井型HPGe探测器的效率刻度和符合修正因子测量

於国兵[1] 项云翔[2] 顾先宝[1] 刘 毅[1] 何 旭[1] 张文亮[1] 王金龙[1]

1（安徽省辐射环境监督站 合肥 230071）

2（聚变新能（安徽）有限公司 合肥 230000）

摘要 为了计算井型HPGe探测器的探测效率曲线和符合修正因子，使用常用的单能γ核素标准源刻度了井型HPGe探测器在置顶测量模式和井内测量模式下的全能峰探测效率，同时测量了^{60}Co、^{88}Y、^{131}I、^{134}Cs、^{152}Eu、^{133}Ba等常见核素的符合修正因子。测量结果表明，利用常用单能γ核素标准源中的^{139}Ce获得的效率测量值与数值拟合结果相差最大可达49%；井型HPGe探测器的符合效应对活度测量结果影响大，样品高度越小符合修正因子越大，当样品高度为0.5 cm时，^{134}Cs发射的563.23 keV γ射线全能峰计数率的符合修正因子达到了8.00，604.70 keV γ射线全能峰计数率的符合修正因子为3.01；当样品的活度超过1 000 Bq时，偶然符合对总符合修正因子的贡献逐渐增大；当^{131}I的活度从1 300 Bq增加到6 300 Bq时，80.19 keV γ射线全能峰计数率的符合修正因子增加10%。测量数据可以为井型HPGe探测器效率刻度源的选择和核素活度测量结果的修正提供参考。

关键词 井型高纯锗探测器，效率刻度，符合修正，^{139}Ce，^{134}Cs，^{131}I

中图分类号 TL817^{+}.2

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250118

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250118

Efficiency calibration and coincidence factor measurements for well HPGe detector

YU Guobing[1] XIANG Yunxiang[2] GU Xianbao[1] LIU Yi[1] HE Xu[1] ZHANG Wenliang[1] WANG Jinlong[1]

1(*Anhui Radiation Environment Supervision Station*, *Hefei 230071*, *China*)

2(*Anhui Fusion New Energy Ltd*., *Hefei 230000*, *China*)

Abstract **[Background]** Well-type HPGe detectors have the advantage of high detection efficiency and are commonly used for measuring small-sized samples. Coincidence correction is necessary in the measurement process, but such measurement data are rarely reported. **[Purpose]** This study aims to determine the detection efficiency curve and coincidence correction factors of well-type HPGe detectors. **[Methods]** Firstly, monoenergetic γ-ray nuclide standard sources including ^{241}Am, ^{109}Cd, ^{57}Co, ^{139}Ce, ^{51}Cr, ^{113}Sn, ^{85}Sr, ^{137}Cs, ^{54}Mn, ^{65}Zn, and ^{40}K were used to calibrate the full-energy peak detection efficiency of well-type HPGe detector in both top-mounted and in-well measurement modes. Then, standard sources of ^{60}Co, ^{88}Y, ^{131}I, ^{134}Cs, ^{152}Eu, and ^{133}Ba with known activities were prepared to measure the coincidence correction factors. Finally, the relationship between coincidence correction factors and sample height as well as sample activity was investigated. **[Results]** The efficiency value obtained using ^{139}Ce differs from the numerical fitting result by up to 49%. The activity measurement results are significantly influenced by the coincidence effect with smaller sample heights resulting in larger coincidence correction factors. When the sample

第一作者：於国兵，男，1974年出生，2013年于清华大学获硕士学位，研究领域为辐射环境监测

通信作者：项云翔，E-mail：yunxiang.xiang@ipp.ac.cn；顾先宝，E-mail：guxb0564@126.com

收稿日期：2025-05-19，修回日期：2025-11-12

First author: YU Guobing, male, born in 1974, graduated from Tsinghua University with a master's degree in 2013, focusing on radiation environmental monitoring

Corresponding author: XIANG Yunxiang, E-mail: yunxiang.xiang@ipp.ac.cn; GU Xianbao, E-mail: guxb0564@126.com

Received date: 2025-05-19, revised date: 2025-11-12

height is 0.5 cm, the coincidence correction factors for the 563.23 keV and 604.70 keV γ-ray full-energy peaks emitted by ^{134}Cs reach 8.00 and 3.01, respectively. When the sample activity exceeds approximately 1 000 Bq, the contribution of random coincidence to the total coincidence correction factor gradually increases, and the coincidence correction factor for the 80.19 keV γ-ray full-energy peak increases by 10% when the activity of ^{131}I increases from 1 300 Bq to 6 300 Bq. **[Conclusions]** For well-type HPGe detectors with high detection efficiency for low-energy photons, ^{139}Ce should be used with caution in efficiency calibration due to potential X-ray and γ-ray coincidence effects. Coincidence correction is essential for accurate activity measurements in well-type HPGe applications, particularly when measuring cascade-decay nuclides with small sample geometries or high activities. The measurement data provide practical guidance for selecting appropriate calibration sources and establishing correction procedures.

Key words　Well HPGe detector, Efficiency calibration, Coincidence correction, ^{139}Ce, ^{134}Cs, ^{131}I

α能谱仪、β液体闪烁能谱仪和γ能谱仪是环境样品放射性核素活度分析的常用测量设备[1–3]，其中井型高纯锗探测器（HPGe）（探测器晶体形状似井）具有大立体角、高探测效率的优点，常用于测量低样品量环境样品，例如：沉降灰、生物灰等环境样品的质量只有几克，需要将样品放置于井内测量，以获得更高的探测效率。但是，井型HPGe探测器在提供高探测效率的同时也会增加γ射线发生级联符合效应的概率，使测量结果不准确。由于目前的γ能谱测量系统时间分辨能力有限，无法将核素级联发射的两个或多个光子区分开来，导致测量系统将级联发射的两个或多个光子识别为一个事件。多条γ射线之间会发生级联符合效应，γ射线与X射线之间也会发生级联符合效应[4–5]，发生级联符合效应时，会使待分析γ射线全能峰的计数减少或增加[6–7]。利用系列单能γ核素标准源刻度HPGe探测器的探测效率是获得符合效应修正因子的常用方法[8–10]，但是关于常见单能γ核素标准源对井型HPGe探测器和具有较大灵敏面积的HPGe探测器是否适用的报道很少。使用γ能谱法精确测量样品中核素的活度浓度时，对结果进行符合相加修正是必要的。关于置顶式HPGe探测器（测量时将样品放置在探测器晶体顶部）级联符合修正的研究较多[11–14]，但是关于井型HPGe探测器符合相加修正测量数据的报道较少，Sima等[15]利用蒙特卡罗方法计算了^{134}Cs和^{60}Co在井型HPGe内测量时的符合修正因子，并用^{210}Pb、^{57}Co、^{51}Cr、^{7}Be、^{137}Cs、^{54}Mn、^{65}Zn和^{40}K标准源验证了计算结果，王世联等[16]根据^{134}Cs、^{60}Co等核素的衰变纲图计算了这些核素在井型HPGe内测量时的符合修正因子，这些研究均没有考虑标准源可能发射的X射线、样品几何特点、大活度引起的偶然符合等因素对符合修正因子的影响。

