

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2021.0126

张杨, 许梦雅, 张超, 等. 2021. 白洋淀村落水域沉积物中营养元素和重金属分布特征及风险评价[J]. 环境科学学报 41(10): 4074–4085

Zhang Y, Xu M Y, Zhang C, et al. 2021. Distribution characteristics of nutrient elements and heavy metals and its risk assessment in sediments around villages in Baiyangdian Lake[J]. Acta Scientiae Circumstantiae 41(10): 4074–4085

# 白洋淀村落水域沉积物中营养元素和重金属分布特征及风险评价

张杨<sup>1,2</sup>, 许梦雅<sup>1,2</sup>, 张超<sup>2,\*</sup>, 单保庆<sup>2,3</sup>, 刘操<sup>4,\*</sup>, 翟付杰<sup>2,5</sup>

1. 辽宁大学环境学院, 沈阳 110036
2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085
3. 中国科学院大学, 北京 100049
4. 中国环境科学研究院, 北京 100012
5. 华北水利水电大学水利学院, 郑州 450046

**摘要:** 选取白洋淀下张庄、大田庄、邱庄、圈头乡、采蒲台 5 个典型淀中村为研究对象, 分析村边水域沉积物中营养元素(N、P、S、OM)和重金属(Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn)的空间分布特征, 运用有机污染指数法、污染指数法和潜在生态危害指数进行系统性的沉积物污染水平、生态风险评价。结果表明: 沉积物 TN、TP 含量均值分别为 1687.16 和 642.91 mg·kg<sup>-1</sup>, 其 TN、TP 含量最高值出现在大田庄水道水域, TN 含量均值排序均为水道>沟壕>塘>开阔水面; 除采蒲台外其余村落有机指数均处于 IV 等级, 沉积物中有机污染和有机氮污染较为严重。重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 含量均值分别为 0.17、55.77、35.52、28.25、19.99 和 119.74 mg·kg<sup>-1</sup>, Cd 的富集系数均值为 1.65, 来源以人为输入为主。沉积物风险指数(SPI)相应等级为低风险级别(SPI=1.85<5), 且潜在生态风险指数(RI)相应的亦为低生态风险(RI=76.87<150)。村落水域沉积物的生物毒性排序为邱庄>下张庄>圈头>大田庄>采蒲台, 邱庄水域沉积物生物毒性处于中-高水平, 其余 4 个村落后多为中-低等毒性。

**关键词:** 白洋淀; 淀中村; 营养元素; 重金属; 风险评价; 生物毒性

文章编号: 0253-2468(2021)10-4074-12 中图分类号: X52, X820.4 文献标识码: A

## Distribution characteristics of nutrient elements and heavy metals and its risk assessment in sediments around villages in Baiyangdian Lake

ZHANG Yang<sup>1,2</sup>, XU Mengya<sup>1,2</sup>, ZHANG Chao<sup>2,\*</sup>, SHAN Baoqing<sup>2,3</sup>, LIU Cao<sup>4,\*</sup>, ZHAI Fujie<sup>2,5</sup>

1. College of the Environment, Liaoning University, Shenyang 110036
2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environment Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049
4. Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012
5. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046

**Abstract:** Five typical villages in Baiyangdian Lake, Xiazhangzhuang (XZZ), Datianzhuang (DTZ), Dizhuang (DZ), Quantou (QT) and Caiputai (CPT), were selected to be studied. The spatial distribution characteristics of nutrient elements (N, P, S, OM) and heavy metals (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) in sediment around the villages were analyzed. Organic pollution index (OPI), sediment pollution index (SPI) and potential ecological risk index (RI) were employed to systematically evaluate the sediment pollution levels and ecological risks. The results showed that the average values of TN and TP were 1687.16 and 642.91 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively. The max values of TN, TP and TC were located in the sediment of DTZ waterway, and the order of the average content of TN was waterway>ditch>pond>lake region near the residential area. Except CPT, the OPI of the villages were at level IV, which indicated that the organic pollution and organic nitrogen pollution in sediment were considerably serious. The average concentration of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn were 0.17, 55.77, 35.52, 28.25, 19.99 and 119.74 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively. The enrichment factor of Cd was 1.65 averagely, indicating the anthropogenic input was the main source. Low risk level was identified by both the relative level of SPI (1.85<5) and RI (76.87<150). The order of biotoxicity of the sediments were DZ >XZZ>QT>DTZ>CPT. The biotoxicity of the sediments in some sites from the DZ were medium-high level, while

收稿日期: 2021-01-17 修回日期: 2021-03-20 录用日期: 2021-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(No.41907267)

作者简介: 张杨(1995—), 女, E-mail: 784704003@qq.com; \* 责任作者, E-mail: chaozhang@rcees.ac.cn; lc@bwsti.com

biotoxicity were medium-low levels in other four villages.

**Keywords:** Baiyangdian Lake; in-lake village; nutrient elements; heavy metals; risk assessment; biological toxicity

## 1 引言( Introduction)

白洋淀是中国北方最大的天然淡水湖,在调节气候、维持区域生态平衡和调蓄洪水方面发挥着不可替代的作用(Zhu *et al.*, 2019),淀区土地利用类型以苇地、水塘、开阔水域和村落为主(易雨君等, 2020)。雄安新区成立前,白洋淀的生态环境已受到严重污染,主要问题为河流污染输入、工农业污水排放、底泥及生物质内源性污染等造成的氮磷营养盐和重金属的累积(Ji *et al.*, 2019; 李琳琳等, 2019)。雄安新区的成立为白洋淀的生态环境保护与修复带来了巨大的机遇。研究发现,白洋淀重金属污染以Cd、Pb和Zn污染为主,潜在高风险区主要集中在府河河口区域和临近村落淀边区域(Ji *et al.*, 2019);白洋淀开阔水面沉积物中营养元素呈“西北高东南低”、重金属呈“中部高南北低”的分布特征(Wang *et al.*, 2020)。

