

食品中放射性水平测量技术及标准现状调查与分析

Investigation and analysis of current status of measurement technology and standards for radioactive levels in food

Yao Meinan, Wang Huan, Sun Yaru, Ma Yongzhong, Bai Bin

引用本文:

姚美男, 王欢, 孙亚茹, 等. 食品中放射性水平测量技术及标准现状调查与分析[J]. 国际放射医学核医学杂志, 2022, 46(11): 704-712. DOI: 10.3760/cma.j.cn121381-202205015-00234

Yao Meinan, Wang Huan, Sun Yaru, et al. Investigation and analysis of current status of measurement technology and standards for radioactive levels in food[J]. *International Journal of Radiation Medicine and Nuclear Medicine*, 2022, 46(11): 704-712. DOI: 10.3760/cma.j.cn121381-202205015-00234

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202205015-00234>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

¹⁸F-FDG注射残留放射性活度影响因素的分析

Analysis of factors affecting the residual radioactive activity of injection of ¹⁸F-FDG

国际放射医学核医学杂志. 2018, 42(6): 491-494 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2018.06.003>

SD大鼠放射性肺纤维化模型的建立及评价

Establishment and evaluation of radioactive pulmonary fibrosis model in SD rats

国际放射医学核医学杂志. 2020, 44(1): 52-58 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2020.01.011>

福岛核事故对日本环境和食品安全的影响

Environmental impact and food safety in Japan after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident

国际放射医学核医学杂志. 2019, 43(2): 99-105 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2019.02.001>

放射性皮肤损伤的治疗进展

A review of the literature on the treatment of radiation-induced skin injury

国际放射医学核医学杂志. 2021, 45(7): 461-469 <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202005043-00030>

BRAF^{V600E}突变与甲状腺乳头状癌淋巴结转移的关系及对放射性碘治疗后s-Tg的影响

The association between BRAF^{V600E} mutation and lymph node metastasis of papillary thyroid cancer and its effect on stimulated thyroglobulin radioactive iodine

国际放射医学核医学杂志. 2020, 44(11): 679-684 <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-201908003-00102>

放射性核素在嗜铬细胞瘤诊断与治疗中的应用进展

Advances in the application of radionuclide in the diagnosis and treatment of pheochromocytoma

国际放射医学核医学杂志. 2019, 43(1): 82-87 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2019.01.014>

食品中放射性水平测量技术及标准现况调查与分析

姚美男 王欢 孙亚茹 马永忠 白斌

北京市疾病预防控制中心放射卫生防护所, 北京 100013

通信作者: 白斌, Email: baibin1973@foxmail.com

【摘要】 自上个世纪六十年代起, 我国已开展对粮食和水源的放射性监测工作。至今, 由于2次重大核电站事故, 尤其是2011年日本福岛核事故中产生的放射性核素在海洋、大气和陆地上扩散并在食物链中积聚, 放射性核素对人类健康的危害程度急需量化评估, 因此, 食品中放射性水平的测量至关重要。笔者概述了食品中放射性核素的常用测量方法, 并对福岛核事故中造成公众健康危害的主要核素的具体测量技术和依据标准进行了分析, 旨在为进一步完善测量食品中放射性核素的技术和标准提供理论支撑, 为核辐射的应急管理和恢复策略提供数据支持, 最终实现为公众的健康提供切实的保障。

【关键词】 食品污染; 放射性; 放射性同位素; 放射测量术; 放射性有害物质释放

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

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202205015-00234](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202205015-00234)

Investigation and analysis of current status of measurement technology and standards for radioactive levels in food

Yao Meinan, Wang Huan, Sun Yaru, Ma Yongzhong, Bai Bin

Institute of Radiation Protection, Beijing Center for Disease Prevention and Control, Beijing 100013, China

Corresponding author: Bai Bin, Email: baibin1973@foxmail.com

【Abstract】 Since the 1960s, our country has carried out radioactive monitoring of food and water sources. So far, due to two major nuclear power plant accidents, especially the radionuclides produced in the Fukushima nuclear accident in Japan in 2011, which have spread in the ocean, atmosphere and land and accumulated in the food chain, the hazard degree of radionuclides to human health needs to be quantitatively assessed. Therefore, the measurement of the level of radioactivity in food is crucial. This article outlined the commonly used measurement methods for radionuclides in food, and analyzed the specific measurement techniques and standards for the main contributing nuclides in the Fukushima nuclear accident that caused public health hazards. The aim was to provide theoretical support for further improving the technology and standards for measuring radionuclides in food, to provide data support for emergency management and recovery strategies of nuclear radiation, and to provide practical protection for public health finally.

【Key words】 Food contamination; Radioactive; Radioisotopes; Radiometry; Radioactive hazard release

Fund programs: Beijing Science and Technology Plan Project (Z211100007021010); Construction Project of High-Level Public Health Technical Personnel in Beijing (Academic Leader-01-20)

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202205015-00234](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202205015-00234)

暨1986年前苏联切尔诺贝利核电站重大事故后,放射性核素的泄漏及其对食品水源的污染和对人体内照射、外照射所引发的危害引起世界各国广泛关注。2011年3月12日,日本本州东海岸发生地震,进而引发海啸,导致福岛县第一核电站的1号反应堆爆炸,大量放射性核素释放;2d内,2号反应堆的外壳受损,导致含有放射性的冷却水流入海洋,3号、4号反应堆发生氢气爆炸,再次导致大量放射性物质泄漏^[1-2]。当时的日本只能向4个反应堆中注水使其降温至安全状态,但此举也同时排出了大量含有放射性污染物的蒸汽。蒸汽随着大气环流迁移,污水随着海洋环流至世界各地,这些放射性核素将沉降至地表引起外照射,同时人类吸入空气中的放射性核素及摄入被污染的食品引起内照射^[3]。2021年4月13日,日本政府正式决定将福岛第一核电站的上百万吨核污染水排入大海^[4],将造成未知后果的核辐射危害。因此,食品中放射性核素的持续监测与早发现、早预防至关重要。

