

府河-白洋淀沉积物中重金属污染特征及潜在风险评价

胡国成^{1,2}, 许木启^{2*}, 许振成¹, 戴家银², 曹 宏², 彭晓武¹, 齐建英¹

(1.环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655; 2.中国科学院动物研究所动物生态与保护生物学重点实验室, 北京 100101)

摘 要:沉积物重金属污染是水环境污染评价的重要内容,重金属含量水平常被作为水环境质量的重要指标之一。为了掌握华北平原的府河和白洋淀中沉积物重金属的污染水平,研究了 19 个沉积物样品和 3 个土壤样品中 7 种重金属的污染特征,利用地累积指数法、潜在生态危害指数法及生物效应浓度法评估了重金属的环境风险,并初步分析了污染来源。结果表明,府河和白洋淀沉积物受多种重金属复合污染,其中 Zn、Pb、Cu 和 Cd 污染较为严重,府河沉积物的潜在生态环境危害强于白洋淀。相关分析显示府河和白洋淀重金属污染具有相似污染源,保定市工业废水、生活污水及府河沿岸金属冶炼企业很可能是白洋淀地区重金属的主要来源。从城市环境管理、生态环境修复、宣传教育等方面提出白洋淀区域重金属污染控制对策与建议,为白洋淀区域生态环境保护提供科技支撑。

关键词:重金属;污染特征;风险评价;沉积物;府河;白洋淀

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)01-0146-08

Pollution Characteristic and Potential Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment from Fuhe River and Baiyangdian Lake, North China

HU Guo-cheng^{1,2}, XU Mu-qi^{2*}, XU Zhen-cheng¹, DAI Jia-yin², CAO Hong², PENG Xiao-wu¹, QI Jian-ying¹

(1.South China Institutes of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China; 2.Key Laboratory of Animal Ecology and Conservation Biology, Institute of Zoology, Chinese Academic Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Contamination of heavy metals in sediment is an essential component of environmental pollution assessment. It is also regarded as very important parameters reflecting water environmental quality. Pollution characteristics of heavy metals (Zn, Pb, Cu, Ni, Cd, Cr and As) in nineteen surface sediments and three soils from Fuhe River and Baiyangdian Lake, North China, were investigated. The potential environmental risk assessments were conducted systematically by using the Index of Geoaccumulation (I_{geo}), the Potential Ecological Risk Index (RI) and Sediment Quality Guidelines (SQGs), respectively. The potential sources of heavy metals in sediments were examined. The results showed that average concentrations of Zn, Cu, Pb and Cd in sediments from Fuhe River were 1 147.1, 190.5, 109.7 mg·kg⁻¹ and 3.3 mg·kg⁻¹, respectively, whereas these in sediment from Baiyangdian Lake were 269.4, 31.3, 16.3 mg·kg⁻¹ and 0.3 mg·kg⁻¹. The concentrations of heavy metals (Zn, Cu, Pb and Cd) in sediments from Fuhe River were higher than those of Baiyangdian Lake. The heavy metal contamination of Zn, Pb, Cu and Cd in surface sediment from Fuhe River was serious. Potential ecological risk assessments indicated that the potential risk of sediment from Fuhe River was larger than that of Baiyangdian Lake. The heavy metals in sediment sample from S3 indicated the highest total toxic units (20.93) among all the sample sites. Correlation analysis suggested that heavy metals in sediments from Fuhe River and Baiyangdian Lake might come from similar sources, which were possibly from industrial and domestic sewage discharge and the smaller metal refinery plants along the bank of Fuhe River. In view of the potential ecological risk of heavy metals in sediments from Fuhe and Baiyangdian Lake, control strategies and suggestion were provided, based on city environmental management, ecological restoration, environmental education and communication.

Keywords: heavy metals; pollution characteristics; risk assessment; surface sediment; Fuhe River; Baiyangdian Lake

收稿日期:2010-08-03

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB403306);环境保护部华南环境科学研究所公益项目(zx_200910_26)

作者简介:胡国成(1978—),男,博士,工程师,主要从事水生生态毒理学研究。E-mail:huguo Cheng@scies.org

* 通讯联系人:许木启 E-mail:xumq@ioz.ac.cn

随着工农业生产的迅速发展,环境污染日趋严重。污染物在环境中的累积、迁移和转化导致环境质量恶化,严重威胁人类健康。重金属是一类具有较大毒性的污染物,能与生物大分子基团和遗传物质相互作用,导致生物器官畸变、突变、癌变效应^[1-3]。环境介质中的重金属通过地表径流、雨水冲刷、大气沉降等途径普遍存在于自然界,重金属污染已经成为水环境污染的重要组成部分。沉积物是水体重金属重要载体,能够反映水体生态环境质量^[4]。受到重金属污染的沉积物在水力的作用下,成为河流、湖泊、水库等水体重金属二次污染的重要污染源^[5]。因此,对有关河流、湖泊、水库等水体沉积物中重金属含量分布、组成特征及其潜在风险进行研究,对于了解该地区重金属污染程度和环境保护具有重要价值。

白洋淀是我国华北平原上最大的淡水湖泊,位于河北省东南,太行山东麓,永定河冲积扇与滹沱河冲积扇之间的低洼地区,是河北中部平原与大清河流域滨海平原的结合处,地处大清河水系中部。白洋淀淀区由大小不等的100多个淀泊组成,面积为360 km²。府河是白洋淀一条重要的供水河,也是保定市的排污河道,全长60多km。白洋淀在拦蓄洪水、调节气候,改善生态环境,发展旅游事业等方面发挥了重要作用,故有“北国江南”、“华北明珠”之称。近年来,随着白洋淀周边地区人口剧增,工农业发展迅速,在自然因素和人类活动的影响下,白洋淀每年接纳大量生活污水、工业废水及农业面源的径流水,严重影响了其生态环境。关于白洋淀生物体和沉积物中重金属的研