本文主要研究了常见效率刻度单能γ核素标准源对井型和大灵敏面积HPGe探测器的适用性，并使用井型HPGe测量了辐射环境监测中常见放射性核素的符合修正因子及其与样品高度的关系，还研究了部分核素活度与偶然符合的关系。对使用井型等大立体角HPGe探测器精确测量样品中放射性核素活度具有参考意义。

1　原理

1.1　效率刻度

使用HPGe γ能谱仪测量样品中放射性核素的活度前，需要对γ能谱测量系统进行效率刻度。通常使用单能γ核素标准源，得到一系列能量分别为E_0、E_1、E_2……（单位为keV）的γ射线全能峰探测效率$\varepsilon(E_0)$、$\varepsilon(E_1)$、$\varepsilon(E_2)$……，再通过对这些能量点全能峰探测效率的拟合，得到探测效率$\varepsilon(E)$与γ射线能量E之间的关系曲线。拟合函数采用式（1）：

$$\ln\varepsilon(E)=\sum_{i=0}^{k}b_i(\ln E)^i \tag{1}$$

式中：i为多项式的阶次；k为多项式的最高阶次，实验中取5；b_i为拟合常数。

1.2　符合修正因子测量

使用标准源法和距离法测量符合修正因子[17]。使用标准源法时，需使用一套发射单能γ射线的标准源刻度HPGe的全能峰探测效率，得到无符合效应影响的全能峰效率曲线$\varepsilon(E)$，根据效率曲线得到关心能点的全能峰探测效率$\varepsilon(E_0')$。在样品基质、几何特征、质量等参数与单能γ射线的标准源一致的前提下，使用待测核素标准源得到关心能点的全能峰探测效率$\varepsilon_0(E_0')$。待测核素发射能量为E_0'的γ射线全能峰计数率的符合修正因子F为：

$$F=\frac{\varepsilon(E_0')}{\varepsilon_0(E_0')} \tag{2}$$

标准源法需要使用已知活度的待测核素标准源，且对标准源样品的活度准确性要求高。

使用距离法测量符合修正因子时，需要将基质、几何特征、质量等参数一致的单能γ核素标准源和待测样品，分别放置在远离探测器的F位置上（可以忽略符合相加影响）和贴近探测器的N位置上进行测量，得到两个位置上的全能峰探测效率曲线$\varepsilon_F(E)$和$\varepsilon_N(E)$，根据效率曲线得到关心能点的全能峰探测效率$\varepsilon_F(E_0')$和$\varepsilon_N(E_0')$。待测核素发射能量为E_0'的γ射线全能峰计数率n_F和n_N，该全能峰的符合修正因子F为：

$$F=\frac{\varepsilon_N(E_0')n_F}{\varepsilon_F(E_0')n_N} \tag{3}$$

待测核素活度未知时，也可以使用距离法计算符合修正因子，但是该方法不适用于将样品放置在井型HPGe探测器的井内测量。

2 实验和设备

2.1 γ能谱探测器

实验中使用的井型γ能谱仪为Canberra公司生产的GCW5021型HPGe探测器，晶体尺寸为∅70 mm×60 mm，能量分辨为2.0 keV（^{60}Co，1 332 keV），井内径为10 mm，井深40 mm。还使用了灵敏面积较大的BE5030宽能型HPGe探测器，晶体尺寸为∅81 mm×31 mm，能量分辨为1.9 keV（^{60}Co，1 332 keV），γ能谱分析软件为Genie2000。

2.2 标准源

实验中使用的单能γ核素标准源是法国LEA公司生产的标准溶液，核素包括^{241}Am、^{109}Cd、^{57}Co、^{139}Ce、^{51}Cr、^{113}Sn、^{85}Sr、^{137}Cs、^{54}Mn和^{65}Zn，^{109}Cd比活度的不确定度为5%（k=2，95%的置信度，下同），其他核素比活度的不确定度均不大于3.5%，^{40}K溶液是使用KCl配置的，比活度的不确定度约为4.0%，^{133}Ba、^{134}Cs、^{152}Eu和^{226}Ra标准源是中国同辐股份有限公司生产的，核素比活度的不确定度分别不大于2.9%、3.5%、3.2%和3.6%。

3 测量结果

3.1 效率刻度

使用井型HPGe探测器测量样品中放射性核素的活度时，可以将样品放置在探测器晶体的顶部，称为置顶式测量方式，也可以将样品放置在探测器晶体的井内，称为井内测量方式。置顶式测量方式适用于样品量较大样品的测量，可以根据实验的需要制备不同几何形状的样品。井内测量方式常用于低样品量样品的测量，只能根据探测器井径的大小制备不同高度的样品。

