

黄河尾间及近岸沉积物中重金属的含量分布及生态风险评价

赵明明^{1,2}, 王传远¹, 孙志高¹, 孙万龙^{1,2}, 吕迎春¹, 赵浩杰³, 卢勇⁴

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 大连大学, 辽宁 大连 116000; 4. 许昌学院, 河南 许昌 461000)

摘要: 为了解黄河尾间及近岸沉积物中重金属的污染特征, 采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定了黄河河道和河口 48 个样品中 Cr、Cu、Zn、Cd、Pb 和 As 等 6 种重金属的含量, 并对其分布和生态风险进行了评价。结果表明, 黄河尾间及近岸重金属的总含量沿河道至河口方向呈现先增加后降低再增加的趋势, 至近岸 B 断面, As、Pb、Cd 和 Zn 含量呈明显增加趋势, Cu 和 Cr 含量增加幅度较小; 黄河河口沉积物中重金属浓度明显高于河道沉积物中重金属的浓度。与我国其他流域相比, 研究区域重金属含量处于较低水平。潜在生态风险评价结果表明, 黄河尾间及近岸沉积物 6 种重金属潜在生态风险系数从高到低依次为: Cd>As>Pb>Zn>Cu>Cr, 黄河尾间及近岸沉积物的潜在生态风险主要由 Cd 和 As 引起, 两者的贡献率分别为 55.90%和 29.54%, 研究区域生态风险低, 污染轻。研究结果将为黄河尾间及近岸生态保护、环境管理和污染治理提供一定基础数据。

关键词: 黄河尾间及近岸; 沉积物; 重金属; 分布特征; 生态风险评价

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)01-0068-08

doi: 10.11759/hyqx20130827002

重金属是指原子密度大于 5 g/cm^3 的一类金属元素, 具有含量少, 毒性大的特征; 某些重金属的毒性在微生物作用下会被强化; 重金属性质稳定, 不可降解, 可通过食物链在生物体中富集浓缩到有害浓度, 即生物富集^[1]。重金属污染是环境科学领域研究的主要热点之一^[2-3], 当前重点研究的重金属有 V、Sn、Co、Ni、Mn、Fe、Ag、Cu、Zn、Cr、Cd、Hg、Pb、As, 其中 Cd、Hg、Pb 和 As 等因毒性显著而研究较多^[4-5]。

沉积物是水生生态系统的重要组成部分, 比表面积大, 多数带有有机配体, 所以重金属可通过复杂的物理化学过程进入沉积物中, 成为对水质具有潜在影响的次生污染源, 而被沉积物吸附的重金属可以通过一系列物理、化学和生物过程解析出来, 从而使水体形成二次污染, 所以沉积物是污染最严重的环境介质之一^[6-7]。随着河流流域城市工农业的高速发展和人口的不断膨胀, 未经处理的废污水排放量与日俱增, 打破了重金属在海洋生态系统中的自然循环, 导致海水、生物体、沉积物等环境介质受重金属污染日益严重, 近海环境质量急剧下降, 各种海洋生态灾害频发^[4, 8]。

黄河是我国第二大河, 横贯我国北方, 以高悬浮泥沙为主要特点。黄河每年不仅携带着大量淡水、

颗粒物、营养盐, 也携带着来自流域内许多重要城市和工、矿企业的重金属和有机污染物入海, 黄河水质受到严重污染^[9-10]。近年来, 随着黄河沿岸人口的增多, 地区经济发展与生态保护的矛盾日益突出, 越来越多的重金属、营养盐等污染物进入黄河尾间及近岸, 不利于河口自然环境的维护。目前, 人们对长江口^[11-12]、珠江口^[13-14]的重金属迁移转化的研究较多, 而对黄河尾间及近岸重金属的含量分布及生态风险评价研究较少。河口生态系统属陆海交汇地带, 是物质与能量交换最频繁和影响最显著的地方, 河流入海过程决定河流与海洋之间的化学质量平衡^[15]。所以研究黄河尾间及近岸沉积物中重金属的含量、分布特征和生态风险评价有助于了解该流域生态系统的污染状况, 对重金属环境行为的研究也具有重要意义。本文利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)对黄河尾间及近岸 48 个表层沉积物样品中重金属的含量及分布特征进行研究, 探讨重金属离子的迁移

收稿日期: 2013-08-27; 修回日期: 2013-09-13

基金项目: 中国科学院烟台海岸带研究所“一三五”规划项目(Y254021031)
[Foundation: One Three Five planning projects of Yantai Institute of Coastal Zone, Chinese Academy of Sciences(Y254021031)]

