

级联符合相加修正因子的传递

孔令南, 杨宝路, 叶政霖, 张京, 周强

中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所 辐射防护与核应急中国疾病预防控制中心
重点实验室, 北京 100088

摘要: **目的** 通过相关测量分析, 进一步拓展符合相加修正因子传递实验的应用。 **方法** 用 BE5030 高纯锗 γ 能谱仪配备的 LabSOCS 模拟无源效率, 在 GENIE 2000 解谱软件中调用 LabSOCS 模拟的总效率计算符合相加修正因子, 通过含有 ^{134}Cs 、 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 的点源和体源配合测量的符合相加修正因子传递实验, 得到其他高纯锗 γ 能谱仪的符合相加修正因子。 **结果** BE5030 γ 能谱上分别得到的 ^{134}Cs 、 ^{60}Co 符合相加修正因子, 经证书活度验证, 最大偏差绝对值在 3.53% 以内; 通过符合相加修正因子传递实验, 将其传递到其他高纯锗 γ 谱仪, 经证书活度验证, 最大偏差绝对值在 5.86% 以内。 **结论** 在 GENIE 2000 解谱软件中, 调用 LabSOCS 模拟总效率计算的符合相加修正因子, 修正效果良好, 可作为标准实验室的修正因子使用。通过符合相加修正因子传递实验, 可较好地实现其他高纯锗 γ 能谱仪的符合相加修正, 拓宽符合相加修正方法。

关键词: γ 能谱; 符合相加效应; 修正因子; 无源效率刻度

中图分类号: TL81 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2024)03-0283-05

Transfer of cascade coincidence summing correction factors

KONG Lingnan, YANG Baolu, YE Zhenglin, ZHANG Jing, ZHOU Qiang

Key Laboratory of Radiological Protection and Nuclear Emergency, China CDC, National Institute for
Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100088 China

Abstract: **Objective** To further extend the application of coincidence summing correction factor transfer experiments through the analysis of relevant measurements. **Methods** The passive efficiency was simulated using BE5030 high-purity germanium (HPGe) γ -energy spectrometer equipped with LabSOCS, and the total efficiency was simulated using LabSOCS in GENIE 2000 spectrum analysis software, which was used for calculating the coincidence summing correction factor. The coincidence summing correction factor transfer experiments were performed using the measurements with the point source containing ^{134}Cs , ^{60}Co , and ^{137}Cs as well as the body source to obtain the coincidence summing correction factors of other HP-Ge γ -energy spectrometers. **Results** The coincidence summing correction factors for ^{134}Cs and ^{60}Co were obtained using the BE5030 γ -energy spectrum. In verification by certificate activity, the absolute value of the maximum deviation was within 3.53%. Using coincidence summing correction factor transfer experiments, these factors were transferred to other high-purity germanium γ spectrometers. In verification by certificate activity, the absolute value of the maximum deviation was within 5.86%. **Conclusion** The coincidence summing correction factors calculated using simulated total efficiency by calling LabSOCS in the GENIE 2000 spectrum analysis software are effective in correction, and can be used as correction factors in standard laboratories. Through coincidence summing correction factor transfer experiments, the coincidence summing correction of other high-purity germanium γ -energy spectrometers can be achieved, which broadens the application of coincidence summing correction method.

Keywords: γ -Energy spectrum; Coincidence summing effect; Correction factor; Sourceless efficiency calibration

Corresponding author: ZHOU Qiang, E-mail: zhouqiang@nirp.chinacdc.cn

20 世纪 90 年代以来, 高纯锗 (HPGe) γ 能谱探测器广泛应用于环境放射性测量和核事故应急监测等领域^[1]。当使用探测器近距离测量样品时, 由于探测器分辨时间的限制, 具有级联衰变关系的放射性核素中的各条 γ 射线被探测器同时探测到, 记录为一个事件而出现级联符合相加效应, 使实际测量的

有关 γ 射线全能峰计数增加或减少^[2-4]。若将样品置于距探测器远的位置上测量(如 15 cm 以上), >25 cm 时, 可以认为符合相加效应近似为零^[5-7], 但测量距离的增大, 会导致探测效率明显降低, 直接影响放射性活度的测量。因此, 对于低放射性活度环境样品的测量, 通常是将样品放置于探测器表面位置测量^[8]。这种情况下, 根据国标 GB/T 16145—2022^[2] 中有关核素活度确定部分的要求, 采用效率曲线法刻度 γ 能谱时, 计算样品中核素的活度时, 对于受级联衰变影响大的核素(如 ^{134}Cs 、 ^{60}Co 等)应做级联符合相加修正。

