

日本福岛核泄漏典型人工放射性核素 在北太平洋柔鱼渔场的分布

唐峰华^{1,2}, 王锦龙², 刘丹彤², 何利军², 杜金洲^{2*}

(1.农业部东海与远洋渔业资源开发利用重点实验室 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090; 2.河口海岸学国家重点实验室 华东师范大学, 上海 200062)

摘要: 为了解福岛核事故泄漏放射性核素对海洋环境的污染情况, 于 2011 年 8—11 月在北太平洋公海渔场采集柔鱼样品, 带回实验室利用超低本底 HPGe γ 谱仪进行分析。监测到福岛核事故释放并扩散至北太平洋公海海域的放射性核素有 ^{110}Ag 、 ^{134}Cs 和 ^{137}Cs , 其中 ^{110}Ag 在 3 种核素中含量百分比最高, 在 90% 以上, ^{134}Cs 只占 0~1.5%, ^{137}Cs 也仅为 0.2~1.3%。在所有站位中, ^{110}Ag 、 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs 3 种核素均在同一站位 (155.08°E, 42.17°N) 含量达最高, 分别为 101.31、32.63、32.63 Bq·kg⁻¹。另外, 对比了靠近日本西侧的日本海海域样品, 检测到的 ^{110}Ag 核素含量为 1.50 Bq·kg⁻¹、 ^{137}Cs 核素含量为 0.05 Bq·kg⁻¹, 但未检测出超出本底的 ^{134}Cs , 总体放射性核素含量比日本以东的公海海域明显要低, 暗示这次日本核泄漏对西部海域海洋生物的影响比较小。

关键词: 福岛核事故; 人工放射性核素; 柔鱼; 北太平洋海域

中图分类号: X771 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2013)10-2066-06 **doi:** 10.11654/jaes.2013.10.024

Distribution of Fukushima Accident-derived Radionuclides in Neon Flying Squid in the North Pacific Ocean

TANG Feng-hua^{1,2}, WANG Jing-long², LIU Dan-tong², HE Li-jun², DU Jin-zhou^{2*}

(1.Key Laboratory of East China Sea & Oceanic Fishery Resources Exploitation and Utilization, Ministry of Agriculture, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China; 2.State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: To examine contamination of radionuclides emitted from Fukushima nuclear accident on marine organisms, neon flying squid samples were collected from the high seas in the North Pacific Ocean between August and November in 2011. A HPGe γ spectrometer with ultra-low background was used to measure concentrations of three radionuclides (^{110}Ag , ^{134}Cs and ^{137}Cs). Of three radionuclides, ^{110}Ag was dominant with over 90%, while ^{134}Cs and ^{137}Cs were 0%~1.5% and 0.2%~1.3%, respectively. These nuclides had the highest concentrations (^{110}Ag , 101.31 Bq·kg⁻¹; ^{137}Cs , 32.63 Bq·kg⁻¹ and ^{134}Cs , 32.63 Bq·kg⁻¹) in the squids at the site (155.08°E, 42.17°N). On the contrary, the radionuclides in the squid from the Japan Sea close to the western Japanese main islands were much lower (^{110}Ag , 1.50 Bq·kg⁻¹; ^{137}Cs , 0.05 Bq·kg⁻¹ and ^{134}Cs , 0 Bq·kg⁻¹). These findings indicated that the Fukushima nuclear accident might have limited influences on marine organisms in the Sea of Japan.

Keywords: Fukushima nuclear accident; artificial radionuclide; neon flying squid (*Ommastrephes bartrami*); North Pacific Ocean

2011 年 3 月在日本发生的 9 级地震, 致使日本福岛核电站 (37°25'N、141°02'E) 发生爆炸, 造成放射

性物质泄漏, 冷却的污水排放问题至今是个难题, 并造成日本水产业受到重创。北太平洋海域的巴特柔鱼 (*Ommastrephes bartrami*), 俗称柔鱼或枪柔鱼, 是一种主要经济头足类, 其分布范围广阔, 渔场多分布于 145°E~165°W、35°N~45°N 的北太平洋海域的黑潮与亲潮交汇混合区以及混合水向东延伸的亚极海洋锋面混合区^[1-2]。我国于 1994 年对北太平洋海域的柔鱼资源开始大规模的商业性开发利用, 至 2001 年作业

收稿日期: 2013-03-21

基金项目: 河口海岸学国家重点实验室开放基金资助项目 (SKLEC201206); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目 (2012T07)

