

低本底 α/β 测量仪测定食品中铯-137 含量的 不确定度评定

孙功明¹ 李冠超¹ 黄玲玉¹ 李巧勤² 李美丽²

(1. 广东省地质实验测试中心(广东省矿产应用研究所), 广东 广州 510080;

2. 广东省环境辐射监测与核应急响应技术支持中心, 广东 广州 510300)

摘要: [目的] 提高低本底 α/β 测量仪测定食品中铯-137 含量的测量结果准确性。[方法] 根据 GB 14883.10—2016 中第二法建立食品中铯-137 测量的不确定分析模型, 对影响检测过程的不确定度分量进行分析, 探讨不确定度来源, 并进行评定。[结果] 通过对样品测量、监督源测量、样品铯回收率校正、样品取样、样品灰鲜比、标准源校正监督源、自吸收系数校正引入的不确定度分析, 得到磷钼酸铵法测定食品中铯-137 的活度浓度为 1.44 Bq/kg, 其扩展不确定度为 0.13 Bq/kg ($k=2$)。[结论] 影响低本底 α/β 测量仪测定食品中铯-137 测量不确定度的主要因素为样品测量过程引入的不确定度, 其次为标准源校正监督源引入的不确定度。

关键词: 铯-137; 低本底 α/β 测量仪; 磷钼酸铵法; 不确定度

Uncertainty evaluation for Cs-137 in food by low-background α/β counter

SUN Gongming¹ LI Guanchao¹ HUANG Lingyu¹ LI Qiaoqin² LI Meili²

(1. Guangdong Province Research Center for Geoanalysis (Guangdong Institute of Mineral Applications),

Guangzhou, Guangdong 510080, China; 2. Environmental Radiation Monitoring and Nuclear Emergency

Response Technical Support Center of Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510300, China)

Abstract: [Objective] To improve the measurement accuracy of cesium-137 (Cs-137) content in food using low-background α/β measuring instruments. [Methods] An uncertainty analysis model for measuring Cs-137 in food was established based on the second method in GB 14883.10—2016. The uncertainty components affecting the detection process were analyzed, the sources of uncertainty were explored, and the uncertainty was evaluated. [Results] Through uncertainty analysis introduced by sample measurement, supervised source measurement, cesium recovery rate calibration, sample sampling, sample ash-to-fresh ratio, standard source calibration supervised source, and self-absorption coefficient calibration, the activity concentration of Cs-137 in food determined by the ammonium phosphomolybdate method was 1.44 Bq/kg, with an expanded uncertainty of 0.13 Bq/kg ($k=2$). [Conclusion] The main factor affecting the uncertainty of Cs-137 measurement in food by low-background α/β measuring instruments is the uncertainty introduced during the sample measurement process, followed by the uncertainty introduced by the standard source calibration supervision source.

Keywords: Cs-137; low-background α/β counter; ammonium phosphomolybdate method; uncertainty

基金项目: 省级海洋资源管理与利用专项资金项目(编号: 粤财资环[2023]20号)

通信作者: 李冠超(1982—), 男, 广东省地质实验测试中心(广东省矿产应用研究所)正高级工程师, 硕士。E-mail: 1728136@qq.com

收稿日期: 2024-09-09 **改回日期:** 2025-02-19

引用格式: 孙功明, 李冠超, 黄玲玉, 等. 低本底 α/β 测量仪测定食品中铯-137 含量的不确定度评定[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 58-63.

Citation: SUN Gongming, LI Guanchao, HUANG Lingyu, et al. Uncertainty evaluation for Cs-137 in food by low-background α/β counter [J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 58-63.

铯-137 是一种半衰期较长 (30.17 年) 的人工放射性核素, 其衰变过程会放射出 β 、 γ 射线, 且在自然界中容易通过食物链进入人体。铯-137 在放射性核素毒性分组中属于中毒组, 进入人体后会均匀分布于人体软组织中, 肌肉中浓度稍高, 而骨骼和脂肪中浓度稍低^[1]。人体摄入放射性核素铯-137 可能导致一定的辐射损伤和危害, 根据 GB 14882—1994 中对各类食品中铯-137 限制浓度具有明确规定。自福岛核事故以来, 福岛核污染对海洋环境和生态系统的影响备受关注^[2-3], 事故后人工核素在海洋生物中的分布及风险开展了相关研究^[4-6], 并且公众对食品中铯-137 的放射性浓度尤为关注^[7-9], 因此准确表征食品中铯-137 含量具有重要意义。

