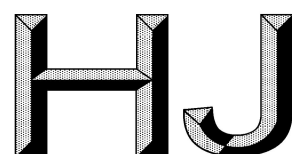


附件 6



中华人民共和国国家环境保护标准

HJ□□□□-20□□

应急监测中环境样品 γ 核素测量技术规范

Technical Specifications on Determination of Gamma-ray Emitting
Radionuclides in Environmental Samples for Emergency Monitoring

(征求意见稿)

20□□-□□-□□发布

20□□-□□-□□实施

生态环境部 发布

目 次

1 适用范围.....	94
2 规范性引用文件.....	94
3 术语和定义.....	94
4 测量原理.....	94
5 试剂和材料.....	94
6 仪器和设备.....	95
7 样品初筛、制备及记录.....	95
8 高纯锗 γ 能谱仪刻度.....	96
9 样品测量.....	96
10 结果计算.....	97
11 注意事项.....	98
12 质量控制.....	99
13 废物处理.....	99
附录 A (资料性附录) γ 谱仪快速效率刻度推荐数据库.....	100
附录 B (资料性附录) γ 核素分析不确定度评定方法.....	108
附录 C (资料性附录) 应急监测中 γ 核素测量时间和探测限关系.....	112
附录 D (资料性附录) 不同核与辐射事故类别中特征 γ 核素数据库..	113
附录 E (资料性附录) 核裂变后不同阶段 γ 能谱可能存在感兴趣峰..	118
附录 F (资料性附录) 2L 马林杯尺寸.....	123

前 言

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国放射性污染防治法》《中华人民共和国核安全法》，保护生态环境，保障人体健康，规范核与辐射应急监测中环境样品 γ 核素测量技术，制定本标准。

本标准规定了核与辐射应急监测情况下土壤、水、气溶胶和生物等四类典型环境介质样品中 γ 核素的测量技术。

本标准的附录A～附录F为资料性附录。

本标准为首次发布。

本标准由生态环境部核设施安全监管司、法规与标准司组织制订。

本标准起草单位：生态环境部核与辐射安全中心、浙江省辐射环境监测站、北京市辐射安全技术中心、安徽省辐射环境监督站、中国计量科学研究院和华北电力大学。

本标准验证单位：黑龙江省辐射环境监督站、上海市辐射环境监督站、山东省核与辐射环境管理中心、广东省环境辐射监测中心、广西壮族自治区辐射环境监督管理站和四川省辐射环境管理监测中心站。

本标准生态环境部20□□年□□月□□日批准。

本标准自20□□年□□月□□日起实施。

本标准由生态环境部解释。

应急监测中环境样品 γ 核素测量技术规范

1 适用范围

本标准规定了核与辐射事故情况下，应急监测中环境样品 γ 核素的测量技术。

本标准适用于应急监测中，使用实验室高纯锗 γ 能谱仪分析气溶胶、土壤、水、生物四类典型环境介质中 γ 核素，应急监测中其它环境介质 γ 核素的测量、或短时间内使用其它测量手段测定样品中 γ 核素的种类或活度浓度也可参照本标准。

2 规范性引用文件

本标准引用了下列文件或其中的条款。凡是不注日期的引用文件，其有效版本适用于本标准。

GB/T 11713 高纯锗 γ 能谱分析通用方法

GB/T 11743 土壤中放射性核素的 γ 能谱分析方法

GB/T 16140 水中放射性核素的 γ 能谱分析方法

GB/T 16145 生物样品中放射性核素的 γ 能谱分析方法

WS/T 184 空气中放射性核素的 γ 能谱分析方法

WS/T 614 应急情况下放射性核素的 γ 能谱快速分析方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1 应急监测 emergency monitoring

核与辐射事故情况下，为发现或查明人员、场所、环境中放射性污染情况或辐射水平而进行的辐射监测。

4 测量原理

针对应急监测中气溶胶、土壤、水、生物等四类典型环境介质样品，经样品初筛分类后，快速制备成一定的几何形状，放置于高纯锗 γ 能谱仪的适当几何位置，获取样品 γ 能谱并确定全能峰位置和净峰面积，根据高纯锗 γ 能谱仪能量刻度系数、效率刻度系数、 γ 射线发射几率、样品质量（或体积）等相关参数确定样品中含有的放射性 γ 核素种类和活度浓度。

5 试剂和材料

5.1 圆柱形样品盒若干，外尺寸为 $\phi 75 \times 70 \text{mm}$ ，样品尺寸 $\phi 70 \times 65 \text{mm}$ ，匹配的样品用内衬袋。

5.2 2L 马林杯若干，马林杯尺寸见附录 F，匹配的样品内衬袋。

5.3 用于土壤样品碾碎成小颗粒状的工具，如研钵等。

5.4 用于气溶胶样品制备的压片机，配备制备样品匹配尺寸的模具，制备成的超大流量气溶胶样品尺寸为 $\phi 70 \times 15 \text{mm}$ ，大流量气溶胶样品尺寸为 $\phi 50 \times 6 \text{mm}$ 。

5.5 用于水样品转移的移液管、量筒（100ml）。

5.6 用于生物样品制备的剪刀、菜刀、砧板等。

5.7 用于样品转移的小型实验用工具。

5.8 用于防止样品污染的聚乙烯密封袋或膜。

5.9 一般实验室常用样品制备设备设施。

5.10 用于 γ 能谱仪能量刻度和效率刻度的匹配样品尺寸系列标准物质，核素种类见标准 GB/T 11713。

6 仪器和设备

6.1 高纯锗（HPGe） γ 能谱仪，高纯锗（HPGe） γ 能谱仪配置、主要部件、基本要求见标准 GB/T 11713。

6.2 分析天平，或可精确到 0.1 g 的电子秤。

6.3 γ 剂量率仪，量程范围 10 nGy/h ~100 $\mu\text{Gy/h}$ ，能量响应范围 50 keV~3 MeV。

6.4 样品测量架，可调节样品至探测器垂直上方 0、20、40、80、120mm 等不同几何位置，满足不同等级活度水平 γ 核素的测量。

7 样品初筛、制备及记录

7.1 样品初筛

将待筛查样品装入匹配有样品内衬袋的圆柱形样品盒（5.1）。土壤样品碾碎成小颗粒盛放；超大流量气溶胶折叠成 $\phi 70 \times 65 \text{mm}$ 圆柱状，大流量气溶胶折叠成 50mm（长） \times 50mm（宽） \times 10mm（高）的长方体、水平放置于样品盒底部。水样品直接转移至样品盒；生物样品用剪刀、菜刀、菜板等剪切成约 1cm 小段装入样品盒。待筛查的土壤、水和生物样品装（盛）满、压实、盖紧，防止溢洒。

将装（盛）入待筛查样品的样品盒放置于 γ 剂量率仪探测器正下方尽可能近的距离进行 γ 剂量率水平测量。根据测量结果判断是否在环境本底涨落水平，将待测样品分为 I 级（在环境本底涨落水平）和 II 级（明显高于环境本底涨落水平）。

7.2 样品制备

7.2.1 土壤：I 级和 II 级测量样品均沿用样品初筛制备的样品。

7.2.2 气溶胶：对于 I 级测量样品，压制成饼状，超大流量气溶胶压制成圆柱体，尺寸为 $\phi 70 \times 15 \text{mm}$ ，大流量气溶胶压制成圆柱体，尺寸为 $\phi 50 \times 6 \text{mm}$ ，装入样品盒底部；如果受时间和测量系统限制，可将若干压制成同一尺寸的圆柱体样品叠加起来进行批量测量，得到紧急状态批量样品测量数据，测量结果如有异常，需进一步分析和测量，如无异常可进行另外批次样品的测量；对于 II 级测量样品，超大流量气溶胶、大流量气溶胶测量样品均沿用样品初筛制备的样品。

7.2.3 水：对于 I 级测量样品，将样品转移至匹配有样品内衬袋的 2L 马林杯（5.2），盛满、

盖紧；对于 II 级测量样品，沿用样品初筛制备的样品。

7.2.4 生物：对于 I 级测量样品，将样品切成约 1cm 小段，转移至匹配有样品内衬袋的 2L 马林杯（5.2），装满、压实、盖紧；对于 II 级样品，沿用样品初筛制备样品。

7.3 样品记录

土壤、水、生物样称重并记录样品信息，记录样品信息分别见标准 GB/T 11743、GB/T 16140 和 GB/T 16145 要求；气溶胶样品信息，见标准 WS/T 184。

8 高纯锗 γ 能谱仪刻度

8.1 能量刻度

刻度源选择、刻度范围、刻度曲线、刻度曲线计算方法、刻度曲线核查见标准 GB/T 11713。

8.2 效率刻度

8.2.1 应急准备阶段的效率刻度

在应急准备阶段，应事先对每一台探测器可能涉及的典型样品及测量几何进行实验效率刻度。通常采用系列标准源进行实验效率刻度，效率刻度源选择、刻度一般方法和程序见标准 GB/T 11713。

如果待测样品或待测核素没有相应的标准物质，可以选择无源效率刻度得到探测效率。无源效率刻度需要探测器相关尺寸，结合蒙特卡罗等方法进行模拟计算，需对得到的效率刻度结果不确定进行评估。

8.2.2 应急监测中效率的快速刻度

为满足核与辐射事故应急监测工作的需要，针对未事先刻度的 γ 能谱仪，面向大气、土壤、水、生物四类典型环境介质样品，附录 A 推荐了通用类型 γ 能谱仪典型效率的快速效率刻度方法和数据库，可实现谱仪的快速、简便的效率刻度，并对引入的不确定度进行了评估。

