

doi: 10.2029/gc20220321

尹德超, 祁晓凡, 王雨山, 徐蓉桢, 安永会, 王旭清, 耿红杰. 2022. 雄安新区白洋淀表层沉积物重金属地球化学特征及生态风险评价[J]. 中国地质, 49(3): 979–992.

Yin Dechao, Qi Xiaofan, Wang Yushan, Xu Rongzhen, An Yonghui, Wang Xuqing, Geng Hongjie. 2022. Geochemical characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Baiyangdian Lake, Xiong'an New Area[J]. Geology in China, 49(3): 979–992(in Chinese with English abstract).

雄安新区白洋淀表层沉积物重金属地球化学特征 及生态风险评价

尹德超¹, 祁晓凡^{1,2}, 王雨山¹, 徐蓉桢¹, 安永会¹, 王旭清¹, 耿红杰¹

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 2. 中国地质调查局地质环境监测院, 北京 100081)

摘要:【研究目的】白洋淀为雄安新区核心生态功能区, 为支撑白洋淀湿地生态修复与保护, 系统开展了全淀区表层沉积物环境质量调查。【研究方法】在白洋淀湿地采集表层沉积物样品 484 组, 查明了白洋淀表层沉积物重金属地球化学特征, 并采用地累积指数法、潜在生态风险指数法等多种方法开展了重金属生态风险评价。【研究结果】白洋淀表层沉积物重金属含量普遍偏高, 高于河北省表层土壤重金属含量背景值, 府河入淀口及白沟引河入淀口为重金属元素主要富集区, 入淀河流输入为白洋淀重金属主要来源; 环境地球化学综合评价结果为清洁无污染等级分布面积 144.54 km², 占表层沉积物分布总面积的 96.68%; 各重金属污染程度由重到轻排序为 Cd > Cu > Hg > Pb > Zn > Ni > Cr > As, Cd 元素污染程度等级以中度和偏中度为主, Cu 元素以轻度和清洁为主, 其他元素以清洁无污染为主; 重金属潜在生态风险以轻度和中度为主, 河流入淀口所在淀区重金属潜在生态风险高于其他淀区, 潜在生态风险由高到低排序为南刘庄 > 烧车淀 > 小白洋淀 > 王家寨 > 藻苣淀 > 捞王淀 > 池鱼淀 > 泛鱼淀。【结论】白洋淀表层沉积物环境质量总体较好, 南刘庄等局部淀区存在重金属污染潜在生态风险, 以 Cd 元素污染最为突出。

关键词: 表层沉积物; 地球化学特征; 重金属; 生态风险; 环境地质调查工程; 雄安新区; 白洋淀

创新点: 采用地累积指数法、潜在生态风险指数法等多种方法, 系统评价白洋淀湿地表层沉积物重金属污染程度和生态风险; 重金属地球化学特征分析与主成分分析法相结合, 揭示表层沉积物重金属污染主要来源为河流输入。

中图分类号: X524; X826

文献标志码: A

文章编号: 1000–3657(2022)03–0979–14

Geochemical characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Baiyangdian Lake, Xiong'an New Area

YIN Dechao¹, QI Xiaofan^{1,2}, WANG Yushan¹, XU Rongzhen¹,
AN Yonghui¹, WANG Xuqing¹, GENG Hongjie¹

(1. Center For Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding 071051, Hebei, China; 2. China Institute of Geo-Environmental Monitoring, CGS, Beijing 100081, China)

收稿日期: 2021–03–17; 改回日期: 2021–10–14

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190300)资助。

作者简介: 尹德超, 男, 1990 年生, 工程师, 从事生态地质、水文地质调查研究工作; E-mail: yindechao@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 王雨山, 男, 1984 年生, 高级工程师, 从事生态地质、水文地质调查研究工作; E-mail: wangyushan@mail.cgs.gov.cn。

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

[Objective] Baiyangdian Lake (BYD Lake) is the main ecological function area of Xiong'an New Area. In order to provide support for ecological restoration and protection of BYD Lake, we conducted a comprehensive survey on the environmental quality of the surface sediments in BYD Lake. **[Methods]** We collected 484 sets of surface sediment samples from Baiyangdian wetland, identified the geochemical characteristics of heavy metals in surface sediments of Baiyangdian lake, and used multiple methods such as geo-accumulation index method and potential ecological risk index method to evaluate the ecological risk of heavy metals. **[Results]** The results indicate that the average content of most heavy metal elements in the surface sediments of BYD Lake is significantly higher than the soil background value in Hebei Province. The entrance of Fuhe river and Baigou river are the main rich areas of heavy metal elements, rivers are the main sources of heavy metals in the surface sediments of BYD Lake. The distribution area of clean and pollution-free grade is 144.54 km², accounting for 96.68% of the total surface sediment distribution area. The pollution degree of each heavy metal can be ranked as Cd > Cu > Hg > Pb > Zn > Ni > Cr > As. The pollution degree of Cd is mainly moderate, the pollution degree of Cu is mainly light and clean, and the pollution degrees of other elements are mainly clean and pollution-free. The potential ecological risk of heavy metals in the surface sediments of BYD Lake is mainly mild and moderate, and the potential ecological risk level of heavy metals near the river entrance is higher than that of other areas. The potential ecological risk levels can be ranked as Nanliuzhuang > Shaochedian > Xiaobaiyangdian > Wangjiazhai > Zaozhadian > Laowangdian > Chiyudian > Fanyudian. **[Conclusions]** The environmental quality of the surface sediments in BYD Lake is generally good, with heavy metals exceeding the standard in some areas. The environmental quality of surface sediments in Baiyangdian is generally good. There are potential ecological risks of heavy metal pollution in Nanliuzhuang and other areas, and Cd is the main pollution element.

Key words: surface sediments; geochemical characteristics; heavy metal; ecological risk; environmental geological survey engineering; Xiong'an New Area; Baiyangdian Lake

Highlights: Geo-accumulation index method and potential ecological risk index method were used to evaluate the heavy metal pollution degree and ecological risk of surface sediments in Baiyangdian Wetland. The analysis of heavy metal geochemical characteristics combined with principal component analysis revealed that the heavy metal pollution in surface sediments were mainly from river input.

About the first author: YIN Dechao, male, born in 1990, engineer, engaged in ecological geology and hydrogeological survey and research; E-mail: yindechao@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: WANG Yushan, male, born in 1984, senior engineer, engaged in ecological geology, hydrogeological survey and research; E-mail: wangyushan@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190300).

1 引 言

白洋淀位于河北省中部(图1),是中国北方最具代表性的湖泊湿地,发挥着调节气候、蓄水兴利、旅游景观、维持生物多样性等多种重要生态功能(易雨君等,2020)。在气候变化和人类活动影响下,20世纪80年代以来白洋淀生态环境受到严重的破坏,湿地退化、环境污染等问题屡见报道(李建国等,2004;杨卓等,2005)。在众多污染物中,重金属由于其毒性和持久性而成为影响湿地环境质量较严重的一类(李玉等,2006;Liu et al.,2020)。

近20年来,有学者对白洋淀湿地表层沉积物重金属污染开展研究(胡国成等,2011;赵钰等,2013;

高秋生等,2019; Ji et al.,2019;汪敬忠等,2020;向语兮等,2020),前人采集沉积物样品6~30个不等,研究均表明白洋淀湿地部分淀区存在重金属污染。由于白洋淀湿地围埝沟壕纵横、景观格局破碎、淀内结构复杂、水文连通性差(张敏等,2016;张梦嫚等,2018),不同淀区表层沉积物环境质量存在较大差异。白洋淀湿地作为雄安新区核心生态功能区,湿地生态环境的保护与修复显得更为重要。此前较少的样品尚不能刻画白洋淀湿地表层沉积物重金属元素地球化学特征,亟需在白洋淀湿地开展全面系统的表层沉积物调查研究,查明重金属地球化学特征、分布规律及潜在生态风险。

