



·蒙特卡罗方法及其应用·

MC 模拟无卷积全谱转换法测量 X, γ 辐射剂量*

曹 蕾^{1,2}, 张耀锋¹, 杨 扬², 黄建微², 张晓乐²

(1. 北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100875; 2. 中国计量科学研究院电离辐射研究所, 北京 100013)

摘 要: 为了更好地进行环境 X/ γ 辐射剂量的测量, 通过对电制冷高纯锗探测器蒙特卡罗建模获取 0.01~1.5 MeV 能量范围内的能谱和剂量(率)值, 并利用无卷积全谱转换法进行能谱-剂量转换研究。研究发现, 通过无卷积全谱转换法计算得到的剂量率与模拟剂量率符合较好; 通过在中国计量研究院环境 γ 辐射空气吸收剂量标准辐射场中进行 Co-60 和 Cs-137 放射源剂量率实验验证, 结果显示, 在 0.01~1.5 MeV 的能量范围内, 通过能谱-剂量转换得到剂量率与标准剂量率的误差小于 $\pm 10\%$, 这表明通过无卷积全谱转换法进行能谱-剂量(率)转换系数的求解是可行的。

关键词: 蒙特卡罗模拟; 能谱-剂量; 高纯锗探测器; G(E) 函数法; 无卷积全谱转换法

中图分类号: TL72

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210300

Measurement of environmental level X, γ dose with conversion of complete spectra without deconvolution method of MC simulation

Cao Lei^{1,2}, Zhang Yaofeng¹, Yang Yang², Huang Jianwei², Zhang Xiaole²

(1. College of Nuclear Science and Technology, Beijing normal university, Beijing 100875, China;

2. Institute of Ionizing Radiation Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract: For the accurate measurement of environmental X/ γ radiation dose rate, the conversion from energy spectrum to dose rate is used. In this paper, the energy spectrum and dose value of the electrically cooled high-purity germanium detector (HPGe detector) in the energy range of 0.01–1.5 MeV are obtained by Monte Carlo simulation. And the method “Conversion of complete spectra without deconvolution” is used for energy spectrum-dose conversion study. It is found that the dose rate calculated by Conversion of complete spectra without deconvolution method is in good agreement with the simulated dose rate. Experimental verification was carried out in the standard radiation field (Co-60, Cs-137) of the environmental γ radiation air absorbed dose of the China Institute of Metrology, the result shows that in the energy range of 0.01–1.5 MeV, the error between the dose rate value obtained by energy spectrum-dose conversion and the standard dose rate value is less than $\pm 10\%$. The study shows that it is feasible to solve the energy spectrum-dose (rate) conversion coefficient by the method “Conversion of complete spectra without deconvolution”.

Key words: MC simulation; energy spectrum to dose; HPGe detector; G(E) function method; conversion of complete spectra without deconvolution

目前国内用于环境监测仪表溯源的参考辐射场的剂量率范围($> 0.5 \mu\text{Gy/h}$)未完全满足环境监测的需求($0.1 \sim 1 \mu\text{Gy/h}$), 因此覆盖环境水平的参考辐射场的建立是十分迫切和必要的; 作为参考辐射场建立的基础, 其辐射剂量($0.1 \sim 2 \mu\text{Gy/h}$)的准确测量就显得十分重要^[1]。常用的 γ 辐射剂量率测量仪表为 GM 计数管^[2]、高压电离室^[3]、基于闪烁体型剂量仪^[4]等, 该类仪表通过辐射计数与剂量的线性转换实现剂量(率)的测量, 在灵敏度和能量响应方面尚存在一定的不足, 而一种新的方法——能谱-剂量转换法可以有效地弥补这些不足。

* 收稿日期: 2021-07-20; 修订日期: 2021-09-08

基金项目: 基本科研业务费重点领域项目(AKYZD2015)

联系方式: 曹 蕾, lcao@mail.bnu.edu.cn。

通信作者: 黄建微, huangjw@nim.ac.cn。

常用的能谱-剂量的转换方法^[5-6]有 $G(E)$ 函数法^[7]、BECK 法^[8]等。BECK 法通过一定核素的特征 γ 谱线进行计算,这对解谱过程的要求较高,在复杂环境下使用的难度较大。 $G(E)$ 函数法是对能谱计数进行分段加权积分计算得到剂量率的方法,该方法的难点在于能谱剂量转换系数的求解,常用的转换系数求解方法有最小二乘法和共轭梯度法^[9],但这些方法在评估卷积迭代过程误差传递方面存在问题,在应用中存在一定的难度。

