

白洋淀底泥重金属的污染及其潜在生态危害评价

杨 卓¹, 李贵宝², 王殿武¹, 崔惠敏³, 商同钊³

(1. 河北农业大学 资源与环境科学学院, 河北 保定 071000; 2. 中国水利水电科学研究院 水环境研究所, 北京 100038; 3. 保定市水环境监测中心, 河北 保定 071001)

摘 要:采用地累积指数法和潜在生态危害指数法对白洋淀湖区底泥重金属元素进行了污染和生态危害评价,并和历史资料对比进行了分析。结果表明,白洋淀底泥中重金属 Cd、Pb 含量较高,分别表现为极强和轻微-中等的生态危害和极强和中度的污染程度,针对白洋淀现状,提出了治理措施建议。

关键词:底泥; 重金属; 地累积指数; 潜在生态危害; 白洋淀

中图分类号:X824 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2005)05-0945-07

Pollution and the Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediment of Baiyangdian Lake

YANG Zhuo¹, LI Gui-bao², WANG Dian-wu¹, CUI Hui-min³, SHANG Tong-zhao³

(1. Collage of Resource and Environmental Science, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China; 2. Dept. of Water Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Water Environment Monitoring Center of Baoding City, Baoding 071001, China)

Abstract: The sediment is a important component of the water body. Geoaccumulation index and the potential ecological risk of heavy metals in sediment of Baiyangdian Lake were evaluated and compared with the historical data, the causes of pollution were analyzed. The contents of Cd, Pb were very high in sediment of Baiyangdian Lake, and there existed extremely stronger ecological risk for Cd and slight-medium ecological risk for Pb. The pollution in upper reaches was more serious than that in lower reaches. In the places where the village was intensive and populous, the water quality was broken heavily with very high content of heavy metal, and breeding fish very densely and raising more duck and crab aggravated the pollution. The degree of pollution in sediment of 0~10cm in Baiyangdian Lake was greater than that of 10~20 cm. The sediment was polluted and still aggravated at the bottom in recent years. Among 21 sampling sites, Anxin bridge, the South Liu Village, original Tangriver sewage storehouse and Tong kou were polluted comparatively serious than other places. Based on these results, the administration measure for Baiyangdian Lake was put forward.

Keywords: sediment; heavy metal; index of geoacoamulation; ecological risk; Baiyangdian Lake

底泥是水体的重要组成部分。在湖水-底泥体系中,底泥是各种污染物累积富集比较稳定的场所,底泥中污染物的浓度可以间接反映河水的污染程度。因此,底泥的污染状况是全面衡量水环境质量状况的重要因素^[1]。

收稿日期:2004-12-21

基金项目:国家自然科学基金(50379057、50179040);中国水科院青年科研专项(环集 02QN03)

作者简介:杨 卓(1980—),女,河北秦皇岛人,在读硕士研究生,主要从事土壤物理与湿地方面的研究。

E-mail:yangzhuo315566@126.com

联系人:王殿武

2004 年,为了缓解白洋淀地区缺水状况,从河北邯郸岳城水库调水到白洋淀,随着大量淡水资源的注入,白洋淀地区水质有了明显改善,但底泥中重金属质量分数仍呈增加趋势。重金属具有极强的累积作用,并且在受纳水体中,重金属污染物不易降解,通过各种途径排入水体的重金属等污染物绝大部分迅速地转移至沉积物和悬浮物中。悬浮物在废水流搬运过程中,当其负荷量超过搬运能力时,便逐步转变为沉积物^[2]。大量研究还表明,在受重金属污染的水体中,水相中重金属的质量分数往往甚微,而且随机性很大,常随排放状况与水力条件不同,其分布往往毫无

规律,但底泥中的重金属质量分数比水相中高得多,常常得到积累,并表现出明显的规律性。沉积物可以反映水系状况^[3,4],是水环境中重金属的指示剂^[5]。因此,对底泥中的重金属的分布与含量水平的研究是很有价值的。

本文以白洋淀底泥为主要研究对象,采用 Muller 提出的地累积指数法^[6]和瑞典国家环保局乌普萨拉水质实验室的 Lars Hakanson 的潜在生态危害指数法^[7]对其污染和生态危害进行评价,同时与历史调查资料相比较,为白洋淀的污染治理和生态恢复提供理论依据。