食品中铯-137 的检测方法主要包括 γ 能谱法和低本底 α/β 测量仪法 (也称为放射化学法)^[10-12]。低本底 α/β 测量仪法是经典分析方法, 具有仪器设备成本低、检出限低等优点, 但其分析步骤较多, 引入的不确定度影响因素较多。不确定度评定是评价分析结果准确性的重要手段^[13-14], 宫增艳等^[15-16] 对水中铯-137 放射化学分析测定进行了不确定度评定; 魏计房等^[17] 对海水中铯-137 的测定进行了不确定度评估, 但有关食品中铯-137 放射化学分析的不确定度评定却尚未见报道。

研究拟依据 JJF 1059.1—2012, 并参考 GB 14883.10—2016, 对影响食品中铯-137 放射化学分析方法结果的不确定度进行评估, 为科学准确评定放射化学法分析食品中铯-137 的结果可靠性提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

样品: 某海域捕捞的海鱼样品;

铯-137 标准溶液: 56.4 Bq/g, 相对扩展不确定度为 3.0% ($k=2$), 中国计量科学研究院;

磷酸氢二铵、碘化钠、冰乙酸、氯化铯等: 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司;

硝酸铵、硝酸、无水乙醇: 分析纯, 广州化学试剂厂;

钼酸铵: 分析纯, 西陇化工股份有限公司;

三氧化二铋: 分析纯, 天津市光复精细化工研究所;

草酸: 分析纯, 天津市大众试剂研发中心。

1.1.2 主要仪器设备

低本底 α/β 测量仪: PAB-6000 型, 武汉谱析科技有限公司;

离心机: TD5A 型, 湖南赫西仪器设备有限公司;

电子天平: AR224CN 型, 奥豪斯仪器 (上海) 有限

公司;

烘箱: DHG-9031A 型, 上海精宏实验设备有限公司。

1.2 试验方法

样品的前处理、测定参照 GB 14883.10—2016 中第二法——磷钼酸铵法。

1.3 数学模型

按式 (1)、式 (2) 计算食品中铯-137 的放射性活度浓度^[10]。

$$A = \frac{NA_1M}{60W\delta RN_3}, \quad (1)$$

$$A_1 = \frac{N_1A_2}{N_2}, \quad (2)$$

式中:

A ——食品中 ^{137}Cs 放射性活度浓度, Bq/kg 或 Bq/L;

N ——样品测量得到的净计数率, c/min;

M ——灰鲜比, g/kg 或 g/L;

W ——分析用灰质量, g;

δ —— ^{137}Cs 的自吸收系数;

R ——铯的化学回收率;

N_3 ——样品测量时 ^{137}Cs 监督源的净计数率, c/min;

A_1 ——经 ^{137}Cs 标准源校正的 ^{137}Cs 监督源的强度, d/min;

N_1 ——标定时 ^{137}Cs 监督源的净计数率, c/min;

A_2 ——加入 ^{137}Cs 标准溶液的活度, d/min;

N_2 ——经自吸收及化学回收率校正后的标准源净计数率, c/min。

2 结果与分析

2.1 不确定度来源分析

根据检测方法和数学模型, 对食品中铯-137 测定结果的各不确定度分量来源进行分析, 详细见图 1。

2.2 各不确定度分量评定

2.2.1 样品测量不确定度 样品在仪器上测量过程中要得出样品的净计数, 因此要进行样品和本底计数的测量, 根据计数类仪器统计规律, 样品测量的净计数相对不确定度为^[15]:

$$u_1 = \frac{\sqrt{\frac{N_y}{t_y} + \frac{N_0}{t_0}}}{N_y - N_0}, \quad (3)$$

式中:

N_y ——样品测量计数率, c/min;

t_y ——样品测量时间, min;

