

海南东寨港表层沉积物重金属 分布特征及污染评价

邢孔敏¹, 陈石泉^{1*}, 蔡泽富¹, 向芸芸², 陈晓慧¹, 王海先¹, 王道儒¹

(1. 海南省海洋与渔业科学院, 海南 海口 570125; 2. 国家海洋局 第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要: 表层沉积物重金属分布、污染源及潜在风险研究可为区域内重金属浓度变化及环境污染研究提供基础数据, 为区域内渔业生产、海洋环境保护、典型生态系统的可持续发展提供科学数据及理论研究。通过对海南省东寨港内表层沉积物重金属的含量分布、同源相关性分析及生态危害程度分析与评价, 结果表明: 东寨港表层沉积物铜(Cu), 铅(Pb), 锌(Zn), 镉(Cd), 铬(Cr), 汞(Hg)及砷(As)高值主要位于航道、口门及东潮沟; 重金属Cu, Zn, Hg及As相互呈极显著相关, 具相同污染源, 主要受渔船与养殖影响; Pb, Cd与Cr相关性不显著, 同源性有待考察。区域内重金属潜在生态危害以中等生态危害为主, 其次为轻微生态危害, 未出现强生态危害或很强生态危害, 多种重金属的潜在生态危害指数(RI)较高的站位大致位于东寨港口门附近及东潮沟, 潜在生态风险: Cd>Hg>Cu>As>Pb>Cr>Zn。

关键词: 东寨港; 相关性; 重金属; 沉积物; 生态危害评价

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2018)03-0478-11

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2018.03.014

东寨港位于海南岛东北部(110°32′~110°37′E, 19°51′~20°01′N), 处于三江、演丰、演海和文昌铺前、罗豆等地交界处。东寨港有演州河、三江河、演丰东河及演丰西河等淡水河流汇入, 每年约7亿m³水量注入大海。海岸线曲折多弯总长约84 km, 海湾开阔, 形状似漏斗, 滩面缓平, 微呈阶梯状, 许多曲折迂回的潮水沟分布其间, 其水位较浅, 面积约5 240 hm²。近年来, 随着人们红树保护意识的不断加强, 东寨港国家级红树林保护区的红树林研究备受关注, 不少研究者对其红树种类组成^[1]、群落结构^[2]、栖息生物^[3-4]、地质地貌^[5]、潮汐汉道^[6]、有机质元素^[7]、生物体质量^[8]及其生态功能评估与退化方面^[9-10]进行了大量研究。

海洋沉积物重金属含量变化可反映一片海域的环境质量^[11], 其污染具长时间残留且易于沿食物链转移与富集, 给海洋生态环境带来严重影响, 同时对水生生物和人体健康有着极大的危害^[12]。海洋沉积物重金属的含量、分布及存在形态已成为海洋环境评价的一个重要指标^[13]。目前, 海南岛周边海域重金属污染也在逐步受到重视及研究^[14-15]。

东寨港潟湖内表层沉积物重金属污染评价研究较少, 目前研究主要集中在东寨港潟湖周边红树林分布区域, 有科研工作者对演西村至三江镇一带红树林分布区沉积物中Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Hg, As七种重金属的含量分布及污染进行了评价, 认为东寨港红树林湿地重金属含量在我国南方及世界各地的典型红树林湿

收稿日期: 2017-04-25

资助项目: 国家重点研发计划项目——海草床退化机理研究及生态恢复技术研发与示范(2017YFC0506104); 国家自然科学基金青年科学基金项目——土地资源约束下海岛系统的适应性管理研究(41506140); 国家自然科学基金地区科学基金项目——海洋自然保护区旅游生态补偿: 适应性、运作机理与实现路径研究(41661111); 海南自然科学基金面上项目——海南岛周边养殖活动对珊瑚海草资源的影响研究(20163092)和海南周边围填海生态系统服务功能损害与补偿研究(318MS119)

作者简介: 邢孔敏(1989-), 男, 海南乐东人, 助理工程师, 主要从事海洋生物生态与环境调查方面研究。E-mail: 308700651@qq.com

*** 通讯作者:** 陈石泉(1985-), 男, 湖南郴州人, 高级工程师, 硕士, 主要从事海洋生物生态与环境调查方面研究。

E-mail: breezysmile.c.s.q@163.com

(陈 靖 编辑)

地处于中等偏低水平,光滩、林缘、林内表层沉积物中重金属含量存在一定差异,且表现出较强的同源性^[16]。目前,整个潟湖表层沉积物环境及重金属污染评价的报道较少。

对整个东寨港内潟湖表层沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg 和 As 七种重金属的含量进行了采样测定,对其分布特征进行了初步探讨,并分析其生态危害程度,旨在为东寨港表层沉积物重金属浓度变化及环境污染研究提供基础数据,为东寨港的渔业生产、海洋环境保护、典型潟湖生态系统的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样站位

2016-08,对东寨港表层沉积物布设 12 个沉积物取样站位,涵盖整个东寨港潟湖及口门区域(图 1)。研究区域内东寨港红树林自然保护区为国家级自然保护区,港内潮水沟迂回曲折,海湾多泥,滩涂上生长着真红树及半红树种类约 15 科 33 种,常见种类为白骨壤 *Aricennia marina*、桐花树 *Aegiceras corniculatum*、木榄 *Bruguiera gymnorhiza*、秋茄 *Kandelia candel*、角果木 *Ceriops tagal*、海莲 *Bruguiera sexangula*、海漆 *Excoecaria agallocha*、榄李 *Lumnitzera racemosa* 与红海榄 *Rhizophora stylosa* 等,保护区内有 118 种鸟类,以涉禽和游禽为主^[17];此外,潟湖内还有 3 种海草资源:贝克喜盐草 *Halophila beccarii*、喜盐草 *Halophila ovalis* 及小喜盐草 *Halophila minor*。

