

DOI: 10.3724/j.1007-6336.2025-0131

台湾海峡海域海洋生物中有机结合氚和 ^{14}C 的赋存特征及剂量评估

郭辰洋¹, 于涛¹, 李聪², 刘文靖¹, 柯思因^{1,3},
钟强强¹, 吴镇², 张福乐¹, 黄德坤¹

(1.自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005; 2.福建省渔业资源监测中心, 福建 福州 350003; 3.上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306)

摘要:日本福岛核污染水中氚(^3H)和碳-14(^{14}C)作为难以被净化处理的核素,对海洋生态系统的潜在风险引发了广泛关注。本文研究了2024年台湾海峡海域海洋生物中有机结合氚(organically bound tritium, OBT)和 ^{14}C 的污染水平,结果表明海洋生物可食用部分中OBT和 ^{14}C 的比活度范围分别为 $<0.15\sim 1.45\text{ Bq/kg}$ 和 $1.51\sim 22.1\text{ Bq/kg}$ (鲜重)。总体而言,台湾海峡海域海洋生物中OBT和 ^{14}C 的比活度与我国其他海域的研究结果相当,而 ^{14}C 的比活度远低于英国塞拉菲尔德乏燃料后处理厂附近海域海洋生物中的污染水平。进一步开展剂量评估发现,福建省沿海居民因食用海产品而摄入的OBT和 ^{14}C 所致的年待积有效剂量平均值分别为 $8\times 10^{-4}\mu\text{Sv}$ 与 $0.18\mu\text{Sv}$,最大值总和为 $0.45\mu\text{Sv}$,远远低于我国国家标准(GB 18871—2002)规定的剂量限值($1000\mu\text{Sv}$)。本文的研究结果可为评估福岛核污染水排海对福建省海洋环境的潜在影响和缓解公众焦虑提供关键的数据参考。

关键词:海洋生物; 有机结合氚; ^{14}C ; 剂量评估; 台湾海峡

中图分类号:X837

文献标识码:A

文章编号:1007-6336(2026)01-0034-09

Level characteristics and dose assessment of organically bound tritium and carbon-14 in marine biota from the Taiwan Strait

Guo Chenyang¹, Yu Tao¹, Li Cong², Liu Wenjing¹, Ke Siyin^{1,3},
Zhong Qiangqiang¹, Wu Zhen², Zhang Fule¹, Huang Dekun¹

(1.Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China; 2.Fujian Fishery Resources Monitoring Center, Fuzhou 350003, China; 3.College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Tritium (^3H) and carbon-14 (^{14}C) are radionuclides present in Fukushima nuclear contaminated water in Japan that are difficult to effectively remove, their potential risks to marine ecosystem safety have raised extensive concern. This study assessed the pollution levels of organically bound tritium (OBT) and ^{14}C in seafoods from Taiwan Strait. The results showed that in the eatable part of marine biota, the specific activities

收稿日期:2025-09-03, 修订日期:2025-11-21

基金项目:福建省促进海洋与渔业产业高质量发展专项资金项目(FJHYF-L-2023-36);自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目(海三科 2025047, 海三科 2025002)

作者简介:郭辰洋(2000—),男,福建龙岩人,硕士研究生,主要研究方向为海洋环境放射性分析方法和监测, E-mail: guochenyang@tio.org.cn

通信作者:张福乐(1993—),男,副研究员,主要研究方向为海洋环境化学及风险评估, E-mail: zhangfule@tio.org.cn

黄德坤(1985—),男,研究员,主要研究方向为海洋环境化学及风险评估, E-mail: dkhuang@tio.org.cn

of OBT and ¹⁴C ranged from < 0.15 to 1.45 Bq/kg and from 1.51 to 22.1 Bq/kg (in fresh weight), respectively. The specific activities of OBT and ¹⁴C in marine biota of the Taiwan Strait were comparable to those in other nearshore areas in China, while the specific activities of ¹⁴C were much lower than those in marine biota around the Sellafield spent fuel reprocessing plant in the UK. Further dose assessment revealed that the average annual committed effective doses for Fujian residents due to the consumption of OBT and ¹⁴C in seafood were 8×10^{-4} μSv and 0.18 μSv, respectively, with a maximum combined dose of 0.45 μSv, which was far below the dose limit (1000 μSv) stipulated by the national standard (GB 18871—2002). The results of this study can provide key data references for evaluating the potential impact of Fukushima nuclear contaminated water on Fujian marine environments and for alleviating public anxiety.

Key words: marine biota; organically bound tritium; ¹⁴C; dose assessment; Taiwan Strait

2023 年 8 月 24 日, 日本福岛核污染水排海引发了社会公众对海洋生态环境安全, 特别是对海产品安全的密切关注。截至 2025 年 8 月 25 日, 福岛核污染水总计排放量超过 11 万吨, 且仍将持续产生和排海, 直至福岛第一核电站安全退役^[1]。尽管东京电力公司使用多核素去除系统(advanced liquid processing system, ALPS)对核污染水进行了去污处理, 但该系统无法去除氚(³H), 对碳-14(¹⁴C)的去污能力也相对较差^[2-3]。在启动排海前, 福岛核污染水储罐中³H 的浓度高达 $1.9 \times 10^5 \sim 25.0 \times 10^5$ Bq/L, 超出日本法律允许的³H 最大排放浓度(6×10^4 Bq/L), 部分储罐中¹⁴C 的浓度也超出了世界卫生组织推荐的饮用水指导浓度(100 Bq/L)^[4]。此外, 全球滨海核电运行、核废料后处理等核工业活动也在向海洋排放³H 与¹⁴C^[5-6], 随着核电在全球部分地区能源供应中占据比例快速提高, 核电排放的³H 与¹⁴C 对其周边海域生态环境的影响亟待评估^[7]。

