

文章编号:1009-2722(2017)03-0047-09

# 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

何海军<sup>1</sup>,甘华阳<sup>1</sup>,何金先<sup>2</sup>,夏真<sup>1</sup>,阮明<sup>3</sup>,杨永鹏<sup>3</sup>

(1 国土资源部海底矿产资源重点实验室,广州海洋地质调查局,广州 510760;

2 中国矿业大学资源与地球科学学院,江苏徐州 221116; 3 海南省地质调查院,海口 570206)

**摘要:**通过多种测试手段对海南岛南部滨海地区 164 个站位表层沉积物样品进行了重金属含量分析,探讨了重金属元素来源及分布特征,并对其生态风险进行了评价,结果表明:研究区 Cu、Pb、Zn、Cr、As、Hg 和 Cd 等元素含量分别为 10.45、22.38、53.72、23.42、4.52、0.09 和 0.05  $\mu\text{g/g}$ 。重金属元素主要富集在新村港及榆林湾等地,其 Hg 元素较同类旅游港湾明显偏高。Cu、Pb、Zn、Cr 主要来源为自然风化和侵蚀,其含量与分布受粒度制约;As 元素分布主要受人类活动影响;有机质降解过程释放的金属离子以及人为因素是 Hg、Cd 的主要来源。单一重金属污染物对底质环境影响较小,潜在生态危害指数综合评价结果表明,部分站位表层沉积物已经受到重金属污染,各重金属潜在生态危害等级排序依次为  $\text{Hg} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Zn}$ ,Hg 元素是主要潜在的生态风险,应加强对其监控。

**关键词:**海南岛南部;重金属;分布特征;物质来源;生态风险评价

中图分类号:P736.21; X826

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2017.03008

水体沉积物中的重金属主要来源于悬浮物的沉积作用。因此,近岸沉积物是进入海洋的绝大部分重金属污染物富集区域,蕴含着丰富的地质和环境信息,能够指示污染状况,为评价生态风险提供重要帮助<sup>[1-4]</sup>。随着海南国际旅游岛建设,旅游业迅猛发展使得城市污染问题日益严峻。因此,研究海南岛南部滨海沉积物中重金属分布及其潜在生态风险不仅关乎人们日常健康生活,更对于海南岛生态旅游的进一步发展建设具有重要意义。近年来部分学者探讨了研究区生态风险,但研究成果比较零散,主要集中在新村港<sup>[5]</sup>、三

亚湾<sup>[6]</sup>、三亚河<sup>[7]</sup>等局部地区,缺乏对区域整体的系统研究。

目前,对于评价水体沉积物重金属的污染影响程度,国内外主要的方法有污染指数法、潜在生态危害指数法(Hakanson)、脸谱图法、污染负荷指数法、回归过量分析法及地质累积指数法(Geoac-cumulation Index)等<sup>[8-15]</sup>。其中潜在生态危害指数法不仅可以反映单个重金属污染物的影响,同时还可以体现多种重金属污染物的综合影响,从而全面认识该海域的重金属污染现状以及潜在的生态风险。笔者通过海南岛南部滨海海域 164 个站位实际样品采集,对各个站位样品进行了重金属元素的含量测定,研究其分布特征及影响因素。通过使用统计软件 SPSS,分析研究区的重金属与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  及有机质的含量相关性,识别重金属的可能来源途径;采用潜在生态危害指数

收稿日期:2016-12-28

基金项目:中国地质调查局项目“华南西部滨海湿地地质调查与生态环境评价”(1212010914020)

作者简介:何海军(1986—),男,硕士,工程师,主要从事海洋地质与海洋环境方面的研究工作。E-mail: hehaijun1986@126.com

法全面评价重金属污染现状以及潜在生态风险,以期为海南岛南部滨海区域环境管理和生态环境保护提供科学依据,促进该区域实现可持续发展。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于海南岛南部滨海,地理坐标范围为  $18^{\circ}00' - 18^{\circ}50' N$ ,  $108^{\circ}25' - 110^{\circ}35' E$ 。整体地形中部高,在东、西、南3个方向,由山地、丘陵、平原顺序逐渐递降,倾向海面。沿海主要为阶地、潟湖、河口三角洲等。地层以第四系为主,亚龙湾东部、南山角、新村—黎安港滨海一带有燕山期花岗岩直接出露,大东海至榆林湾一带则有早古生代浅海相砂质岩、碳酸盐岩出露,沿海向内陆则出露有中生代火山岩和新生代火山岩以及晚古生代侵入岩,部分地区出露有寒武系和奥陶系变质石英砂岩等。研究区以旅游为主,重化工工业较少,人类活动多集中于榆林湾、新村港等地。

### 1.2 野外样品采集

2014年,通过采用抓斗取样器完成了164个站点的海底表层沉积物取样,取样深度为0.2~6 m,取样间距为5 km,港口、潟湖、河口等人类活动强烈影响区域取样间距加密至1~2 km,取样站位见图1。

