强激光与粒子束
High Power Laser and Particle Beams

基于蒙卡模拟能量响应的CLYC探测器γ能谱解析方法

李宇浩　郑洪龙　庹先国　贺平　魏世平　杨剑波　王朝林　李宇航　余佳佳　邓淇元

Gamma spectrum analysis method for CLYC detectors based on Monte Carlo-simulated energy response

Li Yuhao, Zheng Honglong, Tuo Xianguo, He Ping, Wei Shiping, Yang Jianbo, Wang Chaolin, Li Yuhang, Yu Jiajia, Deng Qiyuan

引用本文:
李宇浩, 郑洪龙, 庹先国, 贺平, 魏世平, 杨剑波, 王朝林, 李宇航, 余佳佳, 邓淇元. 基于蒙卡模拟能量响应的CLYC探测器γ能谱解析方法[J]. 强激光与粒子束, 2026, 38: 096002. doi: 10.11884/HPLPB202638.250242
Li Yuhao, Zheng Honglong, Tuo Xianguo, He Ping, Wei Shiping, Yang Jianbo, Wang Chaolin, Li Yuhang, Yu Jiajia, Deng Qiyuan. Gamma spectrum analysis method for CLYC detectors based on Monte Carlo-simulated energy response[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2026, 38: 096002. doi: 10.11884/HPLPB202638.250242

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11884/HPLPB202638.250242

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于Geant4的α粒子能谱模拟研究及软件设计实现

Research and software design of α particle energy spectrum simulation based on Geant4

强激光与粒子束. 2023, 35: 126003-1-126003-9　https://doi.org/10.11884/HPLPB202335.230143

Timepix探测器质子响应的蒙特卡罗模拟

Monte Carlo simulation of proton response of Timepix detectors

强激光与粒子束. 2025, 37: 022001-1-022001-6　https://doi.org/10.11884/HPLPB202537.240199

基于邦纳多球谱仪探测的中子能谱解谱研究

Neutron spectrum unfolding based on the detection of Bonner multi-sphere spectrometer

强激光与粒子束. 2024, 36: 126003-1-126003-6　https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.240156

面积对垂直NPN结构探测器直流X射线响应特性的影响

Effect of area on X-ray response characteristics of vertical NPN detectors

强激光与粒子束. 2025, 37: 106010-1-106010-6　https://doi.org/10.11884/HPLPB202537.250202

用于探测器标定的单能X射线源研究

Single energy X-ray source for calibration of X-ray detectors

强激光与粒子束. 2023, 35: 091007-1-091007-6　https://doi.org/10.11884/HPLPB202335.220422

一种基于^{4}He气闪烁体的组合式中子探测器中子灵敏度研究

Study on neutron sensitivity of a composite neutron detector based on ^{4}He gas scintillator

强激光与粒子束. 2025, 37: 106006-1-106006-7　https://doi.org/10.11884/HPLPB202537.250218

第 38 卷第 9 期
2026 年 9 月

强 激 光 与 粒 子 束
HIGH POWER LASER AND PARTICLE BEAMS

Vol. 38，No. 9
Sep.，2026

·蒙特卡罗方法及其应用·

基于蒙卡模拟能量响应的 CLYC 探测器 γ 能谱解析方法*

李宇浩， 郑洪龙， 庹先国， 贺 平， 魏世平， 杨剑波，
王朝林， 李宇航， 余佳佳， 邓淇元

（四川轻化工大学 射线检测学科与技术中心，四川 宜宾 644000）

摘 要： 对于能量分辨能力不足的探测器，能谱解析工作能够提高核素识别和活度计算的准确度。CLYC 探测器以其能够同时探测中子和γ光子的优点被广泛应用于中子-光子双模探测领域中，其能量分辨能力与高纯锗、碲锌镉等半导体探测器相比相对较差，在复杂的辐射环境中难以保证对γ能谱的分析精度。采用蒙特卡罗方法计算 CLYC 探测器的γ能量响应函数，并通过插值法构建探测器的能量响应矩阵，利用极大似然期望最大化算法（MLEM）进行γ能谱解析。选取 0～3 MeV 的能量区间，每间隔 0.05 MeV 计算一个响应函数，利用插值算法构建了 CLYC 探测器对γ射线的高精度响应矩阵，并结合 MLEM 算法对 ^{226}Ra 能谱、^{60}Co–^{137}Cs 混合能谱及 ^{152}Eu 复杂能谱进行解谱验证，对特征峰面积进行了定量计算。结果表明：该方法能够有效克服探测器能量分辨率的限制，解谱后特征峰位清晰，复杂能谱中的重峰区域实现了有效分离，特征峰面积计算结果稳定，清晰反映了入射γ射线的能量和强度信息，提高了能谱分析的精度。

关键词： 能谱解析；MLEM 算法；CLYC 探测器；响应函数

中图分类号： TL81 **文献标志码：** A **doi**: 10.11884/HPLPB202638.250242

Gamma spectrum analysis method for CLYC detectors based on Monte Carlo-simulated energy response

Li Yuhao， Zheng Honglong， Tuo Xianguo， He Ping， Wei Shiping， Yang Jianbo，
Wang Chaolin， Li Yuhang， Yu Jiajia， Deng Qiyuan

（*Research Center for Ray Detection Discipline and Technology*, *Sichuan University of Science and Engineering*, *Yibin* 644000, *China*）