3.1.1 置顶式测量方式

单能γ核素标准源是获得HPGe探测器全能峰探测效率曲线的常用标准源，其中的放射性核素一般只会发射一种能量的γ射线，不会发生级联符合效应。但有些核素虽然只会发射一种能量的γ射线，但是会产生X射线，γ射线和X射线可能会发生符合效应。^{139}Ce是单能标准源的常用核素[4–10,14]，主要通过轨道电子俘获发生衰变，并发射能量为166 keV的γ射线，同时，外层电子填充轨道俘获形成的空位还会产生X射线，X射线的能量主要为33 keV和38 keV（能量为33.03 keV X射线的发射率为22.81%，能量为33.44 keV X射线的发射率为41.89%，能量为37.80 keV的X射线的发射率为15.63%）[18]。实验室使用的GCW5021型HPGe探测窗为1 mm铝壳，晶体死层厚度为0.1 mm，BE5030型HPGe探测窗为0.6 mm碳纤维，晶体死层厚度为0.01 mm，一般P型同轴HPGe探测窗为2 mm左右的铝壳，平均晶体死层厚度为2 mm左右。由于P型同轴HPGe探测窗和晶体死层厚度较大，几乎所有的低能光子在到达HPGe晶体前都会被吸收，因此这种探测器对40 keV以下的光子几乎不响应[19–20]，也就不会产生γ射线与X射线之间的级联符合效应，可以将^{139}Ce用于这类HPGe的效率刻度。井型HPGe探测窗和晶体死层厚度小，虽然会吸收一部分低能X射线，但仍然对X射线具有较高的探测效率，因此γ射线与X射线之间可能发生级联符合效应。为了研究^{139}Ce对于低能X、γ射线响应好、探测效率高的井型和宽能型HPGe的适用性，使用§2.2中的单能γ核素标准源制备了不同几何形状的水溶液标准源样品，分别对GCW5021型（井型）和BE5030型（宽能型）HPGe探测器进行了全能峰探测效率刻度，效率刻度结果见图1和图2，图中的效率曲线是剔除了166 keV γ射线的效率后，根据不同能量γ射线测得的全能峰效率拟合得到的。在制备标准源样品时，选择了辐射环境监测中常用的∅50 mm×2 mm、∅50 mm×20 mm、∅70 mm×65 mm、∅75 mm×10 mm和∅10 mm×47 mm规格的样品盒，测量时，将这些规格的样品盒分别放置在两种HPGe探测器表面，其中∅10 mm×47 mm规格的样品只能放置在井型HPGe探测器的井内进行测量。

图1和图2测量结果显示，随着光子能量的增大，两种型号HPGe探测器的全能峰探测效率先增大后减小，在光子能量为100 keV左右时，全能峰探测效率达到最大。对于晶体体积一定的HPGe探测器，在入射条件相同的情况下，光子能量越大穿透能

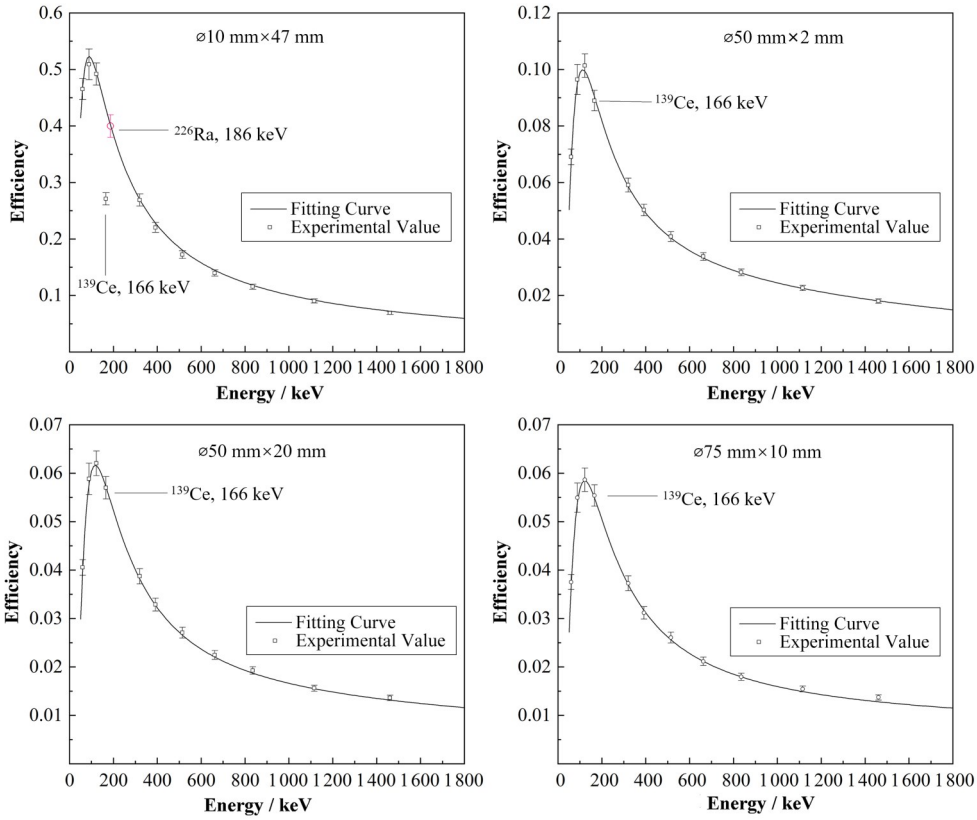


图1 GCW5021型HPGe探测器对不同规格样品的探测效率和相对不确定度
Fig.1 Detection efficiency of GCW5021 HPGe detector for different sample sizes and relative uncertainty

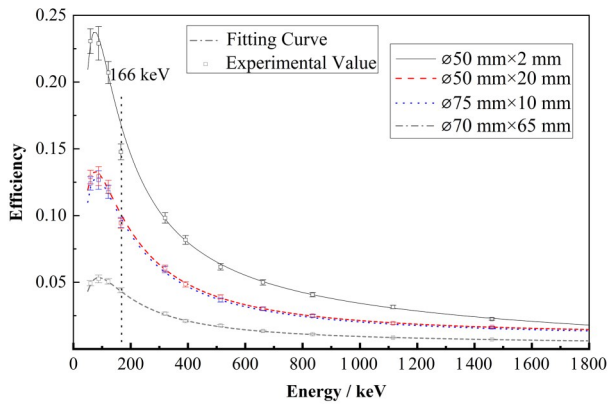


图2 BE5030型HPGe探测器对不同规格样品的探测效率（彩图见网络版）
Fig.2 Detection efficiencies of BE5030 HPGe for different sample sizes (color online)

力越强、全部能量都沉积在晶体内的概率越低，全能峰探测效率就越低。晶体外壳、探测窗、晶体死层等结构材料的存在会吸收一部分光子，光子能量越低，被吸收的概率越大。对于能量大于100 keV的光子，这种吸收作用贡献有限，对全能峰探测效率影响不大，而对于能量低于100 keV的光子这种吸收作用贡献显著，会使全能峰探测效率降低。探测器对同一能量光子的探测效率主要由晶体相对于样品的平均立体角和样品的自吸收决定，样品几何尺寸越大、与晶体平均距离越大，探测效率就越低。因此HPGe探测器对⌀70 mm×65 mm规格样品的探测效率比对⌀50 mm×2 mm规格样品的探测效率小得多。