N_0 ——本底测量计数率, c/min;

t_0 ——本底测量时间, min。

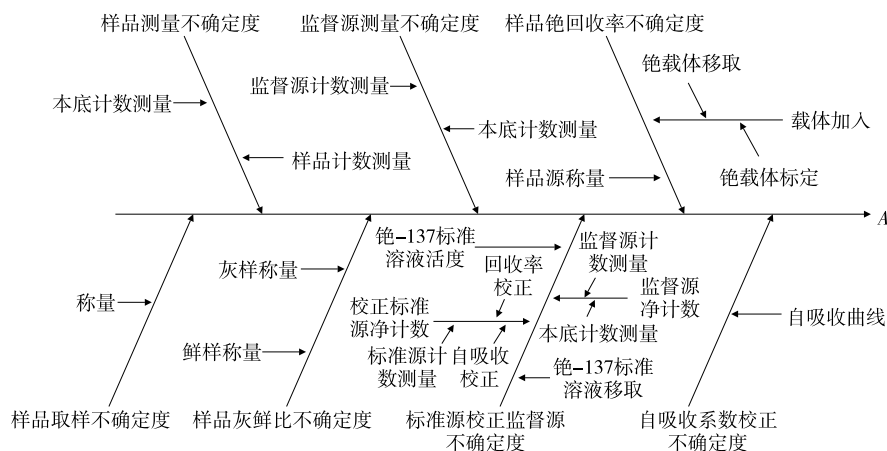


图 1 不确定度来源分析

Figure 1 Analysis of the source of uncertainty

当样品测量计数率为 4.65 c/min, 测量时间为 720 min, 本底测量计数率为 2.44 c/min, 本底测量时间为 1 440 min, 根据式(3)计算样品测量的相对不确定度 $u_1 = 4.086\%$ 。

2.2.2 监督源测量不确定度 样品测量时监督源测量是为了反映样品测量时仪器相对刻度时的波动性, 能有效修正样品测量时仪器探测效率的变化。根据计数类仪器统计规律, 其监督源测量的净计数相对不确定度(u_2)计算与式(3)类似, 只是样品测量计数(N_y)和测量时间(t_y)对应的是监督源测量计数(N_j)和测量时间(t_j)。

当监督源测量计数率为 908.1 c/min, 测量时间为 60 min, 本底测量计数率为 2.44 c/min, 本底测量时间为 1 440 min, 根据式(3)计算监督源测量的相对不确定度 $u_2 = 0.430\%$ 。

2.2.3 样品铯回收率不确定度 根据样品铯回收率计算过程, 通过加入一定量铯载体, 形成碘铯酸铯沉淀进行回收率校正, 因此引入的不确定度包括载体加入(u_{31})、样品源称量过程的不确定度(u_{32})。

(1) 载体加入不确定度: 分析过程采用移液管移取 2 mL 铯载体, 产生的不确定度包括移取体积的不确定度(u_{311})和载体标定不确定度(u_{312})。

查移液管检定证书, 2 mL 移液管的扩展不确定度为 0.004 mL ($k=2$), 移取 2 mL 铯载体的不确定度为 0.002 mL。考虑温度变化, 当温度变化为 $\pm 5^\circ\text{C}$, 铯载体的体积膨胀系数为 $2.1 \times 10^{-4}^\circ\text{C}^{-1}$, 按均匀分布进行计算, 由温度引入的不确定度为 $\frac{2\text{ mL} \times 2.1 \times 10^{-4}^\circ\text{C}^{-1} \times 5^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.0012\text{ mL}$ 。

则载体移取体积产生的相对不确定度 $u_{311} =$

$$\sqrt{\left(\frac{0.002\text{ mL}}{2.00\text{ mL}}\right)^2 + \left(\frac{0.0012\text{ mL}}{2.00\text{ mL}}\right)^2} = 0.117\%。$$

分析过程采用的铯载体需进行标定, 标定过程中平行测定 4 次, 测定结果分别为 10.05, 10.08, 10.02, 10.11 mg/mL, 根据贝塞尔公式进行计算, 其标准偏差为 0.038 7 mg/mL, 则由重复性引入的相对不确定度 $u_{312} = \frac{0.0387\text{ mg/mL}}{10.06\text{ mg/mL}} = 0.385\%$ 。