Abstract: [**Background**] Precise γ-ray spectrum analysis is essential for nuclide identification and activity quantification, but faces significant challenges when using low-resolution detectors such as CLYC scintillators in complex radiation fields. The limited energy resolution of these detectors often leads to overlapping peaks and obscured characteristic spectral features, which complicates accurate spectrum interpretation. [**Purpose**] This study aims to overcome the inherent energy resolution limitations of CLYC detectors by developing a spectrum deconvolution method that can recover clear spectral information and separate overlapping peaks in complex γ-ray spectra. [**Methods**] A detector energy response matrix was constructed by combining Monte Carlo simulations to calculate γ-ray energy response functions with an interpolation method. Response functions were derived across the 0−3 MeV energy range at intervals of 0.05 MeV to ensure high precision. Spectrum deconvolution was then performed using the Maximum Likelihood Expectation Maximization (MLEM) algorithm, which was then applied to analyze the original complex spectrum. [**Results**] The method was validated by unfolding the spectra of a ^{226}Ra source, a mixed ^{60}Co–^{137}Cs source, and the complex spectrum of ^{152}Eu. The unfolded spectrum exhibited well-resolved characteristic peaks, effective separation of severely overlapping spectral regions, and stable quantitative results for characteristic

* **收稿日期:** 2025-07-29； **修订日期:** 2026-01-23
基金项目: 国家自然科学基金项目 (42204179、42374227); 四川省科技计划项目 (2024NSFSC1358); 核测量方法与智能装备“652”科研创新团队项目 (SUSE652A001)
联系方式: 李宇浩，liyuhaosuse@163.com。
通信作者: 郑洪龙，zhenghlswust@126.com。

peak areas. [**Conclusions**] The proposed approach significantly enhances the precision of γ-ray spectrum analysis with CLYC detectors. It successfully reveals the energy and intensity information of incident γ-ray, mitigates the detector's resolution limitations, and provides a reliable method for analyzing spectra in complex radiation environments.

Key words: spectrum unfolding, MLEM algorithm, CLYC detector, response function

由铈掺杂激活的 Cs_2LiYCl_6(CLYC)探测器是一款兼具中子-伽马射线双模探测能力的新型探测器,常用于复杂辐射背景下的辐射测量,CLYC 属于钾冰晶石类闪烁晶体,其具备以下几个优点:光产额高、能量分辨率较好、非比例响应低、中子-光子甄别能力优异等[1-3]。CLYC 探测器的能量分辨率在 0.662 MeV 处一般为 5%,略优于碘化钠,但与高纯锗、碲锌镉一类的半导体探测器相比仍存在不足,在目前的核辐射测量中,核素的种类丰富、特征能量多,在能谱中出现重峰的概率较大,对能谱的测量和分析带来了一定的困难,尤其是在核素的准确识别和活度分析方面影响更加明显[4-6]。采用合适的解谱方法可以弥补这一缺陷,常见的解谱方法有最小二乘法、剥谱法、Gravel 法、神经网络方法、遗传算法、迭代法等[7-12]。本文使用蒙特卡罗方法模拟计算 CLYC 探测器的 γ 射线能量响应函数,并通过插值算法获得探测器的能量响应矩阵,结合 MLEM 极大似然期望最大化算法,实现对 ^{226}Ra 能谱、^{60}Co - ^{137}Cs 混合能谱及 ^{152}Eu 复杂能谱的解析,对特征能量峰位和特征峰面积进行了准确识别与计算,基本验证了响应矩阵的准确性和解谱方法的可靠性。

1 原理与方法

1.1 能谱解析方程

CLYC 探测器测量 γ 能谱,可以理解为源发射的所有 γ 光子中,有一部分能够在探测器中引起能量响应,进入探测器的 γ 光子能够在 γ 能谱的每一个道址位置上存在一定概率产生计数。在一段时间内,所有进入探测器的 γ 光子在每一道址上引起的计数总和,即为该时间段探测器测得的一个 γ 能谱。在该过程中,探测器输出的 γ 能谱是源发射的 γ 光子与探测器能量响应的卷积,即,

$$y(i)=\sum_{j=0}^{N-1} r(i,j)g(j),\quad i=1,2,\cdots,N \tag{1}$$

式中:$y(i)$为探测器输出 γ 能谱;i 为输出 γ 能谱的道址序号;$r(i,j)$为探测器的能量响应,即为道址 j 处对应能量的 1 个入射 γ 光子在道址 i 处引起的计数概率;$g(j)$为原始 γ 光子,j 为入射 γ 能谱的道址序号;N 为能谱道址总数,$1\leqslant i\leqslant N$, $1\leqslant j\leqslant N$。上式可改为矩阵形式

$$\begin{bmatrix} y(1)\\ y(2)\\ \vdots\\ y(N)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} r_1(1,1) & r_2(1,2) & \cdots & r_N(1,N)\\ r_1(2,1) & r_2(2,2) & \cdots & r_N(2,N)\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ r_1(N,1) & r_2(N,1) & \cdots & r_N(N,N)\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} g(1)\\ g(2)\\ \vdots\\ g(N)\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{Y}=[y(1),y(2),\cdots,y(N)]$, $\boldsymbol{Y}$ 为探测器的输出 γ 能谱矩阵;$\boldsymbol{R}=[r_1(1,1),r_1(1,2),\cdots,r_N(N,N)]$, $\boldsymbol{R}$ 为响应矩阵;$\boldsymbol{G}=[g(1),g(2),\cdots,g(N)]$, $\boldsymbol{G}$ 为原始 γ 光子的矩阵。

1.2 MLEM 算法

针对能谱解析方程,需要采用合适的反卷积迭代算法进行求解,即可获得源发射的原始 γ 光子矩阵 $\boldsymbol{G}$,实现 γ 能谱解析。本文采用极大似然期望最大化算法对能谱进行反卷积迭代。

MLEM 算法是迭代法中性能比较优异的算法之一,该算法是一种基于泊松统计模型的求解最大似然估计的迭代算法,相较于最小二乘法、逆矩阵法等传统能谱分析方法,其能够有效适应核辐射测量中的统计涨落[13],且由于算法的迭代形式,在提高信噪比的同时能够避免非负解,有效减弱了探测器的展宽效应,提升了重峰的分辨能力,弥补了探测器自身分辨率不足的缺陷。