研究表明,农村水体污染主要来源于生活污水无序排放、分散式畜禽养殖废水污染等外源污染,以及底泥污染、岸边垃圾等内源污染(鞠昌华等, 2016)。白洋淀共有淀中村40个,组成25个聚落区。目前,有关白洋淀沉积物污染的研究主要集中在开阔水面区域,针对淀中村水域沉积物污染的研究相对较少。已有研究表明,白洋淀淀中村总氮、总磷排放量分别达到481.8和24.09 t·a<sup>-1</sup>,直接影响淀中村周边水域沉积物,导致水质恶化、富营养化加剧(辜凌云等, 2012);白洋淀端村等水域沉积物受临水厕所和畜禽业废物的影响,存在重金属(如Cd、Cu、Zn)污染(Ji *et al.*, 2019; Peng *et al.*, 2019)。重金属等有毒元素在沉积物中积累时,可通过食物链或富集效应对人类或水生生物构成威胁(Li *et al.*, 2013)。淀中村为白洋淀内源治理的重点区域,生产生活带来的污染对村边水域影响较大。开展村落周边底泥污染及生态风险研究,可为白洋淀沉积物质量管理、控制区域农村污染及水生态修复等提供参考,具有重要的科学和实际意义。

基于此,本文以白洋淀村落周边与淀泊连通的受到人类生活影响的水域为主要研究对象,探究典型淀中村周边不同类型水域沉积物营养元素(C、N、P、S)和重金属(Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn)的分布特征,评价毒性元素的潜在生态风险,并采用发光细菌分

析沉积物的急性生物毒性,以期对白洋淀淀中村污染治理和底栖生境修复提供理论依据。

## 2 材料与方法( Materials and methods)

### 2.1 研究区域概况

白洋淀属于海河流域的大清河水系,位于113°40′~116°40′E、38°10′~40°40′N,属温带季风型大陆性半湿润半干旱气候,常年平均气温为7.3~12.7℃,多年平均降水量为564 mm,年内降水量分配极不均匀,70%~80%集中在6—8月(高彦春等, 2017)。白洋淀包括淀中村40个,本研究选取临近重要淀泊的5个村落,分别为下张庄、圈头、大田、邸庄和采蒲台。

### 2.2 沉积物样品的采集

根据村落周边水域类型特点,设置采样点位(图1)共计109个,其中,下张庄11个、大田庄12个、邸庄18个、圈头乡24个、采蒲台44个,包括开阔淀泊水面(30个)、水塘(村落周边人工利用围堤围埝建立的封闭鱼塘22个)、沟壕(位于芦苇台田之间的水域,39个)、水道(用于进出淀中村的航道水域,18个)。2020年9月采用彼得森采泥器采集表层(0~10 cm)沉积物,使用聚乙烯7号自封袋密封保存于4℃的车载冰箱,带回室内实验室进行试验指标分析。

### 2.3 样品实验分析

将沉积物放入真空冷冻干燥机中冷干后,研磨并过100目尼龙筛,经过预处理后的样品保存备用(Li *et al.*, 2013)。沉积物有机质测定使用灼烧减量法,称取过100目尼龙筛的沉积物样品1 g(精确至0.0001 g)至坩埚并放入马弗炉中,升温至600℃灼烧3 h(郭杰等, 2020)。沉积物中TN、TS含量采用燃烧法测定,称取150~170 mg过100目尼龙筛的样品用锡箔纸包好上元素分析仪测定(王旭等, 2020),同时测定30~33 mg土壤成分分析标准物质(磺胺STBB4751)。

沉积物中重金属总量的测定采用王水-氢氟酸消解法,称取沉积物样品0.2 g(精确至0.0001 g),依次加入12 mL王水和4 mL氢氟酸,放入微波消解仪进行消解,加入1~2滴高氯酸后赶酸,再过0.45 μm滤膜至离心管,采用电感耦合等离子体发射光谱仪ICP-OES测定Fe、Mn、Al和TP含量(李振涵等,

