

NaI(Tl)探测器测量空气吸收剂量率方法研究

王雪建¹ 於国兵² 郭建友¹ 许丰³ 顾先宝² 庞杨^{3,4}

¹(安徽大学物理与光电工程学院 合肥 230601)

²(安徽省辐射环境监督站 合肥 230071)

³(哈尔滨工程大学核科学技术学院 哈尔滨 150001)

⁴(黑龙江省原子能研究院 哈尔滨 150081)

摘要 本文基于 $\Phi 7.5\text{ cm}\times 7.5\text{ cm}$ NaI(Tl)探测器,开展测量 γ 射线空气吸收剂量率方法的研究。使用蒙特卡罗方法对NaI(Tl)探测器进行仿真模拟,获取探测器50 keV~2.5 MeV能量范围的 γ 射线能谱图。利用 $G(E)$ 函数对放射源空气吸收剂量率进行计算,求解 $G(E)$ 函数时考虑 K_{\max} 与优化因子 M 对其计算空气吸收剂量率产生的影响,对 $G(E)$ 函数的求解进行优化以提高计算精度。经过优化的 $G(E)$ 函数计算的空气吸收剂量率与理论标准值相对偏差 S 低于 $\pm 1\%$ 。最后经过实验测量对比发现, $G(E)$ 函数空气吸收剂量率计算结果与剂量率仪测量结果相对偏差小于 $\pm 10\%$,说明经过优化得到的NaI(Tl)探测器 $G(E)$ 函数值可以用于空气吸收剂量率的测量应用。

关键词 NaI(Tl)探测器, $G(E)$ 函数, 空气吸收剂量率

中图分类号 TL11

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0026

引用该文:

王雪建, 於国兵, 郭建友, 等. NaI(Tl)探测器测量空气吸收剂量率方法研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2023, 41(5): 050701. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0026.

WANG Xuejian, YU Guobing, GUO Jianyou, *et al.* Study on the method of air absorbed dose rate measurement by NaI(Tl) detector[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, 41(5): 050701. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0026.



Study on the method of air absorbed dose rate measurement by NaI(Tl) detector

WANG Xuejian¹ YU Guobing² GUO Jianyou¹ XU Feng³ GU Xianbao² PANG Yang^{3,4}

¹(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

²(Radiation Environment Supervision Station, Anhui Provincial Department of Ecology and Environment, Hefei 230071, China)

³(School of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

⁴(Institute of Atomic Energy, Heilongjiang Province, Harbin 150081, China)

ABSTRACT This study investigated a method of measuring the absorbed dose rate of γ -ray in air using a Φ

基金资助: 国家自然科学基金项目(11935001)资助

第一作者: 王雪建, 男, 1998年10月出生, 安徽大学硕士研究生在读, 攻读方向辐射监测与防护

通信作者: 郭建友, 教授, 博士生导师, E-mail: Jianyou@ahu.edu.cn; 许丰, E-mail: xufengid@sina.com

收稿日期: 初稿 2023-03-28; 修回 2023-04-20

Supported by National Natural Science Foundation of China (11935001)

First author: WANG Xuejian (male) was born in October 1998. Now he is a graduate student at Anhui University, focusing on radiation monitoring and protection

Corresponding author: GUO Jianyou, professor, doctoral supervisor, E-mail: Jianyou@ahu.edu.cn; XU Feng, E-mail: xufengid@sina.com

Received 28 March 2023; accepted 20 April 2023

7.5 cm×7.5 cm NaI(Tl) detector. Simulation of the NaI(Tl) detector using the Monte Carlo method was performed to obtain the γ -ray energy spectrum of the detector in the energy range of 50 keV~2.5 MeV. The $G(E)$ function was used to calculate the air-absorbed dose rate of radioactive sources. When solving the $G(E)$ function, the influence of the K_{\max} and the optimization factor M on its calculation of the air-absorbed dose rate was considered, and the solution of the $G(E)$ function was optimized to improve the calculation accuracy. The relative deviation S of the air absorbed dose rate calculated by the optimized $G(E)$ function from the theoretical standard value was less than $\pm 1\%$. Finally, after the comparison of experimental measurements, it was found that the relative deviation between the calculated air absorbed dose rate of the $G(E)$ function and the measured results of the dose rate meter was less than $\pm 10\%$, indicating that the optimized $G(E)$ function value of the NaI(Tl) detector can be used for the application of air absorbed dose rate measurement.

