

2014—2021 年参加全国放射性核素 γ 能谱分析能力考核结果分析

王欢, 孟庆华, 孙亚茹, 白斌, 孔玉侠, 马永忠

北京市疾病预防控制中心, 北京 100013

摘要: **目的** 保证实验室 γ 能谱仪对样品中放射性核素测定的准确度, 提高实验室人员放射性核素分析检测能力。**方法** 连续参加由中国疾病预防控制中心组织的全国放射性核素 γ 能谱分析能力考核, 利用 GEM-MX7080P4 型高纯锗 γ 能谱仪对样品进行测量, 对 2014—2021 年的 γ 能谱分析能力考核结果进行分析。**结果** 本实验室 2014—2021 年 γ 能谱分析能力考核结果总体合格率为 100%(8/8), 总体优秀率为 39%(3/8), 涉及 ^{208}Tl 、 ^{228}Ac 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 、 ^{238}U 和 ^{137}Cs 放射性核素 28 个测量结果的 RD 、 Z 、 U 和 U_{rel} 的分布范围分别为 $-11.82\% \sim 5.97\%$, $-0.59 \sim 0.30$, $0.02 \sim 0.92$ 和 $4.33\% \sim 10.49\%$ 。**结论** 本实验室利用 γ 能谱分析放射性核素方法正确, 出具的检测报告准确可靠。

关键词: γ 能谱分析; 放射性核素; 能力考核

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2023)04-0444-06

An analysis of the results of the national assessments of gamma spectrometry of radionuclides, 2014-2021

WANG Huan, MENG Qinghua, SUN Yaru, BAI Bin, KONG Yuxia, MA Yongzhong

Beijing Center for Disease Prevention and Control, Beijing 100013 China

Abstract: **Objective** To ensure the accuracy of gamma spectrometer in our laboratory for the analysis of radionuclides in samples and to improve the laboratory personnel's ability to perform analyses of radionuclides. **Methods** Our laboratory had continuously participated in the national assessments of gamma spectrometry of radionuclides organized by the Chinese Center for Disease Control and Prevention. The samples were measured by a high-purity germanium gamma spectrometer (GEM-MX7080P4). An analysis was performed on the results of the gamma spectrometry assessments from 2014 to 2021. **Results** Our laboratory had an overall qualified rate of 100% (8/8) and an overall excellent rate of 39% (3/8) in the gamma spectrometry assessments from 2014 to 2021. The distribution ranges of RD , Z , U , and U_{rel} for 28 measurements involving radionuclides ^{208}Tl , ^{228}Ac , ^{232}Th , ^{40}K , ^{238}U , and ^{137}Cs were -11.82% to 5.97% , -0.59 to 0.30 , 0.02 to 0.92 , and 4.33% to 10.49% , respectively. **Conclusion** The methods used in our laboratory for gamma spectrometry of radionuclides are accurate and the testing reports issued by our laboratory are reliable.

Keywords: Gamma spectrometry; Radionuclide; Assessment

Corresponding author: MA Yongzhong, Email: myz0905@126.com

高纯锗 γ 能谱仪在放射性测量中具有分辨率强、灵敏度高、刻度方便、样品前处理简单等优点, 广泛应用于日常和核事故应急状况下环境样品中放射性核素分析^[1-2]。实验室间的比对可以提高 γ 能谱实验室放射性核素检测能力和水平, 保证放射性核素 γ 能谱分析的质量^[3-4]。本实验室常年承担北京市大气、水、土壤以及食品中放射性核素监测工作, 为加强实验室质量控制, 提高放射性核素实验室检测能力, 本

实验室于 2014—2021 年连续参加了由中国疾病预防控制中心组织的全国放射性核素 γ 能谱分析能力考核, 对历年结果分析如下^[5-6]。

1 材料与方法

1.1 样品来源 比对组织机构为中国疾病预防控制中心, 组织机构将均匀性检验合格、完成定值的样品分份, 每份样品约 500 g 土壤样品粉末, 装入相应的

基金项目: 高层次公共卫生技术人才建设项目培养计划 (学科带头人-01-20); 北京市科技计划 (Z211100007021010)