由图1和图2中的测量结果可以看出，对于⌀10 mm×47 mm、⌀50 mm×2 mm和⌀50 mm×20 mm（BE5030测量）规格的样品，利用^{139}Ce得到的166 keV能量点处的全能峰探测效率，相对于拟合效率曲线值的偏差分别为38%、12%和6%，出现较大偏差的原因可能是标准源中^{139}Ce的活度值不准确，也有可能是效率曲线在拟合过程中产生了偏差。但是，对于⌀50 mm×2 mm、⌀50 mm×20 mm（GCW5021测量）、⌀70 mm×65 mm（BE5030测量）、⌀75 mm×10 mm和⌀75 mm×10 mm规格的样品，这个偏差均不大于2%，这就说明标准源中^{139}Ce的活度值是可靠的。为了验证HPGe对能量在166 keV附近γ射线的探测效率与拟合效率曲线的符合性，利用^{226}Ra发射的186 keV γ射线与166 keV γ射线能量相近的特点，配置了⌀10 mm×47 mm规格的^{226}Ra标准源样品。测量结果表明，186 keV γ射线的探测效率与拟合效率曲线的偏差不大于1%，这说明剔除

166 keV γ射线的效率后，数值拟合得到的全能峰效率曲线是可靠的。

为了研究部分样品在166 keV能量点处的全能峰探测效率出现较大偏差的原因，图3展示了使用GCW5021型HPGe探测器测得的∅10 mm×47 mm和∅50 mm×20 mm规格^{139}Ce标准源样品γ能谱和使用BE5030型HPGe探测器测得的∅50 mm×2 mm和∅50 mm×20 mm规格^{139}Ce标准源样品γ能谱。从能谱中可以看到，^{139}Ce刻度的效率与拟合效率曲线偏差较大时，166 keV γ射线与33 keV和38 keV X射线的符合峰明显，偏差很小时，符合峰不明显，这说明效率偏差的原因可能是由符合效应引起的。为了验证这一结论，使用Canberra公司开发的LabsSOCS和Genie2000软件，计算了使用BE5030型HPGe探测器测量∅50 mm×2 mm和∅50 mm×20 mm规格^{139}Ce水溶液标准源样品时全能峰计数率的符合修正因子，并根据计算结果修正了166 keV处的全能峰探测效率，修正后的效率值与拟合曲线值的偏差不大于3%。

探测效率是影响符合效应的主要因素，实验室使用的GCW5021型和BE5030型HPGe探测器的探测立体角和晶体体积比一般P型HPGe探测器大，增加了γ射线和X射线的探测效率。同时这两款探测器晶体外壳材料和电极设置更有利于低能光子的探测，这就增加γ射线与X射线发生符合效应的概率。因此，在使用含有^{139}Ce的单能标准源刻度HPGe探测效率时，需要验证所使用的探测器和样品规格是否会引起符合效应，HPGe探测器对能量在40 keV以下X射线的探测效率越高，这种符合效应越明显，对效率刻度结果的影响越大。但是很多研究工作[7,9]往往忽略了^{139}Ce产生的符合效应，可能会导致效率刻度结果不准确。

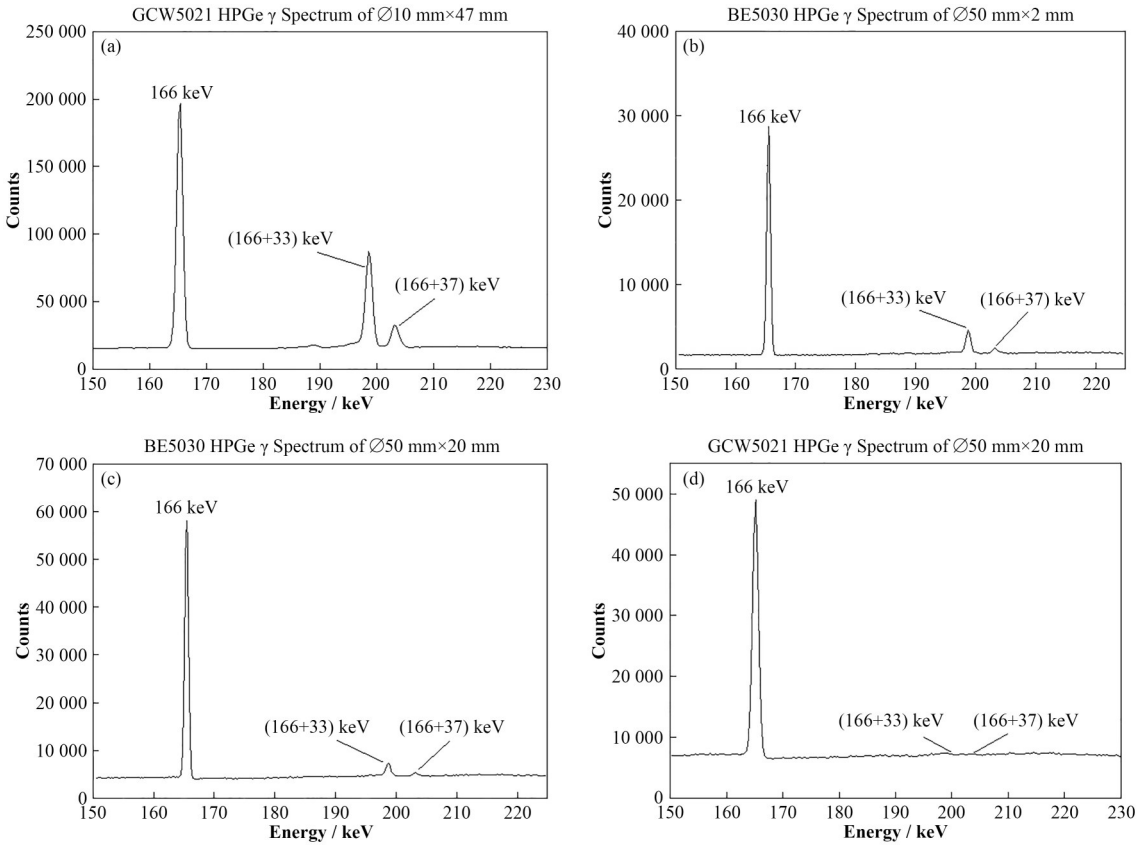


图3 两种HPGe探测器测得的^{139}Ce标准源样品γ能谱

Fig.3 γ energy spectra of ^{139}Ce standard source samples measured by two HPGe detectors

