

## ◆环境科学◆

## 北部湾表层沉积物中重金属与放射性元素/核素的分布、风险、源解析与环境研究启示\*

许泽铖<sup>1</sup>, 刘鳧卿<sup>1\*\*</sup>, 何贤文<sup>1</sup>, 周花珑<sup>1</sup>, 黄美琴<sup>1</sup>, 管永精<sup>2</sup>, 何 华<sup>2</sup>, 刘志勇<sup>3</sup>, 郭凯行<sup>1</sup>, 卢 颖<sup>1</sup>, 何佶蔓<sup>1</sup>, 韦淑阳<sup>1</sup>

(1. 广西壮族自治区辐射环境监督管理站, 广西南宁 530222; 2. 广西大学物理科学与工程技术学院, 广西相对论天体物理重点实验室, 广西南宁 530004; 3. 苏州大学放射医学及交叉学科研究院, 放射医学与辐射防护国家重点实验室, 江苏苏州 215123)

**摘要:**本研究对北部湾表层沉积物中的重金属(Hg、Cr、Zn、As、Cd、Ni、Cu、Pb)和放射性核素(<sup>238</sup>U、<sup>232</sup>Th、<sup>210</sup>Pb、<sup>239+240</sup>Pu)进行全面分析,以评估其环境风险并考察其作为环境指示物的有效性。结果表明,除了局部地区的Cr浓度超出《海洋沉积物质量》(GB 18668-2002)中的第一类指标外,其他重金属浓度均低于第一类指标。放射性核素的环境风险评估显示<sup>238</sup>U和<sup>232</sup>Th属于第二级(安全级别),而<sup>210</sup>Pb和<sup>239+240</sup>Pu尚缺乏评估标准。研究发现部分重金属和放射性元素/核素呈现出“T”型分布,指向多样化的污染源和传输机制。结果显示放射性元素/核素在海洋环境监测和管理中具有独特的源相示踪潜力,海洋放射性研究可作为交叉学科为海洋环境保护和污染综合治理研究提供新的启示。

**关键词:**北部湾;表层沉积物;重金属;放射性核素;环境风险评估;空间分布;环境研究启示

中图分类号:X8,P722.7,P734.2<sup>+</sup>4,P736.21<sup>+</sup>2 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2024)03-0565-16

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20240910.017

北部湾作为中国乃至东南亚海洋环境中的关键区域,承载着生态、经济和社会多重功能。这一重要海湾不仅是多种海洋生物生存繁衍的天然栖息地,而且其健康状态也直接关系到区域经济的可持续性以及数百万人的食品安全。然而,北部湾自然环境和生

态系统受到快速工业化和城市化的双重压力。大规模工业和生活废水排放导致北部湾沉积物中重金属元素累积,如Hg、Cr、Zn、As、Cd、Ni、Cu和Pb等,这些污染物带来的生态风险和对人类健康的影响已经引起了广泛关注<sup>[1-3]</sup>。此外,自2011年日本福岛核事

收稿日期:2024-02-27 修回日期:2024-04-20

\* 广西自然科学基金项目(2021GXNSFBA196001)资助。

## 【第一作者简介】

许泽铖(1992-),男,工程师,主要从事电离辐射监测与评价研究。

## 【\*\*通信作者简介】

刘鳧卿(1991-),女,工程师,主要从事电离辐射监测与评价研究,E-mail:284350371@qq.com。

## 【引用本文】

许泽铖,刘鳧卿,何贤文,等.北部湾表层沉积物中重金属与放射性元素/核素的分布、风险、源解析与环境研究启示[J].广西科学,2024,31(3):565-580.

XU Z Y, LIU M Q, HE X W, et al. Distribution, Risk, Source Apportionment, and Implications for Environmental Research of Heavy Metals and Radioactive Elements/Nuclides in the Surface Sediments of the Beibu Gulf [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(3): 565-580.

故以来,海洋放射性污染问题逐渐成为国际社会焦点。放射性核素因具有生物毒性和放射毒性被特别关注。其产生的辐射能够与生物体的组织和细胞发生相互作用,可能导致细胞损伤、DNA损伤、癌症等健康问题。海洋沉积物中 $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 等放射性核素一方面会引起生物健康问题,其中综合毒性分组显示 $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 属于低毒组, $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 属于极毒组;另一方面因其独特的示踪能力,在污染源溯源、颗粒物沉降过程等环境问题的研究中扮演着重要角色<sup>[4-7]</sup>。

尽管北部湾沉积物中重金属污染的局部分布、来源和潜在风险评估已有相关报道<sup>[8-11]</sup>,放射性核素在揭示污染物来源及传播途径方面也表现出了研究潜力<sup>[5]</sup>,但是现有文献在整合这两方面的工作仍显不足。特别是对重金属与放射性元素/核素在北部湾沉积物的综合应用和环境指示意义的研究尚处于起步阶段。先前的研究多集中于运用 $^{210}\text{Pb}$ 定年技术来重建北部湾的历史性重金属污染记录<sup>[11,12]</sup>。本研究对重金属和放射性元素/核素联合研究进行补充,通过系统地采样与分析,全面揭示这些污染物在北部湾沉积环境中的环境风险和分布特征,进而深入探究其相互关系及环境行为,拟为理解海洋表层沉积物中污染物的复杂环境行为提供新的视角,同时也为北部湾及相似海域的环境保护和污染防治政策制定提供科学依据和实践指导。本研究旨在强调环境科学在实现海洋资源可持续利用和维护区域生态安全中的应用价值,对未来海洋环境治理具有重要的参考价值。

## 1 材料与方法

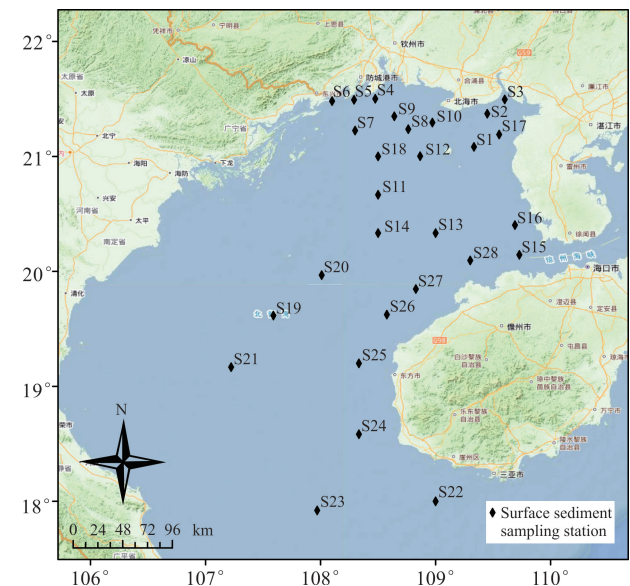
### 1.1 环境特征

北部湾坐落于中国南海的北部地带,东起雷州半岛和琼州海峡,南至海南省西南侧,北至广西壮族自治区,西至越南边界。该湾区覆盖面积约为130 000 km<sup>2</sup>,平均水深50 m,大部分区域的水深小于100 m<sup>[13]</sup>。北部湾沿岸主要港口包括中国的安铺港、铁山港、钦州湾、珍珠港、洋浦港以及越南的下龙湾等。北部湾接纳众多河流,包括中国的九洲江、南流江、大风江、钦江、防城江、北仑河、珠碧江、昌化江以及越南的先安河、红河、马江等,这些河流共同为北部湾输送了大量的泥沙,其中红河的输沙量每年高达 $4.00 \times 10^7 \text{ t}^{[14]}$ ,而南流江和昌化江的年输沙量分别为 $1.10 \times 10^6 \text{ t}$ 和 $0.88 \times 10^6 \text{ t}^{[15]}$ 。北部湾在物质与能量的交换上拥有2个通道:琼州海峡和连通南海的南

湾口<sup>[6,15]</sup>。该湾区的动力系统复杂,由波浪、潮汐、沿岸流、环流和外来水团等因素共同构成。研究显示,南海海流会通过海南岛南岸进入北部湾,并且北部湾全年存在逆时针方向的环流模式<sup>[13,16]</sup>。

### 1.2 样品采集与分析

本研究依据《海洋监测规范 第3部分:样品采集、贮存与运输》(GB 17378.3-2007)<sup>[17]</sup>以及《辐射环境监测技术规范》(HJ 61-2021)<sup>[18]</sup>,于2021年7月在北部湾海域采集28个表层沉积物样品,采样点位见图1。具体采样操作如下:将抓斗式采泥器与钢丝绳末端连接好,检查是否牢靠;提起已张口的采泥器,慢速放入水中,稳定后常速放至离底3-5 m处,再全速放入底部,然后慢速提升采泥器,离底后快速提升;将采泥器降至接样盘上,打开采泥器耳盖,倾斜采泥器使上部水缓缓流出,采集表层(0-5 cm)沉积物,再进行样品的定性描述和分装。



The base map comes from the National Platform for Common GeoSpatial Information Services (<https://www.tianditu.gov.cn/>).

