

# 海南昌江核电厂两次海域放射性调查结果分析

刘伟容<sup>1</sup>, 齐宇虹<sup>1</sup>, 林峰<sup>2</sup>, 张伟<sup>1</sup>, 王欣<sup>1</sup>

(1. 中国核电工程有限公司, 北京 100840; 2. 自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

**摘要:**为了解海南昌江核电厂周围海域放射性水平, 两次海域放射性调查分别于2009年和2017年进行。两次调查的调查项目、范围、频次、站位、要素等均依据相关标准规范制定。调查中的采样、预处理和放化分析方法也参照了当时最新的标准规范要求。通过对调查结果的对比分析显示, 两次调查中海水、沉积物、海洋生物的绝大部分测量结果基本处于同一水平, 可认为海南昌江核电厂1、2号机组的运行未对周围海域环境放射性水平产生明显影响, 建议在后续监测工作中进一步关注<sup>90</sup>Sr。

**关键词:**海洋化学; 海洋放射性; 环境监测; 核电厂

DOI: 10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2020. 01. 009

中图分类号: P734

文献标识码: A

文章编号: 2095-4972(2020)01-0063-08

海南昌江核电厂位于海南省昌江县海尾镇塘兴村, 西北濒临北部湾, 规划建设4台压水堆核电机组。为获得核电厂1、2号机组运行前的海域放射性本底资料, 2009年9月中国核电工程有限公司委托国家海洋局第三海洋研究所对海南昌江核电厂进行了首次海域放射性调查, 调查分为2009年秋季、2010年春季两个航次进行。2015年11月7日1号机组首次并网成功, 2016年6月20日2号机组首次并网成功。为获得核电厂3、4号机组运行前的海域放射性现状资料, 2017年3月中国核电工程有限公司委托国家海洋局第三海洋研究所对海南昌江核电厂进行了第二次海域放射性调查, 调查分为2017年春季、夏季和秋季三个航次进行。本研究对两次海域放射性调查结果进行了对比分析, 以评估海南昌江核电厂1、2号机组运行后对周边海域环境的影响。

## 1 调查项目和方法

### 1.1 调查项目

开展首次调查时, 调查项目、范围、频次、站位、要素的确定主要参照了2004年版《海洋工程环境影响评价技术导则》<sup>[1]</sup>和《辐射环境监测技术规范》<sup>[2]</sup>这两个标准。第二次调查开展时, 前述第一个标准已被2014年版《海洋工程环境影响评价技

术导则》<sup>[3]</sup>替代, 新标准对调查项目、范围、频次、站位、要素均进行了明确的要求, 因此第二次调查按照新标准要求执行。两次调查的布点见图1、2, 两次调查的调查项目、范围、频次、站位、要素见表1。

### 1.2 调查方法

**1.2.1 采样和预处理** 海水: 使用水泵抽取表层2 m以浅的海水, 采样量150 L, 采集后立即酸化处理, 密封, 并记录好采样站位经纬度、采样日期、采样时间、温度和盐度。另采集25 L海水, 不酸化, 用于总铀、<sup>3</sup>H、<sup>14</sup>C、<sup>131</sup>I分析; 记录采样信息(包括站位经纬度、采样日期、采样时间)。海水样品送至实验室后, 先静置2~3 d, 待澄清后, 虹吸出上清液, 再进行不同要素的放化分析。

**沉积物:** 采用抓斗采泥器采集表层沉积物, 采样量为每个湿样3~4 kg左右, 装入塑料袋中, 并记录采样站位经纬度、采样日期、采样时间、沉积物厚度、表观性状。如果采样点遇到沙质环境无法采样, 则采样位置稍作移动再进行采样。沉积物样品送至实验室后, 用吸水纸吸去表面的水份, 除去杂物, 烘干、研磨、过筛(80目)后, 再进行不同要素的放化分析。

**海洋生物:** 通过现场采集和购买的方式获取海洋生物样品, 每份样品10~20 kg, 冷冻保存, 并记录生物名称、采集地点、采样日期、采样时间、湿重量等相关信息。海洋生物样品只取可食部分进行分析

收稿日期: 2018-10-30

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2016J05099); 厦门海洋研究开发院共建资助项目(K191301)

