

基于 NaI (Tl) γ 能谱温漂修正方法研究

方登富, 韦应靖, 崔伟, 冯梅, 唐智辉, 李志刚, 以恒冠

中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006

摘要: **目的** 探究 NaI (Tl) γ 谱仪的道址随环境温度变化的规律, 通过 ^{60}Co 和 ^{152}Eu 能谱修正试验验证修正方法的可靠性。 **方法** 使用了 2 种稳谱方法, 分别为曲线拟合的修正方法和已知测量峰值的修正方法。 **结果** 温度变化会对 NaI (Tl) 测量谱峰位产生影响, 以 25℃ 为参考温度, 在 5℃ 时相对峰位会向右偏移 9.6%, 在 60℃ 向左偏移 16%。两种修正方法都是基于温度变化引起的道址变化进行的修正, 修正后的测量谱与参考测量谱峰位基本符合, 验证了修正方法的可靠性。 **结论** 在现场监测时, 为使测量谱信息准确可靠, 建议对环境温度进行监控, 以便进行相应的数据修正。

关键词: NaI(Tl) 探测器; 测量能谱; 温漂修正; 全能峰

中图分类号: TL81 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2021)01-0019-05

Research on temperature peak-shift correction methods for NaI (Tl) gamma spectrum

FANG Dengfu, WEI Yingjing, CUI Wei, FENG Mei, TANG Zhihui, LI Zhigang, YI Hengguan

China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006 China

Abstract: **Objective** The experiment project was designed to explore the variation of NaI (Tl) gamma spectrometer channels with environmental temperature. ^{60}Co and ^{152}Eu were used to verify the reliability of the correction methods. **Methods** Two correction methods were applied, which were curve fitting correction method and known measurement peak correction method. **Results** The experimental results showed that temperature changes had an effect on NaI (Tl) measured spectra peak. The relative peak will shift to the right at 5℃ by 9.6%, and to the left at 60℃ by 16%, with the reference temperature set at 25℃. The two methods are based on the channel change due to temperature changes, and they could effectively correct the temperature peak-drift. **Conclusion** In order to make the measured spectrum information accurate and reliable in field monitoring, it is suggested to monitor the environmental temperature so as to correct the measured data.

Keywords: NaI Detector; Measurement of Energy Spectrum; Correction of Temperature Peak-Shift; Full-Energy-Peak

随着核技术的广泛应用, 在国内外 γ 谱仪被广泛应用于环境天然核素, 人工核素的识别与鉴定^[1], 放射源的活度及 γ 剂量率测量等多个领域。在 γ 谱仪的使用过程中, 常常涉及到能量刻度、探测效率校准、峰面积等参数的求解, 其中准确的确定全能峰的面积及位置非常重要, 因为在测量和分析的过程中, 许多相关的物理量都是根据全能峰面积及位置而求得。目前放射性监测常用闪烁体探测器进行 γ 能谱测量与分析, 然而现场测量相比实验室更容易受到温度的影响, 探测系统周围环境温度的变化, 对闪烁体及光电倍增管影响较大^[2], 会造成 γ 测量能谱峰位偏移, 影响能谱的分辨率, 继而影响核素的识别^[3]。因此对其进行峰位偏移修正有一定的必要性。目前进行峰位偏

移修正有很多方法, 可以通过硬件电路实现^[4], 也可以通过软件调节。

本研究提供了 2 种 NaI (Tl) γ 谱仪能谱温漂修正的方法, 使用 ^{60}Co 和 ^{152}Eu 放射源进行修正方法的有效性试验。

1 材料与方法

1.1 实验设计及数据获取 闪烁探测器的温度效应通常由闪烁体的温度效应与光电倍增管的温度效应 2 部分构成。就 NaI(Tl) 闪烁体发光效率而言, 其温度系数可近似分为 5 段: -50℃ 时脉冲幅度下降至室温幅度的 40%~50%, -40℃~-15℃ 区间变化最剧烈, 光电峰脉冲幅度随温度升高而增大, -15℃ 以上变化趋缓, 至 25℃ 时幅度最大, 25℃~40℃ 间幅度