究已有报道^[6-7]。Chen 等对白洋淀水体和鱼体中 Hg 和 As 进行了研究,发现鱼体中的 Hg 和 As 的含量超出美国环境保护署(USEPA)的标准^[6];杨卓等对白洋淀淀区表层沉积物中重金属污染及其潜在风险评价进行了研究,结果显示白洋淀底泥中重金属 Cd 和 Pb 含量较高,分别表现为极强和轻微-中等的生态危害^[7]。

近年来,随着淀区经济的迅速发展,白洋淀生态环境遭到破坏。流经保定市的府河已成为城市纳污河,保定市工业企业排放的废水对白洋淀水体环境质量构成威胁。因此,本文以白洋淀淀区及其支流(府河)沉积物作为研究对象,初步分析7种重金属元素的含量水平及分布特征,并对其可能产生的潜在生态风险进行评价。同时,与历史污染数据比较,以其为进一步了解白洋淀地区重金属污染规律,保护白洋淀湿地生态环境提供科学依据。

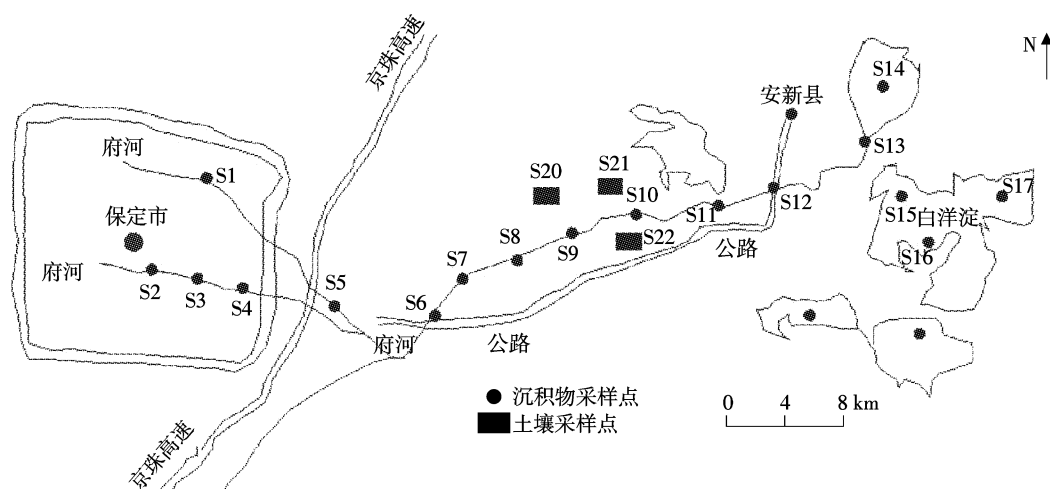
1 材料与方法

1.1 样点布设与样品采集

本文以白洋淀淀区和府河为研究对象,分别于2007年8月和2008年3月,利用彼得逊采泥器采集表层沉积物样品19个,其中12个来自府河,7个来自白洋淀。在府河岸边采集3个土壤样品,附近有焚烧金属的痕迹,如图1所示。样品采集后保存于洁净的密封袋中,运回实验室于-20℃保存至分析。

1.2 样品分析与测试

沉积物和土壤样品经真空冷冻干燥后过孔径为63 μm的不锈钢金属筛,于密封袋中4℃保存备用。



(S1~S12 来自府河, S13~S19 来自白洋淀, S20~S22 来自府河岸边土壤)

(Site 1~12 from Fuhe River, Site 13~19 from Baiyangdian Lake, S20~S22 from bank of Fuhe River)

图1 府河-白洋淀沉积物采样示意图

Figure 1 Sampling sites of surface sediments in Fuhe River and Baiyangdian Lake, North China

准确称取沉积物(或土壤样品)0.5 g 于聚四氟乙烯烧杯中,加入浓硝酸 5.0 mL,氢氟酸 2.0 mL 后,平板加热至近干,再加入 1.0 mL 高氯酸,加热至浓白烟冒尽,冷却。然后用 5 mL 稀硝酸(体积比为 1:1)溶解烧杯中的残留物,转移至 25 mL 容量瓶定容,过滤待测,并作空白样品。用原子吸收分光光度计(岛津 6800)测定 Cu、Pb、Zn、Cd、Ni 和 Cr;采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HNO}_3$ 消解沉积物和土壤,然后采用双道原子荧光光度计(北京万拓仪器公司 AFS-230a)测定 As^[8]。每 6 个样品做一次平行,平行分析的相对误差控制在 15%以内。