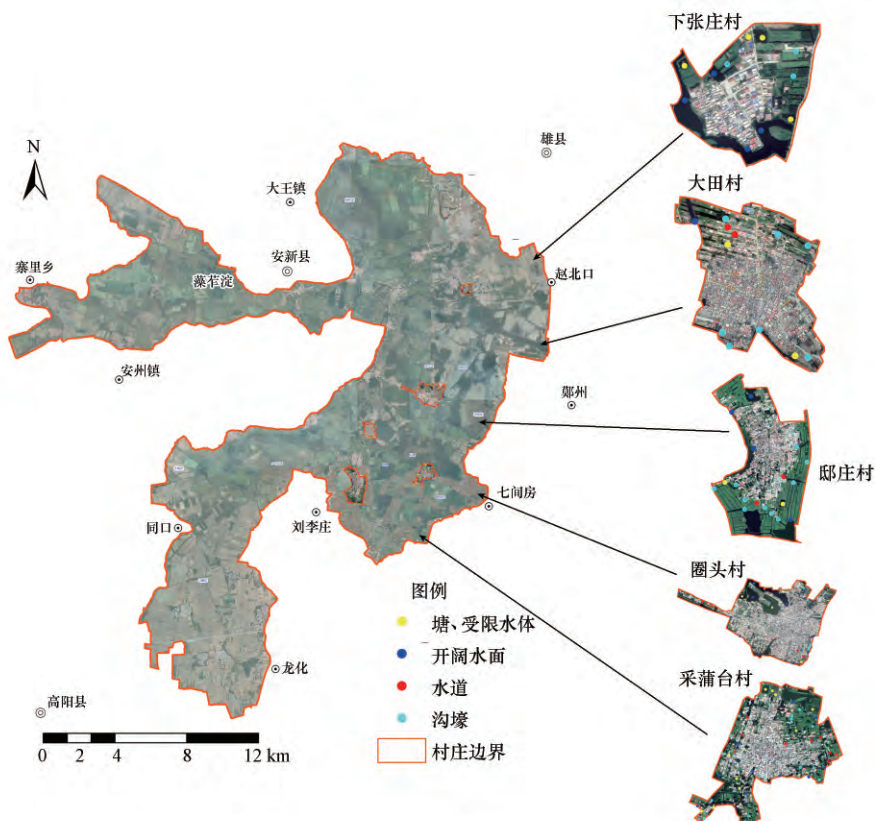


图1 白洋淀沉积物采样点位

Fig.1 Sampling sites of the sediments in Baiyangdian Lake

2018) 采用电感耦合等离子质谱仪 ICP-MS 分析 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 含量(王旭等, 2017)。测试过程中同步测定 3 个平行样品、3 个空白样品、2 个水系沉积物标准物质样品(GBW07427), 以减少误差及进行质量控制, 各金属元素回收率均在 90%~108% 之间, 测定值与认证值之间的测量误差小于 5%, 数据精度和准确度均符合要求。实验中所用药品试剂均为优级纯(所用酸品牌均为沪式), 实验用水均为超纯水(Milli-Q 超纯水仪, 默克化工技术有限公司), 滤膜(孔径 0.45 μm, 津腾实验设备有限公司), 仪器包括真空冷冻干燥机(FD-1A-50, 北京博医康实验仪器有限公司)、马弗炉(SXL-1008, 上海精宏实验设备有限公司)、分光光度计(UV-2700 紫外分光光度计, Shimadzu Corporation)、元素分析仪(variou MACRO cube, Elementar)、微波消解仪(907511, 培安有限公司)、ICP-OES(OPTIMA 2000 DV, Perkin Elmer, USA) 和 ICP-MS(7500 a, Agilent, USA)。

本研究使用 ArcGIS10.3 制作采样图, 采用 OriginPro9.1 制作数据分析图表, 数据统计分析利用

Excel 2019、IBM SPSS Statistics 26 完成。

#### 2.4 沉积物污染特征及风险评价

采用富集系数法进行污染源解析, 采用污染指数法和潜在生态危害指数法 2 种方法进行生态风险评价。综合不同评价方法可以强化风险评价的可靠性。利用有机污染指数法和有机氮污染指数法评价营养盐污染水平, 以期形成系统评价方法学并更好地进行流域沉积物污染与生态风险评价。

2.4.1 沉积物重金属评价方法 ①富集系数法(Enrichment Factor): 通过沉积物中所含重金属元素含量与背景值之比来说明沉积物重金属的富集程度, 本文选用 Fe 作为背景元素, 具体计算如下所示:

$$EF = \frac{[C_i/Fe]_s}{[C_i/Fe]_b} \quad (1)$$

式中, EF 为重金属在沉积物中的富集系数;  $[C_i/Fe]_s$  为沉积物中重金属  $i$  与沉积物中 Fe 含量的比值;  $[C_i/Fe]_b$  为环境中该金属元素背景值与 Fe 背景值之比。当 EF 值小于 1.5, 表明重金属主要来源是土壤和岩石圈的自然风化过程; EF 值大于 1.5, 表明重金属主要来源是人为输入(匡荃芬等, 2020)。

②潜在生态危害指数(Potential Ecological Risk Index): 基于重金属实测值与背景值比较及重金属的毒性系数的评价指标, 综合考虑了各种重金属毒性、评价区域对重金属污染的敏感度和区域背景值差异(Almeida *et al.* 2020), 具体计算公式如下:

$$f_i = \frac{C_i}{B_i} \quad (2)$$

$$E_i = T_i \times f_i \quad (3)$$

$$RI = \sum E_i = \sum T_i \times f_i = \sum T_i \times C_i / B_i \quad (4)$$

式中  $f_i$  为第  $i$  种重金属污染系数;  $C_i$  为第  $i$  种重金属实测含量 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $B_i$  为重金属  $i$  的背景值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $E_i$  为单个重金属潜在生态危害系数;  $T_i$  为单个污染物毒性响应参数(Jwa *et al.* 2020), 本研究各重金属毒性响应参数取值分别为 30(Cd)、2(Cr)、5(Cu、Ni、Pb)、1(Zn); RI 为多种重金属潜在生态危害指数, 分级标准详见表 1。

③沉积物污染指数法(Sediment Pollution Index, SPI): 综合多种重金属实验室测定值定量污染指数来评价沉积物重金属生态风险(翟婉盈等, 2017), 计算公式见式(5)。

$$SPI = \frac{\sum \left( \frac{C_n}{B_n} \times T_f \right)}{\sum T_f} \quad (5)$$

式中  $C_n$  为第  $n$  种重金属实际测定值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $B_n$  为第  $n$  种重金属对应区域背景值 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ );  $T_f$  表示生态风险毒性系数, 本研究各重金属生态毒性系数

