

地形对就地 γ 谱仪技术注量活度比测量影响的模拟研究

潘 妙, 吴 英

华北电力大学, 北京

收稿日期: 2022年5月9日; 录用日期: 2022年5月23日; 发布日期: 2022年7月18日

摘 要

本文简要比较了几种不同地形对就地 γ 谱仪中注量活度比测量的影响, 分析其可近似使用Beck公式直接计算的条件。通过几何平移变换、源偏倚抽样、简化模型等方法提高蒙特卡洛模拟效率以获得山包、冲沟和粗糙表面等不同土壤模型下的注量活度比数值, 比较其与理论注量活度比的偏差。结果表明, 当放射性核素衰变光子能量在0.354 MeV到2.614 MeV范围内, 且山包和冲沟的坡角小于 5° , 粗糙表面模型面源粗糙度小于0.5 cm, 体源粗糙度小于10 cm时, 都可以忽略地形对就地 γ 谱仪注量活度比测量的影响, 直接使用Beck公式进行简便计算。

关键词

就地 γ 谱仪, 注量活度比, Beck公式, Geant4

Simulation Research on the Influence of landform on the Measurement of Fluence Activity Ratio in *in-Situ* γ -Ray Spectrometer

Miao Pan, Ying Wu

North China Electric Power University, Beijing

Received: May 9th, 2022; accepted: May 23rd, 2022; published: Jul. 18th, 2022

Abstract

This paper briefly compared the influence of landforms on the fluence activity ratio of *in-situ* γ -ray

spectrometer, and analyzes the conditions in which the fluence activity ratio can be approximated by Beck's formula. This paper uses some variance reduction methods to improve the efficiency of Monte Carlo simulation, including geometric transformation method, source bias sampling method and simplified model method. Then it compares the simulated fluence activity ratios of different landforms such as mountain, gully and rough-surface ground with the theoretical values given by Beck's formula. The result shows that when the energy of decay photon is in the range of 0.354 MeV to 2.614 MeV, the following cases can ignore the influence of landforms on the fluence activity ratio and use Beck's formula to calculate the value directly: the slope angle of mountain and gully is less than 5° ; the roughness is less than 0.5 cm under surface source distribution in rough-surface flat ground model; the roughness is less than 10 cm under volume source distribution in rough-surface flat ground model.

Keywords

In-Situ γ -Ray Spectrometer, Fluence Activity Ratio, Beck's Formula, Geant4

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

就地 γ 谱仪测量技术可以快速识别放射性核素并探测环境 γ 辐射剂量水平及其变化, 适用于地面或空气中放射水平的确定、核设施及其附近放射性污染的测量以及地质勘探中的辐射检测。Beck 等人[1]使用公式计算就地探测效率, 可以直接将某 γ 射线的计数率换算为土壤中某放射性核素的活度值。该公式基于 2π 半无限土壤空间的简化模型, 计算放射性核素在其中的辐射场参数, 将探测效率简化为有效前面积、角度修正因子和注量活度比的乘积[2] [3]。

近年来, 围绕 Beck 公式开发有系列的模拟计算软件以获得就地 γ 谱仪测量方法的探测效率。其中, 有效前面积仅与探测器相关, 通过对 HPGe 探测器的晶体、内外死层、端面弧、冷指孔等结构进行精准的建模, 由蒙特卡模拟获得可靠的有效前面积数值。角度修正因子可表示为注量率角分布和相对角响应因子关于角度的积分, 前者由 2π 半无限土壤假设理论计算给出, 后者可用蒙特卡方法模拟 γ 射线各入射角度下的相对探测效率。

对于注量活度比, Beck 等人给出 2π 半无限体积、放射性核素随深度分布不同的土壤源中单位质量活度或单位表面活度放射性核素的光子注量率公式。本课题组此前[4]基于此公式, 推导得到有限体积假设下的光子注量率计算方法, 编写相应 MATLAB 计算程序, 输入放射源半径、探测面高度等参数即可得到光子注量率。并与几何平移变换方法所得有限体积假设下的光子注量率蒙特卡洛模拟数值相互对比验证, 证明了该工作的合理性, 提高了软件的模拟效率。