1.3 数据分析

采用 SPSS11.0 软件进行独立样本 t 检验,用 Pearson 相关分析各金属元素之间的关系,显著性水平设置为 0.05。

2 结果与讨论

2.1 沉积物中重金属分布特征

沉积物和土壤样品中重金属测定结果见表 1。在所有沉积物样品中,Cd 和 As 的检出率分别为 57.9% 和 78.9%。府河表层沉积物中 Zn、Cu、Pb、Cd 的平均含量分别为 1 147.1、190.5、109.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 3.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;白洋淀表层沉积物中 Zn、Cu、Pb、Cd 的平均含量分别为 269.4、31.3、16.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。府河和白洋淀受重金属污染的程度有较大差异,基中府河受到 7 种重金属污染的程度显著高于白洋淀 ($P<0.05$),这可能与府河集纳保定市生活污水和工业废水有关。据历史资料调查,保定市向府河排放污水的企业约 200 家,主要涉及造纸、化工、电力、印染、石油等行业,日排放废水量约 30 万 t。工业废水中主要包含硫化物、石油类、重金属、氰化物等。虽然保定市已经建成污水处理厂,但是污水处理量不及污水排放量。府河发源于保定市西郊,自 20 世纪 60 年代以来,府河就已经成为保定市排污、纳污的河流。白洋淀环境污染治理早在 20 世纪 70 年代就已经开始。1991—1993 年间,中国科学院的相关院所对白洋淀区域水污染控制进行了深入研究^[9];2005 年,相关科研单位对白洋淀底泥污染现状进行了评价^[7]。与 20 世纪 90 年代的资料相比,府河沉积物中 Cu、Cr、Zn、As 的平均含量有下降的趋势,而 Pb、Cd 的平均含量有升高的趋势,Ni 的平均含量变化幅度不大;白洋淀沉积物中 Cu 和 Zn 的平均含量有升高的趋势,可能与府河污水汇入及岸边的金属冶炼企业有关,而白洋淀沉积物中 Pb 和 Cd 的平均含量变化幅度不大。

表 1 府河-白洋淀表层沉积物/土壤中重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 1 Concentrations of heavy metals in surface sediments from Fuhe River and Baiyangdian Lake, North China ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

采样点	Cu	Pb	Cd	Ni	Cr	Zn	As
S1	15.4	14.7	<0.1	22.9	63.3	972.2	9.8
S2	139.4	103.9	<0.1	40.1	27.2	1 206.0	10.9
S3	792.1	458.6	1.8	49.0	117.9	2 072.5	24.3
S4	593.0	185.6	1.2	39.8	103.2	691.0	18.2
S5	31.7	18.0	<0.1	26.6	76.2	4 752.7	7.9
S6	243.4	152.0	5.0	30.8	79.8	463.3	14.9
S7	89.9	71.9	3.0	64.8	137.9	433.3	23.6
S8	115.4	119.3	1.8	24.1	66.6	898.6	14.0
S9	120.3	109.0	8.0	76.6	192.1	769.7	26.7
S10	59.9	29.4	3.3	60.8	134.6	314.9	18.0
S11	33.2	29.3	<0.1	26.4	75.0	494.7	7.7
S12	52.4	24.4	2.1	29.8	89.3	696.7	8.2
S13	21.4	19.5	0.3	20.5	53.0	275.8	<0.1
S14	27.7	13.9	0.2	28.6	72.7	340.3	<0.1
S15	19.8	8.7	<0.1	28.8	66.5	267.5	<0.1
S16	78.4	27.8	0.4	22.2	61.7	221.9	0.7
S17	37.0	9.76	<0.1	33.5	74.7	303.1	5.2
S18	14.2	21.6	<0.1	20.2	52.2	200.5	<0.1
S19	20.6	13.0	<0.1	21.7	61.8	276.6	9.8
S20	33 019.6	1 579.8	7.0	26.1	61.6	44 739.5	48.1
S21	4 420.7	1 815.1	2.0	156.5	546.7	7 248.3	81.0
S22	5 209.2	1 409.7	1.6	64.7	87.8	22 854.0	13.8
ERL ^a	34	46.7	—	20.9	81	150	—
ERM	270	218	—	51.6	370	410	—
TEL	18.7	30.2	—	15.9	52.3	124	—
PET	108.2	112.2	—	42.8	160.4	271	—

注:^a ERL 和 ERM 分别表示效应范围低值和效应范围中值;TEL 和 PEL 分别表示为临界效应浓度和必然效应浓度。

ERL:effect range low,ERM:effect range median,TEL:threshold effect level,PEL:probable effect level.

用全国表层土壤背景值评价府河和白洋淀沉积物中 7 种重金属污染情况^[10],结果显示府河沉积物中 Cd、Zn、Cu 和 Pb 的平均含量分别为全国表土背景值的 46.8、16.9、9.5 倍和 4.6 倍,而白洋淀表层沉积物中 Cd、Zn 和 Cu 的含量分别为全国表土背景值的 4.2、4.0 倍和 1.6 倍。尽管府河和白洋淀沉积物中 Cd 的含量低于其他重金属元素的含量,但是 Cd 含量超出全国表土背景值的倍数最大,说明 Cd 在府河和白洋淀污染最严重,这一研究结果与杨卓等^[7]的研究结果基本一致。在位于府河的 12 个采样点中,S2(动物园)、S3(焦庄)、S4(下闸)、S8(刘口)、S9(臧庄)采样点受重金属复合污染严重,其中 S3(焦庄)Cu

(792.1 mg·kg⁻¹)和 Pb 的含量最高(458.6 mg·kg⁻¹), S9 (臧庄)Cd (7.98 mg·kg⁻¹), Ni (76.6 mg·kg⁻¹), Cr (192.1 mg·kg⁻¹)和 As(26.7 mg·kg⁻¹)的含量最高; S5 (孙村)Zn(4752.7 mg·kg⁻¹)的含量最高。根据调查资料,府河是保定市全部生活污水的纳污河流,黄花沟引污总干渠接纳保定市大部分工业废水,最终汇入唐河污水库。S2(动物园)、S3(焦庄)位于保定市区, S5(孙村)距离排污总干渠比较近,生活污水和工业废水污染比较严重,从而导致重金属含量较高。

