

北部湾沉积物中天然放射性核素:活度水平、特征规律及指示意义

莫敏婷^{1,2,3}, 林武辉^{4,5}, 刘昕明^{1,2,3}

(1.广西中医药大学 海洋药物研究院, 广西 南宁 530200; 2.广西海洋药物重点实验室, 广西 南宁 530200; 3.自然资源部北部湾滨海湿地生态系统野外科学观测研究站, 广西 北海 536015; 4.集美大学港口与海岸工程学院 极地海洋研究院, 福建 厦门 361021; 5.广西师范大学 广西核物理与核技术重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 海洋沉积物是放射性核素的最终归宿。本研究利用高纯锗 γ 谱仪探索了北部湾表层沉积物中天然放射性核素活度水平及分布特征。结果表明, 北部湾表层沉积物中 ^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 、 ^{40}K 、 ^{210}Pb 的平均活度分别为 (29.5 ± 14.6) Bq/kg、 (22.0 ± 12.2) Bq/kg、 (37.0 ± 20.2) Bq/kg、 (302 ± 195) Bq/kg、 (34.4 ± 19.9) Bq/kg; ^{228}Ra 、 ^{40}K 和总活度 (A_T) 在水平方向上呈现由陆向海方向升高的规律。北部湾沉积物中 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 和 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 活度比值的特征指纹为 1.2 和 1.5。此外, 北部湾 ^{40}K 低活度区与海砂分布高度一致, 说明 ^{40}K 可能是海洋砂矿的潜在指示剂。本研究系统定量分析了北部湾沉积物放射性水平, 不仅可为未来北部湾滨海核电的辐射环境影响评估提供本底基线, 而且能为今后北部湾海砂资源在线走航高效勘探提供一定的参考价值。

关键词: 北部湾; 沉积物; 放射性核素; 海砂资源; 核电站

中图分类号: P736

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2025)04-0534-09

Radionuclides in sediments of Beibu Gulf: activity levels, distribution patterns and implications

MO Minting^{1,2,3}, LIN Wuhui^{4,5}, LIU Xinming^{1,2,3}

(1. Institutes of Marine Drugs, Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning 530200, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Marine Drugs, Nanning 530200, China; 3. Observation and Research Station of Coastal Wetland Ecosystem in Beibu Gulf, MNR, Beihai 536015, China; 4. Polar and Marine Research Institute, College of Harbour and Coastal Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China; 5. Guangxi Key Laboratory of Nuclear Physics and Nuclear Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: Marine sediments are the final destinations of radionuclides. We used a high purity germanium γ spectrometry to measure natural radionuclides and explore the spatial distribution characteristics of nuclides in the surface sediments of Beibu Gulf. The mean activities of ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{40}K and ^{210}Pb are (29.5 ± 14.6) Bq/kg, (22.0 ± 12.2) Bq/kg, (37.0 ± 20.2) Bq/kg, (302 ± 195) Bq/kg, and (34.4 ± 19.9) Bq/kg, respectively. In

收稿日期: 2024-08-14, 修订日期: 2024-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42276044); 广西自然科学基金 (2024GXNSFAA010449); 福建省环保科技计划项目 (2025R004); 广西南海珊瑚礁研究重点实验室开放基金 (GXLSRSCS2023003); 中国辐射防护研究院平台开放基金项目 (ZFYHHJMN-2024003); 广西核物理与核技术重点实验室开放课题 (NLK2021-04)

作者简介: 莫敏婷 (1996—), 女, 广西贵港人, 硕士, 研究方向为海洋放射性核素, E-mail: mominting6@163.com

通信作者: 林武辉 (1987—), 男, 教授, 博士, 研究方向为海洋过程的同位素示踪、海洋/大气放射性观测与核安全评估, E-mail: linwuhui8@163.com

the horizontal direction, ^{228}Ra , ^{40}K and total activity (A_T) show an increasing pattern from nearshore to far offshore. Fingerprints of $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ and $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ activity ratios in sediments are 1.2 and 1.5, respectively. In addition, the ^{40}K low activity area in Beibu Gulf is highly consistent with the distribution of marine sands, suggesting that ^{40}K may be a potential indicator of marine sands. This study systematically quantifies sediment radioactivity levels in Beibu Gulf, which not only provides a background baseline for future assessment of the radiological environmental impacts of coastal nuclear power in Beibu Gulf, but also may provide some reference value for the future on-line travelling and efficient exploration of sea sand resources in Beibu Gulf.

Key words: Beibu Gulf; surface sediments; radionuclides; sea sand resources; nuclear power plant

放射性核素被广泛应用于海洋学过程研究中,可用于年代学研究、沉积物物源识别等过程^[1-2]。此外,海洋中的放射性核素会参与海洋生物地球化学过程,最终进入海洋沉积物,也可以通过食物链富集放大,以海产品的形式被人类摄食,进而对人类健康构成潜在的电离辐射威胁^[3]。

北部湾位于南海西北部,是西南地区最便捷的出海通道。北部湾属于半封闭海湾,湾内水深不超过 100 m,等深线分布大致与海岸线平行,有安铺港、铁山港、钦州湾、珍珠湾等众多天然港湾以及茅岭江、钦江、大风江、北仑河、防城河等陆地河流汇入,拥有丰富的生物资源及石油、天然气、石英砂矿等矿产资源^[4]。本文对北部湾不同水平空间的表层沉积物中天然放射性核素(^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 、 ^{40}K 、 ^{210}Pb)含量与分布特征进行了研究,可为今后北部湾海域生态环境影响评价以及资源开发提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 放射性核素的测量

