

DOI: 10.3724/j.1007-6336.2025-0033

福建海域海产品中 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 的放射性水平 及剂量评估

柯思因^{1,2}, 钟强强¹, 张福乐¹, 李 聪³, 宾 丽¹,
陈 越¹, 吴 镇³, 黄德坤¹, 于 涛¹

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

摘 要:2023 年 8 月日本福岛核污染水排海引发公众对海产品安全的担忧。本研究通过分析 2024 年福建海域海产品中人工放射性核素 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 的比活度, 系统评估我国近海海产品放射性本底水平。全样分析的结果表明, 海产品中 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 的比活度范围分别为 $<0.004 \sim 0.155 \text{ Bq/kg}$ 和 $0.006 \sim 0.132 \text{ Bq/kg}$ (鲜重); 将海产品分为可食部分和不可食部分并进一步分析发现, ^{137}Cs 更易富集于肌肉组织等可食部分, 而 ^{90}Sr 倾向富集在骨骼等不可食部分。总体而言, 福建海域海产品中 ^{137}Cs 比活度水平与我国山东等邻近海域相当, 远低于福岛附近海域。本文评估了居民因食用海产品而摄入 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 所致的年待积有效剂量分别为 $0.0051 \mu\text{Sv/a}$ 和 $0.0062 \mu\text{Sv/a}$, 约为全球自然本底辐射 (2.4 mSv/a) 的 0.25‰。本研究为评估核污染水排放对福建海域的后续影响提供了基础数据支撑。

关键词:福岛核污染水; ^{90}Sr ; ^{137}Cs ; 海产品; 剂量评估

中图分类号:X837 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-6336(2026)01-0025-09

Radioactivity levels of ^{90}Sr and ^{137}Cs in seafoods collected from sea area of Fujian and associated dose assessment

Ke Siyin^{1,2}, Zhong Qiangqiang¹, Zhang Fule¹, Li Cong³, Bin Li¹,
Chen Yue¹, Wu Zhen³, Huang Dekun¹, Yu Tao¹

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

Abstract: The discharge of Fukushima nuclear wastewater in August 2023 raised public concerns about seafood safety. This study systematically assessed the baseline levels of artificial radionuclides (^{90}Sr and ^{137}Cs) in seafood from Fujian coastal waters in 2024. Whole-sample analysis revealed activity concentrations of ^{90}Sr and ^{137}Cs ranging from <0.004 to 0.155 Bq/kg and 0.006 to 0.132 Bq/kg (fresh weight), respectively. Further analysis of seafood divided into edible and non-edible parts revealed that ^{137}Cs tends to accumulate more in edible muscle tissues, while ^{90}Sr shows a higher propensity for enrichment in non-edible skeletal components. The ^{137}Cs levels in Fujian seafood were comparable to those in Shandong and adjacent Chinese coastal areas but

收稿日期: 2025-02-26, 修订日期: 2025-04-28

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)

作者简介:柯思因(2001—), 女, 广东深圳人, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋环境放射性监测, E-mail: m230200692@st.shou.edu.cn

通信作者:于 涛(1971—), 女, 研究员, 主要研究方向为海洋环境化学及风险评估, E-mail: yutao@tio.org.cn

significantly lower than contamination levels near Fukushima. The estimated annual committed effective doses from dietary intake of ^{90}Sr and ^{137}Cs were $0.0051\ \mu\text{Sv/a}$ and $0.0062\ \mu\text{Sv/a}$, respectively, accounting for approximately 0.25% of the global natural background radiation dose ($2.4\ \text{mSv/a}$). This study provides fundamental data for evaluating the long-term impacts of Fukushima wastewater discharge on Fujian marine ecosystems and seafood safety.

Key words: Fukushima nuclear contaminated water; ^{90}Sr ; ^{137}Cs ; seafood; dose assessment

自2023年8月日本政府启动福岛核污染水排海至今,福岛第一核电站已向西北太平洋排放核污染水达7.8万吨^[1]。尽管东京电力公司使用多核素去除装置(advanced liquid processing system, ALPS)和铯铷吸附装置等多种去污系统对核污染水中的放射性核素进行了去污处理,但福岛核污染水中仍然包含了大量的裂变产物和超铀元素,福岛核污染水排海引发了社会公众对海洋生态环境安全,特别是海产品安全的担忧和关注^[2-3]。

^{90}Sr 和 ^{137}Cs 是福岛核污染水中存在的两种典型人工放射性核素,报道曾指出在启动排海前福岛核污染水中 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 的储量分别高达 $6.2\times 10^{11}\ \text{Bq}$ 和 $8.2\times 10^8\ \text{Bq}$ ^[3]。 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 的物理半衰期长(分别为28.8 a和30.2 a),在海洋中主要以离子形式存在,排入海洋后会随着洋流大范围扩散,并对海洋环境造成较为持久的影响。值得一提的是, ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 具有较强的生物毒性。研究发现,铯与钙的化学性质相似,容易积累在生物体的骨骼和牙齿中, ^{90}Sr 及其子体 ^{90}Y 的长期照射会增加患骨骼癌的风险^[4];而铯与钾的化学性质相似,容易富集在生物体的肌肉组织中,可能会引起软组织肿瘤并导致癌症^[5]。因此,福岛核污染水中排放的 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 经生物富集和食物链传递后,可能会对全球海洋生物乃至人类健康产生长期的负面影响。