图1 北部湾表层沉积物采样点位

Fig. 1 Sampling sites of surface sediments in the Beibu Gulf

表层沉积物中的重金属元素(Hg、Zn、Cr、As、Cd、Ni、Cu、Pb)和放射性元素(Th、U)的分析在广西壮族自治区分析测试研究中心完成,相关的检测依据和典型检出限见表1,浓度单位以干重计,下同。放射性核素 $^{210}\text{Pb}$ 的分析在广西壮族自治区辐射环境监督管理站实验室完成,按《土壤中放射性核素的 $\gamma$ 能谱分析方法》(GB/T 11743-2013)<sup>[19]</sup>进行,其典型探测下限为11 Bq/kg。样品的采集、保管、运输、分

析、质量控制措施都严格按照标准、规范执行。

表 1 样品分析项目、检测依据和典型检出限

Table 1 Analysis items, detection basis, and typical detection limits

分析项目 Analysis item	检测依据 Detection basis	典型检出限 Typical detection limit
Hg	Soil and sediment—Determination of mercury, arsenic, selenium, bismuth, antimony—Microwave dissolution/atomic fluorescence spectrometry (HJ 680—2013) <sup>[20]</sup>	0.002 μg/g
As	Soil and sediment—Determination of mercury, arsenic, selenium, bismuth, antimony—Microwave dissolution/atomic fluorescence spectrometry (HJ 680—2013) <sup>[20]</sup>	0.01 μg/g
Zn	Analysis methods for regional geochemical sample—Part 2; determination of 27 components including calcium oxide etc. by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (DZ/T 0279.2—2016) <sup>[21]</sup>	0.03 μg/g
Th	Analysis methods for regional geochemical sample—Part 2; determination of 27 components including calcium oxide etc. by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (DZ/T 0279.2—2016) <sup>[21]</sup>	2.00 μg/g
Ni	Analysis methods for regional geochemical sample—Part 2; determination of 27 components including calcium oxide etc. by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (DZ/T 0279.2—2016) <sup>[21]</sup>	0.20 μg/g
Cu	Analysis methods for regional geochemical sample—Part 2; determination of 27 components including calcium oxide etc. by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (DZ/T 0279.2—2016) <sup>[21]</sup>	0.50 μg/g
Pb	Analysis methods for regional geochemical sample—Part 2; determination of 27 components including calcium oxide etc. by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (DZ/T 0279.2—2016) <sup>[21]</sup>	0.70 μg/g
Cd	Analysis methods for regional geochemical sample—Part 5; determination of cadmium contents by inductively coupled plasma mass spectrometry (DZ/T 0279.5—2016) <sup>[22]</sup>	0.021 μg/g
U	Analysis methods for regional geochemical sample—Part 6; determination of uranium contents by inductively coupled plasma mass spectrometry (DZ/T 0279.6—2016) <sup>[23]</sup>	0.009 μg/g
Cr	Detailed investigation of soil pollution in China technical regulations on soil sample analysis and testing methods (Environmental soil letter [2017] No. 1625) <sup>[24]</sup>	0.50 mg/kg

<sup>239+240</sup>Pu 的测定在苏州大学放射医学与辐射防护国家重点实验室完成,分析测定简要流程如下<sup>[6]</sup>:称取 2.5 g 样品并添加<sup>242</sup>Pu 作为内标以监测<sup>239+240</sup>Pu 分析的化学回收率。样本制备过程包括消解、过滤、调酸调价,使用 AG1-X8 阴离子交换树脂和 AG MP-1 M 阴离子交换树脂进行<sup>239+240</sup>Pu 的连续纯化。最终,使用 4% HNO<sub>3</sub> 将样品稀释至 1 mL,用于<sup>239+240</sup>Pu 的分析。样品制备的化学回收率在 70%—80%,对干扰核素<sup>238</sup>U 的去污因子为  $2 \times 10^6$ 。<sup>239+240</sup>Pu 浓度 (mg/kg) 的测定采用扇形场电感耦合等离子体质谱仪 [Element 2 SF-ICP-MS, 美国 Thermo Fisher Scientific 公司, 配备由 APEX-Q 进样系统和膜去溶装置 (ACM) 组成的 APEX-Q-ACM 进样系统], APEX-Q-ACM 进样系统和锥形同心雾化器用于提高仪器的检测灵敏度。<sup>239+240</sup>Pu 测量结果通过进一步换算得到其放射性活度浓度 (Bq/kg)。<sup>239+240</sup>Pu 的方法检出限采用 11 个试剂空白实验的 3 倍标准偏差来确定,为  $5.5 \times 10^{-4}$  Bq/kg。

有机物 (Organic Matter, OM) 含量的分析在广西大学实验室完成<sup>[6]</sup>:称量 1.0 g 烘干的沉积物样

品,置入已恒重的坩埚,然后在马弗炉中炭化灰化 4 h,温度为 450 °C;灰化结束后将坩埚转移至干燥器内冷却至室温,再次称量沉积物样品的质量。样品处理前后的质量损失视为样品中有机物含量的近似量。

### 1.3 数据处理和分析方法

首先,采用 IBM SPSS Statistics 25 软件对重金属元素浓度和放射性元素/核素活度浓度数据进行统计分析;使用 RStudio 2024.04.2-764 软件对数据进行 Spearman 相关性分析、聚类分析和绘制图像;利用 ArcGIS Pro 3.0.2 软件绘制北部湾表层沉积物的采样点位图,并通过反距离权重法预测北部湾表层沉积物中重金属元素浓度、放射性元素/核素活度浓度以及有机物含量的空间分布。其次,用重金属的分析结果与《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)<sup>[25]</sup>、其他标准、研究数据等进行比较,以评估该区域的重金属污染状况。由于缺乏针对沉积物中放射性核素的国家或环境质量标准,本研究使用海洋放射性环境质量评价软件 MREQA V1.0 对放射性核素进行评价<sup>[26,27]</sup>。最后,结合重金属与放射性元素/核素的相关性、分布特点及北部湾环境特征,进一步探讨它们



的来源及环境指示意义。

### 1.3.1 放射性核素活度浓度换算

放射性元素 U 和 Th 的浓度是指总 U 和总 Th 的浓度,放射性核素<sup>238</sup>U 和<sup>232</sup>Th 的活度浓度是通过总 U 和总 Th 的浓度与对应的比活度以及丰度来计算得出,<sup>238</sup>U 和<sup>232</sup>Th 的比活度分别为 12.350 Bq/kg 和 4.046 Bq/kg,丰度分别为 99.3% 和 100%。比活度也称为质量活度,是指某一纯的元素或化合物样品中,单位质量所含的放射性活度,以 Bq/g 或 Bq/mol 及它们的分倍数单位表示。 $m$  克天然元素中的某种天然放射性核素的活度可表示为

$$A = \frac{m \cdot N_A \cdot f}{M} \cdot \frac{\ln 2}{T_{1/2}}, \quad (1)$$

其中, $A$  为放射核素的活度(Bq); $m$  为放射性核素的质量(g); $N_A$  为阿伏伽德罗常数( $6.02 \times 10^{23}$ ); $f$  为放射性核素的丰度; $M$  为放射性核素的相对原子质量; $T_{1/2}$  为放射性核素的半衰期,以秒计。

比活度公式为

$$C = \frac{A}{m}, \quad (2)$$

其中, $C$  为放射性核素的比活度(Bq/g 或 Bq/mol)。

结合公式(1)和公式(2)可计算出目标放射性核素的比活度。再将比活度与沉积物中放射性核素的浓度(mg/kg)相乘,便得到沉积物中放射性核素的活度浓度(Bq/kg)。

### 1.3.2 Spearman 相关性分析

为揭示重金属与放射性元素/核素的潜在关联和来源,本研究对北部湾表层沉积物中重金属与放射性元素/核素进行 Spearman 相关性分析,Spearman 相关性系数表示为  $r_s$ 。为方便后续的讨论,对重金属与放射性元素/核素进行聚类分析,其中聚类使用 K-

means-层次聚类叠加。最佳分段数( $k$ )采用平均轮廓系数法,由 RStudio 软件计算得出, $k$  使每个聚类内部的相似度最大化,而不同聚类之间相似度最小化。

## 2 结果与分析

### 2.1 重金属含量和分布特征

#### 2.1.1 重金属含量

北部湾表层沉积物中重金属 Hg、Cr、Zn、As、Cd、Ni、Cu、Pb 的浓度如表 2 所示,均值从低到高依次为 Hg、Cd、As、Cu、Ni、Pb、Zn、Cr。北部湾表层沉积物中重金属浓度的变异系数(Coefficient of Variation, CV)由小到大依次为 Pb(38.8%)、Cr(42.4%)、Ni(45.4%)、Cd(52.2%)、As(52.6%)、Cu(52.6%)、Hg(61.5%)、Zn(63.8%)。重金属浓度的变异系数是衡量样本点中重金属分布离散程度的相对标准,变异系数为 15%—36% 表示中等程度的变异性,等于或大于 36% 则表示高变异性<sup>[28]</sup>。以上 8 种重金属的变异系数均超过 36%,说明这些重金属在北部湾表层沉积物中的分布具有高变异性。通常当区域内存在重金属局部富集的时候,该重金属浓度的变异系数较高,往往具有高变异性,同时,这也意味着在这些采样点可能存在重金属的局部富集现象。

如表 3 所示,与北部湾区域过去近 14 年内的其他研究结果相比,本研究中所有表层沉积物采样点的重金属浓度除 Ni 外均在文献报告的数据范围之内,Ni 浓度范围仅下限低于文献报道的范围。这表明在整体上,北部湾表层沉积物中的重金属浓度处于历年浓度范围内,即北部湾表层沉积物中重金属浓度与过去 14 年内的环境污染状况一致,也说明以往的污染事件可能仍在持续,如 Cd 污染<sup>[8]</sup>。

Table 2 Heavy metal concentration ranges in surface sediments

分析项目 Analysis item	样本量( $n/N$ ) Sample size ( $n/N$ )	浓度范围/(mg/kg) Concentration range/(mg/kg)	均值/(mg/kg) Mean/(mg/kg)	标准偏差/(mg/kg) Standard deviation/(mg/kg)	变异系数/% Coefficient of variation/%
Hg	28/28	0.003—0.032	0.013	0.008	61.5
Cr	28/28	5.00—161.00	68.00	28.80	42.4
Zn	27/28	0.03**—96.90	42.80	27.30	63.8
As	28/28	1.17—8.18	3.52	1.85	52.6
Cd	27/28	0.021**—0.101	0.046	0.024	52.2
Ni	28/28	2.23—36.30	20.10	9.12	45.4
Cu	28/28	3.18—27.70	13.70	7.21	52.6
Pb	28/28	6.40—38.50	23.90	9.28	38.8

Note: $n/N$  indicates that there are  $n$  measured values above the detection limit out of  $N$  samples, i. e. detected. \*\* indicates results of concentrations below the detection limit, which was used as the lower limit of concentration range for statistical analysis.