本研究于 2018—2021 年在广西北部湾采集 105 个站位的表层沉积物(5 cm 以浅),采样站位如图 1 所示。为进一步探讨核素的分布规律,本文根据离岸距离以及水深等因素,将采样站位划分为 4 个区域,分别为沙滩站位 8 个、近岸 I 区(水深为 0~10 m)站位 59 个、近岸 II 区(水深为 10~20 m)站位 22 个、近岸 III 区(水深>20 m)站位 16 个。将沉积物样品装入塑料密封袋中,带回实验室并冷冻保存。测量前取出表层沉积物样品,剔除树枝、贝壳等杂物后,在 60℃ 烘箱内烘干至恒重。烘干后的沉积物研磨过筛(100~150 目),取 20 g 沉积物粉末,装入透明聚乙烯盒中密封放置 30 d,以使 ^{226}Ra 及其子体核素达到

平衡状态。本研究利用高能量分辨率的 HPGe- γ 谱仪(Canberra BE6530)测量天然放射性核素 ^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 、 ^{40}K 、 ^{210}Pb 的活度,每个样品测量时间在 2 d 左右。

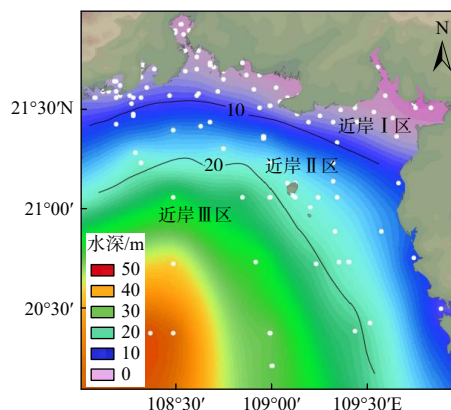


图 1 北部湾表层沉积物采样站位

Fig. 1 Surface sediment sampling station of the Beibu Gulf

选择 ^{238}U 子体 ^{234}Th (63.3 keV) γ 能量峰计算 ^{238}U 活度,采用 ^{226}Ra 子体 ^{214}Pb (351.9 keV)和 ^{214}Bi (609.3 keV) γ 能量峰计算 ^{226}Ra 活度,选择 ^{228}Ra 子体 ^{228}Ac (911.1 keV)的 γ 能量峰计算 ^{228}Ra 活度,选择 1460.8 keV 的 γ 能量峰计算 ^{40}K 活度,选择 46.5 keV 的能量峰计算 ^{210}Pb 活度。核素活度计算采用相对测量法,沉积物标准物质来自国际原子能机构(IAEA-385)和中国计量科学研究院(SGPB/1014、SGU/1014 与 4NSG/1014)。根据公式(1)与公式(2)分别计算核素活度和计数统计涨落引入的不确定度。

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

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

式中: n_T 和 n_0 分别代表核素对应的 γ 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 γ 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); ε 和 m 分别代表相对探测效率和样品重量; λ 代表核素衰变常数; t_1 和 t_0 分别为仪器测量时刻和样品采样时刻; T 代表仪器的测量时间(s)。由于铀系和钍系存在衰变链平衡, 具有较长的半衰期(亿年量级), 且原生放射性核素 ^{40}K 的半衰期也较长(亿年量级), 因此采样时间至测量时间(1~2 a)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)和中国计量科学研究院(SGPB/1014、SGU/1014与4NSG/1014)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, 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^[2]。

1.2 电离辐射剂量评价

不同种类的放射性核素对生物体和人体造成的辐射危害不同。本文使用国际上常用的等当量镭指数(Ra_{eq})、外照射和内照射指数(H_{ex} 、 H_{in})、吸收剂量率(D_R)4个电离辐射评价指数开展北部湾的辐射环境质量评价^[5]。具体计算公式如下:

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

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

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

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

式中: Ra_{eq} 单位为 Bq/kg; H_{ex} 和 H_{in} 为无量纲; A_{Ra} 、 A_{Th} 、 A_K 分别代表 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 、 ^{40}K 的活度(Bq/kg); D_R 单位为 nGy/h。

2 结果与讨论

2.1 北部湾表层沉积物放射性核素含量及分布特征

北部湾表层沉积物中放射性核素的水平分布如图2所示。 ^{238}U 活度范围为 3.82~77.0 Bq/kg, 平均值为 (29.5±14.6) Bq/kg; ^{226}Ra 活度范围为

0.46~82.4 Bq/kg, 平均值为 (22.0±12.2) Bq/kg; ^{228}Ra 活度范围为 4.28~123 Bq/kg, 平均值为 (37.0±20.2) Bq/kg; ^{40}K 活度范围为 2.27~692 Bq/kg, 平均值为 (302±195) Bq/kg; ^{210}Pb 活度范围 6.29~89.7 Bq/kg, 平均值为 (34.4±19.9) Bq/kg。总之, ^{238}U 、 ^{226}Ra 与 ^{228}Ra 活度变化规律相同, 活度低值区均分布在北海市-铁山港-英罗港-安铺港海域, 高值区集中在钦州湾、廉州湾附近海域。 ^{40}K 活度低值区的分布与其他核素相同, 但核素高值区主要集中在北部湾近岸Ⅱ区、Ⅲ区, 总体上呈现由陆向海方向升高的趋势。 ^{210}Pb 活度高值区集中在防城港市、钦州湾以及雷州半岛西部等海域。海洋中的 ^{210}Pb 主要来源于大气沉降, 此外, 陆地径流也会携带大量的颗粒态 ^{210}Pb 进入海洋。北部湾周边有众多陆地河流汇入, ^{210}Pb 容易在河口区堆积, 导致河口区的 ^{210}Pb 活度偏高。