级联符合相加修正可通过实验测量单能 γ 核素点源, 如 ^{241}Am 、 ^{109}Cd 、 ^{57}Co 、 ^{203}Hg 、 ^{137}Cs 、 ^{85}Sr 、 ^{113}Sn 、 ^{54}Mn 、 ^{65}Zn 等, 通过符合相加修正因子实验的方法, 获得修正因子^[2]。但这些单能 γ 核素中, 如 ^{203}Hg 的半衰期为 46.59 d、 ^{85}Sr 的半衰期为 64.85 d, 这些短寿命核素在购置需尽快进行测量实验, 否则达不到相应测量计数要求则需重新购置, 另外单能 γ 核素点源的制备、价格和保管等原因, 使得普通实验室难以具备符合相加修正的实验条件, 使其应用受到了限制。近年来, 无源效率刻度技术不断发展^[9-11], 可利用配备 LabSOCS 无源效率刻度软件的高纯锗 γ 能谱, 在 Genie

2000 解谱软件中调用 LabSOCS 模拟的总效率计算修正因子, 通过标准体源样品中 ^{134}Cs 、 ^{60}Co 等核素的标准值验证, 级联符合相加修正效果良好, 可将 Genie 2000 给出的 ^{134}Cs 、 ^{60}Co 等核素的修正因子假设作为标准实验室的修正因子。其他高纯锗 γ 谱仪若不具备符合相加修正实验条件, 且配套的无源效率刻度软件不具备符合相加修正功能, 符合相加效应给 γ 能谱测量和分析带来的误差又不可忽略, 此时可通过 GB/T 16145—2022^[2] 附录 D.4 点源和体源配合测量的修正因子传递实验, 将标准实验室的修正因子传递到其他高纯锗 γ 谱仪, 来实现其他高纯锗 γ 谱仪的级联符合相加修正^[2]。

1 材料与方法

1.1 标准源 本研究使用的 3 个体标准源包括 2 个土壤样品和 1 个白藜麦样品, 样品装满在 $\Phi 75\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 的圆柱盒内, 其活度可溯源至美国国家计量基准。另外, 修正因子传递实验还要求 3 个体标准源中均应包含有单能核素 ^{137}Cs , 3 个体标准源中 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 的活度详见表 1。为完成传递实验, 还要使用包含有 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 的点源, 本研究中这 3 个点源均来自中国计量科学研究院。

表 1 标准源中 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 的活度参数 (Bq)

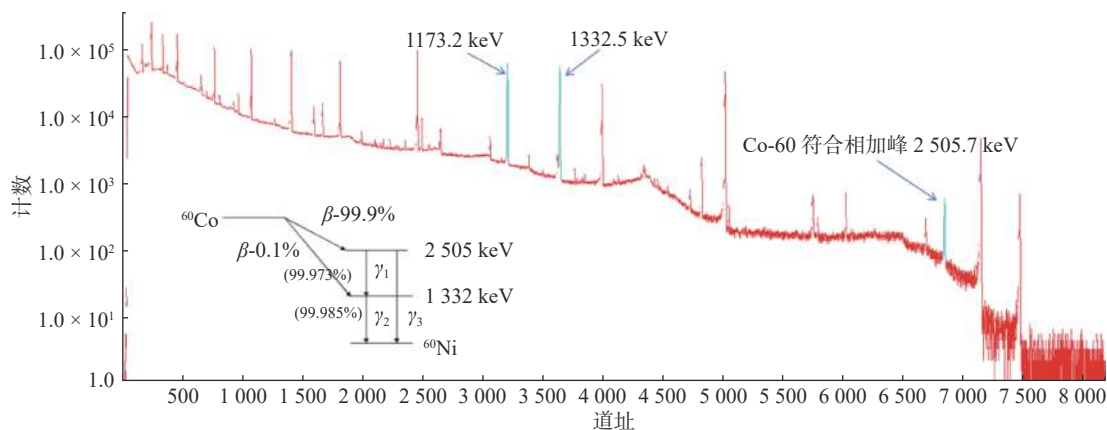
Table 1 Activity parameters for ^{134}Cs , ^{137}Cs , and ^{60}Co in standard sources