对府河沿岸(安州镇附近)3个土壤样品中(S20、S21、S22)重金属进行了分析,其重金属含量显著高于府河和白洋淀沉积物中重金属含量($P<0.05$), Zn、Cu、Pb、Cr、Ni、As、Cd 的平均含量分别为 24 947.2、14 216.5、1 601.6、232.0、82.4、47.6、3.5 mg·kg⁻¹。土壤样品中 7 种重金属的平均含量分别是府河沉积物中重金属的 21.7、74.6、14.6、2.4、2.0、3.1 倍和 1.1 倍,是白洋淀沉积物的 92.6、454.4、98.2、3.3、3.7、9.1 倍和 12.0 倍。用《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)评价 3 个土壤样品重金属污染程度^[10],结果显示, S20 位点 Cu 和 Zn 的含量超出土壤环境质量三级标准值 83 倍和 89 倍。以上研究结果显示,在府河沿岸安州镇附近的土壤受重金属污染严重,这可能与附近的电线、电缆及电子废弃品拆卸活动有关系。安州镇附近的小作坊通过焚烧、酸洗等简单的处理方式,获取废弃品中有价值的金属,而在拆卸这些废弃品的同时,对周边环境造成了严重污染。

2.2 沉积物中重金属元素的相关性分析

为了更加清楚地了解沉积物中各种重金属元素含量的相关状况,本研究对府河和白洋淀表层沉积物中 5 种重金属元素进行了 Pearson 相关分析,结果如表 2 所示。由于 Cd 和 As 只在部分样品中检出,相关分析不包括这两种元素。从表 2 可以看出,除了 Zn 和 Ni、Zn 和 Cr 以外,其他重金属元素之间都存在不同程度的相关关系,这说明府河和白洋淀表层沉积物中的 Cu、Pb 和 Zn 存在共同变化的趋势,同时也说明这 3 种重金属污染具有一定的同源性。Cu 和 Pb 的相关系数大于 0.8,说明两者之间高度正相关。

2.3 沉积物中重金属的污染评价

为了更加清楚地了解府河-白洋淀表层沉积物中重金属元素的污染水平及生态危害,本文采用地积累指数法(Geoaccumulation Index, I_{geo})和潜在生态风险指数法(Risk Index, RI)对府河和白洋淀沉积物进行

表 2 府河-白洋淀表层沉积物中重金属含量相关性分析($n=19$)

Table 2 Pearson correlation analysis of heavy metals contents in surface sediments from Fuhe River and Baiyangdian Lake, North China($n=19$)

	Cu	Pb	Ni	Cr	Zn
Cu	1.000				
Pb	0.874**	1.000			
Ni	0.691*	0.493*	1.000		
Cr	0.532*	0.463*	0.765**	1.000	
Zn	0.479*	0.468*	0.407	0.367	1.000

注: * 表示相关系数在 0.05 水平上显著, ** 表示相关系数在 0.01 水平上显著。

Note: one asterisk indicates significant difference at 0.05 level, two asterisks indicate very significant difference at 0.01 level.

初步评价;利用 2 套沉积物质量基准(SQGs)评价其潜在生物毒性风险。因 Cd 和 As 在部分沉积物样品中检出,所以在计算重金属地积累指数和生物毒性风险时未包括这两种元素。

2.3.1 地积累指数法

地积累指数法是德国科学家 Müller 于 1979 年提出,其计算公式如下^[11]:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_n} \right)$$

式中: C_n 是元素 n 在小于 2 μm 沉积物中的含量; B_n 为黏质沉积岩(即普通页岩)中该元素的地球化学背景值,本文采用我国大陆沉积物地球化学背景值作为参照标准^[12]; 1.5 用于校正区域背景值差异。按 I_{geo} 数值可将重金属污染划分为 7 个等级,主要包括(0)清洁($I_{geo}<0$)、(1)轻度($0<I_{geo}<1$)、(2)偏中度($1<I_{geo}<2$)、(3)中度($2<I_{geo}<3$)、(4)偏重($3<I_{geo}<4$)、(5)严重($4<I_{geo}<5$)和(6)极重污染($I_{geo}>5$)^[13-14]。

府河和白洋淀表层沉积物中重金属元素地积累指数和污染级别结果见表 3。可以看出,府河和白洋淀表层沉积物中重金属 I_{geo} 值有较大差别。对于府河而言, Zn 的污染较为严重, I_{geo} 值在 1.47~5.38 之间(平均值为 2.88), 污染程度从偏中度污染到极重污染状态,特别是 S5(孙村)采样点 Zn 的 I_{geo} 值最高(5.38), 污染程度处于极重污染状态,这可能与历史上保定市工业废水、生活污水大量排放有关; Cu 的 I_{geo} 值变动较大,除了 S1(植物园)采样点外, I_{geo} 值范围在 0.07~4.71 之间,其污染程度从轻度污染至严重污染, S3 和 S4(焦庄和下闸)两个采样点 Cu 污染最严重,其 I_{geo} 值分别为 4.71 和 4.30; Pb 的 I_{geo} 值在 S3(焦庄)处最高(3.71),其污染程度处于偏重污染状态;府河

多数采样点中 Ni 和 Cr 的 I_{geo} 值小于 0, 说明府河受 Ni 和 Cr 污染程度较轻。综上所述, 府河 12 个采样点重金属元素污染程度的顺序为 $Zn > Cu > Pb > Ni = Cr$ 。多金属加和的结果显示: 除了 S1(植物园)、S10(安州镇)、S11(东向阳)、S12(安新大桥)4 个采样点外, 其他采样点均受到重金属的严重污染, 其中 S3(焦庄)和 S4(下闸)污染最严重。对于白洋淀而言, Zn 的 I_{geo} 值变化不大, 其范围在 0.81~1.58, 其污染程度处于轻度污染; Cu 在 S16(光淀)和 S17(枣林庄)的 I_{geo} 值分别为 1.38 和 0.29, 污染也较轻; Pb、Ni 和 Cr 在白洋淀 7 个采样点的 I_{geo} 值均小于 0, 这说明白洋淀受这 3 种重金属元素污染非常轻。综合考虑这 5 种重金属元素对白洋淀的污染, 其程度从轻度污染到中度污染状态, 重金属污染程度的顺序为 $Zn > Cu > Pb = Ni = Cr$ 。本文利用地积累指数评价白洋淀重金属污染等级的结果与杨卓等的不一致^[7]。2005 年, 白洋淀底泥中 Cd 污染达到极强程度, Pb 污染达到中等污染程度, Cu 和 Zn 未构成污染; 本文研究结果 Zn、Cu、Pb、Ni、Cr 等重金属污染较轻, 其程度处于轻度-中度污染状态。这可能与地方政府加大白洋淀环境污染治理的力度有关。自 2005 年以来, 河北省政府启动了白洋淀生态环境治

