黄河三角洲湿地重金属污染生态风险评价

宋　颖,李华栋,时文博,王　伟
(黄河水利委员会山东水文水资源局,山东 济南 250100)

摘　要:以黄河三角洲湿地为研究区域,分析了湿地表层沉积物中重金属的含量,采用 Hakanson 潜在生态风险指数法综合评价了黄河三角洲湿地表层沉积物中重金属的污染状况和潜在生态风险程度。结果表明,黄河三角洲湿地表层沉积物中 Cu、Pb、Cd、As 的均值分别为 47.1、21.3、1.44、12.0 mg/kg,除 Pb 外,湿地表层沉积物中 Cu、Cd、As 的含量均高于山东省土壤底质背景值,超出背景值最多的是 Cd 元素。全区综合潜在生态风险指数 *RI* 变化范围为 87.63 ~ 1332.7,均值为 540.24,说明全区具有较高潜在生态风险。4 种污染因子污染程度由高到低为 Cd > Cu > As > Pb,单个污染物潜在生态危害指数由高到低为 Cd > As > Cu > Pb,Cd 为黄河三角洲湿地最主要的重金属污染因子和潜在生态风险因子。

关键词:表层沉积物;重金属;生态风险评价;黄河三角洲湿地
中图分类号:X53;X820.4　　**文献标志码**:A　　DOI:10.16803/j.cnki.issn.1004 - 6216.2018.05.022

Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Wetland of the Yellow River Delta

Song Ying, Li Huadong, Shi Wenbo, Wang Wei
(Shandong Bureau of Hydrology Water Resources, Yellow River Conservancy Commission, Jinan 250100, China)

Abstract: In this study, the Yellow River Delta wetland was taken as the study area for analysis of the concentrations of heavy metals in surface sediments. Hakanson's potential ecological risk index method was used to comprehensively evaluate the pollution status and potential ecological risk in the surface sediments of the Yellow River Delta wetland. The results indicated that the average contents of Cu, Pb, Cd and As in the surface sediments were 47.1, 21.3, 1.44, and 12.0 mg/kg respectively. The concentrations of Cu, Cd and As in the surface sediments were higher than the soil background values in Shandong Province, with the element of Cd exceeding maximally. The regional comprehensive ecological risk index of *RI* varied in the range of 87.63 ~ 1332.7, with the average value of 540.24, indicating a higher potential ecological risk of the Yellow River Delta wetland. The order of pollution levels of the four pollution factors was Cd > Cu > As > Pb, and the order of potential ecological risk parameters of individual pollutant was Cd > As > Cu > Pb. Element Cd was the major factor of the pollution factors and the potential ecological risk factor in the Yellow River Delta wetland.

Keywords: Surface Sediment; Heavy Metal; Ecological Risk Assessment; the Yellow River Delta Wetland
CLC number: X53; X820.4

黄河三角洲湿地是我国温暖带最完整、最广阔、最年轻的湿地生态系统,拥有丰富的植物资源,种类繁多的珍稀、濒危鸟类在此栖息。黄河三角洲湿地处于陆海相互作用的敏感地带,在维持珍稀物种、消减外源污染、调节气候、恢复水陆生态交错带功能等方面发挥着重要作用[1]。近年来,随着黄河三角洲地区经济社会的快速发展,工业、农业、畜牧业和居民生活中产生的大量污染物通过河流进入海域,湿地受重金属污染的形势越来越严峻。

多源性、隐蔽性、积累性和长期性等是重金属污染的典型特点,同时,其具有显著的生物毒性,因此重金属能够对动物、植物、人类及生态环境构成潜在威胁[2]。管理、控制和治理土壤污染的前提是进行重金属污染风险评价[3],目前典型的和最常用的重金属风险评价方法有地累积指数法、内梅罗综合污染指数法、污染负荷指数法、潜在生态危害指数法等。瑞典科学家 Hakanson[4] 于

收稿日期:2018 - 04 - 21
作者简介:宋颖(1988 -),女,硕士研究生、工程师。研究方向:水质监测及水质评价。E - mail:songy09@163.com

