

DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2025.05.001

• 论 著 •

# 我国某核电站周边海洋环境中氚的放射性水平及其评价

何映雪, 姜晓燕, 范莉, 闫冬

中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所, 北京 100088

**摘要:** **目的** 随着全球核电的发展, 核电运行中氚的排放引发了人们的关注, 本研究为核电站周边海域海水和海产品中氚的放射性水平评估提供基础数据支持。**方法** 本研究选取我国某核电站周边海域为研究区域, 采集浅表层海水样品 15 个、海洋生物样品 3 种(紫菜、牡蛎、鲳鱼), 检测并分析了海水和海洋生物体中的氚活度。**结果** 海水中氚活度的范围是 1.54~3.55 Bq/L, 平均值为(2.25 ± 0.70) Bq/L。海洋生物中氚活度范围是 1.1~1.6 Bq/L。氚对鲳鱼和牡蛎的总剂量率分别为  $6.93 \times 10^{-7}$  μGy/h 和  $5.39 \times 10^{-7}$  μGy/h。**结论** 对比邻近海域氚活度的数值, 本研究中的核电站周边海域海水的氚活度没有明显偏高, 海洋生物体氚含量处于正常范围, 鲳鱼和牡蛎中氚的辐射剂量不会对这两种生物产生辐射危害。

**关键词:** 氚; 海水; 海洋生物; 放射性水平

中图分类号: R14 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2025)05-0625-05

## Radioactivity levels and assessment of tritium in the marine environment around a nuclear power plant in China

HE Yingxue, JIANG Xiaoyan, FAN Li, YAN Dong

National Institute of Radiological Protection, China CDC, Beijing 100088, China

**Abstract:** **Objective** With the development of global nuclear power, the discharge of tritium during nuclear power plant operation has raised concerns. This study provides basic data support for the assessment of tritium radioactivity levels in seawater and seafood around nuclear power plants. **Methods** This study selected the coastal waters near a nuclear power plant in China as the research area. A total of 15 surface seawater samples and three types of marine organisms (laver, oyster, and mullet) were collected to measure and analyze the tritium activity concentrations in seawater and marine organisms. **Results** The tritium activity concentrations in seawater ranged from 1.54 to 3.55 Bq/L, with an average of  $2.25 \pm 0.70$  Bq/L. In marine organisms, the tritium activity concentrations ranged from 1.1 to 1.6 Bq/L. The total dose rates of tritium to mullet and oyster were  $6.93 \times 10^{-7}$  μGy/h and  $5.39 \times 10^{-7}$  μGy/h, respectively. **Conclusion** Compared with tritium activity concentrations in adjacent waters, those in seawater near this nuclear power plant showed no significant increases, and the tritium content in marine organisms remained within normal ranges. The radiation doses of tritium in mullet and oyster did not pose a radiation hazard to these two organisms.

**Keywords:** Tritium; Seawater; Marine biology; Radioactivity level

**Corresponding author:** YAN Dong, E-mail: [yandong\\_blue@sina.com](mailto:yandong_blue@sina.com)

氚(Tritium,  $^3\text{H}$ )是氢的一种放射性同位素, 通过β衰变转变为氦-3( $^3\text{He}$ ), 同时释放出一个电子和一个反中微子, 其半衰期约为 12.43 年。氚衰变过程释放的β粒子能量较低, 穿透力较弱, 对人体和环境的直接危害较小, 但在生物体内累积可能产生长期影响。氚极易经呼吸、饮水、饮食及皮肤途径进入人体并与细胞中的 DNA 和 RNA 结合, 直接产生辐照作用, 并可诱发染色体畸变。氚还具有一定的化学毒性, 氚中

毒可造成中枢神经和造血系统的改变, 甚至可诱发恶性肿瘤<sup>[1-2]</sup>。氚以氚化水(HTO)的形式存在于环境中<sup>[3]</sup>, 其化学性质与普通水相似, 易于参与水循环并在生态系统中迁移<sup>[4]</sup>。由于其具有放射性的特性, 氚在环境中的分布和活度水平受到长期监测。其中海洋中的氚受到更为广泛的关注<sup>[5]</sup>, 海水中的氚来源复杂, 既有自然过程, 也有人为活动的影响<sup>[6]</sup>。自然来源包括: (1)宇宙射线作用, 宇宙射线与大气中的氮和氧

