

珠海高栏港湾表层沉积物重金属分布特征及来源分析评价^{*}

柯盛, 陈春亮, 谢群, 孙省利

(广东海洋大学分析测试中心 湛江 524088)

摘要:于 2013 年 5 月对高栏港湾内 11 个采样站位表层沉积物中 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr 与 As 等重金属元素进行测定,探讨了表层沉积物重金属平均含量及其分布特征。并对由 11 个采样站位分组而成的 4 个区域(填海区、浇灌养殖排污区、航道区与外海区)进行了表层沉积物重金属的污染程度分析以及潜在生态风险评价。结果表明,该湾表层沉积物重金属的平均含量较低,除 Cu 与 Cr 属于国家海洋沉积物二类标准外,其余 4 种元素均低于国家海洋沉积物一类标准,平均含量由多到少依次为 Zn、Cr、Cu、Pb、As、Cd。重金属的分布特征具有明显的区域性:除 Cr 外,其余 5 种重金属元素含量由高到低的区域依次为:填海区、浇灌养殖排污区、航道区、外海区。高栏港湾表层沉积物重金属单因子污染程度总体不高,属于中等污染水平,污染程度排序由大到小依次为 Cd、Cu、Zn、Pb、As、Cr。高栏港湾表层沉积物生态风险评价处于较低水平,区域评价上由高到低依次为:填海区、浇灌养殖排污区、航道区、外海区,其中填海区的生态风险评价为中等水平,主要受 Cd 元素的高风险水平的影响。

关键词:分布;潜在生态风险评价;重金属;表层沉积物;高栏港湾

中图分类号:P736.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-9857(2015)11-0092-07

高栏港湾位于国家发改委核准的省级经济开发区——高栏港经济开发区,该区目前已初步形成了以石化、电力、能源、钢铁、装备制造为主导的重化产业格局,高栏港湾则将成为该开发区货物运输的主要载体。目前,高栏港湾内已正筹建多个液体化工品码头以及万吨级石化大码头来应对日趋发展的石化经济。可是,随着港湾内填海海域面积的扩大、建筑原废料的沿岸堆积以及日后码头建成运营期间都极有可能给高栏港湾带来严重的环境污染隐患。重金属是近海环境中最主要的污染物之一,进入水体后的重金属被吸附至水体内的悬浮颗粒物以及底层沉积物中,当环境条件发生变化时,上覆水水体和沉积物之间的平衡被打破^[1],沉积物中的重金属被释放至水体^[2],引起二次污染。因此,海洋沉积物中重金属的空间分布特征能一方面反映海洋的污染状况^[3-4]。目前,尚未见有关于高栏港湾沉

积物与水体中重金属的研究成果。因此,通过考察高栏港湾沉积物中重金属的含量水平与分布特征,探讨研究区域内沉积物重金属的污染状况和潜在生态危害程度,将有利于为高栏港经济开发区的产业布局与规划以及海湾资源的可持续利用提供可靠客观的科学依据。

1 材料与方法

1.1 站位布设与样品采集

为了能更客观地反映高栏港湾表层沉积物的分布特征,本调查所设置的 11 个站位将覆盖海湾内 4 个性质不同的海域:海湾西北侧的填海区海域(S1、S5、S7)、东南侧的浇灌养殖排污区海域(S2、S3)、海湾中部的航道区海域(S4、S6、S8)以及湾口处的外海区(S9、S10、S11)(图 1)。本次调查站位参照《海洋监测规范》^[5]进行布设,于 2013 年 5 月利用重力式柱状采样器采