作者简介: 王欢 (1988—), 男, 陕西紫阳人, 放射卫生防护技术主管技师, 从事辐射检测与评价工作。E-mail: cdcwanghuan@aliyun.com

通信作者: 马永忠, E-mail: myz0905@126.com

容器内密封后分组邮寄给各参加机构。 γ 能谱分析能力考核中使用的标准源为中国计量科学研究院提供的环境放射性标准物质,分别为河泥标准源(HN08095)

和土壤监测效率校准源(7NTR/70-1201),具体情况见表 1。

表 1 标准源基本信息

Table 1 Basic information of the standard sources

编号	质量/g	形状尺寸	表观密度/(g/cm ³)	核素	基质
HN08095	240.0	圆柱形, 直径75 mm, 高70 mm	0.97	²³⁸ U, ²³⁵ U, ²²⁶ Ra, ²³² Th, ⁴⁰ K, ⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs	河泥
7NTR/70-1201	340.1		1.38	²³⁸ U, ²³⁵ U, ²²⁶ Ra, ²³² Th, ⁴⁰ K, ²⁴¹ Am, ⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs	土壤

1.2 仪器设备 本实验室使用的仪器设备为 ORTEC 公司生产的 GEM-MX7080P4 型高纯锗 γ 谱仪测量系统, 其对 $3'' \times 3''$ NaI (TI) 探测器的相对探测效率为 71%。谱仪对 ⁶⁰Co 的 1332.5 keV γ 射线的能量分辨率约为 2.2 keV, 峰康比为 88:1, 积分本底为 3.01 s^{-1} (20~2 400 keV)。配套使用 DSPEC jr2.0 数字化多道分析器, 谱测量分析软件采用 Gamma Vision 32。谱仪测量时探测器置于壁厚 118 mm、内腔 $278 \text{ mm} (\Phi) \times 411 \text{ mm} (H)$ 的复合屏蔽铅室内。谱仪在样品测量前, 使用中国计量科学研究院提供的标准源对系统进行了能量刻度和效率刻度。

1.3 方法 依据《土壤中放射性核素的 γ 能谱分析方法》GB/T 11743—2013^[7] 和《高纯锗 γ 能谱分析通用方法》GB/T 11713—2015^[8] 对样品进行制备、测量、计算及不确定度评定。

1.3.1 样品制备与测量 收到考核样品后, 将样品平铺在搪瓷盘中并放入电子恒温烤箱, 温度设置为 105℃, 烘烤 4 h 后, 将样品置于干燥器中冷却至室温。将样品封装于 $75 \text{ mm} (\Phi) \times 70 \text{ mm} (H)$ 样品盒中, 称量土壤样品装样质量。按照本底、标准源、考核样品和本底的顺序放置在高纯锗 γ 能谱仪的探头上进行测量, 测量时间均为 72 h, 所有样品测量条件保持一致。

1.3.2 计算分析方法 2014—2021 年考核的目标核素涉及的 ²⁰⁸Tl、²²⁸Ac、²³²Th、²³⁸U、⁴⁰K 和 ¹³⁷Cs 均包括在标准源中, 其中 ²³²Th 的放射性比活度可依据平衡条件下子体 ²⁰⁸Tl 的特征能量 583.19 keV 或 ²²⁸Ac 的特征能量 911.07 keV 来计算, ²³⁸U 的放射性活度浓度可依据平衡条件下子体 ²³⁴Th 的特征能量 63.29 keV 来计算, ⁴⁰K 和 ¹³⁷Cs 分别根据其特征能量 1 460.75 keV 和 661.66 keV 来计算。因此考核样品采用目标核素特征能量全能峰计数的相对比较法进行计算, 目标核素比活度计算公式^[9-10]:

$$A_{is} = \frac{N_{is}/t_s - N_{ib}/t_b}{(N_{ic}/t_c - N_{ib}/t_b)m_s F_1 F_2} A_{ic} \quad (1)$$