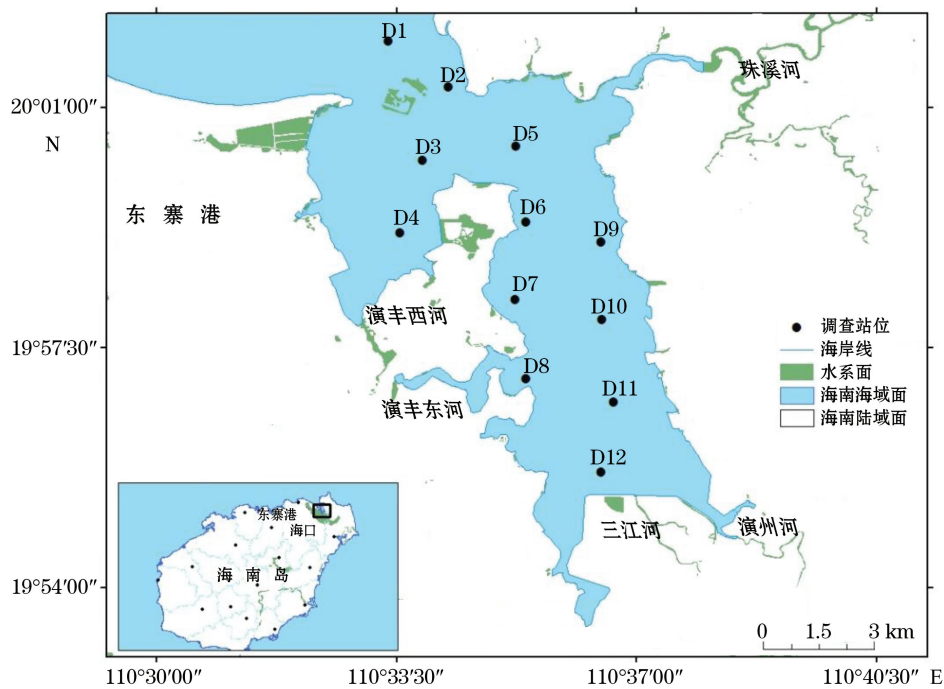


图 1 沉积物采样站位

Fig.1 Sampling locations for investigating heavy metals in the surface sediments

1.2 样品分析

Cu、Pb、Zn 和 Cd 样品采集、保存、制备和前处理均按照中华人民共和国国家标准《海洋监测规范》^[18](GB 17378.5—2007)进行。采用火焰原子吸收分光光度法测定 Cu、Pb、Zn 的质量分数:

铜单元素标准溶液 GBW(E)080122,线性回归拟合标准(工作)曲线方程: $A=a+bx$ ($a=0.015\ 725$, $b=$

0.000 002 5, $r=0.999\ 1$);

铅单元素标准溶液 GBW(E)080129, 线性回归拟合标准(工作)曲线方程: $A=a+bx$ ($a=0.279\ 0$, $b=0.000\ 79$, $r=0.996\ 3$);

锌单元素标准溶液 GBW(E)080549, 线性回归拟合标准(工作)曲线方程: $A=a+bx$ ($a=0.110\ 0$, $b=0.005\ 3$, $r=0.999\ 0$)。

采用无火焰原子吸收分光光度法测定 Cd 质量分数, 测定仪器为原子吸收分光光度仪(日立 Z-2000 型); 委托国家海洋局海口海洋环境监测中心站测定 Cr, Hg, As 质量分数, 测定仪器为 AFS-933 原子荧光光度仪。

Cr 单元素标准溶液 GBW(E)080257, 线性回归拟合标准(工作)曲线方程: $A=bx+a$ ($a=-0.008\ 8$, $b=15.587\ 0$, $r=0.998\ 8$);

Cd 单元素标准溶液 GBW(E)080119, 线性回归拟合标准(工作)曲线方程: $A=a+bx$ ($a=0.043\ 5$, $b=0.008\ 52$, $r=0.997\ 7$);

Hg 单元素标准溶液 GBW(E)080124, 线性回归拟合标准(工作)曲线方程: $A=a+bx$ ($a=14.669\ 5$, $b=537.441\ 4$, $r=0.998\ 8$);

As 单元素标准溶液 GBW(E)080117, 线性回归拟合标准(工作)曲线方程: $A=a+bx$ ($a=10.252\ 9$, $b=126.512\ 4$, $r=0.999\ 9$)。

1.3 评价方法

沉积物潜在生态危害程度采用 1980 年瑞典科学家 Lars Hakanson 提出的潜在生态危害指数法进行评价(表 1)^[19], 该法目前已被广泛应用于近海海洋沉积物重金属污染评价^[20-21]; 研究区域为海南岛东寨港潟湖, 该潟湖处于南海近海海域且濒临琼州海峡。因此, 其重金属丰度标准采用琼州海峡近海沉积物重金属元素丰度为标准^[22](表 2)。