福岛第一核电站(141.0°E , 37.4°N)位于亚极地环流与亚热带环流之间,该区域是以强流和涡流为特征的亲潮-黑潮交汇区^[6],同时也是西北太平洋模态水的主要形成区域^[7],这一特殊的地理位置使得福岛放射性污染物能够快速在太平洋海域扩散。我国学者的模拟研究表明,福岛核事故泄漏的 ^{137}Cs 可以自2013年起长期入侵并影响我国东南海域^[8],该数值模拟结果已得到东海和南海北部实测数据的验证^[9-10]。近期针对

福岛核污染水排海的模拟研究则指出,核污染水排海后受福岛附近的强洋流驱动,在1000 d内就能覆盖北太平洋大部分表层水域^[11]。这些研究表明我国海洋核与辐射生态环境安全面临着福岛核污染水排海的潜在威胁。尽管福岛核事故后,对我国海域海水中 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 的监测工作已大量开展^[12-13],但对海产品中 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 的跟踪监测尚且不足。

福建省是我国的海洋水产大省,拥有闽东、闽中、闽南、闽外和台湾浅滩五大渔场。2023年福建省水产品年总产量达890.2万吨,位居全国前三。同时,福建省也是我国海产品消费大省,年人均海产品消费量212.7 kg,居全国第一^[14]。然而,目前关于福建海域主要海产品中 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 污染水平的报道还相对较少。

因此,本文以 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 为例,研究了其在福建海域海产品中的污染水平和富集特征,并评估了福建沿海居民因食用海产品带来的辐射剂量。本工作的开展可在一定程度上填补福建近海海产品放射性核素本底数据的空白,并缓解公众对海产品安全的担忧,同时为科学评估福岛核污染水排海对我国海产品安全的潜在影响提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 海产品样品采集、处理与分析

本研究于2024年通过拖网捕捞的方式,在闽东、闽中、闽南、闽外和台湾浅滩五大渔场共采集了28种海产品样品,主要包括鱼类、头足类及虾类(注:不同海域采集的相同物种为同一物种),具体海产品的采样信息列于表1,捕捞的海产品如图1所示。现场采集后冷冻(-18°C)保存。

对于2024年4月捕捞的鱼类样品,根据鱼的尺寸可以分成大型鱼类($>10\ \text{cm}$)和小型鱼类($<10\ \text{cm}$);进一步,将大型鱼类样品分为可食部

表 1 海产品采样信息
Tab.1 Information on sampling of seafood

采样海区	位置	采样日期	物种名称	拉丁学名	样品总量/kg	体长/cm
闽东渔场	26°00'N—27°00'N, 125°00'E以西海区	2024-04-17	带鱼	<i>Trichiurus lepturus</i>	6.4	48.6
			鲈鱼	<i>Scomber japonicus</i>	11.1	16.6
			孔鰕虎鱼	<i>Eucyclogobius newberryi</i>	6.2	15.3
		2024-04-18	龙头鱼	<i>Harpadon nehereus</i>	5.1	16.9
			中华管鞭虾	<i>Solenocera crassicornis</i>	11.6	11.5
闽南渔场	22°00'N—24°30'N, 116°00'E—119°30'E	2024-04-19	中华海鲶	<i>Ariussinensis lacepede</i>	8.2	18.9
			鲷鱼	<i>Mugil cephalus</i>	9.2	14.3
			二长棘鲷	<i>Paerargyrops edita</i>	10.6	12.0
			长蛇鲷	<i>Saurida elongat</i>	8.4	15.8
			蓝圆鲹	<i>Decapterus maruadsi</i>	9.2	10.1
闽中渔场	24°30'N—26°00'N, 121°30'E和 台湾北部以西海区	2024-04-16	鹿斑仰口鲷	<i>Leiognathus ruconius</i>	4.3	5.5
			黄鲫	<i>Setipinna taty</i>	11.3	13.0
			大鳞舌鲷	<i>Cynoglossus macrolepidotus</i>	6.3	20.6
			叫姑鱼	<i>Johnius grypotus</i>	2.8	15.0
			白姑鱼	<i>Pennahia argentata</i>	5.3	11.0
		2024-04-21	鱿鱼	<i>Teuthida</i>	6.8	28.5
			六指马鲛	<i>Polynemus.sextarius</i>	9.6	11.4
			网纹裸胸鳗	<i>Gymnothorax reticularis</i>	7.2	21.2
			条尾绯鱼	<i>Upeneus bensasi</i>	2.6	9.4
		2024-08-18	二长棘鲷	<i>Paerargyrops edita</i>	10.0	10.9
台湾浅滩渔场	22°00'N—24°30'N, 117°30'E—121°30'E	2024-08-19	蓝圆鲹	<i>Decapterus maruadsi</i>	10.0	16.7
		2024-08-20	六指马鲛	<i>Polynemus.sextarius</i>	10.0	15.4
			丝背细鳞鲷	<i>Stephanolepis cirrhifer</i>	10.0	22.0
			叉斑狗母鱼	<i>Grammoplites scaber</i>	10.0	13.1
			棘线鲷	<i>Synodus macrops</i>	10.0	20.4
闽外渔场	26°00'N—27°00'N, 125°00'E—126°30'E	2024-09-11	带鱼	<i>Trichiurus lepturus</i>	10.4	41.8
			刺鲳	<i>Psenopsis anomala</i>	10.2	13.0
			小白鲨	<i>Scoliodon macrorhynchos</i>	11.4	31.8