作者简介: 何映雪(1988—), 女, 安徽人, 助理研究员, 从事海洋放射生态学研究。E-mail: [heyingsxue@nirp.chinacdc.cn](mailto:heyingsxue@nirp.chinacdc.cn)  
通信作者: 闫冬, E-mail: [yandong\\_blue@sina.com](mailto:yandong_blue@sina.com)

原子核的相互作用产生氡,随后氡通过降水进入海洋,这是氡的主要自然来源。(2)天然核反应:地球内部的一些天然放射性元素(如铀、钍)在衰变过程中也会产生少量的氡,这些氡通过地下水或火山活动进入海洋。氡的人为来源包括:(1)核试验,20 世纪中叶的核武器试验是海水中氡浓度显著增加的主要原因。这些试验释放了大量的氡进入大气层,随后通过降水进入海洋。(2)核电站和核设施,核电站的运行、核燃料再处理设施以及核废料的储存和处理过程中也会释放氡。这些氡通过冷却水排放或事故泄漏进入海洋。(3)医学和工业应用,氡在医学(如放射性示踪剂)和工业(如发光涂料)中的应用也可能导致少量氡进入环境,最终汇入海洋。

海水中氡对海洋生物和人类的影响主要通过食物链累积和长期暴露体现。尽管氡的放射性较弱,但在高浓度或长期暴露情况下仍需关注其潜在风险。近年来,核电站周围海洋环境中有机结合氡(OBT)的监测受到了越来越多的关注。海洋中的浮游植物(如藻类)通过光合作用将海水中的氡结合到有机分子中,形成 OBT,这一过程是 OBT 进入海洋食物链的主要途径。OBT 在食物链中有生物放大效应,在较高营养级的生物(如鱼类和海洋哺乳动物)中的浓度高于浮游植物和浮游动物。OBT 在生物体内的代谢速率远低于 HTO,导致其在生物组织中长期滞留。研究表明,OBT 的生物半衰期可能长达数月甚至数年,这使得它成为长期内照射的来源,OBT 在海洋环境中的持久性较高,尤其是在沉积物和底栖生物中,另外,OBT 可以在沉积物中存留数十年,成为潜在的二次污染源<sup>[7]</sup>。

本研究选取了我国东南某核电站周边近岸海域为研究区域,采集排污口附近表层海水和海洋生物样品,并采集距离排污口直线距离 131 km 处同一省份沿岸海域的表层海水作为对照,检测海水和生物中氡的活度水平,分析海洋中氡的迁移转化规律,通过欧共体“电离辐射污染的环境危害:评价与管理(Environmental Risk from Ionising Contaminants: Assessment and Management, ERICA)”计划中开发的非人类物种剂量估算软件 ERICA Tool 2.0 评估氡对海洋生物的辐射影响,为该核电站周边海域生态环境放射性评价提供数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

使用采水器采集表层海水样品,采集后装入清洁且密封良好的 1 L 聚乙烯瓶中,样品采集后迅速转移到冰箱中,在 4 °C 下保存。在实验室中海水首先通过 0.45 μm 滤膜(Waterman, 47 mm)过滤以去除悬浮颗粒,随后储存在棕色玻璃瓶中。将 1 L 过滤后的海水加入蒸馏瓶中,同时加入 4 g 无水碳酸钠、2 g 高锰酸钾和 2 g 铜粉,盖上磨砂玻璃塞并安装蛇形冷凝管,随后进行加热蒸馏。前 10 mL 馏出液被弃去(用于清洁蒸馏管路),之后收集馏出液并密封于磨砂玻璃瓶中。取 700 mL 收集液,放置氡电解浓集装置中,电解 48 h 左右,收集电解液。量取 8 mL 电解液加入 12 mL 闪烁液置于塑料闪烁瓶内,将所测量样品摇晃混合均匀后,放置入超低本底液闪烁仪(Quantulus1220, 美国 PE 公司)腔室内,避光 24 h 后,开始测量。

采集该区域的 3 种生物样品,采集后立即使用低氡水平海水(<0.2 Bq/L)在现场冲洗,该海水已通过 0.45 μm 滤膜过滤。新鲜样品表面用纸巾擦干,记录样品重量,随后转移至冰箱中,在 -20 °C 下保存。在实验室中将生物样品烘干,使用研磨机研磨并均质化,取 70 g 样品放入氡碳氧化炉燃烧,收集冷凝后的燃烧水。取 8 mL 蒸馏过的燃烧水,后续测量方法与海水中氡的测量方法相同。

