



中华人民共和国国家标准

GB/T 16140—1995

水中放射性核素的 γ 能谱 分析方法

Gamma spectrometry method for analysis of
radionuclides in water

1996-01-23 发布

1996-07-01 实施

国家技术监督局
中华人民共和国卫生部

发布

水中放射性核素的 γ 能谱
分析方法

GB/T 16140—1995

Gamma spectrometry method for analysis of
radionuclides in water

1 主题内容与适用范围

本标准规定了使用高分辨半导体或NaI(Tl) γ 能谱仪测定水中放射性核素的方法。

本标准适用于在实验室中分析特征 γ 射线能量大于50 keV,活度不低于0.4 Bq的放射性核素。如果待测样品全谱计数率超过1 000 计数/s时应采取适当的稀释措施。

2 γ 能谱仪

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

2.1 探测器

2.1.1 碘化钠探测器[NaI(Tl)]:由尺寸不小于 $\phi 7.5\text{ cm} \times 7.5\text{ cm}$ 的圆柱形NaI(Tl)晶体和低噪音光电倍增管组成。整个晶体密封于有透光窗的密封容器内,晶体和光电倍增管之间形成光耦合。探测器对 ^{137}Cs 的661.6 keV光峰的分辨率应小于9%。

2.1.2 半导体探测器,Ge(Li)或高纯锗探测器的灵敏体积大于 50 cm^3 ,对 ^{60}Co 的1 332.5 keV γ 射线的能量分辨率小于2.2 keV。低噪声场效应管电荷灵敏前置放大器应和探测器组装在一起。

2.2 屏蔽室:探测器应置于铅当量厚度不小于10 cm的金属屏蔽室中,屏蔽室内壁距探测器表面的距离应不小于13 cm。屏蔽室为铅室或有铅内衬,在屏蔽室的内表面应有原子序数逐渐递减的多层内屏蔽层。由外向内依次由1.6 mm镭,0.4 mm电解紫铜和2~3 mm的有机玻璃等组成。屏蔽室应有便于取放样品的门或孔。

2.3 高压电源:稳定性好于0.1%,纹波电压不大于0.01%,对于半导体探测器高压应在0~5 kV内连续可调,电流1~100 μA 。

2.4 谱放大器:应与前置放大器和多道分析器相匹配。

2.5 数据获取和存储设备

2.5.1 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-数转换器执行 γ 能谱仪的数据获取功能。对于NaI(Tl)谱仪多道分析器不少于256道,对于高分辨 γ 谱仪,多道分析器不少于4 096道。

2.5.2 存储器:多道分析器要有足够的数据存储和把谱数据的任一部分向一个或多个终端设备传输的能力,这些终端设备可以是行打印机、盒式磁带、软盘、硬盘、X-Y绘图仪、串或并接计算机接口。

2.6 数据处理系统:应具备用于 γ 能谱分析的各种常规程序,如能量刻度、效率刻度、谱光滑、寻峰、峰面积计算和重峰分析等功能。

2.7 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 按照使用说明书的要求安装和调整个 γ 能谱仪系统,使处于正常工作状态。

3.1.2 准备一套用于 γ 能谱能量刻度的系列刻度源(或标准源)。

3.1.2.1 能量范围覆盖所需能量区间(通常为 50 keV~2 000 keV)、适于作能量刻度的单能或多能 γ 射线核素见表 1。

表 1 适于作能量刻度的 γ 放射性核素

核素	半衰期	γ 射线能量,keV
²¹⁰ Pb	22.3a	46.5
²⁴¹ Am	432.3a	59.5
¹⁰⁹ Cd	464.0d	88.0
⁵⁷ Co	270.9d	122.1
¹⁴¹ Ce	32.5d	145.5
⁶¹ Cr	27.7d	320.1
¹³⁷ Cs	30.17d	661.6
⁶⁴ Mn	312.7d	834.8
²² Na	2.60a	511,1 275
⁸⁸ Y	106.66d	898,1 836
⁶⁰ Co	5.26a	1 173.2,1 332.5
¹⁵² Eu	4 869d	121.7,244.7,344.3,444.9,778.9,867.4,964.1,1 085.9,1 112.1,1 408

3.1.2.2 对用于能量刻度的刻度源,其外表面必须无放射性污染,其活度应使特征峰的计数率达到 100 计数/s。

3.1.3 制备用于效率刻度的系列刻度源(或标准源)

3.1.3.1 效率刻度源的核素取决于拟采取的 γ 谱分析方法。当采用效率曲线求解样品中核素的浓度时,可采用 3.1.2.1 条中所提到的单能或多能 γ 射线核素;当采用相对比较法或逆矩阵法时,刻度源的核素要与样品中的核素一一对应。