表 1 潜在生态危害指数法
Table 1 Index for potential ecological harm

评价指标	公 式	备 注
单一重金属污染系数(Single heavy metals' pollution coefficient) C_f^i	$C_f^i = \frac{C^i}{C_n^i}$	C^i 为重金属浓度实测值(Measured values of heavy metals' concentrations); C_n^i 为重金属丰度标准(Abundance standard of heavy metals)
单一重金属潜在生态危害系数(Single heavy metals' potential ecological harm coefficient) E_k	$E_k = T_r^i \cdot C_f^i$	T_r^i 重金属元素 i 的毒性系数(Toxic coefficient of heavy metal element i);
多种重金属的潜在生态危害指数(Various heavy metals' potential ecological harm coefficient) RI	$RI = \sum_{i=1}^m E_k = \sum_{i=1}^m T_r^i \cdot \frac{C^i}{C_n^i}$	

注:空白表示无数据

表 2 重金属的参照值和毒性系数

Table 2 Reference values and toxicity coefficients of heavy metals

项 目	重金属种类						
	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Hg	As
参照值 $E_k/\times 10^{-6}$	10.60	25.36	54.55	50.05	0.051	0.023	10.09
毒性系数 E_k	5.00	5.00	1.00	2.00	30.00	40.00	10.00