MLEM 算法的迭代格式为

$$G_j^{(k+1)}=\frac{G_j^{(k)}}{\sum\limits_{i=1}^{N}R_{ij}}\sum_{i=1}^{N}R_{ij}\frac{Y_i}{\sum\limits_{i=1}^{N}R_{ij}G_j^{(k)}} \tag{3}$$

式中:k 为迭代次数;$G_j^{(k)}$为经过 k 次迭代后的第 j 道道址的计数;$Y(i)$为测量伽马谱中第 i 道址的计数;R_{ij}为响应矩

阵元素；N 为 γ 能谱道址的总数。

1.3 响应矩阵构建方法

响应函数是描述探测器对某单能入射 γ 射线的单个粒子在每一个道址上引起计数的概率分布函数。响应函数是计算响应矩阵的基础。在构建响应矩阵的过程中，结合蒙特卡罗模拟和插值算法能够在加快速度的同时保证构建精度，使用 MCNP 每间隔 0.05 MeV 模拟一个响应函数，通过插值算法可在两个响应函数之间计算出另一个响应函数。如图 1 所示，首先假设有两个响应函数分别是 $R_1(E_1,e)$ 和 $R_2(E_2,e)$，将当前响应函数切分为四个部分。一般将假定插值段分为 n 个部分。然后可以分类计算得到每个插值响应函数 $R_i(E_i,e)$ 对应的点[14]。

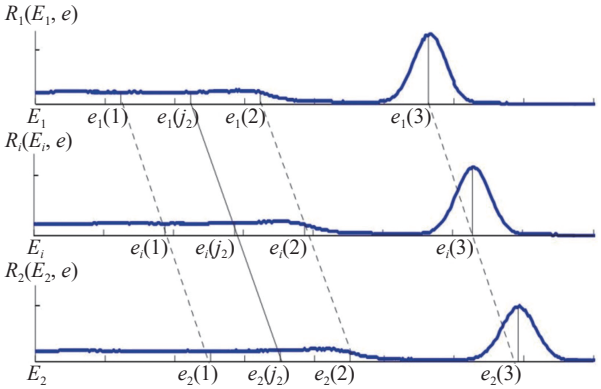

Fig. 1 Interpolation method between two simulated response functions

图 1 两个模拟响应函数之间的插值方法

$$e_i(k)=\frac{E_i-E_2}{E_1-E_2}[e_1(k)-e_2(k)]+e_2(k),\quad k\in(1,n) \tag{4}$$

对于每部分 k 和每个 e_i，找出匹配的一对点 $e_1(j_k)$、$e_2(j_k)$，分别为

$$e_1(j_k)=\frac{e_i(j_k)-e_i(k-1)}{e_i(k)-e_i(k-1)}[e_1(k)-e_1(k-1)]+e_1(k-1) \tag{5}$$

$$e_2(j_k)=\frac{e_i(j_k)-e_i(k-1)}{e_i(k)-e_i(k-1)}[e_2(k)-e_2(k-1)]+e_2(k-1) \tag{6}$$

从响应函数 R_1、R_2 中，读出其值

$$y_i(j_k)=R_1[E_1,e_1(j_k)],\quad y_2(j_k)=R_2[E_2,e_2(j_k)] \tag{7}$$

然后，响应函数 R_i 中对应能量 e_i 的值由插值给出

$$y_i(j_k)=\frac{E_i-E_2}{E_1-E_2}[y_1(j_k)-y_2(j_k)]+y_2(j_k) \tag{8}$$

用上述插值方法可以生成所有的响应函数，通过该算法填充未模拟计算的间隔区域，可以获取能量范围内整个响应矩阵 $\boldsymbol{R}$。

1.4 能谱解析工作流程

基于上述 γ 能谱解析方程、MLEM 迭代算法以及响应矩阵插值方法，本文提出的 CLYC 探测器 γ 能谱解析方法工作流程如图 2 所示，主要分为响应矩阵构建和能谱解析两个阶段。

首先通过 MCNP 建立探测器物理模型，计算不同特征能量下的响应函数，随后根据插值算法构建高精度探测器响应矩阵，最后将实测 γ 能谱与响应矩阵代入 MLEM 迭代方程进行统计迭代求解，最终得到入射 γ 射线的真实能谱，从而实现对 CLYC 探测器的 γ 能谱解析。

2 实 验

采用 CLYC 探测器及谱仪系统对实验室的标准 γ 源 ^{137}Cs、^{60}Co、^{226}Ra 进行 γ 能谱测量实验，源放置于探测器正前方 5 cm 处，设置测量时间 10 min，如图 3 所示。实验测量得到的 ^{137}Cs–^{60}Co 混合源 γ 能谱及 ^{226}Ra 的 γ 能谱如图 4 所示，其中图 4(a)为 ^{137}Cs–^{60}Co 混合源 γ 能谱，图 4(b)为 ^{226}Ra 的 γ 能谱。通过计算得到 ^{137}Cs–^{60}Co 混合源 γ 能谱中特征能量 0.662 MeV、1.173 MeV、1.332 MeV 对应的半高宽分别为 0.070 12 MeV、0.079 39 MeV、0.084 02 MeV。

