

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.

LI Yue, LI Shun, CAI Guanqiang. Distribution and origination of heavy metal pollution in bays of northern Hainan Island[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(8): 37-46.

海南岛北部海湾重金属污染分布及来源

李越, 李顺, 蔡观强

(中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510075)

摘要:伴随社会经济的发展,海南岛附近海域出现不同程度的重金属污染。2019年我们采集了位于海南岛北部的铺前湾、澄迈湾、后水湾、洋浦湾的表层沉积物,对照国家海洋沉积物质量标准(GB18668-2002),使用地累积指数、重金属污染指数、重金属污染程度指数以及潜在生态风险指数等多种参数评价了各海湾重金属分布及污染状况。结果显示,砷(As)是各海湾中污染最明显的重金属元素。澄迈湾及铺前湾总体污染状况较为严重,洋浦湾总体污染状况较轻。船舶燃油燃烧、水产养殖、化肥施用、矿业废水等人类活动都会带来不同程度的重金属污染,需采取适当措施,有针对性地海南岛北部海湾重金属污染进行防治。

关键词:海南岛北部海湾;表层沉积物;重金属污染;来源分析

中图分类号:P736.4

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2021.134

0 引言

海南岛北部以琼州海峡与雷州半岛相隔,西邻北部湾。近年来,随着社会经济的加速发展,海南岛陆上水系及附近海域出现了不同类型、不同程度的污染^[1-4]。在各类污染中,重金属污染越来越受到人们的关注,过量的重金属累积会对人体健康造成影响^[5]。已有很多研究对海南岛不同水域的重金属污染状况进行评价,例如 XU等^[3]以及 ZHAO^[4]曾对海南岛主要河流的沉积物重金属污染状况进行评价;HU等^[6]、YANG等^[7]、ZHAO等^[8]曾分别对昌化河口、东寨港以及三亚沿岸的沉积物重金属污染分布及来源进行分析;DOU等^[9]对北部湾东侧重金属污染进行了研究。

为更好地了解海南岛北部海湾的重金属污染分布并分析其来源,本文采集了海南岛北部包括铺前湾、澄迈湾、后水湾、洋浦湾在内的4个海湾的表层沉积物,根据国家海洋沉积物质量标准(GB 18668-2002)^[10]对各海湾沉积物的重金属含量状

况进行评价,使用了地累积指数、重金属污染指数、重金属污染程度指数以及潜在生态风险指数等多种参数对各海湾表层沉积物中包括铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、镉(Cd)、总铬(Cr)、总汞(Hg)以及砷(As)的污染状况进行了评价。

1 样品采集及测试方法

1.1 样品采集

2019年,广州海洋地质调查局使用抓斗取样器对铺前湾、澄迈湾、后水湾、洋浦湾(图1)进行表层沉积物取样。其中,铺前湾(110.41°-110.55°E, 20.03°-20.09°N)共采集17个站位,采样区水深1.9~12.7 m,南渡江自海湾西北部入海;澄迈湾(109.96°-110.05°E, 19.95°-19.99°N)共采集17个站位,采样区水深4.8~18.3 m;后水湾(109.38°-109.50°E, 19.87°-19.93°N)共采集17个站位,采样区水深8.2~16.6 m;洋浦湾(109.05°-109.18°E, 19.62°-19.72°N)共采集13个站位,采样区水深5.7~18.8 m,以排浦江为主要入海河流。

1.2 测试方法

本研究对沉积物中的Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg、

收稿日期:2021-05-03

资助项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20190627, DD20221712)