作者简介: 唐峰华 (1982—), 男, 浙江湖州人, 助理研究员, 主要研究方向为海洋生态学和渔业遥感研究。E-mail: f-h-tang@163.com

* 通信作者: 杜金洲 E-mail: jzdu@sklec.ecnu.edu.cn

渔场已到达 165°W 海域,渔获产量稳步上升,至 20 世纪末我国北太平洋柔鱼钓年均渔获量超过 11 万 t,占全国远洋业总产量的 12% 以上^[3]。目前,北太平洋公海鱿钓业已成为我国远洋渔业的重要组成部分。

海洋生物吸收放射性物质的问题一直倍受关注,不但从环境中吸收和积累放射性物质,成为放射性污染物质的携带者与传播者,通过洄游或漂流可以将污染物质带到非污染海区,而且通过食物链传递,放射性核素可能进一步在高营养级生物中富集^[4-5]。通过检测海洋生物体内放射性核素含量,进一步估算通过食物链的传递导致人类受到辐射的剂量,了解海洋生物对不同放射性核素的浓集能力和规律,对于估算生物辐射剂量率和保护生态系统健康具有重要意义^[6]。

国外学者 Buessler K O 等^[7]通过研究发现在日本海岸 30~600 km 的水体中以及浮游动物和鱼类中检测到了 ^{134}Cs 和 ^{137}Cs ,另外在浮游动物检测到放射性 ^{110}Ag ,显示核泄漏物以快速的水平流向北太平洋外海。Madigan D J 等^[8]对美国加利福尼亚州沿海捕获的蓝鳍金枪鱼在日本福岛核事故前后分别做了检测,确定其体内放射性 Cs 含量的增加来自日本福岛核事故泄露。在开发利用北太平洋柔鱼资源的同时,国内学者对柔鱼渔场的海洋环境特征进行过一系列跟踪调查及研究,但主要方向还是海表温度、叶绿素浓度、海面高度、海流等^[9-13],目前国内对日本福岛核泄漏关于海洋生物方面放射性核素的报道较少,本研究主要针对北太平洋公海渔场相关的主要渔业资源生物体内核素的含量与分布状况,弥补这方面的空白。

1 材料与方法

1.1 采样方法

1.1.1 采样时间

采样时间为 2011 年 8—11 月,样本为在北太平洋公海海域进行的渔业捕捞生产所得。将柔鱼样品进行标记,包括采样生物名、日期、经纬度、数量等。

1.1.2 采样站位

具体站位如图 1 所示,主要区域为北太平洋公海传统渔场,主要采样经纬度范围是 150°E~160°E、39°N~45°N,另外在日本海 134.73°E、39.85°N 的位置有一个站点,采样对象是柔鱼,同时对样品进行相关生物学体长、体重的测定。样品冷冻,带回实验室进行检测。

1.1.3 采样数量

每个站位测定的柔鱼样品数为 10~20 条,挑选其

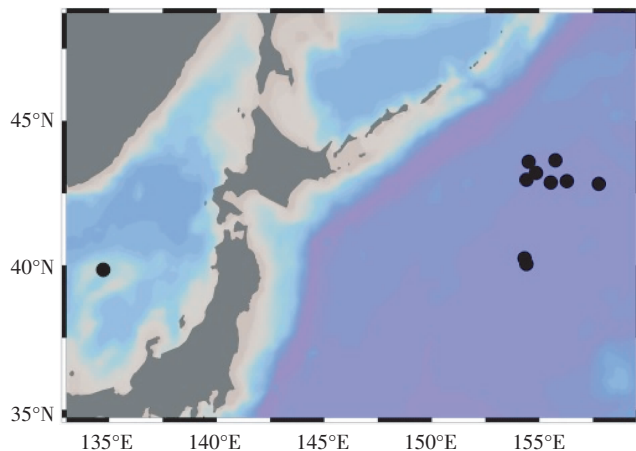


图 1 调查的站位分布

Figure 1 Distribution position of investigation

中部分样品对其组织解剖或分部位进行局部检测。

1.2 测量和处理方法

1.2.1 样品处理

将样品在 4 °C 下解冻,用蒸馏水洗净表面,除去空壳和破碎的个体,晾干后按照要求分类处理。首先将头足类内容物取出,并用去离子水反复冲洗,拭干水分后用不锈钢刀具将头部与腕部分离、剪碎。将处理好的各类样品称鲜重;置于烘箱内 105 °C 烘干,称干重;将干样放入不锈钢盘内加热炭化,加热过程中应防止发生燃烧,经常用铲子翻动,捣碎,到不再冒烟为止;将一定量炭化后的样品放入瓷坩埚中,置于马弗炉内灰化(灰化温度 ≤ 450 °C),直到残渣呈白色或灰白色为止,放入干燥器中,冷却、称重,计算灰鲜比,研磨后备用。