作者简介: 刘伟容(1989—), 男, 硕士, 工程师; E-mail: liuwr@cnpe.cc

(植物除外)经过预处理、炭化、灰化后制成灰样,再进行不同要素的放化分析。

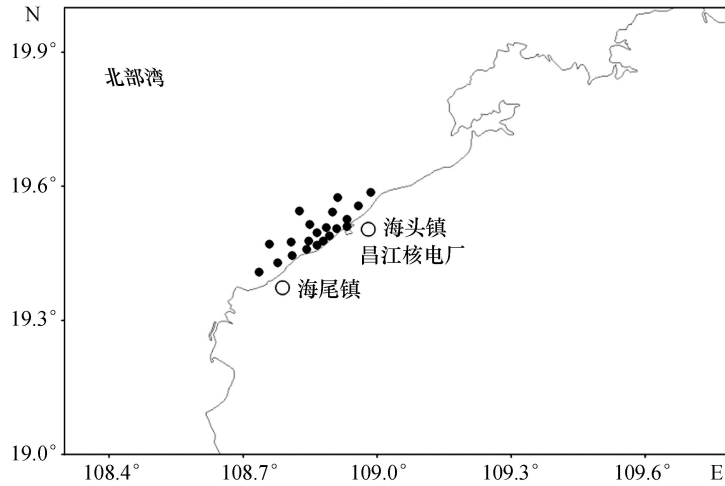


图 1 2009 年海南昌江核电厂周围海域放射性调查布点示意图

Fig. 1 Site distribution of marine radioactivity survey around Hainan Changjiang nuclear power plant (NPP) in 2009

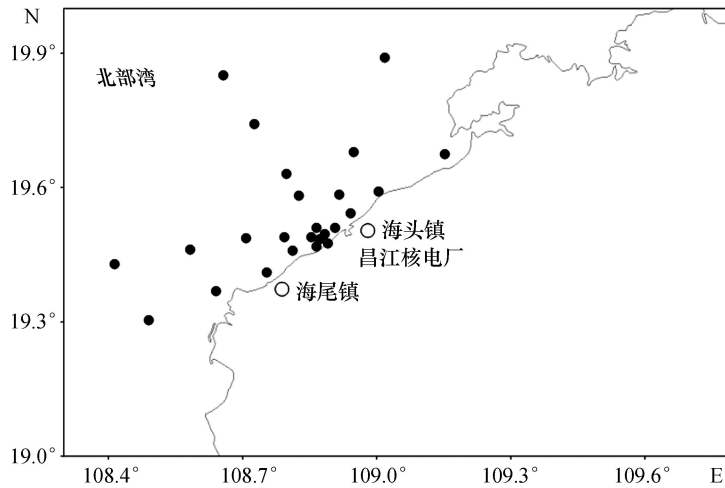


图 2 2017 年海南昌江核电厂周围海域放射性调查布点示意图

Fig. 2 Site distribution of marine radioactivity survey around Hainan Changjiang NPP in 2017

表 1 2009 年和 2017 年海南昌江核电厂周围海域放射性调查内容

Tab. 1 Contents of marine radioactivity survey around Hainan Changjiang NPP in 2009 and 2017

时间	项目	范围/km	站位/种类	要素
2009 年秋、2010 年春	海水	20	21 个站位	总铀、总 β、 <sup>90</sup> Sr、 <sup>3</sup> H、 <sup>226</sup> Ra、 <sup>58</sup> Co、 <sup>60</sup> Co、 <sup>134</sup> Cs、 <sup>137</sup> Cs、 <sup>110m</sup> Ag
2009 年秋	沉积物	20	12 个站位	总铀、总 β、 <sup>90</sup> Sr、 <sup>58</sup> Co、 <sup>60</sup> Co、 <sup>137</sup> Cs、 <sup>110m</sup> Ag、 <sup>226</sup> Ra、 <sup>232</sup> Th、 <sup>40</sup> K、 <sup>54</sup> Mn
2009 年秋、2010 年春	海洋生物	20	10 种	总铀、总 β、 <sup>90</sup> Sr、 <sup>226</sup> Ra、 <sup>40</sup> K、 <sup>58</sup> Co、 <sup>60</sup> Co、 <sup>134</sup> Cs、 <sup>137</sup> Cs、 <sup>110m</sup> Ag、 <sup>54</sup> Mn
2017 年春、夏、秋	海水	50	25 个站位	总铀、总 β、 <sup>3</sup> H、 <sup>14</sup> C、 <sup>40</sup> K、 <sup>54</sup> Mn、 <sup>58</sup> Co、 <sup>59</sup> Fe、 <sup>60</sup> Co、 <sup>65</sup> Zn、 <sup>89</sup> Sr、 <sup>90</sup> Sr、 <sup>106</sup> Rh、 <sup>106</sup> Ru、 <sup>110m</sup> Ag、 <sup>131</sup> I、 <sup>134</sup> Cs、 <sup>137</sup> Cs、 <sup>226</sup> Ra
2017 年春	沉积物	50	25 个站位	总铀、总 β、 <sup>40</sup> K、 <sup>54</sup> Mn、 <sup>58</sup> Co、 <sup>59</sup> Fe、 <sup>60</sup> Co、 <sup>90</sup> Sr、 <sup>106</sup> Rh、 <sup>106</sup> Ru、 <sup>110m</sup> Ag、 <sup>134</sup> Cs、 <sup>137</sup> Cs、 <sup>226</sup> Ra、 <sup>232</sup> Th
2017 年春、夏、秋	海洋生物	50	12 种	总铀、总 β、 <sup>3</sup> H、 <sup>14</sup> C、 <sup>40</sup> K、 <sup>54</sup> Mn、 <sup>58</sup> Co、 <sup>59</sup> Fe、 <sup>60</sup> Co、 <sup>65</sup> Zn、 <sup>90</sup> Sr、 <sup>106</sup> Rh、 <sup>106</sup> Ru、 <sup>110m</sup> Ag、 <sup>134</sup> Cs、 <sup>137</sup> Cs、 <sup>226</sup> Ra