1 样品的采集与研究方法

1.1 样品的采集

参考保定市水环境监测中心水质监测断面和“海河流域环境管理与规划研究(白洋淀)”中在白洋淀底泥调查所布设的点位,在此基础上增补。2004 年 6 月,在白洋淀全面布设点位 21 个,并分 0~10 cm、10~20 cm 层采集底泥样品,共取得底泥样品 41 个。藻荇淀现已干淀,苇地退化严重;同口取样点设在原唐河污水库区,现已废弃干涸,10 cm 以下为一水泥底,此 2 处取得底泥风干样品。取样点一般位于水流速度较缓,水面较 1 个约 1~2 cm 的混合样品。底泥样品除去石头和动植物残体,盛于塑料盒中于通风处自然风干。具体采样点位置如图 1 所示。编号、名称及水位见表 1。

1.2 样品的分析

将自然风干的底泥用木棍碾磨,运用四分法除去

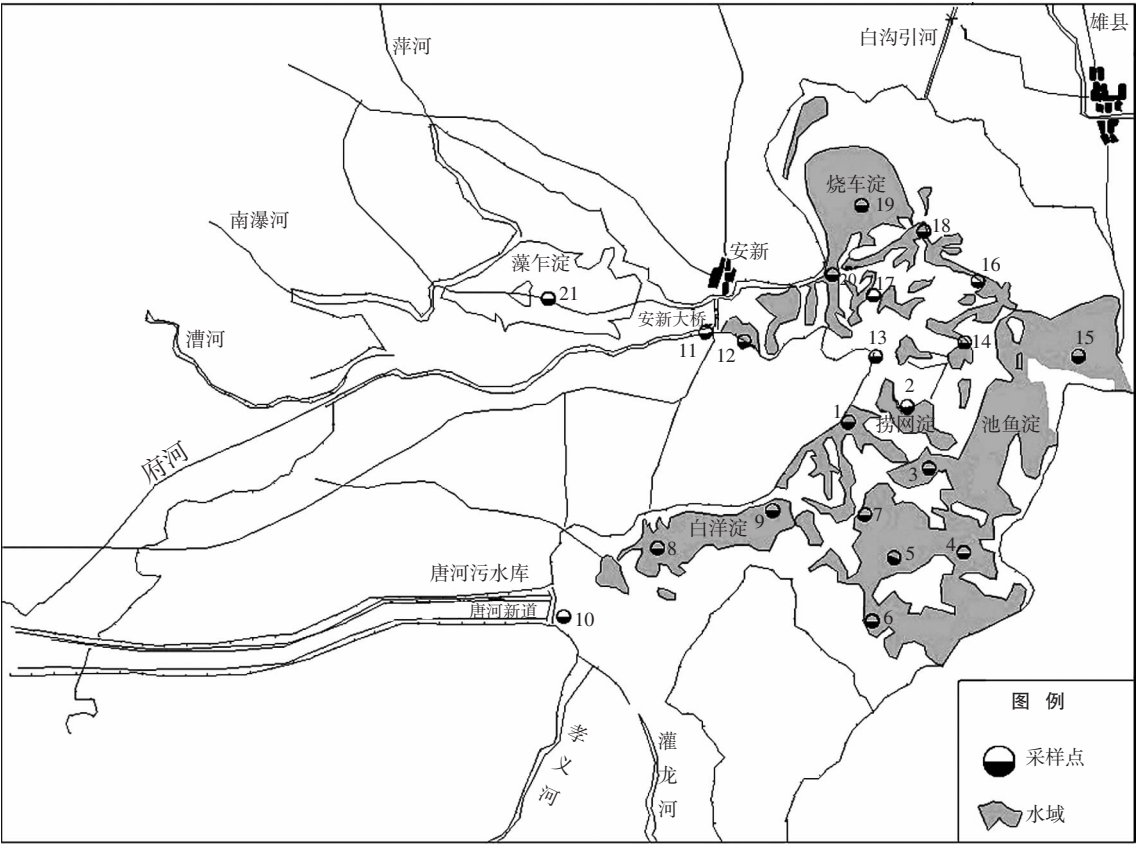


图 1 白洋淀采样点示意图
Figure 1 Distribution of sampling sites for the heavy metals in sediment of Baiyangdian Lake