3 结果与分析

3.1 CLYC 探测器蒙卡建模

为了使模拟谱反映出统计涨落、电子学噪声等因素对能谱的影响，需要将模拟计算的 γ 能谱做高斯展宽，使特征峰呈现高斯分布的状态。在 MCNP 中可以通过 FT8 GEB 卡输入高斯展宽系数实现对能量沉积谱的高斯展宽，在 MCNP 中，高斯展宽的 3 个系数 a、b、c 满足[15-16]

$$\sigma_{\mathrm{FWHM}}=a+b\times\sqrt{E+c\times E^2} \tag{9}$$

式中：a、b、c为高斯展宽系数；σ_{FWHM}为能谱半高宽；E 为入射光子能量。根据实验测得的相关参数，根据式(9)，代入^{60}Co 和^{137}Cs 的 3 组半高宽与能量的数据，两边平方整理得到一个非线性方程组，使用 Matlab 求解该方程组得到 a、b、c 分别为 0.072 895、0.009 079、0.000 669。

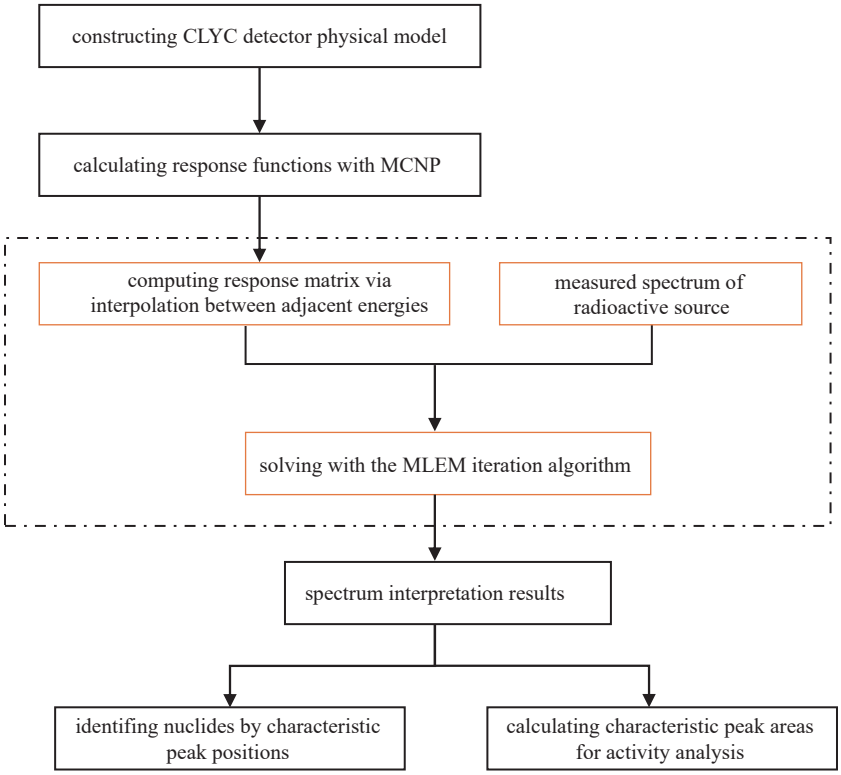

Fig. 2　CLYC detector energy spectrum analysis process

图 2　CLYC 能谱解析工作流程

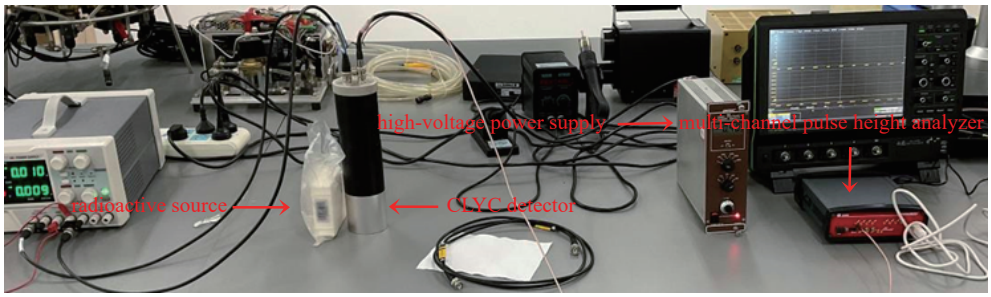

Fig. 3　CLYC detector energy spectrum measurement experiment

图 3　CLYC 能谱测量实验

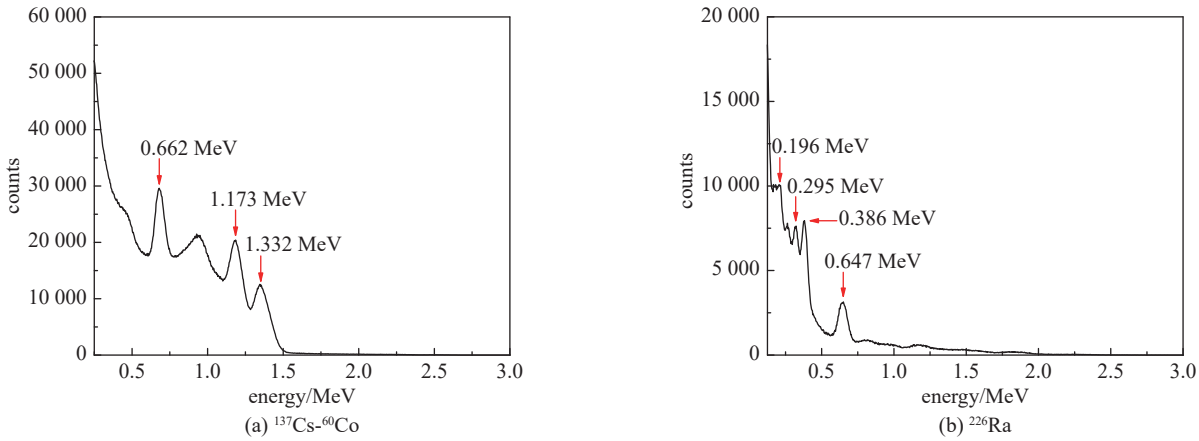

Fig. 4　Gamma-ray spectra of ^{60}Co–^{137}Cs mixed source and ^{226}Ra source

图 4　^{60}Co–^{137}Cs 混合源及^{226}Ra 能谱图

本文使用的探测器为直径 6.5 cm、高 25 cm 的圆柱体，晶体为直径、高度都为 3.18 cm 的圆柱体，晶体密度为 3.31 g/cm^3，探测器外部为铝壳，数字化谱仪为 CAEN 公司的 DT5725S。源设置为距离探测器正前方 5 cm 的各向同性点源，图 5 为根据上述参数建立的 MCNP 计算模型。

