

渤海表层沉积物重金属污染评价

陈江麟¹, 刘文新², 刘书臻², 林秀梅², 陶 澍²

(1. 国家海洋局 北海分局, 山东 青岛 266033; 2. 北京大学 环境学院地表过程分析与模拟实验室, 北京 100871)

摘要: 依据第二次全国海洋污染基线调查数据, 采用地积累指数和潜在生态风险因子两种方法对渤海表层沉积物中 As, Cd, Hg, Pb 进行污染分区评价。结果表明, 渤海全区内 Cd, Hg 和 Pb 存在较强的正相关关系。各海区重金属污染特征明显不同: (1) 北部辽东湾 Hg 和 Cd 污染最为严重; (2) 秦皇岛近岸 Hg 污染较为突出; (3) 南部莱州湾仅有轻微 Hg 污染, 而西部渤海湾没有出现上述金属污染; (4) 辽东半岛近岸和外海海区呈现偏中度 Hg 污染。

关键词: 渤海; 表层沉积物; 重金属; 地积累指数; 潜在生态风险因子

中图分类号: X832 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2004)12-0016-06

许多研究表明重金属(包括类金属元素)与生物大分子基团和遗传物质的相互作用可导致多器官的畸变、突变和癌变效应^[1-3]。进入水体的重金属大部分转移至悬浮颗粒物和底层沉积物中, 累积的重金属在一定条件下又释放进入上覆水。此外, 通过生物富集和放大作用, 重金属会对生态系统构成直接和间接的威胁^[4]。因此, 具有源和汇双重作用的沉积物在重金属污染评价中至关重要^[5]。

渤海三面环陆, 由 3 个海湾(即北部辽东湾、西部渤海湾、南部莱州湾)和中部盆地海区组成, 东部经渤海海峡与黄海相通。截至上世纪 90 年代初期, 渤海重金属污染(以 Hg 和 Cd 为代表)主要限于某些河口和港湾^[6-8]。自 1998 年起, 国家海洋局组织实施第二次全国海洋污染基线调查, 作者利用调查数据确定渤海表层沉积物重金属污染现状。受实测项目限制, 主要比较 As, Cd, Hg 和 Pb 的污染程度及空间分布特征, 并进行相应的潜在生态风险评价。

1 材料与方 法

1.1 站点分布

该调查在渤海海区布设的表层沉积物采样站点如图 1 所示。

调查海域按 5 m 等深线分为近岸区和外海区, 采样时间为 1998 年 5 月至 8 月。近岸区站点按地理位置分别归属辽东半岛近岸(简称辽东半岛, 1~5 号), 辽东湾(6~23 号), 秦皇岛近岸(简称秦皇岛, 24~

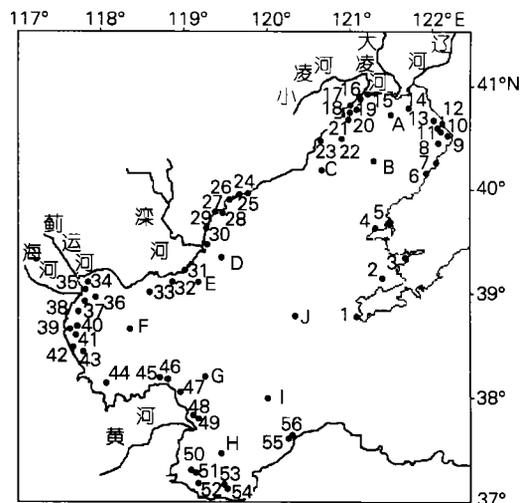


图 1 监测站点分布图

Fig. 1 Sketch map of monitoring stations

收稿日期: 2003-09-27; 修回日期: 2004-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(40021101)

作者简介: 陈江麟(1963-), 男, 浙江平湖人, 高级工程师, 硕士, 主要从事海洋环境保护和 GIS 技术在海洋科学中的应用, E-mail: xmban@public.qd.sd.cn 刘文新, 通讯作者, E-mail: wxliu@urban.pku.edu.cn