针对上述情况,本研究采用无卷积全谱转换法求解 $G(E)$ 函数进行能谱-剂量转换系数的求解。通过高纯锗探测器 MCNP 建模得到能谱和剂量(率),使用无卷积全谱转换法实现转换系数的求解,并在中国计量院 γ 辐射空气吸收剂量标准辐射场中进行实验验证。

1 原 理

1.1 $G(E)$ 函数法

$G(E)$ 函数法是对测量获得的脉冲高度谱进行加权积分计算得到空气吸收剂量率的方法。在 X/γ 光子注量场的特定位置 P 处,探测器测量得到的脉冲高度谱^[10]与注量谱的关系式

$$N(E) = \int_{E_0} \phi(E_0) \mathbf{M}(E_0, E) dE_0 \quad (1)$$

式中: $N(E)$ 为能谱中的计数; ϕ 为光子注量; $\mathbf{M}(E_0, E)$ 为探测器的响应矩阵。

同样地,在该位置 P 处的吸收剂量 D 为

$$D = \int_{E_0, E} \phi E \frac{\mu}{\rho}(E) dE \quad (2)$$

式中: E 为光子能量; $\frac{\mu}{\rho}(E)$ 为能量 E 对应的质量衰减系数。

令系数 $C(E)$ 代替 $E \frac{\mu}{\rho}(E)$, 即 $C(E)$ 为 γ 光子注量转换为环境 γ 辐射剂量的系数因子

$$D = \int_E \phi C(E) dE = \int_E (\mathbf{M}(E_0, E)^{-1} N(E)) C(E) dE = \int_E (\mathbf{M}(E_0, E)^{-1} C(E)) N(E) dE = \int_E G(E) N(E) dE \quad (3)$$

由式(3)可知,空气吸收剂量的求解的转换为对 G 的求解。因此,空气吸收剂量率的求解为

$$\dot{D} = \int_{E_1}^{E_2} G(E) n(E) dE \quad (4)$$

式中: $n(E)$ 为能谱的计数率; G 为能谱-剂量转换系数。

1.2 无卷积全谱转换法

无卷积全谱转换法在 $G(E)$ 函数法的基础上通过多组能谱-剂量率值求解转换系数 G 值的方法,该方法无需对能谱进行卷积处理^[11]。将式(4)进行离散化处理得到

$$\dot{D} = \int_{E_1}^{E_2} G(E) n(E) dE + \int_{E_2}^{E_3} G(E) n(E) dE + \cdots + \int_{E_{z-1}}^{E_z} G(E) n(E) dE = G_1 E_1 n_1 + G_2 E_2 n_2 + \cdots + G_z E_z n_z \quad (5)$$

将能谱划分为不同区域,使不同能量的能量峰位落在这些区域中,根据每个区域的能谱和剂量率值依次求解每个区域的能谱-剂量转换系数 G 值,最终得到整个能谱的转换系数,能谱-剂量转换系数 G 的求解为

$$G_i = \frac{\dot{D}_i - \sum_{j < i} G_j E_j n_{ij}}{E_i n_{ii}} \quad (6)$$

式中: n_{ij} 为第 i 个放射源在第 j 个区域内的计数率; E_j 为第 j 个放射源在第 j 个区域内的平均能量。

2 实验设计

2.1 MCNP 模拟

MCNP 是由美国 Los Alamos 实验室研制的一个大型的多功能的蒙特卡罗程序包^[12],可用于计算粒子输运问题。由于无卷积全谱转换法的实现需要多组能谱和对应的剂量值,因此本研究通过对电制冷高纯锗探测器进行 MCNP 建模,并使用 F8, F6 计数卡得到多组能量的能谱-剂量率值^[13]。

2.1.1 模型建立

根据电制冷高纯锗探测器(型号: ORTEC DETECTIVE X)的 CT 扫描图建立高纯锗探测器探头模型, CT 扫描图如图 1 所示。其中高纯锗探测器的 Ge 晶体有效体积为 $\phi 67 \text{ mm} \times 52 \text{ mm}$, 贴近锗晶体为厚度 0.47 mm 的铝壳, 最外侧是前面厚度 1 mm 侧面厚度为 1 mm 的铝壳, MC 建模示意图如图 2 所示。

