

秦山核电站周围海洋生物放射性水平调查

王天姿, 涂彧, 万骏

苏州大学放射医学与防护国家重点实验室, 江苏 苏州 215024

摘要: **目的** 基于秦山核电站历年的流出物排放量及周围海域海洋介质的监测水平, 了解其海域生物介质的放射性富集水平, 评价其流出物对周围海域生物介质的影响。**方法** 收集 2008—2017 年秦山核电站所监测得到的环境介质中 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 的监测数据, 用 IBM SPSS Statistics 26 进行数据处理及分析。**结果** 秦山核电基地周围海域鲻鱼鳃活度浓度为 0.5~2.9 Bq/kg、牡蛎体内鳃活度浓度为 0.55~8.2 Bq/kg, 二者受核电站流出物的影响鳃活度浓度呈总体上升趋势; ^{14}C 、 ^{137}Cs 与 ^{90}Sr 在监测生物中的活度浓度低于本底值, 相关性分析结果显示核电站流出物对 ^{14}C 几乎没有影响; $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 的活度水平在牡蛎体内逐年变化显著下降, 在鲻鱼体内稳定在本底水平以下。**结论** 秦山核电站作为中国大陆运行时间最长的核电站, 其周围海域生物介质体内多数核素都低于本底水平, 该核电站流出物对周围海域海洋生物介质影响较小。

关键词: 秦山核电站; 液态流出物; 放射性核素; 海洋生物

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2023)02-0108-07

Radioactivity in marine organisms around Qinshan Nuclear Power Plant

WANG Tianzi, TU Yu, WAN Jun

State Key Laboratory of Radiation Medicine and Protection, Soochow University, Suzhou 215024 China

Abstract: **Objective** To determine the radioactive enrichment level in marine biological media around Qinshan Nuclear Power Plant and to evaluate the impact of effluent on marine biological media in the surrounding sea area based on the discharge of effluent from the nuclear power plant over the years and the monitoring level of surrounding marine media.

Methods The monitoring data of ^3H , ^{14}C , ^{90}Sr , ^{137}Cs , and $^{110\text{m}}\text{Ag}$ in the environmental media monitored in Qinshan Nuclear Power Plant from 2008 to 2017 were collected, and the data were processed and analyzed by IBM SPSS Statistics 26.

Results The activity concentrations of tritium in mullet and oyster in the sea area around Qinshan Nuclear Power Plant were 0.5-2.9 Bq/kg and 0.55-8.2 Bq/kg, respectively, and the activity concentrations of tritium in both increased generally under the influence of effluent from the nuclear power plant. The activity concentrations of ^{14}C , ^{137}Cs , and ^{90}Sr in the monitored organisms were lower than the background values. The results of correlation analysis showed that the effluent from the nuclear power plant had almost no effect on ^{14}C . The activity level of $^{110\text{m}}\text{Ag}$ decreased significantly year by year in oyster, and remained below the background level in mullet. **Conclusion** Qinshan Nuclear Power Plant is the longest operating nuclear power plant in mainland China. Most of the nuclides in biological media in the surrounding sea area are lower than the background levels, and the effluents from the nuclear power plant have little influence on marine biological media in the surrounding sea area.

Keywords: Qinshan Nuclear Power Plant; Liquid effluents; Radionuclides; Marine organism

Corresponding author: WAN Jun, E-mail: sdwanjun@suda.edu.cn

秦山核电站位于 30°26'30"N, 120°56'40"E, 是我国自行设计、建设与管理的第一座核电站^[1], 核电厂分为秦山一期工程、秦山二期工程、秦山三期工程与方家山核电工程, 其中方家山核电工程属于一期核电工程的扩建项目。核电站正常运行时排放的液态流

出物中含有 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 等核素, 这些核素经由核电站排出口排入海洋后进行扩散稀释^[2], 对海洋介质产生一定的影响。秦山核电站于 1991 年投入运行后, 当地监测站及核电站就对各期工程周围海域的各类介质进行了长期监测。本文基于秦山核电

基金项目: 国家自然科学基金 (资助号: U186720); 江苏省高等学校学科优先发展计划 (PAPD)

作者简介: 王天姿 (1997—), 女, 海南海口人, 硕士研究生, 放射医学专业, 从事放射防护与放射毒理学研究, E-mail: tz_vince@163.com

通信作者: 万骏, E-mail: sdwanjun@suda.edu.cn

站历年的流出物排放量及周围海域海洋介质的监测水平,旨在了解核电站液态流出物对周围海域生物介质的放射性富集水平,客观评价秦山核电站运行以来其流出物对周围海域生物介质的影响。

1 材料与方法

据《核动力厂环境辐射防护规定》(GB 6249—2011)^[3]、《环境辐射监测规定》(GB 12379—1990)、《核电厂环境辐射监测规定》(NB/T 20246—2013)^[4]的要求,秦山核电站周围海域所监测的介质分为水样、土样、生物样,生物样包括海产品(鲷鱼、带鱼)与指示生物(牡蛎)。监测对象及项目如表 1 所示。据