作者简介:李越(1994-),女,硕士,助理工程师,主要从事第四纪地质及环境变化方面的研究工作. E-mail: cugliyue@126.com

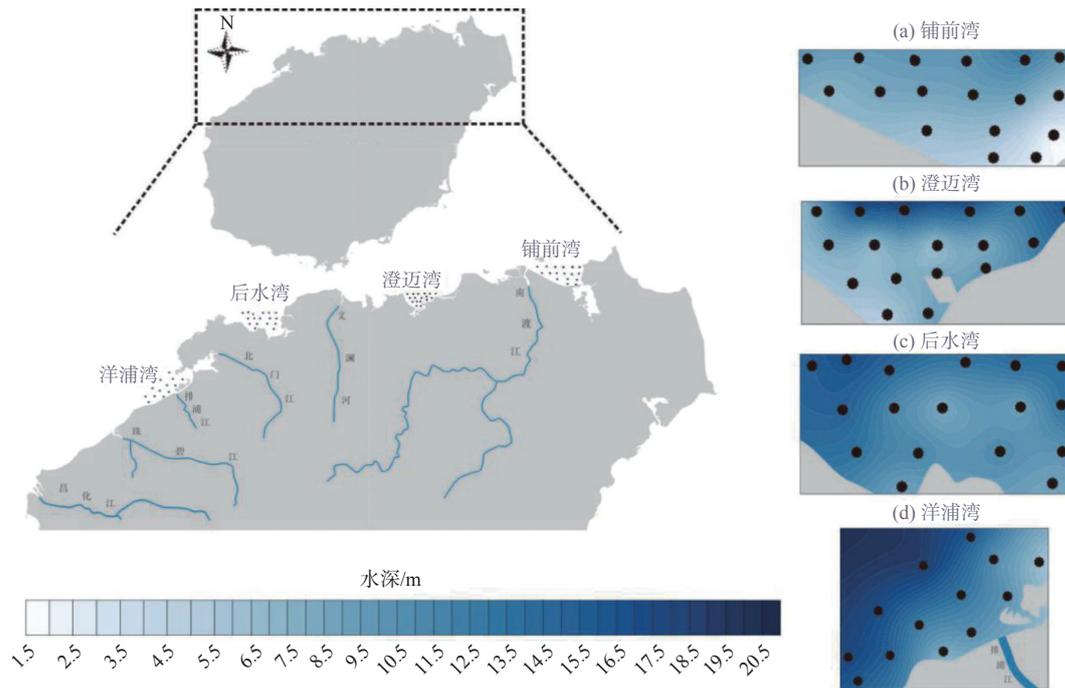


图1 采样区及采样点位置

Fig.1 Locations and sampling points of the study area

As 进行测试。其中 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 采用《海洋监测技术规程第 2 部分: 沉积物》中的电感耦合等离子体质谱法(HY/T 147.2-2013)进行测试^[11]; Hg 以及 As 采用《土壤和沉积物汞、砷、硒、铋、锑的测定》中的微波消解/原子荧光法(HJ680-2013)^[12]进行测试, 见表 1。

表 1 重金属分析及检出限

Table 1 Analytical methods and detection limits of different heavy metals

项目	检出限/(mg/kg)	分析方法	检测仪器
Zn	1		
Cu	0.6		
Pb	2	电感耦合等离子体 质谱法	电感耦合等离子体 质谱仪/7900 ICP-MS
Cd	0.09		
Cr	2		
Hg	0.002	微波消解/原子荧 光法	原子荧光分光光度计/ AFS-930
As	0.01		

重金属分析测试的具体方法如下:

电感耦合等离子体质谱法: ①对沉积物进行消解, 将 0.1 g 冻干研磨后的沉积物置于聚四氟乙烯坩埚中, 加少许水润湿样品; ②加入 5 mL HNO₃, 盖好盖子置于电热板上, 升温至 180 °C, 加热 3 h, 取出降温; ③依次加入 2 mL HNO₃、2 mL HF、2 mL HClO₄, 盖好盖子置于电热板上, 升温至 180 °C, 加热 3 h 后取出; ④打开盖子赶酸, 反复加入少量水, 至酸赶尽; ⑤加入 1 mL HNO₃ 溶液微热浸提, 将

消解液转入 25 mL 比色管中, 定容至标线, 混合均匀后静置待测; ⑥使用电感耦合等离子体质谱仪(7900 ICP-MS)对产生的酸性消化液进行测试。

微波消解/原子荧光法: ①将 0.1 g 冻干研磨后的沉积物置于溶样杯中, 用少量水润湿; ②依次加入 6 mL HCl、2 mL HNO₃, 混合使样品与消解液充分接触; ③待反应结束后将溶样杯置于消解罐中密封, 将消解罐装入支架后放入微波消解仪中依据预定升温程序进行微波消解; ④程序结束后冷却, 待罐内温度降至室温后由通风橱中取出, 缓慢泄压打开消解罐盖; ⑤把玻璃漏斗插于 50 mL 容量瓶的瓶口, 用慢速定量滤纸对消解后的溶液进行过滤并转移入容量瓶中, 使用实验用水洗涤溶样杯及沉淀, 将所有洗涤液并入容量瓶中, 最后用实验用水定容至标线, 混匀后静置待测; ⑥使用原子荧光分光光度计(AFS-930)对样品进行测试。

同时对采集的沉积物进行平均粒径(Mz)测试, 测试依据《海洋调查规范 第 8 部分: 海洋地质地球物理调查》激光法(GB/T 12763.8-2007(6.3.2.3))^[13]进行: ①取数克样品加入玻璃杯中, 加入纯净水以及 5 cm³ 的 0.5 mol/dm³ 的 [NaPO₃]₆ 后浸泡 1 d, 定时搅拌使样品充分分散; ②将浸泡样品倒入激光样品槽中, 超声振动, 使样品充分分散; ③使用激光粒度仪(Mastersizer-3000 型)测试粒级质量分数, 要求分析结果误差 < 3, 遮光度 < 30。

文中主成分分析(PCA, Principal Component Analysis)采用 SPSS 19.0 软件进行。

2 重金属污染分布

将研究区 4 个海湾以及海南岛其他区域的研究成果进行对比(表 2), 发现在研究区 4 个海湾中, 后水湾的 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg 平均含量均最高,

As 的平均含量则在铺前湾及澄迈湾较高。与海南岛其他区域进行对照, 发现相比之下, 海南河流沉积物的 Cu、Pb、Zn、Cd 含量相对较高, 此外, 后水湾的 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg 均相对较高。位于研究区西部的洋浦湾各项重金属含量较低, 而靠近海南岛东侧的铺前湾与澄迈湾 Hg、As 的含量相对较高, 铺前湾位于东寨港北部, 其 Cu、Pb、Zn、Cd、As 平均含量均高于东寨港^[7]。

表 2 各海湾重金属平均含量对比

Table 2 Average heavy metal concentration in different bays

位置	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	As	文献
铺前湾	12.04	23.08	57.68	0.04	39.44	0.06	26.37	本文
澄迈湾	13.62	24.71	66.18	0.03	41.12	0.07	28.45	
后水湾	17.21	28.56	86.45	0.07	64.16	0.10	19.89	
洋浦湾	6.71	23.96	59.24	0.04	39.45	0.04	15.18	
东寨港	3.60	10.59	33.25	0.01	-	-	16.81	[7]
三亚湾	8.92	20.61	29.13	0.06	45.76	0.02	9.70	[8]
海南东部陆架	29.40	19.20	81.40	0.19	57.30	-	7.60	[14]
海南河流沉积物	33.35	43.44	102.10	0.33	56.48	0.05	8.79	[4]

注: “-”为无数据

3 评价方法与结果

3.1 国家海洋沉积物质量标准 (GB18668—2002)

