

◆海洋科学◆

陵水、新盈红树林和海草湿地表层沉积物重金属分布及污染特征^{*}傅开哲,龙军桥^{**},陈泽恒,丁伟品,黄赞慧

(中国地质调查局海口海洋地质调查中心,海南海口 571127)

摘要:为深入研究海南岛陵水、新盈两大典型生态系统的风险状况,采集研究区红树林和海草湿地70组沉积物样品进行理化分析。利用差值分析、地累积指数分析、生态风险分析、相关性分析和主成分分析等数理统计方法对重金属污染特征进行分析和评价,研究不同类型湿地表层沉积物重金属含量和污染特征。结果表明:研究区红树林和海草湿地沉积物重金属As地累积指数明显高于Cr、Cu和Pb,为偏中度污染,存在中度生态风险,而Cr、Cu和Pb的生态风险较小。陵水、新盈红树林沉积物中Cr、Cu、As和Pb具有相似的来源,即主要来源于自然环境,其次来源于人类活动,As超标与研究区域周边存在大面积的鱼虾养殖、船坞停放等人类活动因素有关。

关键词:滨海湿地;表层沉积物;重金属;空间分布;污染评价

中图分类号:X55 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2023)02-0277-14

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20230529.007

红树林和海草湿地位于陆地生态系统和海洋生态系统的交替过渡带,是海陆之间能量流动、物质循环的重要一环,其特殊的地理位置、极高的生产力和丰富的生物类型,使其具有重要的生态功能^[1,2],而滨海湿地沉积物则是红树林和海草湿地生态系统中重要的组成部分。红树林和海草生态系统是重要的碳汇,其中湿地沉积物的重金属能够显著影响总有机碳(Total Organic Carbon, TOC)含量^[3,4],从而影响

红树林及海草湿地的固碳能力,最终作用于全球气候变暖等生态环境问题^[5]。

新村港、黎安港和泊潮港是海南岛具有代表性的滨海湿地分布区,拥有较为典型的红树林和海草湿地生态系统。由于城市扩张、工业发展和鱼类养殖等人类活动的加剧,大量污染物进入红树林和海草湿地生态系统中,并且在红树林、海草根系和沉积物的吸附作用下,污染物中的重金属元素极易富集于红树林和

收稿日期:2021-11-29

修回日期:2022-03-07

^{*} 中国地质调查局“琼海-万宁海岸带综合地质调查项目(DD20208012)”和“海南岛湿地资源现状试点调查项目(DD20208061)”资助。

【第一作者简介】

傅开哲(1993-),男,工程师,主要从事海岸带、滨海湿地生态环境研究,E-mail:971779607@qq.com。

【**通信作者】

龙军桥(1990-),男,工程师,主要从事滨海湿地生态环境研究,E-mail:303820842@qq.com。

【引用本文】

傅开哲,龙军桥,陈泽恒,等. 陵水、新盈红树林和海草湿地表层沉积物重金属分布及污染特征[J]. 广西科学,2023,30(2):277-290.

FU K Z, LONG J Q, CHEN Z H, et al. Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments of Lingshui, Xinying Mangrove and Seagrass Wetlands [J]. Guangxi Sciences, 2023, 30(2): 277-290.

海草湿地的沉积物中,导致湿地生态系统整体呈衰退的趋势^[6]。前人研究多单独针对红树林或海草生态系统重金属分布及污染评价^[7-9],未见海南岛多地区多生态系统的综合研究。本研究通过采集海南岛陵水红树林湿地、新盈红树林湿地、陵水海草湿地和新盈海草湿地表层沉积物样品,对4处湿地沉积物样品粒度、营养元素和重金属含量进行测定,对沉积物样品的粒度组成、分类,以及营养元素分布特征、重金属含量变化、空间分布、污染程度、生态风险和来源进行初步分析,从重金属污染的角度出发,探究重金属含量、分布以及湿地健康状况,为海南岛陵水、新盈红树林和海草湿地生态系统的重金属分布和环境污染程度提供基础数据,为滨海湿地生态系统的保护和可持续发展提供理论依据。同时,本研究对于评估人类活动对红树林和海草湿地生态系统的影响情况乃至固碳能力的扰动有着重要作用,也对海南生态文明试验区和海南自由贸易港建设的生态修复和污染排放控制有积极意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陵水红树林和海草湿地位于新村港与黎安港海陆交汇区域,新盈红树林和海草湿地位于泊潮港海陆交汇区域^[10]。新村港位于海南省陵水黎族自治县东南部,是一个被潮汐控制的近封闭状的天然潟湖,港内南北长约4.5 km,东西宽约5.5 km,面积约19.43 km²,港口窄港内宽,港内中心水深较深,最深处可达12 m^[11]。黎安港位于陵水县城东南部,同样是一个天然的潟湖,三面临海,通过水道与大海相通。新村港和黎安港属于热带海洋性气候,长夏无冬,夏季高温高湿、台风活动频繁、降水充沛。年平均气温为25.0℃,年平均降水量为1 699 mm。两港中间为陵水黎安国际教育创新试验区,正在进行大规模基础设施建设。查家人世代生活在新村潟湖的渔排上,祖祖辈辈靠打鱼为生,舟楫为家,给潟湖生态环境带来了深远的影响。泊潮港位于儋州市北部,与临高新盈镇相接,平均潮位高1.3 m,最高潮位2.8 m,水域面积约2×10⁵ km²。泊潮港属于热带海洋性气候,年平均气温22.9℃,月平均气温最高为6月和7月,最低为1月。年平均降水量1 600 mm。研究区内有狗仔沟、钢鼓沟、南蛇沟等数条排水沟,水流量小,均向北流经

泊潮港入海。周边分布新盈农场的两个村庄,村民主要从事橡胶种植、热带水果种植及渔业养殖等经营活动。

1.2 样品采集与处理

在陵水红树林湿地、新盈红树林湿地、陵水海草湿地和新盈海草湿地分别布设16、19、27、9个沉积物采样点(具体采样区域和采样点分布如图1所示)。各沉积物采样点均采集沉积物样品约1 000 g装入密封采样袋中,在0℃下保存运送至实验室后进行冷冻干燥,除去杂质。研磨过筛(用于测定重金属的样品过160目筛,用于测定TOC、TN和TP的样品过80目筛),粒度测试用新鲜沉积物样品。样品的采集、保存和测试分析按照《海洋监测规范 第3部分:样品采集、贮存与运输》(GB 17378.3-2007)^[12]和《海洋调查规范 第9部分:海洋生态调查指南》(GB/T 12763.9-2007)^[13]等规定执行。