1.2.2 放化分析 两次调查均参照了当时最新的标准规范要求进行分析,采用了非标的方法,具体如表 2 所示。

表 2 海南昌江核电厂周围海域放射性调查分析方法

Tab. 2 Analysis methods for marine radioactivity survey around Hainan Changjiang NPP

要素	分析介质	检测下限 (LLD)	分析方法	依据标准规范
总铀	海水	0.17 $\mu\text{g/L}$	激光荧光法	标准[4] 标准[5]
	沉积物	0.02 $\mu\text{g/g}$		
	海洋生物	0.02 $\mu\text{g/g}$ (灰)		
$^{40}\text{K}$	海水	0.038 Bq/L	原子吸收分光光度法 $\gamma$ 能谱法 $\gamma$ 能谱法	标准[6] 标准[7] 标准[5]
	沉积物	3.9 Bq/kg		
	海洋生物	5.9 mBq/g(灰)		
$^{226}\text{Ra}$	海水	1.1 Bq/ $\text{m}^3$	多核素联合沉淀- $\gamma$ 能谱法 $\gamma$ 能谱法 $\gamma$ 能谱法	标准[5] 标准[7] 标准[8] 标准[9] 标准[10] 标准[11]
	沉积物	1.3 Bq/kg		
	海洋生物	1.5 mBq/g(灰)		
$^{232}\text{Th}$	沉积物	0.93 Bq/kg	$\gamma$ 能谱法 $\gamma$ 能谱法	
	海洋生物	1.3 mBq/g(灰)		
$^{238}\text{U}$	沉积物	10.6 Bq/kg	$\gamma$ 能谱法	
$^{134}\text{Cs}$	海水	0.29 Bq/ $\text{m}^3$	AMP 富集- $\gamma$ 能谱法 $\gamma$ 能谱法 $\gamma$ 能谱法	
	沉积物	0.34 Bq/kg		
	海洋生物	0.54 mBq/g(灰)		
$^{137}\text{Cs}$	海水	0.28 Bq/ $\text{m}^3$	AMP 富集- $\gamma$ 能谱法 $\gamma$ 能谱法 $\gamma$ 能谱法	
	沉积物	0.41 Bq/kg		
	海洋生物	0.62 mBq/g(灰)		
$^{58}\text{Co}$	海水	0.24 Bq/ $\text{m}^3$	多核素联合沉淀- $\gamma$ 能谱法 $\gamma$ 能谱法 $\gamma$ 能谱法	
	沉积物	0.36 Bq/kg		
	海洋生物	0.67 mBq/g(灰)		
$^{60}\text{Co}$	海水	0.35 Bq/ $\text{m}^3$	多核素联合沉淀- $\gamma$ 能谱法 $\gamma$ 能谱法 $\gamma$ 能谱法	
	沉积物	0.44 Bq/kg		
	海洋生物	1.2 mBq/g(灰)		
$^{54}\text{Mn}$	海水	0.30 Bq/ $\text{m}^3$	多核素联合沉淀- $\gamma$ 能谱法 $\gamma$ 能谱法 $\gamma$ 能谱法	
	沉积物	0.39 Bq/kg		
	海洋生物	0.69 mBq/g(灰)		
$^{65}\text{Zn}$	海水	0.71 Bq/ $\text{m}^3$	多核素联合沉淀- $\gamma$ 能谱法 $\gamma$ 能谱法	
	海洋生物	1.9 mBq/g(灰)		
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	海水	0.32 Bq/ $\text{m}^3$	多核素联合沉淀- $\gamma$ 能谱法 $\gamma$ 能谱法 $\gamma$ 能谱法	
	沉积物	0.35 Bq/kg		
	海洋生物	0.58 mBq/g(灰)		
$^{131}\text{I}$	海水	3.2 Bq/ $\text{m}^3$	离子交换树脂富集- $\gamma$ 能谱法 $\gamma$ 能谱法	标准[12] 标准[7]
	沉积物	0.34 Bq/kg		
总 $\beta$	海水	1.0 Bq/ $\text{m}^3$	铁明矾-氯化钡法 直接铺样法 直接铺样法	标准[5]
	沉积物	30 Bq/kg		
	海洋生物	0.03 Bq/g(灰)		
$^{90}\text{Sr}$	海水	0.1 Bq/ $\text{m}^3$	HDEHP 萃取- $\beta$ 计数法	标准[5]
	沉积物	0.05 Bq/kg		
	海洋生物	0.49 mBq/g(灰)		
$^{89}\text{Sr}$	海水	0.40 Bq/ $\text{m}^3$	HDEHP 萃取- $\beta$ 计数法	非标