基本不变,或稍有下降;40℃~120℃时产生负效应,温度系数为-0.1%/℃~-0.2%/℃^[5]。光电倍增管的温度效应主要体现在光阴极的热发射及各打拿极二次发射系数受温度的影响,都会对测量谱产生影响,给测量结果带来误差^[6]。

为探究环境温度变化对 NaI (TI)探测器的实际影响^[7],实验方案设计主要分为 2 部分:NaI (TI) γ 谱仪探测系统和温湿度控制系统;γ 谱仪探测系统主要由晶体尺寸为 7.62cm × 7.62 cm 的 NaI (TI)探测器、高压电源、线性放大器、多道脉冲幅度分析器等组成,其结构如图 1 所示;温湿度控制系统利用 SDJ69AF 型高低温湿热实验箱实现温湿度调控,其工作室为 2000 mm(深) × 2000 mm(宽) × 2200 mm(高),可实现的温控范围为-60℃~100℃,温差为±0.5℃,外观如图 2 所示。

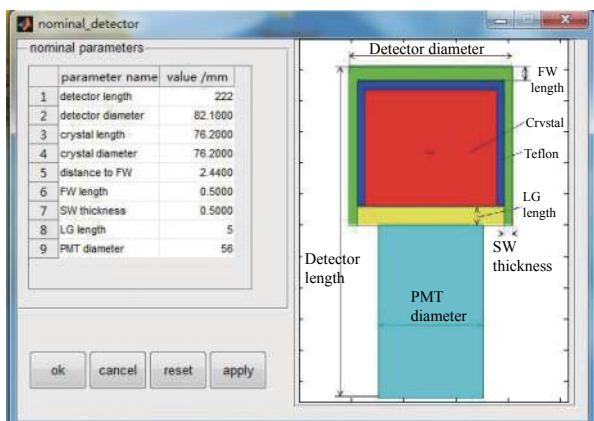


图 1 NaI (TI) 探测器结构图

Figure 1 Structure of the NaI (TI) detector



图 2 SDJ69AF 型温湿度实验箱 (-60℃~100℃)

Figure 2 Temperature and humidity experiment chamber (model: SDJ69AF, -60℃~100℃)

试验时,将能量刻度完成的 γ 谱仪测量装置放置在该温湿度箱中,调节放射源与探测器的距离为 20 cm,通过温度箱的温度设置窗口控制温度的变化,每个温度挡位下测量一幅 γ 能谱。为保证每个能谱在温度稳定后进行测量,每 2 个温度点调节的等待时间间隔

不小于 1 h,使其保持在一个相对稳定的环境中。在 -10℃~60℃ 范围内使用 ⁶⁰Co 和 ¹⁵²Eu 放射源进行试验,温度间隔为 5℃。观察温度变化引起的峰位偏移状态,如 1173.2 keV 和 1408 keV 峰位,以 25℃ 测量谱为参考峰位,其峰位相对偏移状况如图 3 所示,不同能量的全能峰峰位随着温度的升高,峰位都朝向减小的方向变化,峰位偏离最大可达 16%,其总体变化趋势及区间与西班牙 R.Casanovas 等^[8]所测量的基本符合,证明了测量方法的准确性。不同温度下对同一个全能峰,其最小峰位与最大峰位的差距高达 30%,如此大的差距对于谱分析造成极大的影响。例如对 ⁴⁰K 的 1461 keV 来讲,若 30% 的峰位漂移,就是 438 keV,这个范围相当于能量区间变成了 1212~1680 keV,完全覆盖了 ⁶⁰Co 的右侧全能峰,由于展宽影响,对于左侧的全能峰也会造成较大影响。在放射性监测中,相当于 ⁴⁰K 的本底直接影响了 ⁶⁰Co 的测量正确度^[9]。

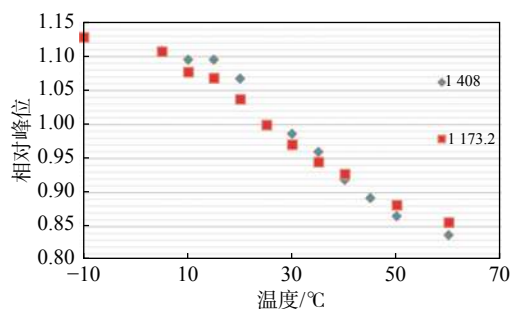


图 3 温度变化引起的相对峰位变化 (参考温度为 25℃)