1.3 分析测试方法

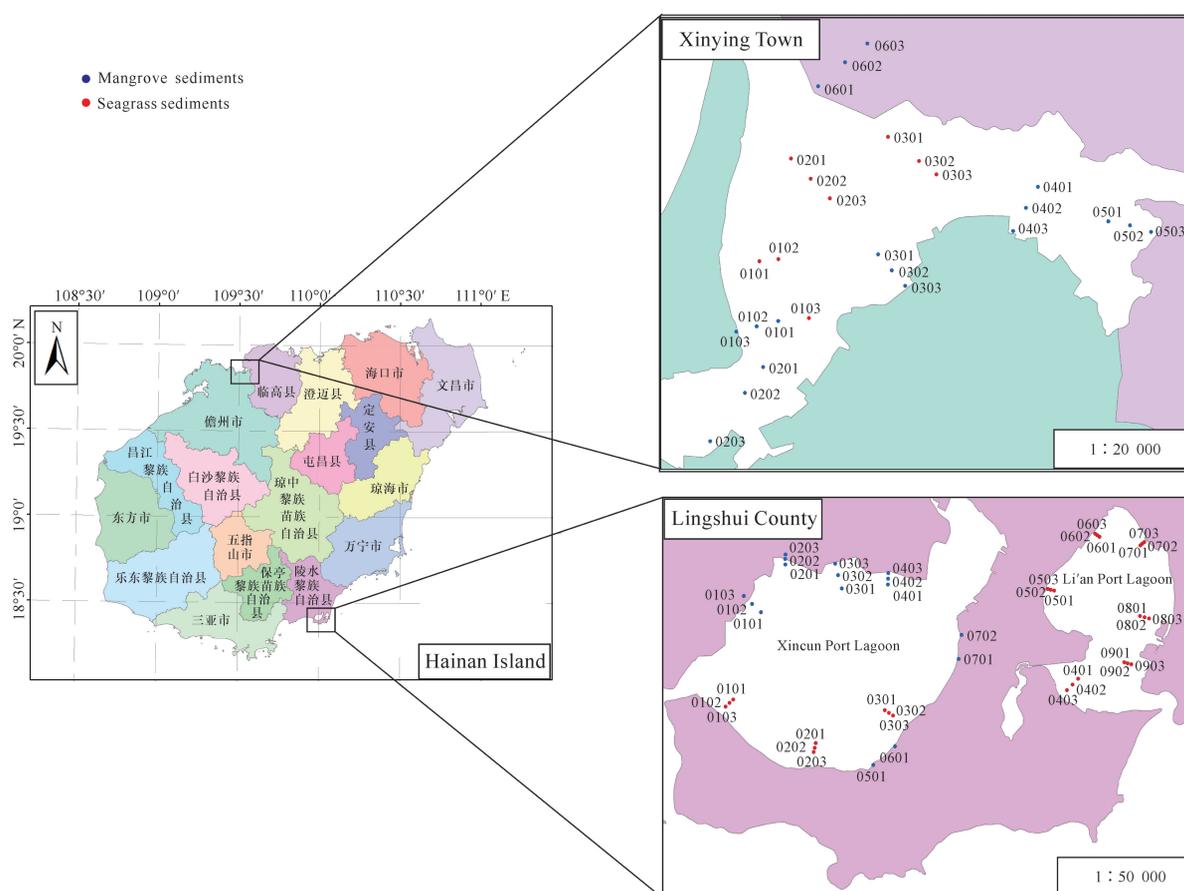
本研究采集的沉积物样品测试分析均按照《海洋监测规范 第5部分:沉积物分析》(GB 17378.5-2007)^[14]中的要求执行。粒度通过粒度分析仪[PSA 1190 LD,安东帕(上海)商贸有限公司]测定,TOC通过TOC分析仪(TOC-L CPH,日本岛津公司)测定,总氮通过凯氏定氮仪(K1100,海能未来技术集团股份有限公司)测定,总磷通过ICP-OES [6300,赛默飞世尔科技(中国)有限公司]测定,Cr、Cu和Pb通过原子吸收分光光度计(AA-7000,日本日立公司)测定,As通过原子荧光光度计(AFS-9800,北京海光仪器有限公司)测定。

1.4 评价方法

(1)地累积指数法。地累积指数(I_{geo})法是根据重金属含量与地球化学背景值对重金属污染程度进行定量研究的方法^[15]。其计算公式为

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_i}{K \times B_i},$$

式中: I_{geo} 为地累积污染指数, C_i 为重金属元素*i*的实测浓度(mg/kg), B_i 为沉积物中重金属元素*i*的地球化学背景值(mg/kg)。本研究选择以海南岛表层土壤重金属背景值作为地球化学背景值,Cr、Cu、As和Pb背景值分别为22.70、7.72、1.87、24.40 mg/kg^[16],常数*K*取1.5^[17]。地质累积指数对应的污染程度如表1所示。



The sampling point number, Xinying Town mangrove sediments are "HSLDZXY + number", Xinying Town seagrass sediments are "HCYDXY + number"; Mangrove sediments in Lingshui County are "HSLDZLS + number" and seagrass sediments in Lingshui County are "HCYDLS + numbers". The space in the diagram is limited and is represented only by numbers.

图 1 陵水、新盈红树林和海草湿地表层沉积物采样区域及采样点

Fig. 1 Surface sediment sampling areas and sample points of Lingshui, Xinying mangrove and seagrass wetlands

表 1 地累积指数污染分级

Table 1 Geological accumulation index pollution classification

等级 Grade	地累积指数 I_{geo}	污染等级 Pollution degree
0	$I_{geo} < 0$	Nothing
1	$0 \leq I_{geo} < 1$	Lightly
2	$1 \leq I_{geo} < 2$	Relatively moderately
3	$2 \leq I_{geo} < 3$	Moderately
4	$3 \leq I_{geo} < 4$	Relatively heavily
5	$4 \leq I_{geo} < 5$	Heavily
6	$I_{geo} \geq 5$	Severely

(2) 潜在生态风险指数法。潜在生态风险指数 (RI) 法是综合考虑沉积物中重金属的种类、含量和

毒性水平的定量评价方法^[18]。其计算公式为

$$E_r^i = T_r^i C_f^i = \frac{T_r^i C_s^i}{C_n^i},$$

$$RI = \sum_{i=1}^n T_r^i C_f^i,$$

式中: C_f^i 为重金属元素 i 的污染系数, C_s^i 为重金属元素 i 的实测浓度 (mg/kg), C_n^i 为重金属元素 i 的背景值, 与地累积指数计算选用的背景值一致; T_r^i 为重金属元素 i 的毒性响应系数, 反映重金属元素的毒性水平与生物对重金属元素毒性的敏感程度; Cr 为 2, Cu 为 5, As 为 10, Pb 为 5; E_r^i 为重金属元素 i 的潜在生态风险系数; RI 为潜在生态风险指数。重金属污染潜在生态风险分级如表 2 所示。

表 2 潜在生态风险分级

Table 2 Classification of potential ecological risk

生态风险等级 Ecological risk level	潜在生态风险系数 E	潜在生态风险指数 RI
Light	<40	<150
Medium	[40,80)	[150,300)
Strong	[80,160)	[300,500)
Very strong	[160,320)	≥500
Extremely strong	≥320	≥500

2 结果与分析

2.1 沉积物粒度分析

2.1.1 沉积物粒度组成特征

海南岛陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物粒度组成主要以砂为主,其次为粉砂和黏土(图2)。其中

陵水红树林湿地沉积物砂含量为 1.97% - 94.70%, 平均值为 64.64%; 粉砂含量为 5.26% - 62.80%, 平均值为 21.37%; 黏土含量为 0 - 54.90%, 平均值为 10.10% [图 2(a)]。陵水海草湿地沉积物砂含量为 52.00% - 97.20%, 平均值为 84.60%; 粉砂含量为 1.85% - 42.50%, 平均值为 13.89%; 黏土含量为 0 - 5.46%, 平均值为 1.16% [图 2(b)]。新盈红树林湿地沉积物砂含量为 68.50% - 93.60%, 平均值为 75.08%; 粉砂含量为 2.31% - 30.10%, 平均值为 17.75%; 黏土含量为 0.13% - 24.10%, 平均值为 7.19% [图 2(c)]。新盈海草湿地沉积物砂含量为 51.70% - 98.20%, 平均值为 79.75%; 粉砂含量为 1.75% - 29.40%, 平均值为 17.23%; 黏土含量为 0 - 26.4%, 平均值为 5.32% [图 2(d)]。