进入海洋的福岛核污染水会随着洋流逐渐向北太平洋及其边缘海扩散。尽管海洋体积巨大, 对污染物的稀释能力强, 但在长期低剂量辐射暴露的背景下, 海洋生态系统对放射性干扰的韧性还有待深入研究^[8]。³H 和¹⁴C 的物理半衰期长(分别为 12.32 a 和 5730 a), 因而需要仔细评估³H 和¹⁴C 在海洋环境中的潜在生态风险^[9]。生物暴露在较高活度氚化水(HTO, ≥ 1000 Bq/L)中会出现代谢器官功能损伤、胚胎发育异常等现象已被报道^[10-11], 然而低剂量辐射背景暴露的情况却鲜有研究。福岛核污染水中的³H 和¹⁴C 可以经生物富集由食物链传递而进入人体, 对人类健康产生潜在的负面影响。³H 在海洋

生物体内以组织自由水氚(tissue free water tritium, TFWT; 成分为 HTO)和有机结合氚(organically bound tritium, OBT)两种形式存在。OBT 较 TFWT 更易被生物同化吸收并富集在海洋生物体内^[12], 其在海洋生物体内的富集因子可高达 4×10^3 L/kg^[13-14], 远高于国际原子能机构的推荐值(1 L/kg)^[15]。此外, OBT 在海洋生物中的停留时间也明显长于 TFWT^[16-17]。因此, OBT 成为监测海洋生物中氚污染水平的可靠指标^[18]。碳是组成生命体的最基本元素,¹⁴C 在各种类型的海洋生物中都具有较高的富集因子, 并且随生物营养级的升高而略有增加^[15]。藻类能将无机态¹⁴C 同化为有机态¹⁴C 并富集^[19]; ¹⁴C 也可以从食物链进入鱼类, 在其脑部富集后, 通过改变 DNA 甲基化水平造成神经毒性效应^[20]。监测海洋生物中 OBT 和¹⁴C 的污染水平对研究其在生物体中的富集特征和产生的潜在生物毒性具有重要意义。

台湾海峡位于我国福建和台湾之间, 是连接东海和南海的重要通道, 也是西北太平洋边缘海的重要组成部分, 因此, 台湾海峡海域面临着日本核污染水跨界污染的现实问题。福建省是我国的海洋与渔业大省, 2024 年福建省海产品总产量达 818.7 万吨, 位居全国前三^[21], 相应地, 福建省人均海产品消费量也常年位居全国前列。然而, 目前对于台湾海峡海域海洋生物中³H 和¹⁴C 污染水平的研究还相对较少, 仅对滨海核电厂邻近海域有少量的数据报道^[22-23]。此外, 从 Web of Science 等期刊数据库的检索结果来看, 相较于其他放射性核素, 海洋生物体内的³H 和¹⁴C 受到的关注明显不足。

本研究于 2024 年采集了台湾海峡海域的生物样品,分析测定了海洋生物中 OBT 和¹⁴C 的比活度水平,并评估了福建沿海居民因摄入海产品中的 OBT 和¹⁴C 而受到的辐射剂量。本研究的开展可以有效弥补台湾海峡海域海洋生物中 OBT 和¹⁴C 背景数据的不足,同时为科学评估福岛核污染水长期排海对福建省海产品安全的潜在风险提供重要的基础数据。

1 材料与方法

1.1 台湾海峡海域海洋生物的采集

本研究通过拖网捕捞方式在台湾海峡海域共采集 24 种海洋生物(图 1),不同时间和批次获取的同种海洋生物归为同一样品。海洋生物捕捞后,人工挑拣剔除样品中的杂质,沥干水分后迅速密封,于-18 ℃ 条件下冷冻保存和运输,以避免样品污染和腐败变质。