KEYWORDS NaI(Tl) detector, $G(E)$ function, Air absorbed dose rate

CLC TL11

在日常环境辐射监测与核应急过程中需要快速准确获取放射源核素的种类、活度、剂量等相关信息。 γ 能谱仪被广泛应用于环境辐射监测,使用 γ 能谱仪可以得到辐射场的能谱信息,对能谱进行分析处理以获取放射源的相关信息。不同能量的 γ 射线在空气中产生相应的吸收剂量,使用 γ 能谱仪不能直接评估放射源的辐射剂量,为了快速准确评估辐射场的剂量特性可以使用能谱剂量转换的方法^[1-2]。通过能谱与剂量转换获取辐射场剂量信息,这种方法最初由日本原子能研究所提出,其做法是利用放射源在低辐射本底环境下使用高纯锗能谱仪测量辐射场能谱,然后通过理论计算的方法得到辐射场剂量率^[3-4]。

经过多年的发展,目前通过能谱转换剂量的方法主要有HASL标定法^[5]、总窗法^[6]、贝克公式法^[7-8]、 $G(E)$ 函数法^[9-12]等。HASL标定法有比较高的灵敏度,因为其刻度因子计算复杂,所以应用较少;总窗法标定简单,但在使用过程中引入的误差较大^[6];贝克公式法可以计算环境中离地面一定距离处的空气吸收剂量率但是需要满足相应的条件^[7-8]。 $G(E)$ 函数法适用的辐射环境广泛,可以有效解决探测器的能量响应问题^[9-12]。近年来,能谱剂量转换方法在国内得到相应的发展^[13-14],中国辐射防护研究院任晓娜^[9]对NaI(Tl)探测器测量辐射场剂量特性的加权积分法进行研究,将此方法应用于空气剂量率测量,验证了 $G(E)$ 函数的可行性。西北核技术研究所李惠彬等^[11]计算了一台便携式HPGe能谱仪的剂量转换函数,分析了探测器的角响应问题。曹蕾等^[15]研究了电制冷高纯锗探测器无卷积全谱法测量X/ γ 辐射剂量,使用蒙特卡罗模拟无卷积的方法进行能

谱剂量转换系数的求解。使用蒙特卡罗方法开展能谱剂量转换方法研究,可以解决实验条件限制的问题,通过蒙特卡罗模拟快速获取所需能量的 γ 射线,具有方便快捷的特点^[11,15,17]。

本文基于 Φ 7.5 cm×7.5 cm NaI(Tl)闪烁体探测器开展能谱剂量转换方法研究。使用蒙特卡罗模拟程序FLUKA对NaI(Tl)探测器进行仿真模拟,获取50 keV~2.5 MeV能量范围的不同能量 γ 射线能谱图。使用蒙特卡罗方法模拟计算NaI(Tl)探测器的能谱剂量转换函数具有方便快捷的特点。在全谱法的基础上利用 $G(E)$ 函数计算空气吸收剂量率,使用最小二乘法求解 $G(E)$ 函数。通过对 $G(E)$ 函数的求解过程进行优化降低理论计算引起的误差,提高 $G(E)$ 函数方法求解空气吸收剂量率精度,并将计算结果与剂量率仪测量结果进行对比分析。

1 方法原理

1.1 理论计算

吸收剂量是电离辐射授予某单位体积中物质的平均能量^[18]。对于能量为 E 、活度为 A 的放射性点源,距离其相应位置处产生的空气吸收剂量率 $\dot{D}(E)$ 可以根据公式(1)计算^[18]。

$$\dot{D}(E) = \lambda\phi \cdot (\mu_{\text{en}}/\rho) \cdot E \quad (1)$$

式中: $\dot{D}(E)$ 为空气吸收剂量率, $\mu\text{Gy/h}$; μ_{en}/ρ 为能量为 E 的 γ 射线在空气中的质量能量吸收系数^[18-20], m^2/kg ; λ 为转换系数; ϕ 为该点处 γ 射线的注量率, $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$,用公式(2)表示。

$$\phi = \frac{AP_{\gamma}}{4\pi d^2} \quad (2)$$

式中: A 表示放射源活度, Bq; P_γ 表示特征 γ 射线的发射概率; d 表示点源到探测器中心的距离, m。可以使用公式(1)计算标准点源在探测器中心处产生的 γ 辐射空气吸收剂量率。

1.2 $G(E)$ 函数原理

在全谱法的基础上引入 $G(E)$ 函数通过 γ 能谱计数与剂量转换的方式获取空气吸收剂量率信息。全谱法是把一定能量范围内计数响应相加来度量剂量的一种方法, 通过引入 $G(E)$ 函数转换因子使计数率与剂量率之间相互关联, 解决探测器能量响应问题^[18]。 $G(E)$ 函数计算 γ 射线空气吸收剂量率可以表示为公式(3)。

$$\dot{D} = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \dot{N}(E_i) \cdot G(E_i) dE \quad (3)$$