我国海洋沉积物质量标准(GB18668—2002)^[10]对不同等级的海洋沉积物重金属含量进行了规定(表 3)。

表 3 我国海洋沉积物重金属质量标准
(根据 GB18668—2002)

Table 3 China's national standard (GB18668—2002) on marine sediment quality for heavy metal

项目	第1类	第2类	第3类
Hg	0.2	0.5	1
Cd	0.5	1.5	5
Pb	60	130	250
Zn	150	350	600
Cu	35	100	200
Cr	80	150	270
As	20	65	93

将各海湾各站位的重金属含量与我国海洋沉积物质量标准(GB18668—2002)进行对比, 发现除

后水湾 1 个站位的 Cr 含量属于第 2 类沉积物质量标准外, 各海湾其余站位的 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg 均符合第 1 类沉积物质量标准。

相比而言 As 的污染较为严重, 各海湾中有超过一半(58%)的站点为第 2 类沉积物质量标准。结合各海湾 As 含量的分布, 对 As 的富集状况进行探究, 发现铺前湾以及澄迈湾的 As 含量相对较高(图 2)。铺前湾的 As 集中于海湾北部; 澄迈湾的 As 于海湾西北部较为富集; 后水湾的 As 元素分布较为均匀; 洋浦湾的 As 则主要集中于海湾西南部。各海湾 As 含量高值分布范围并不紧邻陆地, 可见陆源输入并非各海湾 As 的主要来源。

3.2 地累积指数 I_{geo}

地累积指数 I_{geo} (Index of geo-accumulation), 常用于评价重金属元素的富集程度^[3,14], 由 Müller 提出^[15-16], 其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2[C_i/(kB_n)] \quad (1)$$

式中: C_i 为重金属元素 i 的实测含量;

k 为修正指数, 此处取 1.5;

B_n 为重金属元素 i 的背景值, 此处选用上地壳元素平均含量作为背景值, Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg、

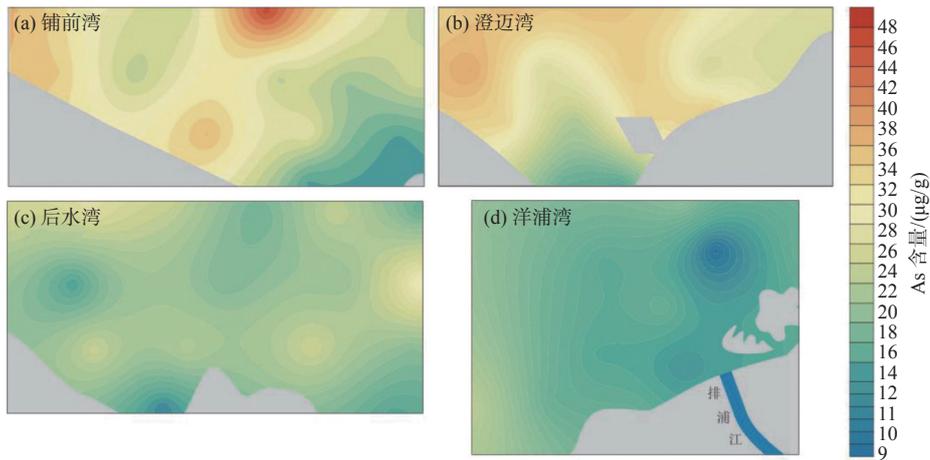


图2 各海湾As含量分布

Fig.2 Spatial distribution of As concentration in different bays to the north of Hainan Island

As的背景值分别为28、17、67、0.09、92、0.05、4.8 mg/kg^[17]。

I_{geo} 分级如表4所示。

表4 I_{geo} 污染程度分级^[18]
Table 4 The pollution levels of I_{geo} ^[18]

I_{geo}	污染程度
$I_{geo} \leq 0$	无
$0 < I_{geo} \leq 1$	轻度—中度
$1 < I_{geo} \leq 2$	中度
$2 < I_{geo} \leq 3$	中度—强
$3 < I_{geo} \leq 4$	强
$4 < I_{geo} \leq 5$	强—极严重
$5 < I_{geo} \leq 10$	极严重

地累积指数 I_{geo} 显示各海湾的 Cu、Zn、Cd、Cr 富集程度较轻,其中 Cu 及 Cr 未出现超标富集;Cd 元素除了位于铺前湾和后水湾的各1个站位分别出现轻—中度富集以及中度富集外,其余站位均正常;Zn 元素为轻—中度富集的4个站位均位于后水湾,其余站位 Zn 元素均无富集。相比之下,Pb、Hg 以及 As 元素的富集则较明显,过半(52%)的站位 Pb 元素为轻—中度富集,As 于全部站位均出现富集。

结合 As 元素含量(图2)及各海湾 As 的 I_{geo} 分布(图3a—d)可以看出,As 元素于铺前湾及澄迈湾的富集较为明显,其中铺前湾大部分范围、澄迈湾的中部及西北部均出现 As 中度—强富集(图3a、b),后水湾及洋浦湾的 As 富集程度则相对较弱,基本以轻—中度以及中度富集为主(图3c、d)。

Hg 的 I_{geo} 分布显示(图4a—d),后水湾的 Hg 富集程度是四个海湾中最高的,其西北部以及东南部近岸区域为 I_{geo} 高值区,是研究区中唯一达到中

度富集水平的海湾(图4c);铺前湾的湾口未出现 Hg 富集,向西北部逐渐过渡为 Hg 轻—中度富集(图4a);澄迈湾 Hg 的轻—中度富集主要分布于近海方向(图4b);洋浦湾的 Hg 富集程度最轻,于西北近海以及海花岛西北侧部分区域出现轻—中度富集,其余区域均未出现 Hg 富集(图4d)。