^{*} 基金项目:海洋公益性行业科研专项(200905005-05)。

集并将 0~5 cm 的表层沉积物样品移至洁净的聚乙烯封口袋,除尽空气后密封,当天送回实验室冷冻备用。

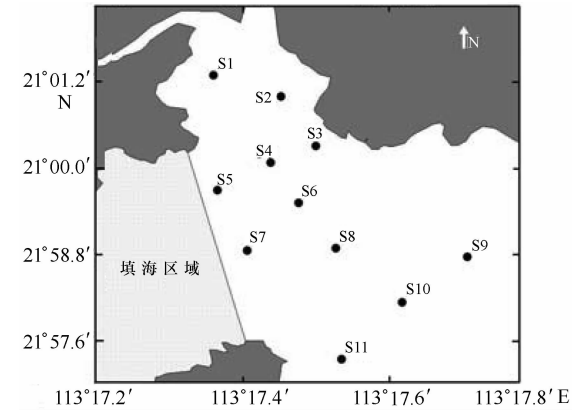


图 1 高栏港湾采样站位

1.2 样品前处理与测定

将已冻结的沉积物样品在室温下进行解冻,然后置于常温下自然风干,除去明显的杂物后充分混匀、研磨、过筛(200 目尼龙筛),将过筛后的样品分装进透明洁净聚乙烯瓶,并置于干燥器内待用。采用 HNO₃—HClO₄—HF 消解体系对样品进行消解,并采用国家标准物质进行质量监控已确保样品数据的可靠性。并用安捷伦 ICP—MS 对样品消解液中的铜(Cu)、锌(Zn)、镉(Cd)、铅(Pb)、铬(Cr)以及砷(As)等元素进行测定。

1.3 评价方法

1.3.1 沉积物重金属污染程度

以单因子污染指数 C_i^t (实测污染物含量与背景值的比值)及综合污染指数 C_d (各单因子污染系数 C_i^t 之和)来表征沉积物重金属污染程度(表 1)。用于分析重金属污染程度的重金属背景值并无统一标准,鉴于本研究海湾为广东省珠海市辖内的新兴工业港湾,故采用广东省沿海沉积物背景值^[6](Cu、Zn、Cd、Pb、Cr 以及 As 元素的背景值分别为 15.5 mg/kg、63 mg/kg、0.137 mg/kg、30 mg/kg、106 mg/kg 及 13 mg/kg)

1.3.2 Hakanson 潜在生态风险评价^[7]

单因子潜在生态风险系数(E_i^t)及综合生态风险系数(E_{RI})是沉积物质量评价较为广泛应用的方法之一,该指数能反映不同环境对重金属的敏感性差异(表 2)。

表 1 沉积物重金属污染程度

C_i^t	单个重金属污染程度	C_d	重金属总体污染程度
<1	低	<6	低
1~3	中等	6~12	中等
3~6	重	12~24	重
≥6	严重	≥24	严重

表 2 潜在生态风险等级评价

E_i^t	单个重金属潜在生态危害程度	E_{RI}	重金属总体潜在生态危害程度
<40	低	<150	低
40~80	中等	150~300	中等
80~160	较重	300~600	重
160~320	重	≥600	严重
≥320	严重		

沉积物中重金属的潜在生态风险指数 E_{RI} 公式为

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

式中: E_{RI} 为所有重金属的潜在生态风险指数; E_i^t 为重金属 i 的潜在生态风险系数; T_r^i 为重金属响应系数,反映重金属的毒性水平,Cu、Zn、Cd、Pb、Cr 以及 As 的毒性响应系数分别为 5、1、30、5、2 以及 10。

2 结果与讨论

2.1 珠海高栏港湾表层沉积物重金属含量水平

2013 年 5 月珠海高栏港湾的表层沉积物各重金属测定结果如表 3 所示。高栏港湾的表层沉积物中各重金属的平均含量由多到少依次为:Zn、Cr、Cu、Pb、As、Cd。

Zn:是表层沉积物中含量最高的元素,其平均含量为 119.77 mg/kg,低于国家海洋沉积物 I 类质量标准^[8]。

变化范围为 94.51~159.13 mg/kg,最小值出现在 S11,最大值则出现在 S5,呈现出近岸海域向远岸海域递减。

Cr:平均含量为 83.79 mg/kg,属于国家海洋沉积物 II 类质量标准。含量变化范围为 67.76~97.86 mg/kg,最小值出现在 S9,最大值则出现在 S1。仅 S9、S10 及 S6 低于国家海洋沉积物 I