不同能量的 γ 射线在 NaI(Tl) 闪烁体探测器产生能量响应, 单位活度单位计数所对应的 γ 辐射空气吸收剂量率值即为该道的 $G(E)$ 函数值, 式(3) $\dot{N}(E_i)$ 代表能量为 E_i 道的计数率, NaI(Tl) 探测器能谱的道数 $n=1\ 024$, 在计算过程中可以对能谱道址进行合并处理, 降低计数的统计涨落, 提高 $G(E)$ 函数计算精度。 $G(E)$ 函数表达形式见公式(4)^[3-4]。

$$G(E) = \sum_{k=1}^{K_{\max}} A_k (\lg E)^{K-M-1} \quad (4)$$

式中: K_{\max} 是多项式的最高项, K_{\max} 的选取与标准谱图的数量相关。 K_{\max} 与 M 为可变参数, M 为 $G(E)$ 函数求解优化因子, A_k 是与多项式第 k 项对应的待定系数。通过蒙特卡罗软件 FLUKA 获取 100~2 000 keV 能量范围单能 γ 射线能谱图, 根据式(1), 通过理论计算的方法求解不同能量 γ 射线的空气吸收剂量率 \dot{D} , 利用 $G(E)$ 函数求得的与模拟能谱对应的空气吸收剂量率 \dot{D}' , \dot{D} 与 \dot{D}' 相对偏差 S 表示如式(5)。

$$S = \frac{\dot{D}' - \dot{D}}{\dot{D}} = \frac{\dot{D}'}{\dot{D}} - 1 \quad (5)$$

根据最小二乘法原理, 每一个标准能谱 $G(E)$ 函数计算值与理论计算值相等, 满足方程(6)。

$$\frac{\partial S^2}{\partial A_k} = 0 \quad (6)$$

2 仿真模拟

在计算 $G(E)$ 函数时需要获取一系列不同能量 γ 射线的标准能谱 $N(E)$ 。 γ 射线标准能谱可以通过实验测量与蒙特卡罗模拟计算两种方式获取^[12-13],

本文使用蒙特卡罗程序获取足够数量的单能 γ 射线响应能谱。

图1为NaI(Tl)探测器模拟图。

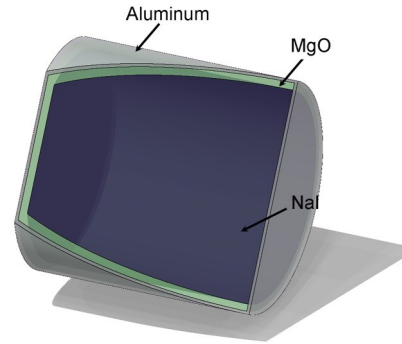


图1 NaI(Tl)探测器 FLUKA 模拟图
Fig.1 NaI(Tl) detector FLUKA simulation diagram

使用 FLUKA 蒙特卡罗程序对 $\Phi 7.5\text{ cm} \times 7.5\text{ cm}$ NaI(Tl) γ 探测器进行仿真建模。NaI(Tl) 闪烁体探测器探头主要有三部分组成: 铝壳、MgO 反射层和 NaI(Tl) 闪烁体晶体。铝壳厚度 1 mm; MgO 反射层厚度 0.5 mm; 闪烁体晶体 $\Phi 75\text{ mm} \times 75\text{ mm}$ 。使用 FLUKA 展宽文件对脉冲能量分布进行高斯展宽^[15,17] (Gaussian energy broadening, GEB)。 γ 射线能谱全能峰能量脉冲服从高斯分布, 即 γ 能谱的高斯展宽, γ 能谱高斯分布的特征反映了探测器的能量分辨率。在 FLUKA 进行模拟的时候可使用展宽文件对脉冲能量分布进行高斯展宽。

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

式中: FWHM 为探测器半高宽, keV; E 是射线的能量, keV; a 、 b 、 c 为探测器展宽系数, a 的单位是 keV, b 的单位是 $\text{keV}^{1/2}$, c 的单位为 keV^{-1} 。本实验所使用的 NaI(Tl) 探测器为 ORTEC 公司生产的尺寸为 $\Phi 7.5\text{ cm} \times 7.5\text{ cm}$ 的 NaI(Tl) 闪烁体探测器。根据 NaI(Tl) 探测器不同能量全能峰的半高宽数据进行非线性曲线拟合, 将拟合的 NaI(Tl) 探测器半高宽参数写入 FLUKA 展宽文件。图2为 NaI(Tl) 探测器半高宽拟合曲线。

NaI(Tl) 探测器的能量响应随入射光子的能量发生变化^[14]。 $G(E)$ 函数法求解空气吸收剂量率, 大部分能量的 $G(E)$ 函数值需要通过内插求解得到。使用内插的方法得到相应能量的 $G(E)$ 函数值会产生一定的误差, 并影响空气吸收剂量率计算的精度。为了使此方法计算空气吸收剂量率更加准确, 对 $G(E)$ 函数求解过程进行优化, 降低计算过程中的误差, 提高计算精度。在标准能谱能量选取方面, 根据 $G(E)$ 函数整体的变化趋势, 经过

