量刻度 energy calibration

确定 γ 能谱仪系统 γ 射线能量和道址间的对应关系的过程。

3.4

全能峰探测效率 total absorption detection efficiency

对于给定的测量条件和 γ 射线能量,探测到的全能峰内的净计数与同一时间间隔内辐射源发射的该能量的 γ 光子总数的比值。

3.5

效率刻度 efficiency calibration

在给定测量条件下,建立 γ 射线能量与其全能峰效率关系曲线,或者确定一些具体核素刻度系数。

3.6

放射性气溶胶 radioactive aerosol

固体或液体放射性微粒悬浮在空气或气体介质中形成的分散体系。

3.7

探测限 detection limit; DL

在给定的置信度下,谱仪可探测的最低活度。

3.8

实时间 real time

γ 能谱仪某一测量过程经过的时间。

3.9

死时间 dead time

γ 能谱仪某一测量过程中,探测器不能获得脉冲的时间。

3.10

活时间 live time

γ 能谱仪探测器能够接受脉冲的时间,等于实时间减去死时间。

4 方法概要

根据检测目的采集具有代表性的环境或生物样品,经物理或化学方法预处理制成具有一定体积或形状的测量样品,使用 γ 能谱仪获取待分析样品的特征 γ 射线全能峰,经能量刻度和效率刻度,对样品中放射性核素的种类和活度进行定性(特征峰位)和定量(特征峰面积)的分析,从而给出所分析放射性核素在样品中的活度浓度。

5 测量系统

5.1 γ 能谱仪系统

5.1.1 γ 能谱仪应包括探测器、前置放大器、主放大器、脉冲幅度分析器、高压电源、谱数据分析处理系统等部件。

5.1.2 对 ^{60}Co 1 332.5 keV γ 射线的能量分辨力(FWHM)应小于2.5 keV。脉冲幅度分析器应不小于4 096道。

5.1.3 一般选用放射性本底低的铅或钢铁等金属作屏蔽物质,屏蔽室壁厚不小于10 cm铅当量,屏蔽室主体内衬一定厚度的镭、铜或锡以及有机玻璃。屏蔽室形状可为方形或圆柱形,其内腔容积应满足样品测量要求,屏蔽室应有便于取、放样品的门或窗。

5.2 谱分析软件

谱分析软件应具有数据获取、自动寻峰、峰面积分析、能量刻度、效率刻度及核素定性、定量分析功能。配备无源效率刻度软件。

5.3 标准源

适用于 γ 能谱仪能量和效率刻度用的含有特定放射性核素的标准源,其所用核素通常是 ^{210}Pb 、 ^{241}Am 、 ^{109}Cd 、 ^{57}Co 、 ^{141}Ce 、 ^{51}Cr 、 ^{137}Cs 、 ^{54}Mn 、 ^{22}Na 、 ^{88}Y 、 ^{60}Co 、 ^{152}Eu 、 ^{40}K 等。标准源中各核素活度扩展不确定度均应不超过5%($k=2$)。适用于能量和效率刻度的单能和多能核素及其主要参数见附录A。在进行能量刻度、效率刻度和测量时需注意能量、发射分支比及半衰期参数的来源统一。

5.4 检验源

检验源用于仪器可操作性检查,以及用于执行测试以验证、评估环境因素对仪器稳定性的影响。可以使用具有适当几何形状的长寿命 γ 放射性核素(如 ^{137}Cs 、 ^{133}Ba 、 ^{40}K)的固体密封源。

5.5 样品盒

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样品盒。样品盒应由天然放射性核素含量低、无人工放射性核素污染的材料制成。附录 B 给出了适合测量低活度样品用的两种常用典型样品盒示例。

6 能量刻度

6.1 标准源要求

标准源中放射性核素所发射的 γ 射线的能量宜尽可能均匀分布在所需刻度的能区(通常为 40 keV~2 000 keV),且最少需要 4 个能量点。

6.2 能区范围与道址

刻度的能区范围(脉冲幅度分析器满量程)可通过调节系统的增益来完成。如果所分析的能区为 40 keV~2 000 keV,应调节系统增益,使¹³⁷Cs 的 661.66 keV γ 射线的全能峰峰位大约在多道分析器总道数的 1/3 处。若多道分析器取 8 192 道,则该峰位约在 3 000 道附近。

6.3 刻度谱的获取

γ 能谱仪系统调至合适的工作状态并待稳定后,将能量刻度标准源置于探测器适当位置,获取一个至少包含均匀分布于整个能区的 4 个孤立全能峰的 γ 能谱,记录标准源的特征 γ 辐射的能量及其全能峰峰位。

6.4 刻度曲线的确定

6.4.1 刻度曲线的拟合

采用谱分析软件获得全能峰峰位,确定峰位和能量之间的关系,用谱分析软件进行 γ 射线能量与全能峰峰位的拟合。处于良好工作状态的 γ 能谱系统的能量刻度曲线非线性不能超过 0.5%(拟合曲线的二次项与之后各项之和不能超过总贡献的 0.5%)。

能量刻度曲线也可以自行进行计算拟合,假定峰位(道址)和能量之间关系满足式(1):

$$E = a_0 + a_1 P^1 + a_2 P^2 + \dots + a_n P^n \quad \dots \dots \dots (1)$$

式中:

E —— γ 射线能量,单位为千电子伏(keV);

a_i —— 能量刻度曲线(a_0, a_1, \dots, a_n)拟合常数;

P —— 全能峰中心所在道址。

利用式(1)对已知的峰位和能量做最小二乘法拟合,确定系统 a_0, a_1, \dots, a_n 。通常取一次或二次多项式做拟合即可。

6.4.2 刻度曲线的核查

在样品测量期间,至少用 2 个能量点的全能峰峰位对谱仪进行定期检查,所用 γ 射线的能量应分别靠近刻度能区的低能端和高能端。如果峰位基本保持不变,则刻度数据保持适用。若多道分析器取 8 192 道,要求对⁶⁰Co 的 1 332.5 keV γ 射线的全能峰峰位置于 6 000 道附近时,24 h 内峰位漂移应不超过 2 道。

7 效率刻度

7.1 标准源要求

标准源应选择与待测样品的几何形状和大小相同、基质一样或类似(或质量密度相等或相近)、核素活度和 γ 射线能量已知,以及源容器材料和样品容器材料相同的标准源。效率刻度标准源的放射性核素总活度应小于 1 000 kBq,能量分布应适当,用于效率曲线刻度时的能量点应分布在需刻度的能区内(通常为 40 keV~2 000 keV),选择至少 9 个能量的 γ 射线。

7.2 谱的获取

将谱仪系统调至合适工作状态并待稳定后,把效率刻度标准源置于与样品测量时几何条件完全相同的位置上获取刻度 γ 能谱,并使 γ 能谱中用于刻度的全能峰净面积计数统计引入的相对扩展不确定度不超过 1%($k=2$)。

7.3 γ 射线全能峰探测效率刻度

7.3.1 刻度的一般程序及要求

刻度的一般程序及要求如下:

- a) 以效率刻度标准源谱获取时间归一,得到归一后的基体本底谱的有关核素的有关核素的本底数据(简称基体本底归一谱);
- b) 从效率刻度标准源谱中扣除基体本底归一谱,得到刻度核素的净谱;
- c) 从净谱中选择该核素的特征 γ 射线的全能峰,并求得其净峰面积;
- d) 计算所选特征 γ 射线的全能峰净峰面积,与在获取效率刻度标准源能谱同一时间间隔内效率刻度标准源中总放射性活度的比值,即为该能量 γ 射线的全能峰探测效率;
- e) 如果所选特征 γ 射线是级联辐射,在计算净峰面积时,应对级联辐射的相加效应做出修正;
- f) 拟合探测效率与 γ 射线能量之间的关系曲线,此曲线即为效率刻度曲线。

7.3.2 相对比较法

对于待测样品与效率刻度标准源的几何形状相同、性状相似,所分析的核素或 γ 射线能量相同的情况,则该能量 γ 射线的全能峰探测效率可直接用于相对比较法的刻度。

7.3.3 效率曲线法拟合

对于待测样品与效率刻度标准源的几何形状、性状等相同,只是核素或 γ 射线能量不同的情况, γ 射线全能峰探测效率刻度可用全能峰效率曲线法:

- a) 在常用能区内(如 40 keV~2 000 keV),至少选择 9 个能量孤立的 γ 射线能峰,并计算它们的全能峰探测效率 $\epsilon_{p,\gamma}(E_\gamma)$;
- b) 用谱分析软件完成 γ 射线全能峰探测效率 $\epsilon_{p,\gamma}(E_\gamma)$ 与 γ 射线能量 E_γ 的关系曲线拟合,即 γ 射线全能峰效率刻度曲线。一般的拟合函数采用式(2)计算:

$$\ln \epsilon_{p,\gamma}(E_\gamma) = \sum_{i=0}^k b_i (\ln E_\gamma)^i \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- $\epsilon_{p,\gamma}(E_\gamma)$ —— 探测器对能量为 E_γ 的 γ 射线的全能峰探测效率;
- b_i —— 效率刻度曲线拟合常数;

E_{γ} —— γ 射线对应的能量,单位为千电子伏(keV);

k ——多项式的最高阶次, $k \leq m-1$, m 为相应能区内参加曲线拟合的实验效率点的数目。

曲线一般分两段拟合,大约在150 keV~300 keV处有个“拐点” E_c ,对 γ 能量 $E < E_c$ 的低能段,当实验效率点 ≥ 6 个时,式(2)中拟合阶数 k 可取3;当有3个~5个实验效率点时,式(2)中拟合阶数 k 可取2。对 $E > E_c$ 的高能段,当有3个~5个实验效率点时,式(2)中拟合阶数 k 可取2;当有6个或7个实验效率点时,式(2)中拟合阶数 k 可取3;当大于8个实验效率点时,式(2)中拟合阶数 k 可取4。宜采用系统自带的谱分析软件进行 γ 射线能量与全能峰效率的拟合。

7.4 无源效率法刻度

使用无源效率刻度时,需首先对探测器进行特有表征,并且所用无源效率刻度软件能与 γ 能谱分析软件结合使用。使用无源效率刻度时需用可溯源的实际标准源进行验证,各能量点验证结果的相对偏差均小于15%时,该类型无源效率刻度方法才可应用于样品分析。无源效率法刻度只是对传统有源效率刻度的一种补充。

7.5 效率刻度的修正

7.5.1 采用相对比较法和效率曲线法时,当效率刻度标准源与样品的装样量或密度间差异较大时,应对效率刻度做出修正,特别是在能量低于200 keV的特征 γ 射线核素活度分析时,密度差异不能忽略,应进行样品自吸收修正。样品自吸收修正方法见附录C。

7.5.2 采用效率曲线法时,如果使用的效率刻度标准源中某种核素具有级联 γ 辐射,而且 γ 能谱是在效率刻度标准源距离探测器较近情况下获取的,则用于计算效率的峰面积应做符合相加修正,其修正方法见附录D。

7.5.3 当效率刻度标准源中,使用的基质中固有的放射性核素(通常是天然放射性核素)与加入的标准源溶液或标准物质的 γ 能量一样或相近,宜考虑它们对刻度谱峰面积的影响。一般可以用制作效率刻度标准源的基质单独制作一个“基体”本底样,并在同样条件下获取其 γ 能谱,然后从刻度谱(或对应的全能峰面积)中扣除“基体”本底。

7.5.4 对反康普顿 γ 能谱仪系统的全能峰效率刻度,应特别注意级联 γ 辐射核素的相应全能峰面积处理。通常可以利用其同时获取的非反符合谱中相应峰面积,经符合相加修正后,再计算全能峰探测效率。

8 样品的准备与测量

8.1 方法概述

环境及生物样品中放射性核素的 γ 能谱分析,要根据检测的目的和有关要求,采集具有代表性的一定量的样品,经过物理或化学等方法进行处理,制成与标准源几何形状、密度等相同或类似的样品,或制成无源效率验证合格的一定几何形状的样品,置于 γ 能谱仪系统的探测器的适当位置获取 γ 能谱,以确定特征 γ 射线全能峰位置和净峰面积。

8.2 样品采集原则

样品的采集原则如下。

- a) 采集方法和工具宜避免待测样品污染和被测核素损失,采样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,以避免容器使用不当对测量结果的影响。
- b) 样品运输、保存、预处理、制样和待测等过程避免发生样品自然蒸发、变质、降解、分解和污染等,对于衰变链中气态核素、易挥发核素和易吸附核素等宜避免核素的丢失。