3.1.3.2 效率刻度源的体积、形状、基质的主要物理化学特性以及容器必须与待测样品相同。

3.1.3.3 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于国家法定计量部门。标准溶液活度的标准偏差应小于 $\pm 3.5\%$,刻度源的活度在 50~10 000 Bq 之间。

3.1.3.4 γ 能谱效率刻度源由模拟基质加特定核素的标准溶液制备而成,它必须满足核素含量准确、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小于 $\pm 2\%$ 。

3.1.4 准备测量几何条件能准确重复的样品和刻度源容器。容器应有良好的密封性,以保证不会污染环境和工作人员。样品容器和刻度源容器应相同。

3.2 能量刻度

3.2.1 对高分辨 γ 谱仪通常将能量-道址转换系数调在每道 1 keV 或 0.5 keV。对 NaI(Tl) γ 谱仪,以每道 5 keV 为宜。

3.2.2 能量刻度至少应包括四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。计算机化的能谱系统，则利用终端给出刻度系数。高分辨 γ 谱仪的非线性不得超过0.5%，NaI(Tl)谱仪的非线性不得超过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质本底能谱测量)时的谱仪状态必须与能量刻度时相同。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。在对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 全能峰效率用式(1)计算：

$$\eta = N_p / N_s \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中： η ——全能峰效率；

N_p ——所考虑的全能峰的净计数率， s^{-1} ；

N_s ——已作过衰变校正的该能量 γ 射线的发射率， s^{-1} 。

如果刻度源的定值是以活度为单位的，则

$$N_s = S \cdot P \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中： S ——核素每秒的衰变数；

P ——每次衰变发射该能量 γ 射线的几率。

3.3.4 以 γ 射线能量为横坐标，全能峰效率为纵坐标，在对数坐标纸上作全能峰效率和 γ 射线能量的关系曲线(效率曲线)或用计算机对实验点作最小二乘法拟合求效率曲线。在50~2 000 keV范围内用式(3)表示；

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

式中： η ——全能峰效率，%；

E_{γ} ——相应的 γ 射线能量，keV；

a_i ——拟合常数。

图1是Ge(Li) γ 谱仪的一组典型效率曲线。

3.3.5 全能峰效率确定以后，如果探测器的分辨率、测量的几何条件和系统配置等没有变化，则无需再刻度。

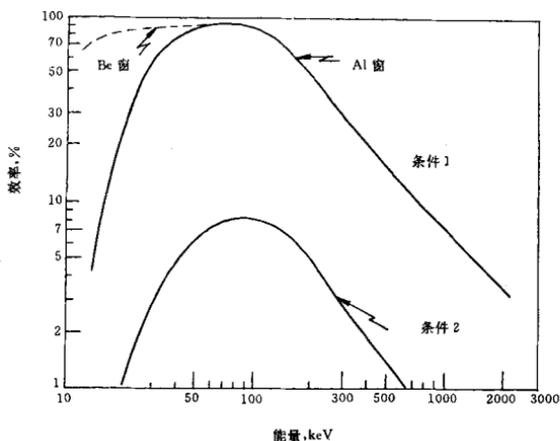


图 1 高分辨半导体探测器的效率曲线

4 样品准备

4.1 一次分析所需水样的量 V 由式(4)计算:

$$V = \frac{LLD}{Q \cdot r} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中: V ——一次分析所需用水量, L;

LLD —— γ 能谱系统的探测下限, Bq;

Q ——样品中核素的预计浓度, Bq/L;

r ——预处理过程中核素回收率。

如果要求作 N 个平行样, 需要的总水样量为 NV 。

4.2 当水样中的放射性核素浓度大于 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 水样品预处理要能在不损失原样品中放射性核素的条件下均匀地浓缩以便制成适于 γ 能谱测量分析的样品。降水(雨水、雪水)、淡水(河水、湖水、饮用水等)和海水样品的预处理方法参见附录 A(补充件)。

5 测量

5.1 测量(本底测量和样品测量)时样品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 应测量模拟基质本底谱和空样品盒本底谱。

5.3 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质的本底计数;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 逆矩阵法求核素浓度:用于样品中核素成分(3~5个)已知,且谱中光峰又部分重叠的情况(如用NaI(Tl)γ能谱作水的常规分析)。

6.2.1 特征道区的选择原则:

- a. 对于发射多种能量γ射线的核素,特征道区应选择分支比最大的γ射线全能峰区;
- b. 如果一种核素发射几种能量的γ射线的几率差不多,则应该选择无其他核素γ射线重叠干扰、能量适中的γ射线全能峰区;
- c. 如果两种核素发射几率最大的γ射线重叠,则其中一种核素就只能取其次要的γ射线作为特征峰;
- d. 特征道区宽度的选取应使多道分析器的漂移效应以及相邻峰的重叠保持最小。