《秦山核电环境辐射监测大纲》与秦山地区周围海域的主要特征,充分考虑各类水文、人文因素后,监测点布点情况如表 2 所示。

表 1 秦山核电站环境监测对象及项目

Table 1 Environmental monitoring objects and items in Qin-shan Nuclear Power Plant			
介质	监测对象	监测项目	取样频率
水样	海水	γ核素、 ³ H、 ¹⁴ C、 ⁹⁰ Sr、 ¹³⁷ Cs	半年
	鲷鱼	γ核素、 ³ H、 ¹⁴ C、 ⁹⁰ Sr、 ¹³⁷ Cs、 ^{110m} Ag	年
海洋生物样	带鱼	γ核素、 ³ H、 ¹⁴ C、 ⁹⁰ Sr、 ¹³⁷ Cs	年
指示生物	牡蛎	γ核素、 ³ H、 ¹⁴ C、 ¹³⁷ Cs、 ^{110m} Ag	年

表 2 监测点分布

Table 2 Distribution of monitoring sites		
监测对象	测量点分布	布点数
海水	各总排水口或附近各一点(4个), 澈浦、武原、门山外、白塔山北、杨柳山南、舟山(年)	10
鲷鱼	乍浦、秦联海域;	2
带鱼	舟山(沈家门);	1
牡蛎	毛灰山、杨柳山、白塔山、武原、澈浦、海塘、乍浦	7

所有样品依据《海洋调查规范 第 4 部分 海水化学要素调查》(GB/T 12763.4—2007)^[5]和《海洋监测规范 第 3 部分 样品采集、储存与运输》(GB 17378.3—2007)^[6]进行采集,数据的处理与记录按照《海洋调查

规范 第 4 部分 海水化学要素调查》(GB/T 12763.4—2007)^[5]和《海洋监测规范 第 4 部分 海水分析》(GB 17378.4—2007)^[7]等有关标准执行。各类介质的核素分析监测方法如表 3 所示。

表 3 各类介质的核素分析监测方法

Table 3 Nuclide analysis and monitoring methods for various media			
介质	检测项目	分析测量方法	测量仪器
水样	⁹⁰ Sr	二-(2-乙基己基)磷酸酯萃取色层法(HJ 815—2016) ^[8]	LB770、MDS-8低本底α、β计数器
	¹³⁷ Cs	磷钼酸铵-碘钼酸铯法(HJ 816—2016) ^[9]	
	³ H	液体闪烁计数法(HJ 1126—2020) ^[10]	Quantulus 1200低本底液闪谱仪
	¹⁴ C	加酸吹扫-Carbsorb吸收-液体闪烁计数法(HJ 1056—2019) ^[11]	
	γ核素	MnO ₂ 吸附-γ能谱分析法(GB/T 16140—2018) ^[12]	HPGe
鱼类	⁹⁰ Sr	二-(2-乙基己基)磷酸酯萃取色层法(HJ 815—2016)	LB770、MDS-8低本底α、β计数器
	¹³⁷ Cs	磷钼酸铵-碘钼酸铯(HJ 816—2016)	
	³ H	冷冻捕捉-液体闪烁计数法/燃烧冷凝-液体闪烁计数法(HJ 1126—2020)	Quantulus 1200低本底液闪谱仪
	¹⁴ C	生物样品中 ¹⁴ C的分析方法-氧弹燃烧法(GB/T 37865—2019)	
	γ核素	γ能谱分析法(GB/T 16145—2020) ^[13]	HPGe
牡蛎	³ H	冷冻捕捉-液体闪烁计数法(HJ 1126—2020)	Quantulus 1200低本底液闪谱仪
	¹⁴ C	生物样品中 ¹⁴ C的分析方法-氧弹燃烧法(GB/T 37865—2019)	
	γ核素	γ能谱分析法(GB/T 16145—2020)	HPGe

数据资料均用平均数来表示, 低于最小可探测值的数据取探测下限值的一半纳入数据统计和计算, 2 组样本比较采用 t 检验, 多组样本进行比较采用双因素方差分析, 方差分析的两两比较采用 LSD 法。数据处理软件为 IBM SPSS Statistics 26, 检验标准为 $\alpha = 0.05$, 在数据资料在可以进行对比的情况下, 当 $P < 0.05$ 时, 差异有统计学意义, 反之, 则表明差异无统计学意义。

2 结果

秦山核电站周围海域由于潮水流量的日差较大, 导致其附近海域生物相对贫瘠, 所监测的海洋对象生物主要为鲳鱼及牡蛎, 而舟山作为对照点, 在其附近海域捕捉带鱼进行监测。做为指示生物的牡蛎所设置的监测点主要设在各个排水口附近地区(毛灰山、杨柳山、白塔山等)和较远地区(武原、澉浦、乍浦、海