本次开展了白洋淀湿地表层沉积物环境质量

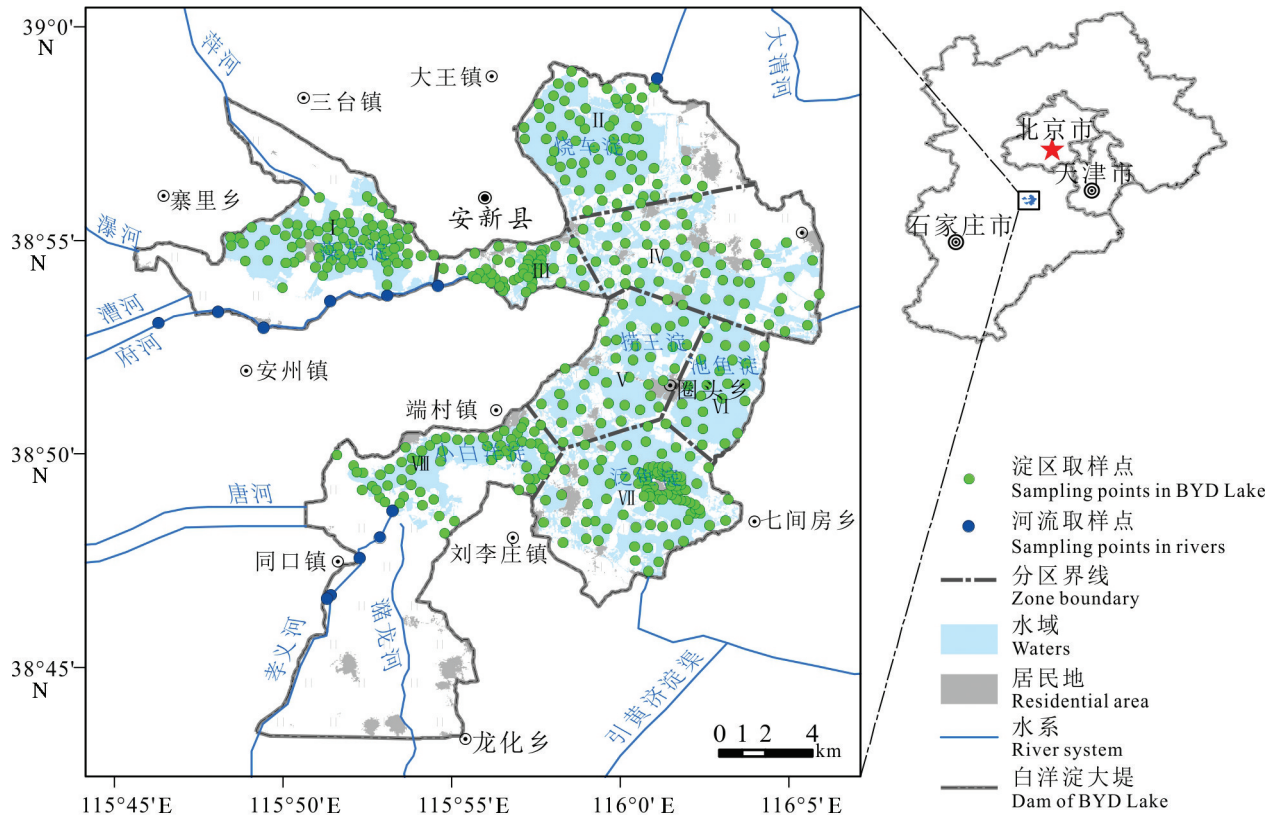


图1 白洋淀表层沉积物取样点分布图

I—藻荇淀; II—烧车淀; III—南刘庄; IV—王家寨; V—捞王淀; VI—池鱼淀; VII—泛鱼淀; VIII—小白洋淀

Fig.1 Distribution map of surface sediments samples in BYD Lake

I—Zaozhadian; II—Shaochedian; III—Nanliuzhuang; IV—Wangjiazhai; V—Laowangdian; VI—Chiyudian; VII—Fanyudian; VIII—Xiaobaiyangdian

全面调查,采集表层沉积物样品484组,取样密度为3~4组/km²,系统查明了表层沉积物重金属地球化学特征。并采用多种方法开展表层沉积物环境质量及生态风险评价,初步划定重金属污染建议清淤区,以为白洋淀湿地生态保护与修复提供科学依据。

2 研究区概况

白洋淀湿地(38°43'N~40°00'N, 115°45'E~116°07'E)位于京津冀腹地,雄安新区东南部,是华北平原最大淡水湿地系统,素有“华北明珠”之称,对维护华北地区生态环境具有不可替代作用。白洋淀湿地入淀河流有8条,自南向北分别为潞龙河、孝义河、唐河、府河、漕河、瀑河、萍河、白沟引河(毛欣等,2020;王雨山等,2021),其中孝义河、府河以城市中水为主,为常年入淀河流,其他河流仅在汛期或生态补水期有少量径流入淀,大部分时间处于干涸状态。白洋淀东侧枣林庄水利枢纽为出水口,经赵王新河汇入大清河,东流入海。

白洋淀湿地四周堤埝环绕,淀区143个淀泊星罗棋布,3700条沟壕纵横交错,淀区面积360 km²(马震等,2021)。根据野外调查及遥感解译,白洋淀湿地地貌类型可分为水域、台田、旱地、居民地等4类,表层沉积物分布与水域分布范围一致,面积149.5 km²。

3 研究方法

3.1 样品采集及测试

依据白洋淀湿地地貌格局及淀泊分布,将白洋淀划分为藻荇淀、烧车淀、南刘庄、王家寨、捞王淀、池鱼淀、泛鱼淀、小白洋淀等8个亚区,各亚区多以近连续分布的台田为边界。其中烧车淀、池鱼淀亚区水域开阔,围埝及台田分布较少,水体连通性好;南刘庄、王家寨亚区台田及居民地分布集中,水体连通性一般;藻荇淀、捞王淀、泛鱼淀、小白洋淀亚区围埝纵横,水体连通性较差。

2019—2020年,在白洋淀湿地调查采集表层沉积物样品484组,在孝义河、府河、白沟引河这3条

入淀河流采集河床表层沉积物样品 14 组。表层沉积物取样深度均为表层 0~10 cm, 采样设备为 Corer 60 mm 柱状采泥器。白洋淀湿地亚区划分及表层沉积物调查点分布如图 1 所示。

表层沉积物重金属分析测试工作由河北省地质实验测试中心实验室完成, 项目包括砷(As)、镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、汞(Hg)、铅(Pb)、镍(Ni)和锌(Zn)等 8 项。其中 As 元素测定采用氢化物发生-原子荧光光谱法, Cd 元素测定采用电感耦合等离子体质谱法, Hg 元素测定采用蒸汽发生-冷原子荧光光谱法, Cr、Cu、Pb、Ni、Zn 元素测定均采用波长色散 X 射线荧光光谱法。

3.2 评价方法

3.2.1 环境质量评价

白洋淀表层沉积物环境质量评价参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)和《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)。GB 15618 规定了农用地土壤污染风险筛选值和风险管制值两个指标, 其中风险筛选值包括 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 等 8 个基本项目, 风险管制值包括 Cd、Hg、As、Pb、Cr 等 5 个项目。根据调查实测, 白洋淀水体 pH 平均值为 8.06, 表层沉积物环境质量评价参照 pH > 7.5、水田条件下土壤污染风险筛选值及管制值, 如表 1 所示。

DZ/T 0295 在 GB 15618 风险筛选值基础上给出了环境地球化学等级划分标准以及划分方法(表 2)。污染物 i 的单项污染指标 P_i 计算公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中: C_i 为污染物 i 的实际测量值(mg/kg); S_i 为污染指标 i 的风险筛选值(mg/kg)。

每个评价单元的环境地球化学综合等级等同

表 1 农用地土壤污染风险筛选值与管制值

Table 1 Risk screening values and risk intervention values for soil contamination of agricultural land

类别	项目	风险筛选值/(mg/kg)	风险管制值/(mg/kg)
基本项目	镉	0.8	4.0
	汞	1.0	6.0
	砷	20	100
	铅	240	1000
	铬	350	1300
	铜	100	
	镍	190	
	锌	300	

于单指标划分出的环境等级最差的等级, 即综合等级划分从劣不从优。

3.2.2 重金属污染程度评价

地累积指数法最早是由德国科学家 Müller 提出的用于研究沉积物中重金属污染程度的指标, 在国内应用广泛(鲍丽然, 2020)。其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_i}{k B_i} \right) \quad (2)$$

式中: I_{geo} 为地累积指数; C_i 为第重金属元素 i 的实际测量值(mg/kg), k 为修正指数, 一般 $k=1.5$; B_i 为重金属元素 i 的地球化学背景值(mg/kg), 参考河北省土壤 A 层重金属背景值(中国环境监测总站, 1990)。

以地累积指数法评价重金属污染程度共分为 7 级, 表示污染程度由清洁到极重度污染, 划分标准如表 3 所示。

3.2.3 潜在生态风险评价

潜在生态风险指数法是由 Hakanson 于 1980 年创立的从沉积学原理评价重金属生态风险的方法。该方法将重金属的含量、生态效应、环境效应以及毒理学效应联系起来, 是目前生态风险评价使用较广泛的方法。其计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \cdot \frac{C_i}{B_i} \quad (3)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (4)$$

