

## 广西防城港核电周边红树林沉积物中 放射性核素是否存在富集现象?

林武辉<sup>1,2</sup>, 莫敏婷<sup>1</sup>, 宁秋云<sup>3</sup>, 莫珍妮<sup>3</sup>, 刘昕明<sup>3</sup>,  
冯禹<sup>1</sup>, 冯亮亮<sup>4</sup>, 何贤文<sup>4</sup>

(1.广西大学海洋学院, 广西南宁 530004; 2.广西南海珊瑚礁研究重点实验室, 广西南宁 530004; 3.广西海洋研究院, 广西南宁 530022; 4.广西壮族自治区辐射环境监督管理站, 广西南宁 530222)

**摘要:**放射性核素作为一类被广泛关注的危险物质, 红树林典型生态系统中放射性核素研究极少。本研究利用高纯锗  $\gamma$  谱仪探索广西防城港核电站周边 10 处不同地点的红树林表层及沉积物柱样中天然放射性核素含量及分布特征。结果表明, 红树林区表层沉积物中  $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  活度范围分别为 6.2~70.7 Bq/kg、7.3~55.3 Bq/kg、10.0~94.1 Bq/kg、26.5~479 Bq/kg, 对应均值为 (27.8±19.8) Bq/kg、(21.2±13.9) Bq/kg、(35.8±24.8) Bq/kg、(177±131) Bq/kg; 不同深度的沉积物柱样中  $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  活度与表层沉积物的结果接近, 4 种核素在垂向上的含量均无显著增加或者减少的变化趋势。广西防城港核电周边红树林沉积物中放射性水平低于广西、全国、全球的土壤和我国大部分海域的放射性水平, 仅高于南海珊瑚礁区极低的放射性水平。此外, 红树林沉积物中  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  活度比值与我国其他海区沉积物的结果一致, 范围在 0.5~1.0, 但是显著高于珊瑚礁区的  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  活度比值 ( $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U} < 0.1$ ), 说明地质成因的红树林沉积物 (和其它海区沉积物) 与生物成因的珊瑚礁沉积物存在显著不同的物质来源机制。总之, 本研究结果表明广西红树林系统中天然放射性核素不存在富集现象。

**关键词:**红树林; 沉积物; 放射性核素; 珊瑚礁; 核电站

中图分类号: P736; X55

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2020)05-0676-08

## Do the enrichment of radionuclides occur in the mangrove systems nearby the Fangchenggang Nuclear Power Plant in Guangxi?

LIN Wu-hui<sup>1,2</sup>, MO Min-ting<sup>1</sup>, NING Qiu-yun<sup>3</sup>, MO Zhen-ni<sup>3</sup>, LIU Xin-ming<sup>3</sup>,  
FENG Yu<sup>1</sup>, FENG Liang-liang<sup>4</sup>, HE Xian-wen<sup>4</sup>

(1.School of Marine Sciences, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2.Guangxi Laboratory on the study of Coral Reefs in the South China Sea, Nanning 530004, China; 3.Guangxi Academy of Oceanography, Nanning 530022, China; 4.Radiation-Environment Management and Monitoring Station of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530222, China)

**Abstract:** As one of widely concerned hazardous materials, radioactivity in the mangrove ecosystems is rarely studied. In this study, we presented radioactivity in surface sediments and sediment core collected from 10 locations of mangrove ecosystems nearby the Fangchenggang Nuclear Power Plant using high purity germanium  $\gamma$  spectrometry in order to explore the enrichment of radionuclides in the mangrove systems. The activities of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ , and  $^{40}\text{K}$  in surface sediments were in the range of 6.2~70.7 Bq/kg, 7.3~55.3

收稿日期: 2019-04-16, 修订日期: 2019-06-03

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0506104); 广西自然科学基金 (2017GXNSFBA198096); 国家海洋局海洋-大气化学与全球变化重点实验室开放基金 (GCMAC1606)

作者简介: 林武辉 (1987-), 男, 福建泉州人, 博士, 主要研究海洋过程的同位素示踪、海洋放射性监测与评价, E-mail: linwuhui8@163.com

Bq/kg, 10.0~94.1 Bq/kg, and 26.5~479 Bq/kg with the mean value of (27.8±19.8) Bq/kg, (21.2±13.9) Bq/kg, (35.8±24.8) Bq/kg, (177±131) Bq/kg, respectively. The activities of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  and  $^{40}\text{K}$  in sediment core were consistent with that in surface sediment. No significant trend was observed for the vertical profile of these naturally occurring radionuclides ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  and  $^{40}\text{K}$ ). We found that radioactivity in the mangrove ecosystems was lower than that in Guangxi soil, China soil, global soil, other sea regions except coral reefs. The activity ratio of  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  in surface sediments from the mangrove ecosystems was consistent with that from other sea regions, ranging from 0.5 to 1.0. However, the significant difference of the activity ratio of  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  between the mangrove ecosystems (0.5~1.0) and coral reefs (<0.1) was determined by distinct sediment sources with geologically originating sediment in the mangrove ecosystems and biogenic carbonate sediment in coral reefs, respectively. Overall, the enrichment of radionuclides was not observed in the mangrove ecosystems in Guangxi.