多余的部分,过 100 目的筛子,装袋以备用。Pb、Cd、Cu、Zn 的含量用 HCl-HNO₃-HClO₄ 进行消化,原子吸收分光光度法测定^[8]。

1.3 评价方法

污染和生态危害评价。

2 结果与分析

2.1 白洋淀底泥重金属含量分布及污染状况

白洋淀底泥重金属含量分布见表 2。其统计结果

运用地累积指数法和潜在生态危害指数法进行

表 1 采样点编号、名称及水位

Table 1 The number of the sample, name and water level								
编号	名称	水位	编号	名称	水位	编号	名称	水位
1	大淀头	1.50	8	关城	1.30	15	枣林庄	0.79
2	涝网淀	1.60	9	端村	2.00	16	刘庄子	1.30
3	东淀	2.34	10	同口	—	17	王家寨	2.08
4	泛鱼淀	1.37	11	安新大桥	1.42	18	郭里口	1.64
5	前唐	1.18	12	南刘庄	1.68	19	烧车淀	1.58
6	梁庄	1.50	13	寨南	1.97	20	大张庄	1.70
7	大田庄	1.50	14	光淀张庄	2.20	21	藻苈淀	—

见表 3。由表 2、3 可知,如果将以上底泥施于土壤,则其部分地区的重金属含量及其平均含量高于河北地区土壤背景值。以平均含量作比较,Cu 为河北地区土壤背景值(平原)的 1.01 倍;Zn 为 1.57 倍;Pb 为 5.26 倍;Cd 为 95.01 倍。其中,Cd 的污染尤为严重。在布设的 21 个采样点中,同口、安新大桥、梁庄、南刘庄、王家寨、烧车淀重金属污染较为严重。同口采样点原为唐河污水库,20 世纪 90 年代曾泄漏,造成白洋淀死

表 2 白洋淀底泥重金属含量检测结果 (mg·kg⁻¹)

Table 2 Contents of heavy metals in sediment of Baiyangdian Lake (mg·kg ⁻¹)									
测点	Cu	Zn	Pb	Cd	测点	Cu	Zn	Pb	Cd
1-1	21.60	102.17	48.94	6.97	12-1	64.14	175.45	59.14	7.49
1-2	37.36	103.10	78.64	10.43	12-2	40.91	153.32	58.97	7.51
2-1	25.46	83.73	48.42	6.10	13-1	31.09	116.85	56.11	7.53
2-2	26.40	95.27	56.04	7.10	13-2	30.75	104.62	55.21	7.03
3-1	14.27	75.01	39.48	5.25	14-1	29.34	100.95	56.78	6.75
3-2	14.75	55.53	39.79	5.69	14-2	27.89	84.69	47.99	6.83
4-1	21.53	73.78	50.98	6.42	15-1	20.79	135.01	48.42	7.35
4-2	26.89	79.10	53.67	6.05	15-2	21.55	82.24	48.03	7.26
5-1	22.42	94.95	53.64	6.92	16-1	25.63	99.19	56.76	7.23
5-2	23.37	92.17	51.21	6.45	16-2	24.96	93.09	46.54	6.63
6-1	50.15	120.84	67.13	7.94	17-1	28.14	121.16	53.85	8.15
6-2	27.01	89.45	47.70	5.96	17-2	26.31	107.82	47.49	6.37
7-1	31.06	101.10	56.17	7.64	18-1	29.26	101.36	51.59	6.49
7-2	39.68	118.12	61.10	7.51	18-2	41.82	114.73	51.63	6.94
8-1	34.04	131.78	62.05	7.62	19-1	28.08	97.33	55.80	6.63
8-2	41.70	122.14	66.45	8.16	19-2	28.15	103.36	68.73	9.80
9-1	34.64	117.19	57.73	6.99	20-1	12.13	59.52	33.38	5.17
9-2	32.60	103.85	54.81	7.44	20-2	24.97	87.51	43.75	7.20
10-1	53.31	212.39	85.69	7.41	21-1	35.38	134.68	54.91	6.19
11-1	52.69	236.38	65.32	7.09	21-2	22.85	91.07	55.10	7.02
11-2	22.38	107.14	35.71	5.54	均值	30.66	112.33	54.61	7.03