- c) 样品采集过程中还应防止工作场所和样品之间的交叉污染。
- d) 土壤、水、生物、空气及类似基质样品的采样具体操作及注意事项分别见附录 E、附录 F、附录 G 和附录 H；根据检测目的和有关要求，结合现场具体情况制定方案，确定检测项目、采样容器、设备、方法、采样点的布置和采样量等。需采集的样品量(W)可采用式(3)来估算：

$$W = \frac{N}{A_c f \epsilon P Y T} \dots\dots\dots(3)$$

式中：

- W —— 采集样品质量或体积，单位为千克(kg)或升(L)或立方米(m^3)；
- N —— 在 T 时间内，谱仪可测量到的最小计数，通常指核素特征峰面积计数；
- A_c —— 样品定量分析的最小活度浓度，单位为贝可每千克(Bq/kg)或贝可每升(Bq/L)或贝可每立方米(Bq/ m^3)；
- f —— 被测量样品所占采样量份额(包括干鲜比和灰鲜比，见附录 I 的表 I.1 和表 I.2)；
- ϵ —— 相应能量 γ 射线全能峰探测效率，单位为计数率每贝可[(计数/s)/Bq]；
- P —— 相应能量 γ 射线发射分支比；
- Y —— 样品预处理回收率；
- T —— 样品测量活时间，单位为秒(s)。

估算时因参数 N 、 W 、 f 、 ϵ 、 Y 等值在很大范围内可有多种组合，应根据测量的目的要求、现有条件和花费成本最低等原则，实行优化组合来确定采样量的多少。

对一台测量装置固定的 γ 能谱仪，可根据测量不确定度的要求，对 N 值和特性参数(f 、 ϵ 、 P 、 Y 、 T)做出一些估计和假设，然后按 A_c - W 关系曲线确定 W 值。当样品可能出现多种核素时，应以估计的 W 值中最大者为采样量。

A_c 值可根据现有的资料分析估计，或通过粗略预测来估计。

- e) 样品按检测要求和方案采集。

8.3 样品制备原则

样品的制备应遵循如下原则：

- a) 样品制备方法可根据实际使用的谱仪类型、数据处理方法、实验分析目的等具体情况选择；
- b) 短半衰期核素检测项目要尽快进行制备和测定、分析，对含有易挥发核素或伴有放射性气体生成的样品，以及需要使母子体核素达到平衡后再测量的样品，要将测量容器密封，并待其达到放射性平衡时再开始测量，否则在数据处理时，要对非平衡核素做出合理的校正；
- c) 在不影响测量精度的情况下，尽量减少处理步骤，缩短环节，采用简单的方法，以最大限度减少由处理过程引入的测量结果的不确定度(如核素丢失、污染等)；
- d) 土壤、水、生物、空气及类似基质样品的制备及相关注意问题分别见附录 E、附录 F、附录 G 和附录 H；
- e) 常见生物样品的干鲜比和灰鲜比见表 I.1 和表 I.2，部分样品灰化时初始着火的临界温度范围见表 I.3。

8.4 γ 能谱获取

测量前检查 γ 能谱仪，待进入正常工作状态，设定高压、测量时间等有关参数，把制好的样品置于 γ 能谱仪探测器的合适位置进行测量。获取样品 γ 能谱时，应注意以下几点：

- a) 应采用与获取效率刻度标准源 γ 能谱相同的几何条件和工作状态下测量样品 γ 能谱；
- b) 测量时间视 γ 能谱仪探测效率、样品中放射性强弱和对特征峰面积统计精确性要求而定；
- c) 低活度样品的长期测量中应注意和控制谱仪的工作状态变化对样品谱的可能影响，测量过程

中可暂停获取谱数据(或作为一个单独谱存储一次并分析处理);

- d) 特别对于天然核素活度低的样品分析时,应在测量样品之前或之后(或者前后各一次)测量基体本底谱,用于谱数据分析时扣除本底谱的贡献。

9 γ 能谱分析

9.1 核素识别

9.1.1 寻峰并确定峰位。

9.1.2 根据确定的峰位,用能量刻度的系数或曲线内插值求出相应的 γ 特征峰能量。

9.1.3 根据所确定的 γ 特征峰能量查找能量-核素数据表(库),即可得知样品中存在的核素。但有时需根据样品核素半衰期(具体可测量峰面积的衰变曲线)、一种核素的多个 γ 特征峰及其发射分支比比或核素的低能特征 X 射线等辅助方法加以鉴别。附录 J 给出了样品 γ 能谱分析方法中存在的可能干扰核素及 γ 射线。

9.2 核素活度浓度确定

9.2.1 根据鉴别的核素的特征,原则上尽量选择 γ 射线发射分支比大,受其他因素干扰小的一个或多个 γ 射线全能峰作为分析核素的特征峰。伴有短半衰期核素而难以选定时,可利用不同时间获取的 γ 能谱做适当处理。

9.2.2 根据样品谱特征峰的强弱和具体条件选择合适的方法计算特征峰面积。

9.2.3 受干扰小的孤立单峰,可直接使用谱分析软件计算得到的特征峰面积。

当分析重峰或受干扰严重的峰时,可采用以下两种方法。

a) 应使用具有重峰分解能力的曲线拟合程序。其步骤包括:

- 1) 选取适当本底谱和峰形拟合方法;
- 2) 将谱分段,确定进行拟合的谱段;
- 3) 进行非线性最小二乘法拟合,求出拟合曲线的最佳参数向量;
- 4) 对拟合的最佳峰形函数积分或直接由有关参数计算峰面积和相关量。

b) 在重峰的情况下,运用适当的剥谱技术,或通过总峰面积的衰变处理,或其他峰面积修正方法,达到分解重峰或消除干扰影响的目的。

9.2.4 采用全能峰效率曲线法刻度的 γ 能谱仪时,按式(4)计算采样时刻样品中核素活度浓度 A_b :

$$A_b = \frac{(N_s / T_s - N_b / T_b) F_1 F_3}{F_2 \epsilon P m e^{-\lambda \Delta t}} \dots \dots \dots (4)$$

式中:

A_b —— 采样时刻样品中核素活度浓度,单位为贝可每千克(Bq/kg)、贝可每升(Bq/L)或贝可每立方米(Bq/m³);

N_s —— 样品测量的全能峰净面积计数;

T_s —— 样品测量活时间,单位为秒(s);

N_b —— 本底峰净面积计数;

T_b —— 本底测量活时间,单位为秒(s);

F_1 —— 短寿命核素在测量期间的衰变修正因子,采用式(5)计算,如果被分析的核素半衰期与样品测量的时间相比大于 100, F_1 可取为 1;

F_3 —— γ 符合相加修正系数,对发射单能 γ 射线核素,或估计被分析 γ 射线的相应修正系数不大时,可取 F_3 为 1,否则应估算 F_3 , F_3 的计算见附录 D;

F_2 —— 样品相对于效率刻度标准源 γ 自吸收修正系数,如果样品密度和效率刻度标准源的密度

相同或相近, F_2 可取 1, F_2 的计算见附录 C;

ϵ ——相应能量 γ 射线全能峰探测效率, 单位为计数率每贝可 [(计数/s)/Bq];

P ——相应能量 γ 射线发射分支比;

m ——测量样品的质量或体积(当测量样品不是采集的样品直接装样测量时, m 则为相应于采集时的样品质量或体积), 单位为千克(kg)、升(L)或立方米(m^3);

e ——自然常数;

λ ——放射性核素衰变常数, 单位为每秒(s^{-1});

Δt ——核素衰变时间, 即从采样时刻到样品测量时刻之间的时间间隔, 单位为秒(s)。

$$F_1 = \frac{\lambda T_c}{1 - e^{-\lambda T_c}} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

F_1 ——短寿命核素在测量期间的衰变修正因子, 如果被分析的核素半衰期与样品测量的时间相比大于 100, F_1 可取为 1;

λ ——放射性核素衰变常数, 单位为每秒(s^{-1});

T_c ——为样品测量的实时间(不是活时间 T_s), 单位为秒(s);

e ——自然常数。

10 不确定度评定

活度浓度测量结果不确定度的各分量包括采用 A 类评定方法和 B 类评定方法求出分量, A 类方法指通过多次测量, 由贝塞尔公式计算得出的方法; B 类方法是指非 A 类的评定方法, 例如标准源所含核素活度浓度的不确定度, 一般直接引用自标准源证书。各不确定度分量 u_i 采用“方和根”法合成得到合成标准不确定度 u_c , 采用式(6)计算:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

u_c ——合成标准不确定度;

u_i ——各不确定度分量(u_1, u_2, \dots, u_n), 来源于计数统计不确定度、标准源的不确定度、样品质量或体积不确定度、效率拟合的不确定度、几何位置不确定度、 γ 射线发射分支比不确定度等。

活度浓度扩展不确定度 U 采用式(7)计算:

$$U = k u_c \dots\dots\dots (7)$$

式中:

U ——扩展不确定度;

k ——包含因子, 一般取 2, 相应置信度为 95%;

u_c ——合成标准不确定度。

活度浓度测量结果的扩展不确定度 U , 应注明扩展不确定度置信度: $k=2$; 扩展不确定度一般保留 1 位有效数字, 当扩展不确定度首位小于“3”, 可保留 2 位有效数字。 γ 能谱分析中活度浓度不确定度的主要来源及不确定度评定方法以生物样品举例说明见附录 K。

11 结果报告

11.1 报告样品分析结果应清晰简明, 同时给出适当说明。

11.2 定量分析结果大于样品探测限, 测量结果表述形式为: $A_b \pm U, k=2$ 。其中 A_b 为活度浓度值, U

为扩展不确定度值,单位为贝可每千克(Bq/kg)、贝可每升(Bq/L)或贝可每立方米(Bq/m³),标明单位和结果参考日期。测量结果的有效位数按照测量结果的末位与不确定度的末位对齐的原则确定。

11.3 低于样品探测限的核素其活度浓度以“<DL”表示,并注明样品探测限值及置信水平。当样品探测限值首位大于“2”时,保留2位有效数字,小于或等于“2”时,保留3位有效数字,单位为贝可每千克(Bq/kg)、贝可每升(Bq/L)或贝可每立方米(Bq/m³);并注明测量条件,如样品用量、测量时间、特征峰能量、效率、测量几何条件等。探测限的计算见附录L。

附录 A

(资料性)

能量和效率刻度用的单能和多能核素

能量和效率刻度用的单能和多能核素列于表 A.1。

表 A.1 能量和效率刻度用的单能和多能核素

核素	半衰期	γ 射线能量 keV	γ 射线发射分支比 %
$^{210}\text{Pb}^{\text{a,b,c}}$	22.23 a	46.54	4.252
$^{241}\text{Am}^{\text{c}}$	432.6 a	59.54	35.92
^{109}Cd	461.4 d	88.03	3.626
$^{57}\text{Co}^{\text{b}}$	271.80 d	122.06	85.51
$^{141}\text{Ce}^{\text{a,b}}$	32.503 d	145.44	48.29
$^{51}\text{Cr}^{\text{b}}$	27.703 d	320.08	9.87
$^{137}\text{Cs}^{\text{a,b}}$	30.05 a	661.66	84.99
$^{56}\text{Mn}^{\text{a,b,c}}$	312.19 d	834.85	99.975 2
$^{22}\text{Na}^{\text{d}}$	2.602 9 a	1 274.54	99.94
$^{88}\text{Y}^{\text{b}}$	106.626 d	898.04	93.90
		1 836.06	99.32
$^{60}\text{Co}^{\text{a,b}}$	5.271 1 a	1 173.23	99.85
		1 332.49	99.982 6
$^{152}\text{Eu}^{\text{b}}$	13.522 a	121.78	28.41
		344.28	26.59
		964.08	14.50
		1 112.08	13.41
$^{40}\text{K}^{\text{d}}$	$1.250 4 \times 10^9$ a	1 408.01	20.85
		1 460.82	10.55

注：表中的数据来源于 GB/T 11713—2015，并根据 *Mini Table of Radionuclides*, BIPM, 2015 进行了更新。

^a 更新了核素的半衰期。

^b 更新了核素的 γ 射线能量。

^c 更新了核素的 γ 射线发射分支比。

^d 新增加的核素。

附录 B

(资料性)

测量低活度样品用的典型样品盒示例

B.1 典型马林杯样品盒

典型马林杯样品盒为无色透明圆柱型马林杯,材料为聚丙烯塑料,密度为 $0.91 \text{ g/cm}^3 \sim 0.96 \text{ g/cm}^3$, 熔化温度为 $220 \text{ }^\circ\text{C} \sim 275 \text{ }^\circ\text{C}$, 使用中温度不应超过 $220 \text{ }^\circ\text{C}$ 。其剖面如图 B.1 所示。