则载体加入引入的相对不确定度 $u_{31} = \sqrt{(0.117\%)^2 + (0.385\%)^2} = 0.402\%$ 。

(2) 样品源称量不确定度: 在进行样品铯回收率计算过程中, 要对形成的碘铯酸铯沉淀进行称量, 称量过程需进行两次称量, 一次是烘干滤纸称量, 另外一次是烘干后含滤纸和碘铯酸铯沉淀的称量。查天平的检定证书, 称量采用的天平不确定度为 0.4 mg ($k=2$), 则称量一次引用的标准不确定度为 0.000 2 g。当称量烘干滤纸为 0.071 4 g, 烘干滤纸和碘铯酸铯沉淀质量为 0.111 4 g, 两次称量引入的

$$\text{相对不确定度 } u_{32} = \sqrt{\left(\frac{0.0002\text{ g}}{0.0714\text{ g}}\right)^2 + \left(\frac{0.0002\text{ g}}{0.1114\text{ g}}\right)^2} = 0.333\%。$$

则样品铯回收率相对不确定度 $u_3 = \sqrt{u_{31}^2 + u_{32}^2} = 0.522\%$ 。

2.2.4 样品取样不确定度 分析过程中称取 10.000 g 样品灰, 称量一次, 根据分布规律, 采取均匀分布进行统计, 采用的天平符合中准确度级, 查检定证书中该天平的不确定度为 0.02 g ($k=2$), 则样品取样过程引入的相对不确定度 $u_4 = \frac{0.01\text{ g}}{10.00\text{ g}} = 0.100\%$ 。

2.2.5 样品灰鲜比不确定度 样品分析需对鲜样进行灰化,并求出灰鲜比,根据灰鲜比求算式可知,需要对鲜样和灰样进行称量,根据称量分布规律,称量采用的天平符合中准确度级,查称量鲜样检定证书天平的不确定度为 2 g ($k=2$),称量灰样检定证书天平的不确定度为 0.02 g ($k=2$),当称量的鲜样质量为 1 463 g,灰样质量为 37.00 g 时,则样品灰鲜比引入的相对不确定度 $u_5=$

$$\sqrt{\left(\frac{1 \text{ g}}{1 463 \text{ g}}\right)^2 + \left(\frac{0.01 \text{ g}}{37.00 \text{ g}}\right)^2} = 0.074\%。$$

2.2.6 标准源校正监督源不确定度 根据式(2)可知,标准源校正引入的不确定度包括铯-137 标准溶液活度不确定度(u_{61})、移取体积不确定度(u_{62}),以及标定时监督源测量的净计数相对不确定度(u_{63}),同时还包括自吸收及化学回收率校正后的标准源净计数率不确定度(u_{64})。

(1) 标准溶液活度不确定度:试验用的铯-137 标准溶液由中国计量科学研究院提供,根据标准物质证书,使用的铯-137 标准溶液的活度为 56.4 Bq/g,其扩展相对不确定度为 3.0% ($k=2$),因此其标准溶液活度引入的相对不确定度 $u_{61}=1.5\%$ 。

(2) 标准溶液移取体积不确定度:制备铯-137 标准源时,准确移取 1.00 mL 铯-137 标准溶液,移取采用的是移液枪(100~1 000 μL)。查移液枪校准证书,其示值误差的扩展不确定度为 0.3% ($k=2$),则移取 1.00 mL 铯-137 标准溶液的不确定度为 0.001 5 mL。考虑温度变化,当温度变化为 $\pm 5^\circ\text{C}$,铯-137 标准溶液的体积膨胀系数为 $2.1 \times 10^{-4}^\circ\text{C}^{-1}$,按均匀分布进行计算,由温度引入的不确定度为 $\frac{1.00 \text{ mL} \times 2.1 \times 10^{-4}^\circ\text{C}^{-1} \times 5^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.000 6 \text{ mL}$ 。

则铯-137 标准溶液移取体积相对不确定度 $u_{62}=$

$$\sqrt{\left(\frac{0.001 5 \text{ mL}}{1.00 \text{ mL}}\right)^2 + \left(\frac{0.000 6 \text{ mL}}{1.00 \text{ mL}}\right)^2} = 0.162\%。$$

(3) 标定时监督源净计数不确定度:标定时监督源测量是为了反映仪器刻度时的状态。根据计数类仪器统计规律,其监督源测量的净计数相对不确定度(u_{63})计算与式(3)类似,只是样品测量计数(N_y)和测量时间(t_y)对应的是监督源测量计数(N_1)和测量时间(t_1)。