取值分别为 300(Cd)、2(Cr、Ni)、5(Cu、Pb)、1(Zn)(王旭等 2017)。

2.4.2 有机污染指数和有机氮指数 有机污染指数(Organic Pollution Index, OPI) 常用来评价水域沉积物的环境状况, 有机氮指数(Organic Nitrogen Index, ONI) 是衡量湖泊表层沉积物是否遭受 N 污染的关键指标(Zhang *et al.* 2017), 计算公式如下所示:

$$OPI = [\text{TOC}] \times [\text{ON}] \quad (6)$$

$$[\text{TOC}] = [\text{OM}] / 1.724 \quad (7)$$

$$\text{ONI} = [\text{TOC}] \times 0.95 \quad (8)$$

## 2.5 急性生物毒性

本文采用青海弧菌 Q67 (*Vibrio qinghaiensis*, CS235, 滨松光子医疗科技有限公司) 发光抑制率来表征白洋淀中村周边水域沉积物的生物毒性, 这是因为发光细菌发光持续、稳定, 对有毒物质较敏感。将 1 g 沉积物干样加入到 5 mL 超纯水中, 振摇 72 h, 3000  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$  下离心 30 min, 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤备用。待测样品: 将过滤后的水样与渗透压调节液以体积比 19:1 混合, 配置成待测样品, 蒸馏水作为对照样。

测试方法: 取青海弧菌 Q67 冻干粉置于室温 (20  $^{\circ}\text{C}$  左右) 平衡 15 min, 取 1 mL 复苏稀释液加入平衡后的青海弧菌 Q67 冻干粉试剂瓶中; 溶解后的冻干粉溶液置于室温下 10 min 后用于测定样品; 取待测样品 180  $\mu\text{L}$  加入到干净的测试管中, 向各测试管中依次加入冻干粉溶液, 轻轻振荡 5 min, 使之充分混匀, 放置 15 min 后测定发光值, 同时进行 6 个平行样的测定, 生物毒性分级标准详见表 2。

表 1 评价方法分级标准

Table 1 Classification standard of evaluation method

潜在生态危害指数法				有机指数法				生态风险等级法	
潜在生态危害指数		综合潜在生态危害指数		沉积物有机指数评价标准		沉积物有机氮评价标准		生态风险等级法	
阈值区间	风险因子等级	阈值区间	风险指数等级	阈值区间	污染等级	阈值区间	污染等级	阈值区间	风险等级
$E_i < 40$	轻微风险	$RI < 150$	低	$OPI < 0.05$	清洁	$ONI < 0.033$	清洁	$SPI < 2$	自然
$40 \leq E_i < 80$	中等风险	$150 \leq RI < 300$	中	$0.05 \leq OPI < 0.20$	较清洁	$0.033 \leq ONI < 0.066$	较清洁	$2 < SPI < 5$	低风险
$80 \leq E_i < 160$	较强风险	$300 \leq RI < 600$	高	$0.20 \leq OPI < 0.50$	尚清洁	$0.066 \leq ONI < 0.133$	尚清洁	$5 < SPI < 10$	中度风险
$160 \leq E_i < 320$	强风险	$RI \geq 600$	极高	$OPI \geq 0.50$	有机污染	$ONI \geq 0.133$	有机污染	$10 < SPI < 20$	高风险
$E_i \geq 320$	极强风险							$SPI > 20$	危险

表 2 生物毒性分级标准

Table 2 Classification standard of biological toxicity

毒性等级	抑光率	生物等级
I	<10%	无毒
II	10% ~ 30%	低等毒性
III	30% ~ 50%	中等毒性
IV	50% ~ 80%	高等毒性
V	>80%	极高毒性

## 3 结果与讨论(Results and discussion)

### 3.1 沉积物营养盐分布

白洋淀中村周边水域中水道沉积物 N、P、S、OM 等营养盐含量较高, 其次为沟壕水域, 大田庄水域沉积物的主要营养物质含量高于其它 4 个村庄,

TN、TP、TS 和 OM 含量的最大值分别达到 8300.00、5824.00、9160.00  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 20.81% ( $p<0.05$ )。不同水域类型中,水道沉积物的 TN ( $2156.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、TP ( $984.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、TS ( $3973.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 含量均值均高于其它水域。水道直通村落内部,更易受村落污染影响,同时,水道以放射形态将村落中的污染物汇入周围淀泊,从而直接影响周围淀泊水质。沟壕水域沉积物的 OM 含量较高,研究发现,白洋淀沉积物中有机质以类蛋白和类腐殖酸为主,沟壕中大量

的芦苇衰亡腐解产生腐殖质、木质素等,使沟壕中的 OM 含量增加(王青等 2013; 胡晓明等 2019)。如表 4 所示,白洋淀淀中村沉积物 N、P 含量均值均高于鄱阳湖、洞庭湖、太湖沉积物。与朱曜曜等(Zhu *et al.* 2019)的研究相比,白洋淀淀中村周边水域沉积物的 TN 含量为  $400.00\sim 8300.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,淀泊中沉积物 TN 含量为  $445.00\sim 3499.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,淀中村水域沉积物 TN 含量最大值为淀泊沉积物的 2.37 倍,说明淀中村区域污染强度更大。