单位为毫米

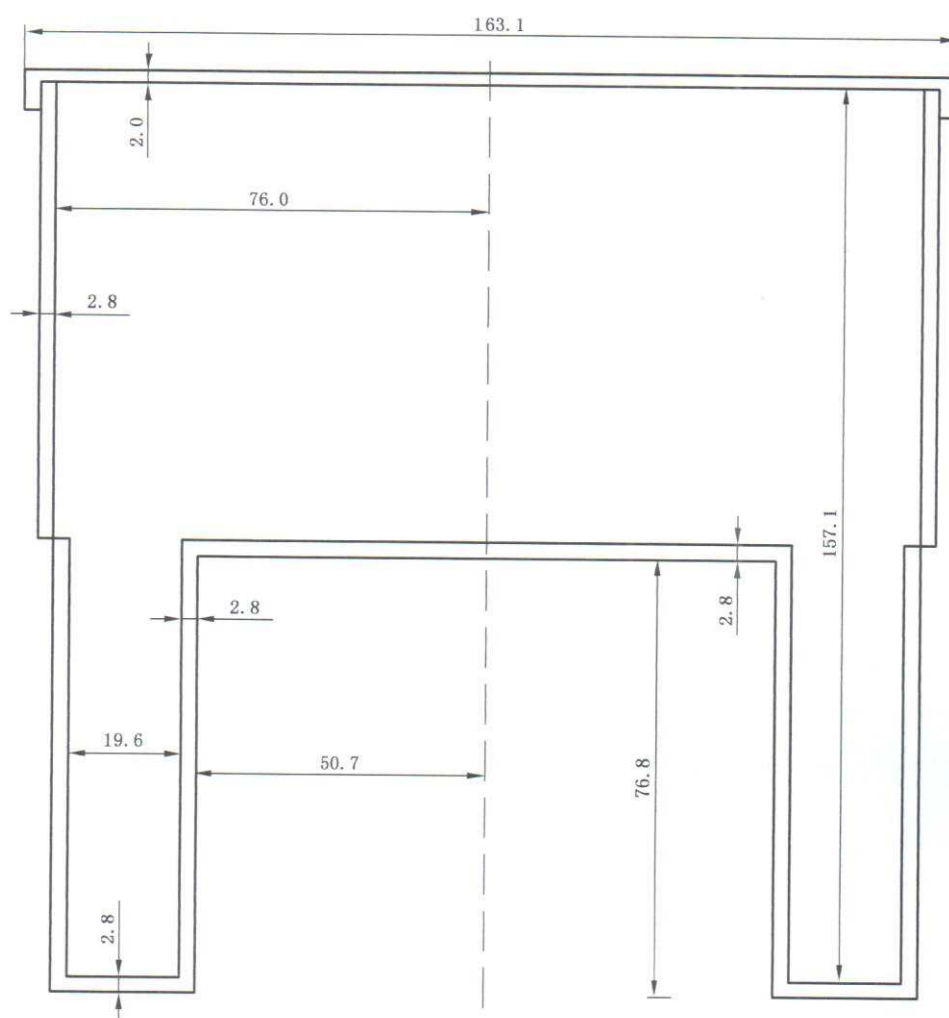


图 B.1 典型马林杯样品盒剖面图示例

B.2 典型圆柱形样品盒

常用的两种典型高、低圆柱形样品盒剖面如图 B.2 和图 B.3 所示，材料为聚丙烯塑料。

单位为毫米

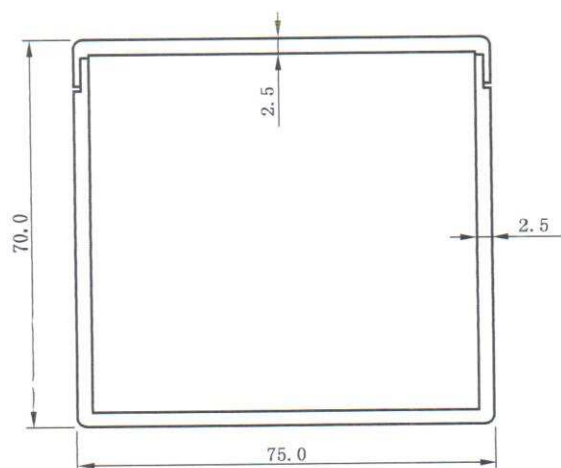


图 B.2 典型高圆柱形样品盒剖面图示例

单位为毫米

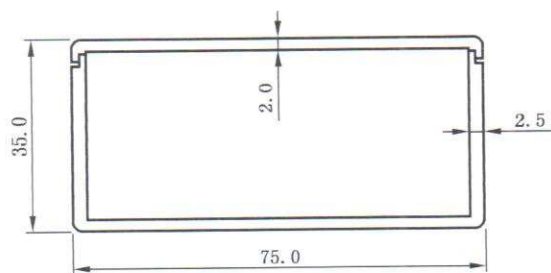


图 B.3 典型低圆柱形样品盒剖面图示例

附录 C

(资料性)

样品自吸收修正方法

C.1 样品相对标准源自吸收系数 F_2 的确定方法

C.1.1 当分析样品的基质组成和刻度用的 γ 源基质组成不一样,造成装样质量密度与标准源的质量密度差别很大时,它们之间的 γ 射线自吸收差别就不能忽略,对分析结果或峰面积就应进行修正。通常不必求出绝对自吸收修正因子,只要求分析出样品相对于标准源的自吸收修正系数即可。根据各自实验室具体条件可选用下列方法之一。

C.1.2 当样品的 γ 射线质量衰减系数 $(\mu/\rho)_1$ 和标准源的 γ 射线质量衰减系数 $(\mu/\rho)_0$ 已知时(其中,质量衰减系数的单位为 cm^2/g),则样品相对标准源自吸收修正系数 F_2 可按式(C.1)计算:

$$F_2 = e^{-\frac{\bar{L}}{V}[(\mu/\rho)_1 m_1 - (\mu/\rho)_0 m_0]} \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

- F_2 —— 样品相对标准源修正自吸收系数;
- e —— 自然常数;
- \bar{L} —— 被分析 γ 射线通过样品本身的平均有效长度,单位为厘米(cm);
- V —— 样品体积,也就是标准源的体积,单位为立方厘米(cm^3);
- $(\mu/\rho)_1$ —— 样品的 γ 射线质量衰减系数,单位为平方厘米每克(cm^2/g);
- m_1 —— 是样品的装填质量,单位为克(g);
- $(\mu/\rho)_0$ —— 标准源的 γ 射线质量衰减系数,单位为平方厘米每克(cm^2/g);
- m_0 —— 标准源的装填质量,单位为克(g)。

注: \bar{L} 是由样品体积或者说标准源体积 V 决定的几何量,可以由标准实验室提供或由 C.2.2 给出的方法获得。

当样品的 $(\mu/\rho)_1$ 值不容易得到,所求自吸收修正的 γ 能量大于 200 keV,装填样品质量密度 (m_1/V) 与标准源的差别不大于 $0.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ 时,样品相对标准源自吸收修正系数 F_2 可用式(C.2)近似代替式(C.1):

$$F_2 = e^{-\frac{\bar{L}}{V}(\mu/\rho)_0(m_1 - m_0)} \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

- F_2 —— 样品相对标准源修正自吸收系数;
- e —— 自然常数;
- \bar{L} —— 被分析 γ 射线通过样品本身的平均有效长度,单位为厘米(cm);
- V —— 样品体积,也就是标准源的体积,单位为立方厘米(cm^3);
- $(\mu/\rho)_0$ —— 标准源的 γ 射线质量衰减系数,单位为平方厘米每克(cm^2/g);
- m_1 —— 是样品的装填质量,单位为克(g);
- m_0 —— 标准源的装填质量,单位为克(g)。

C.1.3 可按图 C.1 所示点源、样品与探测器的几何位置,通过测量发射多 γ 能量的点源(如 ^{152}Eu , 或单能 γ 混合源等)峰面积来计算自吸收修正系数。点源的 γ 射线能量范围应覆盖待分析的 γ 射线能量。实验要求至少测量两次,测量活时间相同,一次是在样品盒装满无放射性的样品基质材料上测量,设测量的峰面积为 a_1 ;另一次是在样品盒装满无放射性的标准源基质材料上测量,设测得的峰面积为 a_0 ,则样品的相对标准源修正自吸收系数 F_2 可按式(C.3)计算:

$$F_2 = e^{\frac{\bar{L}}{V} \ln(a_1/a_0)} \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

式中：

F_2 ——样品相对标准源修正自吸收系数；

e ——自然常数；

\bar{L} ——被分析 γ 射线通过样品本身的平均有效长度，单位为厘米(cm)；

L ——点源 γ 射线通过样品的最近距离(如图 C.1 所示)，单位为厘米(cm)；

a_1 ——在样品盒装满无放射性的样品基质材料测量的峰面积；

a_0 ——在样品盒装满无放射性的标准源基质材料测量的峰面积。

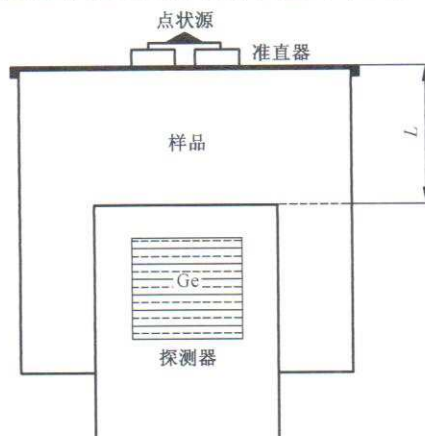


图 C.1 点源、样品与探测器的几何位置

当选用的点源足够强，样品和标准源相对较弱，特别是 γ 射线能量不重合时，C.1.2 的实验可直接在样品与标准源上来完成。

C.1.4 确定自吸收系数的第三种方法是用待分析的样品基质和标准源基质物质制作两个放射性活度相等(实际上相对强度已知即可)、形状大小和待分析样品一样、 γ 能量范围覆盖待求自吸收的 γ 能量的体源。在相同条件下测量两个源，测量活时间相同，并分别求出对应的峰面积，设为 A_1 和 A_0 ，则样品相对于标准源的自吸收系数 F_2 可按式(C.4)计算：

$$F_2 = A_1/A_0 \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

式中：

F_2 ——样品相对标准源自吸收系数；

A_1 ——待分析的样品基质测量所得的对应峰面积；

A_0 ——标准源基质测量所得的对应峰面积。

求出若干不同能量 E 的 F_2 值，做 F_2 - E 曲线图，或选用适当函数拟合各实验点，则可求出任意能量下的 F_2 值。

当选用更多的不同密度物质制源，用该实验方法求得多组数据，然后通过适当数据处理，可以内插出任意 γ 能量和任意密度情况下相对于标准源的自吸收系数。

C.2 γ 射线在物质中的质量衰减系数和所用样品盒对 γ 光子的有效行程长度 \bar{L} 的确定方法

C.2.1 关于质量衰减系数的确定方法

C.2.1.1 如果样品或标准源的元素组成已知，则可利用已知元素的 γ 射线质量衰减系数数据表按它们在样品中或标准源中的质量份额加权，计算出整个样品或标准源对各种不同的 γ 射线质量衰减系数，部分常用元素或物质的 γ 射线质量衰减系数见表 C.1。