类质量标准,其余 8 个站位均属于国家海洋沉积物Ⅱ类质量标准。Cr 含量的变异系数较低,说明 Cr 在各站位间的差别较小。

Cd:是表层沉积物中含量最低的元素,含量变化范围是 0.29 ~0.84 mg/kg,最大值是最小值 3 倍左右,且变异系数较大,达到了 41.9%,表明 Cd 的地区分布差别较大。其平均值 0.43 mg/kg,虽然低于国家海洋沉积物Ⅰ类质量标准,但位于填海区海域的 S1 含量则较高,属于国家海洋沉积物Ⅱ类质量标准。

Cu:平均含量为 43.07 mg/kg,最低值出现在 S11,为 28.38 mg/kg,而 S1 的则达到最大值为 61.84 mg/kg,其余站位由大到小依次为 S5、S7、S2、S3、S4、S6、S10、S8、S9,由河口处向湾口处递减,海湾沿岸向海湾中部及外部递减。

Pb 与 As: Pb 与 As 的平均含量分别为 39.11 mg/kg 与 17.46 mg/kg,均低于国家海洋沉积物Ⅰ类质量标准。而这两个元素的最低值均出现在外海区的 S11(Pb 为 31.29 mg/kg,As 为 11.40 mg/kg),而最大值则分布出现在填海区的 S5(Pb 为 52.71 mg/kg)及 S7(30.25 为 mg/kg)。

表 4 为高栏港湾表层沉积物各重金属含量范围、均值与国内外其他海湾的比较。通过对比分析发现:5 个大陆的海湾中,高栏湾的 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr 以及 As 元素含量处于中等水平,比工业化发展程度较高的深圳湾低,比处于工业发展期的莱州湾高。与香港海岸、Palermo Gulf 相比,则除高栏港湾的 Cd 略高外,其余 5 个重金属元素均低于这两个海湾。

表 3 高栏港海域表层沉积物重金属元素含量

站位	各重金属浓度						mg/kg
	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As	
S1	61.84	155.46	0.84	52.18	97.86	20.97	
S2	49.10	113.48	0.40	36.61	95.92	15.35	
S3	46.60	118.18	0.44	37.92	92.28	18.00	
S4	41.91	102.81	0.30	33.31	83.75	14.20	
S5	59.85	159.13	0.56	52.71	87.62	22.60	
S6	37.15	109.05	0.29	36.11	76.38	16.75	
S7	52.25	154.69	0.63	49.53	85.03	30.25	
S8	33.11	105.82	0.30	35.30	83.45	18.20	
S9	29.11	101.53	0.29	32.38	67.76	13.60	
S10	34.46	102.86	0.32	32.92	69.44	11.70	
S11	28.38	94.51	0.34	31.29	82.17	11.40	
范围	28.38~61.84	94.51~159.13	0.29~0.84	31.29~52.71	67.76~97.86	11.40~30.25	
平均值	43.07	119.77	0.43	39.11	83.79	17.46	
中值	41.91	109.05	0.34	36.11	83.75	16.75	
标准偏差	11.78	24.37	0.18	8.21	9.76	5.51	
变异系数%	27.4	20.3	41.9	21.0	11.6	31.6	
沉积物Ⅰ/Ⅱ类质量标准	35 / 100	150 / 350	0.5 / 1.50	60 / 130	80 / 150	20 / 65	

表 4 高栏港湾表层沉积物重金属含量与其他海湾比较

海湾	各元素含量范围及平均值						mg/kg
	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As	
高栏港	28.38~61.84	94.51~159.13	0.29~0.84	31.29~52.71	67.76~97.86	11.40~30.25	
	(43.07)	(119.77)	(0.43)	(39.11)	(82.79)	(17.55)	