9 样品测量

9.1 测量前，首先检查测量样品盒外观是否完好，用酒精将表面擦拭干净；如有破损需重新装样。为了防止探测器受到污染，用聚乙烯袋或膜（5.8）将测量样品包裹。

9.2 将测量样品放置于探测器垂直上方适当几何位置测量时，样品的测量几何位置应与得到效率曲线的几何位置一致。

9.3 将 I 级测量样品放置于高纯锗 γ 谱仪探测器 0mm 位置进行测量。

9.4 对于 II 级测量样品，根据剂量率水平和 γ 能谱仪探测器的探测能力（如死时间和峰形畸变等的容纳能力），将样品放置于 γ 能谱仪探测器垂直上方适当测量高度；如样品剂量率水平异常（高出环境本底数十倍），超过 γ 能谱仪探测器测量能力，可通过减少样品量或采用其它 γ 核素监测手段进行测量。

9.5 样品测量时间依据应急监测中 γ 核素测量目的，测量时间视样品中放射性强弱和对测量结果的统计误差要求而定，一般测量时间为数分钟~数小时，附录 C 列出了应急监测中 γ 核

素测量时间和探测下限的关系。

9.6 样品测量的一般步骤和方法见标准 GB/T 11713、GB/T 16140、GB/T 16145 和 WS/T 184。

9.7 测量完毕后，样品应妥善管理。

10 结果计算

10.1 定性分析

根据测定样品中全能峰峰位对应的 γ 能量查找能量-核素数据表，判断样品中是否存在核素。结合 γ 核素半衰期、一种核素的多个 γ 特征峰及其发射几率、或核素的低能特征 X 射线等性质加以鉴别，应急监测中不同类型核与辐射事故的常见 γ 核素库见附录 D，核裂变后不同阶段 γ 能谱中可能存在的感兴趣峰见附录 E。

10.2 定量分析

10.2.1 活度浓度计算

$$A_C = \frac{R_{net} - B_{net}}{\varepsilon \times I \times V_a} \times \prod_{j=1}^l K_j \times e^{\frac{\ln(2) \times \Delta t}{T_{1/2}}} \quad (1)$$

式中：

A_C —特征 γ 射线对应核素的活度浓度，Bq/kg 或 Bq/L 或 Bq/m³；

R_{net} —能量为 E 的 γ 射线的全能峰净计数率，s⁻¹；

B_{net} —能量为 E 的 γ 射线峰位本底净计数率，s⁻¹；

ε —能量为 E 的 γ 射线全能峰探测效率；

I —表示能量为 E 的 γ 射线的发射几率，%；

V_a —测量样品的单位，kg 或 L 或 m³；

K_j —其它可能涉及的修正因子（自吸收、符合相加、采样及测量过程衰变修正等）；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，可取 1；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小于 5%时，可取 1；气溶胶采样过程通常为数小时至数天，对较短半衰期的感兴趣核素（如 ¹³¹I 等）需要考虑修正，修正系数见标准 WS/T 184，其余介质采样过程衰变系数通常取 1；测量过程衰变修正，如果感兴趣核素半衰期与样品测量的时间相比大于 100，可取 1，其余情况修正系数见 GB/T 14165；

$T_{1/2}$ —表示半衰期；

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）。

10.2.2 不确定度计算

活度浓度 A_C 的合成标准不确定度可以表示为：

$$u(A_C) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial A_C}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i)} \quad (2)$$

式中：

$u(A_C)$ —活度浓度 A_C 的合成标准不确定度；

x_i —不确定度的来源（计数率、本底、探测效率、发射几率、半衰期等）；

$\frac{\partial A_C}{\partial x_i}$ —灵敏系数；

$u(x_i)$ —不确定度分量。

扩展不确定度由(3)式给出：

$$U(A_C) = k \cdot u(A_C) \quad (3)$$

式中：

$U(A_C)$ —扩展不确定度；

k —为包含因子，一般取2。

不确定的估算详见附录 B。

10.2.3 探测下限的计算

土壤、水、生物、气溶胶探测下限的计算方法分别见标准 GB/T 11743、GB/T 16140、GB/T 16145 和 WS/T 184。

10.2.4 结果表示

定性分析和定量分析结果应清晰简明，必要时给出适当说明。

定量分析结果中，感兴趣核素活度浓度和不确定度，未测出感兴趣核素应标明小于探测限并给出探测下限。

测定结果的末尾有效数字与探测下限有效数字数量级保持一致，最多保留 3 位有效数字。

定量分析结果应使用国际单位制单位和符号，4 类典型环境介质测量结果标准单位推荐分别为：土壤，Bq/kg；水，Bq/L；空气，mBq/m³；生物，Bq/kg（鲜重）。

11 注意事项

11.1 应急样品应加强样品管理，所有样品在样品初筛、制备、测量及存放过程中应妥善管

理样品、防止交叉污染。

11.2 制样工具在使用前和使用后需清洗干净，马林杯样品内衬袋不重复使用。

12 质量控制

12.1 应急监测的 γ 核素测量应建立在日常工作基础上。在应急准备阶段，应定期做本底质控和效率质控，绘制本底质控图和效率质控图，保证仪器状态正常。

12.2 γ 能谱仪效率刻度和质量控制测试涉及的标准物质应可溯源至国家标准或国际认证的实验室。

12.3 样品测量前应进行仪器本底测量，每 20 个样品或每批样品（少于 20 个/批）至少要进行 1 次本底测量，通过相邻的前后两次测量结果比较来判断谱仪系统是否受污染；当样品的测量结果明显高于同批次样品时，应在该样品测量完毕后立即进行本底测量，与最近的本底测量结果作比较，判断本底是否受污染，确定测量系统未受污染方可进行下一个样品测量；如果测量系统受到污染，应进行去污处理后方可进行下一个样品测量。

12.4 每 20 个样品或每批样品（少于 20 个/批）需测量 1 个复测样，复测样要求双样误差比（DER）不大于 3.0。DER 的计算公式如下：

$$DER = \frac{|AC_{original} - AC_{dup}|}{\sqrt{u_c^2(AC_{original}) + u_c^2(AC_{dup})}} \quad (4)$$

其中：

DER —双样误差比；

$AC_{original}$ —原样测量值；

AC_{dup} —复测样测量值；

$u_c(AC_{original})$ —原样测量值的标准偏差；

$u_c(AC_{dup})$ —复测样测量值的标准偏差。

13 废物处理

制样和测量过程中不产生放射性废物。预处理过程中剩余的样品及制备后的样品，应根据辐射水平，做好相应标识，妥善管理和处理。

附录 A

(资料性附录)

γ谱仪快速效率刻度推荐数据库

应急监测中，针对未事先刻度的γ谱仪报送数据的时效性和可操作性，面向大气、土壤、水、生物等四类代表性环境介质，本标准推荐了通用类型γ谱仪中典型效率的快速效率数据库。

针对核与辐射事故应急监测中可能遇到的γ核素众多（数十种），相对比较法难以在短时间内获取刻度源，且覆盖全核素刻度，本标准选用无源效率刻度法进行刻度，且能量侧重于 200 keV 以上能量。

目前，实验室用于应急监测的γ谱仪主要分为 N 型、P 型两种类型。选择两种类型探测器的系列典型效率，结合探测器的代表性尺寸，采用蒙特卡罗等计算软件进行无源效率刻度的模拟计算，并通过相关实验进行验证。

系列典型探测器效率，根据探测器类型和相对效率等级，包括 P 型 4 种，相对效率分别为 40%、50%、60%和 70%；N 型 5 种，相对效率分别为 30%、40%、50%、60%和 70%。涉及 5 个典型测量几何，分别为探测器垂直上方 0、20、40、80 和 120mm。

表 1-9 分别为相对效率 P 型和 N 型同轴型系列探测器在不同几何位置的推荐效率。各效率探测器不同几何位置（探测器垂直上方 0、20、40、80 和 120mm）效率曲线由对应换算系数乘以该探头在 0mm 处推荐效率曲线得到。

针对超过γ能谱仪探测器测量能力的较高活度样品，可通过减少样品量进行测量，表 10-19 分别给出了相对效率为 40%的两种类型探测器（P 型和 N 型），土壤、水、生物三种介质在样品量不足装（盛）满整个样品盒时，在不同几何位置下不同体积样品的效率推荐值。各效率探测器不同几何位置（探测器垂直上方 0、20、40、80 和 120mm）效率曲线由对应换算系数乘以该探头在 0mm 处推荐效率曲线得到。另外，其它相对效率水平探测器的快速效率曲线及对应转换系数可通过表 1-9 同一类型各范围探测器间的效率间关系进行相应修正得到。

引用以下推荐效率及换算系数时，推荐 0mm 效率曲线引入的不确定度小于 50%，其它几何条件下引入的不确定度小于 60%。另外，如果探测器相对效率介入推荐效率曲线两者之间，可用内插等方法进行适当修正，以减少引入的不确定度。

表 1 相对效率为 40%的 P 型同轴型探测器在不同几何位置的推荐效率

介质类型	样品尺寸, mm	样品描述	0mm 处效率曲线 (E>200keV)	不同几何位置换算系数				
				0mm	20mm	40mm	80mm	120mm
土壤	φ70*65	约 340g	$\epsilon(E_x)=\text{EXP}(-0.6711*\text{LN}(E_x)-4.4231)$	1.00	0.57	0.36	0.18	0.11
水	φ70*65	约 250g	$\epsilon(E_x)=\text{EXP}(-0.6919*\text{LN}(E_x)-4.3799)$	1.00	0.57	0.36	0.18	0.11
水	2L 马林杯	约 2000g	$\epsilon(E_x)=\text{EXP}(-0.6734*\text{LN}(E_x)-4.7039)$					