塘等)。

2008—2017 年秦山核电站周围海域海洋生物的 ^{90}Sr 与 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 活度水平如图 1 所示, 秦山核电基地鲳鱼的 ^{90}Sr 本底为 0.2 Bq/kg, 带鱼本底为 3.4 Bq/kg, 图 1a 可见带鱼 ^{90}Sr 的活度水平远低于本底值, 年均活度水平为 80 mBq/kg。鲳鱼 ^{90}Sr 的水平也在本底值附近波动, 年均活度水平约为 0.37 Bq/kg, 该年均活度水平略高于对照点舟山的带鱼体内 ^{90}Sr 活度水平, 但总体处在相对平稳的水平。图 1b 为 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 在生物体内的活度水平, 鲳鱼和牡蛎的 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 本底水平分别为 20 mBq/kg 与 17 mBq/kg。由图可见牡蛎体内 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 的活度水平逐年显著下降, 2012—2016 年的年均活度水平已经降低至 26 mBq/kg; 而鲳鱼体内的 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 活度水平相对稳定在本底水平以下, 2008—2016 年的活度水平范围为 2.5~10 mBq/kg, 平均年活度水平约为 2 mBq/kg。

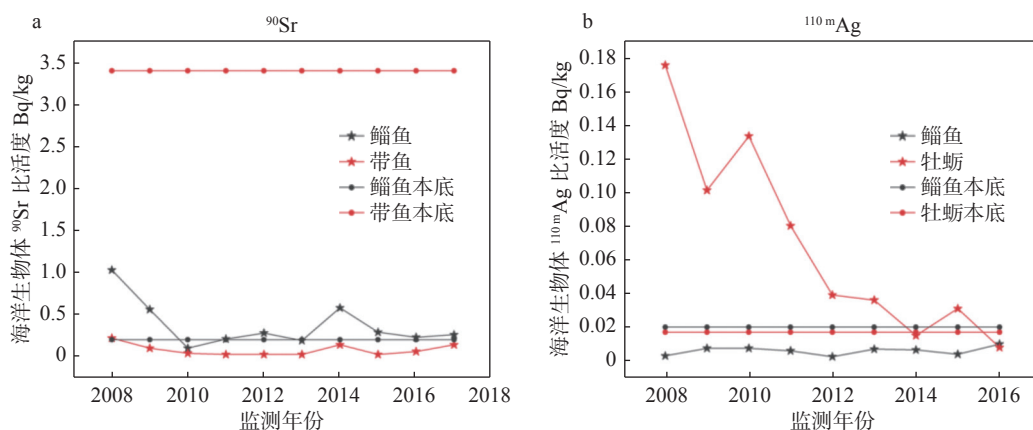


图 1 秦山核电站周围海域海洋生物的 ^{90}Sr 与 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 的活度水平 (Bq/kg)

Figure 1 Activity levels of ^{90}Sr and $^{110\text{m}}\text{Ag}$ (Bq/kg) in marine organisms in the sea area around Qinshan Nuclear Power Plant

2008—2017 年秦山核电站周围海域带鱼、鲳鱼与牡蛎的 ^3H 、 ^{14}C 与 ^{137}Cs 的活度水平如图 2 所示。带鱼、鲳鱼与牡蛎的 ^3H 本底值分别为 1.8、0.6 和 0.8 Bq/kg, 由图 2a 可见, 秦山核电基地海域所捕捉的鲳鱼、牡蛎体内氚活度水平呈总体上升趋势, 且明显高于对照点舟山带鱼的氚活度水平, 鲳鱼的氚活度范围为 0.5~2.9 Bq/kg, 年均活度水平约为 1.43 Bq/kg, 指示生物牡蛎的氚活度范围为 0.55~8.2 Bq/kg, 年均活度水平为 3.22 Bq/kg, 而对照点舟山带鱼的氚活度范围仅为 0.49~0.97 Bq/kg, 年均活度水平约为 0.67 Bq/kg。海洋生物体内 ^{14}C 在 2008—2017 年的活度水平的变化如图 2b 所示, 带鱼、鲳鱼与牡蛎的 ^{14}C 本底值分别为 9 Bq/kg、23 Bq/kg 与 10 Bq/kg, 图 2b 可见鲳鱼、牡蛎的 ^{14}C 水平在本底值范围上下波动, 年均活度水平分别为 24.71 Bq/kg 和 12.35 Bq/kg, 而

对照点舟山带鱼的 ^{14}C 水平平均高于其本底值, 年均活度水平为 23.29 Bq/kg。图 2c 为 2008—2017 年 ^{137}Cs 在带鱼、鲳鱼和牡蛎体内的活度水平变化, 三者 ^{137}Cs 的本底分别为 0.32、0.107 和 0.03 Bq/kg, 而检测到的带鱼的活度范围为 11~114 mBq/kg, 鲳鱼活度范围为 2~28 mBq/kg, 牡蛎的活度范围为 2.5~16 mBq/kg, 可见三者的活度水平均低于本底值, 且其值趋于稳定。