续表

海湾	各元素含量范围及平均值					
	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As
湛江湾 ^[9]	19.18~39.78 (29.51)	76.30~134.4 (110.02)	0.12~0.29 (0.205)	43.44~64.08 (56.49)	72.58~95.17 (84.84)	
深圳湾 ^[10]	7.96~101.63 (68.94)	355.75~565.50 (489.08)	1.19~6.58 (4.61)	11.80~63.24 (38.4)		
莱州湾 ^[11]	0.11~47.24 (14.97)	29.60~81.50 (50.8)	0.04~0.29 (0.11)	3.18~34.22 (11.7)		3.24~22.51 (9.2)
泉州湾 ^[12]	24.8~119.7 (71.4)	105.5~241.9 (179.6)	0.28~0.89 (0.59)	34.3~100.9 (67.7)		17.7~30.2 (21.7)
Hong Kong coasts ^[13]	1~4 000 (118.68)	17~190 (147.73)	0.1~5.3 (0.33)	9~260 (53.56)		
Palermo Gulf ^[14]	47.2~698 (86.3)	47.2~752 (162)		13.5~220 (45.1)	13.3~86.6 (48.2)	

2.2 珠海高栏港湾表层沉积物重金属的分布特征

对各监测站位的表层沉积物中各重金属含量进行聚类分析得到相似性关系排序图(图 2)。以欧式平方距离为 15 作为聚类分析的类别划分线,4 个区域(填海区、浇灌养殖区、航道区及填海区)被明显划分出来,表明 4 个区域间的表层沉积物重金属的来源可能存在差异,而各区域内的监测站位间的表层沉积物重金属来源则存在一定相似性。

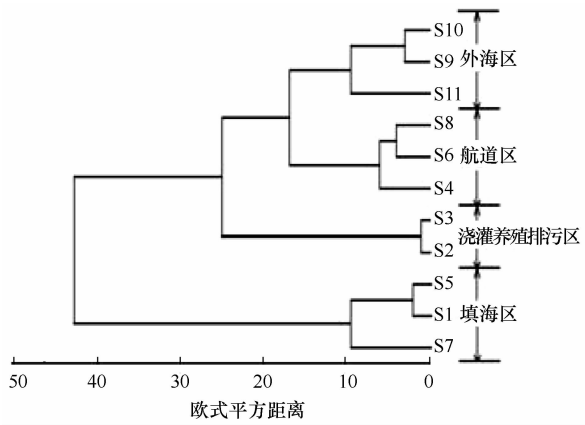


图 2 各采样站位表层沉积物含量均值的聚类结果

通过对 4 个区域表层沉积物各重金属含量进行分析(图 3)得出:① 从元素分布上,4 个区域的 6 种元素含量由多到少依次均为:Zn、Cr、Cu、Pb、As、Cd;② 区域分布上,Zn、Cu、Pb、As 以及

Cd 的等 5 种元素的含量由高到低的区域依次为:填海区、浇灌养殖排污区、航道区、外海区,即由湾内向湾外,工业化程度较高海域向非工业化或者工业化程度较低海域递减的变化趋势。由此可见,沉积物重金属含量高值区主要集中在人类活动较为活跃的地区附近海域。

填海区海域位于高栏港湾西部。人为堆填极有可能向海湾内带进大量的重金属,且填海的陆域上已建有多个大型的化工厂及原料存放仓,加之绕其而下的承载该区陆域排污及泄洪河流的河口处亦在填海区海域附近,因该河流量较小,故作为高栏港湾海域重金属最大的源与汇的底质沉积物受河口处涡流作用不明显,沉积物再悬浮的可能性较小,进而促使该区域沉积物重金属高值区的形成。