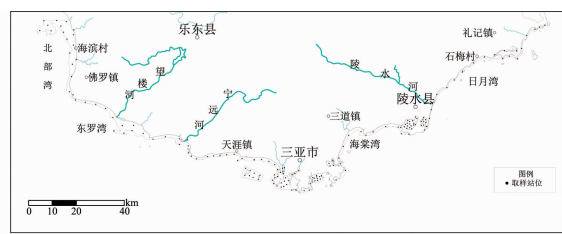


图1 取样站位分布

Fig. 1 Map of sampling stations

### 1.3 分析测试方法

#### 1.3.1 沉积物粒度

本次研究采用综合法分析沉积物粒度,粒度在  $2\ 000\ \mu\text{m}$  以下的沉积物采用英国马尔文仪器公司 (Malvern Instruments) 产的 Mastersizer

2000型激光粒度分析仪进行激光粒度分析;  $2\ 000\ \mu\text{m}$  以上则采用筛分法,对2种测量结果综合分析得到最终沉积物粒度结果。

#### 1.3.2 重金属元素

样品在恒温 ( $<60\ ^{\circ}\text{C}$ ) 下烘干后,研磨至250目以下进行分析。元素 Cu、Pb、Zn 采用美国珀金埃尔默公司 (Perkin Elmer) 产的 Optima 4300DV 型电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP—OES) 测试;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和元素 Cr 采用 X 荧光光谱法测定,测试仪器为荷兰帕纳科公司 (PANalytical) 产的 Axios 型 X 射线荧光光谱仪和日本理学公司 (Rigaku) 产的 ZSXmini 型台式 X 射线荧光光谱仪; As 和 Hg 测试采用原子荧光法,测试仪器为中国北京吉天仪器有限公司产的 AFS-820 型原子荧光光度计; Cd 测试采用石墨炉原子吸收分光光度法,测试仪器为德国耶拿分析仪器股份公司 (Analytik Jena AG) 产的 Jena Zeenit60 型石墨炉原子吸收光谱仪。所有重金属元素测试都设置空白与重复,沉积物标准样控制下测试结果与参考值相对偏差  $<5\%$ ,吻合度较好。

#### 1.3.3 评价方法

潜在生态危害评价主要从“元素丰度原则”和“元素释放度”2个方面反映重金属的毒性程度和生物对重金属污染的敏感程度,根据单因子潜在生态风险指数  $E_r^i$  和综合潜在生态风险指数 ( $E_{\text{RI}}$ ) 值的范围定义重金属4个级别的生态危害程度<sup>[16]</sup>。

本文对重金属环境质量评价采用标准对照法和潜在生态危害指数<sup>[17]</sup>,潜在生态危害指数法的具体公式如下:

$$C_d = \sum_i^n C_i = \sum_i^n \frac{C_i}{C_n^i}$$

式中:  $C_i$  为重金属  $i$  的污染系数;

$C_i$  为重金属  $i$  的实测浓度;

$C_n^i$  为重金属评价参比值;

$C_d$  为沉积物重金属总体污染程度。

本研究采用工业化以前沉积物中重金属背景值<sup>[18]</sup>。基于重金属污染状况评价的多种重金属潜在生态危害指数  $E_{\text{RI}}$ ,是所有参与评价的单个重金属的潜在生态危害系数求和,其公式如下:

$$E_{\text{RI}} = \sum_i^n E_r^i = \sum_i^n (T_r^i \cdot C_i)$$

式中:  $T_i$  为重金属  $i$  的毒性响应系数;

