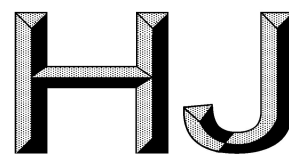


附件 8



中华人民共和国国家环境保护标准

HJ □□□□-20□□

就地 HPGe 谱仪测量土壤中 γ 核素技术规范

Technical Specifications for Determination of γ -emitting Radionuclide in
Soil by In-suit HPGe Spectrometry

（征求意见稿）

20□□-□□-□□发布

20□□-□□-□□实施

生 态 环 境 部 发 布

目 次

前 言.....	155
1 适用范围.....	156
2 规范性引用文件.....	156
3 术语和定义.....	156
4 方法原理.....	158
5 仪器和设备.....	158
6 分析步骤.....	159
7 效率刻度.....	160
8 结果计算与表示.....	163
9 质量保证和质量控制.....	165
10 注意事项.....	166
附录 A（资料性附录）土壤中单位活度浓度放射性核素在地表 1m 处产生初级 γ 射线注量率.....	168
附录 B（资料性附录）就地 HPGe 谱仪测量土壤中 γ 核素活度浓度的影响因素.....	189
附录 C（资料性附录）空气中均匀分布的放射性核素在地表 1m 处的初级 γ 射线注量率.....	191
附录 D（规范性附录）蒙特卡洛模拟技术规范.....	196

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，规范土壤中 γ 核素的测定方法，制定本规范。

本规范规定了测定土壤中 γ 核素的就地HPGe谱仪法，等效引用ISO 18589-7《环境放射性的测量 — 土壤 第7部分 γ 核素的就地测量》。

本规范的附录A～附录C为资料性附录，附录D为规范性附录。

本规范为首次发布。

本规范由生态环境部核设施安全监管司、法规与标准司组织制订。

本规范起草单位：生态环境部核与辐射安全中心、辐射环境监测技术中心、华北电力大学、安徽省辐射环境监督站。

本规范生态环境部20□□年□□月□□日批准。

本规范自20□□年□□月□□日起实施。

本规范由生态环境部解释。

就地HPGe谱仪测量土壤中 γ 核素技术规范

1 适用范围

本规范规定了就地 HPGe γ 谱仪法测定土壤中 γ 核素的放射性活度浓度。

本规范适用于核事故应急监测、常规环境监测时，地表土壤中天然放射性和人工放射性 γ 核素的测定。本规范不适用于土壤中放射性核素分布未知、强辐射场的测量。

对于新沉降的放射性落下灰，本规范测定的 ^{137}Cs 活度浓度检出限为 100 Bq/m^2 。

2 规范性引用文件

本规范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规范。

GB/T 11713 高纯锗 γ 能谱分析通用方法

GB/T 27418 测量不确定度评定和表示

JJG 417 γ 谱仪

CNAS-CL01 检测和校准实验室能力认可准则

ISO 18589-7 环境放射性的测量 – 土壤 第 7 部分 γ 核素的就地测量

IEC 1452 核仪器 放射性核素 γ 发射率的测量 锗谱仪的校准和使用

ICRU Report 53 环境中 γ 谱仪

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本规范。

3.1 本征探测效率 intrinsic detection efficiency

用以表示探测器本身性能的参数。它等于记录的脉冲数与入射到探测器灵敏体积内的 γ 光子数之比，量纲一的量。

3.2 全能吸收峰效率 full-energy-peak efficiency

对于给定的测量条件和 γ 射线能量，HPGe 探测器测得的 γ 射线全能吸收峰净计数与同一时间间隔内辐射源发射的该能量 γ 射线总数的比值，量纲一的量。

3.3 相对探测效率 relative detection efficiency

在源至探头前表面距离为 25cm 时，HPGe 探测器和标准圆柱形 NaI(Tl)闪烁体（ $\phi \times h$: 7.62 cm $\times$ 7.62 cm）探测器测量 ^{60}Co 源 1332.5 keV γ 射线的全能吸收峰探测效率之比。

注：标准圆柱形 NaI(Tl)闪烁体晶体对 1332.5 keV γ 射线的全能吸收峰探测效率为 1.2×10^{-3} 。

3.4 能量分辨力 energy resolution

探测器分辨能量不同却又非常相近的入射 γ 射线的能力。能量分辨力与入射 γ 射线能量有关,对于指定能量的单能 γ 射线,常用该能量的全能吸收峰的半高宽来表示, keV。

3.5 半高宽 full width at half maximum (FWHM)

在脉冲高度谱中,单峰峰值一半处两点得横坐标之间的距离, keV。

注:如果能谱由几个峰组成,则每个峰都有一个半高宽。

3.6 峰位 peak position

由脉冲高度谱中,一个峰的钼心处的能量(keV)或等效量(道数)。

3.7 本底干扰 background disturbance

本底对于待测核素特征 γ 射线 E 全能吸收峰面积的干扰。

3.8 探测下限 lower limit of detection (LLD)

在给定的置信度下, γ 谱仪可探测到最低的活度值。

3.9 就地测量 in-situ measurement

不对待测对象做任何物理或化学性质处理或改变,在其所处的现场进行的测量。

3.10 探测器高度 detection height

HPGe 晶体几何中心与地表的垂直距离, m。

3.11 活度浓度 activity concentration

单位面积或单位质量待测物质中放射性核素的活度, $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ 或 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

3.12 有效前面积 η effective front area

表征探测器全能吸收峰探测效率的参数,即能量为 E 的 γ 射线束沿探测器轴向平行入射的情况下,单位注量率所产生的全能吸收峰计数率, m^2 。

3.13 角度修正因子 W angle correction factor

将探测器置于在野外地表实际测量 γ 射线的计数率与沿轴向平行入射的 γ 射线计数率之比,量纲一的量。

3.14 注量活度比 ϕ/A fluence activity ratio

土壤中单位活度浓度的放射性核素,在地面 h 高度处产生的能量为 E 的 γ 射线的注量率, $(\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})\cdot(\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1})^{-1}$ 或 $(\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})\cdot(\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2})^{-1}$ 。

3.15 张弛深度 / relaxation length

描述放射性核素与土壤深度相关的数学参数，表示活度浓度减少至表面 e^{-1} (37%) 时，距离土壤表面的深度，cm。

3.16 质量张弛深度 β relaxation mass per unit area

表示活度浓度减少至表面活度的 e^{-1} (37%) 时，此深度距离土壤表面范围内的单位面积土壤的质量， $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

3.17 等效表面沉积量 equivalent surface deposition

对于人工放射性核素，假设质量张弛深度为 0，计算得到的无限大平面源活度浓度即为等效表面沉积量。等效表面沉积量在探测器高度处产生的初始 γ 射线注量率与实际体源产生的相同，但忽略了 γ 射线在土壤中的衰减，导致给出的结果比实际值偏小。

3.18 监督源 radiation sources for supervision

为了监督谱仪的长期稳定性，HPGe γ 谱仪应配备有长寿命的、高中低能区至少各有一条 γ 射线的监督源。

4 方法原理

地表 γ 射线的注量率与土壤中放射性核素的活度浓度、核素在土壤中的分布，以及土壤的化学组分、含水率等因素有关。探测器高度为 1 米时，测量的全能吸收峰计数率与土壤中放射性核素的活度浓度成正比。

$$A = \frac{N_f}{\varepsilon} \quad (1)$$

式中：

ε —探测效率，HPGe 探测器的全能吸收峰净计数率与土壤中待测放射性核素的活度浓度之比， $\text{s}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1})^{-1}$ 或 $\text{s}^{-1}\cdot(\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2})^{-1}$ 。

N_f —待测放射性核素的全能吸收峰计数率， s^{-1} 。

A —待测放射性核素的活度浓度， $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 或 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

5 仪器和设备

5.1 HPGe 谱仪：由 HPGe 探测器、高压电源、主放大器、多道脉冲幅度分析器 (MCA)、制冷单元 (液氮或电制冷)、数据处理系统等 6 个主要部分构成。

5.1.1 HPGe 探测器：对于 ^{60}Co 的 1332.5 keV γ 射线全能吸收峰能量分辨力应优于 2.5keV。 N 型或 P 型 HPGe 探测器都可，但一般情况下不推荐 N 型探测器，这是因为 N 型探测器与 P 型探测器相比较脆弱。推荐使用具有各向同性响应函数的探测器，即对入射光子方向没有或几乎没有依赖关系的探测器。探测器的表面积 (即垂直于入射光子方向的截面) 与入射角度

不相关时（即晶体的直径与高度近似相等时），会满足这个条件。

5.1.2 高压电源：根据所用探测器的最佳工作状态选择探测器高压。电源输出电压应连续可调，波纹电压应不大于 0.01%，电流应不小于 100 μA 。对于同轴 *P* 型 HPGe 探测器，要加正高压，同轴 *N* 型要加负高压。

5.1.3 主放大器：又称谱学放大器，属于线性放大器，应具有波形调节并与前置放大器及多道脉冲幅度分析器匹配。

5.1.4 多道脉冲幅度分析器 (MCA)：与 HPGe 探测器相匹配的 MCA 的道数应不少于 8192 道。

5.1.5 数据处理系统

（1）接收 MCA 的谱数据并对其进行处理。数据处理系统由计算机硬件设备和软件构成。

（2）软件主要包括解析 γ 能谱的各种常规程序，诸如能量刻度、效率刻度、谱光滑、核素识别、峰面积计算、峰面积校正、效率校正、母子体校正和重峰分析等基本程序。

（3）数据处理系统的硬件设备主要包括计算机及配套的读出读入装置。

5.2 三角架：能够固定探测器晶体中心距地面 1m 高的支架，应使用低原子序数、低密度的材料制造（如：铝、塑料、木材）。

5.3 卷尺：卷尺的刻度长度应大于 1m，且刻度精度不小于 1mm

5.4 其它辅助设备：应配备全球定位系统（GPS）仪、温湿度仪，记录测试时的地理坐标、温湿度。

6 分析步骤

6.1 布点原则

一般情况，选择一个开阔、平坦的区域，而且探测器的视阈半径 R_s 内应无干扰物体（如建筑物）。测量落下灰时，应选择自落下灰沉积以来放射性核素在土壤中分布未被破坏的区域（如：没有农业活动）。

6.2 测量条件记录

记录测量点位温湿度、GPS 坐标等。

6.3 仪器状态的检查

就地测量前，检查 HPGe 探测器的晶体温度是否达到工作温度。之后再打开 HPGe 探测器的偏压电源，检查仪器的能量分辨力。

6.4 就地 γ 谱仪的安装

在选定的测量区域中间位置，将 HPGe 探测器稳定地安装在测量支架上，探测器的端面

朝下。调整探测器高度，使之距离地表 1 米。连接 HPGe 谱仪电子学仪器的所有电缆。

6.5 测量设置

根据现场待测核素特征峰的计数率，设置测量时间，使得感兴趣区计数统计涨落在 10% 以内。

6.6 γ 能谱的采集

在预定的时间内获取 γ 能谱。分析人员应离开探测器几米远。停止测量后，在适当的文件名下存储收集到的 γ 能谱。

6.7 γ 能谱分析

用 γ 能谱分析软件查看采集的 γ 能谱，若能谱中存在可明显辨别的峰，根据峰形特征设置适合的感兴趣区域，读取全能吸收峰的净峰面积；若能谱中无可明显辨别的峰，则根据待测核素的特征峰的能量和谱仪的半高宽，设置感兴趣区，读取全能吸收峰的积分面积。

7 效率刻度

对于就地 HPGe 谱仪而言，很难有不同深度分布的大面积 γ 射线标准场。因此，根据土壤、空气的物理参数，放射性核素在土壤中分布的理论模型，并结合探测器的特征进行探测效率刻度。就地 HPGe 谱仪的探测效率取决于放射性核素在土壤中的分布，探测器高度，探测器的性质， γ 射线的能量以及在土壤和空气的吸收性质等因素，可利用三个比例系数相乘计算，即为 Beck 公式：

$$\varepsilon = \eta \times W \times F \quad (2)$$

式中：

F —注量活度比，土壤中单位活度浓度的核素在地表 1m 处产生的初级 γ 射线注量率， $(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \cdot (\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1})^{-1}$ 或 $(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \cdot (\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}$ 。该物理量由放射性核素在土壤中分布、土壤组分与密度等因素决定，与探测器无关。

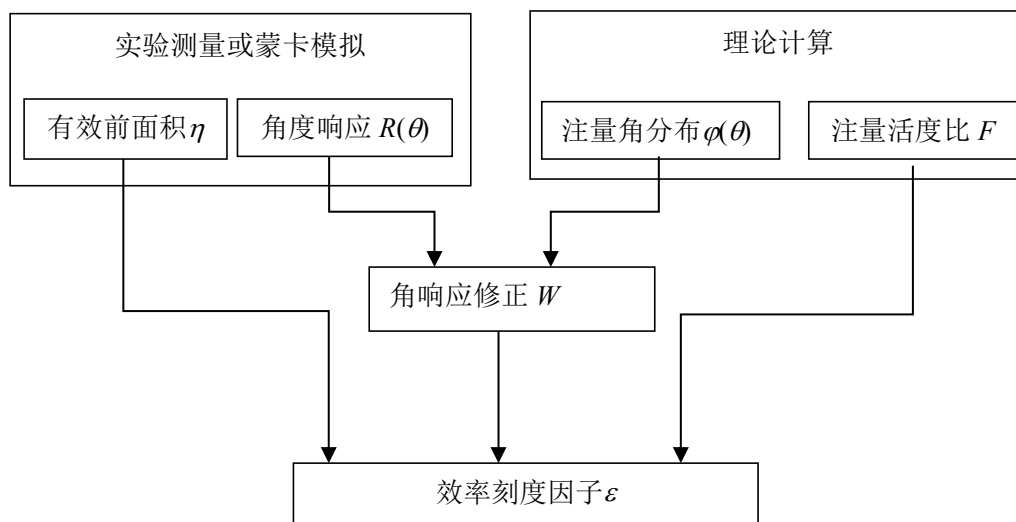
W —角度修正因子，由探测器的角响应因子 $R(\theta)$ 和地表 γ 射线注量率角分布 $\varphi(\theta)$ 共同决定的，量纲一的量。这是因为探测器非标准球体，对具有不同角度入射的 γ 射线探测效率并不相同。而探测器所在的位置， γ 射线是从土壤方向 2π 立体角内发射而来的，而非沿探测器轴向平行入射的 γ 射线，故需要进行角度修正。该物理量与探测器几何结构、 γ 射线能量、放射性核素在土壤的分布有关。

η —有效前面积， cm^2 。该物理量只与所用的探测器有关，由探测器晶体尺寸、材料、几何结构等因素决定，与土壤中放射性核素分布无关。

7.1 效率校准的方法

就地 HPGe 谱仪的探测效率 ε 由注量活度比 F 、角度修正因子 W 和探测器有效前面积 η 三个物理量乘积构成。(1)理论模型计算土壤中放射性核素在空气产生的初级 γ 射线注量率 φ (即

注量活度比 F) 和角分布 $\varphi(\theta)$ 。(2) 实验测量或蒙特卡洛模拟计算探测器的有效前面积 η 和角度响应 $R(\theta)$ 。(3) 由注量率角分布 $\varphi(\theta)$ 和探测器的角度响应 $R(\theta)$ 计算得到角度修正因子 W 。



7.2 质量张弛深度 β 的确定

天然放射性核素在土壤中均匀分布的, $\beta = \infty$; 人工放射性核素可先取 $\beta = 0$, 计算等效表面沉积量, 再根据现场取样或经验值得到真实质量深度 β 。一般来说, 新近沉降的放射性落下灰, 放射性核素在土壤表面均匀分布, $\beta = 0$; 随着时间推移, 放射性核素不断向土壤深度渗透, 活度浓度随着土壤质量深度 ζ 的增加而呈指数下降, $0 < \beta < \infty$ 。

7.3 注量活度比的计算

根据放射性核素的质量张弛深度、土壤密度和组分计算单位放射性核素活度浓度在地表 1m 处的注量率和角分布。详细计算模型见附录 A。

7.4 有效前面积 η 的刻度

用标准 γ 点源或蒙特卡洛方法刻度 HPGe 探测器的有效前面积 η 。

7.4.1 标准 γ 点源刻度

刻度 HPGe 探测器有效前面积 η 的标准 γ 点源应能够发射低能 γ 射线和高能 γ 射线, 一般包括 ^{241}Am 、 ^{133}Ba 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{152}Eu 等。

(1) 将标准 γ 点源放在探测器轴向上, 尽可能远离探测器 (>10 探测器长度), 以便使得到达探测器前表面的光束近似为平行光束。开始获取数据, 使待测的全能吸收峰面积的统计涨落小于 5%。计算在探测器的有效晶体中心的注量率;

$$\varphi = \frac{A_k p}{4\pi r^2} e^{-\mu_a x} e^{-\mu_h y} \quad (3)$$

式中:

A_k —刻度源的活度, Bq;

p —能量为 E 的 γ 射线的发射几率，量纲为一的量；

μ_a —能量为 E 的 γ 射线在空气中的衰减系数， cm^{-1} ；

x —空气中源的容器和探测器前帽之间的距离， cm ；

μ_h —源容器（壁）中的减弱系数， cm^{-1} ；

y — γ 射线在到达探测器途中在源容器穿过壁中的距离， cm ；

r —源到晶体有效中心的距离， cm ；

i 对 $E > 1\text{MeV}$ 的 γ 射线，晶体的有效中心近似在晶体的几何中心；

ii 对 $E < 0.1\text{MeV}$ 的 γ 射线，晶体的有效中心在晶体的表面；

iii 对能量处在上面二个值之间的 γ 射线，必须根据晶体的吸收系数作出平均穿透厚度的估算：

$$r = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{1 - e^{-\mu d}(1 + \mu d)}{1 - e^{-\mu d}} + d_0 + x \quad (4)$$

μ —能量为 E 的 γ 射线在 HPGe 晶体中的减弱系数， cm^{-1} ；

d —HPGe 晶体的厚度， cm ；

d_0 —端帽到晶体的距离， cm 。

(2) 采集并储存 γ 能谱，进行解谱，确定刻度源特征峰的全能吸收峰的计数率 n_g 。

(3) 采集不放源时的本底谱，进行谱分析，获取本底计数率 n_b 。

(4) 由修正后的计数率 $(n_g - n_b)$ 除以注量率 ϕ ，得到 η 。

$$\eta = \frac{n_g - n_b}{\phi} \quad (5)$$

(5) 对于其它刻度源，重复 (1) ~ (4) 步，得到探测器不同能量的有效前面积 η 。

7.4.2 蒙特卡洛模拟计算

根据探测器的材料组成和几何结构等参数，利用蒙特卡洛软件模拟探测器的有效前面积，具体规范见附录 B。

7.5 角度修正因子的刻度

7.5.1 探测器角响应因子 $R(\theta)$

用标准 γ 点源或蒙特卡洛方法刻度探测器角度响应因子 $R(\theta)$ 。

(1) 标准 γ 点源刻度

刻度 HPGe 探测器角响应因子 $R(\theta)$ 的标准 γ 点源应与 7.4 节 相同, 一般包括 ^{241}Am 、 ^{133}Ba 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{152}Eu 等。

(1) 用离晶体固定距离至少 1 米的点源, 在入射角 $\theta = 0^\circ$ (垂直于探测器的正表面) 和 $\theta = 90^\circ$ 之间每隔 10° 间隔测量净峰计数率 $N_f(\theta)$ 。

