

霞浦核电基地海洋生物放射性本底水平 及辐射剂量评价

付 斌¹, 吴春勇¹, 余 雯^{2,4*}, 何建华^{3,4}

(1. 中国核电工程有限公司, 北京 100840;

2. 北京师范大学国家安全与应急管理学院, 广东 珠海 519087;

3. 四川大学华西医院, 四川 成都 610041; 4. 自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

摘要:为掌握霞浦核电基地海洋生物的放射性本底水平,在其周边 50 km 范围内采集 5 类 9 种海洋生物样品,测量其中的天然放射性核素²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra、⁴⁰K,以及人工放射性核素¹³⁷Cs、¹³⁴Cs、⁹⁰Sr、⁵⁸Co、⁶⁰Co、⁵⁴Mn、^{110m}Ag、⁶⁵Zn 的活度浓度并进行辐射剂量评价。结果显示,所有样品中¹³⁴Cs、⁵⁸Co、⁶⁰Co、⁵⁴Mn、^{110m}Ag、⁶⁵Zn 的活度浓度均低于最小可探测活度浓度,²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra、⁴⁰K、¹³⁷Cs 和⁹⁰Sr 的平均活度浓度分别为(0.48±0.48)、(0.86±1.20)、(0.27±0.34)、(74.3±43.0)、(0.023±0.019)、(0.242±0.167) Bq/kg,处于我国食品天然放射性本底水平内。当地公众由于食入海产品所致年有效剂量为 55.1 μSv/a,其中¹³⁷Cs、⁹⁰Sr 所致剂量分别为 0.021、0.49 μSv/a;海洋生物所受辐射剂量为 0.048~0.276 μSv/h。当地公众及海洋生物所受辐射剂量均远低于国家标准限值或国际推荐控制值。本次调查为霞浦核电站运行前海洋生物放射性本底建立了基线数据,并提出了今后海洋生物监测的重点核素,除¹³⁷Cs、¹³⁴Cs、⁹⁰Sr、⁵⁸Co、⁶⁰Co、⁵⁴Mn、^{110m}Ag、⁶⁵Zn,还应增加对³H、¹⁴C、¹³¹I 的监测。

关键词:海洋化学;海产品;放射性本底;辐射剂量评价;霞浦核电基地

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2022.03.010

中图分类号:P734

文献标识码:A

文章编号:2095-4972(2022)03-0454-08

核电是一种清洁高效的非化石能源,在提升我国综合经济实力、优化能源结构、推进节能减排中正发挥越来越重要的作用。福建地处我国东南沿海,传统能源资源匮乏,近年来随着经济的发展对能源的需求快速上升,大力发展核能势在必行。截至 2020 年 8 月,福建省已建有宁德、福清、霞浦、漳州等 4 个核电基地。霞浦核电基地位于福建省宁德市霞浦县长春镇长门村长表岛,基地内规划建设 6 台核电机组,目前 1 台机组在建,未有机组投入商业运行。基地邻近海域的海产品养殖场主要分布在海域保留区及其附近,养殖种类主要以大黄鱼(*Larimichthys crocea*)、牡蛎、弹涂鱼(*Periophthalmus cantonensis*)为主。

公开发表的霞浦海域放射性本底数据并不多,且主要针对海水介质进行调查,亦有极少数的沉积

物放射性数据,暂未见有海洋生物放射性本底数据。上世纪 80 年代开展的全国环境天然放射性水平调查^[1]得到福建—台湾海峡海区海水中总 U:1.87~2.50 μg/L,均值 2.20 μg/L;Th:0.04~0.41 μg/L,均值 0.23 μg/L;²²⁶Ra:1.60~10.80 mBq/L,均值 3.78 mBq/L;⁴⁰K:10 600~14 000 mBq/L,均值 12 150 mBq/L。邹诺舟等(2015)报道福建近岸海域海水中¹³⁷Cs 活度浓度为 1.33~1.89 mBq/L^[2]。邓芳芳等(2015)报道宁德核电站附近的海洋沉积物样品⁹⁰Sr 活度浓度范围为 0.21~0.89 Bq/kg(干重),均值为 0.47±0.03 Bq/kg(干重)^[3]。