处理好的样品用 γ 能谱分析来测定,其是根据待测的核素或其衰变子体发射的 γ 射线的能量进行核素的定性分析,而由 γ 能谱中待测核素 γ 谱峰的高度(或面积)进行核素的定量分析^[14-15]。其中放射性核素的测量精度用 IAEA-414 标样^[16]作为标准参考物。

1.2.2 仪器与设备

样品处理设备:电动搅拌机 200~4000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$,抽滤装置(含布氏漏斗),可拆卸漏斗。

样品检测设备:美国 CANBERRA 公司生产的高纯锗(High Purity Germanium, HPGGe)无源效率刻度 γ 谱仪,仪器型号 BE3830。

1.2.3 数据处理

数据处理利用 Excel 和 Origin 7.0 (Origin 7.0, v7.0220; OriginLab Corp., Northampton, MA, USA); 利用软件 ArcView4.1 和 Ocean Data View 4.0 绘图。

2 结果与分析

2.1 柔鱼体内的核素含量

柔鱼的组织部位核素含量如图2所示。其中肝脏所含的 ^{110}Ag 核素含量最高,比活度为 $2.14\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$; ^{134}Cs 核素含量比活度为 $0.12\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$,但在肝脏中未检测出超出本底的 ^{137}Cs 。内脏中所含 ^{134}Cs 和 ^{137}Cs 核素含量都是最高,比活度分别为 0.28 、 $0.75\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$; ^{110}Ag 含量一般,比活度为 $0.55\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。柔鱼头部 ^{137}Cs 核素含量排第二,比活度为 $0.57\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$; ^{134}Cs 核素含量相对较低,比活度为 $0.17\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$;在该部位中未检测出超出本底的 ^{110}Ag 。鳍部中的 ^{134}Cs 和 ^{110}Ag 核素含量排第二,比活度分别为 0.20 、 $0.74\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$; ^{137}Cs 含量相对较低,比活度为 $0.40\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

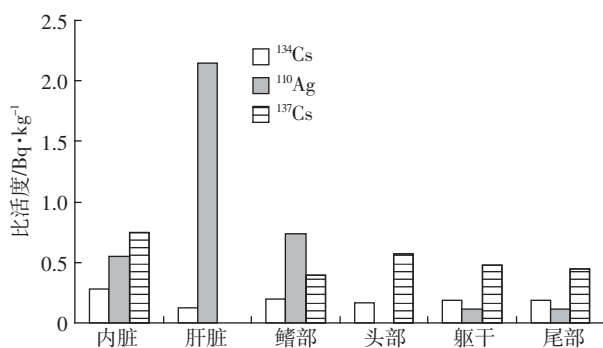


图2 柔鱼组织部位的核素含量

Figure 2 Nuclide content in tissue of neon flying squid

2.2 柔鱼随时间变化的核素分布

9—11月采集柔鱼共有5个日期,如图3所示,其中 ^{134}Cs 核素分布最高的是9月18日,其次是10月20日、11月12日、10月1日,而10月10日未检测出超出本底的核素含量。 ^{110}Ag 核素含量由高至低的日期依次是9月18日、10月10日、10月20日、11月12日、10月1日。 ^{137}Cs 核素含量由高至低的日期依次是10月20日、9月18日、11月12日、10月10日、10月1日。图3是随时间变化的核素分布情况。

从不同日期采样的柔鱼的核素含量百分比中可以看出(图4), ^{110}Ag 在3种核素中含量占绝对的百分比,在每个采样时间都为95%左右,而 ^{134}Cs 核素含量比重只占0~1.5%, ^{137}Cs 核素含量也仅为0.2%~1.3%。

2.3 不同胴长组的核素含量分布

不同个体柔鱼平均的核素含量分布规律如图5所示。将柔鱼体型的胴长组分为150~200 mm、200~250 mm、250~300 mm、300~350 mm、350~400 mm、>