2 结果与分析

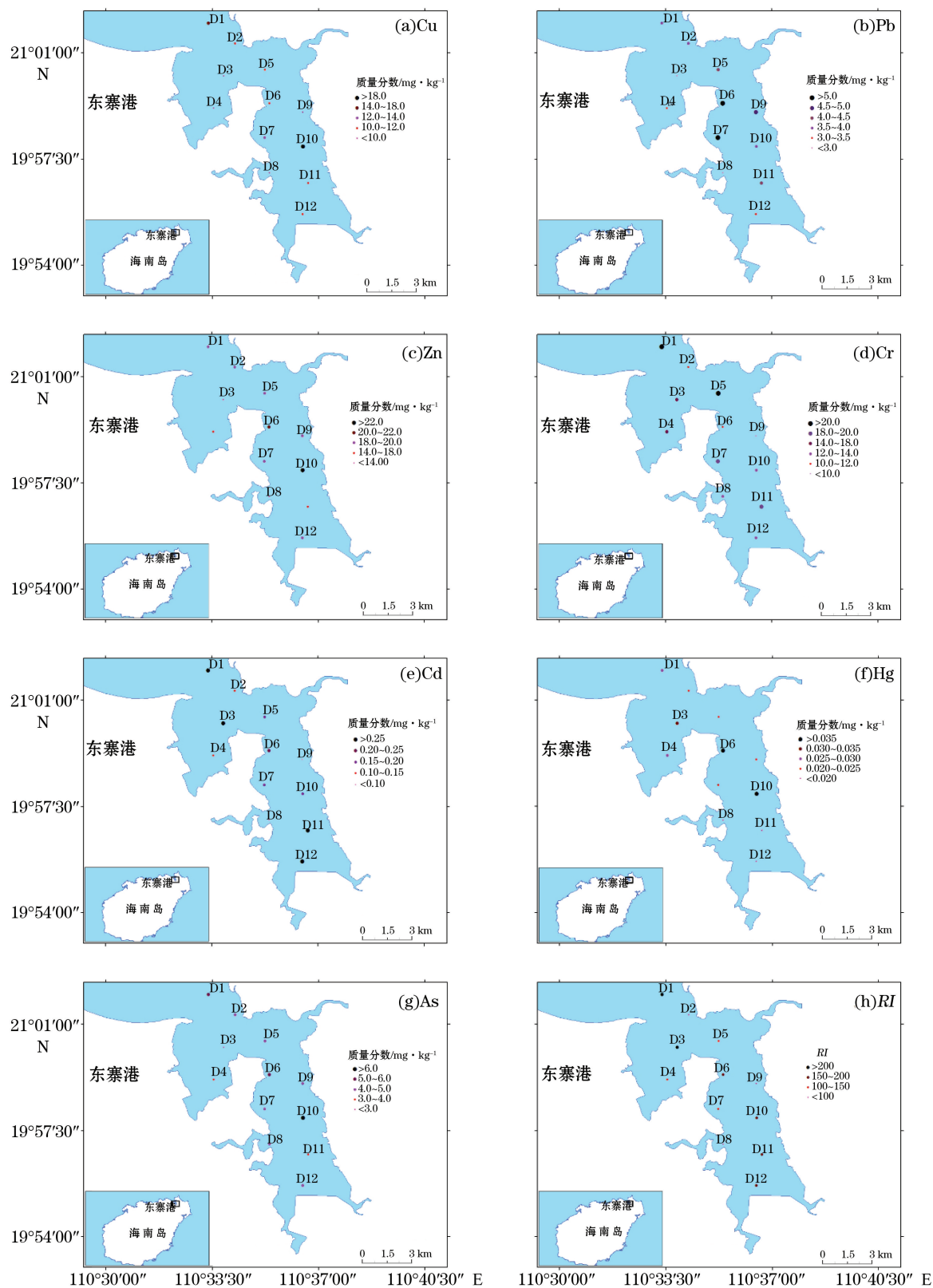
2.1 东寨港表层沉积物各重金属分布

东寨港表层沉积物重金属 Cu 质量分数为(8.85~39.72)mg/kg,均值 13.34 mg/kg,最低在 D8,8.85 mg/kg,最高在 D10,39.72 mg/kg;Pb 质量分数为(2.64~5.25)mg/kg,均值 3.93 mg/kg,最低在 D8,2.64 mg/kg,最高在 D6,5.25 mg/kg;Zn 质量分数为(12.68~52.45)mg/kg,均值 20.61 mg/kg,最低在 D8,12.68 mg/kg,最高在 D10,52.45 mg/kg;Cr 质量分数为(8.30~23.60)mg/kg,均值 15.26 mg/kg,最低在 D9,8.30 mg/kg,最高在 D1,23.60 mg/kg;Cd 质量分数为(0.06~0.32)mg/kg,均值 0.20 mg/kg,最低在 D8,0.06 mg/kg,最高在 D1、D3 与 D12,均约 0.32 mg/kg;Hg 质量分数为(0.019~0.049)mg/kg,均值 0.030 mg/kg,最低在 D8 与 D11,0.019 mg/kg,最高在 D10,0.049 mg/kg;As 质量分数为(2.70~13.58)mg/kg,均值 5.72 mg/kg,最低在 D3,2.70 mg/kg,最高在 D10,13.58 mg/kg(表 3)。通过对重金属 Cu,Pb,Zn,Cd,Cr,Hg 及 As 高值散点分布图可见,东寨港表层沉积物各重金属高值主要位于航道、口门及东潮沟(图 2)。

表 3 表层沉积物中重金属质量分数($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 3 Contents of heavy metals in the surface sediments from the Dongzhai Harbor($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

站 位	沉积物重金属质量分数/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$						
	Cu	Zn	Cd	Cr	Pb	Hg	As
D1	14.32	19.74	0.32	23.6	3.80	0.025	5.65
D2	10.81	19.01	0.11	11.5	3.90	0.023	4.85
D3	8.88	13.68	0.32	17.3	2.69	0.034	2.70
D4	9.48	16.13	0.12	14.2	3.33	0.027	3.99
D5	11.94	18.31	0.19	22.2	4.06	0.024	4.81
D6	11.89	20.62	0.23	12.0	5.25	0.038	5.27
D7	12.54	19.16	0.19	18.1	5.11	0.022	4.57
D8	8.85	12.68	0.06	12.4	2.64	0.019	4.20
D9	9.68	18.89	0.10	8.3	4.73	0.022	4.88
D10	39.72	52.45	0.19	12.1	3.85	0.049	13.58
D11	10.78	17.86	0.28	19.3	4.33	0.019	3.90
D12	11.21	18.74	0.32	12.1	3.42	0.020	4.81
平均值	13.34	20.61	0.20	15.26	3.93	0.030	5.72

图2 表层沉积物重金属质量分数及 RI 散点分布图Fig.2 Scatter distribution of RI , and contents of surface sediments' heavy metals

2.2 重金属来源分析

已有研究表明,具高度显著相关关系的多种重金属之间,一定程度上存在相似的含量分布规律,具有同源性^[23]。

采用软件 SPSS 19.0 对东寨港表层沉积物中重金属 Cu,Pb,Zn,Cd,Cr,Cd,Hg 及 As 等含量进行统计及相关性分析(表 4);采用软件 Arc GIS 7.3,获取重金属含量不同监测站位的区域散点分布特征(图 2)。相关性分析显示,Cu 与 Zn 呈极正显著相关($r=0.989,P<0.01$)、与 Hg 呈极正显著相关($r=0.751$)、与 As 呈极正显著相关($r=0.980$);Zn 与 Hg 呈极正显著相关($r=0.754$)、与 As 呈极正显著相关($r=0.983$);Hg 与 As 呈极正显著相关($r=0.717$)。重金属散点分布图显示,研究区域内表层沉积物重金属含量的空间分布为: Cd 与 Cr 在潟湖口门以及潟湖东潮沟分布稍高,高值区偏向港口入海口附近(图 2d ~图 2e),据现场调查,该区域目前在建造海洋工程铺前大桥,该区域重金属含量是否受其影响还有待考察;Pb,Zn,Hg 及 As 含量高值区集中分布在潟湖东潮沟(图 2b~图 2c,图 2f~图 2g),该区域主要为潟湖航道区以及养殖区,Cu 含量在潟湖分布比较匀称,高值区位于口门及潟湖东潮沟(图 2a)。可见,Cu,Zn,Hg 及 As 具有相同污染源,主要受到渔船及养殖影响,Pb,Cd 与 Cr 相关性不显著,同源性有待考察。

表 4 7 种表层沉积物重金属含量相关性分析

Table 4 Correlation analysis of contents of seven heavy metals in surface sediments

因 子	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Hg	As
Cu	1						
Pb	0.071	1					
Zn	0.989 **	0.163	1				
Cr	0.043	-0.017	0.012	1			
Cd	-0.098	-0.030	-0.189	0.524	1		
Hg	0.751 **	0.057	0.754 **	0.138	-0.168	1	
As	0.980 **	0.124	0.983 **	-0.061	-0.202	0.717 **	1

注: P 值是按某水准拒绝假设检验的可能性, ** 表示 $P<0.01$, 极显著相关; * 表示 $P<0.05$, 显著相关

2.3 重金属潜在生态危害评价

沉积物中金属污染的潜在生态危害评价采用 Lars Hakanson 提出重金属污染潜在生态危害指数法^[18]。研究区域处于南海北部濒临琼州海峡,故沉积物重金属丰度标准采用琼州海峡近海沉积物重金属元素丰度。