作者简介: 赵明明(1987-), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要从事环境地球化学研究, 电话: 15653513782, E-mail: mingming7541@163.com; 王传远, 通信作者, 副研究员, E-mail: wangchy6111@163.com

转化规律, 并运用潜在生态风险指数 Hakanson 评价方法, 对沉积物中重金属的污染状况进行综合分析评价, 以深入了解该区域重金属污染状况, 为黄河尾间及近岸的环境质量改善和生态环境保护提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 样品采集与前处理

2012 年 9~10 月在黄河尾间及近岸 118°18'~

119°31'E 和 37°31'~37°51'N 范围内实地考察并采集样品, 采样时利用 GPS 确定采样位置, 用抓斗采泥器采集沉积物样品。本次采样共采集了 48 个表层沉积物(0~15 cm)样品(图 1), 其中黄河河道样品 17 个, 河口样品 31 个, 样品采集后置于聚乙烯自封袋中, 并于冷柜中保存。取适量沉积物样品于真空冷冻干燥机中冷冻干燥, 去除杂质, 用玛瑙研钵研磨, 过 100 目筛, 充分混匀后储存于干燥器中备用。分析项目有: 铜, 铅, 锌, 铬, 镉和砷 6 项。

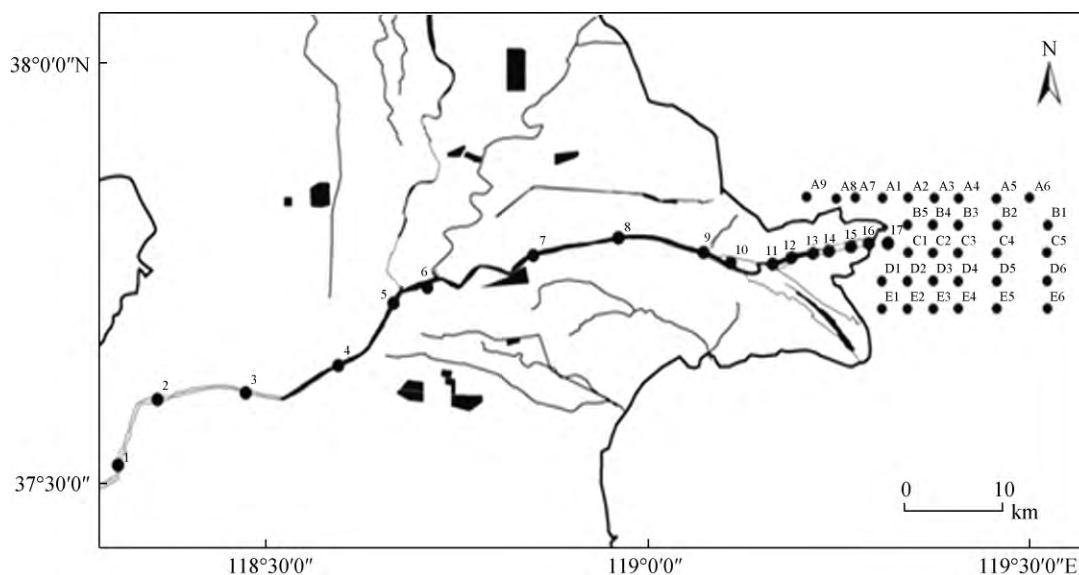


图 1 黄河尾间及近岸表层沉积物采样点示意图

Fig. 1 Geographical map of sites where surface sediments were obtained from the tail reaches of Yellow River Estuary

1.2 样品分析

1.2.1 重金属测定

称约 0.1000 g 干燥的沉积物于 Toflon 罐中, 依次加入 5 mL 氢氟酸, 2 mL 硝酸, 1 mL 高氯酸后用密闭微波消解法处理, 充分溶解样品, 待罐冷却后在电加热板上加热至白烟冒尽, 再加入 2 mL 硝酸, 2 mL 去离子水加热回溶, 冷却, 加热至白烟冒尽, 用去离子水定容至 30.0 g。用电感耦合等离子体质谱仪(美国 PerkinElmer 公司)测定沉积物中各重金属含量。以上所用 HF、HNO₃ 和 HClO₄ 均为优级纯。

