

天然辐射场 γ 射线谱分布的MC模拟研究

朱松林, 樊新胜, 刘雅因, 张凡颖, 赵小刚

成都理工大学, 四川 成都

收稿日期: 2022年6月13日; 录用日期: 2022年7月6日; 发布日期: 2022年7月13日

摘要

天然辐射 γ 的测量一直是野外测量的一个重要问题。本文采用MCNP软件模拟了天然地-空界面不同矿质组分下的 γ 射线谱以及NaI探测器置于不同高度所得的谱线。通过对比和分析, 得到距离对天然 γ 能谱的影响以及不同矿层能谱的差异。所得到的模拟结果较好地反映了理论上 γ 能谱的分布规律, 为自然辐射场中 γ 射线谱的分布情况提供了可靠的解释依据, 并给天然环境辐射水平的监测和评价提供了参考方法, 从而为野外测量等提供一些指导。

关键词

天然辐射场, MCNP5, NaI(Tl)晶体

MC Simulation Study of γ -Ray Spectral Distribution in Natural Radiation Field

Songlin Zhu, Xincheng Fan, Yanan Liu, Fanying Zhang, Xiaogang Zhao

Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan

Received: Jun. 13th, 2022; accepted: Jul. 6th, 2022; published: Jul. 13th, 2022

Abstract

The measurement of natural radiation γ has always been an important issue for field measurement. In this paper, MCNP software is used to simulate the γ -ray spectra under different mineral components at the natural ground-air interface and the spectral lines obtained by placing the NaI detector at different heights. Through comparison and analysis, the influence of distance on natural γ energy spectrum and the difference of energy spectrum of different mineral layers are obtained. The obtained simulation results better reflect the theoretical distribution of γ energy spectrum, provide a reliable explanation basis for the distribution of γ -ray spectrum in the natural radiation field, and provide a reference for the monitoring and evaluation of the natural environmental radiation level Method, so as to provide some guidance for field surveys.

Keywords

Natural Radiation Field, MCNP5, NaI(Tl) Crystal

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. 前言

野外 γ 能谱测量是环境就地放射性测量的一种重要手段,天然放射性环境中主要是土壤里面的 ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U 和 ^{40}K 等天然放射性核素,对这些放射性核素的含量和它们分布规律的测量是研究天然环境里面辐射水平的一个重要内容。针对自然条件下天然 γ 辐射场的主要来源,我们一般选择 NaI 探测器来进行测量。但是天然 γ 辐射能谱的影响因素很多[1],如不同环境矿层中 γ 能谱的差异以及测量高度对于能谱的影响。测量高度的不同,探测体积也会有差距,如何选择测量距离十分重要,比如将探测器置于距离地面合适的高度下,就可以增大晶体能测量到的面积(或者探测体积),以此减少不同地形变化对 γ 能谱测量结果的影响。相应的,在不同的距离下, γ 射线经过空气的吸收程度也会不同,导致最后所得到的 γ 能谱也会发生一些变化,进而导致土壤里面的放射性核素活度所测得结果的准确性受到影响。且不同高度空气对 γ 射线的吸收效果不相同,从而影响能谱成份[2]。针对天然地层、钾矿层、钍矿层、铀矿层和混合矿层等 5 种矿层,以及铀系、钍系和钾系这三个放射性衰变系发射的 γ 射线进行 MCNP 模拟。研究不同矿质的天然 γ 射线的探测器沉积谱,从而为矿产资源勘测提供理论依据,为野外测量等提供一些指导。

