

# 阳江核电站附近海域表层沉积物中 $\gamma$ 放射性核素含量水平

吴梅桂, 周鹏, 赵峰, 李冬梅, 赵力, 郑远来,  
蔡伟叙, 方宏达, 娄全胜

(国家海洋局南海环境监测中心, 广东 广州 510300)

**摘要:**用 HPGe- $\gamma$  谱分析方法测定了阳江核电海域表层沉积物中 $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{228}\text{Th}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{58}\text{Co}$  和  $^{60}\text{Co}$  共 11 种核素的比活度, $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{228}\text{Th}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  等 7 种核素的放射性比活度范围分别为 75.2 ~ 102.0、32.6 ~ 38.6、86.9 ~ 148、54.3 ~ 71.3、40.9 ~ 70.6、580 ~ 660 和 < 0.16 ~ 3.82 Bq/kg<sub>干重</sub>, 平均值分别为 82.4±5.2、35.5±2.0、121.7±14、60.2±3.1、57.1±3.1、621±29 和 2.21±0.31 Bq/kg<sub>干重</sub>, $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{58}\text{Co}$  和  $^{60}\text{Co}$  等 4 种核素的比活度均低于检测限。沉积物中 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 、 $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  和  $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}$  比值的范围分别为 0.35 ~ 0.48、2.63 ~ 4.17 和 0.96 ~ 1.36, 平均值分别为 0.43、3.43 和 1.06。结果显示, 该海域表层沉积物中 $^{210}\text{Pb}$  相对于 $^{226}\text{Ra}$  过剩, $^{226}\text{Ra}$  相对于 $^{238}\text{U}$  亏损, 而 $^{228}\text{Th}$  与 $^{228}\text{Ra}$  基本平衡; 沉积物中  $\gamma$  放射性核素含量水平与粒度分布、离岸距离无明显相关性。

**关键词:**放射性核素;  $\gamma$  能谱; 海洋表层沉积物; 阳江核电站

中图分类号: P736

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2018)01-0043-05

## The concentration of $\gamma$ radionuclides in surface marine sediments from Yangjiang nuclear power plant and its adjacent sea area, South China Sea

WU Mei-gui, ZHOU Peng, ZHAO Feng, LI Dong-mei, ZHAO Li, ZHENG Yuan-lai,  
CAI Wei-xu, FANG Hong-da, LOU Quan-sheng

(South China Sea Environmental Monitoring Center, SOA, Guangzhou 510300, China)

**Abstract:** Some radionuclides in surface marine sediments from Yangjiang nuclear power plant and its adjacent sea area were measured using HPGe  $\gamma$  spectrometer. The specific activities of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  were 75.2 ~ 102.0, 32.6 ~ 38.6, 86.9 ~ 148, 54.3 ~ 71.3, 40.9 ~ 70.6, 580 ~ 660 and < 0.16 ~ 3.82 Bq/kg<sub>DW</sub>, with the mean of 82.4±5.2, 35.5±2.0, 121.7±14, 60.2±3.1, 57.1±3.1, 621±29 and 2.21±0.31 Bq/kg<sub>DW</sub>, respectively. The specific activities of  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{58}\text{Co}$  and  $^{60}\text{Co}$  were below the limit of method. Ratio( $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ ) and Ratio( $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ ) were 0.35 ~ 0.48 and 2.63 ~ 4.17, with the mean of 0.43 and 3.43, respectively. It was shown that the uranium decay series was in disequilibrium in the surface sediments, where  $^{210}\text{Pb}$  relative of  $^{226}\text{Ra}$  were excess while  $^{226}\text{Ra}$  relative of  $^{238}\text{U}$  was deficient. The average value of Ratio( $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}$ ) was 1.06, ranging from 0.96 to 1.36. It was shown that  $^{228}\text{Th}$  and  $^{228}\text{Ra}$  was in equilibrium in the surface sediments. No obvious relationship was found among the specific activities of radionuclides in sediments, the grain size characteristics and the offshore distance.