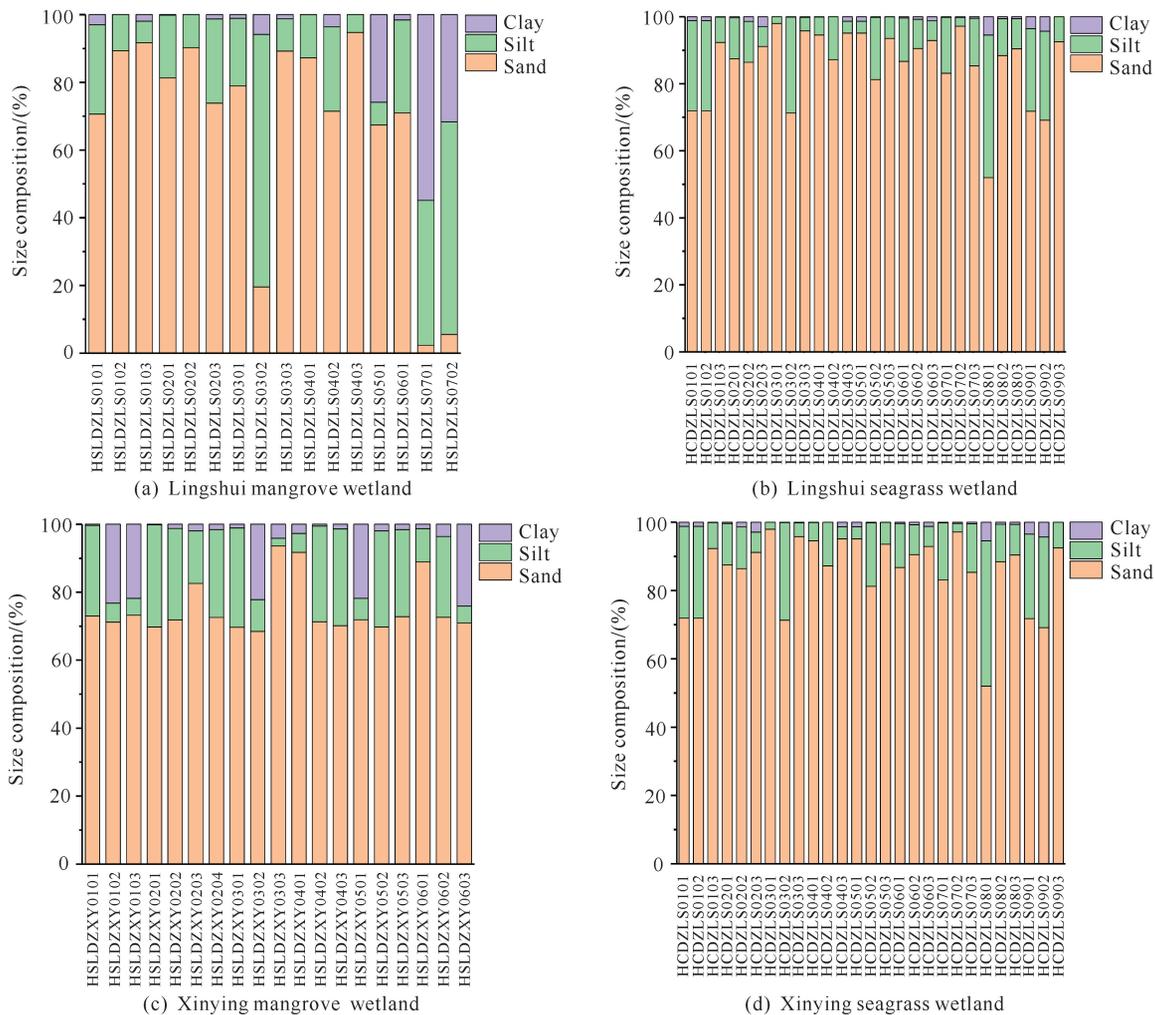


图 2 陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物粒度组成

Fig. 2 Grain size composition of sediments in Lingshui, Xinying mangrove and seagrass wetlands

2.1.2 沉积物粒度分类

根据谢帕德沉积物三角分类法对陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物进行分类和命名,结果如图3所示^[19]。陵水红树林湿地沉积物可划分为砂、粉砂质砂、黏土质砂、粉砂质黏土和黏土质粉砂5种类型,主要以砂和粉砂质砂为主;陵水海草湿地沉积物主要划分为砂和粉砂质砂,其中砂的比例高于粉砂质砂。新盈红树林湿地沉积物可划分为粉砂质砂、黏土质砂和砂3种类型,且3种类型比例相近;新盈海草湿地可划分为砂、粉砂质砂和黏土质砂3种类型。

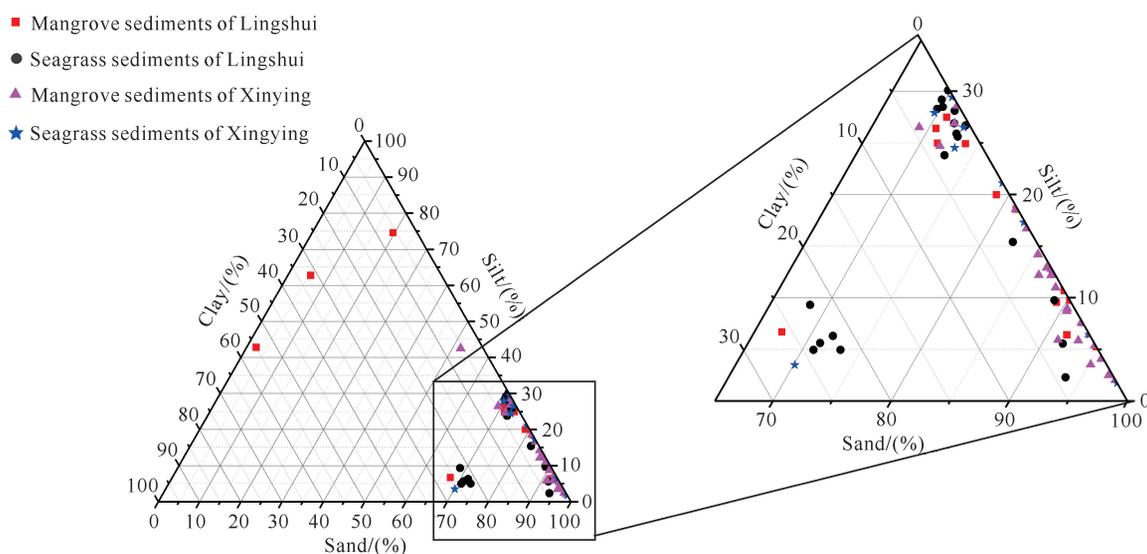


图3 陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物类型分布

Fig. 3 Distribution of sediment types in Lingshui, Xinying mangrove and seagrass wetlands

2.2 沉积物营养元素分布特征

海南岛陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物营养元素存在一定的差异(图4),具体表现为陵水海草湿地沉积物和新盈红树林湿地沉积物中全盐量、TP、TN和TOC变化均较大,而陵水红树林湿地沉积物中的TN以及新盈海草湿地沉积物中全盐量、TP、TN和TOC变化均较小。

由图4(a)可知,陵水红树林湿地沉积物中,各采样点全盐量和TP变化不大,而TN和TOC变化较大,其中全盐量含量为1.74–4.95 g/kg,平均值为3.14 g/kg;TP含量为0.252–0.326 mg/g,平均值为0.290 mg/g;TN含量为0.248–0.445 mg/g,平均值为0.343 mg/g;TOC含量为1.48%–4.29%,平均值为3.00%。由图4(b)可知,陵水海草湿地沉积物中,各采样点全盐量、TP、TN和TOC变化均较大,其中全盐量含量为1.74–7.23 g/kg,平均值为

陵水、新盈红树林和海草采样湿地沉积物类型存在明显差异,陵水红树林湿地沉积物类型复杂多样,陵水海草湿地沉积物类型比较单一,新盈红树林和海草湿地沉积物类型较为相似。由图1可以看出,陵水红树林和海草沉积物样品分别采集于两个独立的潟湖,沉积物来源和水动力条件存在一定的差异性,因此其沉积物类型存在差异^[20]。新盈红树林和海草沉积物样品采集于同一个海湾,沉积物来源相似,水动力条件相差较小,因此其沉积物类型差异较小。

3.67 g/kg;TP含量为0.232–0.320 mg/g,平均值为0.275 mg/g;TN含量为0.277–0.468 mg/g,平均值为0.370 mg/g;TOC含量为2.24%–3.80%,平均值为3.33%。由图4(c)可知,新盈红树林湿地沉积物中,各采样点全盐量、TP、TN和TOC变化同样较大,其中全盐量含量为2.34–8.26 g/kg,平均值为5.86 g/kg;TP含量为0.241–0.354 mg/g,平均值为0.294 mg/g;TN含量为0.244–0.470 mg/g,平均值为0.346 mg/g;TOC含量为2.00%–4.84%,平均值为3.52%。由图4(d)可知,新盈海草湿地沉积物中,各采样点全盐量、TP、TN和TOC变化较小,其中全盐量含量为1.93–7.25 g/kg,平均值为4.51 g/kg;TP含量为0.272–0.316 mg/g,平均值为0.286 mg/g;TN含量为0.258–0.468 mg/g,平均值为0.382 mg/g;TOC含量为2.71%–3.52%,平均值为3.07%。