式中: T_r^i 为重金属 i 的毒性系数, 各重金属毒性系数为 $Zn=1 < Cr=2 < Cu=Ni=Pb=5 < As=10 < Cd=$

表 2 环境地球化学等级

Table 2 Geochemical grade of soil environment

等级	P_i	污染程度
一等	0~1	清洁
二等	1~2	轻微污染
三等	2~3	轻度污染
四等	3~5	中度污染
五等	> 5	重度污染

表 3 重金属污染程度等级

Table 3 Classification of heavy metal pollution grade

级数	I_{geo} 值	污染程度
0	< 0	清洁
1	0~1	轻度污染
2	1~2	偏中度污染
3	2~3	中度污染
4	3~4	偏重度污染
5	4~5	重度污染
6	≥ 5	极重污染

表4 重金属潜在生态风险等级
Table 4 Potential ecological risk grade of heavy metals

生态风险 指数	生态风险等级			
	低度	中度	重度	严重
E_i^i	<40	40~80	80~160	>160
RI	<150	150~300	300~600	≥600

30 < Hg=40 (Hakanson, 1980; 陈静生等, 1989; 徐争启等, 2008); C_i 为重金属*i*的实际测量值(mg/kg); B_i 为重金属*i*的参比值(mg/kg), 文中采用河北省土壤A层重金属背景值; E_i^i 为第*i*种重金属的潜在生态风险系数; RI 为多种重金属元素综合潜在生态风险指数。潜在生态风险等级划分标准见表4。

3.3 数据处理及图件编制

采用Excel及SPSS 19.0软件进行数据统计处理、相关性分析及主成分分析, 采用ArcGIS 10.5软件进行空间数据分析及图件绘制。

4 结果与分析

4.1 重金属元素地球化学特征

4.1.1 统计规律

白洋淀湿地及入淀河流表层沉积物重金属含量如表5所示。重金属平均含量由大到小排名依次为 Zn (102.43 mg/kg) > Cr (75.46 mg/kg) > Cu

(37.43 mg/kg) > Ni (37.22 mg/kg) > Pb (28.72 mg/kg) > As (9.91 mg/kg) > Cd (0.33 mg/kg) > Hg (0.054 mg/kg)。As元素含量平均值低于河北背景值和全国背景值; Hg元素平均值高于河北背景值, 但低于全国背景值; Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb等6种元素含量平均值均高于河北背景值及全国背景值, 以Cd元素最为突出, 含量均值为全国背景值的3.4倍。从变异系数统计分析, As、Cr、Ni变异系数小于40%, 反映其离散程度小, 分布相对均一; Cd、Pb、Hg、Cu、Zn变异系数较大, 反映数据离散程度大, 可能存在不同来源。

入淀河流与淀区表层沉积物重金属平均含量对比显示: 府河表层沉积物各重金属元素平均含量均大于淀区平均值, 且除Cr元素外其他重金属元素含量均大于府河入淀口南刘庄亚区平均值, 以Pb、Zn、Cu、Cd四种元素较为突出, 分别为淀区含量平均值的2.8倍、3.7倍、4.3倍、5.3倍; 白沟引河表层沉积物Hg、Cr、Ni、Cu、Zn、Cd元素平均含量大于全淀区及白沟引河入淀口烧车淀亚区含量均值, 其中Ni、Cu元素平均含量分别为淀区含量均值的2.5倍、4.1倍; 孝义河表层沉积物除Cr、Zn含量略大于淀区平均含量外, 其他各元素含量均低于淀区平均水平, 所有重金属元素含量均低于孝义河入淀口小白

表5 白洋淀表层沉积物重金属含量特征统计
Table 5 Characteristics of heavy metals in surface sediments of BYD Lake

统计区	样本数	统计值	As	Hg	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
白洋淀 全区	484	最小值	3.71	0.015	29	18.7	14.4	46.1	0.11	15.5
		最大值	28.6	0.225	253.5	134.5	255.5	408.5	4.13	486
		平均值	9.91	0.054	75.46	37.22	37.43	102.43	0.33	28.72
		中位数	9.52	0.049	75	36.2	35.48	93.55	0.25	27.28
		标准差	2.98	0.029	17.39	11.19	15.67	42.43	0.32	21.62
		变异系数	30.1%	54.2%	23.0%	30.1%	41.9%	41.4%	96.6%	75.3%
藻荇淀	83	平均值	8.48	0.049	83.54	39.50	39.19	98.25	0.29	30.52
烧车淀	66	平均值	7.97	0.065	65.49	43.55	43.84	100.07	0.33	26.70
南刘庄	53	平均值	8.99	0.090	88.47	39.65	40.69	177.30	0.84	34.37
王家寨	28	平均值	11.64	0.047	76.90	35.43	32.77	92.91	0.30	25.34
捞王淀	38	平均值	10.68	0.049	72.61	32.67	31.29	85.74	0.24	24.92
池鱼淀	23	平均值	10.91	0.039	58.52	27.48	24.98	75.53	0.25	24.24
泛鱼淀	101	平均值	11.51	0.039	66.46	31.45	31.56	80.45	0.21	24.30
小白洋淀	66	平均值	9.75	0.054	84.93	42.28	46.76	108.37	0.28	30.25
孝义河	5	平均值	6.58	0.050	79.76	35.46	37.11	102.56	0.25	27.76
府河	6	平均值	11.83	0.098	87.77	41.51	161.43	381.02	1.76	81.61
白沟引河	3	平均值	5.15	0.105	119.63	94.03	153.63	182.11	0.57	23.78
河北省		背景值	13.60	0.036	68.30	30.80	21.80	78.40	0.094	21.50
全国		背景值	11.20	0.065	66.00	26.90	22.60	74.20	0.097	26.00

注: 河北省及全国背景值来自《中国土壤元素背景值》(国家环境保护局等, 1990); 重金属含量单位mg/kg。

表6 中国中东部主要湖泊表层沉积物重金属含量统计

Table 6 Statistics of heavy metals in surface sediments of main lakes in eastern China

湖泊	样本数	As	Hg	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	文献
白洋淀	21					32.26	121.19	6.90	55.71	杨卓等,2005
	7					31.30	269.40	0.30	16.30	胡国成等,2011
	6	32.08		41.34	35.04	28.19	150.88	0.80	33.50	赵钰等,2013
	15	161.51		48.53	25.52	28.83	91.19	3.21	45.26	高秋等生,2019
	9			84.43	35.14	31.08	98.76	0.30	40.72	汪敬忠等,2020
	30			59.68	28.85	28.79	56.77	0.25	19.01	向语兮等,2020
	484	9.91	0.054	75.46	37.22	37.43	102.43	0.33	27.78	本次测试
衡水湖	11	8.97	0.005	41.51	21.85	7.04	56.88	0.77	17.08	刘利等,2020
巢湖	39	21.08	0.206	81.93	35.54	27.67	142.04	0.42	56.00	夏建东等,2020
洪泽湖	10	23.67	0.070	57.59		34.99	72.44	3.24	18.82	余辉等,2011
鄱阳湖	17	15.00	0.110	64.00	26.30	30.70	112.00	0.80	49.40	彭小明等,2019
洞庭湖	24	12.90	0.330	56.20	29.70	37.70	164.00	2.44	50.80	唐聪等,2020
维多利亚湖-坦桑尼亚	93		0.100	11.00		21.60	36.40	2.50	29.60	Kishe et al., 2003
圣克莱尔湖-美国	34	5.90	0.170	8.60	10.10	11.60	40.00	<1	7.90	Gewurtz et al., 2007
伊利湖-美国	28	11.71		46.37	28.29	27.30	123.44	2.84	75.45	Opfer et al., 2011

注:重金属含量单位mg/kg。

洋淀亚区含量均值。

与前人对白洋淀湿地表层沉积物重金属调查结果对比(表6),Cr、Ni、Cu、Zn、Pb含量基本一致,As含量小于赵钰等(2013)和高秋生等(2019)测试值,Cd含量小于杨卓等(2005)和高秋生等(2019)测试结果。与中国中东部及世界其他地区湖泊相比,白洋淀表层沉积物重金属污染并不突出,除Cr、Ni、Cu、Zn含量略高于平均水平外,其他重金属元素含量均低于平均水平。