6.2.2 浓度计算:在求得多种核素混合样品的γ能谱中某一特征道区的净计数率后,样品中的第j种核素的浓度可用式(5)计算:

$$Q_j = \frac{1}{VD_j} X_j = \frac{1}{VD_j} \sum_{i=1}^m a_{ij}^{-1} \cdot C_i \quad j = 1, 2, \dots, m \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中: Q_j —— 第j种核素浓度, Bq/L;

m —— 特征道区数;

a_{ij} —— 第j种核素对第i个特征道区的响应系数;

C_i —— 混合样品γ谱在第i个特征道区上的净计数率;

X_j —— 测样中第j种核素的活度, Bq;

D_j —— 第j种核素的校正到采样时的衰变校正因数;

V 的定义见式(4)。

6.3 根据全能峰效率曲线求核素浓度

6.3.1 根据效率曲线或效率曲线的拟合函数求出相应能量γ射线的全能峰效率值,然后用式(6)计算水样中核素的浓度:

$$Q_j = \frac{A_{ji} - A_{jib}}{P_{ji} \eta_i D_j V} \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中: A_{ji} —— 被测样品第j种核素的第i个特征峰的全能峰面积, 计数/s;

A_{jib} —— 与 A_{ji} 相对应的光峰的本底计数率, 计数/s;

P_{ji} —— 第j个核素发射第i个γ射线的几率;

η_i —— 第i个γ射线特征峰的全能峰效率值;

Q_j, D_j 的意义见式(5);

V 的定义见式(4)。

6.3.2 本方法适用于没有待测核素效率刻度源可以利用的情况。

6.4 用相对比较法求解核素浓度

6.4.1 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(7)计算各个刻度源的刻度系数 K_{ji} :

$$K_{ji} = \frac{S_j}{A_{jia}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中: K_{ji} —— 各个刻度源的 K_{ji} ;

S_j —— 第j种核素效率刻度源的活度, Bq;

A_{jia} —— 第j种核素效率刻度源的第i个特征峰的全能峰面积, 计数/秒。

6.4.2 被测样品中第j种核素的浓度可用式(8)计算:

$$Q_i = \frac{K_{\mu}(A_{\mu} - A_{\mu a})}{V D_i} \dots\dots\dots (8)$$

式中各符号定义及单位见式(6)和式(7)。

6.4.3 本方法适用于有待测核素效率刻度源可以利用的情况。

6.5 干扰和影响因素

6.5.1 当两种或两种以上核素发射的 γ 射线能量类似,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。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误差。

6.5.2 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。

6.5.3 级联 γ 射线在探测器中产生级联加和现象。增加源(或样品)到探测器的距离,可减少级联加和的影响。

6.5.4 应将全谱计数率限制到小于1 000计数/s,使随机加和损失降到1%以下。

6.5.5 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,可以避免或减少密度差异的影响。

6.6 核素识别

根据 γ 能谱中谱线的能量、各谱线的相对关系、核素的特征能量和其他参数以及参考样品的性质等识别核素。水中可能存在的主要核素的 γ 射线能量、半衰期和发射几率列在附录C(参考件)中。

7 结果表述

7.1 在常规测量中应报告样品中超过探测下限的所有核素以Bq/L为单位的浓度及相应的计数标准差,并注明所采用的置信度(95%置信度)。对于低于探测下限的核素其浓度以“小于LLD”表示。其他如刻度误差、解谱误差也需要在报告中注明。探测下限的计算见附录B(补充件)。

7.2 样品计数标准差 S_0 用下式计算:

$$S_0 = \sqrt{\frac{N_a}{t_a} + \frac{N_b}{t_b}} \dots\dots\dots (9)$$

式中: N_a ——全能峰或道区计数;

N_b ——相应的本底计数;

t_a ——样品计数时间,s;

t_b ——本底计数时间,s。

附 录 A
γ 能谱分析的水样品预处理方法
(补充件)

A1 降水(雨水、露水)和淡水(河水、井水等)的预处理

A1.1 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。本标准推荐简便而又准确的蒸发浓缩法。

A1.2 操作程序

A1.2.1 将所采样品转移至蒸发容器(如瓷蒸发皿或烧杯)中。

A1.2.2 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。当液体量减少到一半时,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。

A1.2.3 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,洗液合并入浓缩液。

A1.2.4 将浓缩后的液体转移至测量容器,用A1.2.3的方法洗涤使用过的容器。

A1.2.5 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,这时要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,所以要注意灯和样品的距离不要太近。