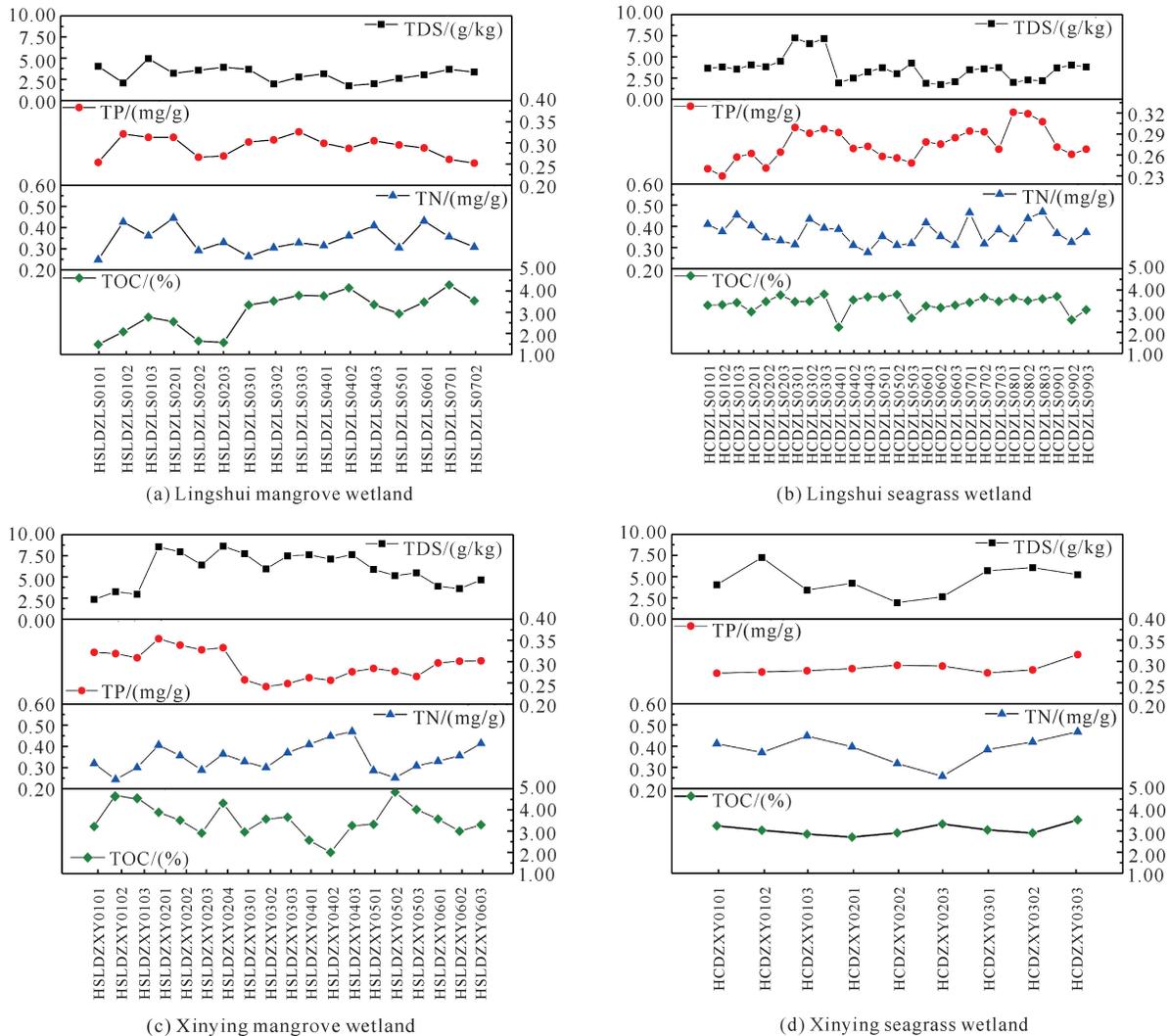


图4 陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物营养元素

Fig. 4 Nutrient elements deposited in Lingshui, Xinying mangrove and seagrass wetlands

2.3 沉积物重金属空间分布特征

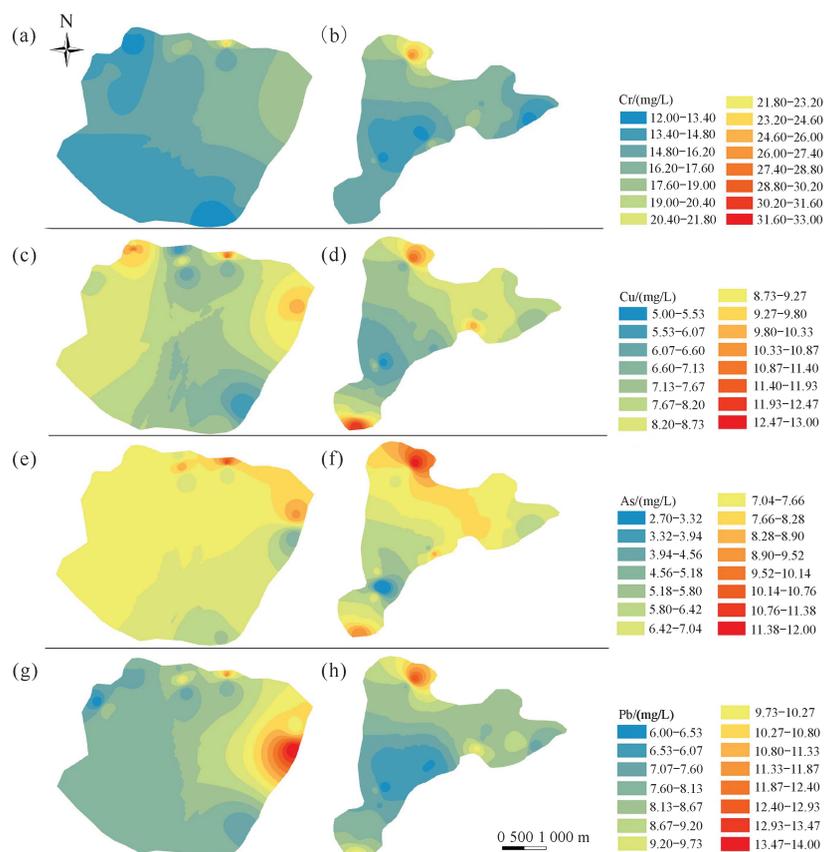
陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物中重金属含量及其空间分布特征的统计分析结果如表3所示,陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物中Cr、Cu、As和Pb的含量均处于较低水平,根据《海洋沉积物质量》(GB 18668-2002)^[21]中对浅海沉积物环境质量的等级划分,陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物环境质量达到第一类标准,说明陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物未受到明显的人类活动影响^[22,23]。陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物中重金属的变异系数为0.16-0.41,均小于1,属于中等变异程度,说明陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物中的Cr、Cu、As和Pb含量分布较均匀,空间差异性中等。

4处湿地沉积物中重金属的空间分布存在一定的共性,同时也存在差异性(图5,图6)。在陵水和新盈红树林区域,Cr和Pb的分布具有一定相似性,其含量分布呈现西南向东北方向逐渐增加的特征;Cu和As的分布具有一定相似性,其含量分布呈现中间区域分别向西北和东南方向逐渐增加的特征(图5)。陵水和新盈海草采样区域,As的空间分布与Cr、Cu和Pb存在明显的差异;在陵水海草区域,Cr、Cu和Pb含量呈现西南区域高于东北区域趋势,而As含量呈现东北区域高于西南区域趋势;在新盈海草区域,Cr、Cu和Pb含量由南向北呈逐渐增加的特征,而As在整个海草区域含量分布较均匀,且含量较高(图6)。

表 3 陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物重金属含量及空间分布特征

Table 3 Content and spatial distribution of heavy metals in sediments of Lingshui, Xinying mangrove and seagrass wetlands