$E_i$  为重金属  $i$  的潜在生态危害系数。

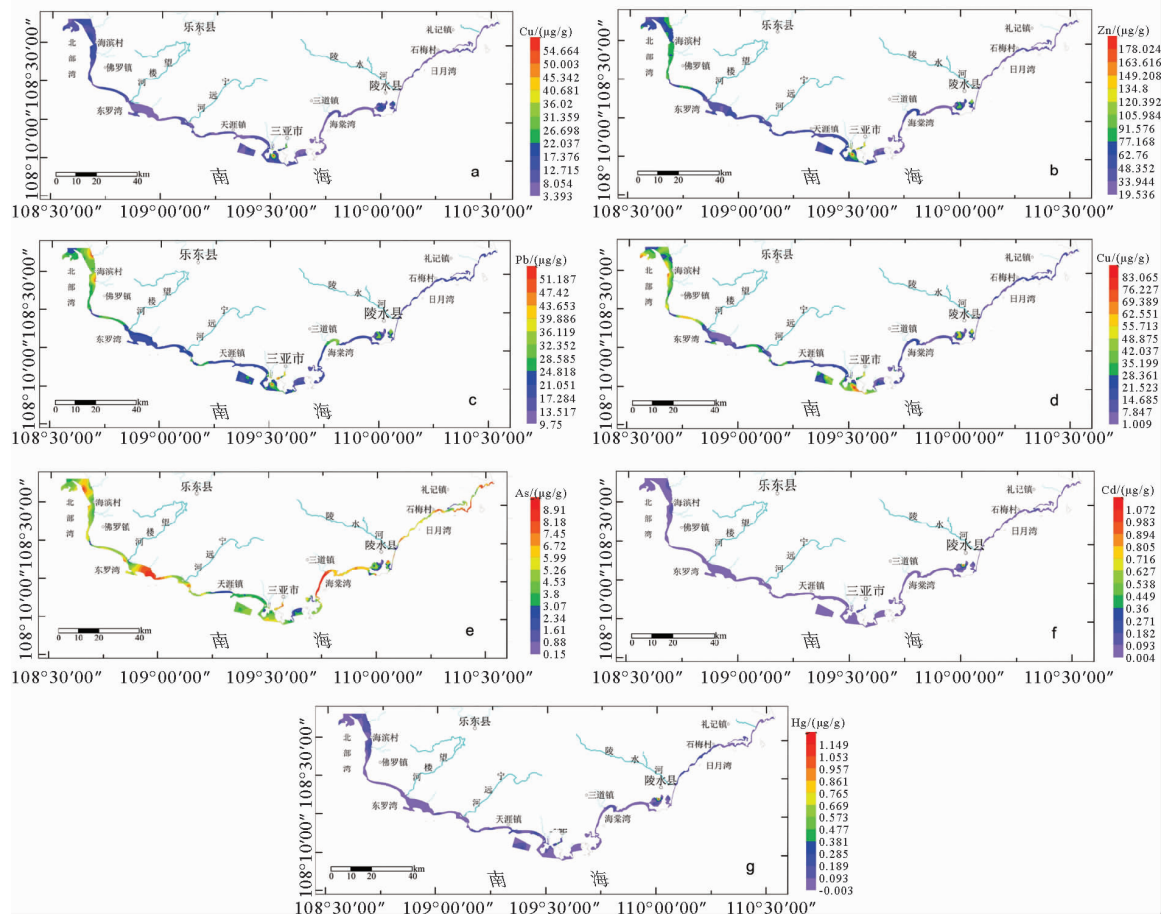
## 2 结果与讨论

### 2.1 重金属分布特征

Cu、Pb、Zn 和 Hg 是影响沉积物环境质量的重要组分,因此也是本次重点研究元素。其含量分布统计见图 2、表 1。

图 2 为研究区重金属分布状况。在图 2 中,As 含量为  $0.11 \sim 8.91 \mu\text{g/g}$ ,平均为  $4.52 \mu\text{g/g}$ ,高值区集中分布在海棠湾、龙栖湾等海域;Cd 高值区主要分布在新村港北部,三亚河及榆林湾为

次高值区,含量为  $0.00 \sim 0.35 \mu\text{g/g}$ ,平均为  $0.05 \mu\text{g/g}$ ;Cr 含量为  $1.06 \sim 83.40 \mu\text{g/g}$ ,平均为  $23.42 \mu\text{g/g}$ ,高值区集中在三亚以西地区,三亚以西的含量高于三亚以东的含量,其中三亚以东新村港、黎安港含量也稍高;Cu 含量为  $3.36 \sim 59.90 \mu\text{g/g}$ ,平均为  $10.45 \mu\text{g/g}$ ,高值区分布与 Cr 类似,三亚以西的含量高于三亚以东的含量;Hg 含量为  $0.02 \sim 0.44 \mu\text{g/g}$ ,平均为  $0.09 \mu\text{g/g}$ ,高值区集中分布在新村港北部、榆林湾;Pb 的高值区集中分布在乐东南港海域、新村港和黎安港、榆林湾等海域,含量为  $9.67 \sim 55.10 \mu\text{g/g}$ ,平均为  $22.38 \mu\text{g/g}$ ;Zn 含量为  $18.70 \sim 194.00 \mu\text{g/g}$ ,平均为  $53.72 \mu\text{g/g}$ ,高值区分布形式与 Cr 和 Cu 基本一致。



(a)Cu 元素;(b)Zn 元素;(c)Pb 元素;(d)Cr 元素;(e)As 元素;(f)Cd 元素;(g)Hg 元素

图 2 重金属含量分布

Fig. 2 Distribution map of heavy metals in the surface sediments

表1 研究区沉积物样品的重金属含量统计

统计量	Cu	Zn	Pb	Cr	As	Cd	Hg
N	164	164	164	164	164	164	164
最小值	3.36	18.70	9.67	1.06	0.11	0.00	0.02
最大值	59.90	194.00	55.10	83.40	8.91	0.35	0.44
平均值	10.45	53.72	22.38	23.42	4.52	0.05	0.09
中间值	8.66	47.85	20.80	17.95	4.67	0.04	0.06
标准差	6.73	29.21	8.04	18.92	2.11	0.05	0.07
变异系数	0.64	0.54	0.36	0.81	0.47	0.91	0.81
沉积物 I/II 类质量标准	35/100	150/350	60/130	80/150	20/65	0.5/1.5	0.2/0.5