为掌握霞浦核电基地邻近海域海洋生物放射性本底水平及其对当地公众和海洋生物的所致辐射剂量,于 2020 年在研究海域采集了 5 类 9 种海洋生物

收稿日期:2020-12-03

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(12105378);北京师范大学珠海校区引进人才科研启动项目资助项目;中国辐射防护研究院自主科研项目开放基金资助项目

作者简介:付斌(1981—),男,高级工程师;E-mail: 13910049130@163.com

* 通讯作者:余雯(1982—),女,博士,研究员;E-mail: yuw@bnu.edu.cn

样品,对样品中天然放射性核素 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 以及人工放射性核素 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^{58}Co 、 ^{60}Co 、 ^{54}Mn 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 和 ^{65}Zn 的活度浓度进行分析检测,并对当地公众由于摄入海产品所致辐射剂量和海洋生物所受辐射剂量进行了评价。

1 材料与方法

1.1 样品采集

依据《核动力厂运行前辐射环境本底调查技术规范》^[4]、《辐射环境监测技术规范》^[5]和《环境辐射监测中生物采样的基本规定》^[6],本研究于2020年4月27日—30日,在霞浦核电基地周边50 km范围内,考虑当地居民膳食习惯及海洋生物代表性,采集藻类[海带(*Laminaria japonica*)、石莼(*Ulva lactuca*)]、贝类[海蛎(*Ostrea gigas*)、福建牡蛎(*Crassostrea angulata*)]、甲壳类[远海梭子蟹(*Portunus pelagicus*)、日本猛虾蛄(*Harpiosquilla japonica*)]、鱼类[大黄鱼(*Larimichthys crocea*)、钟馗虾虎鱼(*Tridentiger barbatus*)]、头足类[金乌贼(*Sepia esculenta*)]共5类9种样品。

1.2 样品预处理

大黄鱼样品去头和内脏,贝类样品去壳,其他样品取全体,称鲜重,放入搪瓷盘,置于烘箱中,于80℃烘干,称干重。烘干的生物样品加热炭化,炭化样品于450℃下用马弗炉灰化,过筛(80目),称重。

1.3 样品测量与分析

按照《生物样品中放射性核素的 γ 能谱分析方法》^[7]、《海洋环境放射性核素监测技术规程》^[8],本研究采取以下具体方法进行样品制备和检测:

γ 核素测量:取灰样100 g,装入与刻度谱仪的体标准源相同形状和体积的样品盒(直径75 mm,高75 mm)中,密封,放置3~4周后测量。本底和样品检测时间均为24 h。

^{90}Sr 分析:取海洋生物样品灰约10 g,用HDE-HP萃取- β 计数法进行分析^[8]。

1.4 设备

使用美国CANBERRA公司的BE6530型高纯锗 γ 谱仪和美国ORTEC公司的MPC9064型 α/β 计数器检测,设备均检定合格并在有效期内。

1.5 剂量评价

依据《食品中放射性物质限制浓度标准》^[9]和《放射性核素摄入量及内照射剂量估算规范》^[10]对公众摄入海产品所致有效剂量进行评价,用ERICA程序对海洋生物辐射剂量进行评价。

1.6 质量控制

采用可溯源的标准源进行能量刻度和效率刻度,并定期核查是否出现偏移。测量设备定期接受检定,严格把控实验室各项物理条件,保证设备的稳定性。实验人员每年参加培训学习,并定期参加国际原子能机构组织的核素分析比对。

2 结果与讨论

2.1 海洋生物样品中放射性核素活度浓度

全部样品中人工放射性核素 ^{134}Cs 、 ^{58}Co 、 ^{60}Co 、 ^{54}Mn 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{65}Zn 的活度浓度均低于最小可探测活度浓度,其他核素 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 、 ^{137}Cs 和 ^{90}Sr 的活度浓度检测结果见表1。由表1可见,9个样品中天然放射性核素 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 的活度浓度范围分别为0.10~1.66、0.06~3.42、0.05~0.93、13.8~155.5 Bq/kg(鲜重),由低到高依次为 ^{226}Ra 、 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 。 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 的活度浓度在甲壳类样品中相对较高,在其他几类样品中相差不大; ^{40}K 的活度浓度在藻类和头足类样品中相对较高,在其他几类样品中相差不大。除了大黄鱼中未检出 ^{137}Cs 外,其余样品中均检出人工放射性核素 ^{137}Cs 和 ^{90}Sr 。检出 ^{137}Cs 和 ^{90}Sr 的样品中,两种核素的活度浓度范围分别为0.003~0.052和0.047~0.557 Bq/kg(鲜重)。 ^{137}Cs 的活度浓度在各类样品中相差不大,在甲壳类和头足类中相对较高,在藻类中相对较低; ^{90}Sr 的活度浓度在贝类中相对较高,在鱼类和头足类中相对较低。