核素	标准点源的参数	土壤标准源(127815)	土壤标准源(104243A)	白藜麦标准源
^{134}Cs	2.95×10^4	—	4.26×10^3	4.28×10^3
^{137}Cs	8.32×10^3	4.13×10^2	1.00×10^3	1.01×10^3
^{60}Co	4.19×10^4	6.65×10^2	—	—

注: 土壤标准源(104243A)与白藜麦标准源活度值参考日期为 2016 年 8 月 1 日, 土壤标准源(127815)活度值参考日期为 2023 年 7 月 1 日; 标准点源活度值参考日期为 2023 年 9 月 6 日; “—”表示标准体源样品中无此核素。

1.2 仪器设备 使用 Canberra 公司生产的 BE5030 宽能型低本底高纯锗 γ 能谱(简称 BE5030 γ 能谱仪), 相对效率 50.5%, 能量分辨率 1.65 keV, 分析软件 GENIE 2000(V3.4.1)。探测器配有 LabSOCS 软件, 其无源效率模拟的有效性在文献^[12-13], 可对各种基质样品的效率进行较为精确的模拟^[14]。待传递修正因子的 γ 能谱为 ORTEC 公司生产的 Detective-DX-100T 便携式电制冷高纯锗 γ 能谱(简称便携式 γ 能谱仪), 相对效率为 46%, 能量分辨率 2.18 keV。便携计算机通过 USB 连接便携式 γ 能谱仪, 分析软件为 Gamma Vision。

1.3 γ 能谱的获取 分别使用便携式 γ 能谱仪与 BE5030 γ 能谱仪, 在探测器表面处测量 3 个体标准源。然后, 2 台 γ 能谱仪使用测量支架在可忽略符合相加影响的远距探测器位置 D 处, 分别获取 ^{134}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 3 个点源的 γ 能谱。关于远距探测器位置 D 处的选择, 以测量谱文件中不出现符合相加峰为准, 图 1 显示有 ^{60}Co 的 2 个主要能峰及其相应的符合相加峰。经测量确认在距探测器表面 25 cm 处测量的谱文件中, ^{60}Co 的符合相加峰基本消失。因此本研究的 D 处确定为远距探测器表面 25 cm 的位置。

图1 ^{60}Co 主要能峰及其相应的符合相加峰Figure 1 Main energy peaks of ^{60}Co and their corresponding coincidence summing peaks

1.4 γ 能谱核素定量分析 核素活度定量分析的基础是效率刻度,效率刻度主要方法有相对比较法和效率曲线法^[2]。当采用相对比较法计算时,由于级联核素在样品和体标准源中都有级联符合相加影响,二者相比可消除该影响^[15]。但在应用效率曲线法计算样品中核素活度时,对于级联核素则需要进行符合相加修正^[2]。

1.5 修正因子的获取 本研究首先在 BE5030 γ 能谱仪中配套的 LabSOCS 内建立 3 个标准体源的模型即建立 GEO 文件,并生成 LabSOCS 模拟的效率曲线。其次,在 GENIE 2000 软件中对谱文件进行能量刻度,标记 ROI 感兴趣区、寻峰、峰面积计算、峰效率计算和活度计算。在活度计算时调用建立的 GEO 文件,选择“Perform cascade correction”复选框,同时选择“Use ISOCS/LABSOCS Total efficiencies”复选框,执行级联修正得到修正因子和活度计算结果,分别得到 3 个标准体源中存在符合相加效应的核素的修正因子 F_{C1} ,将修正前后的测量活度与标准体源证书活度进行比较,评价分析级联符合相加修正的效果。

1.6 修正因子的传递 计算修正因子 F_{C2} 及修正效果评价:公式 1) 来自 GB/T 16145—2022^[2],计算在便携式 γ 能谱仪探测器表面测量 3 个体标准源中 ^{134}Cs 或 ^{60}Co 相应能峰传递来的修正因子 F_{C2} 。将便携式 γ 能谱仪测量的 ^{134}Cs 和 ^{60}Co ,经级联修正后的活度与证书活度值进行比较,评价修正因子传递后的修正效果。

$$F_{C2} = \left[\frac{a_{C1}}{a_{D1}} \right] \left[\frac{a_{C2}}{a_{D2}} \right] M_{\text{Body}} F_{C1} \quad 1)$$