表 3 北部湾表层沉积物中重金属近 14 年内浓度范围

Table 3 Concentration ranges of heavy metals in surface sediments of the Beibu Gulf over the past 14 years

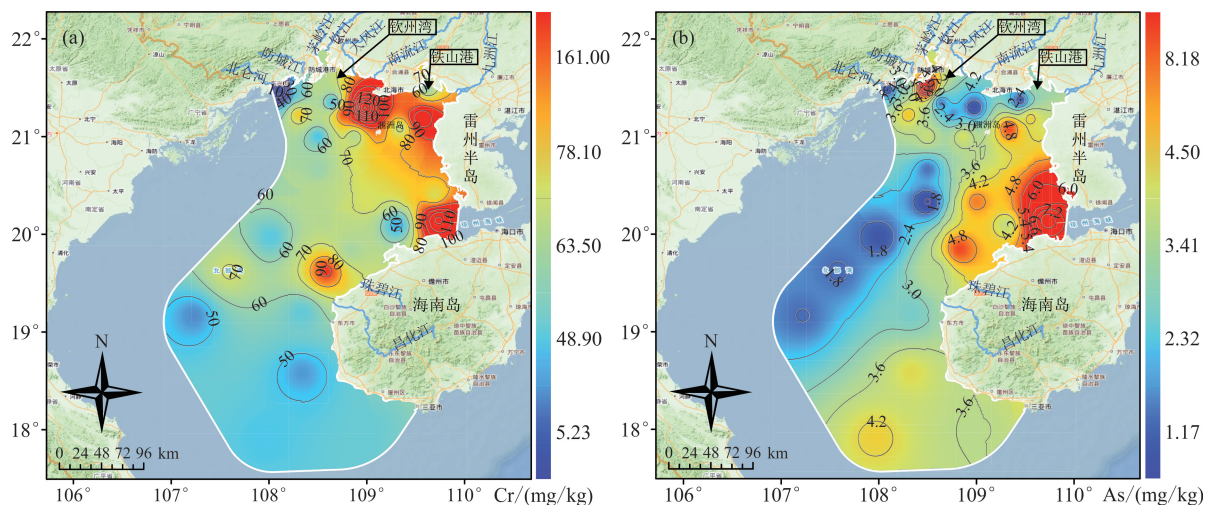
研究区域 Study area	浓度范围/(mg/kg) Concentration range/(mg/kg)								时间 Time
	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	As	Ni	
Beibu Gulf	3.18— 27.70	6.40— 38.50	0.03 <sup>**</sup> — 96.90	0.021 <sup>**</sup> — 0.101	5.00— 161.00	0.003— 0.032	1.17— 8.18	2.23— 36.30	2021 (this study)
	29.75— 145.70	7.12— 49.33	4.55— 112.54	0.030— 0.280	6.28— 83.92	0.010— 0.160	2.40— 23.09	ND	2006 <sup>[8]</sup>
	6.72— 25.95	16.99— 57.98	73.15— 112.25	0.030— 0.120	20.69— 56.47	ND	ND	ND	2007 <sup>[3]</sup>
	4.97— 28.20	17.90— 38.00	14.20— 110.00	0.040— 0.120	ND	0.005— 0.280	2.10— 15.50	ND	ND <sup>[29]</sup>
Fangchenggang sea area	5.60— 23.80	18.00— 44.20	19.90— 97.10	0.040— 0.100	18.90— 75.90	0.020— 0.090	3.80— 16.30	ND	2021 <sup>[11]</sup>
Qinzhou Bay	1.89— 43.50	11.45— 70.32	28.01— 121.00	0.080— 0.280	6.61— 84.91	ND	ND	9.30— 41.07	2013 <sup>[2]</sup>
	0.00— 21.93	8.65— 30.73	12.09— 74.23	0.040— 0.420	2.18— 21.06	0.034— 0.118	10.87— 22.27	ND	2018 <sup>[30]</sup>
	1.51— 58.25	6.55— 40.53	14.28— 93.43	0.078— 0.477	21.49— 52.95	0.010— 0.061	4.19— 18.60	ND	2021 <sup>[31]</sup>
Beihai sea area	1.40— 12.90	8.00— 39.50	4.15— 86.40	0.010— 0.300	57.90— 259.00	0.010— 0.070	1.61— 36.20	ND	2007 <sup>[32]</sup>
Tieshan Port	2.00— 21.30	1.90— 30.20	6.80— 103.00	ND	4.90— 79.30	0.004— 0.029	0.34— 10.60	ND	2020 <sup>[33]</sup>
Guangxi coastal waters	1.70— 129.20	3.90— 94.50	7.10— 321.00	ND	5.90— 137.80	ND	ND	ND	2007 <sup>[10]</sup>
Beibu Gulf nearshore	0.00— 50.90	4.20— 97.90	1.60— 156.00	0.000— 0.450	0.00— 65.20	0.003— 0.160	0.52— 27.00	ND	2010 <sup>[34,35]</sup>

Note: "ND" means that the data was not provided in the literature. \* \* indicates results of concentrations below the detection limit, which was used as the lower limit of concentration range for statistical analysis.

### 2.1.2 重金属分布特征

重金属在北部湾沉积物中的空间分布预测图表明, Cr、As、Hg 的分布特征与 Zn、Ni、Cd、Cu、Pb 有较大差异(图 2)。Zn、Ni、Cd、Cu、Pb 的高浓度或较高浓度区域分布特征相似, 总体上呈现“T”型分布, 在广西壮族自治区防城港市港口区东南岸、广东省雷州半岛西南侧海域和海南省西侧至北部湾南部湾口区连线区域有高浓度分布。相反, As、Cr、Hg 则没有表现出“T”型分布特征。As 的最大浓度出现在琼州海

峡的西侧, 并向北部湾内扇形扩散; Cr 在湾内有 4 个高浓度区, 分别位于海南岛西北侧、琼州海峡西侧、北海市西南侧近岸和雷州半岛西北侧近岸; Hg 的高浓度区域主要分布在防城港市与海南岛之间以及雷州半岛西侧海域, 并且在铁山港区有 1 个显著高值区。此外, 这 3 种重金属在铁山港近岸区域的 S3 点位均有高值区。这些重金属有规律或无规律的分布特征表现出其存在局部富集现象, 这与变异系数超过 36% 存在高变异性的分析结论相吻合。



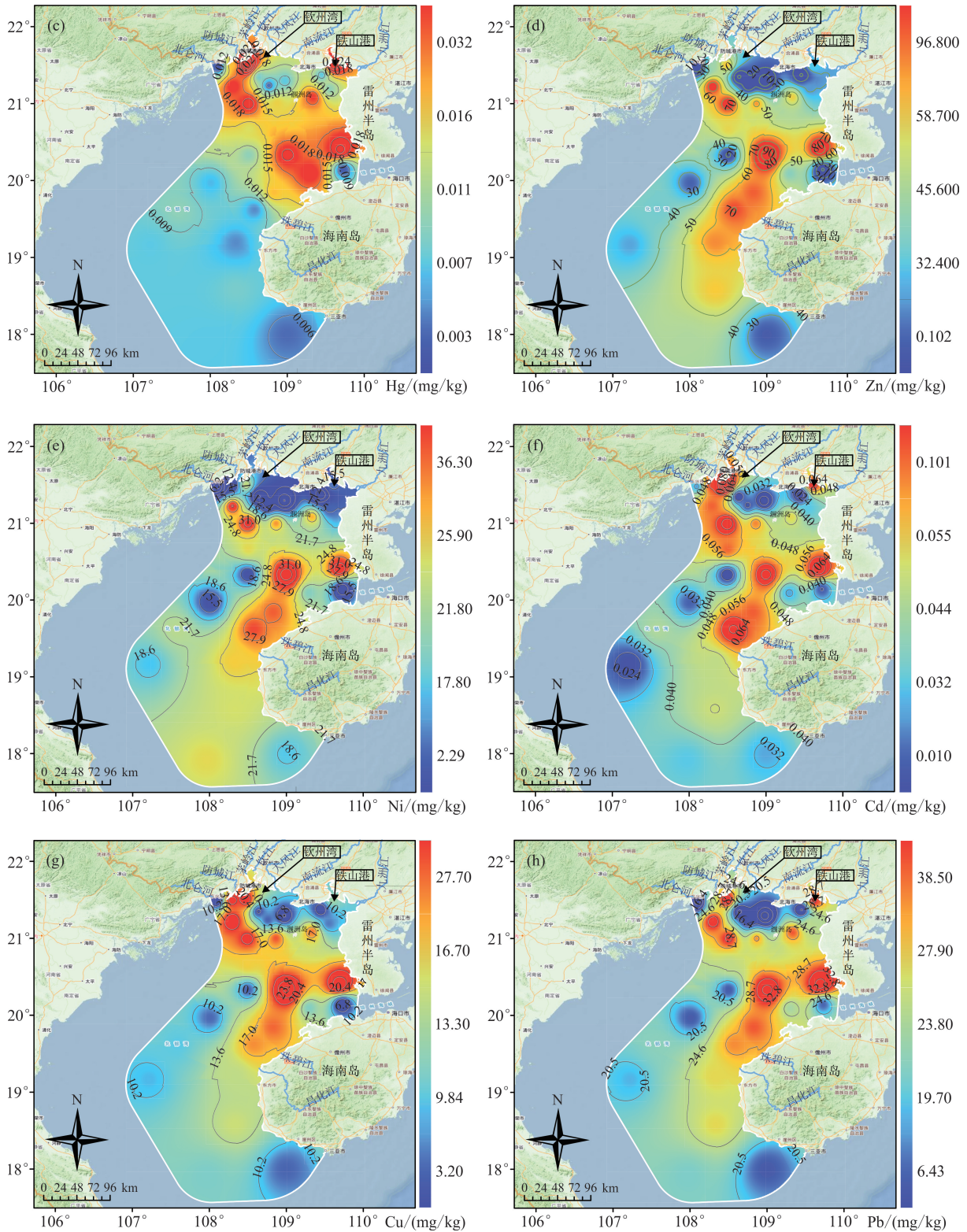


图2 北部湾表层沉积物中重金属分布预测

Fig. 2 Predicted distribution patterns of heavy metals in surface sediments of the Beibu Gulf