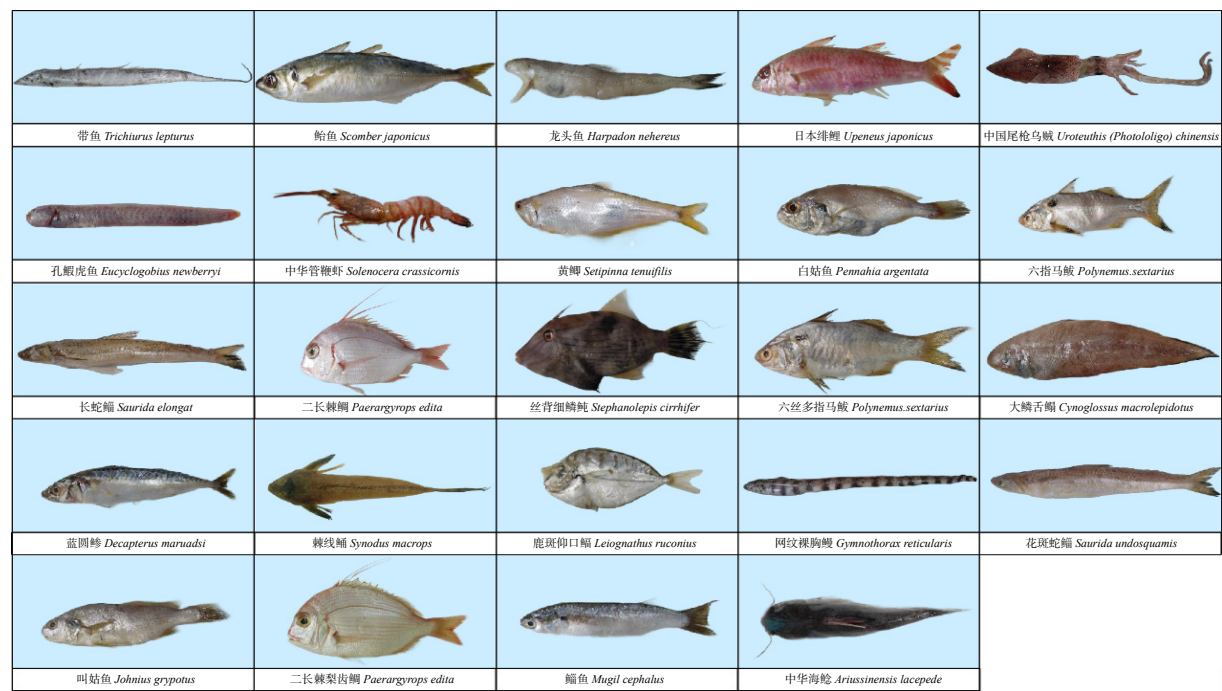


图 1 本研究采集的台湾海峡海域海洋生物种类

Fig. 1 Species of marine biota from the Taiwan Strait

1.2 海洋生物中 OBT 和¹⁴C 比活度的分析

本研究在鉴定海洋生物种类后,测量了所有海洋生物的长度和重量,选取其中性成熟的个体进行分析。依据公众的食用习惯,分离样品的可食用部分(主要为肌肉组织)与不可食用部分(骨骼、甲壳、鳞片、头和消化腺等),分别称重,分析了可食用部分的 OBT 和¹⁴C 比活度。取 1.0 kg 可食用部分,置于烘箱中 55 ℃ 恒温干燥 24 h,称量干重。将干燥后的样品粉碎、过 80 目筛网后密封保存直至分析。另取 3~5 g 可食用部分的干样分析其中的碳、氢元素含量(Vario EL III, Elementar, 德国),用于后续鲜样比活度的计算。本研究中海洋生物的基本信息归纳于表 1 中。

海洋生物 OBT 和¹⁴C 的分析方法参照《生物中氚和碳-14 的分析方法 管式燃烧法》(HJ 1324—2023)进行。称取 100.0 g 干样,使用氚碳燃烧装置 [HDT-TB101, 青稻川(上海)新能源科技有限公司,中国],将样品彻底氧化为 CO₂ 和 H₂O。氧化产物捕集于串联吸收装置中,水蒸气冷凝于-35 ℃ 冷阱;CO₂ 被装有 200 mL 1.0 mol/L NaOH 溶液的鼓泡瓶吸收。燃烧所得的 H₂O 经过回流氧化、蒸馏除杂后,回收的水样电导率≤10 μS/cm, pH 为 6~7。取 8.0 mL 水样与 12.0 mL 闪烁液(Ultima Gold uLLT, PerkinElmer, 美国)于 20 mL 低扩散聚乙烯瓶(PerkinElmer, 美国)中混匀,避光、静置 24 h 后使用超低本底液体闪烁

表 1 本研究海洋生物基本信息
Tab.1 Basic information of marine biota

物种名称	物种拉丁学名	干鲜比/%	碳元素含量/%	氢元素含量/%
中华管鞭虾	<i>Solenocera crassicornis</i>	18.4	42.8	8.0
龙头鱼	<i>Harpadon nehereus</i>	11.0	49.9	9.0
鲈鱼	<i>Scomber japonicus</i>	23.8	51.5	7.9
带鱼	<i>Trichiurus lepturus</i>	21.5	50.1	8.4
孔鰕虎鱼	<i>Eucyclogobius newberryi</i>	19.4	44.6	6.4
二长棘鲷	<i>Paerargyrops edita</i>	20.5	38.9	6.4
鲻鱼	<i>Mugil cephalus</i>	25.6	49.8	8.0
长蛇鲻	<i>Saurida elongat</i>	22.4	48.8	7.6
黄鲫	<i>Setipinna tenuifilis</i>	26.6	54.5	8.9
鹿斑仰口鲷	<i>Leiognathus ruconius</i>	28.8	55.6	9.0
大鳞舌鲷	<i>Cynoglossus macrolepidotus</i>	19.7	48.4	7.7
日本绯鲤	<i>Upeneus japonicus</i>	26.8	42.1	6.8
中国尾枪乌贼	<i>Uroteuthis (Photololigo) chinensis</i>	26.2	42.2	7.4
六指马鲛	<i>Polynemus.sextarius</i>	25.6	51.0	8.2
白姑鱼	<i>Pennahia argentata</i>	22.0	46.8	7.8
叫姑鱼	<i>Johnius grypotus</i>	20.6	43.7	6.9
网纹裸胸鳐	<i>Gymnothorax reticularis</i>	27.1	55.6	9.0
丝背细鳞鲀	<i>Stephanolepis cirrhifer</i>	20.0	40.0	5.6
棘线鲷	<i>Synodus macrops</i>	22.0	40.7	5.8
六丝多指马鲛	<i>Polynemus.sextarius</i>	26.0	47.1	6.7
蓝圆鲹	<i>Decapterus maruadsi</i>	21.5	48.9	7.0
二长棘梨齿鲷	<i>Paerargyrops edita</i>	23.0	49.7	7.2
花斑蛇鲻	<i>Saurida undosquamis</i>	21.0	46.6	6.7
中华海鲶	<i>Ariussinensis lacepede</i>	22.0	47.9	7.7