然而, Beck 公式的 2π 半无限土壤假设在就地 γ 谱仪技术的实际应用中是难以实现的, 用 Beck 公式处理各种相对复杂地形时可能会带来一定偏差。成智威等人[5]分析了台阶、冲沟和山包地形对车载就地 HPGe γ 谱仪测量结果的影响。J. P. Laedermann 等人[6]用符合余弦函数的土壤表面模型来描述土壤表面粗糙情况, 并基于此模型探讨了探测器视域改变的问题。本文比较了不同地形在不同放射性核素分布下对注量活度比测量的影响, 并给出可近似使用 Beck 公式的相应条件, 扩展其适用范围, 使就地 γ 谱仪技术在实际应用中更为简便。

2. 模拟计算方法

在实际的就地 γ 谱仪测量中, 山包、冲沟、粗糙表面等多种土壤模型并不满足 Beck 公式的平面假设; 由于复杂模型一般难以通过理论计算获得注量率数值, 且大待测源小探测器模型通过蒙特卡洛模拟得到统计性数据所需计算时间较长, 故需要对模型进行简化或者使用某些变换方法来减小模拟数据的方差。山包和冲沟这类满足一定对称条件的模型可使用几何平移变换方法模拟, 粗糙表面模型可通过简化模型进行模拟, 源偏倚抽样可适用于上述所有模型的模拟。

2.1. 几何平移变换方法

对于某些满足一定对称条件且介质均匀的模型, 文献[7]提出可使用几何平移变换方法来提高该类小探测器探测大待测源问题的模拟效率。其原理在于从土壤模型中轴线源到探测器所在水平面上的任意 γ 射线的通量与从整个土壤源到探测器的 γ 射线通量是完全对称且等价的, 故可在不引入偏差的情况下将均匀介质中的体源对点探测器的辐射过程转换为线源对面探测器的过程。本文将几何平移变换方法从原来的圆柱形土壤模型推广到倒三角形冲沟和圆锥形山包土壤模型上, 其中山包原始模型和几何变换后的模型如图 1 所示, 可以看到对于截面轮廓为线性的模型, 几何变换方法仍然适用。但是更为复杂的模型如半球形模型, 几何平移变换方法将失效; 如图 2 所示, 对于不同深度的源其变换后所对应的土壤表面并不重合, 即并不存在满足几何变换的唯一土壤实体模型。

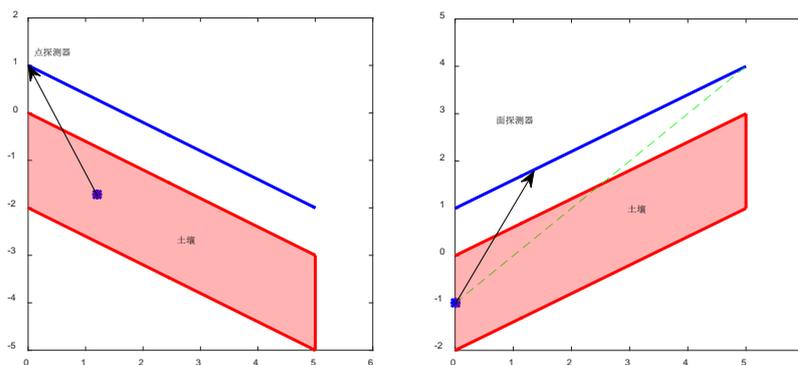


Figure 1. Schematic diagram of geometric transformation method for conical model
图 1. 圆锥形模型几何平移变换方法原理图