2. 理论基础

在自然界中,天然 γ 射线广泛存在,主要是由宇宙射线以及地球本身所含的放射性核素进行一系列衰变后所产生的 γ 射线。其中主要是由铀系、钍系两个放射性系列中的核素以及 ^{40}K 核素产生的 γ 射线。对于 γ 射线与物质的相互作用,主要分为光电效应、康普顿效应和电子对效应。这三种主要过程发生的概率与光子能量 E_γ 、吸收物质的原子序数 Z 有关。一般来说, γ 光子与物质发生相互作用的总截面为:

$$\sigma = \sigma_{ph} + \sigma_c + \sigma_p \quad [3] \quad (1)$$

σ_{ph} 代表光电效应的截面, σ_c 代表康普顿效应的截面, σ_p 代表电子对效应的截面。截面与 γ 射线能量 (E)和吸收物质的原子序数 Z 关系如下[4]:

$$\sigma_{ph} \propto Z^5 / E_\gamma^2 \quad (2)$$

$$\sigma_c \propto Z / E_\gamma \quad (3)$$

$$\sigma_p \propto Z^2 \ln 2E_\gamma \quad (4)$$

从式(2)、(3)、(4)可以看出,三种效应的截面都与 γ 射线能量 E_γ 以及吸收物质的原子序数 Z 有关系。对于不同矿层所发射出的 γ 射线会有不同,利用 MCNP 模拟分别得到不同地层环境的 γ 射线在 NaI 探测器中的沉积谱线;当探测距离发生变化时, γ 射线所经过得空气层厚度就发生变化。 γ 射线的衰减程度就会变化,最终得到的谱线也会改变。

3. 蒙特卡洛模型描述

在本实验中, 为了对地 - 空界面上天然辐射场的 γ 射线进行有效模拟, 根据探测器有效范围、探测器大小以及粒子数等诸多条件的综合考虑, 最后模拟出以下土壤体源及空气模型, 由上方 $\Phi 100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}$ 的圆柱体空气层与下方 $\Phi 100 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$ 的圆柱体土壤层组成。如图 1:

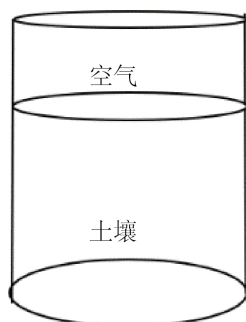


Figure 1. Soil and air model diagram

图 1. 土壤及空气模型图

在图 1 模型中, 采用地壳元素丰度作为土壤的组成, 空气采用标准空气元素含量。具体元素含量与土壤及空气密度列于表 1 与表 2 [5]。

Table 1. Soil element content in the model

表 1. 模型中土壤元素含量

元素含量%										密度(g/cm^3)
O	Si	AL	Fe	Ca	Na	K	Mg	H	其它	
48.06	26.30	7.73	4.75	3.45	2.74	2.47	2.00	0.76	1.74	2.35

Table 2. Air element content in the model

表 2. 模型中空气元素含量

元素含量%						密度(g/cm^3)
C	N	O	Ar	其它		
0.013	75.51	23.186	1.29	0.001	0.001293	

本次模拟所用的探测器是 NaI(Tl)晶体探测器。其内部是 $\Phi 3.75 \text{ cm} \times 7.5 \text{ cm}$ 的 NaI 晶体, 0.5 mm 厚度的氧化镁(MgO)反射层, 外壳则是 2.0 mm 厚度的铝作为整个探测器的密封层[6]。结构示意图如图 2:

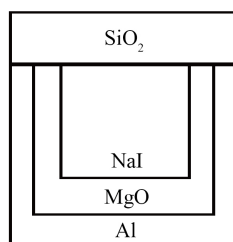


Figure 2. Schematic diagram of the probe simulation structure

图 2. 探头模拟结构示意图

根据五种天然地质体的 U、Th、K 含量得出各种核素与地表介质反应放出对应能量 γ 射线的几率大小[7]。不同矿层的 U、Th、K 含量如表 3，对应能量的 γ 射线反应几率大小如表 4:

Table 3. U, Th and K contents of different natural geological bodies

表 3. 不同天然地质体的 U、Th、K 含量

矿层类型	含量		
	K (%)	U (g/t)	Th (g/t)
天然地层	0.23	2.01	2.75
钾矿层	4.41	5.32	8.98
钍矿层	0.21	9.08	383.90
铀矿层	0.50	197.41	10.99
混合矿层	2.50	65.14	194.46

Table 4. Reaction probabilities of various nuclides and different energies under five ore layers