根据潜在生态危害指数分析,研究区域重金属污染程度以中等生态危害为主($150<RI<300$,占总站位 66.67%),其次为轻微生态危害($RI<150$,占总站位 33.33%)。区域内未出现强生态危害或很强生态危害(表 5 及表 6)。RI 较高的站位位于东寨港口门附近,这是否受到铺前大桥施工影响,目前还有待考察,此外东寨港潟湖内东潮沟重金属含量明显高于其他区域(图 2h)。

潜在生态危害系数(E_R^i)(表 5 及表 7),研究区域 Cu,Pb,Zn,Cr 及 As 等均处在生态轻微危害($E_R^i<40$):Cu, $4.17<E_R^i<18.74$,均值 6.29;Pb, $0.52<E_R^i<1.04$,均值 0.77;Zn, $0.23<E_R^i<0.96$,均值 0.38;Cr, $0.33<E_R^i<0.97$,均值 0.61;As, $2.68<E_R^i<13.46$,平均值 5.22;研究区域 Hg, $33.04<E_R^i<85.22$,均值 46.67,以中等生态危害($40<E_R^i<80$,占总站位 50.00%)为主,其次为生态轻微危害($E_R^i<40$,占总站位 41.67%),然后强生态危害($80<E_R^i<160$,占总站位 8.33%);Cd, $35.29<E_R^i<188.24$,均值 119.12,研究区域以强生态危害($80<E_R^i<160$,占总站位 33.33%)及很强生态危害($160<E_R^i<320$,占总站位 33.33%)为主,其次为中等生态危害($40<E_R^i<80$,占总站位 25.00%),再次生态轻微危害($E_R^i<40$,占总站位

8.33%);根据 E_k^i 均值大小研究重金属的潜在生态风险大小依次为 $Cd>Hg>Cu>As>Pb>Cr>Zn$ 。

表 5 表层沉积物中重金属的潜在生态危害系数(E_k^i)与潜在危害指数(RI)

Table 5 E_k^i and RI of heavy metals in the surface sediments

站 位	E_k^i							RI
	Cu	Zn	Cd	Cr	Pb	Hg	As	
D1	6.75	0.36	188.24	0.94	0.75	43.48	5.60	246.12
D2	5.10	0.35	64.71	0.46	0.77	40.00	4.81	116.19
D3	4.19	0.25	188.24	0.69	0.53	59.13	2.68	255.70
D4	4.47	0.30	70.59	0.57	0.66	46.96	3.95	127.49
D5	5.63	0.34	111.76	0.89	0.80	41.74	4.77	165.93
D6	5.61	0.38	135.29	0.48	1.04	66.09	5.22	214.11
D7	5.92	0.35	111.76	0.72	1.01	38.26	4.53	162.55
D8	4.17	0.23	35.29	0.50	0.52	33.04	4.16	77.92
D9	4.57	0.35	58.82	0.33	0.93	38.26	4.84	108.10
D10	18.74	0.96	111.76	0.48	0.76	85.22	13.46	231.38
D11	5.08	0.33	164.71	0.77	0.85	33.04	3.87	208.65
D12	5.29	0.34	188.24	0.48	0.67	34.78	4.77	234.57
平均值	6.29	0.38	119.12	0.61	0.77	46.67	5.22	179.06

表 6 表层沉积物中重金属的潜在危害指数(RI)

Table 6 RI of heavy metals in the surface sediments

项 目	RI			
	轻微生态危害 ($RI<150$)	中等生态危害 ($150\leq RI<300$)	强生态危害 ($300\leq RI<600$)	很强生态危害 (≥ 600)
站位	D2, D4, D8, D9	D1, D3, D5, D6, D7, D10, D11, D12	/	/
百分比/%	33.33	66.67	/	/

注:“/”表示未测出

表 7 表层沉积物中重金属的潜在生态危害系数(E_k^i)

Table 7 of heavy metals in the surface sediments

重金属	E_k^i			
	轻微生态危害 ($E_k^i<40$)	中等生态危害 ($40\leq E_k^i<80$)	强生态危害 ($80\leq E_k^i<160$)	很强生态危害 ($160\leq E_k^i<320$)
Cu	D1~D14 (100%)	/	/	/
Pb	D1~H14 (100%)	/	/	/
Zn	D1~D14 (100%)	/	/	/
Cr	D1~D14 (100%)	/	/	/
Cd	D8 (8.33%)	D2, D4, D9(25.00%)	D5, D6, D7, D10(33.33%)	D1, D2, D11, D12(33.33%)
Hg	D7, D8, D9, D11, D12(41.67%)	D1, D2, D3, D4, D5, D6(50.00%)	D10(8.33%)	/
As	D1~D14 (100%)	/	/	/

注:“/”表示未测出

3 讨 论

3.1 东寨港表层沉积物中重金属含量特征

东寨港潟湖体系由演州河、三江河、演丰东河、演丰西河汇集后流入大海,港内潮沟区流速较大,具驻波特征,呈明显时间与速度不对称,且东潮沟具涨潮优势,西潮沟具落潮优势,整个港湾水体呈顺时针循环,白滩与林地周期性淹没,白滩流速较潮沟略小^[6]。汇入东寨港潟湖的4条淡水河(演州河、三江河、演丰东河及演丰西河)虽然目前年径流量未调查到,然而其每年有7亿 m^3 的淡水量注入记录,通过图2中不同重金属的散点分布图及结合4条淡水河分布位置,可知4条河分布沿岸重金属含量(除Cd在三江河附近较高外)均较潟湖中心低。

可见,东寨港潟湖重金属分布与潮汐动力有关,潟湖表层沉积物重金属主要通过潮汐运动经港门搬运出海,从而导致口门沉积物重金属累积,含量高于港内,且潟湖东潮沟高于西潮沟。