**Key words:** radionuclide;  $\gamma$  spectroscopy; surface sediment; Yangjiang nuclear power plant

收稿日期: 2017-02-16, 修订日期: 2017-06-16

基金项目: 国家海洋局南海分局海洋科学技术局长基金项目 (1332, 1333); 国家海洋公益性项目 (201505005-6)

作者简介: 吴梅桂 (1986-), 女, 福建晋江人, 硕士, 主要从事海洋环境放射性监测与评价和同位素海洋化学等研究, E-mail: rosemg1027@163.com

通讯作者: 周鹏 (1976-), 男, 河南开封人, 主要从事海洋环境放射性监测与评价、海洋核事故应急监测与评价以及同位素海洋化学等研究, E-mail: samzhou2@126.com

阳江核电站位于粤西阳江市东平镇沙环村,三面环山,南面临海。阳江核电站主体工程开工于2008年底,共6台机组,其中前三号机组已于2014年、2015年投入商业运行,其余机组也将在2017年全部建设完成并投入商业运行。阳江核电站濒临南海,海域开阔,近年来对该海域的调查研究主要有:张祥玉于2000年对阳江核电站址及其附近海域的气候进行了综合分析<sup>[1]</sup>。在海洋生态研究方面,1994年广东省海岛资源综合调查大队、2003年张俊彬和黄增岳先后对该海域的鱼卵和仔鱼进行了调查<sup>[2-3]</sup>。在放射性监测预评价方面,张晓峰等于2009年对阳江核电厂附近海域进行生物辐射影响评价研究<sup>[4]</sup>;邓飞等于2015年对阳江核电厂周围环境中<sup>3</sup>H的浓度进行了调查<sup>[5]</sup>。本次调查采样时间为2012年5月,正值阳江核电站投入商业运行前,期望本调查结果能够为将来科学评价阳江核电站运行前后海洋生态环境变化以及周边环境放射性水平的监测工作提供基础数据。

海洋沉积物中的放射性核素<sup>40</sup>K, <sup>137</sup>Cs, <sup>210</sup>Pb, <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra, <sup>228</sup>Th 和 <sup>238</sup>U 等可以用 $\gamma$ 谱同时测定而无需复杂的化学分离过程<sup>[6-9]</sup>,目前已经成为环境放射性监测和调查以及同位素海洋化学研究的一种基本技术手段。本文用 $\gamma$ 谱方法测定了2012年阳江核电海域表层沉积物的放射性核素含量水平,研究了其中 $\gamma$ 放射性核素的分布规律。

本调查测定的人工放射性核素除了<sup>137</sup>Cs外还包括<sup>134</sup>Cs、<sup>110m</sup>Ag、<sup>58</sup>Co 和 <sup>60</sup>Co。海洋环境中这些放射性核素主要来源于核设施活动及核试验等。其中,<sup>60</sup>Co是反应堆结构材料和冷却水中的杂质因中子活化而生成的感生放射性核素,放射性毒性高,海洋生物对它有较高的浓集效应,有可能经食物链被人体吸收积累。这些核素的测定,对于海洋环境放射性水平评价监测具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究海域

广东省阳江市所在区域是我国较著名的天然放射性高本底地区之一,已有的研究表明,该

区域的高本底天然辐射地区面积约为500 km<sup>2</sup>,高本底地区的辐射水平约为邻近正常本底地区的3倍或更高<sup>[10]</sup>。阳江核电站厂址距该区域高本底天然辐射地区的边缘在30 km以上,厂址所在位置的天然放射性水平属于一般地区正常天然本底水平。阳江核电厂址近岸水深5~9 m,潮汐为不正规半日潮,实测最高潮位为1.83 m,最大潮差为3.40 m。潮流呈明显的往复流形式,潮流流速较大,最大值为0.45~0.52 m/s<sup>[11-12]</sup>。

