

广东湛江湾红树林沉积物重金属 分布特征及生态风险评价

孙志佳, 李保飞, 陈玉海, 赵明杰,
闫兴国, 袁庆政, 臧现菲

(中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东 烟台 264004)

摘要:随着人类社会经济的快速发展,红树林面临越来越严重的生态环境风险。为了掌握广东湛江湾红树林沉积物重金属污染及生态风险现状,为红树林保护、修复工作提供支撑,本研究沿湛江湾红树林分布区域采集了 25 个沉积物样品,分析评价了重金属的含量、相关性、富集程度和生态风险,并讨论了重金属的来源。结果表明,研究区红树林沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cr、Co、Ni、As、Cd、Mn、Hg 的含量平均值分别为 $(9.62 \pm 6.86) \times 10^{-6}$ 、 $(16.70 \pm 12.13) \times 10^{-6}$ 、 $(29.68 \pm 21.33) \times 10^{-6}$ 、 $(24.17 \pm 23.32) \times 10^{-6}$ 、 $(2.48 \pm 2.17) \times 10^{-6}$ 、 $(7.22 \pm 5.19) \times 10^{-6}$ 、 $(4.97 \pm 4.15) \times 10^{-6}$ 、 $(0.14 \pm 0.08) \times 10^{-6}$ 、 $(118.80 \pm 115.23) \times 10^{-6}$ 、 $(0.16 \pm 0.04) \times 10^{-6}$, 其中, Cd、Hg 的含量分别是广东省土壤环境背景值的 2.41 倍和 2.06 倍,富集程度高于其他元素;红树林沉积物中重金属主要为自然来源, Cd 受人为输入影响含量偏高, Hg 主要来源于人类活动;沉积物中重金属总体为轻微污染和中等潜在生态风险, Cd、Hg 两种元素均为中等污染和中等到强潜在生态风险,是研究区的主要污染物。

关键词:红树林; 沉积物; 重金属; 生态风险评价; 湛江湾

中图分类号: P736; X820.4

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2022)02-0215-07

Distribution features and ecological risk assessment of heavy metals in mangrove sediments in Zhanjiang bay, Guangdong province

SUN Zhi-jia, LI Bao-fei, CHEN Yu-hai, ZHAO Ming-jie,

YAN Xing-guo, YUAN Qing-zheng, ZANG Xian-fei

(China Geological Survey Yantai Coastal Zone Geological Survey Center, Yantai 264004, China)

Abstract: With the rapid development of human society and economy, the ecological risk of mangrove sediments is more and more serious. In order to understand the heavy metals pollution status and ecological risk of mangrove sediments in Zhanjiang bay, Guangdong province, and provide support for the protection and restoration of mangroves, 25 samples were collected along the mangrove distribution area in this study. The content, correlation, enrichment factors and ecological risk of heavy metals were analyzed and evaluated, and the sources of heavy metals were discussed. The results showed that, the average contents of Cu, Pb, Zn, Cr, Co, Ni, As, Cd, Mn and Hg in mangrove sediments were $(9.62 \pm 6.86) \times 10^{-6}$, $(16.70 \pm 12.13) \times 10^{-6}$, $(29.68 \pm 21.33) \times 10^{-6}$, $(24.17 \pm 23.32) \times 10^{-6}$, $(2.48 \pm 2.17) \times 10^{-6}$, $(7.22 \pm 5.19) \times 10^{-6}$, $(4.97 \pm 4.15) \times 10^{-6}$, $(0.14 \pm 0.08) \times 10^{-6}$, $(118.80 \pm 115.23) \times 10^{-6}$ and $(0.16 \pm 0.04) \times 10^{-6}$, respectively. The contents of Cd and Hg were 2.41 and 2.06 times higher than the background values of soil environment in Guangdong province. Heavy metals in

收稿日期: 2020-12-13, 修订日期: 2021-03-05

基金项目: 广东湛江地区海岸带自然资源综合调查项目(DD20208062)

作者简介: 孙志佳(1991-), 男, 河北沧州人, 工程师, 学士, 主要从事自然资源调查与监测研究, E-mail: vcszj@qq.com

mangrove sediments were mainly from natural sources. The content of Cd was high due to human activities. Hg was mainly from human activities. The pollution level of heavy metals in mangrove sediments is slight, and the potential ecological risk is moderate. Cd and Hg are the main pollutants in the study area.