式中 A_{is} 为考核样品第 i 种核素的比活度, Bq/kg; A_{ic} 是标准源第 i 种核素的活度, Bq; N_{is} , N_{ib} 和 N_{ic} 分别是考核样品、本底样品和标准源第 i 种核素的特征能量全能峰的净面积计数, counts; t_s , t_b 和 t_c 分别是考核样品、本底样品和标准源测量活时间 s; m_s 为被测样品净重, kg; F_1 自吸收校准因子; F_2 为核素 i 校正到组织者规定日期的衰变校正系数。测量结果的相对不确定度采用公式:

$$U_{\text{total}} = k \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2} \quad (2)$$

式中, U_{total} 为合成相对不确定度; k 为包含因子, 取 2; U_1 为计数率的相对不确定度; U_2 标准源的相对不确定度; U_3 样品称量相对不确定度; U_4 自吸收校正引入的相对不确定度。

1.4 比对结果判定方法 参考值由组织方确定, 以相对偏差 RD 、 Z 值, U 值以及相对合成不确定度 U_{rel} 4 个参数通过准确度和精确度来判定参加机构的考核结果, 公式如下:

$$RD = \frac{A_{is} - A_{ir}}{A_{ir}} \times 100\% \quad (3)$$

$$Z = \frac{A_{is} - A_{ir}}{\sigma} \quad (4)$$

$$U = \frac{|A_{is} - A_{ir}|}{2.58 \sqrt{U_{is}^2 + U_{ir}^2}} \quad (5)$$

$$U_{\text{rel}} = \sqrt{\left(\frac{U_{is}}{A_{is}}\right)^2 + \left(\frac{U_{ir}}{A_{ir}}\right)^2} \times 100\% \quad (6)$$

式中, RD 为测量值与参考值的相对偏差, %; A_{is} 为考核样品中核素 i 的测量值比活度, Bq/kg; A_{ir} 为考核样品中核素 i 的参考值比活度, Bq/kg; σ 为

标准偏差的目标值, 基于合理性原则, 取值为 $0.20 \times A_{\text{ir}}$, Bq/kg; U_{is} 为核素 i 的测量值的扩展不确定度 ($k=2$), Bq/kg; U_{ir} 为核素 i 的参考值的扩展不确定度 ($k=2$), Bq/kg。

1.5 判定标准 依据以上 4 个参数的计算以及准确度和精确度的判定后, 结合判定结果与提交结果报告资料的完整性打分, 其打分规则如下:

① 当比对样品中所有核素 $U \leq 1$ 且 $U_{\text{rel}} \leq 20\%$ 时考核结果为合格, 打分 60 分。

② 当比对样品中所有核素 $U \leq 0.4$ 且 $U_{\text{rel}} \leq 15\%$ 时, 加 10 分, 打分 70 分。

③ 同时满足 1、2 条件后, 对检测报告进行评分 (分值 10 分), 得 80 分方可参与优秀评比。

④ 再进行 Q 值评定, Q 值为 20 分, 总分大于等于 95 分为优秀。

2 结 果

2014—2021 年能力考核样品均为土壤样品, 共涉及放射性核素 6 种, 分别是天然放射性核素 ^{208}Tl 、 ^{228}Ac 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 、 ^{238}U 和人工放射性核素 ^{137}Cs 。共检测上述放射性核素 28 次, 分别检测 ^{208}Tl 、 ^{228}Ac 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 、 ^{238}U 和 ^{137}Cs 为 4、4、4、8、1 和 7 次。2014—2021 年放射性核素 γ 能谱分析能力考核结果见表 2。 RD 、 Z 、 U 和 U_{rel} 的分布范围分别为 $-11.82\% \sim 5.97\%$, $-0.59 \sim 0.30$, $0.02 \sim 0.92$ 和 $4.33\% \sim 10.49\%$, 均值 \pm 标准偏差分别为 $-2.50\% \pm 5.02\%$, $-0.13 \pm$