本次调查主要以阳江核电站入水口和排水口为基准点,开展附近海域表层沉积物放射性本底调查。具体站位布设见图1。

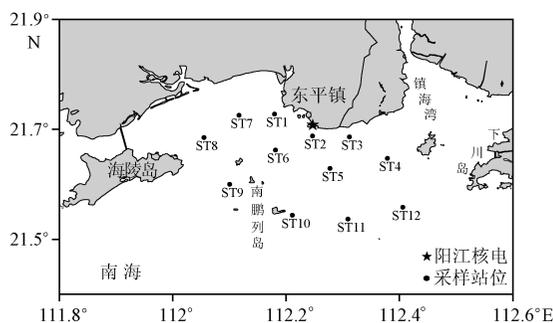


图1 阳江核电附近海域表层沉积物样品采集站位(2012年5月)

Fig. 1 The sampling stations of surface sediments from Yangjiang nuclear power plant and its adjacent sea area (May, 2012)

### 1.2 样品采集

本研究中样品均用抓斗式采泥器采集,采样时间为2012年5月,共12个沉积物。现场采集到的样品用塑料袋封装,回实验室晾干后磨细、混匀、80目过筛<sup>[13]</sup>,然后用 $\Phi 75 \times 50$  mm的聚乙烯塑料样品盒封装,密封放置20 d,使<sup>226</sup>Ra与其子体达到放射性衰变平衡。

### 1.3 粒度分析

沉积物的粒度采用激光粒度分析仪测定,分析方法参见《GB/T 12763.8 海洋调查规范》<sup>[14]</sup>,粒度分析结果误差小于3,遮光度小于30。沉积物的粒度分析结果显示所有站位的沉积物均为粉砂质沉积物,如表1。

表 1 阳江核电海域表层沉积物的粒度 (%) 分布

Tab. 1 Grain size characteristics (%) of surface sediments from Yangjiang nuclear power plant and its adjacent sea area

站位	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	ST6	ST7	ST8	ST9	ST10	ST11	ST12	
砾	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
粒级含量 (%)	砂	5	24.6	5.4	4.4	5.2	5.9	16.9	4.8	5.5	3.3	17.5	3.9
	粉砂	75.8	59	75.2	74.4	74	74.5	63.7	73.9	74.1	76.5	63.7	75.5
性状	粘土	19.2	16.4	19.4	21.2	20.8	19.6	19.4	21.3	20.4	20.2	18.8	20.6
	粉砂	粉砂	粉砂	粉砂	粉砂	粉砂	粉砂	粉砂	粉砂	粉砂	粉砂	粉砂	粉砂

## 1.4 放射性核素测量

本研究采用 BE5030 型高纯锗  $\gamma$  谱仪探测器测量样品中  $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{228}\text{Th}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{58}\text{Co}$  和  $^{60}\text{Co}$  等放射性核素。系统使用 S574 无源效率软件进行效率刻度,以仪器配送的 S/N:13000566 点源和河泥标准物质 GBW08304a(中国计量科学研究院)作为检测和验证。样品测量时间为 24 h。效率刻度与样品核素比活度的计算按照文献<sup>[6,15-17]</sup>所述方法进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 阳江核电海域表层沉积物中放射性核素分布特征