浇灌养殖排污区海域位于高栏港湾东部,其周边陆域主要以农业灌溉及水产养殖为主,虽然该区海域也接近河口流域,可周边仅为生活及农业区,并无大型工业区,因此所承载的污水排放压力较小,因此该区域主要受周边的农田灌溉以及养殖排污的重金属污染。周边农田的部分土壤会在农田灌溉或雨水的冲刷作用下进入海域,而养殖池内的淤污则将随养殖水体的更换被引排进周边海域。在河口附近的海域,坡度较缓,河口水体将以漫滩式向前推进,河水所流经海域的沉积物将在咸淡水的交汇作用下形成再悬浮

现象,加之潮汐作用,再悬浮的沉积物则将由湾内向湾口进行缓慢移动。当到达湾中部的航道区附近时,波浪作用有所加剧,其将增强沉积物沉淀与再悬浮相交替的迁移行为。当到达外海区,除受潮汐及波浪作用外,洋流对于沉积物的迁移也起到了重要的作用,因此沉积物的沉淀与再悬浮的交替作用愈加强烈,对沉积物起到了一定的扩散效应。从聚类分析(图 2)得知,当欧式平方距离为 25 时,外海区、航道区以及浇灌养殖排污区则聚合在一起,表明 3 个区域内表层沉积物的重金属污染可能来自同一污染源。因此,浇灌养殖排污区的沉积物重金属将有可能是高栏港湾中部及东部海域沉积物重金属污染的源头。

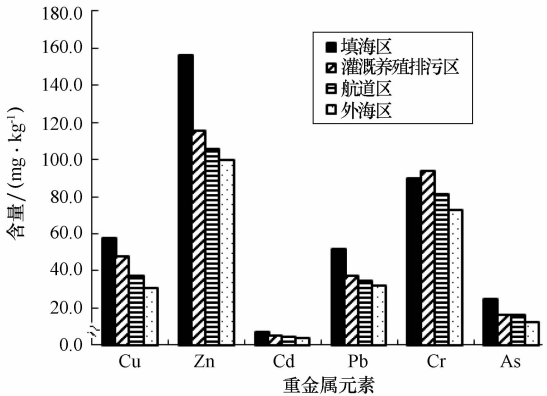


图 3 高栏港湾内 4 个海区的表层沉积物重金属含量

2.3 珠海高栏港湾表层沉积物重金属沉积行为相关性及来源分析

对高栏港湾内所有站位表层沉积物中 Zn、Cu、Pb、As、Cd 以及 Cr 等元素的测定结果进行 Pearson 相关分析。结果表明(表 5),Zn、Cu、Pb、As 及 Cd 等 5 种元素相互间的相关程度较高($r \geq 0.691$),表明这 5 种元素在高栏港湾环境沉积行为有较强的相似性,并且在沉积作用的影响下呈现出较为相似的分布特征;Cr 与 Zn、Pb、As 及 Cd 等元素间的相关程度较低($r \leq 0.649$),表明 Cr 的沉积行为与 Zn、Pb、As 及 Cd 等差异较大。通过对各元素平均含量的主成分的分析来验证 6 种元素之间的沉积行为差异性,该结果提取了两个主成分(图 4),因子 1 主要由 Zn、Cu、Pb、As 及 Cd 等元素组成,而因子 2 则仅与 Cr 相联系;两因子的方差累积百分比占总方差百分比的 93.0%,其中因子 1 占 81.3%,因子 2 占 11.7%。

对上述 6 种元素含量的主成分分析结果也验证了上述 6 种元素的沉积差异性,该分析结果提取了 2 个主成分(图 4)因子 1 主要 Zn、Cu、Pb、As 及 Cd 等元素组成,而因子 2 主要与 Cr 元素联系。本海湾表层沉积物各重金属元素间的关系与湛江湾的较为相似,导致 Cr 元素与其他元素关系间的差异可能是其在沉积物中的赋存形态与别的元素不一致有关。已有研究结果表明^[9,15-17],Cr 有+3 与+6 价两种价态,在晶体中主要存在晶格内部,消解时必须加 HF 酸消解才能完全把 Cr 酸洗出来,体现在土壤和沉积物中主要赋存形态为氧化态和残渣态,而 Zn、Pb 与 Cd 等元素的赋存形态则随环境条件变化较大,在各相中都有富集。