4.1.2 分布特征

白洋淀湿地表层沉积物各重金属元素地球化学分布如图2所示。As元素空间分布呈现东南高西北低的特征,藻荇淀、南刘庄、烧车淀、小白洋淀片区含量相对较低,王家寨、捞王淀、池鱼淀、泛鱼淀含量较高。Hg、Zn元素分布规律相近,府河入淀口周边和白沟引河入淀口周边均明显富集,其次为小白洋淀和藻荇淀,东部其他淀区相对较低。Cr元素总体分布特征为西高东低,南刘庄、藻荇淀、小白洋淀以及王家寨亚区西侧含量多大于80 mg/kg,其他淀区Cr含量较低。Cu、Ni元素分布特征相似,烧车淀东北部白沟引河入淀口周边为主要富集区,其次为南刘庄、小白洋淀及藻荇淀南部,东部其他淀区相对较低。Cd元素高值区集中分布于南刘庄亚区府河入淀口及烧车淀西南部,含量多大于0.6 mg/kg,极大值(4.13 mg/kg)点位于南刘庄北侧航道,其他大部分淀区Cd元素含量多小于0.4 mg/kg。Pb元

素在藻荇淀南部、南刘庄、小白洋淀西南等淀区含量较高,极大值点位于圈头乡西南部。不同重金属元素分布特征存在较大差异。

4.2 表层沉积物环境质量评价

白洋淀湿地表层沉积物全部484组样品中,Hg、Cr、Ni三种元素含量均未超过风险筛选值(表7),环境地球化学等级均为一等清洁。Cd元素污染最严重,有28组样品Cd元素超筛选值,其中23组为二等轻微污染、4组为三等轻度污染、1组为五等重度污染,超标点除1组位于圈头乡东部外,其余均位于府河入淀口及周边区域。有4组样品As元素超风险筛选值,均为二等轻微污染,分布于白洋淀东南部。有3组样品Zn元素超筛选值,均为二等轻微污染,分布于府河入淀口。有2组样品Cu元素超过风险筛选值,轻微污染和轻度污染各有1组,均位于烧车淀东北部。有1组样品Pb元素超风险筛选值,为三等轻度污染,位于圈头乡西南。

总体来看,白洋淀湿地表层沉积物环境地球化学综合等级以清洁无污染为主,共有35组样品存在不同程度的重金属污染情况,超标比率为7.2%,超标点主要分布于府河入淀口周边,少量分布于白沟引河入淀口以及圈头周边等淀区。绘制白洋淀湿地表层沉积物环境地球化学综合等级分布图(图3),统计结果显示,一等清洁区分布面积144.54 km²,占表层沉积物分布总面积的96.68%;轻微污染区面积4.81 km²,主要分布于南刘庄、烧车淀西南、

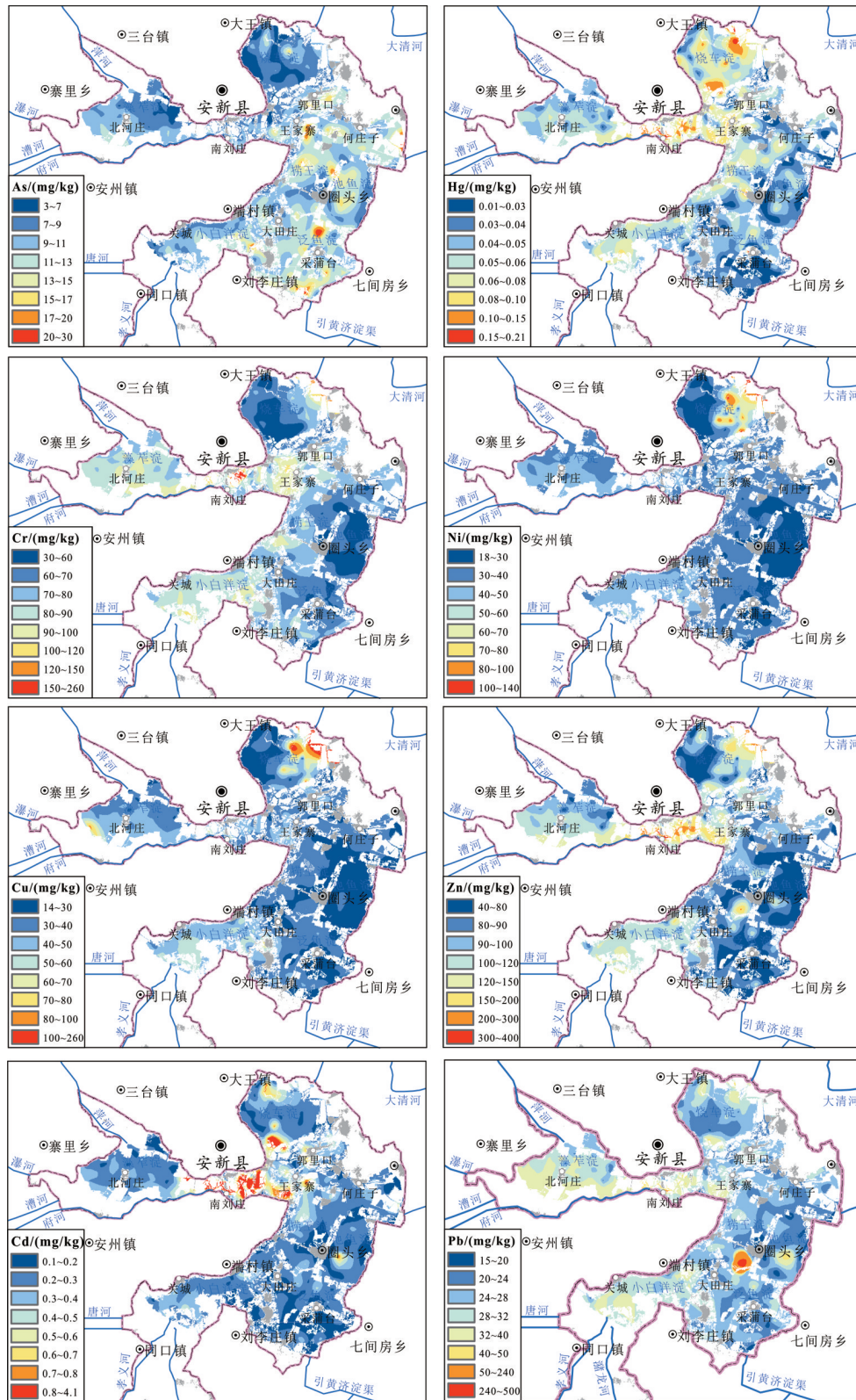


图2 白洋淀表层沉积物重金属元素地球化学分布

Fig.2 Geochemical distribution of heavy metals in the surface sediments of BYD Lake

表7 白洋淀表层沉积物各重金属元素污染指数及各等级样本数统计
Table 7 Statistics of pollution index and sample numbers of each grade of heavy metal elements in surface sediments of BYD Lake

指标	污染指数 P_i			各等级样本数				
	最小值	最大值	平均值	清洁	轻微污染	轻度污染	中度污染	重度污染
As	0.19	1.43	0.50	480	4	0	0	0
Hg	0.01	0.23	0.05	484	0	0	0	0
Cr	0.08	0.72	0.22	484	0	0	0	0
Ni	0.10	0.71	0.20	484	0	0	0	0
Cu	0.14	2.56	0.37	482	1	1	0	0
Zn	0.15	1.36	0.34	481	3	0	0	0
Cd	0.14	5.16	0.42	456	23	4	0	1
Pb	0.06	2.03	0.12	483	0	1	0	0
综合	0.21	5.16	0.62	449	28	6	0	1

以及圈头乡南部,占表层沉积物分布总面积的3.22%;轻度、中度及重度污染区仅分布于南刘庄一带,面积总计0.15 km²,占比为0.10%。

4.3 重金属污染程度评价

根据公式(1)计算白洋淀湿地表层沉积物样品各重金属地累积指数,各重金属元素地累积指数及不同污染程度等级样品数统计如表8所示。

研究区484组表层沉积物样品中As、Cr、Ni、Zn、Pb、Hg等6种元素地累积指数平均值小于0,污染程度等级以清洁无污染为主。Cu元素地累积指数分布范围为-1.18~2.97,平均值0.12,污染程度等级以轻度和清洁为主,有2组样品污染程度等级为中度。Cd元素地累积指数分布范围为-0.36~4.87,平均值为0.95,污染程度等级以中度和偏中度为主,有49组样品污染程度等级为中度及以上。各重金属污染程度由严重到轻微排序为: Cd > Cu > Hg > Pb > Zn > Ni > Cr > As。