A1.2.6 冷却后盖上测量容器盖,注意密封(必要时使用粘剂),即可用于测量。

A2 海水的预处理

A2.1 标准推荐操作简便易行的磷酸铵-二氧化锰吸附分离法。向酸性样品中加入磷酸铵,搅拌吸附饱,其滤液呈碱性后,加入二氧化锰粉末并搅拌,则锰、铁、钴、锌、镉、铀、钍等元素的放射性核素被吸附。

A2.2 试剂及仪器

浓盐酸。

浓氨水。

磷酸铵。

MnO₂(100~200目)。

搅拌器。

过滤装置(和测量盘直径大体相同)或布氏漏斗。

抽滤装置。

pH计或pH试纸。

A2.3 操作程序

A2.3.1 采样时,每升样品中加入浓盐酸1 mL,使样品呈酸性。

A2.3.2 把样品转移到搪瓷或塑料容器或烧杯中。盛过样品溶液的容器用3 mol/L盐酸(以20 mL为宜)洗涤,洗液并入样品溶液中。

A2.3.3 以1 L样品中加入磷酸铵粉末0.5 g¹⁾的比例加入磷酸铵搅动30 min,放置过夜²⁾。

A2.3.4 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过滤分离,用0.1 mol/L盐酸溶液洗涤。用抽滤装置尽可能除去沉淀中的水分,滤液、洗涤液均加入到溶液中去。

A2.3.5 向分离出铀的上清液中加入氨水,pH调节到8.0~8.5³⁾。

A2.3.6 以1 L溶液加入MnO₂粉末2 g的比例加入MnO₂搅动2 h,放置过夜⁴⁾。

A2.3.7 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 A2.3.4 中得到的磷酸铵沉淀之上转移到测量容器中²⁾。

A2.3.8 测量容器的盖子好密封后,即可测量。

注:1) 每升海水加入磷酸铵的数量在 0.2 g 以上则铀的清除率几乎达到恒定。本方法中考虑到清除完全定为 0.5 g/L。由于磷酸铵加入会影响自吸收,故加入量要保持一样。

2) 磷酸铵的制备,称取 20 g 硝酸铵、20 g 柠檬酸和 25 g 磷酸铵溶于 530 mL 水中。取 63 mL 浓硝酸,加水稀释到 210 mL,在不断搅拌下,将上述 530 mL 的混合液倒入硝酸中,得一清液。再向此清液中加入 10 mL 5% 磷酸氢二铵溶液,搅拌并加热到沸腾 2 min,取下后放置冷却 30 min,用布氏漏斗抽滤所产生的黄色沉淀,再以 1 mol/L 磷酸铵洗涤沉淀 4~5 次。

滤液在搅拌下,再加入 12 mL 0.8 mol/L 磷酸铵、2 mL 4.5 mol/L 硝酸和 10 mL 0.4 mol/L 磷酸氢二铵溶液,重复上述加热、过滤、洗涤等操作。这样反复多次,直到获得 60 g 左右的磷酸铵时,便可弃去母液。

将制得的磷酸铵合并于烧杯中,加入少量 1 mol/L 磷酸铵溶液调匀后,再过滤于布氏漏斗中。用 1 mol/L 磷酸铵溶液洗涤至滤液呈中性,空气中晾干后,将此黄色粉末装入瓶内,放在暗处保存备用。

3) 加入 MnO_2 时,溶液的 pH 为 6.0~9.0,这时,铀、铁、钴的清除在 95% 以上。但是铀、钋在 pH 接近 9 时,清除率降低。为此将溶液 pH 调至 8.0~8.5。如果铀、钋不是测量对象时,pH 的范围在 7~9 波动,其结果不受影响。此外,整个实验操作中都要使 pH 维持在所定的范围之内。

4) 市售 MnO_2 中有电解纯产品,也有化学纯产品等。无论使用那种,都对结果无大影响,但是化学纯 MnO_2 中混有杂质,溶液易混浊,有时给沉淀的分离造成困难。而且有时由于 MnO_2 产品性能,会因加入 MnO_2 改变原溶液的 pH 值。因此尽可能使用电解纯产品。使用化学纯 MnO_2 时,操作过程中要随时注意检查 pH 值。另外,对使用的每批 MnO_2 试剂均应对进行吸附预实验和天然放射性核素本底检验。

5) 测定样品为磷酸铵和 MnO_2 的两层重叠样品。这种重叠测量刻度较难,但简便。理想的情况是把 2 层分别进行测量。

附录 B

γ 能谱分析的探测下限

(补充件)