表 C.1 γ 射线的质量衰减系数

光子 能量/ MeV	质量衰减系数(μ/ρ) cm ² /g								
	氢	碳	氮	氧	铝	硅	铁	水	空气
0.040	3.458×10^{-1}	2.076×10^{-1}	2.288×10^{-1}	2.585×10^{-1}	5.685×10^{-1}	7.012×10^{-1}	3.629×10^0	2.683×10^{-1}	2.485×10^{-1}
0.050	3.355×10^{-1}	1.871×10^{-1}	1.980×10^{-1}	2.132×10^{-1}	3.681×10^{-1}	4.385×10^{-1}	1.958×10^0	2.269×10^{-1}	2.080×10^{-1}
0.060	3.260×10^{-1}	1.753×10^{-1}	1.817×10^{-1}	1.907×10^{-1}	2.778×10^{-1}	3.207×10^{-1}	1.205×10^0	2.059×10^{-1}	1.875×10^{-1}
0.080	3.091×10^{-1}	1.610×10^{-1}	1.639×10^{-1}	1.678×10^{-1}	2.018×10^{-1}	2.228×10^{-1}	5.952×10^{-1}	1.837×10^{-1}	1.662×10^{-1}
0.100	2.944×10^{-1}	1.514×10^{-1}	1.529×10^{-1}	1.551×10^{-1}	1.704×10^{-1}	1.835×10^{-1}	3.717×10^{-1}	1.707×10^{-1}	1.541×10^{-1}
0.15	2.651×10^{-1}	1.347×10^{-1}	1.353×10^{-1}	1.361×10^{-1}	1.378×10^{-1}	1.448×10^{-1}	1.964×10^{-1}	1.505×10^{-1}	1.356×10^{-1}
0.20	2.429×10^{-1}	1.229×10^{-1}	1.233×10^{-1}	1.237×10^{-1}	1.223×10^{-1}	1.275×10^{-1}	1.460×10^{-1}	1.370×10^{-1}	1.233×10^{-1}
0.30	2.112×10^{-1}	1.066×10^{-1}	1.068×10^{-1}	1.070×10^{-1}	1.042×10^{-1}	1.082×10^{-1}	1.099×10^{-1}	1.186×10^{-1}	1.067×10^{-1}
0.40	1.893×10^{-1}	9.546×10^{-2}	9.557×10^{-2}	9.566×10^{-2}	9.276×10^{-2}	9.614×10^{-2}	9.400×10^{-2}	1.061×10^{-1}	9.549×10^{-2}
0.50	1.729×10^{-1}	8.715×10^{-2}	8.719×10^{-2}	8.729×10^{-2}	8.445×10^{-2}	8.748×10^{-2}	8.414×10^{-2}	9.687×10^{-2}	8.712×10^{-2}
0.60	1.599×10^{-1}	8.058×10^{-2}	8.063×10^{-2}	8.070×10^{-2}	7.802×10^{-2}	8.077×10^{-2}	7.704×10^{-2}	8.956×10^{-2}	8.055×10^{-2}
0.80	1.405×10^{-1}	7.076×10^{-2}	7.081×10^{-2}	7.087×10^{-2}	6.841×10^{-2}	7.082×10^{-2}	6.699×10^{-2}	7.865×10^{-2}	7.074×10^{-2}
1.00	1.263×10^{-1}	6.361×10^{-2}	6.364×10^{-2}	6.372×10^{-2}	6.146×10^{-2}	6.361×10^{-2}	5.995×10^{-2}	7.072×10^{-2}	6.358×10^{-2}
1.50	1.027×10^{-1}	5.179×10^{-2}	5.180×10^{-2}	5.185×10^{-2}	5.006×10^{-2}	5.183×10^{-2}	4.883×10^{-2}	5.754×10^{-2}	5.175×10^{-2}
2.00	8.769×10^{-2}	4.442×10^{-2}	4.450×10^{-2}	4.459×10^{-2}	4.324×10^{-2}	4.480×10^{-2}	4.265×10^{-2}	4.942×10^{-2}	4.447×10^{-2}

注：表中所有数据来源于 *National Institute of Standards and Technology report, NISTIR 5632, 1995。*

C.2.1.2 当样品或标准源的基质组成不清楚时,可由实验方法确定(μ/ρ)。实验如图 C.1 所示,测量活时间相同,样品盒用(μ/ρ)已知的物质装满(如水,质量衰减系数值见表 C.1),测量点源的 γ 能谱,计算全能峰面积 a_0 ,后用待求(μ/ρ)的样品或标准源的基质装满样品盒,测量点源 γ 能谱,计算全能峰面积 a_1 ,则样品或标准源的相应 γ 射线质量衰减系数(μ/ρ)₁ 可按式(C.5)计算:

$$(\mu/\rho)_1 = [L (\mu/\rho)_0 m_0 / V - \ln(a_1/a_0)] / (L m_1 / V) \quad \dots\dots\dots (C.5)$$

式中:

- (μ/ρ)₁ —— 样品或标准源的相应 γ 射线质量衰减系数,单位为平方厘米每克(cm²/g);
- L —— 点源 γ 射线通过样品的最近距离(如图 C.1 所示),单位为厘米(cm);
- (μ/ρ)₀ —— 水的 γ 射线质量衰减系数,单位为平方厘米每克(cm²/g);
- m₀ —— 水的质量,单位为克(g);
- V —— 装样体积,单位为立方厘米(cm³);
- a₁ —— 样品或标准源的基质装满样品盒时,测量点源 γ 能谱,计算全能峰面积;
- a₀ —— 样品盒用(μ/ρ)已知的物质装满(如水),测量点源的 γ 能谱,计算全能峰面积;
- m₁ —— 待求基质(即分析样品或标准源)的质量,单位为克(g)。

C.2.2 关于平均有效长度 \bar{L} 的确定方法

C.2.2.1 用 γ 射线质量衰减系数已知的两种基质物质做两个体源,其活度相等,形状大小和待分析样品一样,在相同条件下测量两体源,测量活时间相同,确定相应 γ 全能峰面积,按式(C.6)计算 \bar{L} :

$$\bar{L} = \ln(A_1/A_2) / [(\mu/\rho)_2 m_2 / V - (\mu/\rho)_1 m_1 / V] \quad \dots\dots\dots (C.6)$$

式中:

- \bar{L} ——被分析 γ 射线通过样品本身的平均有效长度,单位为厘米(cm);
- A_1 ——对基质物质 1 测量的峰面积;
- A_2 ——对基质物质 2 测量的峰面积;
- $(\mu/\rho)_2$ ——对基质物质 2 测量的 γ 射线质量衰减系数,单位为平方厘米每克(cm^2/g);
- m_2 ——对基质物质 2 测量的装样量,单位为克(g);
- V ——装样体积,单位为立方厘米(cm^3);
- $(\mu/\rho)_1$ ——对基质物质 1 测量的 γ 射线质量衰减系数,单位为平方厘米每克(cm^2/g);
- m_1 ——对基质物质 1 测量的装样量,单位为克(g)。

对不同 γ 能量,求出多个 \bar{L} 值,其算术平均值即为所用样品盒对 γ 光子的平均有效长度。

C.2.2.2 用两种不含放射性的基质物质,如水和 FeCl_3 水溶液,分别装满样品盒,按图 C.1 所示实验方法测量上面的 ^{152}Eu 点源 γ 能谱,测量活时间相同,计算两种情况的峰面积,设分别为 a_1 和 a_2 。再将这两个无放射性的基质物质加入相同量 ^{152}Eu 溶液制成体源,放在同一探测器同样位置上测量,得到体源的峰面积,设分别为 A_1 和 A_2 ,然后按式(C.7)计算 \bar{L} :

$$\bar{L} = L \times \ln(A_1/A_2) / \ln(a_1/a_2) \quad \dots\dots\dots (C.7)$$

式中:

- \bar{L} ——被分析 γ 射线通过样品本身的平均有效长度,单位为厘米(cm);
- L ——点源 γ 射线通过样品的最短距离,单位为厘米(cm);
- A_1 ——对基质物质 1 测量的峰面积;
- A_2 ——对基质物质 2 测量的峰面积;
- a_1 ——在样品盒装满无放射性的样品基质材料测量的峰面积;
- a_2 ——在样品盒装满无放射性的标准源基质材料测量的峰面积。

实验时, ^{152}Eu 点源和 ^{152}Eu 溶液不一定是标准源。对不同 γ 能量求出多个 \bar{L} 值,其算术平均值即为所用样品盒对 γ 光子的平均有效长度。

附录 D

(资料性)

级联辐射引起的符合相加修正

D.1 符合相加效应

符合相加效应是指在谱仪分辨时间内,核素发射的级联 γ 光子或其他与 γ 光子产生的级联辐射有可能在探测器内同时被探测而记录为一个事件,使实际测量的有关 γ 射线全能峰面积增加或减少的现象。一般情况下只考虑级联 γ 辐射或电子俘获和内转换引起的X射线的符合相加效应。

在效率刻度或样品测量中宜尽可能设法避免或减少这种效应的影响,例如,样品放射性较强时,可以置于距探测器远的位置上测量(如15 cm以上),大于25 cm时,可以认为符合相加效应近似为零;用标准源与待分析核素做相对应的比较测量;选择待分析核素受符合相加效应小的 γ 峰作为特征峰。但有时仍不可避免地要进行这种影响修正。

D.2 符合相加修正因子的计算方法

对点源修正,可以用单能 γ 点源,如 ^{241}Am 、 ^{109}Cd 、 ^{57}Co 、 ^{203}Hg 、 ^{137}Cs 、 ^{85}Sr 、 ^{113}Sn 、 ^{54}Mn 、 ^{65}Zn 和 ^{88}Y 等在选定的测量位置上测量峰总比 R ,得到 R 与能量 E 的关系曲线。用已知标准点源在相同条件下测量,得到全能峰效率 ϵ 和能量 E 关系曲线。由该两条曲线内插可以求出任意能量的总效率 ϵ_1 。知道了 ϵ 和 ϵ_1 ,则可以按照核素的衰变纲图、有关核参数和推导的符合相加修正因子计算公式计算出所关心的 γ 射线的符合相加修正因子 F_3 ,将测量的 γ 射线的净峰面积乘以 F_3 便得到真正的峰面积。实验中如果使用的单能 γ 点源为标准源,则可直接得到效率 ϵ 和总效率 ϵ_1 曲线,不必求峰总比 R 曲线。对体源修正,方法类似点源情况。

D.3 符合相加修正因子的实验方法

D.3.1 用一套单能 γ 射线标准溶液制备一套或一个混合 γ 源,用待确定符合相加修正因子的核素标准溶液制备一同样大小和形状的 γ 源,它们的基质都一样,但可以不同于样品或用于刻度的标准源的基质。在相同的情况下,分别置于测量样品用的位置上获取 γ 能谱,于是由单能 γ 源可得到无符合相加效应影响的峰效率与能量关系曲线,由确定符合相加修正的 γ 源可得到相应 γ 射线的具有符合相加影响的峰效率 ϵ' 。两效率之比为该 γ 射线的符合相加修正因子 F_3 ,按式(D.1)计算:

$$F_3 = \epsilon / \epsilon' \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

F_3 ——符合相加修正因子;

ϵ ——由曲线内插得到的相应 γ 能量峰的效率;

ϵ' ——具有符合相加影响的峰效率。

该方法求效率时要使用到每种核素的活度和有关 γ 射线的发射分支比,故确定的 F_3 误差较大,标准偏差(1σ)大约为2%。

D.3.2 式(D.1)效率比实际上可分解为两部分之积,一部分是峰面积之比,一部分是 γ 发射率之比,于是可导出式(D.2)和具体的实验方法,以减少测量误差。

- a) 制备若干单能 γ 射线体源和相应的点源(或混合源)。
- b) 制备待确定符合相加修正系数的核素体源和相应点源。各种源的几何形状、大小和基质都应相同,它们的强度与各对应的点源强度相比值应已知,因此应用同一溶液制备。
- c) 在距探测器近距离位置C上测量各体源 γ 能谱,在远距离探测器的轴线位置D(符合相加效应

可忽略)测量各点源的 γ 能谱。

用位置 C 和位置 D 各对应的单能 γ 能谱的峰面积 a_C 和 a_D 及相应的发射分支比获得效率比值 ϵ_C/ϵ_D 与 γ 能量 E 关系曲线。用待求符合相加修正的源和点源 γ 能谱计算位置 C 和位置 D 上的时间与强度归一的峰面积比 a'_C/a'_D (实际为 ϵ'_C/ϵ'_D)。

按式(D.2)计算 F_3 值, 则 F_3 为相应源几何大小在位置 C 上待求的 γ 射线的符合相加修正系数:

$$F_3 = \frac{\epsilon_C / a'_C}{\epsilon_D / a'_D} \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

F_3 ——相应源几何大小在位置 C 上待求的 γ 射线的符合相加修正系数;

ϵ_C ——在位置 C 上, 单能 γ 能谱的峰效率;

ϵ_D ——在位置 D 上, 单能 γ 能谱的峰效率;

a'_C ——在位置 C 上, 存在符合相加效应的峰面积;

a'_D ——在位置 D 上, 存在符合相加效应的峰面积。

ϵ_C/ϵ_D 由效率比值曲线内插值得到。

上述实验步骤消除了活度和 γ 发射分支比的误差, F_3 值的标准偏差 (1σ) 可以做到大约为 1%。而且使用的各源溶液绝对活度不一定准确知道。

D.4 符合相加修正因子的传递

这是指借助标准实验室或权威实验室实验标准数据的传递使用修正方法。例如, 假定只用 ^{152}Eu 标准源进行效率曲线刻度, 这时需要的基本条件是具备一个 ^{152}Eu 体源, 一个 ^{137}Cs 体源, 以及一个 ^{152}Eu 点源和一个 ^{137}Cs 点源。体源的几何条件和构成应与标准实验室的一样。具体符合相加修正方法如下。