**Key words:** mangrove; sediment; radionuclide; coral reefs; nuclear power plant

红树林是位于热带、亚热带海岸潮间带上的典型湿地生态系统,它在防风御浪、净化环境、维持生物多样性、增加渔业资源等方面具有重要价值<sup>[1]</sup>。部分研究者将红树林、盐沼湿地和海草床并称为“海岸带蓝碳”,表明红树林具有一定的固碳能力,是重要的二氧化碳增汇区<sup>[2]</sup>。我国红树林广泛分布在东南沿海,主要分布在海南、广东、广西、福建、台湾、香港等地。其中,广西是我国红树林的重要分布地之一,主要分布地位于英罗港、丹兜海、铁山港、大风江口、钦州港、防城江口、珍珠港、北仑河口等区域<sup>[1]</sup>。

红树林被称为地球的“肾”,许多污染物在红树林系统中贮存和富集<sup>[3]</sup>。红树林作为具有许多重要经济价值物种的栖息地,红树林生态系统中放射性核素的富集和食物链中的传递,可能对生物和人类健康构成一定的电离辐射风险<sup>[4]</sup>。然而相对于红树林中有机碳<sup>[2]</sup>、有机污染物<sup>[3]</sup>、微塑料<sup>[5]</sup>、重金属<sup>[3]</sup>、稳定同位素<sup>[6]</sup>等方向的研究,红树林生态系统中放射性核素的研究报道较少。目前红树林生态系统的放射性核素研究主要集中于沉积物年代学( $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{234}\text{Th}$ 、 $^7\text{Be}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{239+240}\text{Pu}$ )的应用<sup>[7-9]</sup>。相对于被广泛报道的陆地和海洋环境中放射性核素研究<sup>[10-12]</sup>,我国红树林中最主要的 $^{238}\text{U}$ 系、 $^{232}\text{Th}$ 系、 $^{40}\text{K}$ 三大类的放射性核素未见公开报道。

综上所述,本研究试图探索广西防城港核电周边红树林生长区沉积物中放射性核素的富集特征,利用高纯锗(HPGe) $\gamma$ 谱仪首次测定广西防城港核电站周边的10处不同红树林区域的表层

沉积物及沉积物柱样中放射性核素( $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$ )含量,以掌握红树林沉积物放射性水平,为今后红树林电离辐射环境质量评价和放射性核素的生物地球化学行为研究奠定基础。

## 1 材料与方法

本研究在2017年5月采用随机采样法(1 m<sup>2</sup>范围内采集3个方位的沉积物后,混合装入样品袋),在广西防城港核电站周边的10处不同地点的红树林区(图1),共采集13个站位的表层沉积物(2 cm以浅)。具体10处红树林区域分别为:竹山(ZS)、中间榄(ZJL)、渔洲坪(YZP)、大坪坡(DPP)、北村(BC)、团和(TH)、瓦泾(WJ)、沙环(SH)、水井环(SJH)、月亮湾(YLW),其中,在DPP红树林区采集4份表层沉积物样品,其他红树林区各采集1份表层沉积物样品。同时,在DPP红树林区利用内径为15 cm的PVC管采集1份沉积物柱状样(长度40 cm)。不同红树林区域的表层沉积物特征存在差别,有些站位红树林较为茂盛,根系发达,促淤效果较显著,沉积物以泥质为主;而有些站位红树林矮小而稀疏,长在砂质海岸,图2给出两种典型的沉积物底质的差异。

沉积物样品放入洁净塑料密封袋内,带回实验室并用冰箱冷冻保存。测量前取出表层沉积物样品,解冻并挑选出树枝、落叶等杂物后,在60℃的烘箱内烘干过夜。烘干后的沉积物研磨过筛,取45 g沉积物粉末,装入聚乙烯圆柱盒( $\Phi 7.5\text{ cm}\times h 2.5\text{ cm}$ )中密封后放置30 d,以使

$^{226}\text{Ra}$  及其子体核素达到平衡状态, 利用高能量分辨率的 HPGe- $\gamma$  谱仪测量放射性核素 ( $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$ ) 测量 2 d 左右,  $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  的最低检测限分别为 2.4 Bq/kg、0.69 Bq/kg、1.1 Bq/kg、5.6 Bq/kg。其中, 沉积物柱状样按照 1 cm 一层进行切割分样, 其前处理方法与表层沉积物一样, 但是只有部分样品被筛选测量其中的核素活度随深度变化趋势。

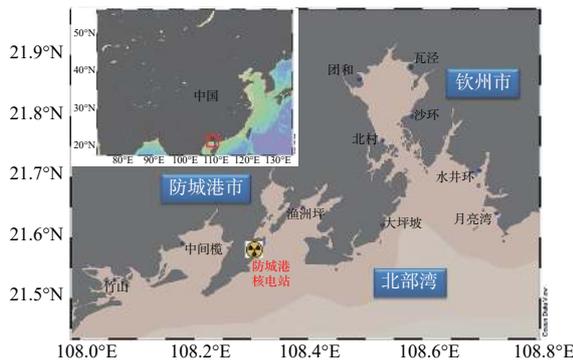


图1 广西红树林区表层沉积物采样站位(广西防城港核电站用放射标志标出)