当标定时监督源测量计数率为 936.5 c/min,测量时间为 60 min,本底测量计数率为 2.44 c/min,本底测量时间为 1 440 min,根据式(3)计算样品测量的相对不确定度 $u_{63}=0.423\%$ 。

(4) 校正后标准源净计数不确定度:校正后标准源净计数引入的不确定度主要包括标准源测量净计数不确定

度(u_{641})、自吸收系数校正不确定度(u_{642})和回收率校正不确定度(u_{643})。

标准源测量是为了反映仪器的刻度效率。根据计数类仪器统计规律,其标准源测量的净计数相对不确定度(u_{641})计算与式(3)类似,只是样品测量计数(N_y)和测量时间(t_y)对应的是监督源测量计数(N_1)和测量时间(t_1)。

当标定时标准源测量计数率为 793.6 c/min,测量时间为 60 min,本底测量计数率为 2.44 c/min,本底测量时间为 1 440 min时,根据式(3)计算标准源测量的净计数相对不确定度 $u_{641}=0.460\%$ 。

标准源自吸收系数校正通过自吸收曲线查询对应制备标准源碘铯酸铯沉淀质量的自吸收系数进行校正的。根据拟合,拟合自吸收系数 $\delta(I/I_0)$ 函数为:

$$\delta = -1.047m_i + 0.992 3 \quad (r = 0.995 4), \quad (4)$$

式中:

m_i ——碘铯酸铯沉淀质量, g。

根据自吸收系数—质量曲线的相对不确定度(u_{642})为^[16]:

$$u_{642} = \frac{s_d \sqrt{\sum \frac{m_i^2}{n} - 2m_y \bar{m} + m_y^2}}{\bar{\delta}}, \quad (5)$$

$$s_d = d \sqrt{\frac{1 - r^2}{r^2(n - 2)}}, \quad (6)$$

式中:

m_i ——碘铯酸铯沉淀质量, g;

m_y ——标准源碘铯酸铯沉淀质量, g;

n ——自吸收曲线制备样品数量, g;

$\bar{m}$ ——自吸收曲线制备样品沉淀平均值, g;

$\bar{\delta}$ ——自吸收系数平均值;

d ——自吸收系数—质量曲线斜率;

r ——自吸收系数—质量曲线相关系数。

根据式(5)和式(6)计算,经自吸收校正引入的相对不确定度 $u_{642}=0.551\%$ 。

标准源回收率不确定度(u_{643})包括载体加入不确定度(u_{6431})和标准源称量过程的不确定度(u_{6432})。由于标准源制备与样品源制备类似,均是加入 2 mL 铯载体进行处理,因此引入的载体加入不确定度 $u_{6431}=u_{31}=0.402\%$;标准源在进行回收率计算过程中,需对形成的碘铯酸铯沉淀进行称量,引入的不确定度与样品回收率计算过程类似。查天平的检定证书,称量采用的天平不确定度为 0.4 mg ($k=2$),则称量一次引用的标准不确定度为 0.000 2 g。当称量烘干滤纸为 0.070 4 g,标准源烘干滤纸和碘铯酸铯沉淀质量为 0.157 4 g,两次称量引入的相对不确定度 $u_{6432}=$

$$\sqrt{\left(\frac{0.000\ 2\ \text{g}}{0.070\ 4\ \text{g}}\right)^2 + \left(\frac{0.000\ 2\ \text{g}}{0.157\ 4\ \text{g}}\right)^2} = 0.311\%, \text{则标准源回收率}$$

相对不确定度 $u_{643} = \sqrt{u_{6431}^2 + u_{6432}^2} = 0.508\%$ 。

因此,校正后标准源净计数的相对不确定度 $u_{64} = \sqrt{u_{641}^2 + u_{642}^2 + u_{643}^2} = 0.879\%$ 。

根据上述计算结果,则标准源校正监督源相对不确定度 $u_6 = \sqrt{u_{61}^2 + u_{62}^2 + u_{63}^2 + u_{64}^2} = 1.797\%$ 。

2.2.7 自吸收系数校正不确定度 样品源测量结果计算中也要进行自吸收系数校正,其校正过程引入的不确定度(u_7)与标准源自吸收系数校正类似,因此自吸收系数校正按式(5)和式(6)进行计算,但 m_y 需按照样品源的碘铯酸铯沉淀质量进行计算,当样品源碘铯酸铯沉淀质量为 0.040 0 g 时,根据计算样品自吸收系数校正不确定度 $u_7 = 0.746\%$ 。