研究区重金属含量与其他研究区的重金属含量比较见表2。通过表2可知,与人口密集、工业发达重金属含量较高的珠江口地区相比,研究区各重金属含量相对较低<sup>[19]</sup>。研究区绝大部分重金属的含量除As外都普遍高于海南岛近岸<sup>[20]</sup>,表明地质环境有恶化的趋势,尤其是Hg,高出7.5倍。将研究区与国内重点滨海旅游城市青

岛、天津、北海等对比,除Hg外,各重金属元素含量大致相当<sup>[21-23]</sup>。Hg含量则比青岛、天津、北海等滨海旅游城市高2~3倍<sup>[21-23]</sup>。因此,Hg元素是本地区需密切关注和监测的重金属元素。此外,通过与Long等(1995)划定的生物效应阈值浓度相比较<sup>[24]</sup>,研究区各项重金属元素浓度均低于生物效应阈值浓度低值(ERL)。

表2 研究区重金属元素与其他近岸重金属平均含量比较

Table 2 Comparison of average concentrations of heavy metals for study area and other coastal regions  $\mu\text{g/g}$ 

地区	Cu	Zn	Pb	Cr	As	Cd	Hg	文献来源
海南岛南部	10.45	53.72	22.38	23.42	4.52	0.05	0.09	本文
珠江口	46.7	110.2	40.9	82.3	26.36	0.37	0.19	文献[19]
海南岛近岸	4.48	21.89	16.09	16.05	5.50	0.03	0.012	文献[20]
青岛近岸	23.1	71.1	25.0	64.3	11.4	0.082	0.032	文献[21]
天津近岸	30.5	77.4	21.6	57.5	5.45	0.147	0.025	文献[22]
北海近岸	8.5	47.1	18.4	/	10.4	0.065	0.039	文献[23]
ERL	34	150	46.7	81	8.2	1.2	0.15	文献[24]
ERM	270	410	218	370	70	9.6	0.71	文献[24]

注:ERL:生物效应阈值浓度低值;ERM:生物效应阈值浓度中值

## 2.2 重金属含量相关性

通过分析沉积物重金属含量的相关性,可以判断重金属的来源是否相同<sup>[25]</sup>,若元素之间显著相关,表明其出自同一来源的可能性较大,这可能是天然来源,也可能是人类活动造成的污染所致。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 作为较稳定的陆源碎屑风化产物,因此许多学者将海洋中的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 作为陆源成分的标志<sup>[26,27]</sup>。依据此方法,结合统计软件SPSS,把重

金属元素与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、中值粒径之间进行皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficient)分析,结果见表3。从表3中看出,Zn、Cu、Pb、Cr之间为显著正相关,其含量具有共同的变化趋势,表明这些重金属污染具有同源性。4种重金属元素与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、粒径相关性也较强,其含量与分布以自然来源为主,主要来自大陆碎屑物质风化,且受沉积物粒度的影响,符合元素粒度控制规律<sup>[28]</sup>。

As与Cd、Hg的相关性较小,Cd与Hg相关

表 3 重金属元素、 $Al_2O_3$ 、有机质、中值粒径 Pearson 相关系数Table 3 Pearson correlation coefficient of heavy metal elements,  $Al_2O_3$ , organic matter, and Mz

	$Al_2O_3$	Cu	Zn	Pb	Cr	As	Cd	Hg	Mz	Org. M
$Al_2O_3$	1.000									
Cu	0.735**	1.000								
Zn	0.820**	0.898**	1.000							
Pb	0.864**	0.767**	0.864**	1.000						
Cr	0.888**	0.709**	0.784**	0.719**	1.000					
As	0.315**	0.123	0.163*	0.301**	0.213**	1.000				
Cd	0.366**	0.476**	0.501**	0.439**	0.315**	-0.118	1.000			
Hg	0.322**	0.363**	0.400**	0.438**	0.243**	0.073	0.484**	1.000		
Mz	0.718**	0.519**	0.587**	0.505**	0.768**	0.197*	0.284**	0.207**	1.000	
Org. M	0.742**	0.848**	0.844**	0.720**	0.698**	0.096	0.649**	0.453**	0.533**	1.000

注:  $n=164$ ; \*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

性强,表明 Cd 与 Hg 具同源性,且与 As 不具同源性。As 与有机质相关较弱,Cd、Hg 与有机质在 0.01 水平(双侧)上显著相关,表明 Cd、Hg 含量及分布受有机质影响,而 As 则主要受人为污染源的影响。为进一步辨别这些重金属之间的联系和来源,对其进行主成分分析。