3.3 重金属污染指数 C_f

重金属污染指数 C_f (Contamination factor)通过对比重金属实际含量与背景值之间的关系,对单个重金属元素的污染程度进行判断^[19],其计算公式为:

$$C_f^i = C_i/B_i \quad (2)$$

式中: C_i 为重金属元素 i 的实测含量;

B_i 为重金属元素 i 的背景值,此处选用上地壳元素平均含量^[17]作为背景值。

不同重金属污染指数 C_f 对应的污染程度如表5所示。

重金属污染指数 C_f 指示各海湾均未出现 Cu 及 Cr 污染。重金属 Cd 除了在铺前湾的一个站位为中等程度污染,在后水湾的一个站位污染程度为“较严重”外,其余站位均未出现污染。各站位的 Pb、Zn 污染处于中等水平: Pb 的中等程度污染分布较为平均,86%的站位呈现中等程度 Pb 污染,于洋浦湾污染状况较轻;56%的站位出现中等程度 Zn 污染,主要出现于后水湾以及澄迈湾。

As 及 Hg 的污染最为明显。As 元素于所有站位均出现不同程度的污染,19%的站位为 As 中等程度污染,主要出现在洋浦湾;56%的站位污染程

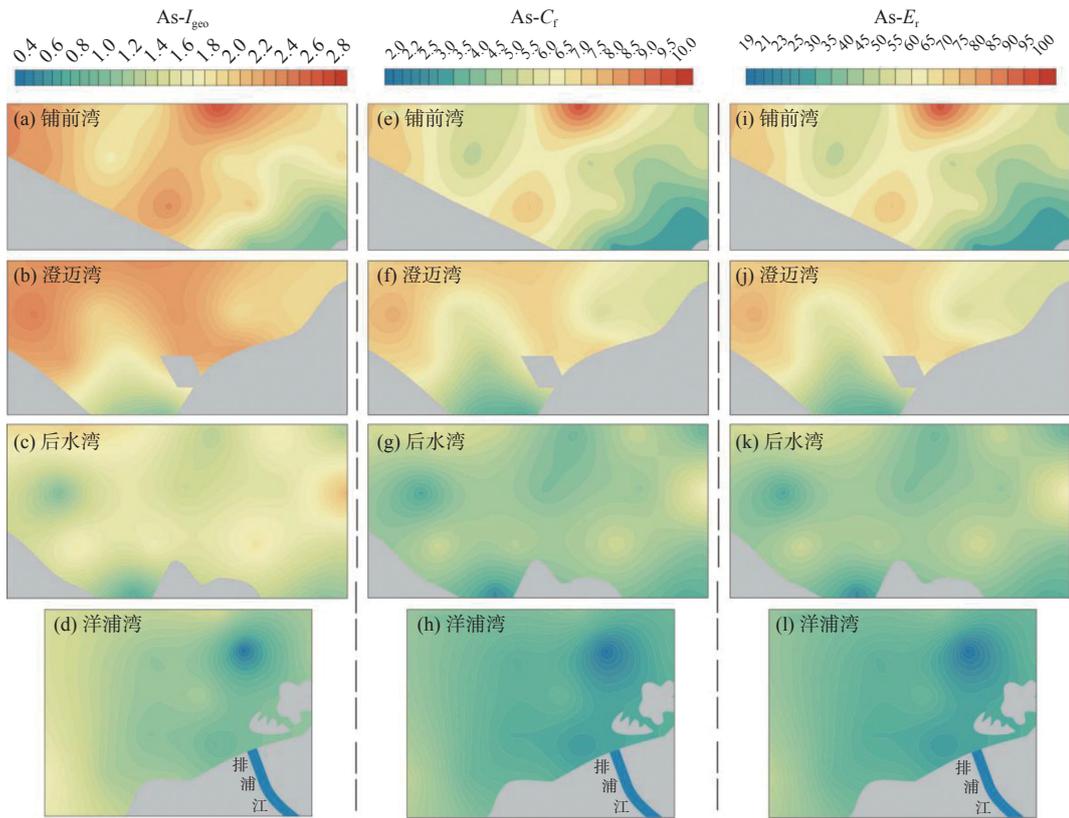


图 3 各海湾 As 元素的 I_{geo} 、 C_f^{As} 及 E_r^{As} 指标分布

Fig.3 Spatial distribution of I_{geo} (As), C_f^{As} , and E_r^{As} in different bays