表1 2020年霞浦核电基地邻近海域海洋生物放射性核素活度浓度检测结果

Tab. 1 Activity concentrations of radionuclides in marine organisms in waters nearby Xiapu Nuclear Power Plant (XNPP) in 2020

类别	种名	活度浓度/(Bq·kg ⁻¹)(鲜重)					
		^{238}U	^{232}Th	^{226}Ra	^{40}K	^{137}Cs	^{90}Sr
鱼类	大黄鱼 (<i>Larimichthys crocea</i>)	0.49±0.13	0.57±0.09	0.22±0.03	13.8±1.4	<0.025	0.059±0.008
	钟馗虾虎鱼 (<i>Tridentiger barbatus</i>)	0.13±0.11	0.27±0.05	0.08±0.02	71.3±5.0	0.003±0.001	0.098±0.005

续表

类别	种名	活度浓度/(Bq · kg ⁻¹) (鲜重)					
		²³⁸ U	²³² Th	²²⁶ Ra	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
甲壳类	远海梭子蟹 (<i>Portunus pelagicus</i>)	1.66±0.44	3.42±0.56	0.93±0.15	64.0±4.5	0.045±0.006	0.389±0.019
	日本猛虾蛄 (<i>Harpisquilla japonica</i>)	0.24±0.15	2.38±0.40	0.79±0.12	66.4±4.6	0.019±0.003	0.260±0.020
头足类	金乌贼 (<i>Sepia esculenta</i>)	0.15±0.04	0.14±0.02	0.07±0.01	102.5±7.2	0.052±0.005	0.047±0.009
贝类	海蛎 (<i>Ostrea gigas</i>)	0.50±0.10	0.19±0.03	0.08±0.02	33.5±3.0	0.007±0.001	0.220±0.010
	福建牡蛎 (<i>Crassostrea angulata</i>)	0.58±0.11	0.43±0.06	0.11±0.02	50.8±3.6	0.040±0.005	0.560±0.010
藻类	海带 (<i>Laminaria japonica</i>)	0.51±0.11	0.06±0.01	0.05±0.01	111.0±7.8	0.016±0.002	0.220±0.020
	石莼 (<i>Ulva lactuca</i>)	0.10±0.09	0.28±0.04	0.12±0.02	155.5±10.9	0.008±0.001	0.330±0.030
范围		0.10~1.66	0.06~3.42	0.05~0.93	13.8~155.5	0.003~0.052	0.047~0.560
平均值		0.48±0.48	0.86±1.20	0.27±0.34	74.3±43.0	0.023±0.019	0.242±0.167

2.2 公众食用海产品摄入放射性核素及其所致辐射剂量

参考《中国居民膳食指南(2016)》^[11]并结合当地公众饮食习惯,普通成年公众海产品按人均日摄入量 200 g 计算,即年摄入量为 73 kg,则²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra、⁴⁰K、¹³⁷Cs 和⁹⁰Sr 的年摄入量分别为 35.4、62.8、19.8、5 425、1.64、17.7 Bq,⁴⁰K 的年摄入量最高,¹³⁷Cs 的年摄入量最低。