表 2 给出了表层沉积物中  $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{228}\text{Th}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  和  $^{137}\text{Cs}$  等 7 种核素的测量结果,其中  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 、 $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  和  $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}$  分别表示两种核素的活度比。 $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{228}\text{Th}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  和  $^{137}\text{Cs}$  的放射性比活度的变化范围分别为 75.2 ~ 102.0、32.6 ~ 38.6、86.9 ~ 148、54.3 ~ 71.3、40.9 ~ 70.6、580 ~ 660 和  $<0.16 \sim 3.82$  Bq/kg<sub>干重</sub>,平均值分别为  $82.4 \pm 5.2$ 、 $35.5 \pm 2.0$ 、 $121.7 \pm 14$ 、 $60.2 \pm 3.1$ 、 $57.1 \pm 3.1$ 、 $621 \pm 29$  和  $2.21 \pm 0.31$  Bq/kg<sub>干重</sub>。 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 、 $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  和  $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}$  变化范围分别为 0.35 ~ 0.48、2.63 ~ 4.17 和 0.96 ~ 1.36,平均值分别为  $0.43 \pm 0.04$ 、 $3.43 \pm 0.43$  和  $1.06 \pm 0.08$ 。表层沉积物中  $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{58}\text{Co}$  和  $^{60}\text{Co}$  等 4 种核素均为未检出,检出限分别为 0.40、0.42、0.45、0.54 Bq/kg。

阳江核电海域表层沉积物中  $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{228}\text{Th}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  和  $^{137}\text{Cs}$  等 7 种放射性核素

比活度变化较大,但各站位的核素活度基本处于相同水平。暂未发现各核素含量变化与沉积物粒度或者离岸距离明显的相关性。

阳江核电海域表层沉积物中的  $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$  和  $^{210}\text{Pb}$ ,其放射性呈现衰变不平衡性。沉积物样品中  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  比值范围在 0.35 ~ 0.48 之间,平均值为  $0.43 \pm 0.04$ 。陈敏等<sup>[18]</sup>在研究近岸海域沉积物中  $^{226}\text{Ra}$  分布特征时,发现中国近岸沉积物  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  的变化范围为 0.11 ~ 0.84,普遍存在  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  的不平衡,并且认为这是由镭的易迁移性质导致的<sup>[18]</sup>。本文所测值在其范围内,表明阳江核电海域表层沉积物中全部站点  $^{226}\text{Ra}$  相较于  $^{238}\text{U}$  亏损。 $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  的比活度比值在 2.63 ~ 4.17 之间,平均值为  $3.43 \pm 0.43$ 。表明该海域沉积物中  $^{210}\text{Pb}$  过剩明显。过剩的  $^{210}\text{Pb}$  主要来源于大气沉降,这是因为  $^{210}\text{Pb}$  具有显著颗粒活性,大气中的  $^{222}\text{Rn}$  衰变产生的  $^{210}\text{Pb}$  与海水中  $^{226}\text{Ra}$  产生的  $^{210}\text{Pb}$  一起吸附于颗粒物进入沉积物,从而造成了沉积物中  $^{210}\text{Pb}$  相对于  $^{226}\text{Ra}$  过剩<sup>[16,19]</sup>。 $^{228}\text{Ra}$  和  $^{228}\text{Th}$  均属钍系核素,  $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}$  的比活度比值范围在 0.96 ~ 1.36 之间,平均值为 1.06,  $^{228}\text{Ra}$  和  $^{228}\text{Th}$  的含量水平在实验误差范围内一致。在钍放射系中,除母体  $^{232}\text{Th}$  外,只有  $^{228}\text{Ra}$  和  $^{228}\text{Th}$  半衰期较长,分别为 5.75a 和 1.91a,其它核素半衰期较短,可以将钍系看做是由  $^{232}\text{Th}$ 、 $^{228}\text{Ra}$  和  $^{228}\text{Th}$  构成的三级衰变链,样品中  $^{228}\text{Ra}$  和  $^{228}\text{Th}$  的含量水平一致,说明所测样品中钍放射系是衰变平衡的<sup>[7]</sup>。阳江核电海域表层沉积物中  $^{228}\text{Th}$  与  $^{228}\text{Ra}$  基本平衡,不存在明显的  $^{228}\text{Th}$  过剩。

表2 阳江核电海域表层沉积物放射性核素含量 (Bq/kg<sub>干重</sub>)