表 4. 各种核素不同能量五种矿层下的反应几率

类别	核素	能量 E(KeV)	反应几率 η				
			天然地层	钾矿层	钍矿层	铀矿层	混合矿层
钾	⁴⁰ K	1460	0.01755	0.33659	0.01603	0.03816	0.19081
		29	0.00004	0.00011	0.00018	0.00402	0.00133
	²³⁴ Th	64	0.00217	0.00574	0.00981	0.21318	0.07034
		93	0.00126	0.00334	0.00570	0.12387	0.04087
		242	0.00426	0.01129	0.01927	0.41886	0.13821
	²¹⁴ Pb	295	0.01080	0.02858	0.04879	1.06070	0.35000
		352	0.02073	0.05487	0.09365	2.03613	0.67187
		609	0.02649	0.07012	0.11968	2.60191	0.85856
		769	0.00285	0.00753	0.01285	0.27943	0.09221
		1120	0.00867	0.02295	0.03917	0.85155	0.28099
	²¹⁴ Bi	1378	0.00232	0.00613	0.01047	0.22758	0.07510
		1408	0.00139	0.00368	0.00628	0.13655	0.04506
		1760	0.00890	0.02355	0.04020	0.87402	0.28840
		2204	0.00287	0.00759	0.01296	0.28174	0.09297
		²³² Th	64	0.00007	0.00022	0.00948	0.00027
	58		0.00012	0.00040	0.01721	0.00049	0.00870
129	0.00066		0.00212	0.09153	0.00262	0.04625	
338	0.00299		0.00967	0.41738	0.01195	0.21092	
795	0.00113		0.00365	0.15780	0.00452	0.07974	

Continued

	911	0.00687	0.02221	0.95925	0.02746	0.48475
	969	0.00417	0.01348	0.58214	0.01667	0.29418
²¹² Bi	727	0.00177	0.00571	0.24677	0.00706	0.12470
²²⁴ Ra	241	0.00108	0.00349	0.15084	0.00432	0.07623
	511	0.00590	0.01908	0.82378	0.02358	0.41629
²⁰⁸ Tl	583	0.02229	0.07207	3.11208	0.08909	1.57266
	2615	0.00940	0.03040	1.31256	0.03758	0.66329
²¹² Pb	239	0.01143	0.03697	1.59631	0.04570	0.80668
	300	0.00083	0.00270	0.11643	0.00333	0.05884

模拟采用粒子数 10^9 ，模拟高度为 40~140 cm 之间，模拟过程探测器能量窗为 0~3 MeV，采用 1024 道。

4. 模拟结果及分析

在高于土壤层 40 cm、60 cm、80 cm、100 cm、120 cm、140 cm 不同高度处进行模拟，得出探测器处于不同高度时的 γ 能谱如图 3 (天然地层)、图 4 (混合矿层)、图 5 (钾矿层)、图 6 (钍矿层)、图 7 (铀矿层)，以及 γ 射线总计数与探测距离的关系(图 8)。