核反应堆主要通过重核裂变与轻核聚变获得核能,而裂变产物中的气态产物、易升华的核素及熔点较低的核素是最容易释放到环境中的污染物^[5],这些污染物主要包括¹³¹I、¹³⁴Cs、¹³⁷Cs等;此外,仍有部分核素虽然不易挥发,释放量较少,但其长期毒性不容小觑,比如⁹⁰Sr、²³⁹Pu、²⁴⁰Pu、²⁴¹Am等。对这些核素在环境中的浓度和性质的研究已在世界范围内展开,表1总结了日本福岛核事故中释放的主要核素及其典型测量方法^[6]。自1976年至今,我国一直对食品中的放射性核素水平进行常规监测^[7],并根据核试验、国民膳食习惯的改变等因素,不断调整食品中放射性核素的监测项目,表2列举了中国对食品中放射性核素的监测工作^[8-9]。我们对日本福岛核事故中的主要污染核素在食品中含量的测定及标准进行简述,以期对食品中放射性的监测提供参考价值。

1 食品中放射性核素的测定方法

食品中常见的放射性核素衰变形式主要有 α 衰变、 β 衰变和 γ 辐射^[10]。目前,食品中放射性核素的测定通常包括4个步骤:样品采集、样品处理、样品检测和结果分析^[8]。采集样品时采样量应至少为检验所需量的3倍,样品混匀等分3份,其中1份用于检验,另外2份用于复查或者仲裁^[11]。样品在检测前需要预先进行处理,目的是浓聚目标核素、除去干扰杂质以及将样品转化为易于测定的状态^[8],对于蔬菜等含水量高的样品,可通过冷冻干燥或者80℃热处理来浓缩待测核素浓度^[12]。根据GB14883.1—2016附录A所述要求^[10],收集可食用部分,部分核素如³H、²¹⁰Po、¹³¹I等可直接测定鲜样的 γ 能谱,对于不能直接测定鲜样的样品,处理方法主要包括衰变法、共沉淀法、灰化法、电

表1 日本福岛核事故中释放的主要放射性核素及其典型的测量方法

Table 1 The major radionuclides released during the Fukushima nuclear accident and their typical measurement methods in Japan

放射性核素	半衰期	衰变方式	典型测量方法
³ H	12.32年	β^-	LSC
¹⁴ C	5 730年	β^-	AMS
⁸⁹ Sr	50.6 d	β^-	LSC、ICP-MS、AMS
⁹⁰ Sr	28.8年	β^-	LSC、ICP-MS、AMS
⁹⁹ Tc	2.1×10 ⁵ 年	β^-	ICP-MS、TIMS
¹²⁹ I	1.57×10 ⁷ 年	β^-	AMS
¹³¹ I	8.02 d	β^- 、 γ	γ 光谱测定法
¹³² Te	3.2 d	β^- 、 γ	γ 光谱测定法
¹³³ Xe	8.24 d	β^- 、 γ 、 e^-	γ 光谱测定法
¹³⁴ Cs	2.06年	β^- 、 γ	γ 光谱测定法
¹³⁵ Cs	2.3×10 ⁶ 年	β^-	ICP-MS、TIMS
¹³⁷ Cs	30.2年	β^- 、 γ	γ 光谱测定法
²³⁵ U	7.04×10 ⁸ 年	α	ICP-MS、TIMS
²³⁶ U	2.34×10 ⁷ 年	α	AMS、TIMS、ICP-MS
²³⁸ U	4.47×10 ⁹ 年	α	ICP-MS、TIMS
²³⁷ Np	2.14×10 ⁶ 年	α	ICP-MS
²³⁸ Pu	87.74年	α	α 光谱测定法
²³⁹ Pu	2.41×10 ⁴ 年	α	α 光谱测定法、ICP-MS、TIMS、AMS
²⁴⁰ Pu	6 537年	α	α 光谱测定法、ICP-MS、TIMS、AMS
²⁴¹ Pu	14.4年	β^-	LSC、ICP-MS、TIMS、AMS
²⁴¹ Am	432.7年	α 、 γ	α 光谱测定法、ICP-MS
²⁴² Cm	162.9 d	α	α 光谱测定法

注:LSC为液体闪烁计数法;AMS为加速器质谱法;ICP-MS为电感耦合等离子体质谱法;TIMS为热电离质谱法

化学法和其他方法(有机溶剂溶解法、萃取法、离子交换法)等。

衰变法是指将样品中短半衰期的干扰性核素放置到衰变殆尽后,再测定样品的放射性。该方法常用于大气中总 α 、总 β 放射性的测定,比如,对空气进行过滤采样后放置数小时,使放射性气溶胶中的氦及其子体衰变后再测总放射性^[13]。共沉淀法是指加入共沉淀剂与待测核素共沉淀出来,通常可加入毫克量级的非放射性同位素载体,以实现痕量放射性核素的分离浓缩。灰化法常用于水样的测定,将蒸干的水样置于马弗炉中灰化,将样品灰铺于测量盘中检测放射性;在测量食品中的放射性时常与共沉淀法、离子交换法等联合应用。电化学法是指通过电解的方法将放射性核素沉积到电极的阴极、放射性核素的氧化物沉积到阳极上,可实现较高的分离纯度^[13]。离子交换法广泛应用

表2 中国对食品中放射性核素的监测工作

Table 2 Monitoring work of radionuclides in food in China

时间	组织部门	调查对象	产品种类	监测项目
1967年12月至 1979年10月	卫生部	沿海海域海水和海洋生物放射性核素常规性监测	渤海、黄海、东海、南海中的海产食品	16种放射性核素
1982至1985年	卫生部	全国食品正常辐射本底调查	27种路产食品及可能有放射性升高地区所产食品	22种放射性核素
1988年	卫生部	全国食品和水中放射性水平调查	80余种食品样品(谷类、肉类、蔬菜、水果、鱼类)	U、Th、 ²²⁶ Ra、 ⁴⁰ K、 ²¹⁰ Pb、 ²¹⁰ Po 6种天然放射性核素
1995年	国家环境保护部	全国天然放射性核素本底调查	露天蔬菜、叶菜、牛羊奶等食品,海产品数据较少	U、Th、 ²²⁶ Ra、 ⁴⁰ K、 ⁹⁰ Sr、 ¹³⁷ Cs的活度、浓度
1995年	全国辐射环境监测网	全国天然放射性核素本底调查	粮食、蔬菜和水果,海洋植物以及指示植物等10多种样品	总α、总β、 ²³⁸ U、 ²³⁸ Th、 ²²⁶ Ra、 ⁴⁰ K、 ⁹⁰ Sr、 ¹³⁷ Cs和 ³ H
2012至2022年	中国疾病预防控制中心	全国食品中放射性水平调查	粮食、蔬菜、肉类、奶类、海产品类、野生蘑菇等食品	⁹⁰ Sr、 ¹³⁷ Cs、 ²¹⁰ Po、 ²¹⁰ Pb、 ^{110m} Ag、 ¹³¹ I、 ²³⁸ U、 ²²⁶ Ra、 ⁴⁰ K等