气溶胶(超大流量)	φ70*15	压制成饼状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7771*\text{LN}(\text{Ex})-3.604)$					
气溶胶(大流量)	φ50*6	压制成饼状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7936*\text{LN}(\text{Ex})-3.2508)$					
气溶胶(超大流量)	φ70*65	卷成均匀圆柱状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7679*\text{LN}(\text{Ex})-4.2287)$	1.00	0.57	0.37	0.19	0.12
气溶胶(大流量)	50(L)*50(W)*10(H)	折成均匀长方体	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.8007*\text{LN}(\text{Ex})-3.4205)$	1.00	0.48	0.28	0.12	0.07
蔬菜(叶菜)	φ70*65	约 125g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7401*\text{LN}(\text{Ex})-4.2873)$	1.00	0.57	0.37	0.19	0.11
蔬菜(叶菜)	2L 马林杯	1kg	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7124*\text{LN}(\text{Ex})-4.7698)$					

表 2 相对效率为 50% 的 P 型同轴型探测器在不同几何位置的推荐效率

介质类型	样品尺寸, mm	样品描述	0mm 处效率曲线 ($E > 200\text{keV}$)	不同几何位置换算系数				
				0mm	20mm	40mm	80mm	120mm
土壤	φ70*65	约 340g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6402*\text{LN}(\text{Ex})-4.2264)$	1.00	0.57	0.37	0.19	0.11
水	φ70*65	约 250g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6609*\text{LN}(\text{Ex})-4.1843)$	1.00	0.57	0.37	0.19	0.12
水	2L 马林杯	约 2000g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.633*\text{LN}(\text{Ex})-4.6502)$					
气溶胶(超大流量)	φ70*15	压制成饼状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7651*\text{LN}(\text{Ex})-3.0777)$					
气溶胶(大流量)	φ50*6	压制成饼状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7376*\text{LN}(\text{Ex})-4.0323)$					
气溶胶(超大流量)	φ70*65	卷成均匀圆柱状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.8069*\text{LN}(\text{Ex})-3.4538)$	1.00	0.57	0.37	0.19	0.12
气溶胶(大流量)	50(L)*50(W)*10(H)	折成均匀长方体	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.8069*\text{LN}(\text{Ex})-3.4538)$	1.00	0.48	0.28	0.12	0.07
蔬菜(叶菜)	φ70*65	约 125g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7083*\text{LN}(\text{Ex})-4.0907)$	1.00	0.57	0.37	0.19	0.12
蔬菜(叶菜)	2L 马林杯	1kg	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.681*\text{LN}(\text{Ex})-4.5501)$					

表 3 相对效率为 60% 的 P 型同轴型探测器在不同几何位置的推荐效率

介质类型	样品尺寸, mm	样品描述	0mm 处效率曲线 ($E > 200\text{keV}$)	不同几何位置换算系数				
				0mm	20mm	40mm	80mm	120mm
土壤	φ70*65	约 340g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7616*\text{LN}(\text{Ex})-3.9723)$	1.00	0.58	0.37	0.19	0.11
水	φ70*65	约 250g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7839*\text{LN}(\text{Ex})-3.9295)$	1.00	0.58	0.37	0.19	0.11
水	2L 马林杯	约 2000g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7082*\text{LN}(\text{Ex})-4.6361)$					
气溶胶(超大流量)	φ70*15	压制成饼状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.8427*\text{LN}(\text{Ex})-2.8936)$					
气溶胶(大流量)	φ50*6	压制成饼状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.8681*\text{LN}(\text{Ex})-3.769)$					
气溶胶(超大流量)	φ70*65	卷成均匀圆柱状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.8611*\text{LN}(\text{Ex})-3.0106)$	1.00	0.58	0.37	0.19	0.11
气溶胶(大流量)	50(L)*50(W)*10(H)	折成均匀长方体	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.8611*\text{LN}(\text{Ex})-3.0106)$	1.00	0.50	0.30	0.13	0.07
蔬菜(叶菜)	φ70*65	约 125g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.8343*\text{LN}(\text{Ex})-3.8324)$	1.00	0.58	0.37	0.19	0.11

蔬菜（叶菜）	2L 马林杯	1kg	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.769*\text{LN}(\text{Ex})-4.5199)$					
--------	--------	-----	--	--	--	--	--	--

表 4 相对效率为 70% 的 P 型同轴型探测器在不同几何位置的推荐效率

介质类型	样品尺寸, mm	样品描述	0mm 处效率曲线 ($E>200\text{keV}$)	不同几何位置换算系数				
				0mm	20mm	40mm	80mm	120mm
土壤	$\phi 70*65$	约 340g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.5946*\text{LN}(\text{Ex})-4.0029)$	1.00	0.57	0.37	0.19	0.12
水	$\phi 70*65$	约 250g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6153*\text{LN}(\text{Ex})-3.9598)$	1.00	0.57	0.37	0.19	0.12
水	2L 马林杯	约 2000g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.5546*\text{LN}(\text{Ex})-4.4228)$					
气溶胶(超大流量)	$\phi 70*15$	压制成饼状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7055*\text{LN}(\text{Ex})-3.1925)$					
气溶胶(大流量)	$\phi 50*6$	压制成饼状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7188*\text{LN}(\text{Ex})-2.8791)$					
气溶胶(超大流量)	$\phi 70*65$	卷成均匀圆柱状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6932*\text{LN}(\text{Ex})-3.8062)$	1.00	0.58	0.37	0.19	0.12
气溶胶(大流量)	50(L)*50(W)*10(H)	折成均匀长方体	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7238*\text{LN}(\text{Ex})-3.0192)$	1.00	0.49	0.28	0.13	0.07
蔬菜（叶菜）	$\phi 70*65$	约 125g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6618*\text{LN}(\text{Ex})-3.8659)$	1.00	0.57	0.37	0.19	0.12
蔬菜（叶菜）	2L 马林杯	1kg	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6013*\text{LN}(\text{Ex})-4.3237)$					

表 5 相对效率为 30% 的 N 型同轴型探测器在不同几何位置的推荐效率

介质类型	样品尺寸, mm	样品描述	0mm 处效率曲线 ($E>200\text{keV}$)	不同几何位置换算系数				
				0mm	20mm	40mm	80mm	120mm
土壤	$\phi 70*65$	约 340g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7014*\text{LN}(\text{Ex})-4.4789)$	1.00	0.56	0.36	0.18	0.11
水	$\phi 70*65$	约 250g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7038*\text{LN}(\text{Ex})-4.2997)$	1.00	0.56	0.35	0.18	0.11
水	2L 马林杯	约 2000g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6987*\text{LN}(\text{Ex})-4.933)$					
气溶胶(超大流量)	$\phi 70*15$	压制成饼状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.806*\text{LN}(\text{Ex})-3.6484)$					
气溶胶(大流量)	$\phi 50*6$	压制成饼状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.8243*\text{LN}(\text{Ex})-3.2793)$					
气溶胶(超大流量)	$\phi 70*65$	卷成均匀圆柱状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7952*\text{LN}(\text{Ex})-4.2842)$	1.00	0.56	0.36	0.18	0.11
气溶胶(大流量)	50(L)*50(W)*10(H)	折成均匀长方体	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.83*\text{LN}(\text{Ex})-3.456)$	1.00	0.47	0.27	0.12	0.07
蔬菜（叶菜）	$\phi 70*65$	约 125g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7668*\text{LN}(\text{Ex})-4.3428)$	1.00	0.56	0.36	0.18	0.11
蔬菜（叶菜）	2L 马林杯	1kg	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7432*\text{LN}(\text{Ex})-4.8254)$					

表 6 相对效率为 40% 的 N 型同轴型探测器在不同几何位置的推荐效率

介质类型	样品尺寸, mm	样品描述	0mm 处效率曲线 ($E>200\text{keV}$)	不同几何位置换算系数				
				0mm	20mm	40mm	80mm	120mm
土壤	$\phi 70*65$	约 340g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6846*\text{LN}(\text{Ex})-4.3457)$	1.00	0.57	0.36	0.18	0.11

水	φ70*65	约 250g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7038*\text{LN}(\text{Ex})-4.2997)$	1.00	0.56	0.36	0.18	0.11
水	2L 马林杯	约 2000g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6282*\text{LN}(\text{Ex})-4.8896)$					
气溶胶(超大流量)	φ70*15	压制成饼状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.786*\text{LN}(\text{Ex})-3.5112)$					
气溶胶(大流量)	φ50*6	压制成饼状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.8044*\text{LN}(\text{Ex})-3.1536)$					
气溶胶(超大流量)	φ70*65	卷成均匀圆柱状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7775*\text{LN}(\text{Ex})-4.1468)$	1.00	0.56	0.36	0.18	0.11
气溶胶(大流量)	50(L)*50(W)*10(H)	折成均匀长方体	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.8118*\text{LN}(\text{Ex})-3.3254)$	1.00	0.47	0.27	0.12	0.07
蔬菜(叶菜)	φ70*65	约 125g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7483*\text{LN}(\text{Ex})-4.2054)$	1.00	0.56	0.36	0.18	0.11
蔬菜(叶菜)	2L 马林杯	1kg	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6832*\text{LN}(\text{Ex})-4.7834)$					

表 7 相对效率为 50% 的 N 型同轴型探测器在不同几何位置的推荐效率

介质类型	样品尺寸, mm	样品描述	0mm 处效率曲线 ($E > 200\text{keV}$)	不同几何位置换算系数				
				0mm	20mm	40mm	80mm	120mm
土壤	φ70*65	约 340g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6378*\text{LN}(\text{Ex})-4.264)$	1.00	0.57	0.37	0.19	0.11
水	φ70*65	约 250g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.657*\text{LN}(\text{Ex})-4.2185)$	1.00	0.57	0.37	0.19	0.11
水	2L 马林杯	约 2000g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6222*\text{LN}(\text{Ex})-4.6855)$					
气溶胶(超大流量)	φ70*15	压制成饼状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7435*\text{LN}(\text{Ex})-3.4431)$					
气溶胶(大流量)	φ50*6	压制成饼状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7659*\text{LN}(\text{Ex})-3.0987)$					
气溶胶(超大流量)	φ70*65	卷成均匀圆柱状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7324*\text{LN}(\text{Ex})-4.0653)$	1.00	0.57	0.37	0.19	0.12
气溶胶(大流量)	50(L)*50(W)*10(H)	折成均匀长方体	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7713*\text{LN}(\text{Ex})-3.2632)$	1.00	0.49	0.28	0.13	0.07
蔬菜(叶菜)	φ70*65	约 125g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7033*\text{LN}(\text{Ex})-4.1243)$	1.00	0.57	0.37	0.19	0.12
蔬菜(叶菜)	2L 马林杯	1kg	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6685*\text{LN}(\text{Ex})-4.5844)$					