表 2 2014—2021 年本实验室放射性核素 γ 能谱分析能力考核结果

Table 2 Results of the assessments of gamma spectrometry of radionuclides performed by our laboratory, 2014-2021

年度	核素	测量值/(Bq/kg)	参考值/(Bq/kg)	$RD(\%)$	Z	U	$U_{\text{rel}}(\%)$
2014	^{208}Tl	13.10(0.40)	14.1(0.61)	-7.09	-0.35	0.53	5.30
	^{228}Ac	35.50(1.10)	36.00(1.62)	-1.39	-0.07	0.10	5.46
	^{40}K	486.20(11.70)	462.30(16.64)	5.17	0.26	0.46	4.33
	^{137}Cs	5.10(0.20)	5.20(0.23)	-1.92	-0.10	0.13	5.91
	^{232}Th	35.62(1.09)	37.24(1.86)	-4.35	-0.22	0.29	5.86
2015	^{40}K	483.11(11.61)	547.87(24.65)	-11.82	-0.59	0.92	5.10
	^{137}Cs	9.90(0.39)	10.39(24.65)	-4.72	-0.24	0.30	6.29
	^{232}Th	71.2(3.7)	74.4(3.7)	-4.30	-0.22	0.24	7.19
2016	^{40}K	624(28)	692(31)	-9.83	-0.49	0.63	6.34
	^{137}Cs	14.2(0.7)	15.4(0.8)	-7.79	-0.39	0.44	7.16
	^{232}Th	66.3(3.4)	69.0(3.5)	-3.91	-0.20	0.21	7.21
2017	^{40}K	675(31)	637(29)	5.97	0.30	0.35	6.47
	^{137}Cs	28.1(1.3)	27.2(1.3)	3.31	0.17	0.19	6.65
	^{232}Th	55.2(2.9)	59.7(4.5)	-7.54	-0.38	0.33	9.19
2018	^{40}K	632(3)	677(34.5)	-6.65	-0.33	0.37	7.18
	^{137}Cs	9.01(0.49)	9.80(0.49)	-8.06	-0.40	0.44	7.39
	^{208}Tl	27.2(1.4)	25.9(1.4)	5.02	0.25	0.25	7.46
2019	^{228}Ac	77.4(4)	77(4)	0.52	0.03	0.03	7.33
	^{40}K	1445(73)	1555(78)	-7.07	-0.35	0.40	7.12
	^{238}U	166.9(9.4)	161(10)	3.66	0.18	0.17	8.38
2020	^{208}Tl	20.4(1.1)	20.3(1.1)	0.49	0.02	0.02	7.64
	^{228}Ac	54.8(2.9)	56(3)	-2.14	-0.11	0.11	7.53
	^{40}K	828(38)	819(37)	1.10	0.05	0.07	6.44
	^{137}Cs	12(0.6)	11.5(0.6)	4.35	0.22	0.23	7.23
	^{208}Tl	15.5(1.0)	16.2(1.2)	-4.32	-0.22	0.17	9.82
2021	^{228}Ac	42.5(2.8)	44.1(3.6)	-3.63	-0.18	0.14	10.49
	^{40}K	515(30)	548(38)	-6.02	-0.30	0.26	9.06
	^{137}Cs	18(1.1)	17.5(1.4)	2.86	0.14	0.11	10.07