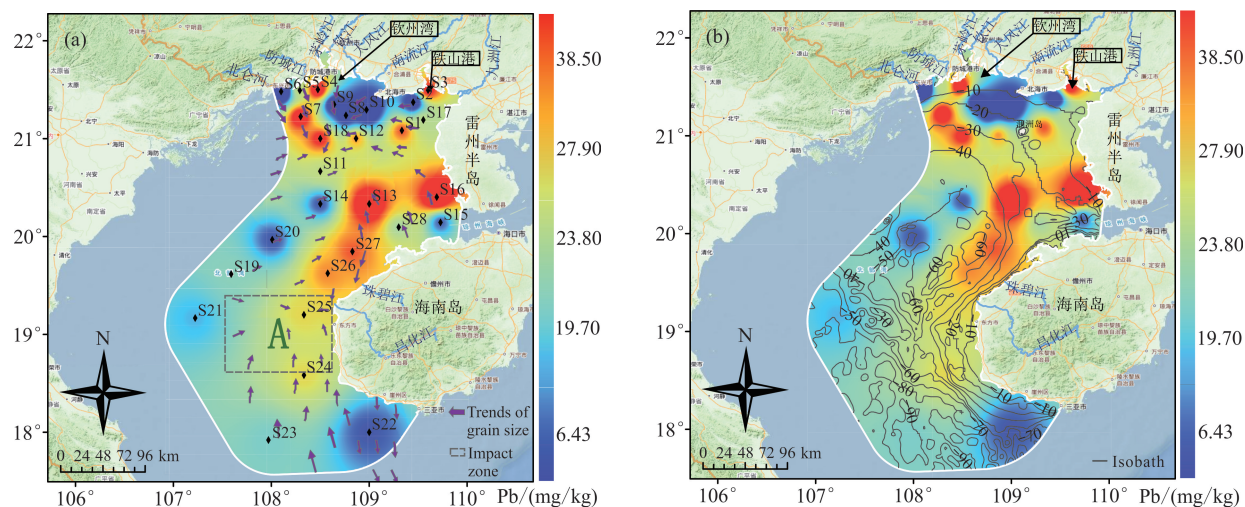
如图3所示,为了进一步了解重金属的“T”型分布特征,以重金属Pb为例,将预测的Pb的浓度分布与北部湾海域的等深线、北部湾粒径趋势<sup>[36]</sup>进行对

比,其中,等深线数据来源于全球岸线数据库(<http://www.soest.hawaii.edu/wessel/gshhg/>)。图3(a)显示,粒径趋势的最终走向与Pb的“T”型高值



分布基本一致,表明重金属的高值分布受粒径控制,粒径与表层沉积物中重金属的含量之间存在显著相关性<sup>[10]</sup>。图 3(b)显示,高浓度的 Pb 主要分布在水深 20—45 m 的区域,特别是在 S7(水深约 25 m)、S18(水深约 32 m)、S13(水深约 35 m)点位,这种分布特征对应于 Pb 在海洋洋流运动过程中的迁移路

径。从结果来看,重金属随着海水环流运动在水深 20—45 m 的海底坡上大量沉积,这种现象表征了近海区域海水环流的运动路径。而在近岸的 S3(水深约 5 m)、S4(水深约 5 m)、S16(水深约 20 m)点位中检测到的高浓度 Pb 则指示 Pb 的来源以及迁移路径。



The grain size trend is redrawn from reference [36].

图 3 Pb 的分布预测与粒径趋势、等深线

Fig. 3 Predicted Pb distribution patterns with grain size trend and isobaths

## 2.2 放射性元素/核素含量与分布特征

### 2.2.1 放射性元素/核素含量

表 4 提供了表层沉积物中放射性元素/核素的活度浓度数据。U 和 Th 浓度换算成活度浓度的结果如下:<sup>238</sup>U 的活度浓度为 9.07—41.60 Bq/kg,平均值为 27.00 Bq/kg,<sup>232</sup>Th 的活度浓度为 14.90—123.00 Bq/kg,平均值为 53.40 Bq/kg。另外,<sup>210</sup>Pb 和<sup>239+240</sup>Pu 的活度浓度分别为 14.70—187.00 和 0.012—0.451 Bq/kg,平均值分别为(90.10±52.30)和(0.166±0.145) Bq/kg。在北部湾表层沉积物中,

表 4 表层沉积物中放射性元素/核素、有机物分析统计结果

Table 4 Statistical analysis results of radioactive elements/nuclides and organic matter in surface sediments

分析项目 Analysis item	样本量(n/N) Sample size(n/N)	范围 Range	平均值 Mean	标准偏差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient of variation/%
Th	28/28	3.680—30.300 mg/kg	13.200 mg/kg	5.760 mg/kg	43.6
U	28/28	0.740—3.390 mg/kg	2.210 mg/kg	0.838 mg/kg	37.9
<sup>210</sup> Pb	28/28	14.70—187.00 Bq/kg	90.10 Bq/kg	52.30 Bq/kg	58.0
<sup>239+240</sup> Pu	28/28	0.012—0.451 Bq/kg	0.166 Bq/kg	0.145 Bq/kg	87.3
Organic matter	28/28	0.500%—9.000%	4.090%	2.200%	53.8

Note: n/N indicates that there are n measured values above the detection limit out of N samples, i. e. detected.

### 2.2.2 放射性元素/核素分布特征

如图 4、图 5 所示,放射性元素/核素的预测分布图揭示了 U 和 Th 的分布趋势与重金属 Cd、Cu、Ni、

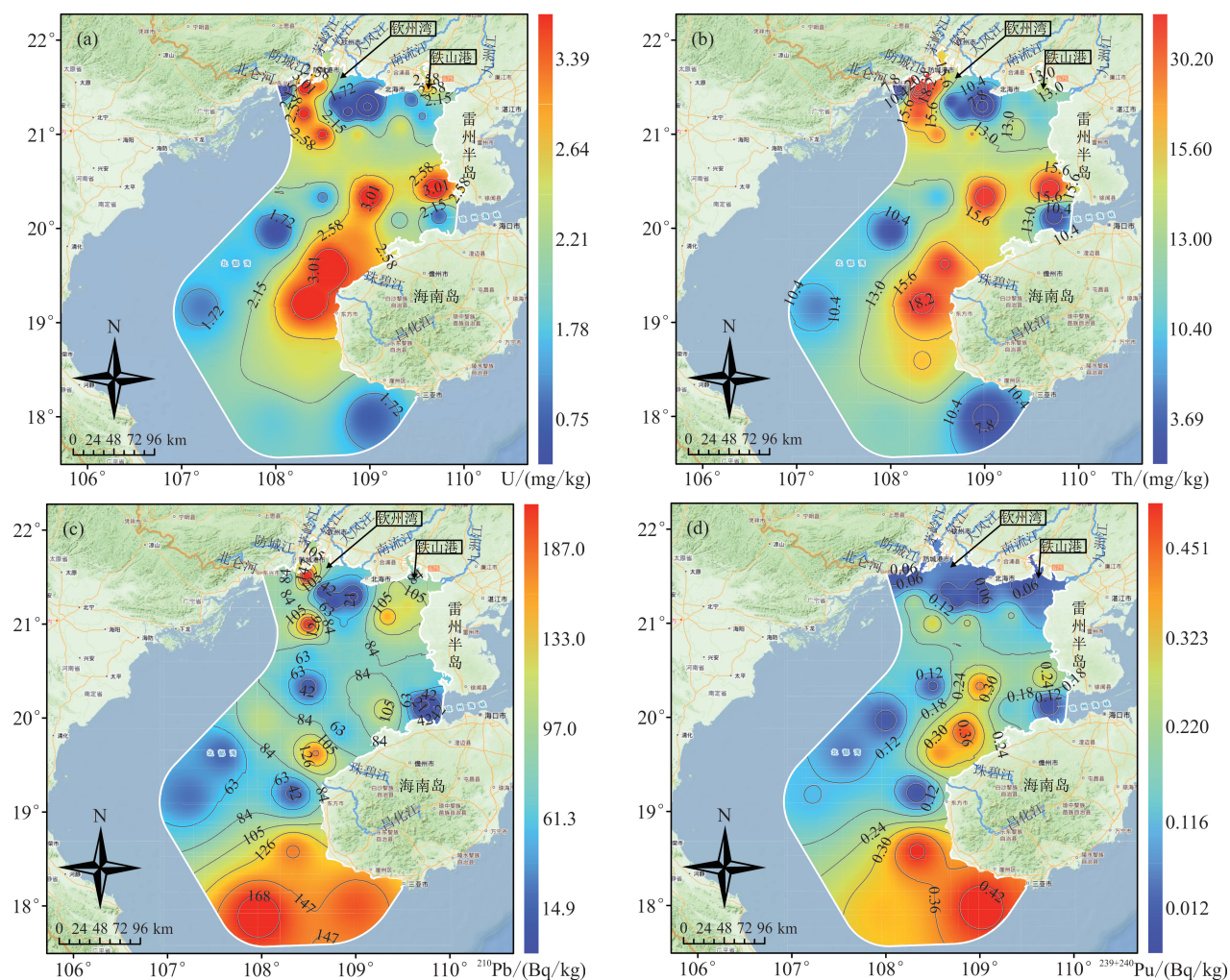
放射性核素活度浓度从低到高的顺序为<sup>239+240</sup>Pu、<sup>238</sup>U、<sup>232</sup>Th、<sup>210</sup>Pb。此外,表层沉积物中放射性元素/核素的变异系数从小到大的排序为 U (37.9%)、Th (43.6%)、<sup>210</sup>Pb (58.0%)、<sup>239+240</sup>Pu (87.3%),变异系数均超出了 36%,这表明表层沉积物中 U、Th、<sup>210</sup>Pb、<sup>239+240</sup>Pu 的分布具有高变异性,提示可能存在放射性元素/核素的局部富集现象。特别地,放射性核素<sup>238</sup>U 和<sup>232</sup>Th 的含量用于后续放射性环境质量评估,后续其他分析均使用放射性元素 U、Th。

Pb、Zn 相似,均呈现出“T”型的分布特征。<sup>239+240</sup>Pu 在北部湾湾内的分布趋势与 U、Th 相似,但与<sup>210</sup>Pb 不同。<sup>210</sup>Pb 在广西壮族自治区防城港市南侧海域、广



西壮族自治区北海市涠洲岛东北侧海域、海南省西北侧海域有零星高值区,并不呈现“T”型分布。然而,在北部湾南部湾口向南海方向, $^{239+240}\text{Pu}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 在S22(水深约65 m)和S23(水深约95 m)点位均有高

值分布,两者在海南省西南侧的深水区域的高值分布区域相似。综合U、Th、 $^{239+240}\text{Pu}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 的高变异系数和分布预测图,二者相互印证了放射性元素/核素在北部湾表层沉积物中的分布存在局部富集现象。



Predicted distribution of  $^{239+240}\text{Pu}$  is redrawn from reference [6].