于多种核素的分离,可选择不同的交换树脂吸附不同种类的核素,之后用高浓度酸洗脱核素并检测分析。

食品中放射性核素的检测方法主要包括α能谱测定法、β射线能谱测定法、γ能谱测定法和其他方法(液体闪烁计数法、加速器质谱法、液闪-质谱联用法、热表面电离质谱法等),表3列举了3种主要的检测方法及其适用的核素范围^[8]。α粒子是带正电的高能粒子,可与所接触物质的电子碰撞并释放能量,α能谱测定法根据不同核素释放出的α粒子能量不同的特性进行分析,可测定食品中²³⁹Pu、²⁴⁰Pu、²⁴¹Am等核素^[14]。β射线能谱测定法在分析释放β射线粒子的放射性核素时,样品需经过酸溶解、选择性沉淀、萃取等复杂的化学前处理,因此,只有当核素仅发射β粒子或者发射的γ射线比较少难以测定时才选择β射线能

谱测定法进行分析^[8],对于既发射较多γ射线又发射β射线的核素(如¹³¹I、¹³⁷Cs等),通常选择γ能谱测定法进行分析。γ能谱仪的主体探测器具有能量分辨率高、制作工艺简单等优势。当核素发生能级跃迁时释放γ射线,探测器作为光电转换器,将γ射线的能量转换为正比的电脉冲,从而形成该核素的特征γ能谱^[15-16]。对于不同的食品样品及不同的放射性核素,需具体研究分析相应的测量方法才能取得较为准确的结果。

2 食品中主要放射性核素的测定及依据标准

2.1 易挥发的放射性核素

由于具有易升华、易挥发的特性,日本福岛核事故中¹³¹I及放射性金属铯(主要包括¹³⁴Cs和¹³⁷Cs)引起人们的主要

表3 食品中主要放射性核素的检测方法及其优缺点

Table 3 Methods for detection of major radionuclides in food and their advantages and disadvantages

测定方法	针对类型	主要检测核素	探测器	优点	缺点
α能谱测定法	α射线	²³⁸ Pu、 ²³⁹ Pu、 ²¹⁰ Po和 ²⁴¹ Am	闪烁探测器、正比计数器、半导体探测器、电流电离室	检出限低、灵敏度高	需要对核素进行富集、分离纯化,操作复杂,耗时较长
β射线能谱测定法	β射线	³ H、 ⁸⁹ Sr、 ⁹⁰ Sr	闪烁探测器、正比计数器、盖革计数器、半导体探测器	仅适用于纯β放射性核素或γ射线分支较少的核素	前处理复杂
γ能谱测定法	γ射线	⁵⁴ Mn、 ⁵⁵ Fe、 ⁵⁹ Fe、 ⁶⁰ Co、 ⁶⁵ Zn、 ⁹⁵ Zr、 ⁹⁵ Nb、 ¹⁰³ Ru、 ¹⁰⁶ Ru、 ¹¹⁰ Ag、 ¹²⁵ Sb、 ¹³¹ I、 ¹³⁴ Cs、 ¹³⁷ Cs、 ¹⁴¹ Ce、 ¹⁴⁴ Ce和 ²²⁶ Ra	闪烁探测器、半导体探测器	前处理简单,检测效率高,能量分辨能力强、装置体积小	成本高,影响其测量准确度的因素很多

关注,其总释放量超过 10^{16} Bq^[17-18]。放射性碘和放射性铯可被人体 100% 吸收^[19],因此在事故发生后的早期阶段,食物受到¹³¹I、¹³⁴Cs 和¹³⁷Cs 污染而导致的健康风险是农业领域面临的最紧迫的问题^[20]。升华后的¹³¹I 扩散迅速,在事故发生后的第 1 周就在泰国的食品样品中检测到¹³¹I^[21],到第 2 周至第 3 周,我国兰州、北京等地相继在食品中检测到¹³¹I 的存在。¹³¹I 可增加甲状腺癌的发病风险,早在切尔诺贝利事故发生 4 年后,就有研究结果表明放射性覆盖区域的儿童和青少年甲状腺癌的发病率急剧增加^[22]。放射性铯在高温下易挥发,相比于半衰期仅有 8 d 的¹³¹I,放射性铯的半衰期较长(¹³⁴Cs 的半衰期为 2.07 年,¹³⁷Cs 的半衰期可长达 30.08 年),被人体吸收后滞留在全身软组织中,由于其可释放 γ 射线,可引起人体软组织的急、慢性损伤^[23]。因此对食品中¹³¹I、¹³⁴Cs、¹³⁷Cs 的检测十分必要。

¹³¹I、¹³⁴Cs、¹³⁷Cs 的检测通常选择 γ 能谱分析法,利用高纯锗检测器,连接多通道分析仪和分析软件进行检测^[24]。在我国,食品中¹³¹I 的测定应按照国家标准 GB 14883.9—2016《食品安全国家标准 食品中放射性物质碘-131 的测定》^[25]进行。该标准代替 GB 14883.9—1994《食品中放射性物质检验 碘-131 的测定》^[26],将 γ 能谱测定法调整为第一法,即用 γ 能谱仪在 364.5 keV 的 γ 射线特征峰中对 6 d 内的新鲜裂变产物中的¹³¹I 进行测定。由于¹³¹I 的半衰期仅 8 d,因此对采样时间较长的食品中¹³¹I 的测定应进行衰变测量来排除其他碘放射性同位素的干扰。该标准的第二法是采用放射化学测量法,即以低本底 β 测量仪来测量¹³¹I 的 β 放射性浓度,其检出限较低,但操作更为复杂。对于¹³⁷Cs,除了 γ 能谱测定法,还可用放射化学法^[10]进行测定,其中较为常用的为磷钼酸铵法^[27]。磷钼酸铵可在一定条件下与铯离子进行选择性地离子交换,因此可在其他离子存在的情况下吸附并浓集铯离子。对比这 2 种检测方法, γ 能谱测定法可以同时测定多种释放 γ 射线的核素,但其检出限显著高于磷钼酸铵法($P < 0.05$),因此需要采集并处理大量样本,单一样品的完整检测周期较长;磷钼酸铵法可对铯离子进行选择性地吸附,且检出限低,样品用量较少,但样品需预先进行化学处理,在繁多的处理过程中,磷钼酸铵法对¹³⁷Cs 的吸附及检测容易被¹³⁴Cs 干扰。所以, γ 能谱测定法适用于大部分食品中¹³⁷Cs 的检测,磷钼酸铵法适用于少部分样本量少或者铯含量较低的食品样本^[28];在 GB 14883.10—2016《食品安全国家标准 食品中放射性物质铯-137 的测定》^[27]中也把 γ 能谱测定法调整为第一法,磷钼酸铵法调整为第二法。