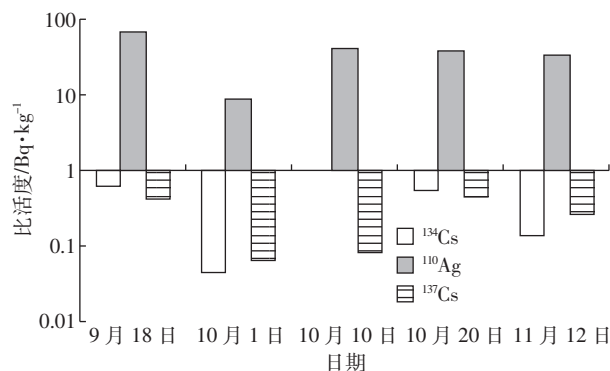


图3 随时间变化的核素分布

Figure 3 Nuclide distribution change over time

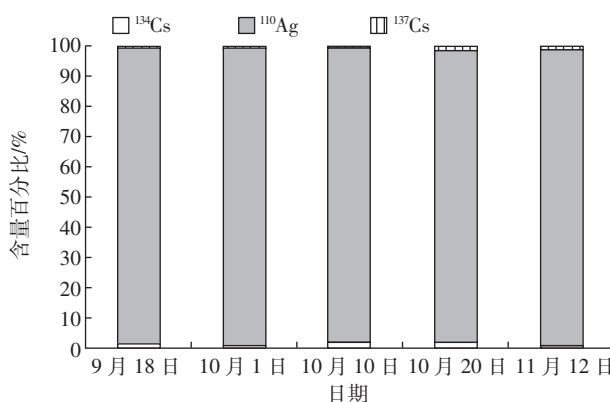


图4 随时间变化的柔鱼体内核素含量百分比

Figure 4 Percentage of nuclide concentration change over time

400 mm 6组,3种核素分布随胴长组的增加并没有呈现明显的线性规律。其中 ^{134}Cs 核素含量各胴长组分布比较均衡平稳,最高在200~250 mm的胴长组; ^{110}Ag 核素含量最高在>400 mm的胴长组,除了350~400 mm这组,其余基本呈上升趋势; ^{137}Cs 核素含量在250~300 mm的胴长组最高。

2.4 渔场站位的核素含量

各站位 ^{134}Cs 核素含量的分布情况如图6所示, ^{134}Cs 核素含量最高的站位是155.08°E、42.17°N,高达 $32.63\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$;其次是154.40°E、40.05°N和154.32°E、40.25°N,核素含量分别为4.93、1.48 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$;在两个站位未能检测出超出本底的 ^{134}Cs ,所有站位平均 ^{134}Cs 核素含量为 $2.80\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

各站位 ^{110}Ag 核素含量的分布情况如图7所示, ^{110}Ag 核素含量最高的站位是155.08°E、42.17°N,高达 $101.31\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$;其次是154.40°E、40.05°N和155.75°E、43.63°N,核素含量分别为73.15、65.03 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$;在156.08°E、42.16°N的站位上未能检测出超出本底的 ^{110}Ag ;所有站位平均 ^{110}Ag 核素含量为22.61