分析, 我们所选取的低能部分入射光子能量的间隔较小, 中高能区的能量间隔逐渐扩大一些。选取能量 E 为 100 keV、150 keV、200 keV、250 keV、300 keV、400 keV、500 keV、600 keV、800 keV、1 000 keV、1 500 keV、2 000 keV, 获取 50 keV~2.5 MeV 能量范围内 12 组单能 γ 射线标准能谱, 其中放射源距离探测器空间距离为正前方 25 cm 处。图 3 为使用 FLUKA 模拟的各个能量标准能谱图。

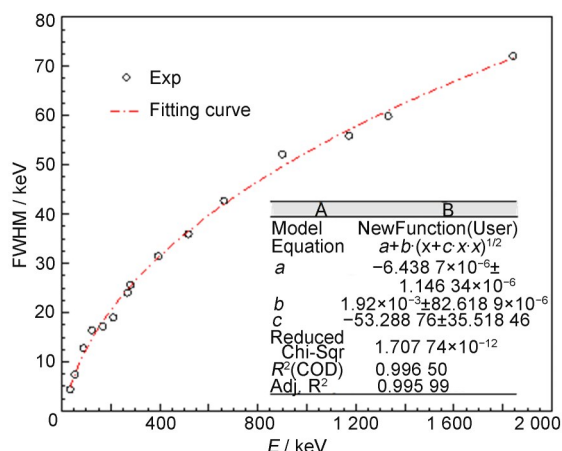


图2 NaI(Tl)探测器半高宽拟合曲线
Fig.2 NaI(Tl) detector half height and width fitting curve

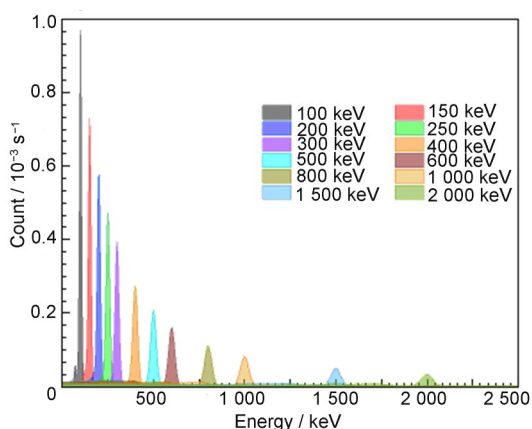


图3 FLUKA 模拟的不同能量 γ 射线能量谱图
(彩色见网络版)

Fig.3 FLUKA simulated energy spectra of γ -rays at different energies (color online)

3 计算与验证

3.1 $G(E)$ 函数计算

$G(E)$ 函数的计算是一个优化的过程, 通过给定 K_{\max} 值与 M 值, 用最小二乘法确定待定系数 A_k 。通过讨论分析 K_{\max} 值与优化因子 M 的取值以得到最小的相对偏差 S 。 K_{\max} 和 M 选择下列数值进行计算

与讨论分析: $K_{\max}=5、6、7、8、9、10、11、12$; $M=0、1、2、3$ 。图 4 为放射源距离探测器 25 cm 处 $K_{\max}=5、6、7、8、9、10、11、12$ 时 $G(E)$ 函数曲线。

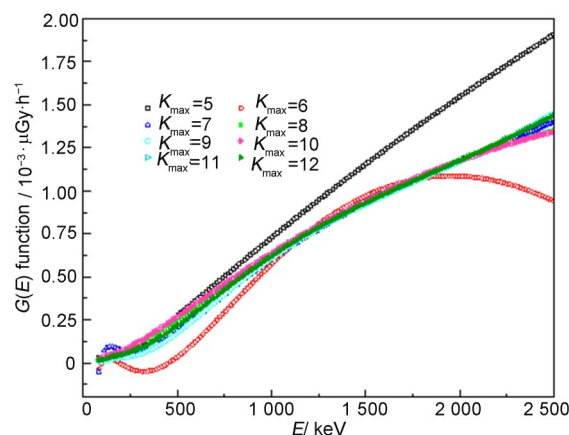


图4 K_{\max} 值不同时 $G(E)$ 函数曲线
Fig.4 $G(E)$ function curves with different K_{\max} values