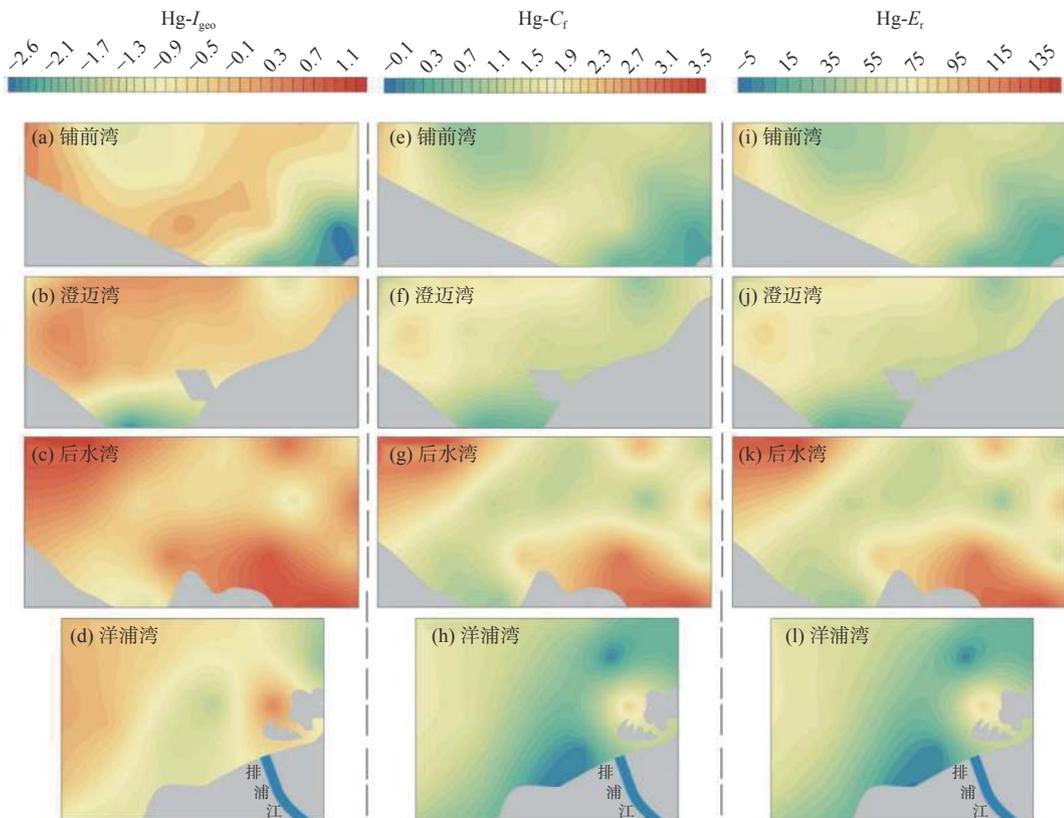


图 4 各海湾 Hg 元素的 I_{geo} 、 C_f 及 E_r 指标分布

Fig.4 Spatial distribution of I_{geo} (Hg), C_f^{Hg} , and E_r^{Hg} in different bays

表5 C_f 污染程度分级^[19]Table 5 The pollution levels of C_f

C_f	污染程度
$1 \leq C_f < 3$	中等
$3 \leq C_f < 6$	较严重
$C_f \geq 6$	非常严重

度为“较严重”，主要出现在后水湾；25%的站位则显示As污染达到“非常严重”的级别，主要出现于澄迈湾及铺前湾。铺前湾大部分站位As污染非常严重， C_f 高值集中于海湾北部(图3e)；澄迈湾中部及西北部大部分海域均呈现级别为“非常严重”的As污染(图3f)；后水湾的As污染指数分布同As含量分布相似，较为均匀(图3g)；洋浦湾As的 C_f 高值集中于海湾西侧(图3h)。

64%的站位出现中等程度的Hg污染，主要出现于后水湾、铺前湾以及澄迈湾，6%的站位Hg污染程度为“较严重”，均出现在后水湾。铺前湾的Hg主要为中等程度污染， C_f 高值主要分布于海湾西侧(图4e)；澄迈湾的Hg同样普遍为中等程度污染， C_f 高值主要分布于海湾西北部(图4f)；后水湾的Hg污染最为严重，海湾东南部及西北部污染程度甚至达到“较严重”以及“非常严重”级别(图4g)。

3.4 重金属污染程度指数 C_d

重金属污染程度指数 C_d (degree of contamination)的计算基于重金属污染指数 C_f ，用于多元素重金属污染的整体评价^[19]，其计算公式为：

$$C_d = \sum_i^n \left(C_f^i \right) = \sum_i^n \left(\frac{C_i}{B_i} \right) \quad (3)$$

式中： n 为重金属元素种数量；

C_f^i 为重金属元素 i 的污染指数；

C_i 为重金属元素 i 的实测含量；

k 为修正指数，此处取1.5；

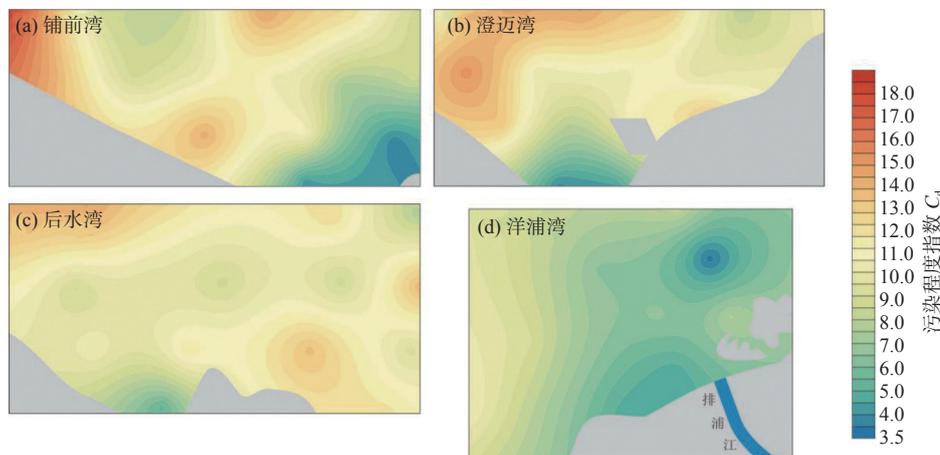
B_i 为重金属元素 i 的背景值，此处选用上地壳元素平均含量^[17]作为背景值。

由于本研究对7种重金属元素进行评价，不同重金属污染程度指数 C_d 对应的污染程度如表6所示：

表6 C_d 污染程度分级^[19]Table 6 The pollution levels of C_d

C_d	污染程度
$C_d < 7$	低污染
$7 \leq C_d < 14$	中等程度污染
$14 \leq C_d < 28$	污染较严重
$C_d \geq 28$	重度污染