注:测点中-1 为 0~10 cm,-2 为 10~20 cm。

表 3 白洋淀底泥重金属含量统计值(mg·kg⁻¹)

Table 3 Contents of heavy metals in sediment of Baiyangdian Lake (mg·kg ⁻¹)						
样本数		项目	Cu	Zn	Pb	Cd
底泥	21	范围值	12.13~64.14	59.52~236.38	33.38~85.69	5.17~8.15
		平均值	32.26	121.19	55.71	6.90
0~10 cm	20	范围值	14.75~41.82	55.53~153.32	35.71~78.64	5.54~10.43
		平均值	29.04	99.87	53.770	7.36
底泥	41	范围值	12.13~64.14	55.53~236.38	33.38~85.69	5.17~10.43
		平均值	30.66	112.33	54.61	7.03
0~20 cm		平原	30.495	71.368	10.390	0.074
土壤 ^[9]		山区	34.766	69.857	8.520	0.067
背景值						

鱼事件,现已废弃干涸,并有相当大面积已开垦为菜地,但此地土壤质量较差,应引起有关部门的重视。安新大桥和南刘庄是府河入淀处,府河集纳了保定市生活和生产污水,污染历来都比较严重。在调查选取的 4 种重金属中,Cu 含量最高的采样点是南刘庄(0~10 cm 层底泥),Zn 是安新大桥(0~10 cm 层底泥),Pb 是同口(0~10 cm 层底泥),Cd 是大淀头(10~20 cm 层底泥)。这样的污染现状与府河、唐河等纳污河的废水排放有密切关系。

经调查发现各主要测点污染程度与周边环境相关联。根据白洋淀污染科研协作组调查,上游向白洋淀排放污水的工厂共 197 个,据 137 个工矿的调查,日排废水量 33.6 万 t,其中排放废水量大的是造纸、

化工、电力、印染、石油等 5 大行业,占总污水排放量的 94.19%,目前,白洋淀上游主要污染企业有 20 家,依次为化纤厂、六 0 四厂、一造纸厂、化工四厂、农药厂、染厂、制革厂、一玻璃厂、胶化厂、二造纸厂、化工总厂等,是污水的主要来源。工业废水中,主要污染物有 COD、BOD、硫化物、挥发酚、悬浮物、石油类、Zn、Pb、Hg、Cd、Cr、As、氰化物等。加上淀区的生活污水全部排入淀中,另有一些民办的小企业,设备简陋,一般无污水处理系统,污水和工业垃圾随意排放。淀内围拦养鱼现象随处可见,这些都给淀区带来污染。

白洋淀底泥污染主要呈现出以下特点:上游污染重于下游,0~10 cm 泥层重于 10~20 cm 泥层,离排污口近则污染严重,村落密集、人口稠密的淀区则水质

表 4 地累积指数与污染程度分级

Table 4 Contamination degree corresponding to geoaccumulation index

I_{geo}	<0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5
级数	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	无-中	中	中-强	强	强-极强	极强

表 5 白洋淀不同层次底泥重金属地累积指数

Table 5 Geoaccumulation index of heavy metals in sediment of different layers in Baiyangdian Lake

项目	$C_{i\max}$	$C_{i\min}$	0~10 cm 平均	10~20 cm 平均	0~40 cm 平均
Cu	0.49	-1.92	-0.51	-0.66	-0.58
Zn	1.14	-0.95	0.18	-0.10	0.07
Pb	2.46	1.10	1.84	1.79	1.81
Cd	6.55	5.54	5.96	6.05	5.99

坏、重金属含量高,围拦养鱼甚密、养鸭养蟹多的地方污染会加剧。在 21 个采样点中,府河入淀口处的安新大桥、南刘庄、原唐河污水库同口污染较为严重。

2.2 污染程度评价

地累积指数 I_{geo} (Index of Geoaccumulation)法是德国学者 Muller 和 Suess 于 1979 年提出的,计算式如下:

$$I_{geo}=\log_2(C_i/K\times B_i)$$

式中, C_i 是实测底泥中重金属的质量分数; B_i 为当地岩石中该元素的地球化学背景值(本研究中取河北平原区土壤中该元素的背景值); K 为考虑当地岩石差异可能引起的背景值的变动而取的系数(一般取值为 1.5)。Forstner 等人提出了 I_{geo} 值与污染程度对应关系^[10],如表 4 所示。表 5 给出了白洋淀底泥中重金属地累积指数。