30号), 渤海湾(31~46号)和莱州湾(47~56号)5个海区。鉴于锦州湾和双台子-辽河口口的污染历史和特征^[9], 将辽东湾进一步划分为双台子-辽河(9~14号), 锦州湾(17~20号)和其它站点(在本文简称“辽东湾”, 6~8号, 15~16号, 21~23号)3个子海区。此外, 将黄河口附近站点划归黄河口(47~49号), 其它划归莱州湾(50~56号)。外海海区设置10个站点(A~J号)。

1.2 采样与分析

近岸海区采用箱式采泥器, 外海海区采用0.1 m²抓斗式采泥器。采集表层0~2 cm沉积物样品约500 g供重金属分析。样品装入聚乙烯袋中, 于0~4℃保

存, 并尽快测试。

分析As, Cd, Pb的样品前处理^[10]: 将解冻至室温的样品转移至瓷蒸发皿中, 在80~100℃烘箱内烘干。将干样在聚乙烯板上用聚乙烯棒压碎, 剔除砾石和生物残骸。在玛瑙钵中碾磨样品并全部通过160目筛, 充分混匀后缩分取样10~20 g供测定, 剩余样品留作副本保存。分析Hg(总汞)的样品前处理^[10]: 将解冻至室温的样品通风干燥, 将干样在聚乙烯板上用聚乙烯棒压碎, 剔除砾石和生物残骸。用瓷研钵粉碎, 加盖过80目筛, 充分混匀后缩分取样40~50 g供测定。样品消解用酸、分析方法和检出限见表1, 定量均采用外标法。

表1 金属元素分析方法

Tab. 1 Analytical method for the heavy metals

分析元素	消解用酸	分析方法	检出限(mg/kg)
As	浓硝酸+ 浓高氯酸+ 浓硫酸	砷钼酸-结晶紫外分光光度法	1
Cd	浓硝酸+ 浓高氯酸	原子吸收分光光度法	0.04
Hg	浓硝酸	冷原子吸收分光光度法	0.005
Pb	浓硝酸+ 浓高氯酸	原子吸收分光光度法	1

1.3 沉积物重金属污染评价方法

地积累指数(geoaccumulation index, I_{geo})是研究水体沉积物重金属污染的一种定量指标:

$$I_{geo, i} = \log_2 \left[\frac{C_i}{kB} \right]$$

其中 C_i 是元素 i 在粒径小于 $2 \mu\text{m}$ 沉积物中的质量分数, B_i 为粘质沉积岩(普通页岩)中该元素的地球化学背景值, 系数 k 用于校正区域背景值差异(一般取1.5)。按 I_{geo} 数值可划分为: $< 0, 0 \sim 1, 1 \sim 2, 2 \sim 3, 3 \sim 4, 4 \sim 5, > 5$ 共7级, 分别指示清洁(0), 轻度(1), 偏中度(2), 中度(3), 偏重(4), 严重(5)和极重污染(6)状况^[11, 12]。在沉积物重金属污染研究中, 金属的区域地球化学质量分数是一项重要参比值^[4], 应用时必须考虑沉积物的粒度分布。地积累指数法通常采用世界标准页岩(相当于 $< 2 \mu\text{m}$ 的粘土矿物)的平均组成作为参比值。第二次全国海洋污染基线调查中筛选样品粒径均大于 $2 \mu\text{m}$, 若直接应用原方法提供的参比值会造成污染水平偏低^[13]。为此, 选择国内学者测定的渤海表层沉积物中重金属质量分数(m)的背景值作为参比, 其中, 锦州湾和渤海湾取自各海区的背景值, 其它海区取全渤海的背景值, 如表2所示。

潜在生态风险因子(potential ecological risk factor,

表2 地球化学背景值(mg/kg)

Tab. 2 Background values for the heavy metals studied (mg/kg)

海区	$m(\text{As})$	$m(\text{Cd})$	$m(\text{Hg})$	$m(\text{Pb})$	来源
锦州湾	15	0.29	0.03	9.2*	[6, 9]
渤海湾	15	0.17*	0.05	25.0	[6, 14]
其它海区	15	0.10	0.01	14.0*	[6, 7]