Key words: mangrove; sediments; heavy metals; ecological risk assessment; Zhanjiang bay

红树林分布于热带、亚热带低能海岸的潮间带,能够提供多种生态系统服务,随着人类对红树林生态系统服务功能认识的提高,红树林湿地恢复工程不断展开。红树林能持续沉积潮汐、河流、大气沉降和人类活动所带来的重金属元素^[1-2]。随着人类社会经济的快速发展,红树林生态系统面临越来越严重的环境风险。近年来,相关学者针对红树林表层沉积物重金属的含量、空间分布及污染评价等方面开展了大量研究^[1, 3-8]。沉积物中重金属相对其环境本底值的变化能够直接反映环境质量,具有重要的环境指示意义^[9]。

广东湛江国家级红树林自然保护区成立于1997年,湛江湾内的红树林分布范围广,是红树林自然保护区的重要组成部分,随着湛江湾重金属污染物入海量不断增加^[10],红树林承受的环境压力也越来越大。在人为活动的影响下,区域污染加重,进而可能造成潜在的生态风险^[11]。目前,针对湛江湾红树林沉积物重金属的评价研究偏少,前人开展的研究主要位于观海长廊、特呈岛、东海岛等区域,对湛江湾的覆盖度偏低。坡头区红树林面积约375 ha,广泛分布于湛江湾内,对其沉积物重金属污染状况的研究可补充前人研究的不足,为湛江湾红树林的保护、修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广东省湛江市坡头区沿海一带,海岸线曲折,总长208.59 km。研究区属于热带海洋季风气候,具有夏长冬短、气候温和、雨量丰沛的特点,潮汐为半日潮。区内地层为元古界和第四系,以第四系分布最广,北部发育花岗岩体,土壤类型主要为砖红壤。红树植物包括白骨壤、无瓣海桑、秋茄、海漆、木榄、红海榄、蜡烛果等。区内滨海湿地还包括浅海水域、沙石海滩、河口水域、海水养殖场等。

1.2 样品采集

研究区沉积物样品于2020年7月利用木铲获取,取样深度为0~20 cm,每个采样点均采用梅花采样法取样。共采集25件沉积物样品(图1),采样点布设在红树生长比较茂盛的区域,子样分布在不同类型的红树植物附近,最大程度上反映了红树林沉积物中重金属分布特征。

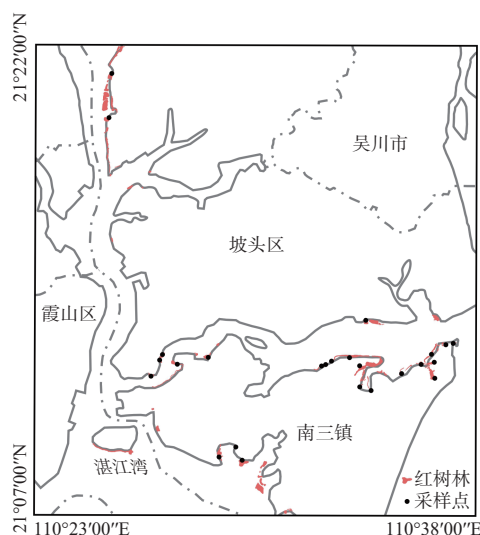


图1 湛江湾红树林采样点分布

Fig. 1 Distribution of mangrove sampling points in Zhanjiang bay

1.3 测试方法

沉积物样品采集后经自然风干,剔除样品中的根系并过100目筛。样品经初步处理后送往实验室。地球化学分析项目包括 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、Cu、Pb、Zn、Cr、Co、Ni、As、Cd、Mn、Hg等元素含量及pH。土壤样品经四硼酸锂-偏硼酸锂混合坩埚熔融,通过X射线荧光光谱仪(Rigaku ZSX Primus II, 日本理学)测定 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量(检出限为0.01%);样品用盐酸-硝酸混合液体体系经水浴法消解,通过原子荧光光度计(AFS-8220, 北京吉天)测定As、Hg含量(检出限为 10×10^{-9});样品用盐酸-高氯酸-硝酸-氢氟酸体系经石墨炉消解,通过电感耦合等离子质谱仪