Fig. 1 Sampling stations in mangrove ecosystems of Guangxi (the Fangchenggang Nuclear Power Plant is indicated with radiation symbol)



图2 大坪坡(左)和瓦泾(右)站位的砂质和泥质沉积物对比

Fig. 2 Comparison of sandy (left) and muddy (right) sediment of mangrove systems at station DPP and WJ, respectively

$^{238}\text{U}$  和  $^{228}\text{Ra}$  分别选择其子体  $^{234}\text{Th}$  (63.3 keV) 和  $^{228}\text{Ac}$  (911.1 keV) 的  $\gamma$  射线进行计算,  $^{226}\text{Ra}$  采用其子体  $^{214}\text{Pb}$  (351.9 keV) 和  $^{214}\text{Bi}$  (609.3 keV) 进行分析,  $^{40}\text{K}$  选择 1460.8 keV 的能量区间计算。本研究采用相对测量法, 沉积物标准物质来自国

际原子能机构 (IAEA-385 和 IAEA-448) 和中国计量科学研究院<sup>[13-15]</sup>。根据公式 (1) 和 (2) 分别计算核素活度和计数统计涨落引入的不确定度。

$$A = \frac{(n_T - n_0)}{\epsilon m} e^{\lambda(t_1 - t_0)} \quad (1)$$

$$\delta A = A \times \sqrt{\frac{(n_{GT} + n_{G0})}{T(n_T - n_0)^2}} \quad (2)$$

式中:  $n_T$  和  $n_0$  分别代表核素对应的  $\gamma$  全能峰处的样品净计数率和仪器本底净计数率;  $n_{GT}$  和  $n_{G0}$  分别代表核素  $\gamma$  全能峰处的样品总计数率和仪器本底总计数率 (包含环境本底和电子学噪声等);  $\epsilon$  和  $m$  代表相对探测效率和样品重量;  $\lambda$  代表衰变常数;  $t_1$  和  $t_0$  分别代表仪器测量时刻和样品采样时刻;  $T$  代表仪器的测量时间。由于铀系和钍系存在衰变链平衡, 且具有很长的半衰期 (几亿年), 原生核素  $^{40}\text{K}$  的半衰期也很长 (几亿年), 采样时间至测量时间 (1 年 ~ 2 年) 过程中的衰变校正可以忽略不计。

质量控制方面, 实验室定期测量仪器本底和探测效率, 制作质量控制图以保证仪器的稳定性; 同时本研究采用国际原子能机构 (IAEA-385 和 IAEA-448) 和中国计量科学研究院提供的沉积物标准源进行交叉验证, 以保证数据的可靠性。此外, 2017 年至 2018 年间实验室多次参加并顺利通过国家海洋环境监测中心和中广核苏州热工院组织的海洋沉积物/土壤中放射性核素全国性的比对活动。详细分析和质控过程参见本实验室已发表的论文<sup>[13-15]</sup>。