分(主要为肌肉组织)和不可食部分(主要为骨骼、鱼鳍、鳞片、内脏等);大型鱼类需分为头、鳞片、骨骼和内脏等部分,对可食用部分以及不可食用部分分别测定分析;小型鱼类采用全鱼分析,于马弗炉中灰化,装样。

上述样品⁹⁰Sr比活度的测定按《水和生物样品灰中锶-90的放射化学分析方法》(HJ 815—2016)^[15]中的二-(2-乙基己基)磷酸萃取色层法进行,处理后的沉淀放置于低本底α/β计数器测量⁹⁰Y,计算样品中的⁹⁰Y活度,⁹⁰Sr比活度的检出

限为 0.004 Bq/kg(鲜重)。¹³⁷Cs比活度按《环境及生物样品中放射性核素的γ能谱分析方法》(GB/T 16145—2022)^[16]测量,使用高纯锗γ能谱仪测量 24 h。¹³⁷Cs的比活度以 661.7 keV(85.1%)能量处的峰进行计算,分析误差控制在 5%。¹³⁷Cs比活度的检出限为 0.005 Bq/kg(鲜重)。样品的探测效率使用鱼灰标样(中国计量科学研究院供应,校准时间:2006-05-21)。

1.2 剂量估算

居民因食用海产品带来的辐射剂量可运用

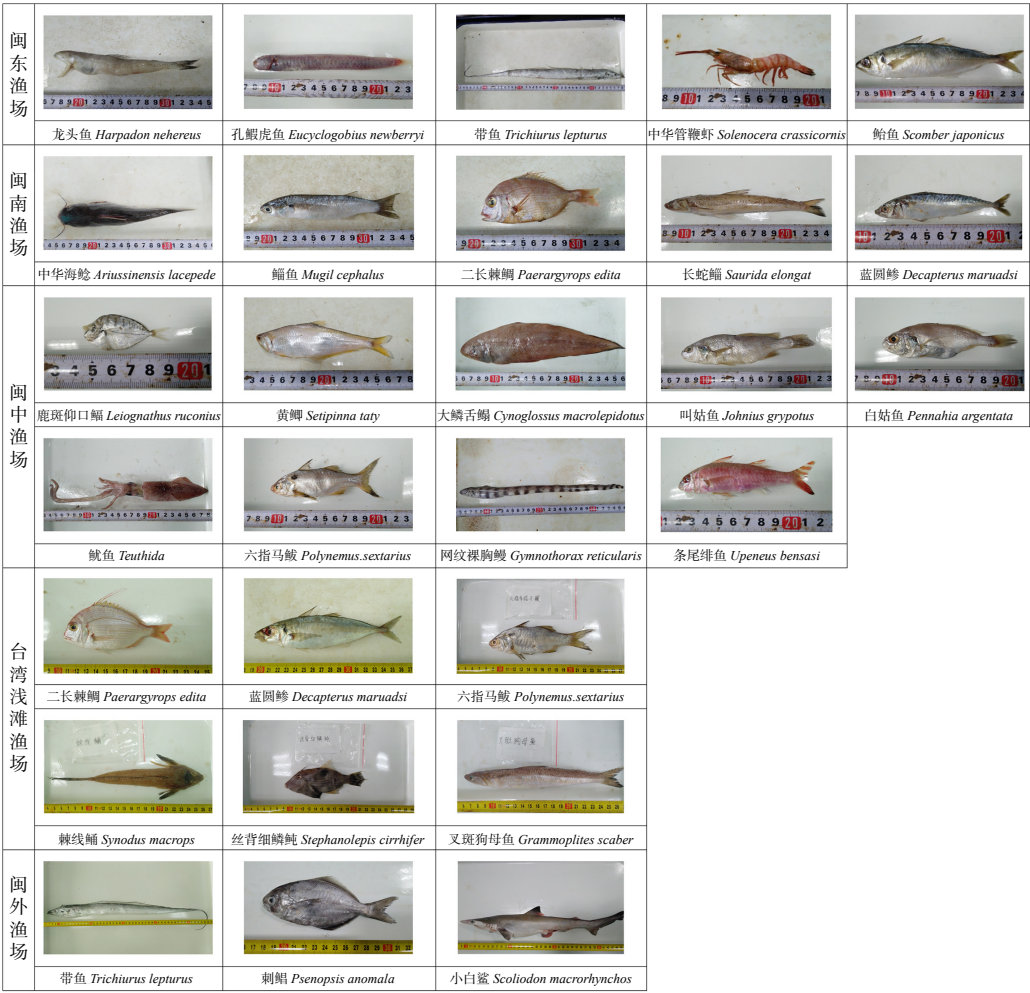


图 1 本研究捕捞的福建近海海域海产品

Fig. 1 Species of marine biota in Fujian offshore waters

食入食物所致的年待积有效剂量 (E_{ing}) 进行计算^[17], 估算公式如下:

$$E_{\text{ing}} = \sum C_i D_i Q_i \tag{1}$$

式中: E_{ing} 为福建沿海城市居民因食用海产品所致的年待积有效剂量 (Sv/a); C_i 为海产品中 i 核素的活度 (Bq/kg); D_i 为每年食用食物的量 (kg), 福建沿海城市以厦门为代表, 每年食入海产品的量参考《厦门经济特区年鉴 2022》; Q_i 为公众食用食物中 i 核素的计量转换系数 (Sv/Bq), 引自《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002)^[18]。