秦山核电基地自 2008—2017 年各期排放口对 ^3H 、 ^{14}C 与 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 的排放量如表 4 所示, 秦山核电各期对氚排放量贡献最大为秦山核电基地二期和三期, 据排出口排量数据显示, 二期对氚排放的年均值为 5.96×10^{10} Bq/m³, 10 年总排放量为 5.96×10^{11} Bq/m³, 三期氚排放的年均值为 5.02×10^{10} Bq/m³, 10 年总排放量为 5.02×10^{11} Bq/m³, 两个厂区均达秦山一期厂区总

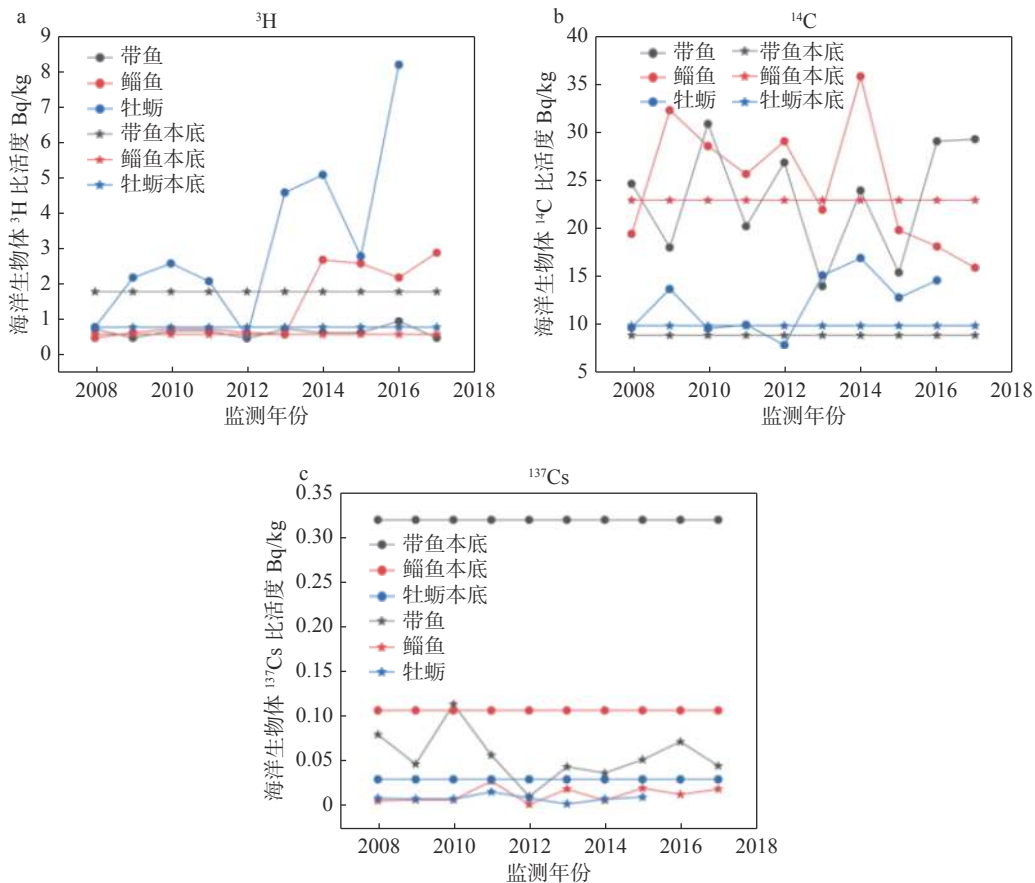


图 2 秦山核电站周围海域海洋生物的与³H、¹⁴C 与¹³⁷Cs 的活度水平 (Bq/kg)

Figure 2 Activity levels of ³H, ¹⁴C, and ¹³⁷Cs (Bq/kg) in marine organisms in the sea area around Qinshan Nuclear Power Plant

表 4 2008—2017 年秦山核电站流出物排放量 (Bq/m³)

Table 4 Discharge of effluents from Qinshan Nuclear Power Plant, 2008—2017 (Bq/m³)