由表 5 可以得出,白洋淀底泥中重金属元素 Cd 已经达到 6 级,为极强的污染程度。Pb 达到了中度的污染程度,Cu、Zn 未构成污染。总体上白洋淀 0~10

cm 底泥污染程度大于 10~20 cm 底泥,根据沉积学原理,可以说明近年来底泥污染仍在加剧。其中 Cd 的污染现状应引起广泛重视,其呈现出含量高、各监测点位含量变幅小的特点。整个白洋淀地区普遍受到了 Cd 的污染。

2.3 潜在危害程度评价

该评价方法是由瑞典科学家 Hakanson1980 年提出的关于沉积学的方案,由北京大学陈静生等(1992)在太子河、柴河等沉积物的评价中进行了应用,并取得了良好的效果。现已应用于世界各地多条河流的生态危害影响评价。潜在生态危害指数值(RI)可以反映 4 方面的情况:(1)表层沉积物金属的浓度;(2)金属污染物的种类数;(3)金属的毒性水平;(4)水体对金属污染的敏感性^[11]。

该方法的计算公式为:

$$RI=\sum E_i=\sum (T_i\times f_i)=\sum (T_i\times C_{i0})/B_i$$

式中:RI 为潜在生态危害指数; $E_i=T_i\times f_i$ 为单个重金属的潜在生态危害系数 (Potential Ecological Risk Fac-

表 6 参比值对照表(mg·kg⁻¹)
Table 6 Contrasts of different consult values (mg·kg⁻¹)

项目	参比值	Cu	Zn	Pb	Cd
当地背景值		30.5	71.4	10.4	0.07
工业化前全球沉积物金属最高背景值		90.0	175.0	70.0	1.50

表 7 生态危害指数、系数、与危害程度分级
Table 7 Logical risk degrees corresponding to the potential ecological risk index and factor

生态危害程度	轻微	中等	强	很强	极强
E_i	<40	40~80	80~160	160~320	≥320
RI	<150	150-300	300-600	≥600	

tor); T_i 为各重金属的毒性响应系数 (Toxic ResPonse Factor),此值被用来反映重金属的毒性水平及水体对重金属污染的敏感程度。根据 Hakanson 提出的“元素丰度原则”与“元素释放度”的观点,即认为:某一金属元素的潜在生物毒性与其丰度成反比,或者说与其稀

少度成正比。某一金属的潜在生物毒性也与"元素的释放度"(等于其在水中的含量与沉积物含量的比值)有关。易于释放的对生物的潜在毒性较大。对毒性系数作规范化处理后,本研究中的 Cu、Zn、Pb、Cd 的 T_i 值分别取 5、1、5、30^[7]; f_i 为某一重金属的污染系数, $f_i=$

表 8 白洋淀底泥重金属潜在生态危害系数和指数
Table 8 Potential ecological risk factor and index of heavy metals in the sediment of Baiyangdian Lake

参比值		E_i				RI
		Cu	Zn	Pb	Cd	
当地背景值	最大值	10.52	3.31	41.24	4226.76	4282
	最小值	1.99	0.78	16.06	2097.57	2116
	平均值	5.08	1.60	26.39	2864.19	2897
工业化前全球沉积物金属最高背景值	最大值	3.56	1.35	6.12	208.52	219.6
	最小值	0.67	0.32	2.38	103.48	106.9
	平均值	1.72	0.65	3.92	141.30	147.6

C_{i0}/B_i ; C_{i0} 为表层沉积物重金属质量分数的实测值; B_i 为计算所需的参比值,目前国内外学者对参比之选择的差别较大,Hakanson 提出以现代工业化以前正常颗粒金属的最高背景值为参比值,有的以页岩平均金属含量值作为全球统一的沉积物金属含量背景值,有的以当地的金属背景值的平均值为参比值。在本研究中,采用当地背景值和现代工业化以前正常颗粒金属的最高背景值作为参比值。以当地背景值为参比值,可以反映本河流各采样点的金属的相对污染程度。已工业化以前沉积物的最高背景值为参比值,可在更大程度上反映可能的潜在危害程度。参比值列于表 6。 RI 、 E_i 值与生态危害分级关系如表 7 所示。