Figure 3 Relative peak position change with temperature change (reference temperature is 25℃)

1.2 修正方法

1.2.1 曲线拟合修正方法 峰位偏移是不同温度条件下能谱测量位置的变化量,是一个相对值,任一温度下的峰位只有同参考峰位比较才能知道具体的偏移量,温度补偿的目的就是消除峰位偏移及失真的偏移量。

对于温漂实验结果,我们认为使用单一的核素能量进行曲线拟合并不能反映总体的情况,而在图 3 中对于不同的能量下的漂移情况有很大的相似性,选择总体拟合结果进行尝试,拟合结果如式(1)所示。

$$n(T)/n(T_0) = 1.097 - 4.199 \times 10^{-3}T \quad (1)$$

式中: $n(T_0)$ 为温度在 25℃ 时所对应的道址, $n(T)$ 为温度在测量温度 T 时所对应的道址。

NaI(TI)γ 谱仪能量刻度后的表达式为:

$$E(T_0) = 9.869 \times 10^{-5}n(T_0)^2 + 1.765n(T_0) - 8.634 \quad (2)$$

式中: $E(T_0)$ 为 25℃ 下道址为 $n(T_0)$ 所对应的能量。

由式(1)和式(2)可得,形成的最终拟合修正公式为

$$E(T_0) = 9.869 \times 10^{-5} \left[n(T) / (1.097 - 4.199 \times 10^{-3} T) \right]^2 + 1.765 \left[n(T) / (1.097 - 4.199 \times 10^{-3} T) \right] - 8.634 \quad (3)$$

式中: $E(T)$ 为温度 T 下道址 $n(T)$ 所对应的能量。经化简, 上式变为:

$$E(T) = 5.597 n^2(T) / (261.3 - T)^2 + 420.4 n(T) / (261.3 - T) - 8.634 \quad (4)$$

1.2.2 已知测量峰值修正方法 同样设定测量温度 25℃ 为参考测量谱, 在该温度下探测器测量计数率较稳定, 在实验中假设 $n(T_0)$ 为温度在 25℃ 时全能峰对应的道址, $n(T)$ 为温度在测量温度 T 时全能峰所对应的道址。那么温漂修正的目的就是将 T 时刻全能峰道址校准到参考温度下的全能峰道址, 由此可建立一个函数关系。

$$N_{\text{cor}}(T) = n(T) / f(T) \quad (5)$$

在实际测量中, 以单个峰值为例, 根据 γ 测量谱可以获取不同温度下该全能峰对应的道址, 以参考温度 25℃ 和 T 测量温度为例, 可得到该全能峰对应的校准函数。

$$f(T) = n(T) / n(T_0) \quad (6)$$

$n(T_0)$ 为参考温度 25℃ 时获取的全能峰对应道址, $n(T)$ 为温度在测量温度 T 时所对应的道址, 根据公式(5)和(6), 可得到 T 温度下该全能峰校准后的道址。

对于整个 γ 谱, 忽略其他的影响因素, 假设对所有道数由温度变化引起的峰位偏移可近似的认为是相等的, 那么对于整个 γ 谱的道址利用公式(7)可进行修正。

$$M_{\text{cor}} = M(T) / f(T) = M(T) n(T_0) / n(T) \quad (7)$$

$M(T)$ 为 T 温度下 γ 谱的道址, M_{cor} 为校准后的道址, 利用公式(7)可进行整个 γ 谱的温度补偿, 以达到减小峰位偏移的目的。

从公式中发现, 进行峰位修正的前提是需要测量谱中获取一个能量已知的全能峰及该全能峰在测量谱中对应的道址, 在现场测量中可利用 1461 keV 的 ^{40}K 或者其他具有代表性的峰位, 但是现场测量环境较复杂, 若无法提前预知核素的种类, 也无法在该谱中找到一个已知的峰, 那么可以使用额外的一个已知放射源来获取相关信息, 例如 ^{241}Am 去获取一个已知的全能峰。