从图 4 可以具体分析 $G(E)$ 函数曲线。 $K_{\max}=5、6、7、8、9、10、11、12$ 时, $G(E)$ 函数曲线趋势基本相同, 各数据点均在一定的范围内波动。计算的 $G(E)$ 函数曲线的整体形状与探测效率曲线趋势大致相反。根据图 4 中数据曲线通过对比可以发现, 当 $K_{\max}=5、6$ 时与 $K_{\max}=7、8、9、10、11、12$ 时的数据曲线相比存在一定偏差, 结合表 1 我们可以直观地发现, $K_{\max}=5、6$ 时所得到的 $G(E)$ 函数计算结果, 与剂量率理论计算值相对偏差 S 较大。 $K_{\max}=5$ 时的 $G(E)$ 函数值高于其他数据曲线, 位于整体数据的上方。 $K_{\max}=6$ 时的 $G(E)$ 函数值在 100~500 keV 能量范围内, 数值波动趋势起伏明显, 曲线在 300 keV 附近出现极值, 1 500 keV 能量之后曲线数值呈平缓上升趋势。当 $K_{\max}=7$ 时数据曲线在低能端 150 keV 附近函数值增大。以上三组数据曲线波动在相应能量段波动明显。 $K_{\max}=8、9、10、11、12$ 时 $G(E)$ 函数曲线整体数据相对偏差 S 在 $\pm 5\%$ 以内, 个别数据偏差在 $\pm 5\% \sim \pm 10\%$ 波动。

表 1 为 $M=0$ 时, $G(E)$ 函数计算值与剂量率理论计算结果相对偏差 S 随 K_{\max} 变化数据。从表 1 中选取相对偏差 S 较小时的 K_{\max} 值, 用作 $G(E)$ 函数的求解。结合图 4 与表 1 可知, $G(E)$ 函数的计算精度与 K_{\max} 值的选取存在一定的联系, 随着 K_{\max} 值的增大 $G(E)$ 函数剂量率计算结果精度逐渐提高, 选取 $K_{\max}=11$ 作为 $G(E)$ 函数求解的 K 值。下一步分析优化因子 M 对 $G(E)$ 函数的影响。

表1 K_{\max} 值不同时剂量率 $G(E)$ 函数计算值与理论计算值相对偏差 S
Table 1 Relative deviation of the calculated values of the dose rate $G(E)$ function from the theoretical calculated value S with different values of K_{\max}

E / keV	$S / \%$							
	$K_{\max}=5$	$K_{\max}=6$	$K_{\max}=7$	$K_{\max}=8$	$K_{\max}=9$	$K_{\max}=10$	$K_{\max}=11$	$K_{\max}=12$
100	0.18	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03
150	-41.97	72.53	153.30	6.00	-4.41	7.34	0.02	0.03
200	-30.20	39.92	72.55	0.02	0.02	0.04	0.02	-0.03
250	-13.70	12.97	22.36	-0.24	0	-0.36	0.03	0.06
300	-2.76	0	0.02	-0.04	-0.01	-0.16	-0.09	-0.09
400	6.85	0.41	-1.90	0.56	-0.04	0.29	0.16	0.20
500	9.16	0.07	-0.15	0.19	0.17	-0.05	0.10	0.03
600	10.14	-2.97	-0.20	0.09	-0.51	0.06	-0.19	-0.31
800	11.43	-0.23	0.58	-0.48	-0.33	-0.54	-0.27	-0.39
1 000	14.27	0.18	-0.52	0.37	0.24	0.45	0.39	0.26
1 500	19.36	5.61	0.04	-0.05	-0.02	-0.07	-0.16	-0.18
2 000	25.43	-0.02	0.03	0	0	0	0.04	0.05

图5为放射源距离探测器25 cm处 $K_{\max}=11$; $M=0, 1, 2, 3$ 时 $G(E)$ 函数曲线。

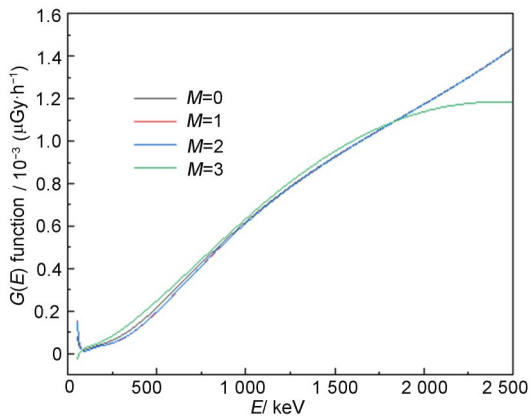


图5 优化因子 M 不同时 $G(E)$ 函数曲线(彩色见网络版)
Fig. 5 Optimization factor M is different from the $G(E)$ function curve (color online)

从图5我们可以进一步分析, 优化因子 M 对 $G(E)$ 函数值计算产生的影响。当 $M=0, 1, 2$ 时, 3条 $G(E)$ 函数曲线整体稳定, 在相应能量范围内各个数据曲线吻合较好。当 $M=3$ 时, $G(E)$ 函数曲线在1 500 keV之后较其他3条曲线相比上升平缓, 结合表2发现, 在1 500 keV位置处其相对偏差 S 为