(2) 用初始位置得到的计数率 N_0 去归一各角度的净计数率 $N_f(\theta)$, 得到相对响应 $N_f(\theta)/N_0$ 与角度 θ 的关系, 然后用多项式进行拟合。

$$R(\theta) = \sum_{i=0}^n A_i \times \cos \theta^i \quad (6)$$

一般情况下, 采用四阶多项式, 即 $n = 4$ 。

(2) 蒙特卡洛模拟刻度

根据探测器的材料组成和几何结构等参数, 利用蒙特卡洛软件模拟探测器的角度响应, 具体规范见附录 B。

7.5.2 角度修正因子 W

角度修正因子用下式进行计算

$$W = \int_0^{\pi/2} \frac{\varphi(\theta)}{\varphi} \cdot R(\theta) d\theta \quad (7)$$

式中:

$\varphi(\theta)$ — γ 射线注量率的角分布, 可以根据放射性核素在土壤中的分布计算出来, 详见附录 A。

对其他几种能量的 γ 光子重复步骤 7.5.1 或 7.5.2, 得到不同能量的角度修正因子 W 。

8 结果计算与表示

8.1 结果计算

用公式 (8) 计算土壤中放射性核素的活度浓度:

$$A = \frac{n_{\text{net}}}{t \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f_d} \quad (8)$$

式中:

A —测量的放射性核素的活度浓度, Bq·m⁻² 或 Bq·kg⁻¹;

n_{net} —能量为 E 的 γ 射线全能吸收峰净计数, 是能量为 E 的 γ 射线全能吸收峰总计数 n_g 减去本底计数 n_b , 量纲一的量;

t —测量活时间, s;

ε —能量为 E 的 γ 射线探测器刻度因子, 量纲一的量;

p —能量为 E 的 γ 射线的发射几率, 量纲一的量;

f_d —测量时间内的衰变修正因子, 量纲一的量。

8.2 测量不确定度评估

根据不确定度传递传播公式, 对公式(2)和(8)各不确定度分量的来源进行计算。公式(8)中不确定度最大来源为 ε 和 n_{net} , 其它量的不确定度可以忽略不计, 因此合成标准不确定度用下式计算:

$$u_{rel}(A) = \sqrt{\frac{u^2(n_g) + u^2(n_b)}{(tpf_d \varepsilon)^2} + \frac{A^2}{\varepsilon^2} (u^2(\eta) \cdot (WF)^2 + u^2(F) \cdot (\eta W)^2 + u^2(W) \cdot (\eta F)^2)} \quad (9)$$

式中:

$u_{rel}(A)$ —放射性核素活度浓度测量结果的不确定度;

$u(n_g)$ —能量为 E 的 γ 射线全能吸收峰总计数 n_g 的不确定度;

$u(n_b)$ —能量为 E 的 γ 射线全能吸收峰本底计数 n_b 的不确定度;

$u(\eta)$ —能量为 E 的 γ 射线有效前面积刻度的不确定度;

$u(F)$ —能量为 E 的 γ 射线注量活度比的不确定度;

$u(W)$ —能量为 E 的 γ 射线角响应修正因子的不确定度。

8.3 探测下限

就地 HPGe 谱仪测量土壤中 γ 放射性核素的活度浓度探测下限:

$$A^* = \frac{2k_{1-\alpha/2} \times \sqrt{n_g - n_b}}{\varepsilon \times p \times f_d \times t} \quad (10)$$

式中:

$k_{1-\alpha/2}$ —标准正态分布的分位数, 一般选择置信度为 95%, 即 $\alpha=0.05$, $k_{1-\alpha/2}=1.96$ 。

8.4 结果表示

测量结果可根据报告要求报告所有超过探测下限的核素活度浓度及测量不确定度 $[A \pm u_{rel}(A)]$, 对于小于探测下限的核素其活度浓度应以“小于 LLD”表述。测量结果的小数点后

位数的保留与方法探测下限一致，最多保留三位有效数字。

9 质量保证和质量控制

9.1 总则

质量保证应满足 CNAS-CL01:2018 的要求，对影响测量结果的变量都应有相应的质量控制措施。

9.2 影响变量

附录 D 中讨论了影响测量结果有的变量，主要包括测量点位的环境特征、地表的平整度、地表植被特征、土壤组分、探测器离地高度、有效前面积和角响应的刻度。测量时，需要特别注意并尽可能地降低这些参数的影响。

9.3 仪器验证

按照实验室的质量控制体系的要求，应定期对仪器的关键技术指标（如探测效率、能量分辨率、本底）进行期间检查。

9.4 方法验证

应定期确认测量方法的有效性，可以参加国内或国际组织的就地 HPGe 谱仪测量比对，或就地 HPGe 谱仪测量结果与现场采样、实验室 HPGe 测量结果进行比对。

9.5 质量控制计划

9.5.1 总则

对于任一就地 HPGe γ 谱仪测量系统，应该建立质量保证计划，规定质控程序和质控措施以保证测量结果的质量。

质量保证计划包括：

- 期间核查
- 实验验证
- 资格认证
- 文件档案

9.5.2 期间核查的要求

9.5.2.1 性能测试

应定期检查 HPGe 探测器性能指标，以及测量结果是否可复现。将 HPGe 探测器放在固定位置，分析环境中天然放射性核素（如 ^{40}K ， ^{214}Pb ， ^{214}Bi ， ^{226}Ra ）的 γ 特征峰的能量和峰

形参数。

9.5.2.2 能量分辨力和全能吸收峰探测效率

应定期进行 HPGe 探测器的能量分辨力和全能吸收峰探测效率的期间核查。一般情况，每年至少开展一次期间核查，若 HPGe 探测器经常回温，应缩小期间核查的时间间隔。用固定监督源测量探测器能量分辨力和全能吸收峰探测效率，绘制质控图。监督源在低能、中能和高能区至少各有 1 条 γ 射线。若期间核查结果与之前相比存在显著差异，需要进行重新刻度或维修。

9.5.2.3 本底

在固定测量条件下，应定期进行 HPGe 探测器的本底期间核查。一般情况下，每年至少开展一次期间核查，若怀疑有污染可能性的时候，也应尽快开展本底期间核查，绘制质控图。若期间核查结果与之前相比存在显著差异，需要进行去污处理。

9.5.3 实验验证

建议定期参加辐射环境监测实验室组织的验证测量或实验室间比对，现场测量分析环境土壤中 γ 核素活度浓度。

9.5.4 资格认证

所有测量人员须经专门培训，考核合格后方可上岗工作。

9.5.5 文件文档

就地 HPGe 谱仪的测量过程应有详细的原始记录，以及现场测量的 γ 能谱文件，并规定适当的保存期限。一般而言，环境质量监测、重点污染源监测和应急监测的原始记录应永久保存，核查报告等质量保证记录应至少保存 6 年。

10 注意事项

10.1 就地 HPGe 谱仪必须防潮和防水。

10.2 HPGe 谱仪的工作环境温度在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内，否则可能使得 HPGe 探测器的真空变差。

10.3 HPGe 晶体制冷达到工作温度（ $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）易碎，运输过程中应保证机械冲击不会导致探测器损坏。

10.4 HPGe 晶体在工作温度（ $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）才能工作，测量前需要预估探测器的运输和测量时间，保证有足够的液氮制冷或电池电量。

注:对于液氮制冷系统,HPGe探测器在运输过程中,液氮消耗量会变大。

10.5 若放射性核素随雨水沉降时,因降水的流动,可能导致测量区域放射性核素分布并非均匀,可能产生较大的偏差。

10.6 若空气中的放射性核素活度浓度已知,应根据附录 C 扣除其影响,并防止 HPGe 谱仪被污染,并注意监测人员的防护。

10.7 超出视阈范围的山脉、山脊也可能影响最终测量结果,建议尽量避免在周边开展测量。

附录 A

(资料性附录)

土壤中单位活度浓度放射性核素在地表 1m 处产生初级γ射线注量率

地表 1m 处的初级γ射线注量率不仅与放射性核素在土壤的深度分布有关，而且与土壤的密度相关。为此，引入质量深度 ζ 这一物理量：

$$\zeta = \int_0^z \rho(z') dz' \quad (\text{A.1})$$

式中：

$\rho(z)$ —土壤密度 $\rho(z)$ 是随深度 z 变化的函数。

通常而言，落下灰中的放射核素活度浓度随着土壤深度的增加而呈指数衰减。土壤质量深度 ζ 处放射性核素的活度浓度可以用式 (A.2) 描述：

$$A(\zeta) = A_{m,0} \times \exp\left(-\frac{\zeta}{\beta}\right) \quad (\text{A.2})$$

式中，

$A_{m,0}$ —表面土壤中放射性核素的活度浓度， $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 或 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ；

$A(\zeta)$ —质量深度 ζ 处放射性核素的活度浓度， $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 或 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ；

β —质量张弛深度， $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ；

ζ —放射性核素的质量深度， $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ；

单位表面积沉降的放射性核素活度浓度 A_α ，可利用式(A.3)计算：

$$A_\alpha = \int_0^\infty A_{m,0} \cdot \exp\left(-\frac{\zeta}{\beta}\right) d\zeta = \beta \cdot A_{m,0} \quad (\text{A.3})$$

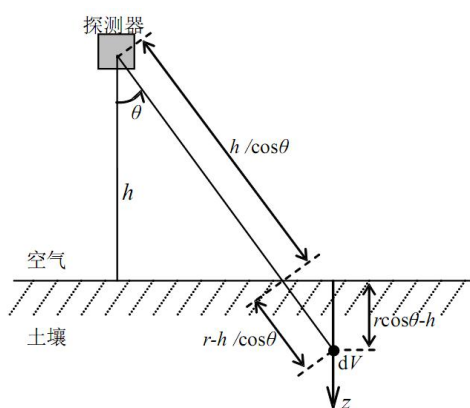


图 A.1 就地 HPGe 谱仪在无穷大平面地表的测量示意图

HPGe 探测器高度为 h ，以灵敏中心作为球坐标原点，用球坐标表示。土壤中放射性核素在探测器的灵敏中心产生的初级γ射线注量率可用下式计算：

$$\varphi_{\cos\theta, \phi} = \frac{p}{4\pi} \cdot \exp(-\mu'_a \cdot h / \cos\theta) \cdot \int_{h/\cos\theta}^{\infty} A_V(r, \cos\theta, \phi) \cdot \exp(-\int_0^z \mu'_s(z') / \cos\theta \cdot dz') \cdot dr \quad (\text{A.4})$$

式中:

p —能量为 E 为 γ 射线的分支比, 量纲为一的量;

μ_a —空气对能量为 E 为 γ 射线的线性吸收系数, m;

$\mu_s(z)$ — z 深度处的土壤对能量为 E 为 γ 射线的线性吸收系数, m;

$A_V(r, \cos\theta, \phi)$ — z 深度处 (球坐标为 $r, \cos\theta, \phi$) 的土壤中放射性核素的活度浓度, Bq·g⁻¹。

对于无穷大平面的土壤, 方位角 ϕ 取值为 $[0, 2\pi]$ 。土壤深度 z cm 处放射性核素活度浓度与方位角 ϕ 无关, 因此对公式(A.4)进行积分, 可得:

$$\varphi_{\cos\theta} = \frac{p}{2} \cdot \exp(-\mu'_a \cdot h / \cos\theta) \cdot \int_{h/\cos\theta}^{\infty} A_V(r, \cos\theta) \cdot \exp(-\int_0^z \mu'_s(z') / \cos\theta \cdot dz') \cdot dr \quad (\text{A.5})$$

土壤深度 z 处土壤的单位体积元内放射性核素活度浓度为:

$$A_V(r, \cos\theta) = \rho(z) \cdot A_{m,0} \cdot \exp(-\frac{\zeta}{\beta}) \quad (\text{A.6})$$

将公式 (A.6) 带入公式 (A.5) 可得:

$$\varphi_{\cos\theta} = \frac{p}{2} A_{m,0} \exp(-\mu'_a \cdot h / \cos\theta) \cdot \int_{h/\cos\theta}^{\infty} \rho(z) \cdot \exp(-\int_0^z \mu'_s(z') / \cos\theta \cdot dz') \cdot \exp(-\frac{\zeta}{\beta}) \cdot dr \quad (\text{A.7})$$

若土壤的组分和密度不随深度 z 变化, 则 ρ 和 μ_s 为恒定值, 公式 (A.7) 可化简为:

$$\varphi_{\cos\theta} = \frac{p}{2} A_{m,0} \frac{\exp(-\mu'_a \cdot h / \cos\theta)}{\mu'_s / \rho + \cos\theta / \beta} \quad (\text{A.8})$$

通过对(A.8)的天顶角 θ 进行积分, 可以得到初级 γ 射线注量率:

$$\varphi = \frac{p(E)}{2} A_{m,0} \int_0^1 \frac{\exp(-\mu'_a \cdot h / \cos\theta)}{\mu'_s / \rho + \cos\theta / \beta} d\cos\theta \quad (\text{A.9})$$

对于均匀分布的放射性核素, 单位体积内放射性核素活度浓度可以用下式计算:

$$A_V(r, \cos\theta, \phi) = \rho(z) \cdot A_{m,0} \cdot \begin{cases} 1 & \cos\theta > 0 \text{ 且 } r \geq h / \cos\theta \\ 0 & \cos\theta > 0 \text{ 且 } r \leq h / \cos\theta \\ 0 & \cos\theta < 0 \end{cases} \quad (\text{A.10})$$

将公式(A.10)代入(A.5)得到初级 γ 射线注量率:

$$\varphi_{\cos\theta} = \frac{p}{2} A_{m,0} \exp(-\mu'_a \cdot h / \cos\theta) \int_{h/\cos\theta}^{\infty} \rho(z) \cdot \exp(-\int_0^z \mu'_s(z') / \cos\theta \cdot dz') \cdot dr \quad (\text{A.11})$$

若土壤的组分和密度不随深度 z 变化, 则 ρ 和 μ_s 为恒定值, 公式 (A.11) 积分为化为:

$$\varphi_{\cos\theta} = \frac{p \cdot \rho}{2\mu'_s} \cdot A_{m,0} \cdot \exp(-\mu'_a \cdot h / \cos\theta) \quad (\text{A.12})$$

通过对(A.12)的天顶角 θ 进行积分, 可以得到初级 γ 射线注量率:

$$\varphi = \frac{p \cdot \rho}{2\mu_s} \cdot A_{m,0} \cdot \int_0^1 \exp(-\mu_a' \cdot h / \cos \theta) d \cos \theta \quad (\text{A} \cdot 13)$$

引入一个数学积分函数:

$$E_2(x) = x \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t^2} dt \quad (\text{A} \cdot 14)$$

空气中 γ 射线注量率可以写为:

$$\varphi = \frac{p(E) \cdot \rho}{2\mu_s} \cdot A_{m,0} \cdot E_2(\mu_a' h) \quad (\text{A} \cdot 15)$$

表 A.1 单位面积活度(Bq·m⁻²)的放射性核素在地表 1m 处产生的初级γ射线注量率 (m⁻²·s⁻¹)

能量 (keV)	分支比	放射性核素	质量张弛深度(g·cm ⁻²)													
			0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10	20	30	50	100
11.2	0.255	Pb-210	7.90E-02	3.13E-02	1.86E-02	1.32E-02	8.35E-03	4.34E-03	2.22E-03	1.49E-03	9.01E-04	4.51E-04	2.26E-04	1.51E-04	9.09E-05	4.54E-05
12.7	0.081	Th-232	3.58E-02	1.52E-02	9.27E-03	6.67E-03	4.29E-03	2.26E-03	1.16E-03	7.85E-04	4.76E-04	2.39E-04	1.20E-04	8.00E-05	4.80E-05	2.40E-05
12.7	0.089	Th-228	3.91E-02	1.65E-02	1.01E-02	7.27E-03	4.68E-03	2.46E-03	1.27E-03	8.56E-04	5.19E-04	2.60E-04	1.30E-04	8.72E-05	5.24E-05	2.62E-05
13.4	0.079	U-236	4.10E-02	1.78E-02	1.10E-02	7.99E-03	5.18E-03	2.74E-03	1.42E-03	9.55E-04	5.81E-04	2.92E-04	1.46E-04	9.77E-05	5.86E-05	2.93E-05
13.4	0.084	U-238	4.33E-02	1.88E-02	1.17E-02	8.43E-03	5.46E-03	2.89E-03	1.50E-03	1.01E-03	6.13E-04	3.08E-04	1.54E-04	1.03E-04	6.19E-05	3.09E-05
13.4	0.094	U-234	4.85E-02	2.11E-02	1.31E-02	9.44E-03	6.12E-03	3.24E-03	1.68E-03	1.13E-03	6.86E-04	3.45E-04	1.73E-04	1.15E-04	6.93E-05	3.47E-05
13.4	0.102	U-232	5.25E-02	2.29E-02	1.42E-02	1.02E-02	6.63E-03	3.51E-03	1.82E-03	1.22E-03	7.44E-04	3.74E-04	1.87E-04	1.25E-04	7.51E-05	3.76E-05
13.7	0.094	Th-234	5.20E-02	2.29E-02	1.42E-02	1.03E-02	6.70E-03	3.56E-03	1.84E-04	1.24E-03	7.55E-04	3.80E-04	1.90E-04	1.27E-04	7.62E-05	3.82E-05
13.7	0.562	Np-237	3.12E-01	1.37E-01	8.54E-02	6.19E-02	4.02E-02	2.13E-02	1.10E-02	7.44E-03	4.53E-03	2.27E-03	1.14E-03	7.62E-04	4.57E-04	2.29E-04
13.7	0.776	Th-231	4.31E-01	1.89E-01	1.18E-01	8.54E-02	5.55E-02	2.94E-02	1.53E-02	1.03E-02	6.25E-03	3.14E-03	1.57E-03	1.05E-03	6.31E-04	3.16E-04
14.1	0.04	Pu-239	2.35E-02	1.05E-02	6.53E-03	4.74E-03	3.09E-03	1.64E-03	8.51E-04	5.73E-04	3.49E-04	1.75E-04	8.78E-05	5.88E-05	3.52E-05	1.76E-05
14.1	0.082	Pu-242	4.89E-02	2.17E-02	1.36E-02	9.85E-03	6.41E-03	3.41E-03	1.77E-03	1.19E-03	7.25E-04	3.65E-04	1.83E-04	1.22E-04	7.32E-05	3.67E-05
14.1	0.089	Pu-240	5.27E-02	2.34E-02	1.46E-02	1.06E-02	6.91E-03	3.68E-03	1.91E-03	1.28E-03	7.82E-04	3.93E-04	1.97E-04	1.32E-04	7.89E-05	3.95E-05
14.1	0.102	Pu-238	6.04E-02	2.68E-02	1.68E-02	1.22E-02	7.92E-03	4.21E-03	2.18E-03	1.47E-03	8.96E-04	4.50E-04	2.25E-04	1.51E-04	9.04E-05	4.53E-05
14.1	0.103	Pu-236	6.10E-02	2.71E-02	1.69E-02	1.23E-02	8.00E-03	4.26E-03	2.21E-03	1.49E-03	9.05E-04	4.55E-04	2.28E-04	1.52E-04	9.14E-05	4.57E-05
14.4	0.365	Am-241	2.31E-01	1.04E-01	6.49E-02	4.72E-02	3.08E-02	1.64E-02	8.52E-03	5.73E-03	3.49E-03	1.76E-03	8.80E-04	5.89E-04	3.53E-04	1.77E-04
14.4	0.575	U-237	3.64E-01	1.63E-01	1.02E-01	7.44E-02	4.85E-02	2.59E-02	1.34E-02	9.05E-03	5.51E-03	2.77E-03	1.39E-03	9.28E-04	5.56E-04	2.78E-04
14.8	0.081	Cm-244	5.42E-02	2.45E-02	1.54E-02	1.12E-02	7.32E-03	3.91E-03	2.03E-03	1.37E-03	8.33E-04	4.19E-04	2.10E-04	1.40E-04	8.41E-05	4.21E-05
14.8	0.085	Cm-242	5.72E-02	2.58E-02	1.62E-02	1.18E-02	7.72E-03	4.12E-03	2.14E-03	1.44E-03	8.79E-04	4.42E-04	2.21E-04	1.48E-04	8.87E-05	4.44E-05