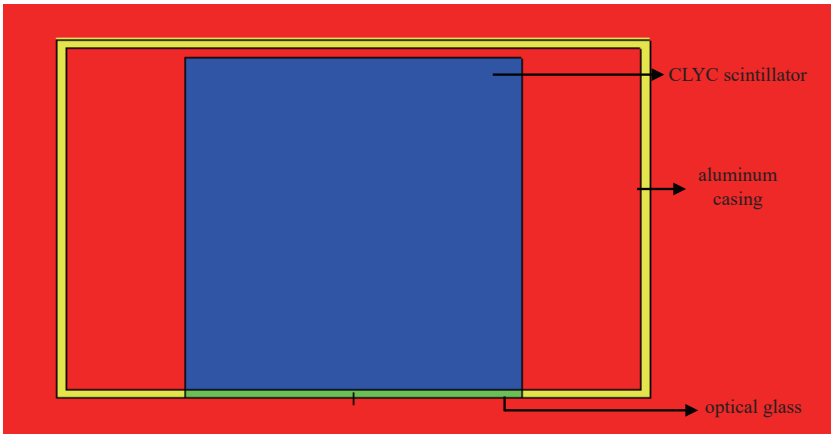

Fig. 5　MCNP model of the CLYC detector

图 5　CLYC 探测器 MCNP 模型

3.2　CLYC 响应函数及响应矩阵计算

根据所建立的 CLYC 探测器 MCNP 模型计算响应函数，选取 0～3 MeV 的能量区间，每间隔 0.05 MeV 计算一个响应函数，计算得到 CLYC 探测器对伽马射线的能量响应如图 6 所示。根据式(4)～式(8)，可以在能量范围内插值计算所有响应函数，通过填补未模拟计算的间隔区域，从而获得 CLYC 探测器对伽马射线的整个响应矩阵 $\boldsymbol{R}$，如图 7 所示。

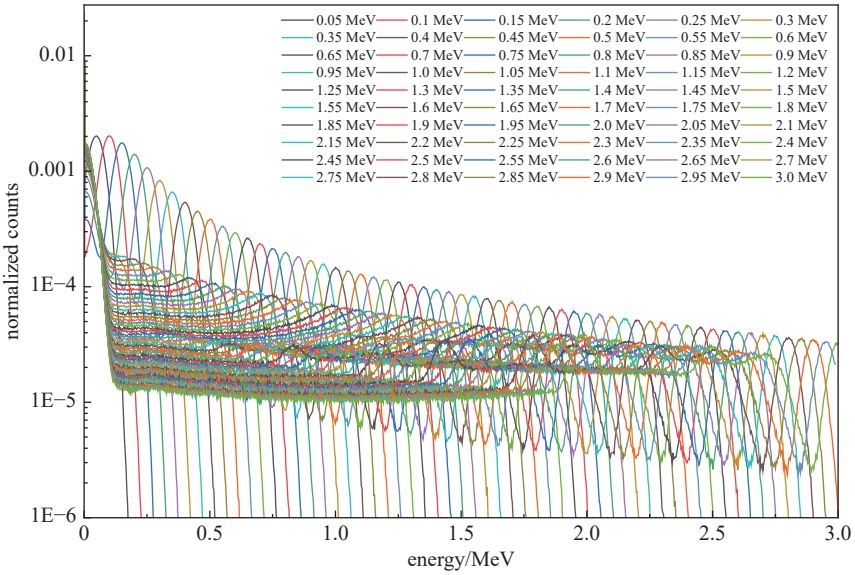

Fig. 6　Energy response of CLYC detectors to gamma rays

图 6　CLYC 探测器对 γ 射线的能量响应

3.3　解谱验证

利用结合蒙特卡罗模拟和插值算法计算得到的能量响应矩阵，采用 MLEM 算法对^{226}Ra 能谱进行解谱，分别计算了迭代次数 50 次、100 次、1 000 次、3 000 次下的解析谱，不同迭代次数下的^{226}Ra 解析谱与实验谱的对比如图 8 所示。

同时对实验测得的^{60}Co−^{137}Cs 混合源 γ 能谱使用 3 000 次迭代解谱，实验谱与解析谱的对比如图 9 所示，特征峰更加尖锐，^{60}Co 核素的两个特征能量分布更为独立。

该方法在实验所测得三种放射源的能谱上均取得了较好的效果，为了评价该方法的复杂能谱分辨能力，需要引入具有重峰场景的能谱，由于实验室缺乏符合条件的放射源，于是采用 MCNP 模拟^{152}Eu 的复杂能谱，参考核素^{152}Eu 衰变发射 γ 能量的信息，选取了 0.122 MeV、0.244 MeV、0.344 MeV、0.778 MeV、0.867 MeV、0.964 MeV、1.112 MeV、1.408 MeV 等 8 个特征能量，它们的能量发射率分支比分别为 28%、7.4%、26.2%、12.7%、4.09%、14.23%、13.35%、20.57%，