(ICP-MS, Elan DRII, 美国 PerkinElmer)测定 Cu、Pb、Zn、Cr、Co、Ni、Cd、Mn 含量(检出限为 0.05×10^{-6})。土壤样品测试中设置平行样和标准物质(国家土壤标准样品 GSS-2 和 GSS-7)进行质量控制,标样回收率为 77%~121%,符合质量控制标准。pH 用 pH 计测定。

1.4 研究方法

1.4.1 富集因子法

富集因子(EF)法是广泛用于沉积物重金属污染评价的方法^[12-14],计算公式如下:

$$EF = \frac{(K_i/K_n)_{\text{sample}}}{(K_i/K_n)_{\text{baseline}}} \quad (1)$$

式中: K_i 为元素 i 的浓度; K_n 为标准化元素的浓度; sample 和 baseline 分别表示样品和背景,本研究以 Fe 作为参考元素,采用广东省土壤环境背景值^[15]。富集因子分级标准见表 1。

表 1 富集因子分级

Tab.1 The level of enrichment factors

富集因子	富集等级
$EF < 2$	无至轻微富集
$2 \leq EF < 5$	中等富集
$5 \leq EF < 20$	较强富集
$20 \leq EF < 40$	强富集
$EF \geq 40$	极强富集

1.4.2 潜在生态风险指数法

本文采用 Hakanson(1980)提出的潜在生态风险指数法^[16]对研究区红树林沉积物重金属生态风险进行评价,该方法被广泛用于土壤重金属污染评价^[17-20],计算公式如下:

$$S_f^i = \frac{S^i}{S_n^i} \quad (2)$$

$$S_d = \sum_i^m S_f^i \quad (3)$$

表 3 评价指标与污染程度和潜在生态风险程度之间的关系

Tab.3 The relation between evaluation indices and the contamination degree and potential ecological risk

S_f^i	单元素污染程度	S_d	总体污染程度	E_r^i	单元素潜在生态风险程度	RI	综合潜在生态风险程度
$S_f^i < 1$	轻微	$S_d < 10$	轻微	$E_r^i < 40$	轻微	$RI < 120$	轻微
$1 \leq S_f^i < 3$	中等	$10 \leq S_d < 20$	中等	$40 \leq E_r^i < 80$	中等	$120 \leq RI < 240$	中等
$3 \leq S_f^i < 6$	强	$20 \leq S_d < 40$	强	$80 \leq E_r^i < 160$	强	$240 \leq RI < 480$	强
$S_f^i \geq 6$	很强	$S_d \geq 40$	很强	$160 \leq E_r^i < 320$	很强	$480 \leq RI < 960$	很强

$$E_r^i = T_r^i \times S_f^i \quad (4)$$

$$RI = \sum_i^m E_r^i = \sum_i^m T_r^i \times S_f^i \quad (5)$$

式中: S_f^i 为重金属 i 的污染系数; S^i 为重金属 i 的实测值; S_n^i 为重金属 i 的评价参比值,本文采用广东省土壤环境背景值^[15]; S_d 为重金属总体污染程度; E_r^i 为重金属 i 的潜在生态风险系数; T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数(表 2); RI 为多种重金属综合潜在生态风险指数。重金属污染评价指标及其与污染程度和潜在生态风险程度的关系如表 3 所示。