表 A.1 单位面积活度(Bq·m⁻²)的放射性核素在地表 1m 处产生的初级γ射线注量率 (m⁻²·s⁻¹)

能量 (keV)	分支比	放射性核素	质量张弛深度(g·cm ⁻²)													
			0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10	20	30	50	100
14.8	0.098	Am-242	6.60E-02	2.98E-02	1.87E-02	1.36E-02	8.91E-03	4.75E-03	2.47E-03	1.66E-03	1.01E-03	5.09E-04	2.55E-04	1.71E-04	1.02E-04	5.12E-05
14.8	0.461	Cm-243	3.10E-01	1.40E-01	8.80E-02	6.41E-02	4.19E-02	2.23E-02	1.16E-02	7.81E-03	4.76E-03	2.39E-03	1.20E-03	8.03E-04	4.81E-04	2.41E-04
14.8	0.471	Cm-245	3.17E-01	1.43E-01	9.00E-02	6.55E-02	4.28E-02	2.28E-02	1.19E-02	7.98E-03	4.87E-03	2.45E-03	1.23E-03	8.21E-04	4.92E-04	2.46E-04
15.2	0.273	Am-242m	1.93E-01	8.84E-02	5.59E-02	4.09E-02	2.68E-02	1.44E-02	7.49E-03	5.05E-03	3.08E-03	1.55E-03	7.77E-04	5.20E-04	3.11E-04	1.56E-04
15.5	0.161	Am-242	1.18E-01	5.50E-02	3.52E-02	2.59E-02	1.71E-02	9.25E-03	4.85E-03	3.27E-03	2.00E-03	1.01E-03	5.05E-04	3.38E-04	2.03E-04	1.02E-04
16.5	0.183	Mo-93	1.48E-01	7.23E-02	4.74E-02	3.54E-02	2.38E-02	1.30E-02	6.92E-03	4.69E-03	2.87E-03	1.45E-03	7.28E-04	4.87E-04	2.93E-04	1.47E-04
16.6	0.06	Nb-93m	4.88E-02	2.39E-02	1.57E-02	1.17E-02	7.89E-03	4.34E-03	2.30E-03	1.56E-03	9.55E-04	4.83E-04	2.42E-04	1.62E-04	9.74E-05	4.89E-05
16.6	0.35	Mo-93	2.85E-01	1.40E-01	9.17E-02	6.86E-02	4.61E-02	2.53E-02	1.35E-02	9.12E-03	5.58E-03	2.83E-03	1.42E-03	9.48E-04	5.56E-04	2.86E-04
18.6	0.09	Mo-93	8.60E-02	4.49E-02	3.05E-02	2.33E-02	1.59E-02	8.91E-03	4.79E-03	3.26E-03	2.00E-03	1.02E-03	5.10E-04	3.42E-04	2.05E-04	1.03E-04
20.1	0.184	Rh-103m	1.96E-01	1.06E-01	7.32E-02	5.63E-02	3.89E-02	2.20E-02	1.19E-02	8.14E-03	5.00E-03	2.55E-03	1.28E-03	8.57E-04	5.16E-04	2.59E-04
20.2	0.349	Rh-103m	3.73E-01	2.03E-01	1.40E-01	1.08E-01	7.51E-02	4.27E-02	2.32E-02	1.58E-02	9.75E-03	4.97E-03	2.50E-03	1.67E-03	1.01E-03	5.06E-04
22.7	0.094	Rh-103m	1.11E-01	6.44E-02	4.66E-02	3.71E-02	2.67E-02	1.60E-02	9.05E-03	6.30E-03	3.94E-03	2.04E-03	1.04E-03	6.96E-04	4.19E-04	2.11E-04
25.3	0.41	Sn-117m	5.25E-01	3.23E-01	2.41E-01	1.96E-01	1.45E-01	8.96E-02	5.17E-02	3.63E-02	2.30E-02	1.19E-02	6.10E-03	4.11E-03	2.47E-03	1.24E-03
25.6	0.146	Th-231	1.89E-01	1.17E-01	8.78E-02	7.15E-02	5.30E-02	3.30E-02	1.90E-02	1.34E-02	8.48E-03	4.41E-03	2.25E-03	1.52E-03	9.15E-04	4.60E-04
26.4	0.156	Sn-126	2.07E-01	1.30E-01	9.80E-02	8.01E-02	5.97E-02	3.74E-02	2.17E-02	1.53E-02	9.68E-03	5.05E-03	2.58E-03	1.74E-03	1.05E-03	5.27E-04
27.2	0.103	Te-127m	1.41E-01	8.95E-02	6.82E-02	5.60E-02	4.19E-02	2.64E-02	1.54E-02	1.09E-02	6.90E-03	3.60E-03	1.84E-03	1.24E-03	7.48E-04	3.77E-04
27.2	0.127	Te-129m	1.74E-01	1.10E-01	8.40E-02	6.90E-02	5.17E-02	3.26E-02	1.90E-02	1.34E-02	8.51E-03	4.44E-03	2.27E-03	1.53E-03	9.22E-04	4.64E-04
27.2	0.327	Te-125m	4.46E-01	2.83E-01	2.16E-01	1.77E-01	1.33E-01	8.37E-02	4.88E-02	3.44E-02	2.18E-02	1.14E-02	5.83E-03	3.93E-03	2.37E-03	1.19E-03
27.5	0.193	Te-127m	2.65E-01	1.69E-01	1.29E-01	1.06E-01	7.97E-02	5.03E-02	2.93E-02	2.07E-02	1.32E-02	6.88E-03	3.52E-03	2.37E-03	1.43E-03	7.19E-04
27.5	0.237	Te-129m	3.26E-01	2.08E-01	1.59E-01	1.31E-01	9.80E-02	6.19E-02	3.61E-02	2.55E-02	1.62E-02	8.46E-03	4.33E-03	2.92E-03	1.76E-03	8.84E-04

表 A.1 单位面积活度(Bq·m⁻²)的放射性核素在地表 1m 处产生的初级γ射线注量率 (m⁻²·s⁻¹)

能量 (keV)	分支比	放射性核素	质量张弛深度(g·cm ⁻²)													
			0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10	20	30	50	100
27.5	0.611	Te-125m	8.39E-01	5.36E-01	4.09E-01	3.36E-01	2.52E-01	1.59E-01	9.29E-02	6.56E-02	4.17E-02	2.18E-02	1.11E-02	7.51E-03	4.52E-03	2.28E-03
27.8	0.156	Te-129	2.17E-01	1.39E-01	1.06E-01	8.76E-02	6.59E-02	4.17E-02	2.44E-02	1.72E-02	1.09E-02	5.72E-03	2.93E-03	1.97E-03	1.19E-03	5.98E-04
29.4	0.152	Np-237	2.22E-01	1.45E-01	1.13E-01	9.35E-02	7.09E-02	4.53E-02	2.66E-02	1.88E-02	1.20E-02	6.29E-03	3.22E-03	2.17E-03	1.31E-03	6.59E-04
29.5	0.185	I-129	2.69E-01	1.77E-01	1.37E-01	1.14E-01	8.64E-02	5.52E-02	3.25E-02	2.30E-02	1.47E-02	7.67E-03	3.93E-03	2.65E-03	1.60E-03	8.04E-04
29.8	0.343	I-129	5.05E-01	3.33E-01	2.59E-01	2.15E-01	1.63E-01	1.05E-01	6.15E-02	4.36E-02	2.78E-02	1.46E-02	7.47E-03	5.03E-03	3.03E-03	1.53E-03
30.6	0.092	Cs-134m	1.37E-01	9.12E-02	7.12E-02	5.94E-02	4.54E-02	2.93E-02	1.74E-02	1.24E-02	7.96E-03	4.19E-03	2.16E-03	1.46E-03	8.78E-04	4.42E-04
31	0.067	Te-127m	9.98E-02	6.68E-02	5.23E-02	4.37E-02	3.35E-02	2.17E-02	1.30E-02	9.26E-03	5.96E-03	3.15E-03	1.62E-03	1.10E-03	6.62E-04	3.33E-04
31	0.068	Te-129m	1.02E-01	6.82E-02	5.33E-02	4.46E-02	3.42E-02	2.22E-02	1.32E-02	9.45E-03	6.08E-03	3.21E-03	1.66E-03	1.12E-03	6.75E-04	3.40E-04
31	0.17	Cs-134m	2.54E-01	1.70E-01	1.33E-01	1.11E-01	8.50E-02	5.51E-02	3.29E-02	2.35E-02	1.51E-02	7.98E-03	4.11E-03	2.78E-03	1.68E-03	8.45E-04
31	0.212	Te-125m	3.16E-01	2.11E-01	1.65E-01	1.38E-01	1.06E-01	6.87E-02	4.11E-02	2.93E-02	1.89E-02	9.96E-03	5.14E-03	3.47E-03	2.09E-03	1.06E-03
31.8	0.021	Ba-137m	3.09E-02	2.09E-02	1.64E-02	1.38E-02	1.06E-02	6.95E-03	4.19E-03	3.01E-03	1.95E-03	1.04E-03	5.36E-04	3.62E-04	2.19E-04	1.11E-04
32.2	0.038	Ba-137m	5.71E-02	3.87E-02	3.05E-02	2.56E-02	1.98E-02	1.30E-02	7.89E-03	5.68E-03	3.68E-03	1.96E-03	1.02E-03	6.88E-04	4.17E-04	2.10E-04
33.6	0.122	I-129	1.85E-01	1.27E-01	1.01E-01	8.54E-02	6.66E-02	4.44E-02	2.73E-02	1.98E-02	1.30E-02	6.97E-03	3.63E-03	2.46E-03	1.49E-03	7.53E-04
35	0.05	Cs-134m	7.69E-02	5.35E-02	4.29E-02	3.64E-02	2.86E-02	1.93E-02	1.21E-02	8.81E-03	5.80E-03	3.14E-03	1.64E-03	1.11E-03	6.77E-04	3.42E-04
35.5	0.067	Te-125m	1.03E-01	7.16E-02	5.75E-02	4.90E-02	3.86E-02	2.62E-02	1.64E-02	1.20E-02	7.91E-03	4.29E-03	2.25E-03	1.53E-03	9.27E-04	4.69E-04
38.7	0.223	Nd-147	3.51E-01	2.52E-01	2.06E-01	1.77E-01	1.42E-01	9.86E-02	6.33E-02	4.69E-02	3.13E-02	1.72E-02	9.08E-03	6.17E-03	3.76E-03	1.90E-03
39.6	0.075	I-129	1.19E-01	8.59E-02	7.05E-02	6.08E-02	4.90E-02	3.42E-02	2.21E-02	1.64E-02	1.10E-02	6.04E-03	3.19E-03	2.17E-03	1.32E-03	6.70E-04
43	0.118	Eu-155	1.90E-01	1.41E-01	1.18E-01	1.03E-01	8.38E-02	5.96E-02	3.92E-02	2.94E-02	1.98E-02	1.10E-02	5.84E-03	3.98E-03	2.43E-03	1.23E-03
59.5	0.345	U-237	5.85E-01	4.69E-01	4.06E-01	3.65E-01	3.09E-01	2.32E-01	1.61E-01	1.25E-01	8.67E-02	4.98E-02	2.71E-02	1.86E-02	1.14E-02	5.83E-03
59.5	0.359	Am-241	6.08E-01	4.88E-01	4.23E-01	3.80E-01	3.22E-01	2.41E-01	1.67E-01	1.30E-01	9.02E-02	5.18E-02	2.82E-02	1.93E-02	1.19E-02	6.07E-03

表 A.1 单位面积活度(Bq·m⁻²)的放射性核素在地表 1m 处产生的初级γ射线注量率 (m⁻²·s⁻¹)

能量 (keV)	分支比	放射性核素	质量张弛深度(g·cm ⁻²)													
			0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10	20	30	50	100
64.3	0.096	Sn-126	1.63E-01	1.32E-01	1.15E-01	1.04E-01	8.86E-02	6.73E-02	4.70E-02	3.68E-02	2.58E-02	1.49E-02	8.18E-03	5.62E-03	3.46E-03	1.77E-03
74.7	0.674	Am-243	1.15E+00	9.46E-01	8.36E-01	7.62E-01	6.55E-01	5.06E-01	3.60E-01	2.85E-01	2.02E-01	1.19E-01	6.57E-02	4.54E-02	2.81E-02	1.44E-02
74.8	0.104	Pb-212	1.78E-01	1.47E-01	1.30E-01	1.18E-01	1.02E-01	7.84E-02	5.58E-02	4.42E-02	3.14E-02	1.85E-02	1.02E-02	7.05E-03	4.36E-03	2.24E-03
77.1	0.176	Pb-212	2.99E-01	2.48E-01	2.19E-01	2.00E-01	1.72E-01	1.33E-01	9.49E-02	7.53E-02	5.36E-02	3.16E-02	1.75E-02	1.21E-02	7.49E-03	3.84E-03
84.2	0.067	Th-231	1.15E-01	9.55E-02	8.48E-02	7.74E-02	6.70E-02	5.21E-02	3.76E-02	2.99E-02	2.14E-02	1.27E-02	7.09E-03	4.92E-03	3.06E-03	1.57E-03
86.5	0.123	Np-237	2.10E-01	1.76E-01	1.56E-01	1.42E-01	1.23E-01	9.63E-02	6.96E-02	5.55E-02	3.98E-02	2.37E-02	1.32E-02	9.18E-03	5.71E-03	2.93E-03
86.5	0.309	Eu-155	5.29E-01	4.41E-01	3.92E-01	3.58E-01	3.10E-01	2.42E-01	1.75E-01	1.40E-01	1.00E-01	5.97E-02	3.33E-02	2.31E-02	1.44E-02	7.38E-03
86.9	1.089	Sn-126	1.53E-01	1.27E-01	1.13E-01	1.03E-01	8.96E-02	6.99E-02	5.06E-02	4.04E-02	2.90E-02	1.73E-02	9.63E-03	6.68E-03	4.16E-03	2.14E-03
87.6	0.37	Sn-126	6.33E-01	5.29E-01	4.70E-01	4.30E-01	3.73E-01	2.91E-01	2.11E-01	1.68E-01	1.21E-01	7.20E-02	4.01E-02	2.79E-02	1.73E-02	8.91E-03
91.1	0.279	Nd-147	4.78E-01	4.00E-01	3.57E-01	3.26E-01	2.84E-01	2.22E-01	1.61E-01	1.29E-01	9.30E-02	5.57E-02	3.11E-02	2.16E-02	1.35E-02	6.93E-03
97.1	0.166	U-237	2.85E-01	2.40E-01	2.14E-01	1.96E-01	1.71E-01	1.35E-01	9.86E-02	7.91E-02	5.72E-02	3.45E-02	1.93E-02	1.35E-02	8.41E-03	4.32E-03
98.4	0.157	Pa-233	2.71E-01	2.28E-01	2.04E-01	1.87E-01	1.63E-01	1.29E-01	9.42E-02	7.56E-02	5.47E-02	3.30E-02	1.85E-02	1.29E-02	8.07E-03	4.15E-03
99.6	0.147	Cm-243	2.53E-01	2.13E-01	1.91E-01	1.75E-01	1.53E-01	1.21E-01	8.86E-02	7.11E-02	5.16E-02	3.11E-02	1.75E-02	1.22E-02	7.62E-03	3.92E-03
99.6	0.157	Np-239	2.70E-01	2.27E-01	2.04E-01	1.87E-01	1.63E-01	1.29E-01	9.44E-02	7.58E-02	5.49E-02	3.32E-02	1.86E-02	1.30E-02	8.12E-03	4.18E-03
99.6	0.185	Cm-245	3.17E-01	2.67E-01	2.40E-01	2.19E-01	1.92E-01	1.51E-01	1.11E-01	8.91E-02	6.46E-02	3.90E-02	2.19E-02	1.53E-02	9.55E-03	4.91E-03
101.1	0.266	U-237	4.59E-01	3.87E-01	3.47E-01	3.18E-01	2.78E-01	2.19E-01	1.61E-01	1.29E-01	9.38E-02	5.67E-02	3.18E-02	2.22E-02	1.39E-02	7.15E-03
103.8	0.059	Am-242	1.02E-01	8.60E-02	7.71E-02	7.07E-02	6.18E-02	4.89E-02	3.59E-02	2.89E-02	2.10E-02	1.27E-02	7.13E-03	4.98E-03	3.11E-03	1.60E-03
103.8	0.236	Cm-243	4.06E-01	3.43E-01	3.08E-01	2.82E-01	2.47E-01	1.95E-01	1.43E-01	1.15E-01	8.36E-02	5.06E-02	2.84E-02	1.98E-02	1.24E-02	6.39E-03
103.8	0.251	Np-239	4.33E-01	3.65E-01	3.28E-01	3.00E-01	2.63E-01	2.08E-01	1.53E-01	1.23E-01	8.91E-02	5.39E-02	3.30E-02	2.11E-02	1.32E-02	6.81E-03
103.8	0.295	Cm-245	5.09E-01	4.30E-01	3.85E-01	3.53E-01	3.09E-01	2.44E-01	1.80E-01	1.44E-01	1.05E-01	6.34E-02	3.56E-02	2.49E-02	1.56E-02	8.01E-03

表 A.1 单位面积活度(Bq·m⁻²)的放射性核素在地表 1m 处产生的初级γ射线注量率 (m⁻²·s⁻¹)