总活度为 3.7×10^5 Bq，放置于探测器正前方 5 cm 处，测量时间 10 min，与实验测量条件一致，由于探测器能量分辨率较差，如 0.778 MeV、0.867 MeV、0.964 MeV 等能量相近的特征峰有相互重叠部分，特征峰位不明显，但经过 MLEM 迭代解析后，各相近特征能量峰位明显，可清晰辨别，解谱效果如图 10 所示。

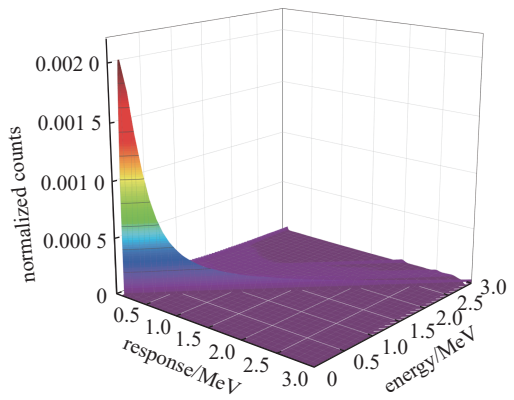

Fig. 7　Energy response matrix of CLYC detectors to gamma rays

图 7　CLYC 探测器对 γ 射线的响应矩阵 R

根据解谱结果，随着迭代次数的增加，^{226}Ra 核素 γ 能谱的解析效果越来越好，原始能谱中不明显的特征峰在迭代次数较低时不能完全解出，在迭代次数 1000 次时，基本能实现能谱解析，特征峰位明显，在迭代次数 3000 次时，解谱效果基本稳定，能够清晰分辨 0.196 MeV、0.295 MeV、0.386 MeV、0.647 MeV 四个特征能量；对于混合源能谱解谱效果也较为良好，0.662 MeV、1.173 MeV、1.332 MeV 三个特征峰分辨较原谱更加清晰，^{152}Eu 复杂能谱的重峰区域得到了有效分离，将 3000 次迭代次数下的解谱效果列于表 1 中。

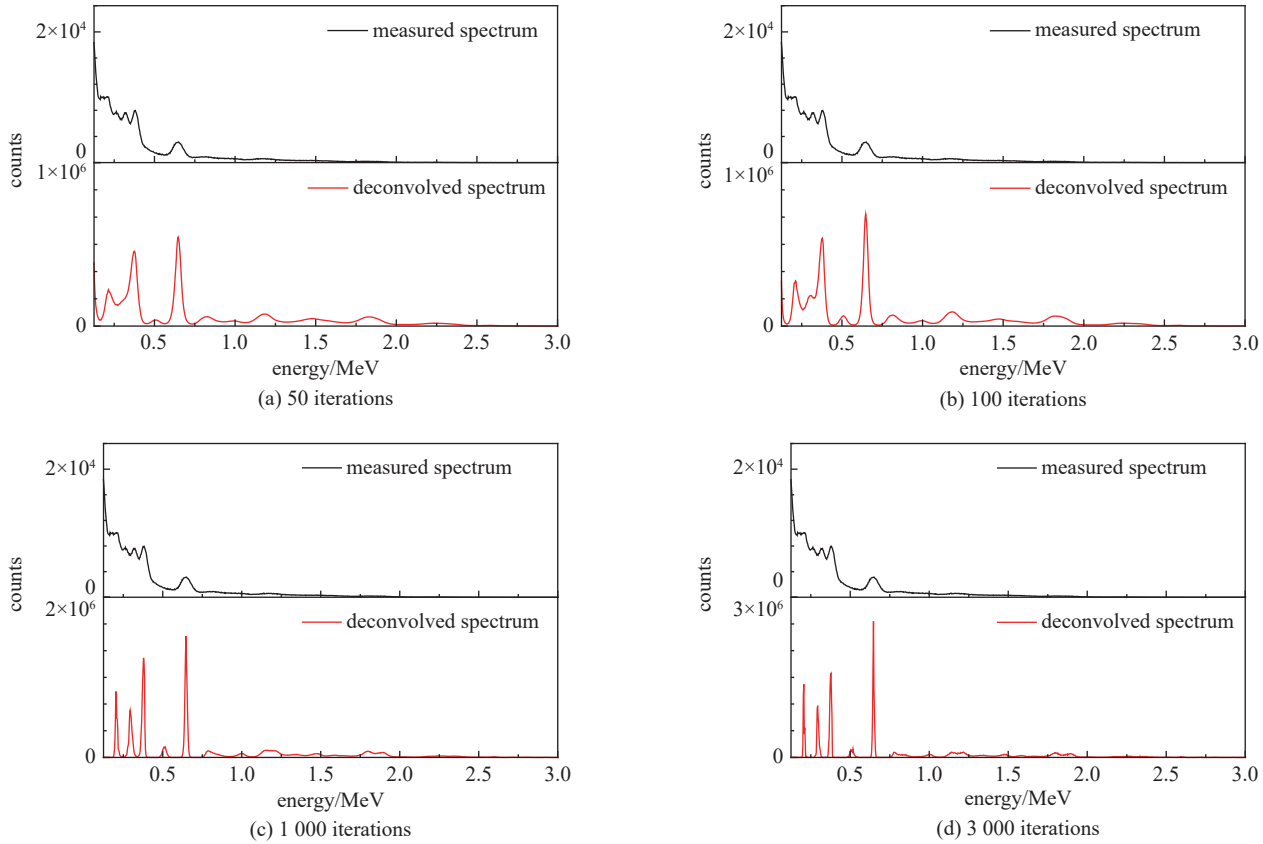

Fig. 8　Comparison of spectrum unfolding results under different iteration counts

图 8　不同迭代次数下的解谱对比

解谱后实验谱与解析谱的特征峰位道址误差在 2 道以内，精度较高，解析谱半高宽显著减小，能量分辨能力显著提高，解谱结果呈现良好的能量单色性，一定程度上提升了核素识别精度。