B1 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有把握探测到的最低活度。

B2 探测下限可以近似表示为:

$$\text{LLD} \approx (K_\alpha + K_\beta)S_0 \quad \dots\dots\dots (\text{B1})$$

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。

如果 α 和 β 值在同一水平上,则 $K_\alpha = K_\beta = K$ 。

$$\text{LLD} \approx 2KS_0 \quad \dots\dots\dots (\text{B2})$$

B3 如果总样品放射性与本底接近,则可进一步简化:

$$\text{LLD} \approx 2\sqrt{2}KS_0 = 2.83K/t_b \sqrt{N_b} \quad \dots\dots\dots (\text{B3})$$

式中: S_0 ——本底计数率的标准偏差;

t_b ——本底谱测量时间, 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 B1 所列。

表 B1

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

B4 式(B3)中探测下限是以计数率为单位的。考虑到核素特性、探测效率、用样量,可计算以浓度表示的探测下限:

即

$$LLD \leq \frac{2KS_0}{\eta \cdot r \cdot V} \dots\dots\dots (B4)$$

式中: LLD——探测下限, Bq/L;

η ——所考虑核素的全能峰绝对效率;

r ——所考虑核素的预处理回收率, %;

V ——所考虑核素的用样量, L。

附录 C

水中可能存在的 γ 放射性核素表

(参考件)

表 C1

γ -能量 keV	核素	半衰期 ¹⁾	发射几率 ²⁾	γ -能量 keV	核素	半衰期 ¹⁾	发射几率 ²⁾
46.5	²¹⁰ Pb	22.3a	0.041	106.1	²³⁹ Np	2.36d	0.227
59.5	²⁴¹ Am	432.2a	0.359	109.3	²³⁵ U	7E8a	0.014
59.5	²³⁷ U	6.75d	0.335	111.8	¹³² Te	78.2h	0.019
63.3	²³⁴ Th	L	0.038	116.3	¹³² Te	78.2h	0.019
80.1	¹⁴⁴ Ce	284.3d	0.016	121.8	¹⁵² Eu	4.869d	0.284
80.1	¹³¹ I	8.04d	0.026	122.1	⁵⁷ Co	270.9d	0.856
81.0	¹³³ Ba	3.981d	0.329	123.1	¹⁵⁴ Eu	8.49a	0.405
81.0	¹³³ Xe	5.25d	0.371	127.2	¹⁰¹ Rh	3.0a	0.880
86.3	¹³⁴ Cs	13.0d	0.063	133.5	¹⁴⁴ Ce	284.3d	0.108
86.5	¹⁵⁵ Eu	4.53a	0.308	136.0	⁷⁵ Se	119.8d	0.590
88.0	¹⁰⁹ Cd	464.0d	0.036	137.5	⁵⁷ Co	270.9d	0.106
91.1	¹⁴⁷ Nd	11.0d	0.279	140.5	⁹⁹ Mo	66.0h	0.057
92.4	²³⁴ Th	L	0.027	140.5	^{99m} Tc	6.02h	0.889
92.8	²³⁴ Th	L	0.027	143.8	²³⁸ U	7E8a	0.109
105.3	¹⁵⁵ Eu	4.53a	0.205	145.4	¹⁴¹ Ce	32.5d	0.484