按照《放射性核素摄入量及内照射剂量估算规范》^[10]提供的估算方法:

$$E = I \times \sum_i (C_i \cdot P_i) \quad (1)$$

式(1)中: E 为摄入海产品所致的年有效剂量($\mu\text{Sv/a}$); I 为海产品年摄入量(kg); C_i 为海产品中

某种核素的活度浓度[Bq/kg(鲜重)]; P_i 为相应核素的剂量系数($\mu\text{Sv/Bq}$),本研究估算了霞浦核电基地周围公众通过食入海产品所获得的内照射剂量,结果列于表 2 中。可见当地公众食用海产品所致年有效剂量为 55.1 $\mu\text{Sv/a}$,远低于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》^[12]中规定的公众年剂量限值 1 mSv/a。总辐射剂量中,⁴⁰K 的贡献最大,占 61.07%,¹³⁷Cs 的贡献最小,占 0.04%。天然放射性核素(²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra 和⁴⁰K)的贡献总和占 99.06%,人工放射性核素(¹³⁷Cs 和⁹⁰Sr)的贡献仅分别为 0.021 $\mu\text{Sv/a}$ 和 0.49 $\mu\text{Sv/a}$,两项之和占总剂量不足 1%,可见,有效剂量主要来源于天然放射性核素。

表 2 霞浦核电基地周边公众海产品中放射性核素年摄入量及所致年有效剂量估算结果

Tab. 2 Annual ingestion of radionuclides and relevant effective dose for public around XNPP due to seafood consumption

项目	²³⁸ U	²³² Th	²²⁶ Ra	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	合计
放射性核素年摄入量/(Bq · a ⁻¹)	35.4	62.8	19.8	5 425	1.64	17.7	5 562
摄入放射性核素所致年有效剂量/ ($\mu\text{Sv} \cdot \text{a}^{-1}$)	1.56	13.8	5.55	33.6	0.021	0.49	55.1
摄入单一放射性核素所致年有效剂量占 年总有效剂量的比例/%	2.83	25.08	10.08	61.07	0.04	0.90	100.00

2.3 海洋生物辐射剂量

环境电离辐射污染危险评估:评价和管理(environmental risk from ionising contaminants: assessment and management, ERICA)是欧盟推荐的用于评估水生生物和陆生生物辐射剂量的方法,采用了国际放射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)对参考生物选取的建议,将生物栖息地分为陆地、淡水、海洋3类生态系统,并包括3种筛选评价模式^[13],本研究使用ERICA 1.2版本,选用二级筛选评价模式对海洋生物辐射剂量进行估算。

本研究涉及鱼类、甲壳类、头足类、贝类和藻类共5类海洋生物,其中鱼类在ERICA程序中进一步分为上层鱼类和底栖鱼类,大黄鱼和钟馗虾虎鱼分属这两类,其他样品分类与表1一致。由于头足类在ERICA程序中并无内置的几何模型,本研究用调查获取的样品的平均个体尺寸(9.0 cm×3.5 cm×3.5 cm)建立评价所需的生物体椭球模型,其空间居留因子设为“水=1.0,其他=0.0”。

评价过程中,需要提供放射性核素在海水、沉积物及生物体内等环境介质中的活度浓度。对海水和沉积物中的核素活度浓度,本次调查同期获得了霞浦核电基地邻近海域海水中²³⁸U、²²⁶Ra、⁴⁰K及沉积物中²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra和⁴⁰K的活度浓度,海水中²³²Th的活度浓度取钱庭荣(1986)在福建海域调查结

果^[14],以此作为环境介质核素活度浓度输入值(表3)。对生物体内的放射性核素活度浓度,取本次调查中获取的同一种类样品中该核素的活度浓度平均值作为输入值,由于大黄鱼的¹³⁷Cs活度浓度低于检测限[0.025 Bq/kg(鲜重)],取其1/2值作为输入值。利用本研究实测数据计算得到的放射性核素生物浓集系数(concentration factor, CF)列于表4中。

基于上述设定及输入参数,ERICA程序计算得到放射性核素对海洋生物的照射途径及辐射剂量如表5所示。可见,甲壳类、上层鱼类和头足类生物所受辐射剂量主要来源于内照射,其他类型生物所受外照射辐射剂量和内照射辐射剂量相差不大。甲壳类所受总辐射剂量最高,为0.276 μGy/h,头足类所受总辐射剂量最低,为0.048 μGy/h。各类生物所受总辐射剂量都远低于ERICA评价方法推荐的保护生物的辐射剂量率控制值10 μGy/h^[13],风险商(实际剂量率与辐射剂量率控制值的商)在10⁻³~10⁻²数量级。由表6可知,对甲壳类和上层鱼类,²²⁶Ra的辐射剂量贡献最大,达到约50%,对底栖鱼类、藻类、贝类和头足类,⁴⁰K的辐射剂量贡献最大,达到约60%;对本研究涉及的所有生物种类,来自天然放射性核素(²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra和⁴⁰K)的辐射剂量贡献均超过99%,来自人工放射性核素(¹³⁷Cs和⁹⁰Sr)的辐射剂量贡献均不足1%。