除定性分析以外，计算特征峰面积从而实现对核素活度计算的定量分析也是核辐射探测领域中的重要工作，分别计算了 50 次迭代、100 次迭代、500 次迭代、1000 次迭代、2000 次迭代、3000 次迭代及 4000 次迭代时的特征峰面积如表 2 和图 11 所示。

^{226}Ra 与 ^{137}Cs 两类核素特征能量的峰面积随迭代次数的增加变化不明显，仅在 500 次迭代以下有小幅波动，整体变化趋势比较稳定，^{60}Co 的特征峰面积在迭代次数小于 2000 次时震荡比较明显，随着迭代次数的增加渐趋稳定。当迭代次数达到 3000 次以后，各核素特征能量的峰面积计算结果均已平稳，峰面积数据与真实值误差较小，

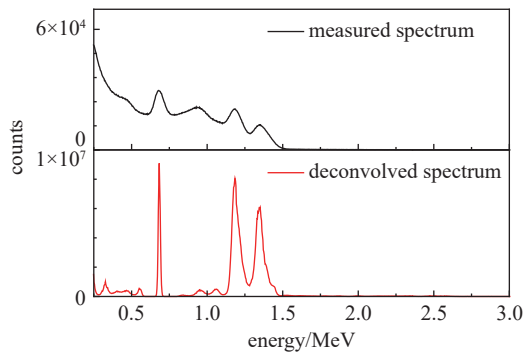

Fig. 9 Spectrum unfolding at 3 000 iterations of ^{60}Co–^{137}Cs mixed source

图 9 ^{60}Co–^{137}Cs 混合源 3 000 次迭代解谱对比

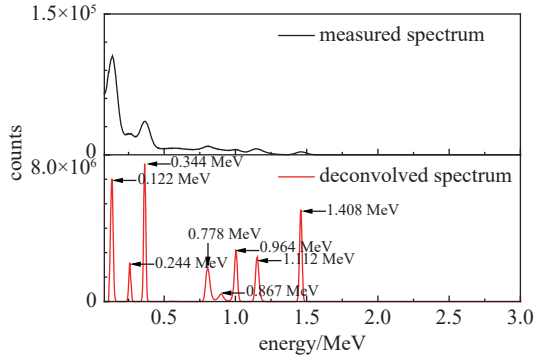

Fig. 10 Unfolding results of the complex ^{152}Eu γ-ray spectrum

图 10 ^{152}Eu 复杂 γ 能谱解析结果

表 1 解谱结果

Table 1 Results of energy spectrum interpretation

energy/ MeV	experimental FWHM/MeV	analytical FWHM/MeV	experimental channel	analytical channel	experimental resolution/%	analytical resolution/%	relative improvement/%
0.196	0.023 87	0.005 81	66	65	12.17	2.97	75.60
0.295	0.028 55	0.015 65	93	95	9.68	5.31	45.18
0.386	0.039 12	0.009 65	124	122	10.13	2.50	75.33
0.647	0.069 31	0.010 98	213	212	10.71	1.70	83.25
0.662	0.070 12	0.015 25	223	224	10.59	2.30	78.25
1.173	0.079 39	0.051 84	390	390	6.77	4.42	34.70
1.332	0.084 02	0.051 49	446	445	6.31	3.87	38.72

表 2 不同迭代次数下的峰面积计算结果

Table 2 Calculation results of peak areas at different numbers of iterations

iterations	peak areas for different energy/MeV						
	0.196	0.295	0.386	0.647	0.662	1.173	1.332
50	14 056	/	34 385	26 088	128 649	473 261	478 623
100	13 397	11 399	24 484	25 572	143 790	479 086	493 475
500	12 312	13 905	23 123	25 062	146 766	476 543	508 245
1 000	12 227	14 195	23 157	24 976	145 330	478 110	506 116
2 000	12 128	14 052	23 225	24 891	144 097	480 865	497 697
3 000	12 114	14 005	23 282	24 857	143 585	491 375	490 585
4 000	12 103	13 982	23 314	24 835	143 322	491 351	491 791

满足活度定量分析对峰面积计算误差的要求。

4 结 论

本研究基于蒙特卡罗方法和插值算法构建了 CLYC 探测器 0 MeV～3 MeV 能区的能量响应矩阵，并通过 MLEM 算法进行了伽马能谱的反卷积迭代，完成了对^{226}Ra 和^{60}Co–^{137}Cs 及 ^{152}Eu 的能谱解析，并进行了定性、定量分析，结果表明，该解谱方法准确度较高，峰位道址误差在 2% 以内，有效提高了峰谷比和探测器的能量分辨能力，随着迭代次数的增加，特征峰面积均逐渐趋于稳定，能够为辐射测量工作提供准确的强度信息，验证了 MLEM 算法在定性定量分析工作上的可靠性。本文的工作为核素识别和活度计算提供了更

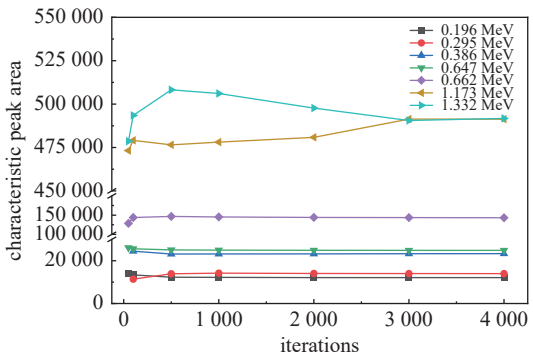

Fig. 11 Variation of characteristic peak area with the number of iterations

图 11 特征峰面积随迭代次数的变化曲线

高精度的数据处理基础，对γ能谱分析工作具有一定的参考意义。

参考文献：

[1] 郑洪龙, 庹先国, 李珍, 等. 基于迭代算法的碲锌镉探测器模拟γ能谱解析方法研究[C]//中国核科学技术进展报告 (第八卷) 中国核学会 2023 年学术年会论文集 第 5 册 计算物理 核物理 粒子加速器 聚变与等离子体物理 辐射物理 核测试与分析 核工程力学 高温堆. 2023: 232-238.（Zheng Honglong, Tuo Xianguo, Li Zhen, et al. An analysis method of simulated gamma energy spectrum for the CdZnTe detector based on itertuve algorithm[C]//Progress Report on China Nuclear Science & Technology (Vol. 8). 2023: 232-238）

