

海南黎安港表层沉积物重金属分布特征及污染评价

陈石泉¹, 吴钟解¹, 蔡泽富¹, 向芸芸², 邢孔敏¹, 王道儒¹, 林国尧¹, 童玉和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: 通过对表层沉积物重金属含量测定, 探讨海南黎安港内表层沉积物重金属的分布特征、相关性及潜在生态危害程度。结果表明, 黎安港表层沉积物中的 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg 及 As 含量平均值分别为 42.23、17.15、76.58、36.24、0.33、0.040 及 9.26 mg/kg, 重金属含量高值主要位于潟湖中心养殖区域及潟湖北部虾塘养殖沿岸; Cu、Pb、Zn、Hg 及 As 具有相同污染源, 主要受养殖影响, Pb、As 与 Cd 还受陆源虾塘影响较大; 研究区以中等生态危害为主, 其次是强生态危害与轻微生态危害, 多种重金属的潜在生态危害指数(RI)高值位于潟湖中心, 重金属的潜在生态危害风险大小依次为: Cd>Hg>Cu>As>Pb>Cr>Zn。黎安港与新村港两潟湖重金属在含量分布、潜在生态风险危害存在一定的差异, 黎安港以中等生态危害为主, 很强生态危害单金属为 Cd。

关键词: 黎安港; 相关性; 重金属; 沉积物; 生态危害

中图分类号: S913 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2018)02-0124-10

DOI: 10.11759/hyxx20170730001

黎安港位于海南陵水黎族自治县东南部, 属热带海洋性季风气候, 年平均气温 25.40℃, 雨量充沛, 年降雨量在 1 500~2 500 mm, 只有一条潮汐汉道与外海相通, 是一个自然形成半封闭状态潟湖海港。黎安港内海草资源非常丰富, 据历年调查数据显示, 海草种类有海菖蒲 *Enhalus acoroides*、泰来草 *Thalassia hemprichii*、圆叶丝粉草 *Cymodocea rotundata*、针叶草 *Syringodium isoetifolium*、单脉二药草 *Halodule uninervis* 及卵叶喜盐草 *Halophila ovalis* 等 6 种, 面积约 1.42 km², 分布遍及整个潟湖, 口门往潟湖沿岸分布海菖蒲、泰来草及圆叶丝粉草, 成斑块状分布; 往里逐渐成片状分布, 潟湖中部沿岸主要是海菖蒲, 潟湖北部沿岸主要为卵叶喜盐草与圆叶丝粉草, 成片状分布, 海菖蒲与泰来草成斑块状分布^[1]。基于海草床对海洋生态环境的重要性以及新村港、黎安港海草资源的丰富性及保护完整性, 2007 年建立海南省陵水新村—黎安海草省级特别保护区。

海洋表层沉积物重金属是具潜在生态危害的重要污染物, 目前已成为海洋环境评价的一个重要指标而受到国内外科学界关注^[2-4]。海南岛周边港湾部分海域表层沉积环境及重金属污染已有监测和评价^[5-10]。近年来, 黎安港沿岸虾塘养殖迅猛发展, 港内渔排养殖、网箱养殖、麒麟菜养殖及珍珠贝养殖数量逐年增加以及潮汐通道的减小, 水体交换能力下降, 污染日趋严重^[11], 然而, 对于黎安港沉积物重

金属含量分布及污染评价方面的研究却少有报道。

本研究通过黎安港内沉积物重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg 和 As 的含量、分布特征及污染源进行分析, 并对其潜在生态危害程度进行评价, 旨在为黎安港重金属污染、渔业生产、海洋环境保护及典型潟湖生态系统的可持续发展提供基础数据及科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查样地

黎安港位于陵水黎族自治县的东南部, 是一个自然形成半封闭状态潟湖海港, 面积约 900 hm², 水

收稿日期: 2017-07-30; 修回日期: 2017-10-20

基金项目: 国家重点研发计划“典型脆弱生态修复与保护研究”重点专项(2017YFC0506104); 国家自然科学基金项目(41661111, 41506140); 海南省海洋渔业科学技术研究项目(204004); 公益性行业(农业)科研专项(201403008); 海南省应用技术研发与示范推广专项(ZDXM2015027, SQ2015KXSY0014)

[Foundation: The National Key Research and Development Program of China, No.2017YFC0506104; National Natural Science Foundation of China, No.41661111, No.41506140; Ocean and fishery science and technology research of Hainan.No.204004; Public welfare industry (agriculture) scientific research.No.201403008; Development and demonstration of application technology of Hainan.No.ZDXM2015027, No.SQ2015KXSY0014]

作者简介: 陈石泉(1985-), 男, 湖南郴州人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 热带典型生态系统研究, E-mail: breezysmile.c.s.q@163.com; 蔡泽富(1984-), 男, 通信作者, 海南定安人, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 热带典型生态系统研究, E-mail: caizefu@126.com

深 1.90~7.60 m, 口门两侧沙嘴发育拦阻通道, 导致潮汐通道不断淤浅, 潟湖日趋消亡状态。黎安港养殖活动主要分布于港内中部, 港内过往或停靠小船 100 余艘, 渔排养殖约 200 宗, 口门有小船 20 余艘, 渔排 22 宗, 养殖网箱 10~20 宗。2007 年海南省批准建立

陵水新村港与黎安港海草特别保护区, 其中黎安港的海草面积约 1.42 km², 种类主要有泰来草、海菖蒲、卵叶喜盐草、圆叶丝粉草等^[12]。2016 年 8 月, 在黎安港布设 14 个沉积物采样站位, 涵盖整个黎安港潟湖及口门区域(图 1)。