续表 2

要素	分析介质	检测下限(LLD)	分析方法	依据标准规范
$^3\text{H}$	海水	0.08 Bq/L	电解富集-液体闪烁计数法	标准[13]
	海洋生物	1.07 Bq/L(水)	燃烧-液体闪烁计数法	非标
$^{14}\text{C}$	海水	0.02 Bq/g	液体闪烁计数法	非标
	海洋生物		燃烧-液体闪烁计数法	
$^{106}\text{Ru}/$ $^{106}\text{Rh}$	海水	2.4 Bq/m <sup>3</sup>	CoS 共沉淀- $\gamma$ 能谱法	非标
	沉积物	3.3 Bq/kg	$\gamma$ 能谱法	标准[7]
	海洋生物	5.1 mBq/g(灰)	$\gamma$ 能谱法	标准[11]
$^{137}\text{Cs}$	海水	0.15 Bq/m <sup>3</sup>	AMP 吸附- $\text{Cs}_2\text{PtCl}_6$ 沉淀- $\beta$ 计数法	文献[14]
	沉积物	2.60 Bq/kg		
	海洋生物	2.60 Bq/kg		

1.2.3 测量误差 对于数据的测量误差,两次调查在样品比活度的测量过程中计算了比活度的标准偏差。计算式如下:

$$\sigma_A = \frac{A}{n_s} \sqrt{\frac{n_b}{t_b} + \frac{n_{s+b}}{t_s}} = \frac{A}{n_s} \sqrt{\frac{N_b}{t_b^2} + \frac{N_{s+b}}{t_s^2}} \quad (1)$$

式(1)中: $A$ 指样品中某核素的比活度; $n_s$ 指样品的净计数率(cps); $n_b$ 指本底计数率(cps); $n_{s+b}$ 指样品加本底计数率(cps); $t_b$ 指本底测量时间(s); $t_s$ 指本底和样品的测量时间(s); $N_b$ 指本底总计数; $N_{s+b}$ 指样品加本底总计数。

## 2 调查结果与分析

2009年海南昌江核电厂周围海域放射性调查结果为:海水除 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 测量结果全部低于探测限之外,其他要素均有高于探测限的测值;沉积物除 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 测量结果全部低于探测限之外,其他要素均有高于探测限的测值;海洋生物除 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 测量结果全部低于探测限之外,其他要素均有高于探测限的测值。

2017年海南昌江核电厂周围海域放射性调查结果为:海水除 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{59}\text{Fe}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{65}\text{Zn}$ 、 $^{89}\text{Sr}$ 、 $^{106}\text{Ru}$ 、 $^{106}\text{Rh}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 测量结果全部低于探测限之外,其他要素均有高于探测限的测值;沉积物除 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{59}\text{Fe}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{65}\text{Zn}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 测量结果全部低于探测限之外,其他要素均有高于探测限的测值;海洋生物除 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{59}\text{Fe}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{65}\text{Zn}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{106}\text{Ru}$ 、 $^{106}\text{Rh}$ 测量结果全部低于探测限之外,其他要素均有高于探测限的测值。

海南昌江核电厂1、2号机组运行后,核电厂采用槽式排放的方式排放放射性废液。废液中主要的放射性核素包括 $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{51}\text{Cr}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{59}\text{Fe}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{124}\text{Sb}$ 、 $^{125}\text{Sb}$ 、 $^{131}\text{I}$ 、 $^{133}\text{I}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ <sup>[15-16]</sup>。考虑到核电厂废液排放情况,选取了两次