谱仪 (RLS 600, 苏州泰瑞迅科技有限公司, 中国) 测量 300 min; 将吸收 CO₂ 的 NaOH 溶液用饱和 CaCl₂ 溶液沉淀, 形成 CaCO₃ 白色沉淀, 沉淀经洗涤、干燥后, 称取 2.00 g 置于 20 mL 低扩散聚乙烯瓶中, 加入 4.0 mL 超纯水、14.0 mL 闪烁液 (Ultima Gold F, PerkinElmer, 美国) 混合, 避光 24 h 后测量 180 min。超低本底液体闪烁能谱仪对³H 和¹⁴C 的探测效率使用标准氟化水 (购买自德国联邦物理技术院) 和¹⁴C 标准粉末 (购买自中国计量科学研究院) 进行刻度。本研究采用的分析方法对海洋生物中 OBT 和¹⁴C 的检出限分别为 0.15 Bq/kg (鲜重) 和 0.50 Bq/kg (鲜重)。

1.3 剂量估算

居民因食用海产品而摄入放射性核素所致的辐射剂量, 可以使用公式(1)、公式(2)进行估算^[24]:

$$E_{\text{ing}} = \sum_j I_{j, \text{ing}} \cdot e(g)_{j, \text{ing}} \quad (1)$$

$$I_{j, \text{ing}} = C_j \cdot m \quad (2)$$

式中: E_{ing} 为摄入海产品中所有参与剂量评估核素所致的年待积有效剂量 (Sv/a); $I_{j, \text{ing}}$ 为海产品中 j 核素的摄入活度 (Bq/a); $e(g)_{j, \text{ing}}$ 为 g 年龄组在一段时间内摄入单位质量某核素的待积有效剂量 (Sv/Bq); C_j 为海产品中核素 j 的比活度 (Bq/kg); m 为海产品人均摄入量 (kg/a)。海产

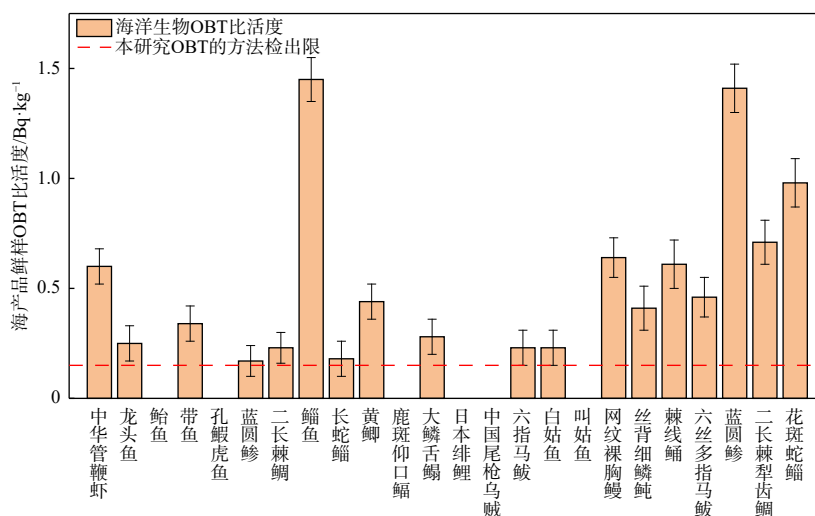
品摄入量参考李雪等^[25]估算的福建省水产人均消费量。

2 结果与讨论

2.1 台湾海峡海域海洋生物中 OBT 和 ^{14}C 比活度分布

在台湾海峡海域的 24 种海洋生物样品中, 可食用部分 OBT 比活度的分布范围为 $< 0.15 \sim 1.45 \text{ Bq/kg}$ (鲜重, 下同), 其中鲈鱼、孔鰕虎鱼、鹿斑仰口鲷、日本绯鲤、中国尾枪乌贼和叫姑鱼

的 OBT 比活度低于检出限 (0.15 Bq/kg)。在可检出 OBT 的 18 种海洋生物中, OBT 比活度的平均值为 $(0.53 \pm 0.39) \text{ Bq/kg}$, 其中鲈鱼的 OBT 比活度最高 (图 2)。与 OBT 不同, 本研究采集的 24 种海洋生物的可食用部分均可检测到 ^{14}C , 其比活度的范围为 $1.51 \sim 22.1 \text{ Bq/kg}$, 平均值为 $(8.98 \pm 5.55) \text{ Bq/kg}$ 。蓝圆鲀的 ^{14}C 比活度最高, 叫姑鱼的 ^{14}C 比活度最低 (图 3)。图 4 为台湾海峡海域海洋生物中 OBT 和 ^{14}C 比活度的频数分布直方图, OBT 比活度集中于 $0 \sim 0.8 \text{ Bq/kg}$ (低



(图中红色虚线表示本研究分析方法对 OBT 的检出限)