### 2.3 重金属来源及影响因素

许多研究证实,主成分分析方法能够为分析沉积物中元素的来源和影响元素富集的主要因素方面提供明确信息<sup>[29,30]</sup>。进行主成分分析前,需要对因子进行检验,看是否适合进行因子分析。一般而言,各变量的 KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)检验统计量,用于检查变量间的偏相关性,取值在 0~1 之前。KMO 统计量越接近于 1,说明变量间的偏相关性越强,因子分析的效果越好。 Bartlett 球形检验(Bartlett 球形检验),用于检验各变量是否独立,一般而言,Bartlett 球形检验相伴概率  $< 0.05$  时,说明各变量间具有相关性,因子分析有效。本研究利用各项实测数据进行 SPSS 因子分析得出,  $KMO=0.832$ , Bartlett 球度检验相伴概率为 0,  $< 0.05$ , 因此,本研究数据适合用于因子分析。由元素主成分分析结果(图 3、表 4)可以辨识出 3 个主成分。3 个主成分的特征值为 6.856(4.746+1.800+1.136),累计方差贡献率为 85.36%,能够反映原来数量的大部分信息。其中 PC1 的贡献率为 52.73%,  $Al_2O_3$ 、Cu、Zn、

Pb、Cr 在 PC1 上占有较高荷载,且它们之间相关性较强,主要来源于大陆自然风化和侵蚀,通过胶体和矿物颗粒运移<sup>[31]</sup>。

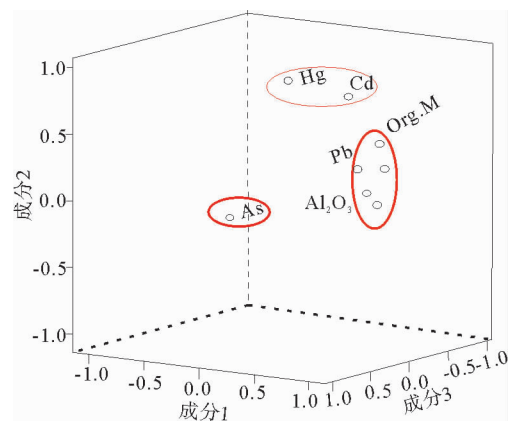


图 3 重金属元素与  $Al_2O_3$  及 Org. M 的主成分荷载  
Fig. 3 Principal component load of heavy metals and  $Al_2O_3$  and Org. M

当同一种元素在不同的主成分上均有相当荷载时,可认为其具备 2 种主成分来源<sup>[32]</sup>。As、Cd、Hg 为常受人为因素的影响元素,PC2 的贡献率为 20%,这一主成分上 Cd、Hg 占有较强的正荷载,有机质荷载为中等,有机质的降解而伴随的金属离子释放,重金属受有机质和人为因素影响。PC3 的贡献率为 12.63%,这一主成分上只有 As 具有较高的正荷载,受人为因素影响,其主要来源于生活污水、工农业废水排放等。生活污水排放

是三亚近沉积物中重金属含量较高的主要原因。红沙污水处理厂的污水因得不到处理而直接排放是陆域主要污染来源,海域主要污染来源于鱼箱养殖、船舶油污、发动机废气及船体腐蚀等。

表4 主成分分析计算结果

Table 4 The calculated results of principal component analysis (PCA)

元素	因子载荷		
	PC1	PC2	PC3
Cu	0.859	—	—
Zn	0.907	—	—
Pb	0.841	—	—
Cr	0.910	—	—
As	—	—	0.952
Cd	—	0.734	—
Hg	—	0.899	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.914	—	—
Org. M	0.809	0.442	—
特征值	4.746	1.800	1.136
方差贡献率	52.73%	20%	12.63%
累计方差贡献率	52.73%	72.73%	85.36%

注:—表示主成分 $<0.4$

表5 重金属含量在不同生物效应浓度范围内样品数占总样品数的比重

Table 5 The proportion of samples in different biological effect ranges in the total number of samples /%

元素	<ERL	ERL-ERM	>ERM
Cu	99.4(163/164)	0.6(1/164)	0
Zn	99.4(163/164)	0.6(1/164)	0
Pb	98.2(161/164)	1.8(3/164)	0
Cr	99.4(163/164)	0.6(1/164)	0
As	95.7(157/164)	4.3(7/164)	0
Cd	100(164/164)	0	0
Hg	86.5(141/164)	13.5(23/164)	0