式中:

F_{C2} ——通过点源和体源配合测量传递的修正因子。

a_{C1} ——在 BE5030 γ 能谱仪探测器表面测量 3 个体标准源中 ^{134}Cs 或 ^{60}Co 相应 γ 射线全能峰净峰面积计数率(CPS);

a_{D1} ——在 BE5030 γ 能谱仪探测器位置 D 处测量 ^{134}Cs 或 ^{60}Co 点源相应 γ 射线全能峰净峰面积计数率(CPS);

a_{C2} ——在便携式 γ 能谱仪探测器表面测量 3 个体标准源中 ^{134}Cs 或 ^{60}Co 相应 γ 射线全能峰净峰面积计数率(CPS);

a_{D2} ——在便携式 γ 能谱仪探测器位置 D 处测量 ^{134}Cs 或 ^{60}Co 点源相应 γ 射线全能峰净峰面积计数率(CPS);

M_{Body} ——计算系数;

F_{C1} ——在 Genie 2000 解谱软件中调用 LabSOCS 模拟的总效率计算 ^{134}Cs 或 ^{60}Co 的修正因子,即假设为标准实验室的修正因子。

2 结果

2.1 F_{C1} 的修正效果 在 BE5030 γ 能谱仪上计算得到的修正前后 ^{134}Cs 、 ^{60}Co 的活度值、符合相加修正因子,及其活度值与证书活度值的相对偏差见表 2。从相对偏差情况来看,修正前相对偏差绝对值范围在 5.79%~11.49%,修正后相对偏差绝对值范围在 0.46%~3.53%,修正后最大相对偏差绝对值在 3.53% 以内,说明符合相加修正效果良好。表 2 中的 ^{134}Cs 和 ^{60}Co 对应能峰的符合相加修正因子,可作为标准实验室的符合相加修正因子 F_{C1} 进行传递。

2.2 F_{C2} 的修正效果 按照公式 1) 计算得到传递后便携式 γ 能谱仪的符合相加修正因子 F_{C2} 。表 3 给出了便携式 γ 能谱仪测量 3 个标准体源中 ^{134}Cs 、 ^{60}Co 的活度值、经符合相加修正因子 F_{C2} 修正后的活度值,

表 2 ^{134}Cs 、 ^{60}Co 符合相加修正因子传递前 F_{C1} 的修正效果

Table 2 Effects of correction using ^{134}Cs and ^{60}Co coincidence summing correction factors before transfer (F_{C1})

标准源	核素	能量/keV	证书活度值/Bq	修正前活度值/Bq	符合相加修正因子 F_{C1}	修正后活度值/Bq ^a	修正前相对偏差(%) ^b	修正后相对偏差(%) ^c
土壤标准源(104243A)	^{134}Cs	604.7	4.26×10^3	3.83×10^3	0.880	4.36×10^3	-10.05	2.22
		795.9	4.26×10^3	3.85×10^3	0.879	4.38×10^3	-9.63	2.81
白藜麦标准源	^{134}Cs	604.7	4.28×10^3	3.78×10^3	0.881	4.30×10^3	-11.49	0.46
		795.9	4.28×10^3	3.82×10^3	0.879	4.34×10^3	-10.76	1.53
土壤标准源(127815)	^{60}Co	1173.2	6.65×10^2	6.27×10^2	0.910	6.89×10^2	-5.79	3.53
		1332.5	6.65×10^2	6.21×10^2	0.907	6.84×10^2	-6.72	2.85

注: ^a为修正前活度值/修正因子; ^b为(修正前活度值-证书活度值)/证书活度值 $\times 100\%$; ^c为(修正后活度值-证书活度值)/证书活度值 $\times 100\%$; 表中活度结果均校正到标准源证书时间。

及其与证书活度值的相对偏差。从偏差情况来看, ^{134}Cs 修正前偏差绝对值范围在 8.20%~10.18%, 修正后偏差绝对值范围在 2.32%~3.92%; ^{60}Co 修正前偏差绝对值范围在 10.39%~10.48%, 修正后偏差绝对值范围在 4.76%~5.86%。经符合相加修正因子 F_{C2}

修正后的最大相对偏差绝对值在 5.86% 以内, 说明符合相加修正因子传递后, 修正结果的最大偏差绝对值虽较传递前的 3.53% 有所增大, 但是比未修正前活度结果还是改善的很多, 表明传递后的修正因子的修正有效。