* 取平均值。

$R_{E, i}$)方法中引入重金属沉积-毒理因子(sedimentological-toxicological factor, $T_{S, i}$)以表征对生态系统的危害程度^[15]:

$$R_{E, i} = \frac{C_i}{C_{i,n}} \times T_{S, i}$$

其中 C_i 和 $C_{i,n}$ 分别是第 i 种金属在表层沉积物中的质量分数和参比值。为与 $I_{geo, i}$ 方法具有可比性, $C_{i,n}$ 采用当地沉积物的平均背景值(见表2)。依据金属毒性的大量相关研究, 4种元素的 $T_{S, i}$ 取值分别为: $T_{S, As} = 10, T_{S, Cd} = 30, T_{S, Hg} = 40, T_{S, Pb} = 5$ ^[15]。由 $R_{E, i}$ 可将潜在生态风险分级为: $R_{E, i} < 20, 20 \leq R_{E, i} < 40, 40 \leq R_{E, i} < 80, 80 \leq R_{E, i} < 160, R_{E, i} \geq 160$, 分别代表无至轻微(a), 中等(b), 强(c), 很强(d)和极强(e)潜

在生态风险状况^[15]。

2 结果与讨论

2.1 各海区沉积物重金属质量分数

各海区站点表层沉积物中重金属质量分数(mg/kg)的分布状况如图 2 所示。

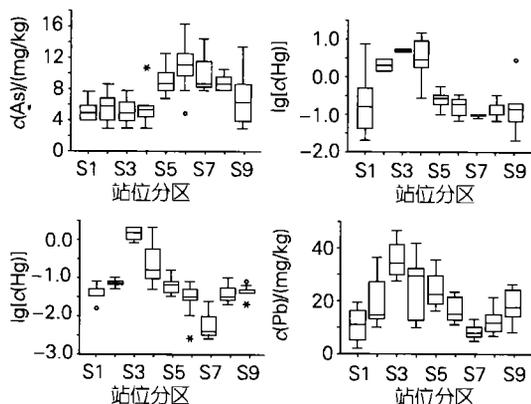


图 2 各海区表层沉积物中重金属质量分数分布的 Box 图

Fig. 2 Box plots of the metal concentrations in surface sediments in different areas

S1: 辽东半岛; S2: 双台子- 辽河; S3: 锦州湾; S4: 辽东湾; S5: 秦皇岛; S6: 渤海湾; S7: 黄河口; S8: 莱州湾; S9: 外海; Box 图包括中位数, 四分位数; °: 离散值(距离箱体一端是箱体长度 1.5- 3 倍); : 极端值(距离箱体一端大于箱体长度 3 倍); c: 重金属质量分数

S1: Liaodong Peninsula; S2: Shuangtaizi - Liaohe River; S3: Jinzhou Bay; S4: Liaodong Bay; S5: Qinhuangdao; S6: Bohai Bay; S7: Estuary of Huanghe River; S8: Laizhou Bay; S9: Outer Sea; The Box plots include median, quartiles; °: outliers; : extremes; C: mass praction of heavy metal

就整体而言,在北部海区(S2, S3 和 S4), Cd 和 Hg

的质量分数明显高于西部渤海湾,南部的黄河口和莱州湾,而且 Cd 和 Hg 的质量分数变动范围大于分布相对均匀的 As 和 Pb。

渤海海区内元素质量分数分布的 Pearson 相关系数列于表 3。这里, Cd, Hg 和 Pb 存在较强的正相关关系, As 则明显不同于上述 3 种元素。

2.2 各海区重金属地积累指数分布特征

图 3 指示各海区表层沉积物中 4 种金属 I_{geo} 的

表 3 元素间 Pearson 相关系数(n = 66)

Tab. 3 Pearson correlation coefficients of the elements (n = 66)

元素	As	Cd	Hg	Pb
As	1.00			
Cd	- 0.37*	1.00		
Hg	- 0.22	0.56*	1.00	
Pb	- 0.14	0.31*	0.56*	1.00