2.2 不易挥发的高放射毒性核素

在福岛核事故中,尽管非挥发性核素(比如⁹⁰Sr、²³⁹⁺²⁴⁰Pu 等)的释放量远小于挥发性核素^[29],但由于其长期的放射性

毒性,它们仍然对人类健康构成高辐射风险,尤其需要引起重视的是⁹⁰Sr,人体消化道对其吸收率可高达 30%。在福岛核事故中,约有 10^9 Bq 的²³⁹⁺²⁴⁰Pu 和 10^{11} Bq 的²⁴¹Pu 释放到环境中^[30],这些放射性核素通过污染海产品及农作物被人体摄入,而²⁴¹Pu 衰变产生的²⁴¹Am 的含量增加可能会带来新的辐射风险^[6]。因此,事故后⁹⁰Sr、²³⁹⁺²⁴⁰Pu、²⁴¹Am 的污染问题备受关注。

与强 γ 放射性核素不同,发射 γ 射线的核素可使用 γ 光谱对大量样品、多种核素进行快速、直接、可靠的检测和量化,而对发射 α 和 β 射线的核素的测定则需要复杂的前处理和分离,因此对于⁹⁰Sr、²³⁹⁺²⁴⁰Pu、²⁴¹Am 等核素的测定存在一定难度,在福岛核事故发生几个月之后才有关于发射 α 射线、 β 射线核素的监测数据报道^[31-32]。在事故发生后,日本政府为了快速统计这些难以检测的核素,研究者建立假设——发射 β 射线的⁹⁰Sr 与发射 γ 射线的¹³⁷Cs 在食品样品中以恒定的比例出现^[33]。最初的假设比例基于切尔诺贝利事故和大气核爆炸沉降物的数据,即⁹⁰Sr : ¹³⁷Cs = 5.2 : 64.6,食品中⁹⁰Sr 的含量为¹³⁷Cs 的 10%^[34]。然而,有研究结果表明,食品中⁹⁰Sr 和¹³⁷Cs 的相关性将很快不再遵循 0.3% 甚至是 10% 的假设,相关研究数据表明在事故后数年之中,食品中的⁹⁰Sr/¹³⁷Cs 的比值显著上升,小麦等样品中的比值可大于 2^[35]。¹³⁷Cs 更易被黏土中矿物质吸附并固定,而⁹⁰Sr 则有更高的迁移率和生物利用度,因此会导致食品中⁹⁰Sr/¹³⁷Cs 的比值偏离最初的活度比值。这一发现进一步证实了对食品中⁹⁰Sr 持续监测的必要性。对于⁹⁰Sr 的测定目前已有多种方法,多数方法需要通过选择性沉淀、液液萃取、萃取色谱和离子交换色谱从样品中预处理和纯化分离⁹⁰Sr 和⁹⁰Y,步骤繁琐耗时^[36-37]。近几年,人们致力于研究更为简便的检测方法。Maxwell 等^[38]利用树脂从干扰物质及⁹⁰Y 中分离出植物样本中的⁹⁰Sr,并用气流正比计数器计算⁹⁰Sr/⁹⁰Y 的放射性活度。2015 年,Maxwell 等^[39]基于海水中⁹⁰Sr 和⁹⁰Y 处于平衡的假设,利用色谱树脂浓集⁹⁰Y 并通过气流正比计数器测定⁹⁰Y 的活度来快速得到海水样品中⁹⁰Sr 的含量,该方法的检出限可低至 10^2 μ Bq/L^[39]。Olfert 等^[40]开发了一种通过液体闪烁和切伦科夫计数法快速测定水样中的⁹⁰Sr/⁹⁰Y 含量,但该研究中只分析了⁹⁰Sr 含量较高的样品。Amano 等^[41]用浓 HNO₃ 或 6 mol/L HCl 萃取灰样中的⁹⁰Y,氢氧化铁共沉淀 1 次,草酸沉淀 2 次,然后将草酸盐沉淀溶液加载到固体萃取色谱柱上,用三相两两符合液闪计数器测定⁹⁰Y,进而分析得到⁹⁰Sr 的含量^[41],该方法大大缩短了样品的前处理时间,但在该研究中仅测定了可使用植物样本,更大范围的食品检测有待进一步研究。2020 年,中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所进一步改良测定方法,将样品碳化、灰化后,用浓 HNO₃ 和 2 mol/L HCl 反复萃取灰

样中的⁹⁰Y,用草酸沉淀得到草酸钇,沉淀再次酸化后加载到二-(2-乙基己基)磷酸(HDEHP)色层柱上,用低本底β测量仪进行计数,该方法可实现较高的化学回收率,且适用于茶叶、粮食、鱼虾蟹贝等广泛的食物样品^[42],该检测方法主要依据GB 14883.3—2016《食品安全国家标准 食品中放射性物质铯-89和铯-90的测定》^[43]。在该标准中,二-(2-乙基己基)磷酸萃取法的检出限可低至 1.6×10^{-2} Bq/g(质量为样品烧成灰样之后的质量)。在国际标准IAEA/AQ/27 *Rapid Simultaneous Determination of ⁸⁹Sr and ⁹⁰Sr in Milk: A Procedure Using Cerenkov and Scintillation Counting*中使用切伦科夫和液体闪烁计数技术快速测定牛奶样品中⁸⁹Sr和⁹⁰Sr的含量,利用阳离子交换、萃取色谱和沉淀等操作对样品中的铯进行分离,结果可在1 d内获得,且化学回收率较高(70%~75%)。但是,由于⁹⁰Sr的活度通常较低,在⁸⁹Sr/⁹⁰Sr较高时测量偏差较高。因此,该标准推荐用于紧急情况下被高水平放射性核素污染的牛奶样品的测定^[44]。综合以上⁹⁰Sr的检测方法及标准可看出,对于较为广泛的食物种类或者放射性铯含量较低时,推荐依据GB 14883.3—2016使用二-(2-乙基己基)磷酸萃取法,IAEA/AQ/27仅适用于牛奶样品中放射性铯的快速测定。然而,二-(2-乙基己基)磷酸萃取法中样品的前处理较为复杂,测定时间相较于γ能谱法仍较长,且相较IAEA/AQ/27而言,GB 14883.3—2016中没有明确给出标准偏差和可重复性、再现性等数据,因此,一种前处理简单、快速测定、灵敏度高、应用广泛、数据更完善的⁹⁰Sr的检测方法有待继续研究。