1980 年提出了潜在生态危害指数法(The Potential Ecological Risk Index)(*RI*),该方法不仅考虑了土壤重金属的含量,同时还考虑了重金属的生态效应、环境效应和生物毒性等方面的内容,因此能够综合反映重金属对生态环境的影响潜力。在环境污染研究中,重金属主要指具有显著生物毒性的 Cd、Pb 等重金属元素以及类金属元素 As,其次是指具有一定毒性的金属元素,如 Cu 等。结合研究区域实际,该项研究选取了 Cu、Pb、Cd、As 4 种黄河三角洲湿地常见的重金属污染因子,其中 Cu、Pb、Cd 是 Hakanson 建议的 3 种重金属元素,As 是其他学者普遍认为的生物毒性较强的重金属元素[5],目前这 4 种重金属元素的研究也较多[6-8]。该项研究以黄河三角洲湿地为研究区域,研究了湿地表层沉积物中重金属的含量,分析了重金属的相关性,同时用潜在生态风险指数法(*RI*)对重金属污染状况进行了生态风险评价,比较了不同重金属元素的污染贡献,以期为重金属污染的防治以及湿地资源的合理开发利用提供科学的理论依据。

1　研究区域和研究方法

1.1　研究区域概况

黄河三角洲湿地位于黄河入海口,地处渤海湾南岸以及莱州湾西岸,主要分布在山东省东营市境内,位置为东经 118°33′ ~ 119°20′,北纬 37°35′ ~ 38°12′,气候为温带大陆性季风气候,年平均气温 12.6 ℃,年平均降水量 592.2 mm,年平均蒸发量 550 mm[9-11]。黄河三角洲湿地是黄河近百年来携带大量泥沙填充渤海凹陷成陆的海相沉积平原,土壤类型为隐域性潮土和盐土土类。

1.2　样品采集与处理

在黄河三角洲南岸湿地和北岸湿地分别设置 10 个和 6 个采样点,采用 GPS 定位并记录坐标信息,采样点布设情况,见图 1。

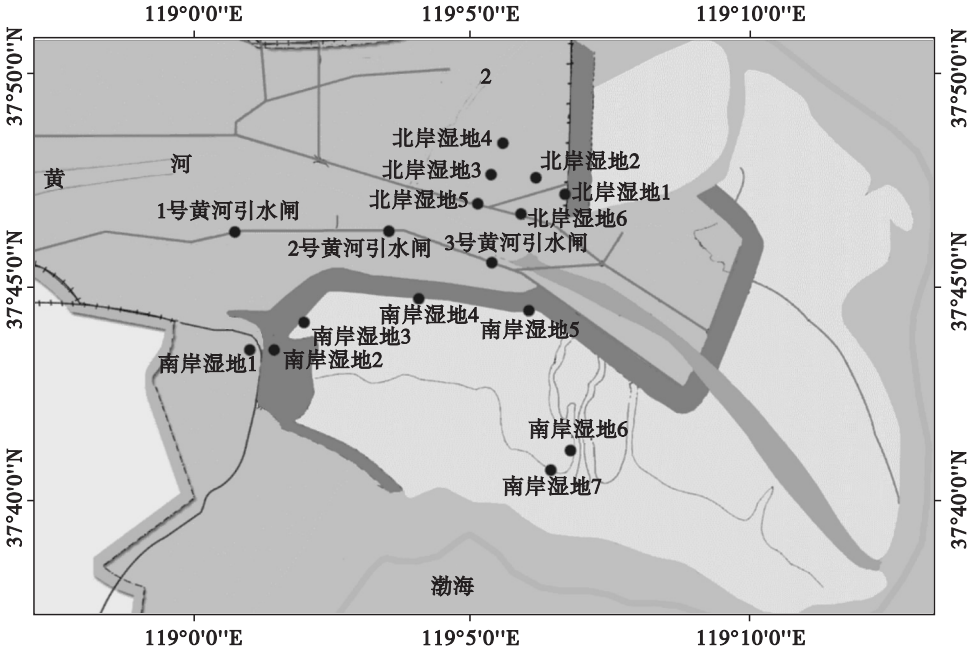

图 1　研究区域位置及采样点布设图

采用抓斗采泥器采集湿地表层 0 ~ 10 cm 的沉积物 1 ~ 2 kg,用塑料勺将不与采泥器抓斗金属部分直接接触的底泥转移至聚乙烯塑料袋中,将样品编号,带回实验室。将所采样品除去砾石和动植物残体等杂物,自然风干后,研磨成粉,过粒度为 150 μm 尼龙筛,装入样品瓶,贴好标签,然后置于干燥器中待测。