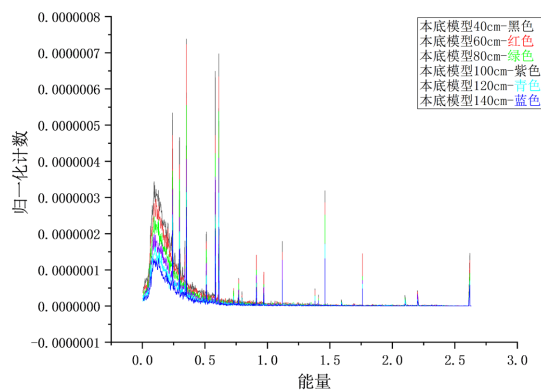


Figure 3. γ energy spectrum of natural ore bed at different heights

图 3. 天然矿层在不同高度下的 γ 能谱

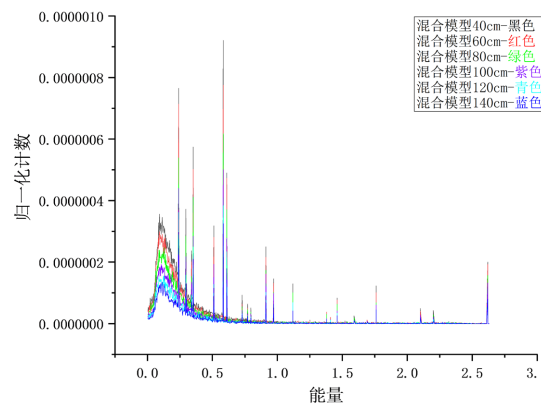


Figure 4. γ energy spectrum of mixed ore bed at different heights

图 4. 混合矿层在不同高度下的 γ 能谱

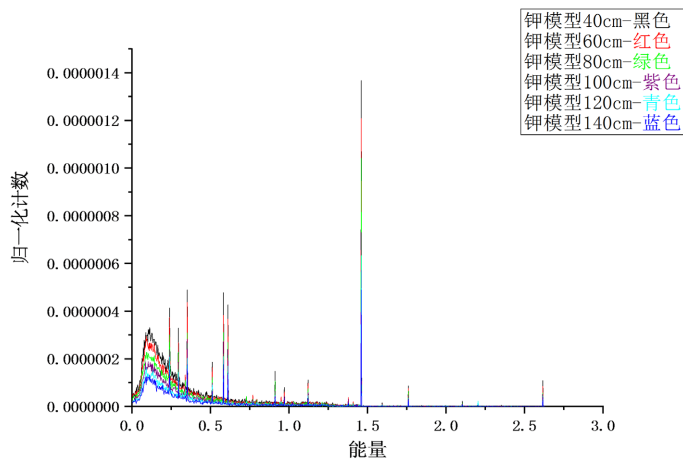


Figure 5. γ energy spectrum of potassium ore layer at different heights
图 5. 钾矿层在不同高度下的 γ 能谱

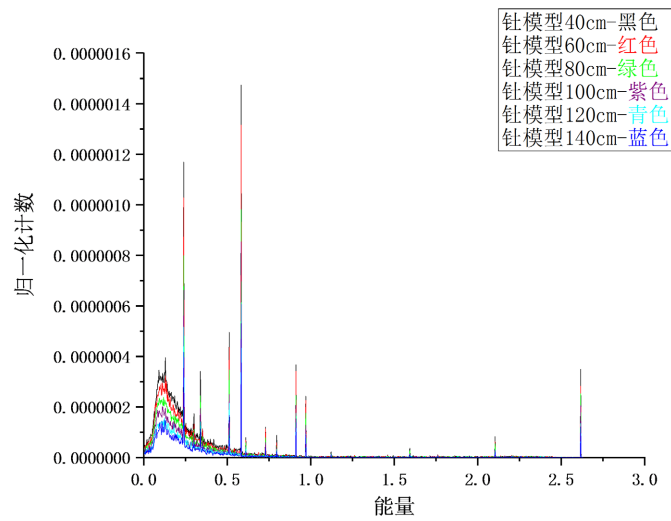


Figure 6. γ energy spectrum of thorium ore layer at different heights
图 6. 钍矿层在不同高度下的 γ 能谱

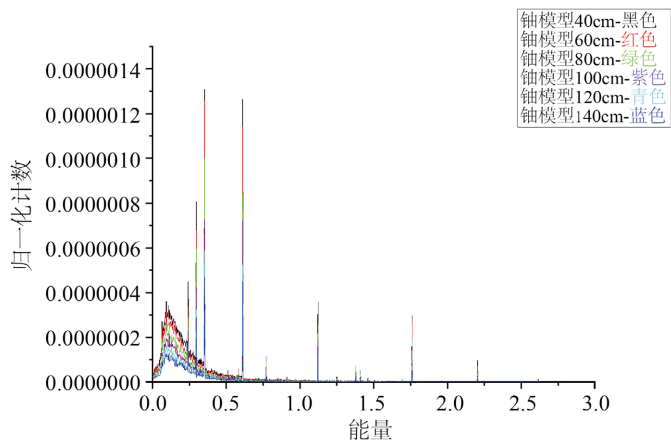


Figure 7. γ energy spectrum of uranium layer at different heights
图 7. 铀矿层在不同高度下的 γ 能谱