2 结果与讨论

2.1 福建近海海产品中⁹⁰Sr和¹³⁷Cs的含量
福建近海海域中 25 种海产品全鱼的⁹⁰Sr比

活度的范围为 $<0.004 \sim 0.155 \text{ Bq/kg}$ (鲜重, 下同), 如 图 2a 所示; ¹³⁷Cs 比活度范围为 $0.006 \sim 0.132 \text{ Bq/kg}$, 如 图 2b 所示。其中, 丝背细鳞鲷的⁹⁰Sr 比活度和二长棘鲷的¹³⁷Cs 比活度最高; 条尾绯鱼、蓝圆鲹和龙头鱼的⁹⁰Sr 比活度低于检出限。

本研究中的带鱼、鲈鱼和孔鲷虎鱼等 16 种海产品在前处理过程中分为了可食部分和不可食部分。可食部分中⁹⁰Sr 比活度的范围为 $<0.004 \sim 0.059 \text{ Bq/kg}$; 不可食部分中⁹⁰Sr 比活度的范围为 $<0.004 \sim 0.087 \text{ Bq/kg}$, 如 图 3a 所示。可食部分中¹³⁷Cs 比活度的范围为 $<0.005 \sim 0.128 \text{ Bq/kg}$; 不可食部分中¹³⁷Cs 比活度的范围为 $<0.005 \sim 0.117 \text{ Bq/kg}$, 如 图 3b 所示。其中, 大鳞舌鲷不可食部分的⁹⁰Sr 比活度最高, 六指马鲛可食部分的¹³⁷Cs 比活度最高。对比 图 3 中同种海洋生物中

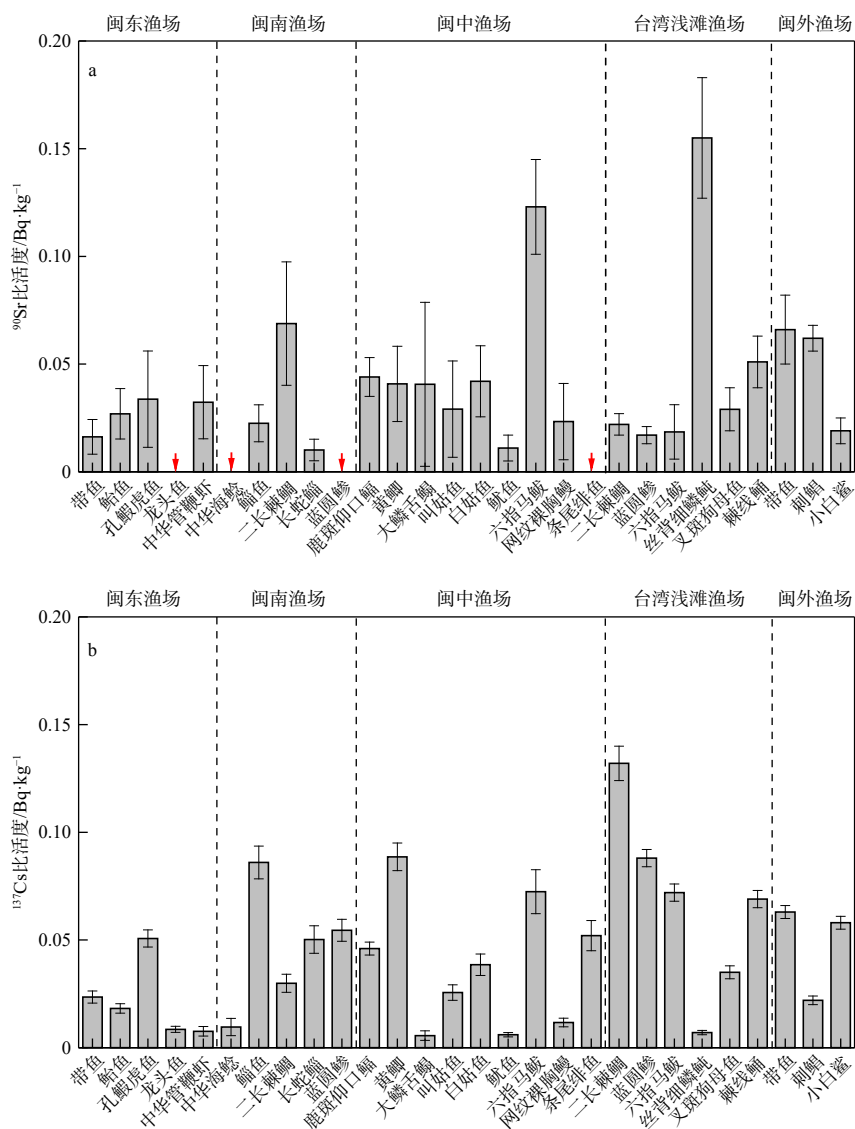


图 2 福建近海海产品全鱼中 ^{90}Sr (a)和 ^{137}Cs (b)的比活度

Fig. 2 The specific activities of ^{90}Sr (a) and ^{137}Cs (b) in the whole fish from Fujian offshore waters