* 统计显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。

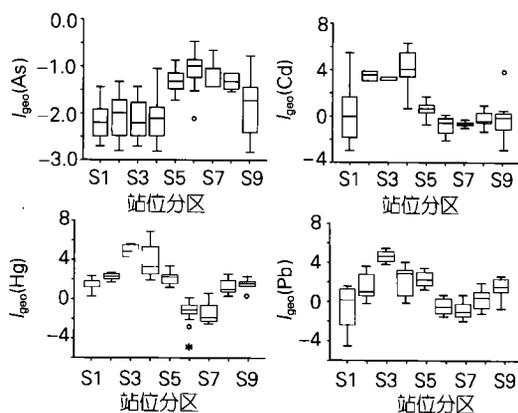


图 3 各海区 4 种元素 I_{geo} 分布的 Box 图

Fig. 3 Box plots of I_{geo} for the elements in different areas

表 4 各海区元素地积累指数平均值、污染分级、排序以及多金属加和排序

Tab. 4 Average of $I_{geo, i}$ and pollution grade and rank for single metal and multiple metals in different areas

海区(站点数)	$I_{geo, i}$ 平均值/ 分级/ 排序				多金属
	As	Cd	Hg	Pb	加和/ 分级/ 排序
辽东半岛(5)	- 2. 2/0/9	0. 5/1/5	1. 4/2/6	- 1. 4/0/8	- 1. 7/0/7
双台子- 辽河(6)	- 2. 1/0/6	3. 6/4/2	2. 2/3/3	- 0. 3/0/4	3. 4/4/3
锦州湾(4)	- 2. 1/0/6	3. 3/4/3	4. 9/5/1	1. 3/2/1	7. 4/6/1
辽东湾(8)	- 2. 1/0/6	4. 2/5/1	3. 9/4/2	0. 1/1/2	6. 1/6/2
秦皇岛(7)	- 1. 3/0/3	0. 6/1/4	2. 1/3/4	0. 1/1/2	1. 5/2/4
渤海湾(16)	- 1. 0/0/1	- 0. 7/0/9	- 1. 3/0/8	- 1. 2/0/7	- 4. 2/0/8
黄河口(3)	- 1. 2/0/2	- 0. 6/0/8	- 1. 3/0/8	- 1. 4/0/8	- 4. 5/0/9
莱州湾(7)	- 1. 3/0/3	- 0. 2/0/6	1. 3/2/7	- 0. 9/0/6	- 1. 1/0/6
外海(10)	- 1. 8/0/5	- 0. 3/0/7	1. 6/2/5	- 0. 3/0/4	- 0. 8/0/5

注: 元素 $I_{geo, i}$ 平均值= \sum 海区站点 $I_{geo, i}$ / 海区内站点数。

分布状况。各海区表层沉积物中4种金属的 I_{geo} 平均值、污染分级、排序以及多金属加和排序结果如表4。

对Cd和Hg而言,北部辽东湾海区(包括S2、S3和S4)的 I_{geo} 总体分级属偏重至严重污染,辽东半岛、秦皇岛、莱州湾和外海主要是偏中度至中度的Hg污染,而在西部渤海湾和南部黄河口,4种重金属都没有明显表现出污染迹象。渤海全区内As的污染分级最轻,而Pb只在锦州湾呈现偏中度污染。多金属加和的高污染分级也主要集中在北部海区。

2.3 各海区重金属潜在生态风险因子分布特征

各海区表层沉积物中4种金属 R_E 的分布状况参见图4,各海区表层沉积物中4种金属的 R_E 平均

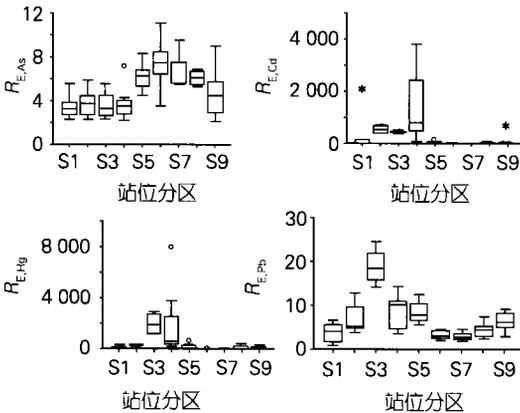


图4 各海区潜在生态风险因子 $R_{E,i}$ 的 Box 图

Fig. 4 Box plots of the potential ecological risk factor $R_{E,i}$ in different areas