总体重金属污染指数 C_d 显示，各海湾的重金属总体污染状况以中等程度污染为主。铺前湾除海湾湾口位置为低污染外，海湾大部分范围为中等程度污染，向海湾西部逐渐过渡为“较严重”污染级别(图5a)；澄迈湾同样除海湾南部湾口区域为低污染外，大部分范围为中等程度污染，以海湾西北部污染更为严重(图5b)；后水湾除海湾南部湾口部分为低污染外，大部分为中等程度污染，较严重级别的重金属污染集中于海湾西北部(图5c)；洋浦湾的污染相对较轻，向海湾西侧 C_d 值逐渐增高，但没有出现“较严重”级别的污染(图5d)。在4个海湾中，洋浦湾的污染程度较低，澄迈湾与铺前湾的污染程度较高，各海湾的重金属污染程度高值区基本在海湾外侧较为集中，海湾近岸湾口的污染程度普遍偏低，这说明海湾总体重金属污染的来源更倾向于海洋。

图5 各海湾污染程度指数 C_d 分布Fig.5 Spatial distribution of contamination degree C_d in different bays

综合各海湾不同重金属污染指数 C_f 的分布特征, 可以发现 As、Hg、Pb、Zn 的污染较为突出, 其中 As 在各海湾中的污染最为明显, 具备较高的潜在生态风险。前人在很多研究中均提到海南岛相关水域的 As 污染, LI 等^[20] 以 I_{geo} 作为评价指标, 结合与本文不同的背景值同样得到了 As 在各海湾中污染较突出的结论, 且认为重金属污染的分布受人为影响较大, 其分布受到沉积物搬运的控制; ZHAO 等^[8] 在对三亚崖州湾沉积物重金属污染进行分析时, 指出当地过量的化肥施用是沉积物中 As 超标的重要原因; XU 等^[3] 在对海南岛主要河流流域的沉积物重金属污染进行分析时, 指出 As 是海南岛北部最明显的污染元素。Hg 及 As 存在较高的潜在生态风险, 过量的重金属 Hg 以及 As 会导致人体产生多种慢性疾病甚至致癌, 海南岛北部海湾的 As 及 Hg 污染需要引起相关部门的关注。

3.5 潜在生态风险指数 E_r

潜在生态风险指数 E_r (Ecological risk factor) 在重金属污染指数 C_f 的基础上结合重金属毒性系数 T_i , 对重金属元素的潜在生态风险进行评价^[19], 其计算公式如下:

$$E_r^i = T_i C_f^i = T_i \frac{C_i}{B_i} \quad (4)$$

式中: T_i 为重金属元素 i 的毒性系数, Cu、Zn、Cd、Pb、As、Hg、Cr 的 T_i 分别为 5、1、30、5、10、40、2^[19];

C_f^i 为重金属元素 i 的污染指数;

C_i 为重金属元素 i 的实测含量;

B_i 为重金属元素 i 的背景值, 此处选用上地壳元素平均含量作为背景值^[17]。

潜在生态风险指数 E_r 对应的生态风险分级如表 7 所示:

表 7 E_r 潜在生态风险分级^[19]
Table 7 The pollution levels of E_r ^[19]

E_r	生态风险
$E_r < 40$	轻微
$40 \leq E_r < 80$	中等
$80 \leq E_r < 160$	强
$160 \leq E_r < 320$	很强
$E_r \geq 320$	极强

重金属生态风险指数 E_r 显示 Cu、Pb、Zn、Cr 于各海湾均为轻微生态风险, Cd 元素除了在铺前湾

以及后水湾各有 1 个站位达到强生态风险外, 在其余各海湾均显示为轻微生态风险。

As 与 Hg 的潜在生态风险则相对较重, 61% 的站位呈现中等程度 As 生态风险, 主要位于澄迈湾及铺前湾。铺前湾东南部湾口 As 元素生态风险较低, 海湾西北部 E_r 值较高, 且有一个站位出现 As 元素强生态风险(图 3i); 澄迈湾除湾口污染较低外, 其余位置 E_r 值较高(图 3j); 后水湾大部分范围为轻微生态风险, 中等程度生态风险区域主要分布于海湾东部及北部(图 3k); 洋浦湾的 As 大部分为轻微生态风险, 向海湾西部逐渐过渡为中等程度潜在生态风险(图 3l)。

Hg 强生态风险站位占有所有站位的 19%, 大部分位于后水湾; 51% 的站位存在 Hg 中等程度生态风险, 大部分位于澄迈湾及铺前湾; 其余 30% 的站位为 Hg 轻微生态风险。铺前湾向海湾西部 Hg 生态风险逐渐由中等过渡为强(图 4i); 澄迈湾南部湾口位置 Hg 生态风险较轻, 其余大部分范围为中等程度 Hg 生态风险, 向海湾西北部逐渐过渡至 Hg 强生态风险(图 4j); 后水湾的 Hg 生态风险最高, 自海湾中部向海湾东南部及西北部, Hg 生态风险逐渐由轻微过渡至强(图 4k); 洋浦湾大部分范围为 Hg 轻微生态风险, 向海湾西部 Hg 生态风险逐渐增至中等程度, 海花岛附近存在部分 Hg 强生态污染区域(图 4l)。

4 各海湾重金属来源分析

为对重金属污染的来源进行讨论, 将各海湾重金属元素含量与平均粒径一同进行主成分分析。

铺前湾只提取出了一个主成分(因此未形成主成分图), 这个主成了解释了 81.99% 的变量, 所有的因子均在该主成分上具有较高的载荷值(表 8), 可见铺前湾重金属以及粒径分布的主控因素相似。铺前湾南部湾口部分粒径较粗, 向海粒度逐渐变细, 前人研究表明细颗粒物更容易吸收重金属元素^[8,16], 可见铺前湾重金属污染的分布在一定程度上受到了沉积物粒径分布的控制。