根据图1和图2显示的效率刻度结果，除能量为166 keV的γ射线以外，HPGe探测器对能量在60~662 keV的γ射线测量效率与拟合曲线的偏差不大于3%，但是对能量大于835 keV的γ射线测量效率相对于拟合曲线的偏差较大，最大偏差达到了5%（∅75 mm×10 mm，1 460 keV）。这是由于单能标准γ核素源中，发射的低能γ射线较多，而高能γ射线的效率测量值较少，导致效率曲线拟合的偏差相对较大。

效率刻度结果的误差和不确定度主要受到标准源活度、γ射线发射率、全能峰计数率、标准源取样量等因素的误差和不确定度的影响，按照GB/T16145

—2022中的方法计算了效率刻度结果的相对不确定度。其中，标准源活度的不确定度按照出厂证书上给定的数值计算，γ射线发射率的相对不确定度分别按照核数据库给出的^{241}Am、^{109}Cd、^{139}Ce、^{57}Co、^{51}Cr、^{113}Sn、^{85}Sr、^{137}Cs、^{54}Mn、^{65}Zn、和^{40}K的发射率不确定度（均小于1%，按照1%计算），每个核素发射的特征γ射线全能峰计数率的相对不确定度均小于1%，按照1%计算，标准源样品配置过程中取样量的相对不确定度按照2%进行估算。其中标准源活度的不确定度是影响效率刻度结果不确定度的主要因素，经过估算，GCW5021和BE5030型HPGe探测器效率刻度结果的相对不确定度在4%~6%。

3.1.2 井内测量方式

为了研究井型HPGe探测器井内测量方式探测效率与样品高度的关系，使用直径为10 mm、高度H分别为0.5 mm、1 mm、2 mm、3 mm、4 mm和5 mm的单能γ核素标准源水溶液样品刻度了井型HPGe探测器的探测效率，结果见图4，图中的效率曲线是剔除了166 keV γ射线的效率后，根据不同能量γ射线测得的全能峰效率拟合得到的。

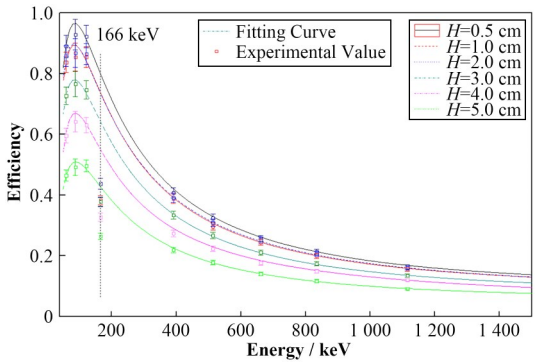


图4 HPGe探测器对不同高度样品的探测效率（彩图见网络版）

Fig.4 Detection efficiency of HPGe for different heights samples (color online)

由测量结果可以看出，井型HPGe探测器对γ射线全能峰探测效率随光子能量的变化特征与置顶式HPGe的（图2）相同。当光子能量相同时，样品高度越小全能峰探测效率越大，这是因为样品高度越小，样品越靠近“井”的底部，探测器相对于“样品源”的立体角越大，“样品源”发射的γ射线被探测到的概率也就越大。同时，样品高度越小，样品的质量越小，“样品源”发射的γ射线被样品本身吸收的概率也就越小，这也会增加全能峰探测效率。Unno等[21]利用蒙特卡罗方法计算了ORTEC GWL-150-15-S型HPGe探测器对井内不同高度水溶液样品（高度分别为0.8 mm、1.7 mm、2.5 mm、2.8 mm、3.3 mm、3.7 mm和4.0 mm）的全能峰探测效率，Byun等[22]利用MCNPX计算了Mirion GSW275L型HPGe（晶体体积275 cm^3，井直径28 mm，井深40 mm）对井内不同高度水溶液样品（高度分别为10 mm、20 mm和30 mm）的全能峰探测效率，结果与图3揭示的探测效率随样品高度和γ射线能量变化规律一致。

由图3中的测量结果可以看出，使用井型HPGe探测器测量样品高度H分别为0.5 cm、1 cm、2 cm、3 cm、4 cm和5 cm的水溶液标准源样品时，166 keV能量点处的效率测量值相对于数值拟合结果的偏差分别为49%、48%、46%、41%、40%和38%，H越小，偏差越大，而其他能量点处的效率测量值相对于数值拟合结果的偏差均不大于5%。这是因为样品高度越小，HPGe探测器对“井”内样品中^{139}Ce发射的γ射线和X射线的探测效率越高，γ射线和X射线发生符合效应的概率就越大，从而导致166 keV γ射线全能峰计数率损失增大。

因此，常用的单能γ核素效率刻度标准源中的^{139}Ce，并不适用于这种低能X、γ射线响应好、探测效率高的井型HPGe，所制备标准源的高度越小，效率刻度的偏差越大。

3.2 符合修正因子测量

在HPGe探测器的时间分辨内，不同原子核发射的两个以上光子（相互独立的光子）同时进入灵敏体积内，被探测系统记录为一个事件，也会使关心的全能峰计数减少或增加，这叫偶然符合。级联符合和偶然符合对修正因子的实验测量值都有贡献，级联符合与样品活度无关，偶然符合与样品活度有关。适用置顶测量方式测量环境样品时，一般不考虑偶然符合[20]，但是使用立体角大、探测效率高的井型HPGe测量高活度样品时需要考虑偶然符合对测量结果的影响。

3.2.1 级联符合修正因子

使用标准源法测量了^{60}Co、^{88}Y、^{134}Cs、^{152}Eu和^{133}Ba在井型HPGe探测器井内放置的全能峰符合修正因子，利用距离法和标准源法相结合测量了^{131}I在井型HPGe探测器内放置的全能峰符合修正因子，同时测量了这些核素在井型HPGe探测器表面放置的符合修正因子。井内放置标准源样品的规格为∅10 mm×47 mm，其中^{60}Co、^{88}Y、^{131}I、^{134}Cs、^{152}Eu和^{133}Ba的活度分别为99 Bq、83 Bq、105 Bq、127 Bq、213 Bq和164 Bq，表面放置标准源样品的规格为∅50 mm×20 mm，各核素的活度是∅10 mm×47 mm内相应核素活度的5倍。各核素符合修正因子测量结果见表1。