1.3　样品分析

沉积物中 Cu、Pb、Cd 重金属元素的消解采用《水和废水监测分析方法》(第四版)中的微波酸分

解法,称取 0.200 0 ~ 0.300 0 g(精确至 0.000 2 g)土样,将其放入聚四氟乙烯消解罐,加入 2 ~ 3 滴纯水润湿土样,然后加入 10 mL HNO_3 和 1 mL HF,加盖密封后,放入微波消解仪中消解,消解程序见表 1。消解完成后,取出消解罐冷却降温。彻底冷却后,将消解液移入 100 mL 容量瓶中,用纯水定容,然后用石墨炉原子吸收分光光度计测定 Cu、Pb、Cd 的含量。沉积物中 As 元素的消解采用《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 2 部分:土壤中总砷的测定》(GB/T 22105.2 - 2008)中的消解方法,用王水(硝酸:盐酸 = 1:3,然后用去离子水稀释一倍)消解,称取 0.200 0 ~ 0.300 0 g(精确至 0.000 2 g)土样,将其放入50 mL具塞比色管中,加入 2 ~ 3 滴纯水润湿土样,然后加入 10 mL 王水,加塞摇匀后,将其置于沸水浴中消解 2 h,期间摇动几次,消解完成后,取下冷却,用纯水稀释至刻度,然后用原子荧光光度计测定 As 的含量。为保证测定质量, 每批样品均放置 2 个空白样品与样品进行同步分析。

表 1 黄河三角洲湿地表层沉积物微波消解程序

程序	功率/W	爬升时间/min	温度/℃	保持时间/min
1	1 000	10	120	2
2	1 000	5	150	5
3	1 000	6	185	30

1.4 评价方法

采用潜在生态风险指数法(RI)来评价黄河三角洲湿地表层沉积物中重金属污染的潜在生态风险。潜在生态风险指数(RI)体现了生物有效性、相对贡献比例以及地理空间差异等特点,能够综合反映沉积物中重金属的影响潜力[12]。

其计算公式为:

$$C_f^i = C_D^i / C_R^i \tag{1}$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \tag{2}$$

$$RI = \sum_{i=1}^{m} E_r^i = \sum_{i=1}^{m} T_r^i \times C_f^i \tag{3}$$

式(1)中,C_D^i 为沉积物中重金属 i 的实测含量,mg/kg;C_R^i 为重金属 i 的背景参考值,文章选用山东省土壤背景值作为计算依据,Cu、Pb、Cd、As 的土壤背景值分别为 24.0, 25.8, 0.084, 9.3 mg/kg[13]。式(2)中,T_r^i 为重金属 i 的毒性系数,反映了重金属的毒性水平及生物体对该污染物的敏感程度,Cu、Pb、Cd、As 4 种重金属的毒性响应系数分别为 5,5,30,10[14]。E_r^i 为某一重金属 i 的潜在生态危害指数。RI 为某一区域沉积物中重金属综合潜在生态风险指数。RI、E_r^i 及 C_f^i 值相对应的污染程度或潜在生态风险程度[15],见表 2。

表 2 重金属元素潜在生态风险评价分级标准

指标	污染程度或潜在生态风险程度				
C_f^i	$C_f^i < 1$	$1 \leqslant C_f^i < 3$	$3 \leqslant C_f^i < 6$	$C_f^i \geqslant 6$	—
	低污染	中污染	较高污染	很高污染	—
E_r^i	$E_r^i < 4$	$40 \leqslant E_r^i < 80$	$80 \leqslant E_r^i < 160$	$160 \leqslant E_r^i < 320$	$E_r^i \geqslant 320$
	低潜在生态风险	中潜在生态风险	较高潜在生态风险	高潜在生态风险	很高潜在生态风险
RI	$RI < 150$	$150 \leqslant RI < 300$	$300 \leqslant RI < 600$	$RI \geqslant 600$	—
	低潜在生态风险	中潜在生态风险	较高潜在生态风险	很高潜在生态风险	—

1.5 数据处理

用 SPSS 19.0 和 Microsoft Excel 2007 进行数据处理和分析。采用 Spearman 进行土壤重金属相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 湿地表层沉积物重金属含量

用 0.10 ~ 0.20 mL 去离子水代替土样作为空白,用与处理样品同样的程序处理空白样品,空白

样品用于各元素测定时仪器的调零,即样品各金属元素测定信号值都应扣除相应空白信号值。各元素空白信号值,见表 3。

表 3　黄河三角洲湿地表层沉积物重金属含量

mg·kg^{-1}

研究区域	项目	Cu	Pb	Cd	As
	空白信号值(无量纲)	0.002	0.002	0.002	103.90
南岸湿地	平均值	47.20	22.8	1.480	11.80
	最大值	171.00	46.4	3.660	14.40
	最小值	6.21	10.8	0.173	8.57
	背景值	24.00	25.8	0.084	9.30
北岸湿地	平均值	47.10	18.9	1.360	12.30
	最大值	110.00	48.2	2.390	14.70
	最小值	10.10	11.2	0.606	9.27
	背景值	24.00	25.8	0.084	9.30
全区	平均值	47.10	21.3	1.440	12.00
	最大值	171.00	48.2	3.660	14.70
	最小值	6.21	10.8	0.173	8.57
	背景值	24.00	25.8	0.084	9.30