$\pm 1\%$ 左右。 $M=0, 1, 2, 3$ 时, 4组 $G(E)$ 函数数据曲线均在100 keV左右出现极值, 在100 keV之后数据值均呈现递增趋势。在1 500 keV~2.5 MeV能量段, $M=3$ 时的 $G(E)$ 函数曲线与 $M=0, 1, 2$ 时相应能量的 $G(E)$ 函数值偏差较大。根据表2相对偏差 S 发现, $M=0, 1, 2$ 时12组能量 γ 射线相对偏差 S 均在 $\pm 1\%$ 以内, $M=3$ 时相对偏差 S 在1 500 keV之后相对偏差增大。

表2为优化因子 $K_{\max}=11$, M 不同时相对偏差 S 数据。我们可以从表2中发现, M 值不同时相对偏差 S 变化稍有不同, 选取合适的 M 值可以提高 $G(E)$ 函数的计算精度。结合图5与表2综合分析优化因子 M 对 $G(E)$ 函数计算产生的影响。 $G(E)$ 函数在100~800 keV相应能量范围内, $M=0$ 时与 $M=1, 2$ 时相比, 相对偏差 S 较小。对于本文的工作而言, 选取 $M=0$ 求解 $G(E)$ 函数较为合适。综合所述, 对于 $K_{\max}=5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12$; $M=0, 1, 2, 3$, 我们可以选择 $K_{\max}=11$ 、 $M=0$ 求解 $G(E)$ 函数, 此时 $G(E)$ 函数计算值与剂量率理论计算值相对偏差 S 在 $\pm 1\%$ 以内, 可以提高 $G(E)$ 函数计算精度。

表2 优化因子 M 不同时相对偏差 S
Table 2 The optimization factor M varies with the relative deviation S

E / keV	$S / \%$			
	$M=0$	$M=1$	$M=2$	$M=3$
100	0.04	0.04	0.04	-0.06
150	0.02	0.01	0.01	0.75

续表

E / keV	$S / \%$			
	$M=0$	$M=1$	$M=2$	$M=3$
200	0.02	0.04	0.04	-1.44
250	0.03	-0.46	-0.44	0.52
300	-0.09	-0.05	-0.05	1.16
400	0.16	-0.02	-0.02	0.76
500	0.10	0.27	0.26	-0.47
600	-0.19	-0.16	-0.16	-0.87
800	-0.27	-0.32	-0.32	-0.94
1000	0.39	0.37	0.37	0.64
1500	-0.16	-0.14	-0.14	1.14
2000	0.04	0.04	0.04	-0.65

3.2 实验测量与验证

根据§3.1,在 $G(E)$ 函数求解过程中我们选取合适的 K_{\max} 与优化因子 M , 可以有效提高 $G(E)$ 函数计算空气吸收剂量率时的精度。根据§3.1 的讨论结果,我们对其进行实验测量来验证所计算的 $G(E)$ 函数值在实际测量方面的可行性。选取不同的放射源进行实验验证,图6(a)为 NaI(Tl)探测器现场实验测量布局;图6(b)为标准物质铀钍矿粉;图6(c)为 ^{137}Cs 、 ^{22}Na 、 ^{60}Co 标准点源。将探测器架高放射源距离探测器 25 cm, 下方放置不同放射源。实验所用放射源包括标准物质铀钍矿粉、 ^{137}Cs 、 ^{22}Na 、 ^{60}Co 标准点源, 3 个标准点源配合使用。放射源具体信息如表 3 所示。

用 NaI(Tl)探测器测量样品获取相应的能谱图使用 $G(E)$ 函数计算其相应的空气吸收剂量率。使用剂量率仪器分别对不同的放射源进行测量,本次使用的剂量率仪器为多功能 THERMO FH 40 G 辐射监测仪, 能量范围 48~4 400 keV。使用剂量率

仪对不同样品进行多次测量取平均值作为辐射场剂量率的标准值, 实验测量结果如表 4 所示。

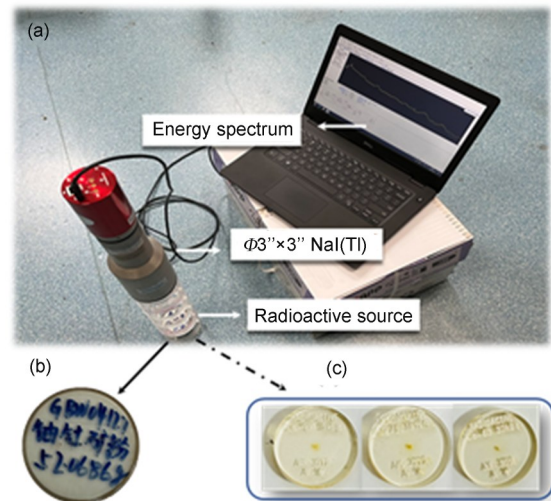


图6 (a) NaI(Tl)探测器实验测量布局;(b)标准物质铀钍矿粉;(c) ^{137}Cs 、 ^{22}Na 、 ^{60}Co 标准点源
 Fig.6 (a) Experimental measurement layout of NaI(Tl) detector; (b) standard material uranium thorium mineral powder; (c) ^{137}Cs 、 ^{22}Na 、 ^{60}Co standard point sources