北部湾属于半封闭海湾, 水动力条件较弱, 湾内等深线与岸线大致平行, 离岸距离越远, 水深逐渐加深。为方便探讨核素的分布规律, 本文根据离岸距离以及水深等因素将采样区域划分为沙滩、近岸Ⅰ区、近岸Ⅱ区、近岸Ⅲ区4个部分。图3结果显示, ^{228}Ra 活度均值为近岸Ⅲ区 [(42.8±5.52) Bq/kg]>近岸Ⅱ区 [(35.7±11.5) Bq/kg]>近岸Ⅰ区 [(28.1±23.7) Bq/kg]>沙滩 [(11.1±4.48) Bq/kg]; ^{40}K 活度均值为近岸Ⅲ区 [(488±107) Bq/kg]>近岸Ⅱ区 [(409±191) Bq/kg]>近岸Ⅰ区 [(250±161) Bq/kg]>沙滩 [(33.0±39.8) Bq/kg]。 ^{238}U 活度均值为近岸Ⅲ区 [(36.7±4.52) Bq/kg]>近岸Ⅰ区 [(30.9±16.1) Bq/kg]>近岸Ⅱ区 [(28.6±9.76) Bq/kg]>沙滩 [(7.61±3.16) Bq/kg]; ^{226}Ra 活度均值为近岸Ⅲ区 [(25.2±3.08) Bq/kg]>近岸Ⅰ区 [(23.9±14.2) Bq/kg]>近岸Ⅱ区 [(20.5±8.10) Bq/kg]>沙滩 [(6.72±1.90) Bq/kg]; ^{210}Pb 活度均值为近岸Ⅱ区 [(38.1±19.7) Bq/kg]>近岸Ⅰ区 [(35.9±21.0) Bq/kg]>近岸Ⅲ区 [(35.4±13.6) Bq/kg]>沙滩 [(11.3±4.35) Bq/kg]。总体而言, 沙滩站位的放射性核素活度最低, 该现象出现的原因是以石英砂为主的沙滩沉积物经过海水的多次冲刷, 矿物中的核素溶解进入海水中, 导致沙滩沉积物中的核素活度总体较低^[6]。本研究发现随着离岸