研究者们对发射α射线的²³⁹⁺²⁴⁰Pu和²⁴¹Am的前处理与测定方法相似^[44-46]。在我国,²³⁹⁺²⁴⁰Pu的测定依据GB 14883.8—2016《食品安全国家标准 食品中放射性物质钚-239、钚-240的测定》^[45],可利用离子交换法、萃取色谱法或α放射性测量法结合低本底α测量仪对各类食品中²³⁹Pu和²⁴⁰Pu的总放射性浓度进行测定。²⁴¹Am的测定则依据WS/T 234-2002《食品中放射性物质检验 钚-241的测定》^[47],利用离子交换法和电沉积法结合低本底α测量仪对各类食品中的²⁴¹Am进行测定。国际原子能机构于2009年出版了一份用α光谱快速检测土壤和沉积物中的Pu同位素和²⁴¹Am的步骤,利用TRU®树脂(含有双辛基-苯基-N,N-二异丁基-氨基甲酰基甲基-氧化膦和磷酸三丁酯)对锕系元素进行选择性萃取分离,用不同洗脱液对²³⁹⁺²⁴⁰Pu和²⁴¹Am分别洗脱,利用α光谱中分析物与示踪剂的净计数率之比来测定待测同位素,即“同位素稀释α光谱法”^[48]。该方法可快速测定土壤及沉淀物中的锕系同位素,更适用于紧急事故中小范围的环境样本,对于各类食品中²³⁹⁺²⁴⁰Pu和²⁴¹Am的快速测定仍有待研究,因此,目前对于食品中²³⁹⁺²⁴⁰Pu和²⁴¹Am的测定仍建议依照GB 14883.8—2016和WS/T 234—2002进行。

2.3 参与生态循环的放射性核素

在福岛核事故中,³H和¹⁴C被排放到环境中后通过各种反应参与到自然水循环和碳循环中,通过植物的固定进入人体中,造成内照射损伤。目前我国对于食品中³H的测定主要依据GB 14883.2—2016《食品中放射性物质氚-3的测定》,样品经过氧化燃烧使氢转化为水,再用液体闪烁计数器测量³H的放射性^[48]。我国对于¹⁴C的测定尚未有系统的研究^[49],依据的标准也仅有江苏省的DB32/T 3583—2019《生物中氚和碳-14的测定 液体闪烁计数法》^[50]和山东省的DB 37/T 3458—2018《环境生物氚、碳-14的测定 液体闪烁计数法》^[51],即用氧化燃烧法将样品中的碳转化为二氧化碳,再用液体闪烁计数法测定,而国际标准中仅规定了废弃物中¹⁴C的含量水平^[52]。因此,建立准确有效的食品中¹⁴C的测定方法和标准是检测食品安全的重要工作。

3 小结与展望

综上所述,在测定放射性核素时,应进一步优化对发射α和β射线核素的样品的处理,进一步明确测定¹⁴C的国家标准。

核电站根据核反应堆类型可分为压水堆、沸水堆、重水堆、气冷堆等。在切尔诺贝利事故中,核反应堆为石墨堆,即以石墨作慢化剂材料、水作冷却剂,在该事故后此堆型已被废止。至今,仅有长半衰期核素¹³⁷Cs的后续影响仍在被研究^[53]。压水堆与沸水堆均利用水作慢化剂和冷却剂,用核裂变产生的能量供能,不同之处在于压水堆有2个回路系统,而沸水堆只有1个回路系统。目前我国大部分核电机组为压水堆,可能造成污染的裂变产物包括¹³⁷Cs、¹³⁴Cs、¹³¹I、¹³³I和¹⁴⁴Ce等^[19]。在福岛核事故中发生事故的为沸水堆,事故后福岛及周围辖区的气溶胶沉积、土壤及海水中¹³¹I和¹³⁷Cs含量急剧升高并引发广泛关注^[54]。综合以上常见核电站类型,我们归纳了核事故后重点核素的检测方法,为我国核电站周围食物中重要放射性核素的测量及常规监测提供参考。

在福岛核事故之后,¹³¹I和¹³⁷Cs等放射性核素作为挥发性气体扩散,且是危害公众健康的主要核素^[18]。尽管事故已过去10年,但¹³⁷Cs由于其长半衰期和滞留于土壤中而得以长时间保留,因此对于农作物中的放射性的长期监测和管理尤为重要。对于同样为长半衰期核素且迁移率和生物利用度更高的⁹⁰Sr,其潜在的危害更高,但是目前的β放射性核素的测定仍需要较为复杂的样品前处理。在福岛核事故中,核电站排出了大量含有放射性的污水,其中包含发射α射线的锕系核素,因此对于海洋食品中的²³⁹⁺²⁴⁰Pu和²⁴¹Am的持续监测同样不可忽视。对于可参与自然水循环和碳循环的³H和¹⁴C,其导致的食品污染与我们近在咫尺,然

而, ^{14}C 的测定方法及国家标准仍有待确定^[9]。基于以上现状, 我们需要更高效的检测方法和更完善的国家标准对食品中的辐射危害进行长期监测, 致力于保障公众健康, 并对核辐射事故后的放射性污染修复提供数据支持与参考。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 姚美男负责文献的调研、综述框架的设计、数据的收集与分析、综述的撰写; 王欢和孙亚茹负责文献的调研与整理、综述的审核与修订; 马永忠负责研究命题的提出、综述的审核与修订; 白斌负责提出研究的方向、综述最终版本的修订