的可食部分与不可食部分的核素比活度数据可以看出,不可食部分中 ^{90}Sr 的含量大多高于可食部分,而 ^{137}Cs 则恰恰相反,可食部分中 ^{137}Cs 的含量大多高于不可食部分,这一结果表明 ^{90}Sr 更容易富集在海洋生物的骨骼、内脏等组织中,而 ^{137}Cs 则更容易富集在海洋生物的肌肉组织中。Johansen 等^[19]在福岛近岸海域的研究中也观察到相似的研究结果, ^{90}Sr 在骨骼中比在其他器官中的剂量要高一个数量级。

2.2 与其他海域海洋生物中 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 污染水平的比较

本文总结了我国其他海域海产品中 ^{90}Sr 和

^{137}Cs 比活度水平,详细结果列于表 2。从表 2 中的数据对比可以发现,本研究所述海产品样品中 ^{90}Sr 比活度与 2023 年在渤海、黄海、东海、南海沿海地区采集的海产品样品中的水平一致^[20],且仅为 2018—2020 年三门核电站附近海域^[21]和 2019—2022 年石岛湾附近海域生物中的测量均值的十二分之一^[22]。

本研究海产品中 ^{137}Cs 比活度均值,同我国其他海域海产品中 ^{137}Cs 均值的分析结果相比基本处于同一水平(表 2),基本处于福岛核事故发生前海洋生物中 ^{137}Cs 的背景水平范围内(0.01~0.1 Bq/kg)^[23-24]。Lee 等^[25]收集并分析了 2018 年

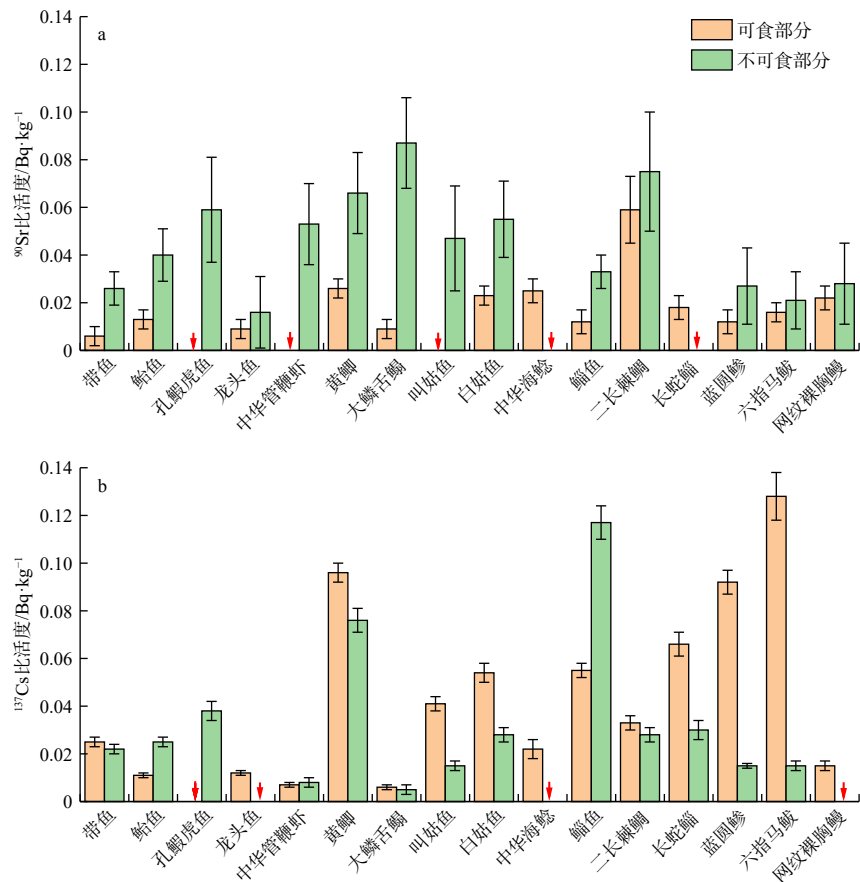


图 3 福建近海海产品可食部分和不可食部分⁹⁰Sr 和 ¹³⁷Cs 比活度

Fig. 3 The specific activities of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in edible and non-edible parts from Fujian offshore waters

表 2 不同海域海产品中⁹⁰Sr 和 ¹³⁷Cs 比活度

Tab.2 Specific activities of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in seafood from different sea areas