2 结果

2.1 温度变化引起的峰位偏移情况 图 4(a) 为 ^{60}Co 测量谱, 从图中发现, 当温度升高时, 峰位向左偏移, 且计数率有所增加, 和 25℃ 测量谱相比较, 温度越高, 其向左偏移量越大, 温度降低时, 峰位开始向右偏移, 由于测量点较多, 对于 ^{60}Co 测量谱已经很难分辨出全能峰位置, 可以看出在 -10℃ ~ 60℃, 其全能峰道址的偏移量处于 500 ~ 650 道址内, 最低温度与最高温度测量谱的峰位偏移已经高达 30%。

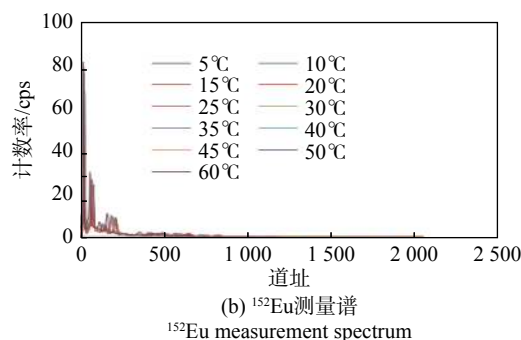
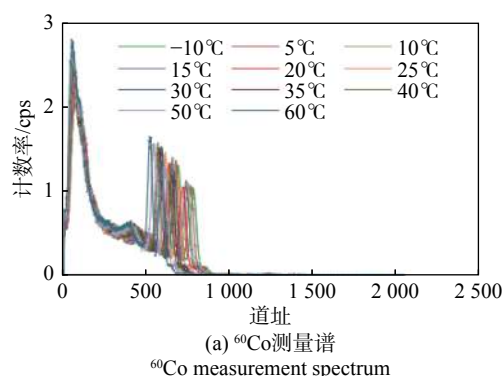


图 4 不同温度下 ^{60}Co 及 ^{152}Eu 测量谱
Figure 4 Measurement spectra of ^{60}Co and ^{152}Eu at different temperatures

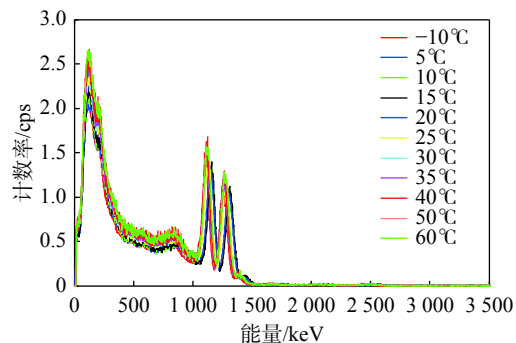
图 4(b) 为 ^{152}Eu 在不同温度下的测量谱, 从图中可以看出, 随着温度的变化, 其全能峰开始出现较大偏移, 当温度升高时, 峰位开始向左偏移, 且计数率有所增加, 和 25℃ 测量谱相比较时, 温度越高, 其向左偏移量越大, 其全能峰位置最大偏移量已经达到 50 道, 温度降低时, 峰位开始向右偏移, 温漂情况同 ^{60}Co 测量谱的规律相似, 验证了温度变化对测量谱全能峰偏移的影响。

2.2 方法 1 实验验证 为了验证方法 1 的可靠性, 使用曲线拟合的方法分别对 ^{60}Co 和 ^{152}Eu 的测量谱进行修正, 图 5(a) 为 ^{60}Co 在经过曲线拟合修正后的测量谱, 图 5(b) 为修正后 ^{152}Eu 测量谱, 图中不同温度下的峰位已完全重合, 修正后的 γ 谱峰位已不随温度的变化而偏移, 各个温度下的全能峰重叠在一起, 全能

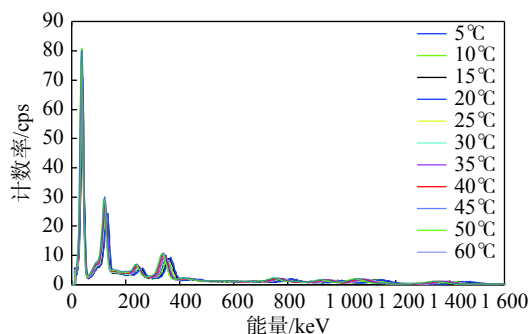
峰对应的道址也可以清晰的从测量谱中获取,直观的说明了修正公式的可靠性,验证了该温度补偿方法的有效性。