从白洋淀湿地各分区对比来看(图4):南刘庄亚区(Ⅲ)重金属污染程度最为严重,Cd元素污染程度为中度,Hg、Cu、Zn、Pb四种元素为轻度污染;烧车淀亚区(Ⅱ)其次,Hg、Cu、Cd三种元素为轻度污染;再次为藻荇淀亚区(Ⅰ)和小白洋淀(Ⅷ),均有Cu、Cd两种重金属元素轻度污染;其他亚区仅有Cd元素为轻度污染。

4.4 重金属潜在生态风险评价

根据公式(2)和(3)计算各重金属元素单指标潜在生态风险指数 E_i^p 及综合潜在生态风险指数 RI ,统计结果如表9所示。研究区484组表层沉积物样

品中As、Cr、Ni和Zn潜在风险指数均小于40,为低度生态风险等级。Cu和Pb潜在生态风险指数均值分别为8.59和6.68,以低度风险等级为主,各有一组样品生态风险指数大于40,分别为中度和重度风险等级。Hg潜在生态风险指数范围为16.56~250.00,存在低度至严重潜在生态风险,以低度和中度为主,分布占样本总数的24.8%和59.3%,有8组样品存在严重潜在风险。Cd潜在生态风险指数范围为35.11~1316.49,存在低度至严重潜在生态风险,以中度和重度为主,占比分别为50.2%和36.8%,有54组样品存在严重潜在生态风险。

总体看来,白洋淀表层沉积物各重金属单指标潜在生态风险以低度为主,Cd元素生态风险最高,其次为Hg元素,单指标潜在生态风险由高到低排序为: Cd > Hg > Cu > As > Pb > Ni > Cr > Zn。该评价结果与周亚龙等(2020)雄安新区农田土壤重金属潜在生态风险评价结果基本一致。

白洋淀湿地表层沉积物样品潜在生态风险综合指数 RI 分布范围为70.06~1596.91,平均值为197.49,存在低度至严重潜在生态风险。绘制白洋淀湿地表层沉积物重金属潜在生态风险等级分区图(图5)。白洋淀湿地表层沉积物重金属潜在生态风险以中度和低度为主,重度及严重风险区零星分布。中度风险区分布面积最大,为97.43 km²,占表层沉积物分布总面积的65.2%;低度风险区分布面积其次,为45.14 km²,占比30.2%;重度风险区主要分布于南刘庄一带、安新旅游码头以及烧车淀北侧局部地区,分布面积6.65 km²,占比4.5%;严重风险区仅分

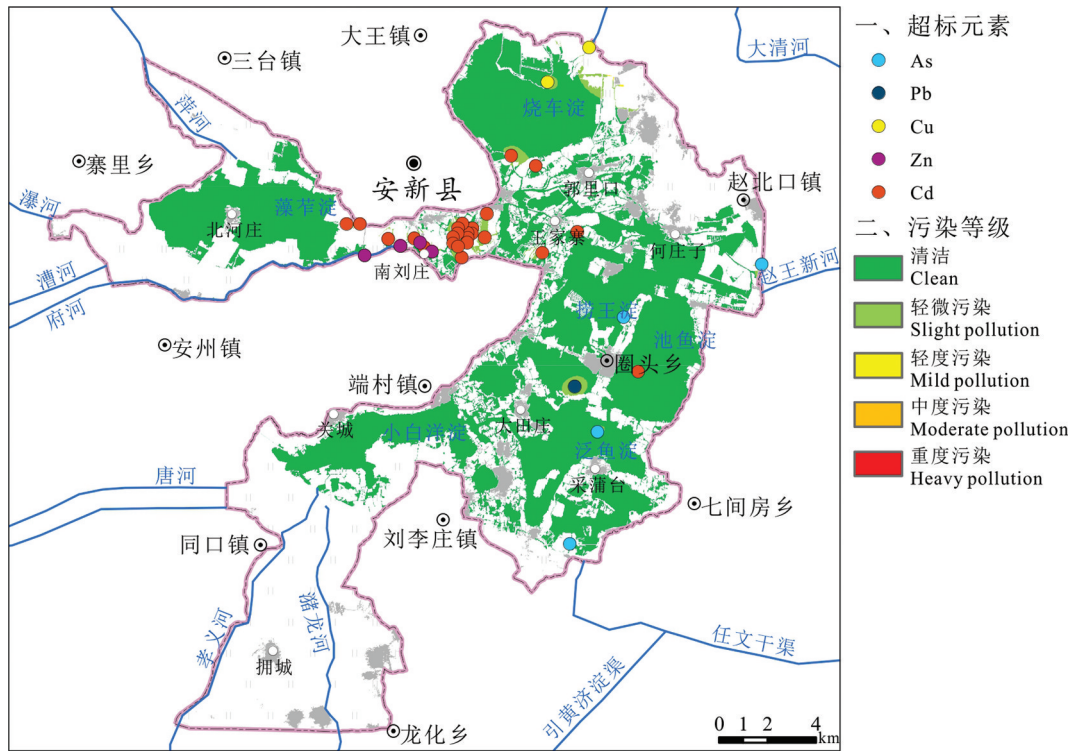


图3 白洋淀表层沉积物环境地球化学综合等级

Fig.3 Comprehensive grade of environmental geochemistry of surface sediments in BYD Lake

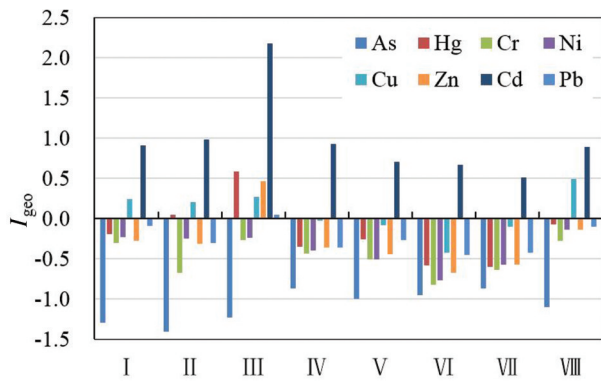


图4 各亚区表层沉积物重金属元素地累积指数

Fig.4 Geoaccumulation index of heavy metal elements in surface sediments of each subregion

布于南刘庄北侧航道,面积0.22 km²,占比0.1%。

总体看来,河流入淀口所在亚区重金属潜在生态风险高于其他亚区,府河入淀口南刘庄亚区潜在生态风险综合指数均值(404.3)最高,东南部泛鱼淀亚区潜在生态风险综合指数均值(140.0)最低。各亚区重金属潜在生态风险由高到低排序依次为:南刘庄 > 烧车淀 > 小白洋淀 > 王家寨 > 藻荇淀 > 捞

王淀 > 池鱼淀 > 泛鱼淀。

4.5 重金属污染来源解析

表层沉积物重金属可能来源于母岩自然风化(严洪泽等,2018),可能来源于受污染河流、生活污水及工农业污水排放等,同时也可能存在多种复合来源。对白洋淀湿地表层沉积物重金属含量进行Pearson相关性分析(表10),湿地表层沉积物中Hg、Cr、Ni、Cu、Zn、Cd等6种元素两两之间均为极显著相关($P < 0.01$),说明这6种元素具有相同或相似的来源。Pb与其他重金属元素相关性稍低,与Zn元素为极显著相关,与Ni、Cu、Cd为显著相关。As元素与其他元素相关性最低,与Cu、Cd为极显著相关,与Ni为显著相关。

主成分分析是一种通常用于环境研究的多变量统计方法(代杰瑞等,2015),白洋淀表层沉积物8种重金属元素主成分分析显示(图6a),前四个主成分特征值之和为6.79,反映了84.9%的全部信息,可解释研究区内大部分重金属成因信息。

第一主成分F1特征值(3.48)显著高于其他主成分,方差贡献率为44%,其特点表现为因子变量

表8 白洋淀表层沉积物地累积指数分级统计

Table 8 Classification statistics of geoaccumulation index of surface sediment in BYD Lake

重金属	地累积指数			各污染程度等级样本数						
	最小值	最大值	平均值	清洁	轻度	偏中度	中度	偏重度	重度	极重度
As	-2.46	0.49	-1.10	481	3	0	0	0	0	0
Hg	-1.86	2.06	-0.18	304	156	23	1	0	0	0
Cr	-1.82	1.31	-0.47	477	5	2	0	0	0	0
Ni	-1.30	1.54	-0.36	444	36	4	0	0	0	0
Cu	-1.18	2.97	0.12	184	287	11	2	0	0	0
Zn	-1.35	1.80	-0.28	398	74	12	0	0	0	0
Cd	-0.36	4.87	0.95	36	261	138	35	13	1	0
Pb	-1.06	3.91	-0.24	393	90	0	0	1	0	0