续表 C1

γ -能量 keV	核素	半衰期 ¹⁾	发射几率 ²⁾	γ -能量 keV	核素	半衰期 ¹⁾	发射几率 ²⁾
151.2	^{85m} Kr	4.48h	0.751	279.5	⁷⁵ Se	119.8d	0.252
153.2	¹³⁴ Cs	13.0d	0.075	284.3	¹³¹ I	8.04d	0.061
162.6	¹⁴⁰ Ba	12.8d	0.056	293.3	¹⁴³ Ce	1.38d	0.420
163.4	²³⁹ U	7E8a	0.051	295.2	²¹⁴ Pb	L	0.192
163.9	¹³⁴ Cs	13.0d	0.046	300.1	²¹² Pb	L	0.034
163.9	^{133m} Xe	12.0d	0.020	302.9	¹³³ Ba	3.981d	0.187
165.9	¹³⁹ Ce	137.7d	0.800	304.8	¹⁴⁰ Be	12.8d	0.034
166.0	⁸⁶ Kr	2.84h	0.031	304.9	^{85m} Kr	4.48h	0.137
176.3	¹²⁵ Sb	2.77a	0.069	315.9	²³⁵ Np	2.36d	0.016
176.6	¹³⁶ Cs	13.0d	0.136	319.4	¹⁴⁷ Nd	11.1d	0.020
181.1	⁹⁹ Mo	66.0h	0.065	320.1	⁵¹ Cr	27.7d	0.099
185.7	²³⁵ U	7E8a	0.561	326.0	¹⁰² Rh	3.0a	0.110
186.2	²²⁸ Ra	1.602a	0.033	328.0	²²⁸ Ac	L	0.033
192.3	⁹⁹ Fe	44.6d	0.031	328.8	¹⁴⁰ La	40.2h	0.200
196.3	⁸⁸ Kr	2.84h	0.263	333.0	¹⁹⁸ Au	6.183d	0.229
197.9	¹⁰¹ Rh	3.0a	0.750	334.2	¹³⁹ Np	2.36d	0.020
205.3	²³⁵ U	7E8a	0.047	338.5	²²⁸ Ac	L	0.123
208.0	²³⁷ U	6.75d	0.217	340.6	¹³⁴ Cs	13.0d	0.468
228.2	²³⁵ Np	2.36d	0.107	344.3	¹⁵² Eu	4.869d	0.267
228.2	¹³² Te	78.2h	0.882	351.9	²¹⁴ Pb	L	0.372
233.2	^{133m} Xe	2.19d	0.103	355.7	¹⁹⁸ Au	6.183d	0.869
238.6	²¹² Pb	L	0.446	356.0	¹³³ Ba	3.981d	0.626
241.0	²²⁴ Ra	L	0.040	364.5	¹³¹ I	8.04d	0.812
242.0	²¹⁴ Pb	L	0.075	366.4	⁹⁹ Mo	66.0h	0.014
244.7	¹⁵² Eu	13.5a	0.075	380.5	¹²⁵ Sb	2.77a	0.016
248.0	¹⁶⁴ Eu	8.6a	0.066	383.9	¹³² Ba	3.981d	0.089
249.8	¹²⁵ Xe	9.08h	0.899	391.7	¹¹⁵ Sn	116.1d	0.642
256.3	²²⁷ Th	L	0.067	402.6	⁸⁷ Kr	1.272h	0.495
264.7	⁷⁵ Se	119.8d	0.566	409.5	²²⁸ Ac	L	0.021
270.2	²²⁸ Ac	L	0.038	411.1	¹⁵² Eu	13.5a	0.022
273.7	¹³⁶ Cs	13.0d	0.127	411.8	¹⁹⁹ Au	2.696d	0.955
276.4	¹³³ Ba	10.7a	0.073	415.3	¹⁰² Rh	2.89a	0.021
277.2	²⁰⁴ Tl	L	0.024	418.5	¹⁰² Rh	2.89a	0.094
277.6	²³⁵ Np	2.36d	0.141	420.4	¹⁰² Rh	2.89a	0.032
279.2	²⁰³ Hg	46.62	0.816	423.8	¹⁴⁰ Ba	12.8d	0.025