表 2 重金属毒性响应系数

Tab.2 The toxic-response factor of heavy metals

元素	Hg	Cd	As	Cu	Ni	Co	Pb	Cr	Zn	Mn
T_r^i	40	30	10	5	5	5	5	2	1	1

1.5 数据处理

采用 SPSS 22.0 和 Excel 2016 软件对数据进行处理和统计分析,用 MapGIS 6.7 软件进行图件绘制。

2 结果与讨论

2.1 重金属含量特征

研究区红树林沉积物总体呈弱酸性, pH 平均值为 6.18。10 种重金属平均含量大体表现为 $Mn > Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > As > Co > Hg > Cd$ (表 4), 其中, Mn 和 Cr 的变异系数大, 分别为 0.97 和 0.96, 说明这两种元素在沉积物中的含量波动幅度大, Hg 和 Cd 的变异系数小, 分别为 0.28 和 0.60, 说明这两种元素含量波动幅度小。

与广州南沙、深圳福田和珠海淇澳岛红树林表层沉积物^[4]相比(表 5), 研究区红树林沉积物中除 Cd 含量略高于深圳福田外, 其他重金属明

显处于较低水平。与海南东寨港、清澜港相比(表 5), 研究区红树林沉积物中重金属含量均处于较低水平, 其中, Cd 含量与清澜港接近, Pb 含量与东寨港接近。与广西山口、茅尾海相比(表 5), 研究区红树林沉积物中 Cd、Hg 处于较高水平, Cd 含量为茅尾海的 11.25 倍。

表 4 红树林沉积物中 10 种重金属、2 种主量元素的含量和 pH 特征
Tab.4 The pH values and contents of ten heavy metals and two major elements in mangrove sediments

统计量	含量/ $\times 10^{-6}$										含量/(%)		pH
	Cu	Pb	Zn	Cr	Co	Ni	As	Cd	Mn	Hg	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	
样品数量/个	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
最小值	1.80	4.28	8.42	5.14	0.44	2.00	0.70	0.07	20.00	0.08	0.48	0.40	4.78
最大值	25.90	47.90	100.00	113.00	9.04	22.00	17.00	0.32	510.00	0.25	19.70	6.03	7.12
平均值	9.62	16.70	29.68	24.17	2.48	7.22	4.97	0.14	118.80	0.16	4.74	1.78	6.18
标准差	6.86	12.13	21.33	23.32	2.17	5.19	4.15	0.08	115.23	0.04	4.66	1.52	0.64
变异系数	0.71	0.73	0.72	0.96	0.87	0.72	0.84	0.60	0.97	0.28	0.98	0.85	0.10

表 5 湛江湾和其他典型红树林沉积物重金属含量($\times 10^{-6}$)比较
Tab.5 Comparisons of heavy metals content in the sediments of Zhanjiang bay and other typical mangroves

研究区域	Cu	Pb	Zn	Cr	Co	Ni	As	Cd	Mn	Hg
湛江湾(本研究)(短柱, 0~20 cm)	9.62	16.70	29.68	24.17	2.48	7.22	4.97	0.14	118.80	0.16
广州南沙, 广东 ^[4] (表层, 0~5 cm)	209.00	83.30	419.70	146.00	18.40	73.90	44.10	4.10	655.70	—
深圳福田, 广东 ^[4] (表层, 0~5 cm)	29.10	39.60	112.80	122.30	7.50	20.90	9.80	0.10	588.30	—
珠海淇澳岛, 广东 ^[4] (表层, 0~5 cm)	77.70	71.60	228.30	101.30	20.60	58.00	36.40	1.10	1073.00	—
东寨港, 海南 ^[5] (短柱, 0~40 cm)	19.62	20.76	44.84	75.82	—	31.06	8.67	0.62	—	—
清澜港, 海南 ^[3] (表层)	15.48	24.39	50.92	54.83	—	20.92	12.16	0.14	—	—
山口, 广西 ^[7] (表层)	4.31	6.23	21.20	17.30	—	—	3.99	0.05	—	0.03
茅尾海, 广西 ^[8] (表层)	24.81	18.31	59.85	30.02	—	9.24	—	0.01	—	0.10
广东省土壤环境背景值 ^[15] (A层)	17.00	36.00	47.30	50.50	7.00	14.40	8.90	0.06	279.00	0.08