表9 白洋淀表层沉积物重金属元素潜在生态风险指数分级统计

Table 9 Statistics of potential ecological risk index of heavy metal elements in surface sediments of BYD Lake

风险等级	潜在生态风险指数			各风险等级样本数			
	最小值	最大值	平均值	低度	中度	重度	严重
As	2.72	21.03	7.29	484	0	0	0
Hg	16.56	250.00	59.44	120	287	69	8
Cr	0.85	7.42	2.21	484	0	0	0
Ni	3.04	21.83	6.04	484	0	0	0
Cu	3.30	58.60	8.59	483	1	0	0
Zn	0.59	5.21	1.31	484	0	0	0
Cd	35.11	1316.49	106.29	9	243	178	54
Pb	3.60	113.02	6.68	483	0	1	0
R_I	70.06	1596.91	197.84	171	260	40	13

表10 白洋淀表层沉积物重金属含量相关性

Table 10 Correlation of heavy metal content in surface sediments of BYD Lake

重金属	As	Hg	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
As	1							
Hg	0.052	1						
Cr	-0.037	0.360**	1					
Ni	0.154*	0.339**	0.696**	1				
Cu	0.189**	0.509**	0.573**	0.794**	1			
Zn	0.135	0.625**	0.560**	0.612**	0.680**	1		
Cd	0.186**	0.640**	0.349**	0.304**	0.460**	0.798**	1	
Pb	0.017	0.099	0.087	0.153*	0.168*	0.418**	0.142*	1

注:**表示 $P < 0.01$,为极显著相关; *表示 $P < 0.05$,为显著相关。

Zn、Cu、Hg、Ni、Cd、Cr具有较高的正载荷(图6b),因子变量Pb其次,As载荷最低。根据各重金属元素分布特征,上述6种载荷较高的元素主要富集区均为府河、白沟引河入淀口周边,且两两之间均为极显著相关,因此推测第一主成分为入淀河流输入。

长期以来,府河承接了保定市大量的工业废水、生活污水及府河沿岸金属冶炼企业排水,自西向东径流,在南刘庄亚区西部注入白洋淀;白沟引河则承接白沟新城等上游工业区排水,自北向南径流,在烧车淀亚区东北部留通村东侧注入白洋淀。入淀

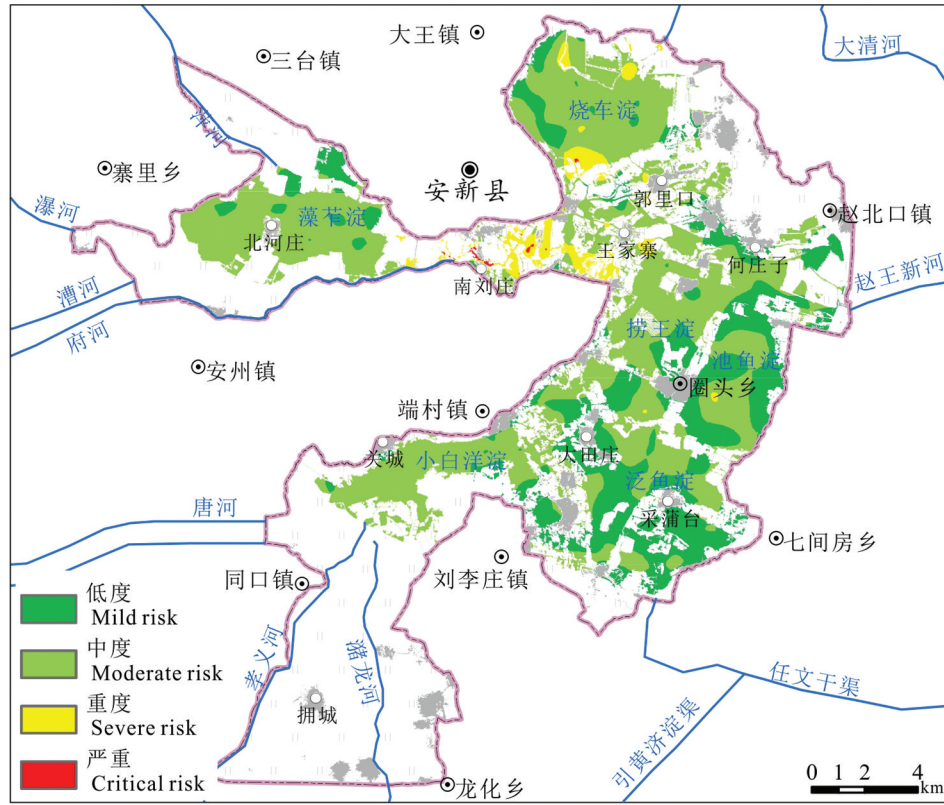


图5 白洋淀表层沉积物重金属潜在生态风险等级分区

Fig.5 Potential ecological risk levels of heavy metals in surface sediments of BYD Lake

河流水体的Cd、Hg、Zn、Ni等重金属通过化学吸附、物理沉淀等作用转移至淀泊表层沉积物中,导致府河、白沟引河入淀口所在亚区表层沉积物重金属元素相对富集。

第二、三、四主成分方差贡献率相近,分别为17.5%、12.4%和11.4%,其中第三、四主成分特征最

为明显(图6b、c)。第三主成分特征表现为因子变量As具有最高正载荷(0.97),Cd、Hg、Zn等受河流输入影响显著元素载荷较低,结合As元素分布特征,推测第三主成分As元素主要受母岩自然风化因素影响。第四主成分表现特征为变量Pb具有最高正载荷(0.91),Cd、Hg、As等元素载荷较低,结合Pb

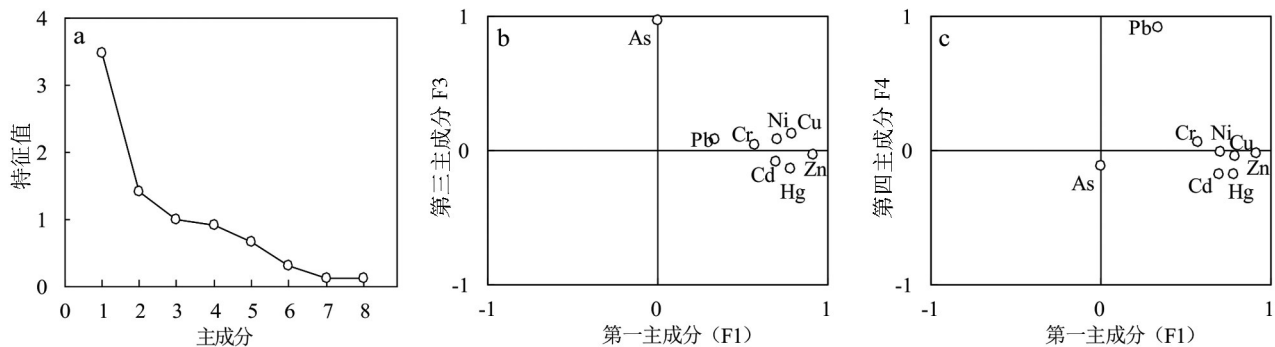


图6 白洋淀表层沉积物重金属元素主成分分析

a—碎石图;b—主成分图F1-F3;c—主成分图F1-F4

Fig.6 Principal component analysis of heavy metal elements in surface sediments of BYD Lake

a—Gravel figure;b—Principal component diagram F1-F3;c—Principal component diagram F1-F4

元素在淀区分布特征,推测第四主成分为淀内人类活动因素,鉴于Pb元素在第一主成分中亦具有较高载荷,推测Pb元素存在河流外源输入及淀内人类活动多种来源。

5 结 论

(1)白洋淀湿地上层沉积物环境质量总体较好,府河入淀口南刘庄、白沟引河入淀口烧车淀东北部以及圈头乡周边等局部淀区存在重金属含量超污染风险筛选值现象,主要超标元素为Cd;表层沉积物环境地球化学综合等级为清洁无污染区,分布面积144.54 km²,占分布总面积的96.68%。

(2)据重金属污染程度评价结果,白洋淀湿地上层沉积物各重金属污染程度存在差异,Cd元素污染程度等级以中度和偏中度为主,Cu元素污染程度等级以轻度和清洁为主,其他元素以清洁无污染为主,污染程度由重到轻排序为Cd>Cu>Hg>Pb>Zn>Ni>Cr>As。主成分分析显示,入淀河流输入为白洋淀重金属主要来源。