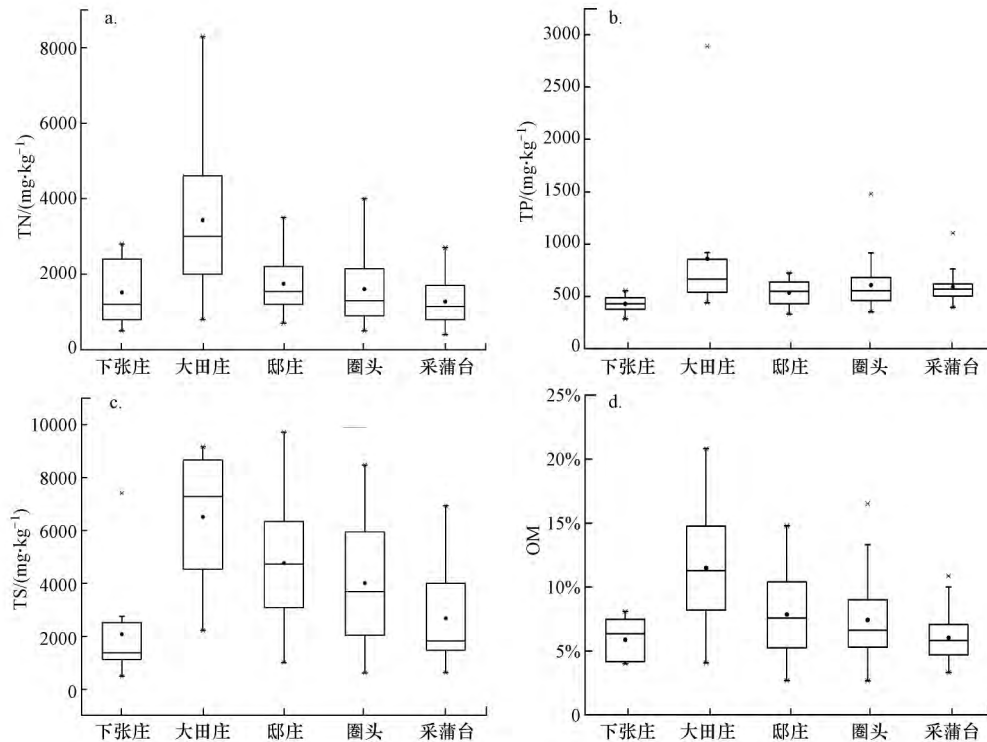


图 2 白洋淀淀中村沉积物 N (a)、P (b)、S (c) 和 OM (d) 总量分布

Fig.2 Spatial distribution of N (a), P (b), S (c) and OM (d) content in sediments around the villages in Baiyangdian Lake

白洋淀淀中村周边水域沉积物 TN 和 TP 含量均值排序为水道>沟壕>开阔水面。淀中村居民生活污水排放直接影响村落周边淀泊水域氮、磷元素的污染水平,受村落污染最严重的是水道。沟壕水域流动性较差,容易造成污染物质的累积,导致水体污染物在沉积物中蓄积(鲁成秀, 2016)。根据 C/N 可分析沉积物中有机物的来源:有纤维素植物碎屑的  $C/N>20$ ,无纤维素植物的  $C/N$  为  $4\sim 12$ ,浮游动物的  $C/N<7$ ,浮游植物的  $C/N$  为  $6\sim 14$ ,藻类的  $C/N$  为  $4\sim 10$ (黄廷林等 2016)。白洋淀淀中村开阔水域、塘、沟壕和水道的 C/N 分别为  $12.5\sim 35.99$ 、 $9.42\sim 32.69$ 、 $10.77\sim 35.44$  和  $11.29\sim 25.40$ ,多以纤维素植物碎屑和浮游植物为有机质的主要来源。对比太湖

沉积物 C/N ( $5.7\sim 14.2$ ) (甘树等 2012) 和巢湖沉积物 C/N ( $7.28\sim 9.95$ ) (何延召等 2016) 可知,白洋淀底泥污染受水生植物影响较大。白洋淀水生维管束植物的覆盖度达  $30\%\sim 40\%$ ,随季节变化植物衰亡腐化未能及时分解氧化形成碎屑进入水体沉积下来,导致水域沉积物的 C/N 增加(易雨君等 2020)。

淀中村周边水域沉积物有机污染较为严重,有机污染指数均值达到 0.859。沉积物有机指数结果表明(表 3),下张庄、大田庄、邸庄和圈头的有机指数处于 IV 等级。大田庄有机指数和有机氮污染最为严重,大田庄东接石侯淀,淀与淀相连,导致村落产生的污染物排入淀中,使淀泊生态系统受到污染。水道、沟壕和塘均为有机氮和有机指数污染类型,开

阔水面为尚清洁类型. 由于生活污水中氮含量较高, 淀中村水域污染严重. 大量生活污水经过雨水冲刷或者直接排入淀中, 造

表 3 沉积物中有机氮指数、有机指数统计特征

Table 2 Statistical characteristics of organic nitrogen index and organic pollution index in sediment

村庄	有机氮指数					有机指数				
	最大值	最小值	平均值	等级	类型	最大值	最小值	平均值	等级	类型
下张庄	0.266%	0.048%	0.144%	IV	有机氮污染	1.248	0.112	0.553	IV	有机污染
大田庄	0.789%	0.076%	0.326%	IV	有机氮污染	9.518	0.179	2.643	IV	有机污染
邸庄	0.333%	0.067%	0.166%	IV	有机氮污染	2.203	0.104	0.868	IV	有机污染
圈头	0.380%	0.048%	0.152%	IV	有机氮污染	3.641	0.088	0.810	IV	有机污染
采蒲台	0.257%	0.038%	0.121%	IV	有机氮污染	1.617	0.075	0.473	III	尚清洁
总计	0.789%	0.038%	0.160%	IV	有机氮污染	9.518	0.075	0.859	IV	有机污染

### 3.2 重金属含量及其分布

白洋淀淀中村不同水域沉积物中重金属含量存在差异, 分别有 89.90%、67.89% 和 56.88% 的点位中 Cd、Cu 和 Zn 含量超过土壤背景值 (CNEMC,

1990). 如图 3 所示, 淀中村沉积物重金属总量分布为  $Zn(119.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > Cr(55.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > Cu(35.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > Ni(28.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > Pb(19.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > Cd(0.177 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ . Cd 含量均值是土壤