图 6 为使用 MATLAB 软件 mesh 和 view 函数绘制修正前及修正后相同峰位下不同温度的瀑布图,(a)图和(b)图为 ^{60}Co 曲线拟合修正前与修正后的图,(c)图和(d)图为 ^{152}Eu 曲线拟合修正前与修正后的图,设置视角 AZ 为 90, EL 为 -90,横轴表示道址,纵轴为温度变化量。从图 6 中(b)、(d)2 幅图可清晰发现经过修正后,峰位道址已经不随温度变化而变化,说明已知全能峰方法的温漂修正效果较好。

2.3 方法 2 实验验证 利用方法 2 对 5℃~60℃ 的 ^{60}Co 和 ^{152}Eu 放射源测量谱进行修正,图 7 为修正后测量谱,与图 4 比较可知,由温度变化引起的峰位偏移已得到修正,测量谱呈规则形状,可以清晰的从谱中判断各个峰的位置,从图中可以看出不同温度的测量谱已经重合在一起,全能峰对应的道址可清晰的从测量谱中获取,峰位保持在一定的位置,温度变化对峰位影响基本可以忽略,直观的说明了修正公式的可靠性,验证了该温度补偿方法的合理性。

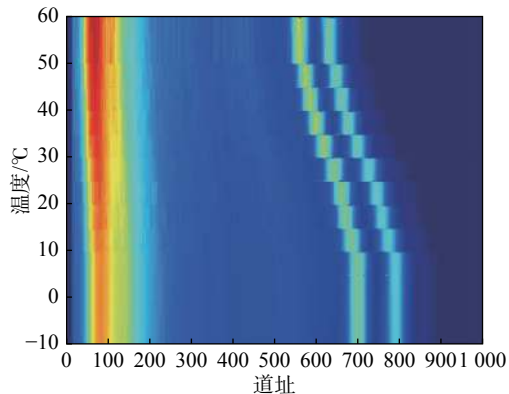


(a) ^{60}Co 修正后测量谱
 ^{60}Co measurement spectrum corrected

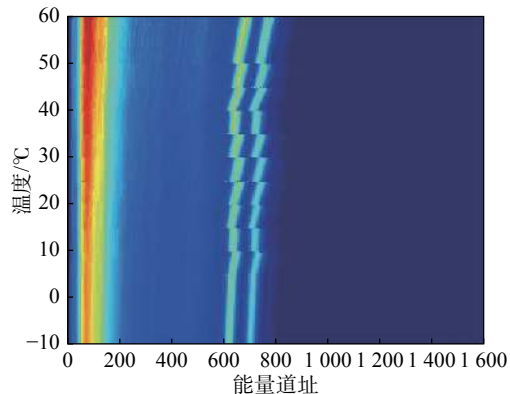


(b) ^{152}Eu 修正后测量谱
 ^{152}Eu measurement spectrum corrected

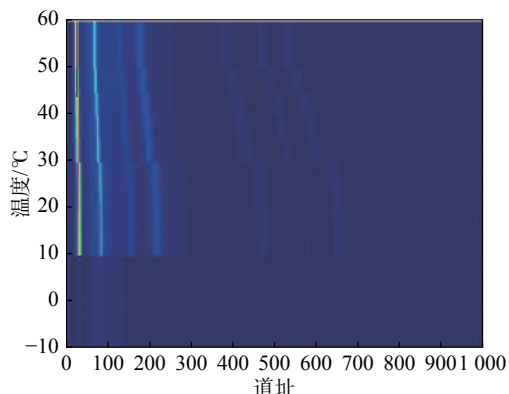
图 5 经方法 1 修正后的 ^{60}Co 和 ^{152}Eu 的测量谱
Figure 5 Measurement spectra of ^{60}Co and ^{152}Eu corrected by method 1