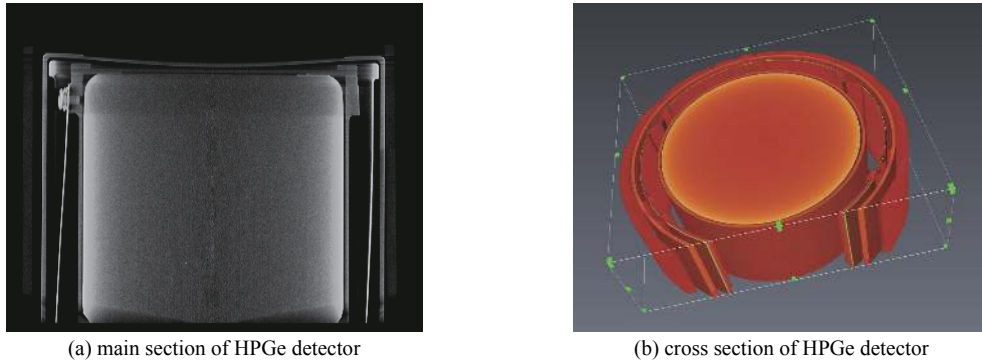


Fig. 1 CT images of HPGe detector

图 1 高纯锗探测器 CT 扫描图

2.1.2 刻度实验

为了获得 GEB 参数和准确的死层厚度, 使用放射源(Co-57, Co-60, Cs-137, Na-22)在低本底箱中对高纯锗探测器进行能量刻度, 高纯锗能量刻度的结果如表 1 所示, 测量现场装置如图 3 所示。

2.1.3 GEB 参数、死层厚度、冷指尺寸

通过实验测量得到高纯锗探测器的半高宽和探测效率调整模型^[14]。其中半高宽参数用于 MCNP 模拟能谱展宽系数—— GEB 系数的求解, 计算式为

$$GEB = a + b\sqrt{E} + cE^2 \quad (7)$$

式中: E 为能量值, 单位 MeV; a, b, c 为待定系数; GEB 为能谱展宽系数。

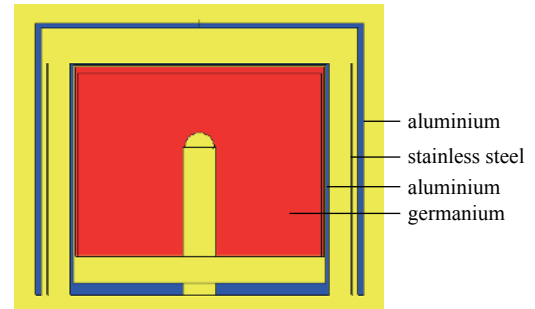


Fig. 2 Schematic diagram of MCNP model of HPGe detector

图 2 高纯锗探测器 MCNP 模型示意图

表 1 高纯锗探测器能量刻度测量结果

Table 1 Result of the calibration measurement of HPGe detector

radioactive source	energy/keV	FWHM/MeV	detection efficiency/%
Co-57	122.06	2.74×10^{-3}	0.239
	136.47	2.67×10^{-3}	0.274
Co-60	1173.24	3.44×10^{-3}	0.057
	1332.51	3.51×10^{-3}	0.052
Cs-137	661.66	3.36×10^{-3}	0.092
Na-22	1274.54	3.17×10^{-3}	0.054

根据表 1 的实验半高宽和能量数据, 通过式(6)进行拟合, 得到能谱展宽系数 $a=0.00207$, $b=0.00183$, $c=-0.4148$, $R^2=0.99$ 。

随着高纯锗的使用, 其晶体死层可能发生改变, 为得到准确的死层厚度和冷指尺寸, 设置不同死层厚度, 利用 MCNP 模拟得到探测效率^[15], 将其与实验测量的探测效率进行对比, 确定死层厚度。表 2 为不同死层厚度高纯锗探测器模拟得到的探测效率。在死层为 0.10 cm 时, 模拟得到的探测效率与实验测量探测效率最为接近。

当死层厚度为 0.10 cm , 调整冷指尺寸为 $\phi 0.4 \text{ cm} \times 33 \text{ cm}$ 时, 模拟探测效率和实验探测效率对比结果如图 4 所示, 模拟效率和实验效率的偏差控制在约 5%, 两者符合较好。