续表 C1

γ -能量 keV	核素	半衰期 ¹⁾	发射几率 ²⁾	γ -能量 keV	核素	半衰期 ¹⁾	发射几率 ²⁾
427.9	¹²⁵ Sb	2.77a	0.294	604.7	¹³⁴ Cs	2.06a	0.976
432.6	¹⁴⁰ La	40.2h	0.029	606.7	¹²⁵ Sb	2.77a	0.050
434.0	^{108m} Ag	127.0a	0.907	609.3	²¹⁴ Bi	L	0.463
437.6	¹⁴⁰ Ba	12.8d	0.015	610.3	¹⁰² Ru	39.95d	0.056
439.9	¹⁴⁷ Nd	11.1d	0.012	614.4	^{108m} Ag	127.0a	0.907
446.8	^{110m} Ag	251d	0.037	619.1	⁸² Br	1.47d	0.431
463.0	²²⁸ Ac	L	0.047	620.3	^{110m} Ag	251d	0.028
463.4	¹²⁵ Sb	2.77a	0.106	621.8	¹⁰⁶ Ru	368.2d	0.098
468.6	^{102m} Rh	206.0d	0.029	626.1	^{102m} Rh	206a	0.045
475.0	^{102m} Rh	206.0d	0.460	628.1	¹⁰² Rh	2.89a	0.083
475.1	¹⁰² Rh	2.89a	0.950	631.3	¹⁰² Rh	2.89a	0.560
475.4	¹³⁴ Cs	2.06a	0.015	635.9	¹²⁵ Sb	2.77d	0.113
477.6	⁷ Be	53.3d	0.103	637.0	¹³¹ I	8.04d	0.073
487.0	¹⁴⁰ La	40.2h	0.455	645.8	¹²⁴ Sb	60.2d	0.072
497.1	¹⁰² Ru	39.95d	0.895	657.8	^{110m} Ag	251.0a	0.944
510.7	²⁰⁸ Tl	L	0.090	661.6	¹³⁷ Cs	30.17a	0.852
511.0	⁶⁵ Zn	244.0d	0.029	665.6	²¹⁴ Bi	L	0.016
511.0	⁵⁶ Co	70.8d	0.300	667.7	¹³² I	2.30h	0.987
511.0	²² Na	2.60a	1.808	671.4	¹²⁵ Sb	2.77a	0.018
511.9	¹⁰⁴ Ru	368.2d	0.206	677.6	^{110m} Ag	251.0d	0.106
514.0	⁸⁵ Kr	10.72a	0.004	687.0	^{110m} Ag	251.0d	0.065
514.0	⁸⁵ Sr	64.84d	0.983	692.4	¹⁰² Rh	2.89a	0.016
529.5	⁸² Br	2.39h	0.013	692.4	¹⁵⁴ Eu	8.6a	0.017
529.9	¹³¹ I	20.8h	0.873	695.2	¹⁰² Rh	2.89a	0.029
531.0	¹⁴⁷ Nd	11.0d	0.131	696.5	¹⁴⁴ Ce	284d	0.013
537.3	¹⁴⁰ Ba	12.8d	0.244	697.5	¹⁰² Rh	2.89a	0.440
554.3	⁸² Br	1.47d	0.706	706.7	^{110m} Ag	251.0d	0.164
556.6	^{102m} Rh	206a	0.020	709.3	¹²⁴ Sb	60.2d	0.014
563.2	¹³⁴ Cs	2.06a	0.084	713.8	¹²⁴ Sb	60.2d	0.024
569.3	¹³⁴ Cs	2.06a	0.154	722.8	¹²⁴ Sb	60.2d	0.113
569.7	²⁰⁷ Bi	38.0a	0.978	723.0	^{108m} Ag	127.0a	0.915
583.2	²⁰⁸ Tl	L	0.30	723.3	¹⁵⁴ Eu	8.49a	0.197
591.7	¹⁵⁴ Eu	8.6a	0.048	724.2	⁹⁴ Zr	65.0d	0.437
600.6	¹²⁵ Sb	2.77a	0.178	727.2	²¹² Bi	L	0.076
602.7	¹²⁴ Sb	60.2d	0.979	739.5	⁹⁹ Mo	66.0h	0.130

续表 C1

γ -能量 keV	核素	半衰期 ¹⁾	发射几率 ²⁾	γ -能量 keV	核素	半衰期 ¹⁾	发射几率 ²⁾
744.3	^{110m} Ag	251.0d	0.047	919.7	¹⁴⁰ La	40.2d	0.027
751.9	¹⁴⁰ La	40.2h	0.043	925.2	¹⁴⁰ La	40.2d	0.071
755.1	²²⁸ Ac	L	0.011	934.1	²¹⁴ Pb	L	0.032
756.7	⁹⁴ Zr	65.0d	0.553	937.5	^{110m} Ag	251.0d	0.344
763.9	^{110m} Ag	251.0d	0.224	964.0	¹⁵² Eu	4 869d	0.146
765.8	⁹⁵ Nb	35.1d	0.998	964.6	²²⁸ Ac	L	0.055
766.8	¹⁰³ Rh	2.89a	0.340	968.3	¹²⁴ Sb	60.2d	0.018
768.4	²¹⁴ Pb	L	0.050	968.9	²²⁸ Ac	L	0.175
771.9	²²⁸ Ac	L	0.017	996.3	¹⁵⁴ Eu	8.6a	0.103
772.6	¹³² I	2.03h	0.762	1 001.0	^{234m} Pa	L	0.006
773.7	^{131m} Te	30.0h	0.381	1 004.8	¹⁵⁴ Eu	8.6a	0.174
776.5	⁸² Br	1.47d	0.834	1 038.6	¹³⁴ Cs	2.06a	0.010
777.9	⁹⁹ Mo	66.0h	0.046	1 045.2	¹²⁴ Sb	60.2d	0.018
778.9	¹⁵² Eu	4 869d	0.130	1 046.6	¹⁰³ Rh	2.89a	0.340
785.5	²¹² Pb	L	0.013	1 048.1	¹³⁶ Cs	13.0d	0.797
793.8	^{131m} Te	30.0h	0.138	1 050.5	¹⁰⁶ Ru	368.2d	0.017
794.9	²²⁸ Ac	L	0.049	1 063.6	²⁰⁷ Pb	38.0a	0.740
795.9	¹³⁴ Cs	2.06a	0.854	1 085.3	¹⁴⁰ La	40.2h	0.011
801.9	¹³⁴ Cs	2.06a	0.087	1 085.8	¹⁵² Eu	4 869d	0.102
806.2	²¹⁴ Pb	L	0.012	1 099.2	⁵⁹ Fe	44.6d	0.565
810.8	⁵⁸ Co	70.8d	0.994	1 103.2	^{105m} Rh	206d	0.029
815.8	¹⁴⁰ La	40.2d	0.235	1 103.2	¹⁰³ Rh	2.89a	0.046
818.0	^{110m} Ag	251.0d	0.073	1 112.1	¹⁵² Eu	4 869d	0.136
818.5	¹³⁶ Cs	13.0d	1.000	1 112.8	¹⁰³ Rh	2.89a	0.190
834.8	⁵⁴ Mn	312.7d	1.000	1 115.5	⁶⁵ Zn	244.0d	0.507
845.4	⁸⁷ Kr	1.272h	0.073	1 120.3	²¹⁴ Pb	L	0.151
852.2	^{131m} Te	30.0h	0.206	1 120.5	⁴⁶ Sc	83.85	1.000
860.6	²⁰⁸ Tl	L	0.047	1 121.3	¹⁸² Ta	114.7d	0.350
867.4	¹⁵² Eu	4 869d	0.042	1 131.5	¹³⁵ I	6.61h	0.225
867.9	¹⁴⁰ La	40.2d	0.055	1 136.0	¹³² I	2.30h	0.030
873.2	¹⁵⁴ Eu	8.6a	0.115	1 155.3	²¹⁴ Pb	L	0.019
884.7	^{110m} Ag	251.0d	0.730	1 167.9	¹³⁴ Cs	2.06a	0.018
889.3	⁴⁶ Sc	83.85d	1.000	1 173.2	⁶⁰ Co	5.26a	0.999
898.0	⁸⁸ Y	106.66	0.950	1 189.1	¹⁸² Ta	114.7d	0.163
911.0	²²⁸ Ac	L	0.277	1 212.8	¹⁵² Eu	4 869d	0.014