监测年份	³ H				¹⁴ C				^{110m} Ag		
	一期	二期	三期	方家山	一期	二期	三期	方家山	一期	二期	方家山
2008	1.23 × 10 ¹⁰	3.80 × 10 ¹⁰	3.33 × 10 ¹⁰	—	—	—	3.92 × 10 ⁷	—	8.89 × 10 ³	1.88 × 10 ⁶	—
2009	1.03 × 10 ¹⁰	3.10 × 10 ¹⁰	2.88 × 10 ¹⁰	—	—	—	8.58 × 10 ⁷	—	6.63 × 10 ³	8.31 × 10 ⁵	—
2010	6.06 × 10 ⁹	3.22 × 10 ¹⁰	3.05 × 10 ¹⁰	—	—	—	8.61 × 10 ⁷	—	1.84 × 10 ⁴	6.10 × 10 ⁵	—
2011	9.12 × 10 ⁹	4.00 × 10 ¹⁰	3.09 × 10 ¹⁰	—	2.42 × 10 ⁴	3.69 × 10 ⁶	6.79 × 10 ⁷	—	4.96 × 10 ⁴	2.79 × 10 ⁵	—
2012	4.99 × 10 ⁹	2.83 × 10 ¹⁰	2.33 × 10 ¹⁰	—	1.68 × 10 ⁵	6.20 × 10 ⁶	1.23 × 10 ⁸	—	7.43 × 10 ⁴	2.79 × 10 ⁵	—
2013	9.12 × 10 ⁹	4.76 × 10 ¹⁰	3.85 × 10 ¹⁰	—	9.46 × 10 ⁴	8.36 × 10 ⁶	1.17 × 10 ⁸	—	6.11 × 10 ⁴	1.78 × 10 ⁵	—
2014	1.65 × 10 ¹⁰	6.74 × 10 ¹⁰	5.09 × 10 ¹⁰	1.86 × 10 ⁸	6.49 × 10 ⁵	1.26 × 10 ⁷	8.10 × 10 ⁷	2.07 × 10 ⁴	7.32 × 10 ⁴	3.03 × 10 ⁵	1.37 × 10 ³
2015	1.19 × 10 ¹⁰	1.00 × 10 ¹¹	8.81 × 10 ¹⁰	6.87 × 10 ⁹	1.16 × 10 ⁶	1.00 × 10 ⁷	3.52 × 10 ⁷	1.86 × 10 ⁵	7.35 × 10 ⁴	8.99 × 10 ⁴	6.59 × 10 ³
2016	1.93 × 10 ¹⁰	9.53 × 10 ¹⁰	7.60 × 10 ¹⁰	3.00 × 10 ¹⁰	8.04 × 10 ⁵	7.72 × 10 ⁶	8.89 × 10 ⁷	8.15 × 10 ⁵	1.17 × 10 ⁵	1.36 × 10 ⁵	2.15 × 10 ⁴
2017	1.42 × 10 ¹⁰	1.16 × 10 ¹¹	1.02 × 10 ¹¹	2.24 × 10 ¹⁰	5.84 × 10 ⁵	1.17 × 10 ⁷	1.00 × 10 ⁸	8.70 × 10 ⁵	9.81 × 10 ⁴	1.02 × 10 ⁵	8.71 × 10 ³
均值	1.14 × 10 ¹⁰	5.96 × 10 ¹⁰	5.02 × 10 ¹⁰	1.49 × 10 ¹⁰	4.98 × 10 ⁵	8.61 × 10 ⁶	8.24 × 10 ⁷	4.73 × 10 ⁵	5.81 × 10 ⁴	4.69 × 10 ⁵	9.54 × 10 ³

排放量的 5 倍左右。而¹⁴C 的贡献最大的厂区是秦山核电基地三期, 年均排放 8.24×10^7 Bq/m³, 10 年总排放为 8.24×10^8 Bq/m³。^{110m}Ag 排放量贡献最大为二期, 年均排放为 4.69×10^5 Bq/m³。

由表 4 可见, 秦山核电站的氚排量呈现逐年增加

趋势, 原因是由于秦山核电基地机组的及发电量的增加导致。在 2014 年方家山厂区投入运营后, 方家山厂区对氚的排放贡献也是整个秦山基地氚排放量增加的主要来源, 但总体的排量相对稳定。而受监测生物的氚含量也可见总体上升趋势, 这与秦山核电基地

总体的排放量变化相似。为了将秦山核电基地周围生物样体内核素的变化与核电基地液态流出物的总排放量进行对比,将表 4 的数据按核素进行总和,结果如图 3 所示,即秦山核电基地排放口对 ^3H 、 ^{14}C 与 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 的总排放量示意图,并将各核素的总排放量与海洋生物介质各核素的活度水平进行 Pearson 相关性分析,结果如表 5 所示。结果可见秦山核电基地的氚排放量对其周围海域鲢鱼、牡蛎体内的氚活度水平有较大的影响,存在较高的相关性, Pearson 相关系数分别为 0.89 和 0.72, P 值均具有统计学差异。事实上,随着全球的核电站数量和核武器、核试验的增加,全球环境中的氚含量日渐增加,40 年来,通过大气层核爆炸实验产生大量的氚通过各种途径降落到

地面和海洋内,对环境中氚的含量影响极大^[14-16],而秦山核电站受运行时间与功率的影响,秦山核电站内机组的数量的增加引起了该基地周围海域海洋介质的氚增加^[17-19],因此海洋环境中氚水平逐年升高是有多种因素共同影响下的结果。 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 的排放量与牡蛎体内的 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 活度水平有相关性, Pearson 系数为 0.88, 且有统计学差异。由图 1b 与图 3c 可见 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 的活度水平与排放量呈现一致的下降,可见核电站流出物对环境生物有一定的影响。但随着核电站对液态流出物的监管力度的加强和相关规章制度的不断完善,近年来秦山核电基地对 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 的排放量逐年减少,且指示生物牡蛎体内的 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 也逐年下降至本底值范围内。