图 2 台湾海峡海域海洋生物中 OBT 的比活度

Fig. 2 Specific activities of OBT in marine biota from the Taiwan Strait

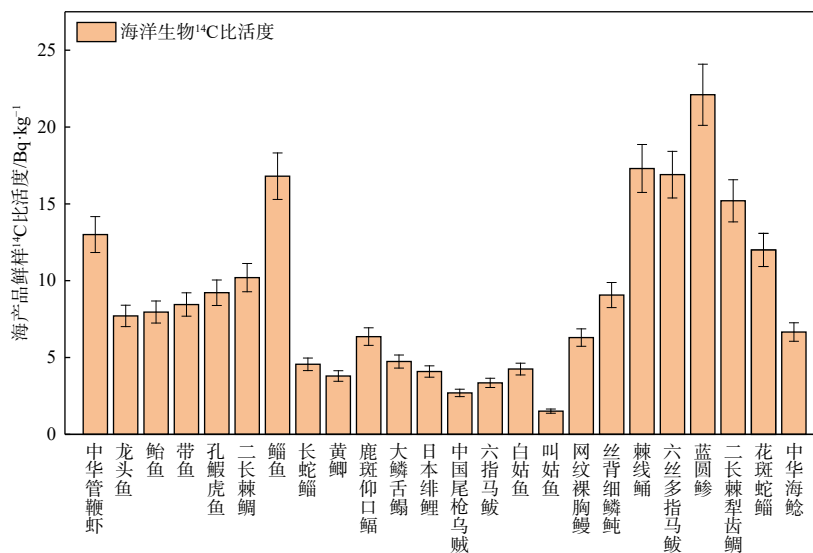


图 3 台湾海峡海域海洋生物中 ^{14}C 的比活度

Fig. 3 Specific activities of ^{14}C in marine biota from the Taiwan Strait

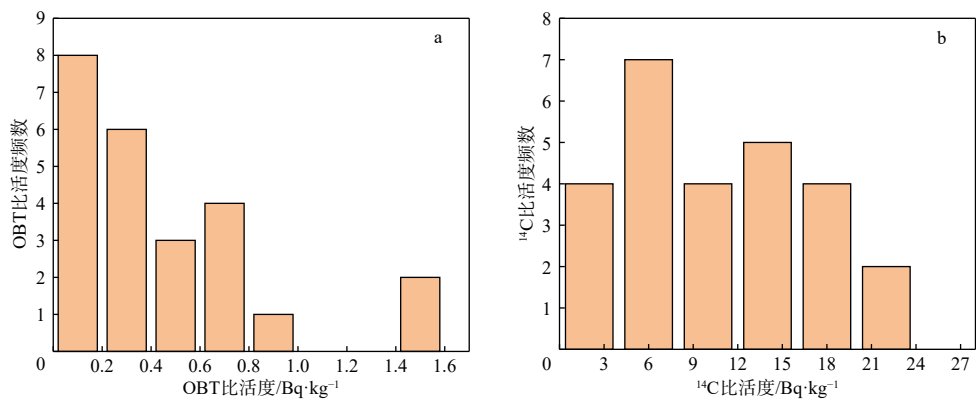


图 4 台湾海峡海域海洋生物 OBT 和¹⁴C 比活度的频数分布

Fig. 4 Frequency distributions of radionuclide specific activities in marine biota from the Taiwan Strait

于本研究 OBT 检出限的生物计入 0~0.2 Bq/kg 的区间);¹⁴C 比活度主要集中于 0~18 Bq/kg, 分布频数较为平均。

2.2 台湾海峡海域海洋生物中的 OBT 和¹⁴C 比活度与其他海域的比较

为比较台湾海峡海域与其他海域的海洋生物中 OBT 和¹⁴C 比活度水平, 本研究整理了先前研究中海洋生物中 OBT 和¹⁴C 比活度的报道结果(表 2)。汇总结果表明, 台湾海峡海域海洋生物鲜样中 OBT 比活度水平与其他海域海洋生物鲜样中 OBT 比活度水平相近。例如, 2023 年 7 月日本核污染水排海前后在中国东海海域的研究中, 海洋生物鲜样中 OBT 比活度范围为 0.07~1.80 Bq/kg, 与本研究在 2024 年 4 月捕获的海洋生物鲜样中 OBT 比活度(<0.15~1.45 Bq/kg)处于同一水平^[23, 26-27]; 王天姿等^[27]报道的 2013 年

后秦山核电站附近牡蛎和鲷鱼鲜样中³H 的比活度(2.1~8.2 Bq/kg)较本研究样本的³H 比活度高, 推测可能受核电站³H 排放的影响。2022 年 5 月, 在日本福岛第一核电站半径 20 km 海域内采集的比目鱼中 OBT 比活度范围为 0.05~0.35 Bq/kg, 平均值为 (0.11±0.08) Bq/kg^[28]; Hyoe 等^[29]调查了 2023—2024 年福岛核污染水排海前后, 日本比目鱼和石斑鱼中 OBT 的比活度, 范围为 0.04~0.06 Bq/kg, 低于本研究测得的 OBT 比活度水平。台湾海峡海域海洋生物鲜样中¹⁴C 比活度与其他海域的报道数据无明显差异, 海洋生物鲜样中¹⁴C 的比活度均小于现代碳中¹⁴C 比活度的水平(0.226 Bq/g), 海洋生物鲜样中¹⁴C 比活度低于英国塞拉菲尔德乏燃料后处理厂周围海域生物鲜样中¹⁴C 的比活度(21.61~82.23 Bq/kg)^[30]。

表 2 不同海域海洋生物中 OBT 和¹⁴C 的比活度

Tab.2 A comparison of activity of OBT and ¹⁴C in marine biota from different areas