参 考 文 献

- [1] Monastersky R. Giant shock rattles ideas about quake behaviour [J]. *Nature*, 2011, 471(7338): 274. DOI: 10.1038/471274a.
- [2] Ozawa S, Nishimura T, Suito H, et al. Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake [J]. *Nature*, 2011, 475(7356): 373–376. DOI: 10.1038/nature10227.
- [3] Jaeschke BC, Lind OC, Bradshaw C et al. Retention of radioactive particles and associated effects in the filter-feeding marine mollusc *mytilus edulis* [J]. *Sci Total Environ*, 2015, 502: 1–7. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.09.007.
- [4] 傅云威. 新华国际时评: 排放核废水入海, 日方不可一意孤行 [EB/OL]. 新华网. (2021-04-13). http://www.xinhuanet.com/2021-04/13/c_1127325752.htm.
Fu YW. Xinhua International Review: Japan must not go its own way by discharging nuclear waste water into the sea [EB/OL]. Xinhuanet. (2021-04-13). http://www.xinhuanet.com/2021-04/13/c_1127325752.htm.
- [5] 邬家龙, 孙卫, 王赞, 等. 日本福岛核事故对兰州地区所致放射性污染的监测与分析 [J]. *核电子学与探测技术*, 2013, 33(5): 603–605, 636. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2013.05.019.
Wu JL, Sun W, Wang Y, et al. Monitoring and analysis of radioactive contamination in Lanzhou due to Japan Fukushima nuclear accident [J]. *Nucl Electron Detect Technol*, 2013, 33(5): 603–605, 636. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2013.05.019.
- [6] Bu WT, Ni YY, Steinhauser G, et al. The role of mass spectrometry in radioactive contamination assessment after the Fukushima nuclear accident [J]. *J Anal At Spectrom*, 2018, 33(4): 519–546. DOI: 10.1039/C7JA00401J.
- [7] 陈曦. 电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 法测定七类食品中铀钍的含量 [J]. *武夷科学*, 2015, 31: 176–181. DOI: 10.15914/j.cnki.wyxx.2015.31.23.
Chen X. Determination of uranium and thorium in the seven categories of food by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) [J]. *Wuyi Sci J*, 2015, 31: 176–181. DOI: 10.15914/j.cnki.wyxx.2015.31.23.
- [8] 高飞, 杨敏莉, 张峰. 我国食品中放射性污染监测调查情况概述 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8(12): 4877–4884. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0381.2017.12.064.
- Gao F, Yang ML, Zhang F. Research progress on monitoring of food radioactive contamination [J]. *J Food Saf Qual*, 2017, 8(12): 4877–4884. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0381.2017.12.064.
- [9] 拓飞, 周强, 孙全富. 我国食品中放射性物质监测工作及其挑战 [J]. *中国辐射卫生*, 2020, 29(5): 447–452. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.001.
- Tuo F, Zhou Q, Sun QF. Monitoring of radioactive substances in food in China and its challenges [J]. *Chin J Radiol Health*, 2020, 29(5): 447–452. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.05.001.
- [10] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 14883.1—2016 食品安全国家标准 食品中放射性物质检验 总则 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 14883.1—2016 National food safety standards Inspection of radioactive substances in food general [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [11] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5009.1—2003 食品卫生检验方法 理化部分 总则 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
Ministry of Health of the PRC, Standardization Administration of China. GB/T 5009.1—2003 Methods of food hygienic analysis Physical and chemical section-General principles [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [12] Hori M, Saito T, Shozugawa K. Source evaluation of ^{137}Cs in foodstuffs based on trace ^{134}Cs radioactivity measurements following the Fukushima nuclear accident [J/OL]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 16806 [2022-05-15]. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-35183-z>. DOI: 10.1038/s41598-018-35183-z.
- [13] 孟现柱. 对光子和高速粒子散射的研究 [J]. *量子光学学报*, 2003, 9(3): 102–104. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6654.2003.03.003.
Meng XZ. Research the scatter on photon interacting with moveable particle [J]. *Acta Sin Quantum Opt*, 2003, 9(3): 102–104. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6654.2003.03.003.
- [14] 霍梦慧. 天津市气溶胶、表层土壤、饮用水中 ^{210}Po 放射性水平评价研究 [D]. 北京: 北京协和医学院, 2020. DOI: 10.27648/d.cnki.gzxhu.2020.000743.
Huo MH. Evaluation of the radioactivity level of ^{210}Po in aerosol, surface soil and drinking water in Tianjin [D]. Beijing: Peking Union Medical College, 2020. DOI: 10.27648/d.cnki.gzxhu.2020.000743.
- [15] 孙勇. 水产品中放射性活度的检测方法研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.
Sun Y. Researches on method of radioactivity determination in aquatic products [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2003.
- [16] 赵新春, 冯兰英, 吴应宇, 等. 北部湾近海某海域主要海产品放射性水平分析 [J]. *中国辐射卫生*, 2021, 30(6): 687–692. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.06.006.
- Zhao XC, Feng LY, Wu YY, et al. Analysis of radioactivity level of main seafood in a sea area offshore Beibu gulf [J]. *Chin J*