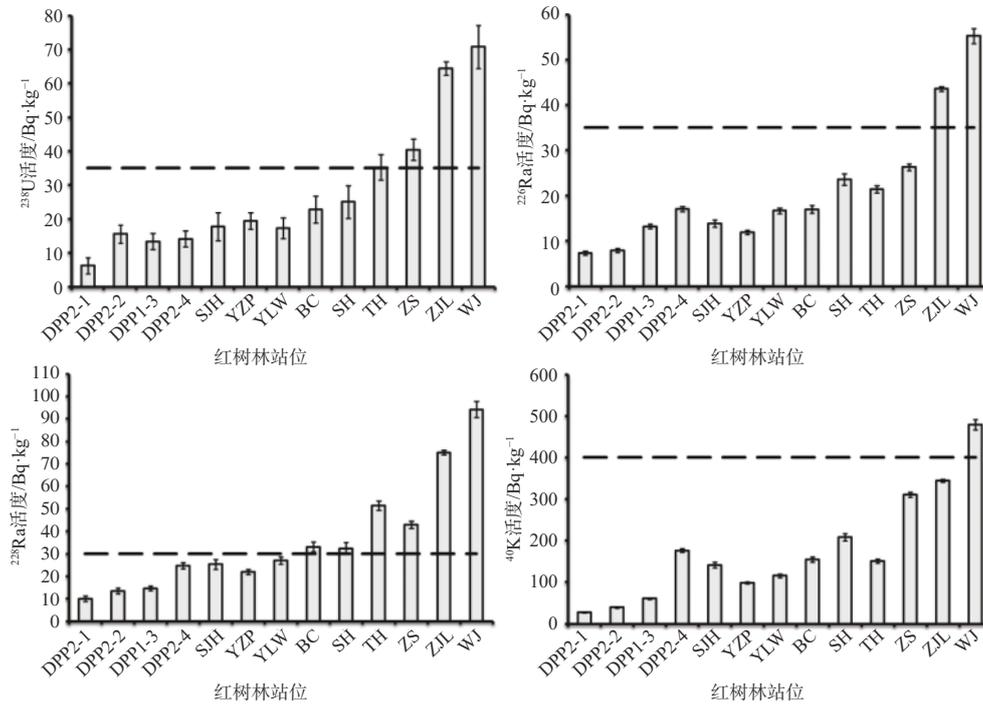
## 2 结果与讨论

### 2.1 红树林表层沉积物放射性核素

防城港核电周边的红树林表层沉积物中  $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  核素活度范围分别为 6.2 ~ 70.7 Bq/kg、7.3 ~ 55.3 Bq/kg、10.0 ~ 94.1 Bq/kg、26.5 ~ 479 Bq/kg, 活度均值依次为  $^{40}\text{K}$  [(177±131) Bq/kg] >  $^{228}\text{Ra}$  [(35.8±24.8) Bq/kg] >  $^{238}\text{U}$  [(27.8±19.80) Bq/kg] >  $^{226}\text{Ra}$  [(21.2±13.9) Bq/kg]。不同站位的红树林表层沉积物中放射性核素结果如图 3 所示, 只有瓦泾 (WJ) 表层沉积物中 4 种放射性核素 ( $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$ ) 活度均高于联合国原子辐射效应科学委员会 (UNSCEAR) 给出的

全球土壤放射性核素平均活度(35 Bq/kg、35 Bq/kg、30 Bq/kg、400 Bq/kg)<sup>[16]</sup>。因此, 广西大部分地区

的红树林放射性水平低于全球土壤的平均放射性水平。



虚线表示联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)给出的世界土壤的放射性核素平均活度<sup>[16]</sup>

图 3 不同站位红树林沉积物中放射性核素(<sup>238</sup>U、<sup>226</sup>Ra、<sup>228</sup>Ra、<sup>40</sup>K)活度

Fig. 3 Activities and uncertainty of radionuclides (<sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra, and <sup>40</sup>K) in mangrove surface sediments

本文发现放射性水平较高的站位(图 2 的瓦径), 往往泥质组分含量也较高, 砂质含量较高的站位则放射性水平较低(图 2 的大坪坡), 与之前的研究结果一致<sup>[17]</sup>。颗粒粒径较小的泥质沉积物, 具有较大的比表面积, 表面吸附能力更强, 容易吸附颗粒活性的重金属和放射性核素。同时, 泥质沉积物相对拥有较高浓度的有机物, 容易络合一些重金属和放射性核素, 保存于泥质沉积物中。然而, 粒径较大的砂质沉积物往往拥有更活跃的沉积物-水界面交换行为, 随着有机物的降解和沉积物-水界面间的物质交换, 重金属和放射性核素也更容易被释放, 再次进入上覆水体中, 导致砂质沉积物中重金属和放射性核素浓度的降低, 但同时砂质沉积物中物质的再释放过程可能带来水体的二次污染。

### 2.2 红树林沉积物柱状样中放射性核素

红树林沉积物中放射性核素的垂直剖面分布特征如图 4 所示。<sup>238</sup>U、<sup>226</sup>Ra、<sup>228</sup>Ra、<sup>40</sup>K 核素活

度范围分别为 11.6 ~ 24.4 Bq/kg、13.1 ~ 22.7 Bq/kg、14.2 ~ 20.1 Bq/kg、68.2 ~ 107 Bq/kg; 活度均值分别为 ( 19.3±1.6 ) Bq/kg、( 18.7±6.8 ) Bq/kg、( 17.1±2.5 ) Bq/kg、( 89.2±8.7 ) Bq/kg。由表层至深层, 沉积物柱样中放射性核素<sup>238</sup>U、<sup>226</sup>Ra、<sup>228</sup>Ra、<sup>40</sup>K 活度在其各自均值附近呈现一定的波动性, 但整体上核素含量无显著的增加或者减少的变化趋势。沉积物柱状样中放射性核素活度范围与其他红树林区的表层沉积物中放射性核素活度范围较为一致, 柱样中 4 种核素活度也都低于全球土壤的 4 种核素活度平均值<sup>[16]</sup>。

### 2.3 红树林与珊瑚礁放射性核素对比

红树林和珊瑚礁系统是两种典型的海洋生态系统, 二者都拥有很高的生物生产力, 是许多海洋经济鱼类的栖息场所, 为人类提供重要的生物资源。红树林和珊瑚礁系统中的放射性核素可以通过食物链传递, 可能对生物和人类构成一定电离辐射威胁<sup>[4]</sup>。因此, 本文对比两种不同生