- a) 在效率刻度位置 C 处分别获取 ^{152}Eu 和 ^{137}Cs 体源 γ 能谱; 在可忽略符合相加修正的远距探测器位置 D 处 (如 25 cm 处), 分别获取 ^{152}Eu 和 ^{137}Cs 点源 γ 能谱。这里位置 C 和位置 D 与标准实验室的位置类似。
- b) 求出位置 C ^{137}Cs 体源和位置 D ^{137}Cs 点源的 661.66 keV γ 射线的全能峰效率, 分别记为 ϵ_{C2} 和 ϵ_{D2} 。
- c) 求出位置 C ^{152}Eu 体源和位置 D ^{152}Eu 点源各有关 γ 射线的全能峰面积, 分别记为 $a_{C2}(E_i)$ 和 $a_{D2}(E_i)$ 。
- d) 用标准实验室在类似位置 C 和位置 D 上给出 ^{137}Cs 体源和 ^{137}Cs 点源的全能峰效率 ϵ_{C1} 和 ϵ_{D1} , 按式(D.3)计算系数 M_{Body} :

$$M_{\text{Body}} = \frac{\epsilon_{C1} / \epsilon_{C2}}{\epsilon_{D1} / \epsilon_{D2}} \dots\dots\dots (D.3)$$

式中:

M_{Body} ——计算系数;

ϵ_{C1} ——标准实验室在类似位置 C 上给出的 ^{137}Cs 体源的全能峰效率;

ϵ_{D1} ——标准实验室在类似位置 D 上给出的 ^{137}Cs 点源的全能峰效率;

ϵ_{C2} ——位置 C ^{137}Cs 体源的 661.66 keV γ 射线的全能峰效率;

ϵ_{D2} ——位置 D ^{137}Cs 点源的 661.66 keV γ 射线的全能峰效率。

- e) 用标准实验室在类似位置 C 和位置 D 上给出的 ^{152}Eu 体源和点源相应 γ 射线的全能峰面积比 $a_{C1}(E_i)/a_{D1}(E_i)$ 和相应 γ 射线符合相加修正系数 $F_{C1}(E_i)$, 按式(D.4)计算本实验室在位置 C 的 ^{152}Eu 体标准源 γ 射线符合相加修正系数 $F_{C2}(E_i)$:

$$F_{C2}(E_i) = \left[\frac{a_{C1}(E_i)}{a_{D1}(E_i)} / \frac{a_{C2}(E_i)}{a_{D2}(E_i)} \right] M_{\text{Body}} F_{C1}(E_i) \dots\dots\dots (D.4)$$

式中：

$F_{C2}(E_i)$ ——在位置 C¹⁵²Eu 体源的 γ 射线符合相加修正系数；

$a_{C1}(E_i)$ ——在类似位置 C 上给出的¹⁵²Eu 体源相应 γ 射线全能峰面积；

$a_{D1}(E_i)$ ——在类似位置 D 上给出的¹⁵²Eu 点源相应 γ 射线全能峰面积；

$a_{C2}(E_i)$ ——在位置 C¹⁵²Eu 体源各有关 γ 射线的全能峰面积；

$a_{D2}(E_i)$ ——在位置 D¹⁵²Eu 点源各有关 γ 射线的全能峰面积；

M_{Body} ——计算系数；

$F_{C1}(E_i)$ ——标准实验室相应 γ 射线符合相加修正系数。

- f) 上面实验中也可考虑分别制备混合的¹⁵²Eu 和¹³⁷Cs 体源和混合的点源。修正系数的误差主要来源于上述各峰面积的测量误差和标准实验室的 $F_{C1}(E_i)$ 的误差。



附录 E

(资料性)

土壤、沉积物(底泥)样品采集、制备与测量

E.1 样品的采集

E.1.1 土壤、沉积物(底泥)样品的采集

E.1.1.1 土壤样品的采集

土壤样品的采样设备、采样点和采样方法如下。

- a) **采样设备。**土壤的采样工具为土壤采集器或采样铲,采样前用自来水冲洗干净,采样容器为聚乙烯塑料袋和与聚乙烯塑料袋大小相同的布袋。
- b) **采样点。**根据检测目的和有关要求选择采样点。
- c) **采样方法。**应根据样品采样的特定检测目的、检测项目特点和有关要求,选定特定采样点及特定的采样方法,如表层土的取样深度可适当调整,使采集的样品具有代表性。一般在相对开阔的未耕区采取垂直深 10 cm 的表层土,在 10 m×10 m 范围内,采用梅花形布点或根据地形采用蛇形布点(采点不少于 5 个)进行采样。将多点采集的土壤除去石块、草根等杂物,现场混合后取样(可取 2 份~3 份,每份取 2 kg~3 kg 样品),分别装在双层塑料袋内密封,再置于同样大小的布袋中。

E.1.1.2 陆水沉积物(底泥)样品的采集

陆水沉积物(底泥)样品的采样设备、采样点和采样方法如下。

- a) **采样设备。**深水部位的沉积物(底泥)用专用采泥器采集,浅水处可直接用塑料勺采集;采样容器为聚乙烯样品袋和与聚乙烯塑料袋大小相同的布袋。
- b) **采样点。**河流、水库等陆水沉积物(底泥)的采样点设置,可根据检测的具体目的和要求在河流、水库等布点。
- c) **采样方法。**浅水处可用塑料勺直接采集,深水部位的沉积物(底泥)用专用采泥器采集。采集的沉积物(底泥)置于塑料袋内(放置一段时间倒出上层液体层),现场混合后取样(可取 2 份~3 份,每份取 2 kg~3 kg 样品),分别装在双层塑料袋内密封,整理样品后置于布袋中。

E.1.1.3 海洋沉积物(底泥)样品的采集

海洋沉积物(底泥)样品的采样设备、采样点和采样方法见 GB 17378.3—2007。

E.1.2 采样信息记录

采样信息包括样品名称、样品唯一性编号、采样地点、采样时间、样品量、分析项目、卫星定位、采样单位、采样人,以及有关采样环境特征等信息。

E.2 样品的运输和保存

E.2.1 样品的运输

应根据本实验室质量控制要求,填写送样单,并附采样现场记录。对照送样单和样品卡清点样品,检查样品包装是否符合要求,防止发生破损和洒漏,确保安全送至实验室。

E.2.2 样品的保存

样品暂存入实验室样品库,宜尽量防止挥发、蒸发和流失,一般封闭保存,注意根据分析核素半衰期和有机物的情况尽早进行预处理。

E.3 样品的制备

土壤、沉积物(底泥)样品进实验室后,进行如下预处理。

- 剔除杂草、碎石等异物,样品量取 2 kg~3 kg。
- 称湿重后将样品倒在托盘中,在干燥箱中样品经 105 °C 烘干至恒重,对于分析挥发性的放射性核素的样品,宜采用风干或冷冻干燥等处理方法。可根据检测要求确定是否测定样品含水率。
- 用清洁木棒碾压土壤样品,并过 10 目(孔径为 2 mm)尼龙土壤筛,收集并分别称量标记:将孔径 ≥ 2 mm 的砾石称重装袋标记备查;将孔径 < 2 mm 的土壤样品称重、装入已编号标记的土壤样品瓶中备用。
- 将处理好的样品装入测量用的聚乙烯塑料盒中(如 $\phi 75$ mm $\times 70$ mm 样品盒),称出样品用量,用橡胶垫圈和胶带密封样品,在一定时间(如衰变链中含氦-222 的核素的样品需密封放置放射性衰变链基本达到平衡时间,约 21 d)进行 γ 能谱测量。

E.4 样品的测量

E.4.1 效率刻度标准源制备或定制

效率刻度标准源制备或定制的方法及要求如下。

- 效率刻度标准源。**土壤、沉积物(底泥)样品效率刻度用的效率刻度标准源由模拟基质加特定核素的标准溶液或标准矿粉均匀混合后制成,应满足均匀性好、核素活度准确、稳定、密封等要求。
- 模拟基质。**选用放射性本底低,容易均匀混合,与待测样品密度相近的物质作为模拟基质。对于填充密度在 $0.8 \text{ g/cm}^3 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ 的土壤样品的体标准源以一定比例的氧化铝和二氧化硅作为模拟基质。
- 活度浓度。**效率刻度标准源的活度要适中,一般为被测样品的 10 倍~30 倍,具体倍数根据样品量的多少及强弱而定。
- 密封。**制备好的铀、镭体标准源应放入样品盒中密封 3 周~4 周,使铀、镭及其短寿命子体达到平衡后再使用。
- 不确定度。**效率刻度标准源活度的总不确定度应在 5% 以内。

E.4.2 测量

测量程序如下。

- 本底测量。**应测量模拟基质本底谱和空样品盒本底谱,在求体标准源全能峰净面积时,应将体标准源全能峰计数减去相应模拟基质本底计数,土壤、沉积物(底泥)样品的全能峰计数应扣除相应空样品盒本底计数。
- 效率刻度标准源测量。**测量效率刻度标准源时,其相对探测器的位置应与测量土壤、沉积物(底泥)样品时相同。
- 测量时间及测量计数不确定度。**测量时间根据被测效率刻度标准源或样品放射性活度的强弱、实验误差和不确定度而定,效率刻度标准源的测量不确定度应小于 5%,土壤、沉积物(底

泥)样品中放射性核素活度的相对扩展不确定度(包含因子为 2)应满足:铀-238 小于 20%,镭-226、钍-232、钾-40 小于 10%,铯-137 小于 15%,通常情况样品可进行 24 h 测量,具体根据检测要求确定。

附录 F

(资料性)

水样品采集、制备与测量

F.1 样品的采集

F.1.1 水样品的采集

F.1.1.1 淡水样品的采集

F.1.1.1.1 地表水样品的采集

地表水样品的采样设备、采样点和采样方法及要求如下。

- a) **采样设备。**用自动采水器、塑料桶(如聚乙烯塑料桶,规格 10 L、25 L 等)或单层采水瓶采集水样。采样前,先用洗涤剂清洗除去油污等,用自来水冲洗干净后,再用 10%硝酸浸泡 8 h,用自来水冲洗至 $\text{pH}=7$,然后用蒸馏水清洗三次,并晾干,贴好标签备用。
- b) **采样点。**选择在水流混合均匀段取一断面,在断面中心线上采样,避开没有代表性的区域,如汇入支流处、死水区或回水区。水库,选择在它的中心部位或多点取混合样;均采集其表层水下 0.2 m~0.5 m 处水样。江河选择控制断面采样,断面水面宽 ≤ 10 m 时,在主流中心采样;断面水面宽 >10 m 时,在左、中和右三点采样。湖泊、水库水样应多点采样,水深 ≤ 10 m 时,在水面下 50 cm 处采样;水深 >10 m 时,增加中层采样。
- c) **采样方法及要求。**采样前洗净采样设备,采样时用样品水洗涤三次后采集。

F.1.1.1.2 饮用水、地下水样品的采集

饮用水、地下水样品的采样设备、采样点和采样方法及要求如下。

- a) **采样设备。**同地表水。
- b) **采样点。**自来水水样取自自来水管末端水,井水水样取自饮用水井,泉水水样取自出水量大的泉水,地下水水样选自专用的水文井和深水井。
- c) **采样方法及要求。**饮用水用聚乙烯塑料桶采集,采样容器在采样时先用所采的水样清洗三次后并去除积水,再将水样按采样量采集于清洗后的样品容器中,采样时尽量避免空气混入样品,采样容器装满后加盖。地下水用专门采样器(水泵)在预定水深处首先排出原井内滞水,停留一定时间,等扰动平静后,再开始采样,采样器管道内原有水清除干净,并将采样容器用所采集的水样清洗三次后再将水样采集于样品容器中,如发现有颗粒物自然沉淀后应与清液分开。凡用泵或直接从干管采集水样时,应先排尽管内的积水,方可采集水样。