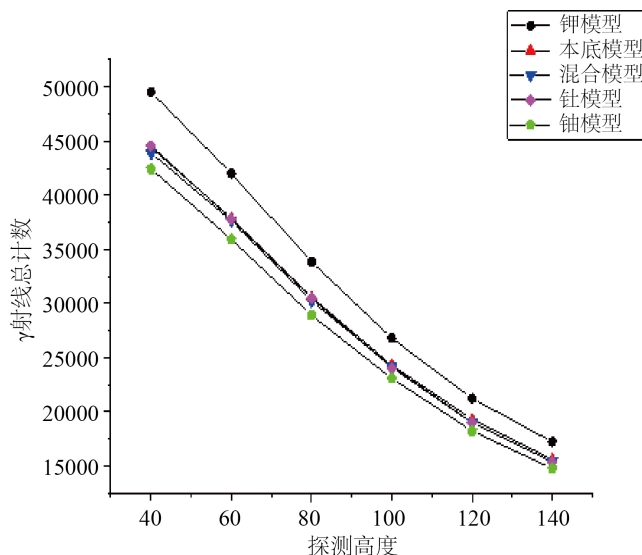


Figure 8. Fitting curve of total gamma ray count and detection height
图 8. γ 射线总计数与探测高度拟合曲线

由上图 3~7 看出，探测器晶体对不同能量的 γ 射线的计数随着高度的增加而降低，探测效率也逐渐减少，且减少的趋势越来越慢。且随着探测高度的逐渐增加， γ 射线总计数在下降，呈负相关关系。对于不同矿层间的比较，铀矿地区上方的 γ 射线谱与天然地层的基本一致，但在铀、钍、钾各矿层中，由于铀、钍、钾各自的浓度偏大，同探测高度下铀矿层中的铀系核素的 γ 射线计数明显增大比如 0.609 MeV、1.76 MeV 等，钍矿层的钍系核素的 γ 射线计数较大比如 2.615 MeV、0.511 MeV 等，最为明显的就是钾矿层中的 ^{40}K ，能清晰的看到 1.460 MeV 的计数远远大于其他能量 γ 射线计数。为了进一步分析每种矿层的能谱差异，针对每种矿层下的特征峰计数进行拟合，如下图 9~13：

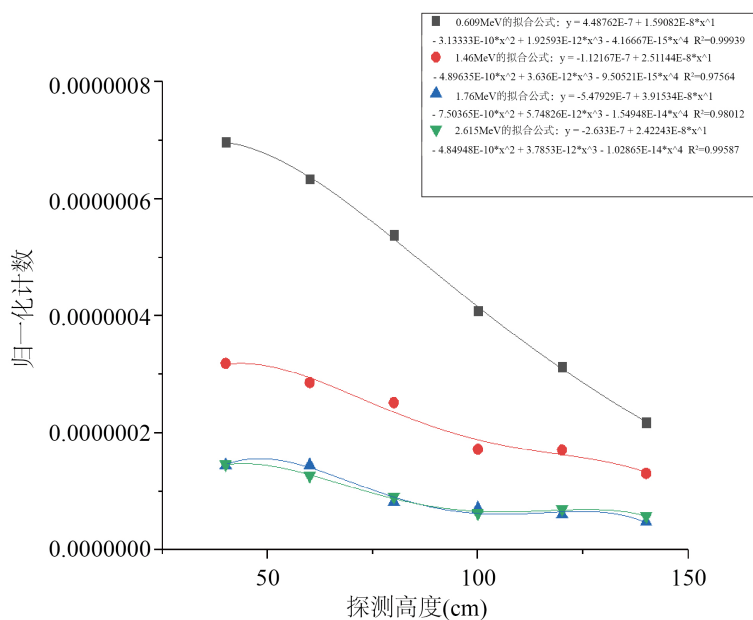


Figure 9. Fitting curve of natural formation characteristic peak count and detection height
图 9. 天然地层特征峰计数与探测高度拟合曲线