表 3 ^{134}Cs 、 ^{60}Co 符合相加修正因子传递后 F_{C2} 的修正效果

Table 3 Effects of correction using ^{134}Cs and ^{60}Co coincidence summing correction factors after transfer (F_{C2})

标准源	核素	能量/keV	证书活度值/Bq	修正前活度值/Bq	符合相加修正因子 F_{C2}	修正后活度值/Bq ^a	修正前相对偏差(%) ^b	修正后相对偏差(%) ^c
土壤标准源(104243A)	^{134}Cs	604.7	4.26×10^3	3.83×10^3	0.869	4.41×10^3	-10.18	3.40
		795.9	4.26×10^3	3.86×10^3	0.885	4.36×10^3	-9.45	2.32
白藜麦标准源	^{134}Cs	604.7	4.28×10^3	3.89×10^3	0.877	4.44×10^3	-8.91	3.92
		795.9	4.28×10^3	3.93×10^3	0.893	4.40×10^3	-8.20	2.82
土壤标准源(127815)	^{60}Co	1173.2	6.65×10^2	5.96×10^2	0.951	6.26×10^2	-10.48	-5.86
		1332.5	6.65×10^2	5.96×10^2	0.941	6.34×10^2	-10.39	-4.76

注: ^a为修正前活度值/修正因子; ^b为(修正前活度值-证书活度值)/证书活度值 $\times 100\%$; ^c为(修正后活度值-证书活度值)/证书活度值 $\times 100\%$; 表中活度结果均校正到标准源证书时间。

3 讨论

放射性核素活度定量分析的基础是效率刻度, 在有源效率刻度中, 主要包括相对比较法和效率曲线法^[2]。当采用相对比较法计算时, 由于级联核素在样品和体标准源中都有级联符合相加影响, 二者相比可消除该影响^[15]。但在应用效率曲线法计算样品中核素活度时, 对于级联核素则需要符合相加修正^[2,16]。本研究针对便携式 γ 能谱应用效率曲线法计算样品中 ^{134}Cs 和 ^{60}Co 活度的符合相加修正问题, 开展了修正因子传递的应用研究。

在 BE5030 γ 能谱仪探测器表面测量了 3 个体标准源, 获得了各自对应的 ^{134}Cs 和 ^{60}Co 的修正因子 F_{C1} , 经证书活度验证, 最大偏差绝对值在 3.53% 以内, 说明 F_{C1} 的修正效果良好。说明 BE5030 γ 能谱仪所配的 LabSOCS 软件, 在 GENIE 2000 调用 LabSOCS 模

拟的总效率进行的符合相加修正准确有效, 可以较好地解决 γ 能谱仪测量分析中受级联符合相加效应影响的问题。

根据国标 GB/T 16145—2022^[2] 的附录 D, 符合相加修正因子传递实验需要有包含要传递核素(如 ^{134}Cs 、 ^{60}Co 等)的体源、包含要传递核素的点源, 以及包含 ^{137}Cs 的相应体源和点源。体源的几何条件和构成应与传递前标准实验室的一样。本研究所用体源和点源满足国标中的要求。在 BE5030 γ 能谱仪和便携式 γ 能谱仪的探测器表面和远距探测器 D(25 cm) 处, 分别进行了测量。按照公式 1) 计算的传递后修正因子 F_{C2} 。通过对使用效率曲线法计算的活度进行修正。从表 3 的修正结果可以看出, 3 个标准体源中修正因子传递前后, 计算的 ^{134}Cs 和 ^{60}Co 活度与证书活度相比, 偏差绝对值范围均有了明显的缩小, 最大偏差由修正前的 -10.48% 变为 -5.86%, 表明将软件模拟计

算效果良好的修正因子 F_{CI} , 作为标准实验室的修正因子进行传递, 实验效果良好。同时, 也说明点源和体源配合测量 ^{134}Cs 和 ^{60}Co 等级联核素, 以及不受级联衰变影响的单能核素 ^{137}Cs , 按照全能峰效率和全能峰净峰面积计数率的比值关系经验公式, 可将符合相加修正因子传递出去, 较好地实现其他高纯锗 γ 能谱仪的符合相加修正。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展, 排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