2.3 合成不确定度

根据上述分析,放化法测定食品中铯-137 的相对不确定度分量结果如表 1 所示。

表 1 各不确定度分量结果汇总表

Table 1 Results for various uncertainty components

不确定度分量	相对不确定度/%	占比/%
u_1	4.086	52.7
u_2	0.430	5.5
u_3	0.522	6.7
u_4	0.100	1.3
u_5	0.074	1.0
u_6	1.797	23.2
u_7	0.746	9.6

由表 1 可知,采用 GB 14883.10—2016 方法测定食品中铯-137 时,不确定来源占主导的是样品测量过程,且为本底和样品计数统计引入的不确定度,其不确定度占比为 52.7%,这与宫增艳等^[15]的结论一致。其次是标准源校正监督源引入的不确定度,占比为 23.2%,这两个不确定度分量是影响测定结果准确度的主要因素。

根据分析的 7 个不确定度分量,按式(7)计算其合成相对不确定度。

$$u_r = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2} \quad (7)$$

代入式(7),得出合成相对不确定度 $u_r = 4.58\%$ 。

当包含因子 $k=2$ 时(置信概率为 95%),其扩展不确定度 $U=9.16\%$ 。测定的食品中铯-137 的活度浓度为其扩展不确定度 $U=0.13\ \text{Bq/kg}$,测量结果可表示为 $(1.44 \pm 0.13)\ \text{Bq/kg}$ 。

3 结论

采用低本底 α/β 测量仪测定食品中铯-137 含量,对样品测量、监督源测量、样品铯回收率校正、样品取样、样品灰鲜比、标准源校正监督源、自吸收系数校正引入的不确定度进行分析和评定,并对所有不确定度分析进行合成。结果表明,样品中铯-137 的合成相对不确定度为 9.16%, $k=2$ (置信概率为 95%),其活度浓度表示为 $(1.44 \pm 0.13)\ \text{Bq/kg}$ 。根据计算的不确定度分量,样品测量过程引入的不确定度占主导,其次是标准源校正监督源引入的不确定度。因此,在采用该检测方法进行低放射性水平食品检测过程中要注意仪器的稳定性核查,同时要提高检测人员的熟练程度,在样品制源过程中要控制均匀性,降低制源不均匀性导致计数波动对检测结果不确定度的影响,从而提高检测结果的准确度,同时在分析过程中做好质控措施,保证分析结果准确可靠。

参考文献

- [1] 潘自强. 核与辐射安全[M]. 北京: 中国环境出版社, 2015: 382-383.
PAN Z Q. Nuclear and radiation safety[M]. Beijing: China Environmental Press, 2015: 382-383.
- [2] 张福乐, 王锦龙, 黄德坤, 等. 福岛核污染水中的人工放射性核素及其在海洋环境中的迁移转化行为[J]. 地球科学进展, 2024, 39(1): 23-33.
ZHANG F L, WANG J L, HUANG D K, et al. Artificial radionuclides in the fukushima nuclear contaminated water and their migration and transformation behaviors in the marine environment[J]. Advances in Earth Science, 2024, 39(1): 23-33.
- [3] 高翔, 刘西汉. 核污染对海洋生态系统的影响[J]. 河北经贸大学学报, 2024, 45(1): 21-24.
GAO X, LIU X H. The impact of nuclear pollution on marine ecosystems[J]. Journal of Hebei University of Economics and Business, 2024, 45(1): 21-24.
- [4] 李孟奇, 陈新军, 刘必林, 等. 福岛核泄漏对北太平洋海洋生物的影响研究进展[J]. 生态毒理学报, 2023, 18(3): 1-10.
LI M Q, CHEN X J, LIU B L, et al. Research progress on impact of fukushima nuclear leakage on north Pacific organisms[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2023, 18(3): 1-10.
- [5] 董宇辰, 秦松, 陈柯旭, 等. 人工放射性核素在海洋鱼类中的富集、分布及放射损伤研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2022, 37(6): 1 066-1 075.
DONG Y C, QIN S, CHEN K X, et al. Research progress on enrichment, distribution and radiation damage of artificial radionuclides in marine fish: a review[J]. Journal of Dalian