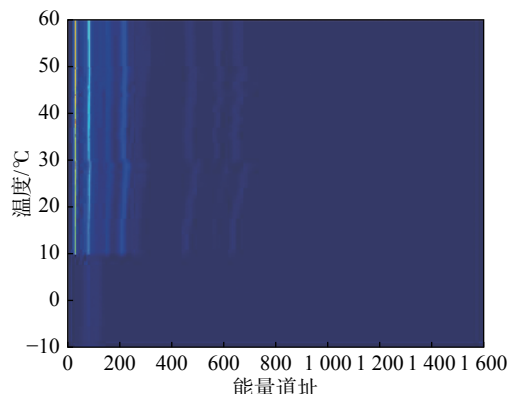
(a) ^{60}Co 修正前二维图
The two-dimensional graph of ^{60}Co uncorrected



(b) ^{60}Co 修正后二维图
The two-dimensional graph of ^{60}Co corrected



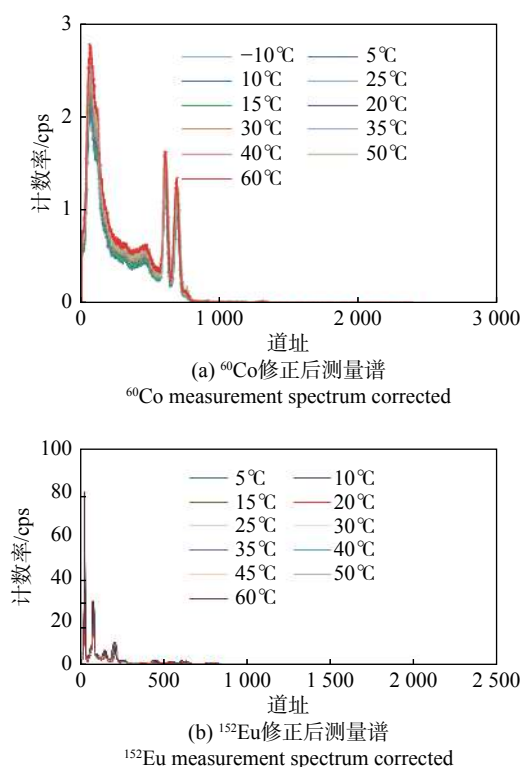
(c) ^{152}Eu 修正前二维图
The two-dimensional graph of ^{152}Eu uncorrected



(d) ^{152}Eu 修正后二维图
The two-dimensional graph of ^{152}Eu corrected

图 6 温度补偿修正前后的 ^{60}Co 和 ^{152}Eu 能谱二维显示效果图

Figure 6 Two dimensional graphs of ^{60}Co and ^{152}Eu spectra before and after temperature correction

图 7 经方法 2 修正后的 ^{60}Co 和 ^{152}Eu 的测量谱Figure 7 Measurement spectra of ^{60}Co and ^{152}Eu corrected by method 2

3 讨论

对晶体尺寸为 $7.62\text{ cm} \times 7.62\text{ cm}$ 的 NaI(Tl)探测器的温度效应进行了 $-10^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 的实验,得到了该系列探测器的道址随温度偏移变化的规律,该变化趋势与国外 R.Casanovas 等^[8]所得到的实验曲线基本符合,验证了测量方法的可靠性。实验结果证明以 25°C 为参考峰位,温度升高时其测量峰位会向左偏移,且计数率有一定的增加,温度降低时峰位会向右偏移,计数率会相对减小。

使用 ^{60}Co 和 ^{152}Eu 放射源对修正方法进行有效性验证,修正结果表明 2 种修正方法对温度变化引起的能谱峰位偏移修正均有较好的效果,与国外 R.Casanovas 等^[8]使用 $^{241}\text{Am}+^{137}\text{Cs}+^{60}\text{Co}$ 混合源修正 ^{152}Eu 测量谱的结果符合,且已知测量峰值方法比曲线拟合修正方法的效果更好。2 种方法的缺点是曲线拟合的方法针对的是相同的探测器,而对于不同的探测器则需要在实验室中获取该探测器的温漂曲线,有一定的局限性。已知测量峰值方法的缺陷是需要一个已知的全能峰,因此在现场测量过程中必须选择合适的全能峰。另外,曲线拟合和已知测量峰值方法只是对峰位偏移进行了修正,无法对温度变化引起的测量计数变