表 8 相对效率为 60% 的 N 型同轴型探测器在不同几何位置的推荐效率

介质类型	样品尺寸, mm	样品描述	0mm 处效率曲线 ($E > 200\text{keV}$)	不同几何位置换算系数				
				0mm	20mm	40mm	80mm	120mm
土壤	φ70*65	约 340g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6146*\text{LN}(\text{Ex})-4.0491)$	1.00	0.58	0.37	0.19	0.11
水	φ70*65	约 250g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6314*\text{LN}(\text{Ex})-3.9992)$	1.00	0.57	0.37	0.19	0.11
水	2L 马林杯	约 2000g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6055*\text{LN}(\text{Ex})-4.4687)$					
气溶胶(超大流量)	φ70*15	压制成饼状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7268*\text{LN}(\text{Ex})-3.2309)$					
气溶胶(大流量)	φ50*6	压制成饼状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7346*\text{LN}(\text{Ex})-2.8954)$					
气溶胶(超大流量)	φ70*65	卷成均匀圆柱状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.71*\text{LN}(\text{Ex})-3.846)$	1.00	0.57	0.37	0.19	0.12
气溶胶(大流量)	50(L)*50(W)*10(H)	折成均匀长方体	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7431*\text{LN}(\text{Ex})-3.0539)$	1.00	0.49	0.28	0.13	0.07

	(H)							
蔬菜 (叶菜)	φ70*65	约 125g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6813*\text{LN}(\text{Ex})-3.9062)$	1.00	0.57	0.37	0.19	0.12
蔬菜 (叶菜)	2L 马林杯	1kg	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6508*\text{LN}(\text{Ex})-4.3656)$					

表 9 相对效率为 70%的 N 型同轴型探测器在不同几何位置的推荐效率

介质类型	样品尺寸, mm	样品描述	0mm 处效率曲线 ($E > 200\text{keV}$)	不同几何位置换算系数				
				0mm	20mm	40mm	80mm	120mm
土壤	φ70*65	约 340g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.578*\text{LN}(\text{Ex})-3.9394)$	1.00	0.58	0.38	0.19	0.12
水	φ70*65	约 250g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.597*\text{LN}(\text{Ex})-3.8918)$	1.00	0.58	0.38	0.19	0.12
水	2L 马林杯	约 2000g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.5509*\text{LN}(\text{Ex})-4.3438)$					
气溶胶(超大流量)	φ70*15	压制成饼状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6927*\text{LN}(\text{Ex})-3.1321)$					
气溶胶(大流量)	φ50*6	压制成饼状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6998*\text{LN}(\text{Ex})-2.8152)$					
气溶胶(超大流量)	φ70*65	卷成均匀圆柱状	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6786*\text{LN}(\text{Ex})-3.7389)$	1.00	0.58	0.38	0.20	0.12
气溶胶(大流量)	50(L)*50(W)*10(H)	折成均匀长方体	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.7089*\text{LN}(\text{Ex})-2.9642)$	1.00	0.50	0.29	0.13	0.08
蔬菜 (叶菜)	φ70*65	约 125g	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.6509*\text{LN}(\text{Ex})-3.8015)$	1.00	0.58	0.38	0.20	0.12
蔬菜 (叶菜)	2L 马林杯	1kg	$\epsilon(\text{Ex})=\text{EXP}(-0.5962*\text{LN}(\text{Ex})-4.241)$					

表 10 相对效率为 40%的 N 型同轴型探测器推荐效率曲线针对不同体积土壤源在不同几何位置下的推荐效率

介质类型	样品尺寸, mm	样品描述	0mm 处效率曲线 ($E > 200\text{keV}$)	不同几何位置换算系数				
				0mm	20mm	40mm	80mm	120mm
土壤	φ70*6.5	约 34g	$\epsilon(\text{Ex}) = \text{EXP}(-0.7785*\text{LN}(\text{Ex})-3.3618)$	1.00	0.48	0.28	0.12	0.07
	φ70*13	约 68g	$\epsilon(\text{Ex}) = \text{EXP}(-0.7536*\text{LN}(\text{Ex})-3.5146)$	1.00	0.50	0.30	0.13	0.08
	φ70*19.5	约 102g	$\epsilon(\text{Ex}) = \text{EXP}(-0.7368*\text{LN}(\text{Ex})-3.6531)$	1.00	0.51	0.31	0.14	0.08
	φ70*26	约 136g	$\epsilon(\text{Ex}) = \text{EXP}(-0.727*\text{LN}(\text{Ex})-3.7806)$	1.00	0.52	0.32	0.15	0.09
	φ70*32.5	约 170g	$\epsilon(\text{Ex}) = \text{EXP}(-0.7162*\text{LN}(\text{Ex})-3.8914)$	1.00	0.53	0.33	0.16	0.09
	φ70*39	约 204g	$\epsilon(\text{Ex}) = \text{EXP}(-0.7053*\text{LN}(\text{Ex})-3.993)$	1.00	0.54	0.33	0.16	0.09
	φ70*45.5	约 238g	$\epsilon(\text{Ex}) = \text{EXP}(-0.697*\text{LN}(\text{Ex})-4.0878)$	1.00	0.54	0.34	0.17	0.10
	φ70*52	约 272g	$\epsilon(\text{Ex}) = \text{EXP}(-0.6917*\text{LN}(\text{Ex})-4.1784)$	1.00	0.55	0.34	0.17	0.10
	φ70*58.5	约 306g	$\epsilon(\text{Ex}) = \text{EXP}(-0.6893*\text{LN}(\text{Ex})-4.2658)$	1.00	0.55	0.35	0.18	0.11
	φ70*65	约 340g	$\epsilon(\text{Ex}) = \text{EXP}(-0.6859*\text{LN}(\text{Ex})-4.344)$	1.00	0.56	0.35	0.18	0.11

表 11 相对效率为 40%的 N 型同轴型探测器推荐效率曲线针对不同体积水源在不同几何位置下的推荐效率

介质类型	样品尺寸, mm	样品描述	0mm 处效率曲线 ($E > 200\text{keV}$)	不同几何位置换算系数				
				0mm	20mm	40mm	80mm	120mm
水	φ70*6.5	约 25g	$\epsilon(\text{Ex}) = \text{EXP}(-0.7816*\text{LN}(\text{Ex})-3.3523)$	1.00	0.48	0.28	0.12	0.07
	φ70*13	约 50g	$\epsilon(\text{Ex}) = \text{EXP}(-0.7615*\text{LN}(\text{Ex})-3.5008)$	1.00	0.50	0.29	0.13	0.08

φ70*19.5	约 75g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7453 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.631)$	1.00	0.51	0.31	0.14	0.08
φ70*26	约 100g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7369 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.7528)$	1.00	0.52	0.32	0.15	0.09
φ70*32.5	约 125g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7303 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.8623)$	1.00	0.53	0.33	0.15	0.09
φ70*39	约 150g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7223 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.9604)$	1.00	0.54	0.33	0.16	0.09
φ70*45.5	约 175g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7157 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.0544)$	1.00	0.54	0.34	0.17	0.10
φ70*52	约 200g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7115 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.1438)$	1.00	0.55	0.34	0.17	0.10
φ70*58.5	约 225g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7128 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.2279)$	1.00	0.56	0.35	0.18	0.11
φ70*65	约 250g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7104 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.3043)$	1.00	0.56	0.36	0.18	0.11

表 12 相对效率为 40%的 N 型同轴型探测器推荐效率曲线针对不同体积生物样品源
在不同几何位置下的推荐效率

介质 类型	样品尺寸, mm	样品描述	0mm 处效率曲线 ($E > 200\text{keV}$)	不同几何位置换算系数				
				0mm	20mm	40mm	80mm	120mm
蔬菜 (叶菜)	φ70*6.5	约 11.5g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.8122 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.3555)$	1.00	0.48	0.28	0.12	0.07
	φ70*13	约 23g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.8047 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.4968)$	1.00	0.50	0.29	0.13	0.07
	φ70*19.5	约 34.5g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7812 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.607)$	1.00	0.51	0.30	0.14	0.08
	φ70*26	约 46g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7823 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.722)$	1.00	0.52	0.31	0.15	0.09
	φ70*32.5	约 57.5g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7778 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.8189)$	1.00	0.53	0.32	0.15	0.09
	φ70*39	约 69g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7529 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.8952)$	1.00	0.54	0.33	0.16	0.09
	φ70*45.5	约 80.5g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.752 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.9829)$	1.00	0.54	0.34	0.17	0.10
	φ70*52	约 92g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.745 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.0599)$	1.00	0.55	0.34	0.17	0.10
	φ70*58.5	约 103.5g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7439 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.1417)$	1.00	0.56	0.35	0.18	0.11
φ70*65	约 115g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7335 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.2094)$	1.00	0.56	0.36	0.18	0.11	