由于HPGe探测器对井内放置样品发射光子的探测效率更高，表1的测量结果中，同一核素井内放

表1　各核素符合修正因子测量结果

Table 1　Measurement results of coincidence correction factors for each nuclide

核素 Nuclide	能量 Energy / keV	发射率 Emissivity / %	井内放置符合修正因子 In-well coincidence correction factor	表面放置符合修正因子 Surface coincidence correction factor
^{60}Co	1 173	99.97	1.67	1.09
	1 332	99.99	1.77	1.12
^{88}Y	898	93.7	1.59	1.09
	1 836	99.2	1.84	1.26
^{131}I	80	2.62	2.75	1.10
	284	6.14	2.32	1.08
	364	81.7	0.99	1.00
^{134}Cs	563	8.38	3.38	1.17
	569	15.43	3.32	1.21
	605	97.60	1.94	1.09
	796	85.40	2.05	1.09
	802	8.73	2.88	1.15
	1 365	3.04	0.60	0.87
^{152}Eu	122	28.40	3.57	1.17
	245	7.49	6.69	1.26
	344	26.60	1.62	1.07
	779	12.96	2.43	1.11
	964	14.34	4.24	1.15
	1 086	9.92	1.53	1.01
	1 112	13.55	3.44	1.11
	1 408	20.87	3.97	1.18
^{133}Ba	81	34.06	3.85	1.23
	276	7.16	5.42	1.21
	303	18.00	4.08	1.14
	356	62.04	3.05	1.11
	384	8.94	1.23	1.02

置和表面放置的全能峰符合修正因子相差较大，最大的相差5.5倍，井内样品符合效应发生的概率显然大于表面放置样品。同样测量条件下，同一核素发射的不同能量γ射线的符合修正因子差异较大，^{152}Eu的245 keV γ射线全能峰符合修正因子最大达到6.69，而它发射的1 086 keV γ射线全能峰符合修正因子只有1.53，这主要是由原子核自身的衰变过程和探测器对相应能量γ射线探测效率的差异造成的。使用井型HPGe探测器测量大气沉降物中的^{131}I活度浓度时，如果分析364 keV的γ射线全能峰，符合修正因子为0.99，符合效应对结果影响很小，可不进行修正；如果分析80 keV或284 keV的γ射线全能峰，就需要对测量结果进行符合修正。测量沉降物中^{134}Cs的活度浓度时，如果将样品放置在井内，γ能谱中605 keV的γ射线全能峰面积需要乘以1.94，如果放置在探测器表面，只需要乘以1.09。

为了研究符合修正因子与井内样品高度的关系，制备了直径10 cm、样品高度H分别为0.5 cm、1 cm、2 cm、3 cm、4 cm和5 cm的^{134}Cs水溶液标准源样品，符合修正因子的测量结果见图5。

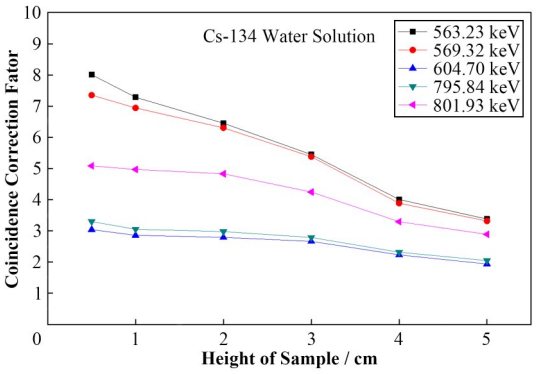


图5　样品高度与^{134}Cs符合修正因子的关系（彩图见网络版）

Fig.5　Relationship between sample height and ^{134}Cs coincidence correction factors (color online)

由测量结果可以看出，样品高度越小，符合修正因子越大，H=0.5 cm时，563.23 keV γ射线全能峰的符合修正因子达到了8.00，604.70 keV γ射线全能峰的符合修正因子为3.01，而H=5 cm时，这两个修正因子分别只有3.38和1.94。根据^{134}Cs的衰变纲图，

衰变时所发射的不同能量γ射线中，563.23 keV γ射线级联发射概率最大，因此符合修正因子比其他能量γ射线的大。样品高度越小，探测器的探测立体角越大，级联发射的两个或多个光子同时与晶体发生相互作用的概率越大，符合修正因子就越大。

使用标准源法计算全能峰符合修正因子时，结果的误差和不确定度主要来自单能标准γ核素源活度、单能标准γ核素发射率、单能标准γ核素γ射线全能峰计数率、单能标准γ核素标准源样品取样量、效率曲线拟合结果、待测核素源活度、待测核素发射率、待测核素γ射线全能峰计数率、待测核素标准源样品取样量等因素的误差和不确定度，符合修正因子测量结果的相对不确定度为7%~9%。

使用距离法计算全能峰符合修正因子时，结果的误差和不确定度主要来自单能标准γ核素源活度、单能标准γ核素发射率、单能标准γ核素γ射线全能峰计数率、单能标准γ核素标准源样品取样量、效率曲线拟合结果、待测核素γ射线全能峰计数率等因素的误差和不确定度，符合修正因子测量结果的相对不确定度为6%~8%。

3.2.2 偶然符合

为了研究偶然符合与样品活度的关系，使用GCW5021型HPGe探测器，采用井内测量方式测量了规格为∅10 mm×47 mm的不同活度^{131}I、^{134}Cs和^{133}Ba标准源样品的符合修正因子，结果见图6。图7是^{133}Ba γ能谱中的几个偶然符合峰。