表 7 给出了白洋淀底泥重金属元素的潜在生态危害系数和指数,对照表 6 可得出结论:若以当地背景值作为参比值,发现 Cd 已经表现为极强的生态危害,43 个样品均达到极强。Pb 表现为轻微-中等的生态危害,Cu、Zn 未表现出生态危害。4 种重金属的综合潜在生态危害指数达到极强,其主要贡献因子是

Cd。由此可见,白洋淀底泥的相对污染状况已十分严峻。若以工业化以前全球沉积物金属最高背景值作为参比值,则 Cu、Zn、Pb 均未表现出生态危害性,Cd 表现为强的生态危害。总体上白洋淀底泥中重金属表现为中等的生态危害程度,其贡献因子主要为 Cd。底泥的可能潜在危害程度已经应引起人们的重视。

3 结论与讨论

3.1 白洋淀底泥重金属含量与历史调查资料的比较

湖泊的污染程度与其周围城市的发展及其工业化进程密切相关。全球大多数工业城市都座落在河流两岸、河口及其邻近地区。城市和工农业的发展带来的生活污水,没有得到有效控制的工农业点源和面源污染,给他们赖以生存和发展的河流及其伴生的湖泊带来了严重污染。白洋淀地区的污染治理一直受到有关部门的重视,20 世纪 70 年代就有了底泥调查的数据资料,1994 年在“海河流域环境管理与规划研究”中也在白洋淀作了完整的底泥资源调查。

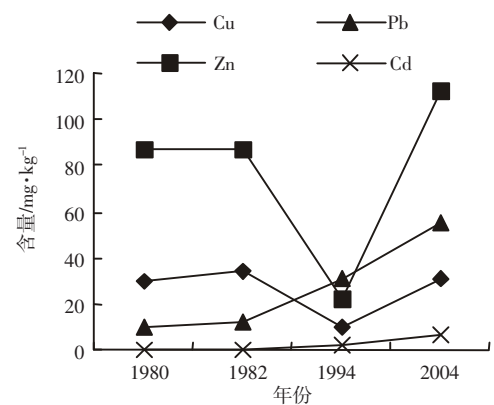


图2 白洋淀底泥重金属含量的变化

Figure 2 Changes of heavy metal contents in Baiyangdian Lake

湖泊沉积物可以记录湖区环境变化的丰富信息,可以把湖泊沉积物看作环境变化的档案,并通过湖泊底泥研究来评价人类活动产生的污染物的影响,湖泊

底泥也记录着历史沉积状况。进入 20 世纪 80 年代后,气候持续干旱。1985—1987 年出现连续 3 年干淀。90 年代还曾发生大规模死鱼事件。由于周边城市和工业的迅猛发展,给湖泊带来了严重威胁。近年来,从保定西大洋水库、王快水库和邯郸岳城水库调水到白洋淀,调来的大量淡水稀释了白洋淀原有的富营养化水体,但底泥的污染成分仍在逐年积累。

通过图 2 可以看出,Cu 的含量变化不大,比 1980 年仅高了 0.87 g·kg⁻¹,并且与华北地区土壤背景值相差不多(平原为 30.495 mg·kg⁻¹山区为 34.766 mg·kg⁻¹);Zn 的含量有了较大幅度升高,但仍不构成威胁;Pb 的含量呈逐年递增趋势;Cd 的污染尤为严重,已经为 1980 年的 77 倍之多。

3.2 重金属含量分布及污染状况

在调查的 21 个点位 41 个底泥样品中,底泥污染

表 9 污染程度较高的测站的 RI 值

Table 9 The RI values of the places with relatively high content of pollutants

测站名称	E _i (以当地背景值为参比值)					E _i (以工业化前全球沉积物最高背景值为参比值)				
	Cu	Zn	Pb	Cd	RI	Cu	Zn	Pb	Cd	RI
大淀头	6.13	1.45	37.8	4227	4272	2.08	0.59	5.62	208.5	216.8
烧车淀	4.62	1.45	33.1	3974	4013	1.56	0.59	4.91	196.0	203.1
关城	6.84	1.71	32.0	3310	3350	2.32	0.70	4.75	163.3	171.0
王家寨	4.61	1.70	25.9	3302	3334	1.56	0.69	3.85	162.9	169.0
南刘庄	7.14	2.94	32.7	3226	3269	2.42	1.20	4.85	159.1	167.6