化进行修正,在后续工作中将会侧重于该方面的修正。从适用角度分析,曲线拟合修正方法对现场测量要求较高,需要准确的测量不同温度下的测量谱,以便对峰位变化的趋势进行拟合,而已知测量峰值方法主要依靠对测量谱中全能峰的预知或者策划,方法简单,但是在现场测量时如需携带额外的放射源则存在一定的风险,同样会提高本底测量值,因此在使用过程中需根据实际情况而定。若在源项已知的情况下,建议选择已知测量峰值方法进行修正,若源项处于未知情况,建议使用曲线拟合的情况下进行修正。现场测量过程中若 NaI(Tl) γ 谱仪使用频繁,为保障测量数据的准确可靠,建议定期对谱仪进行温漂修正实验。

利益冲突声明 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 由方登富、韦应靖提出测量过程温漂修正,进行文献调研与整理,着手设计实验,并进行数据分析,撰写论文。方登富、韦应靖、崔伟、冯梅、唐智辉、李志刚、以恒冠等人一起进行实验、并参与实验分析、讨论、撰写论文

参考文献

- [1] Milbrath BD, Choate BJ, Fast JE, et al. Comparison of LaBr_3 : Ce and NaI(Tl) scintillators for radio-isotope identification devices[J]. Nucl Instruments Methods Phys Res Sect A: Accel Spectrometers Detect Assoc Equip, 2007, 572 (2): 774-784. DOI: 10.1016/j.nima.2006.12.003.
- [2] Moszyński M, Nassalski A, Syntfeld-Kazuch A, et al. Temperature dependences of $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ and NaI(Tl) scintillators[J]. Nucl Instruments Methods Phys Res Sect A: Accel Spectrometers Detect Assoc Equip, 2006, 568 (2): 739-751. DOI: 10.1016/j.nima.2006.06.039.
- [3] 姚杰, 钱爱君, 高林峰. 2018年参加全国放射性核素 γ 能谱分析比对结果[J]. 中国辐射卫生, 2019, 28 (3): 321-324. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714x.2019.03.028.
Yao J, Qian AJ, Gao LF. Results of participating in the national intercomparison of radionuclide analysis by γ spectroscopy in 2018[J]. Chin J Radiol Heal, 2019, 28 (3): 321-324. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714x.2019.03.028.
- [4] 屠琦, 陈乐庚. 基于 DSP 的 NaI(Tl) 闪烁探测器温漂补偿方法[J]. 测控技术, 2016, 35 (7): 13-16. DOI: 10.19708/j.ckjs.2016.07.004.
Tu Q, Chen LG. A compensation method of temperature drift of NaI(Tl) scintillation detector based on DSP[J]. Meas Control Technol, 2016, 35 (7): 13-16. DOI: 10.19708/j.ckjs.2016.07.004.

(下转第 33 页)