通过对湿地表层沉积物中各重金属元素的平均含量与当地土壤背景值相比,可以反映出其不同的污染程度。黄河三角洲湿地表层沉积物中重金属的含量可见表 3。全区、南岸湿地和北岸湿地表层沉积物重金属含量由高到低依次为:Cu、Pb、As、Cd。与山东省土壤背景值相比,除 Pb 外,湿地表层沉积物中 Cu、Cd、As 的含量均高于土壤底质背景值,尤其是 Cd 元素,其最高含量为土壤底质背景值的 43.57 倍。因此,需要关注 Cd 元素引起的污染,与 Bai et al[6] 和 Wang et al[16] 有相同的研究结果。

2.2　湿地表层沉积物重金属相关性分析

对表层沉积物中不同重金属间进行相关性分析,可以在一定程度上说明元素来源的相似性。湿地表层沉积物中 Cu、Pb、Cd 和 As 4 种重金属间的相关性分析,见表 4。

表 4　黄河三角洲湿地表层沉积物中重金属的相关性

重金属元素	Cu	Pb	Cd	As
Cu	1.000			
Pb	0.127	1.000		
Cd	−0.106	0.015	1.000	
As	0.128	0.114	−0.244	1.000

由表 4 可知,Cu、Pb、Cd 和 As 4 种重金属之间相关性相对不显著。重金属间不存在相关性说明它们可能来自不同的污染源,其来源具有多元性和复杂性。

2.3　湿地表层沉积物重金属生态风险评价

潜在生态风险指数法(*RI*)之所以能够综合反映多种重金属对生态环境的影响潜力,是因为该方法综合考虑了重金属的生态效应、环境效应和生物毒性,并且该方法能定量区分出各重金属元素的潜在毒性水平。黄河三角洲湿地表层沉积物单个污染物的污染参数及潜在生态风险评价结果,见表 5。

表 5　黄河三角洲湿地表层沉积物重金属污染指数和生态风险评价结果

研究区域	项目	单个污染物的污染参数 C_f^i				单个污染物潜在生态危害指数 E_r^i				综合潜在生态风险指数 *RI*
		Cu	Pb	Cd	As	Cu	Pb	Cd	As	
南岸湿地	平均值	1.97	0.88	17.68	1.27	9.83	4.41	530.29	12.65	557.17
	最大值	7.13	1.80	43.57	1.55	35.63	8.99	1307.14	15.48	1 332.70
	最小值	0.26	0.42	2.06	0.92	1.29	2.09	61.79	9.22	87.63
北岸湿地	平均值	1.96	0.73	16.18	1.33	9.81	3.66	485.30	13.26	512.02
	最大值	4.58	1.87	28.45	1.58	22.92	9.34	853.57	15.81	872.98
	最小值	0.42	0.43	7.21	1.00	2.10	2.17	216.43	9.97	237.08
黄河三角洲湿地	平均值	1.97	0.83	17.11	1.29	9.82	4.13	513.42	12.88	540.24
	最大值	7.13	1.87	43.57	1.58	35.63	9.34	1307.14	15.81	1 332.7
	最小值	0.26	0.42	2.06	0.92	1.29	2.09	61.79	9.22	87.63

从单个污染物的污染参数 C_f^i 来看,Pb 为低污染状态,Cu 和 As 为中污染状态,Cd 为很高污染。4 种污染因子污染程度由高到低为 Cd > Cu > As > Pb。黄河三角洲湿地最主要的重金属污染因子为 Cd,变化范围为 2.06 ~ 43.57,均值为 17.11。单个污染物潜在生态危害指数由高到低为 Cd > As > Cu > Pb,黄河三角洲湿地最主要的潜在生态风险因子为 Cd,最大值为 1 307.14,均值为 513.42;其次为 As,变化范围为 9.22 ~ 15.81,均值为 12.88。从综合潜在生态风险指数 *RI* 来看,全区变化范围为 87.63 ~ 1332.7,均值为 540.24,说明全区具有较高潜在生态风险。