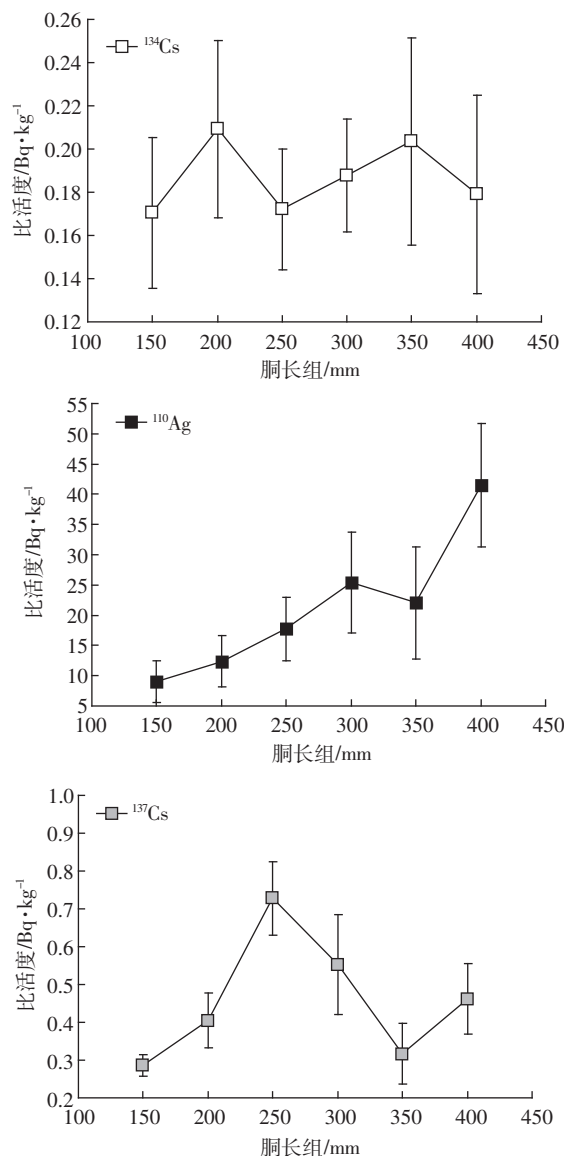


图5 不同个体体内的核素含量分布

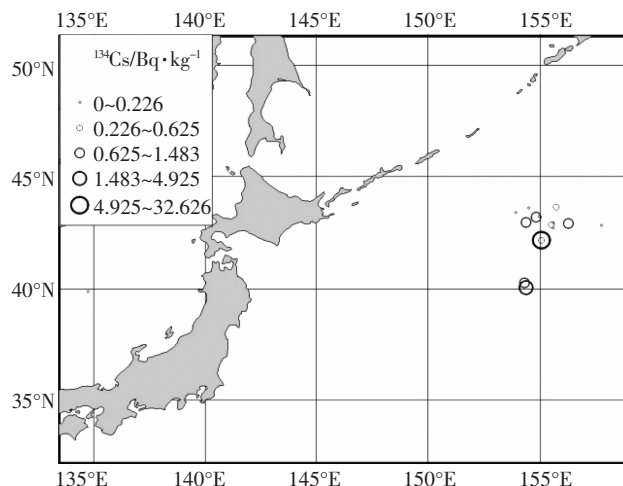
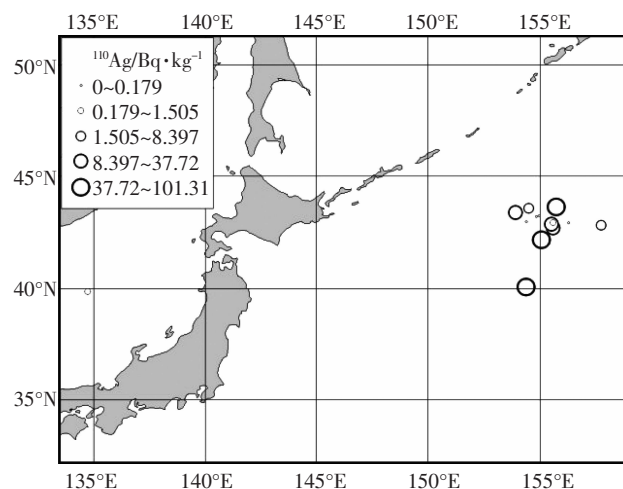
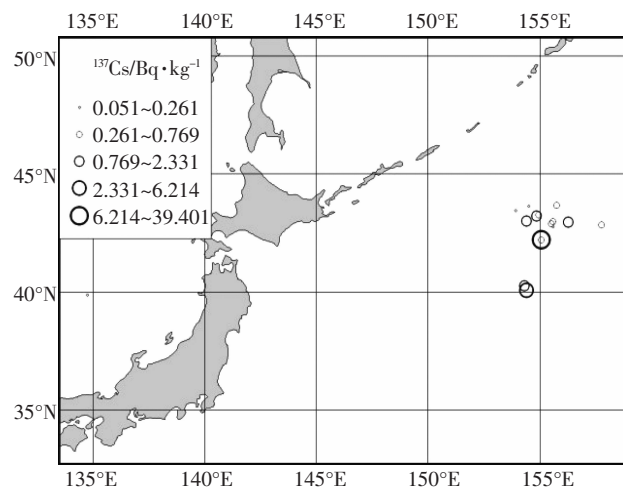
Figure 5 Nuclide concentration distribution of different individuals