注: 括号中数字表示测量值和参考值的 2 倍扩展不确定度。

0.25, 0.28 ± 0.20 和 $7.20\% \pm 1.50\%$ 。按照 $U \leq 1$ 且 $U_{\text{rel}} \leq 20\%$ 时考核结果为合格的标准, 28 次放射性核素测量结果均合格。按照 $U \leq 0.4$ 且 $U_{\text{rel}} \leq 15\%$ 时考核结果满足优秀的必要条件之一, 28 次放射性核素测量结果 U_{rel} 均小于 15%, U 值 ≤ 0.4 占比为 79% (22/28), U 值 > 0.4 有 6 次, 分别是 2014、2015 和 2016 年 ^{40}K ($U = 0.46$ 、 0.92 和 0.63) 3 次, 2016 和 2018 年 ^{137}Cs ($U = 0.44$ 、 0.44) 2 次和 2014 年 ^{208}Tl ($U = 0.53$) 1 次。2014—2021 年考核结果均合格, 其中 2017 年、2020 年和 2021 年考核结果优秀, 总体合格率为 100% (8/8), 总体优秀率为 39% (3/8)。如果针对每次考核中单个核素而言, 单个核素测量结果按照 $U \leq 1$ 且 $U_{\text{rel}} \leq 20\%$ 时为合格, $U \leq 0.4$ 且 $U_{\text{rel}} \leq 15\%$ 时为优秀, 核素测量结果合格率为 100% (28/28), 优秀率为 75% (18/24), 其中 ^{208}Tl 、 ^{228}Ac 和 ^{232}Th 测量结果的优秀率为 92% (11/12)、 ^{40}K 测量结果优秀率为 63% (5/8)、 ^{238}U 测量结果优秀率为 100% (1/1) 和 ^{137}Cs 测量结果优秀率为 71% (5/7)。从图 1 和图 2 可以看出, 随着逐年参加比对, U 值逐渐降低至满足 $U \leq 0.4$ 考核优秀的条件, U_{rel} 虽有波动, 但均满足 $U_{\text{rel}} \leq 15\%$ 考核优秀的条件。

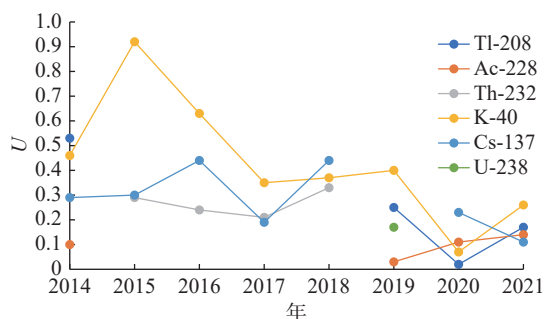


图 1 2014—2021 年考核结果 U 值

Figure 1 U values for the assessments, 2014-2021

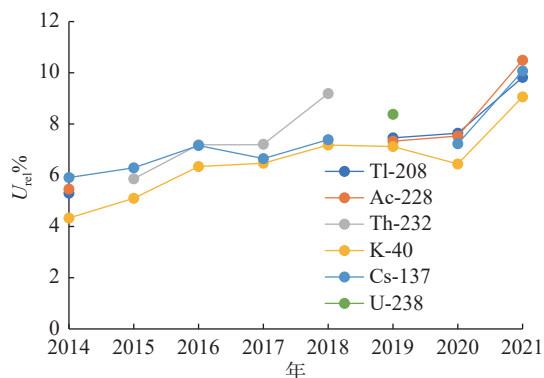


图 2 2014—2021 年考核结果 U_{rel} 值

Figure 2 U_{rel} values for the assessments, 2014-2021

3 讨论

本实验室在 2014—2021 年全国放射性核素 γ 能

谱分析检测能力考核中合格率为 100%, 通过准确度 ($|RD|$ 、 $|Z|$ 和 U) 和精确度 (U_{rel}) 来判定测量值与参考值的差异程度, $|RD|$ 均 $< 20\%$, $|Z|$ 和 U 均 < 1 , 说明在 99% 的给定概率水平下测量值与参考值不存在显著差异, U_{rel} 均 $< 15\%$ 表明测量值有优秀的精确度。说明实验室质量控制体系完善, 相关技术人员熟练掌握了实验室 γ 能谱分析方法, 能够准确测定样品中的放射性核素比活度。