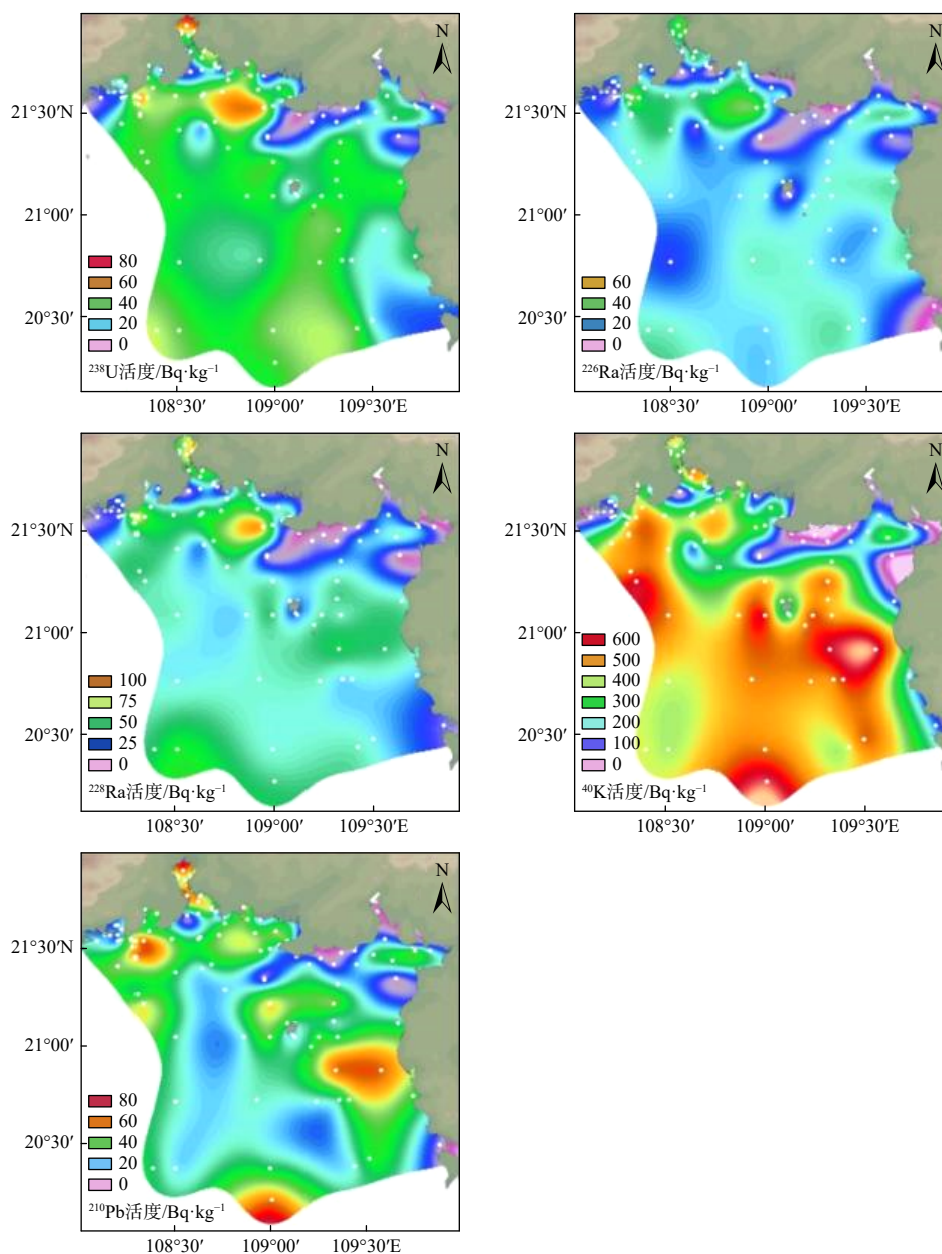


图2 北部湾表层沉积物中放射性核素的水平分布

Fig. 2 Distribution of radionuclides in surface sediments of the Beibu Gulf

距离增加, 水深增大, 北部湾沉积物中 ^{228}Ra 和 ^{40}K 核素活度也增大, ^{228}Ra 和 ^{40}K 活度与水深存在一定的正相关关系。

为进一步探究北部湾海域水深与核素活度的关系, 本文基于北部湾沉积物中的 ^{238}U 、 ^{232}Th (^{228}Ra)、 ^{40}K 活度, 提出利用 ^{238}U - ^{232}Th (^{228}Ra)- $^{40}\text{K}/10$ 三角图解来反映核素活度与水深的关系(图4)。三维视角下的 ^{238}U - ^{232}Th (^{228}Ra)- $^{40}\text{K}/10$ 三角图解能综合反映3种放射性核素的端元组成、

核素组成比例、空间特征等丰富的信息, 颜色棒的数值可定量地反映3种核素(^{238}U 、 ^{228}Ra 、 $^{40}\text{K}/10$)的总活度($A_T = A_{238\text{U}} + A_{228\text{Ra}} + A_{40\text{K}}/10$, 单位为 Bq/kg)^[7]。如图4所示, 沙滩站位的核素总活度较低, 随着离岸距离增加, 水深增大, 近岸I、II、III区的核素总活度也增大。前人研究表明, 北部湾沉积物中的核素活度主要受控于沉积物粒度大小^[2]。湾内等深线与岸线大致平行, 离岸距离越远, 水深逐渐加深。近岸浅海水深较