1.2.2 粒度测定

取适量未过筛湿样于测试烧杯中, 用超声波分散样品 20 s 后用 Marlvern Mastersizer 2000F 激光粒度仪(英国马尔公司)测试。

1.3 潜在生态风险评价法

潜在生态风险指数法^[16]是 1980 年瑞典科学家

Hakanson 根据沉积物中污染物的种类、含量水平、毒性水平和水体对污染物的敏感性 4 个原则提出的对 8 种污染物进行评价的方法, 该方法能快速简便地划分沉积物中重金属污染程度及其水域潜在生态风险, 是国内外评价河流沉积物中重金属的潜在生态风险应用最广泛的方法之一^[17-19], 单因子潜在风险指数 E_r^i 和综合潜在生态风险指数 I_R 能反映不同环境对重金属的敏感性差异^[16], 其具体公式为:

$$C_f^i = \frac{C_i}{C_n^i} \quad (1)$$

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_f^i \quad (2)$$

$$E_r^i = T_r^i C_f^i \quad (3)$$

$$I_R = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_f^i \quad (4)$$

式中: C_i 为测定污染物 i 的质量比(单位: mg/kg); C_n^i 为全球工业化前污染物 i 的背景质量比(单位: mg/kg); T_r^i 为第 i 种污染物的毒性系数, Hakanson 根据大量数据分析, 提出 Cd, As, Cu, Pb, Cr 和 Zn 的 C_n^i 分别取 1.0, 15, 50, 70, 90 和 175 mg/kg, 毒性响应参数 T_r^i 分

别取 30, 10, 5, 5, 2 和 1; C_f^i 为单因子污染指数; C_d 为多种污染物的综合污染程度; E_i^i 为第 i 种污染物的潜在生态风险系数; I_R 为沉积物中多种污染物的综合风险指数。评价指标与污染程度和潜在生态风险程度参见表 1。

表 1 评价指标与污染程度和潜在生态风险程度的关系

Tab. 1 Relation among evaluation indexes, contamination degree, and potential ecological risk

C_f^i	单因子污染程度	C_d	综合污染程度	E_i^i	单因子污染生态风险程度	I_R	总潜在生态风险程度
<1	低	<8	低	<40	低	<150	低
1~3	中等	8~16	中等	40~80	中等	150~300	中等
3~6	重	16~32	重	80~160	较重	300~600	重
6	严重	32	严重	160~320	重	600	严重
—	—	—	—	320	严重	—	—

注: “—”表示无数值。

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物中重金属含量水平

对黄河尾间及近岸 48 个沉积物样品中 Cd, Cu, Pb, Zn, Cr 和 As 等 6 种重金属含量进行测定, 近岸沉积物中重金属浓度明显高于河道沉积物中重金属的浓度; 黄河尾间及近岸重金属总含量沿河道至河口方向呈现先增加后降低再增加的趋势, 至河口 B 断面, As, Pb, Cd 和 Zn 含量明显增加, Cu 和 Cr 含量变化幅度小。表 2 为黄河尾间及近岸表层沉积物重金属含量统计, 48 个沉积物样品中 6 种重金属含量顺序依次是 Cr>Zn>Pb>Cu>As>Cd, 含量最高的

Cr 和 Zn 平均质量比分别为 74.35 和 63.21 mg/kg, 其次是 Pb, Cu 和 As, 平均质量比分别为 20.10, 17.26 和 15.76 mg/kg, Cd 含量最低, 平均为 0.66 mg/kg, 由表 2 可知, 研究区域表层沉积物中 Cd 和 Cr 的含量偏高, 最大值远高于国家 II 类标准(GB18668-2002)^[20]; As 质量比较低, 最大值略高于 I 类标准远低于 I 类标准; Cu, Pb 和 Zn 质量比明显偏低, 最高值低于国家 I 类标准(GB18668-2002)。对黄河尾间及近岸沉积物中重金属质量浓度进行正态性检验(显著性水平 $P=0.05$), 其中 Cu, Pb, Zn 和 Cr 的浓度服从正态分布, 而 Cd 和 As 的质量比服从对数正态分布。

表 2 黄河尾间及近岸表层沉积物中重金属含量

Tab. 2 Concentration of heavy metals in surface sediments from the tail reaches of the Yellow River estuary

重金属	重金属质量比(mg/kg)							变异系数 (%)	沉积物 I / II 类标准
	范围	全部点位	A 断面	B 断面	C 断面	D 断面	E 断面		
Cd	0.13~2.48	0.66±0.49	0.84±0.79	0.40±0.04	0.52±0.29	0.56±0.24	0.34±0.20	74.01	0.5/1.5
As	4.75~22.7	15.8±6.2	14.4±6.84	7.76±5.35	8.33±6.43	17.1±5.83	18.5±2.63	39.63	20/65
Cu	10.1~33.4	17.3±6.0	22.8±7.10	24.5±4.59	17.7±4.15	17.3±3.12	14.4±7.25	34.70	35/100
Pb	13.7~40.1	20.1±6.2	25.5±9.22	26.3±7.09	19.3±3.64	19.8±2.78	16.1±7.90	30.96	60/130
Zn	40.8~112.5	63.2±17.3	77.4±30.7	65.1±8.13	65.9±13.7	71.0±16.4	56.7±26.7	27.41	150/350
Cr	48.4~190.7	74.4±26.6	79.9±14.8	81.2±11.2	73.8±23.6	59.8±7.12	49.6±23.6	35.72	80/150