铺前湾西侧靠近南渡江, As 含量及污染指标的高值区集中于海湾北部及西部(图 2,3 a、e、i), Hg 污染指标的高值区主要集中于海湾西北部(图 4 a、e、i)。前人研究曾指出南渡江的污染较为严重, 且以 As 污染为主^[3], 因此南渡江的水体输入或许在一定程度上影响着铺前湾的重金属污染分布。此

表8 铺前湾重金属及平均粒径 Mz 主成分分析

Table 8 The Principal Component Analysis of heavy metals and the mean particle size in the Puqian Bay

重金属	主成分1
Cu	0.97
Pb	0.95
Zn	0.96
Cd	0.74
Cr	0.94
Hg	0.99
As	0.79
Mz	0.87

外,铺前湾南部靠近东寨港,前人曾报道东寨港沉积物主要存在 As 及 Pb 污染,二者主要源自水产养殖业以及船舶柴油与汽油的燃烧^[7],但铺前湾并未表现出明显的靠近东寨港重金属污染程度升高的趋势,这可能与东寨港红树林对重金属的吸收有关^[7]。

澄迈湾的两个主成分累计解释了 87.98% 的变量,所有重金属在主成分 1 上具有较高的载荷值,而平均粒径(Mz)则主成分 2 上具有较高的载荷值(图 6a),说明澄迈湾重金属污染具有较为一致的主控因素,但并非粒径的分布。

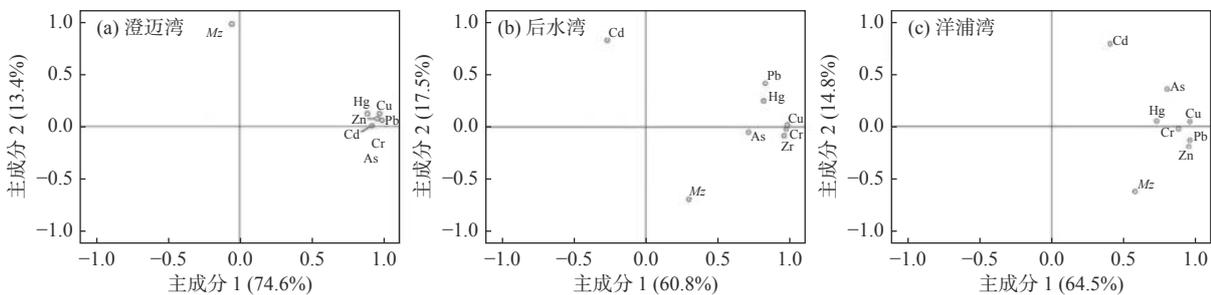


图6 澄迈湾、后水湾、洋浦湾重金属及平均粒径主成分分析图

Fig.6 The principal component loadings of heavy metals and Mz in Chengmai Bay, Houshui Bay and Yangpu Bay

后水湾分析得到的 2 个主成分累计解释了 78.21% 的变量, Cu、Pb、Zn、Cr、Hg、As 在主成分 1 上具备较高的载荷值,重金属 Cd 则主成分 2 上具有较高的载荷值,平均粒径(Mz)与各重金属均无十分明显的相关性(图 6b),可见澄迈湾重金属分布的主控因素并非粒径分布,且重金属 Cd 具有与其他重金属不同的来源。有研究表明由于磷酸盐类化肥中的杂质含有 Cd,过量的磷酸盐类化肥施用可能会造成 Cd 超标^[21-22];此外渔业养殖及生活污水的排放加之较慢的水体循环同样有可能造成 Cd 的累积^[23-24],因此不排除研究区沉积物中的 Cd 在一定程度上受到了人为活动的影响。

洋浦湾的 2 个主成分累计解释了 79.36% 的变量,洋浦湾与后水湾的主成分分析图较为类似。Cu、Pb、Zn、Cr、Hg、As 在主成分 1 上具有较高的载荷值,重金属 Cd 在主成分 2 上具备较高的载荷值(图 6c),平均粒径同样与各重金属均无十分明显的相关性,可见洋浦湾的 Cd 与其他重金属具有不同的来源,或许同样与磷酸盐化肥的过度施用有关,粒径分布同样不是洋浦湾重金属污染分布的主控因素。昌化江位于洋浦湾南部,前人研究表明昌化江口的污染以 As 及 Pb 为主^[6],但昌化江口距离洋浦湾较远,洋浦湾北部的北门江污染程度较轻,南

部珠碧江处于中—低度污染^[4],周边水系较轻的重金属污染是洋浦湾总体重金属污染程度较轻的原因之一。

XU 等^[3]曾发现海南岛河流污染状况与海南经济发展分区状况之间存在一定的对应关系,ZHAO 等^[4]也提出海南岛矿业废水及化肥施用对河流沉积物重金属污染的分布产生影响。海洋作为河流物质重要的汇,很大程度上承接了河流带来的重金属污染,在海南经济发展较快的北部,澄迈湾与后水湾的污染程度高于位于西部的洋浦湾,船舶燃油的燃烧、农业灌溉、水产养殖、矿业废水等都会带来不同程度的重金属污染,建议环保部门采取适当措施有针对性地针对不同海湾的重金属污染进行预防和治理。

5 结论

本文采集了位于海南岛北部铺前湾、澄迈湾、后水湾、洋浦湾的 64 个沉积物样品,对沉积物中重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg、As 的分布进行分析,采用地累积指数 I_{geo} ,重金属污染指数 C_f 与重金属污染程度指数 C_d 以及潜在生态风险指数 E_r 对各海湾的重金属污染状况进行分析,并结合各海湾沉积

物平均粒径进行主成分分析,初步探讨了各海湾沉积物重金属的来源。研究表明在 4 个海湾中,洋浦湾的污染程度较低,铺前湾及澄迈湾的重金属污染较显著,各海湾的重金属污染以 As 及 Hg 污染为主。船舶燃油的燃烧、农业灌溉、水产养殖、矿业废水等都是重金属污染的可能来源,建议相关部门有针对性地对不同海湾的重金属污染进行科学防治。

致谢: 感谢广州海洋地质调查局韩艳飞工程师在本文制图方面提供的帮助!