能量 (keV)	分支比	放射性核素	质量张弛深度(g·cm ⁻²)													
			0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10	20	30	50	100
105.3	0.206	Eu-155	3.55E-01	3.00E-01	2.69E-01	2.47E-01	2.16E-01	1.71E-01	1.26E-01	1.01E-01	7.33E-02	4.44E-02	2.50E-02	1.74E-02	1.09E-02	5.62E-03
106.1	0.272	Np-239	4.70E-01	3.97E-01	3.56E-01	3.27E-01	2.86E-01	2.26E-01	1.66E-01	1.34E-01	9.72E-02	5.89E-02	3.31E-02	2.31E-02	1.45E-02	7.45E-03
117.3	0.066	Cm-245	1.14E-01	9.66E-02	8.68E-02	7.98E-02	7.00E-02	5.55E-02	4.10E-02	3.31E-02	2.41E-02	1.47E-02	8.30E-03	5.81E-03	3.64E-03	1.88E-03
121.1	0.173	Se-75	3.01E-01	2.56E-01	2.30E-01	2.12E-01	1.86E-01	1.48E-01	1.09E-01	8.81E-02	6.44E-02	3.93E-02	2.22E-02	1.56E-02	9.74E-03	5.03E-03
122.1	0.855	Co-57	1.49E+00	1.27E+00	1.14E+00	1.05E+00	9.20E-01	7.30E-01	5.41E-01	4.36E-01	3.19E-01	1.95E-01	1.10E-01	7.71E-02	4.83E-02	2.49E-02
127.5	0.141	Cs-134m	2.46E-01	2.09E-01	1.88E-01	1.74E-01	1.53E-01	1.21E-01	8.99E-02	7.27E-02	5.33E-02	3.25E-02	1.84E-02	1.29E-02	8.10E-03	4.19E-03
133	0.419	Hf-181	7.35E-01	6.27E-01	5.64E-01	5.21E-01	4.58E-01	3.64E-01	2.71E-01	2.19E-01	1.61E-01	9.85E-02	5.59E-02	3.92E-02	2.46E-02	1.27E-02
133.5	0.111	Ce-144	1.94E-01	1.66E-01	1.49E-01	1.38E-01	1.21E-01	9.65E-02	7.18E-02	5.61E-02	4.13E-02	2.53E-02	1.44E-02	1.01E-02	6.33E-03	3.38E-03
136	0.59	Se-75	1.04E+00	8.85E-01	7.96E-01	7.36E-01	6.47E-01	5.15E-01	3.84E-01	3.11E-01	2.28E-01	1.40E-01	7.95E-02	5.58E-02	3.50E-02	1.81E-02
136.5	0.106	Co-57	1.87E-01	1.60E-01	1.44E-01	1.33E-01	1.17E-01	9.31E-02	6.93E-02	5.61E-02	4.13E-02	2.53E-02	1.44E-02	1.01E-02	6.33E-03	3.28E-03
140.5	0.89	Tc-99m	1.57E+00	1.34E+00	1.21E+00	1.12E+00	9.83E-01	7.83E-01	5.84E-01	4.73E-01	3.48E-01	2.14E-01	1.22E-01	8.54E-02	5.36E-02	2.78E-02
143.8	0.11	U-235	1.93E-01	1.66E-01	1.49E-01	1.38E-01	1.22E-01	9.70E-02	7.24E-02	5.87E-02	4.33E-02	2.66E-02	1.52E-02	1.06E-02	6.68E-03	3.46E-03
145.4	0.484	Ce-141	8.55E-01	7.33E-01	6.61E-01	6.12E-01	5.39E-01	4.30E-01	3.21E-01	2.60E-01	1.92E-01	1.18E-01	6.73E-02	4.73E-02	2.93E-02	1.54E-02
158.6	0.864	Sn-117m	1.54E+00	1.32E+00	1.19E+00	1.10E+00	9.74E-01	7.79E-01	5.84E-01	4.75E-01	3.51E-01	2.17E-01	1.24E-01	8.72E-02	5.48E-02	2.84E-02
159	0.084	Te-123m	1.50E+00	1.28E+00	1.16E+00	1.07E+00	9.47E-01	7.58E-01	5.68E-01	4.62E-01	3.42E-01	2.11E-01	1.21E-01	8.49E-02	5.33E-02	2.77E-02
162.6	0.062	Ba-140	1.11E-01	9.52E-02	8.57E-02	7.95E-02	7.02E-02	5.62E-02	4.22E-02	3.43E-02	2.54E-02	1.57E-02	8.98E-03	6.32E-03	3.97E-03	2.06E-03
165.9	0.238	Ba-139	4.24E-01	3.65E-01	3.28E-01	3.05E-01	2.69E-01	2.16E-01	1.62E-01	1.32E-01	9.77E-02	6.03E-02	3.45E-02	2.44E-02	1.53E-02	7.94E-03
174.9	0.095	Cm-245	1.71E-01	1.47E-01	1.32E-01	1.23E-01	1.08E-01	8.71E-02	6.55E-02	5.33E-02	3.96E-02	2.45E-02	1.41E-02	9.93E-03	6.24E-03	3.24E-03
181.1	0.061	Mo-99	1.09E-01	9.40E-02	8.45E-02	7.84E-02	6.94E-02	5.59E-02	4.21E-02	3.43E-02	2.54E-02	1.58E-02	9.07E-03	6.41E-03	4.03E-03	2.09E-03
185.7	0.572	U-235	1.03E+00	8.90E-02	8.01E-02	7.43E-02	6.57E-02	5.31E-02	4.00E-02	3.26E-01	2.43E-01	1.50E-01	8.64E-02	6.12E-02	3.84E-02	2.00E-02

表 A.1 单位面积活度(Bq·m⁻²)的放射性核素在地表 1m 处产生的初级γ射线注量率 (m⁻²·s⁻¹)

能量 (keV)	分支比	放射性核素	质量张弛深度(g·cm ⁻²)													
			0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10	20	30	50	100
186	0.033	Ra-226	5.92E-02	5.10E-02	4.59E-02	4.26E-02	3.77E-02	3.04E-02	2.29E-02	1.87E-02	1.39E-02	8.62E-03	4.96E-03	3.51E-03	2.20E-03	1.14E-03
202.5	0.985	Y-90m	1.75E+00	1.51E+00	1.35E+00	1.26E+00	1.11E+00	9.02E-02	6.82E-02	5.57E-01	4.16E-01	2.59E-01	1.49E-01	1.06E-01	6.65E-02	3.45E-02
205.3	0.05	U-235	9.14E-02	7.89E-02	7.09E-02	6.59E-02	5.83E-02	4.73E-02	3.57E-02	2.92E-02	2.18E-02	1.36E-02	7.83E-03	5.55E-03	3.49E-03	1.81E-03
208	0.216	U-237	3.95E-01	3.41E-01	3.06E-01	2.84E-01	2.52E-01	2.04E-02	1.54E-02	1.26E-01	9.43E-02	5.87E-02	3.39E-02	2.40E-02	1.51E-02	7.86E-03
210.5	0.223	Te-134	4.08E-01	3.52E-01	3.17E-01	2.94E-01	2.61E-01	2.12E-01	1.60E-01	1.31E-01	9.78E-02	6.09E-02	3.51E-02	2.49E-02	1.57E-02	8.16E-03
228.2	0.106	Cm-243	1.95E-01	1.68E-01	1.51E-01	1.41E-01	1.25E-01	1.01E-01	7.68E-01	6.30E-02	4.72E-02	2.95E-02	1.71E-02	1.21E-02	7.65E-03	3.98E-03
228.2	0.113	Np-239	2.08E-01	1.80E-01	1.62E-01	1.50E-01	1.33E-01	1.08E-01	8.19E-02	6.72E-02	5.03E-02	3.15E-02	1.82E-02	1.29E-02	8.16E-03	4.24E-03
228.2	0.882	Te-132	1.63E+00	1.40E+00	1.26E+00	1.18E+00	1.04E+00	8.46E-01	6.41E-01	5.25E-01	3.94E-01	2.46E-01	1.42E-01	1.01E-01	6.38E-02	3.32E-02
234.7	0.261	Nb-95m	4.82E-01	4.17E-01	3.75E-01	3.49E-01	3.10E-01	2.52E-01	1.91E-01	1.56E-01	1.17E-01	7.34E-02	4.25E-02	3.02E-02	1.91E-02	9.91E-03
238.6	0.434	Pb-212	8.03E-01	6.95E-01	6.25E-01	5.82E-01	5.17E-01	4.20E-01	3.18E-01	2.61E-01	1.96E-01	1.23E-01	7.11E-02	5.04E-02	3.19E-02	1.66E-02
241	0.04	Ra-224	7.36E-02	6.36E-02	5.73E-02	5.33E-02	4.74E-02	3.85E-02	2.91E-02	2.39E-02	1.80E-02	1.12E-02	6.53E-03	4.63E-03	2.92E-03	1.52E-03
264.7	0.591	Se-75	1.11E+00	9.85E-01	8.64E-01	8.05E-01	7.16E-01	5.82E-01	4.42E-01	3.64E-01	2.74E-01	1.72E-01	1.00E-01	7.11E-02	4.52E-02	2.35E-02
266.9	0.068	Y-93	1.27E-01	1.10E-01	9.95E-02	9.27E-02	8.25E-02	6.71E-02	5.09E-02	4.20E-02	3.16E-02	1.99E-02	1.16E-02	8.21E-03	5.22E-03	2.71E-03
275.2	0.068	Pm-151	1.27E-01	1.10E-01	9.92E-02	9.25E-02	8.24E-02	6.70E-02	5.09E-02	4.20E-02	3.16E-02	1.99E-02	1.16E-02	8.24E-03	5.24E-03	2.73E-03
277.6	0.14	Cm-243	2.63E-01	2.28E-01	2.06E-01	1.92E-01	1.71E-01	1.39E-01	1.05E-01	8.71E-02	6.56E-02	4.14E-02	2.41E-02	1.71E-02	1.09E-02	5.66E-03
277.6	0.144	Np-239	2.71E-01	2.35E-01	2.12E-01	1.97E-01	1.76E-01	1.43E-01	1.09E-01	8.97E-02	6.75E-02	4.26E-02	2.49E-02	1.76E-02	1.12E-02	5.83E-03
278	0.209	Te-134	3.93E-01	3.41E-01	3.07E-01	2.87E-01	2.55E-01	2.08E-01	1.58E-01	1.30E-01	9.81E-02	6.19E-02	3.61E-02	2.56E-02	1.63E-02	8.47E-03
279.5	0.252	Se-75	4.74E-01	4.11E-01	3.71E-01	3.46E-01	3.08E-01	2.51E-01	1.90E-01	1.57E-01	1.18E-01	7.47E-02	4.36E-02	3.09E-02	1.97E-02	1.02E-02
285.9	0.001	Pm-149	1.84E-03	1.60E-03	1.44E-03	1.34E-03	1.20E-03	9.75E-03	7.41E-03	6.12E-04	4.62E-04	2.92E-04	1.70E-04	1.21E-04	7.69E-05	4.00E-05
293.3	0.42	Ce-143	7.96E-01	6.91E-01	6.24E-01	5.82E-01	5.19E-01	4.22E-01	3.21E-01	2.66E-01	2.00E-01	1.27E-01	7.41E-02	5.25E-02	3.35E-02	1.74E-02

表 A.1 单位面积活度(Bq·m⁻²)的放射性核素在地表 1m 处产生的初级γ射线注量率 (m⁻²·s⁻¹)

能量 (keV)	分支比	放射性核素	质量张弛深度(g·cm ⁻²)													
			0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10	20	30	50	100
300.1	0.066	Pa-233	1.26E-01	1.10E-01	9.89E-02	9.23E-02	8.23E-02	6.71E-02	5.10E-02	4.22E-02	3.19E-02	2.02E-02	1.18E-02	8.37E-03	5.35E-03	2.78E-03
306.1	0.051	Rh-105	9.76E-02	8.47E-02	7.66E-02	7.14E+02	6.37E-02	5.19E-02	3.95E-02	3.17E-02	2.47E-02	1.57E-02	9.18E-03	6.50E-03	4.15E-03	2.16E-03
312	0.386	Pa-233	7.36E-01	6.39E-01	5.78E-01	5.39E-01	4.81E-01	3.92E-01	2.99E-01	2.47E-01	1.87E-01	1.19E-01	6.95E-02	4.93E-02	3.15E-02	1.64E-02
314.1	0.61	Sb-128	1.16E+00	1.01E+00	9.14E-01	8.52E-01	7.61E-01	6.20E-01	4.72E-01	3.91E-01	2.96E-01	1.88E-01	1.10E-01	7.80E-02	4.98E-02	2.60E-02
318.9	0.192	Rh-105	3.67E-01	3.19E-01	2.88E-01	2.69E-01	2.40E-01	1.96E-01	1.49E-01	1.24E-01	9.34E-02	5.93E-02	3.48E-02	2.47E-02	1.58E-02	8.22E-03
320.1	0.098	Cr-51	1.88E-01	1.63E-01	1.48E-01	1.38E-01	1.23E-01	1.00E-01	7.64E-02	6.33E-02	4.79E-02	3.04E-02	1.78E-02	1.27E-02	8.08E-03	4.22E-03
330.9	0.78	Sb-130	1.50E+00	1.30E+00	1.18E+00	1.10E-01	9.79E-01	7.99E-01	6.10E-01	5.06E-01	3.83E-01	2.43E-01	1.43E-01	1.02E-01	6.48E-02	3.39E-02
340.1	0.225	Pm-151	4.32E-01	3.76E-01	3.40E-01	3.17E-01	2.84E-01	2.31E-01	1.77E-01	1.47E-01	1.11E-01	7.07E-02	4.16E-02	2.96E-02	1.89E-02	9.87E-03
340.5	0.422	Cs-136	8.11E-01	7.04E-01	6.38E-01	5.95E-01	5.31E-01	4.34E-01	3.32E-01	2.75E-01	2.09E-01	1.33E-01	7.81E-02	5.54E-02	3.54E-02	1.85E-02
342.1	0.067	Ag-111	1.28E-01	1.12E-01	1.01E-01	9.43E-02	8.42E-02	6.87E-02	5.26E-02	4.36E-02	3.31E-02	2.10E-02	1.24E-02	8.80E-03	5.62E-03	2.94E-03
344.3	0.266	Eu-155	5.11E-01	4.44E-02	4.03E-01	3.75E-01	3.35E-01	2.74E-01	2.09E-01	1.74E-01	1.32E-01	8.39E-02	4.94E-02	3.51E-02	2.24E-02	1.17E-02
345.9	0.12	Hf-181	2.31E-01	2.01E-01	1.82E-01	1.70E-01	1.52E-01	1.24E-01	9.46E-02	7.85E-02	5.59E-02	3.79E-02	2.23E-02	1.59E-02	1.01E-02	5.30E-03
364.5	0.812	I-131	1.57E+00	1.37E+00	1.24E+00	1.16E+00	1.03E+00	8.44E-01	6.47E-01	5.27E-01	4.09E-01	2.61E-01	1.54E-01	1.09E-01	6.99E-02	3.66E-02
400.7	0.116	Se-75	2.26E-01	1.97E-01	1.79E-01	1.67E-01	1.49E-01	1.22E-01	9.40E-02	7.81E-02	5.96E-02	3.82E-02	2.26E-02	1.61E-02	1.03E-02	5.41E-03
402.5	0.69	Cm-247	1.35E+00	1.17E+00	1.07E+00	9.49E-01	8.91E-01	7.29E-01	5.62E-01	4.67E-01	3.56E-01	2.28E-01	1.35E-01	9.65E-02	6.16E-02	3.14E-02
414.8	0.833	Sb-126	1.64E+00	1.42E+00	1.29E+00	1.21E+00	1.08E+00	8.85E-01	6.83E-01	5.68E-01	4.34E-01	2.78E-01	1.65E-01	1.18E-01	7.52E-02	3.96E-02
417.9	0.01	Te-127	1.95E-02	1.69E-02	1.54E-02	1.43E-02	1.29E-02	1.05E-02	8.13E-03	6.76E-03	5.17E-03	3.31E-03	1.97E-03	1.40E-03	8.96E-04	4.72E-04
418	0.341	I-130	6.71E-01	5.84E-01	5.31E-01	4.59E-01	4.44E-01	3.63E-01	2.80E-01	2.33E-01	1.78E-01	1.14E-01	6.78E-02	4.85E-02	3.09E-02	1.63E-02
427.9	0.294	Sb-125	5.80E-01	5.05E-01	4.59E-01	4.28E-01	3.84E-01	3.14E-01	2.43E-01	2.02E-01	1.55E-01	9.93E-02	5.90E-02	4.22E-02	2.69E-02	1.42E-02
435.1	0.186	Te-134	3.66E-01	3.19E-01	2.90E-01	2.71E-01	2.43E-01	1.99E-01	1.54E-01	1.28E-01	9.08E-02	6.29E-02	3.74E-02	2.68E-02	1.71E-02	9.00E-03

表 A.1 单位面积活度(Bq·m⁻²)的放射性核素在地表 1m 处产生的初级γ射线注量率 (m⁻²·s⁻¹)

能量 (keV)	分支比	放射性核素	质量张弛深度(g·cm ⁻²)													
			0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10	20	30	50	100
438.6	0.949	Zn-69m	1.88E+00	1.63E+00	1.49E+00	1.39E+00	1.24E+00	1.02E+00	7.88E-01	6.56E-01	5.02E-01	3.23E-01	1.92E-01	1.37E-01	8.76E-02	4.62E-02
459.6	0.074	Te-129	1.46E-01	1.27E-01	1.16E-01	1.08E-01	9.71E-02	7.96E-02	6.18E-02	5.14E-02	3.95E-02	2.54E-02	1.52E-02	1.09E-02	6.92E-03	3.66E-03
461	0.099	Te-134	1.96E-01	1.71E-01	1.56E-01	1.45E-01	1.30E-01	1.07E-01	8.29E-02	6.90E-02	5.30E-02	3.41E-02	2.03E-02	1.46E-02	9.29E-03	4.91E-03
462.8	0.307	Cs-138	6.12E-01	5.32E-01	4.86E-01	4.52E-01	4.06E-01	3.33E-01	2.59E-01	2.15E-01	1.65E-01	1.06E-01	6.35E-02	4.55E-02	2.90E-02	1.53E-02
463.4	0.105	Sb-125	2.08E-01	1.81E-01	1.65E-01	1.54E-01	1.38E-01	1.13E-01	8.79E-02	7.32E-02	5.62E-02	3.62E-02	2.16E-02	1.55E-02	9.86E-03	5.22E-03
469.4	0.175	Ru-105	3.50E-01	3.04E-01	2.78E-01	2.59E-01	2.32E-01	1.91E-01	1.48E-01	1.23E-01	9.48E-02	6.11E-02	3.64E-02	2.61E-02	1.67E-02	8.82E-03
473	0.247	Sb-127	4.94E-01	4.30E-01	3.92E-01	3.65E-01	3.28E-01	2.69E-01	2.09E-01	1.74E-01	1.34E-01	8.64E-02	5.15E-02	3.70E-02	2.36E-02	1.25E-02
477.6	0.103	Be-7	2.07E-01	1.80E-01	1.64E-01	1.53E-01	1.37E-01	1.13E-01	8.77E-02	7.30E-02	5.62E-02	3.62E-02	2.16E-02	1.55E-02	9.88E-03	5.23E-03
479.5	0.253	W-187	5.06E-01	4.40E-01	4.02E-01	3.74E-01	3.36E-01	2.76E-01	2.15E-01	1.79E-01	1.38E-01	8.87E-02	5.30E-02	3.80E-02	2.42E-02	1.28E-02
479.5	0.9	Y-90m	1.80E+00	1.57E+00	1.43E+00	1.33E+00	1.20E+00	9.81E-01	7.64E-01	6.36E-01	4.89E-01	3.16E-01	1.88E-01	1.35E-01	8.62E-02	4.56E-02
482	0.83	Hf-181	1.66E+00	1.45E+00	1.32E+00	1.23E+00	1.10E+00	9.06E-01	7.05E-01	5.88E-01	4.52E-01	2.92E-01	1.74E-01	1.25E-01	7.97E-02	4.22E-02
487	0.459	La-140	9.19E-01	8.00E-01	7.31E-01	6.81E-01	6.12E-01	5.02E-01	3.91E-01	3.26E-02	2.51E-01	1.62E-01	9.67E-02	6.94E-02	4.42E-02	2.34E-02
497.1	0.889	Ru-103	1.79E+00	1.55E+00	1.42E+00	1.32E+00	1.19E+00	9.77E-01	7.62E-01	6.35E-01	4.89E-01	3.16E-01	1.89E-01	1.36E-01	8.65E-02	4.58E-02
507.7	0.053	Zr-97	1.07E-01	9.30E-02	8.50E-02	7.92E-02	7.12E-02	5.85E-02	4.56E-02	3.80E-02	2.93E-02	1.90E-02	1.14E-02	8.16E-03	5.20E-03	2.76E-03
511	0.301	Co-58	6.06E-01	5.28E-01	4.83E-01	4.50E-01	4.05E-01	3.32E-01	2.59E-01	2.16E-01	1.67E-01	1.08E-01	6.46E-02	4.64E-02	2.96E-02	1.57E-02
511	1.81	Na-22	3.64E+00	3.17E+00	2.90E+00	2.70E+00	2.43E+00	2.00E+00	1.56E+00	1.30E+00	1.00E+00	6.48E-01	3.88E-01	2.79E-01	1.78E-01	9.43E-02
511.9	0.207	Rh-106	4.17E-01	3.63E-01	3.32E-01	3.09E-01	2.78E-01	2.28E-01	1.78E-01	1.49E-01	1.15E-01	7.41E-02	4.44E-02	3.19E-02	2.04E-02	1.08E-02
526.5	0.45	Sb-128	9.07E-01	7.91E-01	7.24E-01	6.74E-01	6.07E-01	4.99E-01	3.89E-01	3.25E-01	2.51E-01	1.62E-01	9.74E-02	7.00E-02	4.47E-02	2.37E-02
529.9	0.863	I-133	1.74E+00	1.52E+00	1.39E+00	1.29E+00	1.16E+00	9.57E-01	7.48E-01	6.24E-01	4.82E-01	3.12E-01	1.87E-01	1.35E-01	8.60E-02	4.56E-02
531	0.131	Nd-147	2.64E-01	2.30E-01	2.11E-01	1.96E-01	1.77E-01	1.45E-01	1.13E-01	9.47E-02	7.31E-02	4.74E-02	2.84E-02	2.04E-02	1.31E-02	6.92E-03