调查均包含的且属于废液排放的核素进行对比分析。

### 2.1 海水

对于海水,选取了 $^3\text{H}$ 、总 $\beta$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 等测量结果,并对每个航次平均值再进行等权重平均,计算得到两次调查数据的比值 $R_{\text{海水}}$ ,如表3所示。除 $^{90}\text{Sr}$ 的两次调查比值为0.27, $^3\text{H}$ 、总 $\beta$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 的两次调查比值均在0.50~2.00区间范围内。

对比结果显示:除第二次调查中 $^{90}\text{Sr}$ 测量结果比首次调查低之外,两次调查中其他测量项目的范围和平均值基本处于同一水平。可认为海南昌江核电厂1、2号机组的运行未对周围海域海水放射性水平产生明显影响。对于 $^{90}\text{Sr}$ ,建议在后续监测工作中进一步关注。

### 2.2 沉积物

对于沉积物,选取了总 $\beta$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 等测量结果,并计算得到两次调查数据的比值 $R_{\text{沉积物}}$ ,如表4所示。除 $^{90}\text{Sr}$ 的两次调查比值为2.20,总 $\beta$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 的两次调查比值均在0.50~2.00区间范围内。

对比结果显示:除第二次调查中 $^{90}\text{Sr}$ 测量结果比首次调查高之外,两次调查中其他测量项目的范围和平均值基本处于同一水平。可认为海南昌江核电厂1、2号机组的运行未对周围海域沉积物放射性水平产生明显影响。对于 $^{90}\text{Sr}$ ,建议在后续监测工作中进一步关注。

### 2.3 海洋生物

对于海洋生物,由于不同航次在现场采集和购买的方式获取的海洋生物样品不完全一样。对于同一种核素,不同海洋生物之间的测量结果通常差别较大<sup>[17-19]</sup>。因此选取了各航次基本都获取的4种

生物:文蛤 (*Meretrix lyrata*)、海鳗 (*Muraenesox cinereus*)、对虾 (*Metapenaeus affinis*)、麒麟菜 (*Eucheuma muricatum*), 选取了它们的总  $\beta$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 、 $^{60}\text{Co}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  等测量结果, 并对每个航次平均值再进行等权重平均, 计算得到两次调查数据的比值  $R_{\text{文蛤}}$ 、 $R_{\text{海鳗}}$ 、 $R_{\text{对虾}}$ 、 $R_{\text{麒麟菜}}$ , 如表 5 所示。除文

蛤、海鳗中  $^{90}\text{Sr}$  的两次调查比值为 2.73 和 0.31, 其余结果均在 0.50 ~ 2.00 区间范围内。

对比结果显示: 两次调查中测量项目的测量结果基本处于同一水平。可认为海南昌江核电厂 1、2 号机组的运行未对周围海域海洋生物放射性水平产生明显影响。

表 3 2009 年和 2017 年海南昌江核电厂周围海域放射性调查的海水调查结果对比

Tab. 3 Comparison of seawater radioactivities from marine radioactivity survey around Hainan Changjiang NPP in 2009 and 2017

调查批次	统计项目	比活度							
		$^3\text{H}/$ (Bq · L <sup>-1</sup> )	总 $\beta/$ (mBq · L <sup>-1</sup> )	$^{58}\text{Co}/$ (mBq · L <sup>-1</sup> )	$^{60}\text{Co}/$ (mBq · L <sup>-1</sup> )	$^{90}\text{Sr}/$ (mBq · L <sup>-1</sup> )	$^{110\text{m}}\text{Ag}/$ (mBq · L <sup>-1</sup> )	$^{134}\text{Cs}/$ (mBq · L <sup>-1</sup> )	$^{137}\text{Cs}/$ (mBq · L <sup>-1</sup> )
2009 年调查	范围(2009 年秋)	0.10 ~ 0.40	41.3 ~ 58.0	—	—	1.6 ~ 6.2	—	—	1.0 ~ 2.1
	平均值(2009 年秋)	0.20 ± 0.02	49.8 ± 3.9	—	—	3.2 ± 0.2	—	—	1.4 ± 0.1
	范围(2010 年春)	0.10 ~ 0.30	28.6 ~ 74.4	—	—	1.3 ~ 5.5	—	—	0.7 ~ 1.9
	平均值(2010 年春)	0.20 ± 0.02	51.2 ± 4.1	—	—	2.5 ± 0.2	—	—	1.3 ± 0.1
2017 年调查	范围(2017 年春)	0.09 ~ 0.73	41.4 ~ 81.6	—	—	0.3 ~ 2.9	—	—	1.0 ~ 1.7
	平均值(2017 年春)	0.27 ± 0.16	58.2 ± 10.7	—	—	0.8 ± 0.5	—	—	1.4 ± 0.2
	范围(2017 年夏)	0.08 ~ 0.82	25.8 ~ 129.9	—	—	0.2 ~ 1.3	—	—	1.0 ~ 1.7
	平均值(2017 年夏)	0.35 ± 0.14	54.0 ± 28.5	—	—	0.7 ± 0.2	—	—	1.4 ± 0.2
	范围(2017 年秋)	0.10 ~ 0.40	35.2 ~ 87.6	—	—	0.3 ~ 1.9	—	—	0.7 ~ 2.1
	平均值(2017 年秋)	0.23 ± 0.08	58.3 ± 15.5	—	—	0.8 ± 0.5	—	—	1.3 ± 0.3
两次调查 比值	$R_{\text{海水}}$	1.42	1.13	—	—	0.26	—	—	1.01