表3 霞浦核电基地表层海水及沉积物中放射性核素活度浓度平均值及分配系数

Tab. 3 Average activity concentration of radionuclides in surface seawater and sediments with K_d values nearby XNPP

项目	²³⁸ U	²³² Th	²²⁶ Ra	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
活度浓度(海水)/(Bq·m ⁻³)	30.4	1.34 ^[14]	3.10	11 400	1.32	1.02
活度浓度(沉积物)/(Bq·kg ⁻¹)	55.1	58.3	29.0	670	1.70	0.69
分配系数/(L·kg ⁻¹)	1 813	43 507	9 355	59	1 288	676

表4 霞浦核电基地海域放射性核素生物浓集系数

Tab. 4 Concentration factors of radionuclides in marine biota nearby XNPP

项目	生物浓集系数/(L·kg ⁻¹)					
	²³⁸ U	²³² Th	²²⁶ Ra	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
上层鱼类	16.1	425	71.0	1.21	84.0*	57.4
底栖鱼类	4.28	201	25.8	6.25	2.27	96.5
大型藻类	10.0	127	25.8	11.70	9.09	270
甲壳类	31.3	2 164	277.0	5.72	24.2	317
双壳贝类	17.8	231	30.6	3.70	17.8	381
头足类	4.9	104	22.6	8.99	39.4	46

注:“*”表示由于上层鱼类(大黄鱼)样品中¹³⁷Cs活度浓度低于检测限[0.025 Bq/kg(鲜重)],此生物浓集系数值来自文献^[15],生物浓集系数按鲜重计算。

表 5 霞浦核电基地邻近海域海洋生物照射途径、辐射剂量及风险商

Tab. 5 Exposure pathway and radiological dose for marine organisms and the risk quotient nearby XNPP

项目	底栖鱼类	甲壳类	藻类	贝类	上层鱼类	头足类
外照射剂量率/($\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)	0.047	0.044	0.068	0.053	0.001	0.001
内照射剂量率/($\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)	0.041	0.233	0.054	0.045	0.058	0.046
总剂量率/($\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$)	0.088	0.276	0.122	0.098	0.060	0.048
风险商	0.009	0.028	0.012	0.010	0.006	0.005

表 6 各核素对海洋生物产生辐射剂量份额

Tab. 6 Percentage of radiological dose contributions from important radionuclides

类别	占比/%					
	^{238}U	^{232}Th	^{226}Ra	^{40}K	^{137}Cs	^{90}Sr
底栖鱼类	4	7	28	61	0.3	0.1
甲壳类	8	24	49	18	0.1	0.1
藻类	6	3	22	68	0.2	0.2
贝类	13	7	28	51	0.3	0.3
上层鱼类	20	22	49	9	0.004	0.1
头足类	8	7	20	65	0.02	0.1

2.4 讨论

2.4.1 海洋生物中放射性核素活度浓度水平 研究区域海洋生物中天然放射性核素水平由低至高依次为 ^{226}Ra 、 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K ，人工放射性核素除 ^{137}Cs 和 ^{90}Sr 外，其余核素活度浓度水平均低于检测下限，与文献^[16-21]报道的我国山东、浙江、广东、广西、海南等地海洋生物放射性核素活度浓度水平一致，低于国家食品标准限值^[9]。可见研究区域海洋生物中 ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{40}K 、 ^{137}Cs 和 ^{90}Sr 等放射性核素的活度浓度水平在我国正常本底范围内。

2.4.2 公众年有效剂量 当地公众经摄入海产品所致年有效剂量为 $55.1 \mu\text{Sv/a}$ ，其中食入 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 所致年有效剂量分别为 0.021 、 $0.49 \mu\text{Sv/a}$ ，与文献^[16,20-21]报道的我国山东、其他海域公众由于摄入海产品所致年有效剂量相近，低于我国剂量水平^[22]，远低于国家标准中规定的公众年剂量限值^[12]，说明当地海产品食用后对居民造成的剂量负担较小，对当地公众健康未见不利影响。