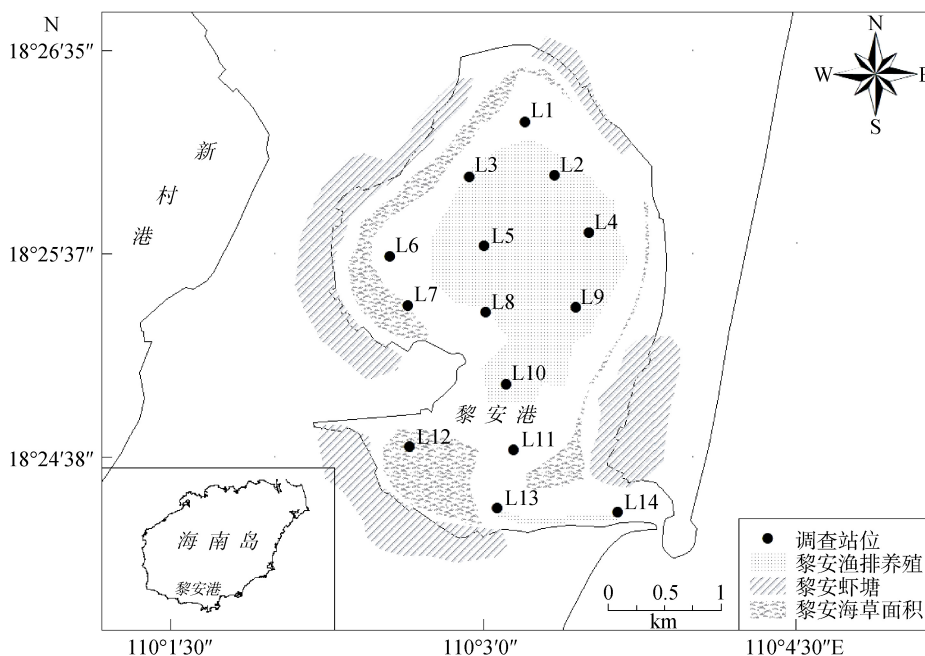


图 1 沉积物调查站位
Fig. 1 Sampling position of sediments

1.2 样品采集与分析

采用普力特 VG-mini 型采泥器将沉积物样品采集后(清除表层沉积物上海草、海藻及其栖息生物等)装入洁净聚乙烯自封袋用油性笔做好记录后带回实验室后烘干磨碎, 过 160 目尼龙筛, 称取约 0.10 g 左右干样放入微波消解仪(WX-4000 型)加入 7 mLHNO₃ 和 2 mL HF 消解液进行消解, 反应完全后定容至 25 mL 容量瓶中, 待测。

Cu、Pb、Zn 及 Cd 含量采用无火焰原子吸收分光光度法测定, 测定仪器为原子吸收分光光度仪(日立 Z-2000 型); Cr、Hg 及 As 含量测定仪器为 AFS-933 原子荧光光度仪。样品采集、保存、制备和前处理均符合中华人民共和国国家标准《海洋监测规范》^[13] 的要求。

黎安港潟湖表层沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Cd、Hg 及 As 等重金属含量数据统计与相关性分析采用软件 IBM SPSS Statistics 19.0 分析; 潟湖各重金属含量分布特征散点图采用软件 Arc GIS7.3

绘制。

1.3 评价方法

黎安港表层沉积物潜在生态危害采用瑞典科学家 Lars Hakanson(1980)提出的潜在生态危害指数法^[14], 目前该法已广泛应用于沉积物的重金属污染评价^[15-16]。本文研究区域为海南岛黎安港潟湖, 处于南海近海海域, 故重金属丰度标准采用南海近海沉积物重金属元素丰度为标准^[17-18](表 1)。

计算公式如下:

$$C_f^i = C^i / C_n^i \quad (1)$$

$$E_R^i = T_r^i \cdot C_f^i \quad (2)$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_R^i = \sum_{i=1}^m T_n^i \cdot C^i / C_n^i \quad (3)$$

RI 表示多种重金属的潜在生态危害指数, 当 RI<150, 处于轻微生态危害, 当 150 RI<300, 处于轻中等生态危害, 当 300 RI<600, 处于强生态危害, 当 RI ≥ 600, 处于很强生态危害; C_fⁱ 表示单一重金

属污染系数; E_R^i 表示单一重金属潜在生态危害系数, 当 $E_R^i < 40$, 处于轻微生态危害, 当 $40 < E_R^i < 80$, 处于中等生态危害, 当 $80 < E_R^i < 160$, 强生态危害, 当

$160 < E_R^i < 320$, 很强生态危害; C^i 为重金属浓度实测值; T_r^i 为重金属元素 i 的毒性系数, 主要反映重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感度。

表 1 重金属参照值 (C_n^i) 和毒性系数 (T_r^i)

Tab. 1 Reference values (C_n^i) and toxicity coefficients (T_r^i) of heavy metals

金属元素	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Hg	As
$C_n^i (\times 10^{-6})$	15.00	20.00	65.00	61.00	0.07	0.03	7.70
T_r^i	5.00	5.00	1.00	2.00	30.00	40.00	10.00