海区	位置	时间	海洋生物种类	⁹⁰ Sr比活度/Bq·kg ⁻¹		¹³⁷ Cs比活度/Bq·kg ⁻¹		文献来源
				范围	均值	范围	均值	
山东省石岛湾核电站 附近海域	36°42'N—37°14'N, 122°11'E—122°52'E 25°21'N—25°32'N,	2019—2022	海产品	/	0.500± 0.520	/	0.045± 0.004	[22]
福建省福清和宁德核 电站附近海域	119°20'E—119°32'E, 26°57'N—27°08'N, 120°10'E—120°23'E	2020	鲷鱼, 斑鲷, 带鱼, 小黄鱼	0.03 ~ 0.44	0.23± 0.18	ND ~ 0.08	0.065± 0.015	[27]
浙江省台州市三门核电站 附近海域	28°55'N—29°02'N, 121°38'E—121°39'E	2018—2020	鲫鱼, 鲷鱼	0.28 ~ 0.69	0.54± 0.16	0.13 ~ 0.45	0.22± 0.12	[21]
中国渤海、黄海、东海、 南海沿海地区	/	2023	海产品	0.023 ~ 0.098	/	0.017 ~ 0.24	/	[20]
福建省霞浦核电站 附近海域	26°21'N—27°15'N, 119°38'E—120°39'E	2020	海产品	0.047 ~ 0.560	0.242± 0.167	0.003 ~ 0.052	0.023± 0.052	[28]
韩国东南沿海	33°N—38°N, 124°E—130°E	2018	凤尾鱼	/	/	0.074 ~ 0.137	0.116± 0.016	[25]
瑞典市场采集	/	2017—2019	海产品	/	/	0.130 ~ 4.994	1.445± 0.044	[26]
福建省近海海域	22°30'N—27°00'N, 117°30'E—121°30'E	2024	海鱼	ND ~ 0.155	0.042± 0.034	0.0056 ~ 0.132	0.044± 0.031	本研究

注: ND为低于检出限; /表示引用文献中无此数据

韩国东南沿海的海鲜市场的凤尾鱼(*Engraulis japonicus*)样本,其报道的结果与本研究的 ^{137}Cs 结果大致相当,其体内的 ^{137}Cs 比活度范围为 $0.074 \sim 0.137 \text{ Bq/kg}$ 。另外, Piñero-García 等^[26]对 2017—2019 年瑞典市场的海产品进行了分析,鱼类 ^{137}Cs 比活度范围为 $0.130 \sim 4.994 \text{ Bq/kg}$,分析结果远高出本研究结果。

图 4 为 2013—2024 年日本福岛核电站港口鱼类中放射性核素 ^{137}Cs 的年际变化,红色的实线表示日本《食品卫生法》中规定的海产品中 ^{137}Cs 的比活度限值(100 Bq/kg)。从图 4 可以看出,日本福岛核电站港口区海域鱼类体内的 ^{137}Cs 比活度(89000 Bq/kg)从 2013 年 11 月至今呈降低的趋势,但在 2013—2016 年,核电站港口区海域鱼类中 ^{137}Cs 的比活度仍远高于日本政府设定的限值。总体来看,从福岛核事故发生至 2018 年,日本福岛港口区的海洋生物中 ^{137}Cs 比活度的水平总体呈下降趋势,随后进入稳定波动期,2020 年后含量范围为 $10 \sim 100 \text{ Bq/kg}$ 。2023 年 5 月鱼类体内 ^{137}Cs 比活度出现增加的现象,可能是沉积物的长期记忆效应对底栖鱼类产生持久影响^[29]。2023 年 8 月日本开启核污染水排海计划,港口内捕捞的鱼类体内 ^{137}Cs 的水平出现一定的增加现象,部分鱼类的检测结果高于日本政府规定的安全限值。将 2023—2024 年福岛核电站港口区鱼类 ^{137}Cs 比活度均值 [$(88.865 \pm 143.127) \text{ Bq/kg}$] 与本研究福建近海海域海产品中 ^{137}Cs 比活度均值 [$(0.036 \pm 0.026) \text{ Bq/kg}$] 相比较,日本福岛核电站港口区海域鱼类 ^{137}Cs 比活度比福建近海海产品中 ^{137}Cs 比活度高了近 2400 倍。

国际原子能机构(IAEA)官网公布了 2017 年至 2023 年从日本福岛核电站近岸海域(非港口区海域)捕获的鱼类中 ^{137}Cs 比活度的监测结果^[30],这些远离港口区的海鱼中 ^{137}Cs 比活度从 2017 年的 $0.586 \sim 4.05 \text{ Bq/kg}$ (均值为 2.06 Bq/kg)逐渐变化为 $0.212 \sim 0.668 \text{ Bq/kg}$ (均值为 0.44 Bq/kg)(图 4),由此可见,福岛核电站近岸海域(非港口区)野生鱼类体内的 ^{137}Cs 总体也呈下降趋势。虽然,福岛核电站近岸海域的鱼类体内 ^{137}Cs 比活度仅为福岛核电站港口区海域的鱼类