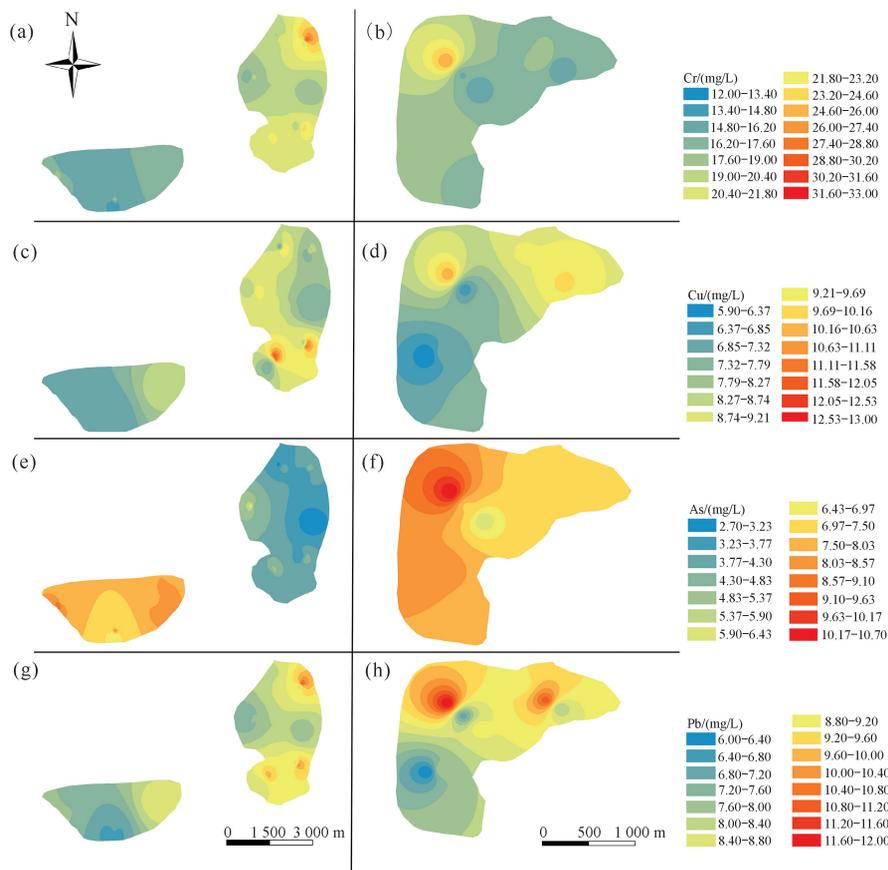
采样区域 Sampling area	采样数量 Sample size	重金属元素 Heavy metal elements	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	标准偏差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation
Mangrove area in Lingshui	16	Cr	25.00	12.00	15.75	3.44	0.22
		Cu	11.90	5.40	8.20	2.02	0.25
		As	11.40	4.60	7.29	1.58	0.22
		Pb	14.00	6.00	8.54	2.07	0.24
Mangrove area in Xinying	19	Cr	27.00	12.00	16.11	3.33	0.21
		Cu	12.70	5.00	7.78	1.89	0.24
		As	12.00	5.30	7.26	1.57	0.22
		Pb	13.00	6.00	8.11	1.63	0.20
Seagrass areas in Lingshui	27	Cr	33.00	12.00	19.07	4.27	0.22
		Cu	13.00	6.30	8.21	1.86	0.23
		As	9.40	2.70	5.20	2.15	0.41
		Pb	12.00	6.00	8.26	1.35	0.16
Seagrass areas in Xinying	9	Cr	26.00	15.00	18.00	3.35	0.19
		Cu	10.50	5.90	8.17	1.62	0.20
		As	10.70	6.00	7.82	1.27	0.16
		Pb	12.00	6.00	8.67	1.87	0.22



(a) Cr distribution in Lingshui mangrove wetland, (b) Cr distribution in Xinying mangrove wetland, (c) Cu distribution in Lingshui mangrove wetland, (d) Cu distribution in Xinying mangrove wetland, (e) distribution of As in Lingshui mangrove wetland, (f) distribution of As in Xinying mangrove wetland, (g) Pb distribution in Lingshui mangrove wetland, (h) Pb distribution in Xinying mangrove wetland.

图 5 陵水、新盈红树林湿地沉积物中重金属分布特征

Fig. 5 Distribution characteristics of heavy metals in sediments of Lingshui and Xinying mangrove wetlands



(a) Cr distribution in Lingshui seagrass wetland, (b) Cr distribution in Xinying seagrass wetland, (c) Cu distribution in Lingshui seagrass wetland, (d) Cu distribution in Xinying seagrass wetland, (e) distribution of As in Lingshui seagrass wetland, (f) distribution of As in Xinying seagrass wetland, (g) Pb distribution in Lingshui seagrass wetland, (h) Pb distribution in Xinying seagrass wetland

图6 陵水、新盈海草湿地沉积物中重金属分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of heavy metals in sediments of Lingshui and Xinying seagrass wetlands