F.1.1.1.3 降水(雨、雪)样品的采集

降水(雨、雪)样品的采样设备、采样点和采样方法及要求如下。

- a) **采样设备。**降水采集装置。
- b) **采样点。**降水采集装置安放在周围至少 30 m 内没有树林和建筑物的开阔平坦地。受水器边沿上缘离地面高 1 m,采取适当措施防止扬尘的干扰。
- c) **采样方法及要求。**贮水器要每天定时更换,在降暴雨的情况下,应随时更换,以防发生外溢。采集好的样品充分搅拌以后用量筒量出总量。采完样品后,贮水器用蒸馏水充分清洗,以备下次使用。采集的雪样,要移至室内自然融化。

F.1.1.2 海水样品的采集

海水样品的采样设备、采样点和采样方法及要求见 GB 17378.3—2007。

F.1.2 采样信息记录

采样信息包括样品名称、样品唯一性编号、采样地点、采样时间(应精确到分)、采样量、加入的保存剂、保存方法、检测项目、卫星定位、采样单位、采样人,以及有关采样环境特征等信息。

F.2 样品的运输与保存

F.2.1 样品的运输

应根据本实验室质量控制要求,认真填写送样单,并附采样现场记录。对照送样单和样品卡认真清点样品,检查样品包装是否符合要求,防止发生破损和洒漏,确保安全送至实验室。

根据采样具体情况,采样后尽可能当日把样品运送至实验室;不能当日运抵的,可根据具体情况进行适当的样品保存处理。

F.2.2 样品的保存

水样采集后,淡水样品自然放置 24 h 取上清液,加浓硝酸酸化至 pH 值为 1~2(检测项目中含铯-137 则用盐酸酸化);海水样品采集后,原则上取无泥沙清样(如若需考虑对^{110m}Ag 吸附的处理),一般不需要进行过滤处理,仅当水中含泥沙量较高时,静置 24 h 后取上清液,再加浓硝酸酸化至 pH 值为 1~2;上述样品均尽快测量。地热水等样品可根据浑浊情况适当延长放置时间,或采用抽滤,处理后加浓硝酸酸化至 pH 值为 1~2。放射性碘样品以 1 L 水样加 2 mL~4 mL 次氯酸钠溶液(10%),确保过量氯。衰变链中含氡-222 的核素的样品制样需密封,放置约 21 d。暂存样品宜尽量防止挥发、蒸发和流失,一般封闭保存,水样保存期一般不超过 2 个月。

F.3 样品的制备

F.3.1 淡水的预处理

地表水、饮用水、地下水、降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。一般多采用蒸发浓缩法,蒸发浓缩法的操作步骤如下。

- a) 将所采样品转移至蒸发容器(如烧杯、瓷蒸发皿)中。
- b) 若检测项目无挥发性碘等元素时可使用电炉或沙浴加热蒸发容器,若检测项目有碘等挥发性元素,应用恒温电热板将温度控制在 70 °C 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。
- c) 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洗涤,并加入浓缩液中。遇到器壁上有悬浮物等吸附时,用淀粉仔细擦洗,洗涤合并入浓缩液。
- d) 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。
- e) 转移至测量容器后,如有继续浓缩的必要,可用红外灯加热,蒸发浓缩至效率刻度标准源的体积。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。
- f) 冷却后盖上测量容器盖,注意密封(必要时使用黏合剂),即可用于测量。

F.3.2 海水的预处理

F.3.2.1 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,搅拌吸附铯,其滤液呈碱性后,

加入二氧化锰粉末并搅拌,则锰、铁、钴、锌、锆、铈、钇、铈等元素被吸附。

F.3.2.2 试剂及仪器如下:

- a) 浓盐酸;
- b) 浓氨水;
- c) 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。

F.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) 向分离出的上清液中加氨水,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(样品样与效率刻度标准源的基质应相似,样品样应适当烘干、混匀后待测)。
- h) 测量容器的盖盖好密封后,待测量。

F.4 样品的测量

F.4.1 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;或根据样品探测下限的预估和检测要求进行直接装样测量;否则,进行必要的预处理。

F.4.2 制备样品的测量

测量(包括本底测量和样品测量)在相对探测器的几何条件和谱仪状态与刻度时一致的条件下进行:

- a) 如果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;
- b) 应测量模拟基质本底谱和空样品盒本底谱;
- c) 应按要求的计数误差控制测量时间。

附录 G

(资料性)

生物样品采集、制备与测量

G.1 生物样品的采集

G.1.1 陆生生物样品的采集

G.1.1.1 谷类、蔬菜类

谷类、蔬菜类样品的采样设备、采样点和采样方法及要求如下。

- a) 采样设备。用镰刀等工具收割或手摘取,采样容器用全新的蛇皮袋。
- b) 采样点。根据检测目的、要求确定采样地点。
- c) 采样方法及要求。植物样品的采集由等量采集多个采样点中的原始样品均匀混合而成;以当地居民消费较多和(或)种植面积较大的谷类为采集对象,于收获季节现场采集种植区的谷类干籽实;在蔬菜生长均匀的菜地选 5 处~7 处采集样品。

G.1.1.2 牧草

一般在有代表性的畜牧区内均匀划分 10 个等面积区域,在每个区域中央部位取等量的样品;根据检测目的、要求确定采样地点。

G.1.1.3 牛(羊)奶

牛(羊)奶样品的采样设备、采样点和采样方法及要求如下。

- a) 采样设备。玻璃瓶、塑料桶、塑料袋等。
- b) 采样点。根据检测目的、要求确定采样地点。
- c) 采样方法及要求。在养殖场直接采集新鲜样品或从市场购买(了解动物来源地)。根据检测目的,在养殖场、奶品生产地购买新鲜牛奶或从市场购买已知来源地的牛奶产品。

G.1.1.4 动物类

动物类样品的采样设备、采样点和采样方法及要求如下。

- a) 采样设备。保鲜袋、塑料袋等。
- b) 采样点。根据检测目的、要求确定采样地点。
- c) 采样方法及要求。在养殖场直接采集新鲜样品或从市场购买(了解动物来源地)。

G.1.1.5 指示生物类

松针直接用剪刀在松树上采集,苔藓从原野手工采集,浒苔在海岸边打捞,牡蛎委托渔民采样。

G.1.2 水生生物样品的采集

淡水生物采集食用鱼类、虾蟹和贝类等;海水生物采集浮游生物,底栖生物,海藻类和附着生物等,在捕捞季节于养殖区直接采集或从渔业公司购买确知捕捞区的海产品。

G.1.3 采样信息记录

采样信息包括样品名称、样品唯一性编号、采样地点(生产或捕捞地点)、采样时间(应精确到分)、样

品量、检测项目、加入的保存剂、保存方法、卫星定位、采样单位、采样人,以及有关采样环境特征等信息。

G.2 样品的运输和保存

G.2.1 样品的运输

G.2.1.1 应根据本实验室质量控制要求,认真填写送样单,并附采样现场记录。对照送样单和样品卡认真清点样品,检查样品包装是否符合要求,防止发生破损和洒漏,特别注意防止样品变质(必要时可采用冷藏或冷冻运输),确保安全送至实验室。

G.2.1.2 根据采样具体情况,采样后尽可能当日把样品运送至实验室;不能当日运抵的,可根据具体情况进行适当的样品保存处理。

G.2.2 样品的保存

生物样品采集后,及时处理,注意保鲜。牛(羊)奶样品采集后,立即加适量甲醛,防止变质,同时宜尽量防止挥发、蒸发和流失,一般封闭保存。

G.3 样品的制备

G.3.1 鲜样制备法

将采集的样品去掉不可食部分。蔬菜、果类生物样品,去除泥土、根须,去籽,根据检测要求,可洗净后用吸水纸拭干或不清洗样品;虾蟹、贝壳等生物样品浸泡一夜,使吐出泥沙,去外壳,取其软体部分;动物样品应分别取其肌肉和内脏等;鱼类取其肉;藻类采集的样品洗净根部,晾干表面水,取可食部分称重。然后称鲜重并视不同情况,将其切碎、剪碎、搅成肉末状或压碎后装入样品盒中踏实、压紧,制备成合适的样品用于 γ 能谱分析。

G.3.2 干样制备法

将不能直接测量的鲜样适当弄碎,进行冷冻干燥或放入清洁搪瓷盘内置于烘箱干燥。采用烘箱干燥时徐徐加温至 105°C ,烘十几至数十小时至干,然后称重并求出干鲜比。牛(羊)奶定量移入蒸发皿,缓慢加热蒸发至干。对含核素碘的样品,注意烘干温度控制在 70°C (在淡水处理中 70°C 蒸发),防止碘升华损失。干燥后的样品粉碎或研磨后再装样测量,有的样品可压缩成一定形状后再转入测量样品盒中进行测量。

G.3.3 灰样制备法

核素活度浓度较低的样品,需要进一步灰化浓缩才能测量,可采用干式灰化、湿式灰化或低温灰化。大量样品主要靠干式灰化。灰化时应严格控制温度,开始炭化阶段应慢慢升温,防止着火。为了使样品完全灰化或炭化,可对样品分多次灰化或炭化,同时在植物纤维、动物蛋白灰化时,容易产生空气污染,需通过排风进行多层过滤,除烟除异味。表 I.3 给出了部分样品灰化时着火的临界温度范围,对脂肪多的样品可加盖并留有适当缝隙或皂化后炭化。炭化完成后可较快地将温度升至 450°C ,并在该温度下灰化十至数十小时,使样品成为含炭量最少的灰。严格防止高温炉内温度过高,造成样品损失或烧结。对灰化时容易挥发的核素,如铯、碘和钆等,应视其理化性质确定其具体灰化温度或灰化前加入适当化学试剂,或改用其他预处理方法。待处理的样品中如需分析放射性铯时,灰化温度不宜超过 400°C 。对要分析碘的样品,灰化前应用 0.5 mol/L NaOH 溶液浸泡样品十几个小时。牛奶样品在蒸发浓缩或灰化前也应加适量的 NaOH 溶液。灰化好的样品在干燥器内冷却后称重,并计算灰鲜比,然后按需要量制备测量样品。

G.3.4 特殊生物样品

对于某些生物样品,如机体组织或器官、毛发、尿样、便样等样品,可能受到采样量限制,核素在机体内分布也不一样,因此应根据具体情况、特点和条件决定其采样和处理方法,以及具体的测量分析方式。

G.3.5 装样

根据样品放射性核素含量高低,样品量(质量或体积)多少,最低探测限要求、谱仪类型和其系统的主要性能指标,以及现有条件,选择最合适的样品盒装样。装样应满足以下原则要求。

- a) 选择与标准源规格、材质一致、未被放射性污染的样品盒。
- b) 对可能引起放射性核素壁吸附的样品(如液体或呈流汁状态样品),应选择壁吸附小或经一定壁吸附预处理的样品盒装样。
- c) 装样密度尽可能均匀,并尽量保证与效率刻度标准源的质量密度和体积一样。在达不到质量密度一致条件时,应保证样品均匀和体积一致。当体积也不能达到一致时,则保证样品均匀条件下准确记录装样体积和质量,以便对结果做体积和密度修正。
- d) 对含有易挥发核素或伴有放射性气体生成的样品,以及需要使母子体核素达到平衡后再测量的样品,在装样后应密封适当时间。
- e) 对样品量充足,预测核素含量很低,装样密度又小于效率刻度标准源的样品(通常可能是一些直接分析的样品),可以选用特殊的工具和手段(如压样机),把样品尽可能压缩到样品盒中。
- f) 样品体积和样品质量宜尽量精确,前者偏差应控制在5%以内,后者应小于1%。

G.4 样品的测量

测量(包括本底测量和样品测量)在相对探测器的几何条件和谱仪状态与刻度时一致的条件下进行:

- a) 应测量模拟基基本底谱和空样品盒本底谱;
- b) 应按要求的计数误差控制测量时间。

附 录 H
(资料性)
空气样品采集、制备与测量

H.1 样品的采集**H.1.1 空气样品的采集****H.1.1.1 材料与设备**

样品采集所需的材料和设备如下。

- a) **空气采样系统。**空气采样系统主要包括空气采样器、流量测量与控制装置、抽气动力。
- b) **过滤介质。**应根据采样目的和采集对象,选用合适的过滤介质。过滤介质的有效采样面积应与空气采样器采样窗面积相符。本文件推荐常用的三种用途的过滤介质:
 - 1) 超细玻璃纤维滤纸,用于采集放射性气溶胶微粒;
 - 2) 活性炭滤纸,用于放射性气溶胶微粒或气态碘等采集;
 - 3) 活性炭滤筒,用于采集气态有机碘化物。
- c) **流量测量与控制装置。**流量测量与控制装置应具有即时流量显示、流量调节和采集体积累积等功能,流量测量装置应经法定计量单位标定,精度应优于5%。
- d) **抽气动力。**抽气动力应与流量控制装置联动实现流量调节和维持流量恒定功能。
- e) **样品盒。**它用于装过滤介质样品供 γ 能谱仪直接测量,样品盒材质宜选用聚乙烯。