$\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

各站位 ^{137}Cs 核素含量的分布情况如图 8 所示, ^{137}Cs 核素含量最高的站位也是 155.08°E 、 42.17°N , 高达 $32.63 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$; 其次是 154.40°E 、 40.05°N 和 154.85°E 、 43.20°N , 核素含量分别为 6.21 、 $2.33 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$; 在所有站位都能检测出超出本底的 ^{137}Cs , 其平均 ^{137}Cs 核素含量为 $3.60 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

3 讨论

本次研究中绝大部分的柔鱼样品检出了相关的典型人工放射性核素, 其中 86.67% 的站位样品中检出了正常情况下无法检出的 ^{134}Cs , 93.33% 的站位的 ^{110}Ag 含量超出我国海域本底值, 所有站位的 ^{137}Cs 含

图6 调查站位 ^{134}Cs 核素的分布Figure 6 Nuclide distribution of ^{134}Cs in survey stance图7 调查站位 ^{110}Ag 核素的分布Figure 7 Nuclide distribution of ^{110}Ag in survey stance图8 调查站位 ^{137}Cs 核素的分布Figure 8 Nuclide distribution of ^{137}Cs in survey stance

量超过我国海域本底范围,样品中3种典型核素 ^{134}Cs 、 ^{110}Ag 、 ^{137}Cs 的平均含量分别为0.23、29.93、0.22 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。福岛核事故核泄漏之后,我国海洋局于福岛以东及东南方向西太平洋海域进行相关的采样监测工作,分别于2011年7月和8月公布了西太平洋海洋环境放射性监测对巴特柔鱼检测结果,显示 ^{90}Sr 的放射性比活度为我国沿海生物样品放射性本底平均值的29倍,还测出生物样品中正常情况下难以检出的 ^{110}Ag 、 ^{134}Cs 和 ^{137}Cs 。本次研究对北太平洋柔鱼核素类型检测结果与此基本一致,几种核素都是日本福岛核泄漏释放的污染物质,而且 ^{134}Cs 、 ^{110}Ag 、 ^{137}Cs 3种典型核素含量最高位置都是 155.08°E 、 42.17°N 的同一站位,初步分析这与寒暖流(黑潮、亲潮)在该位置海域交汇比较明显,此消彼长的过程使海水中的放射性核素在该区域停留比较久。

国内同时期关于放射性监测工作也有所报道。如向元益等^[17]关于福岛核事故期间浙江地区生物样品放射性水平监测中显示2011年4—6月舟山的牡蛎样品中 ^{134}Cs 含量为 $<0.07 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ^{137}Cs 含量为 $<0.09 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$;杭州的鱼样品中 ^{134}Cs 含量为 $<0.09 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 ^{137}Cs 含量为 $<0.08 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。杨名生等^[18]开展的监测工作了解到福岛核事故期间广西地区土壤中 ^{137}Cs 的活度浓度范围值为 $0.38\sim 7.00 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤中其他人工放射性核素活度浓度均低于该核素分析方法的探测限。相比于国内样品的检测值,本次关于北太平洋柔鱼样品的核素平均含量明显要偏高, ^{134}Cs 和 ^{137}Cs 含量达到了 $0.1 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的数量级,而 ^{110}Ag 含量则高达 $10 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的数量级,但核素含量水平均未超过我国食品中放射性核素含量的限制浓度($300 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)与通用水平($1000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)的标准线^[19]。

国外关于日本福岛核泄露的污染状况也有所报道。Kim C K等^[20]研究发现了在朝鲜半岛的干湿沉积物样品中有来自日本福岛核事故泄露的放射性核素I和Cs,而在其淡水与海洋生物中未发现大量放射性核素的增加情况。Buesseler K O^[21]在Science期刊上发表的报告表示福岛核事故核泄露附近海域中底层鱼类核素含量明显比中上层鱼类以及远洋鱼类高很多,尤其是放射性Cs核素。Madigan D J等^[8]的研究说明类似金枪鱼高度洄游的海洋生物携带放射性化合物穿越太平洋的速度要比风或水更快。本次研究,检测样品主要针对日本福岛核电站东面海洋联通的北太平洋公海海域柔鱼样品的典型人工放射性核素含量,对福岛核泄漏事故的后续性影响具有补充意义,同时