黄河尾间及近岸沉积物中重金属的变异系数顺序依次是 Cd > As > Cr > Cu > Pb > Zn, 其中 Cd 和 As 的空间分布差异最大, 变异系数最大, 分别是 74.01% 和 39.63%, 说明这两种元素可能存在点源输入, 其

他元素的变异系数相对较小, 说明来源相对一致。

由表 2 知, 五个断面中 E 断面重金属 Cd, Cu, Pb, Cr 和 Zn 的质量比最低, 而 As 质量比偏高, A、B 断面的 Cd, Cu 和 Pb 的质量比高于 C、D 和 E 断

面, E 断面 Cr 质量比相对偏低, 其他四个断面 Cr 质量比相当, A、D 和 E 断面的 As 质量比高于 B 和 C 断面, 总体说来, 北部断面的重金属质量比高于南部断面。

与我国其他流域相比, 黄河尾闾及近岸表层沉积物中重金属质量浓度总体偏低。黄河尾闾及近岸沉积物重金属质量浓度比珠江口低, 而与长江口相近, 其中黄河尾闾及近岸 Cu, Cr, Pb 和 Zn 质量比低, 变化范围小, Cd 和 As 质量比介于两河口之间, 应引

起重视。黄河尾闾及近岸沉积物中重金属质量比与莱州湾相近或略高于莱州湾; 相较于锦州湾, 黄河尾闾及近岸 Cr 质量比较高, 其他 5 种重金属质量比较低, 锦州湾 Zn 污染比较严重, 平均质量比远高于其他流域。黄河尾闾及近岸与东海沉积物中 Cu, Pb 和 Zn 的质量比相当, 但相较于东海, 黄河尾闾及近岸 Cd 质量比偏高, Cr 质量比偏低, 说明两流域可能受到不同重金属的污染。详见表 3 我国近海沉积物中重金属质量比比较。

表 3 我国近海沉积物中重金属含量

Tab. 3 Comparison of heavy metal concentrations in surface sediments along the Chinese coast

流域	重金属质量比(mg/kg)						文献
	Cd	Cu	Pb	Zn	Cr	As	
黄河尾闾及近岸	0.13~2.48 (0.66)	10.04~33.36 (17.26)	13.65~40.10 (20.10)	40.79~112.48 (63.21)	48.35~190.68 (74.35)	4.75~22.67 (15.76)	本文
长江口	1.30~3.83 (2.57)	10.3~51.3 (32.9)	10.2~91.3 (20.6)	49.0~126 (87.5)	未测	9.55~19.3 (14.5)	[11]
珠江口	0.04~0.7 (0.2)	15.4~66.5 (39.4)	30.9~116.0 (53.3)	64.3~237.0 (130.4)	53.7~120.0 (86.3)	5.5~35.6 (21.1)	[21]
锦州湾	0.17~2.83 (1.74)	15.4~81.8 (53.1)	15.8~63.4 (42.2)	69~475 (305.0)	44.0~72.4 (60.6)	11.7~80.3 (44.8)	[22-23]
莱州湾	0.04~0.29 (0.11)	0.11~47.24 (14.97)	3.18~34.22 (11.70)	29.60~81.50 (50.80)	34.0~91.1 (57.1)	3.24~22.51 (9.20)	[24] [25]
东海	0.016~0.27 (0.064)	1.86~35.91 (13.01)	9.67~44.34 (22.21)	33.50~105.1 (68.72)	96.55~167.30 (146.2)	未测	[26]

注: 括号内数据为重金属质量比平均值

2.2 重金属含量与沉积物粒度的关系

粒度组成特征是沉积物的重要地球化学特征参数之一^[27], 由图 2 可知: 黄河河道沉积物以砂粒为主, 仅河道样点 8~12 沉积物中有少量粉砂和黏土;

黄河口的沉积物以砂粒和粉砂为主, 黄河近岸北部断面 A 和 B 粉砂和黏土含量先增加后降低, C 断面粉砂和黏土含量先降低后增加, 南部断面 D 粉砂和黏土含量呈降低趋势, 而 E 断面呈增加趋势, 其中 A 和