Tab. 2 Contents (Bq/kg DW) of radionuclides in surface sediments from Yangjiang nuclear power plant and its adjacent sea area

站位	<sup>238</sup> U	<sup>226</sup> Ra	Ratio ( <sup>226</sup> Ra/ <sup>238</sup> U)	<sup>210</sup> Pb	Ratio ( <sup>210</sup> Pb/ <sup>226</sup> Ra)	<sup>228</sup> Th	<sup>228</sup> Ra	Ratio ( <sup>228</sup> Th/ <sup>228</sup> Ra)	<sup>40</sup> K	<sup>137</sup> Cs
ST1	80.4±4.9	38.6±2.3	0.48±0.04	108±13	2.80±0.38	64.1±3.3	58.6±3.2	1.09±0.08	611±28	2.07±0.25
ST2	75.2±4.5	33.1±1.8	0.44±0.04	86.9±11	2.63±0.36	64.5±3.3	61.9±3.2	1.04±0.08	601±28	<0.16 *
ST3	81.1±4.9	34.1±2.0	0.42±0.04	117±13	3.43±0.43	71.3±3.6	70.6±3.7	1.01±0.07	646±30	3.82±0.71
ST4	78.9±4.8	34.2±1.9	0.43±0.04	105±11	3.07±0.36	60.1±3.1	57.2±3.1	1.05±0.08	591±27	1.96±0.21
ST5	78.3±4.5	34.4±1.9	0.44±0.04	130±14	3.78±0.46	62.3±3.2	58.2±3.1	1.07±0.08	641±29	2.69±0.20
ST6	85.6±4.9	37.9±2.0	0.44±0.03	140±15	3.69±0.44	61.2±3.1	56.9±3.1	1.08±0.08	660±30	2.34±0.19
ST7	86.3±4.9	38.1±2.0	0.44±0.03	122±13	3.20±0.38	60.3±3.1	58.1±3.0	1.04±0.08	597±27	2.20±0.18
ST8	80.8±4.7	37.0±2.0	0.46±0.04	124±14	3.35±0.42	56.1±2.9	57.8±3.1	0.97±0.07	580±27	2.08±0.22
ST9	77.6±4.7	35.5±1.9	0.46±0.04	118±13	3.32±0.41	54.3±2.8	54.6±2.9	0.99±0.07	627±29	2.95±0.35
ST10	80.6±4.8	32.6±1.9	0.40±0.03	136±15	4.17±0.52	54.4±2.8	56.7±3.5	0.96±0.08	643±29	<0.17 *
ST11	82.1±4.9	34.8±2.0	0.42±0.04	126±17	3.62±0.53	55.6±2.9	40.9±2.2	1.36±0.10	607±28	3.25±0.42
ST12	102.0±10.0	36.1±2.0	0.35±0.04	148±16	4.10±0.50	58.3±3.0	53.2±3.1	1.10±0.09	651±30	2.94±0.34
均值	82.4±5.2	35.5±2.0	0.43±0.04	121.7±14	3.43±0.43	60.2±3.1	57.1±3.1	1.06±0.08	621±29	2.21±0.31
范围	75.2~102.0	32.6~38.6	0.35~0.48	86.9~148	2.63~4.17	54.3~71.3	40.9~70.6	0.96~1.36	580~660	<0.16~3.82

注: \* 低于检出限的数据,按 1/2 最低检出限参加统计计算

## 2.2 不同海域沉积物放射性核素含量水平的比较

表3给出了我国部分海域沉积物同本研究中<sup>238</sup>U、<sup>226</sup>Ra、<sup>210</sup>Pb、<sup>228</sup>Th、<sup>228</sup>Ra、<sup>40</sup>K和<sup>137</sup>Cs等7种放射性核素比活度的比较。