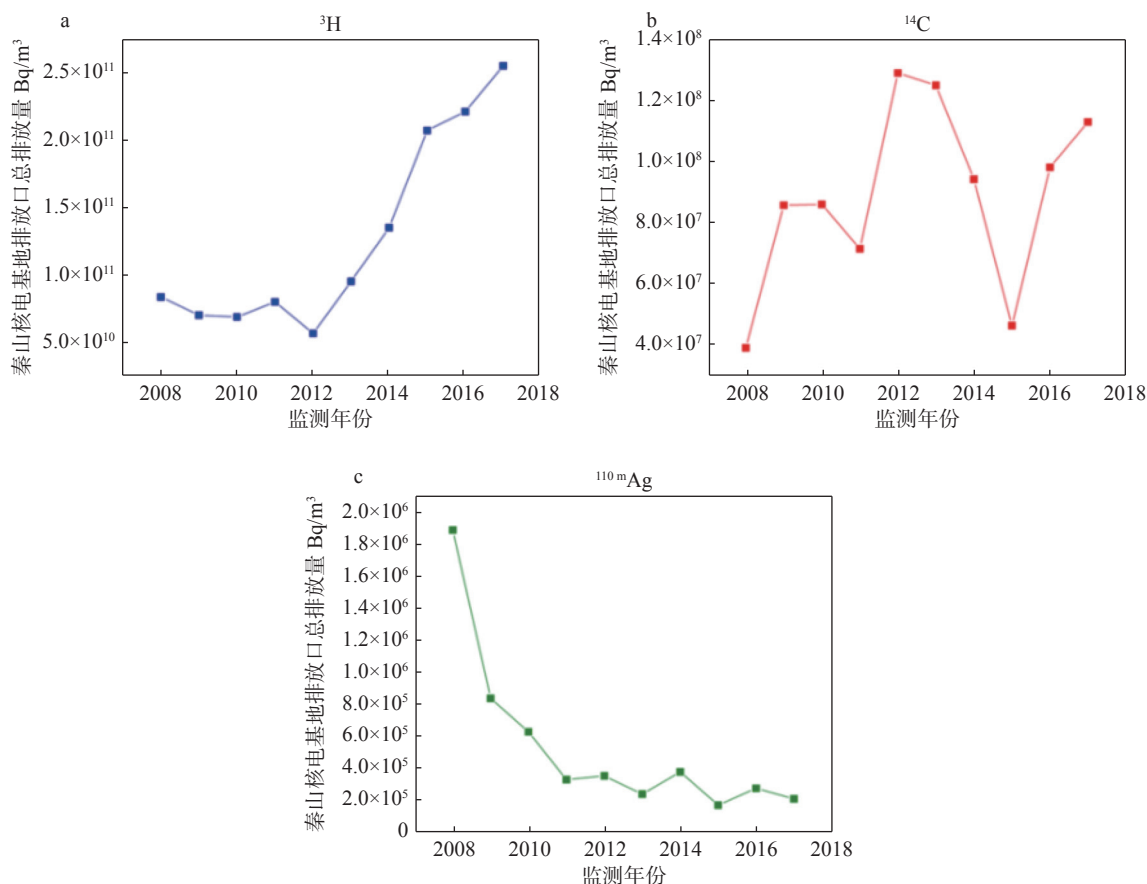


图 3 秦山核电基地四大排放口对 ^3H 、 ^{14}C 和 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 的总排放量 (Bq/m^3)

Figure 3 Total discharge of ^3H , ^{14}C , and $^{110\text{m}}\text{Ag}$ from four discharge ports of Qinshan Nuclear Power Plant (Bq/m^3)

3 讨论

秦山核电基地自 2010 年秦山核电二期 3、4 号机组投入运行后,导致整体的 ^{14}C 排放量明显增高,为了判断秦山核电对 ^{14}C 的排放是否影响监测生物的 ^{14}C 水平,将二者进行相关性分析,结果发现核电站对 ^{14}C 的排放量与该海域周围生物介质体内的 ^{14}C 活度水平无相关性,可判断生物体对秦山核电排放的

^{14}C 富集程度较小。指示生物牡蛎对海水中氚的富集能力强,氚主要通过组织自由水形式在其体内进行蓄积,因此其体内氚含量极易受到海水中氚的活度浓度波动而波动。秦山核电基地的液态流出物中 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 与 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 的排放量受机组运行数量与时间影响,也因此而出现波动,但液态流出物入海后经由潮水进行稀释,核电基地富集生物样体内富集的核素多保持在低于本底值的水平。

表 5 秦山核电基地³H、¹⁴C 和^{110m}Ag 总排放量与生物介质体内核素水平相关性分析

Table 5 Correlation analysis between total discharge of ³H, ¹⁴C, and ^{110m}Ag in Qinshan Nuclear Power Plant and the levels of nuclides in biological media