此外,从表 5 可以明显看出,单个污染物的污染程度与其潜在生态危害程度不一致,其原因是 Cu 元素虽然污染程度较高,但是其毒性响应系数为 5 小于 As 的毒性响应系数(T_r^i)。因此,要同时考虑重金属的浓度及其毒性响应系数两方面,才能正确反映重金属的潜在生态危害程度。

在所研究的 4 种重金属元素中,Cd 的毒性响应系数($T_r^i = 30$)最高,同时其实测含量(0.173 ~ 3.66 mg/kg)相对于山东省土壤底质背景值(0.084 mg/kg)也较高,这均表明 Cd 具有较高的潜在生态危害指数。与 Bai et al[6] 和 Wang et al[16] 有相同的研究结果,他们也认为黄河三角洲湿地中度到强度的 Cd 污染需要格外重视。He et al[17] 指出我国农田土壤和河口、水域沉积物中的 Pb、Hg 和 Cd 污染最为严重,亟需有效控制。因此,为了保护黄河口三角洲湿地生态环境,使其健康发展,必须采取相应措施来控制湿地土壤中 Cd 元素的积累趋势,削弱石油开采、石油化工业和其他重工业等对黄河口三角洲湿地造成的污染。

3 结论

(1)黄河三角洲湿地表层沉积物中的重金属元素除 Pb 外,Cu、Cd、As 的含量均高于土壤底质背景值,超出背景值最多的为 Cd 元素。

(2)潜在生态风险评价结果表明,黄河三角洲湿地的重金属污染为较高潜在生态风险,Cd 为主要的生态风险因子,其次为 As。因此,在湿地重金属污染治理过程中要加倍重视 Cd 元素引起的污染,其次,As 元素引起的污染也不容忽视。

(3)今后在黄河三角洲湿地环境治理中,要重点关注 Cd 元素的富集、迁移转化和生态效应。面对经济快速发展同资源及环境保护之间的深层矛盾,为保护和恢复已破坏的湿地生态环境,黄河三角洲地区应积极建设资源循环利用、生物多样性保护等生态工程,实现经济、社会与生态环境的协调发展。

参 考 文 献

[1]吴志勇,黄川友. 湿地构成变化与湿地保护[J]. 环境科学与技术,2001,24(S2):32 - 34.

[2]毛志刚,谷孝鸿,陆小明,等. 太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学,2014,35(1):186 - 193.

[3]高瑞英. 土壤重金属污染环境风险评价方法研究进展[J]. 科技管理研究,2012(8):45 - 50.

[4]Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8):975 - 1001.

[5]陈静生,王 忠,刘玉机. 水体金属污染潜在危害:应用沉积学方法评价[J]. 环境科技,1989,9(1):16 - 25.

[6]Bai J H, Xiao R, Zhang K J, et al. Arsenic and heavy metal pollution in wetland soils from tidal freshwater and salt marshes before and after the flow - sediment regulation regime in the Yellow River Delta, China [J]. Journal of Hydrology, 2012(450 - 451):244 - 253.

[7]Cui B, Zhang Q, Zhang K, et al. Analyzing trophic transfer of heavy metals for food webs in the newly - formed wetlands of the Yellow River Delta, China [J]. Environmental Pollution, 2011, 159(5):1297 - 1306.

[8]姚新颖. 黄河三角洲湿地土壤重金属形态特征及风险评价[D]. 北京:北京林业大学,2015.

[9]崔步礼,常学礼,陈雅琳,等. 黄河水文特征对河口海岸变化的影响[J]. 自然资源学报,2006,21(6):957 - 964.

[10]刘高焕,刘庆生,叶庆华,等. 黄河三角洲土地利用动态监测于海岸带综合管理[J]. 资源科学,2006,28(5):171 - 175.

[11]张高生,李 峻,李 岩. 黄河三角洲生态现状及保护对策[J]. 农业生态环境,2000,16(2):24 - 27.

[12]刘 晶,腾彦国,崔艳芳,等. 土壤重金属污染生态风险评价方法综述[J]. 环境监测管理技术,2007,19(3):6 - 11.

[13]国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990.

[14]王云倩,杨丽原,曹 峰,等. 洙赵新河表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. 有色金属工程,2014,4(1):64 - 67.

[15]伍恒赟,罗 勇,张起明,等. 鄱阳湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价[J]. 中国环境监测,2014,30(6):114 - 119.

[16]Wang Y P, Bai J H, Xiao R, et al. Assessment of heavy metal contamination in the Suaeda salsa wetland in the Yellow River Estuary[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33:3083 - 3091.

[17]He B, Yun Z J, Shi J B, et al. Research progress of heavy metal pollution in China: sources, analytical methods, status, and toxicity[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(2):134 - 140.