(3)白洋淀湿地上层沉积物重金属潜在生态风险以低度和中度为主,重度及严重风险区零星分布;各亚区重金属潜在生态风险差异较大,河流入淀口所在淀区重金属潜在生态风险高于其他淀区,由高到低排序依次为:南刘庄>烧车淀>小白洋淀>王家寨>藻荇淀>捞王淀>池鱼淀>泛鱼淀。

References

- Bao Liran, Deng Hai, Jia Zhongmin, Li Yu, Dong Jinxiu, Yan Mingshu, Zhang Fenglei. 2020. Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil of northwest Xiushan, Chongqing[J]. *Geology in China*, 47(6): 1625–1636 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jingshen, Wang Zhong, Liu Yuji. 1989. Potential hazards of metal pollution in surface water: Evaluation by sedimentological methods[J]. *Environmental Science and Technology (Liaoning)*, 9(1):16–25(in Chinese).
- Dai G, Liu X, Liang G. 2011. Distribution of organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in surface water and sediments from Baiyangdian Lake in North China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 23(10): 1640–1649.
- Dai Jierui, Zhu Decheng, Pang Xugui, Yang Lizhi, Peng Guanfang, Ning Zhenguo. 2015. Geochemical characteristics and environmental quality of soil elements in Jinan City [J]. *Geology in China*, 42(1): 308–316(in Chinese with English abstract).
- Forstner U. 1989. *Lecture Notes in Earth Sciences (Contaminated Sediments)* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 107–109.
- Gao Qiusheng, Tian Ziqiang, Jiao Lixin, Ding Lin, Yang Suwen, Hao Zifeng, Cui Zhidan, Jia Haibin. 2019. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in Baiyangdian Lake [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 9(1): 66–75(in Chinese with English abstract).
- Gewurtz S B, Helm P A., Waltho J, Stern G A., Reiner E J, Painter S, Marvin C H., 2007. Spatial distributions and temporal trends in sediment contamination in Lake St. Clair [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 33: 668–685.
- Gong Xiaofeng, Chen Chunli, Zhou Wenbing, Jian Minfei, Zhang Zhenhui. 2006. Assessment on Heavy Metal Pollution in the Sediment of Poyang Lake [J]. *Environmental Science*, (4): 732–736 (in Chinese with English abstract).
- Hu Guocheng, Xu Muqi, Xu Zhencheng. 2011. Pollution characteristic and potential risk assessment of heavy metals in surface sediment from Fuhe River and Baiyangdian Lake, North China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 30(1):146–153.
- Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 14(8): 975–1001.
- Hu G, Luo X, Li F. 2010. Organochlorine compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediment from Baiyangdian Lake, North China: concentrations, sources profiles and potential risk[J]. *J. Environ.*, 22(2):176–183.
- Hu Guocheng, Guo Jianyang, Luo Xiaojun, Chen Shejun, Xu Muqi, Dai Jiayin, Mai Bixian, Li Fengchao. 2009. Content, distribution, source and ecological risk assessment of PAHs in surface sediments of Baiyangdian Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 22(3): 321–326 (in Chinese with English abstract).
- Hu Guocheng, Li Fengchao, Dai Jiayin, Luo Xiaojun, Mai Bixian, Chen Shejun, Cao Hong, XU Muqi. 2009. Characteristics of distribution and risk assessment of DDTs in surface sediments from Fuhe and Baiyangdian [J]. *Research of Environmental Sciences*, 22(8): 891–896 (in Chinese with English abstract).
- Hu Guocheng, Xu Muqi, Xu Zhencheng, Dai Jiayin, Cao Hong, Peng Xiaowu, Qi Jianying. 2011. Characteristics and potential risk assessment of heavy metal pollution in sediments from Fuhe-Baiyangdian [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 30(1): 146–153(in Chinese with English abstract).
- Ji Z, Zhang H, Zhang Y. 2019. Distribution, ecological risk and source identification of heavy metals in sediments from the Baiyangdian Lake, Northern China[J]. *Chemosphere*, 237: 124425–.
- Kishe M A, Machiwa J F. 2003. Distribution of heavy metals in sediments of Mwanza Gulf of Lake Victoria, Tanzania[J]. *Environment International*, 28:619–625.
- Li Bicao, He Liansheng, Yang Min, Meng Rui, Yuan Donghai, Xi Beidou, Shu Jianmin. 2012. Speciation and vertical distribution of

- heavy metals in sediments of Baiyangdian Lake [J]. *Environmental Science*, 33(7): 2376–2383 (in Chinese with English abstract) .
- Li Jianguo, Li Guibao, Cui Huimin, Wang Dianwu. 2004. Degradation of reed wetland and protection study in Baiyangdian [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, (3):35–38. (in Chinese with English abstract) .
- Li Jie, Song Peng, Li Hui, Chen Yunxuan, Jiao Lixin, Li Guodong. 2020. Heavy metal regional characteristics and potential ecological risk assessment of lakes and reservoirs in North China[J]. *China Environmental Science*, 40(11): 4927– 4935(in Chinese with English abstract) .
- Li Jingwei, Yang Luhua, Xia Hui, Gao Huiyan, Kang Guofang. 2007. Evaluation of heavy metal pollution in surface sediments of Baiyangdian Lake by geoaccumulation index method [J].*Yellow River*, (12): 59–60,88 (in Chinese) .
- Li Yu, Yu Zhiming, Song Xiuxian. 2006. Application of principal component analysis (PCA)for the estimation of source of heavy metal contamination in marine sediments [J]. *Environmental Science*, (1):137–141(in Chinese with English abstract) .
- Liang Shuxuan, Zhang Zhenran, Qin Zhe, Wang Yu, Liu Lusan. 2016. On the physico– chemical characteristic features and the nutrient distribution in the sediments of Lake Baiyangdian [J]. *Journal of Safety and Environment*, 16(1): 294–298 (in Chinese with English abstract) .
- Liu Li, Zhang Jiawen, Chen Fenfei, Sheng Sheng, Tian Ziqiang, Wang Jian. 2020. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediment of Hengshui Lake [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 10(2): 205– 211(in Chinese with English abstract) .
- Liu Ruiping, Xu Youning, Zhang Jianghua, Wang Wenke, Rafaey M Elwardany.2020. Effects of heavy metal pollution on farmland soils and crops: A case study of the Xiaoqinling Gold Belt, China[J]. *China Geology*, 3(3): 402–410.
- Ma Zhen, Xia Yubo, Li Haitao, Han Bo, Yu Xuezhong, Zhou Yalong, Wang Yushan, Guo Xu, Li Hongqiang, Pei Yandong. 2021. Analysis of naturalresources and environment eco– geological conditions in the Xiong'an New Area[J]. *Geology in China*, 48(3): 677– 696 (in Chinese with Englishabstract).
- Mao Xin, Liu Linjing, Song Lei, Jiang Gaolei, Li Junfeng, Li Chang'an. 2020. A 70– year sedimentary record of eco– environment changes in Baiyangdian Lake and its influencing factors [J]. *Earth Sciences*, 1–18 (in Chinese with English abstract) .
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2008. Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land GB 15618– 2008[S](in Chinese) .
- Ministry of Land and Resources, PRC. 2016. DZ /T 0295–2016 Land Quality Geochemical Evaluation Criteria [S](in Chinese) .
- Opfer S E, Farver J R, Miner J G, Krieger K.2011. Heavy metals in sediments and uptake by burrowing mayflies in western Lake Erie basin [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 37:1–8.
- State Environmental Protection Bureau, China Environmental Monitoring Station. 1990. Background Values of Soil Elements in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 326–359 (in Chinese) .
- Tang Cong, Qian Bao, Li Weiqin, Pan Chang, Yang Yu, Xiao Xiao. 2020. Pollution characteristics and risk evaluation of heavy metals in surface sediments of Dongting Lake [J]. *Yangtze River*, 51(6): 49–56, 62(in Chinese with English abstract) .
- Wang Jingzhong, Liu Zhuo, Wei Hao, Wu Yuhui, Zhan Shuie, Zhu Chi, Zhang Yimiao. 2020. Spatial characteristics, risk assessment, and source analysis of elements in surface sediments from the Baiyangdian Lake [J]. *Environmental Science*, 41(1): 224–231(in Chinese with English abstract) .
- Wang Yushan, Yin Dechao, Wang Xuqing, Qi Xiaofan, Xia Yubo, Ma Zhitong, Zhang Liang, Xu Rongzhen. 2021. Groundwater– surface water inter actions in the Baiyangdian wetland, Xiong'an New Area and its impact on reed land[J]. *Geology in China*, 48(5):1368–1381. (in Chinese with Englishabstract).
- Xia Jiandong, Long Jinyun, Gao Yaping, Chen Yue, Meng Jing, Zhou Yunqiao, Chen Shuqin. 2020. Ecological risk assessment and source analysis of heavy metal pollutions in sediments of the Chaohu Lake [J]. *Earth and Environment*, 48(2): 220– 227(in Chinese with English abstract) .
- Xiang Yuxi, Wang Xiao, Shan Baoqing, Zhao Yu, Tang Wenzhong, Shu Limin, Jiang Shixin, Cao Yang. 2020. Spatial distribution, fractionation and ecological risk of heavy metals in surface sediments from Baiyangdian Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 40(6): 2237–2246(in Chinese with English abstract) .
- Xu Zhengqi, Ni Shijun, Tuo Xianguo, Zhang Chengjiang. 2008. Calculation of toxic coefficient of heavy metals in evaluation of potential ecological hazard index method [J]. *Environmental Science and Technology*, (2): 112– 115 (in Chinese with English abstract) .
- Yan Hongze, Zhou Guohua, Sun Binbin, He Ling, Liu Yinfei, Hou Shujun. 2018. Geochemical characteristics of the bayberry producing area in Longhai, Fujian [J]. *Geology in China*, 45(6): 1155–1166(in Chinese with English abstract) .
- Yang Zhuo, Li Guibao, Wang Dianwu, Cui Huimin, Shang Tongzhao. 2005. Pollution and the potential ecological risk assessment of heavy metals in sediment of Baiyangdian Lake [J]. *Journal of Agro–Environment Science*, (5): 115–121(in Chinese with English abstract) .
- Yi Yujun, Lin Chuqiao, Tang Caihong. 2020. Hydrology, environment and ecological evolution of Lake Baiyangdian since 1960s [J]. *Journal of Lake Science*, 32(5): 1333–1347,1226(in Chinese with English abstract) .
- Zhang Mengman, Wu Xiuqin. 2018. Changes in hydrological