表 A.1 单位面积活度(Bq·m⁻²)的放射性核素在地表 1m 处产生的初级γ射线注量率 (m⁻²·s⁻¹)

能量 (keV)	分支比	放射性核素	质量张弛深度(g·cm ⁻²)													
			0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10	20	30	50	100
536.1	0.99	I-130	2.00E+00	1.74E+00	1.60E+00	1.49E+00	1.34E+00	1.10E+00	8.60E-01	7.18E-01	5.54E-01	3.59E-01	2.16E-01	1.55E-01	9.91E-02	5.25E-02
537.3	0.244	Ba-140	4.92E-01	4.30E-01	3.93E-01	3.66E-01	3.30E-01	2.71E-01	2.12E-01	1.77E-01	1.37E-01	8.85E-02	5.31E-02	3.82E-02	2.44E-02	1.29E-02
544.7	0.179	Sb-129	3.62E-01	3.16E-01	2.89E-01	2.70E-01	2.43E-01	2.00E-01	1.56E-01	1.30E-01	1.01E-01	6.53E-02	3.92E-02	2.82E-02	1.81E-02	9.56E-03
550.3	0.22	Pm-148	4.45E-01	3.88E-01	3.55E-01	3.31E-01	2.98E-01	2.45E-01	1.92E-01	1.60E-01	1.24E-01	8.04E-02	4.83E-02	3.48E-02	2.22E-02	1.18E-02
550.3	0.944	Pm-148m	1.91E+00	1.67E+00	1.53E+00	1.42E+00	1.28E+00	1.05E+00	8.23E-01	6.88E-01	5.31E-01	3.45E-01	2.07E-01	1.49E-01	9.54E-02	5.05E-02
551.5	0.059	W-187	1.19E-01	1.04E-01	9.52E-02	8.87E-02	7.99E-02	6.57E-02	5.14E-02	4.29E-02	3.32E-02	2.15E-02	1.29E-02	9.31E-03	5.96E-03	3.16E-03
555.6	0.949	Y-91m	1.92E+00	1.68E+00	1.53E+00	1.43E+00	1.29E+00	1.06E+00	8.29E-01	6.93E-01	5.35E-01	3.48E-01	2.09E-01	1.50E-01	9.63E-02	5.10E-02
566	0.183	Te-134	3.70E-01	3.23E-01	2.96E-01	2.76E-01	2.49E-01	2.05E-01	1.60E-01	1.34E-01	1.03E-01	6.73E-02	4.05E-02	2.91E-02	1.87E-02	9.88E-03
569.3	0.15	Cs-134	3.04E-01	2.66E-01	2.43E-01	2.27E-01	2.04E-01	1.68E-01	1.32E-01	1.10E-01	8.51E-02	5.53E-02	3.33E-02	2.40E-02	1.54E-02	8.13E-03
600.6	0.178	Sb-125	3.62E-01	3.17E-01	2.90E-01	2.70E-01	2.44E-01	2.01E-01	1.58E-01	1.32E-01	1.02E-01	6.66E-02	4.02E-02	2.90E-02	1.86E-02	9.84E-03
602.7	0.979	Sb-124	1.99E+00	1.74E+00	1.60E+00	1.49E+00	1.34E+00	1.11E+00	8.69E-01	7.27E-01	5.63E-01	3.67E-01	2.22E-01	1.60E-01	1.03E-01	5.43E-02
604.6	0.975	Cs-134	1.99E+00	1.74E+00	1.59E+00	1.48E+00	1.34E+00	1.10E+00	8.66E-01	7.25E-01	5.61E-01	3.66E-01	2.21E-01	1.59E-01	1.02E-01	5.41E-02
606.6	0.05	Sb-125	1.02E-01	8.95E-02	8.20E-02	7.65E-02	6.89E-02	5.69E-02	4.46E-02	3.73E-02	2.89E-02	1.89E-02	1.14E-02	8.21E-03	5.27E-03	2.79E-03
610.3	0.056	Ru-103	1.14E-01	9.99E-02	9.15E-02	8.54E-02	7.69E-02	6.35E-02	4.98E-02	4.17E-02	3.23E-02	2.11E-02	1.27E-02	9.18E-03	5.90E-03	3.12E-03
618.4	0.073	W-187	1.48E-02	1.30E-01	1.19E-01	1.11E-01	1.00E-01	8.26E-02	6.48E-02	5.43E-02	4.21E-02	2.75E-02	1.66E-02	1.20E-02	7.70E-03	4.07E-03
621.8	0.098	Rh-106	2.00E-01	1.75E-01	1.61E-01	1.50E-01	1.35E-01	1.12E-01	8.76E-02	7.34E-02	5.69E-02	3.71E-02	2.24E-02	1.62E-02	1.04E-02	5.51E-03
628.7	0.31	Sb-128	6.33E-01	5.55E-01	5.08E-01	4.74E-01	4.28E-01	3.53E-01	2.77E-01	2.32E-01	1.80E-01	1.18E-01	7.12E-02	5.14E-02	3.31E-02	1.75E-02
630	0.886	Pm-148m	1.81E+00	1.59E+00	1.45E+00	1.36E+00	1.22E+00	1.01E+00	7.93E-01	6.65E-01	5.15E-01	3.37E-01	2.04E-01	1.47E-01	9.46E-02	5.00E-02
635.9	0.113	Sb-125	2.31E-01	2.03E-01	1.86E-01	1.73E-01	1.56E-01	1.29E-01	1.01E-01	8.51E-02	6.60E-02	4.31E-02	2.61E-02	1.88E-02	1.21E-02	6.41E-03
636.2	0.36	Sb-128	7.36E-01	6.45E-01	5.91E-01	5.52E-01	4.98E-01	4.11E-01	3.23E-01	2.71E-01	2.10E-01	1.37E-01	8.30E-02	5.99E-02	3.86E-02	2.04E-02

表 A.1 单位面积活度(Bq·m⁻²)的放射性核素在地表 1m 处产生的初级γ射线注量率 (m⁻²·s⁻¹)

能量 (keV)	分支比	放射性核素	质量张弛深度(g·cm ⁻²)													
			0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10	20	30	50	100
637	0.073	I-131	1.49E-01	1.30E-01	1.19E-01	1.11E-01	1.00E-01	8.30E-02	6.52E-02	5.47E-02	4.24E-02	2.77E-02	1.68E-02	1.21E-02	7.79E-03	4.12E-03
641.3	0.474	La-142	9.69E-01	8.50E-01	7.79E-01	7.27E-01	6.56E-01	5.42E-01	4.26E-01	3.57E-01	2.77E-01	1.81E-01	1.10E-01	7.91E-02	5.10E-02	2.69E-02
647.5	0.194	Te-133m	3.97E-01	3.48E-01	3.19E-01	2.98E-01	2.69E-01	2.22E-01	1.75E-01	1.46E-01	1.14E-01	7.44E-02	4.50E-02	3.25E-02	2.09E-02	1.11E-02
657.7	0.947	Ag-110m	1.94E+00	1.70E+00	1.56E+00	1.46E+00	1.32E+00	1.09E+00	8.55E-01	7.18E-01	5.57E-01	3.65E-01	2.21E-01	1.60E-01	1.03E-01	5.44E-02
657.9	0.983	Nb-97	2.01E+00	1.77E+00	1.62E+00	1.51E+00	1.37E+00	1.13E+00	8.88E-01	7.45E-01	5.78E-01	3.79E-01	2.30E-01	1.66E-01	1.07E-01	5.65E-02
661.6	0.899	Ba-137m	1.84E+00	1.62E+00	1.48E+00	1.38E+00	1.25E+00	1.03E+00	8.13E-01	6.82E-01	5.30E-01	3.47E-01	2.10E-01	1.52E-01	9.80E-02	5.18E-02
664.5	0.053	Ce-143	1.08E-01	9.45E-02	8.67E-02	8.09E-02	7.30E-02	6.04E-02	4.75E-02	3.99E-02	3.10E-02	2.03E-02	1.23E-02	8.88E-03	5.73E-03	3.03E-03
666.3	0.997	Sb-126	2.05E+00	1.80E+00	1.65E+00	1.54E+00	1.39E+00	1.15E+00	9.02E-01	7.58E-01	5.88E-01	3.86E-01	2.34E-01	1.69E-01	1.09E-01	5.76E-02
667.7	0.987	I-132	2.03E+00	1.78E+00	1.63E+00	1.52E+00	1.37E+00	1.14E+00	8.94E-01	7.50E-01	5.83E-01	3.82E-01	2.32E-01	1.67E-01	1.08E-01	5.71E-02
668.5	0.961	I-130	1.97E+00	1.73E+00	1.59E+00	1.48E+00	1.34E+00	1.11E+00	8.71E-01	7.31E-01	5.68E-01	3.72E-01	2.26E-01	1.63E-01	1.05E-01	5.56E-02
676.4	0.157	Ru-105	3.22E-01	2.82E-01	2.59E-01	2.42E-01	2.18E-01	1.81E-01	1.42E-01	1.19E-01	9.27E-02	6.08E-02	3.69E-02	2.67E-02	1.72E-02	9.10E-03
685.7	0.353	Sb-127	7.26E-01	6.38E-01	5.85E-01	5.46E-01	4.93E-01	4.08E-01	3.21E-01	2.70E-01	2.10E-01	1.38E-01	8.36E-02	6.04E-02	3.90E-02	2.06E-02
685.8	0.316	W-187	6.50E-01	5.71E-01	5.23E-01	4.89E-01	4.41E-01	3.65E-01	2.88E-01	2.42E-01	1.88E-01	1.23E-01	7.48E-02	5.41E-02	3.49E-02	1.85E-02
695	0.997	Sb-126	2.05E+00	1.80E+00	1.65E+00	1.55E+00	1.39E+00	1.16E+00	9.10E-01	7.65E-01	5.49E-01	3.90E-01	2.37E-01	1.72E-01	1.11E-01	5.86E-02
697	0.289	Sb-126	5.96E-01	5.23E-01	4.80E-01	4.48E-01	4.05E-01	3.35E-01	2.64E-01	2.22E-01	1.72E-01	1.13E-01	6.88E-02	4.98E-02	3.21E-02	1.70E-02
720.5	0.538	Sb-126	1.11E+00	9.78E-01	8.79E-01	8.38E-01	7.56E-01	6.28E-01	4.95E-01	4.16E-01	3.24E-01	2.13E-01	1.30E-01	9.39E-02	6.06E-02	3.21E-02
722	0.051	Ce-143	1.06E-01	9.31E-02	8.54E-02	7.98E-02	7.20E-02	5.97E-02	4.71E-02	3.96E-02	3.08E-02	2.03E-02	1.23E-02	8.94E-03	5.78E-03	3.06E-03
723.3	0.197	Eu-154	4.07E-01	3.58E-01	3.28E-01	3.07E-01	2.77E-01	2.30E-01	1.81E-01	1.52E-01	1.19E-01	7.81E-02	4.75E-02	3.44E-02	2.22E-02	1.18E-02
724.2	0.444	Zr-95	9.19E-01	8.08E-01	7.41E-01	6.93E-01	6.25E-01	5.18E-01	4.09E-01	3.44E-01	2.68E-01	1.76E-01	1.07E-01	7.76E-02	5.02E-02	2.66E-02
724.3	0.473	Ru-105	9.78E-01	8.60E-01	7.88E-01	7.37E-01	6.65E-01	5.52E-01	4.35E-01	3.66E-01	2.85E-01	1.88E-01	1.14E-01	8.26E-02	5.34E-02	2.83E-02

表 A.1 单位面积活度(Bq·m⁻²)的放射性核素在地表 1m 处产生的初级γ射线注量率 (m⁻²·s⁻¹)

能量 (keV)	分支比	放射性核素	质量张弛深度(g·cm ⁻²)													
			0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10	20	30	50	100
725.7	0.327	Pm-148m	6.77E-01	5.95E-01	5.45E-01	5.10E-01	4.60E-01	3.82E-01	3.01E-01	2.53E-01	1.97E-01	1.30E-01	7.89E-02	5.72E-02	3.69E-02	1.96E-02
727.2	0.068	Bi-212	1.40E-01	1.23E-01	1.13E-01	1.05E-01	9.50E-02	7.88E-02	6.21E-02	5.23E-02	4.07E-02	2.68E-02	1.63E-02	1.18E-02	7.63E-02	4.05E-03
739.5	0.122	Mo-99	2.53E-01	2.22E-01	2.04E-01	1.91E-01	1.72E-01	1.43E-01	1.13E-01	9.48E-02	7.38E-02	4.86E-02	2.96E-02	2.15E-02	1.39E-02	7.36E-03
739.5	0.823	I-130	1.71E+00	1.50E+00	1.37E+00	1.29E+00	1.16E+00	9.63E-01	7.60E-01	6.40E-01	4.98E-01	3.28E-01	2.00E-01	1.45E-01	9.36E-02	4.97E-02
742.6	0.151	Te-134	3.13E-01	2.75E-01	2.52E-01	2.36E-01	2.13E-01	1.77E-01	1.39E-01	1.17E-01	9.14E-02	6.03E-02	3.67E-02	2.66E-02	1.72E-02	9.12E-03
743.3	1	Sb-128	2.07E+00	1.82E+00	1.67E+00	1.56E+00	1.41E+00	1.17E+00	9.24E-01	7.78E-01	6.06E-01	4.00E-01	2.43E-01	1.76E-01	1.14E-01	6.05E-02
748.3	0.008	Pr-145	1.56E-02	1.37E-02	1.26E-02	1.18E-02	1.06E-02	8.83E-03	6.97E-03	5.87E-03	4.57E-03	3.02E-03	1.84E-03	1.33E-03	8.61E-04	4.57E-04
754	1	Sb-128	2.08E+00	1.83E+00	1.67E+00	1.57E+00	1.41E+00	1.17E+00	9.27E-01	7.81E-01	6.08E-01	4.02E-01	2.45E-01	1.77E-01	1.15E-01	6.09E-02
756.7	0.549	Zr-95	1.14E+00	1.00E+00	9.19E-01	8.60E-01	7.76E-01	6.45E-01	5.09E-01	4.29E-01	3.34E-01	2.21E-01	1.34E-01	9.75E-02	6.30E-02	3.35E-02
763.9	0.224	Ag-110m	4.65E-01	4.09E-01	3.75E-01	3.51E-01	3.17E-01	2.63E-01	2.08E-01	1.75E-01	1.36E-01	9.02E-02	5.50E-02	3.99E-02	2.58E-02	1.37E-02
765.8	1	Nb-95	2.08E+00	1.83E+00	1.68E+00	1.57E+00	1.42E+00	1.18E+00	9.30E-01	7.84E-01	6.11E-01	4.04E-01	2.46E-01	1.79E-01	1.15E-01	6.13E-02
767.2	0.29	Te-134	6.04E-01	5.31E-01	4.87E-01	4.56E-01	4.11E-01	3.42E-01	2.70E-01	2.27E-01	1.77E-01	1.17E-01	7.14E-02	5.18E-02	3.35E-02	1.78E-02
772.6	0.762	I-132	1.59E+00	1.40E+00	1.28E+00	1.20E+00	1.08E+00	8.99E-01	7.10E-01	5.98E-01	4.67E-01	3.08E-01	1.88E-01	1.37E-01	8.83E-02	4.69E-02
773.7	0.382	Te-131m	7.95E-01	6.99E-01	6.41E-01	6.00E-01	5.42E-01	4.50E-01	3.56E-01	3.00E-01	2.34E-01	1.54E-01	9.42E-02	6.84E-02	4.42E-02	2.35E-02
778.9	0.13	Eu-152	2.70E-01	2.38E-01	2.18E-01	2.04E-01	1.84E-01	1.53E-01	1.21E-01	1.02E-01	7.95E-02	5.26E-02	3.21E-02	2.33E-02	1.51E-02	8.01E-03
783.7	0.145	Sb-127	3.03E-01	2.66E-01	2.44E-01	2.29E-01	2.06E-01	1.72E-01	1.36E-01	1.14E-01	8.92E-02	5.90E-02	3.60E-02	2.61E-02	1.69E-02	8.99E-03
793.4	1	Sb-130	2.09E+00	1.84E+00	1.68E+00	1.58E+00	1.42E+00	1.18E+00	9.37E-01	7.90E-01	6.17E-01	4.08E-01	2.49E-01	1.81E-01	1.17E-01	6.23E-02
793.8	0.139	Te-131m	2.89E-01	2.55E-01	2.33E-01	2.19E-01	1.97E-01	1.64E-01	1.30E-01	1.09E-01	8.54E-02	5.65E-02	3.45E-02	2.51E-02	1.62E-02	8.64E-03
795.8	0.851	Cs-134	1.78E+00	1.57E+00	1.43E+00	1.34E+00	1.21E+00	1.01E+00	7.98E-01	6.73E-01	5.25E-01	3.48E-01	2.12E-01	1.54E-01	9.98E-02	5.31E-02
810.8	0.994	Co-58	2.08E+00	1.83E+00	1.68E+00	1.58E+00	1.42E+00	1.18E+00	9.36E-01	7.90E-01	6.17E-01	4.09E-01	2.50E-01	1.82E-01	1.18E-01	6.26E-02

表 A.1 单位面积活度(Bq·m⁻²)的放射性核素在地表 1m 处产生的初级γ射线注量率 (m⁻²·s⁻¹)