表 5 高栏港湾表层沉积物各重金属间 Pearson 相关矩阵

元素	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As
Cu	1	0.906**	0.863**	0.904**	0.749**	0.691*
Zn	0.906**	1	0.901**	0.996**	0.532	0.865**
Cd	0.863**	0.901**	1	0.907**	0.649	0.702*
Pb	0.904**	0.996**	0.907**	1	0.551	0.845**
Cr	0.749**	0.532	0.649	0.551	1	0.399
As	0.691*	0.865**	0.702*	0.845**	0.399	1

注:“**”、“*”分别代表 99%和 95%置信水平下显著相关。

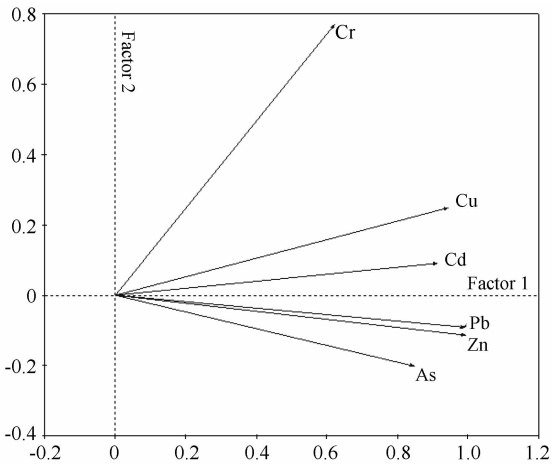


图 4 因子 1 与因子 2 间的关系

2.4 珠海高栏港湾表层沉积物重金属污染程度分析及潜在生态风险评价

从单因子污染指数(C_i^p)及单因子潜在生态风险系数(E_i^p)角度分析(表 6),Zn、Pb、As 以及

Cr 等 4 种元素在 4 个海区所处的污染级别一致:单因子污染指数(C_i^t)为中等污染水平,单因子潜在生态风险系数(E_i^t)则为低污染级别。虽然 Cu 元素在填海区与浇灌养殖排污区的单因子污染指数(C_i^t)均属重污染级别,但单因子潜在生态风险系数(E_i^t)则均为低污染级别。至于 Cd 的单因子污染指数(C_i^t)及单因子潜在生态风险系数

(E_i^t)在填海区与浇灌养殖排污区均表现为级别Ⅲ(重/较重)。综观整个高栏港湾,除 Cd 的外单因子污染指数(C_i^t)及单因子潜在生态风险系数(E_i^t)表现为中等污染及较重污染水平外,其余 5 种元素以中等污染以及低污染级别占主导。因此,可以推断 Cd 是整个高栏港湾最主要的重金属污染因子。

表 6 珠海高栏港湾各海区 C_i^t 、 E_i^t 、 C_d 、 E_{Ri} 分析结果

海区(站位)	C_i^t/E_i^t						C_d/E_{Ri}
	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As	
填海区(S1/S5/S7)	3.7/18.7	2.5/2.5	4.9/148.2	1.7/8.6	0.9/1.7	1.9/18.9	15.6/198.6
浇灌养殖排污区(S2/S3)	3.1/15.4	1.8/1.8	3.1/92.8	1.2/6.2	0.9/1.8	1.3/12.8	11.4/130.9
航道区(S4/S6/S8)	2.4/12.1	1.7/1.7	2.2/65.2	1.2/5.8	0.8/1.5	1.3/12.6	9.5/98.9
外海区(S9/S10/S11)	2.0/9.9	1.6/1.6	2.3/69.5	1.1/5.4	0.7/1.4	0.9/9.4	8.6/97.1
高栏港湾(S1~S11)	2.8/13.9	1.9/1.9	3.1/94.0	1.3/6.5	0.8/1.6	1.3/13.5	11.3/131.4