注: “—” 表示缺数据

研究区红树林沉积物中 Cd、Hg 分别是广东省土壤环境背景值的 2.41 倍和 2.06 倍, 其他重金属含量平均值均小于背景值, 表明研究区 Cd、Hg 发生了富集, 与前人的研究结果^[6, 19]相比, Cd、Hg 的含量呈增长趋势。

2.2 重金属相关性特征

在同一研究区, 如果沉积物中重金属之间存在相关性, 那么可能有相似的来源^[21]。从 Pearson 相关性来看(表 6), Cu、Pb、Zn、Cr、Co、Ni、As、Cd 8 种重金属元素之间呈显著相关性, 与主量元素 Al₂O₃、Fe₂O₃ 呈显著相关性, 相关系数 r 基本都在 0.8 以上, 为强相关性, 表明他们之间具有相近或者相同的来源。Mn 与 Zn、Co、Ni 呈中

等相关性($0.50 \leq r < 0.80$)。Hg 与其他元素之间均不存在相关性, 表明其来源不同。

2.3 重金属来源分析

为了进一步探明重金属来源, 本文进行了聚类分析(图 2)。本研究中, 10 种重金属被分为三簇, 第一簇为 Cu、Pb、Zn、Cr、Co、Ni、As 和 Cd, 第二簇为 Mn, 第三簇为 Hg, 距离簇可用于表示重金属之间的关联程度, 距离簇值越低, 关联就越显著^[22]。该结果与相关性分析有较好的一致性。

第一簇中的重金属元素与主量元素 Al₂O₃、Fe₂O₃ 距离值(值为 6)较小, 主量元素主要来源于地壳, 表明这些重金属元素的主要来源是沉积物本身, 受地质背景影响较强, 主要来自研究区

表 6 红树林沉积物中 10 种重金属之间的相关系数
Tab.6 Correlation coefficient between ten heavy metals in mangrove sediments

	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Cu	Pb	Zn	Cr	Co	Ni	As	Cd	Mn	Hg
Al ₂ O ₃	1											
Fe ₂ O ₃	0.90**	1										
Cu	0.93**	0.91**	1									
Pb	0.98**	0.95**	0.96**	1								
Zn	0.79**	0.90**	0.91**	0.87**	1							
Cr	0.97**	0.84**	0.87**	0.91**	0.67**	1						
Co	0.64**	0.84**	0.76**	0.76**	0.92**	0.49	1					
Ni	0.90**	0.90**	0.94**	0.94**	0.93**	0.81**	0.85**	1				
As	0.91**	0.97**	0.92**	0.95**	0.91**	0.84**	0.83**	0.94**	1			
Cd	0.93**	0.90**	0.96**	0.96**	0.90**	0.85**	0.77**	0.94**	0.91**	1		
Mn	0.34	0.51**	0.48	0.49	0.55**	0.21	0.72**	0.51**	0.45	0.45	1	
Hg	0.14	0.07	0.16	0.11	0.20	0.10	0.08	0.18	0.14	0.18	-0.06	1