2.1.4 通用源项

本次模拟设置 2 组能量点(分别记为能量组 1 和能量组 2), 能量组 1 的能量间距小, 能量点多, 覆盖 $30 \text{ keV} \sim$

2.8 MeV 的能量范围, 主要用于观察理想情况下能谱剂量转换系数 G 的变化趋势; 能量组 2 的能量点设置与实际实验条件相符合: 设置能量点 55, 70, 100, 125, 170 keV 和 0.662, 1.17, 1.33 MeV。通过 MCNP 构建 HPGe 探测器模型, 设置放射源与探测器等效中心距离为 30 cm, 使用 F8 计数卡配合 E8 能量卡以及 GEB 高斯展宽参数进行能谱获取, 使用 F6 计数卡进行剂量率的获取。

2.2 实验验证

在中国计量科学研究院 γ 辐射空气吸收剂量标准辐射场中进行实验验证, 使用电制冷高纯锗探测器测量 Co-60 和 Cs-137 的能谱, 通过 10 L 球空腔电离室测量对应条件下的剂量率值。图 5 为高纯锗探测器测量放射源实验装置图, 图 6 为 10 L 球电离室测量放射源实验装置图。

将高纯锗探测器探头和电离室正对 γ 射线窗口, 为降低探测器测量过程的死时间, 选择距放射源 Co-60 和 Cs-137 的 3, 3.5, 4, 4.5 m 处进行能谱和剂量率的测量。

表 2 不同死层厚度高纯锗探测器模拟探测效率结果

Table 2 Simulated detection efficiency results of HPGe detector with different dead layer thickness

E/keV	experimental detection efficiency/%	simulated detection efficiency at different dead layer/%					
		0.05 cm	0.07 cm	0.10 cm	0.12 cm	0.17 cm	0.22 cm
122.06	0.278	0.230	0.273	0.264	0.250	0.228	0.208
136.47	0.275	0.293	0.283	0.288	0.264	0.245	0.227
511.00	0.128	0.078	0.119	0.116	0.116	0.112	0.108
661.66	0.092	0.098	0.098	0.091	0.095	0.092	0.089
1 173.24	0.058	0.031	0.063	0.062	0.062	0.060	0.059
1274.54	0.055	0.021	0.060	0.058	0.058	0.056	0.055
1332.51	0.052	0.029	0.057	0.056	0.056	0.054	0.053

3 结果与讨论

3.1 模拟能谱

根据上述描述的电制冷高纯锗模型, 按照能量组 1 号和能量组 2 号设置的能量点得到一系列不同能量的能谱, 图 7 和图 8 为 MCNP 模拟能量组 2 号对应的能谱。

3.2 转换系数的求解

根据式(6), 将 MCNP 模拟得到的能谱和对应剂量率值进行 G 的计算求解。在求解过程中, 根据能量组 1 号和能量组 2 号的能量点选取合适的能量区域, 使得模拟能谱峰位分布在能量区域内。能量组 1 号选择以 0.05 MeV 为能量间隔, 0.02~2.82 MeV 的能量区域; 能量组 2 号选取 0.01, 0.06, 0.11, 0.15, 0.2, 0.7, 1.5 MeV 的能量区域。 G 的求解选取 10 keV 为能量下阈值, 55 keV 作为最小能谱。能量组 1 和能量组 2 的 G 和 GE 求解结果如图 9、图 10 所示, 图 9(a) 为能量组 1 的 G 的求解结果 图 9(b) 为能量组 1 的 GE 的求解结果; 图 10(a) 为能量组 2 的 G 的求解结果, 图 10(b) 为能量组 2 的 GE 的求解结果。

通过模拟的能量组 1 号与能量组 2 号结果进行对比分析得到两组 G 和 GE 的变化趋势一致。由于能量组 2 号的能量间距大于能量组一号, 所以 2 号对应的 GE 值整体小于能量组一号对应的 GE 值。能量组 1 号可以反映出

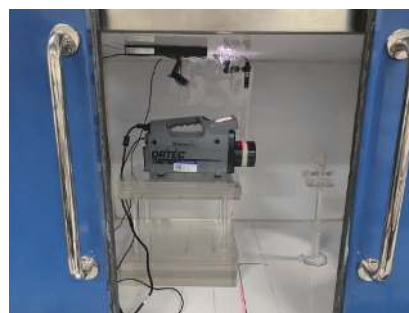


Fig. 3 Diagram of calibration measuring situation for HPGe detector

图 3 高纯锗探测器刻度实验图

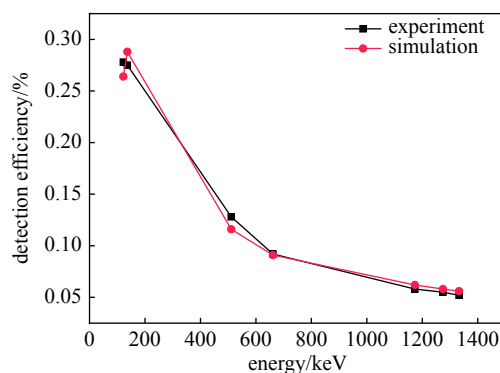


Fig. 4 Comparison of experimental detection efficiency and simulated detection efficiency