表3 实验测量标准源信息
 Table 3 Experimental measurement standard source information

标准源 Standard sources	尺寸 / mm Size	活度信息 Activity information	相对不确定度 / % Relative uncertainty	日期 Date
^{60}Co	$\Phi 25 \times 3$	39.9 kBq	3	2017.10
^{137}Cs	$\Phi 25 \times 3$	8.96 kBq	3	2017.10
^{22}Na	$\Phi 25 \times 3$	38.1 kBq	3	2017.10
铀钍天然系矿石标准物质 Uranium serie and thorium serie ore	$\Phi 50 \times 20$	^{238}U 9.31/ ^{234}U 9.42/ ^{232}Th 2.96/ ^{230}Th 9.24/ ^{226}Ra 9.45/ ^{210}Pb 9.41/ ^{40}K 1.13 (Bq/g)	≤ 3	2015.08

表4 $G(E)$ 函数计算剂量率与剂量率仪测量结果对比
Table 4 Comparison of dose rate calculation by $G(E)$ function and dose rate meter measurement

实验测量 Experimental measurements	剂量率仪测量值 / (nGy·h ⁻¹) Dose rate meter measurements	$G(E)$ 计算值/ (nGy·h ⁻¹) Calculated value of $G(E)$	相对偏差 / % Relative deviation
实验测量环境 Experimental measurement environment	130.00	131.78	1.37
标准物质铀钍矿粉 Uranium serie and thorium serie ore	135.00	129.50	-4.07
¹³⁷ Cs 标准源 ¹³⁷ Cs standard source	145.00	142.57	-1.68
²² Na 标准源 ²² Na standard source	182.00	198.25	8.93
¹³⁷ Cs、 ⁶⁰ Co 混合点源 ¹³⁷ Cs, ⁶⁰ Co hybrid point source	250.00	244.08	2.37
¹³⁷ Cs、 ²² Na、 ⁶⁰ Co 混合点源 ¹³⁷ Cs, ²² Na, ⁶⁰ Co hybrid point source	285.00	294.91	3.48

4 结论

本文基于 Φ 7.5 cm×7.5 cm 的 NaI(Tl) 闪烁体探测器采用蒙特卡罗的方法研究 γ 射线空气吸收剂量率的计算方法, 在全谱法的基础上引入 $G(E)$ 函数进行能谱与剂量转换方法的研究。求解 $G(E)$ 函数的过程中深入讨论 K_{\max} 与优化因子 M 的选取, 提高 $G(E)$ 函数的计算精度。经过理论计算, 选取合适的 K_{\max} 、 M 值, 当 $K_{\max}=11$ 、 $M=0$ 时, $G(E)$ 函数计算值与标准值相对偏差 S 为 $\pm 1\%$ 。基于以上计算结果进行实验测量, 选取标准物质与标准点源进行实验测量验证。实验测量发现, 使用 $G(E)$ 函数计算的剂量率与剂量率仪多次测量的结果相对偏差在 $\pm 10\%$ 以内, 验证了我们所求解的 $G(E)$ 函数值在实验测量时的可行性。可以将求解的 NaI(Tl) 探测器的 $G(E)$ 函数用于测量 γ 射线空气吸收剂量率对辐射场剂量特性进行准确评估。理论计算与实验测量会存在一定偏差, 下一步的研究工作可进一步细化算法与实验测量方法, 以达到 NaI(Tl) 探测器精确测量空气吸收剂量率与多参数获取放射性核素信息的效果。

作者贡献声明 王雪建负责文章调研、理论模拟计算、撰写论文; 於国兵和郭建友提供研究思路和实验平台; 许丰和顾先宝为论文的实验部分提供支持并完成相关内容; 庞杨负责校对论文内容, 修订论文。全体作者均已阅读并同意最终的文本。