对我国进行北太平洋远洋鱿钓渔业生产起一定的指导作用。

海洋放射性监测工作一直受到采样、制样和测量技术等限制^[22]。各种放射性核素由环境进入生物体循环、及经食物链进入人体的剂量受多方面因素的影响,例如放射性核素的物理化学状态,地质水文与气象条件、生物体内的代谢情况以及人们的饮食习惯等;对那些从不同的路径进入人体后的放射性核素,因物理、化学特性不同,吸收、蓄积与排出的特点也会不同^[23]。因此,对围绕柔鱼捕食和被捕食相关的食物链生物以及北太平洋公海海域水体、沉积物等进行采样及其放射性检测是我们后期的主要工作。

4 结论

(1)大部分的柔鱼样品检测出了相关的典型人工放射性核素,其中86.67%站位样品中检出了正常情况下无法检出的 ^{134}Cs ,93.33%站位的 ^{110}Ag 含量超出我国海域本底值,所有站位的 ^{137}Cs 含量超过我国海域本底范围,样品中3种典型核素 ^{134}Cs 、 ^{110}Ag 、 ^{137}Cs 的平均含量分别是0.23、29.93、0.22 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

(2) ^{134}Cs 、 ^{110}Ag 、 ^{137}Cs 核素含量最高位置都是 155.08°E 、 42.17°N 的同一站位,分别高达32.63、101.31、32.63 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。日本的西部日本海海域样品中检测到 ^{110}Ag 核素含量为 $1.50 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, ^{137}Cs 核素含量为 $0.05 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$,但未检测出超出本底的 ^{134}Cs ,总体放射性核素含量远低于日本东部公海海域。

参考文献:

- [1] 王尧耕,陈新军.世界大洋性经济柔鱼类资源及其渔业[M].北京:海洋出版社,2004:1-95.
WANG Yao-geng, CHEN Xin-jun. World ocean economic soft fish resources and fisheries[M]. Beijing: Ocean Press, 2004: 1-95.
- [2] 董正之.世界大洋经济头足类生物学[M].济南:山东科学技术出版社,1991:82-88.
DONG Zheng-zhi. Biology of the economic species of cephalopods in the world oceans[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1991: 82-88.
- [3] 陈思行.世界头足类渔业现状及我国发展远洋头足类渔业的探讨[J].远洋渔业,1995,31(3):4-8.
CHEN Si-xing. World cephalopod fishery development in China, and ocean cephalopod fishery discussion[J]. Journal of Pelagic Fishery, 1995, 31(3): 4-8.
- [4] 蔡福龙.放射性污染与海洋生物[M].北京:海洋出版社,1983:94-113.
CAI Fu-long. Radioactive pollution and marine organism[M]. Beijing: Ocean Press, 1983: 94-113.