态系统中表层沉积物的放射性核素水平(图5),结果表明两种典型生态系统中 $^{238}\text{U}$ 活度接近,红树林中其他3种放射性核素( $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$ )水平均高于珊瑚礁的结果<sup>[15]</sup>。该现象与沉积物的来源有关,珊瑚礁沉积物主要来自于造礁珊瑚、仙掌藻、贝类等钙质生物死亡后的残骸,这些钙质生物碎屑往往拥有较低的放射性水平<sup>[13-14]</sup>,而红树林沉积物主要来自于地球内部的岩浆变成岩石,随着风化过程逐渐形成土壤或者沉积

物,经过一系列的搬运过程(河流输入、大气沉降、海流搬运等),最终在红树林系统中堆积所经历的一系列地质过程。因此,珊瑚礁沉积物属于生物成因,而红树林沉积物属于地质成因,沉积物的不同成因和来源最终造成两种不同生态系统中放射性核素的不同特征和差异<sup>[14]</sup>。值得指出的是本文的红树林区域和之前报道的珊瑚礁区域中沉积物放射性核素水平都低于全球土壤的平均值(图5)。

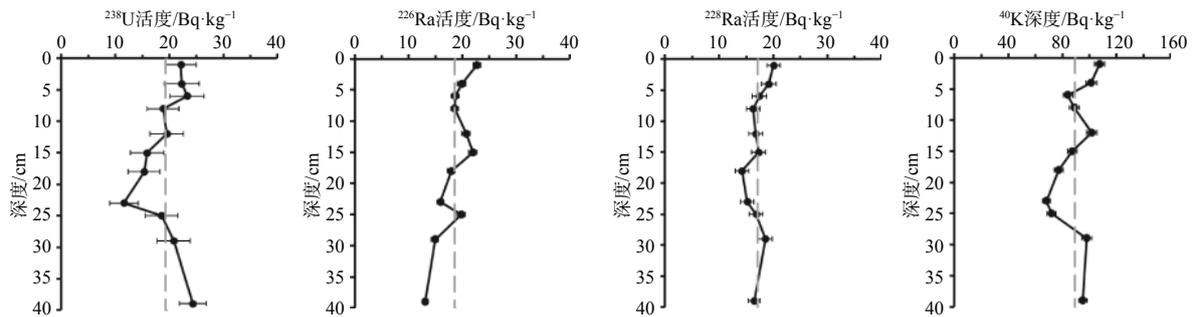


图4 红树林垂直沉积物中放射性核素( $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$ )活度虚线表示放射性核素的平均活度

Fig. 4 Activities and uncertainty of radionuclides ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ , and  $^{40}\text{K}$ ) in sediment core

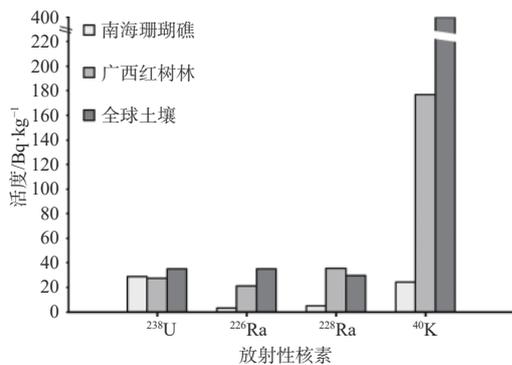


图5 广西红树林和南海珊瑚礁表层沉积物中放射性核素对比(南海珊瑚礁的数据来自林武辉等(2018)<sup>[15]</sup>,全球土壤的数据来自 UNSCEAR 报告)

Fig. 5 Comparison of radionuclides in surface sediments collected from coral reefs and mangrove systems

#### 2.4 不同海区沉积物中放射性核素比较

本文进一步对比红树林和中国其他海区的表层沉积物中放射性核素水平,结果如表1。我国大部分海区(珠三角区域<sup>[18]</sup>、黄河口湿地<sup>[19]</sup>、厦门潮间带<sup>[20]</sup>、大连近岸<sup>[21]</sup>、阳江核电站<sup>[22]</sup>、胶州湾<sup>[23]</sup>、黄茅海-广海湾<sup>[24]</sup>、上海长江口<sup>[25]</sup>、山东莱州湾<sup>[26]</sup>、南海东北部<sup>[27]</sup>、白龙半岛<sup>[28]</sup>)的海洋

沉积物放射性核素水平,都与中国土壤的放射性核素水平接近<sup>[29]</sup>。该现象因为中国近海的沉积物主要来自于河流所携带的中国土壤,二者拥有源汇上的内在联系<sup>[14]</sup>。

防城港土壤、广西土壤中的放射性核素平均水平与全国土壤及我国其他海域的放射性核素平均水平接近<sup>[30]</sup>。然而,本文发现广西红树林表层沉积的放射性核素活度整体上低于防城港、广西、全国土壤及我国其他海区的沉积物结果,仅高于南海珊瑚礁区沉积物中极低的放射性核素活度。因此,通过多个不同区域的研究结果对比,本文并未观测到放射性核素在广西红树林系统中的富集特征。