浅,波浪破碎、潮流、风驱动海流等导致水动力较强,沉积物粒度通常较粗,可能使得核素活度

较低。相反,水深较深,水动力过程较弱,沉积物粒径较细,核素活度可能相对较高。

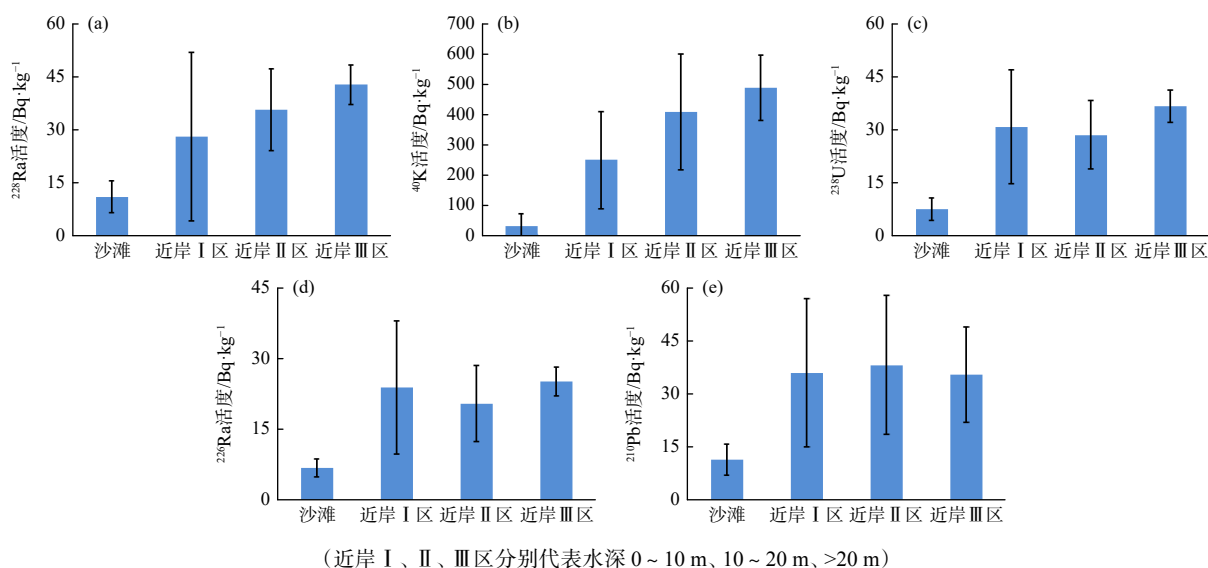


图3 北部湾不同深度放射性核素的分布

Fig. 3 Spatial distribution of radionuclides in Beibu Gulf

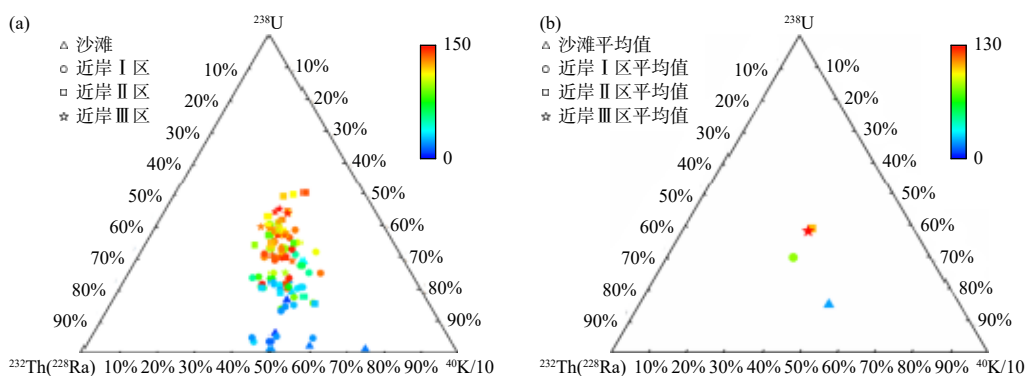


图4 北部湾沉积物中 ^{238}U - ^{232}Th (^{228}Ra)- $^{40}\text{K}/10$ 的三角图解

Fig. 4 Ternary diagrams of ^{238}U - ^{232}Th (^{228}Ra)- $^{40}\text{K}/10$ in sediments from the Beibu Gulf

2.2 北部湾沉积物中的放射性核素特征指纹

^{226}Ra 是 ^{238}U 的子体核素,在漫长的地质过程中铀系放射性核素趋近平衡或者准平衡状态,平衡时 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 理论比值为1。在海洋环境中, ^{226}Ra 与 ^{238}U 往往会受到复杂的物理过程及海洋生物地球化学过程的影响, $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 很难达到理论状态下的平衡。如图5a所示,北部湾沉积物中 ^{226}Ra 处于略亏损状态, $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 比值范围为0.1~1.6,大部分为0.5~1.0,与我国大部分海域沉积物的 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ (0.5~1.0)相符^[8]。

北部湾沉积物 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 线性回归拟合结果如图5b所示,二者整体呈现一定的正相关关系。 ^{228}Ra 半衰期($T_{1/2}=5.75\text{ a}$)较短,很容易达到 ^{232}Th - ^{228}Ra 的长期平衡状态, ^{232}Th 活度可用其子体核素 ^{228}Ra 代替。地壳中 ^{232}Th 活度平均值为48.7 Bq/kg, ^{238}U 活度平均值为37.2 Bq/kg, $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 为1.3^[9]。本论文 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 的范围为0.8~2.4,平均值为1.3,与地壳值相符。地壳的 ^{232}Th 与 ^{238}U 活度平均值基本落在北部湾沉积物的拟合线上,表明北部湾沉积物是地壳物质经过

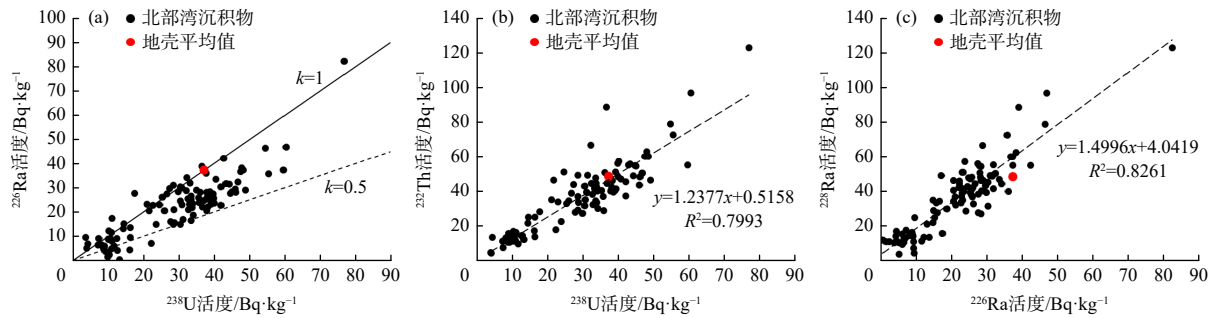


图 a 中 k 代表 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 活度比值; 图 b 为 ^{232}Th 与 ^{238}U 关系, 虚线为线性回归拟合结果; 图 c 为 ^{228}Ra 与 ^{226}Ra 关系, 虚线为线性回归拟合结果

图 5 北部湾沉积物中 ^{226}Ra 与 ^{238}U 关系

Fig. 5 Relationships between ^{226}Ra and ^{238}U in sediments from the Beibu Gulf

风化作用形成土壤, 土壤再经河流搬运等作用进入海洋环境所形成的, 沉积物较好地保存了来自地壳 ^{232}Th 与 ^{238}U 的原始信号。

^{226}Ra ($T_{1/2}=1602\text{ a}$) 与 ^{228}Ra ($T_{1/2}=5.75\text{ a}$) 是海洋学研究中重要的示踪剂。北部湾沉积物 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 线性回归拟合结果如图 5c 所示。总体而言, ^{226}Ra 与 ^{228}Ra 呈现一定的正相关关系。本文中 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 的范围为 0.8~26, 线性拟合后的比值为 1.5。 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 差异大, 与核素自身的半衰期、铀系与钍系不同的地球化学行为等因素有关^[10]。

2.3 中国不同海域放射性核素对比及辐射环境质量评价

表 1 列出了中国其他海域表层沉积物的放射性核素活度情况。整体来说, 中国大部分海域的海洋沉积物中放射性核素活度与中国土壤相近, 表明近岸海域沉积物主要由陆地土壤经河流搬运而来, 二者拥有源汇上的联系。北部湾表层沉积物放射性核素 ^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 和 ^{40}K 的活度均低于我国其他海域表层沉积物的结果, 与之前的研究报道相符^[2]。