2 结果与讨论

2.1 黎安港表层沉积物重金属含量及分布特征

黎安港沉积物重金属 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg 及 As 含量范围分别为 17.90~71.11、7.27~33.33、35.92~128.26、28.50~43.00、0.08~0.70、0.02~0.07 及 3.35~17.23 mg/kg, 平均值分别为 42.23、17.15、76.58、36.24、0.33、0.040 及 9.26 mg/kg。黎安港表层沉积物中 Cu 的含量分布, 以潟湖中心渔排养殖区最高, 西部海草区次之, 南部海草区及潮汐汊道口含量最低; Pb 含量分布, 以潟湖北部水体交换较弱区最高, 中心渔排养殖区域次之, 西部海草区及南部口门区域含量较低; Zn 含量分布, 以潟湖中心渔排养殖区域最高, 北部含量次之, 西部海草区及南部口门含量均较低; Cr 含量分布, 以潟湖中部养殖区及北部区域较高, 西部海草区域及南部口门较低; Cd 含量分布, 以潟湖中心及北部较高, 西部及南部较低; Hg 含量分布, 以潟湖养殖区域最高, 北部含量次之, 西部海草区及南部口门最低; As 含量分布, 以潟湖北部最高, 中部养殖区域次之, 海草分布区及南部口门含量较低(图 2a~图 2h)。许多科研工作者对沉积物中重金属的污染源进行了研究, 他们认为多种重金属之间存在高度显著相关关系, 在一定程度上表明了这几种重金属含量分布规律具有相似性, 能够反映这些重金属的污染具有同源性^[19-21]。黎安港潟湖表层沉积物重金属相关性分析显示(表 2), Cu 与 Zn 成极正显著相关($r=0.706$), 与 Hg 成极正显著相关($r=0.648$); Pb 与 Hg 成极显著正相关($r=0.731$), 与 As 成极显著正相关($r=0.737$); 与 Zn 成显著正相关($r=0.587$); Zn 与 Hg 成极显著正相关($r=0.730$), 与 As 成显著正相关($r=0.599$); Cr 与 Cd 呈极显著负相关

($r=-0.840$), 与 As 成显著负相关($r=-0.535$); Hg 与 As 成极正显著相关($r=0.659$); Cu、Pb、Zn、Hg 及 As 高值主要位于潟湖中心(图 2a~图 2c, 图 2f~图 2g), 该区域是潟湖渔排养殖区, 投喂饵料带来的重金属以残饵和粪便形式沉积于湖底, 造成沉积物中重金属累积高于其他区域; 此外, Pb 与 As 高值还稍偏潟湖北部沿岸(图 2b), 该潟湖沿岸分布众多虾塘, 鱼虾养殖未经处理的废水带有重金属 Pb 及 As, 加上潟湖北部水体交换能力较弱, Pb 及 As 含量累积增高; Cd 高值主要位于潟湖中心养殖区域、北部水体交换较弱区域、西部及南部海草分布区域(图 2e), 该区域主要受到潟湖以及沿岸虾塘养殖带来的重金属影响, 同时也反映出海草对重金属 Cd 的吸附比其余重金属吸附能力稍弱; Cr 高值位于潟湖中心养殖区域、北部虾塘沿岸以及航道入海口, 这与养殖残饵和粪便带来重金属外, 还受到渔船行驶过程中溢出的油中重金属影响。此外, 本研究于 2016 年对新村港、黎安港、铁炉港、花场湾及东寨港等典型潟湖中养殖规模、品种、面积, 船只活动数以及沉积环境中重金属含量分布等进行相关性方面的研究, 数据显示 Hg 与养殖与渔船呈显著相关, Cu、Pb、As 与养殖呈显著相关, Cr、Cd 及 Zn 来源于其他污染。

综上所述, Cu、Pb、Zn、Hg 及 As 相互间相关性极显著, 具有相同污染源, 主要受渔排养殖影响。Pb、As 与 Cd 还受陆源虾塘影响较多, Cr 与其余重金属均呈负相关性, 其同源性亦或不同, 结合其散点分布图分析, 其来源可能主要受渔船影响。

经计算, 黎安潟湖以中等生态危害为主, 占总调查站位的 50%, 其次为强生态危害, 占总调查站位的 28.57%, 以及轻微生态危害, 占总调查站位的 21.43%(表 3 及表 4); RI 高值主要位于黎安港北部沿岸处或潟湖中心(图 2g)。