参考文献:

- [1] 谢文平,覃顺枫,马丽莎,等. 海南淡水养殖环境中有机氯农药及重金属残留情况分析[J]. *环境化学*, 2017, 36(6): 1407-1416.
- [2] 张钦洲,刁晓平,谢嘉,等. 海南东部海水养殖区水体、沉积物中微塑料的分布特征[J]. *海南大学学报(自然科学版)*, 2020, 38(2): 159-165.
- [3] XU F J, HU B Q, LI J, et al. Reassessment of heavy metal pollution in riverine sediments of Hainan Island, China: sources and risks[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2018, 25(1/3): 1766-1772.
- [4] ZHAO D B, WAN S M, YU Z J, et al. Distribution, enrichment and sources of heavy metals in surface sediments of Hainan Island rivers, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(6): 1-14.
- [5] ONWULI D O, GOSPEL A, BROWN H, et al. The concentration of Lead in Periwinkle (*Typanotonosfuscatus*) and River sediments in Eagle Island River, Port Harcourt, Rivers State Nigeria[J]. *American Journal of Environmental Protection*, 2014, 2(2): 37-40.
- [6] HU B Q, CUI R Y, LI J, et al. Occurrence and distribution of heavy metals in surface sediments of the Changhua River Estuary and adjacent shelf (Hainan Island) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 76(1-2): 400-405.
- [7] YANG J, ZHANG B X, PENG X J, et al. Sediment Quality Assessment for Heavy Metal Contamination in the Dongzhai Harbor (Hainan Island, China) with Pollution Indices Approach[J]. *Open Chemical Engineering Journal*, 2014, 8(1): 32-37.
- [8] ZHAO L, LIU J Q, CAI G Q, et al. Distribution, source, and pollution assessment of heavy metals in Sanya offshore area, south Hainan Island of China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 160: 111561.
- [9] 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.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB18668—2002, 海洋沉积物质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社.
- [11] 国家海洋局. HY/T 147.2—2013, 海洋监测技术规程 第2部分: 沉积物[S]. 北京: 中国标准出版社.
- [12] 环境保护部. HJ 680—2013, 土壤和沉积物汞、砷、硒、铍、锑的测定 微波消解/原子荧光法[S]. 北京: 中国环境科学出版社.
- [13] 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. 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.
- [14] 徐方建, 闫慧梅, 田旭, 等. 海南岛东部陆架表层沉积物重金属污染评价[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(5): 1530-1539.
- [15] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 3(2): 108-118.
- [16] MULLER G. Schwermetalle in den sedimenten des Rheins-Vervänderungen seit 1971[J]. *Umschau*, 1979, 79: 778-783.
- [17] RUDINICK R L, GAO S. Composition of the continental crust[J]. *The Crust 3*, 2003: 1-64.
- [18] MULLER G. Die Schwermetallbelastung der sedimente des Neckars und seiner Nebenflüsse: eine Bestandsaufnahme[J]. *Chem Zeitung*, 1981, 105: 157-164.
- [19] HAKANSON S L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [20] LI T, CAI G Q, ZHANG M H, et al. The response of benthic foraminifera to heavy metals and grain sizes: A case study from Hainan Island, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 167: 112328.
- [21] ZHANG H, SHAN B Q. Historical records of heavy metal accumulation in sediments and the relationship with agricultural intensification in the Yangtze-Huaihe region, China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2008, 399(1/3): 113-120.
- [22] 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.
- [23] 吴钟解, 陈石泉, 蔡泽富, 等. 海南八门湾沿岸表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, 31(6): 28-32.
- [24] 陈石泉, 蔡泽富, 吴钟解, 等. 海南花场湾表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. *应用海洋学学报*, 2018, 37(1): 85-93.

Distribution and origination of heavy metal pollution in bays of northern Hainan Island

LI Yue, LI Shun, CAI Guanqiang

(Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510075, China)

Abstract: Hainan Island has been developing rapidly in recent years. Accompanied with the development of social economy, various degrees of heavy metal pollution has become an issue of pollution to the sea areas around the Hainan Island especially in the bays to the north of the island. To better understand the heavy metal pollution at present in those bays, surface sediments were sampled in Puqian Bay, Chengmai Bay, Houshui Bay, and Yangpu Bay in 2019. According to the China's national standard on marine sediment quality (GB18668—2002), using multiple parameters including the index of geo-accumulation (I_{geo}), contamination factor (C_f), the degree of contamination (C_d), and ecological risk factor (E_r), the heavy metal pollution status in different those bays were evaluated. Results show that arsenic (As) was the common heavy metal pollutant among the bays. The pollution status in Chengmai Bay and Puqian Bay were relatively more serious than in Yangpu Bay. Anthropogenic activities such as fuel combustion by marine vessels, fertilizer application, and waste water discharge from mining could cause different levels of heavy metal pollution. Countermeasures shall be taken for the environmental protection by the local managements to prevent and control heavy metal pollution in the bays to the north of Hainan Island.

Key words: bays to the north of Hainan Island; surface sediment; heavy metal pollution; source analysis