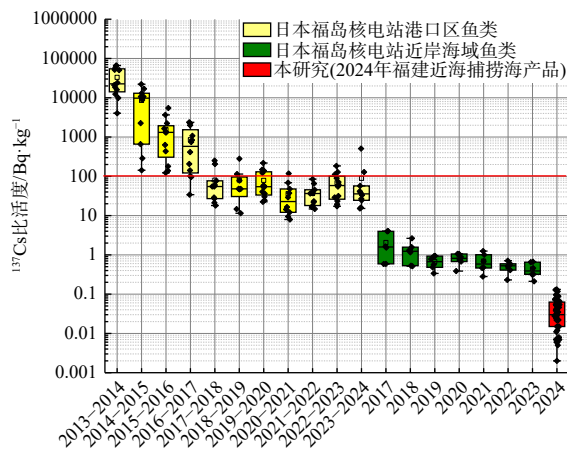


图 4 日本福岛核电站港口区海洋生物中 ^{137}Cs 比活度与本研究结果的对比^[30-31]

Fig. 4 Comparative analysis of ^{137}Cs specific activity in marine biota from Fukushima Daiichi NPP harbor area versus present findings^[30-31]

体内 ^{137}Cs 比活度的百分之一,但与我国福建近海捕捞的海产品中的 ^{137}Cs 比活度相比仍然高出大约 10 倍(图 4)。由此可知,从人工放射性核素 ^{137}Cs 的角度来判断,食用我国福建近海海产品显然更加安全。

2.3 福建沿海城市居民所受剂量评估

由于海产品中含有人工放射性核素,会对摄食居民造成一定的内照射剂量。居民食用海产品带来的辐射剂量可运用公式(1)估算出因食用食物所致的年待积有效剂量(E_{ing})。考虑到本研究中 16 种大型鱼类分为可食部分和不可食部分,因此,在计算 C_i 时,以海产品的可食部分进行评估,福建近海海域海产品中 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 比活度水平的代表性结果为 $(0.016 \pm 0.014) \text{ Bq/kg}$ ($n=16$)和 $(0.042 \pm 0.036) \text{ Bq/kg}$ ($n=16$)。

福建沿海居民从海产品中摄入放射性核素所致的年待积有效剂量估算结果列于表 3。估算结果表明,福建沿海居民因海产品中 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 所致的年待积有效剂量分别为 $0.0051 \mu\text{Sv/a}$ 和 $0.0062 \mu\text{Sv/a}$ 。联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)在 2000 年的报告书中指出,成年人受到自然辐射源的平均暴露量为 2.4 mSv ,本研究中福建沿海居民从海产品中摄入 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 所致的年待积有效剂量分别占全球自然辐射源平均暴露量的 0.00021% 和 0.00026% ,远低

于全球内照射所致的年待积有效剂量。

表3 从海产品中摄入放射性核素所致的年待积有效剂量
Tab.3 Committed effective dose to local residents due to intake of radionuclides

成年居民年食用量 /kg	成年公众单位摄入量所致的 年待积有效剂量/ $\times 10^{-8}$ $\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$		年待积有效剂 量/ $\mu\text{Sv}\cdot\text{a}^{-1}$	
	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs
11.44	2.8	1.3	0.0051	0.0062

2.4 建 议

(1) 加强对海洋生物体内 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 富集特征和规律的研究,例如,开展海洋生物不同组织中 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 比活度的对比研究以及海洋生物富集 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 的室内培养实验等,这将有助于深入了解 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 在不同海洋环境介质中的迁移转化行为,也有助于更加准确地评估公众因食用海产品所致的年待积有效剂量。

(2) 拓展监测范围至福岛核污染水中其他关键放射性核素,并加强对我国近海主要海产品中人工放射性核素的长期追踪监测工作,构建我国近海海产品放射性水平的动态数据库,从而为蓝色粮仓安全提供长效保障体系。

3 结 论

(1) 2024年从福建近海海域捕捞的海产品中 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 比活度分别为 $<0.004 \sim 0.155 \text{ Bq/kg}$ 和 $0.006 \sim 0.132 \text{ Bq/kg}$,远低于日本福岛核电站港口区和近岸海域海洋生物中 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 比活度。

(2) 对比发现,福建近海海域海产品可食部分比不可食部分中的 ^{137}Cs 比活度更高,不可食部分比可食部分中的 ^{90}Sr 比活度更高,表明 ^{137}Cs 倾向于富集在肌肉组织,而 ^{90}Sr 倾向于富集在骨骼等不可食组织。

(3) 食用福建近海海产品带来的辐射剂量很低,福建沿海居民因食用海产品而摄入 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs 所致的年待积有效剂量分别为 $0.0051 \mu\text{Sv/a}$ 和 $0.0062 \mu\text{Sv/a}$,远低于全球自然辐射源所致的年待积有效剂量(2.4 mSv/a)。