$$\text{注: } R_{\text{海水}} = \frac{(B_1 + B_2 + B_3)/3}{(A_1 + A_2)/2}。$$

表 4 2009 年和 2017 年海南昌江核电厂周围海域放射性调查的沉积物调查结果对比

Tab. 4 Comparison of sediment radioactivities from marine radioactivity survey around Hainan Changjiang NPP in 2009 and 2017

调查批次	统计项目	比活度						
		总 $\beta/$ (Bq · Kg <sup>-1</sup> )	$^{54}\text{Mn}/$ (Bq · Kg <sup>-1</sup> )	$^{58}\text{Co}/$ (Bq · Kg <sup>-1</sup> )	$^{60}\text{Co}/$ (Bq · Kg <sup>-1</sup> )	$^{90}\text{Sr}/$ (Bq · Kg <sup>-1</sup> )	$^{110\text{m}}\text{Ag}/$ (Bq · Kg <sup>-1</sup> )	$^{137}\text{Cs}/$ (Bq · Kg <sup>-1</sup> )
2009 年调查	范围	270 ~ 1 030	—	—	—	0.30 ~ 1.00	—	0.2 ~ 1.5
	平均值	600 ± 40	—	—	—	0.50 ± 0.03	—	0.9 ± 0.1
2017 年调查	范围	306 ~ 1 081	—	—	—	0.05 ~ 4.60	—	< LLD ~ 1.3
	平均值	772 ± 231	—	—	—	1.10 ± 1.44	—	0.6 ± 0.3
两次调查 比值	$R_{\text{沉积物}}$	1.29	—	—	—	2.20	—	0.61

$$\text{注: } R_{\text{沉积物}} = \frac{B}{A}。$$

表 5 2009 年和 2017 年海南昌江核电厂周围海域放射性调查的海洋生物调查结果对比

Tab.5 Comparison of marine organism radioactivities from marine radioactivity survey around Hainan Changjiang NPP in 2009 and 2017