参考文献

- Andoh M, Yamamoto H, Kanno T, *et al.* Measurement of ambient dose equivalent rates by walk survey around Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using KURAMA- II I until 2016[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2019, **210**: 105812. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.09.010.
- 王南萍, 裴少英, 黄英, 等. 环境 γ 能谱测量方法研究及应用[J]. 辐射防护, 2005, **25**(6): 347-356. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-8187.2005.06.004.
WANG Nanping, PEI Shaoying, HUANG Ying, *et al.* Research on and application of methods for gamma-ray spectrometry in environmental monitoring[J]. Radialization Protection, 2005, **25**(6): 347-356. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-8187.2005.06.004.
- Moriuchi S. A new method of dose evaluation by spectrum-dose conversion operator and determination of the operator[R]. Tokyo: Japan Atomic Energy Research Institute, 1970.
- Terada H, Sakai E J, Katagiri M. Environmental gamma-ray exposure rates measured by *in-situ* Ge(Li) spectrometer[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1980, **17**(4): 281-290. DOI: 10.1080/18811248.1980.9732580.
- Beck H L, DeCampo J, Gogolak C. *In situ* Ge(Li) and NaI(Tl) gamma-ray spectrometry[R]. New York: Health and Safety Laboratory, 1972.
- Lowder W M, Beck H L, Condon W J. Spectrometric

- determination of dose rates from natural and fall-out gamma-radiation in the United States, 1962-63[J]. Nature, 1964, **202**(4934): 745-749. DOI: 10.1038/202745a0.
- 7 Moriuchi S, Miyanaga I. A spectrum etric method for measurement of low-evel gamma exposure dose[J]. Health physics, 1966, **12**(5): 541-551.
 - 8 Beck H L, Condon W J, Lowder W M. Spectrometric techniques for measuring environmental gamma radiation [R]. New York: Health and Safety Laboratory, 1964.
 - 9 任晓娜, 胡遵素. 用 NaI(Tl)探测器测量 γ 辐射场剂量特性的加权积分法研究[J]. 辐射防护, 2003, **23**(2): 65-73. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-8187.2003.02.001.
REN Xiaona, HU Zunsu. Study on a weighted integration method by using NaI(Tl) detector for measuring dosimetric properties of the gamma-radiation field[J]. Radialization Protection, 2003, **23**(2): 65-73. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-8187.2003.02.001.
 - 10 Chen W, Feng T C, Liu J, *et al.* A method based on Monte Carlo simulation for the determination of the $G(E)$ function[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2015, **163**(2): 217-221. DOI: 10.1093/rpd/ncu145.
 - 11 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 method and technology of measuring γ dose by γ energy spectrum full spectrum method[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.
 - 12 李惠彬, 贾明雁, 吴睿, 等. 便携式HPGe γ 谱仪能谱剂量转换函数计算[J]. 核电子学与探测技术, 2013, **33**(6): 699-704. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2013.06.011.
LI Huibin, JIA Mingyan, WU Rui, *et al.* Calculation of spectrum to dose conversion function of portable HPGe γ spectrometer[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2013, **33**(6): 699-704. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2013.06.011.
 - 13 赖万昌, 刘艳芳, 唐丽丽, 等. 用 $G(E)$ 函数法计算 γ 射线空气吸收剂量率[J]. 核技术, 2011, **34**(9): 679-682.
LAI Wanchang, LIU Yanfang, TANG Lili, *et al.* Determination of air dose rate of γ -rays by using $G(E)$ function method[J]. Nuclear Techniques, 2011, **34**(9): 679-682.
 - 14 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): 070403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.070403.
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): 070403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.070403.
 - 15 曹蕾, 张耀锋, 杨扬, 等. MC模拟无卷积全谱转换法测量X, γ 辐射剂量[J]. 强激光与粒子束, 2022, **34**(2): 026005. DOI: 10.11884/HPLPB202234.210300.
CAO Lei, ZHANG Yaofeng, YANG Yang, *et al.* Measurement of environmental level X, γ dose with conversion of complete spectra without deconvolution method of MC simulation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, **34**(2): 026005. DOI: 10.11884/HPLPB202234.210300.
 - 16 Moriuchi S, Nagaoka T, Saito K, *et al.* Theoretical analysis and dose evaluation of low-level external radiation in environment[R]. Tokyo: Radiation Effects Research, 1990.
 - 17 黄建微, 王乃彦. 基于蒙特卡罗方法的NaI探测器效率刻度及其测量韧致辐射实验[J]. 物理学报, 2014, **63**(18): 180702. DOI: 10.7498/aps.63.180702.
HUANG Jianwei, WANG Naiyan. Efficiency calibration for a NaI scintillation detector based on Monte-Carlo process and preliminary measurements of bremsstrahlung [J]. Acta Physica Sinica, 2014, **63**(18): 180702. DOI: 10.7498/aps.63.180702.
 - 18 夏益华. 高等电离辐射防护教程[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010: 12-18.
XIA Yihua. Advanced ionizing radiation protection course [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2010, 12-18.
 - 19 International Commission on Radiation Units and Measurements. Gamma-ray spectrometry in the environment[R]. Bethesda: International Commission on Radiation Units & Measurements, 1994.
 - 20 National Institute of Standards and Technology Physical measurement laboratory; XCOM: Photon Cross Sections Database[EB/OL]. (2019-12-26) [2023-03-10]. <http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>.