理计划, 总投资达数十亿元^[15]。另外, 国家相关部门也将白洋淀作为重点保护区域, 采取相关措施对白洋淀环境污染进行综合整治。

2.3.2 潜在生态风险指数法(RI)

瑞典学者 Hakanson 于 1980 年提出的潜在生态危害指数法^[16]。这种指数法主要受表层沉积物中重金属的浓度、种类、毒性水平以及水体对重金属污染的敏感性等 4 个方面因素的控制和影响。这种评价方法的优势在于从重金属的生物毒性角度出发, 反映了多种污染物的综合影响, 并定量地划分出潜在生态危害的程度。潜在生态危害指数(RI)计算公式为:

$$RI = \sum_i^m E_i^i = \sum_i^m T_i^i \times \frac{C_i^i}{C_n^i}$$

式中: RI 为沉积物中多种重金属潜在生态危害指数; C_i^i 为单一元素实测值; C_n^i 为单一元素参比值; T_i^i 为第 i 种重金属元素的毒性系数; E_i^i 为第 i 种重金属的潜在生态危害系数。Hakanson 指出了几种重金属毒性系数: Cu 为 5, Pb 为 5, Zn 为 1, Cd 为 30, Cr 为 2, As 为 10, Ni 为 2, 以我国大陆沉积物地球化学背景值作为各重金属的参比值^[12]。依据重金属的潜在生态危害系数(E_i^i)可将沉积物中重金属污染状况划分为 5 个等

表 3 府河-白洋淀表层沉积物重金属元素地积累指数和划分等级

Table 3 Index of geoaccumulation and classification of heavy metals pollution of the surface sediments from Fuhe River and Baiyangdian Lake, North China

采样位点	Cu		Pb		Ni		Cr		Zn		金属总和	
	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级
S1	-0.97	0	-1.25	0	-0.87	0	-0.91	0	3.09	4	-0.92	0
S2	2.21	3	1.57	2	-0.07	0	-2.13	0	3.40	4	4.99	5
S3	4.71	5	3.71	4	0.22	1	-0.01	0	4.18	5	12.82	6
S4	4.30	5	2.41	3	-0.08	0	-0.21	0	2.60	3	9.02	6
S5	0.07	1	-0.96	0	-0.66	0	-0.64	0	5.38	6	3.19	4
S6	3.01	4	2.12	3	-0.45	0	-0.58	0	2.02	3	6.13	6
S7	1.57	2	1.04	2	0.63	1	0.21	1	1.93	2	5.38	6
S8	1.93	2	1.77	2	-0.80	0	-0.84	0	2.98	3	5.04	6
S9	1.99	2	1.64	2	0.87	1	0.69	1	2.76	3	7.95	6
S10	0.99	1	-0.25	0	0.53	1	0.18	1	1.47	2	2.92	3
S11	0.14	1	-0.25	0	-0.67	0	-0.67	0	2.12	3	0.66	1
S12	0.79	1	-0.52	0	-0.49	0	-0.41	0	2.61	3	1.98	2
S13	-0.50	0	-0.84	0	-1.04	0	-1.17	0	1.27	2	-2.27	0
S14	-0.12	0	-1.33	0	-0.56	0	-0.71	0	1.58	2	-1.14	0
S15	-0.61	0	-2.00	0	-0.54	0	-0.84	0	1.23	2	-2.77	0
S16	1.38	2	-0.33	0	-0.92	0	-0.95	0	0.96	1	0.14	1
S17	0.29	1	-1.84	0	-0.32	0	-0.67	0	1.41	2	-1.13	0
S18	-1.09	0	-0.70	0	-1.05	0	-1.19	0	0.81	1	-3.21	0
S19	-0.55	0	-1.42	0	-0.95	0	-0.95	0	1.28	2	-2.60	0

级;依据重金属的潜在生态危害指数(RI)可将沉积物中重金属污染程度划分为 4 个等级。重金属的潜在生态危害系数(E_i^i)、潜在生态危害指数(RI)与污染程度的关系如表 4 所示。

表 4 重金属潜在生态危害系数(E_i^i)、危害指数(RI)与危害程度分级的关系

Table 4 Relationship between potential ecological risk coefficients (E_i^i), risk indices(RI) of heavy metals and pollution degree

E_i^i	RI	生态危害程度
<40	<150	轻微的生态危害
40~80	150~300	中等的生态危害
80~160	300~600	强的生态危害
160~320	>600	很强的生态危害
>320		极强的生态危害

府河-白洋淀表层沉积物重金属的潜在生态风险评价结果如表 5 所示。在来自府河的 12 个采样点中, 7 个采样点沉积物中 Cd 的潜在生态危害系数均大于 160, 达到很强的生态危害级别(E_i^i 平均值为 198); Cu 的平均潜在生态危害系数大于 40, 达到中等危害级别, 其中 S3 采样点(焦庄)沉积物中 Cu 的潜在生态危害系数最高(196.8), 超过 160, 达到很强生态危害级别。Pb、Ni、Cr、Zn 和 As 的平均潜在生态危害系数均小于 40, 说明这 5 种重金属元素达到轻微生态危害级别。用表 4 中的评价标准分析白洋淀沉积物中重金属的生态危害程度, 结果显示 Cu、Pb、Zn、Ni、Cd、Cr、As 的平均潜在生态危害系数均小于 40, 说明白洋淀沉积物重金属污染达到轻微生态危害级别。