1.2 分析方法 最小可探测活度(Minimum Detectable Activity, MDA)是用于区分测量结果与本底的重要参数。MDA(单位:Bq/L)通过以下公式计算:

$$MDA = \frac{3.29 \cdot \sqrt{cpm_{bk}/t_{bk} + cpm_{bk}/t_s}}{60 \cdot \varepsilon \cdot V}$$

氡在燃烧水中的活度(单位:Bq/L)通过以下公式计算:

$$A = \frac{cpm_s - cpm_{bk}}{60 \cdot \varepsilon \cdot V}$$

使用以下表达式,在 95 % 的置信水平( $k=2$ )下对不确定性进行了评估:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{cpm_s^2} \cdot \left( \frac{cpm_s + cpm_{bk}}{t_s} + \frac{cpm_{bk}}{t_{bk}} + \sigma_\varepsilon^2 \right)}$$

其中  $cpm_{bk}$  是背景样品的净计数率,  $cpm_s$  是分析样品的净计数率,背景和样品的计数时间分别表示为  $t_{bk}$  和  $t_s$ ,  $V$  是计数瓶中所含样品的体积(单位:L),  $\varepsilon$  是计数率,  $\sigma_\varepsilon$  是标准差。

干燥样品中的氡活度浓度  $C$ (单位:Bq/L)可根据以下公式计算:

$C = A \cdot \delta$

其中  $\delta$  是通过元素分析仪测得的每克 OBT 样品中水的理论产率。

所以, 湿样品中的氚活度浓度  $B$ (单位:Bq/L) 可根据以下公式计算:

$B = C \cdot \omega$

其中  $\omega$  是样品中干样与湿样的比值。

2 结 果

2.1 海水中的氚放射性水平 本研究所采集的海水样品共计 16 份, 其中 F1—F15 为研究区域表层海水, F16 为对照海水, 图 1 为采样点位置分布示意图, 表 1 为海水中氚活度浓度。本研究海水样品中氚活度范围是 1.44~3.55 Bq/L, 平均值为 2.20 Bq/L, 其中最高值出现在 F14 站点处为 3.55 Bq/L, 最低值出现

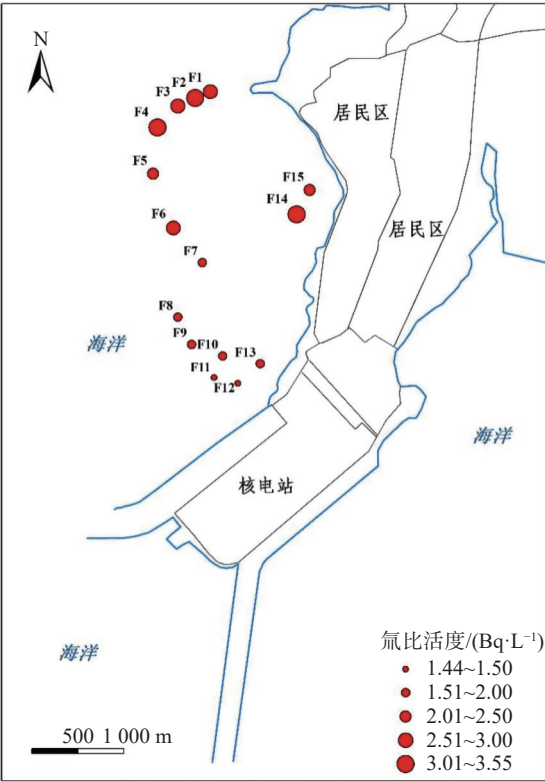


图 1 采样点位置分布  
Figure 1 Distribution of sampling points

表 1 海水样品中氚的活度浓度

Table 1 Tritium activity concentrations of seawater samples	
采样点位	氚活度浓度(Bq/L)
F1	2.53 ± 0.10
F2	3.16 ± 0.11
F3	2.6 ± 0.09
F4	3.1 ± 0.11
F5	2.07 ± 0.09
F6	2.94 ± 0.10
F7	1.93 ± 0.09
F8	1.54 ± 0.09
F9	1.55 ± 0.08
F10	1.69 ± 0.09
F11	1.44 ± 0.08
F12	1.47 ± 0.09
F13	1.81 ± 0.09
F14	3.55 ± 0.10
F15	2.32 ± 0.09
F16(对照)	0.47 ± 0.07