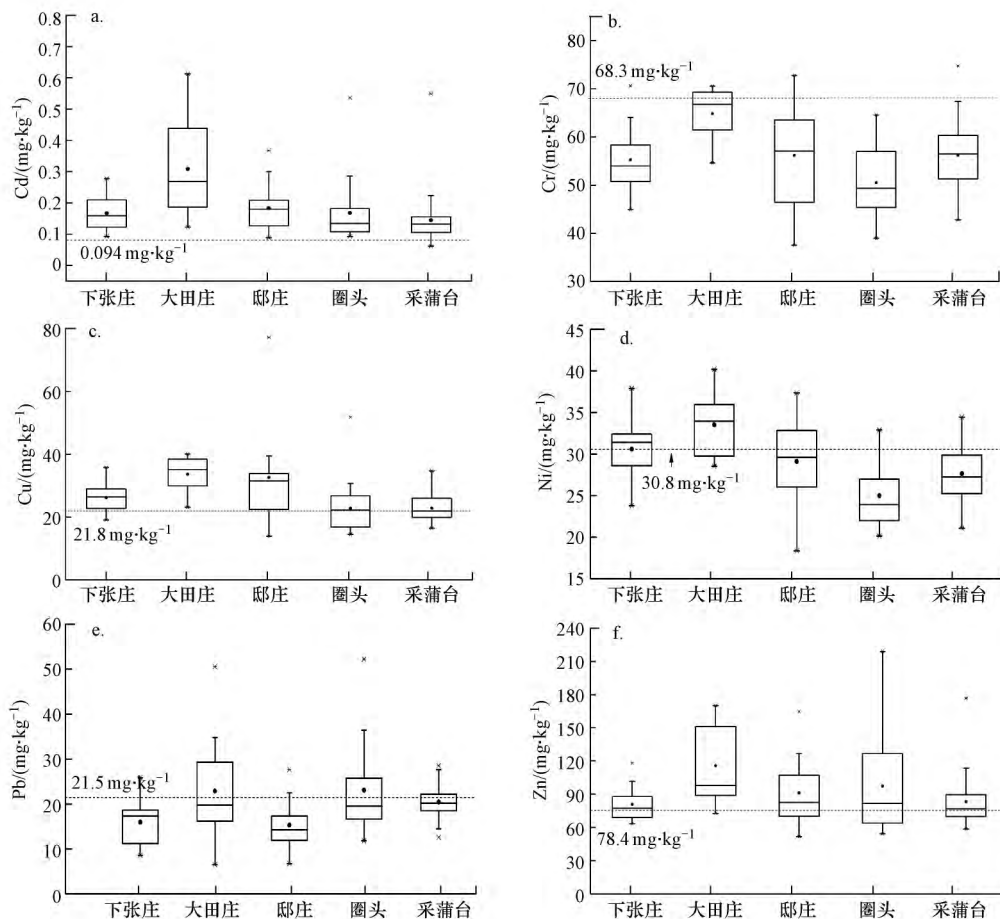


图 3 白洋淀淀中村沉积物重金属 Cd (a)、Cr (b)、Cu (c)、Ni (d)、Pb (e)、Zn (f) 含量分布

Fig.3 Spatial distribution of heavy metals Cd (a), Cr (b), Cu (c), Ni (d), Pb (e) and Zn (f) content in sediments around the village in Baiyangdian Lake

背景值的 1.88 倍,大田庄水域沉积物的 Cd 含量差异较大,最大值位于水道,达到  $0.61 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Cu、Zn 含量均值分别是背景值 1.63、1.53 倍; Cr、Ni、Pb 含量均值未超过白洋淀区域的背景值. 水道沉积物的重金属含量较高, Cd、Cu、Pb、Zn 均存在富集情况, 并且水道水域的 Pb 含量超出土壤背景值 ( $21.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). 综上所述, 本研究结果与 Ji 等 (2019) 关于淀泊重金属污染特征的研究结果基本一致.

白洋淀沉积物重金属含量与鄱阳湖、洞庭湖、

太湖、巢湖沉积物重金属含量的比较结果见表 4, 淀中村的重金属含量处于较低水平. 除 Cu 以外, 洞庭湖、太湖和巢湖沉积物中 5 种重金属平均含量均超过白洋淀淀中村沉积物重金属平均含量. 对比淀中村和淀泊水域, 淀中村部分点位沉积物中 Cu 和 Zn 含量显著高于淀泊沉积物, 而 Cd、Cr、Ni 和 Pb 含量相似. 根据历史资料, 大田庄等村落曾有无纺织、制鞋等小型作坊, 排放污水中含有 Cd、Cu、Zn 等, 从而造成沉积物中重金属的蓄积(刘婷, 2015; 陈雅丽等, 2019).

表 4 白洋淀淀中村沉积物与代表性湖泊沉积物中重金属、营养元素的含量

Table 4 Content of heavy metals and nutrient elements in the sediment around the villages in Baiyangdian Lake, as well as representative lakes in China

研究区	重金属元素/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )						文献来源	营养元素/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )		文献来源
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn		N	P	
白洋淀	0.06~	37.54~	13.90~	18.36~	6.51~	51.49~	本研究	400.00~	283.45~	本研究
	0.61 <sup>a</sup>	74.73	817.86	40.20	52.22	2346.68		8300.00	5823.93	
	0.18 <sup>b</sup>	55.77	35.52	28.25	19.99	119.74		1687.16	642.91	
白洋淀	0.10~	56.59~	17.34~	23.18~	14.62~	53.99~	Jwa et al. 2020	445.00~	-	Zhu et al. 2019
	0.83 <sup>a</sup>	79.20	42.46	44.00	28.56	118.95		3499.00	-	
	0.27 <sup>b</sup>	68.87	28.73	33.04	20.81	80.91		1809.00	-	
鄱阳湖	0.62	42.10	39.22	24.90	46.10	119.30	匡荅芬等 2020	1340.00	460.00	王圣瑞等 2012
洞庭湖	1.26	102.95	30.57	-	37.10	95.87	高吉权等 2019	1046.00	368.85	刘俊 2019
太湖	0.479	102.46	44.71	45.50	37.00	163.62	张杰等 2019	1349.00	486.00	杨洋等 2014
巢湖	0.419	168.24	27.67	35.54	56.00	142.04	夏建东等 2020	2208.17	704.59	李振涵等 2018
背景值	0.094	68.30	21.80	30.80	21.50	78.40	CNEMC 1990	-	-	-

注: a. 数据范围; b. 平均值.