图 4 实验探测效率与模拟探测效率对比图



Fig. 5 Experimental device for measuring radioactive source with high purity germanium detector

图 5 高纯锗探测器测量放射源实验装置图



Fig. 6 Experimental device for measuring radioactive sources in a 10L spherical ionization chamber

图 6 10L 球电离室测量放射源实验装置图

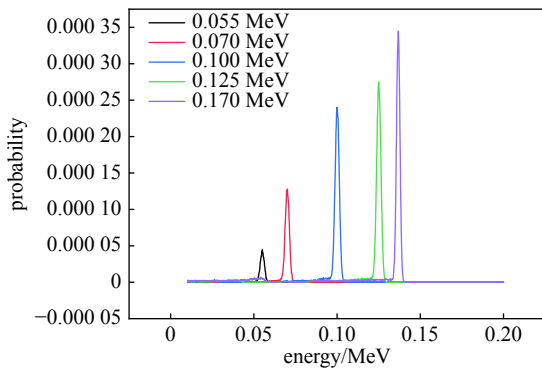


Fig. 7 Energy spectrum of different energies simulated by MCNP

图 7 MCNP 模拟不同能量的能谱结果

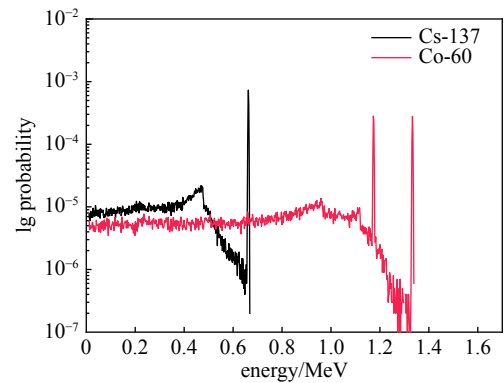
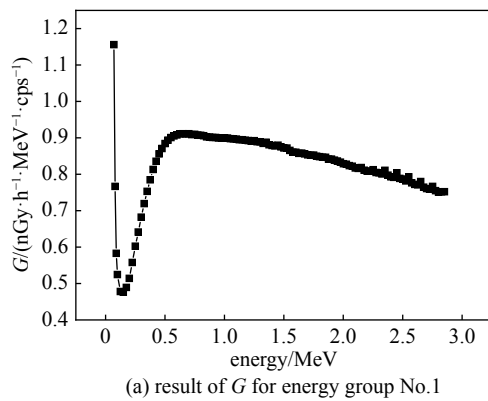
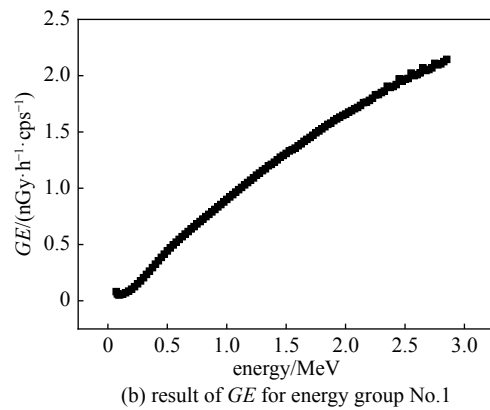


Fig. 8 Energy spectrum of Co-60 and Cs-137 simulated by MCNP

图 8 MCNP 模拟 Co-60, Cs-137 的能谱结果



(a) result of G for energy group No.1



(b) result of GE for energy group No.1

Fig. 9 Results of G and GE for energy group No. 1

图 9 能量组 1 号 G 和 GE 的求解结果

在理想情况下 G 和 GE 在 0.02~2.85 MeV 的变化趋势。

3.3 方法验证

将模拟求解得到的 G 值, 通过式(5)利用模拟能谱进行剂量率求解, 表 3 为能量组 2 号无卷积全谱转换法与模拟剂量率的比较。可以发现, 无卷积全谱转换法计算得到的剂量率与模拟剂量率的残差不超过 10^{-17} , 这反映出使用无卷积全谱转换法进行能谱剂量是自洽的, 这也为实验工作提供了参考。