利用潜在生态危害指数(RI)评价府河和白洋淀沉积物中重金属的污染情况, 结果显示: 府河上 S1、S2、S5 和 S11 采样点的生态危害程度属于轻微级别; S8 采样点属于中等级别; S3、S4、S6、S7 和 S10 属于强的生态危害级别, 而 S9 属于很强的生态危害级别。对于白洋淀而言, 7 个采样点的潜在生态危害指数均小于 150, 其潜在生态危害处于轻微级别。总体而言, 由于府河接纳污水量比较大而且长期积累, 使得表层沉积物中重金属潜在生态危害明显高于白洋淀。基于潜在生态危害指数(RI), 与国内其他地区湖泊沉积物重金属污染情况相比, 白洋淀沉积物重金属污染轻于千岛湖、南四湖和红枫湖^[17-19]。白洋淀的潜在生态危害处于轻微级别, 而千岛湖、南四湖和红枫湖分别处于强生态危害、轻微-强生态危害及轻微-中等生态危害级别。

2.3.3 潜在生物毒性风险评价

沉积物污染的环境危害评价应把沉积物中污染

表 5 府河-白洋淀表层沉积物潜在生态危害系数、危害指数及危险等级

Table 5 Potential ecological risk coefficients(E_i^i) and risk indices (RI) of heavy metals in surface sediments from Fuhe River and Baiyangdian Lake, North China

采样 位点	E_i^i							RI	生态危 害程度
	Cu	Pb	Ni	Cr	Zn	As	Cd		
S1	3.8	3.1	1.6	1.6	12.8	17.4	0.0	40.4	轻微
S2	34.6	22.3	2.9	0.7	15.9	19.4	0.0	95.8	轻微
S3	196.8	98.5	3.5	3.0	27.3	43.2	165.4	537.7	强
S4	147.4	39.8	2.8	2.6	9.1	32.3	112.9	346.9	强
S5	7.9	3.9	1.9	1.9	62.5	14.1	0.0	92.2	轻微
S6	60.5	32.6	2.2	2.0	6.1	26.5	455.9	585.8	强
S7	22.3	15.4	4.6	3.5	5.7	41.8	267.4	360.8	强
S8	28.7	25.6	1.7	1.7	11.8	24.9	159.1	253.5	中等
S9	29.9	23.4	5.5	4.8	10.1	47.5	723.5	844.8	很强
S10	14.9	6.3	4.3	3.4	4.1	32.0	297.0	362.0	强
S11	8.3	6.3	1.9	1.9	6.5	13.6	0.0	38.5	轻微
S12	13.0	5.2	2.1	2.3	9.2	14.5	194.7	241.0	中等
S13	5.3	4.2	1.5	1.3	3.6	0.0	24.1	40.0	轻微
S14	6.9	3.0	2.0	1.8	4.5	0.0	21.8	40.0	轻微
S15	4.9	1.9	2.1	1.7	3.5	0.0	0.0	14.0	轻微
S16	19.5	6.0	1.6	1.6	2.9	1.3	33.9	66.7	轻微
S17	9.2	2.1	2.4	1.9	4.0	9.3	0.0	28.8	轻微
S18	3.5	4.6	1.4	1.3	2.6	0.0	0.0	13.6	轻微
S19	5.1	2.8	1.5	1.6	3.6	17.4	0.0	32.1	轻微

物浓度水平与污染物对沉积物基质栖息物种的生物毒性数据相结合。沉积物质量基准 (sediment quality guidelines, SQGs) 中效应范围低值(ERL)和效应范围中值(ERM)^[20-21]是基于大量化学数据和相应的生物数据分析得到的, 通常用来评价沉积物中重金属污染的潜在生物毒性^[22-24]。一般情况下, 当沉积物中污染物浓度低于 ERL 时, 生物毒性效应很少发生; 当沉积物中污染物浓度高于 ERM 时, 生物毒性效应将频繁发生; 当沉积物中污染物浓度介于 ERL 和 ERM 之间时, 生物毒性效应偶尔发生。因而, 只要判断一种或几种重金属浓度所在范围就可得出其是否产生生物毒性。毒性单位 (Toxic units, TU) 定义为毒性物质化学浓度与其对应的 PEL 值之比^[21]。采样点急性毒性用多种重金属的毒性单位总和(Σ TUs)来表征。Pedersen 等认为 Σ TUs<4 时可视为无毒性, Σ TUs>6 时表明具有急性毒性^[25]。因为 Cd 和 As 在部分样点未检出, 故本研究中仅评价 Cu、Pb、Zn、Ni、Cr 的潜在生物毒性。