- connectivity and spatial morphology of Baiyangdian wetland over the last 20 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38(12): 4205–4213 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Min, Gong Zhaoning, Zhao Wenji, Duo A. 2016. Landscape pattern change and the driving forces in Baiyangdian wetland from 1984 to 2014 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(15): 4780–4791(in Chinese with English abstract).
- Zhou Yalong, Yang Zhibin, Wang Qiaolin, Wang Chengwen, Liu Fei, Song Yuntao, Guo Zhijuan. 2020. Potential ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in soil–crop System in Xiong'an New District[J]. *Environmental Science*, 42(4): 2003–2015(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 鲍丽然, 邓海, 贾中民, 李瑜, 董金秀, 严明书, 张风雷. 2020. 重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 47(6): 1625–1636.
- 陈静生, 王忠, 刘玉机. 1989. 水体金属污染潜在危害: 应用沉积学方法评价[J]. *环境科技(辽宁)*, 9(1):16–25.
- 代杰瑞, 祝德成, 庞绪贵, 杨丽芝, 彭观峰, 宁振国. 2015. 济南市土壤元素地球化学特征及环境质量[J]. *中国地质*, 42(1): 308–316.
- 高秋生, 田自强, 焦立新, 丁琳, 杨苏文, 郝子峰, 崔志丹, 贾海斌. 2019. 白洋淀重金属污染特征与生态风险评价[J]. *环境工程技术学报*, 9(1): 66–75.
- 弓晓峰, 陈春丽, 周文斌, 简敏菲, 张振辉. 2006. 鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价[J]. *环境科学*, (4): 732–736.
- 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 1990. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 326–359.
- 胡国成, 郭建阳, 罗孝俊, 陈社军, 许木启, 戴家银, 麦碧娴, 李凤超. 2009. 白洋淀表层沉积物中多环芳烃的含量、分布、来源及生态风险评价[J]. *环境科学研究*, 22(3): 321–326.
- 胡国成, 李凤超, 戴家银, 罗孝俊, 麦碧娴, 陈社军, 曹宏, 许木启. 2009. 府河和白洋淀沉积物中DDTs的分布特征和风险评估[J]. *环境科学研究*, 22(8): 891–896.
- 胡国成, 许木启, 许振成, 戴家银, 曹宏, 彭晓武, 齐建英. 2011. 府河–白洋淀沉积物中重金属污染特征及潜在风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 30(1): 146–153.
- 李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民. 2012. 白洋淀底泥重金属形态及竖向分布[J]. *环境科学*, 33(7): 2376–2383.
- 李建国, 李贵宝, 崔慧敏, 王殿武. 2004. 白洋淀芦苇湿地退化及其保护研究[J]. *南水北调与水利科技*, (3):35–38.
- 李捷, 宋鹏, 李慧, 程云轩, 焦立新, 李国栋. 2020. 北方湖区沉积物重金属区域特征及生态风险评价[J]. *中国环境科学*, 40(11): 4927–4935.
- 李经伟, 杨路华, 夏辉, 高惠嫣, 康国芳. 2007. 白洋淀底泥重金属污染地积累指数法评价[J]. *人民黄河*, (12): 59–60, 88.
- 李玉, 俞志明, 宋秀贤. 2006. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源[J]. *环境科学*, (1):137–141.
- 梁淑轩, 张振冉, 秦哲, 王瑜, 刘录三. 2016. 白洋淀沉积物理化特性及营养盐分布特征[J]. *安全与环境学报*, 16(1): 294–298.
- 刘利, 张嘉雯, 陈奋飞, 盛晟, 田自强, 王俭. 2020. 衡水湖底泥重金属污染特征及生态风险评价[J]. *环境工程技术学报*, 10(2): 205–211.
- 马震, 夏雨波, 李海涛, 韩博, 余学中, 周亚龙, 王雨山, 郭旭, 李洪强, 裴艳东. 2021. 雄安新区自然资源与环境–生态地质条件分析[J]. *中国地质*, 48(3): 677–696.
- 毛欣, 刘林敬, 宋磊, 姜高磊, 李峻峰, 李长安. 2020. 白洋淀近70年生态环境演化过程及影响因素[J]. *地球科学*: 1–18.
- 唐聪, 钱宝, 李炜钦, 潘畅, 杨宇, 肖潇. 2020. 洞庭湖区表层沉积物重金属污染特征与风险评价[J]. *人民长江*, 51(6): 49–56, 62.
- 汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 吴玉会, 占水娥, 朱迟, 张益森. 2020. 白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析[J]. *环境科学*, 41(1): 224–231.
- 王雨山, 尹德超, 王旭清, 祁晓凡, 夏雨波, 马稚桐, 张亮, 徐蓉桢. 2021. 雄安新区白洋淀湿地地表水和地下水转化关系及其对芦苇分布的影响[J]. *中国地质*, 48(5):1368–1381.
- 夏建东, 龙锦云, 高亚萍, 陈悦, 孟晶, 周云桥, 陈书琴. 2020. 巢湖沉积物重金属污染生态风险评价及来源解析[J]. *地球与环境*, 48(2): 220–227.
- 向语兮, 王晓, 单保庆, 赵钰, 唐文忠, 束礼敏, 姜时欣, 曹阳. 2020. 白洋淀表层沉积物重金属形态分布特征及生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 40(6): 2237–2246.
- 徐争启, 倪师军, 庾先国, 张成江. 2008. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, (2): 112–115.
- 严洪泽, 周国华, 孙彬彬, 贺灵, 刘银飞, 候树军. 2018. 福建龙海杨梅产地元素地球化学特征[J]. *中国地质*, 45(6): 1155–1166.
- 杨卓, 李贵宝, 王殿武, 崔惠敏, 商同钊. 2005. 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*, (5): 115–121.
- 易雨君, 林楚翹, 唐彩红. 2020. 1960s以来白洋淀水文、环境、生态演变趋势[J]. *湖泊科学*, 32(5): 1333–1347, 1226.
- 张梦曼, 吴秀芹. 2018. 近20年白洋淀湿地水文连通性及空间形态演变[J]. *生态学报*, 38(12): 4205–4213.
- 张敏, 官兆宁, 赵文吉, 阿多. 2016. 近30年来白洋淀湿地景观格局变化及其驱动机制[J]. *生态学报*, 36(15): 4780–4791.
- 中华人民共和国国土资源部. 2016. DZ/T 0295–2016 土地质量地球化学评价规范[S].
- 中华人民共和国生态环境部. 2018. GB15618–2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准[S].
- 周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟. 2021. 雄安新区农田土壤–农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析[J]. *环境科学*, 42(4): 2003–2015.