表 13 相对效率为 40%的 P 型同轴型探测器推荐效率曲线针对不同体积土壤源
在不同几何位置下的的推荐效率

介质 类型	样品尺寸, mm	样品描述	0mm 处效率曲线 ($E > 200\text{keV}$)	不同几何位置换算系数				
				0mm	20mm	40mm	80mm	120mm
土壤	φ70*6.5	约 34g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7645 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.4532)$	1.00	0.49	0.29	0.13	0.08
	φ70*13	约 68g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.743 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.6054)$	1.00	0.51	0.30	0.14	0.08
	φ70*19.5	约 102g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7259 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.7388)$	1.00	0.52	0.31	0.15	0.09
	φ70*26	约 136g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7171 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.8656)$	1.00	0.53	0.32	0.15	0.10
	φ70*32.5	约 170g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7074 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.975)$	1.00	0.54	0.33	0.16	0.10
	φ70*39	约 204g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7004 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.0813)$	1.00	0.54	0.34	0.16	0.10
	φ70*45.5	约 238g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.691 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.1757)$	1.00	0.55	0.34	0.17	0.11
	φ70*52	约 272g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.6871 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.266)$	1.00	0.55	0.34	0.17	0.10
	φ70*58.5	约 306g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.6846 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.351)$	1.00	0.55	0.35	0.18	0.11
	φ70*65	约 340g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.6779 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.4274)$	1.00	0.56	0.35	0.18	0.11

表 14 相对效率为 40%的 P 型同轴型探测器推荐效率曲线针对不同体积水源
在不同几何位置下的推荐效率

介质类型	样品尺寸, mm	样品描述	0mm 处效率曲线 (E>200keV)	不同几何位置换算系数				
				0mm	20mm	40mm	80mm	120mm
水	φ70*6.5	约 25g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7689 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.4451)$	1.00	0.49	0.28	0.13	0.08
	φ70*13	约 50g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7516 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.5909)$	1.00	0.50	0.30	0.14	0.08
	φ70*19.5	约 75g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7362 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.7181)$	1.00	0.52	0.31	0.14	0.09
	φ70*26	约 100g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7296 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.841)$	1.00	0.53	0.32	0.15	0.09
	φ70*32.5	约 125g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7236 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.9493)$	1.00	0.54	0.33	0.16	0.10
	φ70*39	约 150g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7163 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.05)$	1.00	0.54	0.34	0.16	0.10
	φ70*45.5	约 175g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7117 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.1433)$	1.00	0.55	0.35	0.17	0.11
	φ70*52	约 200g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7106 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.233)$	1.00	0.55	0.35	0.18	0.11
	φ70*58.5	约 225g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7056 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.3119)$	1.00	0.56	0.36	0.18	0.12
	φ70*65	约 250g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7011 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.3877)$	1.00	0.57	0.36	0.18	0.11

表 15 相对效率为 40%的 P 型同轴型探测器推荐效率曲线针对不同体积生物样品源
在不同几何位置下的推荐效率

介质类型	样品尺寸, mm	样品描述	0mm 处效率曲线 (E>200keV)	不同几何位置换算系数				
				0mm	20mm	40mm	80mm	120mm
蔬菜 (叶菜)	φ70*6.5	约 12.5g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.8053 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.4517)$	1.00	0.49	0.28	0.13	0.07
	φ70*13	约 25g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7798 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.5769)$	1.00	0.50	0.30	0.14	0.08
	φ70*19.5	约 37.5g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7723 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.6927)$	1.00	0.52	0.31	0.14	0.08
	φ70*26	约 50g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7681 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.8044)$	1.00	0.53	0.32	0.15	0.09
	φ70*32.5	约 62.5g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7618 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.9011)$	1.00	0.54	0.33	0.16	0.09
	φ70*39	约 75g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7477 \cdot \text{LN}(E_x) - 3.982)$	1.00	0.54	0.34	0.17	0.10
	φ70*45.5	约 87.5g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7311 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.0621)$	1.00	0.55	0.34	0.17	0.10
	φ70*52	约 100g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7247 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.1444)$	1.00	0.56	0.35	0.18	0.11
	φ70*58.5	约 112.5g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.723 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.2213)$	1.00	0.56	0.36	0.18	0.11
	φ70*65	约 125g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7124 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.2916)$	1.00	0.57	0.36	0.19	0.11

表 16 相对效率为 40%的 N 型同轴型探测器推荐效率曲线针对不同体积水源
在 0mm 的的推荐效率

介质类型	样品盒尺寸, mm	样品描述	0mm 处效率曲线 (E>200keV)
水	马林杯 2L	约 200g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7501 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.4464)$
		约 400g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7474 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.4187)$
		约 600g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7194 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.4529)$
		约 800g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7092 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.5141)$
		约 1000g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7048 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.5874)$
		约 1200g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7071 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.6778)$
		约 1400g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7049 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.7508)$
		约 1600g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.711 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.8323)$
		约 1800g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.6724 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.8831)$
		约 2000g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.6776 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.9646)$

表 17 相对效率为 40%的 N 型同轴型探测器推荐效率曲线针对不同体积生物样品源
在 0mm 的推荐效率

介质类型	样品盒尺寸, mm	样品描述	0mm 处效率曲线 (E>200keV)
蔬菜 (叶菜)	马林杯 2L	约 100g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7212 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.4867)$
		约 200g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7212 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.3823)$
		约 300g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7132 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.4493)$
		约 400g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7122 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.4988)$
		约 500g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7005 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.5457)$
		约 600g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7105 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.6116)$
		约 700g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7188 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.678)$
		约 800g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7229 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.7389)$
		约 900g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7075 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.7928)$
		约 1000g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7076 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.8554)$

表 18 相对效率为 40%的 P 型同轴型探测器推荐效率曲线针对不同体积水源
在 0mm 的推荐效率

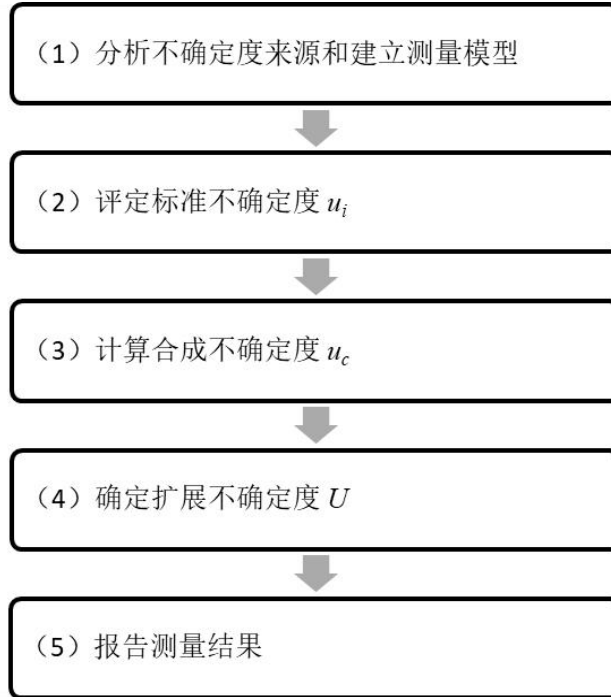
介质类型	样品盒尺寸, mm	样品描述	0mm 处效率曲线 (E>200keV)
水	马林杯 2L	约 200g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7501 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.4464)$
		约 400g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7474 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.4187)$
		约 600g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7194 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.4529)$
		约 800g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7092 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.5141)$
		约 1000g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7048 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.5874)$
		约 1200g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7071 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.6778)$
		约 1400g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7049 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.7508)$
		约 1600g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.711 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.8323)$
		约 1800g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.6724 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.8831)$
		约 2000g	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.6776 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.9646)$

表 19 相对效率为 40%的 P 型同轴型探测器推荐效率曲线针对不同体积生物样品源在
0mm 的推荐效率曲线

介质类型	样品盒尺寸, mm	样品描述	0mm 处效率曲线 (E>200keV)
蔬菜 (叶菜)	马林杯 2L	约 100g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7748 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.4221)$
		约 200g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.773 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.3893)$
		约 300g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7633 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.4227)$
		约 400g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7541 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.4731)$
		约 500g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7472 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.5263)$
		约 600g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.759 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.6048)$
		约 700g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.757 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.6676)$
		约 800g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7522 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.7317)$
		约 900g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7474 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.7943)$
		约 1000g, 压实	$\epsilon(E_x) = \text{EXP}(-0.7405 \cdot \text{LN}(E_x) - 4.8585)$

附录 B
(资料性附录)
γ核素分析不确定度评定方法

B.1 不确定度的评定流程



B.2 不确定度来源分析

不确定度主要来源于：峰面积（计数统计涨落）、本底、效率、γ射线发射几率、半衰期、修正因子等。

B.3 测量模型

活度浓度公式：

$$A_C = \frac{R_{net} - B_{net}}{\varepsilon \times I \times V_a} \times \prod_{j=1}^l K_j \times e^{\frac{\ln(2) \times \Delta t}{T_{1/2}}} \quad (1)$$

式中：

A_C —特征γ射线对应核素的活度浓度，Bq/kg 或 Bq/L 或 Bq/m³；

R_{net} —表示能量为 E 的γ射线的全能峰净计数率，s⁻¹；

B_{net} —表示能量为 E 的γ射线峰位本底净计数率，s⁻¹；

ε —表示能量为 E 的γ射线全能峰探测效率；

I —表示能量为 E 的 γ 射线的发射几率, %;

V_a —测量样品的单位, kg 或 L 或 m^3 ;

K_j —其它可能涉及的修正因子(自吸收、符合相加、采样及测量过程衰变修正等); 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, 可取 1; 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小于 5% 时, 可取 1; 气溶胶采样过程通常为数小时至数天, 对较短半衰期的感兴趣核素(如 ^{131}I 等) 需要考虑修正, 修正系数见标准 WS/T 184, 其余介质采样过程衰变系数通常取 1; 测量过程衰变修正, 如果感兴趣核素半衰期与样品测量的时间相比大于 100, 可取 1, 其余情况修正系数见 GB/T 14165;

$T_{1/2}$ —表示半衰期;