从表 7 得知,综合污染指数(C_d)及综合生态风险系数(E_{Ri})由高到低的区域依次为:填海区、浇灌养殖排污区、航道区、外海区,其中除填海区的综合污染指数(C_d)及综合生态风险系数(E_{Ri})为重及中等污染水平外,其余 3 个海区均为中低

污染水平,呈现出湾内比湾外污染严重,近岸海域比远岸海域污染严重,人类活动区域比未涉足人类活动区污染严重。整个海湾的综合污染指数(C_d)及综合生态风险系数(E_{Ri})则为中低污染级别,表明高栏港湾受重金属污染程度较低。

表 7 珠海高栏港湾各海区表层沉积物重金属污染程度分析及潜在生态风险评价等级

海区(站位)	C_i^t/E_i^t						C_d/E_{Ri}
	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	As	
填海区	重/低	中等/低	重/较重	中等/低	低/低	中等/低	重/中等
浇灌养殖排污区	重/低	中等/低	重/较重	中等/低	低/低	中等/低	中等/低
航道区	中等/低	中等/低	中等/中等	中等/低	低/低	中等/低	中等/低
外海区	中等/低	中等/低	中等/中等	中等/低	低/低	中等/低	中等/低
高栏港湾	中等/低	中等/低	中等/较重	中等/低	低/低	中等/低	中等/低

3 结论

- (1)高栏港湾表层沉积物中各重金属的平均含量由多到少依次为:Zn、Cr、Cu、Pb、As、Cd。除 Cr 外,其余 5 种重金属元素含量由高到低的区域依次为:填海区、浇灌养殖排污区、航道区、外海区。
- (2)Zn、Cu、Pb、As 及 Cd 等 5 种元素相互间的正相关程度较高,表明这 5 种元素在高栏港湾环境沉积行为有较强的相似性。通过相关性分析,浇灌养殖排污区、航道区及外海区的沉积物重金属污染来源存在一定的相似性。
- (3)重金属污染结果表明,高栏港湾表层沉

- 积物重金属单因子污染程度总体不高,属于中等污染水平,污染程度由大到小依次为 Cd、Cu、Zn、Pb、As、Cr。其中,填海区与浇灌养殖排污区的 Cu 与 Cd 元素的单因子污染指数为重污染水平,可推断 Cu 与 Cd 元素为填海区与浇灌养殖排污区的主要污染因子。
- (4)生态风险评价结果表明,整个高栏港湾受重金属的生态风险评价为低水平。可海湾内的填海区域的生态风险评价结果则被评定为中等污染水平。(参考文献转至第 110 页)

严禁污水直排入海;做好环保宣传和员工的技术、素质培训,增强员工的生态保护意识;制定污染事故应急预案,防止污染物外排、溢油等事故造成海洋环境污染。

(3)帆船港位于三亚国家级珊瑚礁自然保护区范围内,属于非常敏感的区域,建议定期对帆船港及附近海域开展环境监测,了解港口及附近海域海洋环境状况,减小对周边环境影

参考文献

[1] 国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会. GB 17378—2007 中华人民共和国国家标准:海洋监测规范[M]. 北京:中国标准出版社,2008.

[2] 杨新梅,陈志宏,焦亦平,等. 大连湾海水环境质量状况分析[J]. 海洋环境科学,2001,20(4):18—20.

[3] 邹景忠,董丽萍,秦保平. 渤海湾富营养化与赤潮问题的初步探讨[J]. 海洋环境科学,1983,2(2):41—54.

[4] 于子江,崔文林,杨建强. 青岛奥运帆船赛区及邻近海域海水环境质量分析与评价[J]. 城市环境与城市生态,2004,17(3):25—26.