作者贡献声明 孔令南负责数据处理、测量结果的分析, 论文撰写和修改; 杨宝路负责论文修改意见; 张京负责 γ 能谱测量; 叶政霖协助 γ 能谱测量; 周强负责论文内容审阅

参考文献

- [1] 徐翠华, 张庆, 周强, 等. HPGe 探测效率和符合相加修正系数的蒙特卡罗计算[J]. 中国辐射卫生, 2004, 13(2): 92-96. DOI: 10.3969/j.issn.1004-714X.2004.02.005.
Xu CH, Zhang Q, Zhou Q, et al. Monte-Carlo calculations of HPGe detection efficiency and coincidence-summing correction[J]. Chin J Radiol Health, 2004, 13(2): 92-96. DOI: 10.3969/j.issn.1004-714X.2004.02.005.
- [2] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 16145—2022 环境及生物样品中放射性核素的 γ 能谱分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. GB/T 16145 —2022 Gamma-ray spectrometry method for the determination of radionuclides in environmental and biological samples[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [3] 杨波, 魏强林, 吴和喜, 等. HPGe 谱仪 γ 能谱高能端探测效率校准[J]. 核电子学与探测技术, 2017, 37(11): 1146-1150. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2017.11.018.
Yang B, Wei QL, Wu HX, et al. Efficiency calibration over the high energy range of a HPGe γ spectrometer[J]. Nucl Electron Detect Technol, 2017, 37(11): 1146-1150. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2017.11.018.
- [4] 张磊. 高纯锗能谱仪 ^{125}I 核素点源和体源绝对活度测量方法研究[J]. 辐射防护, 2022, 42(6): 556-562. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8187.2022.6.fsfh202206008.
Zhang L. Study on the absolute activity measurement method of ^{125}I nuclide point source and volume source by HPGe spectrometer[J]. Radiat Protect, 2022, 42(6): 556-562. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8187.2022.6.fsfh202206008.
- [5] 赵燕子. 体源中 ^{60}Co 射线的符合相加修正因子测量[J]. 核电子学与探测技术, 2008, 28(5): 994-998. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2008.05.032.
Zhao YZ. Measurement of compensation factors for coincidence in detection of Co-60 in solid source[J]. Nucl Electron Detect Technol, 2008, 28(5): 994-998. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2008.05.032.
- [6] 王志慧, 石人刚, 党晓军, 等. γ 级联衰变符合相加效应解析修正[J]. 核电子学与探测技术, 2021, 41(3): 419-424. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2021.03.012.
Wang ZH, Shi RG, Dang XJ, et al. Analytical correction method for coincidence summing effect in γ -rays cascade radiation[J]. Nucl Electron Detect Technol, 2021, 41(3): 419-424. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2021.03.012.
- [7] 张磊. γ 能谱符合相加效应修正方法及影响因素[J]. 核技术, 2022, 45(6): 060401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.060401.
Zhang L. Coincidence summing correction methods and influence factors of γ spectrum[J]. Nucl Tech, 2022, 45(6): 060401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.060401.
- [8] 范梓浩, 刘皓然, 梁璐成, 等. γ 能谱分析中放射性核素活度的蒙特卡修正方法及实验验证[J]. 计量技术, 2020(5): 95-99, 114. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0771.2020.05.19.
Fan ZH, Liu HR, Liang JC, et al. Monte Carlo correction method and experimental verification of radionuclide activity in γ -spectrum analysis[J]. Metrol Sci Technol, 2020(5): 95-99, 114. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0771.2020.05.19.
- [9] 金晓祥, 陈超峰, 林冠, 等. γ 射线级联衰变符合相加修正方法研究[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(6): 1077-1083. DOI: 10.7538/yzk.2017.51.06.1077.
Jin XX, Chen CF, Lin G, et al. Study on method of coincidence summing correction in γ -ray cascade radiation[J]. Atomic Energy Sci Technol, 2017, 51(6): 1077-1083. DOI: 10.7538/yzk.2017.51.06.1077.
- [10] 李斌, 徐哲婷, 何俞政涵, 等. 国际比对模拟气溶胶滤膜 γ 能谱测量及分析讨论[J]. 辐射防护通讯, 2023, 43(5): 35-39. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2023.05.009.
Li B, Xu ZT, Heyu ZH, et al. Analysis and discussion on international intercomparison of simulated aerosol filter γ -spectrometry[J]. Radiat Protect Bull, 2023, 43(5): 35-39. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2023.05.009.
- [11] 徐晨曦, 倪建忠, 余功硕, 等. 利用 Geant4 模拟计算角关联对 HPGe 探测器符合相加效应的影响[J]. 现代应用物理, 2019, 10(1): 1-7. DOI: 10.12061/j.issn.2095-6223.2019.010201.
Xu CX, Ni JZ, Yu GS, et al. Simulation of the angular correlation impact on HPGe detector coincidence summing effect by Geant4[J]. Mod Appl Phys, 2019, 10(1): 1-7. DOI: 10.12061/j.issn.2095-6223.2019.010201.