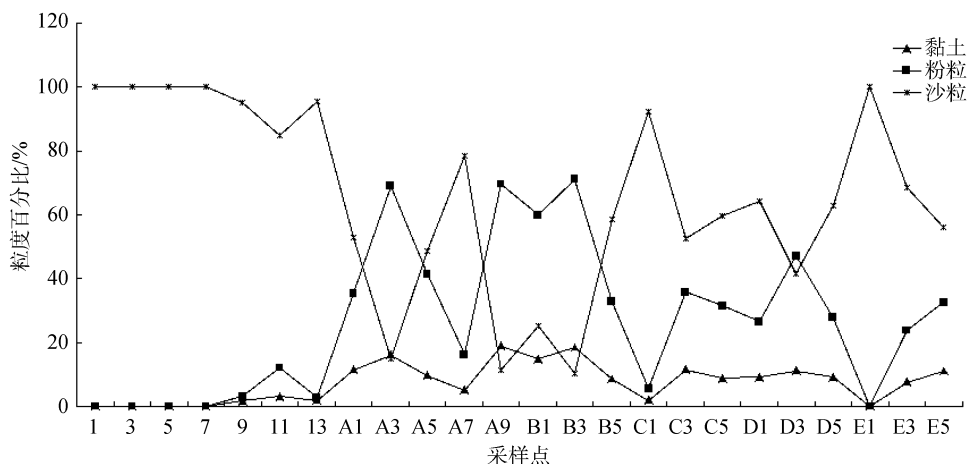


图 2 黄河尾闾及近岸表层沉积物中粒度组成图

Fig. 2 Grain size composition of surface sediments from the tail reaches of the Yellow River estuary

B断面粉砂和黏土含量较高, 分别为 13.8%~87.2%和 39.8%~87.4%, 沉积物中重金属含量变化趋势与沉积物粒度变化一致, 即粒度小的样点重金属含量相对较高, 粒度大的样点重金属含量相对偏低, 由于沉积物颗粒越细, 接触比表面积越大, 对重金属吸附性越强, 所以黏土含量是制约重金属在沉积物中含量及分布的重要因子之一。

2.3 重金属元素间的相关性

对黄河尾闾及近岸沉积物中 6 种重金属元素进行

相关性分析, 得到元素 Pearson 相关系数矩阵(表 4)。由表 4 可以看出, Cu, Pb 和 Zn 在 0.01 水平上呈显著性正相关, 说明这些重金属元素间具有共生共存的地球化学特性, 其中 Cu 与 Zn 在元素周期表中位置相邻, 性质相似, 因此它们来源相同, 影响它们分布的因素也相似; Cd 与 Cr 呈显著性正相关, 与 As 无明显相关关系, 与其他重金属呈负相关, Cd 是最容易发生迁移的重金属, 性质活泼, 所以与其他重金属的相关性最差; As 与 Zn 呈显著性负相关, 说明两者来源完全不同, As 含量与其他重金属含量不存在相关关系。

表 4 黄河尾闾及近岸重金属含量相关系数矩阵($n=48$)

Tab.4 Pearson correlation matrices of heavy metal contents in surface sediments from the tail reaches of the Yellow River estuary($n = 48$)

	Cd	Cu	Pb	Zn	Cr	As
Cd	1.000					
Cu	-0.266	1.000				
Pb	-0.114	0.929**	1.000			
Zn	-0.183	0.833**	0.718**	1.000		
Cr	0.775**	-0.159	0.195	-0.102	1.000	
As	0.042	-0.343*	0.051	-0.422**	0.036	1.000

注: ** $p < 0.01$; * $p > 0.05$

2.4 生态风险评价

按照公式计算黄河尾闾及近岸沉积物中 6 种重金属的潜在生态风险系数和潜在生态风险指数。根据 48 个采样点沉积物中重金属潜在生态风险指数贡献可知, 黄河尾闾及近岸沉积物中 6 种重金属的潜在生态风险从高到低依次为: Cd>As>Pb>Zn>Cu>Cr(图 3)。黄河尾闾及近岸的潜在生态风险主要由 Cd 和 As 引起, 两者对潜在生态风险指数的贡献率分别

为 55.90%和 29.54%, 其次是 Pb、Zn 和 Cu, 它们的贡献指数分别是 4.85%、4.65%和 4.04%, Cr 对潜在生态风险指数的贡献最小, 仅为 1.02%。

表 5 是根据重金属潜在生态风险系数和潜在生态风险指数与污染程度的关系对黄河尾闾及近岸表层沉积物中 6 种重金属的生态风险作出初步评价。沉积物中 Zn, Pb, Cr, As 和 Cu 的生态风险指数均较低, E_r^i 值均小于 40, 为低生态风险(表 5 中未列出)。Cd 的 E_r^i 介于 3.78~74.39, 平均值为 19.88, 其中 87.5%的采样点有低生态风险, 12.5%的采样点为中等生态风险。黄河尾闾及近岸沉积物中 6 种重金属 I_R 介于 11.16~84.54, 平均值为 35.05, 所有采样点的 I_R 均低于 110, 说明沉积物中重金属的潜在生态危害低, 采样点生态风险低, 污染轻, 对黄河尾闾及近岸生态环境潜在影响最大的重金属是 Cd 和 As。