研究海区	研究时间	海洋生物种类	前处理和测量方法	OBT比活度/Bq·kg ⁻¹		¹⁴ C比活度/Bq·kg ⁻¹		参考文献
				范围	均值	范围	均值	
钦州湾, 广西, 中国	2015年	文蛤等(9种)	管式燃烧法, 液闪计数法	0.10~1.15	0.71±0.33	/	/	[22]
浙江沿海, 中国	2020年	蛎子等(4种)	管式燃烧法, 液闪计数法	0.22~0.42	0.30±0.07	3.53~20.34	12.41±5.30	[23]
舟山海域, 浙江, 中国	2008—2017年	牡蛎、鲷鱼、带鱼	管式燃烧法, 液闪计数法	0.18~1.80	/	12.35~24.71	/	[27]
秦山核电海域, 浙江, 中国	2008—2017年	牡蛎、鲷鱼、带鱼	管式燃烧法, 液闪计数法	0.49~8.20	/	9.00~23.00	/	[27]
福清海域, 福建, 中国	2020—2022年	虾、牡蛎、紫菜	管式燃烧法, 液闪计数法	0.07~0.35	0.20±0.09	/	/	[31]
秦山核电海域, 浙江, 中国	2008年	鲷鱼	管式燃烧法, 液闪计数法	/	/	/	16.2±0.7	[32]

续表

研究海区	研究时间	海洋生物种类	前处理和测量方法	OBT比活度/Bq·kg ⁻¹		¹⁴ C比活度/Bq·kg ⁻¹		参考文献
				范围	均值	范围	均值	
不列颠群岛、爱尔兰海, 英国	2014—2015年	挪威鳌虾等(11种)	管式燃烧法, 加速器质谱法	/	/	21.61 ~ 82.23	46.09 ± 21.67	[30]
秦山核电附近海域, 浙江, 中国	2022年	鳙鱼等(5种)	管式燃烧法, 液闪计数法	0.13 ~ 2.58	0.94 ± 0.97	6.84 ~ 15.95	11.04 ± 3.40	[26]
杭州湾, 浙江, 中国	2022年	梭子蟹等(6种)	管式燃烧法, 液闪计数法	0.13 ~ 0.51	0.31 ± 0.14	4.60 ~ 17.77	9.23 ± 4.08	[26]
青森县、岩手县海域, 日本	2003—2012年	牙鲆等(12种)	管式燃烧法, 液闪计数法	0.01 ~ 0.49	0.05 ± 0.06	/	/	[33]
福岛第一核电站海域, 日本	2022年	比目鱼	管式燃烧法, 液闪计数法	0.05 ~ 0.35	0.11 ± 0.08	/	/	[28]
福岛第一核电站海域, 日本	2023—2024年	日本比目鱼、石斑鱼	管式燃烧法, 液闪计数法	0.045 ~ 0.061	0.053 ± 0.011	/	/	[29]
福岛第一核电站海域, 日本	2022年	褐牙鲆等(8种)	管式燃烧法, 液闪计数法	< 0.06	/	20 ~ 28	24.5 ± 2.1	[34]
福岛第一核电站海域, 日本	2023年	褐牙鲆等(8种)	管式燃烧法, 液闪计数法	< 0.05	/	18 ~ 29	23.2 ± 2.9	[34]
福岛第一核电站海域, 日本	2024年	褐牙鲆等(11种)	管式燃烧法, 液闪计数法	< 0.06	/	20 ~ 30	23.1 ± 2.2	[34]
福岛第一核电站海域, 日本	2025年	海鱼	管式燃烧法, 液闪计数法	< 0.05	/	23 ~ 28	25.8 ± 2.6	[34]
台湾海峡, 福建, 中国	2024—2025年	带鱼等(24种)	管式燃烧法, 液闪计数法	< 0.15 ~ 1.45 (6种未检出)	0.53 ± 0.39 (6种未检出)	1.51 ~ 22.1	8.98 ± 5.55	本文

注: /表示引用文献中无此数据

2.3 居民因食用海产品摄入放射性核素所致的辐射剂量

人类摄食富集放射性核素的海产品后, 可能会在体内产生一定剂量的内照射。文献报道福建居民年均海产品消费量约为 63.35 kg^[25], 结合本研究中分析的海产品可食用部分重量的平均占比为 54.1%, 通过公式(1)、公式(2)和本研究测量的比活度数据, 对福建沿海居民因食用海鲜而摄入 OBT 和 ¹⁴C 所致的年待积有效剂量 (*E_{ing}*) 进行估算。

福建沿海居民因食用台湾海峡海域的海产品而摄入 OBT 和 ¹⁴C 所致的年待积有效剂量估算结果分别是 8.0 × 10⁻⁴ μSv 和 0.18 μSv, 由此产生的最大年待积有效剂量分别是 0.002 μSv 和 0.44 μSv(表 3)。Muir 等^[30] 估算了塞拉菲尔德乏燃料后处理厂附近居民因食用海产品而摄入 ¹⁴C 所致的年待积有效剂量为 0.38 ~ 1.67 μSv, 这明显高于福建沿海居民因食用海产品而摄入 ¹⁴C 所致的年待积有效剂量; Ma 等^[26] 估算了居民因食用秦山核电站附近 5 种海产品而摄入 OBT 和 ¹⁴C 所致的年待积有效剂量为 6.37 ×