能量 (keV)	分支比	放射性核素	质量张弛深度(g·cm ⁻²)													
			0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10	20	30	50	100
811.8	0.103	Eu-156	2.16E-01	1.90E-01	1.74E-01	1.63E-01	1.47E-01	1.23E-01	9.70E-02	8.18E-02	6.39E-02	4.24E-02	2.59E-02	1.88E-02	1.22E-02	6.49E-03
812.8	0.43	Sb-129	9.01E-01	7.93E-01	7.27E-01	6.81E-01	6.15E-01	5.12E-01	4.05E-01	3.42E-01	2.67E-01	1.77E-01	1.08E-01	7.86E-02	5.09E-02	2.71E-02
815.8	0.236	La-140	4.95E-01	4.36E-01	4.00E-01	3.75E-01	3.38E-01	2.82E-01	2.23E-01	1.88E-01	1.47E-01	9.74E-02	5.95E-02	4.33E-02	2.80E-02	1.49E-02
818.5	0.997	Cs-136	2.09E+00	1.84E+00	1.69E+00	1.58E+00	1.43E+00	1.19E+00	9.41E-01	7.94E-01	6.20E-01	4.11E-01	2.51E-01	1.83E-01	1.18E-01	6.31E-02
834.8	1	Mn-54	2.10E+00	1.85E+00	1.70E+00	1.59E+00	1.44E+00	1.20E+00	9.47E-01	8.00E-01	6.25E-01	4.15E-01	2.54E-01	1.85E-01	1.20E-01	6.38E-02
839.4	1	Sb-130	2.10E+00	1.85E+00	1.70E+00	1.59E+00	1.44E+00	1.20E+00	9.49E-01	8.01E-01	6.26E-01	4.16E-01	2.54E-01	1.85E-01	1.20E-01	6.40E-02
841.6	0.146	Eu-152m	3.07E-01	2.70E-01	2.48E-01	2.32E-01	2.10E-01	1.75E-01	1.38E-01	1.17E-01	9.14E-02	6.07E-02	3.72E-02	2.71E-02	1.75E-02	9.35E-03
846.8	0.989	Mn-56	2.08E+00	1.83E+00	1.68E+00	1.58E+00	1.42E+00	1.19E+00	9.40E-01	7.94E-01	6.21E-01	4.12E-01	2.52E-01	1.84E-01	1.19E-01	6.35E-02
846.8	0.999	Co-56	2.10E+00	1.85E+00	1.70E+00	1.59E+00	1.44E+00	1.20E+00	9.50E-01	8.02E-01	6.27E-01	4.17E-01	2.55E-01	1.86E-01	1.20E-01	6.42E-02
847	0.954	I-134	2.01E+00	1.77E+00	1.62E+00	1.52E+00	1.37E+00	1.14E+00	9.07E-01	7.66E-01	5.99E-01	3.98E-01	2.44E-01	1.77E-01	1.15E-01	6.13E-02
852.2	0.206	Te-131m	4.35E-01	3.83E-01	3.51E-01	3.29E-01	2.97E-01	2.48E-01	1.96E-01	1.66E-01	1.30E-01	8.62E-02	5.28E-02	3.85E-02	2.49E-02	1.33E-02
856.7	0.176	Sb-126	3.72E-01	3.28E-01	3.00E-01	2.82E-01	2.54E-01	2.12E-01	1.68E-01	1.42E-01	1.11E-01	7.39E-02	4.53E-02	3.30E-02	2.14E-02	1.14E-02
864	0.156	Te-133m	3.29E-01	2.90E-01	2.66E-01	2.50E-01	2.25E-01	1.88E-01	1.49E-01	1.26E-01	9.85E-02	6.22E-02	4.01E-02	2.93E-02	1.90E-02	1.01E-02
873.2	0.115	Eu-154	2.43E-01	2.14E-01	1.96E-01	1.84E-01	1.66E-01	1.39E-01	1.10E-01	9.30E-02	7.28E-02	4.85E-02	2.97E-02	2.17E-02	1.40E-02	7.50E-03
881.6	0.42	Br-84	8.88E-01	7.83E-01	7.18E-01	6.74E-01	6.08E-01	5.08E-01	4.03E-01	3.41E-01	2.67E-01	1.78E-01	1.09E-01	7.94E-02	5.15E-02	2.75E-02
884.1	0.649	I-134	1.37E+00	1.21E+00	1.11E+00	1.04E+00	9.04E-01	7.84E-01	6.23E-01	5.26E-01	4.12E-01	2.75E-01	1.68E-01	1.23E-01	7.97E-02	4.26E-02
884.7	0.729	Ag-110m	1.54E+00	1.36E+00	1.25E+00	1.17E+00	1.06E+00	8.81E-01	6.99E-01	5.91E-01	4.63E-01	3.09E-01	1.89E-01	1.38E-01	8.95E-02	4.78E-02
889.3	1	Sc-46	2.12E+00	1.87E+00	1.71E+00	1.61E+00	1.45E+00	1.21E+00	9.61E-01	8.13E-01	6.37E-01	4.24E-01	2.60E-01	1.90E-01	1.23E-01	6.58E-02
911.3	0.29	Ac-228	6.16E-01	5.43E-01	4.98E-01	4.68E-01	4.22E-01	3.53E-01	2.80E-01	2.37E-01	1.86E-01	1.24E-01	7.62E-02	5.56E-02	3.61E-02	1.93E-02
912.7	0.55	Te-133m	1.17E+00	1.03E+00	9.44E-01	8.88E-01	8.01E-01	6.69E-01	5.32E-01	4.50E-01	3.53E-01	2.36E-01	1.45E-01	1.06E-01	6.85E-02	3.67E-02

表 A.1 单位面积活度(Bq·m⁻²)的放射性核素在地表 1m 处产生的初级γ射线注量率 (m⁻²·s⁻¹)

能量 (keV)	分支比	放射性核素	质量张弛深度(g·cm ⁻²)													
			0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10	20	30	50	100
914.6	0.2	Sb-129	4.26E-01	3.76E-01	3.44E-01	3.24E-01	2.92E-01	2.44E-01	1.94E-01	1.64E-01	1.29E-01	8.59E-02	5.27E-02	3.85E-02	2.50E-02	1.34E-02
914.8	0.109	Te-133m	2.32E-01	2.04E-01	1.87E-01	1.76E-01	1.59E-01	1.33E-01	1.05E-01	8.93E-02	7.00E-02	4.67E-02	2.87E-02	2.09E-02	1.36E-02	7.27E-03
914.8	0.115	Pm-148	2.43E-01	2.15E-01	1.97E-01	1.85E-01	1.67E-01	1.39E-01	1.11E-01	9.38E-02	7.36E-02	4.91E-02	3.01E-02	2.20E-02	1.43E-02	7.64E-03
915.3	0.171	Pm-148m	3.63E-01	3.21E-01	2.94E-01	2.76E-01	2.49E-01	2.08E-01	1.65E-01	1.40E-01	1.10E-01	7.33E-02	4.50E-02	3.29E-02	2.13E-02	1.14E-02
934.5	0.139	Y-92	2.96E-01	2.61E-01	2.39E-01	2.25E-01	2.03E-01	1.70E-01	1.35E-01	1.14E-01	8.98E-02	6.00E-02	3.69E-02	2.70E-02	1.75E-02	9.37E-02
934.9	0.19	Sb-130	4.05E-01	3.57E-01	3.27E-01	3.08E-01	2.78E-01	2.32E-01	1.85E-01	1.56E-01	1.23E-01	8.21E-02	5.04E-02	3.69E-02	2.39E-02	1.28E-02
937.5	0.343	Ag-110m	7.32E-01	6.46E-01	5.91E-01	5.57E-01	5.02E-01	4.20E-01	3.34E-01	2.83E-01	2.22E-01	1.48E-01	9.12E-02	6.67E-02	4.33E-02	2.32E-02
954.5	0.181	I-132	3.86E-01	3.41E-01	3.12E-01	2.94E-01	2.65E-01	2.22E-01	1.77E-01	1.50E-01	1.17E-01	7.86E-02	4.84E-02	3.54E-02	2.30E-02	1.23E-02
963.3	0.12	Eu-152m	2.57E-01	2.27E-01	2.08E-01	1.96E-01	1.77E-01	1.48E-01	1.18E-01	9.97E-02	7.83E-02	5.25E-02	3.23E-02	2.36E-02	1.53E-02	8.22E-03
964.1	0.145	Eu-152	3.10E-01	2.74E-01	2.51E-01	2.36E-01	2.13E-01	1.78E-01	1.42E-01	1.20E-01	9.45E-02	6.33E-02	3.90E-02	2.85E-02	1.85E-02	9.93E-03
964	0.055	Ac-228	1.17E-01	1.03E-01	9.44E-02	8.88E-02	8.02E-02	6.71E-02	5.34E-02	4.53E-02	3.56E-02	2.38E-02	1.47E-02	1.07E-02	6.97E-03	3.74E-03
966.4	0.077	Sb-129	1.65E-01	1.45E-01	1.33E-01	1.25E-01	1.13E-01	9.48E-02	7.55E-02	6.40E-02	5.03E-02	3.37E-02	1.07E-02	1.52E-02	9.85E-03	5.28E-03
969.2	0.175	Ac-228	3.74E-01	3.30E-01	3.02E-01	2.85E-01	2.57E-01	2.15E-01	1.71E-01	1.45E-01	1.14E-01	7.64E-02	4.70E-02	3.44E-02	2.24E-02	1.20E-02
984.5	0.278	Np-238	5.96E-01	5.27E-01	4.83E-01	4.55E-01	4.10E-01	3.44E-01	2.74E-01	2.32E-01	1.83E-01	1.22E-01	7.54E-02	5.52E-02	3.59E-02	1.92E-02
996.3	0.103	Eu-154	2.21E-01	1.96E-01	1.79E-01	1.69E-01	1.52E-01	1.28E-01	1.02E-01	8.63E-02	6.79E-02	4.56E-02	2.81E-02	2.06E-02	1.34E-02	7.18E-03
1004.8	0.174	Eu-154	3.74E-01	3.31E-01	3.03E-01	2.86E-01	2.58E-01	2.16E-01	1.72E-01	1.46E-01	1.15E-01	7.27E-02	4.76E-02	3.49E-02	2.27E-02	1.22E-02
1009.8	0.298	Cs-138	6.42E-01	5.67E-01	5.20E-01	4.90E-01	4.42E-01	3.71E-01	2.96E-01	2.51E-01	1.97E-01	1.33E-01	8.17E-02	5.99E-02	3.89E-02	2.09E-02
1013.8	0.202	Pm-148m	4.35E-01	3.84E-01	3.52E-01	3.32E-01	3.00E-01	2.51E-01	2.00E-01	1.70E-01	1.34E-01	8.98E-02	5.54E-02	4.06E-02	2.64E-02	1.42E-02
1025.9	0.096	Np-238	2.07E-01	1.83E-01	1.67E-01	1.58E-01	1.42E+91	1.19E-01	9.53E-02	8.09E-02	6.37E-02	4.28E-02	2.64E-02	1.94E-02	1.26E-02	6.77E-03
1028.5	0.203	Np-238	4.37E-01	3.87E-01	3.54E-01	3.34E-01	3.01E-01	2.53E-01	2.02E-01	1.71E-01	1.35E-01	9.06E-02	5.60E-02	4.10E-02	2.67E-02	1.43E-02

表 A.1 单位面积活度(Bq·m⁻²)的放射性核素在地表 1m 处产生的初级γ射线注量率 (m⁻²·s⁻¹)

能量 (keV)	分支比	放射性核素	质量张弛深度(g·cm ⁻²)													
			0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10	20	30	50	100
1030.1	0.126	Sb-129	2.72E-01	2.40E-01	2.20E-01	2.07E-01	1.87E-01	1.57E-01	1.25E-01	1.06E-01	8.37E-02	5.63E-02	3.48E-02	2.55E-02	1.66E-02	8.91E-03
1038.8	0.08	I-135	1.73E-01	1.53E-01	1.40E-01	1.32E-01	1.19E-01	1.00E-01	7.98E-02	6.78E-02	5.34E-02	3.59E-02	2.22E-02	1.63E-02	1.06E-02	5.69E-03
1048.1	0.798	Cs-136	1.72E+00	1.52E+00	1.40E+00	1.32E+00	1.19E+00	9.97E-01	7.96E-01	6.76E-01	5.32E-01	3.58E-01	2.21E-01	1.62E-01	1.06E-01	5.68E-02
1072.6	0.15	I-134	3.24E-01	2.86E-01	2.63E-01	2.48E-01	2.24E-01	1.88E-01	1.50E-01	1.27E-01	1.01E-01	6.77E-02	4.20E-02	3.07E-02	2.00E-02	1.08E-02
1076.6	0.088	Rb-86	1.90E-01	1.68E-01	1.54E-01	1.45E-01	1.31E-01	1.10E-01	8.80E-02	7.48E-02	5.90E-02	3.97E-02	2.46E-02	1.80E-02	1.18E-02	6.33E-03
1085.9	0.099	Eu-152	2.15E-01	1.90E-01	1.74E-01	1.64E-01	1.48E-01	1.25E-01	9.96E-02	8.46E-02	6.68E-02	4.50E-02	2.79E-02	2.04E-02	1.33E-02	7.18E-03
1099.2	0.565	Fe-59	1.23E+00	1.08E+00	9.94E-01	9.38E-01	8.47E-01	7.12E-01	5.69E-01	4.83E-01	3.81E-01	2.57E-01	1.60E-01	1.17E-01	7.64E-02	4.11E-02
1112.1	0.136	Eu-152	2.95E-01	2.60E-01	2.39E-01	2.25E-01	2.04E-01	1.71E-01	1.37E-01	1.16E-01	9.18E-02	6.20E-02	3.85E-02	2.82E-02	1.84E-02	9.92E-03
1115.5	0.148	Ni-65	3.22E-01	2.85E-01	2.61E-01	2.47E-01	2.23E-01	1.87E-01	1.50E-01	1.27E-01	1.00E-01	6.78E-02	4.22E-02	3.09E-02	2.02E-02	1.09E-02
1115.5	0.507	Zn-65	1.10E+00	9.74E-01	8.94E-01	8.44E-01	7.62E-01	6.41E-01	5.12E-01	4.35E-01	3.44E-01	2.32E-01	1.44E-01	1.06E-01	6.90E-02	3.72E-02
1120.5	1	Sc-46	2.17E+00	1.92E+00	1.76E+00	1.66E+00	1.50E+00	1.26E+00	1.01E+00	8.59E-01	6.78E-01	4.58E-01	2.85E-01	2.09E-01	1.36E-01	7.34E-02
1121.3	0.349	Ta-182	7.59E-01	6.70E-01	6.16E-01	5.81E-01	5.25E-01	4.41E-01	3.53E-01	3.00E-01	2.37E-01	1.60E-01	9.94E-02	7.28E-02	4.76E-02	2.56E-02
1125.5	0.114	Te-131m	2.48E-01	2.19E-01	2.02E-01	1.90E-01	1.72E-01	1.44E-01	1.15E-01	9.82E-02	7.75E-02	5.24E-02	3.26E-02	2.39E-02	1.56E-02	8.40E-03
1131.5	0.228	I-135	4.96E-01	4.38E-01	4.02E-01	3.79E-01	3.43E-01	2.88E-01	2.31E-01	1.96E-01	1.55E-01	1.05E-01	6.51E-02	4.77E-02	3.12E-02	1.68E-02
1153.5	0.071	Eu-156	1.55E-01	1.37E-01	1.26E-01	1.19E-01	1.07E-01	9.03E-02	7.22E-02	6.14E-02	4.68E-02	3.28E-02	2.05E-02	1.50E-02	9.81E-03	5.28E-03
1157.5	0.113	I-130	2.47E-01	2.18E-01	2.00E-01	1.89E-01	1.71E-01	1.44E-01	1.15E-01	9.79E-02	7.74E-02	5.23E-02	3.26E-02	2.39E-02	1.56E-02	8.42E-03
1173.2	0.999	Co-60	2.18E+00	1.93E+00	1.77E+00	1.67E+00	1.51E+00	1.27E+00	1.02E+00	8.67E-01	6.86E-01	4.64E-01	2.90E-01	2.12E-01	1.39E-01	7.49E-02
1189	0.164	Ta-182	3.59E-01	3.17E-01	2.91E-01	2.75E-01	2.49E-01	2.09E-01	1.68E-01	1.43E-01	1.13E-01	7.65E-02	4.78E-02	3.50E-02	2.29E-02	1.24E-02
1204.9	0.003	Y-91	6.57E-03	5.81E-03	5.34E-03	5.04E-03	4.56E-03	3.84E-03	3.08E-03	2.62E-03	2.07E-03	1.41E-03	8.79E-03	6.44E-04	4.22E-04	2.28E-04
1206.6	0.098	Te-131m	2.14E-01	1.89E-01	1.74E-01	1.64E-01	1.48E-01	1.25E-01	1.00E-01	8.52E-02	6.74E-02	4.57E-02	2.86E-02	2.09E-02	1.37E-02	7.41E-03

表 A.1 单位面积活度(Bq·m⁻²)的放射性核素在地表 1m 处产生的初级γ射线注量率 (m⁻²·s⁻¹)

能量 (keV)	分支比	放射性核素	质量张弛深度(g·cm ⁻²)													
			0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10	20	30	50	100
1221.4	0.273	Ta-182	5.99E-01	5.30E-01	4.87E-01	4.60E-01	4.16E-01	3.51E-01	2.81E-01	2.39E-01	1.90E-01	1.29E-01	8.05E-02	5.90E-02	3.87E-02	2.09E-02
1230.7	0.089	Eu-156	1.94E-01	1.72E-01	1.58E-01	1.49E-01	1.35E-01	1.14E-01	9.12E-02	7.77E-02	6.16E-02	4.18E-02	2.62E-02	1.92E-02	1.26E-02	6.79E-03
1231	0.116	Ta-182	2.54E-01	2.24E-01	2.06E-01	1.95E-01	1.76E-01	1.48E-01	1.19E-01	1.01E-01	8.03E-02	5.45E-02	3.41E-02	2.50E-02	1.64E-02	8.86E-03
1235.4	0.2	Cs-136	4.40E-01	3.89E-01	3.58E-01	3.38E-01	3.06E-01	2.58E-01	2.06E-01	1.76E-01	1.39E-01	9.46E-02	5.93E-02	4.35E-02	2.85E-02	1.54E-02
1238.3	0.67	Co-56	1.47E+00	1.30E+00	1.20E+00	1.13E+00	1.02E+00	8.61E-01	6.90E-01	5.88E-01	4.66E-01	3.16E-01	1.98E-01	1.45E-01	9.53E-02	5.15E-02
1242.4	0.067	Eu-156	1.47E-01	1.30E-01	1.20E-01	1.13E-01	1.02E-01	8.62E-02	6.91E-02	5.89E-02	4.67E-02	3.17E-02	1.99E-02	1.46E-02	9.55E-03	5.16E-03
1260.4	0.289	I-135	6.37E-01	5.63E-01	5.18E-01	4.89E-01	4.43E-01	3.74E-01	2.99E-01	2.55E-01	2.02E-01	1.38E-01	8.64E-02	6.33E-02	4.15E-02	2.24E-02
1274.4	0.355	Eu-154	7.82E-01	6.91E-01	6.37E-01	6.01E-01	5.44E-01	4.59E-01	3.68E-01	3.14E-01	2.49E-01	1.69E-01	1.06E-01	7.80E-02	5.12E-02	2.77E-02
1274.5	0.999	Na-22	2.20E+00	1.95E+00	1.79E+00	1.69E+00	1.53E+00	1.29E+00	1.04E+00	8.84E-01	7.01E-01	4.84E-01	3.05E-01	2.24E-01	1.47E-01	7.97E-02
1291.6	0.423	Fe-59	9.53E-01	8.43E-01	7.76E-01	7.33E-01	6.64E-01	5.60E-01	4.49E-01	3.83E-01	3.04E-01	2.07E-01	1.30E-01	9.54E-02	6.27E-02	3.39E-02
1332.5	1	Co-60	2.21E+00	1.96E+00	1.80E+00	1.90E+00	1.54E+00	1.30E+00	1.05E+00	8.94E-01	7.10E-01	4.84E-01	3.05E-01	2.24E-01	1.47E-01	7.97E-02
1354.5	0.026	La-141	5.84E-02	5.16E-02	4.76E-02	4.50E-02	4.07E-02	3.44E-02	2.76E-02	2.36E-02	1.88E-02	1.28E-02	8.09E-03	5.93E-03	3.90E-03	2.11E-03
1368.6	1	Na-24	2.22E+00	1.96E+00	1.81E+00	1.71E+00	1.55E+00	1.31E+00	1.05E+00	9.01E-01	7.16E-01	4.89E-01	3.09E-01	2.26E-01	1.49E-01	8.08E-02
1383.9	0.9	Sr-92	2.00E+00	1.77E+00	1.63E+00	1.54E+00	1.40E+00	1.18E+00	9.51E-01	8.13E-01	6.46E-01	4.41E-01	2.79E-01	2.05E-01	1.35E-01	7.31E-02
1384.3	0.243	Ag-110m	5.42E-01	4.79E-01	4.42E-01	4.18E-01	3.79E-01	3.20E-01	2.57E-01	2.20E-01	1.75E-01	1.19E-01	7.56E-02	5.54E-02	3.65E-02	1.98E-02
1408	0.209	Eu-152	4.65E-01	4.11E-01	3.79E-01	3.59E-01	3.25E-01	2.75E-01	2.21E-01	1.89E-01	1.51E-01	1.03E-01	6.52E-02	4.78E-02	3.15E-02	1.71E-02
1435.9	0.763	Cs-138	1.71E+00	1.51E+00	1.39E+00	1.32E+00	1.19E+00	1.01E+00	8.13E-01	6.96E-01	5.54E-01	3.79E-01	2.41E-01	1.76E-01	1.17E-01	6.31E-02
1457.6	0.087	I-135	1.96E-01	1.73E-01	1.60E-01	1.51E-01	1.37E-01	1.16E-01	9.35E-02	8.00E-02	6.38E-02	4.37E-02	2.78E-02	2.03E-02	1.34E-02	7.29E-03
1460.8	0.107	K-40	2.40E-01	2.12E-01	1.96E-01	1.85E-01	1.68E-01	1.42E-01	1.14E-01	9.80E-02	7.81E-02	5.35E-02	3.40E-02	2.49E-02	1.65E-02	8.93E-03
1465.1	0.222	Pm-148	4.97E-01	4.40E-01	4.06E-01	3.84E-01	3.49E-01	2.95E-01	2.38E-01	2.03E-01	1.62E-01	1.11E-01	7.07E-02	5.18E-02	3.42E-02	1.86E-02