3.4 放射源实验测量结果

在中国计量院 γ 辐射空气吸收剂量标准辐射场中对放射源 Co-60, Cs-137 进行能谱、剂量率测量。图 11 为高纯锗探测器测量 Co-60 的能谱, 图 12 为高纯锗探测器测量 Cs-137 的能谱, 表 4 为 10 L 球在不同距离处测量放射源 Co-60 和 Cs-137 剂量率结果。

3.5 能谱-剂量转换系数实验验证结果

为了验证无卷积全谱转换法进行能谱-剂量转换的准确性, 将通过无卷积全谱转换法得到的能量组 2 号的能

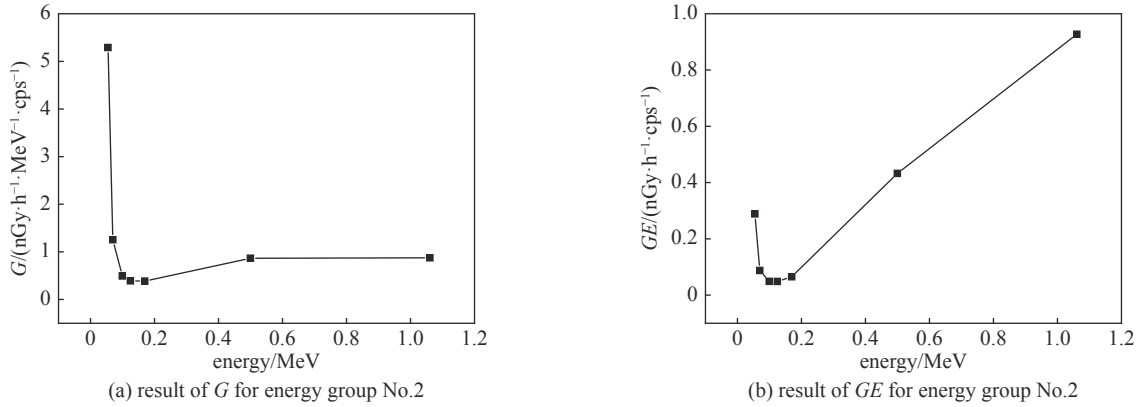


Fig. 10 Results of G and GE for energy group No. 2

图 10 能量组 2 号 G 和 GE 的求解结果

表 3 能量组 2 号无卷积全谱转换法与模拟剂量率的比较

Table 3 Dose rate of conversion of complete spectra without deconvolution method and simulation of energy group No. 2

average energy/MeV	simulated dose rate/(nGy·h ⁻¹)	dose rate of conversion of complete spectra without deconvolution method /(nGy·h ⁻¹)	residue/(nGy·h ⁻¹)
0.055	1.80×10^{-5}	1.80×10^{-5}	0
0.070	1.72×10^{-5}	1.72×10^{-5}	0
1.000	2.20×10^{-5}	2.20×10^{-5}	0
0.125	2.82×10^{-5}	2.82×10^{-5}	9.83×10^{-20}
0.170	4.11×10^{-5}	4.11×10^{-5}	9.49×10^{-20}
0.662	2.00×10^{-3}	2.00×10^{-3}	0
1.250	3.44×10^{-3}	3.44×10^{-3}	9.97×10^{-18}