3.2 东寨港表层沉积物中的重金属污染源分析

由文献可知,海洋沿岸分布的港口、码头以及船舶修造厂是海洋表层沉积物重金属污染源之一^[24],Hg,Cd及As主要来自沿岸人类活动^[25],Cd,Cr,Cu,Pb和Zn主要来自陆源输入,As主要通过海洋环境进入海洋沉积物中^[26],Cd主要来自工业污染^[27],Cu和Cr主要来自沿岸虾塘养殖^[28]。东寨港表层沉积物中重金属Cu,Cr及Cd在潟湖口门及东潮沟分布稍高,经调研,口门处主要为海洋工程(铺前大桥施工,跨海大桥长约3.80 km,两岸接线长约1.90 km)、渔排养殖(60余宗)、插桩养殖(186宗)以及虾塘(600口以上)排污,可见,Cu,Cr及Cd主要受海洋工程及养殖影响;Pb,Zn,Hg及As含量高值区主要位于潟湖东潮沟,该处主要受到潟湖航道(325艘渔船)以及牡蛎插桩养殖(143宗),船坞污染与养殖污染影响,这与本研究Cu,Pb,Zn,Cd,Cr,Hg及As之间相关性分析结论相符。

前人已有研究,海草床及其栖息生物对表层沉积物重金属Cu,Pb,Cd,Zn具有很强的富集作用,一般分布于海草床水体和表层沉积物中Cu,Pb,Cd和Zn含量比较低^[29]。东寨港内西潮沟内分布大面积喜盐草、贝克喜盐草及小喜盐草(海草平均盖度40.25%,平均密度2 000 ind./ m^2 ,平均生物量16.30 g/ m^2),三江河岸及东潮沟最里端红树林边缘分布盖度较高的贝克喜盐草(海草平均盖度51.67%,平均密度22 140 ind./ m^2 ,平均生物量61.18 g/ m^2),这是这些区域重金属含量偏低原因之一;此外,东寨港周边还分布丰富的红树林资源(红树及伴生种类33种),对沉积环境中重金属具有一定的富集及吸附作用,从而导致红树分布周边区域重金属含量偏低,这与本次调查潟湖沉积物重金属含量空间分布大致相同。

可见,东寨港表层沉积物中重金属Cu,Zn,Hg及As具有相同污染源,主要受到渔船污染及养殖污水影响,Pb,Cd与Cr相关性不显著,同源性有待考察。

3.3 东寨港表层沉积物中的重金属潜在生态风险分析

目前东寨港潜在生态危害以中等生态危害为主,其次为轻微生态危害,区域内还未出现强生态危害或很强生态危害,RI较高的站位基本位于东寨港口门附近,潜在生态风险大小依次为Cd>Hg>Cu>As>Pb>Cr>Zn。单一金属潜在生态危害系数表明,Cu,Pb,Zn,Cr以及As等均为轻微生态危害,Cd以强生态危害与很强生态危害为主,中等生态危害与生态轻微危害紧随其后;Hg以中等生态危害为主,生态轻微危害与强生态危害紧随其后。

东寨港目前潜在生态危害程度在很大程度上与潮汐河道有关,东寨港有一口门通道与外海相通,水体相互交换,对口门附近码头、渔排产生的重金属污染具有一定的扩散作用,同时潮汐变化及涨落潮水流大小对潟湖中重金属含量沉降系数具有一定影响,导致口门及潟湖中潮沟重金属含量稍高;东寨港沿岸周边分布丰

富的红树林及海草床,红树、海草及其附着生物对沉积物重金属具有较好的富集与吸附作用,这与东寨港内潟湖周边及里面红树林及海草分布区域重金属含量稍低事实相符。

4 结 论

通过对海南东寨港表层沉积物重金属质量分数分布、重金属相关性系数以及其潜在生态危害风险系数等数据分析,探讨了东寨港表层沉积物重金属质量分数在潟湖中分布特征、不同重金属污染源以及单一种或多种重金属在潟湖中潜在生态风险状况等,具体结论如下:

1) 东寨港潟湖表层沉积物重金属主要通过潮汐运动经港门搬运出海,导致口门沉积物累积重金属比港内沉积物种重金属含量高,且潟湖东潮沟高于西潮沟。

2) 东寨港表层沉积物中重金属 Cu, Zn, Hg 及 As 具有相同污染源,主要受到渔船污染及养殖污水影响; Pb、Cd 与 Cr 相关性不显著,同源性有待考察。

3) 东寨港潜在生态危害以中等生态危害为主,其次为轻微生态危害,区域内还未出现强生态危害或很强生态危害, RI 较高的站位基本位于东寨港口门附近,潜在生态风险大小依次为: Cd > Hg > Cu > As > Pb > Cr > Zn; 单一金属潜在生态危害系数表明, Cu, Pb, Zn, Cr 和 As 等均为轻微生态危害, Cd 以强生态危害与很强生态危害为主,其次是中等生态危害与生态轻微危害; Hg 以中等生态危害为主,其次是生态轻微危害与强生态危害。

参考文献(References):