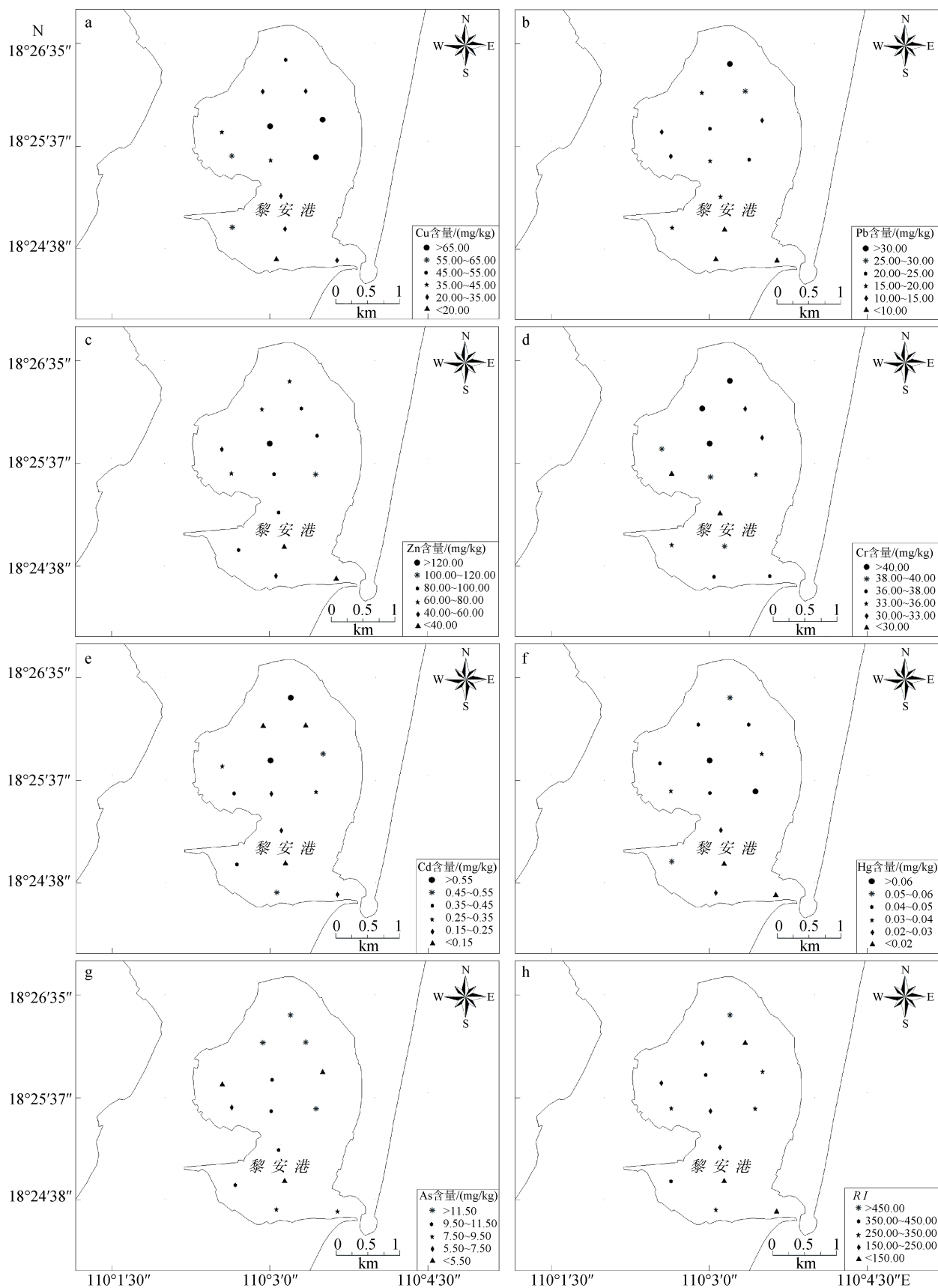


图2 重金属含量及 RI 散点分布

Fig.2 Scatter distribution of heavy metals contents and RI

表 2 表层沉积物重金属含量相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis content of heavy metal in surface sediments

因子	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Hg	As
Cu	1						
Pb	0.256	1					
Zn	0.706**	0.587*	1				
Cr	-0.207	-0.205	-0.243	1			
Cd	0.243	0.274	0.201	-0.840**	1		
Hg	0.648**	0.731**	0.730**	-0.229	0.415	1	
As	0.227	0.737**	0.599*	-0.535*	0.491	0.659**	1

** $P < 0.01$, 极显著相关; * $P < 0.05$, 显著相关

表 3 表层沉积物中重金属的潜在生态危害系数

Tab. 3 Potential ecological risk coefficient of heavy metals in surface sediments

站位	单一重金属潜在生态危害系数(E_R^i)							多种重金属的潜在生态危害指数(RI)
	Cu	Zn	Cd	Cr	Pb	Hg	As	
L1	15.23	1.03	323.08	1.31	8.33	92.80	14.96	456.75
L2	6.77	1.40	36.92	1.02	7.43	64.00	18.06	135.61
L3	6.96	1.06	55.38	1.41	4.97	75.20	17.08	162.06
L4	23.70	1.36	230.77	0.98	2.90	52.80	6.26	318.78
L5	23.62	1.97	263.08	1.37	5.54	97.60	12.35	405.53
L6	12.24	0.81	124.62	1.30	2.77	70.40	4.35	216.48
L7	19.42	1.10	184.62	0.93	3.40	54.40	8.23	272.10
L8	14.54	1.51	87.69	1.27	4.68	67.20	13.82	190.72
L9	22.68	1.75	120.00	1.17	5.50	112.00	22.38	285.49
L10	10.73	1.38	110.77	0.94	4.05	44.80	12.42	185.09
L11	7.91	0.55	69.23	1.29	1.82	30.40	5.22	116.41
L12	19.01	1.27	207.69	1.17	4.33	84.80	12.53	330.80
L13	5.97	0.75	244.62	1.22	2.20	33.60	10.22	298.57
L14	8.27	0.56	83.08	1.23	2.12	28.80	10.48	134.54
平均值	14.08	1.18	152.97	1.19	4.29	64.91	12.03	250.64

表 4 表层沉积物中多种重金属潜在危害指数(RI)百分比

Tab. 4 Percentage of potential ecological risk coefficient of various heavy metals in surface sediments

程度划分	站位	百分比/%
轻微生态危害(<150)	L2, L11, L14	21.43
中等生态危害(150~300)	L3, L6~L10, L13	50.00
强生态危害(300~600)	L1, L4, L5, L12	28.57
很强生态危害(>600)	—	0.00

“—”表示未有

单一重金属潜在生态危害系数(E_R^i)分析结果(表 3 及表 5), 单一重金属潜在生态危害系数最高为 Cd 与 Hg, 其余金属均处在生态轻微危害。Cd 潜在生态危害以很强生态危害为主, 占总调查站位的 42.86%, 其次为强生态危害, 占总调查站位的 35.71%, 中等生态危害, 占总调查站位的 14.29%, 生态轻微危