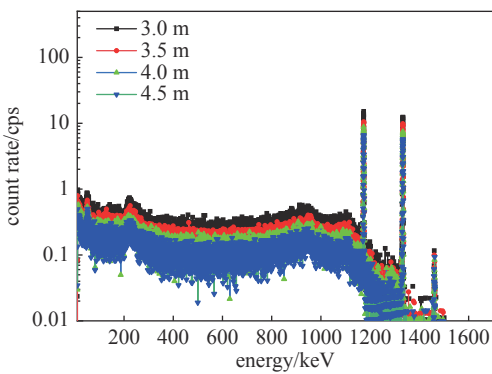


Fig. 11 Energy spectrum of Co-60 of high purity germanium detector

图 11 高纯锗探测器 Co-60 能谱

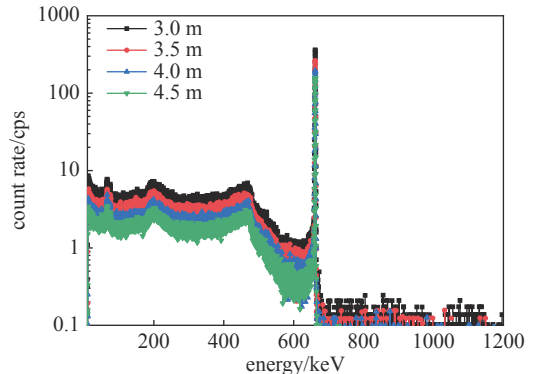


Fig. 12 Energy spectrum of Cs-137 of high purity germanium detector

图 12 高纯锗探测器 Cs-137 的能谱

谱-剂量转换系数代入 γ 辐射空气吸收剂量标准辐射场测量的能谱中进行验证。表 5 为高纯锗 MCNP 建模能谱转剂量率值和标准剂量率值的对比结果。

由表 5 可知, 无卷积全谱转换法计算结果与 γ 标准辐射场的标准值相比, 相对误差不超过 10%, 证明该方法用于求解剂量率是可行的; 可以发现, 使用无卷积全谱转换法通过高纯锗探测器的能谱-剂量转换对 Cs-137 的能量响应较为一致, 最大为 8.02%; 对 Co-60 的能响最大为 2.07%。若将能量响应以 Cs-137 进行归一, 则 Co-60 的能响约在 8%。在 Cs-137 辐射场下, 剂量率在 2.6~6 $\mu\text{Gy/h}$ 的范围内, 剂量率响应变化小于 1.5%; 在 Co-60 辐射场下, 剂量率在 0.6~1.3 $\mu\text{Gy/h}$ 的范围内, 剂量率响应变化不超过 1%, 无卷积全谱转换法在处理高纯锗谱仪剂量率响应方面的一致性较好。

出现上述结果, 一方面是由高纯锗探测器的死时间响应引起, 由于能谱测量过程的死时间较高, 造成能谱符合计数较多, 对能谱转剂量的结果影响较大。另一方面可能由于无卷积全谱转换法受能量阈值的设定影响较大,

表 4 10 L 球电离室在不同距离处测量放射源 Co-60 和 Cs-137 剂量率结果

Table 4 The results of measuring the dose rate of Co-60 and Cs-137 in a 10 L spherical ionization chamber at different distances

radioactive source	distance/m	measured dose rate/(nGy·h ⁻¹)	standard value of dose rate/(nGy·h ⁻¹)	relative error of measured value and standard value/%
Cs-137	3.0	5343	5397	-1.001
Cs-137	3.5	3965	3962	0.076
Cs-137	4.0	3018	3028	-0.330
Cs-137	4.5	2395.5	2396	-0.021
Co-60	3.0	1368	1355.4	-0.921
Co-60	3.5	1005	988.5	-1.642
Co-60	4.0	769	776.1	0.923
Co-60	4.5	607	602.55	-0.733

表 5 能量组 2 号无卷积全谱转换法剂量率值与标准值比较

Table 5 Comparison of dose rate of Conversion of complete spectra without deconvolution method and the standard value

radioactive source	distance/m	dose rate of conversion of complete spectra without deconvolution method/(nGy·h ⁻¹)	live time rate/%	standard value of dose rate/(nGy·h ⁻¹)	relative error of calculated value and standard value/%
Cs-137	3.0	6115.9	0.55	5830.0	8.02
Cs-137	3.5	4497.1	0.63	4286.5	8.19
Cs-137	4.0	3372.5	0.72	3214.1	6.15
Cs-137	4.5	2688.6	0.75	2562.1	6.93
Co-60	3.0	1363.1	0.92	1339.7	-2.07
Co-60	3.5	1010.5	0.93	993.0	-1.20
Co-60	4.0	770.5	0.95	757.0	-1.56
Co-60	4.5	609.7	0.96	598.9	-1.33

因此后期工作将研究下阈值设定对无卷积全谱转换法求解剂量率的影响,并开展采用无卷积全谱转换法实验求解能谱-剂量转换系数的工作。

4 结 论

本文采用 MC 模拟实现无卷积全谱转换法求解能谱-剂量转换系数,并通过 $G(E)$ 函数法进行能谱-剂量的转换。经过实验验证,在 Cs-137 和 Co-60 辐射场下,通过 $G(E)$ 函数法计算得到剂量率与标准值相对误差不超过 $\pm 10\%$ 。由于无卷积全谱转换法受能谱的死时间和能量下阈值的影响较大,后期将研究下阈值设定对无卷积全谱转换法求解剂量率的影响,修正死时间带来的误差并开展采用无卷积全谱转换法实验求解能谱-剂量转换系数的工作。