值、风险分级、排序以及多金属加和排序如表5所示。

由图4和表5可以看出:(1)在北部海区(如S4、S3、S2以及S1),Cd和Hg的生态风险分级明显高于南部黄河口和西部渤海湾;(2)在秦皇岛沿岸、莱州湾和外海海区,主要生态风险源于Hg,其次是Cd;(3)4种重金属在渤海湾和黄河口的生态风险分级均很低;(4)渤海海区内Pb和As的潜在生态风险因子都保持在低水平。

2.4 海区污染分布特征

根据前述结果,表6汇总了渤海各海区表层沉积物中4种金属元素的污染分级和排序情况。

由公式, $I_{geo,i}$ 和 $R_{E,i}$ 有如下关系:

$$I_{geo,i} = \log_2 \left[\frac{R_{E,i}}{kT_{S,i}} \right]$$

因此,对单一元素,两种方法的计算结果必然有相似性,而差别主要归因于数据处理方法不同。根据表4、5、6,可以证实下述情况:在重金属污染的总体分布和变化特征上,两种方法所得的结果基本一致,其中 R_E 生态风险分级方法相对更保守一些。与 $R_{E,i}$ 中简单算术均值相比, I_{geo} 采用加权平均处理,能降低极值的影响。依照 I_{geo} , 北部辽东湾海区存在严重的Hg和Cd污染;在秦皇岛沿海岸区,Hg污染水平为中度;西部渤海湾目前没有出现上述金属的污染;而南部黄河口和莱州湾仅在莱州湾海区发生偏中度Hg污染;外海和辽东半岛偏中度Hg污染也需引起重视。从元素分布角度看,Hg污染程度最强,污染范围最广,污染程度高的站点绝大多数分布在北部海区,西部只有秦皇岛近岸存在中度污染;Cd的污染强度和范围与Hg近似,也主要集中在北部辽东湾海

表5 各海区元素潜在生态风险因子平均值、风险分级、排序以及多金属加和排序

Tab. 5 Average of $R_{E,i}$, risk grade and rank for single metal and multiple metals in different areas

海区(站点数)	$R_{E,i}$ 平均值/ 分级/ 排序				多金属
	As	Cd	Hg	Pb	加和/ 分级/ 排序
辽东半岛(5)	3.5/a/9	463.8/e/3	182.4/e/6	3.8/a/7	653.5/e/4
双台子-辽河(6)	3.8/a/6	546.0/e/2	283.3/e/4	6.9/a/4	840.0/e/3
锦州湾(4)	3.6/a/8	448.5/e/4	1949.0/e/1	19.1/a/1	2420.1/e/2
辽东湾(8)	3.8/a/6	1413.4/e/1	1879.5/e/2	8.8/a/2	3305.5/e/1
秦皇岛(7)	6.3/a/3	80.1/d/6	287.4/e/3	8.7/a/3	382.5/e/5
渤海湾(16)	7.6/a/1	30.4/b/8	30.2/b/9	3.3/a/8	71.5/c/9
黄河口(3)	7.0/a/2	29.0/b/9	39.3/b/8	3.1/a/9	78.4/c/8
莱州湾(7)	6.2/a/4	44.6/c/7	174.3/e/7	4.4/a/6	229.5/e/7
外海(10)	4.7/a/5	101.1/d/5	189.2/e/5	6.4/a/5	301.4/e/6

注:元素 $R_{E,i}$ 平均值 = $\sum (I_{geo,i} / C_i) / \sum (I_{geo,i} / C_{i,n}) / \text{海区内站点数} \times T_{S,i}$