核素类型	对象		Pearson 相关系数	P 值
	排放量	生物种类		
³ H	秦山核电基地 ³ H 总排放量	带鱼	0.18	0.61
		鳙鱼	0.89	<0.01
		牡蛎	0.72	<0.05
		带鱼	0.20	0.58
¹⁴ C	秦山核电基地 ¹⁴ C 总排放量	鳙鱼	0.16	0.67
		牡蛎	0.16	0.68
		带鱼	—	—
		带鱼	—	—
^{110m} Ag	秦山核电基地 ^{110m} Ag 总排放量	鳙鱼	-0.22	0.55
		牡蛎	0.88	<0.05

实际上,我国环境中⁹⁰Sr、¹³⁷Cs 和¹⁴C^[20-22] 含量绝大部分来自于上世纪五十年代的核试验及核事故产生放射性物质物理性沉降,相比之下核电站正常运行期间的放射性核素排放量极少,且排放时均由海水稀释扩散,较难引起周围海域放射性核素富集的情况。值得一提的是,自 1996 年《全面禁止核试验条约》(Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty)的颁布、大气核爆试验要求停止后,¹³⁷Cs 通过衰变、沉降和渗透等作用在环境中放射性水平逐年下降,因此秦山核电周围海洋环境的¹³⁷Cs 活度水平也出现显著下降,并远低于核电基地运行前所检测的本底水平。

秦山核电站作为中国大陆运行时间最长的核电站,其液态流出物对周围生物介质体内的核素含量有所影响,但该影响逐年下降,除了生物氚含量略高于该基地运行前的本底水平外,生物介质体内多数核素都低于本底水平。可见该核电站严格遵守我国反应堆的排放标准,对排出物进行严格监督管控,严格按照国家标准进行排放,因此其液态流出物对周围海域的影响较小。

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 王天姿负责确定研究对象范围、收集数据、采集与分析数据,撰写论文;涂彧负责提出研究方向,设计论文框架,参与论文修订;万骏负责设计研究思路、修订及审核论文、确定论文最终版本修订

参考文献

- [1] 陈沐垚. 秦山春晓——我国第一座核电站今昔纪事[J]. 当代电力文化, 2022 (3): 96-97.
Chen MY. Qinshan Chunxiao - The history of China's first nuclear power plant[J]. Contemp Electr Power Cult, 2022 (3): 96-97.
- [2] 张烨锋, 薛惠元, 李圣日, 等. 核电站排放水对周围水生生物影响的研究进展与展望[J]. 辐射防护通讯, 2020, 40 (6): 17-24. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2020.06.002.
Zhang YF, Xue HY, Li SR, et al. Research progress and prospects of the impact of nuclear power plant discharge water on surrounding aquatic organisms[J]. Radiat Prot Bull, 2020, 40 (6): 17-24. DOI: 10.3969/j.issn.1004-6356.2020.06.002.
- [3] 环境保护部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 6249—2011 核动力厂环境辐射防护规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 6249—2011 Regulations for environmental radiation protection of nuclear power plant[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [4] 国家能源局. NB/T 20246—2013 核电厂环境辐射监测规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
National Energy Administration. NB/T 20246—2013 Regulations for environmental radiation monitoring of nuclear power plant[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.4—2007 海洋调查规范 第4部分: 海水化学要素调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.4—2007 Specifications for oceanographic survey - Part 4: Survey—Part 4: Survey of chemical parameters in sea water[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 17378.3—2007 海洋监测规范 第3部分: 样品采集、贮存与运输[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 17378.3—2007 The specification for marine monitoring-Part 3: Sample collection storage and transportation[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 17378.4—2007 海洋监测规范 第4部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 17378.4—2007 The specification for marine monitoring - Part 4: Seawater analysis[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [8] 邓芳芳, 林武辉, 林静, 等. 海水中⁹⁰Sr测量的国际比对研究[J].