害, 占总调查站位的 7.14%; Hg 潜在生态危害以中等生态危害为主, 占总调查站位的 57.14%, 其次为生态轻微危害, 占总调查站位的 21.43%, 及强生态危害, 占总调查站位的 21.43%。根据 E_R^i 均值大小, Cd 潜在风险最大, Zn 潜在风险最小, 7 种沉积物重金属潜在生态风险大小依次为: Cd>Hg>Cu>As>Pb>Cr>Zn。

表 5 表层沉积物中单一重金属的潜在生态危害系数(E_R^i)百分比

Tab. 5 Percentage of potential ecological risk coefficient of single heavy metals in surface sediments

程度划分	Cu	Pb	Zn	Cr	As	Cd	Hg
轻微生态危害(<40)	L1~L14 (100%)	L1~L14 (100%)	L1~L14 (100%)	L1~L14 (100%)	L1~L14 (100%)	L2 (7.14%)	L11, L13, L14(21.43%)
中等生态危害(40~80)	—	—	—	—	—	L3, L11 (14.29%)	L2~L4, L6~L8, L10, L12(57.14%)
强生态危害(80~160)	—	—	—	—	—	L6, L8~L10, L14 (35.71%)	L1, L5, L9 (21.43%)
很强生态危害(160~320)	—	—	—	—	—	L1, L4, L5, L7, L12, L13 (42.86%)	—

“—”表示未有

黎安港与新村港均处在陵水黎族自治县内, 两潟湖相隔不远, 其地理位置、人文社会以及潟湖环境均极其相似, 新村港和黎安港之间的沙坝为明显的陆连岛坝地形, 这一地形将新村和黎安港分开(图 1)。现将黎安港与新村港沉积物重金属^[10]在含量分布、 RI 及 E_R^i 方面进行对比分析(表 6)。黎安港 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 与 As 含量值均比新村港高, Hg 低于新村港; 黎安港 RI 以中等生态危害为主, 其次为强生态危害与轻微生态危害, 高值区位于北部沿岸处或潟湖中心, 新村港以强生态危害为主, 其次为中等生态危害、轻微生态危害及很强生态危害, 高值区位于口门

附近, 导致这种现象发生, 主要跟新村港、黎安港潮汐汊道, 水体交换强度有关; 单一金属潜在生态危害, 黎安港很强生态危害金属为 Cd, 占总调查站位的 42.86%, 强生态危害金属为 Cd 及 Hg, 分别占总调查站位的 35.71%及 21.43%, 中等生态危害金属为 Cd 及 Hg 占总调查站位的 14.29%及 57.14%, 其余处在轻微生态危害; 新村港很强生态危害金属为 As, 占总调查站位的 61.22%, 强生态危害金属为 Cd 及 As, 占总调查站位的 71.43%及 16.33%, 中等生态危害金属为 Hg、Cd 及 As, 分别占总调查站位的 18.37%、12.24%及 14.29%, 其余处在轻微生态危害(表 6)。

表 6 黎安港与新村港沉积物重金属比较

Tab. 6 Comparison of sediments between Xincun and Li'an lagoon

类别	单项	新村港	黎安港
含量均值 (mg/kg)	Cu	22.1	42.23
	Pb	13.41	17.15
	Zn	37.64	76.58
	Cr	9.1	36.24
	Cd	0.225	0.33
	Hg	0.13	0.04
	As	0.48	9.26
RI (占总站 位百分比/%)	轻微生态危害(<150)	16.32	21.43
	中等生态危害(150~300)	38.78	50.00
	强生态危害(300~600)	42.86	28.57
	很强生态危害(>600)	2.04	—
高值区		新村港口门附近	潟湖中心
E_R^i (占总站 位百分比/%)	轻微生态危害(<40)	Cu(100)、Pb(100)、Zn(100)、Cr(100)、 Hg(81.63)、Cd (16.33)、As(8.16)	Cu(100)、As(100)、Pb(100)、Cr(100)、 Zn(100)、Cd(7.14)、Hg(21.43)
	中等生态危害(40~80)	Hg(18.37)、Cd (12.24)、As(14.29)	Cd(14.29)、Hg(57.14)
	强生态危害(80~160)	Cd (71.43)、As(16.33)	Cd(35.71)、Hg(21.43)
	很强生态危害(160~320)	As(61.22)	Cd(42.86)

“—”表示未有

由此可见, 这两潟湖重金属含量分布、潜在生态风险危害存在一定的差异, 导致这种差异因素较多, 主要原因在于两潟湖中新村港渔排及网箱分布主要位于潟湖口门附近, 重金属便于通过口门及时输入到外海, 而黎安港养殖活动位于潟湖里端及中央位置, 从而导致黎安港 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 与 As 含量值均比新村港高, 然而新村港口门具有一较大规模的港口, 大量的大吨位级渔船使得新村港 Hg 明显高于黎安港; 此外新村港与黎安港潮汐汉道纳潮量的变化导致黎安港高值区主要位于潟湖里端靠岸或潟湖中心, 而新村港主要位于口门附近等。