中国不同海域的电离辐射评价指数对比如

表 1 中国不同海域的 ^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{228}Ra 和 ^{40}K 活度以及电离辐射评价指数

Tab.1 Activity of ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra and ^{40}K and ionising radiation evaluation indices in different sea areas of China

地点	$^{238}\text{U}/\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$		$^{226}\text{Ra}/\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$		$^{228}\text{Ra}/\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$		$^{40}\text{K}/\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$		$R_{\text{eq}}/\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$	H_{ex}	H_{in}	$D_{\text{R}}/\text{nGy}\cdot\text{h}^{-1}$	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	-	-	669~807	746	-	-	-	-	[11]
渤海北部	9.3~33.7	23.3	6.4~24.5	16.5	-	-	511~835	651	-	-	-	-	[12]
渤海近海	23.77~59.39	37.64	17.56~35.98	25.06	30.38~59.18	42.22	571~839	690	139	0.37	0.44	66.1	[13]
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	137	0.37	0.44	65.5	[14]
山东莱州湾	-	54.4±11.7	-	28.6±4.3	-	57.9±9.7	-	542±21	153	0.41	0.49	70.9	[15]
上海长江口	-	32.8±10.6	-	24.3±7.4	-	40.9±9.4	-	628±135	131	0.35	0.42	62.3	[16]
厦门潮间带	11.5~65.1	40.2	27.5~40	32.4	49.9~94.3	69.3	510~1096	692	185	0.50	0.59	85.9	[17]
厦门近海	-	48.0±6.2	-	37.1±3.4	-	56.0±5.6	-	540.4±33.3	159	0.43	0.53	73.6	[18]
广东阳江	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	165	0.45	0.54	77.0	[19]
珠江口黄茅海	66.5~98.8	77.4	32.0~48.7	36.6	49.7~64.8	58.1	505~644	571	164	0.44	0.54	76.0	[20]
大亚湾沉积物	36.6~64.1	49.2±3.9	15.6~29.7	20.9±0.7	40.3~52.7	47.2±1.9	360~482	432±19	122	0.33	0.39	56.3	[21]
深圳近岸	-	-	17.9~35.0	26.5±5.4	32.9~59.8	43.2±9.1	326.2~415.3	364.2±32.4	116	0.31	0.39	53.6	[22]