注: **表示在 $p<0.01$ 时, 双侧 t 检验, 相关性显著, $n=25$

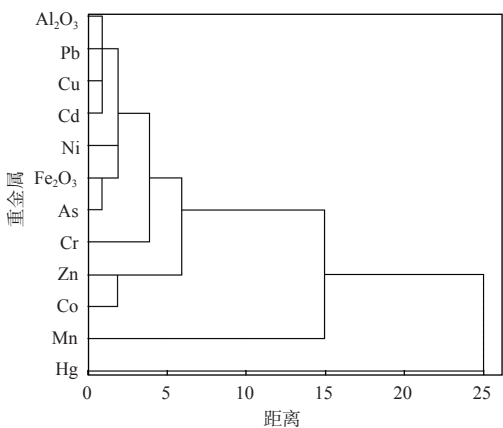


图 2 红树林沉积物中重金属聚类分析树

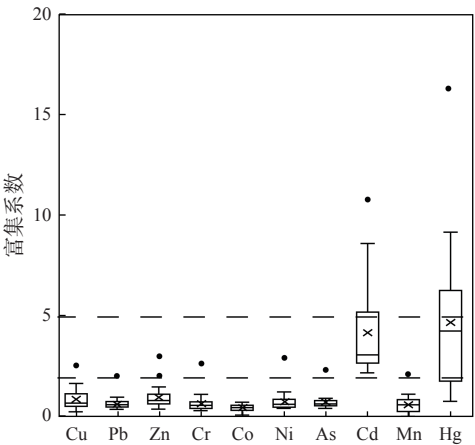
Fig. 2 Dendrogram of heavy metals in mangrove sediments

附近陆域岩石自然风化剥蚀。有研究表明, 受工业污染的大气远距离传输会造成 Cd 的沉降^[23], 大气沉降是 Cd 的重要来源^[24-25], 这是研究区 Cd 含量明显偏高而变异系数偏低的重要原因。第二簇中的 Mn 可能主要受到海洋表层沉积物中锰氧化物的影响。第三簇中的 Hg 与前两簇的距离值(值为 25)很大, 表明 Hg 与其他 9 种重金属来源差异大, 代表了人为输入源, Hg 变异系数最低, 主要来源为大气沉降^[23, 25]。

个别采样点的 Cu、Zn、Cr、Pb 含量高于背景值, 表明除自然输入外, 还有少量人为输入, 包括交通运输、工业活动、城市排污、海水养殖等^[6-8]。

2.4 富集因子法评价

通过公式(1)计算获得研究区红树林沉积物中重金属的富集系数(图 3)。由图 3 可知, 湛江湾红树林沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cr、Co、Ni、As、Mn 8 种重金属元素表现为无富集至轻微富集, 个别异常点为中等富集。Cd 主要为中等富集,



注: 图中箱体下端为 1/4 分位数(Q_1), 上端为 3/4 分位数(Q_3), 中间横线为中位数; “×”表示平均数, “·”表示异常值, 四分位差 $IQR=Q_3-Q_1$; 箱体下端伸出的线条为 $Q_1-1.5\times IQR$, 上端线条为 $Q_3+1.5\times IQR$; 图中两条虚线由上到下分别表示 $EF=5$ 和 $EF=2$

图 3 红树林沉积物中各重金属富集因子范围

Fig. 3 The range of heavy metals enrichment factors in mangrove sediments

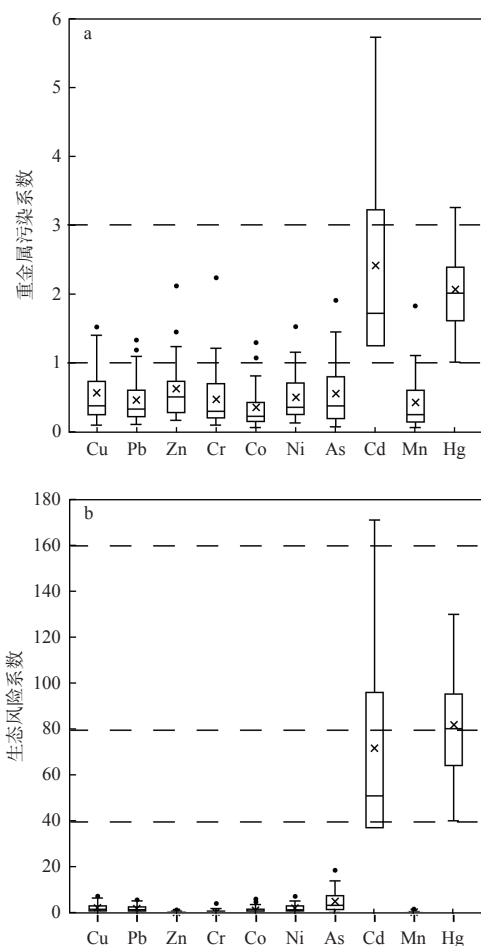
Hg 主要为中等富集到较强富集。结合采样点位置来看,元素富集程度高的采样点大多位于岸线凹进陆地且受水动力影响偏弱的区域。有研究表明,沉积物粒度越细对重金属的吸附能力越强^[21],水动力弱有利于细颗粒的沉积,进而增加了重金属的富集程度。