10⁻⁴ μSv 和 0.19 μSv, 而因食用杭州湾海域 6 种海产品而摄入 OBT 和 ¹⁴C 所致的年待积有效剂量为 2.44 × 10⁻⁴ μSv 和 0.16 μSv。可见本研究估算的福建沿海居民因食用海产品而摄入 OBT 和 ¹⁴C 所致的年待积有效剂量与浙江海域的研究结果较为接近。此外, 柯思因等^[35] 对福建沿海成年居民因食用海产品而摄入 ¹³⁷Cs 和 ⁹⁰Sr 所致的年待积有效剂量估算分别为 6.1 × 10⁻⁴ μSv 以及 6.5 × 10⁻⁴ μSv; Lin 等^[36] 估算了中国东南沿海居民因食用海鲜而摄入 ²¹⁰Po 所致的年待积有效剂量为 3.88 ~ 56.9 μSv。与其他放射性核素相比, 福建沿海居民因摄入 OBT 产生的年待积有效剂量显著低于因摄入 ²¹⁰Po、¹³⁷Cs 和 ⁹⁰Sr 等核素产生的年待积有效剂量; 而因摄入 ¹⁴C 产生的年待积有效剂量高于因摄入 ¹³⁷Cs 和 ⁹⁰Sr 产生的年待积有效剂量, 但仍低于因摄入 ²¹⁰Po 产生的年待积有效剂量。总体上, 本研究评估的福建居民因食用台湾海峡海域海产品而摄入 OBT 与 ¹⁴C 所致的年待积有效剂量均远小于我国《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002)中规定的公众年有效剂量限值(1000 μSv)。

表 3 福建沿海居民因食用海产品而摄入 OBT、¹⁴C 所致有效剂量评估
Tab.3 Dose assessment of OBT and ¹⁴C in seafood ingested by coastal residents in Fujian Province

核素 <i>j</i>	<i>C_j</i> 均值/ Bq·kg ⁻¹	<i>C_j</i> 范围/ Bq·kg ⁻¹	<i>m</i> 可食/ kg·a ⁻¹	<i>I_{j,ing}</i> 均值/ Bq·a ⁻¹	<i>I_{j,ing}</i> 最大值/ Bq·a ⁻¹	<i>e</i> (> 17) _{<i>j,ing</i>} / 10 ⁻¹¹ Sv·Bq ⁻¹	<i>E_{ing}</i> 均值/ μSv·a ⁻¹	<i>E_{ing}</i> 最大值/ μSv·a ⁻¹
³ H(OBT)	0.53 ± 0.39	0.17 ~ 1.45		18.2	49.7	4.20	8.0 × 10 ⁻⁴	2.0 × 10 ⁻³
¹⁴ C	8.98 ± 5.55	1.51 ~ 22.1	34.3	308	757	58.0	0.18	0.44
¹⁴ C + ³ H(OBT)	—	—	—	—	—	—	0.18	0.45

3 结论

(1)台湾海峡海域海洋生物中的 OBT 和¹⁴C 的比活度为环境本底水平。2024 年台湾海峡海域海洋生物鲜样中的 OBT 和¹⁴C 的比活度范围分别为< 0.15 ~ 1.45 Bq/kg 和 1.51 ~ 22.1 Bq/kg, 与我国其他海域研究结果相近。

(2)居民因食用台湾海峡海域海产品产生的辐射剂量很低。福建沿海居民因食用海产品而摄入 OBT 和¹⁴C 所致的年待积有效剂量的最大估计值分别为 2 × 10⁻³ μSv 和 0.44 μSv, 远低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002)规定的年有效剂量(1000 μSv)。

致谢 感谢福建中科环境检测技术有限公司在采样中提供的帮助。

参考文献:

[1] Tokyo Electric Power Company (TEPCO). Treated water portal site[EB/OL]. (2025-08-07)[2025-08-25]. <https://www.tepco.co.jp/en/decommission/progress/watertreatment/index-e.html>.

[2] Buesseler K O. Opening the floodgates at Fukushima[J]. Science, 2020, 369(6504): 621-622.

[3] 张 通, 侯小琳, 范煜坤. 福岛核事故源放射性铯海洋扩散研究进展及其对福岛核污染水排海应对的启示 [J]. 中国科学: 地球科学, 2025, 55(2): 397-415.

[4] 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.

[5] Hou X L. Tritium and ¹⁴C in the Environment and Nuclear Facilities: Sources and Analytical Methods[J]. Journal of the Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology(JNFCWT), 2018, 16(1): 11-39.

[6] Vlasov D A, Desyatov D D, Ekinin A A. Forecast of tritium release into the environment during the normal operation of nuclear power plants[J]. Atomic Energy, 2025, 138(3): 162-170.

[7] IAEA. Management of Waste Containing Tritium and Carbon-

14[M]. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2004: 94-97.

[8] Wang D Y, Zhou Q F, Yin Y G, et al. Implications of Fukushima’s radioactive water discharge on global environmental sustainability[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(7): 3061-3064.

[9] Lai J L, Li Z G, Wang Y, et al. Tritium and carbon-14 contamination reshaping the microbial community structure, metabolic network, and element cycle in the seawater environment[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(13): 5305-5316.

[10] Arcanjo C, Frelon S, Armant O, et al. Insights into the modes of action of tritium on the early-life stages of zebrafish, Danio rerio, using transcriptomic and proteomic analyses[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2023, 261: 107141.