比对考核中涉及天然放射性核素的分析, 按照本底、标准源、考核样品和本底的顺序进行测量, 在考核样品测量前后分别测量空样品盒作为本底样品, 取均值作为本底结果, 减少了实验室本底波动对测量结果的干扰。由于标准源中的核素包括历年考核中所涉及的核素, 因此在测量中使用的方法是相对比较法, 不考虑样品的自吸收和符合相加, 此方法较效率曲线法误差更小。定期用标准源对高纯锗 γ 能谱仪进行刻度, 保证峰位确定的准确性。以上因素均是取得良好考核结果的原因。

2014—2021 年 28 次放射性核素测量结果 U_{rel} 在 5.0%~10.5% 之间波动, 但是由于 U 值 6 次 > 0.4 而不满足优秀评定条件, 其中 ^{40}K 3 次, 相对偏差 RD 分别为 5.13%、-11.82% 和 -9.83, ^{137}Cs 2 次, 相对偏差 RD 分别为 -7.79% 和 -8.06, ^{208}Tl 1 次, 相对偏差 RD 为 -7.09%。由于在核素比活度计算中使用的是相对比较法, 其基本假设样品源和标准源有相同的探测效率, 这就要求测量样品与标准源有相同的体积、密度、形状、基质组成以及测量时与探测器相对位置相同。这在实践中是不可能完全匹配的, 特别是样品与标准源基质成分相对含量会存在差别, 样品与标准源密度不同引起不同的自吸收效应导致 U 值偏大。本实验室 2019 年前在考核中使用的标准源的表现密度 (装样质量/样品盒体积) 为 0.97 g/cm^3 , 而在考核中的土壤样品的表现密度均 $> 0.97 \text{ g/cm}^3$, 当样品密度大于标准源密度时, 在使用相对比较法时, 由于自吸收效应的不同导致测量值小于参考值, 因此在 6 次 U 值 > 0.4 的情况下, 相对负偏差出现 5 次。

从 2019 年开始本实验室使用新购入的土壤监测效率校准源, 其表现密度为 1.38 g/cm^3 , 同时在装样过程中使用定制液压器制样, 使样品和标准源的表现密度一致, 减少自吸收效应对测量结果的影响, 因此 2019—2021 年 U 值均 ≤ 0.4 。如果样品与标准源密度不同应进行相应的自吸收校正, 可以通过实验法或基于蒙特卡罗模拟的方法进行效率修正^[11-13]。影响相对

比较法测量准确性的另一个关键因素就是标准源的准确性,因此必须保证标准源定期经法定部门检定或校准。

在进行环境样品测量时,各种天然放射性核素 γ 射线会对考核样品中的待分析核素造成干扰,特别是对于单能放射性核素如 ^{40}K 和 ^{137}Cs 。 ^{232}Th 的子体 ^{228}Ac 的1459.2 keV γ 射线会对 ^{40}K 的1460.8 keV γ 射线产生干扰, ^{226}Ra 的子体 ^{214}Bi 的665.45 keV γ 射线会对 ^{137}Cs 的661.6 keV γ 射线产生干扰。而环境样品尤其是土壤样品中均含有 ^{232}Th 和 ^{226}Ra ,尤其是在 ^{232}Th 和 ^{226}Ra 含量特别大时,由于射线能量非常接近,通过解谱软件进行重叠峰分离一般较难实现。在具体的分析中可以利用效率曲线法或混合体标准源实验法消除 γ 能谱中 ^{232}Th 对 ^{40}K 的干扰以及 ^{226}Ra 对 ^{137}Cs 的干扰^[14]。

要在放射性核素 γ 能谱分析能力考核中取得良好的结果,也需要加强实验室 γ 能谱分析质量控制。检测报告和原始记录信息完整,名词术语准确表述、符号、单位和有效位数规范使用,原始记录还需公式表述正确,计算过程完整;实验设备进行定期维护保养、期间核查和检定或校准;相关技术人员参加国家组织的各种培训考核以及仪器厂家的技术培训;实验设备定期的能量刻度、效率刻度和本底测量等。

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 王欢负责本研究的设计、测量、数据整理与论文撰写;孟庆华、孙亚茹和孔玉侠负责协同数据整理;白斌协同负责方案设计;马永忠负责指导论文修改