生物品种	统计项目	比活度							
		总 β/(Bq · Kg <sup>-1</sup> )鲜	<sup>54</sup> Mn/(Bq · Kg <sup>-1</sup> )鲜	<sup>58</sup> Co/(Bq · Kg <sup>-1</sup> )鲜	<sup>60</sup> Co/(Bq · Kg <sup>-1</sup> )鲜	<sup>90</sup> Sr/(Bq · Kg <sup>-1</sup> )鲜	<sup>110m</sup> Ag/(Bq · Kg <sup>-1</sup> )鲜	<sup>134</sup> Cs/(Bq · Kg <sup>-1</sup> )鲜	<sup>137</sup> Cs/(Bq · Kg <sup>-1</sup> )鲜
文蛤(2017 年秋无样品)	平均值(2009 年秋)	44.6 ± 3.6	—	—	—	0.232 5 ± 0.012 7	—	—	—
	平均值(2010 年春)	38.5 ± 3.0	—	—	—	0.313 8 ± 0.013 8	—	—	—
	平均值(2017 年春)	45.9 ± 0.5	—	—	—	0.760 0 ± 0.020 0	—	—	0.008 ± 0.001
	平均值(2017 年夏)	38.1 ± 0.4	—	—	—	0.731 0 ± 0.010 0	—	—	—
两次调查比值	R <sub>文蛤</sub>	1.01	—	—	—	2.73	—	—	—
海鳗(2017 年夏无样品)	平均值(2009 年秋)	98.6 ± 15.2	—	—	—	0.084 2 ± 0.004 1	—	—	0.085 ± 0.010
	平均值(2010 年春)	96.3 ± 32.4	—	—	—	0.092 5 ± 0.004 4	—	—	—
	平均值(2017 年春)	90.3 ± 0.9	—	—	—	0.020 0 ± 0.010 0	—	—	0.043 ± 0.001
	平均值(2017 年秋)	88.6 ± 0.8	—	—	—	0.035 0 ± 0.010 0	—	—	0.036 ± 0.002
两次调查比值	R <sub>海鳗</sub>	0.92	—	—	—	0.31	—	—	—
对虾	平均值(2009 年秋)	42.4 ± 4.4	—	—	—	0.083 3 ± 0.004 9	—	—	—
	平均值(2010 年春)	52.7 ± 6.6	—	—	—	0.165 3 ± 0.009 7	—	—	—
	平均值(2017 年春)	90.1 ± 1.1	—	—	—	0.190 0 ± 0.010 0	—	—	—
	平均值(2017 年夏)	79.8 ± 1.0	—	—	—	0.045 0 ± 0.010 0	—	—	0.019 ± 0.002
	平均值(2017 年秋)	34.7 ± 1.2	—	—	—	0.409 0 ± 0.020 0	—	—	—
两次调查比值	R <sub>对虾</sub>	1.43	—	—	—	1.73	—	—	—
麒麟菜	平均值(2009 年秋)	158.7 ± 19.4	0.027 ± 0.002	—	—	0.791 8 ± 0.057 0	—	—	0.020 ± 0.002
	平均值(2010 年春)	177.6 ± 24.8	—	—	—	1.032 7 ± 0.072 1	—	—	—
	平均值(2017 年春)	438.4 ± 4.5	—	—	—	1.640 0 ± 0.050 0	—	—	—
	平均值(2017 年夏)	332.9 ± 2.4	—	—	—	1.011 0 ± 0.040 0	—	—	—
	平均值(2017 年秋)	68.1 ± 0.8	—	—	—	1.145 0 ± 0.020 0	—	—	—
两次调查比值	R <sub>麒麟菜</sub>	1.66	—	—	—	1.39	—	—	—

注:  $R_{\text{文蛤}} = \frac{D_1 + D_2}{C_1 + C_2}$ ,  $R_{\text{海鳗}} = \frac{F_1 + F_2}{E_1 + E_2}$ ,  $R_{\text{对虾}} = \frac{(H_1 + H_2 + H_3)/3}{(G_1 + G_2)/2}$ ,  $R_{\text{麒麟菜}} = \frac{(J_1 + J_2 + J_3)/3}{(I_1 + I_2)/2}$ 。

## 2.4 与其他海域海水数据对比

2017 年全国辐射环境质量报告<sup>[20]</sup>按照不同海域给出了全国近岸海域海水中 U、Th、<sup>226</sup>Ra、<sup>90</sup>Sr 和 <sup>137</sup>Cs 的监测结果范围。根据两次调查的测量要素,选取了上述报告中海南、广西、广东、福建等 4 个

海域海水中 U、<sup>226</sup>Ra、<sup>90</sup>Sr 和 <sup>137</sup>Cs 的数据进行对比,如表 6 所示。

对比结果显示:两次调查海水中的测量结果范围与 2017 年邻近的其他海域监测结果范围基本相同。

表 6 2009 年和 2017 年海南昌江核电站周围海域放射性调查的海水调查结果与其他海域数据对比  
Tab.6 Comparison of seawater radioactivities from marine radioactivity survey around Hainan Changjiang NPP in 2009 and 2017 with the data from other sea areas

调查批次	比活度			
	U/( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	<sup>226</sup> Ra/( $\text{mBq} \cdot \text{L}^{-1}$ )	<sup>90</sup> Sr/( $\text{mBq} \cdot \text{L}^{-1}$ )	<sup>137</sup> Cs/( $\text{mBq} \cdot \text{L}^{-1}$ )
2009 年调查	1.3 ~ 2.9	2.1 ~ 12.1	1.3 ~ 6.2	0.7 ~ 2.1
2017 年调查	1.2 ~ 2.8	1.6 ~ 3.8	0.2 ~ 2.9	0.7 ~ 2.1
海南 <sup>[20]</sup>	2.5 ~ 3.1	3.2 ~ 6.4	0.49 ~ 1.8	1.0 ~ 1.1
广西 <sup>[20]</sup>	1.2 ~ 1.5	6.5 ~ 9.0	2.4 ~ 3.4	0.9 ~ 1.6
广东 <sup>[20]</sup>	1.4 ~ 3.4	5.2 ~ 10	0.56 ~ 1.1	1.0 ~ 2.5
福建 <sup>[20]</sup>	1.5 ~ 2.2	5.1 ~ 8.0	0.61 ~ 1.2	1.6 ~ 2.0