由表中数据可以看出,阳江核电海域表层沉积物中<sup>238</sup>U的比活度值在所列海域中为最高,明显高于渤海湾、胶州湾、厦门海域以及南海东北部等海域,与大亚湾、黄茅海-广海湾海域的值较为接近。赵一阳等<sup>[20]</sup>在文章中提到波罗的海沉积物中<sup>238</sup>U的比活度为85.6 Bq/kg<sub>干重</sub>,咸海沉积物

中<sup>238</sup>U的比活度为87.1 Bq/kg<sub>干重</sub>。本研究得出的<sup>238</sup>U的比活度值与这两个海区的值相近。阳江核电海域表层沉积物中<sup>226</sup>Ra、<sup>210</sup>Pb的比活度值与黄茅海-广海湾相近,略高于其它海域;<sup>228</sup>Th、<sup>228</sup>Ra、<sup>40</sup>K的比活度值与黄茅海-广海湾和大亚湾相近,与其它海域相比位于中等水平。除了渤海湾和胶州湾外,<sup>137</sup>Cs的含量在实验误差范围内,与南海其它海域是一致的。刘广山<sup>[21]</sup>曾罗列出我国各海区沉积物<sup>137</sup>Cs的含量,发现从北到南沉积物中<sup>137</sup>Cs的含量逐渐减小,表3所列各海区<sup>137</sup>Cs的含量也符合此规律。

表3 我国部分海域沉积物天然放射性核素平均含量 (Bq/kg<sub>干重</sub>)Tab. 3 Contents (Bq/kg<sub>DW</sub>) of sediment radionuclides in some Chinese sea areas

海区	<sup>238</sup> U	<sup>226</sup> Ra	<sup>210</sup> Pb	<sup>228</sup> Th	<sup>228</sup> Ra	<sup>40</sup> K	<sup>137</sup> Cs	文献
渤海湾	16.2	25.2	-	-	-	710	14.1	[22]
胶州湾	39.2	26.5	20.5	44.8	40.3	688	3.28	[19]
厦门海域潮间带	40.2	32.4	94.2	71.6	69.3	692	-	[9]
南海东北部	35.4	27.7	116	-	44.9	538	1.16	[21]
大亚湾	67.4	35.3	-	68.7	62.8	711	2.41	[23]
黄茅海-广海湾 及邻近海域	77.4	36.6	123.8	64.5	58.1	571	1.52	[16]
阳江核电海域	82.4	35.5	121.7	60.2	57.1	621	2.21	本研究

### 3 结 论

(1) 阳江核电海域表层沉积物中放射性核素含量变化与离岸距离和沉积物粒度之间不存在明显的相关性;除 $^{137}\text{Cs}$ 外,其它人工放射性核素 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{58}\text{Co}$ 和 $^{60}\text{Co}$ 的含量未检出。

(2) 阳江核电海域表层沉积物中天然放射系不平衡为: $^{210}\text{Pb}$ 相对于 $^{226}\text{Ra}$ 过剩, $^{226}\text{Ra}$ 相对于 $^{238}\text{U}$ 缺损, $^{228}\text{Th}$ 与 $^{228}\text{Ra}$ 基本平衡。

(3) 与我国其他海域相比,阳江核电海域表层沉积物放射性核素含量存在明显的差异: $^{238}\text{U}$ 的比活度值在所有比对海域中为最高; $^{226}\text{Ra}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 含量略高于其他海域; $^{228}\text{Th}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 和 $^{40}\text{K}$ 处于中等水平; $^{137}\text{Cs}$ 的含量则符合从北到南沉积物含量逐渐减小的规律。