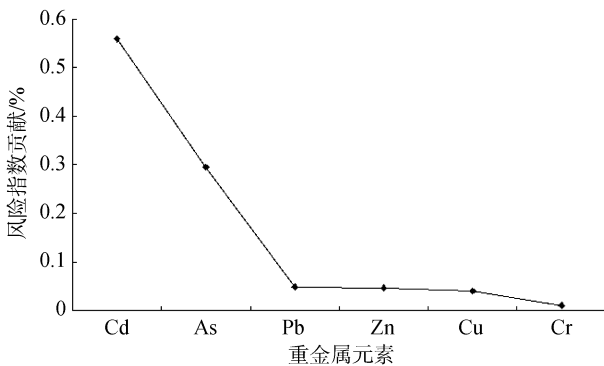


图 3 黄河尾闾及近岸沉积物不同重金属对潜在生态风险指数的贡献

Fig. 3 Contribution of different heavy metals to potential ecological risk indices in sediments from the tail reaches of the Yellow River Estuary

3 结论

1) 黄河尾闾及近岸表层沉积物中 Cu、As、Pb、Zn 和 Cr 平均质量比明显低于国家沉积物质量 I 类标准, 无环境污染, Cd 平均质量比介于国家沉积物质量 I 类和 II 类标准之间, 污染相对较重。总体来说, 河道中重金属总质量比沿河流入海方向呈现先增加

后

降

表 5 黄河尾间及近岸表层沉积物中重金属潜在生态风险评价结果

Tab. 5 Potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments from the tail reaches of Yellow River estuary

E_r^i	生态风险	Cd 所占风险比例(%)	重金属	E_r	I_R	生态风险	生态风险比例(%)
$E_r^i < 40$	低	87.5	Zn	0.36	$I_R < 110$	低	100
40 $E_r^i < 80$	中等	12.5	Pb	1.44	$110 \leq I_R < 220$	中等	0
80 $E_r^i < 160$	强	0	Cr	1.65	$220 \leq I_R < 440$	强	0
160 $E_r^i < 320$	很强	0	Cu	1.73	$I_R \geq 440$	极强	0
$E_r^i \geq 320$	极强	0	As	10.51	—	—	—
—	—	—	Cd	19.88	—	—	—

注: E_r 为 E_r^i 的平均值

低再增加的趋势;黄河尾间及近岸以 Cd 和 As 污染最为严重,其中黄河河道重金属质量比明显低于黄河入海口的重金属质量比。与我国其他流域相比,黄河尾间及近岸沉积物中重金属元素质量比处于较低水平。

2) 相关性分析结果表明, Cu, Pb 和 Zn 呈显著性正相关,具有污染同源性; Cd 与其他重金属的相关性最差,因为 Cd 性质活泼,最容易发生迁移; As 质量比与其他重金属质量比不存在相关关系,来源具有一定差异性。重金属质量比与沉积物中黏土质量比正相关,因为沉积物颗粒越细,接触比表面积越大,对重金属吸附性越强。

3) 潜在生态风险评价结果表明黄河尾间及近岸沉积物中 6 种重金属潜在生态风险系数由高到低依次为: Cd>As>Pb>Zn>Cu>Cr, 黄河尾间及近岸沉积物的潜在生态风险主要由 Cd 和 As 引起,两者的贡献率分别为 55.90%和 29.54%,黄河尾间及近岸所有采样点的 RI 值均低于 110,说明采样点生态风险低,污染轻。

参考文献:

[1] Pan K, Wang W X. Trace metal contamination in estuarine and coastal environments in China [J]. Science of the Total Environment, 2012, 421-422: 3-16.
 [2] 胡宁静, 刘季花, 黄朋, 等. 渤海莱州湾表层沉积物中重金属元素分布及环境质量[J]. 海洋学报, 2012, 34(2): 92-100.
 Hu Ningjing, Liu Jihua, Huang Peng, et al. The distribution and risk assessment of metals in surface sediments of the Laozhou Bay in the Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(2): 92-100.
 [3] Yuan H M, Song J M, Li X G, et al. Distribution and contamination of heavy metals in surface sediments of the South Yellow Sea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 64: 2151-2159.
 [4] 吴斌, 宋金明, 李学刚. 黄河口表层沉积物中重金属