- [1] LIAO B W, LI M, ZHENG S F, et al. Niches of several mangrove species in Dongzhai Harbor of Hainan Island[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(3): 403-407. 廖宝文, 李玫, 郑松发, 等. 海南岛东寨港几种红树植物种间生态位研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 403-407.
- [2] WANG X, MA Z Y, YANG H, et al. Structural features of artificial sonneratia apetala—*S. caseolaris* community at Dongzhai Harbor, Hainan Island[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2008, 29(3): 374-379. 王旭, 马宗耀, 杨怀, 等. 海南东寨港无瓣海桑—海桑人工红树群落结构特征[J]. 热带作物学报, 2008, 29(3): 374-379.
- [3] ZOU F S, SONG X J, CHEN W, et al. The diversity of benthic macrofauna on mud flat in Dongzhai harbor Mangrove Rserve, Hainan [J]. Chinese Biodiversity, 1999, 7(3): 175-180. 邹发生, 宋晓军, 陈伟, 等. 海南东寨港红树林滩涂大型底栖动物多样性的初步研究[J]. 生物多样性, 1999, 7(3): 175-180.
- [4] LIU J L, HUANG B, LIANG Z W. Study on abundance and biomass of benthic meiofauna in mangrove of Dongzhai Bay[J]. Haiyang Xuebao, 2013, 35(2): 187-192. 刘均玲, 黄勃, 梁志伟. 东寨港红树林小型底栖动物的密度和生物量研究[J]. 海洋学报, 2013, 35(2): 187-192.
- [5] BI F Z, HAN M K, ZHAO S S, et al. Characteristics of lift off the coast and Sea moon sediments of Luo Dou farm in Dongzhai Bay, Hainan Island, China[J]. Marine Science Bulletin, 1988, 7(3): 35-40. 毕福志, 韩慕康, 赵叔松, 等. 海南岛东寨港罗豆农场的海月沉积层及其海岸升降特征[J]. 海洋通报, 1988, 7(3): 35-40.
- [6] NI H X, ZHANG Q M, ZHAO H T. A study on the tidal hydrodynamics of the mangrove harbor in Dongzhai Harbor, Hainan Island[J]. Tropical Oceanography, 1996, 15(4): 17-25. 倪海洋, 张乔民, 赵焕庭. 海南东寨港红树林港湾潮汐动力研究[J]. 热带海洋, 1996, 15(4): 17-25.
- [7] WANG H P, JI Y N, FU X N, et al. Distribution and restriction factors of rare earth elements in the sediments from the mangrove in Dongzhai Harbor, Hainan Island[J]. Tropical Geography, 2017, 37(1): 82-90. 王鸿平, 季一诺, 伏箫诺, 等. 海南东寨港红树林沉积物中稀土元素分布特征及其制约因素[J]. 热带地理, 2017, 37(1): 82-90.
- [8] ZHANG L, LIU Y, DING Z H, et al. Mercury concentration and biological quality index of major fish species from Dongzhai Harbor mangrove forest area of Hainan[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(5): 1008-1012. 张玲, 刘洋, 丁振华, 等. 海南东寨港红树林区主要鱼类汞含量及生物质量指数[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 1008-1012.
- [9] XU D, LIAO B W, ZHU N H, et al. A primary analysis on mangroves degradation in Dongzhai Harbor of Hainan Island[J]. Ecological Science, 2014, 33(2): 294-300. 徐蒂, 廖宝文, 朱宁华, 等. 海南东寨港红树林退化原因初探[J]. 生态科学, 2014, 33(2): 294-300.