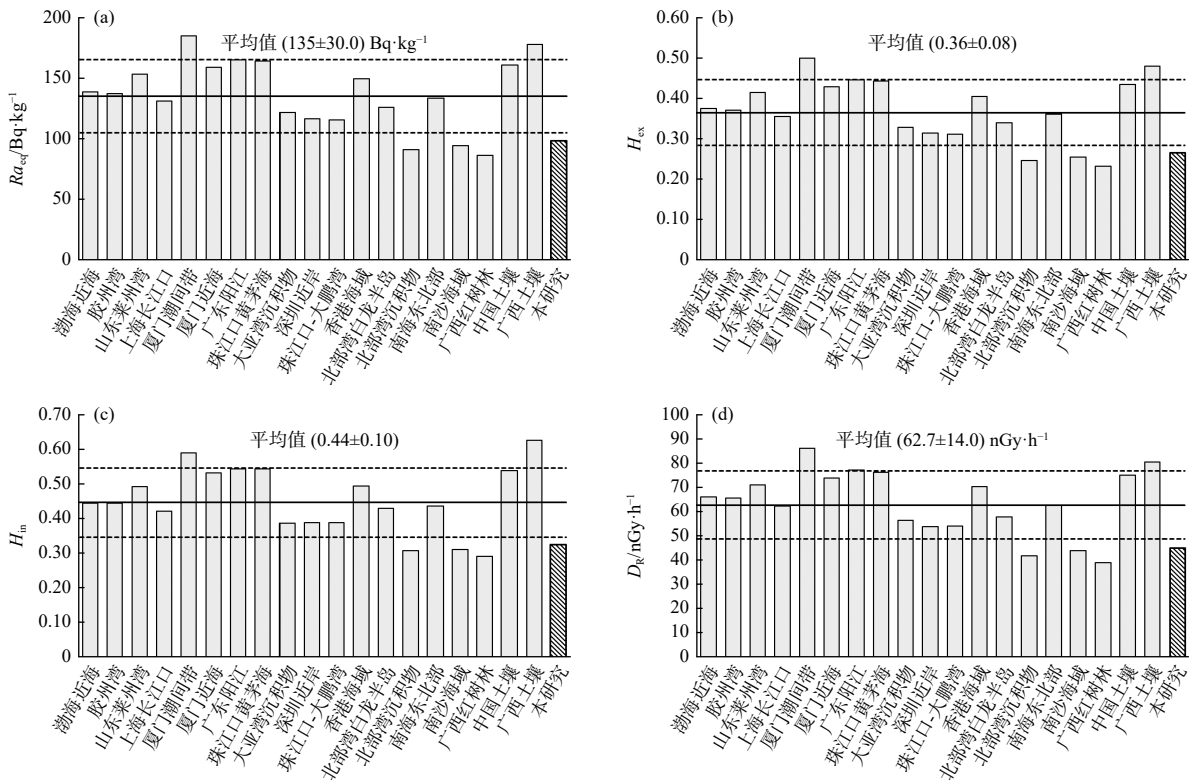
续表

地点	²³⁸ U/Bq·kg ⁻¹		²²⁶ Ra/Bq·kg ⁻¹		²²⁸ Ra/Bq·kg ⁻¹		⁴⁰ K/Bq·kg ⁻¹		$Ra_{eq}/$ Bq·kg ⁻¹	H_{ex}	H_{in}	$D_R/$ nGy·h ⁻¹	参考文献
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值					
珠江口-大 鹏湾	-	-	16.9 ~ 35.0	27.9±7.2	22.0 ~ 59.8	36.5±11.1	326.2 ~ 621.0	456.2±100.1	115	0.31	0.39	54.1	[23]
香港海域	34.9 ~ 48.3	39.7±4.60	28.1 ~ 37.8	32.5±3.09	43.1 ~ 51.8	48.1±3.29	590 ~ 684	625±36.2	149	0.40	0.49	70.3	[24]
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	126	0.34	0.43	57.7	[25]
北部湾沉 积物	5.07 ~ 43.2	24.7±11.6	4.33 ~ 42.2	22.2±10.7	7.76 ~ 88.8	34.4±18.7	0.16 ~ 588	253±192	90.9	0.25	0.31	41.7	[2]
海南岛 东部	6.0 ~ 33.2	21.7±6.4	12.6 ~ 25.5	19.0±1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	[26]
南海东 北部	21.2 ~ 59.0	35.4±3	25.9 ~ 32.4	27.7±1.3	22.6 ~ 65.2	44.9±5.9	273 ~ 686	538±52	133	0.36	0.43	62.5	[27]
南沙海域	25.5 ~ 56.3	36±11	14.1 ~ 27.2	20.4±4.6	20.7 ~ 44.6	32.3±8	218 ~ 553	358±118	94.2	0.25	0.31	44.0	[28]
广西红 树林	6.16 ~ 70.7	27.8±19.8	7.33 ~ 55.3	21.2±13.9	10.0 ~ 94.1	35.8±24.8	26.5 ~ 479	177±131	86.0	0.23	0.29	38.9	[29]
中国土壤	7.3 ~ 449	38.5±21.1	2.8 ~ 533	37.6±23.4	10.3 ~ 1844	54.6±51.3	~ 1548	584±183	161	0.43	0.54	74.9	[30]
本研究	3.82 ~ 77.0	29.5±14.6	0.46 ~ 82.4	22.0±12.2	4.28 ~ 123	37.0±20.2	2.27 ~ 692	302±195	98.2	0.27	0.32	45.2	

注：“-”表示没有数据

图 6 所示。北部湾沉积物的 Ra_{eq} 、 H_{ex} 、 H_{in} 、 D_R 计算结果分别为 98.2 Bq/kg、0.27、0.32、45.2 nGy/h，国际推荐的 Ra_{eq} 、 H_{ex} 、 H_{in} 、 D_R 值分

别为 370 Bq/kg、1.0、1.0 和 84 nGy/h。中国绝大部分海域表层沉积物的电离辐射评价指数小于国际推荐值。北部湾表层沉积物的 4 个电离辐



图中黑色实线表示平均值，两条黑色虚线表示误差范围(±σ)

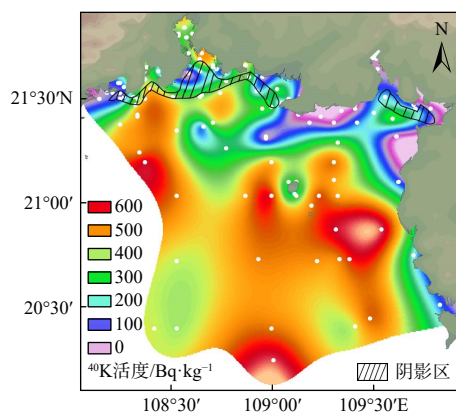
图 6 不同海域的电离辐射评价指数对比

Fig. 6 Comparison of ionising radiation evaluation indices in different sea areas

射评价指数均低于国际推荐值,也低于国内大部分海域。北部湾的低辐射环境背景不会对人类健康安全造成显著的电离辐射危害。

2.4 低 ^{40}K 活度指示海砂资源

海砂可用于工业原料及建筑材料,在陆地砂石日益短缺的背景下,“向海要砂”是必然选择^[31]。然而,近岸区域专项调查较少且费时耗力,难以系统全面评估北部湾海砂资源。广西近岸属于砂质海岸,钦州湾、铁山港、大风江口以及珍珠湾等多发育粗粒海砂堆积,10~20 m水深区域保存大量粗砂、中粗砂,沿海三市(北海、钦州、防城港)目前已探明的海砂总量达103618.49万立方米^[32-33]。北部湾 ^{40}K 活度在水平方向上差异显著, ^{40}K 活度呈现明显的条带状分布,具体表现为近岸Ⅰ区[(250±161) Bq/kg]<近岸Ⅲ区[(409±191) Bq/kg]<近岸Ⅲ区[(488±107) Bq/kg],广东雷州半岛西部沿岸也存在较低的 ^{40}K 活度。本研究发现 ^{40}K 低值区与已探明的海砂资源分布区高度一致(图7),前人研究表明以砂质组分为为主的沉积物中 ^{40}K 活度通常较低^[6,29]。综上所述,本文提出可利用低 ^{40}K 活度来指示潜在的海砂资源分布区。



海砂分布资料来源于文献[33-35]

图7 ^{40}K 活度与海砂资源分布(阴影区)

Fig. 7 ^{40}K activity and coastal sands (shaded area)