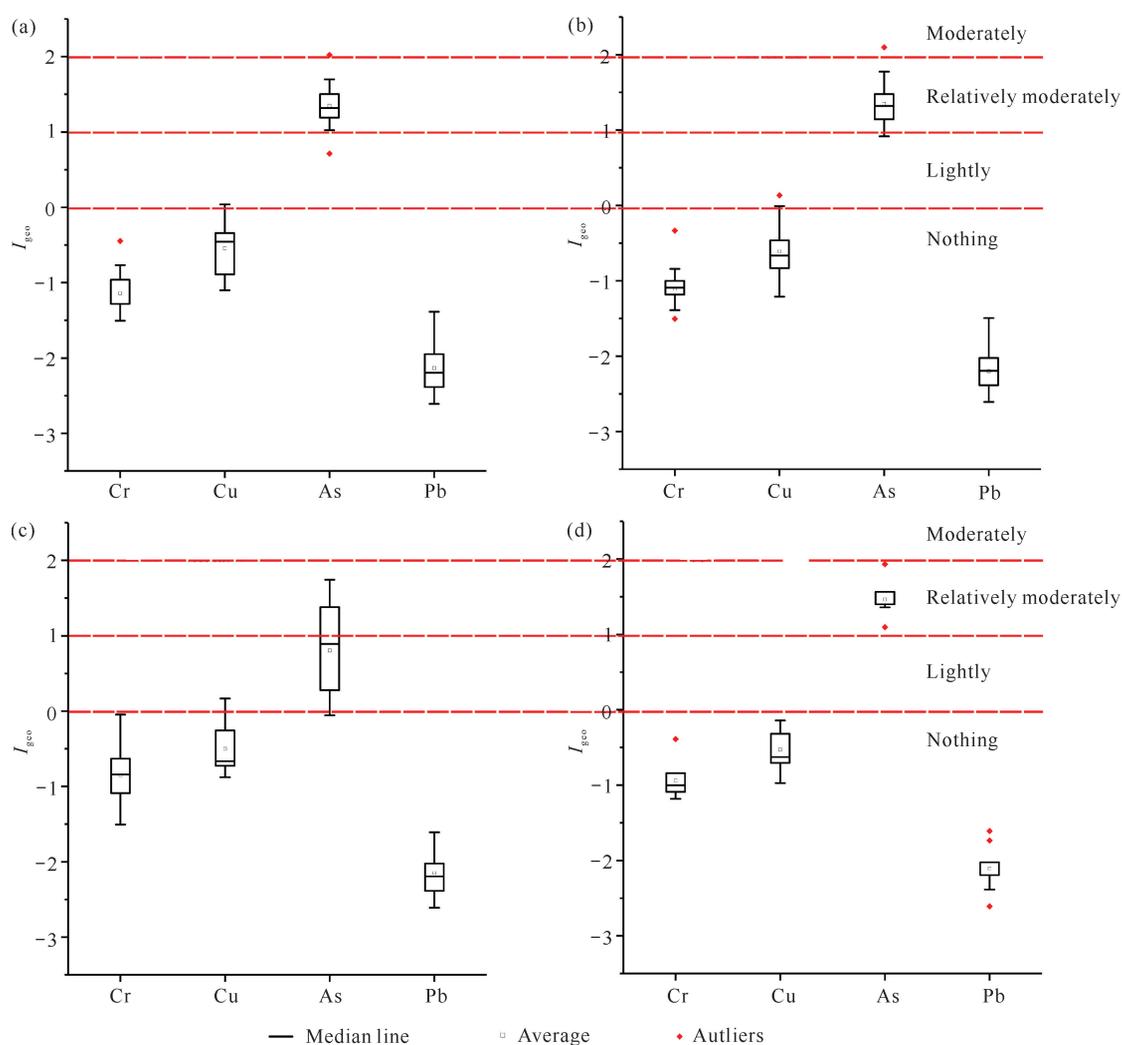
2.4 沉积物重金属污染特征

陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物中地累积指数分析结果如图7所示,4处湿地沉积物中Cr、Cu和Pb与As地累积指数存在明显差异性,同一重金属元素在不同湿地中的地累积指数变化较小。陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物中重金属元素Cr、Cu和Pb的地累积指数均为0级,属于无污染,重金属As的地累积指数为1-2级,属于偏中度污染,4个研究区重金属元素的平均地累积指数均为 $I_{geo}(As) > I_{geo}(Cu) > I_{geo}(Cr) > I_{geo}(Pb)$,在4处湿地沉积物中As地累积指数明显高于Cu、Cr和Pb,可能与陵水、新盈红树林和海草湿地周边存在大面积的渔排养殖、生活污水排放及船体腐蚀等人类活动因素有关^[24]。

2.5 沉积物重金属来源分析

2.5.1 相关性分析

陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物中Cr、Cu、As和Pb之间具有明显的相关性,而重金属元素与沉积物理化性质、沉积物粒径之间无明显相关性(图8)。在陵水和新盈红树林湿地沉积物中,重金属元素Cr、Cu和Pb之间表现为中度-高度正相关关系($r \geq 0.5$)[图8(a)和8(b)];在陵水海草沉积物中,重金属元素Cr和Pb呈高度正相关关系($0.8 \leq r < 1.0$),Cu和Pb呈中度正相关关系($0.5 \leq r < 0.8$);在新盈海草沉积物中,重金属元素Cr和As、Pb呈中-高度正相关关系($r \geq 0.5$),Cu和Pb呈高度正相关关系($r \geq 0.8$)[图8(c)和图8(d)]。



(a) Lingshui mangrove wetland, (b) Xinying mangrove wetland, (c) Lingshui seagrass wetland, (d) Xinying seagrass wetland.

图7 陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物中重金属地累积指数箱线图

Fig. 7 Box plots of heavy metal land accumulation index in sediments of Lingshui, Xinying mangrove and seagrass wetlands

2.5.2 主成分分析

陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物中重金属元素主成分分析结果如表4所示。分析结果显示:陵水红树林湿地第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)的累积贡献率为85.35%,其中PC1的方差贡献率为65.12%,PC1上载荷较大的重金属有Cr、Cu、As和Pb,分别为0.89、0.78、0.79和0.77;PC2的方差贡献率为20.23%,PC2上载荷较大的重金属是As,为0.56。新盈红树林湿地第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)的累积贡献率为84.27%,其中PC1方差贡献率为61.86%,PC1上载荷较大的重金属元素为Cr、Cu、As和Pb,分别为0.90、0.86、0.95和0.96;PC2的方差贡献率为22.41%,PC2上载荷较大的重金属是Pb,为0.63。陵水海草湿地第一主成分

(PC1)和第二主成分(PC2)的累积贡献率为82.17%,其中PC1方差贡献率为57.46%,PC1上载荷较大的重金属有Cr、Cu和Pb,分别为0.90、0.75和0.93;PC2的方差贡献率为24.70%,PC2上载荷较大的重金属是As,为0.96。新盈海草湿地第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)的累积贡献率为94.05%,其中PC1的方差贡献率为69.04%,PC1上载荷较大的重金属有Cr、Cu、As和Pb,分别为0.91、0.75、0.80和0.85;PC2的方差贡献率为25.01%,PC2上载荷较大的重金属是Cu,为0.59。

研究表明,在滨海红树林湿地和海草湿地沉积物中重金属元素As均存在超标现象。而重金属As主要通过海洋环境中水体和沉积物的相互作用进入沉积物中^[25-27]。

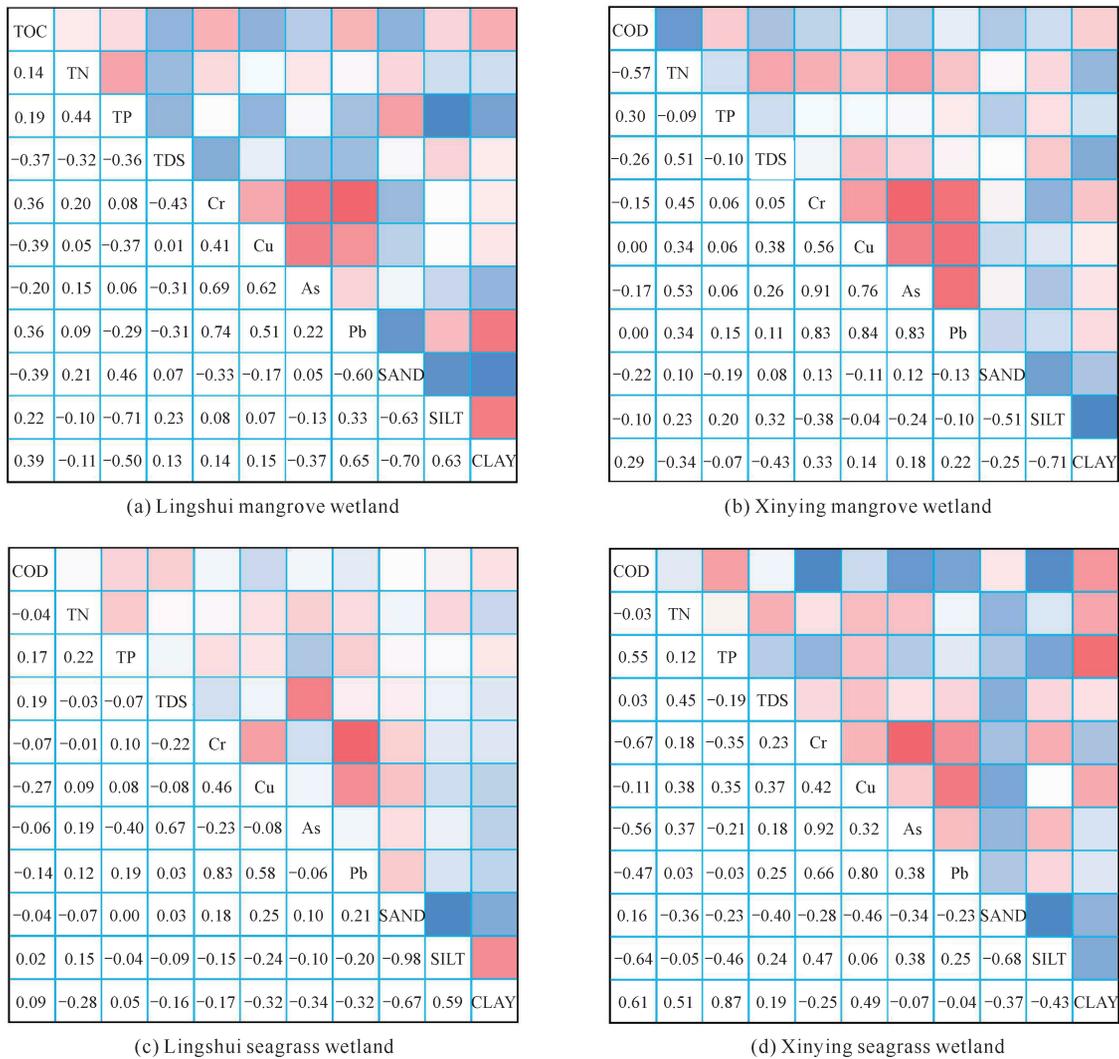


图8 陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物中重金属与理化性质的相关性热图

Fig. 8 Correlation heat maps of heavy metals with physical and chemical properties in sediments of Lingshui, Xinying mangrove and seagrasses wetlands