将表 1 的数据与沉积物质量基准中 ERL 和 ERM 比较分析, 结果显示在府河沉积物中, Zn 的含

量在所有样点(除 S10 外)都大于 ERM;Ni 的含量在 S7(米阳桥)、S9(臧庄)、S10(安洲)大于 ERM,在其他 9 个采样点介于 ERL 和 ERM 之间;Cu 的含量在 S3(焦庄)和 S4(下闸)大于 ERM,在 S1(植物园)、S5(孙村)、S11(东向阳)低于 ERL,其他采样点介于 ERL 和 ERM 之间;Pb 的含量在 S3(焦庄)高于 ERM;Cr 的含量在所有样点均低于 ERM,6 个采样点介于 ERL 和 ERM 之间。综上所述,府河所有采样点沉积物中的 Zn,S7(米阳桥)、S9(臧庄)、S10(安洲)采样点中的 Ni,S3(焦庄)和 S4(下闸)中的 Cu 和 Pb 对生物产生不利的效应频繁发生,生物毒性较强。在白洋淀沉积物中,Zn 和 Ni 的含量介于 ERL 和 ERM 之间,大部分采样点中 Cu、Pb 和 Cr 的含量均小于 ERL。因此,在白洋淀沉积物中 Zn 和 Ni 可能对生物产生不利影响,生物毒性程度较低。用毒性单位总和(ΣTU_s)评价采样点急性毒性,如图 2 所示。在府河沉积物采样点中,S2、S3、S4、S5、S6、S8、S9 的 ΣTU_s 大于 6,表明这些沉积物中的重金属具有急性毒性,其中 S3 的 ΣTU_s 最高(20.9),急性毒性最强。对于白洋淀沉积物而言, ΣTU_s 均小于 4,显示白洋淀沉积物无急性生物毒性。

2.4 重金属污染防治对策和建议

基于府河和白洋淀沉积物重金属污染现状,应科学管理、积极采取措施,综合治理白洋淀水体环境污染。首先,严格控制上游区域工业废水和城市生活污水的污染。建立污水处理厂,使全部生活污水和工业废水实现达标排放。目前,保定市已经建成鲁岗污水处理厂和银定庄污水处理厂,还不能完全满足整个城市污水处理能力。其次,建立长期水源补给机制。通过王快水库、西大洋水库等联合调度方式向白洋淀补水,建立“小水常补”长效的补水机制。再次,在府河入淀区域开发建立人工湿地,通过种植芦苇、蒲草、凤眼莲等挺水植物,修复和净化水体,使水环境质量达到

理想状态。最后加强白洋淀生态环境保护的宣传教育工作。结合白洋淀的旅游产业,提高地区居民及游客的环保意识,热爱自然、保护生态环境,提出人与自然和谐统一的思想。

3 结论

(1)府河-白洋淀表层沉积物受多种重金属污染,府河污染程度强于白洋淀。在 7 种重金属元素中,Zn、Cu、Cd、Pb 的污染较为严重。其中 S3(焦庄)Cu($792.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和 Pb 的含量最高($458.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),污染最严重;S9(臧庄)Cd($7.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Ni($76.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Cr($192.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和 As($26.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)污染最严重;S5(孙村)Zn($4\,752.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)污染最严重。府河上游重金属污染大部分源于保定生活污水和工业废水的排放;而下游金属冶炼企业及无序焚烧线缆等人为活动对周边环境造成污染。

(2)利用地积累指数和潜在生态风险指数法评价府河和白洋淀表层沉积物多种重金属潜在风险。府河沉积物中重金属元素污染程度的顺序为 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Ni} = \text{Cr}$,而白洋淀为 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} = \text{Ni} = \text{Cr}$ 。府河沉积物重金属的潜在危害程度处于中等偏强级别,而白洋淀的危害程度处于轻微级别。白洋淀重金属污染程度较我国其他地区内陆湖泊弱。

(3)基于沉积物质量基准(SQGs),利用效应范围低值(ERL)和效应范围中值(ERM),评估府河和白洋淀沉积物中重金属潜在生物毒性,判别对生物生存不利的污染区域。府河上游采样点 S3(焦庄)和 S4(下闸)沉积物中,Zn、Cu 和 Pb 对生物产生不利的效应频繁发生;而下游 S7(米阳桥)和 S9(臧庄)沉积物中,Ni 和 Zn 对生物产生不利的效应频繁发生。S2(动物园)、S3(焦庄)和 S4(下闸)和 S5(孙村)沉积物中的重金属的急性毒性比较明显。

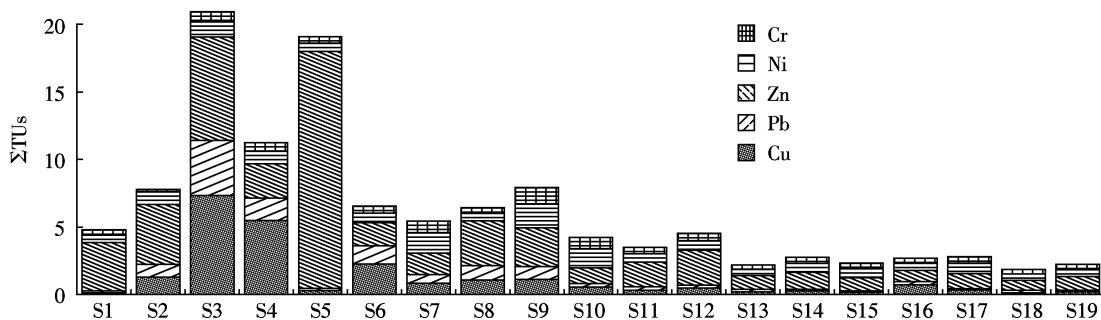


图2 府河-白洋淀表层沉积物中重金属毒性单位总和

Figure 2 Total toxic units(ΣTU_s) heavy metals in surface sediments from Fuhe River and Baiyangdian Lake, North China

(4)从污染源控制、生态修复、环境管理角度,提出白洋淀生态环境保护建议和措施,为白洋淀生态系统持续健康发展提供科学基础。

参考文献:

- [1] Barbosa J S, Cabral T M, Ferreira D N, et al. Genotoxicity assessment in aquatic environment impacted by the presence of heavy metals[J]. *Eco-toxicology and Environmental Safety*, 2010, 73(3):320-325.
- [2] Meetu G, Neera B S. Heavy metal induced DNA changes in aquatic macrophytes: Random amplified polymorphic DNA analysis and identification of sequence characterized amplified region marker[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(5):686-690.
- [3] Beatriz P C, Laffon B, Porta M, et al. Relationship between blood concentrations of heavy metals and cytogenetic and endocrine parameters among subjects involved in cleaning coastal areas affected by the "Prestige" tanker oil spill[J]. *Chemosphere*, 2008, 71(3):447-455.
- [4] Chatterjee M, Silva Filho E V, Sarkar S K, et al. Distribution and possible source of trace elements in the sediment cores of a tropical macrotidal estuary and their ecotoxicological significance [J]. *Environment International*, 2007, 33(3):346-356.
- [5] Sin S N, Chuah, Low, et al. Assessment of heavy metal cations in sediments of Shing Mun River, Hong Kong[J]. *Environmental International*, 2001, 26:297-301.
- [6] Chen C Y, Pickhardt P C, Xu M Q, et al. Mercury and arsenic bioaccumulation and eutrophication in Baiyangdian Lake, China [J]. *Water Air Soil Pollutant*, 2008, 190(1-4):115-127.
- [7] 杨 卓,李贵宝,王殿武,等.白洋淀底泥重金属的污染及其潜在生态危害评价[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(5):945-951.
- YANG Zhuo, LI Gui-bao, WANG Dian-wu, et al. Pollution and the potential ecological risk assessment of heavy metals in sediment of Baiyangdian Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(5):945-951.
- [8] 中国环境监测总站.土壤元素近代分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,1992.
- China Environmental Monitoring Center. Analysis methods of heavy metals in soils[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1992.
- [9] 章 申,唐以剑,等.白洋淀区域水污染控制研究(第一集):水陆交错带水环境特征与调控机理[M].北京:科学出版社,1995.
- ZHANG Shen, TANG Yi-jian, et al. Study on water pollution control for Baiyangdian Lake Area (I): Environmental characteristics and management of land/water ecotone[M]. Beijing: Sciences Press, 1995.
- [10] 国家环境保护局.土壤环境质量标准[S].北京,1995.
- Ministry of Environmental Protection. Environmental quality standard for soils[S]. Beijing, 1995.
- [11] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geo Journal*, 1969, 2(3):108-118.
- [12] 赵一阳,鄢明才.中国浅海沉积物地球化学[M].北京:科学出版社,1994.
- ZHAO Yi-yang, YAN Ming-cai. Geochemistry of sediments of the China shelf sea[M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [13] 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 Pollution*, 2002, 140(1):119-138.
- [14] Santos B J C, Beltrán R, Gómez A J L. Spatial variations of heavy metals contamination in sediments from Odiel River (Southwest Spain)[J]. *Environmental International*, 2002, 29(1):69-77.
- [15] 李书友,冯亚辉.白洋淀生态环境的现状与治理保护[J]. *东北水利水电*, 2008, 26(291):54-56.
- LI Shu-you, FENG Ya-hui. Status of ecological environment quality and management measurements for Baiyangdian Lake[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast China*, 2008, 26(291):54-56.
- [16] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sediment ecological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(1):975-1000.
- [17] 文 军,骆东奇,罗 献,等.千岛湖底泥重金属污染的生态风险评估[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(1):11-14.
- WEN Jun, LUO Dong-qi, LUO Xian, et al. Ecological risk assessment on heavy metals in the bottom mud of the Qiandao Lake[J]. *Research Soil and Water Conservation*, 2006, 13(1):11-14.
- [18] 杨丽原,沈 吉,张祖陆,等.南四湖表层底泥重金属污染及其风险性评价[J]. *湖泊科学*, 2003, 15(3):252-256.
- YANG Li-yuan, SHEN Ji, ZHANG Zu-lu, et al. Distribution and ecological risk assessment for heavy metals in superficial sediments of Nansihu Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2003, 15(3):252-256.
- [19] 黄先飞,秦樊鑫,胡继伟,等.红枫湖沉积物中重金属污染特征与生态危害风险评估[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(2):18-23.
- HUANG Xian-fei, QIN Fan-xin, HU Ji-wei, et al. Pollution characteristic and ecological risk assessment of heavy metals in superficial sediments of Hongfeng Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(2):18-23.
- [20] Long E R, Field L J, MacDonald D D. Predicting toxicity in marine sediments with numerical sediment quality guidelines[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1998, 17(4):714-727.
- [21] MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems [J]. *Archive of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, 39(1):20-31.
- [22] Zheng N, Wang Q, Liang Z, et al. Characterization of heavy metal concentrations in the sediments of three freshwater rivers in Huludao City, Northeast China[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 154(1):135-142.
- [23] 范文宏,张 博,陈静生,等.锦州湾沉积物中重金属污染的潜在生物毒性风险评估[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(6):1000-1005.
- FAN Wen-hong, ZHANG Bo, CHEN Jing-sheng, et al. Pollution and potential biological toxicity assessment using heavy metals from surface sediments of Jinzhou Bay[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(6):1000-1005.
- [24] Pekey H, Karakas D, Ayberk S, et al. Ecological risk assessment using trace elements from surface sediments of Izmit Bay (Northeastern Marmara Sea) Turkey[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48(9):946-953.
- [25] Pedersen F, Sjøbrnstad E, Andersen H V, et al. Characterization of sediments from Copenhagen harbour by use of biotests[J]. *Water Science and Technology*, 1998, 37(6/7):233-240.

致谢:河北大学李凤超老师、中国科学院动物研究所王建设老师、石志敏博士参与了本研究的野外采样工作;环境保护部华南环境科学研究所分析测试中心陈晓燕工程师、陈亚玲工程师参与样品分析测试工作,在此一并表示感谢!