表 A.1 单位面积活度(Bq·m⁻²)的放射性核素在地表 1m 处产生的初级γ射线注量率 (m⁻²·s⁻¹)

能量 (keV)	分支比	放射性核素	质量张弛深度(g·cm ⁻²)													
			0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10	20	30	50	100
1481.8	0.235	Ni-65	5.27E-01	4.66E-01	4.31E-01	4.07E-01	3.70E-01	3.13E-01	2.52E-01	2.16E-01	1.72E-01	1.18E-01	7.51E-02	5.51E-02	3.64E-02	1.97E-02
1505	0.131	Ag-110m	2.95E-01	2.60E-01	2.41E-01	2.28E-01	2.07E-01	1.71E-01	1.41E-01	1.21E-01	9.64E-02	6.61E-02	4.21E-02	3.09E-02	2.04E-02	1.11E-02
1524.6	0.189	K-42	4.25E-01	3.76E-01	3.48E-01	3.29E-01	2.99E-01	2.53E-01	2.04E-01	1.75E-01	1.39E-01	9.57E-02	6.10E-02	4.48E-02	2.96E-02	1.61E-02
1596.2	0.954	La-140	2.16E+00	1.91E+00	1.76E+00	1.67E+00	1.52E+00	1.29E+00	1.04E+00	8.91E-01	7.12E-01	4.90E-01	3.13E-01	2.30E-01	1.52E-01	8.29E-02
1678	0.096	I-135	2.19E-01	1.94E-01	1.79E-01	1.70E-01	1.54E-01	1.31E-01	1.06E-01	9.10E-02	7.28E-02	5.03E-02	3.22E-02	2.37E-02	1.57E-02	8.57E-03
1691	0.488	Sb-124	1.11E+00	9.82E-01	9.09E-01	8.60E-01	7.82E-01	6.65E-01	5.36E-01	4.61E-01	3.69E-01	2.55E-01	1.63E-01	1.20E-01	7.99E-02	4.35E-02
1736.5	0.06	Sb-129	1.36E-01	1.21E-01	1.12E-01	1.06E-01	9.63E-02	8.19E-02	6.61E-02	5.69E-02	4.56E-02	3.16E-02	2.02E-02	1.49E-02	9.91E-03	5.40E-03
1736.5	0.06	Sb-129	1.36E-01	1.21E-01	1.12E-01	1.06E-01	9.63E-02	8.19E-02	6.61E-02	5.69E-02	4.56E-02	3.16E-02	2.02E-02	1.49E-02	9.91E-03	5.40E-03
1771.4	0.155	Co-56	3.55E-01	3.14E-01	2.91E-01	2.75E-01	2.51E-01	2.13E-01	1.72E-01	1.48E-01	1.19E-01	8.25E-02	5.28E-02	3.91E-02	2.59E-02	1.42E-02
1791.2	0.078	I-135	1.78E-01	1.58E-01	1.46E-01	1.38E-01	1.26E-01	1.07E-01	8.66E-02	7.47E-02	5.99E-02	4.15E-02	2.66E-02	1.97E-02	1.31E-02	7.14E-03
1810.7	0.272	Mn-56	6.23E-01	5.52E-01	5.12E-01	4.84E-01	4.41E-01	3.76E-01	3.03E-01	2.62E-01	2.10E-01	1.46E-01	9.33E-02	6.92E-02	4.59E-02	2.51E-02
1897.6	0.147	Br-84	3.39E-01	3.01E-01	2.79E-01	2.64E-01	2.40E-01	2.05E-01	1.66E-01	1.43E-01	1.15E-01	8.07E-02	5.21E-02	3.89E-02	2.59E-02	1.42E-02
1901.3	0.072	La-142	1.65E-01	1.46E-01	1.36E-01	1.29E-01	1.17E-01	9.99E-02	8.07E-02	6.97E-02	5.60E-02	3.90E-02	2.50E-02	1.86E-02	1.24E-02	6.77E-03
2091	0.056	Sb-124	1.30E-01	1.16E-01	1.07E-01	1.02E-01	9.26E-02	7.92E-02	6.41E-02	5.56E-02	4.48E-02	3.13E-02	2.02E-02	1.51E-02	1.01E-02	5.52E-03
2113	0.143	Mn-56	3.34E-01	2.97E-01	2.76E-01	2.61E-01	2.38E-01	2.04E-01	1.65E-01	1.43E-01	1.15E-01	8.07E-02	5.21E-02	3.89E-02	2.59E-02	1.42E-02
2218	0.152	Cs-138	3.56E-01	3.16E-01	2.94E-01	2.78E-01	2.54E-01	2.17E-01	1.76E-01	1.53E-01	1.23E-01	8.67E-02	5.61E-02	4.19E-02	2.80E-02	1.54E-02
2397.8	0.133	La-142	3.13E-01	2.79E-01	2.59E-01	2.46E-01	2.24E-01	1.92E-01	1.57E-01	1.36E-01	1.10E-01	7.75E-02	5.04E-02	3.78E-02	2.53E-02	1.39E-02
2482.1	0.067	Br-84	1.59E-01	1.42E-01	1.32E-01	1.25E-01	1.14E-01	9.77E-02	7.99E-02	6.94E-02	5.62E-02	3.97E-02	2.58E-02	1.94E-02	1.30E-02	7.17E-03
2542.7	0.1	La-142	2.37E-01	2.12E-01	1.97E-01	1.86E-01	1.70E-01	1.46E-01	1.19E-01	1.04E-01	8.41E-02	5.95E-02	3.88E-02	2.92E-02	1.95E-02	1.08E-02
2598.6	0.167	Co-56	3.98E-01	3.56E-01	3.31E-01	3.13E-01	2.86E-01	2.45E-01	2.01E-01	1.75E-01	1.42E-01	1.00E-01	6.55E-02	4.92E-02	3.30E-02	1.82E-02

表 A.1 单位面积活度(Bq·m⁻²)的放射性核素在地表 1m 处产生的初级γ射线注量率 (m⁻²·s⁻¹)

能量 (keV)	分支比	放射性核素	质量张弛深度(g·cm ⁻²)													
			0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10	20	30	50	100
2639.6	0.076	Cs-138	1.82E-01	1.63E-01	1.51E-01	1.43E-01	1.31E-01	1.12E-01	9.19E-02	7.98E-02	6.48E-02	4.59E-02	3.00E-02	2.26E-02	1.52E-02	8.38E-03
2754	0.999	Na-24	2.39E+00	2.14E+00	1.99E+00	1.88E+00	1.72E+00	1.48E+00	1.21E+00	1.06E+00	8.59E-01	6.10E-01	4.00E-01	3.01E-01	2.03E-01	1.12E-01
3253.5	0.074	Co-56	1.80E-01	1.62E-01	1.51E-01	1.42E-01	1.31E-01	1.12E-01	9.28E-02	8.10E-02	6.62E-02	4.73E-02	3.13E-02	2.37E-02	1.60E-02	8.92E-03
3927.5	0.068	Br-84	1.71E-01	1.53E-01	1.42E-01	1.35E-01	1.24E-01	1.07E-01	8.87E-02	7.77E-02	6.38E-02	4.61E-02	3.07E-02	2.34E-02	1.59E-02	8.93E-03

表 A.2 单位质量活度(Bq·g⁻¹)的天然放射性核素在地表 1m 处产生的初级γ射线注量率
(cm⁻²·s⁻¹)

衰变系	核素	能量 (keV)	分支比	注量活度比(cm ⁻² s ⁻¹ Bq ⁻¹ g)
U-238	Pb-214	295	0.192	0.828
		352	0.369	1.71
	Bi-214	609	0.469	2.75
		665	0.0158	0.0965
		768	0.0497	0.325
		934	0.0319	0.229
	Pa-234m	1001	0.00845	0.0629
	Bi-214	1120	0.155	1.22
		1238	0.061	0.507
		1378	0.041	0.361
		1408	0.025	0.223
		1509	0.022	0.203
		1730	0.03	0.298
		1765	0.162	1.62
		1847	0.0216	0.222
		2119	0.0125	0.138
		2204	0.0525	0.592
		2448	0.0162	0.193
Th-232	Pb-212	239	0.434	1.73
	Ra-224	241	0.0397	0.158
	Ac-228	338	0.12	0.547
		463	0.0464	0.241
	Tl-208	511	0.0809	0.438
		583	0.306	1.76
	Bi-212	727	0.0675	0.43
	Ac-228	795	0.0484	0.322
	Tl-208	861	0.0453	0.314
	Ac-228	911	0.29	2.06
		965	0.0545	0.398
		969	0.175	1.282
		1588	0.0371	0.352
	Bi-212	1621	0.0149	0.143
	Ac-228	1630	0.0195	0.187
	Tl-208	2615	0.359	4.418
K-40	K-40	1461	0.107	0.971

附录 B

(资料性附录)

就地 HPGe 谱仪测量土壤中 γ 核素活度浓度的影响因素

B.1 监测点位的选择

监测点位应尽可能地满足：

- 1) 表面平坦（田野、牧场或草地），没有障碍物（树木、岩石、建筑）；
- 2) 尽可能大（大于探测器的视阈）；
- 3) 未经人为活动影响（尽管测量天然放射性核素不受人为活动的影响）；
- 4) 地表以下没有非均匀的部分（凸出岩石）。

注 1：落下灰（人工放射性核素）受雨水冲洗后，在雨水浸泡后的区域进行测量会影响测量结果的准确度。

注 2：测量点位附近（即使在探测器视阈之外）有较大的海拔高度变化（悬崖、河岸、山丘）也可能干扰测量结果的准确度。

注 3：在地表具有坡度的位置进行测量，降水会导致落下灰的分布不是均匀的，坡面处人工放射性核素的浓度较低，凹陷处人工放射性核素的浓度较高。

B.2 土壤表面粗糙度

土壤地表的粗糙度会影响探测器的视阈，因为地形的凸凹会影响后面的区域。对于质量张弛深度较小的情况，土壤表面粗糙度的影响更为显著。此时，质量张弛深度应当使用 3 kg m^{-2} ，而不是 0（用于理想的表面沉积情况）。

注：现实中，无法找到完全平坦的表面源；总是有植物、地面粗糙或少量放射性核素已经在土壤中扩散，对 γ 射线造成一定衰减。然而， $\beta=0$ 的取值可用于计算等效表面沉积量，等效表面沉积量与实际沉积量相比，总是低估的。

B.3 地表植被

表的植被会屏蔽土壤中发射的 γ 射线，这可能导致被测核素的放射性核素活度被低估。植被表面沉积的放射性核素，可能会影响放射性核素在土壤中分布的理论模型。

B.4 放射性核素在平面上非均匀分布

在同一土壤深度，若放射性核素浓度是非均匀，则改变了测量几何条件。非均匀性的影响大小依赖于非均匀区域的尺寸，活度浓度，以及与探测器的相对位置。离探测器近的区域的影响较大，距离远的影响小。如果没有放射性核素在土壤分布信息，则无法对测量的 γ 能谱进行定量分析。

注：尽量避免雨后进行测量天然放射性核素。这是因为氡子体会随雨水降至地表，无准确的分布规律，无法定量分析 ^{222}Rn 子体 ^{214}Bi 和 ^{214}Pb 的活度浓度。这种情况下， ^{226}Ra 的活度浓度只能通过测量其自身衰变的 γ 射线而活度。

B.5 土壤中放射性核素的分布

放射性核素张弛深度 β 的选择测量结果有较强的影响，须根据现场取样测量或经验值而估算。

B.6 土壤成分

低光子能量 ($E < 100 \text{ keV}$) 和质量张弛深度 ($\beta > 30 \text{ kg m}^{-2}$) 时, 土壤成分和含水率对注量活度比影响较大。附录 A 提供的结果是假设土壤组分为: Al_2O_3 13.5 %; Fe_2O_3 4.5 %; SiO_2 67.5 %; CO_2 4.5 %; H_2O 10 %。

B.7 外部贡献

土壤中之外的源项(如视阈内的放射源或大气中的放射性核素)能会导致测量结果偏高, 若导致测量结果的偏差高于测量不确定度, 则无法对就地谱仪的能谱进行定量分析。当已知大气中放射性核素活度浓度时, 可以进行修正。

注: 附录 C 提供了空气中放射性核素在地表 1m 处的初级 γ 注量率。例如, 空气中 1 Bq m^{-3} 的 ^{131}I 将导致测了结果偏高 20 Bq m^{-2} ($\beta = 0 \text{ kg m}^{-2}$)。

B.8 探测器离地高度

对于离地 1 米高的探测器, 高度在 5cm 内的偏差不会对测量结果有显著的影响。

B.9 效率刻度

探测器有效前面积和角度修正因子对测量结果的不确定度有显著的贡献。可以通过精确地放置刻度源、足够长的测量时间或准确的蒙卡模型来减小这项不确定度。

B.10 强辐射场对测量设备的影响

土壤中放射性核素活度浓度较高时, 导致初级 γ 射线的注量率高, 影响就地 γ 谱仪的死时间的影响。单位时间内在探测器晶体内沉积的能量, 是与周围剂量率成正比的量, 可以作为一个限制参数。探测器可以在高至 $10 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 的剂量率条件下进行定量测量, 大致对应的测量表面活度为:

对于沉积在地表的情况 ($\beta = 0 \text{ kg m}^{-2}$):

- 4 MBq m^{-2} 的 ^{137}Cs
- 1 MBq m^{-2} 的 ^{60}Co

对于在土壤中均匀分布的情况:

- 150 kBq kg^{-1} 的 ^{40}K

对于在土壤中均匀分布的情况, 所有衰变子体处于平衡状态:

- 15 kBq kg^{-1} 的 ^{238}U
- 9 kBq kg^{-1} 的 ^{232}Th

附录 C

(资料性附录)

空气中均匀分布的放射性核素在地表 1m 处的初级 γ 射线注量率

地表 1m 处的初级 γ 射线是由土壤中放射性核素和大气中的放射性核素共同引起的。因此,大气中放射性核素在地表产生的注量率将影响就地 HPGe 测量土壤中放射性核素活度浓度的测量结果。

假设空气中放射性核素的分布函数为 $A_V(r, \cos\theta, \phi)$, 则在地表 1m 处的注量率角分布为:

$$\varphi_{\cos\theta, \phi} = \frac{p}{4\pi} \int_0^\infty A_V(r, \cos\theta, \phi) \cdot \exp(-\mu_a' \cdot r) dr \quad (C.1)$$

若放射性核素在空气中均匀分布, 则

$$A_V(r, \cos\theta, \phi) = \begin{cases} A_V & \cos\theta > 0 \text{ 且 } h / \cos\theta \geq r \\ 0 & \cos\theta > 0 \text{ 且 } h / \cos\theta < r \\ A_V & \cos\theta < 0 \end{cases} \quad (C.2)$$

注量率的角分布为:

$$\varphi_{\cos\theta} = \frac{p}{2\mu_a'} A_V \cdot \begin{cases} 1 - \exp(-\mu_a' \cdot h / \cos\theta) & \cos\theta > 0 \\ 1 & \cos\theta < 0 \end{cases} \quad (C.3)$$

对天顶角进行积分, 得到注量率角分布为:

$$\varphi_{\cos\theta} = \frac{p \cdot A_V}{\mu_a'} \left[1 - \frac{1}{2} E_2(\mu_a' \cdot h) \right] \quad (C.4)$$

表 C.1 空气中均匀分布的放射性核素活度浓度 ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$)
在地表 1m 处产生的初级 γ 射线注量率($\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

能量 (keV)	放射性核 素	分支 比	线衰减系 数 (m^{-1})	$(\phi/A_v) /$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}$
14.8	Cm-248	0.058	0.1854	0.2
27.8	Te-129	0.156	0.0419	2.1
28.6	Xe-125	0.539	0.04	7.7
30.6	Xe-133	0.083	0.036	1.3
31	Xe-133	0.155	0.0354	2.5
32	Ba-137m	0.059	0.0338	1
74.8	Pb-212	0.104	0.0194	3
77.1	Pb-212	0.176	0.0193	5
81	Xe-133	0.371	0.019	10.6
99.6	Np-239	0.157	0.0179	4.7
103.8	Np-239	0.251	0.0177	7.7
106.1	Np-239	0.272	0.0177	8.3
122.1	Co-57	0.855	0.017	27.1
133	Hf-181	0.419	0.0166	13.6
136.5	Co-57	0.106	0.0165	3.5
140.5	Tc-99m	0.89	0.0164	29.2
143.8	U-235	0.11	0.0163	3.6
145.4	Ce-141	0.484	0.0161	16.1
148.9	Xe-123	0.49	0.016	16.4
149.7	Te-131	0.689	0.016	23.1
151.2	Kr-85m	0.755	0.016	25.3
172.1	Xe-127	0.255	0.0154	8.9
185.7	U-235	0.572	0.015	20.3
188.4	Xe-125	0.549	0.0149	19.7
202.5	Y-90m	0.958	0.0146	35.1
202.9	Xe-127	0.683	0.0146	25
205.3	U-235	0.05	0.0146	1.8
210.5	Te-134	0.223	0.0144	8.2
228.2	Np-239	0.113	0.0141	4.3
228.2	Te-132	0.882	0.0141	33.4
234.7	Nb-95m	0.261	0.014	10
238.6	Pb-212	0.434	0.0138	16.7
241.9	Pb-214	0.075	0.0138	2.9
243.4	Xe-125	0.288	0.0137	11.2
249.8	Xe-135	0.901	0.0136	35.2
258.3	Xe-138	0.315	0.0135	12.4
277.6	Np-239	0.144	0.0131	5.8
278	Te-134	0.209	0.0131	8.5
295.2	Pb-214	0.192	0.0129	7.9