表4 陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物中重金属元素主成分分析结果

Table 4 Analysis results of principal components of heavy metals in sediments of Lingshui, Xinying mangrove and seagrass wetlands

采样区域 Sampling area	测试指标 Test index	第一主成分 PC1	第二主成分 PC2
Mangrove areas in Lingshui	Cr	0.89	-0.19
	Cu	0.78	0.27
	As	0.79	0.56
	Pb	0.77	-0.62
	Variance contribution rate (%)	65.12	20.23
Accumulative contribution rate (%)		85.35	

续表

Continued table

采样区域 Sampling area	测试指标 Test index	第一主成分 PC1	第二主成分 PC2
Mangrove areas in Xinying	Cr	0.90	-0.26
	Cu	0.86	0.32
	As	0.95	-0.48
	Pb	0.96	0.63
	Variance contribution rate (%)	61.86	22.41
Accumulative contribution rate (%)		84.27	
Seagrass areas in Lingshui	Cr	0.90	-0.06
	Cu	0.75	0.18

续表

Continued table

采样区域 Sampling area	测试指标 Test index	第一主成分 PC1	第二主成分 PC2
Seagrass areas in Xinying	As	-0.25	0.96
	Pb	0.93	0.17
	Variance contribution rate (%)	57.46	24.70
	Accumulative contribution rate (%)	82.17	
	Cr	0.91	-0.38
	Cu	0.75	0.59
	As	0.80	-0.58
	Pb	0.85	0.43
	Variance contribution rate (%)	69.04	25.01
	Accumulative contribution rate (%)	94.05	

成的先决条件。一般情况下,各元素的含量应与土壤元素背景值相差不大。经过评价分析,陵水、新盈红树林和海草沉积物中重金属的含量显现异常,由表2和表5可知,其综合潜在生态风险为轻微生态风险等级,4处湿地沉积物中重金属元素Cr、Cu和Pb的潜在生态风险指数均小于40,属于轻微生态风险等级,陵水红树林湿地沉积物中重金属元素As最大值为60.96,最小值为24.60,平均值为39.00,属于中等生态风险等级;新盈红树林湿地沉积物中重金属元素As最大值为50.27,最小值为14.44,平均值为28.44,属于中等生态风险等级;陵水海草湿地沉积物中重金属元素As最大值为50.27,最小值为14.44,平均值为27.81,属于中等生态风险等级;新盈海草湿地沉积物中重金属元素As最大值为57.22,最小值为32.09,平均值为41.83,属于中等生态风险等级。上述结果表明陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物中重金属元素对湿地生态系统存在一定影响,Cr、Cu和Pb的生态风险较小,而As的生态风险较大。

2.6 沉积物重金属污染风险

自然条件下,岩石和成土母质是上层土壤元素组

表5 陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物中重金属元素的单项潜在生态风险系数(E)和综合潜在生态风险指数(RI)统计

Table 5 Single potential ecological risk index (E) and comprehensive potential ecological risk index (RI) of heavy metals in sediments of Lingshui, Xinying mangrove and seagrass wetlands

采样区域 Sampling area	E/RI	重金属 Heavy metal	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	生态风险等级 Ecological risk level
Mangrove areas in Lingshui	E	Cr	2.20	1.06	1.39	Light
		Cu	7.71	3.50	5.31	Light
		As	60.96	24.60	39.00	Medium
		Pb	2.87	1.23	1.75	Light
	RI		73.33	34.95	47.45	Light
Mangrove areas in Xinying	E	Cr	2.91	1.06	1.62	Light
		Cu	8.23	3.50	5.17	Light
		As	50.27	14.44	28.44	Medium
		Pb	2.46	1.23	1.66	Light
	RI		59.25	21.45	37.05	Light
Seagrass areas in Lingshui	E	Cr	2.91	1.06	1.68	Light
		Cu	8.42	4.08	5.32	Light
		As	50.27	14.44	27.81	Medium
		Pb	2.46	1.23	1.69	Light
	RI		59.25	21.45	36.50	Light
Seagrass areas in Xinying	E	Cr	2.29	1.32	1.59	Light
		Cu	6.80	3.82	5.29	Light
		As	57.22	32.09	41.83	Medium
		Pb	2.46	1.23	1.78	Light
	RI		68.77	40.11	50.48	Light

3 讨论

3.1 滨海湿地沉积物与覆被类型的关系

滨海湿地沉积物是原位沉积、外来沉积、水动力条件以及湿地植物共同作用的结果^[28]。沉积物来源、水动力及其作用下的搬运方式是影响沉积物粒度组成的3个最主要因素^[29]。

陵水、新盈红树林和海草湿地均属于半日潮,陵水位于海南岛东南侧,面临南海,新盈位于海南岛西北侧,陵水、新盈湿地水动力条件不同是其沉积物的粒度存在差异的原因之一。红树林植物根系与海草存在巨大差别,红树林根系坚硬,海草根系柔软,因此海草区域沉积物更加有利于砂的沉积^[30]。根据粒度分析结果,陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物粒度存在显著差异,陵水和新盈海草湿地沉积物中砂含量明显高于红树林湿地沉积物,而粉砂和黏土含量相对较低,印证了沉积物中砂的含量高低与覆被类型有密切关系。

3.2 影响红树林和海草湿地重金属空间分布特征的重要环境因子

不同采样区域沉积物中不同重金属空间分布除受控于湿地区域地形、水动力条件、重金属的性质和来源影响外,还受重金属元素地球化学行为、迁移形式、对物化条件的敏感程度和沉积物粒径的吸附程度等因素的影响,从而产生空间分布的差异性^[31-33]。另外,红树林湿地区域Cr和Pb含量整体上低于海草湿地区域,Cu和As含量在红树林和海草湿地采样区含量差异较小。上述分析说明,在陵水、新盈红树林和海草采样区域,湿地覆盖的植物类型是影响红树林和海草湿地重金属空间分布特征的重要环境因子。

3.3 沉积物重金属污染来源

滨海湿地环境中粒径较小的细颗粒沉积物比表面积较大,易富集吸收重金属元素^[34]。由图8可知,陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物中黏土质量分数与重金属元素大多不存在显著相关性,说明沉积物粒径不是影响陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物重金属含量和分布的关键因子。研究表明,具有高度相关关系的多种重金属元素之间在一定程度上存在相似的空间分布规律,并具有同源性^[35]。由图5和图8可知,在陵水和新盈红树林湿地沉积物中,Cr、Cu、As和Pb可能来自相近污染源,在陵水和新盈海草湿地沉积物中,Cr、Cu和Pb可能来自相近污染源。

重金属元素相关性分析、主成分分析和统计分析

可以综合判断沉积物中重金属的来源^[36]。相关分析和主成分分析说明陵水和新盈红树林湿地沉积物中Cr、Cu、As和Pb可能具有相似的来源,统计分析结果表明,陵水和新盈红树林湿地沉积物中Cr、Cu和Pb含量与调查区重金属元素背景值较为接近,As含量高于背景值,说明陵水红树林湿地沉积物中重金属Cr、Cu、As和Pb主要为自然来源,而As除自然来源外,还存在部分人为污染源,而新盈红树林湿地沉积物中重金属Cr、Cu、As和Pb主要为自然来源^[37]。由表1、图8和表4可知,陵水海草湿地沉积物中重金属元素Cr、Cu和Pb主要为自然来源,As主要为人为来源,新盈海草湿地沉积物中重金属元素Cr、Cu、As和Pb主要为自然来源,而Cu除自然来源外,还存在部分人为来源。

4 结论

(1)区域水动力条件的差异和湿地覆被类型的不同是影响海南岛陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物分类存在差异的关键环境因子。海南岛陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物粒度组成具有相似性,粒度含量均为砂>粉砂>黏土。而沉积物粒度分类存在差异,陵水红树林湿地沉积物可划分为5种类型,陵水海草湿地沉积物主要划分为2种类型,新盈红树林和海草湿地沉积物均可划分为3种类型。