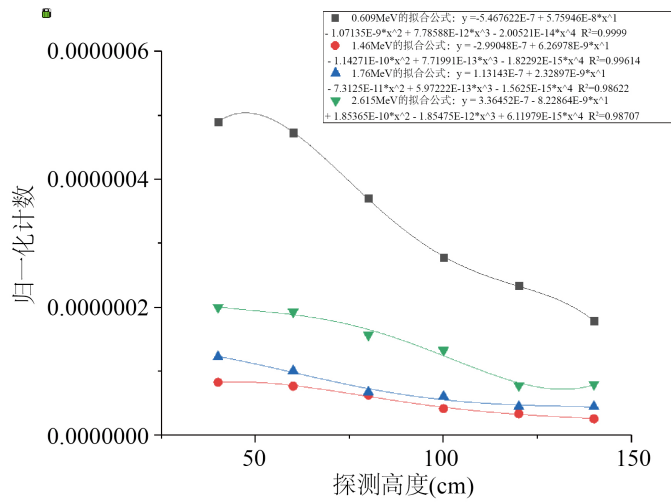


Figure 10. Fitting curve of characteristic peak count and detection height of mixed ore seam
图 10. 混合矿层特征峰计数与探测高度拟合曲线

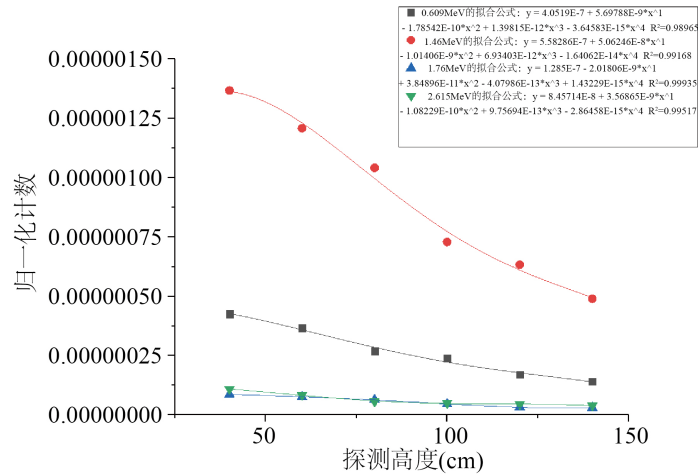


Figure 11. Fitting curve of characteristic peak count and detection height of potassium ore bed
图 11. 钾矿层特征峰计数与探测高度拟合曲线

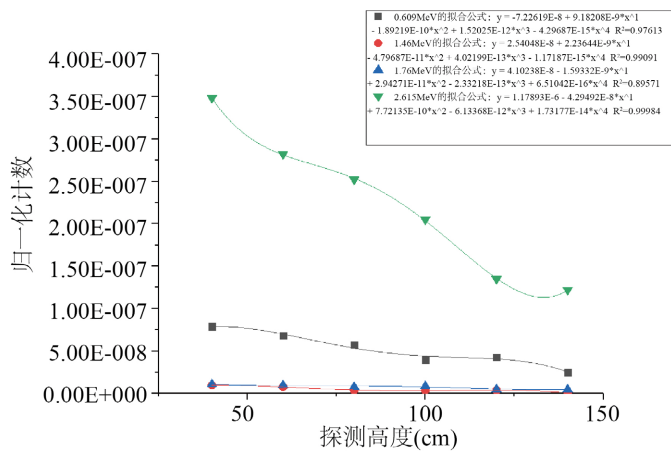


Figure 12. The fitting curve of characteristic peak count and detection height of thorium ore bed
图 12. 钍矿层特征峰计数与探测高度拟合曲线