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)。

B.4 标准不确定度评定

测量结果不确定度的各分量通常包括 A 类评定和 B 类评定。A 类评定指对在规定测量条件下, 测得的量值用统计分析方法进行测量不确定度分量的评定; B 类评定指用不同于 A 类评定方法对测量不确定度分量进行的评定。

B.4.1 标准不确定度的 A 类评定

对被测量进行独立重复观测, 通过所得到的一系列测得值, 用统计分析方法获得实验标准差 $s(x)$, 当用算术平均值 \bar{x} 作为被测量估计值时, 被测量估计值得 A 类标准不确定度按公式(2)计算:

$$u_A = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{n} \quad (2)$$

同一被测量作 n 次测量, 表征测量结果分散性的量 $s(x)$ 可由贝塞尔公式给出:

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中: x_i 为第 i 次测量结果, \bar{x} 为 n 次测量的算术平均值。

一般在测量次数较少时, 可采用极差法评定实验标准偏差。在重复性条件或复现性条件下, 对 x_i 进行 n 次独立重复观测, 测得值中的最大值与最小值之差称为极差。

$$s(x_k) = \frac{R}{C} \quad (4)$$

式中: R 为极差, C 为极差系数。

表 1 极差系数 C

n	2	3	4	5	6	7	8	9
C	1.13	1.69	2.06	2.33	2.53	2.70	2.85	2.97

B.4.2 标准不确定度的 B 类评定

B 类评定的方法是根据有关的信息或经验, 判断被测量的可能值区间 $[\bar{x}-a, \bar{x}+a]$, 假设被测量值的概率分布, 根据概率分布和要求的概率 p 确定置信因子 k 。则 B 类标准不确定度 u_B 可由公式 (5) 得到:

$$u_B = \frac{a}{k} \quad (5)$$

式中: a 为被测量可能值得半宽度, k 为置信因子。

k 的取值与被测量值得概率分布相关, k 的确定方法参考 JJF1059.1-2012。

B.5 合成标准不确定度

B.5.1 合成标准不确定度的计算

根据不确定度传播率, 假设各分量均不相关, 则比活度 A_C 的合成标准不确定度可以表示为:

$$u(A_C) = \sqrt{\left(\frac{\partial A_C}{\partial R_{net}}\right)^2 \cdot u^2(R_{net}) + \left(\frac{\partial A_C}{\partial B_{net}}\right)^2 \cdot u^2(B_{net}) + \left(\frac{\partial A_C}{\partial \varepsilon}\right)^2 \cdot u^2(\varepsilon) + \left(\frac{\partial A_C}{\partial I}\right)^2 \cdot u^2(I) + \left(\frac{\partial A_C}{\partial V_a}\right)^2 \cdot u^2(V_a) + \sum_{j=1}^l \left(\frac{\partial A_C}{\partial K_j}\right)^2 \cdot u^2(K_j) + \left(\frac{\partial A_C}{\partial T_{1/2}}\right)^2 \cdot u^2(T_{1/2})} \quad (6)$$

式中, $\frac{\partial A_C}{\partial R_{net}}$, $\frac{\partial A_C}{\partial B_{net}}$, $\frac{\partial A_C}{\partial \varepsilon}$, $\frac{\partial A_C}{\partial I}$, $\frac{\partial A_C}{\partial V_a}$, $\frac{\partial A_C}{\partial K_j}$, $\frac{\partial A_C}{\partial T_{1/2}}$ 分别为分量 R_{net} , B_{net} , ε , I ,

V_a , K_j , $T_{1/2}$ 的灵敏系数。

B.5.2 灵敏系数

$$\text{全能峰净计数率的灵敏系数: } c_1 = \frac{\partial A_C}{\partial R_{net}} = \frac{A_C}{R_{net} - B_{net}}$$

$$\text{峰位本底净计数率的灵敏系数: } c_2 = \frac{\partial A_C}{\partial B_{net}} = -\frac{A_C}{R_{net} - B_{net}}$$

$$\text{全能峰探测效率的灵敏系数: } c_3 = \frac{\partial A_C}{\partial \varepsilon} = -\frac{A_C}{\varepsilon}$$

$$\gamma\text{射线的发射几率的灵敏系数: } c_4 = \frac{\partial A_C}{\partial I} = -\frac{A_C}{I}$$

$$\text{测量样品单位的灵敏系数: } c_5 = \frac{\partial A_C}{\partial V_a} = -\frac{A_C}{V_a}$$

$$\text{修正因子的灵敏系数: } c_6 = \frac{\partial A_C}{\partial K_j} = \frac{A_C}{K_j}$$

$$\text{半衰期的灵敏系数: } c_7 = \frac{\partial A_C}{\partial T_{1/2}} = A_C \times \left(\frac{\ln(2) \times t}{T_{1/2}^2} \right)$$

B.6 扩展不确定度

扩展不确定度由(7)式给出:

$$U(A_C) = k \cdot u(A_C) \quad (7)$$

式中: $U(A_C)$ 为扩展不确定度; k 为包含因子, 一般取2; 。

B.7 报告测量结果

测量结果 Y 可用公式(8)表示:

$$Y = A_C \pm U(A_C) \quad (8)$$

B.8 γ 谱分析中部分分量的典型不确定度范围

表 γ 能谱分析中部分分量的典型不确定度范围

不确定度来源	典型不确定度范围, %
计数	0.1~20
γ 发射几率	0.1~11
自吸收修正	0.1~5
符合相加修正	1~15
半衰期	0.01~1
效率刻度	1~60*
样品称重	0.01~1

注*: 采用系列标准源度所得效率刻度曲线通常为 1~5, 应急监测中使用无源效率刻度应评估, 应用附录 A 的推荐效率曲线为 50~60。

附录 C

(资料性附录)

应急监测中 γ 核素测量时间和探测限关系

表 1 应急监测中样品量为 2L 马林杯条件下测量时间和探测限关系

介质名称	样品量	I-131				Cs-137				单位
		10min	30min	1h	10h	10min	30min	1h	10h	
水	2L	14	8	6	3	30	18	12	5	Bq/L
蔬菜(叶菜)	1kg	9	5	4	2	20	10	8	3	Bq/kg

表 2 应急监测中样品量在圆柱形样品盒($\Phi 75\text{mm} \times 70\text{mm}$)条件下测量时间和探测限关系

介质名称	样品量	I-131				Cs-137				单位
		10min	30min	1h	10h	10min	30min	1h	10h	
土壤	约 340g	240	150	100	40	500	300	200	90	Bq/kg
气溶胶	1000 m ³	0.004	0.002	0.002	0.001	0.007	0.004	0.003	0.002	Bq/m ³
	10000m ³	0.0004	0.0002	0.0002	0.0001	0.0007	0.0004	0.0003	0.0002	Bq/m ³
水	250g	340	220	150	60	750	450	300	130	Bq/kg
蔬菜(叶菜)	125g	680	440	300	120	1500	900	600	260	Bq/kg

注: 高纯锗 γ 能谱仪探测器相对效率为 40%。

附录 D

(资料性附录)

不同核与辐射事故类别中特征 γ 核素数据库表 1 核事件特征 γ 核素数据库

核素	能量/keV	分支比/%	半衰期	核素	能量/keV	分支比/%	半衰期
^{140}La	1596.17	95.4	40.27h	^{140}Ba	537.26	24.39	12.75d
	487.029	45.94					
^{103}Ru	497.08	86	39.5d	^{103}Rh	497.08	86	56.12min
^{99}Mo	140.51	89.9	66.02h	^{132}Te	228.16	88.5	78.2h
^{115}Cd	336.3	46.02	53.5h	^{138}Cs	1435.86	76.3	32.2min
$^{115\text{m}}\text{Cd}$	933.84	1.33	44.6h	^{137}Ba	661.66	85	2.552min
^{111}Ag	342.12	6.68	7.45d	$^{137\text{m}}\text{Ba}$	661.66	85	2.552min
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	657.76	94.4	249.9d	^{136}Cs	1048.7	79.8	13.16d
	884.68	72.8			818.5	99.7	
^{97}Zr	743.36	92.9	16.9h	^{22}Na	1274.55	99.94	2.602a
^{95}Zr	756.72	54.4	64.0d	^{24}Na	1368.64	99.993	15.03h
	724.18	44.2			2754.03	99.843	
^{124}Sb	602.72	98.3	60.2d	^{125}I	35.49	6.82	60.12d
^{137}Cs	661.66	85	30.17a	^{131}I	364.48	81.1	8.04d
^{125}Sb	600.56	17.78	2.73a	^{132}I	772.6	76.2	2.3h
	427.89	29.44			667.69	98.7	
^{91}Sr	555.57	60	9.5h	^{133}I	529.87	86.2	20.8h
^{153}Sm	103.18	28.3	46.7h	^{135}I	1260.41	28.6	6.61h
^{134}Cs	798.76	85.4	2.062a		1131.51	22.5	
	604.66	97.6		^{147}Nd	91.11	27.9	11.0d
^{97}Nb	657.92	98.2	72.0min	^{106}Rh	511.8	20.47	30.0s
^{198}Au	411.8	95.5	2.695d	^{82}Br	776.49	83.4	35.31h
^{199}Au	158.38	40.9	3.14d		554.32	70.7	
^{76}As	559	45	26.31h	^{95}Nb	765.78	99.79	35.0d
^{149}Pm	285.9	3.1	53.08d	^{144}Pr	696.49	1.34	17.27h
^{151}Pm	340.08	22	28.4h				