表 6 各海区金属元素污染程度排序

Tab. 6 Rank of pollution grade for each metal in different areas

元素	方法	海区污染分级和排序			
As		清洁 →			
	I_{geo}	渤海湾> 黄河口> 秦皇岛、莱州湾> 外海> 双台子- 辽河、辽东湾、锦州湾、辽东半岛 无至轻微 →			
	R_E	渤海湾> 黄河口> 秦皇岛> 莱州湾> 外海> 双台子- 辽河> 辽东湾> 锦州湾> 辽东半岛			
Cd		严重	偏重 →	轻度 →	清洁 →
	I_{geo}	辽东湾> 双台子- 辽河> 锦州湾> 秦皇岛> 辽东半岛> 莱州湾> 外海> 黄河口> 渤海湾 极强 → 很强 → 强 → 中等 →			
	R_E	辽东湾> 双台子- 辽河> 辽东半岛> 锦州湾> 外海> 秦皇岛> 莱州湾> 渤海湾> 黄河口			
Hg		严重 →	偏重 →	中度 →	偏中度 → 清洁 →
	I_{geo}	锦州湾> 辽东湾> 双台子- 辽河> 秦皇岛> 外海> 辽东半岛> 莱州湾> 黄河口、渤海湾 极强 → 中等 →			
	R_E	锦州湾> 辽东湾> 秦皇岛> 双台子- 辽河> 外海> 辽东半岛> 莱州湾> 黄河口> 渤海湾			
Pb		偏中度 →	轻度 →	清洁 →	
	I_{geo}	锦州湾> 辽东湾、秦皇岛> 双台子- 辽河、外海> 莱州湾> 渤海湾> 辽东半岛、黄河口 无至轻微 →			
	R_E	锦州湾> 辽东湾> 秦皇岛> 双台子- 辽河> 外海> 莱州湾> 辽东半岛> 渤海湾> 黄河口			
多金属	I_{geo}	锦州湾> 辽东湾> 双台子- 辽河> 秦皇岛> 外海> 莱州湾> 辽东半岛> 渤海湾> 黄河口			
	R_E	辽东湾> 锦州湾> 双台子- 辽河> 辽东半岛> 秦皇岛> 外海> 莱州湾> 黄河口> 渤海湾			

区。元素 As 在渤海整体海区尚未构成污染, 而 Pb 只是在北部锦州湾、辽东湾和秦皇岛表现出偏中度或轻度污染。对多元素加和情形, 两种方法的结果也大体一致, 除辽东半岛因受 Cd 影响出现排序位置的变化, 其它海区没有发生在污染分级/ 风险分级位置上大的波动。

经济较发达的环渤海地区主要的工业类型包括化工、制革、电镀、冶金、采矿等。在各海区中, 北部海区重金属污染程度最重, Hg 和 Cd 是优势污染物, 该海区长期接受大量工业废水的直接或间接排放 (尤其是沿海冶炼厂的污水排放) 是造成现状的主要原因^[16]。秦皇岛近岸较重的 Hg 污染, 除入海径流外, 来自航运码头的输入很可能也是原因之一。在各元素污染/ 风险分级排序中, Cd, Hg 和 Pb 的相关性有所体现; 而 As 的排序结果则明显不同, 在某种程度上这与前文中元素相关分析的结果一致。应当指出, 鉴于本文中 I_{geo} 和 R_E 两种方法仅利用沉积物中重金属的总量数据, 未来的综合研究还需结合化学形态分析、生物毒性测试和底栖生态结构调查。

3 结论

根据调查数据分析, 得到渤海各海区表层沉积物重金属污染的分布特征: (1) 北部辽东湾海区重金属污染最重, 尤以 Hg 和 Cd 为甚; (2) 秦皇岛近岸海区 Hg 污染比较突出; (3) 西部渤海湾海区尚未呈现 4 种金属的污染; (4) 南部莱州湾和黄河口海区仅在莱州湾发生偏中度 Hg 污染; (5) 与以往相比, 外海和辽东半岛近岸海区已出现偏中度的 Hg 污染; (6) 4 种元素中, Pb, Cd 与 Hg 的质量分数分布存在较强的正相关关系。