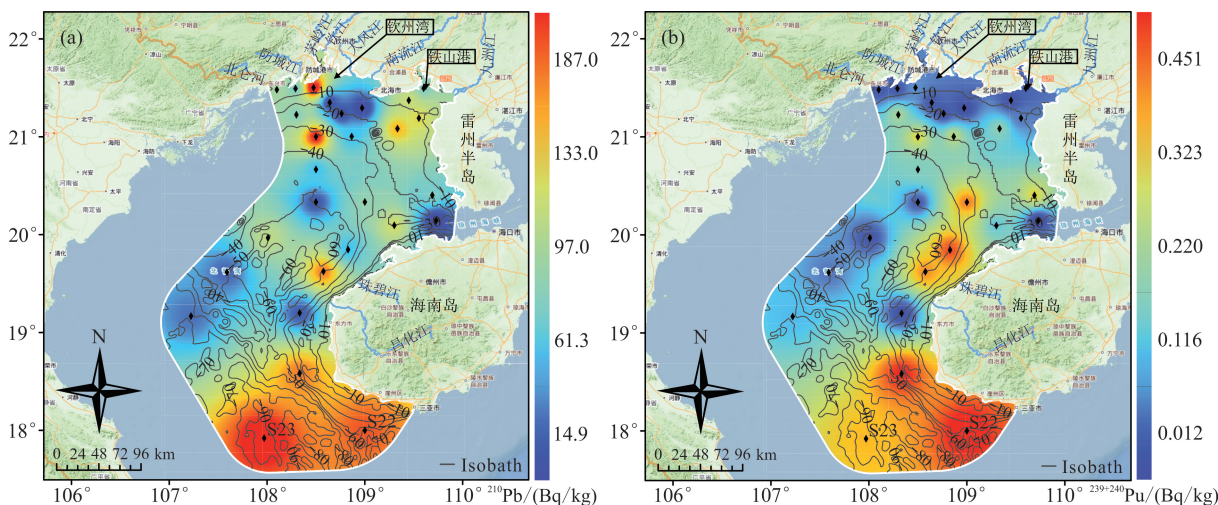
图4 放射性元素/核素分布预测

Fig. 4 Predicted distribution patterns of radioactive elements/nuclides

### 2.3 重金属的环境风险评价

本研究将表层沉积物中的Hg、Cd、Pb、Zn、Cu、Cr、As浓度与《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)<sup>[25]</sup>标准进行对比来评价重金属的环境风险。由于该标准中未给出Ni的质量标准,对Ni的评价参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)<sup>[37]</sup>中的最低风险筛选值(60

mg/kg)。对比结果显示,所有采样点位中的Hg、Cd、Pb、Zn、Cu、As最大浓度均低于第一类指标(表5),Ni的浓度(2.23—36.30 mg/kg)也低于最低风险筛选值。而28个采样点中有6个点位(S2、S8、S10、S15、S17、S26)的Cr浓度超过了第一类指标,且在S10点位中超过了第二类指标(图6)。

图 5  $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{239+240}\text{Pu}$  的分布预测与等深线Fig. 5 Predicted distributions of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{239+240}\text{Pu}$  with isobaths表 5 表层沉积物中重金属浓度范围与《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)<sup>[25]</sup> 标准Table 5 Concentration ranges of heavy metals in surface sediments and *Marine Sediment Quality* (GB 18668—2002)<sup>[25]</sup>

分析项目 Analysis item	浓度范围/(mg/kg) Concentration range/(mg/kg)			
	本研究 This study	第一类指标 First category indicator	第二类指标 Second category indicator	第三类指标 Third category indicator
Hg	0.003—0.032	$C \leq 0.20$	$0.20 < C \leq 0.50$	$0.50 < C \leq 1.00$
Cd	0.010—0.101	$C \leq 0.50$	$0.50 < C \leq 1.50$	$1.50 < C \leq 5.00$
Pb	6.400—38.500	$C \leq 60.00$	$60.00 < C \leq 130.00$	$130.00 < C \leq 250.00$
Zn	0.030—96.900	$C \leq 150.00$	$150.00 < C \leq 350.00$	$350.00 < C \leq 600.00$
Cu	3.180—27.700	$C \leq 35.00$	$35.00 < C \leq 100.00$	$100.00 < C \leq 200.00$
Cr	5.000—161.000	$C \leq 80.00$	$80.00 < C \leq 150.00$	$150.00 < C \leq 270.00$
As	1.170—8.180	$C \leq 20.00$	$20.00 < C \leq 65.00$	$65.00 < C \leq 93.00$

Note: C means the concentration of analysis item.

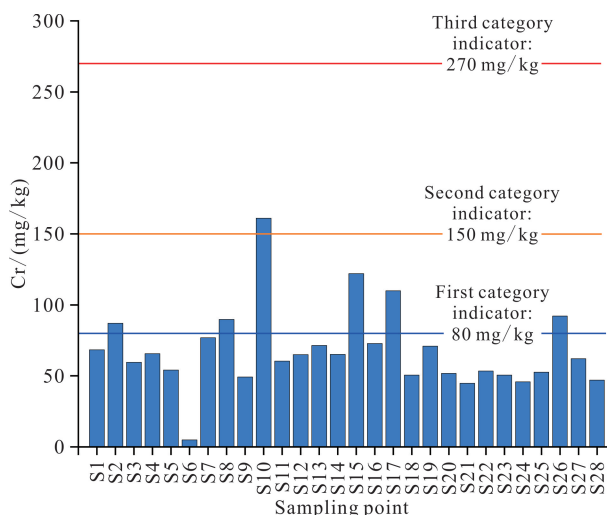


图 6 各采样点位表层沉积物中 Cr 的浓度

Fig. 6 Concentrations of Cr in surface sediments

## 2.4 放射性核素的环境风险评价

使用 $^{238}\text{U}$ 和 $^{232}\text{Th}$ 的最大活度浓度值(分别为41.6和123 Bq/kg)进行放射性核素环境风险评估计算,结果表明表层沉积物放射性环境质量属于第二级(安全级别)。这意味着表层沉积物中的放射性水平虽然超出了自然本底范围,但尚未对人类和海洋生物健康构成威胁<sup>[26]</sup>。由于该评价软件中未包含 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{239+240}\text{Pu}$ ,因此本研究所得到的这两种核素的活度浓度数据无法使用该软件进行评价。然而,这些数据仍可为未来北部湾区域表层沉积物中 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{239+240}\text{Pu}$ 的相关研究提供宝贵参考。

## 2.5 重金属与放射性元素/核素的相关性和来源解析

重金属和放射性元素/核素的最佳分段数  $k$  为 6 (图 7), Spearman 相关性、聚类分析结果如图 8 所示。重金属和放射性元素/核素划分为 6 个类别,聚

类分析结果提示具有分类差异的重金属和放射性核素为 Cr、<sup>210</sup>Pb、As、<sup>239+240</sup>Pu、Hg, 将作为后续重点讨论对象。Spearman 相关性显示, 表层沉积物中的 Cr 与 Hg、Zn、As、Cd、Ni、Cu、Pb、Th、U、<sup>210</sup>Pb、<sup>239+240</sup>Pu、有机物之间有弱相关性或不存在相关性 ( $-0.24 \leq r_s \leq 0.20$ ); <sup>210</sup>Pb 只与 <sup>239+240</sup>Pu、Cd 存在中等相关性 ( $r_s$  分别为 0.58、0.45); 与 Hg、Zn、As、Ni、Cr、Cu、Pb、Th、U、有机物有弱相关性 ( $0.24 \leq r_s \leq 0.37$ ); As 只与 Cr、<sup>210</sup>Pb 不存在相关性 ( $r_s$  分别为 0.20、0.37); <sup>239+240</sup>Pu 只与 Cr、Hg 不存在相关性 ( $r_s$  分别为 -0.22、0.35); Hg 只与 Cr、<sup>210</sup>Pb、<sup>239+240</sup>Pu 不存在相关性, 与 Zn、Ni、Cd、Cu、Pb、Th、U、有机物之间均具有强或极强相关性 ( $r_s \geq 0.76$ , 图 8、表 6)。Spearman 相关性不显著可能指向