H.1.1.2 采样点

采样点的设置原则如下。

- a) **环境空气采样。**环境空气采样指在核设施、辐射源或非密封源放射工作场所等边界外的环境中进行的空气采样,主要用于环境空气辐射水平的检测。空气的采样点应选择在周围没有树木、没有建筑物影响的开阔地,或在没有高大建筑物影响的建筑物的无遮盖平台上,采样口高出基础面1.5 m。在事故空气污染检测时,要特别注意采样的时效性和地理分布情况。
- b) **工作场所空气采样。**工作场所空气采样指在核设施、辐射源或非密封源放射工作场所等边界内进行的空气采样,主要用于工作场所空气辐射水平的检测。在没有个体空气采样器的情况下,可用于吸入空气的内照射个人剂量的估算。这时的采样点应设置在可能发生空气放射性污染的关键位置,通常采用固定点采样,其采样高度距地面1.5 m。
- c) **个体空气采样。**对放射性工作人员吸入工作场所中放射性污染空气进行检测宜采用个体空气采样器进行采样。个体空气采样器应佩带在呼吸带相应的人体部位进行采样,其空气采样速率应与人的呼吸率近似,佩带的时间取决于污染核素的类型和空气中的放射性核素活度浓度水平。

H.1.1.3 采样方法

采样方法如下。

- a) 检查采样滤膜介质和规格,先检查有无漏光现象,将完好无损的滤膜编号、登记、称重。
- b) 采样器的流量计、温度计、湿度计、气压表应经过计量检定,确认其性能良好后方可采样。

- c) 确定每个采样点采样时间、瞬时流量和累积采样量。
- d) 采样过程中的温度和气压由采样仪器自动监测,每次采样详细记录开机与关机的时间及相关的
环境数据,记下采样量,并在样品袋上注明。
- e) 空气采样的体积与修正计算方法如下:

- 1) 空气采样体积由式(H.1)得到采样状态下的采样体积 V_r :

$$V_r = Q \times t \quad \dots\dots\dots (H.1)$$

式中:

V_r —— 采样状态下的采样体积,单位为立方米(m^3);

Q —— 空气流量,单位为立方米每分(m^3/min);

t —— 采样时间,单位为分(min)。

- 2) 空气采样的体积修正,气压和温度会影响气体采样的体积,当采样位置温度低于 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 或高于 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 、大气压低于 98.8 kPa 或高于 103.4 kPa 时,用式(H.2)将采集空气的体积修正为标准状态下的体积 V_0 :

$$V_0 = V_r \times \frac{T_0 \times P}{T \times P_0} \quad \dots\dots\dots (H.2)$$

式中:

V_0 —— 标准状态下的气体体积,单位为立方米(m^3);

V_r —— 采样状态下的气体体积,单位为立方米(m^3);

T_0 —— 标准状态下的空气绝对温度, $T_0 = 273.15\text{ }^\circ\text{C} + 20\text{ }^\circ\text{C}$;

P —— 采样时的大气压,单位为千帕(kPa);

T —— 采样状态下的空气绝对温度,采样时的摄氏温度值与 273.15 的和;

P_0 —— 标准状态下的大气压, $P_0 = 101.3\text{ kPa}$ 。

H.2 样品的采样信息、运输和保存

H.2.1 采样信息记录

采样信息包括样品名称、样品唯一性编号、检测项目、采样开始时间、结束时间、采样体积、采样现场温度和气压、采样位置、卫星定位、周围环境特征、采样单位、采样人、样品编号等信息。

H.2.2 样品的运输

应根据本实验室质量控制要求,认真填写送样单,并附采样现场记录。对照送样单和样品卡认真清点样品,检查样品包装是否符合要求,防止发生破损和洒漏,确保安全送至实验室。

H.2.3 样品的保存

样品暂存入实验室样品库,宜尽量防止挥发、蒸发和流失,一般封闭保存,根据分析核素半衰期和有机物的情况尽早进行预处理。

H.3 样品的制备

样品采集后,取出滤膜,置于干燥器,压样或者密封后,装入样品盒固定几何位置待测。气碘样品盒要密封,防止挥发丢失和污染设备。

H.4 样品的测量

样品的测量程序如下。

- a) **过滤介质本底测量。**取同批干净过滤介质,放于样品盒中加盖密封,在与效率刻度相同的条件下测量,测量时间一般不少于 24 h。
- b) **样品的测量。**将采完样的过滤介质放于样品盒内,在与效率刻度相同的条件下测量。应按要求的计数误差控制测量时间。

附录 I

(资料性)

生物样品的干鲜比、灰鲜比和灰化时着火的临界温度范围

I.1 常见生物样品的干鲜比

常见生物样品的干鲜比见表 I.1。

表 I.1 常见生物样品的干鲜比

名称	干燥方法	干鲜比	1 kg 干样需原样 kg	名称	干燥方法	干鲜比	1 kg 干样需原样 kg
菠菜	烘箱干燥	1 : 10	10	白菜	冷冻干燥	1 : 17	17
胡萝卜	烘箱干燥	1 : 9	9	胡萝卜	冷冻干燥	1 : 10	10
土豆	烘箱干燥	1 : 5	5	芹菜	冷冻干燥	1 : 16	16
白萝卜	烘箱干燥	1 : 17	17	苹果	冷冻干燥	1 : 6	6
茄子	烘箱干燥	1 : 17	17	小麦	冷冻干燥	1 : 1	1
豆角	烘箱干燥	1 : 11	11	玉米	冷冻干燥	1 : 1	1
枣	烘箱干燥	1 : 5	5	猪肉	冷冻干燥	1 : 4	4
大米	烘箱干燥	1 : 1	1	牛肉	冷冻干燥	1 : 4	4
牛肉	烘箱干燥	1 : 4	4	鱼	冷冻干燥	1 : 3	3
羊肉	烘箱干燥	1 : 4	4	鸡肉	烘箱干燥	1 : 4	4
猪肝	烘箱干燥	1 : 3	3	牛乳	烘箱干燥	1 : 8	8
大虾	烘箱干燥	1 : 4	4	海藻	烘箱干燥	1 : 6	6
虾皮	烘箱干燥	1 : 3	3	黄豆	烘箱干燥	1 : 1	1
干海带	烘箱干燥	1 : 1	1	虾蛄(皮皮虾)	烘箱干燥	1 : 5	5
鲛鱼	烘箱干燥	1 : 3	3	螃蟹	烘箱干燥	1 : 4	4

注 1: 大米、虾皮、海带采集时为自然状态下干样,预处理时予以烘干。
注 2: 本表中数值为我国北方地区制作干粉样品的一些典型值,随样品组成和环境条件的不同,本表中值可能在一定范围内波动。
注 3: 本表中数据取自 2015 年国家食品放射性污染风险监测中的实验数据。

I.2 部分生物样品的灰鲜比

部分生物样品的灰鲜比见表 I.2。

表 I.2 部分生物样品的灰鲜比

名称	灰鲜比 ^a %	10 g 灰需原样 kg	名称	灰鲜比 ^a %	10 g 灰需原样 kg
豆类(干)	3.8	0.3	土豆	1.1	0.9
蛋类(带壳)	1.0	1.0	水果(罐头)	0.27	3.7
面粉	0.48	2.1	水果(鲜)	0.62	1.6
大米	0.65	1.5	蔬菜(鲜)	0.75	1.3
小麦	1.7	0.6	蔬菜(根类)	0.76	1.3
鱼类	1.3	0.8	奶	0.7	1.4
贝壳类	1.8	0.6	奶粉	6	0.2
肉类	0.92	1.1	酪乳粉	11	0.1
家禽	0.81	1.2	面包(白)	2.1	0.5
通心粉	0.7	1.4	面包(全麦)	2.4	0.4

注：本表中数据取自 IAEA *Technical Report Series* No.295, 1989。

^a 灰鲜比是在日常工作中对该样品求得的一个平均值,这些数值可有高达 25% 的变化,它取决于各种样品的组成和灰化条件。

I.3 部分样品灰化时着火的临界温度范围

部分样品灰化时着火的临界温度范围见表 I.3。

表 I.3 部分样品灰化时着火的临界温度范围

名称	温度 ℃	名称	温度 ℃
蛋	150~250	根类蔬菜	200~325
肉	150~250	牧草	200~250
鱼	150~250	面粉	175~250
水果(鲜)	175~325	干豆类	175~250
水果(罐头)	175~325	水果汁	175~225
牛奶	175~325	谷物	225~325
蔬菜(罐头)	175~225	通心粉	225~325
蔬菜(鲜)	175~225	面包	225~325

注 1: 本表中数据取自 IAEA *Technical Report Series* No.295, 1989。

注 2: 本表中某类生物样品中可能含有多个品种,其中所含的成分不尽相同,使得其初始着火温度范围较大。

附录 J

(资料性)

样品 γ 能谱分析方法中存在的可能干扰核素及 γ 射线样品 γ 能谱分析方法中存在的可能干扰核素及 γ 射线列于表 J.1。表 J.1 样品 γ 能谱分析方法中存在的可能干扰核素及 γ 射线

核素	能量 keV	发射分支比 %	半衰期 d	干扰核素	能量 keV	发射分支比 %	半衰期 d
^{51}Cr	320.084	9.87	27.703	^{239}Np	315.88	1.59	2.356
				^{105}Rh	319.24	19.6	1.50
				^{147}Nd	319.41	1.991	10.987
				^{223}Ra	323.87	4.06	半衰期同 ^{235}U
				^{219}Rn	323.87	4.06	半衰期同 ^{235}U
^{54}Mn	834.854	99.975 2	312.19	^{211}Bi	831.8	3.3	半衰期同 ^{235}U
				^{234}Pa	831.8	5.7	半衰期同 ^{238}U
				^{211}Pb	831.8	3	半衰期同 ^{235}U
				^{228}Ac	835.70	1.70	半衰期同 ^{232}Th
^{57}Co	122.06	85.51	271.80	^{239}Np	117.13	7.84	2.356
				^{239}Np	121.02	2.72	2.356
				^{223}Ra	122.32	1.238	半衰期同 ^{235}U
				^{219}Rn	122.32	1.238	半衰期同 ^{235}U
^{58}Co	810.76	99.44	70.85	^{234}Pa	806.2	3.3	半衰期同 ^{238}U
^{59}Fe	1 099.24	56.59	44.495	—	—	—	—
	1 291.59	43.21	44.495	—	—	—	—
^{60}Co	1 173.23	99.85	1 923.95	—	—	—	—
	1 332.49	99.982 6	1 923.95	—	—	—	—
^{65}Zn	1 115.54	50.22	244.01	^{214}Bi	1 120.29	14.91	半衰期同 ^{238}U
				^{46}Sc	1 120.54	99.986	83.788
^{95}Zr	724.19	44.27	64.032	^{126}Sb	720.3	53.8	12.4
				^{143}Ce	721.93	5.39	1.377
				^{124}Sb	722.78	10.708	60.208
				^{127}Sb	721.5	1.77	3.85
				^{212}Bi	727.33	6.65	半衰期同 ^{232}Th
	756.73	54.38	64.032	^{140}La	751.65	4.392	1.678 5
^{95}Nb	765.80	99.808	34.991	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	763.94	22.31	249.78
				^{214}Bi	768.36	4.892	半衰期同 ^{238}U

表 J.1 样品 γ 能谱分析方法中存在的可能干扰核素及 γ 射线 (续)