参考文献:

- [1] Gaeme K A, Pollack Jr C V. Heavy metal toxicity, part I: Arsenic and Mercury [J]. **J Emergency Med**, 1998, 16: 45- 56.
- [2] Gaeme K A, Pollack Jr C V. Heavy metal toxicity, part II: Lead and Metal Fume Fever [J]. **J Emergency Med**, 1998, 16: 171- 177.
- [3] Baudouin C, Charveron M, Tarroux R, *et al.* Environmental pollutants and skin cancer [J]. **Cell Biol Toxicol**,

- 2002, 18: 341- 348.
- [4] 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.
- [5] Chapman P M, Wang F Y. Appropriate applications of sediment quality values for metals and metalloids [J]. **Environ Sci Technol**, 1999, 33: 3 937- 3 941.
- [6] 国家环境保护局(渤海黄海海域污染防治科研协作组). 渤海黄海海域污染防治研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 56, 221, 229.
- [7] 李淑媛, 苗丰民, 刘国贤, 等. 渤海底质重金属环境背景值初步研究[J]. 海洋学报, 1995, 17: 78- 85.
- [8] 刘 成, 王兆印, 何 耘, 等. 环渤海湾诸河口潜在生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2002, 15(5): 33- 37.
- [9] 潜婉英, 石厥民, 陈静生. 锦州湾重金属含量分布特征、形态与界面过程[A]. 陈静生, 周家义. 中国水环境重金属研究[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992. 171- 188.
- [10] GB17378.5- 1998. 中华人民共和国国家标准: 海洋监测规范(第5部分: 沉积物分析)[S].
- [11] Jordão C P, Pereira M G, Pereira J L. Metal contamination of river waters and sediments from effluents of Kaolin processing in Brazil [J]. **Water Air Soil Pollut**, 2002, 140: 119- 138.
- [12] Santos B J C, Beltr n R, G me z A J L. Spatial variations of heavy metals contamination in sediments from Odiel River (Southwest Spain) [J]. **Environ Inter**, 2002, 29: 69- 77.
- [13] 霍文毅, 黄风茹, 陈静生, 等. 河流颗粒物重金属污染评价方法比较研究[J]. 地理科学, 1997, 17: 81- 86.
- [14] 吴景阳, 陈静生, 王飞越. 渤海湾重金属的环境地球化学[A]. 陈静生, 周家义. 中国水环境重金属研究[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992. 189- 230.
- [15] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. **Water Res**, 1980, 14: 975- 1 001.
- [16] Fan W H, Wang W X, Chen J S, *et al.* Cu, Ni and Pb speciation in surface sediments from a contaminated bay of northern China [J]. **Mar Pollut Bull**, 2002, 44: 816- 832.

An evaluation on heavy metal contamination in the surface sediments in Bohai Sea

CHEN Jiang- lin¹, LIU Wen- xin², LIU Shu- zhen², LIN Xiu- mei², TAO Shu²

(1. North China Sea Branch of State Oceanic Administration, Qingdao 266033, China; 2. Laboratory for Earth Surface Processes Simulation and Analysis, College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Received: Sep., 27, 2003

Key words: Bohai Sea; surface sediments; heavy metals; geoaccumulation index; potential ecological risk factor

Abstract: In this study, geoaccumulation index and potential ecological risk factor were employed to evaluate the contamination of As, Cd, Hg and Pb at different sites in Bohai Sea, using the data on the Second Survey of Marine Pollution Baseline. The results indicated that Cd and Pb had significant positive correlation with Hg in the surface sediments in Bohai Sea. In addition, the studied heavy metals showed different characteristics in different areas: (1) there was a severe contamination of Cd and Hg in northern Liaodong Bay; (2) intermediate contamination of Hg occurred at the coastal area of Qinhuangdao; (3) only slight Hg contamination was found in the southern Laizhou Bay, and no studied metal contamination was found in western Bohai Bay; and (4) intermediate Hg contamination was presented in the area adjacent to Liaodong Peninsula and in outer sea area.

(本文编辑: 刘珊珊)