2.4.3 海洋生物辐射剂量 我国对有关海洋生物辐射影响的研究和评价工作相对较少，评价中剂量率转换因子、沉积物分配系数、富集因子等参数主要采用ERICA程序的推荐值，这些参数值不一定适合我国的具体情况。本研究利用在核电基地周边海域获取的实测数据，结合核电厂址的实际情况，对于程

序中的关键参数进行补充和修正，增强了程序在我国的适用性和有效性，进一步提升了评价结果的可靠性。

本研究对海洋生物辐射剂量的评价结果显示，研究海域上层鱼类、底栖鱼类、贝类、头足类、藻类等5类海洋生物所受辐射剂量率范围为 $0.048 \sim 0.276 \mu\text{Gy/h}$ ，比ERICA评价方法推荐的保护生物的辐射剂量率控制值低2~3个数量级，与文献^[23-24]报道的结果一致。总辐射剂量率中，超过99%来源于天然放射性核素， ^{226}Ra 和 ^{40}K 为剂量贡献最大的两种核素。

2.4.4 后续监测要素建议 根据上述调查及评价结果，在目前核电厂尚未投入运行的情况下，当地公众和海洋生物所受辐射剂量的绝大部分来源于天然放射性核素。在核电厂投入运行后，将有极少量含人工放射性核素的液态流出物释放进入环境，在其影响评价工作中更关心的是这些人工放射性核素对海洋环境的长期累积影响效应。因此，建议在后续的跟踪监测与研究中，继续选择 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^{58}Co 、 ^{60}Co 、 ^{54}Mn 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 ^{65}Zn 作为监测要素，并补充 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{131}I 等排放量较大且可能对海洋环境产生较大辐射剂量的放射性核素。此外，根据相关研究结果^[25-27]， ^{210}Po 是造成海洋生物辐射剂量贡献最大的天然放射性核素，因此，在后续工作中可考虑补充

^{210}Po 作为监测要素。

3 结论

本研究获取了霞浦核电基地周边海域 5 类 9 种海洋生物样品中的主要天然及人工放射性核素活度浓度水平,各项核素的活度浓度水平均处于本底范

围,对公众和海洋生物所致辐射剂量远低于相应国标限值或国际推荐值。本研究可为评价核电厂运行后的环境放射性质量提供依据,亦可为制定运行后环境监测方案、评价公众和海洋生物所受辐射剂量提供技术依据。

参考文献:

- [1] 全国环境天然放射性水平调查总结报告编写小组. 全国水体中天然放射性核素浓度调查(1983—1990年)[J]. 辐射防护, 1992, 12(2): 143-163.
The Writing Group of the Summary Report on Nationwide Survey of Environmental Radioactivity Level in China. Survey of natural radioactivity level of the waters in China(1983-1990)[J]. Radiation Protection, 1992, 12(2): 143-163.
- [2] 邹诺舟. 福建近岸海域海水中 ^{137}Cs 活度浓度分析[J]. 海峡科学, 2015(6): 11-12.
ZOU N Z. Analysis of ^{137}Cs Radioactivity level in coastal seawater of Fujian[J]. Straits Science, 2015(6): 11-12.
- [3] 邓芳芳, 林武辉, 于涛, 等. 海洋沉积物中 ^{90}Sr 的分析方法[J]. 核化学与放射化学, 2015, 37(4): 231-237.
DENG F F, LIN W H, YU T, et al. ^{90}Sr analysis method in the marine sediments[J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2015, 37(4): 231-237.
- [4] 生态环境部. 核动力厂运行前辐射环境本底调查技术规范: HJ 969—2018[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
Ministry of Ecology and Environment. Technical guideline for environmental radiation background survey of nuclear power plants before operation: HJ 969-2018[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2018.
- [5] 国家环境保护总局. 辐射环境监测技术规范: HJ/T 61—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
State Environmental Protection Administration. Technical criteria for radiation environmental monitoring: HJ/T 61-2001[S]. Beijing: Standards Press of China, 2001.
- [6] 中国核工业总公司. 环境辐射监测中生物采样的基本规定: EJ/T 527—1990[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
China National Nuclear Industry Corporation. Basic provisions for biota sampling in environmental radiation monitoring: EJ/T 527-1990[S]. Beijing: Standards Press of China, 1990.
- [7] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 生物样品中放射性核素的 γ 能谱分析方法: GB/T 16145—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Gamma spectrometry method of analysing radionuclides in biological samples: GB/T 16145-2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [8] 国家海洋局. 海洋环境放射性核素监测技术规程: HY/T 235—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
State Oceanic Administration. Technical specification for marine environmental radionuclide monitoring: HY/T 235-2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [9] 中华人民共和国卫生部. 食品中放射性物质限制浓度标准: GB 14882—1994[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
Ministry of Health of the People's Republic of China. Limit concentrations of radioactive materials in foods: GB 14882-1994[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 放射性核素摄入量及内照射剂量估算规范: GB/T 16148—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration. Specification for assessments of intakes and internal doses of radionuclides: GB/T 16148-2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [11] 中国营养学会. 《中国居民膳食指南(2016)》发布[J]. 中国妇幼健康研究, 2016, 27(5): 670.
China Nutrition Society. Dietary guidelines for Chinese residents (2016) published[J]. China Maternal and Child Health Research, 2016, 27(5): 670.
- [12] 国家质量监督检验检疫总局. 电离辐射防护与辐射源安全基本标准: GB 18871—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources: GB 18871-2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [13] BROWN J E, ALFONSO B, AVILA R, et al. A new version of the ERICA tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2016, 153: 141-148.
- [14] 钱庭荣. 福建海域中的铀和钍[J]. 职业医学, 1986, 13(4): 22-24.
QIAN T R. Uranium and thorium along the sea area in Fujian[J]. Occupational Medicine, 1986, 13(4): 22-24.
- [15] International Atomic Energy Agency. Sediment distribution coefficients and concentration factors for biota in the marine environment, technical reports series No. 422[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2004.
- [16] 冯兰英, 卢秀芳, 赵新春, 等. 2012—2015年广西核电站区域海产品放射性本底调查[J]. 应用预防医学, 2017, 23(4): 315-317.
FENG L Y, LU X F, ZHAO X C, et al. Radiological background survey of seafood in the Guangxi nuclear power plant region, 2012-2015[J]. Journal of Applied Preventive Medicine, 2017, 23(4): 315-317.