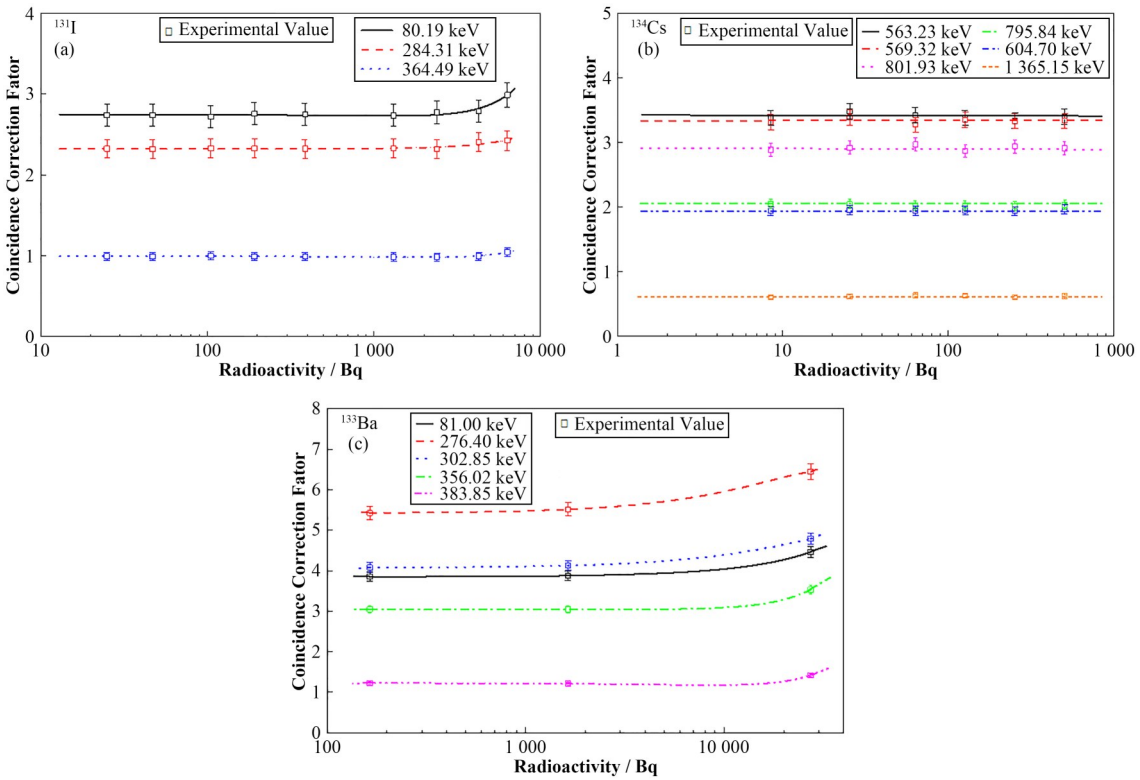


图6 ^{131}I (a)、^{134}Cs (b)和^{133}Ba (c)标准源样品的符合修正因子与活度的关系（彩图见网络版）

Fig.6 Coincidence correction factors for ^{131}I (a), ^{134}Cs (b) and ^{133}Ba (c) standard source samples *vs.* activity (color online)

由图6中的数据可以看出，不同能量γ射线全能峰计数符合修正因子测量结果的相对不确定度约为8%。当^{131}I和^{133}Ba的活度大于1 000 Bq时，符合修正因子会随活度而增大，活度小于1 000 Bq时，符合修正因子基本保持恒定，而^{134}Cs在1 000 Bq以下的符合修正因子一直保持恒定。^{131}I的活度从1 300 Bq增加到6 300 Bq，发射的80.19 keV γ射线全能峰的符合修正因子增加了10%，^{133}Ba的活度从1 600 Bq增加到27 000 Bq，它发射的276.40 keV γ射线全能峰的符合修正因子增加了20%。图7中可见几条γ射线之间的偶然符合峰，这说明偶然符合对测量结果产生了影响。样品的活度低于1 000 Bq时，级联符合是影响符合修正因子的主要因素，偶然符合可以忽略，当样品的活度超过1 000 Bq时，偶然符合对总符合修正因子的贡献逐渐增大，这是由γ能谱测量系统的时间分辨能力决定的。在目前能谱测量技术条件下，使用井型HPGe探测器测量高活度样品时，需要考虑偶然符合对结果的影响。

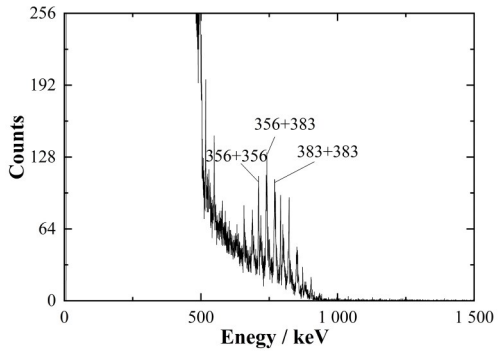


图7 ^{133}Ba γ能谱中的偶然符合峰
Fig.7 Random coincidence peaks in the γ energy spectrum of ^{133}Ba

4 结语

1）使用单能γ射线标准源刻度HPGe探测器的探测效率时，如果所使用的HPGe探测器对能量低于40 keV的光子不响应，就不需要考虑^{139}Ce发射γ射线与X射线的符合效应。如果所使用的探测器是对低能光子响应好、探测效率高的井型或宽能型HPGe探测器，在使用^{139}Ce标准源前需要验证其对效率刻度结果的影响。探测器晶体相对于样品的立体角越大、探测效率越高，符合效应发生的概率就越大，对刻度结果的影响也就越大。

2）能够发射γ射线能量在150~300 keV之间的单能γ射线标准源较少，且大部分半衰期短，^{139}Ce半衰期相对较长（137 d），是HPGe效率刻度常用核素。在这个能量区间，HPGe探测器的探测效率随能量的变化大、可供拟合的测量值少，^{139}Ce符合效应引起的效率偏差很难在效率刻度过程中被发现。

3）使用井型HPGe探测器测量样品活度时，样品高度越小全能峰探测效率越大，但是符合效应对探测系统的效率刻度和测量结果的影响程度也越大。

4）使用大立体角HPGe探测器测量放射性核素活度时，需要根据待测核素的衰变过程和样品的几何特点做符合效应修正，样品活度较大时，可能还要考虑偶然符合对结果的影响。

作者贡献声明 於国兵是本研究的实验设计者和执行人，完成数据分析和论文初稿的写作；项云翔、顾先宝为通信作者，实验负责人，主要负责论文方向的定夺，实验的指导、论文的最终修订、审阅及定稿等；项云翔、刘毅、何旭、张文亮、王金龙参与实验设计和实验结果分析。

参考文献

1 王元, 於国兵, 顾先宝, 等. ^{210}Po在吸烟过程中的分布[J]. 核技术, 2017, **40**(7): 070301. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.070301.
WANG Yuan, YU Guobing, GU Xianbao, *et al*. Distribution of ^{210}Po during smoking[J]. Nuclear Techniques, 2017, **40**(7): 070301. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.070301.