表 2 反应堆核事故特征 γ 核素数据库

核素	能量/keV	分支比/%	半衰期	核素	能量/keV	分支比/%	半衰期
^{131}I	722.89	1.8	8.04d	^{132}I	954.55	18.1	2.3h
	636.97	7.25			772.6	76.2	
	364.48	81.1			667.69	98.7	
	284.3	6.05			630.22	13.7	
	80.18	2.62			522.65	16.1	
^{133}I	1298.22	2.33	20.8h	^{134}Cs	801.84	8.73	2.062a
	875.33	4.47			795.76	85.4	
	529.87	86.2			604.66	97.6	
	510.53	1.81			569.29	15.43	
	233.22	2.64			563.26	8.38	
^{132}Te	228.16	88.5	78.2h	^{99}Mo	140.51	89.9	66.02h
	116.3	1.9			777.8	4.36	
	111.76	1.8			739.5	12.4	
	49.72	14.3			181.07	6.1	
^{140}Ba	537.26	24.39	12.746d	^{140}La	925.188	7.05	40.27h
	423.72	3.15			328.77	20.74	
	304.8	4.3			815.775	23.64	
	162.65	6.21			487.029	45.94	
	13.85	1.17			1596.17	95.4	
^{95}Zr	756.72	54.4	64.00d	^{153}Sm	103.18	28.3	46.7h
	724.18	44.2			69.67	5.25	
^{95}Nb	765.78	99.79	35.00d	$^{115}\text{Cd}^m$	933.84	1.33	44.6d
^{106}Rh	1050.47	1.45	30.00s	$^{110}\text{Ag}^m$	1505.04	13.22	249.9d
	622.2	9.95			1384.3	24.6	
	511.8	20.47			937.49	34.3	
	---	---			884.68	72.8	
	---	---			763.95	22.27	
^{103}Ru	610.33	5.42	39.35d		706.68	16.31	
	497.08	86			657.76	94.4	
^{103}Rh	497.08	86	56.12min		---	---	
	610.33	5.42			---	---	
^{115}Cd	527.9	27.45	53.5h		^{147}Nd	531.02	
	492.35	8.03		439.89		1.18	
	336.3	46.02		319.41		1.91	
	260.9	1.94		91.11		27.9	
^{124}Sb	2091	5.61	60.2d	^{151}Pm	717.6	3.92	28.4h
	1691.02	49			445.65	3.94	
	722.78	11.3			340.08	22	
	645.82	7.23			275.2	6.5	
	602.72	98.3			167.73	7.7	
^{137}Cs	661.66	85	30.17a	^{137}Ba	661.66	85	2.552min
^{141}Ce	145.44	48.8	32.5d	^{149}Pm	285.9	3.1	53.08h

表 3 核燃料后处理厂释放的特征 γ 核素数据库

核素	能量/keV	分支比/%	半衰期	核素	能量/keV	分支比/%	半衰期
^{131}I	722.89	1.80	8.04d	^{133}I	1298.22	2.33	20.80h
	636.97	7.25			875.33	4.47	
	364.48	81.10			529.87	86.20	
	284.30	6.05			510.53	1.81	
	80.18	2.62			233.22	2.64	
^{135}I	1678.03	9.5	6.61h	^{140}Ba	537.26	24.39	12.74d
	1457.56	8.63			437.57	1.93	
	1260.41	28.6			423.72	3.15	
	1131.51	22.5			304.80	4.3	
	526.56	13.3			162.65	6.21	
^{140}La	925.188	7.05	40.27h	^{91}Sr	1024.30	33.00	9.5h
	328.77	20.74			925.80	3.9	
	815.775	23.64			749.80	22.5	
	487.029	45.94			652.90	7.5	
	1596.17	95.4			555.57	60.0	
^{138}Cs	1435.86 1009.78 546.94 462.79 2218.0	76.3 29.8 10.8 30.7 15.2	32.2min	^{137}Cs	661.66	85.0	30.17a
				^{137}Xe	455.490	31.0	3.818min
				^{140}Xe	805.52	20.0	13.60s
					1413.66	12.2	
				^{91}Kr	108.788	43.5	8.57s
					506.592	19.1	

表 4 医用核素释放的特征 γ 核素数据库

核素	能量/keV	分支比/%	半衰期	核素	能量/keV	分支比/%	半衰期
^{72}Ca	2507.70	12.80	14.1h	^{76}As	1228.52	1.40	26.31h
	2201.60	26.10			1216.02	3.90	
	894.20	9.85			1212.72	1.64	
	833.95	95.60			657.03	6.12	
	629.90	24.40			559.00	45.00	
^{82}Br	1317.47	26.9	35.31h	^{192}Ir	604.41	8.31	74.20d
	1043.98	27.4			468.07	48.00	
	776.49	83.4			316.51	82.80	
	698.32	28.6			308.46	29.60	
	619.05	43.00			295.96	28.70	
554.32	20.70						
^{86}Rb	1076.60	8.78	18.82d	^{125}I	35.49	6.82	60.12d
^{99}Mo	777.80	4.36	66.02h	^{131}I	722.89	1.80	8.04d
	739.50	12.4			636.97	7.25	
	366.44	1.30			364.48	81.10	
	181.07	6.10			284.30	6.05	
	140.51	89.90			80.18	2.62	
^{111}Ag	342.12	6.68	7.45d	^{199}Au	208.21	9.00	3.14d
	245.42	1.13			158.38	40.90	
^{132}I	954.55	18.10	2.30h	^{133}I	1298.22	2.33	20.80h
	772.60	76.20			875.33	4.47	
	667.69	98.70			529.87	86.20	
	630.22	13.70			510.53	1.81	
	522.65	16.10			233.22	2.64	
^{24}Na	2754.03	99.84	15.03h	^{203}Hg	279.20	81.50	46.80d
	1368.64	99.99		^{137}Cs	661.66	85.00	30.17a
^{57}Co	136.47	10.47	270.90d	^{58}Co	810.75	99.45	70.80d
	122.06	85.70		^{22}Na	1274.55	99.90	2.602a
	14.41	9.64		^{65}Zn	1115.52	50.75	244.1d
^{132}Te	228.16	88.50	78.20h	^{60}Co	1332.51	99.98	5.27a
	116.30	1.90			1173.24	99.87	
	111.76	1.80		^{198}Au	675.89	1.03	2.695d
	49.72	14.30			411.80	95.5	

表 5 辐射事故释放的特征 γ 核素数据库

核素	能量/keV	分支比/%	半衰期
^{60}Co	1332.51 1173.24	99.982 99.87	5.27a
^{131}I	722.89 636.97 364.48 284.30 80.18	1.8 7.25 81.1 60.5 2.62	8.04 d
^{238}U	92.8 92.38 63.29	2.69 2.72 3.81	
^{137}Cs	661.66	85	30.174 a
^{226}Ra	186.21	3.2	1600a

附录 E
(资料性附录)

核裂变后不同阶段 γ 能谱可能存在感兴趣峰

核素	半衰期	能量 (keV)	核裂变后不同阶段 γ 能谱可能存在感兴趣峰						
			5 小时	10 小时	1 天	3 天	5 天	10 天	30 天
^{77}Ge	11.21 小时	215.5	×	○	○	×	×	×	×
^{78}As	90.7 分钟	613.8	○	○	×	×	×	×	×
		694.9	○	×	×	×	×	×	×
		1308.7	○	×	×	×	×	×	×
^{84}Br	31.76 分钟	881.6	○	×	×	×	×	×	×
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	4.48 小时	151.2	○	○	○	×	×	×	×
		304.9	○	○	○	×	×	×	×
^{87}Kr	76.3 分钟	402.6	○	○	×	×	×	×	×
^{88}Kr	2.83 小时	196.3	○	○	○	×	×	×	×
		834.8	○	○	○	×	×	×	×
		1529.8	○	○	○	×	×	×	×
$^{88}\text{Rb}(^{88}\text{Kr})$	17.77 分钟	1836	○	○	○	×	×	×	×
		898	○	○	○	×	×	×	×
$^{90\text{m}}\text{Y}$	3.19 小时	202.5	○	○	○	×	×	×	×
		479.5	○	○	○	×	×	×	×
^{91}Sr	9.65 小时	1024.3	○	○	○	○	○	×	×
		749.8	○	○	○	○	○	×	×
		652.9	○	○	○	○	○	×	×
^{91}Y	58.51 天	1204.8	×	×	○	○	○	○	○
$^{91\text{m}}\text{Y}(^{91}\text{Sr})$	49.71 分钟	555.6	○	○	○	○	○	×	×
^{92}Sr	2.61 小时	1383.9	○	○	○	×	×	×	×
		430.5	○	○	×	×	×	×	×
		1142.4	○	○	×	×	×	×	×
^{92}Y	3.54 小时	934.5	○	○	○	×	×	×	×
		1405.4	○	○	○	×	×	×	×
		561.1	○	○	○	×	×	×	×
^{93}Y	10.18 小时	266.9	○	○	○	○	×	×	×
		947.1	○	○	○	○	×	×	×
		1917.8	○	○	○	○	×	×	×
^{95}Zr	64.03 天	756.7	○	○	○	○	○	○	○
		724.2	×	×	×	○	○	○	○
^{95}Nb	34.99 天	765.8	×	○	○	○	○	○	○

注：○表示存在，×表示不存在，下同。

(续表)