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]. (2024-09-20)[2024-09-20]. <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.
- [4] Froidevaux P, Bochud F, Haldimann M. Retention half times in the skeleton of plutonium and ^{90}Sr from above-ground nuclear tests: a retrospective study of the Swiss population[J]. *Chemosphere*, 2010, 80(5): 519-524.
- [5] Malek M A, Nakahara M, Nakamura R. Uptake, retention and organ/tissue distribution of ^{137}Cs by Japanese catfish (*Silurus asotus* Linnaeus)[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2004, 77(2): 191-204.
- [6] Buesseler K O, Jayne S R, Fisher N S, et al. Fukushima-derived radionuclides in the ocean and biota off Japan[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(16): 5984-5988.
- [7] Kumamoto Y, Aoyama M, Hamajima Y, et al. Southward spreading of the Fukushima-derived radiocesium across the Kuroshio Extension in the North Pacific[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4276.
- [8] 赵 昌, 乔方利, 王关锁, 等. 福岛核事故泄漏进入海洋的 ^{137}Cs 对中国近海影响的模拟与预测 [J]. 科学通报, 2014, 59(34): 3416-3423.
- [9] Zhang F L, Huang D K, Xu Y P, et al. Spatiotemporal variations in vertical profiles of Fukushima-derived ^{137}Cs in the Kuroshio-Oyashio confluence region from 2011 to 2018: Implications for local water mass dynamics and basin-scale circulations[J]. *Progress in Oceanography*, 2024, 228: 103321.
- [10] Wang F F, Men W, Yu T, et al. Intrusion of Fukushima-derived radiocesium into the East China sea and the Northeast South China Sea in 2011-2015[J]. *Chemosphere*, 2022, 294: 133546.
- [11] Liu Y, Li Y L, Min Y T, et al. Fukushima contaminated water risk factor: global implications[J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(7): 3703-3712.
- [12] Zhang F L, Wang J L, Liu D T, et al. Distribution of ^{137}Cs in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea: sources, budgets and environmental implications[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 672: 1004-1016.
- [13] Lin W H, Mo M T, Yu K F, et al. Establishing historical ^{90}Sr activity in seawater of the China seas from 1963 to 2018[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 176: 113476.

- [14] 张 颖. 2023 年我省海洋生产总值居全国第三 [EB/OL]. (2024-02-28)[2025-02-21]. https://www.fujian.gov.cn/zwgk/ztl/sxzygwxsxgzx/sdjj/hyjj/202402/t20240228_6406402.htm.
- [15] HJ 815—2016 水和生物样品灰中锶-90 的放射化学分析方法 [S].
- [16] GB/T 16145—2022 环境及生物样品中放射性核素的 γ 能谱分析方法 [S].
- [17] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation: UN-SC-AR 2008 report to the General Assembly with scientific annexes Volume I[R]. New York: United Nations, 2008.
- [18] GB 18871—2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准 [S].
- [19] Johansen M P, Ruedig E, Tagami K, et al. Radiological dose rates to marine fish from the Fukushima Daiichi accident: the first three years across the North Pacific[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(3): 1277-1285.
- [20] 郑 蓓, 李红岩, 杨 敏, 等. 中国海域内海产品总 α 、总 β 放射性活度调查与核素筛查 [J]. *环境科学学报*, 2025, 45(4): 251-258.
- [21] Wang P, Yu S F, Zou H, et al. Levels, sources, variations, and human health risk assessment of ^{90}Sr and ^{137}Cs in water and food around Sanmen Nuclear Power Plant (China) from 2011 to 2020[J]. *Frontiers in Public Health*, 2023, 11: 1136623.
- [22] 张 巍, 夏春冬, 张显鹏, 等. 石岛湾核电站周边食品放射性水平及所致居民剂量 [J]. *中国辐射卫生*, 2023, 32(3): 254-258.
- [23] Wada T, Fujita T, Nemoto Y, et al. Effects of the nuclear disaster on marine products in Fukushima: an update after five years[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, 164: 312-324.
- [24] Men W. Discharge of contaminated water from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident into the Northwest Pacific: What is known and what needs to be known[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 173: 112984.
- [25] Lee H, Kim I. Accumulations of artificial radionuclides ^{137}Cs and $^{239+240}\text{Pu}$ in anchovy from the Korean seas[J]. *Radioprotection*, 2021, 56(4): 319-326.
- [26] Piñero-García F, Thomas R, Mantero J, et al. Concentration of radionuclides in Swedish market basket and its radiological implications[J]. *Food Control*, 2022, 133: 108658.
- [27] Sun J, Men W, Wang F, et al. Activity levels of ^{210}Po , ^{210}Pb and other radionuclides (^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{238}U , ^{226}Ra and ^{40}K) in marine organisms from coastal waters adjacent to Fuqing and Ningde nuclear power plants (China) and radiation dose assessment[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 702124.
- [28] 付 斌, 吴春勇, 余 雯, 等. 霞浦核电基地海洋生物放射性本底水平及辐射剂量评价 [J]. *应用海洋学报*, 2022, 41(3): 454-461.
- [29] 林武辉, 张翊邦, 杜金秋, 等. 日本福岛来源 ^{134} , ^{137}Cs 在海洋多介质体系中演变特征解析——以福岛港口区为例 [J]. *原子能科学技术*, 2024, 58(10): 2022-2031.
- [30] IAEA. Marine monitoring: confidence building and data quality assurance[EB/OL]. (2024-05-20)[2025-02-21]. <https://www.iaea.org/about/organizational-structure/departments-of-nuclear-sciences-and-applications/division-of-iaea-marine-environment-laboratories/marine-monitoring-confidence-building-and-data-quality-assurance/reports>.
- [31] Xu Y, Men W, Yu Y, et al. Assessment of radiation in fishes derived from radiocesium in the port of Fukushima Daiichi nuclear power plant[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, 202: 116301.

(本文编辑: 曲丽梅)