在 F11 站点处为 1.44 Bq/L, 误差范围( 0.08~0.11 Bq/L) 表明检测精度较高, 数据可信度强。本研究采集的海水样品中, 氚活度浓度较高点位于靠近沿岸的区域, 呈现沿岸区域海水氚活度浓度高于离岸较远的区域的特点。

2.2 海洋生物样品中 OBT 水平 本研究海域采集的海洋生物样品中 OBT 的活度浓度范围是 1.1~1.6 Bq/L, 平均值为 1.3 Bq/L(表 2)。其中 OBT 的最高值出现在牡蛎样品中为 1.6 Bq/L, 最低值出现在鲳鱼样品中为 1.1 Bq/L。紫菜样品是直接购买了当地养殖户晒干处理的干紫菜, 未获得该样品鲜重比值。

对比本研究测得的海水样品的氚活度浓度 1.44~3.55 Bq/L, 生物样品中 OBT 活度浓度范围和水样中氚活度浓度基本一致, 并未明显高出海水中氚的活度浓度。

表 2 海洋生物样品中 OBT 的活度浓度

Table 2 Organically bound tritium activity concentrations of marine organism samples							
样品	活度(Bq/L燃烧水)	误差(Bq/L燃烧水)	干鲜比	干样含水率	活度(Bq/kg干重)	活度(Bq/kg鲜重)	误差(Bq/kg鲜重)紫菜为误差(Bq/kg干重)
鲳鱼	1.1	0.5	0.2332	0.3505	—	0.09	0.04
紫菜	1.2	0.6	—	0.5230	0.64	—	0.32
牡蛎	1.6	0.7	0.0895	0.4910	—	0.07	0.03

注:“—”表示没有数据。



**2.3 生物辐射剂量估算** 在 ERICA 软件中采用浓度比值(Concentration Ratio, CR)作为动、植物的转移参数,用来估算核素从环境介质到动物体的转移。CR 的定义为:动、植物体单位鲜重质量放射性核素浓度(Bq/kg 鲜重)与栖息地环境中单位介质放射性核素浓度之比(Bq/L 或 Bq/kg 干重)。本研究采用 ERICA 程序的二级评价方法,分别输入鲷鱼和牡蛎的 CR 值,鲷鱼和牡蛎生活海水中氚的活度浓度,输入居留因子,鲷鱼在水中为 1.0,牡蛎在沉积物表层为 1.0,低  $\beta$  内照射权重因子 3.0,  $\beta/\gamma$  内照射权重因子取 1.0。计算得氚对鲷鱼和牡蛎的总剂量率分别为  $6.93 \times 10^{-7} \mu\text{Gy/h}$  和  $5.39 \times 10^{-7} \mu\text{Gy/h}$ 。

### 3 讨论

2020—2022 年陈代文<sup>[8]</sup>对与本研究相同的核电站周边海水中氚活度进行了检测分析,结果显示海水中氚的活度范围是 1.53~4.72 Bq/L,该研究结果与本研究中海水氚水平高度一致。文献中异常峰值(15.90 Bq/L)可能与特定排放事件或采样时间接近排放口有关,而本研究的测量数据未出现此类极端值,表明采样期间未发生类似集中排放。本研究中海水氚的最低值(1.44 Bq/L)略低于陈代文研究中海水均值下限(1.53 Bq/L),但仍显著高于研究的对照点(0.93 Bq/L),说明核电站周边海域的氚活度受到排放的影响,氚活度高于附近其他海域。

2013—2017 年钱震<sup>[9]</sup>对宁德核电周围海域以及福州黄岐对照点的海水中氚的活度浓度水平进行了监测,宁德核电站发电功率略低于本研究所在区域核电站,结果显示监测期间宁德核电周边海水氚的活度浓度测值范围为 0.8~17.0 Bq/L,其中 0.8 Bq/L 为液闪谱仪测量的探测下限,2013 年下半年检测到海水氚活度达到 17.0 Bq/L,原因是海水采样时间与核电厂液态流出物排放时间接近,废水中的氚没有被海水及时稀释,导致测值升高。除去该异常高点,氚活度浓度的最高的测量值为 2.5 Bq/L。该研究结果与本研究测得的氚活度浓度范围接近,表明本研究中的海域氚活度浓度在正常范围,未出现随时间累积的趋势。