- Radiol Health*, 2021, 30(6): 687–692. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2021.06.006](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2021.06.006).
- [17] Tsumune D, Tsubono T, Aoyama M, et al. One-year, regional-scale simulation of ^{137}Cs radioactivity in the ocean following the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(8): 5601–5617. DOI: [10.5194/bg-10-5601-2013](https://doi.org/10.5194/bg-10-5601-2013).
- [18] Charette MA, Breier CF, Henderson PB, et al. Radium-based estimates of cesium isotope transport and total direct ocean discharges from the Fukushima nuclear power plant accident[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(3): 2159–2167. DOI: [10.5194/bg-10-2159-2013](https://doi.org/10.5194/bg-10-2159-2013).
- [19] 沈云, 刘升学, 问清华. 压水堆核电站放射性核素体内污染早期医学干预[J]. *中国职业医学*, 2009, 36(5): 414–416.
Shen Y, Liu SX, Wen QH. Early medical intervention after internal contamination with radionuclides in PWR[J]. *China Occup Med*, 2009, 36(5): 414–416.
- [20] Yamaguchi N, Taniyama I, Kimura T, et al. Contamination of agricultural products and soils with radiocesium derived from the accident at TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station: monitoring, case studies and countermeasures[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2016, 62(3): 303–314. DOI: [10.1080/00380768.2016.1196119](https://doi.org/10.1080/00380768.2016.1196119).
- [21] Itthipoonthanakorn T, Krisanangkura P, Udomsomporn S. The study on radioactive contamination in foodstuffs imported from Japan after the Fukushima accident[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2013, 297(3): 419–421. DOI: [10.1007/s10967-012-2399-1](https://doi.org/10.1007/s10967-012-2399-1).
- [22] Cardis E, Hatch M. The chernobyl accident-an epidemiological perspective[J]. *Clin Oncol (R Coll Radiol)*, 2011, 23(4): 251–260. DOI: [10.1016/j.clon.2011.01.510](https://doi.org/10.1016/j.clon.2011.01.510).
- [23] Ramalho AT, Nascimento ACH. The fate of chromosomal-aberrations in ^{137}Cs exposed individuals in the goiania radiation accident[J]. *Health Phys*, 1991, 60(1): 67–70. DOI: [10.1097/00004032-199101000-00010](https://doi.org/10.1097/00004032-199101000-00010).
- [24] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 16145—2020 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, 2020.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 16145—2020 Gamma spectrometry method of analysing radionuclides in biological samples[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [25] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 14883.9—2016 食品安全国家标准 食品中放射性物质碘-131的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 14883.9—2016 National food safety standards Determination of radioactive substance Iodine-131 in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [26] 中华人民共和国卫生部. GB 14883.9—1994 食品中放射性物质检验 碘-131的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
Ministry of Health of the PRC. GB 14883.9—1994 Examination of radioactive materials for foods Determination of iodine-131[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994.
- [27] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 14883.10—2016 食品安全国家标准 食品中放射性物质铯-137的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 14883.10—2016 National food safety standards determination of radioactive substance Cesium-137 in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [28] 曹艺耀, 宣志强, 俞顺飞, 等. 食品中放射性核素 ^{137}Cs 基于不同检测条件的方法选择研究[J]. *浙江预防医学*, 2016, 28(5): 437–440. DOI: [10.19485/j.cnki.issn1007-0931.2016.05.002](https://doi.org/10.19485/j.cnki.issn1007-0931.2016.05.002).
Cao YY, Xuan ZQ, Yu SF, et al. A selectivity study of the examination of radionuclides Cesium-137 for foods based on different detection conditions[J]. *Zhejiang J Prev Med*, 2016, 28(5): 437–440. DOI: [10.19485/j.cnki.issn1007-0931.2016.05.002](https://doi.org/10.19485/j.cnki.issn1007-0931.2016.05.002).
- [29] Steinhäuser G. Fukushima's forgotten radionuclides: a review of the understudied radioactive emissions[J]. *Environ Sci Technol*, 2014, 48(9): 4649–4663. DOI: [10.1021/es405654c](https://doi.org/10.1021/es405654c).
- [30] Zheng J, Tagami K, Watanabe Y, et al. Isotopic evidence of plutonium release into the environment from the Fukushima DNPP accident[J/OL]. *Sci Rep*, 2012, 2: 304[2022-05-15]. <https://www.nature.com/articles/srep00304>. DOI: [10.1038/srep00304](https://doi.org/10.1038/srep00304).
- [31] Casacuberta N, Masque P, Garcia-Orellana J, et al. ^{90}Sr and ^{89}Sr in seawater off Japan as a consequence of the Fukushima Dai-ichi nuclear accident[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(6): 3649–3659. DOI: [10.5194/bg-10-3649-2013](https://doi.org/10.5194/bg-10-3649-2013).
- [32] Schneider S, Walther C, Bister S, et al. Plutonium release from Fukushima Daiichi fosters the need for more detailed investigations[J/OL]. *Sci Rep*, 2013, 3: 2988[2022-05-15]. <https://www.nature.com/articles/srep02988>. DOI: [10.1038/srep02988](https://doi.org/10.1038/srep02988).
- [33] Kodaira K. Radioactive contamination of rice in Japan-with reference to Sr-90 and Cs-137 content in rice until 1962-[J]. *J Radiat Res*, 1964, 5(2): 116–119. DOI: [10.1269/jrr.5.116](https://doi.org/10.1269/jrr.5.116).
- [34] Hamada N, Ogino H. Food safety regulations: what we learned from the Fukushima nuclear accident[J]. *J Environ Radioact*, 2012, 111: 83–99. DOI: [10.1016/j.jenvrad.2011.08.008](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.08.008).
- [35] Merz S, Shozugawa K, Steinhäuser G. Analysis of Japanese radionuclide monitoring data of food before and after the Fukushima nuclear accident[J]. *Environ Sci Technol*, 2015, 49(5): 2875–2885. DOI: [10.1021/es5057648](https://doi.org/10.1021/es5057648).
- [36] Rondahl SH, Ramebäck H. Evaluation of different methods for measuring ^{89}Sr and ^{90}Sr : measurement uncertainty for the different methods as a function of the activity ratio[J]. *Appl Radiat Isot*, 2018, 140: 87–95. DOI: [10.1016/j.apradiso.2018.06.016](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.06.016).
- [37] Vajda N, Kim CK. Determination of radiostrontium isotopes: a review of analytical methodology[J]. *Appl Radiat Isot*, 2010, 68(12): 2306–2326. DOI: [10.1016/j.apradiso.2010.05.013](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2010.05.013).