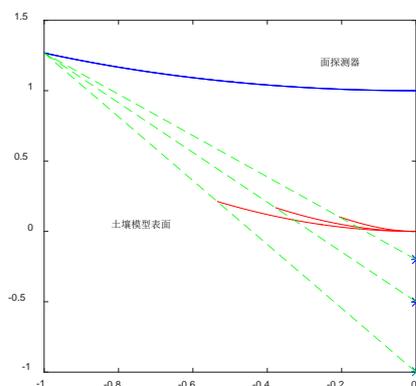


Figure 2. Schematic diagram of geometric transformation method failing to deal with hemispherical model
图 2. 半球形模型的几何变换处理失效示意图

2.2. 源偏倚抽样方法

除几何平移变换方法外, 可以使用源偏倚抽样[2]等减方差方法以提高蒙特卡洛模拟效率, 该方法通过设置放射源沿包含探测器在内的小方位角方向出射以实现源的偏倚抽样。图 3 为源偏倚抽样方法的示意图, 其中 R 为出射源点到探测面中心的距离, r 为探测面半径; 由图显见 $\theta_2 < \theta_1 < \arctan(r/R) = \theta$, 出于简化模拟的考虑, 故设置 θ 为出射圆锥张角, 此时通过探测面的 γ 光子模拟注量率 φ_{bias} 由公式(1)给出

$$\varphi_{bias} = P \cdot \sum \varphi_i / N = ((1 - \cos \theta) / 2) \cdot \sum (1 / \cos \theta_i) / N \quad (1)$$

其中 P 为 γ 光子由指定方位角出射的概率, θ 为出射圆锥的张角, φ_i 为单个 γ 光子穿过探测面的注量计数, θ_i 为该 γ 光子穿过探测面时其运动方向与探测面法线的夹角, N 为 γ 光子出射总计数。当光子方向与探测面法向近乎垂直时, 即光子略过探测面所在平面时, 注量计数 $1/\cos\theta_i$ 取值趋于无穷, 导致模拟注量率过度依赖某几次模拟结果, 故当 $\cos\theta_i < 0.1$ 时, 取其值为 0.05 [8]。

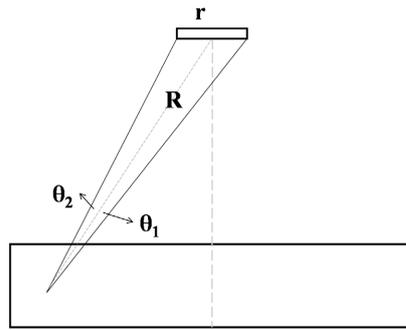


Figure 3. Diagram of source bias sampling method
图 3. 源偏倚抽样示意图

2.3. 简化模型

使用源偏倚抽样方法来模拟粗糙表面模型的注量率时, 其模拟模型如图 4 所示, 土壤粗糙程度由圆柱形土壤模型表面阵列排布的正四棱锥来表示。这种粗糙模型具有一定的局限性, 并不能完全描述粗糙表面土壤的特性; 通常自然界的粗糙表面由高斯函数或者幂函数所生成的模型来表示[9], 然而上述粗糙表面模型难以导入蒙特卡洛模拟软件, 故需要对模型进行一定的简化。若粗糙表面的粗糙尺度为 d , 即其表面高度在 $(-d/2, d/2)$ 间均匀分布, 将土壤中任意点至测量点经过粗糙表面区域的径迹 L 均分为 n 个区间如图 5 所示, 第 k 个区间内 γ 射线径迹所穿过的材质是土壤和空气的概率分别为 k/n 和 $1 - k/n$, 第 k 区间 γ 射线衰减程度如式(2)所示, 整个粗糙表面区域内 γ 射线的衰减如式(3)所示。由于空气的质量衰减系数和质量密度远小于土壤, 故可将整个粗糙表面区域内的 γ 射线衰减视为由厚度为 d 、密度 $\rho/2$ 的均匀土壤实体造成的, 再使用几何平移变换对新模型进行模拟。

$$P_k = \exp\left(-\mu_s \rho_s \frac{L k}{n n}\right) \cdot \exp\left(-\mu_a \rho_a \frac{L}{n} \left(1 - \frac{k}{n}\right)\right) \quad (2)$$

$$P = \prod_{k=1}^n \exp\left(-\mu_s \rho_s \frac{L k}{n n}\right) \cdot \exp\left(-\mu_a \rho_a \frac{L}{n} \left(1 - \frac{k}{n}\right)\right) \quad (3)$$

$$= \exp\left(\frac{-\mu_s \rho_s L}{2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-\mu_a \rho_a L}{2}\right)$$