3 结论

(1)广西北部湾沉积物中放射性核素活度均值为 ^{40}K [(302±195) Bq/kg]> ^{226}Ra [(37.0±20.2) Bq/kg]> ^{210}Pb [(34.4±19.9) Bq/kg]> ^{238}U [(29.5±14.6) Bq/kg]> ^{228}Ra [(22.0±12.2) Bq/kg]。 ^{228}Ra 、 ^{40}K 和总活度

(A_T)在水平方向上呈现由陆向海方向升高的趋势。北部湾沉积物中 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 和 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 活度比值的特征指纹为1.2和1.5。

(2)通过与其他海域数据对比发现,广西北部湾辐射水平远低于其他海域,属低水平辐射区,不会对海洋生物和人类构成显著的辐射威胁。另外,北部湾沉积物的低 ^{40}K 活度区与海砂资源分布区高度一致,未来可考虑利用低 ^{40}K 活度来指示潜在的海砂资源分布区,研发海砂资源的在线走航高效勘探技术。

致谢:感谢广西海洋环境监测中心站站长蓝文陆博士在样品采集中给予的帮助,感谢广西海洋研究院莫珍妮、宁秋云、李英花等在样品测量方面提供的支持。

参考文献:

- [1] 林武辉,余克服,王英辉,等.海洋沉积过程的铀系放射性核素示踪技术:物源识别、沉积、再悬浮[J].海洋地质与第四纪地质,2020,40(1):60-70.
- [2] 林武辉,冯禹,余克服,等.北部湾沉积物中放射性核素的分布特征与控制因素[J].海洋学报,2020,42(2):143-154.
- [3] CARVALHO F P. Radionuclide concentration processes in marine organisms: a comprehensive review[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2018, 186: 124-130.
- [4] 乔延龙,林昭进.北部湾地形、底质特征与渔场分布的关系[J].海洋湖沼通报,2007(增刊1):232-238.
- [5] BERETKA J, MATHEW P J. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products[J]. Health Physics, 1985, 48(1): 87-95.
- [6] 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.
- [7] 林武辉,杜隰峰,余克服,等.基于放射性核素的沉积物源识别技术探索与优化:以红树林-海草床-珊瑚礁系统为例[J].海洋学报,2023,45(12):58-66.
- [8] 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.
- [9] ADAMS J A S, WEAVER C E. Thorium-to-uranium ratios as indicators of sedimentary processes: example of concept of geochemical facies[J]. AAPG Bulletin, 1958, 42(2): 387-430.
- [10] YII M W, WAN-MAHMOOD Z U. ^{226}Ra , ^{228}Ra and $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ in surface marine sediment of Malaysia[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2013, 295(2): 1465-1472.
- [11] 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.
- [12] 张翊邦, 杜金秋, 林武辉, 等. 近海主要天然与人工放射性核素的吸附与迁移研究[J]. 原子能科学技术, 2024, 58(10): 2045-2057.
- [13] 杜金秋, 王震, 林武辉, 等. 渤海沉积物中放射性核素分布及其对沉积环境变化的响应[J]. 地球科学, 2021, 46(12): 4503-4516.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 崔守信, 张洪海, 门武. 厦门邻近海域海洋环境放射性水平及评价[J]. 应用海洋学学报, 2022, 41(3): 443-453.
- [19] 吴梅桂, 周鹏, 赵峰, 等. 阳江核电站附近海域表层沉积物中 γ 放射性核素含量水平[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(1): 43-47.
- [20] 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 γ 放射性核素含量水平[J]. 热带海洋学报, 2015, 34(4): 77-82.
- [21] 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.
- [22] 丁敏霞, 刘国卿, 苏玲玲, 等. 深圳近岸海域海水及沉积物中放射性核素水平[J]. 核化学与放射化学, 2017, 39(6): 442-446.
- [23] 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.
- [24] 关祖杰, 杨健明, 余君岳. 香港海域海洋沉积物的放射性测量[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1994, 33(4): 118-121.
- [25] 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.
- [26] HUANG D K, DU J Z, DENG B, et al. Distribution patterns of particle-reactive radionuclides in sediments off eastern Hainan Island, China: implications for source and transport pathways[J]. Continental Shelf Research, 2013, 57: 10-17.
- [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}Cs [J]. 海洋学报, 2001, 23(6): 76-84.
- [28] 刘广山, 黄奕普, 陈敏, 等. 南沙海区表层沉积物放射性核素分布特征[J]. 海洋科学, 2001, 25(8): 1-5.
- [29] 林武辉, 莫敏婷, 宁秋云, 等. 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?[J]. 海洋环境科学, 2020, 39(5): 676-683.
- [30] WANG Z Y. Natural radiation environment in China[J]. International Congress Series, 2002, 1225: 39-46.
- [31] 赵京涛, 阙靖, 胡邦琦, 等. 中国重点海域海砂资源调查和潜力评价进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(3): 90-97.
- [32] 王圣洁, 刘锡清, 戴勤奋, 等. 中国海砂资源分布特征及找矿方向[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(3): 83-89.
- [33] 谷志岩. 广西北部湾近海海砂资源开发利用与保护[J]. 冶金管理, 2019(5): 126-127.
- [34] 叶维强, 黎广钊, 庞衍军. 广西滨海地貌特征及砂矿形成的研究[J]. 海洋湖沼通报, 1990(2): 54-61.
- [35] 黎广钊, 叶维强, 庞衍军. 广西滨海砂矿特征及其富集条件[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1988, 8(3): 85-92.

(本文编辑: 胡莹莹)