参考文献

- [1] 孟庆华, 马永忠, 王欢, 等. 2009—2016年高纯锗 γ 能谱分析方法比对结果分析[J]. 中国辐射卫生, 2018, 27(2): 145-147, 152. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2018.02.014.
Meng QH, Ma YZ, Wang H, et al. Analysis of the intercomparison results on radioactivity measurements by HPGe γ spectrometer system during 2009-2016[J]. Chin J Radiol Health, 2018, 27(2): 145-147, 152. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2018.02.014.
- [2] Díaz-Asencio M, Sanchez-Cabeza JA, Ruiz-Fernández AC, et al. Calibration and use of well-type germanium detectors for low-level gamma-ray spectrometry of sediments using a semi-empirical method[J]. J Environ Radioact, 2020, 225: 106385. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106385.
- [3] Glavič-Cindro D. Comparison of intercomparison results of gamma ray spectrometry of spiked and real samples[J]. Appl Radiat Isot, 2018, 134: 59-63. DOI: 10.1016/j.apradiso.2017.07.009.
- [4] Mikami S, Ishikawa D, Matsuda H, et al. Guidance for *in situ* gamma spectrometry intercomparison based on the information obtained through five intercomparisons during the Fukushima mapping project[J]. J Environ Radioact, 2019, 210: 105938. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2019.03.014.
- [5] 王欢, 孟庆华, 马永忠, 等. 2017—2020年北京地区大气气溶胶中 ^{7}Be 和 ^{210}Pb 放射性活度浓度监测与分析[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2021, 41(9): 690-694. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2021.09.009.
Wang H, Meng QH, Ma YZ, et al. Monitoring and analysis of activity concentrations of ^{7}Be and ^{210}Pb in atmospheric aerosol in Beijing from 2017 to 2020[J]. Chin J Radiol Med Prot, 2021, 41(9): 690-694. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2021.09.009.
- [6] 孟庆华, 马永忠, 王欢, 等. 2017-2018年北京地区土壤的放射性水平监测与分析[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2020, 40(9): 702-706. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2020.09.009.
Meng QH, Ma YZ, Wang H, et al. Monitoring and analysis of radioactivity in soils in Beijing during 2017-2018[J]. Chin J Radiol Med Prot, 2020, 40(9): 702-706. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2020.09.009.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 11743—2013 土壤中放射性核素的 γ 能谱分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 11743—2013 Determination of radionuclides in soil by gamma spectrometry[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 11713—2015 高纯锗 γ 能谱分析通用方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 11713—2015 General analytical methods of high-purity germanium gamma spectrometer[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [9] Wang S, Yang BL, Zhou Q, et al. Radionuclide content and risk analysis of edible mushrooms in northeast China[J]. Radiat Med Prot, 2021, 2(4): 165-170. DOI: 10.1016/j.radmp.2021.10.001.
- [10] Tuo F, Xu CH, Zhang Q, et al. A review of nationwide radioactivity comparisons on gamma-ray spectrometry organized by the NIRP, China[J]. Appl Radiat Isot, 2014, 87: 435-438. DOI: 10.1016/j.apradiso.2013.11.072.
- [11] 李明生, 姜庆寰, 程金生. 应用Geant4模拟EBT3胶片的能量响应和质子射程测量[J]. 中国辐射卫生, 2022, 31(6): 669-673. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.06.005.
Li MS, Jiang QH, Cheng JS. Energy response and proton range