$^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 活度比值可以指示物质来源<sup>[14]</sup>。广西红树林表层沉积物中 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 平均比值为0.76,范围为0.51~1.21。本文进一步将我国不同海区沉积物的 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 活度比值整理于图6。结果显示,红树林沉积物中 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 活度比值与防城港市土壤、广西土壤、全国土壤、我国其他海区的沉积物中 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 活度比值较为接近,绝大部分海区的结果都分布在0.5~1.0,呈现出

$^{226}\text{Ra}$  略为亏损的状态。该结果也一定程度上说明, 红树林沉积物的来源与我国其他海区的沉积物来源较为一致, 且同属地质成因。但是, 珊瑚礁沉积物中  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  活度比值大部分小于 0.1,

显著低于我国其他海区的结果, 该现象与其生物成因过程密切相关<sup>[13-14]</sup>。因此, 从  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  活度比值角度, 红树林和珊瑚礁区的沉积物存在不同的物质来源机制。

表 1 我国不同海区沉积物中  $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  含量(单位:  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ )  
Tab.1 Activities of  $^{238}\text{U}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  in sediments from distinct sea regions in China (Unit:  $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

地区	$^{238}\text{U}$		$^{226}\text{Ra}$		$^{228}\text{Ra}$		$^{40}\text{K}$		参考文献
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	
大连近岸	26.4 ~ 47.0	34.9	11.2 ~ 25.3	19.3	ND	ND	669 ~ 807	746	[21]
胶州湾	32.4 ~ 56.2	39.2±8.8	20.6 ~ 44.1	26.5±3.3	35.7 ~ 53.3	40.3±4.8	607 ~ 732	688±58	[23]
黄河口湿地	32.67 ~ 81.33	60.52±15.37	19.68 ~ 35.9	29.96±4.23	55.04 ~ 80.92	69.96±6.63	568.49 ~ 785.30	687.33±54.59	[19]
山东莱州湾	30.6 ~ 70.5	54.4±11.7	19.3 ~ 37.8	28.6±4.3	42.8 ~ 85.6	57.9±9.7	504 ~ 580	542±21	[26]
上海长江口	14.1 ~ 62.3	32.8±10.6	13.7 ~ 52.3	24.3±7.4	26.1 ~ 71.9	40.9±9.4	392 ~ 898	628±135	[25]
厦门潮间带	11.5 ~ 65.1	40.2	27.5 ~ 40.0	32.4	49.9 ~ 94.3	69.3	510 ~ 1096	692	[20]
大亚湾海域	ND	ND	16.9 ~ 35.0	27.9±7.2	22.0 ~ 59.8	36.5±11.1	326.2 ~ 621.0	456.2±100.1	[18]
黄茅海 ~ 广海湾	66.5 ~ 98.8	77.4	32.0 ~ 48.7	36.6	49.7 ~ 64.8	58.1	505 ~ 644	571	[24]
广东阳江核电站	75.2 ~ 102.0	82.4±5.2	32.6 ~ 38.6	35.5±2.0	40.9 ~ 70.6	57.1±3.1	580 ~ 660	621±29	[22]
北部湾白龙半岛	12.0 ~ 87.0	48.3±20.2	10.3 ~ 51.8	32.4±9.4	13.2 ~ 72.9	46.1±13.4	69.6 ~ 514.0	354.5±125.3	[28]
南海东北部	21.2 ~ 59.0	35.4±3.0	25.9 ~ 32.4	27.7±1.3	22.6 ~ 65.2	44.9±5.9	273 ~ 686	538±52	[27]
南海珊瑚礁	22.10 ~ 38.18	28.96±5.09	1.47 ~ 9.39	3.34±2.51	0.51 ~ 14.41	5.08±4.91	2.15 ~ 153.95	24.36±49.05	[13]
全国土壤	7.3 ~ 449	38.5±21.1	2.8 ~ 533	37.6±23.4	10.3 ~ 1844	54.6±51.3	ND ~ 1548	584±183	[29]
广西土壤	9.1 ~ 206.2	53.0	13.9 ~ 301.6	53.1	15.5 ~ 270.2	69.1	11.5 ~ 2185.2	332.2	[30]
防城港市土壤	ND	44.7	ND	41.2	ND	75.0	ND	197	内部资料
广西红树林	6.2 ~ 70.7	27.8±19.8	7.3 ~ 55.3	21.2±13.9	10.0 ~ 94.1	35.8±24.8	26.5 ~ 479	177±131	本文

注: ND表示没有数据报道

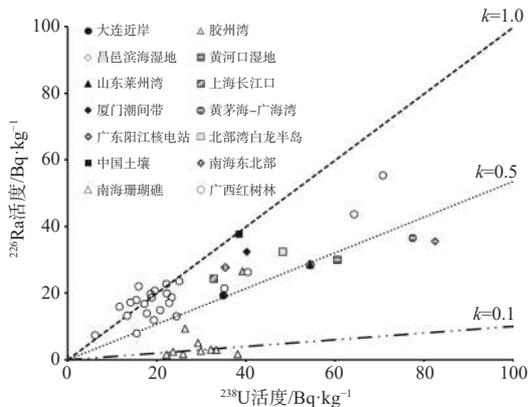


图 6 我国不同海区沉积物中  $^{226}\text{Ra}$  和  $^{238}\text{U}$  分布  
 $k$  值代表  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  的活度比值