## 3 结论

两次调查由同一家单位完成,采样、处理、分析方法均按照相关标准规范要求进行,数据的可比性较好。海南昌江核电站 1、2 号机组的运行时间介于两次调查时间之中。通过选取两次调查均包含的且属于核电站废液排放的核素进行对比分析,结果显示:两次调查中海水、沉积物、海洋生物的绝大部分测量结果基本处于同一水平,可认为海南昌江核电站 1、2 号机组的运行未对周围海域环境放射性水平产生明显影响。两次调查海水中的测量结果范围与

2017 年邻近的其他海域监测结果范围基本相同。

第二次调查中海水的 <sup>90</sup>Sr 测量结果比首次调查低,第二次调查中沉积物的 <sup>90</sup>Sr 测量结果比首次调查高,但两次测量结果均与本底水平相当。两次测量结果的差异可能由于:(1)低水平放射性测量的涨落;(2)由于海水的流动性,<sup>90</sup>Sr 的扩散稀释作用;(3)由于海洋沉积作用,沉积物中 <sup>90</sup>Sr 的积累效应。上述可能性仍待进一步分析确认,建议在后续监测工作中关注 <sup>90</sup>Sr,并与相关测量结果进行比对。

## 参考文献:

- [1] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会. 海洋工程环境影响评价技术导则: GB/T 19485—2004[S]. 北京:中国标准出版社,2004.
- [2] 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:中国环境出版社,2001.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会. 海洋工程环境影响评价技术导则: GB/T 19485—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.
- [4] 核工业部. 水中微量铀分析方法: GB 6768—86[S]. 北京:中国标准出版社,1986.
- [5] 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.
- [6] 国家环境保护局,核工业部. 水中钾-40 的分析方法: GB 11338—89[S]. 北京:中国标准出版社,1989.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会. 海洋沉积物中放射性核素的测定  $\gamma$  能谱法: GB/T 30738—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.
- [8] 核工业部. 水中铯-137 放射化学分析方法: GB 6767—86[S]. 北京:中国标准出版社,1986.
- [9] 国家环境保护局,核工业部. 生物样品灰中铯-137 的放射化学分析方法: GB 11221—89[S]. 北京:中国标准出版社,1989.
- [10] 国家技术监督局,卫生部. 水中放射性核素的  $\gamma$  能谱分析方法: GB/T 16140—1995[S]. 北京:中国标准出版社,1995.

- [11] 国家技术监督局, 卫生部. 生物样品中放射性核素的  $\gamma$  能谱分析方法: GB/T 16145—1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [12] 国家环境保护局, 国家技术监督局. 水中碘-131 的分析方法: GB/T 13272—1991[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- [13] 国家环境保护局, 中国核工业总公司. 水中氚的分析方法: GB 12375—90[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
- [14] 陈国珍. 海水痕量分析[M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
- [15] 海南核电有限公司. 海南昌江核电厂环境辐射监测年报[R]. 昌江: 海南核电有限公司, 2016.
- [16] 海南核电有限公司. 海南昌江核电厂环境辐射监测年报[R]. 昌江: 海南核电有限公司, 2017.
- [17] 蔡福龙, 吴晋平, 陈其焕, 等.  $^{60}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  在几种海洋生物中浓集问题的初步研究[J]. 海洋学报, 1980, 2(2): 81-92.
- [18] 国家海洋局第一海洋研究所环保组. 渤海放射性调查研究[J]. 海洋环境科学, 1985, 4(2): 1-10.
- [19] 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.
- [20] 生态环境部. 2017 全国辐射环境质量报告[R]. 北京: 生态环境部, 2018.

## Result analysis of two marine radioactivity surveys in the adjacent waters of Hainan Changjiang NPP

LIU Wei-rong<sup>1</sup>, QI Yu-hong<sup>1</sup>, LIN Feng<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** To acquire the marine radioactivity level around Hainan Changjiang NPP, two marine radioactivity surveys were conducted in 2009 and 2017. The medium, scope, frequency, site and item of two surveys were set according to officially issued standards or specifications. The methods of sampling, pretreatment and radiochemical analysis were also referred to the update standards related. The comparison results of two surveys show that the radioactivity levels in most of seawater, sediment and marine organism samples are not significantly different. It can be concluded that the operation of Hainan Changjiang NPP Unit 1 and 2 did not have an obvious influence on marine radioactivity level around the plant. It is suggested that  $^{90}\text{Sr}$  monitoring should be concerned in the future work.

**Key words:** marine chemistry; marine radioactivity; environmental monitoring; nuclear power plant

DOI: 10.3969/J. ISSN.2095-4972.2020.01.009

(责任编辑:杜俊民)