### 3.3 重金属富集系数分析

白洋淀淀中村沉积物重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 富集系数 (EF) 均值分别为 1.65、0.73、1.39、0.83、0.82、1.31, 下张庄 (XZZ)、大田庄 (DTZ)、邱庄 (DZ)、圈头 (QT) 和采蒲台 (CPT) 分别有 81%、97%、60%、38% 和 22% 的点位存在重金属富集现象. 选取重金属 EF 值高于 1.5 的点位进行分析 (图 4), 发现 Cd 的 EF 值最高达到 3.41, 大部分点位 EF 值超出 1.5, 说明 Cd 主要以人为源为主. Cr、Ni、Pb 和 Zn 的 EF 均值未超过 1.5, 富集程度较低, 说明主要来源为土壤和岩石圈自然风化过程. 大田庄水道沉积物部分点位富集程度较为严重, Cu、Zn 和 Cd 的 EF 值分别达到 26.92、21.48 和 4.68. Cd 在水道 (EF 值为 2.08) 和沟壕 (EF 值为 1.74) 沉积物中均存在富集现象, Cu 和 Zn 在水道沉积物的 EF 值分别为 2.59 和 2.54, 表明水道沉积物受人为影响较重.

### 3.4 沉积物重金属污染风险评价

**3.4.1 重金属潜在生态危害指数** 潜在生态危害指数结果表明, 淀中村水域沉积物重金属风险总体呈较低风险 ( $RI = 76.87 < 150$ ), 但部分点位沉积物受重金属 Cd 影响呈中等-高等风险. 重金属潜在生态危害指数 ( $E_i^p$ ) 均值顺序为: Cd ( $56.33$ ) > Cu ( $8.14$ ) > Pb ( $4.64$ ) > Ni ( $4.58$ ) > Cr ( $1.63$ ) > Zn ( $1.52$ ). 如图 5 所示, 沉积物中 Cd 处于中等污染-较强污染之间, 其它所分析的重金属呈轻微污染. 大田庄沟壕和水道区域  $E_i^p$  (Cd) 均值分别为 101.20 和 125.41, 且水道和沟壕部分水域 Cd 达到较强风险. 如图 6a 所示, 重金属 RI 均值排序为水道 ( $109.84$ ) > 沟壕 ( $83.37$ ) > 塘 ( $62.31$ ) > 开阔水面 ( $59.31$ ). 水道沉积物重金属 RI 值显著高于其它水域, 生态风险较高. 大田庄部分点位沉积物中重金属潜在生态风险较大, 水道点位 RI 最大值达到 433.35, 重金属风险达到较高风险水平.