2.5 重金属生态风险评价

图4的箱线图显示了研究区红树林沉积物中重金属污染系数 S_f^i 和潜在生态风险系数 E_r^i 值分布范围。依据 Hakanson(1980)给出的评价标准^[16],研究区 Cu、Pb、Zn、Cr、Co、Ni、As、Mn 的 S_f^i 值主要为 0~1,属于轻微污染,个别采样点

为中等污染;Cd、Hg 的 S_f^i 值主要为 1~3,属于中等污染,个别采样点达到了强污染(图4a)。研究区 Cu、Pb、Zn、Cr、Co、Ni、As、Mn 的 E_r^i 值均小于 40,为轻微潜在生态风险,而 Cd、Hg 的毒性响应系数较大, E_r^i 值主要为 40~160,属于中等到强潜在生态风险(图4b)。

研究区红树林沉积物中重金属总体污染程度 S_d 值为 4.03~19.13,平均值为 8.44,为轻微污染。采样点轻微污染站位的比例为 72%,中等污染为 28%(图5),这表明大部分地区重金属总体污染程度轻微。潜在生态风险指数 RI 的范围为 98.60~306.36,平均值为 171.65,为中等潜在生态风险。研究区轻微潜在生态风险站位的比例为 24%,中等潜在生态风险为 52%,强潜在生态风险为 24%(图5)。Cd 和 Hg 的潜在生态风险明显高于其他元素,对重金属总体潜在生态风险贡献较大,应将 Cd 和 Hg 纳入重点监控研究范畴。



注:图 a 中两条虚线由上到下分别表示 $S_f^i=3$ 和 $S_f^i=1$;图 b 中 3 条虚线由上到下分别表示 $E_r^i=160$ 、 $E_r^i=80$ 和 $E_r^i=40$

图4 红树林沉积物中各重金属污染系数(S_f^i)和潜在生态风险系数(E_r^i)范围

Fig. 4 The contamination factor (S_f^i) and ecological harm coefficient (E_r^i) for the heavy metals in mangrove sediments

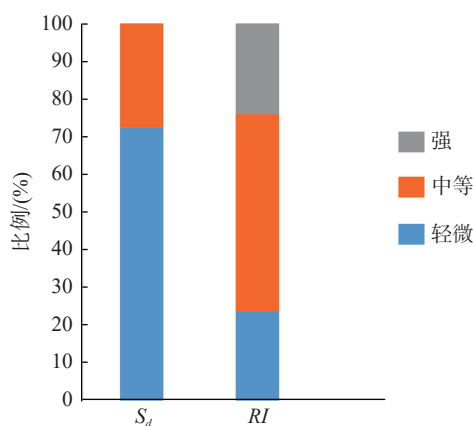


图5 沉积物重金属总体污染程度(S_d)和总体潜在生态风险指数(RI)评价结果

Fig. 5 Results of heavy metals pollution level (S_d) and ecological risk index (RI)

3 结论

(1)研究区红树林沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cr、Co、Ni、As、Mn 为无富集至轻微富集,含量低于广东省土壤环境背景值;Cd 主要为中等富集,Hg 主要为中等到较强富集,Cd、Hg 含量分别为背景值的 2.41 倍和 2.06 倍;与全国典型红树林相比,研究区沉积物中重金属含量整体处于较低水平。

(2)相关性和聚类分析结果表明,研究区红树林沉积物中重金属主要来源于陆域岩石自然风化剥蚀,人类活动加剧了Cd的富集,Hg主要来源于人类活动。

(3)研究区红树林沉积物中重金属总体为轻微污染和中等潜在生态风险,其中,Cd、Hg两种元素均为中等污染状态和中等到强潜在生态风险,相关部门应重视对Cd和Hg的管控,避免污染进一步加剧。