2 夏明明, 於国兵, 闻德运, 等. 基于液体闪烁能谱分析方法的环境水中^{228}Ra检测研究[J]. 核技术, 2019, **42**(3): 030301. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.030301.
XIA Mingming, YU Guobing, WEN Deyun, *et al*. Determination of ^{228}Ra in environmental water by liquid scintillation spectrometry[J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(3): 030301. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.030301.

3 Gu X B, Xu P, Wang Y, *et al*. Measurement of alpha-emitting therapeutic radiopharmaceutical Ra-223 dichloride injection by close/far S-D γ-spectrum method [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2023, **332**(5): 1435 – 1443. DOI: 10.1007/s10967-022-08681-8.

4 Lépy M C, Altzitzoglou T, Anagnostakis M J, *et al*. Intercomparison of methods for coincidence summing corrections in gamma-ray spectrometry[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2010, **68**(7 – 8): 1407 – 1412. DOI: 10.1016/j.apradiso.2010.01.012.

5 Dusan N, Mirjana D, Aleksandar K, *et al*. Coincidence summing of X- and gamma rays of ^{133}Ba[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007, **582**: 592 – 602. DOI: 10.1016/j.nima.2007.09.010.

6 Giubrone G, Ortiz J, Gallardo S, *et al*. Calculation of coincidence summing correction factors for an HPGe detector using GEANT4[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2016, **158 – 159**: 114 – 118. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.04.008.

7 Tomarchio E, Rizzo S. Coincidence-summing correction equations in gamma-ray spectrometry with p-type HPG edetectors[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2011, **80** (3): 318 – 323. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2010.09.014.

8 Collins S M, Pearce A K, Regan P H, *et al*. Precise measurements of the absolute *γ*-ray emission probabilities of ^{223}Ra and decay progeny in equilibrium[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2015, **102**: 15 – 28. DOI: 10.1016/j.apradiso.2015.04.008.

9 陈永伟. γ能谱法分析气溶胶样品的修正方法[J]. 海峡科学, 2019(4): 43 – 46. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8683.2019.04.012.

CHEN Yongwei. Correction method for analyzing aerosol samples by γ-ray spectrometry[J]. Straits Science, 2019 (4): 43–46. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8683.2019.04.012.

10 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 Lei. Coincidence summing correction methods and influence factors of γ spectrum[J]. Nuclear Techniques, 2022, **45**(6): 060401. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2022.hjs.45.060401.

11 周丰群, 张义民, 罗均华, 等. γ谱测量中级联符合效应修正研究[J]. 高能物理与核物理, 2007, **31**(5): 487–491. DOI: 10.3321/j.issn: 0254-3052.2007.05.013.
ZHOU Fengqun, ZHANG Yimin, LUO Junhua, *et al*. Investigation of the correction for cascade radiation coincidence summing in the measurement of gamma spectrometry[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2007, **31**(5): 487–491. DOI: 10.3321/j. issn: 0254-3052.2007.05.013.

12 罗奇, 胡世鹏, 孙慧斌, 等. 高纯锗探测器的效率曲线和符合因子计算[J]. 核技术, 2011, **34**(12): 901–904.
LUO Qi, HU Shipeng, SUN Huibin, *et al*. HPGe detector efficiency curve and coincidence factor calculation[J]. Nuclear Techniques, 2011, **34**(12): 901–904.

13 顾先宝, 於国兵, 卞岍雨, 等. 不同介质环境样品的符合修正方法研究[J]. 核电子学与探测技术, 2024, **44**(3): 542–548. DOI: 10.201.73/j.cnki.ned.20240416.004.
GU Xianbao, YU Guobing, BIAN Qianyu, *et al*. Coincidence correction methods for samples of different environmental media[J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2024, **44**(3): 542–548. DOI: 10.201.73/j.cnki.ned.20240416.004.

14 Rolle C, Lin Z C, Healey S. Computational approaches on photon-attenuation and coincidence-summing corrections for the detection of gamma-emitting radionuclides IN foods[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2017, **126**: 134–137. DOI: 10.1016/j.apradiso.2017.02.034.

15 Sima O, Arnold D. Self-attenuation and coincidence-summing corrections calculated by Monte Carlo simulations for gamma-spectrometric measurements with well-type germanium detectors[J]. Applied Radiation and Isotopes, 1996, **47**(9–10): 889–893. DOI: 10.1016/S0969-8043(96)00082-6.

16 王世联, 白涛, 凡金龙, 等. 阱型HPGe探测器的效率标定及符合相加效应校正[J]. 核电子学与探测技术, 2008, **28**(3): 481–485. DOI: 10.3969/j. issn. 0258-0934.2008.03.008.
WANG Shilian, BAI Tao, FAN Jinlong, *et al*. Efficiency calibration and coincidence summing effect correction of well-type HPGe detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, **28**(3): 481–485. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2008.03.008.

17 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会. 环境及生物样品中放射性核素的γ能谱分析方法: GB/T16145—2022[S]. 北京, 2022.
State Administration for Market Regulation and National Standardization Management Committee. Gamma energy spectrum analysis method for radionuclides in environmental and biological samples: GB/T16145—2022 [S]. Beijing, 2022.

18 CENDL. The database of nuclear physics (2025)[EB/OL]. [2025-04-19] http://www.nuclear.csdb.cn/texing.html.

19 Canberra Industries. Germanium detectors user's manual [M]. Meriden, 2013.

20 李君利. 实验室γ能谱测量与分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
LI Junli. Measurement and analysis of γ-ray spectrum in laboratory[M]. Beijing: China Communications Press, 2014.

21 Unno Y, Furukawa R, Yunoki A. Simulation of a well-type HPGe detector for samples both in the hole and on top of the endcap[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2017, **126**: 154–157. DOI: 10.1016/j. apradiso. 2017.02.011.

22 Byun J I, Hwang H Y, Yun J Y. A low background gamma-ray spectrometer with a large well HPGe detector[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2020, **156**: 108932. DOI: 10.1016/j.apradiso.2019.108932.