不同污染物的多源性以及相异的沉积机制; 反之, 相关性显著则指向相同的源相和沉积机制的可能性。

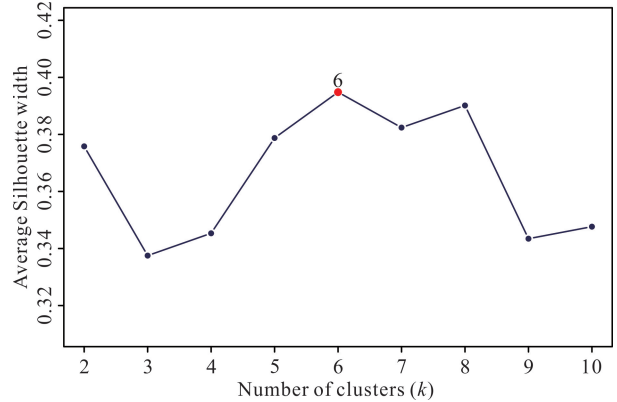
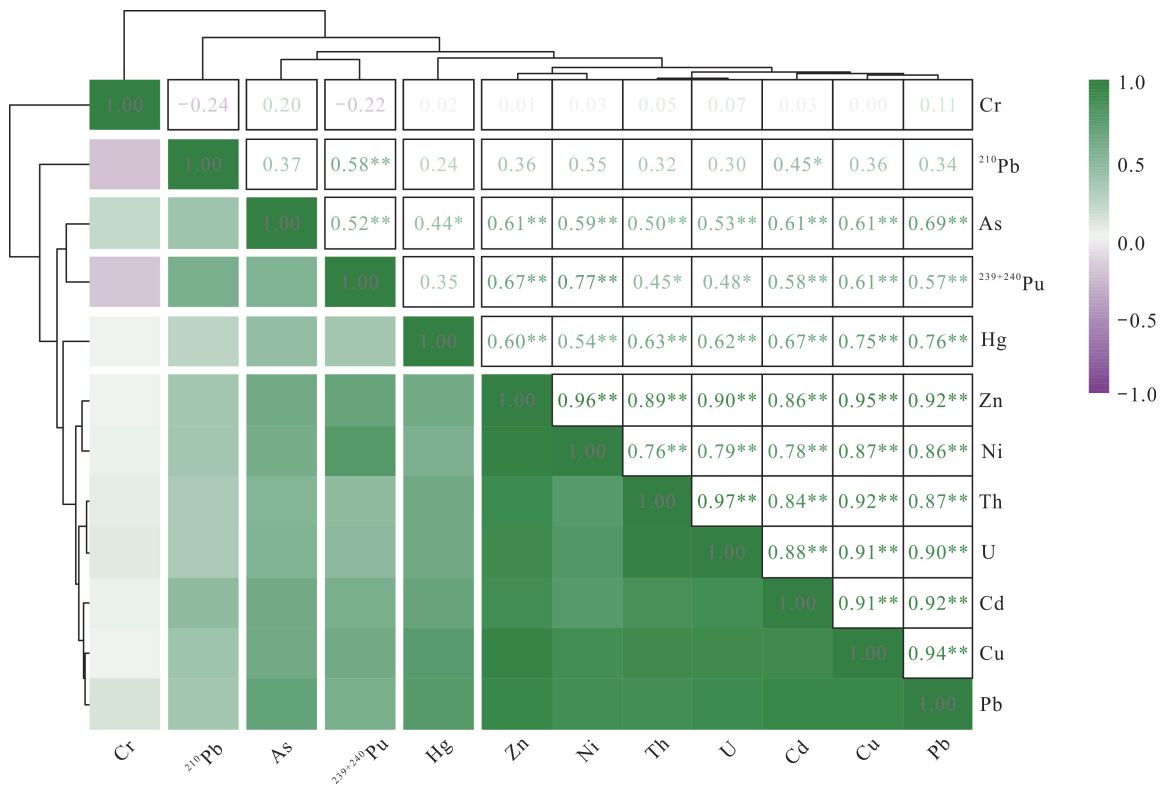


图 7 K-means 聚类优化: 平均轮廓系数分析

Fig. 7 K-means clustering optimization; analysis of the average silhouette coefficient



\* and \*\* indicate the correlations are significant at the 0.05 and 0.01 levels (double-tail), respectively.

图 8 重金属、放射性元素/核素的 Spearman 相关性分析与聚类分析

Fig. 8 Spearman correlation and cluster analysis of heavy metals and radioactive elements/nuclides

表 6 有机物与重金属、放射性核素/元素的 Spearman 相关性

Table 6 Spearman correlations between organic matter, heavy metals and radioactive nuclides/elements

	Cr	<sup>210</sup> Pb	As	<sup>239+240</sup> Pu	Hg	Zn	Ni	Th	U	Cd	Cu	Pb
OM	-0.11	0.35	0.51**	0.55**	0.56**	0.89**	0.84**	0.79**	0.82**	0.83**	0.82**	0.87**

Note: \*\* indicates the correlation is significant at the 0.01 level (double-tail).



综合前人研究<sup>[11,29,32,38]</sup>,可以推断北部湾沿岸区域的表层沉积物中重金属主要来源包括工业与生活污水排放、渔业养殖、沿岸侵蚀、化工污染和陆源输入等,而重金属的高值区域常与河流输入有关。特别是在河流入海口附近区域,如防城港与钦州湾,表层沉积物受到的污染显著。

从空间分布来看,北部湾表层沉积物中部分重金属呈现出“T”型分布特征,如图9所示。防城港附近海域(横左肩)和海南岛西北部海湾(下竖)的表层沉积物中重金属含量较高,与大型入海河流、人类活动频繁的港口及码头的存在密切相关<sup>[11]</sup>。然而,雷州半岛西南侧(横右肩)显示有较高浓度的重金属,其分布可能主要由雷州半岛西部南向沿岸流和琼州海峡的西向洋流所控制,因为该区域没有明显的大型入海河流或工业污染源<sup>[10]</sup>。其中,琼州海峡作为北部湾重要的物质交换通道,其西向洋流常年携带物质并给北部湾湾内沉积物提供补给<sup>[10,15,39]</sup>。而雷州半岛西部南向沿岸流物质输送机制目前未见有报道。同样,在重金属分布预测图中,除Cr外,其他重金属并未显示出南向沿岸流运输痕迹(图2),故雷州半岛西南侧表层沉积物中重金属的主要来源应为琼州海峡输入。

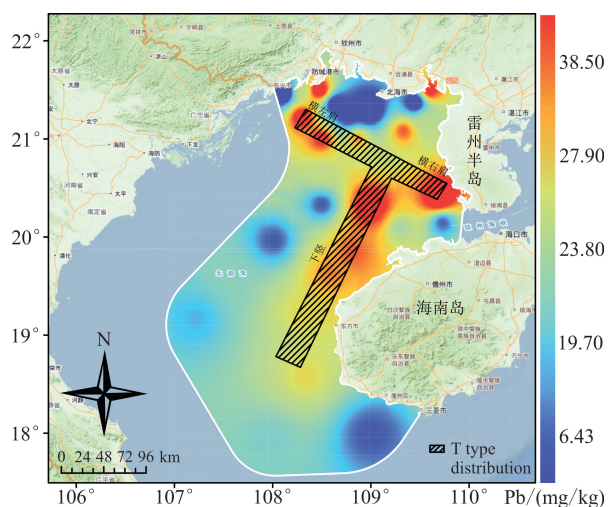


图9 重金属的“T”型分布(以Pb为例)

Fig. 9 “T” type distribution of heavy metals (using Pb as an example)

虽然Cr在雷州半岛西南侧区域S15点位及附近区域的高值分布显示了其由琼州海峡的西向洋流输入,但在北部湾内并未呈现出“T”型分布特征。并且Cr在北海市西南侧和雷州半岛西北侧存在高值分布,这一特征也印证了Cr与其他重金属无相关性。Cr作为燃煤工业排放的主要重金属污染物之一,其在这些区域的高值分布可能受到诸如来自大风江和

南流江的河流输入、北海市和雷州半岛周边可能存在的燃煤工业大气排放的影响。

As浓度的最高、次高值分别出现在S15、S16点位[图2(b)],表明琼州海峡的西向洋流是北部湾沉积物中As污染的主要输入源。Hg的输入源则较为复杂,在S16点位的高浓度区显示琼州海峡的西向洋流是其输入源;在S16点位西南侧方向的S28点位高浓度区则表明该区Hg来自海南省西北岸的陆源排放<sup>[40]</sup>;在S13点位的高值区显示该区既可能受海南省西北岸陆源排放的影响,也可能受琼州海峡洋流运输的影响,还可能受两者的双重控制[图2(c)]。As和Hg在防城港市附近海域和南侧的分布,同其他重金属的“T”型分布(横左肩)特征受控因素一致。此外,Hg、Cd和Pb在铁山港内均存在一个高值点,显示其可能来源于铁山港附近工业与生活污水排放<sup>[38]</sup>。

U和Th不仅与其他重金属存在相关性,而且同样也呈现出“T”型分布特征,表明其来源可能与重金属相似,主要为陆源输入。这与河流输入被认为是北部湾沉积物中U和Th主要来源的研究结果一致<sup>[5,41]</sup>。海洋沉积物中<sup>210</sup>Pb主要来源于大气沉降和泥沙载带,然而在北部湾表层沉积物中<sup>210</sup>Pb与其他重金属、有机物无相关性,说明其沉积过程可能与有机物的关系不密切,主要来源可能为大气沉降。<sup>210</sup>Pb与Cd存在中等程度相关性,可能指向共有的沉积影响因素。此外,<sup>210</sup>Pb在北部湾南部湾口区域表现出高活度浓度,最高值出现在深水区域的S23点位,这可能是由深水区的沉积速率较低、水体较稳定以及深水沉积物的特殊地质和地球化学来源等因素造成的结果。

有机物分布预测如图10所示,<sup>239+240</sup>Pu与Zn、Cd、As、Ni、Cu、Pb、Th、U、有机物的相关性及其分布模式表明,<sup>239+240</sup>Pu的分布在一定程度上与这些重金属相似,在北部湾湾内总体上呈现“T”型分布特征。<sup>239+240</sup>Pu的分布由北部湾南部外海向北部湾湾内表现出逆时针递减的特征趋势,而在北部湾南部湾口位置(海南岛西南侧)存在最高活度浓度,这与海南岛东南近海沉积物中的高<sup>239+240</sup>Pu活度浓度及其来源相对应,考虑其主要受远洋洋流运输的影响<sup>[6,42,43]</sup>。相似地,雷州半岛西南侧的高浓度<sup>239+240</sup>Pu,其来源可能同样受琼州海峡西向洋流输送的影响。同时,<sup>239+240</sup>Pu与有机物的相关性表明有机物的存在对<sup>239+240</sup>Pu的沉积有一定影响,这与大多数重金属的