### 参考文献:

- [1] 张祥玉. 阳江核电站址及其附近海域的气候[J]. 南海研究与开发,2000(1):26-32.
- [2] 广东省海岛资源综合调查大队. 阳江海区鱼卵和仔稚鱼[M]//广东省海岛资源综合调查大队,广东省海岸带和海涂资源综合调查领导小组办公室. 阳江海区海岛资源综合调查报告. 广州:广东科技出版社,1994:199-202.
- [3] 张俊彬,黄增岳. 阳江东平核电站邻近海区鱼卵和仔鱼调查研究[J]. 热带海洋学报,2003,22(3):78-84.
- [4] 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.
- [5] 邓 飞,林 清,周睿东,等. 台山/阳江核电厂周围环境水中 $^3\text{H}$ 浓度调查[J]. 辐射防护通讯,2015,35(3):6-11.
- [6] 刘广山,陈 敏,黄奕普,等. 海洋沉积物岩心放射性核素的 $\gamma$ 谱测定[J]. 厦门大学学报:自然科学版,2001,40(3):669-674.
- [7] 刘广山,徐茂泉,黄奕普. 厦门火烧屿裸露岩石的铀放射系不平衡[J]. 地球学报,2003,24(6):618-621.
- [8] 周 鹏,徐茂泉,刘广山. 福建牛头山火山口岩石中的放射性核素[J]. 地球学报,2005,26(增刊):224-227.
- [9] 陈锦芳,刘广山,黄奕普. 厦门潮间带表层沉积物天然放射系不平衡研究[J]. 台湾海峡,2005,24(3):274-282.
- [10] 袁镛龄,沈 泓,赵士庵,等. 阳江天然放射性高本底地区剂量调查的新进展[J]. 中华放射医学与防护杂志,1995,15(5):311-316.
- [11] 全国环境天然放射性水平调查总结报告编写小组. 全国环境天然贯穿辐射水平调查研究(1983-1990年)[J]. 辐射防护,1992,12(2):96-121.
- [12] OMORI Y, TOKONAMI S, ISHIKAWA T, et al. A pilot study for dose evaluation in high-level natural radiation areas of Yangjiang, China [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry,2015,306(1):317-323.
- [13] 国家海洋局. HY T 003. 8-1991,海洋环境监测规范 放射性核素测定[S]. 北京:海洋出版社,1991:529-531.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 12763. 8-2007,海洋调查规范 第8部分:海洋地质地球物理调查[S]. 北京:中国标准出版社,2008:7-9.
- [15] 刘广山,黄奕普,李静,等. 不平衡铀系和钍系核素的 $\gamma$ 谱测定[J]. 海洋学报,2003,25(5):65-75.
- [16] 赵 峰,吴梅桂,周 鹏,等. 黄茅海-广海湾及其邻近海域表层沉积物中 $\gamma$ 放射性核素含量水平[J]. 热带海洋学报,2015,34(4):77-82.
- [17] ZHOU P, LI D M, LI H T, et al. Distribution of radionuclides in a marine sediment core off the waterspout of the nuclear power plants in Daya Bay, northeastern South China Sea[J]. Journal of Environmental Radioactivity,2015,145:102-112.
- [18] 陈 敏,黄奕普,林永革,等. 中国近岸海域沉积物 $^{226}\text{Ra}$ 的分布特征[J]. 海洋学报,1997,19(6):84-93.
- [19] 贾成霞,刘广山,徐茂泉,等. 胶州湾表层沉积物放射性核素含量与矿物组成[J]. 海洋与湖沼,2003,34(5):490-498.
- [20] 赵一阳. 中国渤海沉积物中铀的地球化学[J]. 地球化学,1980(1):101-105.
- [21] 刘广山,黄奕普,陈 敏,等. 南海东北部表层沉积物天然放射性核素与 $^{137}\text{Cs}$ [J]. 海洋学报,2001,23(6):76-84.
- [22] 李树庆,吴复寿,祝汉民,等. 渤海沿海海域放射性水平及卫生评价[M]//李树庆,祝汉民,吴复寿,等. 中国近海放射性水平. 北京:海洋出版社,1987:1-14.
- [23] 刘广山,周彩芸. 大亚湾海洋生态环境放射性水平研究[M]//侯秉政. 中国青年学者论环境. 北京:中国环境科学出版社,1996:800-804.