的环境地球化学特征[J]. 环境科学, 2013, 34(4): 1324-1332.
 Wu Bin, Song Jinming, Li Xuegang. Environmental characteristics of heavy metals in surface sediments from the Huanghe River [J]. Environmental Science, 2013, 34(4): 1324-1332.
 [5] Duan L Q, Song J M, Xu Y Y, et al. The distribution, enrichment and source of potential harmful elements in surface sediments of Bohai Bay, North China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 183(1-3): 155-164.
 [6] 杨立平, 张学超, 李晓敏, 等. 威海湾沉积物重金属含量分布及其潜在生态危害评价[J]. 海洋科学, 2010, 34(6): 39-43.
 Yang Liping, Zhang Xuechao, Li Xiaomin, et al. Distribution features and evaluation on potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Weihai Bay [J]. Marine Sciences, 2010, 34(6): 39-43.
 [7] Vallee B L, Ulmer D D. Biochemical effects of mercury, cadmium, and lead [J]. Annual Review of Biochemistry, 1972, 41: 91-128.
 [8] Gao X L, Chen C T A. Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay [J]. Water Research, 2012, 46(6): 1901-1911.
 [9] 李任伟, 李禾, 李原. 黄河三角洲沉积物重金属、氮和磷污染研究[J]. 沉积学报, 2001, 19(4): 622-629.
 Li Renwei, Li He, Li Yuan. Study of the heavy metals, Nitrogen and Phosphorus contaminants in the sediments of the Yellow River Delta [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4): 622-629.
 [10] 刘成, 何耘, 王兆印. 黄河口的水质、底质污染及其变化[J]. 中国环境监测, 2005, 21(3): 58-61.
 Liu Cheng, He Yun, Wang Zhaoyin. Water and sediment pollutions and their changes at the Yellow River mouth [J]. Environmental Monitoring in China, 2005, 21(3): 58-61.
 [11] 方明, 吴友军, 刘红. 长江口沉积物重金属的分布、来源及潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2013, 33(2): 563-569.
 Fang Ming, Wu Youjun, Liu Hong. Distribution, sources and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the Yangtze River Estuary [J]. Acta

- Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(2): 563-569.
- [12] 李磊, 平仙隐, 王云龙, 等. 长江口及邻近海域沉积物中重金属研究—时空分布及污染分析[J]. 中国环境科学, 2012, 32(12): 2245-2252.
Li Lei, Ping Xianyin, Wang Yunlong, et al. Spatial and temporal distribution and pollution analysis of the heavy metals in sediments of the Changjiang Estuary and its adjacent areas [J]. China Environmental Science, 2012, 32(12): 2245-2252.
- [13] 陈康, 方展强, 安东, 等. 珠江口沿岸水域表层沉积物中重金属含量分布及污染评价[J]. 应用海洋化学学报, 2013, 32(1): 20-28.
Chen Kang, Fang Zhanqiang, An Dong, et al. Concentration distribution and pollution assessment on heavy metals in surface sediment from the Pearl River Estuary coastal waters[J]. Journal of Applied Oceanography, 2013, 32(1): 20-28.
- [14] 李团结, 龙江平, 刘激. 珠江口底质重金属分布特征及其生态危害性评价[J]. 热带地理, 2009, 29(4): 313-318.
Li Tuanjie, Long Jiangping, Liu Ji. Distribution characteristics and ecological assessments of heavy metals in surface sediments of the Pearl River Estuary [J]. Tropical Geography, 2009, 29(4): 313-318.
- [15] 刘汝海, 吴晓燕, 秦洁, 等. 黄河口河海混合过程中重金属的变化特征[J]. 中国海洋大学学报, 2008, 38(1): 157-162.
Liu Ruhai, Wu Xiaoyan, Qin Jie, et al. The variation characters of heavy metal content in Huanghe Estuary water [J]. Periodical of Ocean University of China, 2008, 38(1): 157-162.
- [16] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [17] 徐庆, 钱瑾, 张毓祥, 等. 上海市黄浦江表层沉积物重金属污染评价[J]. 中国环境监测, 2011, 27(3): 89-92.
Xu Qing, Qian Jin, Zhang Yuxiang, et al. Assessment on heavy metals pollution in surface sediments of Huangpu River, Shanghai [J]. Environmental Monitoring in China, 2011, 27(3): 89-92.
- [18] 徐霖林, 马长安, 田伟, 等. 淀山湖沉积物重金属分布特征及其与底栖动物的关系[J]. 环境科学学报, 2011, 31(10): 2223-2232.
Xu Linlin, Ma Chang'an, Tian Wei, et al. The distribution of heavy metals in surface sediment of Lake Dian-shan and its correlations with macrozoobenthos [J]. Acta Scientiarum Circumstantiae, 2011, 31(10): 2223-2232.
- [19] Khadige R E S, Mohammad R A, Kazem N, et al. Distribution of heavy metals in surface sediments from the South China Sea ecosystem, Malaysia[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 183(4): 545-554.
- [20] GB18668-2002, 海洋沉积物质量[S].
GB18668-2002, Marine sediment quality[S].
- [21] 黄向青, 梁开, 刘雄. 珠江口表层沉积物有害重金属分布及评价[J]. 海洋湖沼通报, 2006, 3: 27-36.
Huang Xiangqing, Liang Kai, Liu Xiong. The distribution and assessment of heavy metals in surficial sediments in the Pearl River Estuary[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2006, 3: 27-36.
- [22] 张玉凤, 宋永刚, 王立军, 等. 锦州湾沉积物重金属生态风险评价[J]. 水产科学, 2011, 30(3): 156-159.
Zhang Yufeng, Song Yonggang, Wang Lijun, et al. The ecological risk assessment of heavy metals in sediments in Jinzhou Bay[J]. Fisheries Science, 2011, 30(3): 156-159.
- [23] 张玉凤, 王立军, 霍传林, 等. 锦州湾表层沉积物重金属污染状况评价[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(3): 258-260.
Zhang Yufeng, Wang Lijun, Huo Chuanlin, et al. Assessment on heavy metals pollution in surface sediments in Jinzhou Bay [J]. Marine Environmental Science, 2008, 27(3): 258-260.
- [24] 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.
Luo Xianxiang, Zhang Rui, Yang Jianqiang, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediment in Laizhou Bay[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(2): 262-269.
- [25] 胡宁静, 石学法, 刘季花, 等. 莱州湾表层沉积物中重金属分布特征和环境影响[J]. 海洋科学进展, 2011, 29(1): 63-72.
Hu Ningjing, Shi Xuefa, Liu Jihua, et al. Distributions and impacts of heavy metals in the surface sediments of the Laizhou Bay [J]. Advances in Marine Science, 2011, 29(1): 63-72.
- [26] 赵宝刚, 邵秘华, 鲍永恩, 等. 东海表层沉积物中重金属集散特征及变化规律[J]. 大连海事大学学报, 2008, 34(3): 13-16.
Zhao Baogang, Shao Mihua, Bao Yongen, et al. The features of concentration and dispersion of the heavy metals and their changing patterns in surface sediments of East China Sea[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2008, 34(3): 13-16.
- [27] Blilali L E I, Rasmussen P E, Hall G E M, et al. Role of sediment composition in trace metal distribution in lake sediments[J]. Applied Geochemistry, 2002, 17: 1171-1181.

Concentration, distribution, and ecological risk assessment of heavy metals in sediments from the tail reaches of the Yellow River Estuary

ZHAO Ming-ming^{1, 2}, WANG Chuan-yuan¹, SUN Zhi-gao¹, SUN Wan-long^{1, 2},
LYU Ying-chun¹, ZHAO Hao-Jie³, LU Yong⁴

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Dalian University, Dalian 116000, China; 4. Xuchang University, Xuchang 461000, China)

Received: Aug., 27, 2013

Key words: tail reaches of the Yellow River Estuary; sediment; heavy metal; distribution; ecological risk

Abstract: To understand the pollution characteristics of heavy metals in surface sediments from the tail reaches of the Yellow River Estuary, the concentrations of Cr, Cu, Zn, Cd, Pb, and As in 48 sediment samples were analyzed using inductively coupled plasma source mass spectrometry, and the potential ecological risks of each heavy metals were evaluated. The total content of metals from the tail reaches of the Yellow River Estuary showed a trend of decrease then a subsequent increase after the first increase, until section B of coastal, the contents of As, Pb, Cd and Zn increased obviously, and the contents of Cu and Cr increased by a lesser extent. The heavy metal concentrations in the sediments of the Huanghe Estuary were significantly higher than those within the Huanghe Channel; however, compared with other typical areas along the coast of China, the heavy metal concentrations are relatively low. In relation to potential ecological risk factors, it was determined that the potential ecological risk of six heavy metals in sediments were in the order of: Cd>As>Pb>Zn>Cu>Cr; Cd and As contributed the most to the total potential ecological risk accounting for 55.90% and 29.54%, respectively. All sampling sites posed low potential ecological risks for the sea reach of the Huanghe River. These results provide base data for studies in ecological protection, environment management, and pollution control within the tail reaches of the Yellow River Estuary.

(本文编辑: 刘珊珊)