沉积过程相似。

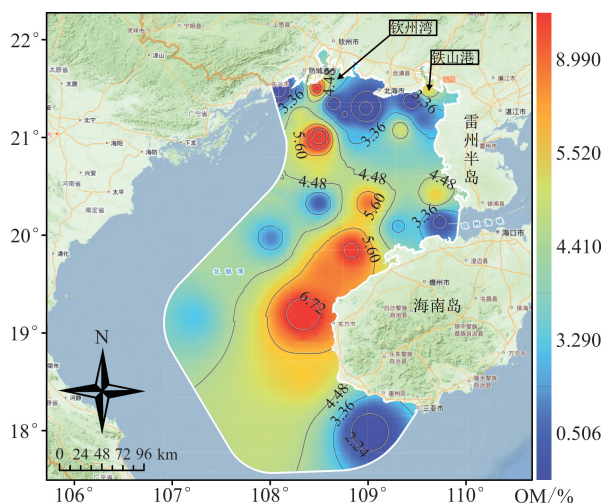


图 10 有机物的分布预测

Fig. 10 Predicted distribution of organic matter

## 2.6 环境研究启示

本研究通过对北部湾表层沉积物中重金属元素和放射性元素/核素的相关性分析与来源解析发现,北部湾表层沉积物中重金属的分布模式明显受到洋流运动的影响。在远离陆地的区域(近海区域),重金属分布与洋流运动路径高度相关,表明洋流是该区域重金属污染的重要传播途径。在靠近陆地的区域(近岸区域),表层沉积物中有高浓度重金属分布,表现出陆源污染源的征。在近岸区域内(如 S2、S6、S8、S9、S10 点位),As、Hg、Zn、Ni、Cd、Cu、Pb、U、Th 的浓度均明显低于其他点位,这是因为淡水使重金属在河口之外随着泥沙沉积造成高值区域外延。此外,由于南海潮波部分经琼州海峡进出北部湾,导致雷州半岛西侧存在表层沉积物高值区,重金属可能受表层沉积物粒度影响,造成部分重金属如 Cr、As 在 S15 点位存在高值,而其他重金属在 S16 点位出现高值。所以北部湾海域复杂水动力环境在形成重金属的“T”型分布特征上起到了重要作用。

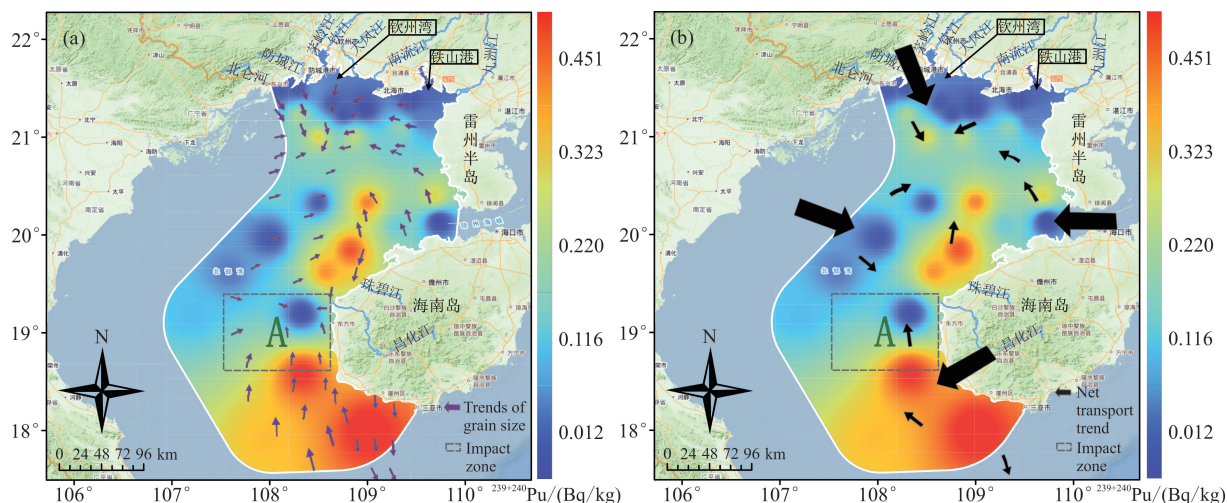
放射性元素 U 和 Th 的分布也遵循这一模式。但 $^{210}\text{Pb}$ 的分布模式则更为复杂,显示出不同源相的混合。在北部湾南部湾口和北部湾湾内区域, $^{210}\text{Pb}$ 的分布存在显著差异,这可能由于大气沉降是其来源所致。 $^{239+240}\text{Pu}$ 在北部湾南部湾口的高值分布揭示了远洋传输对该区域的影响。在北部湾湾内的高

值分布则表明了洋流运动路径对其分布的决定性作用。徐志伟等<sup>[36]</sup>的研究进一步支持了这一发现,其通过多元统计分析和物源分析确定了北部湾东部海域沉积物的运输趋势,并提供了北部湾表层沉积物粒径趋势矢量图和净运输概图。本研究以 $^{239+240}\text{Pu}$ 为例绘制了 $^{239+240}\text{Pu}$ 分布与粒径趋势、净运输趋势关系图(图 11),清晰地展示了 $^{239+240}\text{Pu}$ 从远洋向北部湾输送的路径。 $^{239+240}\text{Pu}$ 在北部湾南部湾口大量沉积后,剩余部分随洋流向北迁移,并受到由昌化江带来的淡水冲击和流速变化影响,在 A 区域形成 $^{239+240}\text{Pu}$ 浓度的低值区。A 区域为淡水和海水混合的复杂水动力叠加区域<sup>[36]</sup>,本研究将其命名为冲击区。逾越冲击区之后, $^{239+240}\text{Pu}$ 随海流呈逆时针方向迁移,并形成递减梯度。特别值得注意的是,在雷州半岛西南侧检测到 $^{239+240}\text{Pu}$ 高值分布带,这可能是由琼海海峡的西向洋流与湾内逆时针海流共同作用造成的。然而,在防城港近岸等其他近岸区域均未检测到 $^{239+240}\text{Pu}$ 高值区,这表明北部湾表层沉积物中高活度浓度的 $^{239+240}\text{Pu}$ 并非主要来自沿岸河流输入。

特别地,结合图 2 和图 4 的分布预测图研究发现,在重金属和放射性元素/核素中,仅 As、 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{239+240}\text{Pu}$ 的分布在冲击区呈现低值现象,即其随洋流运输至此后被淡水稀释、冲断、覆盖等,形成了冲击区浓度断层,而其他元素如 U、Pb 等未呈现浓度断层现象。这种断层现象可能提示这些重金属和放射性污染物运输来源存在差异,说明来自北部湾沿岸的陆源污染物在海洋运输过程中可以随洋流顺时针运动到此处并穿过冲击区,形成递减的趋势。来自北部湾湾外的污染物运输到此处后会受到复杂水动力影响,因此只有部分污染物可以穿过冲击区进入湾内。

综上所述,本研究发现北部湾表层沉积物中的重金属和放射性元素/核素呈现出既相似又不同的分布特征。通过这些分布特征揭示了主控因素,为北部湾海洋研究提供了关于沉积物中污染物来源和示踪物迁移路径的重要信息。这一发现不仅与现有的海洋科学研究相印证,而且可以进一步为理解海流行为、粒度分布、成岩机制、污染溯源等研究提供一定的帮助。





The trends of particle size and net transport are redrawn from reference [36].

图 11  $^{239+240}\text{Pu}$  分布预测与粒径趋势、净运输趋势

Fig. 11 Predicted  $^{239+240}\text{Pu}$  distribution patterns with grain size trends and net transport trends

### 3 结论

本研究对北部湾海域 28 个采样点位的表层沉积物中重金属和放射性元素/核素进行全面分析,以评估其环境风险,并通过其分布特征和相关性讨论来解析其来源和输运趋势,最后形成了以下主要结论与建议:

①北部湾表层沉积物中重金属 Hg、Zn、As、Cd、Cu、Pb、Ni 浓度总体处于历年浓度范围内,部分采样点的 Cr 浓度超出了《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)<sup>[25]</sup>中的第一类指标;放射性核素 $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 的环境风险评估为第二级,属于安全级别。

②北部湾表层沉积物中重金属 Zn、Cd、Ni、Cu、Pb 和放射性元素/核素 U、Th、 $^{239+240}\text{Pu}$  呈“T”型分布特征,显示其源相指示作用,即靠近陆地高值表示陆源输入,远离陆地高值表示洋流运动输入。As、Cr、Hg、 $^{210}\text{Pb}$  分布无“T”型分布特征,显示其高值分布主控因素复杂。

③重金属和放射性元素/核素的“T”型分布特征印证了北部湾洋流的逆时针运动、陆源输入和洋流跨区域运输等观点,为海洋环境保护和经济发展的相关研究以及交叉学科提供参考和研究基础。

本研究的采样点位数量过少,仅从大尺度上进行讨论,重金属和放射性核素在局部地区的实际分布需要更多点位数据支撑。在后续的研究中,需要加强对入海河流的针对性监测,在枯水期和丰水期进行采样分析,来确定入海河流对北部湾海水及表层沉积物污染物的贡献;同时,结合海洋水文和表层沉积物粒度

以及污染物固-液分配系数等来完善海洋污染物分布预测模型,进而完成放射性核素与其他学科交互研究。

北部湾海洋环境保护任重道远,特别是 As、Cr、Hg 的分布显示出人为活动的复杂影响,建议广西、广东、海南等省区通力合作,按照国家有关北部湾经济发展规划、生态功能保护等相关规定,制定统一的北部湾海洋环境保护政策,加大海洋环境治理和监管力度,促进经济与海洋的协调发展。北部湾沿海是我国核电建设的重要阵地,开展海洋核安全技术保障研究,守住北部湾海洋辐射环境安全底线至关重要,建议加快推进海洋沉积物的放射性质量评价方法或标准的建立,为海洋核安全评估提供评价依据。

#### 参考文献

- [1] LAO Q B, SU Q Z, LIU G Q, et al. Spatial distribution of and historical changes in heavy metals in the surface seawater and sediments of the Beibu Gulf, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 146: 427-434.
- [2] GU Y G, LIN Q, YU Z L, et al. Speciation and risk of heavy metals in sediments and human health implications of heavy metals in edible nekton in Beibu Gulf, China: a case study of Qinzhou Bay [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 101(2): 852-859.
- [3] CHEN F J, LIN J, QIAN B H, et al. Geochemical assessment and spatial analysis of heavy metals in the surface sediments in the eastern Beibu Gulf: a reflection on the industrial development of the south China coast [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(3): 496.