- 海洋环境科学, 2018, 37 (3): 448-451, 463. DOI: [10.13634/j.cnki.mes.2018.03.021](https://doi.org/10.13634/j.cnki.mes.2018.03.021).
- Deng FF, Lin WH, Lin J, et al. International comparison of ^{90}Sr analysis in seawater[J]. *Mar Environ Sci*, 2018, 37 (3): 448-451, 463. DOI: [10.13634/j.cnki.mes.2018.03.021](https://doi.org/10.13634/j.cnki.mes.2018.03.021).
- [9] 中华人民共和国环境保护部. HJ 816—2016 水和生物样品灰中铯-137的放射化学分析方法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016. HJ 816—2016 Radiochemical analysis of Caesium-137 in water and ash of biological samples[S]. Beijing: China Environmental Press, 2016.
- [10] 中华人民共和国生态环境部. HJ 1126—2020 水中氚的分析方法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020. HJ 1126—2020 Analysis method for tritium in water[S]. Beijing: China Environmental Press, 2020.
- [11] 中华人民共和国生态环境部. HJ 1056—2019 核动力厂液态流出物中 ^{14}C 分析方法—湿法氧化法[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2019. HJ 1056—2019 Analytical method of ^{14}C in liquid effluent of nuclear power plant—Wet oxidation[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2019.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 16140—2018 水中放射性核素的 γ 能谱分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 16140—2018 Determination of radionuclides in water by gamma spectrometry[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 16145—2020 生物样品中放射性核素的 γ 能谱分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 16145—2020 Gamma spectrometry method of analysing radionuclides in biological samples[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [14] 崔凤梅, 胡明江, 包广粮, 等. 氚水的内照射损伤实验研究[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2009, 27 (5): 317-320. DOI: [10.3969/j.issn.1000-3436.2009.05.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3436.2009.05.012).
- Cui FM, Hu MJ, Bao GL, et al. The irradiation damage of mice induced by internal tritium oxide[J]. *J Radiat Res Radiat Process*, 2009, 27 (5): 317-320. DOI: [10.3969/j.issn.1000-3436.2009.05.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3436.2009.05.012).
- [15] 张蒙, 崔凤梅, 涂戡, 等. 氚水的环境排放及生物学效应研究进展[J]. *中国辐射卫生*, 2018, 27 (4): 302-305. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2018.04.004](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2018.04.004).
- Zhang M, Cui FM, Tu Y, et al. Research progress on environmental discharge and biological effects of tritium water[J]. *Chin J Radiol Health*, 2018, 27 (4): 302-305. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X).
- 2018.04.004.
- [16] 蔡鹏飞, 涂戡. 我国环境水氚浓度的变化规律及趋势[J]. *中国辐射卫生*, 2010, 19 (2): 254-256. DOI: [10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2010.02.013](https://doi.org/10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2010.02.013).
- Cai PF, Tu Y. Regularity and trend of the changes of tritium concentration in the environmental water of China[J]. *Chin J Radiol Health*, 2010, 19 (2): 254-256. DOI: [10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2010.02.013](https://doi.org/10.13491/j.cnki.issn.1004-714X.2010.02.013).
- [17] 梁梅燕, 宋伟力, 叶际达, 等. 秦山核电基地外围环境动物性食物样品放射性水平监测[J]. *辐射防护通讯*, 2007, 27 (2): 28-33. DOI: [10.3969/j.issn.1004-6356.2007.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-6356.2007.02.006).
- Liang MY, Song WL, Ye JD, et al. Monitoring of radioactivity levels in terrestrial animal samples in external environment around Qinshan NPP base[J]. *Radiat Prot Bull*, 2007, 27 (2): 28-33. DOI: [10.3969/j.issn.1004-6356.2007.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-6356.2007.02.006).
- [18] 刘鸿诗, 胡晓燕, 陈彬, 等. 秦山核电基地外围环境放射性水平 20 年监测结果[J]. *原子能科学技术*, 2013, 47 (10): 1906-1915. DOI: [10.7538/yzk.2013.47.10.1906](https://doi.org/10.7538/yzk.2013.47.10.1906).
- Liu HS, Hu XY, Chen B, et al. Monitoring result of radioactivity level in external environment around Qinshan NPP base during past twenty years[J]. *At Energy Sci Technol*, 2013, 47 (10): 1906-1915. DOI: [10.7538/yzk.2013.47.10.1906](https://doi.org/10.7538/yzk.2013.47.10.1906).
- [19] 王莉莉, 曹钟港, 应跃跃. 秦山核电基地周围环境生物样品中锶-90放射性水平监测[J]. *中国科技投资*, 2013 (19): 7-9, 12. DOI: [10.3969/j.issn.1673-5811.2013.19.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5811.2013.19.001).
- Wang LL, Hyang KY, Ying YY. Monitoring of strontium-90 radioactivity in environmental biological samples from Qinshan nuclear power Plant[J]. *China Venture Cap*, 2013 (19): 7-9, 12. DOI: [10.3969/j.issn.1673-5811.2013.19.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5811.2013.19.001).
- [20] 陈锦芳, 刘广山. 环境样品中 ^{90}Sr 的分析方法及其在海洋学研究中的应用[J]. *台湾海峡*, 2003, 22 (3): 395-406. DOI: [10.3969/j.issn.1000-8160.2003.03.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8160.2003.03.019).
- Chen JF, Liu GS. Reviews on ^{90}Sr measurement methods and applications in oceanographical research in environment[J]. *J Appl Oceanogr*, 2003, 22 (3): 395-406. DOI: [10.3969/j.issn.1000-8160.2003.03.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8160.2003.03.019).
- [21] 任珊. 辽东湾和山东半岛沿岸表层海水 ^{137}Cs 与 $^{239+240}\text{Pu}$ 的分布特征及示踪研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- Ren S. Distribution and source identification of the radionuclide ^{137}Cs and $^{239+240}\text{Pu}$ in the costal surface seawater of Liaodong Bay and Shandong Peninsula[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- [22] 吴俊文. 中国海铯(^{137}Cs)和钚($^{239+240}\text{Pu}$)的来源和储量[D]. 厦门: 厦门大学, 2015. Wu JW. Sources and inventory of cesium and plutonium in the China Seas [D]. Xiamen: Xiamen University, 2015.

(收稿日期: 2022-10-10)