核素	能量 keV	发射分支比 %	半衰期 d	干扰核素	能量 keV	发射分支比 %	半衰期 d
^{103}Ru	497.08	89.5	39.255	^{115}Cd	492.29	8.1	2.23
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	657.76	94.38	249.78	^{126}Sb	656.3	2.2	12.4
	884.68	74.0	249.78	^{137}Cs	661.66	84.9	10 968.25
				^{234}Pa	880.8	13.0	半衰期同 ^{238}U
	1 384.29	24.7	249.78	^{234}Pa	883.2	12.0	半衰期同 ^{238}U
^{46}Sc				889.27	99.983 3	83.788	
^{124}Sb	602.73	97.775	60.208	^{125}Sb	600.60	17.76	1 006.87
				^{127}Sb	603.9	4.21	3.85
				^{192}Ir	604.41	8.20	73.827
	1 690.97	47.46	60.208	^{134}Cs	604.72	97.63	753.506
				^{126}Sb	605.0	2.4	12.4
				^{125}Sb	606.71	5.02	1 006.87
				—	—	—	—
176.334	6.89	1 008.1	^{136}Cs	176.60	10.0	13.16	
^{125}Sb	427.87	29.55	1 006.87	^{99}Mo	181.07	6.01	2 747.9
				^{140}Ba	423.72	8.11	12.753
				^{209}Bi	426.9	1.9	半衰期同 ^{235}U
	600.60	17.76	1 006.87	^{211}Pb	427.15	1.81	半衰期同 ^{235}U
				^{140}La	432.51	2.995	1.678 50
				^{124}Sb	602.73	97.775	60.208
				^{127}Sb	603.9	4.21	3.85
635.95	11.32	1 006.87	^{192}Ir	604.41	8.20	73.827	
			^{134}Cs	604.72	97.63	753.506	
			^{126}Sb	605.0	2.4	12.4	
^{131}I	364.49	81.2	8.023 3	^{131}I	636.99	7.12	8.023 3
				^{210}Tl	360.0	4	半衰期同 ^{238}U
				^{99}Mo	366.42	1.194	2 747.9
^{134}Cs	604.72	97.63	753.506	^{234}Pa	369.8	3.4	半衰期同 ^{238}U
				^{125}Sb	600.60	17.76	1 006.87
				^{124}Sb	602.73	97.775	60.208
				^{127}Sb	603.9	4.21	3.85
^{134}Cs	604.72	97.63	753.506	^{192}Ir	604.41	8.20	73.827

表 J.1 样品 γ 能谱分析方法中存在的可能干扰核素及 γ 射线 (续)

核素	能量 keV	发射分支比 %	半衰期 d	干扰核素	能量 keV	发射分支比 %	半衰期 d
^{134}Cs	604.72	97.63	753.506	^{126}Sb	605.0	2.4	12.4
				^{125}Sb	606.71	5.02	1 006.87
				^{214}Bi	609.31	45.49	半衰期同 ^{238}U
				$^{131\text{m}}\text{Te}$	793.75	14.1	1.25
				^{210}Tl	799.6	98.969	半衰期同 ^{238}U
				^{228}Ac	794.94	4.31	半衰期同 ^{232}Th
				^{234}Pa	796.6	3.9	半衰期同 ^{238}U
^{137}Cs	661.66	84.99	10 968.25	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	657.76	94.38	249.78
				^{143}Ce	664.57	5.69	1.40
				$^{131\text{m}}\text{Te}$	665.05	4.5	1.25
				^{214}Bi	665.45	1.530	半衰期同 ^{238}U
				^{126}Sb	666.2	100	12.4
^{141}Ce	145.44	48.29	32.503	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	140.51	88.5	0.250 28
				^{238}U	143.78	9.7	2.57×10^{11}
				^{219}Rn	144.3	3.2	半衰期同 ^{235}U
				^{223}Ra	144.27	3.36	半衰期同 ^{235}U
				$^{131\text{m}}\text{Te}$	149.72	20.0	1.25
^{144}Ce	133.54	11.0	285.0	^{228}Ac	129.07	2.50	半衰期同 ^{232}Th
				^{234}Pa	131.2	20	半衰期同 ^{238}U
				^{57}Co	136.47	10.71	271.80

注 1: 本表中上述所有数据来源于《食物和环境样品中放射性核素的测量与评价》、《实验室 γ 能谱测量与分析》, BIPM 出版的 *Mini Table of Radionuclides* (2015)。列出了用 HPGe γ 能谱分析技术测定生物样品中的 γ 放射性核素时可能存在的干扰核素和 γ 射线。它们被入选的原则是其能量偏差 ΔE 在 ± 5 keV 范围以内; 半衰期 ≥ 1 d; γ 发射分支比 $\geq 1\%$ 。

注 2: 本表中 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{232}Th 的子体核素在平衡状态下,其半衰期可用母体核素代替;其中 ^{235}U 半衰期为 7.038×10^8 a; ^{238}U 半衰期为 4.468×10^9 a; ^{232}Th 半衰期为 1.405×10^{10} a。

附录 K

(资料性)

γ能谱分析中不确定度评定方法举例

K.1 不确定度的主要来源

本附录以生物样品为例,对γ能谱分析中不确定度的主要来源及不确定度评定方法进行说明。γ能谱分析中不确定度的主要来源及典型值,以生物样品为例列在表 K.1 中。

表 K.1 生物样品 γ能谱分析中不确定度的主要来源

不确定度来源	典型不确定度范围 %	典型不确定度 %
计数	0.1~20	5
γ发射分支比	0.1~11	<2
自吸收修正	0.1~6	<1
符合相加修正	1~15	<3
半衰期	0.01~1	<0.2
效率刻度	1~6	2
放射化学操作	1~16	3
样品称重	0.01~1	<0.5

注:数据来源于 IAEA-TECDOC-1401,2004。

K.2 不确定度评定举例

以生物样品 γ能谱分析为例说明不确定度评定的方法,其他样品 γ能谱分析的不确定度评定与此类似。生物样品 γ能谱分析情况描述如下:

- 技术:使用同轴型高纯锗(HPGe)γ能谱仪(相对效率 150%)进行γ能谱测定,使用含不同γ射线能量的标准混合放射性核素进行效率计算;
- 样品:样品质量为 70 g,在形状为 $\phi 7.9 \text{ cm} \times 1.0 \text{ cm}$ 的样品盒中分析,将样品冷冻干燥,研磨,均质化并筛分;
- 分析核素: ^{40}K ;
- 检测项目: ^{40}K 的活度浓度;
- 不确定度来源:生物样品 ^{40}K 分析中不确定度的来源及其量化列于表 K.2;
- 评定结果:检测结果(核素活度浓度) $A_b = 7.1 \text{ Bq/kg}$ 。

不确定度评定结果列于表 K.3。

表 K.2 生物样品⁴⁰K 分析中不确定度的来源及其量化

不确定度分量		标准不确定度	
符号	不确定度来源	估算方法	相对值 %
u_{B1} (样品制备)	样品质量	按制造商数据重复称重或估计,假设高斯分布	0.15
	样品损失或污染	属非破坏性分析,可忽略	
	样品不均匀性	基于以前的经验,这个样本量时可以忽略不计	
	样品浓缩	未使用	
u_A (计数)	效率刻度	使用商业软件从拟合的校准曲线估计	2.8
	仪器的稳定性	由于使用的设备保持在稳定的环境,可忽略其贡献	
	样品和标准源几何形状的差异	样本和标准计数几何形状没有差异,对不确定性没有贡献	
u_{B2} (衰变修正)	采样时刻到样品测量时刻的衰变修正	从表达式估计,对于长寿命核素 ⁴⁰ K 可忽略其贡献	0
	测量过程中的衰变修正	从表达式估计,对于长寿命核素 ⁴⁰ K 可忽略其贡献	
u_{B3}	自吸收修正	需要时根据蒙特卡罗模拟进行估计	1.3
u_{B4}	随机符合修正	从表达式估计,低计数率时其贡献可忽略不计	0
u_{B5}	级联符合修正	需要时根据蒙特卡罗模拟进行估计	0
u_{B6}	样品峰净面积的本底修正	当为泊松分布时根据测量结果(本底和样品)估计	8.2
u_{B7}	γ 发射分支比	基于核衰变数据,假设高斯分布	1.0
注: 信息来自 IAEA-TECDOC-1401:2004。			

表 K.3 生物样品⁴⁰K 分析中不确定度的评定结果

不确定度分量		各分量的相对标准 不确定度 %	各不确定度分量的 平方值 ^a %	各不确定度分量对合成 不确定度的百分贡献 ^a %
符号	分量类别			
u_{B1}	样品制备	0.15	0.022 5	0.03
u_A	计数	2.8	7.84	10.1
u_{B2}	核衰变修正	0	0	0
u_{B3}	自衰减修正	1.3	1.69	2.17
u_{B4}	随机求和的修正	0	0	0
u_{B5}	符合修正	0	0	0
u_{B6}	样品峰净面积的本底修正	8.2	67.24	86.4
u_{B7}	γ 发射分支比	1.0	1.0	1.3
—	—	—	77.79(合计)	—
注: 数据是来源于 IAEA-TECDOC-1401:2004。				
^a 基于 IAEA-TECDOC-1401:2004 的重新估算值。				

由表 K.3 各分量的相对标准不确定度依据式(6)计算得相对合成不确定度 $u_c = 8.8\%$;

相对扩展不确定度 $U=18\%$ (包含因子 $k=2$);

测量值(核素活度浓度) $A_b=7.1 \text{ Bq/kg}$;

测量值 \pm 扩展不确定度 $= (7.1 \pm 1.3) \text{ Bq/kg}$ 。

附 录 L
(资料性)
探测限

在 γ 能谱仪测量过程中,对于本底计数(N_b)足够大(大于 30)的情况,样品中某核素的活度浓度探测限可按式(L.1)来计算:

$$DL = \frac{k_{1-\alpha} + k_{1-\beta}}{\epsilon P m} \sqrt{n_b \left[\frac{1}{T_b} + \frac{1}{T_s} \right]} \quad \dots\dots\dots (L.1)$$

式中:

- DL ——样品的活度浓度探测限,单位为贝可每千克(Bq/kg)、贝可每升(Bq/L)或贝可每立方米(Bq/m³);
- $k_{1-\alpha}$ ——正态分布的 $1-\alpha$ 百分位数(概率 α 通常取为 5%,在这种情况下 $k_{1-\alpha}=1.645$);
- $k_{1-\beta}$ ——正态分布的 $1-\beta$ 百分位数(概率 β 通常取为 5%,在这种情况下 $k_{1-\beta}=1.645$);
- ϵ ——相应能量 γ 射线全能峰探测效率,单位为计数率每贝可[(计数/s)/Bq];
- P ——相应能量 γ 射线发射分支比;
- m ——测量样品的质量或体积(当测量样品不是采集的样品直接装样测量时, m 则为相应于采集时的样品质量或体积),单位为千克(kg)、升(L)或立方米(m³);
- n_b ——本底计数率,可以通过空白样品的测量来确定($n_b=N_b/T_b$);
- T_b ——本底测量活时间,单位为秒(s);
- T_s ——样品测量活时间,单位为秒(s)。

参 考 文 献

- [1] GB/T 5750.2—2006 生活饮用水标准检验方法 水样的采集与保存
- [2] GB/T 11713—2015 高纯锗 γ 能谱分析通用方法
- [3] GB 14883.1—2016 食品安全国家标准 食品中放射性物质检验 总则
- [4] GB 17378.3—2007 海洋监测规范 第3部分:样品采集、贮存与运输
- [5] GB 18871—2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准
- [6] HJ 61—2021 辐射环境监测技术规范
- [7] HJ 493—2009 水质 样品的保存和管理技术规定
- [8] 《环境科学大辞典》委员会. 环境科学大辞典[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1991.
- [9] 任天山, 吴生财. 食物和环境样品中放射性核素的测量与评价[M]. 北京:原子能出版社, 1992.
- [10] ISO 19581 : 2017 Measurement of radioactivity—Gamma emitting radionuclides—Rapid screening method using scintillation detector gamma-ray spectrometry
- [11] ISO 28218 : 2010 Radiation protection—Performance criteria for radiobioassay
- [12] IAEA Technical Report Series No. 295 : 1989 Measurement of radionuclides in food and the environment. Vienna : IAEA, 1989.
- [13] IAEA-TECDOC-1401:2004 Quantifying uncertainty in nuclear analytical measurements
- [14] IAEA Safety Standards Series No. GSG-7 : 2018 Occupational Radiation Protection. Vienna : IAEA, 2018.
- [15] National Institute of Standards and Technology report. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z=1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest. NISTIR 5632.[MD].Gaithersburg:NIST,1995.
- [16] FDA.Determination of gamma-ray emitting radionuclides in foods by high-purity germanium spectrometry, FDA office of regulatory affairs, Winchester Engineering and Analytical Center, WEAC.RN.Method.3.0, Version 7.1[R].Washington:FDA,2010.
- [17] Mini Table of Radionuclides, BIPM, 2015.
-

中华人民共和国
国家标准
环境及生物样品中放射性核素的
 γ 能谱分析方法
GB/T 16145—2022

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址 www.spc.net.cn

总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 3 字数 87 千字
2022年12月第一版 2022年12月第一次印刷

*

书号: 155066·1-71822 定价 64.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107



GB/T 16145-2022



码上扫一扫 正版服务到