- Ocean University, 2022, 37(6): 1 066-1 075.
- [6] 唐峰华, 张胜茂, 吴祖立, 等. 北太平洋公海中心渔场海域放射性核素 ^{137}Cs 的生态环境监测与风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4): 680-687.
- TANG F H, ZHANG S M, WU Z L, et al. Ecological environment monitoring and risk assessment of radioactive element ^{137}Cs in central fishing grounds of the North Pacific Ocean[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(4): 680-687.
- [7] 许家昂, 闵楠, 王垒, 等. 福岛核事故对山东海域海产品 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 放射性活度浓度的影响[J]. 中国辐射卫生, 2017, 26(1): 1-3, 8.
- XU J A, MIN N, WANG L, et al. Effects of fukushima nuclear accident on activity concentration of cesium-134 and cesium-137 of marine products in Shandong[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2017, 26(1): 1-3, 8.
- [8] KONG S Y, YANG B L, TUO F, et al. Advance on monitoring of radioactivity in food in China and Japan after Fukushima nuclear accident[J]. Radiation Medicine and Protection, 2022, 3(1): 37-42.
- [9] TATSUNO T, YOSHIMURA K, NIHEI N. ^{137}Cs contamination of Japanese mustard spinach by resuspended particles in areas with different contamination conditions[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2024, 333(3): 1 089-1 096.
- [10] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品中放射性物质铯-137 的测定: GB 14883.10—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1-9.
- National Food Safety Standards Determination of Radioactive Substance. Cesium-137 in food: GB 14883.10—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 1-9.
- [11] 黄云辉, 李忠, 陈朝方, 等. 食品中 ^{131}I 、 ^{134}Cs 和 ^{137}Cs 快速检测方法研究[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34(6): 675-678.
- HUANG Y H, LI Z, CHEN C F, et al. Research on rapid detection methods for ^{131}I , ^{134}Cs and ^{137}Cs in foods[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2014, 34(6): 675-678.
- [12] 中华人民共和国环境保护部. 水和生物样品灰中铯-137 的放射化学分析方法: HJ 816—2016[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016: 1-7.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Radiochemical analysis of caesium-137 in water and ash of biological samples: HJ 816—2016[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2016: 1-7.
- [13] 刘兰英, 吕新, 李莹, 等. 石墨炉原子吸收光谱法测定海带中镉含量的不确定度评定[J]. 食品与机械, 2022, 38(5): 47-52.
- LIU L Y, LU X, LI Y, et al. Uncertainty evaluation of cadmium content in kelp (*Laminaria japonica*) by graphite furnace atomic absorption spectrometry[J]. Food & Machinery, 2022, 38(5): 47-52.
- [14] 钟文涛, 卢琳, 李政, 等. 基于 ISO19036:2019 评估饮用水中大肠菌群的测量不确定度[J]. 食品与机械, 2024, 40(10): 68-72.
- ZHONG W T, LU L, LI Z, et al. Estimation of measurement uncertainty of coliforms in drinking water according to ISO19036:2019[J]. Food & Machinery, 2024, 40(10): 68-72.
- [15] 宫增艳, 曹淑琴, 叶宏生, 等. 水中铯-137 放射化学分析方法的不确定度评定[J]. 铀矿冶, 2012, 31(3): 136-139.
- GONG Z Y, CAO S Q, YE H S, et al. Uncertainty evaluation in the radiochemical analysis of cesium-137 in water[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2012, 31(3): 136-139.
- [16] 蒋云平. 水中放射性核素铯-137 测量的不确定度评估[J]. 污染防治技术, 2010, 23(3): 96-99.
- JIANG Y P. Uncertainty evaluation of the measurement of ^{137}Cs in water[J]. Pollution Control Technology, 2010, 23(3): 96-99.
- [17] 魏计房, 邓春梅, 王荣元, 等. 海水中铯-137 的 γ 能谱测量不确定度评估[J]. 海洋学报, 2018, 40(8): 20-28.
- WEI J F, DENG C M, WANG R Y, et al. Uncertainty evaluation of γ -spectrum analysis of cesium-137 in seawater [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2018, 40(8): 20-28.