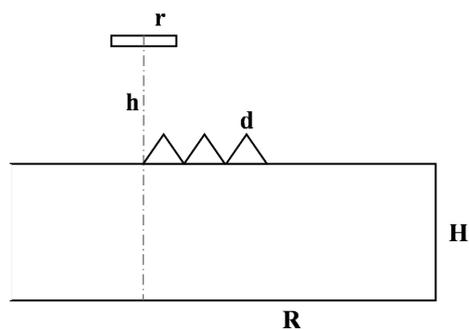


Figure 4. Diagram of rough-surface flat ground model

图 4. 粗糙表面模型建模示意图

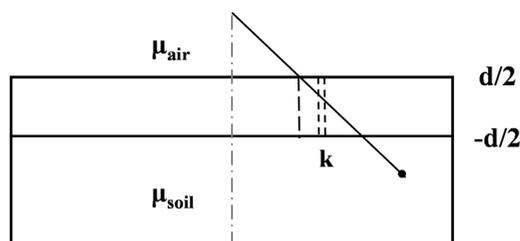


Figure 5. Diagram of rough-surface flat ground model in simplified method

图 5. 粗糙表面简化模型原理图

3. 模拟与结果分析

Beck 等人将就地 γ 能谱测量中放射性核素在土壤中的分布分为均匀体分布、随深度的指数分布和均匀面分布三种类型, 并用注量活度比 φ/A 来描述土壤组分、密度和放射性核素分布等因素对初级 γ 光子注量率测量的影响, 体源和面源的注量活度比 F_V 和 F_S 如式(4)(5)所示

$$F_V = \varphi/A_V = \varphi_{MC} \pi R^2 \rho H \quad (4)$$

$$F_S = \varphi/A_S = \varphi_{MC} \pi R^2 \quad (5)$$

其中 φ 为光子注量率($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), A_V , A_S 为体源和面源的放射性活度, φ_{MC} 为蒙特卡罗软件模拟所得的单位源活度下的注量率数值(cm^{-2}), R , H , ρ 为土壤模型的半径、厚度和密度。

由文献[4]得, 当土壤厚度为 60 cm, 均匀体分布、指数分布和均匀面分布下土壤半径分别取 2000 cm, 5000 cm 和 20000 cm 时, 有限大土壤模型模拟注量率为无限大模型理论值的 95%, 故可用有限大土壤模型近似代替无限大土壤模型。图 6 为面源分布时表面粗糙模型下模拟注量活度比与模拟半径的关系, 不同粗糙度下, 当模拟半径大于 6000 cm 时, 模拟注量活度比的数值都基本不再变化; 由于地形变化对土壤放射性核素为面源分布时注量活度比测量值影响最大, 当面源分布下注量活度比趋于稳定, 其他分布下亦趋于稳定, 故对所有土壤模型取模拟半径 $R = 10000 \text{ cm}$ 。

使用几何平移变换方法对不同坡度的山包和冲沟地形放射性核素分布为均匀体分布下的注量活度比进行蒙特卡罗模拟, 其与 Beck 公式注量活度比理论计算值的相对偏差如表 1 和表 2 所示, 随着坡度增大, 注量活度比越偏离理论值, 对坡度 5° 以上的情况, 比值偏差超过 30%, 不应直接使用 Beck 公式进行计算。