- [17] 娄海林, 卢琰, 文富平, 等. 某核电站运行前环境辐射本底调查中生物体⁹⁰Sr 的监测[J]. 中国辐射卫生, 2017, 26(6): 692-694.
LOU H L, LU Y, WEN F P, et al. Monitoring of radioactive strontium-90 in organisms of the environment around the nuclear power plant before operation[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2017, 26(6): 692-694.
- [18] 胡丹标, 芦丽嫦, 胡艳敏, 等. 三门核电站宁海毗邻区域辐射水平本底调查[J]. 上海预防医学, 2016, 28(4): 214-218.
HU D B, LU L C, HU Y M, et al. Survey of radiation baseline level in Ninghai areas adjacent to the Sanmen Nuclear Power Station[J]. Shanghai Journal of Preventive Medicine, 2016, 28(4): 214-218.
- [19] 陈进兴, 许丕安. 大亚湾核电站周围海洋生物中放射性本底值的研究[J]. 海洋环境科学, 1991, 10(4): 61-64.
CHEN J X, XU P A. A study of the background values of radioactivity in marine organisms around the Daya Bay Nuclear Power Station[J]. Marine Environmental Science, 1991, 10(4): 61-64.
- [20] 许家昂, 李全太, 陈英民, 等. 海阳核电厂周边地区食品中放射性核素调查[J]. 中国辐射卫生, 2011, 20(4): 387-389.
XU J A, LI Q T, CHEN Y M, et al. The investigation of activity concentrations of radionuclides in foods in the adjoining areas of Haiyang Nuclear Power Plant[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2011, 20(4): 387-389.
- [21] 陈玉坤, 王龙义, 邢坤, 等. 昌江核电站周围环境食品放射性本底调查[J]. 中国热带医学, 2016, 16(9): 877-879.
CHEN Y S, WANG L Y, XING K, et al. Baseline survey of radiation in food around Changjiang Nuclear Power Station[J]. China Tropical Medicine, 2016, 16(9): 877-879.
- [22] 张景源, 诸洪达. 中国食品放射性及所致内剂量[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
ZHANG J Y, ZHU H D. Radioactivity and internal doses from food in China[M]. Beijing: China Environment Science Press, 1989.
- [23] 王茹静, 杜风雷. 基于 ERICA 的生物辐射剂量评价[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(10): 165-168.
WANG R J, DU F L. Application of ERICA in assessment of radiological impact on aquatic organisms[J]. Environmental Science and Management, 2012, 37(10): 165-168.
- [24] 张晓峰, 上官志洪, 赵锋. 阳江核电厂附近海域生物辐射影响评价研究[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(6): 35-40.
ZHANG X F, SHANGGUAN Z H, ZHAO F. Assessment of radiological impact on the marine organisms near Yangjiang Nuclear Power Plant[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2009, 28(6): 35-40.
- [25] International Atomic Energy Agency. Sources of radioactivity in the marine environment and their relative contributions to overall dose assessment from marine radioactivity (MARDOS) [R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1995.
- [26] ŠTOK M, SMODIŠ B. Levels of ²¹⁰Po and ²¹⁰Pb in fish and molluscs in Slovenia and the related dose assessment to the population[J]. Chemosphere, 2011, 82(7): 970-976.
- [27] 董信芳, 陈凌, 潘竞舜, 等. 黄海五类典型海产食品中²¹⁰Po 水平[J]. 核化学与放射化学, 2018, 40(1): 67-73.
DONG X F, CHEN L, PAN J S, et al. ²¹⁰Po level in five kinds of typical aquatic products from the Yellow Sea of China[J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2018, 40(1): 67-73.

Marine organism radioactivity baseline and radiological dose assessment near Xiapu Nuclear Power Plant, China

FU Bin¹, WU Chunyong¹, YU Wen^{2,4*}, HE Jianhua^{3,4}

(1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China;

2. School of National Safety and Emergency Management, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China;

3. West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China;

4. Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China)

Abstract: To obtain the radioactivity baseline of marine organisms near Xiapu Nuclear Power Plant (XNPP), we collected 9 marine organism samples in 5 taxonomic groups in waters within 50 km and analyzed the natural radionuclides ²³⁸U, ²³²Th, ²²⁶Ra, ⁴⁰K and artificial radionuclides ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, ⁹⁰Sr, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co, ⁵⁴Mn, ^{110m}Ag and ⁶⁵Zn of the organisms. The radiological dose for local public and marine organisms were also assessed. The results showed that the radioactivities of ¹³⁴Cs, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co, ⁵⁴Mn, ^{110m}Ag and ⁶⁵Zn in all samples were lower than the detectable radioactivity limitation. The average radioactivities of ²³⁸U, ²³²Th, ²²⁶Ra, ⁴⁰K, ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr were respectively (0.48 ± 0.48), (0.86 ± 1.20), (0.27 ± 0.34), (74.3 ± 43.0), (0.023 ± 0.019) and (0.242 ± 0.167) Bq/kg, which are within the normal radioactivity background level in China. The annual effective dose for the local public due to sea-food consumption is 55.1 μSv/year, of which the doses caused by ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr are 0.021 and 0.49 μSv/a, respectively. The radiation dose rate for marine organisms is 0.048 ~ 0.276 μSv/h. The radiation dose or dose rate for local public and marine organisms is far below the national regulation dose limit or the international recommended

screening dose rate. This survey established baseline data for the marine biological radioactivity before the operation of XNPP and proposed that the key nuclides for future marine biological monitoring should include ^3H , ^{14}C , ^{131}I and ^{210}Po , in addition to ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{90}Sr , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{54}Mn , $^{110\text{m}}\text{Ag}$ and ^{65}Zn .

Key words: marine chemistry; seafood; radioactivity baseline; radiological dose assessment; Xiapu Nuclear Power Plant

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2022.03.010

(责任编辑:王 静)