(下转第 335 页)

- 林业教育, 2020, 38(S1): 1-5.
- Wei HB, Zhao YK. Exploration of psychological health education by graduate supervisors[J]. For Educ China, 2020, 38(S1): 1-5.
- [14] 韩牧言, 李立立. 浅谈研究生班主任管理工作面临的问题与对策[J]. 环渤海经济瞭望, 2020(7): 114-115.
- Han MY, Li LL. On the problems and countermeasures faced by the management of graduate class teachers[J]. Econ Outlook Bohai Sea, 2020(7): 114-115.
- [15] 韩艳清, 岳保荣, 范瑶华. 提高研究生培养质量的管理模式的探讨[J]. 中国辐射卫生, 2011, 20(2): 170-172.
- Han YQ, Yue BR, Fan YH. Discussion on the management mode for improving the quality of the graduate education[J]. Chin J Radiol Health, 2011, 20(2): 170-172.
- [16] 杨潇, 伍艳. 医教协同背景下临床医学专业学位研究生班主任制度在医学院研究生管理工作中的探索与实践[J]. 卫生职业教育, 2022, 40(14): 39-43.
- Yang X, Wu Y. The Application of the head teacher system in the management of postgraduates in medical colleges under the background of medical education cooperation[J]. Health Vocat Educ, 2022, 40(14): 39-43.
- (收稿日期: 2024-01-02)

(上接第 287 页)

- [12] 周强, 拓飞, 姚帅墨, 等. LabSOCS 无源效率刻度软件验证与测量研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2018, 38(4): 291-296. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2018.04.009.
- Zhou Q, Tuo F, Yao SM, et al. Validation of the laboratory sourceless calibration software (LabSOCS) on measurement[J]. Chin J Radiol Med Prot, 2018, 38(4): 291-296. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2018.04.009.
- [13] 庞超亚, 拓飞, 杨宝路. 全膳食中放射性核素的 γ 能谱测量方法研究[J]. 中国辐射卫生, 2018, 27(6): 567-569, 589. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2018.06.013.
- Pang CY, Tuo F, Yang BL. A study for measuring radionuclides in whole diet by gamma spectrometry[J]. Chin J Radiol Health, 2018, 27(6): 567-569, 589. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2018.06.013.
- [14] 王硕, 杨宝路, 周强, 等. 无源效率刻度在马林杯状气体源活度测量中的应用[J]. 中国辐射卫生, 2022, 31(1): 6-12. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.01.002.
- Wang S, Yang BL, Zhou Q, et al. Application of sourceless efficiency calibration in activity measurement of gas source in Marinelli beaker[J]. Chin J Radiol Health, 2022, 31(1): 6-12. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.01.002.
- [15] 周强, 张京, 杨宝路, 等. 伽玛能谱仪分析 ^{226}Ra 的部分影响因素的研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2023, 43(2): 112-117. DOI: 10.3760/cma.j.cn112271-20220913-00372.
- Zhou Q, Zhang J, Yang BL, et al. Study on influencing factors associated with the analysis of ^{226}Ra gamma spectra[J]. Chin J Radiol Med Prot, 2023, 43(2): 112-117. DOI: 10.3760/cma.j.cn112271-20220913-00372.
- [16] 许旭, 刘佳强, 陆景彬, 等. 放射源 ^{152}Eu 的能谱识别及和峰特性分析[J]. 同位素, 2018, 31(1): 1-7. DOI: 10.7538/tws.2017.youxian.008.
- Xu X, Liu JQ, Lu JB, et al. Recognition of spectrum in ^{152}Eu source and analysis of sum peak characteristics[J]. J Isot, 2018, 31(1): 1-7. DOI: 10.7538/tws.2017.youxian.008.
- (收稿日期: 2024-01-18)