- [5] 蔡福龙, 陈 英, 许丕安, 等. 放射性核素在海水、底质及海洋生物间的转移: I 核素进入海水后的初始状态[J]. 环境科学学报, 1985, 5(2): 195–200.
CAI Fu-long, CHEN Ying, XU Pi-an, et al. Radionuclide in water, sediment and Marine biological transfer between: I species into the water after the initial state[J]. *Journal of Environmental Science*, 1985, 5(2): 195–200.
- [6] 邹淑美. 海洋鱼类中人工放射性核素[J]. 海洋环境科学, 1984, 3(1): 66–77.
ZOU Shu-mei. Artificial radionuclide of marine fish[J]. *Journal of Marine Environmental Science*, 1984, 3(1): 66–77.
- [7] 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*, 2012, 109: 5984–5988.
- [8] Madigan D J, Baumann Z, Fisher N S. Pacific bluefin tuna transport Fukushima-derived radionuclides from Japan to California[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109: 9483–9486.
- [9] 邵全琴, 马巍巍, 陈卓奇, 等. 西北太平洋黑潮路径变化与柔鱼 CPUE 的关系研究[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(2): 111–122.
SHAO Quan-qin, MA Wei-wei, CHEN Zhuo-qi, et al. Relationship between Kuroshio meander pattern and *Ommastrephes Bartrami* CPUE in Northwest Pacific Ocean[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2005, 36(2): 111–122.
- [10] 陈新军, 田思泉. 西北太平洋海域柔鱼的产量分布及作业渔场与表温的关系研究[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(1): 101–107.
CHEN Xin-jun, TIAN Si-quan. Study on the catch distribution and relationship between fishing ground and surface temperature for *Ommastrephes Bartrami* in the Northwestern Pacific Ocean[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2005, 35(1): 101–107.
- [11] 樊 伟, 崔雪森, 沈新强. 西北太平洋巴特柔鱼渔场与环境因子关系研究[J]. 高技术通讯, 2004, 10: 84–89.
FAN Wei, CUI Xue-sen, SHEN Xin-qiang. Study on the relationship between the neon flying squid, *Ommastrephes bartrami*, and ocean environment in the Northwest Pacific Ocean[J]. *High Technology Communication*, 2004, 10, 84–89.
- [12] 沈新强, 王云龙, 袁 骐, 等. 北太平洋鱿鱼渔场叶绿素 a 分布特点及其与渔场的关系[J]. 海洋学报, 2004, 26(6): 118–123.
SHEN Xin-qiang, WANG Yun-long, YUAN Qi, et al. Distributional characteristics of chlorophyll a and relation to the fishing ground in the squid fishing ground of the Northern Pacific Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26(6): 118–123.
- [13] 唐峰华, 崔雪森, 樊 伟, 等. 北太平洋柔鱼渔获量与海洋环境关系的遥感学研究[J]. 海洋技术, 2011, 18(2): 78–81.
TANG Feng-hua, CUI Xue-sen, FAN Wei, et al. Study on relationship of neon flying squid yield in North Pacific Ocean with marine environment by remote sensing[J]. *Marine Technology*, 2011, 18(2): 78–81.
- [14] 彭 崇, 赖晓洁, 陈 晶. 用高纯锗(HPGe)γ谱仪测量天然放射性核素活度[J]. 大众科技, 2008, 10: 99–101.
PENG Chong, LAI Xiao-jie, CHEN Jing. High purity germanium (HPGe) gamma spectrometer was used to measure natural radioactive nuclide activity[J]. *The Public Science and Technology*, 2008, 10: 99–101.
- [15] 中华人民共和国国家标准. GB/T 16145 水中放射性核素的 γ 能谱分析方法[S]. 1995.
National standard of the People's Republic of China. GB/T 16145 Water radionuclide gamma energy spectrum analysis method[S]. 1995.
- [16] International Atomic Energy Agency(IAEA). Certified reference material for radionuclides in fish flesh sample IAEA-414 (mixed fish from the Irish Sea and North Sea) [J]. *Appl Radiat Isot*, 2006, 64: 1253–1259.
- [17] 向元益, 羊 佳, 胡 飞, 等. 福岛核事故期间浙江地区生物样品放射性水平监测[J]. 辐射防护通讯, 2012, 32(2): 47–51.
XIANG Yuan-yi, YANG Jia, HU Fei, et al. Radioactivity monitoring in biological samples during the events of Nuclear Leakage in Japan[J]. *Radiation Protection Bulletin*, 2012, 32(2): 47–51.
- [18] 杨名生, 杨 远, 廖燕庆, 等. 福岛核事故期间广西地区辐射环境应急监测[J]. 辐射防护通讯, 2012, 32(2): 20–23.
YANG Ming-sheng, YANG Yuan, LIAO Yan-qing, et al. Emergency monitoring of environmental radiation in Guangxi in the wake of nuclear accident at Fukushima in Japan[J]. *Radiation Protection Bulletin*, 2012, 32(2): 20–23.
- [19] 武 权, 刘庆芬, 张晓东, 等. 我国食品中放射性核素含量与限制标准[J]. 癌变·畸变·突变, 2012, 24(6): 470–473.
WU Quan, LIU Qing-feng, ZHANG Xiao-dong, et al. The radionuclide content and limit standard in the food in our country[J]. *Carcinogenesis, Teratogenesis & Mutagenesis*, 2012, 24(6): 470–473.
- [20] Kim C K, Byun J I, Chae J C, et al. Radiological impact in Korea following the Fukushima nuclear accident[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2012, 111: 70–82.
- [21] Buesseler K O. Fishing for answers off Fukushima[J]. *Science*, 2012, 338: 480–482.
- [22] 刘广山. 海洋放射性监测技术: 现在与未来 [J]. 核化学和放射化学, 2012, 34(2): 65–73.
LIU Guang-shan. Marine radioactivity monitoring technology: Present and future[J]. *Journal of Nuclear and Radiochemistry*, 2012, 34(2): 65–73.
- [23] 史建君. 放射性核素对生态环境的影响[J]. 核农学报, 2011, 25(2): 397–403.
SHI Jian-jun. Nuclear accident impact on the ecological environment [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2011, 25(2): 397–403.