注:ERL:生物效应阈值浓度低值;ERM:生物效应阈值浓度中值

## 2.4 环境质量评价

### 2.4.1 质量标准对照法

分析样品结果(表1、2)可知:研究区总重量

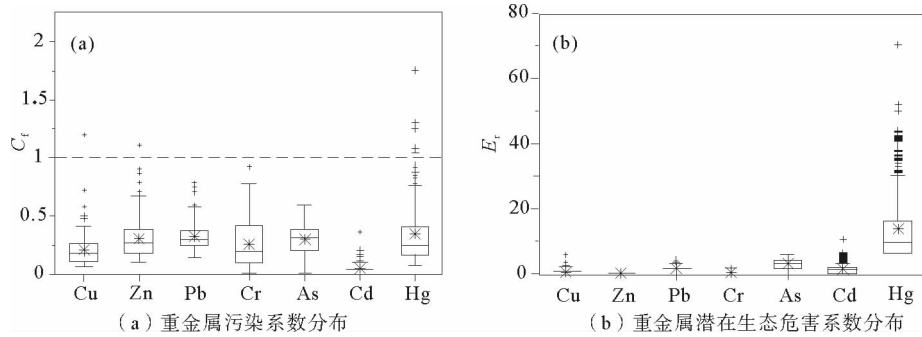
金属含量较低,且其均值均低于国家海洋沉积物质量一类标准,其中Cu、Zn、Cr、Hg最高值均低于国家二类标准(GB 18668—2002)<sup>[33]</sup>。生物效应浓度可以用来指示环境质量<sup>[24,34]</sup>,通过对比各站位沉积物中的重金属含量与沉积物重金属生物效应阈值,即表5可知:Cd元素在所有站位均低于生物效应阈值浓度低值(ERL),Cu、Zn、Cr元素只有一个站位在ERL(生物效应阈值浓度低值)和ERM(生物效应阈值浓度中值)之间,其余163个站位均小于ERL,表明它们对沉积环境很少产生不利影响;Pb元素有3个站位在ERL和ERM之间,161个站位小于ERL。As有7个站位在ERL和ERM之间,Hg有23个站位在ERL和ERM之间,且主要分布在榆林湾,表明这2种元素在该区域已对底质环境产生不利的生态效应。但这7种重金属在164个站位的含量都小于ERM,因此,研究区的单一重金属污染物对底质环境影响较小。但滨海旅游城市对生态环境要求较高,需要加强Hg的监测及其对地质环境影响的研究。

### 2.4.2 潜在生态危害指数法

应用潜在生态危害指数法对重金属进行评价,单因子污染系数( $C_f$ )和潜在生态风险系数( $E_r$ )见表6,其污染系数和潜在生态危害系数分布见图4。重金属元素 $C_f$ 均值 $<1$ ,参照表2的评价标准,7种元素的绝大部分站位的 $C_f$ 值都小于1,属于低污染程度,除了Cu、Zn和Hg元素有少量站位的 $C_f$ 值在1~2之间,属于低到中等污染程度。各元素的平均污染程度依次为:Hg>Pb>Zn>As>Cr>Cu>Cd,Hg是研究区主要的污

表6 重金属单项污染系数( $C_f$ )和潜在生态危害系数( $E_r$ )  
Table 6 Single factor evaluation( $C_f$ ) and potential ecological risk coefficients( $E_r$ ) of heavy metals

重金 属	$C_f$			$E_r$		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
Cu	1.20	0.07	0.21	5.99	0.34	1.05
Zn	1.11	0.11	0.31	1.11	0.11	0.31
Pb	0.79	0.14	0.32	3.94	0.69	1.60
Cr	0.93	0.01	0.26	1.85	0.02	0.52
As	0.59	0.01	0.30	5.94	0.07	3.02
Cd	0.35	0.00	0.05	10.62	0.12	1.62
Hg	1.75	0.07	0.35	70.08	2.88	13.87



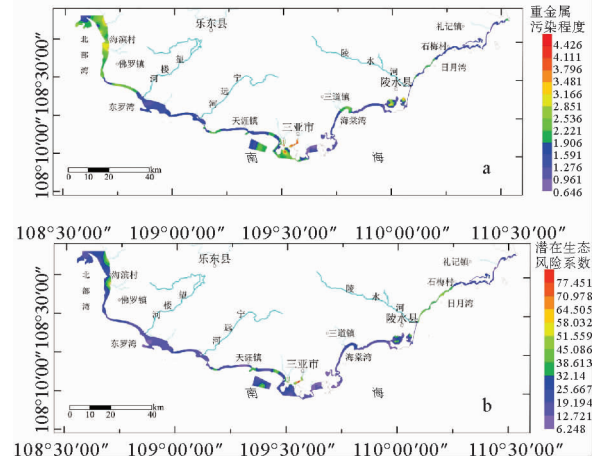
注:箱体为四分位数;中间的横线为中位数,星形符号表示为平均值;两头伸出的线条分别表示两个极端值;十字符号表示离群值

图 4 重金属污染系数和潜在生态危害系数分布特征

Fig. 4 Distribution of pollution coefficient and potential ecological risk

染因子。重金属总体污染程度系数  $C_d$  值的范围为 0.64~4.46,平均值为 1.80,为低污染程度。全区总体污染较严重的区域为榆林湾,可能与近陆源排污有关,例如沿岸居民生活垃圾直接倾倒入海;另外据 2014 年海南省国家重点监控企业监督性监测年报数据显示,榆林湾附近的红沙污水处理厂污染源废水排放达标率较低,未达标的废水和未处理的生活垃圾直接排放入海是导致该区域污染的直接原因<sup>[35]</sup>。因此,控制污水废水超标直接排放、改变居民生活垃圾处理方式是控制污染持续累计的重要途径。