[11] Jaeschke B C, Bradsham C. Bioaccumulation of tritiated water in phytoplankton and trophic transfer of organically bound tritium to the blue mussel, Mytilus edulis[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2013, 115: 28-33.

[12] Tucker J S, Harrison F L. The incorporation of tritium in the body water and organic matter of selected marine invertebrates[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology. 1974, 49(2): 387-397.

[13] Williams J L, Russ R M, Mccubbin D, et al. An overview of tritium behaviour in the Severn Estuary (UK)[J]. Journal of Radiological Protection, 2001, 21(4): 337-344.

[14] Mccubbin D, Leonard K S, Bailey T A, et al. Incorporation of Organic Tritium (³H) by Marine Organisms and Sediment in the Severn Estuary/Bristol Channel (UK)[J]. Marine Pollution Bulletin, 2001, 42(10): 852-863.

[15] IAEA. Sediment Distribution Coefficients and Concentration Factors for Biota in the Marine Environment[M]. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2004: 26-61.

[16] Trivedi A, Galeriu D, Richardson R B. Dose contribution from metabolized organically bound tritium after acute tritiated water intakes in humans. [J]. Health Physics. 1997, 73(4): 579-586.

[17] Balonov M I, Dolgirev E I, Likhtarev I A. Exchange kinetics and dosimetry of tritium oxide in man for different routes of

- administration. [J]. Health Physics. 1974, 27(4): 367-375.
- [18] Nayak S R, D'souza R S, Kamath S S, et al. Organically bound tritium: optimization of measurements in environmental matrices by combustion method and liquid scintillation spectrometry[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2019, 319(3): 917-926.
- [19] Douville E, Fievet B, Germain P, et al. Radiocarbon behaviour in seawater and the brown algae *Fucus serratus* in the vicinity of the COGEMA La Hague spent fuel reprocessing plant (Goury)—France[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2004, 77(3): 355-368.
- [20] Dong S P, Deng R Q, Zeng H, et al. Trophic transfer of carbon-14 from algae to zebrafish leads to its blending in biomolecules and the dysregulation of metabolism via isotope effect[J]. National Science Review, 2025, 12(1): nwae346.
- [21] 福建省统计局, 国家统计局福建调查总队. 2024年福建省国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2025-03-14)[2025-05-17]. https://tjj.fujian.gov.cn/xxgk/tjgb/202503/t20250313_6779048.htm.
- [22] Lin F, Yu W, Guo J P, et al. A method for the determination of organically bound tritium in marine biota based on an improved tubular-combustion system[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2020, 211: 106084.
- [23] 任 鸿, 曹艺耀, 王 鹏, 等. 浙江省 2020 年核电站周围三类海产品中有机结合氚和碳-14 放射性水平及人群有效剂量评估 [J]. 中国公共卫生, 2023, 39(5): 622-626.
- [24] GB 18871—2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准 [S].
- [25] 李 雪, 高 翔, 赵 蕾, 等. 中国居民水产品食用消费量测算与分析 [J]. 中国渔业经济, 2024, 42(2): 95-104.
- [26] Ma X X, Cao Y Y, Zheng T T, et al. Determination and human health risk assessment of TFWT, OBT and carbon-14 in seafood around Qinshan Nuclear Power Plant[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101243.
- [27] 王天姿, 涂 彧, 万 骏. 秦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.
- [28] Tokyo Electric Power Company (TEPCO). Fukushima Daiichi Decontamination and Decommissioning Engineering Company. Verification of analytical values of tritium in fish in sea area monitoring for the sea discharge of the water treated by the Advanced Liquid Processing System, etc. of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station[EB/OL]. (2022-12-21)[2025-06-30]. https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/information/committee/pdf/2022/technical_22122104-e.pdf#:~:text=After%20commencing%20the%20analysis%20of%20tritium%20concentrations%20in,than%20tritium%20concentrations%20in%20the%20surrounding%20sea%20water.
- [29] Takata H, Wada T, Miura H, et al. Tritium and ^{137}Cs levels in marine fishes and in their host seawater around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant from 2021 to 2024[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2025, 289: 107760.
- [30] Muir G K P, Tierney K M, Cook G T, et al. Ecosystem uptake and transfer of Sellafield-derived radiocarbon (^{14}C). Part 1. The Irish Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 114(2): 792-804.
- [31] 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.
- [32] 董美莲, 谷韶中. 秦山核电基地环境生物样品中 ^{14}C 监测方法探讨 [J]. 辐射防护, 2016, 36(2): 117-121, 128.
- [33] Ohtsuki S, Shirotani Y, Takata H. Distributions of tritium and ^{137}Cs in coastal seawater and biota off Aomori and Iwate prefectures, Japan[J]. Journal of Oceanography, 2023, 79(6): 547-561.
- [34] Ministry of the Environment. ALPS treated water marine monitoring results details [EB/OL]. (2025-10-24)[2025-09-25]. <https://policies.env.go.jp/water/shorisui-monitoring/en/download/>.
- [35] 柯思因, 钟强强, 张福乐, 等. 福建海域海产品中 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 的放射性水平及其剂量评估 [J]. 海洋环境科学, 2025. Doi: 10.12111/j.mes.2025-0033.
- [36] Lin J, Ni J L, Ji J D, et al. ^{210}Po and ^{210}Pb in tissues of fish from the southern coast of China and the contribution of ^{210}Po to the radiation dose[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2023, 332(4): 947-952.

(本文编辑: 胡莹莹)