[2] 赵日, 刘娜. 基于深度学习模型的伽马能谱解析方法[J]. 原子能科学技术, 2023, 57(2)：379-388.（Zhao Ri, Liu Na. Deep learning model based gamma spectrum analysis method[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2023, 57(2): 379-388）

[3] 石睿. 基于探测器响应函数的α能谱解谱技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014: 1-5.（Shi Rui. Alpha spectrum resolving method based on the detector response function[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014: 1-5）

[4] 宋一鸣, 周倩倩, 陈晔, 等. 基于γ能谱反演的弱峰检测方法探讨[J]. 原子能科学技术, 2024, 58(10)：2228-2238.（Song Yiming, Zhou Qianqian, Chen Ye, et al. Exploration of weak peak detection method based on gamma spectra deconvolution[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2024, 58(10): 2228-2238）

[5] 张明荣, 侯越云, 张春生, 等. 我国 CLYC 闪烁晶体的研发进展[C]//中国稀土学会 2020 学术年会暨江西 (赣州) 稀土资源绿色开发与高效利用大会摘要集. 2020: 271.（Zhang Mingrong, Hou Yueyun, Zhang Chunsheng, et al. Advances in CLYC scintillation crystal development in China[C]//Abstracts of the 2020 Annual Conference of the Chinese Society of Rare Earths: Combined with the Jiangxi (Ganzhou) Conference on Green Development and Efficient Utilization of Rare Earth Resources. 2020: 271）

[6] Hawrami R, Hines C, Abselem I, et al. Latest advances in large diameter SrI: Eu and CLYC: Ce scintillators for isotope identification[C]//Proceedings Volume 8507, Hard X-Ray, Gamma-Ray, and Neutron Detector Physics XIV. 2012: 850716.

[7] 周悦, 王猛, 刘志杰. CLYC 晶体探测器在密度测井中的响应特性研究[J]. 测井技术, 2023, 47(3)：303-307.（Zhou Yue, Wang Meng, Liu Zhijie. Study on responses of CLYC crystal detector in density logging[J]. Well Logging Technology, 2023, 47(3): 303-307）

[8] 秦建国, 郑普, 赖财锋. $Cs_2{}^6LiYCl_6$: Ce 闪烁体探测器γ响应及特性研究[C]//第十八届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集. 2016: 170-178.（Qin Jianguo, Zheng Pu, Lai Caifeng. Gamma-ray response and characterization for a Cs_2LiYCL_6 scintillator detector[C]//Proceedings of the 18th National Annual Conference on Nuclear Electronics and Nuclear Detection Technology. 2016: 170-178）

[9] Glodo J, Hawrami R, Shah K S. Development of Cs_2LiYCl_6 scintillator[J]. Journal of Crystal Growth, 2013, 379: 73-78.

[10] 唐生达, 兰长林, 聂阳波, 等. $Cs_2{}^6LiYCl^6$: Ce 探测器γ响应函数的高斯展宽及解谱研究[J]. 现代应用物理, 2021, 12(4)：20-26.（Tang Shengda, Lan Changlin, Nie Yangbo, et al. Gaussian broadening of γ response function and spectrum resolution for $Cs_2{}^6LiYCl_6$: Ce detector[J]. Modern Applied Physics, 2021, 12(4): 20-26）

[11] 李玮, 焦听雨, 李晓博, 等. 基于遗传基因算法的中子能谱解谱程序研究[J]. 宇航计测技术, 2020, 40(3)：65-68.（Li Wei, Jiao Tingyu, Li Xiaobo, et al. Research of neutron spectrum unfolding procedure using genetic algorithm technique[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2020, 40(3): 65-68）

[12] 陈晓亮, 赵守智. 基于广义最小二乘法原理的中子能谱解谱程序开发及验证[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(12)：2195-2200.（Chen Xiaoliang, Zhao Shouzhi. Development and validation of neutron spectrum unfolding code based on generalized least squares method[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(12): 2195-2200）

[13] 秦玉瑞, 朱巴邻, 王忠海, 等. 基于最大后验估计的编码孔图像重建算法[J]. 强激光与粒子束, 2024, 36：096004.（Qin Yurui, Zhu Balin, Wang Zhonghai, et al. Coded-aperture image reconstruction algorithm based on maximum *a posteriori* estimation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2024, 36: 096004）

[14] 何剑锋. 低能量分辨率γ能谱数据解析方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013: 37-39.（He Jianfeng. A study for decomposition method of lower-energy resolution gamma-ray spectra data[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013: 37-39）

[15] 冯蠡, 兰长林, 宋朝晖, 等. 溴化镧探测器γ射线能量展宽及解谱研究[J]. 核电子学与探测技术, 2024, 44(1)：86-93.（Feng Li, Lan Changlin, Song Zhaohui, et al. Study of energy broadening and spectrum unfolding for lanthanum bromide detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2024, 44(1): 86-93）

[16] Briesmeister J F. MCNP: a general Monte Carlo N-particle transport code[R]. US: Los Alamos National Laboratory, 2000.