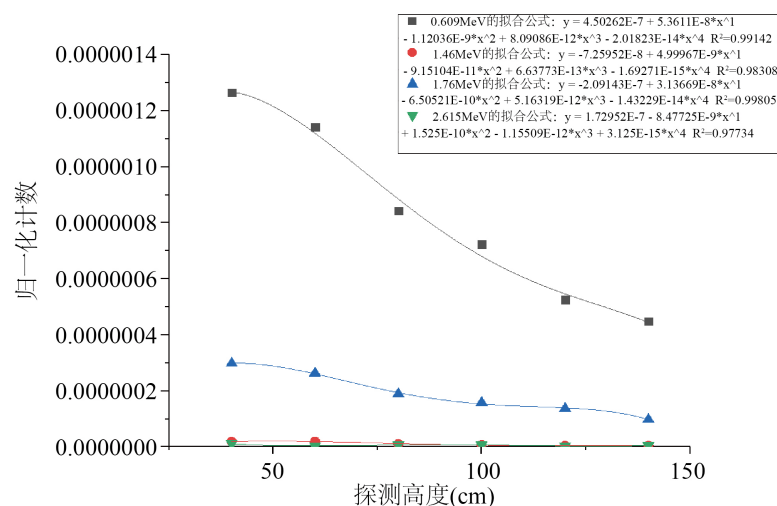


Figure 13. Fitting curve of characteristic peak count and detection height of uranium deposits

图 13. 铀矿层特征峰计数与探测高度拟合曲线

总的来说,不同特征 γ 能量的峰计数会随着探测高度的增加而减小,并且和探测高度呈负相关关系。而不同特征 γ 能量的峰计数会随着探测高度的变化以不同的相关指数规律发生变化,并且低能的斜率较大说明空气对低能 γ 射线的相关吸收系数要比高能 γ 射线的大一些。实际测量中,可根据所模拟的拟合曲线进行计算得出相对应高度下的计数,以此对实际测量数据进行验证。另外也可以看出不同矿层下的特征能量计数,0.609 MeV和1.76 MeV为铀系核素发射在铀矿层中计数明显较多,1.46 MeV为 ^{40}K 钾矿层中计数最多,2.615 MeV为钍系钍矿层中最多。

5. 结论

根据自然界中存在的放射性元素发生衰变的规律和 γ 射线在NaI晶体中的反应原理,在地-空界面上不同矿层环境中的天然 γ 射线谱研究中引入MCNP5程序,建立了地-空界面上的MCNP5程序,对五种矿层环境下天然 γ 射线在NaI晶体探测器中不同高度的沉积谱都进行了模拟。不同矿层下,随着矿层浓度的变化,特征峰计数随着母核浓度的增大而增大。最终为放射性矿层的地质勘探方面的工作提供了较为真实可靠的天然 γ 射线地面能谱特征。天然 γ 能谱的模拟结果表明: γ 射线能量呈现连续分布的特征,而且能清楚地看见在低能段汇集的连续谱,在0.10~0.12 (MeV)间还会形成一个峰值。此外,随着探测高度的增加,探测器晶体对不同能量的 γ 射线的计数降低探测效率逐渐减少,且减弱的趋势越来越慢。 γ 射线总计数会随着探测高度的增加而减小,不同特征 γ 能量的峰计数也会随着探测高度增加而减小,并且总计数和特征峰计数都同探测高度呈现负相关关系。在不同能量特征峰计数中,能量计数越大,斜率越大,实际测量中,可根据所模拟的拟合曲线进行计算得出相对应高度下的计数,以此对实际测量数据进行验证。

参考文献

- [1] 潘自强. 电离辐射环境监测与评价[M]. 北京: 原子能出版社, 2007.
- [2] 杜波, 赖万昌, 汪清浩. MCNP模拟探测距离对铀系、钍系天然 γ 能谱影响分析[J]. 四川有色金属, 2012(4): 43-45.
- [3] 吴治华, 等. 原子核物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1997.
- [4] 汤斌, 葛良全, 方方, 刘义保, 赖万昌, 周四春. 核辐射测量原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011.

-
- [5] 张庆贤, 葛良全, 谷懿, 等. 土壤中水分含量对铀系、钍系天然 γ 能谱影响的分析[J]. 辐射防护, 2009, 29(5): 321-326.
 - [6] 张小龙, 余海湖. NaI(Tl)单晶 γ 能谱的蒙特卡罗模拟[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(13): 41-44.
 - [7] 李婧. 天然放射性场 γ 能谱的蒙特卡罗模拟[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2006: 8-12.