参考文献:

- [1] Knežević Z, Majer M, Baranowska Z, et al. Investigations into the basic properties of different passive dosimetry systems used in environmental radiation monitoring in the aftermath of a nuclear or radiological event[J]. *Radiation Measurements*, 2021, 146: 106615.
- [2] 王成竹, 张佳, 沈杨, 等. GM计数管能量响应补偿研究的新思路[J]. *核电子学与探测技术*, 2013, 33(10): 1215-1218. (Wang Chengzhu, Zhang Jia, Shen Yang, et al. A research of energy response compensation for G-M counter[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2013, 33(10): 1215-1218)
- [3] 郭思明, 黄建微, 杨扬. 用于环境辐射监测的高气压电离室性能研究[J]. *计量学报*, 2020, 41(s1): 172-176. (Guo Siming, Huang Jianwei, Yang Yang. Study on the performance of high-pressure ionization chamber for environmental radiation monitoring[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(s1): 172-176)
- [4] 于兴明. 基于脉冲计数模式的闪烁体剂量研究[J]. *信息与电脑*, 2016(12): 61-62. (Yu Xingming. Research on scintillator dose based on pulse counting mode[J]. *China Computer & Communication*, 2016(12): 61-62)
- [5] Moriuchi S. A new method of dose evaluation by spectrum-dose conversion operator and determination of the operator[R]. JAERI-1209, 1971.
- [6] 贺军, 杨朝文. 用 γ 能谱全能峰计数率测量辐射剂量率的方法研究[J]. *核技术*, 2014, 37(7): 47-52. (He Jun, Yang Chaowen. Measurement of γ absorption dose rate through measuring the full energy peak of γ spectrum[J]. *Nuclear Techniques*, 2014, 37(7): 47-52)
- [7] 黄建微, 李德红, 张健, 等. γ 能谱-剂量转换法测量环境辐射剂量[J]. *核电子学与探测技术*, 2017, 37(5): 468-473. (Huang Jianwei, Li Dehong, Zhang Jian, et al. Study on reference measurement method of dose of environmental radiation based on G-function[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2017, 37(5): 468-473)

- [8] 唐丽丽. γ 能谱全谱法测定 γ 剂量方法技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010. (Tang Lili. Study on the techniques of γ dose determination by γ spectrum[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010)
- [9] 李爱芹. 线性方程组的迭代解法[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(14): 3357-3364. (Li Aiqin. Iterative methods for solving the linear systems[J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, 7(14): 3357-3364)
- [10] 隗莲. 基于 γ 能谱的注量测量与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013. (Wei Lian. The measurement and analysis of influence based on γ energy spectrum[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013)
- [11] Dombrowski H. Area dose rate values derived from NaI or LaBr₃ spectra[J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2014, 160(4): 269-276.
- [12] 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 2版. 北京: 原子能出版社, 2006. (Xu Shuyan. Application of Monte Carlo method in experimental nuclear physics[M]. 2nd ed. Beijing: Atomic Energy Press, 2006)
- [13] 张立国, 刘宇, 肖志刚. MCNP模拟HPGe谱仪 γ 能谱的初步实验验证一例[J]. 核电子学与探测技术, 2010, 30(9): 1135-1138,1143. (Zhang Liguang, Liu Yu, Xiao Zhigang. A case of comparison between γ spectra simulated by MCNP and corresponding experimental ones[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2010, 30(9): 1135-1138,1143)
- [14] 黄建徽, 李德红, 吴迪, 等. MC模拟能谱对G函数法测量剂量率值结果的影响[J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36(3): 283-286. (Huang Jianwei, Li Dehong, Wu Di, et al. Calculating the effect of the energy-spectrum for the dose rate of G-function using Monte Carlo method[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2016, 36(3): 283-286)
- [15] 华艳, 朱祚缤, 刘艺琴, 等. 高纯锗探测器的效率刻度[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34(1): 86-88,116. (Hua Yan, Zhu Zuobin, Liu Yiqin, et al. Calibration of HPGe detector efficiency[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2014, 34(1): 86-88,116)