(2)湿地覆盖植物类型对海南岛陵水、新盈红树林和海草湿地重金属As的空间分布具有一定的影响。在陵水和新盈红树林湿地采样区域,Cr和Pb具有相似的空间分布特征,Cu和As同样具有相似的空间分布特征,而在周围人为活动情况相似的海草湿地采样区域,As的空间分布与Cr、Cu和Pb却存在明显的差异。

(3)海南岛陵水、新盈红树林和海草湿地沉积物重金属As为偏中度污染、中度生态风险。陵水、新盈红树林湿地沉积物中间Cr、Cu、As和Pb具有相似的来源,即主要来源于自然环境,其次来源于人类活动,As超标与研究区域周边存在大面积的鱼虾养殖、船坞停放等人类活动因素有关。

参考文献

- [1] 董婷婷,葛晨东,张响,等.海南岛陵水新村港表层沉积物无机碳分布特征及其指示意义[J].第四纪研究,2016,36(1):86-92.
- [2] 范航清.南中国海的红树林与海岸复杂性研究战略

- [C]//第四届中国红树林学术会议论文摘要集.[出版地不详]:[出版者不详],2008:61.
- [3] ZHANG L, NI Z X, CUI L J, et al. Heavy metal accumulation and ecological risk on four seagrass species in South China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 173: 113153.
- [4] GIRI C, OCHIENG E, TIESZEN L L, et al. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data [J]. *Global Ecology Biogeography*, 2010, 20(1): 154-159.
- [5] 牛安逸,高一飞,徐颂军. 重金属污染对珠江口红树林表层沉积物碳含量的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(23): 8549-8558.
- [6] 高宇. 中国典型红树林湿地沉积物碳库分布特征及控制因子研究[D]. 北京:清华大学, 2019.
- [7] 许战州,朱艾嘉,蔡伟叙,等. 流沙湾海草床重金属富集特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(23): 7244-7250.
- [8] 韦江玲,王增军,潘良浩,等. 山口红树林湿地沉积物重金属含量及生态风险评价[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2019, 14(2): 28-33.
- [9] 谭趣孜,巫冷蝉. 广西山口红树林生态自然保护区海域沉积物重金属污染状况及潜在生态风险评价[J]. *环境与发展*, 2020, 32(1): 20-22.
- [10] 邢瑶丽,赵志忠,李燕. 海南新盈港红树林湿地沉积物有机碳分布特征及其影响因素[J]. *海南师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 31(1): 112-118.
- [11] 巩慧敏,刘永,肖雅元,等. 近海海水和表层沉积物重金属污染与生态风险评价:以海南新村港为例[J]. *农业现代化研究*, 2018, 39(4): 700-708.
- [12] 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.
- [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. 海洋调查规范:第9部分 海洋生态调查指南:GB/T 12763.9-2007 [S]. 北京:中国质检出版社, 2007.
- [14] 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5部分 沉积物分析:GB 17378.5-2007 [S]. 北京:中国标准出版社, 2007.
- [15] MÜLLER G. Index of Geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geology Journal*, 1969, 2(3): 109-118.
- [16] 傅杨荣. 海南岛 1/25 万多目标区域地球化学调查报告[R]. 海口:海南省地质调查院, 2008.
- [17] 谢谊,张腾,雷富,等. 涠洲岛西面及西南面沉积物重金属污染分析[J]. *广西科学*, 2018, 25(1): 57-62, 67.
- [18] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [19] 安福元,马海州,樊启顺,等. 粒度在沉积物物源判别中的运用[J]. *盐湖研究*, 2012, 20(1): 49-56.
- [20] 石一茜,赵旭,林军,等. 基于总量和形态的表层沉积物重金属污染及来源:以马鞍列岛海域为例[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(3): 1189-1198.
- [21] 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.
- [22] 陈石泉,吴钟解,蔡泽富,等. 海南黎安港表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. *海洋科学*, 2018, 42(2): 124-133.
- [23] 陈丹青,谢志宜,张雅静,等. 基于 PCA/APCS 和地统计学的广州市土壤重金属来源解析[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(6): 1014-1022.
- [24] 何海军,甘华阳,何金先,等. 海南岛南部滨海沉积物中重金属分布特征及生态风险评价[J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(3): 47-55.
- [25] 于瑞莲,胡恭任,赵金秀,等. 泉州湾河口湿地秋茄红树林中重金属的分布、迁移和储量[J]. *环境化学*, 2013, 32(1): 125-131.
- [26] UDECHUKWU B E, ISMAIL A, ZULKIFLI S Z, et al. Distribution, mobility, and pollution assessment of Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, and Fe in intertidal surface sediments of Sg. Puloh mangrove estuary, Malaysia [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(6): 4242-4255.
- [27] 尹肃,冯成洪,李扬飏,等. 长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征[J]. *环境科学*, 2016, 37(3): 917-924.
- [28] 石学法,陈春峰,刘焱光,等. 南黄海中部沉积物粒径趋势分析及搬运作用[J]. *科学通报*, 2002, 47(6): 452-456.
- [29] 朱耀军,赵峰,郭菊兰,等. 广东湛江高桥红树林湿地沉积柱粒度特征[J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(11): 9-17.
- [30] 辛成林,任景玲,张桂玲,等. 黄河下游水体悬浮颗粒物中金属元素的地球化学行为[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(10): 3127-3134.
- [31] 王萃,孙野青,贾宏亮,等. 辽宁省大凌河口沉积物重金属污染及生态风险评价[J]. *海洋环境科学*, 2013, 32(1): 28-32.
- [32] DELGADO A, ROMERO I. Environmental conflict analysis using an integrated grey clustering and entropy-weight method: a case study of a mining project in Peru

- [J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 77: 108-121.
- [33] 郑立地, 肖蓉, 姚新颖, 等. 黄河三角洲潮汐生态恢复区湿地土壤特征和重金属分布[J]. 湿地科学, 2015, 13(5): 535-542.
- [34] 张敏. 长江中下游浅水湖泊富营养化机制与重金属污染研究[D]. 武昌: 中国科学院研究生院(水生生物研究所), 2005.
- [35] 庄海海, 高茂生, 徐绍辉, 等. 大沽河口潮间带沉积物重金属污染特征[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(6): 826-834.
- [36] LUO W, LU Y L, WANG T Y, et al. Ecological risk assessment of arsenic and metals in sediments of coastal areas of northern Bohai and Yellow Seas, China [J]. Ambio, 2010, 39(5/6): 367-375.
- [37] 季一诺, 赵志忠, 吴丹, 等. 海南东寨港红树林沉积物中重金属的分布及其生物有效性[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 593-600.

Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments of Lingshui, Xinying Mangrove and Seagrass Wetlands

FU Kaizhe, LONG Junqiao^{**}, CHEN Zeheng, DING Weipin, HUANG Zanhui
(Haikou Marine Geological Survey Center, China Geological Survey, Haikou, Hainan, 571127, China)

Abstract: In order to study the risk status of the two typical ecosystems of Lingshui and Xinying in Hainan Island, 70 groups of sediment samples from mangrove and seagrass wetlands in the study area were collected for physical and chemical analysis. The characteristics of heavy metal pollution were analyzed and evaluated by mathematical statistics methods such as difference analysis, geo-accumulation index analysis, ecological risk analysis, correlation analysis and principal component analysis, and the heavy metal content and pollution characteristics of surface sediments in different types of wetlands were studied. The results showed that the geo-accumulation index of As was significantly higher than that of Cr, Cu and Pb in the sediments of mangrove and seagrass wetlands in the study area, which was moderately polluted and had moderate ecological risk, while the ecological risk of Cr, Cu and Pb was small. Cr, Cu, As and Pb in Lingshui and Xinying mangrove sediments have similar sources, that was, mainly from the natural environment, followed by human activities. The excess of As was related to human activities such as large-scale fish and shrimp aquaculture and dock parking around the study area.

Key words: coastal wetland; surface sediment; heavy metals; spatial distribution; pollution assessment

责任编辑: 陆媛峰