核素	半衰期	能量 (keV)	核裂变后不同阶段 γ 能谱可能存在感兴趣峰						
			5 小时	10 小时	1 天	3 天	5 天	10 天	30 天
^{97}Zr	16.75 小时	1148	○	○	○	○	○	×	×
		1750.2	○	○	○	○	○	×	×
^{97}Nb	72.1 分钟	657.9	○	○	○	○	○	×	×
$^{97\text{m}}\text{Nb} (^{97}\text{Zr})$	58.7 秒	743.4	○	○	○	○	○	○	×
^{99}Mo	65.92 小时	739.5	○	○	○	○	○	○	○
		777.9	○	○	○	○	○	○	○
$^{99\text{m}}\text{Tc} (^{99}\text{Mo})$	6.01 小时	140.5	○	○	○	○	○	○	○
^{103}Ru	39.25 天	497.1	○	○	○	○	○	○	○
		610.3	×	×	×	○	○	○	○
^{105}Ru	4.44 小时	724.3	○	○	○	×	×	×	×
		469.4	○	○	○	×	×	×	×
		316.4	○	○	○	×	×	×	×
^{105}Rh	35.36 小时	318.9	○	○	○	○	○	×	×
$^{105\text{m}}\text{Rh} (^{105}\text{Ru})$	40 秒	129.6	○	○	○	×	×	×	×
$^{106}\text{Rh} (^{106}\text{Ru})$	30.07 秒	621.9	×	×	×	×	×	×	○
^{113}Ag	5.37 小时	298.6	○	○	×	×	×	×	×
$^{115\text{m}}\text{In} (^{115}\text{Cd})$	4.49 小时	336.2	×	×	×	○	×	×	×
^{117}Cd	2.49 小时	1303.3	○	○	×	×	×	×	×
$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36 小时	1066	○	○	×	×	×	×	×
^{125}Sn	9.64 天	1067.1	×	×	×	○	○	○	×
^{127}Sb	3.85 天	685.7	○	○	○	○	○	○	○
		473	×	○	○	○	○	○	○
^{128}Sb	9.05 小时	754	○	○	○	×	×	×	×
^{129}Sb	4.37 小时	813	○	○	×	×	×	×	×
		1030.7	○	○	○	×	×	×	×
$^{129}\text{Te} (^{129}\text{Sb})$	69.6 分钟	459.6	○	○	○	×	×	×	×
^{130}Sb	39.5 分钟	793.4	○	×	×	×	×	×	×
^{131}Sb	23.03 分钟	943.4	○	×	×	×	×	×	×
$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25 小时	852.2	○	○	○	○	○	○	×
		1206.6	○	○	○	○	○	○	×
^{131}I	8.03 天	364.5	○	○	○	○	○	○	○
		637	○	○	○	○	○	○	○
		284.3	×	○	○	○	○	○	×
^{132}Te	3.20 天	228.2	○	○	○	○	○	○	×
		116.3	×	○	○	○	○	○	○
^{132}I	2.30 小时	667.7	○	○	○	○	○	○	○
		772.6	○	○	○	○	○	○	○
		954.6	×	○	○	○	○	○	○
		522.7	○	○	○	○	○	○	○
$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4 分钟	912.7	○	×	×	×	×	×	×
		647.5	○	×	×	×	×	×	×

(续表)

核素	半衰期	能量 (keV)	核裂变后不同阶段 γ 能谱可能存在感兴趣峰						
			5 小时	10 小时	1 天	3 天	5 天	10 天	30 天
^{97}Zr	16.75 小时	1148	○	○	○	○	○	×	×
		1750.2	○	○	○	○	○	×	×
^{97}Nb	72.1 分钟	657.9	○	○	○	○	○	×	×
$^{97\text{m}}\text{Nb}(^{97}\text{Zr})$	58.7 秒	743.4	○	○	○	○	○	○	×
^{99}Mo	65.92 小时	739.5	○	○	○	○	○	○	○
		777.9	○	○	○	○	○	○	○
$^{99\text{m}}\text{Tc}(^{99}\text{Mo})$	6.01 小时	140.5	○	○	○	○	○	○	○
^{103}Ru	39.25 天	497.1	○	○	○	○	○	○	○
		610.3	×	×	×	○	○	○	○
^{105}Ru	4.44 小时	724.3	○	○	○	×	×	×	×
		469.4	○	○	○	×	×	×	×
		316.4	○	○	○	×	×	×	×
^{105}Rh	35.36 小时	318.9	○	○	○	○	○	×	×
$^{105\text{m}}\text{Rh}(^{105}\text{Ru})$	40 秒	129.6	○	○	○	×	×	×	×
$^{106}\text{Rh}(^{106}\text{Ru})$	30.07 秒	621.9	×	×	×	×	×	×	○
^{113}Ag	5.37 小时	298.6	○	○	×	×	×	×	×
$^{115\text{m}}\text{In}(^{115}\text{Cd})$	4.49 小时	336.2	×	×	×	○	×	×	×
^{117}Cd	2.49 小时	1303.3	○	○	×	×	×	×	×
$^{117\text{m}}\text{Cd}$	3.36 小时	1066	○	○	×	×	×	×	×
^{125}Sn	9.64 天	1067.1	×	×	×	○	○	○	×
^{127}Sb	3.85 天	685.7	○	○	○	○	○	○	○
		473	×	○	○	○	○	○	○
^{128}Sb	9.05 小时	754	○	○	○	×	×	×	×
^{129}Sb	4.37 小时	813	○	○	×	×	×	×	×
		1030.7	○	○	○	×	×	×	×
$^{129}\text{Te}(^{129}\text{Sb})$	69.6 分钟	459.6	○	○	○	×	×	×	×
^{130}Sb	39.5 分钟	793.4	○	×	×	×	×	×	×
^{131}Sb	23.03 分钟	943.4	○	×	×	×	×	×	×
$^{131\text{m}}\text{Te}$	33.25 小时	852.2	○	○	○	○	○	○	×
		1206.6	○	○	○	○	○	○	×
^{131}I	8.03 天	364.5	○	○	○	○	○	○	○
		637	○	○	○	○	○	○	○
		284.3	×	○	○	○	○	○	×
^{132}Te	3.20 天	228.2	○	○	○	○	○	○	×
		116.3	×	○	○	○	○	○	○
^{132}I	2.30 小时	667.7	○	○	○	○	○	○	○
		772.6	○	○	○	○	○	○	○
		954.6	×	○	○	○	○	○	○
		522.7	○	○	○	○	○	○	○
$^{133\text{m}}\text{Te}$	55.4 分钟	912.7	○	×	×	×	×	×	×
		647.5	○	×	×	×	×	×	×

(续表)

核素	半衰期	能量 (keV)	核裂变后不同阶段 γ 能谱可能存在感兴趣峰						
			5 小时	10 小时	1 天	3 天	5 天	10 天	30 天
^{133}I	20.83 小时	529.9	○	○	○	○	○	×	×
		875.3	○	○	○	○	○	×	×
		1298.2	×	×	○	○	×	×	×
		1236.4	○	○	○	○	○	×	×
$^{133\text{m}}\text{Xe}$	2.20 天	233.2	×	×	○	×	×	×	×
^{134}Te	41.8 分钟	767.2	○	×	×	×	×	×	×
		210.5	○	×	×	×	×	×	×
		278	○	×	×	×	×	×	×
^{134}I	52.5 分钟	847	○	○	×	×	×	×	×
		1072.6	○	○	×	×	×	×	×
		595.4	○	○	×	×	×	×	×
^{135}I	6.58 小时	1260.4	○	○	○	○	×	×	×
		1131.5	○	○	○	○	×	×	×
		1678	○	○	○	○	×	×	×
^{135}Xe	9.14 小时	249.8	○	○	○	○	○	×	×
		608.2	○	○	○	○	×	×	×
		408	×	×	○	×	×	×	×
$^{135\text{m}}\text{Xe} (^{135}\text{I})$	15.29 分钟	526.6	○	○	○	○	×	×	×
^{137}Cs	30.08 年	661.7	×	×	×	○	○	○	○
^{138}Cs	33.41 分钟	1435.9	○	×	×	×	×	×	×
		462.8	○	×	×	×	×	×	×
		1009.8	○	×	×	×	×	×	×
^{139}Ba	82.93 分钟	165.9	○	○	×	×	×	×	×
		1254.6	○	×	×	×	×	×	×
		1420.5	○	×	×	×	×	×	×
^{140}Ba	12.75 天	537.3	○	○	○	○	○	○	○
		162.7	○	○	○	○	○	○	○
		437.6	○	○	○	○	○	○	○
$^{140}\text{La} (^{140}\text{Ba})$	1.68 天	1596.2	○	○	○	○	○	○	○
		487	○	○	○	○	○	○	○
		815.8	×	○	○	○	○	○	○
		328.8	○	○	○	○	○	○	○
^{141}La	3.92 小时	1354.5	○	○	○	×	×	×	×
		1693.3	○	○	×	×	×	×	×
^{141}Ce	32.51 天	145.4	○	○	○	○	○	○	○
^{142}La	91.1 分钟	641.3	○	○	○	×	×	×	×
		894.9	○	○	×	×	×	×	×
		1901.3	○	○	×	×	×	×	×
^{143}Ce	33.04 小时	293.3	○	○	○	○	○	○	×
		664.6	○	○	○	○	○	○	×
^{144}Ce	284.91 天	133.5	×	○	○	○	○	○	○
$^{144}\text{Pr} (^{144}\text{Ce})$	17.28 分钟	696.5	×	×	×	○	○	○	○

(续表)

核素	半衰期	能量 (keV)	核裂变后不同阶段 γ 能谱可能存在感兴趣峰						
			5 小时	10 小时	1 天	3 天	5 天	10 天	30 天
^{145}Pr	5.98 小时	979	×	○	○	×	×	×	×
^{147}Nd	10.98 天	439.9	×	×	×	○	○	○	○
		398.2	×	×	×	×	×	○	○
^{149}Nd	1.73 小时	211.3	○	○	×	×	×	×	×
		423.6	○	○	×	×	×	×	×
^{149}Pm	53.08 小时	286	×	×	×	○	×	×	×
^{151}Pm	28.40 小时	340.1	○	○	○	○	○	○	×
		717.7	×	○	○	○	○	×	×
^{153}Sm	46.50 小时	103.2	○	○	○	○	○	○	×
^{156}Eu	15.19 天	1230.7	×	×	×	×	×	○	○
		1242.4	×	×	×	×	×	○	○
		646.3	×	×	×	×	×	○	○
^{157}Eu	15.18 小时	370.5	×	○	○	×	×	×	×

附录 F
 (资料性附录)
 2L 马林杯尺寸