参考文献:

- [1] 朱耀军,郭菊兰,武高洁,等. 湛江高桥红树林沉积物理化性质与金属元素的空间分布[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(2): 1-9.
- [2] 朱耀军, BOURGEOIS C, 林广旋, 等. 湛江高桥红树林表层沉积物的粒度空间分布特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(8): 2114-2120.
- [3] 叶心媛, 王 鹏, 李 香, 等. 海南岛东北部红树林湿地表层重金属富集研究[J]. 生态环境, 2014, 30(1): 318-321, 328.
- [4] 张起源, 秦颖君, 刘香华, 等. 广东红树林沉积物有毒金属分布及生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2020, 29(1): 183-191.
- [5] 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.
- [6] 罗松英, 梁绮霞, 邢雯淋, 等. 湛江湾红树林湿地土壤重金属含量分析及污染评价[J]. 分析测试学报, 2020, 39(3): 308-314.
- [7] 谭趣孜, 巫冷蝉, 李 斌. 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]. 安徽农业科学, 2020, 48(12): 70-73, 82.
- [8] 耿俊杰, 黄亮亮, 吴志强, 等. 茅尾海红树林湿地植物对重金属的累积特征[J]. 桂林理工大学学报, 2015, 35(1): 138-141.
- [9] 秦延文, 张 雷, 郑丙辉, 等. 太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征[J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4291-4299.
- [10] 罗松英, 邢雯淋, 梁绮霞, 等. 湛江湾红树林湿地表层沉积物重金属形态特征、生态风险评价及来源分析[J]. 生态环境学报, 2019, 28(2): 348-358.
- [11] 段晓勇, 印 萍, 刘金庆, 等. 滦河口表层沉积物中重金属和多环芳烃的分布、来源及风险评估[J]. 中国环境科学, 2016, 36(4): 1198-1206.
- [12] 王玉军, 吴同亮, 周东美, 等. 农田土壤重金属污染评价研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12): 2365-2378.
- [13] 李 杰, 朱立新, 康志强. 南宁市郊周边农田土壤-农作物系统重金属元素迁移特征及其影响因素[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 43-52.
- [14] 徐玉霞, 汪庆华, 彭国凯, 等. 煤矿周边土壤重金属影响评价及来源分析[J]. 环境监测管理与技术, 2018, 30(3): 32-36, 45.
- [15] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 94-379.
- [16] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [17] 丁喜桂, 叶思源, 高宗军. 近海沉积物重金属污染评价方法[J]. 海洋地质动态, 2005, 21(8): 31-36.
- [18] 吴 振, 王松涛, 刘金庆, 等. 日照市海岸带土壤和海底沉积物重金属分布与环境质量评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(1): 59-68.
- [19] 陈碧珊, 苏文华, 罗松英, 等. 湛江特呈岛红树林湿地土壤重金属含量特征及污染评价[J]. 生态环境学报, 2017, 26(1): 159-165.
- [20] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.
- [21] 甘华阳, 林进清, 梁 开, 等. 雷州半岛滨海湿地表层沉积物中重金属含量分布与生态风险评价[J]. 热带海洋学报, 2014, 33(3): 79-87.
- [22] 师荣光, 张又文, 许萌萌, 等. 天津市郊区土壤重金属的污染评价与来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 1069-1078.
- [23] 杨 安, 邢文聪, 王小霞, 等. 西藏中部河流、湖泊表层沉积物及其周边土壤重金属来源解析及风险评价[J]. 中国环境科学, 2020, 40(10): 4557-4567.
- [24] 黄顺生, 华 明, 金 洋, 等. 南京郊区某菜地土壤镉污染水平及其来源调查[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 129-132.
- [25] 韩志轩, 王学求, 迟清华, 等. 珠江三角洲冲积平原土壤重金属元素含量和来源解析[J]. 中国环境科学, 2018, 38(9): 3455-3463.