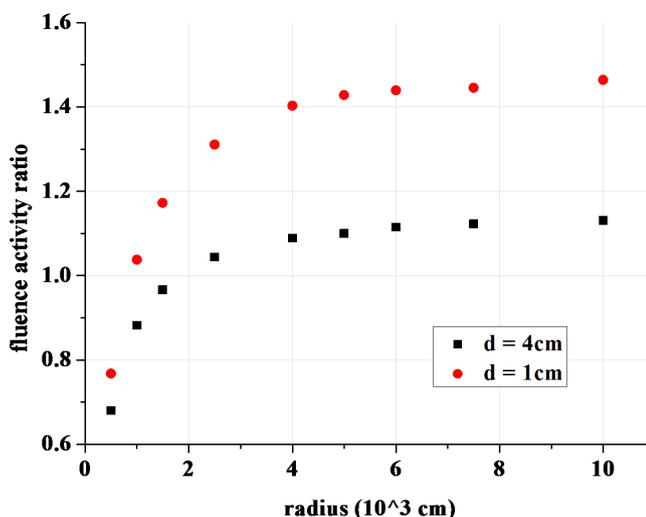


Figure 6. The relationship between fluence activity ratio and radius
图 6. 注量活度比与模型半径关系图

Table 1. The relative deviation between the simulated and theoretical fluence activity ratio in mountain model
表 1. 山包模拟注量活度比与理论值的相对偏差

能量/MeV	坡度/°			
	5	10	20	30
0.352	-0.137	-0.312	-0.555	-0.711
0.583	-0.235	-0.39	-0.604	-0.747
0.662	-0.258	-0.411	-0.618	-0.755
1.1203	-0.251	-0.407	-0.617	-0.752
1.7645	-0.249	-0.406	-0.615	-0.752
2.6145	-0.254	-0.413	-0.62	-0.754

Table 2. The relative deviation between the simulated and theoretical fluence activity ratio in gully model
表 2. 冲沟模拟注量活度比与理论值的相对偏差

能量/MeV	坡度/°			
	5	10	20	30
0.352	0.481	0.835	1.883	3.124
0.583	0.331	0.688	1.567	2.635
0.662	0.285	0.652	1.49	2.518
1.1203	0.299	0.651	1.464	2.484
1.7645	0.297	0.675	1.475	2.49
2.6145	0.294	0.671	1.443	2.448

用源偏倚抽样方法和简化模型方法分别对粗糙表面土壤模型进行模拟，粗糙表面面源和体源的模拟

注量活度比与理论值的相对偏差如表 3 所示。由于源偏倚抽样仅对正四棱锥阵列模型进行模拟, 而简化方法改变了模拟模型, 故表中相同条件下模拟所得注量活度比相对偏差值有所差异但相差较小, 将这两种减方差方法均视为有效模拟手段。由模拟结果可得: 对于体源而言, 表面粗糙度对注量率测量的影响不大, 粗糙尺度在 10 cm 以内时, 可用理论注量活度比代替实际值代入 Beck 公式进行计算。而面源在粗糙尺度为 0.1 cm 时, 其模拟注量活度比与理论值的偏差仍然超过 10%; 实际上由于测量环境通常难以满足理想面源条件, 故如文献[3]所言, 采用张弛深度较小的非均匀体源模型来代替理想面源模型, 其推荐质量张弛深度为 0.3 g/cm², 此时若粗糙尺寸在 0.5 cm 以内, 仍可用 Beck 公式进行计算。

Table 3. The relative deviation between the simulated and theoretical fluence activity ratio in rough-surface model

表 3. 粗糙表面模型模拟注量活度比与理论值的相对偏差

能量/MeV	源偏倚抽样方法		简化模型方法	
	体源 d = 10 cm	面源 d = 0.1 cm	体源 d = 10 cm	面源 d = 0.1 cm
0.352	-0.028	-0.147	0.172	-0.086
0.583	-0.038	-0.107	0.038	-0.102
0.662	-0.05	-0.131	0.005	-0.105
1.1203	-0.05	-0.138	0.016	-0.094
1.7645	-0.047	-0.141	0.015	-0.084
2.6145	-0.038	-0.144	0.012	-0.076