能量 (keV)	放射性核 素	分支 比	线衰减系 数 (m^{-1})	$(\phi/A_v) /$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}$
304.9	Kr-85m	0.14	0.0128	5.8
312.1	Te-133	0.624	0.0126	26.4
340.5	Cs-136	0.422	0.0122	18.4
344.3	Eu-152	0.266	0.0122	11.6
345.9	Hf-181	0.12	0.0122	5.2
351.9	Pb-214	0.369	0.012	16.2
364.5	I-131	0.812	0.0119	36.1
375	Xe-127	0.172	0.0118	7.7
402.6	Kr-87	0.496	0.0114	22.9
407.6	Te-133	0.271	0.0114	12.6
414.5	Sb-126m	0.857	0.0113	40
414.8	Sb-126	0.833	0.0113	38.9
418	I-130	0.341	0.0113	16
427.9	Sb-125	0.294	0.0111	13.9
434.5	Xe-138	0.203	0.0111	9.7
435.1	Te-134	0.186	0.0111	8.9
452.3	Te-131	0.182	0.0109	8.8
459.6	Te-129	0.074	0.0108	3.6
461	Te-134	0.099	0.0108	4.8
462.8	Cs-138	0.307	0.0108	15
463.4	Sb-125	0.105	0.0108	5.1
469.4	Ru-105	0.175	0.0107	8.6
473	Sb-127	0.247	0.0107	12.2
477.6	Be-7	0.103	0.0107	5.1
479.5	W-187	0.253	0.0106	12.5
479.5	Y-90m	0.9	0.0106	44.5
482	Hf-181	0.83	0.0106	41.1
487	La-140	0.459	0.0106	22.8
497.1	Ru-103	0.889	0.0105	44.6
507.7	Zr-97	0.053	0.0104	2.7
511	Co-58	0.301	0.0104	15.3
511	Na-22	1.81	0.0104	91.8
511	Xe-123	0.45	0.0104	22.8
511.9	Rh-106	0.207	0.0104	10.5
514	Kr-85	0.004	0.0103	0.2
526.6	Xe-135m	0.812	0.0102	41.7
529.9	I-133	0.863	0.0102	44.4
536.1	I-130	0.99	0.0102	51.2
537.3	Ba-140	0.244	0.0101	12.6
544.7	Sb-129	0.179	0.0101	9.3
550.3	Pm-148	0.22	0.01	11.5

能量 (keV)	放射性核 素	分支 比	线衰减系 数 (m ⁻¹)	(ϕ/A_v) / m.s ⁻¹ .Bq ⁻¹
550.3	Pm-148m	0.944	0.01	49.4
551.5	W-187	0.059	0.01	3.1
555.6	Y-91m	0.949	0.01	49.8
569.3	Cs-134	0.15	0.0099	8
583.2	Tl-208	0.851	0.0098	45.6
590.3	Sr-93	0.328	0.0098	17.6
590.9	Mo-101	0.164	0.0097	8.8
600.6	Sb-125	0.178	0.0097	9.6
602.7	Sb-124	0.979	0.0097	53.2
604.6	Cs-134	0.975	0.0096	53
606.6	Sb-125	0.05	0.0096	2.7
609.3	Bi-214	0.469	0.0096	25.6
610.3	Ru-103	0.056	0.0096	3.1
618.4	W-187	0.073	0.0095	4
621.8	Rh-106	0.098	0.0095	5.4
630	Pm-148m	0.886	0.0095	49
635.9	Sb-125	0.113	0.0094	6.3
637	I-131	0.073	0.0094	4.1
641.3	La-142	0.474	0.0094	26.4
642.3	Sb-131	0.22	0.0094	12.3
647.5	Te-133m	0.194	0.0094	10.9
652.9	Sr-91	0.08	0.0093	4.5
657.7	Ag-110m	0.947	0.0093	53.4
657.9	Nb-97	0.983	0.0093	55.4
661.6	Ba-137m	0.899	0.0093	50.8
664.5	Ce-143	0.053	0.0093	3
666.1	Sb-126m	0.857	0.0092	48.5
666.3	Sb-126	0.997	0.0092	56.5
667.7	T-132	0.987	0.0092	56
668.5	I-130	0.961	0.0092	54.5
676.4	Ru-105	0.157	0.0092	8.9
685.7	Sb-127	0.353	0.0091	20.2
685.8	W-187	0.316	0.0091	18.1
694.8	Sb-126m	0.823	0.0091	47.4
695	Sb-126	0.997	0.0091	57.5
697	Sb-126	0.289	0.0091	16.7
710.4	Sr-93	0.213	0.009	12.4
719.7	Te-133	0.089	0.0089	5.2
720.5	Sb-126	0.538	0.0089	31.5
723.3	Eu-154	0.197	0.0089	11.6
724.2	Zr-95	0.444	0.0089	26.1

能量 (keV)	放射性核 素	分支 比	线衰减系 数 (m ⁻¹)	(ϕ/A_v) / m.s ⁻¹ .Bq ⁻¹
724.3	Ru-105	0.473	0.0089	27.8
725.7	Pm-148m	0.327	0.0089	19.2
727.2	Bi-212	0.068	0.0089	4
739.5	Mo-99	0.122	0.0088	7.2
739.5	I-130	0.823	0.0088	48.7
742.6	Te-134	0.151	0.0088	9
749.8	Sr-91	0.236	0.0088	14.1
756.7	Zr-95	0.549	0.0087	32.9
763.9	Ag-110m	0.224	0.0087	13.5
765.8	Nb-95	1	0.0087	60.2
767.2	Te-134	0.29	0.0087	17.5
772.6	I-132	0.762	0.0086	46
773.7	Te-131m	0.382	0.0086	23.1
778.9	Eu-152	0.13	0.0086	7.9
783.7	Sb-127	0.145	0.0086	8.8
793.8	Te-131m	0.139	0.0085	8.5
795.8	Cs-134	0.851	0.0085	52.1
810.8	Co-58	0.994	0.0085	61.4
811.8	Eu-156	0.103	0.0085	6.4
812.8	Sb-129	0.43	0.0084	26.6
815.8	La-140	0.236	0.0084	14.6
818.5	Cs-136	0.997	0.0084	61.8
834.8	Mn-54	1	0.0083	62.6
834.8	Kr-88	0.13	0.0083	8.1
845.4	Kr-87	0.073	0.0083	4.6
846.8	Mn-56	0.989	0.0083	62.3
846.8	Co-56	0.999	0.0083	62.9
847	I-134	0.954	0.0083	60.1
852.2	Te-131m	0.206	0.0083	13
856.7	Sb-126	0.176	0.0082	11.1
864	Te-133m	0.156	0.0082	9.9
873.2	Eu-154	0.115	0.0082	7.3
875.7	Sr-93	0.239	0.0082	15.3
881.6	Br-84	0.42	0.0081	26.9
884.1	I-134	0.649	0.0081	41.7
884.7	Ag-110m	0.729	0.0081	46.8
888.1	Sr-93	0.216	0.0081	13.9
889.3	Sc-46	1	0.0081	64.4
898	Rb-88	0.14	0.0081	9.1
911.3	Ac-228	0.29	0.008	19
912.7	Te-133m	0.55	0.008	35.8

能量 (keV)	放射性核 素	分支 比	线衰减系 数 (m ⁻¹)	(ϕ/A_v) / m.s ⁻¹ .Bq ⁻¹
914.6	Sb-129	0.2	0.008	13.1
914.8	Te-133m	0.109	0.008	7.1
914.8	Pm-148	0.115	0.008	7.5
915.3	Pm-148m	0.171	0.008	11.2
933.1	Sb-131	0.246	0.0079	16.2
937.5	Ag-110m	0.343	0.0079	22.7
943.4	Sb-131	0.44	0.0079	29.1
954.5	I-132	0.181	0.0078	12.1
964.1	Eu-152	0.145	0.0078	9.7
964.8	Ac-228	0.055	0.0078	3.7
966.4	Sb-129	0.077	0.0078	5.2
969.2	Ac-228	0.175	0.0078	11.7
984.5	Np-238	0.278	0.0077	18.8
996.3	Eu-154	0.103	0.0077	7
1004.8	Eu-154	0.174	0.0076	11.9
1009.8	Cs-138	0.298	0.0076	20.4
1012.5	Mo-101	0.128	0.0076	8.8
1013.8	Pm-148m	0.202	0.0076	13.8
1024.3	Sr-91	0.334	0.0076	23
1025.9	Np-238	0.096	0.0076	6.6
1028.5	Np-238	0.203	0.0075	14
1030.1	Sb-129	0.126	0.0075	8.7
1031.9	Rb-89	0.58	0.0075	40
1038.8	I-135	0.08	0.0075	5.5
1048.1	Cs-136	0.798	0.0075	55.5
1072.6	I-134	0.15	0.0074	10.5
1085.9	Eu-152	0.099	0.0073	7
1099.2	Fe-59	0.565	0.0073	40.2
1112.1	Eu-152	0.136	0.0073	9.7
1115.5	Ni-65	0.148	0.0072	10.6
1115.5	Zn-65	0.507	0.0072	36.3
1120.3	Bi-214	0.155	0.0072	11.1
1120.5	Sc-46	1	0.0072	71.8
1121.3	Ta-182	0.349	0.0072	25.1
1123.6	Sb-131	0.083	0.0072	6
1125.5	Te-131m	0.114	0.0072	8.2
1131.5	I-135	0.228	0.0072	16.4
1153.5	Eu-156	0.071	0.0071	5.2
1157.5	I-130	0.113	0.0071	8.2
1173.2	Co-60	0.999	0.0071	73.4
1189	Ta-182	0.164	0.007	12.1

能量 (keV)	放射性核 素	分支 比	线衰减系 数 (m ⁻¹)	(ϕ/A_v) / m.s ⁻¹ .Bq ⁻¹
1206.6	Te-131m	0.098	0.007	7.3
1221.4	Ta-182	0.273	0.0069	20.5
1230.7	Eu-156	0.089	0.0069	6.7
1231	Ta-182	0.116	0.0069	8.7
1235.4	Cs-136	0.2	0.0069	15.1
1238.3	Co-60	0.67	0.0069	50.5
1242.4	Eu-156	0.067	0.0069	5.1
1248.1	Rb-89	0.423	0.0069	32
1260.4	I-135	0.289	0.0068	22
1274.4	Eu-154	0.355	0.0068	27.1
1274.5	Na-22	0.999	0.0068	76.4
1291.6	Fe-59	0.432	0.0067	33.3
1332.5	Co-60	1	0.0066	78.2
1333.2	Te-133	0.107	0.0066	8.4
1368.6	Na-24	1	0.0065	79.3
1383.9	Sr-92	0.9	0.0065	71.8
1384.3	Ag-110m	0.243	0.0065	19.4
1408	Eu-152	0.209	0.0064	16.8
1435.9	Cs-138	0.763	0.0064	62
1457.6	I-135	0.087	0.0063	7.1
1460.8	K-40	0.107	0.0063	8.8
1465.1	Pm-148	0.222	0.0063	18.2
1481.8	Ni-65	0.235	0.0063	19.4
1505	Ag-110m	0.131	0.0062	10.9
1529.8	Kr-88	0.109	0.0062	9.1
1532.5	Mo-101	0.06	0.0062	5
1596.2	La-140	0.954	0.006	81.7
1678	I-135	0.096	0.0059	8.4
1691	Sb-124	0.488	0.0059	43.1
1736.5	Sb-129	0.06	0.0058	5.4
1764.5	Bi-214	0.162	0.0057	14.6
1768.3	Xe-138	0.167	0.0057	15.1
1771.4	Co-56	0.155	0.0057	14
1791.2	I-135	0.078	0.0057	7.1
1810.7	Mn-56	0.272	0.0056	24.8
1836	Rb-88	0.214	0.0056	19.7
1897.6	Br-84	0.147	0.0055	13.8
1901.3	La-142	0.072	0.0055	6.7
2004.8	Xe-138	0.054	0.0053	5.2
2015.8	Xe-138	0.123	0.0053	11.9
2032.1	Mo-101	0.069	0.0053	6.7

能量 (keV)	放射性核 素	分支 比	线衰减系 数 (m ⁻¹)	(ϕ/A_v) / m.s ⁻¹ .Bq ⁻¹
2091	Sb-124	0.056	0.0052	5.5
2113	Mn-56	0.143	0.0052	14.2
2195.8	Kr-88	0.132	0.0051	13.4
2195.9	Rb-89	0.133	0.0051	13.5
2204.1	Bi-214	0.052	0.0051	5.3
2218	Cs-138	0.152	0.0051	15.5
2392.1	Kr-88	0.346	0.0049	36.6
2397.8	La-142	0.133	0.0049	14.1
2484.1	Br-84	0.067	0.0048	7.2
2542.7	La-142	0.1	0.0047	10.9

能量 (keV)	放射性核 素	分支 比	线衰减系 数 (m ⁻¹)	(ϕ/A_v) / m.s ⁻¹ .Bq ⁻¹
2554.8	Kr-87	0.092	0.0047	10.1
2570.2	Rb-89	0.099	0.0047	10.9
2598.6	Co-56	0.167	0.0046	18.5
2614.5	Ti-208	0.999	0.0046	110.7
2639.6	Cs-138	0.076	0.0046	8.5
2754	Na-24	0.999	0.0045	113.5
3253.5	Co-56	0.074	0.0041	9.2
3927.5	Br-84	0.068	0.0037	9.3

附录 D
(规范性附录)
蒙特卡洛模拟技术规范

蒙特卡洛方法能够准确地模拟粒子在物质中的输运过程，在处理复杂几何条件具有很大的优势。本附录提供了蒙特卡洛模拟计算 HPGe 探测器的有效前面积和角响应的技术规范。

蒙特卡洛模拟计算的准确度取决于仿真计算模型与实际情况的一致性。因此，在构建几何模型前，用户需要获取探测器的准确材料组成和几何尺寸。一般情况下，用户虽然无法获得确切的探测器组件材料和几何尺寸，但能够根据所有已知的探测器组件信息和实验测量数据，构建一个合适的几何模型。

D.1 HPGe 探测器建模的准确度评估

以下步骤过程用于验证 HPGe 探测器建模的准确度。

D.1.1 实验测量

(1) 仪器与设备

- 1) HPGe 谱仪：见 5.1.1 所述的 HPGe 谱仪。
- 2) 标准 γ 点源：实验所用的标准 γ 点源都应可溯源至国家基准。标准点源的特征 γ 射线应至少涵盖低能、中能和高能区间，一般推荐使用 ^{241}Am 和 ^{152}Eu 标准点源。
- 3) 支架：用于将放射源固定在固定位置的支架。该支架可在 0° 、 45° 和 90° 的方位角上固定，而且放射源与探测器之间的距离可准确获得。

(2) 实验测量

- 1) 将标准 γ 点源固定在 HPGe 探测器的支架上，分别在 0° 、 45° 和 90° 的方位角位置测量 γ 能谱。当感兴趣区全能吸收峰净计数的超过 10 000 时，停止测量(即计数统计涨落小于 1%)。
- 2) 在 90° 的方位角位置，与第一次测量位置相差 120° 和 240° 的极角的情况下，各重复测量下测量 γ 能谱一次。
- 3) 比较三次方位角 90° 的测量值。如果有任何一个测量值大于平均值的 5%，就应计算该探测器的径向偏移量，或者拒绝使用该探测器。若计算探测器的径向偏移量，则在后续的计算和测量中都应用偏移量的数值。
- 4) 解谱分析标准源 γ 射线的特征峰探测效率。

D.1.2 蒙特卡洛建模

- 1) 根据仪器制造商或其它方式获取的 HPGe 探测器几何结构和材料信息，构建蒙特卡洛计算模拟模型，确保 HPGe 晶体、探测器外壳、冷指孔、死层和其它外壳内的组件都得到恰当的建模；

注：除厂家提供尺寸外，还可以通过 X 射线透射成像、电子计算机断层扫描(CT)或 γ 射线透射成像等。

2) 根据实验测量的几何条件, 建立放射源、探测器、空气、支架及其它影响探测器效率的组建模型。

3) 利用蒙特卡洛模型程序计算标准点源各特征峰的全能吸收峰探测效率。尽量增加计算的粒子数或多次运行计算, 保证能量点的标准偏差小于 1%。

4) 比较测量和模拟中得到的探测效率, 调整探测器的相关参数。保证最终模拟计算结果, 每个能量在各位置的相对偏差都在 5% 以内。

结合实验测量结果, 得到最终的 HPGe 探测器模型。

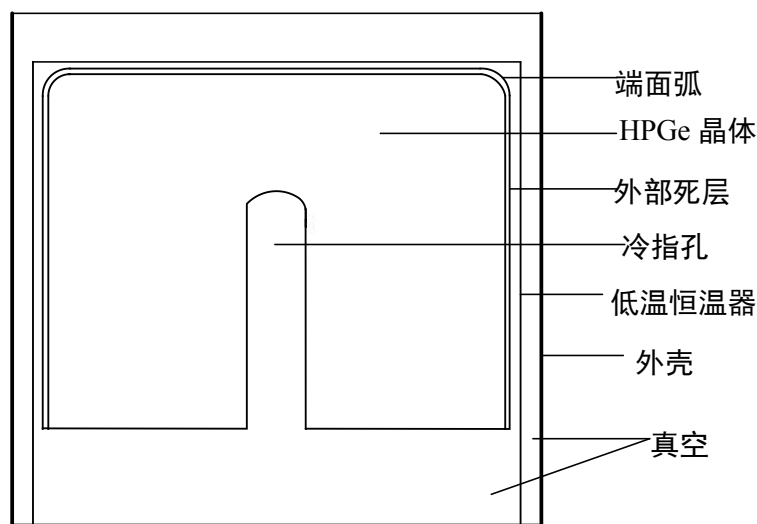


图 D.1 典型同轴 HPGe 结构示意图

D.2 蒙卡模拟计算有效前面积

下面的步骤用于计算 HPGe 探测器的有效前面积。只有经过 D.1 的步骤检验后, 下面的步骤才能够进行。

1) 建立平面源模型: 源平面与探测器的端面相平行; 平面源的形状和面积与探测器相同; 平面源位于探测器端面正前方; γ 射线是平行光束, 入射至 HPGe 探测器端面。

2) 计算不同能量的 γ 射线探测效率, 能量范围涵盖低能、中能、高能区间。

3) 根据计算的探测效率与 HPGe 探测器的灵敏面积相乘, 计算得到 HPGe 探测器的有效前面积。

D.3 蒙卡模拟计算角响应函数

下面的步骤用于计算 HPGe 探测器的角响应函数。只有经过 D.1 的步骤检验后, 下面的步骤才能够进行。

1) 建立平面源模型: 平面源在探测器端面前方, 距灵敏体积的距离大于 $\sqrt{r^2 + h^2}$; 平面源所在平面的法向量与探测器端面法向量呈 θ 度角 (θ 角在 $180^\circ \sim 90^\circ$ 之间); γ 射线是平行光束, 从平面源平行入射至 HPGe 探测器; 平面源在任意 θ 角位置探测器晶体上的投影应大于探测器的面积。

- 2) 计算不同能量的 γ 射线探测效率, 能量范围涵盖低能、中能、高能区间。
- 3) 根据计算的探测效率与平面源的面积, 得到 HPGe 探测器在 θ 角时平行 γ 射线单位注量率下的计数率 $(N_f)_\theta$ 。
- 4) 依次改变平面源所在平面的法向量与探测器端面法向量的角度, 在 $180^\circ \sim 90^\circ$ 之间角度间隔不大于 10° , 重新计算注量率 $(N_f)_\theta$;
- 5) 根据计算得到的注量率 $(N_f)_\theta$, 计算不同能量在各个角度注量率与 180° 角之比, 得到 $(N_f)_\theta / (N_f)_{180^\circ}$ 。