Cr、Zn、As、Cd、Cu 和 Pb 的潜在生态风险系数  $E_r$  值均  $<40$ ,其潜在生态危害均处于低风险状态。Hg 的  $E_r$  均值  $<40$ ,绝大多数站位处于低风险水平,但有 6 个站位处于中等风险水平,主要分布在新村港北部和榆林湾,该区域是红树林密集区,有机质对该元素的贡献较大。各重金属潜在生态危害等级排序依次为  $Hg > As > Cd > Pb > Cu > Cr > Zn$ 。潜在生态危害系数等级  $E_{RI}$  值的范围为 6.24~84.15,平均值为 21.97,综合潜在生态风险水平较低(图 5)。与单因素污染系数相比,生态危害系数考虑了重金属的生物毒性,因此  $E_r$  与  $C_i$  计算结果的排序差异较大,但其结果更能反映研究区重金属含量所产生的潜在生态危害。由于 Hg 的毒性系数与其他元素的差异较大,其  $E_r$  值范围也相应扩大很多。Hg 是最主要的生态危害因子,其他重金属元素风险相对较低,因此,研究区作为人口密集的旅游胜地,应将 Hg 元素是作为主要的监测与生态研究对象,尤其在人类活动较强区域,如榆林湾、新村港等地。



(a) 重金属污染程度( $C_d$ )分布;  
(b) 潜在生态风险系数( $E_{RI}$ )分布

图 5 重金属污染程度( $C_d$ )和潜在生态风险系数( $E_{RI}$ )分布

Fig. 5 Distribution of heavy metal pollution ( $C_d$ ) and potential ecological risk factor ( $E_{RI}$ )

### 3 结论

研究区 Cu、Pb、Zn、Cr、As、Hg、Cd 平均含量分别为 10.45、22.38、53.72、23.42、4.52、4.52、0.35  $\mu\text{g/g}$ ,主要富集在新村港、黎安港、南港港及榆林湾等人为因素影响较强的区域。Cu、Pb、Zn、Cr 受沉积物粒度制约,来源于自然风化和侵蚀;As 受人为因素影响,来源于生活污水、鱼箱养殖、船舶油污等;Hg、Cd 受有机质及人为因素共同影响。与国内的旅游港湾对比,Hg 元素明显偏高,榆林湾及新村港区域 As、Hg 对底质沉积环境产生不利影响,需进一步控制污水排放和养殖规模。

重金属潜在生态危害程度低,但研究区作为旅游胜地,对环境质量要求较高,应加强防范重金属污染存在的隐患和风险,避免在沉积物中的持续累积,尤其是 Hg 元素。

#### 参考文献:

- [1] 王伟力,耿安朝,刘花台,等. 九龙江口表层沉积物重金属分布及潜在生态风险评价[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(4):502-507.
- [2] Huang P, Li T, Li A, et al. Distribution, enrichment and sources of heavy metals in surface sediments of the North Yellow Sea[J]. Continental Shelf Research, 2014, 73(1): 1-13.
- [3] 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.
- [4] 陈亮,李团结,杨文丰,等. 南海北部近海沉积物重金属分布及来源[J]. 生态环境学报, 2016, 25(3):464-470.
- [5] 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.
- [6] 刘建波,刘洁,陈春华,等. 三亚湾表层沉积物中重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(7):106-109.
- [7] 甘华阳,何海军,张卫坤,等. 三亚河沉积物中重金属生态风险评价与污染历史[J]. 生态环境学报, 2015, 24(11): 1878-1885.
- [8] 甘居利,贾晓平,李纯厚,等. 南海北部陆架区表层沉积物中重金属分布和污染状况[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(1):36-42.
- [9] 王红晋,叶思源,杜远生,等. 胶州湾东部和青岛前海表层沉积物重金属分布特征及其对比研究[J]. 海洋湖沼通报, 2007(4):80-86.
- [10] 魏璟玟,张焕玲,李铁,等. 胶州湾及青岛近海表层沉积物重金属赋存形态研究[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 2012, 42(增刊):157-164.
- [11] 刘飞,钟少军,蒲晓强,等. 胶州湾李村河口沉积物中重金属分布特征及其控制因素[J]. 海洋科学, 2006, 30(4): 31-35.
- [12] 李凤业,李学刚,齐君,等. 近百年来胶州湾沉积物中重金属元素的累积过程及其环境意义[J]. 海洋学研究, 2011, 29(2):35-45.
- [13] 柴小平,胡宝兰,魏娜,等. 杭州湾及邻近海域表层沉积物重金属的分布、来源及评价[J]. 环境科学学报, 2015, 35(12):3906-3916.
- [14] 倪志鑫,张霞,蔡伟叙,等. 珠江口沉积物中重金属分布、形态特征及风险分析[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(3):321-328.
- [15] 孙妮,黄蔚霞,于红兵. 湛江港海区沉积物和海洋生物中重金属的富集特征分析与评价[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(5):669-672.
- [16] 罗先香,张蕊,杨建强,等. 莱州湾表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. 生态环境学报, 2010, 19(2):262-269.
- [17] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment to logical approach [J]. Water Research, 1998, 14(8): 975-1001.
- [18] 陈静生,周家义. 中国水环境重金属研究[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1992: 168-170.
- [19] 甘华阳,梁开,郑志昌. 珠江口表层沉积物中微量元素地球化学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(4):131-139.
- [20] 夏南,薛桂澄,傅杨荣,等. 海南岛近海域表层沉积物中重金属元素含量状况及生态风险分析[J]. 资源环境与工程, 2011, 25(3):244-247.
- [21] 刘珊珊,张勇,毕世普,等. 青岛近海底质沉积物重金属元素分布特征及环境质量评价[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(6):891-897.
- [22] 江洪友,刘宪斌,张秋丰,等. 天津近海域沉积物重金属及分布与生态风险分析[J]. 海洋科学, 2013, 37(9):82-89.
- [23] 甘华阳,郑志昌,梁开,等. 广西北海近海域表层沉积物的重金属分布及来源分析[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(5):698-704.
- [24] Long E R, Macdonald D D, Smith S L, et al. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and sediments [J]. Environmental Management, 1995, 19(1): 81-97.
- [25] 杨振,胡明安,黄松. 大宝山矿区河流表层沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 桂林工学院学报, 2007, 27(1):44-49.
- [26] 彭晓彤,周怀阳,翁焕新,等. 珠江口沉积物主元素的组成分布特征及其地化意义[J]. 浙江大学学报:理学版, 2003, 30(6):687-702.
- [27] 孟翊,刘苍宇,程江. 长江口沉积物重金属元素地球化学特征及其底质环境评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(3):37-43.
- [28] 赵一阳. 地球化学方面名词解释(续)[J]. 海洋科学, 1980, 4(3): 33.
- [29] Hu B Q, Cui R Y, Li J, et al. Occurrence and distribution of heavy metal in surface sediments of the Changhua River Estuary and adjacent shelf (Hainan Island) [J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 76(1/2): 400-405.
- [30] 李玉,俞志明,宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源[J]. 环境科学, 2016, 27(1): 137-141.
- [31] Gibbs R J. Metal in the sediments along the Hudson River estuary [J]. Environmental International, 1994, 20(4): 507-516.
- [32] Wang H Y, Lu S G. Spatial distribution, source identification and affecting factors of heavy metals contamination in urban-suburban soils of Lishui city, China [J]. Environ-