对于放射性核素呈指数分布的非均匀体源, 由参数张弛深度描述其分布特征, 该参数为土壤中放射性活度为土壤表面放射性活度半值时的土壤深度。指数分布下粗糙表面模型可近似使用 Beck 公式的条件如图 7 粗糙尺寸—张弛深度曲线所示, 张弛深度越小, 则放射性核素趋于面源分布, 对表面粗糙度越敏感, 反之则趋于体源分布, 对表面粗糙度不敏感。

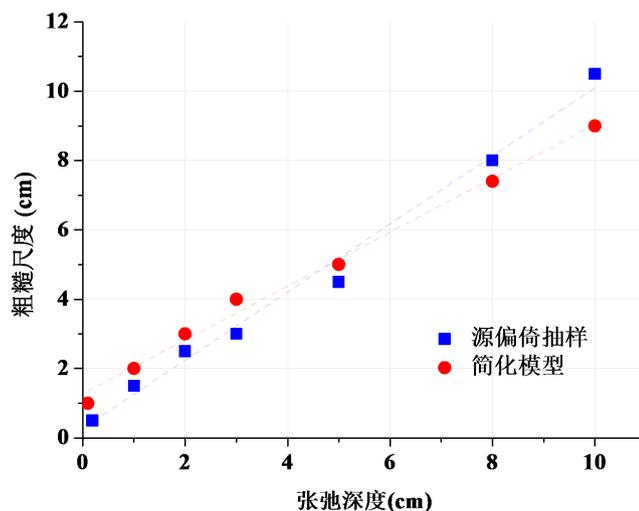


Figure 7. The rough surface inhomogeneous source can be approximated by the Beck formula

图 7. 粗糙表面指数分布源近似使用 Beck 公式条件图

4. 结论

通过几何平移变换方法、源偏倚抽样方法和简化模型方法可高效地使用蒙特卡洛模拟获得山包、冲沟、粗糙表面地形下注量活度比的模拟数值。通过对比注量活度比模拟数值和 Beck 公式理论计算数值, 得到可以使用理论值进行就地 γ 谱仪近似计算的地形和放射性核素分布条件, 扩展了就地 γ 谱仪 Beck 理论公式的适用范围。本研究着重于分析垂直方向上不均匀的地形和放射性核素分布的理论近似条件, 后续可使用源偏倚抽样方法分析水平方向不均匀性带来的影响, 进一步扩大方法的适用范围。

参考文献

- [1] Beck, H.L., DeCampo, J. and Gogolak, C. (1972) *In Situ Ge(Li) And Na(Tl) Gamma-Ray Spectrometry*. United States Atomic Energy Commission, New York.
- [2] 肖雪夫. 就地 HPG γ 谱仪校准系数的蒙特卡罗计算[J]. 辐射防护, 1999, 19(1): 43-57.
- [3] 生态环境部核与辐射安全中心. HJ 1129-2020 就地高纯锗谱仪测量土壤中 γ 核素技术规范[S]. 北京: 中国环境出版集团有限公司, 2020.
- [4] 夏先国. 基于蒙卡模拟的就地 γ 谱仪快速刻度方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [5] 成智威, 苏川英, 马怀成, 尹国辉, 苏旭军. 地形对车载就地 HPG γ 谱仪测量结果的影响[J]. 辐射防护, 2005, 25(1): 40-44+55.
- [6] Laedermann, J.P., Byrde, F. and Murith, C. (1998) *In-Situ Gamma-Ray Spectrometry: The Influence of Topography on the Accuracy of Activity Determination*. *Journal of Environmental Radioactivity*, **38**, 1-16.
[https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(97\)00025-8](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(97)00025-8)
- [7] 赵军, 朱金辉, 牛胜利. 蒙特卡罗研究中的一种几何变换方法[C]//全国蒙特卡罗学术交流会. 西安: 陕西科学技术出版社, 2004.
- [8] X-5 Monte Carlo Team (2003) MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Los Alamos National Laboratory, California, 76-83.
- [9] 逯贵祯, 程春悦. 一维随机粗糙表面的生成方法及其随机表面性质的研究[J]. 北京广播学院学报(自然科学版), 2001(1): 18-21.