Fig. 6 Relationship between  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{238}\text{U}$  in sediments from distinct sea regions in China.  $k$  value represents the activity ratio of  $^{226}\text{Ra}$  to  $^{238}\text{U}$

### 2.5 辐射环境质量评价

不同的放射性核素对生物和人体辐射危害不同, 因此在辐射环境质量评价过程中, 不同核素也被赋予不同权重因子<sup>[14-15]</sup>。本文采用等当量镭指数 ( $\text{Ra}_{\text{eq}}$ )、内照射和外照射指数 ( $H_{\text{ex}}$ 、 $H_{\text{in}}$ )、吸收剂量率 ( $D_R$ ) 开展红树林的辐射环境质量评价<sup>[14-15]</sup>, 具体计算公式如公式 (3)—(6), 计算结果如表 2 所示。同时, 表 2 给出不同评价指标所对应的推荐值<sup>[17]</sup>。结果显示, 我国海洋沉积物的辐射评价指标基本都小于推荐值, 不会对人类构成显著的电离辐射危害。同时, 广西红树林的辐射评价指标低于防城港市土壤、广西土壤、全国土壤、全球土壤、我国大部分海域的结果, 仅高于南海珊瑚礁的结果。因此, 多个评价指标的结果显示广西红树林中的放射性水平较低, 不会对生物和人类健康构成电离辐射威胁。

表 2 不同海区沉积物的辐射环境质量评价

Tab.2 Assessment of environmental radiation quality for sediments from distinct sea regions

地区	Ra <sub>eq</sub> /Bq·kg <sup>-1</sup>	H <sub>ex</sub>	H <sub>in</sub>	D <sub>R</sub> /nGy·h <sup>-1</sup>	参考文献
胶州湾	137	0.37	0.44	65.5	[23]
黄河口湿地	183	0.49	0.57	85.0	[19]
山东莱州湾	153	0.41	0.49	71.0	[26]
上海长江口	131	0.35	0.42	62.3	[25]
厦门潮间带	185	0.50	0.59	85.9	[20]
大亚湾海域	115	0.31	0.39	54.1	[18]
黄茅海~广海湾	164	0.44	0.54	76.0	[24]
广东阳江核电站	165	0.45	0.54	77.0	[22]
北部湾白龙半岛	126	0.34	0.43	57.7	[28]
南海东北部	133	0.36	0.43	62.5	[27]
南海珊瑚礁	12.5	0.03	0.04	5.63	[13]
全球土壤	109	0.29	0.39	51.1	[16]
全国土壤	161	0.43	0.54	74.9	[29]
广西土壤	177	0.48	0.62	80.2	[30]
防城港市土壤	164	0.44	0.55	72.6	内部资料
广西红树林	86.0	0.23	0.29	38.9	本研究
国际推荐值	370	1.0	1.0	84	[17]

$$Ra_{eq}(\text{Bq/kg}) = A_{Ra} + 1.43A_{Th} + 0.077A_K \quad (3)$$

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (4)$$

$$H_{in} = \frac{A_{Ra}}{185} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (5)$$

$$D_R(\text{nGy/h}) = 0.462A_{Ra} + 0.604A_{Th} + 0.042A_K \quad (6)$$

式中:  $H_{ex}$  和  $H_{in}$  无量纲;  $A_{Ra}$ 、 $A_{Th}$ 、 $A_K$  分别代表  $^{226}\text{Ra}$ 、 $^{228}\text{Ra}$ 、 $^{40}\text{K}$  的比活度, 单位为 Bq/kg。

### 3 结 论

(1) 本研究探索放射性核素在广西红树林的富集特征问题, 使用 HPGe- $\gamma$  谱方法首次测定并报道广西防城港核电站周边 10 处红树林典型生态系统中表层和柱样沉积物的放射性核素含量, 其中表层沉积物的活度均值依次为  $^{40}\text{K}$ [(177±131) Bq/kg] >  $^{228}\text{Ra}$ [(35.8±24.8) Bq/kg] >  $^{238}\text{U}$ [(27.8±19.8) Bq/kg] >  $^{226}\text{Ra}$ [(21.2±13.9) Bq/kg]。不同红树林区域的放射性水平高低与沉积物底质特征存在一定关联, 泥质沉积物通常拥有更高的放射性水平。柱样沉积物中 4 种放射性核素含量随深度无明显变化趋势, 均在各活度均值附近波动。

(2) 广西防城港核电周边红树林中沉积物放

射性水平低于广西土壤、全国土壤、全球土壤、我国大部分海区的结果, 仅高于南海珊瑚礁区极低的沉积物放射性水平。在水平及垂直方向上, 本文均未观察到广西红树林区的放射性核素富集特征, 沉积物中放射性核素不会对生物和人类健康构成电离辐射风险。本研究也可为今后红树林系统中放射性核素的生物地球化学行为研究与过程示踪应用提供一定参考。