2.2 黎安港表层沉积物中重金属来源分析

波浪和潮汐、潮流是影响潟湖沉积物环境主要动力因素, 潮汐汉道是潮流作用主导的沉积环境之一, 当过水断面流速变小, 沉积物输运能力下降, 口门内将发生淤积^[22], 黎安港潟湖口门两侧沙嘴发育拦阻通道, 导致潮汐通道不断淤浅, 潟湖处于日趋消亡状态。有报道, 黎安港潮汐类型属于全日潮型, 涨潮平均流速小于落潮平均流速, 平均纳潮量约为 $5.65 \times 10^6 \text{ m}^3$, 海水半交换周期约为 20~50 d, 由于海水半交换周期长, 潟湖内的生态平衡非常脆弱, 因而易受外源和港内养殖自身的污染^[23], 这是黎安港潟湖重金属含量分布及潜在生态危害较强的原因之一。

黎安港 Cu、Pb、Zn、Hg 及 As 在潟湖中心分布稍高, 该区域主要为潟湖养殖、渔排及潟湖航道; 此外, Pb 与 Cd 含量高值主要位于潟湖中心偏岸边位置, 该区域除潟湖养殖、渔排及潟湖航道外, 沿岸还分布许多虾塘; Cr 含量高值主要位于潟湖中心航道直至入海口。

有研究表明, 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], 海洋表层沉积物中重金属 Hg、Cd 及 As 主要来自人类活动^[25], Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 主要来自陆源输入, As 主要通过海洋环境沉降进入海洋沉积物中^[26], Cd 主要来自工业污染^[27], Cu、Cr 主要来自沿岸养殖^[28]。2016 年调查, 黎安港渔排养殖 110 宗, 占陵水自治县渔业用海的 17.57%, 养殖活动主要分布于港内中部, 养殖品种江珧 *pinna rudis linnaeus*、珍珠贝 *Pinctada* sp.、牡蛎 *Ostrea* sp.、龙虾 *Panulirus* sp.、石斑鱼 *Epinehelus* sp.、笛鲷 *Lutjanus* sp.、军曹鱼 *Rachycentron canadum* 及银鲳 *Pampus argenteus* 等, 过往或停靠船只(6 m×2.2 m)约 100 艘左右。由此可见, 黎安港沉积物重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg 及 As 主要来源

于养殖。

海草床生态系统对表层重金属具有很强的富集与吸附作用, 分布于海草床水环境与沉积环境中的 Cu、Pb、Cd 和 Zn 含量一般比较低^[29], 同时海洋中生长的部分藻类对表层沉积物具有一定的富集与吸附作用^[30-31]。2016 年调查, 黎安港海草非常丰富, 潟湖周边浅水区域均有分布, 种类有海菖蒲、泰来草、圆叶丝粉草、针叶草、单脉二药草、卵叶喜盐草等, 尤以根系发达的海菖蒲、泰来草和圆叶丝粉草为优势种, 大致分布: 海菖蒲、泰来草和圆叶丝粉草以成片或斑块状分布在潟湖的南部及西部沿岸, 卵叶喜盐草和泰来草以混合为主的方式分布在水深较浅的北部沿岸海域。海草平均覆盖度范围为 0~95%, 平均 37.80%; 密度在 0~1816 株/m², 平均密度在 626 株/m², 生物量范围为 0~984.62 g/m², 平均生物量为 558.39 g/m²。此外, 黎安港常年有大量麒麟菜养殖。这些海草及麒麟菜对沉积环境中重金属具有一定的富集及吸附作用, 使得这些区域重金属含量偏低。这与本次研究, 黎安港沉积物重金属分布中心高、周边含量低情况相一致。

目前, 黎安港潜在生态危害状态以中等生态危害为主, 其次为强生态危害与轻微生态危害程度, RI 高值位于港内北部沿岸处或潟湖中心。单一重金属 Cu、Pb、Zn、Cr 及 As 等均处在生态轻微危害, Cd 以强生态危害为主, 其次为强生态危害。中等生态危害与生态轻微危害, Hg 以中等生态危害为主, 其次为生态轻微危害与强生态危害。这很大程度上与潟湖水体相互交换较差, 养殖及渔排产生的重金属污染较多, 周边成片海草床及其附着生物对沉积物重金属起到较好的富集及吸附作用等因素有关。

3 结 论

(1) 黎安港表层沉积物中的重金属 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg 及 As 含量范围分别为 17.90~71.11、7.27~33.33、35.92~128.26、28.50~43.00、0.08~0.70、0.018~0.070 及 3.35~17.23 mg/kg, 平均值为 42.23、17.15、76.58、36.24、0.33、0.040 及 9.26 mg/kg, 高值区主要位于潟湖中心养殖区。

(2) 黎安港 Cu、Pb、Zn、Hg 及 As 具有相同污染源, 主要受渔排养殖影响, 此外, Pb、As 与 Cd 受陆源虾塘污染较多, Cr 主要受渔船影响较大。

(3) 研究区内以中等生态危害为主, 其次为轻微生态危害及强生态危害, RI 较高的站位基本位于

潟湖中心; 潜在生态风险大小依次为: Cd>Hg>Cu>As>Pb>Cr>Zn。

(4) 黎安港 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 与 As 含量值均比新村港高, Hg 低于新村港; 黎安港 RI 以中等生态危害为主, 高值区位于潟湖北部沿岸处或潟湖中心, 新村港以强生态危害为主, 高值区位于口门附近; 单一金属潜在生态危害, 黎安港很强生态危害金属为 Cd, 强生态危害金属为 Cd 与 Hg, 中等生态危害金属为 Cd 与 Hg, 其余处在轻微生态危害, 新村港很强生态危害金属为 As, 强生态危害金属为 Cd 与 As, 中等生态危害金属为 Hg、Cd 与 As, 其余处在轻微生态危害。