- mental Earth Sciences, 2001, 64(7): 1921-1929.
- [33] 国家技术监督局. GB 18668—2002 海洋沉积物质量[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [34] 王 昕,乔淑卿,高晶晶,等. 小麦岛附近海域表层沉积物重金属分布特征及环境评价[J]. 海洋通报,2013,32(3): 287-295.
- [35] 海南省环境监测中心站. 海南省国家重点监控企业监督性监测年报[R]. 海口:海南省环境监测中心站,2014.

## DISTRIBUTION PATTERN OF HEAVY METALS IN THE COASTAL SEDIMENT OF SOUTHERN HAINAN ISLAND AND ECOLOGICAL RISK ASSESSMENT

HE Haijun<sup>1</sup>, GAN Huayang<sup>1</sup>, HE Jinxian<sup>2</sup>, XIA Zhen<sup>1</sup>, RUAN Ming<sup>3</sup>, YANG Yongpeng<sup>3</sup>

(1 Guangzhou Marine Geological Survey, Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Guangzhou 510760, China; 2 School of Resources and Geoscience, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China; 3 Hainan Geological Survey, Haikou, Hainan 570206, China)

**Abstract:** The southern coast of Hainan Island is a famous tropical beach for tourism. Careful management of environment is required. However, there is lack of ecological risks evaluation in the region for heavy metal contamination. We made a survey and data analysis of heavy metals in the region recently. 164 samples of surface sediments were collected and analyzed, and the distribution patterns, influencing factors and possible ecological risk of heavy metals discussed. The results show that the contents of Cu, Pb, Zn, Cr, As, Hg, Cd are 10.45  $\mu\text{g/g}$ , 22.38  $\mu\text{g/g}$ , 53.72  $\mu\text{g/g}$ , 23.42  $\mu\text{g/g}$ , 4.52  $\mu\text{g/g}$ , 0.09  $\mu\text{g/g}$ , 0.05  $\mu\text{g/g}$  respectively. Heavy metals are enriched in the Yulin Bay and Xincun Harbor. Heavy metals in other areas are relatively low compared to the densely populated harbor areas. Hg is specifically high and increasing in recent years. The contents and distribution of Cu, Pb, Zn, Cr are obviously controlled by grain size. They are mainly from natural weathering and erosion. The distribution of As is affected by human factors, and it is mainly from domestic sewages, fish cage culture, oil seepages and other sources. Hg and Cd owe their origin to degradation of organic matters and human activities. Single metal pollutant has little effect on the environment, but the overall evaluation of potential ecological risk index results indicates that in some of the stations, sediments have been contaminated by multiple heavy metals, for examples, in the Yulin Bay and Xincun Lagoon, due to the impact of sewage discharge. Further control of farming and sewage contaminated areas is required in order to prevent the region from heavy metal pollution.

**Key words:** southern Hainan Island; heavy metal; distribution; material sources; ecological risk evaluation