- Standards Press, 2016.
- [14] 国家技术监督局, 卫生部. GB/T 16141—1995 放射性核素的 α 能谱分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- State Bureau of Technical Supervision, Ministry of Health, PRC. GB/T 16141—1995 Analytical method for radionuclides by alpha spectrometry[S]. Beijing: China Standards Press, 1995.
- [15] 鲍善芬, 赵霖, 李珍, 等. 2004年北京地区居民膳食调查[J]. 中国食品学报, 2007, 7(3): 9-17. DOI: 10.3969/j.issn.1009-7848.2007.03.002.
- Bao SF, Zhao L, Li Z, et al. Dietary survey of residents in Beijing in 2004[J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2007, 7(3): 9-17. DOI: 10.3969/j.issn.1009-7848.2007.03.002.
- [16] 陈东宛, 李勇, 李永进. 2015年北京市顺义区居民膳食营养摄入状况调查[J]. 中国食品卫生杂志, 2017, 29(3): 339-344. DOI: 10.13590/j.cjfh.2017.03.017.
- Chen DW, Li Y, Li YJ, et al. The status of dietary nutrients intake of the residents in Shunyi District, Beijing in 2015[J]. Chin J Food Hyg, 2017, 29(3): 339-344. DOI: 10.13590/j.cjfh.2017.03.017.
- [17] 常宪平, 崔宝荣, 周慧霞, 等. 北京市丰台农村地区成年居民日均饮水量调查[J]. 预防医学情报杂志, 2012, 28(6): 421-425. DOI: CNKI:SUN:YFYX.0.2012-06-006.
- Chang XP, Cui BR, Zhou HX, et al. Daily water intake and its influencing factors among adults in Fengtai rural area in Beijing[J]. J Prev Med Inf, 2012, 28(6): 421-425. DOI: CNKI:SUN:YFYX.0.2012-06-006.
- [18] 中华人民共和国卫生部. GB 14882—1994食品中放射性物质限制浓度标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. GB 14882—1994 Limited concentrations of radioactive materials in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994.
- [19] 曾文义, 尹明端, 曾宪章, 等. 世界大洋表层水中的 ^{210}Pb [J]. 海洋通报, 2000, 19(5): 21-25. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6392.2000.05.003.
- Zeng WY, Yin MD, Zeng XZ, et al. ^{210}Pb in the surface water of the world oceans[J]. Mar Sci Bull, 2000, 19(5): 21-25. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6392.2000.05.003.
- [20] 赵洪强. 东海带鱼摄食习性的研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2014.
- ZHAO HQ. Studies on the feeding habits of *Trichiurus lepturus* in East China Sea[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2014.
- [21] 林凯. 海洋环境介质中 ^{210}Pb 与 ^{210}Po 水平研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2018.
- Lin K. The research of ^{210}Po and ^{210}Pb in marine environmental media[D]. Hengyang: University of South China, 2018.
- [22] Strumińska-Parulska DI, Olszewski G, Falandysz J. ^{210}Po and ^{210}Pb bioaccumulation and possible related dose assessment in parasol mushroom (*Macrolepiota procera*) [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2017, 24(34): 26858-26864. DOI: 10.1007/s11356-017-0458-4.
- [23] 诸洪达, 刘庆芬. 中国成年男子摄入原生放射性核素所致内照射剂量估算[J]. 辐射防护, 2005, 25(2): 91-101, 108. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8187.2005.02.003.
- Zhu HD, Liu QF. Estimation of internal dose from primordial radionuclides to Chinese adult man[J]. Radiat Prot, 2005, 25(2): 91-101, 108. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8187.2005.02.003.
- [24] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation. Volume: sources[S]. 2000.

收稿日期: 2020-08-06

(上接第 23 页)

- [5] 李文杰, 侯霞, 郝秋伟. 碘化钠 γ 谱仪温度效应对陶瓷材料放射性核素测定的影响研究[J]. 中国测试, 2015, 41(4): 19-23, 28. DOI: 10.11857/j.issn.1674-5124.2015.04.005.
- Li WJ, Hou X, Hao QW. The study of temperature effect of sodium iodide γ -ray detector on measurement of ceramic materials radionuclide[J]. Chin Meas Test, 2015, 41(4): 19-23, 28. DOI: 10.11857/j.issn.1674-5124.2015.04.005.
- [6] 杨焕章. 航空 γ 能谱探头温度效应及校正技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- Yang HZ. Temperature character analysis and adjustment technique for the detector of aerial gamma-ray spectrometric[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.
- [7] Williams D, Snelling GF, Pickup J. A γ -spectrum stabiliser with compensation for the effects of detector temperature variation[J]. Nucl Instruments Methods, 1966, 39(1): 141-149. DOI: 10.1016/0029-554X(66)90054-1.
- [8] Casanovas R, Morant JJ, Salvadó M. Temperature peak-shift correction methods for NaI(Tl) and LaBr₃(Ce) gamma-ray spectrum stabilisation[J]. Radiat Meas, 2012, 47(8): 588-595. DOI: 10.1016/j.radmeas.2012.06.001.
- [9] 方登富, 李强, 唐智辉, 等. 海水就地 γ 谱仪能谱温漂修正研究[J]. 核电子学与探测技术, 2017, 37(6): 564-568. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2017.06.002.
- Fang DF, Li Q, Tang ZH, et al. Study on temperature drift correction of energy spectrum from seawater in-situ γ -ray spectrometer[J]. Nucl Electron Detect Technol, 2017, 37(6): 564-568. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2017.06.002.

收稿日期: 2020-07-10