的主要贡献因子是 Pb 和 Cd,尤其是 Cd。如果按 RI 值的大小排序,其 RI 值较大的 5 个点位的列于表 9 中。

在本次调查所选取的 4 种重金属中,发现 Cd 的污染已经相当严重,其平均值为 7.031 mg·kg⁻¹,为“土壤环境质量标准”(GB15168-1995) 三级标准中的 Cd 的含量的 7 倍多,但未超过“农用污泥中污染物控制标准”(GB4284-84)中 Cd 的含量 20 mg·kg⁻¹。在 41 个底泥样品中其含量从 5.17~10.43 mg·kg⁻¹,最低值的采样点大张庄是“土壤环境质量标准”(GB15168-1995)二级标准中的 Cd 的含量的 8.62 倍。最高值的采样点是大淀头已为 Cd 重污染区域。白洋淀底泥普遍 Cd 含量超标。Cd 的主要来源为冶炼、电镀、染料等工业废水、污泥和废气,另外汽油和轮胎里也含有 Cd。其存在形态分为两种:水溶态(Cd⁺)和难溶态(Cd²⁺),两者相互转化,主要受 pH、Eh 等的影响。Cd 可以通过水体-鱼虾-人体等生态系统进入人体,其在人体积累是一个漫长的过程,潜伏期长,典型症状是骨痛病,甚至有致癌、致畸的报道。白洋淀周边城市

的大量工业废水很可能是造成 Cd 污染的原因。

3.3 底泥污染防治建议

针对白洋淀的污染现状和淀区人民的生活现状,对白洋淀淀区和上游排污口的科学管理是治理白洋淀的关键之所在。目前,保定市已建成大规模污水处理厂两座,经处理后的工业废水经府河排入白洋淀。近日,府河又在进行大规模的河道整治工程,这些无疑会使白洋淀地区的生态环境得到改善。

有关部门要严格执行、加强管理。污染处理设施要保持正常运转、严禁闲置。对于排入淀区的工业废水和生活污水进网集中处理排放。严格控制污染严重的小企业和无污水处理能力的乡镇企业,推行清洁生产。在淀区,要使围栏养鱼、养蟹、养鸭的众多副业得到有效管理,控制其密度。对淀区的生活垃圾,做统一集中处理,并有必要坚持淀区以河泥为肥料的传统做法。在不造成淀区土壤污染的前提下有指导性的挖泥上肥,这样既稳定了以芦苇为代表的作物产量,又使湖区的污染底泥得到疏浚。控制淀区油用船只的数量和用油质量,防止油污染和由此引发的水体缺氧等现

象。还要坚持走植被修复水体、水体自净的生态模式,通过种植芦苇、蒲草、风演练等挺水植物,既美化环境,发展旅游业,又使水体得到修复和净化。

参考文献:

- [1] 郑习健.珠江广州河段底泥的污染分析[J].长江建设,1996,5:17-18.
- [2] 贾振邦,赵智生,杨小毛,等.洋涌河、茅洲河和东宝河沉积物中重金属污染及评价[J].环境化学,2001,20(3):212.
- [3] 陈静生.水环境化学[M].北京:高等教育出版社,1987.
- [4] 陈静生.环境地球化学[M].北京:海洋出版社,1990.
- [5] Forstner U. Metal Pollution in the Aquatic Environment [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1987. 110-112.
- [6] Muir G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. *Geojournal*, 1979, 2: 108.
- [7] Lars Hakanson. An ecological risk index for aquatic pollution control—A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(1): 975.
- [8] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社, 1999.
- [9] 朱, X. 白洋淀环境演变及预测研究[M]. 西安: 西安地图出版社, 1994.
- [10] Forstner U. Ahlf W. Calmanow. Sediment quality objectives and criteria development in Germany [J]. *Water Science Technol*, 1993, 28(8): 307.
- [11] 陈静生, 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.