- [38] Maxwell III SL, Culligan BK, Noyes GW. Rapid separation of actinides and radiostrontium in vegetation samples[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2010, 286(1): 273–282. DOI: [10.1007/s10967-010-0653-y](https://doi.org/10.1007/s10967-010-0653-y).
- [39] Maxwell III SL, Culligan BK, Hutchison JB, et al. Rapid determination of ^{90}Sr in seawater samples[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2015, 303(1): 709–717. DOI: [10.1007/s10967-014-3391-8](https://doi.org/10.1007/s10967-014-3391-8).
- [40] Olfert JM, Dai XX, Kramer-Tremblay S. Rapid determination of $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ in water samples by liquid scintillation and Cherenkov counting[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2014, 300(1): 263–267. DOI: [10.1007/s10967-013-2913-0](https://doi.org/10.1007/s10967-013-2913-0).
- [41] Amano H, Sakamoto H, Shiga N, et al. Method for rapid screening analysis of Sr-90 in edible plant samples collected near Fukushima, Japan[J]. *Appl Radiat Isot*, 2016, 112: 131–135. DOI: [10.1016/j.apradiso.2016.03.026](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.03.026).
- [42] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 14883.3—2016 食品安全国家标准 食品中放射性物质锶-89和锶-90的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 14883.3—2016 National food safety standards Determination of radioactive substances strontium-89 and strontium-90 in food[S]. Beijing: Standard press of China, 2016.
- [43] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 14883.3—2016 食品安全国家标准 食品中放射性物质锶-89和锶-90的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 14883.3—2016 National food safety standards Determination of radioactive substances strontium-89 and strontium-90 in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [44] IAEA. Rapid simultaneous determination of ^{89}Sr and ^{90}Sr in Milk: a procedure using cerenkov and scintillation counting[R]. Vienna: IAEA, 2013.
- [45] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 14883.8—2016 食品安全国家标准 食品中放射性物质钚-239、钚-240的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 14883.8—2016 National food safety standards Determination of radioactive substances plutonium-239 and plutonium-240 in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [46] 中华人民共和国卫生部. WS/T 234—2002 食品中放射性物质检验钼-241的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- Ministry of Health of the PRC. WS/T 234—2002 Examination of radioactive materials for foods Determination of americium-241[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [47] Baigazinov ZA, Lukashenko SN, Panitsky AV, et al. The transfer of $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{137}Cs and ^{90}Sr to the tissues of horses[J]. *J Environ Radioact*, 2020, 222: 106322. DOI: [10.1016/j.jenvrad.2020.106322](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106322).
- [48] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 14883.2—2016 食品安全国家标准 食品中放射性物质氢-3的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 14883.2—2016 National food safety standards Determination of radioactive substances hydrogen-3 in food[S]. Beijing: Standard press of China, 2016.
- [49] 王智慧, 陈飞, 张震, 等. 环境和生物样品中 ^{14}C 的分析方法初探[J]. *首都师范大学学报: 自然科学版*, 2021, 42(5): 45–52. DOI: [10.19789/j.1004-9398.2021.05.009](https://doi.org/10.19789/j.1004-9398.2021.05.009).
- Wang ZH, Chen F, Zhang Z, et al. Analysis method of ^{14}C in environmental and biological samples[J]. *J Cap Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 2021, 42(5): 45–52. DOI: [10.19789/j.1004-9398.2021.05.009](https://doi.org/10.19789/j.1004-9398.2021.05.009).
- [50] 江苏省市场监督管理局, 江苏省生态环境厅. DB32/T 3583—2019 生物中氚和碳-14的测定 液体闪烁计数法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- Jiangsu Provincial Market Supervision Administration. DB32/T 3583—2019 Determination of tritium and carbon-14 in biological samples—liquid scintillation method[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [51] 山东省市场监督管理局. DB37/T 3458—2018 环境生物 氚、碳-14的测定 液体闪烁计数法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- Shandong Provincial Administration for Market Regulation. DB 37/T 3458—2018 Environmental organisms—determination of tritium and carbon 14 activities—liquid scintillation counting method[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [52] IAEA. Management of waste containing tritium and carbon-14[R]. Vienna: IAEA, 2004.
- [53] Ramzaev V, Yonehara H, Hille R, et al. Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996-2003[J]. *J Environ Radioact*, 2006, 85(2/3): 205–227. DOI: [10.1016/j.jenvrad.2004.04.014](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.04.014).
- [54] Butler D. Radioactivity spreads in Japan[J]. *Nature*, 2011, 471(7340): 555–556. DOI: [10.1038/471555a](https://doi.org/10.1038/471555a).

(收稿日期: 2022-05-16)

《国际放射医学核医学杂志》第六届编辑委员会成员名单

顾问 柴之芳 程天民 樊飞跃 刘昌孝 潘自强 詹启敏 张永学

总编辑 樊赛军

副总编辑 黄钢 李宝生 李方 李思进 李亚明 刘强 孙全富 谭建 王军平 王铁
赵军

编辑委员 (含总编辑、副总编辑)

蔡露(美国) 陈明 陈文新 陈跃 程震 邓大平 董秀玥 樊赛军 樊卫
方纬 冯彦林 傅志超 高再荣 顾永清 官键 韩星敏 何玲 贺小红 胡步荣
黄钢 贾强 姜炜 金顺子 鞠永健 兰晓莉 李宝生 李彪 李方 李剑明
李洁清 李林 李林法 李思进 李险峰 李小东 李亚明 李幼忱 梁琰 林岩松
刘鉴峰 刘建军 刘建香 刘强 刘兴党 刘玉龙 龙鼎新 吕玉民 吕中伟 马云川
缪蔚冰 邵春林 沈婕 沈强(美国) 石峰 石洪成 宋娜玲 宋少莉 孙全富
谭建 唐亚梅 王冰(日本) 王春祥 王凡 王海潮(美国) 王辉 王军平
王平 王全师 王铁 王雪梅 王跃涛 王云华 王振光 吴华 吴李君 武志芳
肖国有 徐白莹 徐浩 徐文贵 徐志勇 阎紫宸(中国台湾) 杨国仁 杨辉
杨吉刚 杨卫东 杨志 姚稚明 于丽娟 查金顺 章英剑 章真 张宏 张锦明
张舒羽 张遵城 赵长久 赵晋华 赵军 赵路军 赵新明 郑飞波 周美娟 周平坤
周宗玖 朱朝晖 朱茂祥 朱小华 左长京 Hiroshi Toyama(日本)
Hongming Zhuang(美国) Li shuren(奥地利)

通讯编委 边艳珠 卜丽红 陈薇 陈志军 程兵 程祝忠 戴东 邓智勇 董华 董孟杰
段东 冯学民 傅鹏 付鹏 付巍 管樑 何玉林 何之彦 黄建敏 黄琦
霍力 金刚 康飞 李百龙 李贵平 李素平 李昕 梁婷 林端瑜 林志春
刘斌 刘雪辉 龙再颖 卢洁 陆克义 罗全勇 马超 孟召伟 穆晓峰 农天雷
秦永德 史文杰 宋其韬 苏新辉 孙凯 谭丽玲 王攀 王任飞 王伟 王雪鹃
王玉君 王治国 韦智晓 吴彩兰 吴巍 夏伟 徐荣 徐文清 徐颖 杨爱民
杨忠毅 姚树展 尹雅芙 于海鹏 余飞 袁耿彪 袁建伟 岳殿超 章斌 张春银
张金赫 张金山 张凯秀 张一帆 张照辉 赵倩 郑红宾 朱高红 朱国英 朱玉春
周友俊 邹仲敏 左传涛

(以上按姓氏汉语拼音排序)