### 参考文献:

- [1] 范航清, 陆露, 阎冰. 广西红树林演化史与研究历程[J]. 广西科学, 2018, 25(4): 343-351.
- [2] 唐剑武, 叶属峰, 陈雪初, 等. 海岸带蓝碳的科学概念、研究方法以及在生态恢复中的应用[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(6): 661-670.
- [3] BAYEN S. Occurrence, bioavailability and toxic effects of trace metals and organic contaminants in mangrove ecosystems: a review[J]. *Environment International*, 2012, 48: 84-101.
- [4] 林武辉, 陈立奇, 余雯, 等. 海洋生物辐射剂量评价方法及应用[C]//福建省海洋学会2014年学术年会暨福建省科协第十四届学术年会分会场论文集. 平潭: 福建省海洋学会, 2014: 326-334.

- [5] LI J, ZHANG H, ZHANG K N, et al. Characterization, source, and retention of microplastic in sandy beaches and mangrove wetlands of the Qinzhou Bay, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 136: 401-406.
- [6] SOUZA I D C, ARRIVABENE H P, CRAIG C A, et al. Interrogating pollution sources in a mangrove food web using multiple stable isotopes[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640-641: 501-511.
- [7] SANDERS C J, SMOAK J M, SANDERS L M, et al. Intertidal mangrove mudflat  $^{240+239}\text{Pu}$  signatures, confirming a  $^{210}\text{Pb}$  geochronology on the southeastern coast of Brazil[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2010, 283(3): 593-596.
- [8] SMOAK J M, PATCHINEELAM S R. Sediment mixing and accumulation in a mangrove ecosystem: evidence from  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{234}\text{Th}$  and  $^7\text{Be}$ [J]. *Mangroves and Salt Marshes*, 1999, 3(1): 17-27.
- [9] LYNCH J C, MERIWETHER J R, MCKEE B A, et al. Recent accretion in mangrove ecosystems based on  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$ [J]. *Estuaries*, 1989, 12(4): 284-299.
- [10] LIN W H, CHEN L Q, YU W, et al. Radioactivity impacts of the Fukushima nuclear accident on the atmosphere[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 102: 311-322.
- [11] LIN W H, CHEN L Q, ZENG S, et al. Residual  $\beta$  activity of particulate  $^{234}\text{Th}$  as a novel proxy for tracking sediment resuspension in the ocean[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 27069.
- [12] 林武辉, 陈立奇, 何建华, 等. 日本福岛核事故后的海洋放射性监测进展[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(1): 269-276.
- [13] 林武辉, 余克服, 王英辉, 等. 珊瑚礁区沉积物的极低放射性水平特征与成因[J]. *科学通报*, 2018, 63(21): 2173-2183.
- [14] LIN W H, YU K F, WANG Y H, et al. Radioactive level of coral reefs in the South China Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 142: 43-53.
- [15] 林武辉, 余克服, 王英辉, 等. 罕见的地表低辐射水平区域: 珊瑚礁区[J]. *辐射防护*, 2018, 38(4): 287-292.
- [16] UNSCEAR. Sources and effects of ionization radiation[M]//UNSCEAR. Report to the General Assembly with Scientific Annex. New York: United Nations, 2000.
- [17] LIU X M, LIN W H. Natural radioactivity in the beach sand and soil along the coastline of Guangxi Province, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 135: 446-450.
- [18] 丁敏霞, 刘国卿, 冯江平, 等. 珠江口、大鹏湾和大亚湾海域海水及沉积物中放射性核素水平[J]. *辐射防护*, 2017, 37(6): 453-458.
- [19] 王启栋, 宋金明, 李学刚, 等. 黄河口新生湿地沉积物放射性核素及其对沉积过程变化指示作用解析[J]. *地质论评*, 2014, 60(3): 635-645.
- [20] 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.
- [21] 杜金秋, 关道明, 姚子伟, 等. 大连近海沉积物中放射性核素分布及环境指示[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(5): 1889-1895.
- [22] 吴梅桂, 周鹏, 赵峰, 等. 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[J]. *海洋环境科学*, 2018, 37(1): 43-47.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] WANG J L, DU J Z, BI Q Q. Natural radioactivity assessment of surface sediments in the Yangtze Estuary[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 114(1): 602-608.
- [26] WANG Q D, SONG J M, LI X G, et al. Environmental radionuclides in a coastal wetland of the Southern Laizhou Bay, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 97(1/2): 506-511.
- [27] 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.
- [28] 毛远意, 林静, 黄德坤, 等. 北部湾白龙半岛邻近海域沉积物中放射性核素含量水平[J]. *应用海洋学学报*, 2018, 37(2): 194-202.
- [29] WANG Z Y. Natural radiation environment in China[J]. *International Congress Series*, 2002, 1225: 39-46.
- [30] 杨名生. 广西壮族自治区土壤中天然放射性核素含量调查研究[J]. *辐射防护*, 1993, 13(4): 299-302.