- [4] 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.
- [5] LIN W H, FENG Y, YU K F, et al. Long-lived radionuclides in marine sediments from the Beibu Gulf, South China Sea: spatial distribution, controlling factors, and proxy for transport pathway [J]. *Marine Geology*, 2020, 424: 106157.
- [6] GUAN Y J, HE H, FAN K D, et al. Spatial distribution, source identification, and transportation paths of plutonium in the Beibu Gulf, South China Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, 199: 115972.
- [7] 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.
- [8] DOU Y G, LI J, ZHAO J T, et al. Distribution, enrichment and source of heavy metals in surface sediments of the eastern Beibu Bay, South China Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 67(1/2): 137-145.
- [9] 张志锋, 王燕, 韩庚辰, 等. 北部湾沉积物中重金属元素的地球化学特征及物源初探[J]. *海洋学报(中文版)*, 2013, 35(2): 72-81.
- [10] 陈亮, 李团结, 杨文丰, 等. 南海北部近海沉积物重金属分布及来源[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(3): 464-470.
- [11] 庞国涛, 阎琨, 张晓磊, 等. 防城港海域沉积物重金属分布特征及风险评价[J]. *广西科学*, 2023, 30(5): 931-941.
- [12] XIA P, MENG X W, YIN P, et al. Eighty-year sedimentary record of heavy metal inputs in the intertidal sediments from the Nanliu River estuary, Beibu Gulf of South China Sea [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(1): 92-99.
- [13] GAO J S, WU G D, YA H Z. Review of the circulation in the Beibu Gulf, South China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 138: 106-119.
- [14] LE T P Q, GARNIER J, GILLES B, et al. The changing flow regime and sediment load of the Red River, Viet Nam [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 334(1/2): 199-214.
- [15] 许冬, 葛倩, 韩喜彬, 等. 海洋沉积源-汇过程的驱动因素: 以北部湾为例[J]. *海洋学研究*, 2022, 40(3): 17-32.
- [16] CHEN Z Z, XU S N, QIU Y S, et al. Modeling the effects of fishery management and marine protected areas on the Beibu Gulf using spatial ecosystem simulation [J]. *Fisheries Research*, 2009, 100(3): 222-229.
- [17] 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. 海洋监测规范 第3部分: 样品采集、贮存与运输: GB 17378.3-2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [18] 中华人民共和国生态环境部. 辐射环境监测技术规范: HJ 61-2021 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2021.
- [19] 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. 土壤中放射性核素的 $\gamma$ 能谱分析方法: GB/T 11743-2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [20] 中华人民共和国环境保护部. 土壤和沉积物汞、砷、硒、锑的测定微波消解/原子荧光法: HJ 680-2013 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [21] 中华人民共和国国土资源部. 区域地球化学样品分析方法 第2部分: 氧化钙等27个成分量测定 电感耦合等离子体发射光谱法: DZ/T 0279.2-2016 [S]. 北京: 地质出版社, 2016.
- [22] 中华人民共和国国土资源部. 区域地球化学样品分析方法 第5部分: 镉量测定 电感耦合等离子体质谱法: DZ/T 0279.5-2016 [S]. 北京: 地质出版社, 2016.
- [23] 中华人民共和国国土资源部. 区域地球化学样品分析方法 第6部分: 钍量测定 电感耦合等离子体质谱法: DZ/T 0279.6-2016 [S]. 北京: 地质出版社, 2016.
- [24] 环境保护部办公厅, 国土资源部办公厅, 农业部办公厅. 关于印发全国土壤污染状况详查样品分析测试方法系列技术规定的通知: 环办土壤函〔2017〕1625号 [EB/OL]. (2022-10-23)[2023-10-31]. [https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201711/t20171106\\_425226.htm](https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201711/t20171106_425226.htm).
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 海洋沉积物质量: GB 18668-2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [26] 余雯, 虞泽锋, 王洪波, 等. 海洋环境辐射质量分级方法及导出活度浓度限值初探[J]. *应用海洋学学报*, 2022, 41(3): 386-394.
- [27] 门武, 余雯, 何建华, 等. 我国海洋放射性环境质量评价方法研究进展[J]. *应用海洋学学报*, 2022, 41(3): 554-564.
- [28] LÜ J S, LIU Y, ZHANG Z L, et al. Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 261: 387-397.
- [29] 滕德强, 崔振昂, 袁晓婕, 等. 北部湾海域表层沉积物中重金属元素分布特征及潜在生态危害评价[J]. *中国地质调查*, 2020, 7(6): 79-85.
- [30] 朱学韬, 林海英, 冯庆革, 等. 广西北部湾表层沉积物重金属污染水平、生态风险评价和源分析[J]. *环境工程*,

- 2021, 39(8):69-76.
- [31] 梁千千, 谭凯燕, 戴圣生, 等. 钦州湾海域表层沉积物重金属分布与污染评价[J]. 广西科学, 2023, 30(2):291-298.
- [32] 甘华阳, 郑志昌, 梁开, 等. 广西北海近岸海域表层沉积物的重金属分布及来源分析[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(5):698-704.
- [33] 曲良, 谭海涛, 刘涛, 等. 北部湾铁山港附近海域水体和沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. 环境化学, 2023, 42(3):757-768.
- [34] 雷富, 陈宪云, 张荣灿, 等. 北部湾近岸海域夏季海洋环境质量评价[J]. 广西科学, 2014, 21(1):84-88.
- [35] 姜发军, 尹闯, 张荣灿, 等. 2010年冬季广西北部湾近岸海域表层海水和沉积物中重金属污染现状及评价[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(6):824-830.
- [36] 徐志伟, 汪亚平, 李炎, 等. 多元统计及物源分析支持的北部湾东部海域沉积物输运趋势[J]. 海洋学报(中文版), 2010, 32(3):67-78.
- [37] 中华人民共和国生态环境部, 中华人民共和国国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018 [S]. 北京: 中国环境出版集团, 2018.
- [38] 青尚敏, 陈海南, 孙燕, 等. 广西铁山港邻近海域表层沉积物中重金属污染现状[J]. 广西科学, 2021, 28(6):568-576.
- [39] 陈丽蓉, 徐文强, 申顺喜, 等. 南海北部大陆架和北部湾沉积物中的矿物组合及其分布特征[J]. 海洋科学, 1986, 10(3):6-10.
- [40] 李越, 李顺, 蔡观强. 海南岛北部海湾重金属污染分布及来源[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(8):37-46.
- [41] COCHRAN J K. The oceanic chemistry of the uranium and thorium series nuclides [M]// IVANOVICH M, HARMON R S. Uranium-series disequilibrium: applications to earth, marine, and environmental sciences. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1992.
- [42] WANG R R, LEI L, LI G, et al. Identification of the distribution and sources of Pu in the northern South China Sea: influences of provenance and scavenging [J]. ACS Earth and Space Chemistry, 2019, 3(12):2684-2694.
- [43] ZHANG M T, QIAO J X, ZHANG W C, et al. Plutonium isotopes in the northwestern South China Sea: level, distribution, source and deposition [J]. Environmental Pollution, 2022, 298:118846.

## Distribution, Risk, Source Apportionment, and Implications for Environmental Research of Heavy Metals and Radioactive Elements/Nuclides in the Surface Sediments of the Beibu Gulf

XU Zeyue<sup>1</sup>, LIU Manqing<sup>1\*</sup>, HE Xianwen<sup>1</sup>, ZHOU Hualong<sup>1</sup>, HUANG Meiqin<sup>1</sup>, GUAN Yongjing<sup>2</sup>, HE Hua<sup>2</sup>, LIU Zhiyong<sup>3</sup>, GUO Kaixing<sup>1</sup>, LU Ying<sup>1</sup>, HE Jiman<sup>1</sup>, WEI Qiuyang<sup>1</sup>

(1. Radiation Environment Management and Monitoring Station of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning, Guangxi, 530222, China; 2. School of Physical Science and Technology, Guangxi Key Laboratory for Relativistic Astrophysics, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 3. School for Radiological and Interdisciplinary Sciences (RAD-X), State Key Laboratory of Radiation Medicine and Protection, Soochow University, Suzhou, Jiangsu, 215123, China)

**Abstract:** This study comprehensively analyzed heavy metals (Hg, Cr, Zn, As, Cd, Ni, Cu and Pb) and radioactive nuclides ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{239+240}\text{Pu}$ ) in the surface sediments of the Beibu Gulf of China, aiming to assess their environmental risks and investigate their effectiveness as environmental indicators. The results showed that except for the Cr concentration in some areas exceeding the standard of the first category of indicators in the *Marine Sediment Quality* (GB 18668—2002), the concentrations of other heavy metals were

lower than the standards of indicators in the first category. The environmental risk assessment of radioactive nuclides showed that  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  belonged to the second level (safety level), while  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{239+240}\text{Pu}$  still lacked assessment criteria. Some heavy metals and radioactive elements nuclides showed a “T” type distribution, which implied a variety of pollution sources and transmission mechanisms. The results show the unique source phase tracing potential of radioactive elements/nuclides in marine environmental monitoring and management. Moreover, the results reveal that the research on marine radioactivity as an interdisciplinary subject can give new insights into the research on protection and comprehensive pollution control of the marine environment.

**Key words:** Beibu Gulf; surface sediments; heavy metals; radioactive nuclides; environmental risk assessment; spatial distribution; implication for environmental research

责任编辑: 陆 雁



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxkx@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxkx.ijournal.cn/gxkx/ch>