对比国内其他核电站周边海域的数据,1993—2011 年陈前远等<sup>[10]</sup>的研究表明,秦山核电基地附近海域中海水的氚活度浓度均值为 2.1 Bq/L,范围是 0.8~17.4 Bq/L。2010—2019 年陈志东等<sup>[11]</sup>对大亚湾核电站附近海水中氚的活度浓度分布及其影响因素进行了研究,结果表明西大亚湾水中氚活度浓度均值为 1.0~4.4 Bq/L,大亚湾核电基地液态流出物的氚排

放会导致西大亚湾海水中氚活度浓度升高。甄丽颖等<sup>[12]</sup>对阳江核电站周边海域海水中氚的活度水平进行监测,结果显示海水中氚的年均值范围为 0.95~2.87 Bq/L。本研究所所在区域核电站发电功率与阳江核电站相同,高于秦山核电站和大亚湾核电站。本次研究所测得的海水氚范围与国内其他核电周边海域海水氚范围接近。

本研究采集海水样品中氚活度浓度较高点位于靠近沿岸的区域,可能是由于近岸水深较浅,水动力环境复杂,可能受到局部环流或地形限制(如海湾、河口),水交换效率低于开阔海域,导致近岸水域的氚滞留,延缓其向外海的输运。也可能是由于沉积物影响,沉积物吸附了水体中的氚,在近岸海域当沉积物被扰动时,这些被吸附的氚又进入水体,导致水体中的氚偏高。

陈代文的研究结果表明海洋生物 OBT 的活度浓度为 0.07~0.24 Bq/kg 鲜重;Cossonnet 等<sup>[13]</sup>的研究结果显示鱼类的 OBT 活度浓度为 0.5~15 Bq/L;以上结果与本研究中牡蛎和鲷鱼的 OBT 活度浓度相一致,表明本研究生物样品中 OBT 的活度处于正常水平。另外,本研究结果略低于 Lin 等在钦州湾核电站周边区域海洋生物中的 OBT 活度浓度结果(1.88~12.9 Bq/L)<sup>[14]</sup>。

在所采集的 3 种生物中,紫菜属于食物链等级最低,鲷鱼的食物链等级最高,这 2 种生物的 OBT 活度浓度接近,并未观测到明显的生物富集效应,生物体中的有机结合氚与环境中的氚活度接近,说明不存在氚的时间累积效应。

ERICA 推荐的生物剂量率筛选水平为  $10 \mu\text{Gy/h}$ , IAEA<sup>[15]</sup>推荐的水生生物剂量率筛选水平为  $400 \mu\text{Gy/h}$ ,本研究中核电站周边海水环境中鲷鱼和牡蛎的辐射剂量率远低于以上数值,因此本次采样中的氚的辐射剂量不会对鲷鱼和牡蛎产生辐射危害。

**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** 何映雪负责样品采集和检测、数据处理和分析、论文撰写;姜晓燕参与样品采集;范莉参与样品采集;闫冬参与样品采集、负责设计研究思路、论文修改

### 参考文献

- [1] 黄彦君,陶云良,上官志洪.氚对公众的健康影响及风险评估[J].中华放射医学与防护杂志,2012,32(4): 431-435. DOI:

- 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2012.04.028.
- Huang YJ, Tao YL, Shangguan ZH. Public health impacts and risk assessment of tritium[J]. Chin J Radiol Med Prot, 2012, 32(4): 431-435. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2012.04.028. (in Chinese)
- [2] 邓冰, 井婧, 全旂, 等. 低剂量氚水对人体外周血淋巴细胞的影响[J]. 中国辐射卫生, 2016, 25(1): 6-10. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2016.01.002.
- Deng B, Jing J, Quan Y, et al. Cytogenetic effects of low dose tritiated water in human peripheral blood lymphocytes[J]. Chin J Radiol Health, 2016, 25(1): 6-10, 14. DOI: 10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2016.01.002. (in Chinese)
- [3] 丁洪深, 刘文娜, 赵婉兵, 等. 环境空气中氚化水测定方法验证[J]. 中国辐射卫生, 2024, 33(2): 164-169. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2024.02.010.
- Ding HS, Liu WN, Zhao WB, et al. Verification of a method for determination of tritiated water in ambient air[J]. Chin J Radiol Health, 2024, 33(2): 164-169. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2024.02.010. (in Chinese)
- [4] Murphy Jr C E. Tritium transport and cycling in the environment[J]. Health Phys, 1993, 65(6): 683-697. DOI: 10.1097/00004032-199312000-00007.
- [5] 付照明, 袁龙, 孙全富. 日本福岛事故 10 周年剂量与健康效应评估[J]. 中国辐射卫生, 2021, 30(6): 732-738. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.06.014.
- Fu XM, Yuan L, Sun QF. An assessment of the radiation dose and health effects of the Fukushima nuclear accident in Japan over the past 10 years[J]. Chin J Radiol Health, 2021, 30(6): 732-738. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2021.06.014. (in Chinese)
- [6] 李文红, 谢锋, 杨宝路, 等. 氚的来源与监测[J]. 国际放射医学核医学杂志, 2023, 47(10): 642-646. DOI: 10.3760/cma.j.cn121381-202309034-00365.
- Li WH, Xie F, Yang BL, et al. Sources and monitoring of tritium[J]. Int J Radiat Med Nucl Med, 2023, 47(10): 642-646. DOI: 10.3760/cma.j.cn121381-202309034-00365. (in Chinese)
- [7] Eyrolle F, Copard Y, Lepage H, et al. Evidence for tritium persistence as organically bound forms in river sediments since the past nuclear weapon tests[J]. Sci Rep, 2019, 9(1): 11487. DOI: 10.1038/s41598-019-47821-1.
- [8] 陈代文. 福清核电商运后邻近海域氚放射性水平[J]. 能源与环境, 2023(4): 128-130. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9064.2023.04.034.
- Chen DW. Tritium radioactivity levels in adjacent waters after the commercial operation of Fuqing nuclear power plant[J]. Energy Environ, 2023(4): 128-130. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9064.2023.04.034. (in Chinese)
- [9] 钱震. 福建省宁德核电周围海域海水中 $^3\text{H}$ 水平分析[J]. 福建分析测试, 2018, 27(4): 56-59. DOI: 10.3969/j.issn.1009-8143.2018.04.11.
- Qian Z. Analysis of  $^3\text{H}$  concentration in seawater around ND nuclear power plant in Fujian Province[J]. Fujian Anal Test, 2018, 27(4): 56-59. DOI: 10.3969/j.issn.1009-8143.2018.04.11. (in Chinese)
- [10] 陈前远, 龚传德, 胡丹, 等. 1992~2011 年秦山核电基地外环境中 $^3\text{H}$ 活度浓度水平[C]//第九届中国核学会“核科技、核应用、核经济(三核)”论坛论文集. 杭州: 中国核学会, 2012: 174-185.
- Chen QY, Gong CD, Hu D, et al. Activity concentration level of  $^3\text{H}$  in the ambient around Qinshan NPP base from 1992 to 2011[C]//Hangzhou: Chinese Nuclear Society, 2012: 174-185. (in Chinese)
- [11] 陈志东, 王家玥, 邓飞, 等. 西大亚湾海水中氚的活度浓度分布及其影响因素研究[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(12): 1550-1554. DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.12.011.
- Chen ZD, Wang JY, Deng F, et al. Study on distribution of tritium activity concentration and its influencing factors in sea water of west Daya Bay[J]. Environ Pollut Control, 2021, 43(12): 1550-1554. DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.12.011. (in Chinese)
- [12] 甄丽颖, 林颖慧. 阳江核电站的排放物及环境样品中氚的放射性水平[J]. 核安全, 2019, 18(4): 12-17. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2019.04.003.
- Zhen LY, Lin YH. Emission from Yangjiang nuclear power plant and radioactive levels of tritium in environmental samples[J]. Nucl Saf, 2019, 18(4): 12-17. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2019.04.003. (in Chinese)
- [13] Cossonnet C, Marques AMN, Gurriaran R. Experience acquired on environmental sample combustion for organically bound tritium measurement[J]. Appl Radiat Isotopes, 2009, 67(5): 809-811. DOI: 10.1016/j.apradiso.2009.01.039.
- [14] Lin F, Yu W, Guo JP, et al. A method for the determination of organically bound tritium in marine biota based on an improved tubular-combustion system[J]. J Environ Radioactiv, 2020, 211: 106084. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2019.106084.
- [15] IAEA. Effects of ionizing radiation on plants and animals at levels implied by current radiation protection standards[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1992.

(收稿日期: 2025-07-05)