参考文献:

[1] 陈石泉, 王道儒, 吴钟解, 等. 海南岛东海岸海草床近 10a 变化趋势探讨[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(1): 48-53.
Chen Shiquan, Wang Daoru, Wu Zhongjie, et al. Discussion of the change trend of the seagrass beds in the east coast of Hainan Island in nearly a decade[J]. Marine Environmental Science, 2015, 34(1): 48-53.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 阳杰, 曹玲珑, 姜万钧, 等. 洋浦港近岸海域沉积物中重金属含量分布特征及污染评价[J]. 海洋湖沼通报, 2012, 4: 121-127.
Yang Jie, Cao Linglong, Jiang Wanjun, et al. Distribution and evaluation of heavy metal pollutions for surface sediments near yangpu port[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2012, 4: 121-127.

[5] 刘建波, 刘洁, 陈春华, 等. 海口湾东部表层沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(17): 9416-9418.
Liu Jianbo, Liu Jie, Chen Chunhua, et al. Contamination Characteristic and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Surface Sediment from East Haikou Bay[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(17): 9416-9418.

[6] 张宇峰, 武正华, 王宁, 等. 海南南岸港湾海水和沉积物重金属污染研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2002, 39(1): 81-91.
Zhang Yufeng, Wu Zhenghua, Wang Ning, et al. An Investigation of Heavy Metal Pollution in the Bays in the

South of Hainan Islands[J]. Journal of Nanjing University: Nat Sci Ed, 2002, 39(1): 81-91.

[7] 张家友, 吴国爱, 傅杨荣, 等. 海口湾重金属富集与评价[J]. 国土资源科技管理, 2012, 29(5): 43-49.
Zhang Jiayou, Wu Guoai, Fu Yangrong, et al. Enrichment and Evaluation of Heavy Metals in Haikou Bay[J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2012, 29(5): 43-49.

[8] 曹玲珑, 王平, 田海涛, 等. 海南东寨港重金属在多种环境介质中污染状况及评价[J]. 海洋通报, 2013, 32(4): 403-408.
Cao Linglong, Wang Ping, Tian Haitao, et al. Distribution and ecological evaluation of heavy metals in multi-mediums of Dongzhai Harbor[J]. Marine Science Bulletin, 2013, 32(4): 403-408.

[9] 林钟扬, 倪建宇, 时连强, 等. 海南小海表层沉积环境及重金属污染综合评价[J]. 海洋学研究, 2011, 29(2): 12-24.
Lin Zhongyang, Ni Jianyu, Shi Lianqiang, et al. Comprehensive evaluation of the environment and the heavy metals pollution in the surface sediments of Xiaohai Hainan Province[J]. Journal of Marine Sciences, 2011, 29(2): 12-24.

[10] 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.
Chen Shiquan, Zhang Guangxing, Wu Zhongjie, et al. The distribution characteristics and the pollution evaluation of the heavy metals in the surface sediment of Xincun lagoon[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2014, 4: 144-152.

[11] 吴钟解, 陈石泉, 王道儒, 等. 海南岛东海岸海草床生态系统健康评价[J]. 海洋科学, 2014, 38(8): 67-74.
Wu Zhongjie, Chen Shiquan, Wang Daoru, et al. The health assessment of the Seagrass Bed ecosystem in The East Coast of Hainan Island[J]. Marine Sciences, 2014, 38(8): 67-74.

[12] 陈敏, 陈石泉, 陈春华, 等. 海南岛周边潟湖资源保护与可持续利用研究探讨[J]. 海洋与湖沼通报, 2017, 4:107-114.
Chen min, Chen Shiquan, Chen Chunhua, et al. Research and discussion of protection and sustainable utilization of the Lagoon resources of Hainan island[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2017, 4:107-114.

[13] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB17378-2007. 海洋监测规范 第 5 部分: 沉积物分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 8-23.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China, GB17378-2007. The specification for marine monitoring, Part 5:

- Sediment analysis[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 8-23.
- [14] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment to logical approach[J]. *Water Res*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [15] 方海超, 黄朋, 周宇, 等. 北黄海表层沉积物常量元素分布特征及其控制因素分析[J]. *海洋科学*, 2015, 39(4): 109-114.
Fang Haichao, HuangPeng, ZhouYu, et al. Distribution and controlling factors of the major elements in surface sediments of the North Yellow Sea[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(4): 109-114.
- [16] 赵明明, 王传远, 孙志高, 等. 黄河尾闾及近岸沉积物中重金属的含量分布及生态风险评价[J]. *海洋科学*, 2016, 40(1): 68-75.
Zhao Mingming, Wang Chuanyuan, Sun Zhigao, et al. Concentration, distribution, and ecological risk assessment of heavy metals in sediments from the tail reaches of the yellow river estuary[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(1): 68-75.
- [17] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物化学元素丰度[J]. *中国科学*, 1993, 23(10): 1084 -1090.
Zhaoyiyang, Yan Mingcai. Chemical abundance in the shallow Marine sediments in China[J]. *Science China*, 1993, 23(10): 1084 -1090.
- [18] 崔振昂, 林进清, 甘华阳, 等. 南海北部湾东部海域表层沉积物地球化学特征[J]. *海洋科学*, 2015, 39(7): 103-111.
Cui Zhenang, Lin Jinqing, Gan Huayang, et al. Geochemical characteristics of the surface sediments in the eastern Beibu Gulf, South China Sea[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(7): 103-111.
- [19] 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.
Zheng Na, Wang Qichao, Zheng Dongmei, 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.
- [20] 霍云龙, 陈金民, 林彩, 等. 三沙湾表层沉积物重金属含量分布及生态风险评估[J]. *应用海洋学学报*, 2015, 34(3): 356-364.
Huo Yunlong, Chen Jinmin, Lin Cai, et al. Distribution of heavy metal contents in surface sediments of Sansha Bay and ecological risk assessment[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2015, 34(3): 356-364.
- [21] 龚文平, 陈明和, 温晓骥, 等. 海南陵水黎安港潮汐汉道演变及其稳定性分析[J]. *热带海洋学报*, 2004, 23(4): 25-43.
Gong Wenping, Chen Minghe, Wen Xiaoji, et al. evolution and stability of xincun tidal inlet, linshui county, hainan province[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2004, 23(4): 25-43.
- [22] 蒋增杰, 方建光, 张继红, 等. 海南黎安港纳潮量及海水交换规律研究[J]. *海南大学学报自然科学版*, 2009, 27(3): 261-264.
Jiang Zengjie, Fang Jianguang, Zhang Jihong, et al. The Calculation of Tidal Water Capacity and Water Exchange Characteristic of Lian Lagoon[J]. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2009, 27(3): 261-264.
- [23] 张际标, 刘加飞, 张才学, 等. 湛江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.
Zhang Jibiao, Liu Jiafei, Zhang Caixue, et al. Distribution and pollution assessment on heavy metals in surface sediments of Zhanjiang Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2012, 31(5): 644-649.
- [24] 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.
Liu Qiongyu, Hong Huasheng and Hong Liyu. Distribution features and sources of Cu, Pb, Zn and Cd in Xiamen Western sea sediments[J]. *Marine Science Bulletin*, 1995, 14(6): 46-52.
- [25] 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.
Guo Xiaoyu, Huang Changjiang. Distribution and source of heavy metal elements in sediments of Zhanjiang Harbor[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2006, 25(5): 91-97.
- [26] 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.
Tang Hongliang, Wang Chao, Li Yong, et al. Spatial distribution of heavy metals in sediments of Liyun River[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2006, 34(1): 18-21.
- [27] 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.
Wei Xiaohang, Zhang Min, Yao Weizhong. Heavy Metal Distribution and Pollution Characteristics in the Sediments of Aquaculture Ponds[J]. *journal of ningbo university (nsee)*, 2004, 17(4): 380-384.
- [28] 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.
Xu Zhanzhou, Zhu Aijia, Cai Weixu, et al. Enrichment of heavy metals in the seagrass bed of Liusha Bay[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23): 7244-7250.
- [29] 尹平河, 赵玲, YU Qi-ming, 等. 海藻生物吸附废水中铅、铜和镉的研究[J]. *海洋环境科学*, 2000, 19(3): 11-16.

- Yin Pinghe, Zhao Ling, Yu Qiming, et al. Biosorption of lead copper and cadmium by marine macro algae[J]. *Marine Environmental Science*, 2000, 19(3): 11-16.
- [30] 常秀莲, 王文华, 冯咏梅. 海藻吸附重金属离子的研究[J]. *海洋通报*, 2003, 22(2): 39-45.
- Chang Xiulian, Wang Wenhua, Feng Yongmei. Investigation of Heavy Metal Biosorption on Algae[J]. *Marine Science Bulletin*, 2003, 22(2): 39-45.
- [31] 马晓娜, 李薏, 孙国祥, 等. 贝藻混养对大西洋鲑养殖废水的生物滤除[J]. *海洋科学*, 2016, 40(1): 32-39.
- Ma Xiaona, Li Meng, Sun Guoxiang, et al. Biological purification of Atlantic salmon (*Salmo salar*) waste-water with the polyculture of Bivalves and Macroalgae[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(1): 32-39.

Distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in the surface sediments of Li'an lagoon, Hainan province

CHEN Shi-quan¹, WU Zhong-jie¹, CAI Ze-fu¹, XIANG Yun-yun², XING Kong-min¹, WANG Dao-ru¹, LIN Guo-yao¹, TONG Yu-he¹

(1. Hainan Academy of Ocean and Fisheries Sciences, Haikou 570125, China; 2. Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China)

Received: Jul. 30, 2017

Key words: Li'an lagoon; Correlation; Heavy metals; Sediments; Ecological risk

Abstract: This study investigates the distribution characteristics, correlation, and potential ecological risk of heavy metals in the surface sediments of Li'an lagoon by determining their contents. The results show that the average contents of Cu, Pb, Zn, Cr, Cd, Hg, and As in the surface sediments of Li'an lagoon are 42.23, 17.15, 76.58, 36.24, 0.33, 0.04, and 9.26 mg/kg, respectively, and they are mainly located in the farming area at the lagoon center and the shrimp ponds along the coast. Furthermore, Cu, Pb, Zn, and Hg are the main sources of pollution that affect by aquaculture activities, while Pb, As, and Cd mainly affect terrestrial shrimp ponds. This study also focuses on the ecological risk indexes (*RIs*). Different regions had low, medium, or high *RIs*. The regions with high *RIs* are mainly at the center of the lagoon. A descending order of the heavy metals with potential ecological risk is Cd>Hg>Cu>As>Pb>Cr>Zn. The heavy metals distribution and potential ecological risk in Li'an lagoon differ from those in Xincun lagoon. The Li'an lagoon mainly has a medium ecological risk; however, Cd presents a strong ecological risk.

(本文编辑: 康亦兼)