续表 C1

γ-能量 keV	核素	半衰期 ¹⁾	发射几率 ²⁾	γ-能量 keV	核素	半衰期 ¹⁾	发射几率 ²⁾
1 216.0	⁷⁵ As	1.097d	0.038	1 436.7	¹²⁴ Sb	60.2d	0.010
1 221.4	¹⁸² Ta	114.7d	0.271	1 460.8	⁴⁰ K	1.28E10a	0.107
1 235.3	¹³⁶ Cs	13.0d	0.198	1 475.8	^{110m} Ag	251.0d	0.040
1 238.2	²¹⁴ Bi	L	0.059	1 505.0	^{110m} Ag	251.0d ²⁾	0.133
1 260.4	¹³⁵ I	6.61h	0.286	1 596.5	¹⁴⁰ La	40.2h	0.955
1 274.5	¹⁵⁴ Eu	8.6a	0.355	1 678.0	¹³⁵ I	6.61h	0.095
1 274.5	²² Na	950.4d	1.000	1 691.0	¹²⁴ Sb	60.2d	0.488
1 291.6	⁵⁹ Fe	44.6d	0.432	1 764.5	²¹⁴ Bi	L	0.158
1 293.6	⁴¹ Ar	1.83h	0.992	1 770.2	²⁰⁷ Pb	38.0a	0.073
1 299.0	¹⁵² Eu	4 869h	0.016	1 836.0	⁸⁸ Y	106.66d	0.994
1 325.5	¹²⁴ Sb	60.2d	0.014	2 091.0	¹²⁴ Sb	60.2d	0.056
1 332.5	⁶⁰ Co	5.26a	1.000	2 118.9	²¹⁴ Bi	L	0.012
1 368.2	¹²⁴ Sb	60.2d	0.024	2 204.5	²¹⁴ Bi	L	0.049
1 368.5	²⁴ Na	15.0h	1.000	2 392.1	⁸⁸ Kr	2.84h	0.350
1 377.8	²¹⁴ Bi	L	0.048	2 448.0	²¹⁴ Bi	L	0.016
1 384.3	^{110m} Ag	251.0d	0.247	2 614.5	²⁰⁸ Tl	L	0.36
1 408.0	¹⁵² Eu	4 869d	0.209	2 753.9	²² Na	15.0h	0.998

注：1) 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。

2) 发射几率定义为核素每次衰变发射该能量γ光子的个数。

附加说明：

本标准由中华人民共和国卫生部提出。

本标准由卫生部工业卫生实验所负责起草。

本标准主要起草人：任天山、张淑蓉。

本标准由卫生部委托技术归口单位卫生部工业卫生实验所负责解释。