[5] 韩秀荣. 长江口及邻近海域浮游植物生长的多环境效应因子影响解析研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2009.

[6] 何雪琴,温伟英,何清溪. 海南三亚湾海域水质状况评价[J]. 台湾海峡,2001,20(2):165—170.

[7] 王汉奎,董俊德,王友绍,等. 三亚湾近 3 年营养盐含量变化及其输送量的估算[J]. 热带海洋学报,2005,24(5):90—95.

[8] 李巧香,周永召,李鹏山. 夏季三亚湾近岸海域海水水质状况分析与评价[J]. 海洋湖沼通报,2010,3:100—106.

[9] 宋星宇,谭烨辉,黄良民. 三亚湾春夏季初级生产力的分布特征及环境影响研究[J]. 海洋环境科学,2011,30(1):19—23.

[10] 车志伟. 三亚湾海域关键水质因子的监测与评价[J]. 海南大学学报:自然科学版,2007,25(3):297—304.

[11] 车志伟,车志胜,李刚. 三亚湾海域环境质量现状调查与评价[J]. 海南大学学报:自然科学版,2009,22(1):70—72.

[12] 王慧棋,潘剑宇,车志伟. 三亚湾海水中无机氮、无机磷的时空分布和氮磷比值变化研究[J]. 科技传播,2012,9(1):99—100.

(上接第 97 页)

参考文献

[1] VALDES J, VARGAS G, SIFEDDINE A, et al. Distribution and enrichment evaluation of heavy metals in Mejillones Bay (23°S), Northern Chile; geochemical and statistical approach[J]. Marine Pollution Bulletin, 2005,50:1558—1568.

[2] SIN S N, CHUA H, LO W, et al. Assessment of heavy metal cations in sediment of Shing Mun River, Hong Kong[J]. Environmental International, 2001,26:297—301.

[3] 陈静生,邓宝山,陶澍,等. 环境地球化学[M]. 北京:海洋出版社,1990:196—235.

[4] BRICH G F, TAYLOR S E, MATTHAI C, et al. Small-scale spatial and temporal variance in the concentration of heavy metals in aquatic sediment: a review and some new concepts[J]. Environmental Pollution, 2001,113:357—372.

[5] GB17378.5—2007, 海洋监测规范—第 5 部分:沉积物分析[S].

[6] 甘华阳,梁开,郑志昌. 珠江口沉积物的重金属背景值及污染评价分区[J]. 地球与环境,2010,38(3):344—350.

[7] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control—a sediment logical approach[J]. Water Res., 1980,14:975—1001.

[8] 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.

[9] 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—648.

[10] 左平,汪亚平,程珺,等. 深圳湾近岸海域表层沉积物中重金属污染评价[J]. 海洋通报,2009,28(1):50—54.

[11] 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.

[12] 张玉凤,王立军,霍传林,等. 锦州湾表层沉积物中重金属污染状况评价[J]. 海洋环境科学,2008,27(3):258—260.

[13] ZHOU Feng, GUO Huaicheng, HAO Zejia. Spatial distribution of heavy metals in Hong Kong's marine sediments and their human impacts: A GISP—based chemometric approach[J]. Marine Pollution Bulletin, 2007,54:1372—1384.

[14] TRANCHINA L, BASILE S, BRAL M, et al. Distribution of heavy metals in marine sediments of Palermo Gulf (Sicily, Italy) [J]. Water Air Soil Pollut, 2008,191:245—256.

[15] 陈旭英,何增耀,吴建平. 土壤中铬的形态及其转化[J]. 环境科学,1994,15(3):53—57.

[16] 刘芳文,颜文,黄小平,等. 珠江口沉积物中重金属及其相态分布特征[J]. 热带海洋学报,2003,22(5):16—24.

[17] ADAMO P, ARIENZO M, IMPERATO M, et al. Distribution and partition of heavy metals in surface and sub-surface sediments of Naples city port[J]. Chemosphere, 2005,61:800—809.