- measurement with EBT3 film simulated by Geant4[J]. *Chin J Radiol Health*, 2022, 31 (6) : 669-673. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.06.005.
- [12] 赖忠俊, 宣志强, 俞顺飞, 等. 有源-无源 γ 能谱分析方法在分析环境样品中放射性核素的应用[J]. *中国辐射卫生*, 2020, 29 (4) : 378-381,386. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.04.014.
- Lai ZJ, Xuan ZQ, Yu SF, et al. Application of sources and sourceless methods of γ spectrometry for analysis of radionuclides in environmental sample[J]. *Chin J Radiol Health*, 2020, 29 (4) : 378-381,386. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.04.014.
- [13] 孔淑颖, 杨宝路, 王仁生, 等. 基于Geant4模拟 ^{37}Ar 活度测量计数损失的修正方法[J]. *中国辐射卫生*, 2023, 32 (2) : 93-97,101. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2023.02.001.
- Kong SY, Yang BL, Wang RS, et al. Counting loss correction in ^{37}Ar activity measurement based on Geant4 simulation[J]. *Chin J Radiol Health*, 2023, 32 (2) : 93-97,101. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2023.02.001.
- [14] 王崇杰, 张爱莲. 消除 γ 能谱中 ^{232}Th 对 ^{40}K 的干扰[J]. *核技术*, 2003, 26 (11) : 831-833. DOI: 10.3321/j.issn:0253-3219.2003.11.006.
- Wang CJ, Zhang AL. Eliminating interference of ^{232}Th to ^{40}K in γ energy spectra[J]. *Nucl Tech*, 2003, 26 (11) : 831-833. DOI: 10.3321/j.issn:0253-3219.2003.11.006.
- (收稿日期:2023-01-06)

(上接第 443 页)

- [14] 陈清风, 刘利英, 王健, 等. 江西省某典型非铀矿山高氡暴露矿工健康效应现状调查[J]. *中国辐射卫生*, 2022, 31 (3) : 311-313,319. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.03.010.
- Chen QF, Liu LY, Wang J, et al. Current health status of high-radon exposure miners in a typical non-uranium mine in Jiangxi Province, China[J]. *Chin J Radiol Health*, 2022, 31 (3) : 311-313,319. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.03.010.
- [15] 沈威, 高柏, 章艳红, 等. 临水河天然放射性核素调查及健康风险评估[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19 (19) : 374-381.
- Shen W, Gao B, Zhang YH, et al. Investigation of radionuclides and health risk assessment in Linshui River[J]. *Sci Technol Eng*, 2019, 19 (19) : 374-381.
- [16] 王天姿, 涂戡, 万骏. 泰山核电站周围海洋生物放射性水平调查[J]. *中国辐射卫生*, 2023, 32 (2) : 108-114. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2023.02.004.
- Wang TZ, Tu Y, Wan J. Radioactivity in marine organisms around Qinshan nuclear power plant[J]. *Chin J Radiol Health*, 2023, 32 (2) : 108-114. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2023.02.004.
- [17] 王蕾. 蚌埠市2011—2017年度饮用水源地地表水总 α 、总 β 放射性水平监测分析[J]. *环境与发展*, 2018, 30 (7) : 134-135. DOI: 10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2018.07.079.
- Wang L. Monitoring and analysis of the total α and total β radioactivity levels in surface water in Bengbu from 2011 to 2017[J]. *Environ Dev*, 2018, 30 (7) : 134-135. DOI: 10.16647/j.cnki.cn15-1369/X.2018.07.079.
- [18] 吕旭雅, 李慧萍, 马秀凤, 等. 2012—2021年北京市水源地放射性水平监测与评价[J]. *中国辐射卫生*, 2022, 31 (4) : 418-423. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.04.006.
- Lv XY, Li HP, Ma XF, et al. Monitoring and evaluation of radioactivity levels in water sources in Beijing, China, 2012—2021[J]. *Chin J Radiol Health*, 2022, 31 (4) : 418-423. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.04.006.
- [19] 王嘉莹, 马奎, 李玉文, 等. 我国部分地区煤矿原煤中天然放射性水平调查分析[J]. *中国辐射卫生*, 2022, 31 (4) : 424-427,447. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.04.007.
- Wang JY, Ma K, Li YW, et al. Natural radioactive level in raw coal of coal mines in some regions of China[J]. *Chin J Radiol Health*, 2022, 31 (4) : 424-427,447. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2022.04.007.

(收稿日期:2023-02-20)