- [10] WANG R L, LIAO B W, GUAN W, et al. The correlation between mangrove community degradation characteristics and soil physical and chemical properties in Dongzhai Harbor[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(7): 1804-1808. 王荣丽, 廖宝文, 管伟, 等. 东寨港红树林群落退化特征与土壤理化性质的相关关系[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1804-1808.
- [11] ZHENG S H, YANG M F, XI Y Y, et al. Distribution of 5 heavy metals with relations to environmental factors in surface sediments of Dongshan Bay[J]. Journal of Applied Oceanography, 2014, 33(2): 251-257. 郑盛华, 杨妙峰, 席英玉, 等. 东山湾表层沉积物 5 种重金属元素含量分布及其与主要环境因子的关系[J]. 应用海洋学学报, 2014, 33(2): 251-257.
- [12] KAZEM D B, HOSSEIN B, VAHID K, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments along southeast coast of the Caspian Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 81: 262-267.
- [13] FARKAS A, ERRATICO C, VIGANO L. Assessment of the environmental significance of heavy metals pollution in surficial sediments of the River Po[J]. Chemosphere, 2007, 68(4): 761-768.
- [14] CHEN S Q, ZHANG G X, WU Z J, et al. The distribution characteristics and the pollution evaluation of the heavy metals in the surface sediments of Xincun Lagoon[J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 2014(4), 144-152. 陈石泉, 张光星, 吴钟解, 等. 新村港表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. 海洋湖沼通报, 2014(4): 144-152.
- [15] LI J, QI S H, WANG X Q, et al. Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments from Xiaohai Bay, Hainan, China[J]. Safety and Environmental Engineerin, 2008, 15(2): 18-22. 李杰, 祁士华, 王向琴, 等. 海南小海沉积物中的重金属分布特征及潜在生态风险评价[J]. 安全与环境工程, 2008, 15(2): 18-22.
- [16] JI Y N, ZHAO Z Z, WU D, et al. Distribution and bioavailability of seven heavy metals in mangrove wetland sediments in Dongzhai Harbor, Hainan Island, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(2): 593-600. 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.
- [17] CHANG H, BI X F, CHEN G Z, et al. Composition and avifauna of birds in Dongzhai Harbor national nature reserve, Hainan Island[J]. Ecologic Science, 1999, 18(2): 53-61. 常弘, 毕肖峰, 陈桂珠, 等. 海南岛东寨港国家级自然保护区鸟类组成和区系的研究[J]. 生态科学, 1999, 18(2): 53-61.
- [18] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. The specification for marine monitoring: Part 5 Sediment analysis: GB 17378—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 8-23. 国家质量监督检验检疫总局, 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—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 8-23.
- [19] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment to logical approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [20] XIA P, MENG X W, YIN P, et al. Heavy metal pollution and its potential ecological risk in the sediments from the Beihai intertidal zone of Guangxi Province[J]. Advances in Marine Science, 2008, 26(4): 471-477. 夏鹏, 孟宪伟, 印萍, 等. 广西北海潮间带沉积物中重金属的污染状况及其潜在生态危害[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(4): 471-477.
- [21] ZHANG L X, REN S, CAI J. Enrichment of heavy metals in the surface sediments from the three Regions of random dumping in East China Sea and assessment of their potential ecological risk[J]. Marine Science Bulletin, 2005, 24(2): 92-96. 张丽旭, 任松, 蔡健. 东海三个倾倒区表层沉积物重金属富集特征及其潜在生态风险评价[J]. 海洋通报, 2005, 24(2): 92-96.
- [22] MA R L, HE Y S, YANG Y, et al. Geochemical characteristics of surface sediments from the Qiongzhou Strait[J]. Marine Science Bulletin, 2012, 31(2): 131-135. 马荣林, 何玉生, 杨奕, 等. 琼州海峡表层沉积物元素地球化学特征[J]. 海洋通报, 2012, 31(2): 131-135.
- [23] ZHENG N, WANG Q C, ZHENG D M, et al. Study on Mercury, Zinc, Lead Contamination to sediments in rivers contaminated by different pollution sources[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(2): 155-158. 郑娜, 王起超, 郑冬梅, 等. 不同污染类型河流沉积物的汞、铅、锌污染特征研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 155-158.
- [24] ZHANG J B, LIU J F, ZHANG C X, et al. Distribution and pollution assessment on heavy metals in surface sediments of Zhanjiang Bay [J]. Marine Environmental Science, 2012, 31(5): 644-649. 张际标, 刘加飞, 张才学, 等. 湛江湾表层沉积物重金属分布及污染评价[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(5): 644-649.
- [25] LIU Q Y, HONG H S, HONG L Y. Distribution feature and sources of Cu, Pb, Zn and Cd in Xiamen western sea sediments[J]. Marine Science Bulletin, 1995, 14(6): 46-52. 刘琼玉, 洪华生, 红丽玉. 厦门西海域表层沉积物重金属的分布特征及来源探讨[J]. 海洋通报, 1995, 14(6): 46-52.
- [26] GUO X Y, HUANG C J. Distribution and source of heavy metal elements in sediments of Zhanjiang Harbor[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2006, 25(5): 91-97. 郭笑宇, 黄长江. 粤西湛江港海底沉积物重金属的分布特征与来源[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(5): 91-97.
- [27] TANG H L, WANG C, LI Y, et al. Spatial distribution of heavy metals in sediments of Liyun River[J]. Journal of Hohai University

- (Natural Sciences), 2006, 34(1): 18-21. 汤红亮, 王超, 李勇, 等. 里运河底泥重金属空间分布特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 18-21.
- [28] WEI X H, ZHANG M, YAO W Z. Heavy metal distribution and pollution characteristics in the sediments of aquaculture ponds[J]. Journal of Ningbo University (Natural Science and Engineering Edition), 2004, 17(4): 380-384. 韦肖杭, 张敏, 姚伟忠. 养殖池塘沉积物的重金属分布及污染特征[J]. 宁波大学学报(理工版), 2004, 17(4): 380-384.
- [29] XU Z Z, ZHU A J, CAI W X, et al. Enrichment of heavy metals in the seagrass bed of Liusha Bay[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7244-7250. 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.

Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Surface Sediment of Dongzhai Harbor, Hainan Province

XING Kong-min¹, CHEN Shi-quan¹, CAI Ze-fu¹, XIANG Yun-yun²,
CHEN Xiao-hui¹, WANG Hai-xian¹, WANG Dao-ru¹

(1. Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Haikou 570125, China;

2. The Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The study of distribution, pollutant source and potential risks of heavy metals in the surface sediment is the basis of further studying their concentration change and environmental pollution, and can provide data for regional fishery production, marine environmental protection and sustainable development of typical ecosystems. This study analyzed and evaluated the distributions, homologous correlations and ecological damage degrees of heavy metals in the surface sediments of Dongzhai Harbor, Hainan province. The results showed that the high values of heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Hg and As) were mainly located in the harbor channel, harbor entrance and eastern tidal creek. Some heavy metals (e.g., Cu, Zn, Hg and As) have a same pollutant source which is affected by fishing boats and cultivation. There is no significant correlation between Pb, Cd and Cr. Potential ecological risk of heavy metals in the region were dominated by medium ecological risk, and minor slight ecological risk, and there are no serious or very serious ecological risks in the region. Some stations with higher *RI* (Potential ecological harm coefficient of various heavy metals) were located in harbor entrance and eastern tidal creek, and the order of increasing potential ecological risks was as follows, Cd>Hg>Cu>As>Pb>Cr>Zn.

Key words: Dongzhai Harbor; correlation; heavy metals; sediments; ecological risk assessment

Received: April 25, 2017