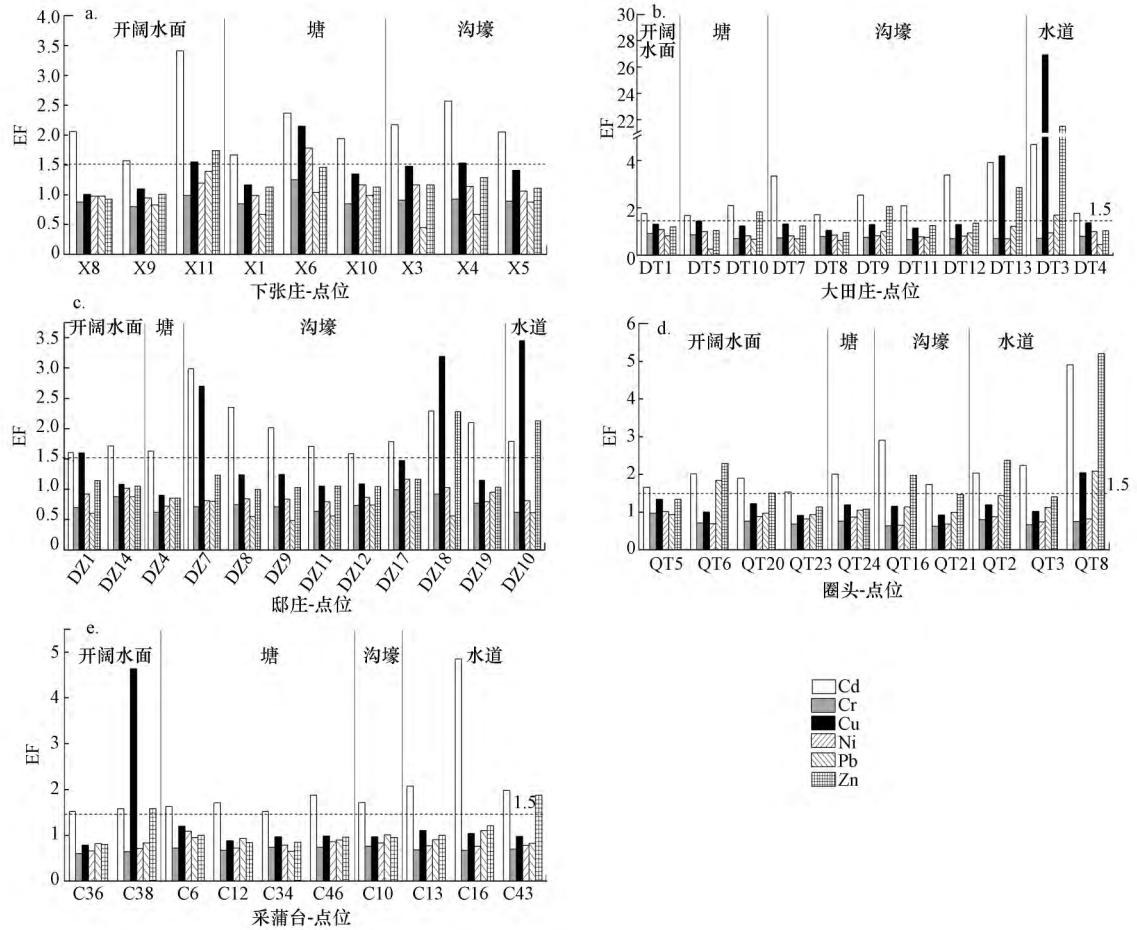
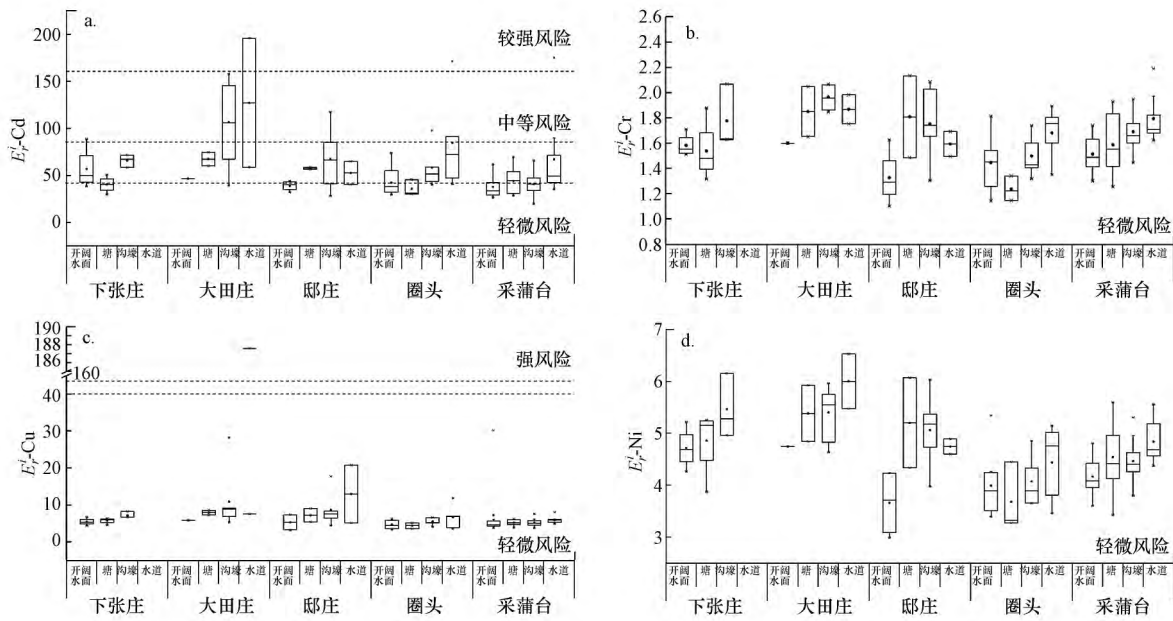


图 4 下张庄(a)、大田庄(b)、邱庄(c)、圈头(d)和采蒲台(e)沉积物重金属富集系数

Fig.4 Enrichment factor of heavy metals in sediment around the XZZ (a) ,DTZ (b) ,DZ (c) ,QT (d) and CPT (e)





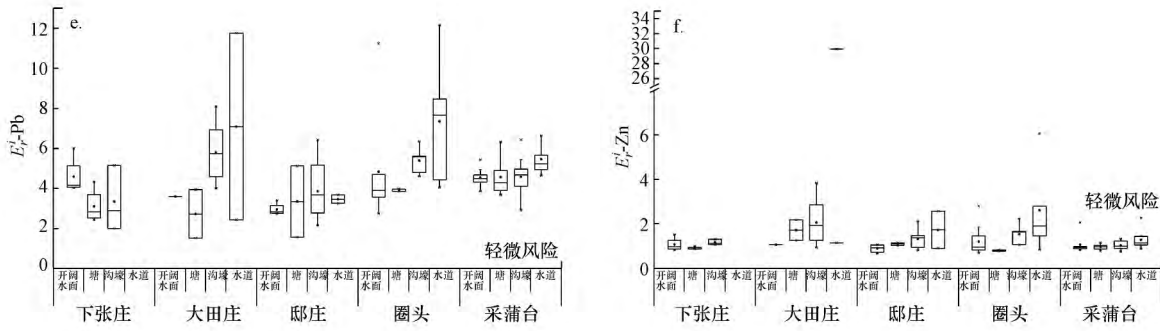


图5 Cd (a) 、Cr( b) 、Cu( c) 、Ni( d) 、Pb( e) 、Zn( f) 沉积物单项潜在生态危害指数

Fig.5 Individual potential ecological risk index of Cd( a) ,Cr( b) ,Cu( c) ,Ni( d) ,Pb( e) and Zn( f) in sediment

3.4.2 重金属污染指数 白洋淀淀中村表层沉积物污染指数 ( SPI) 均值为大田庄 ( 3.24 ) > 邸庄 ( 1.90 ) > 圈头 ( 1.75 ) > 下张庄 ( 1.73 ) > 采蒲台 ( 1.51 ) . 根据重金属污染指数分析 , 村落水域沉积物重金属大多处于自然和低风险级别 , 污染程度较低. 如图 6b 所示 , 水道 DT3 ( SPI = 6.95 ) 、沟壕 DT13 ( SPI =

5.14 ) 、水道 QT8 ( SPI = 5.54 ) 和 C16 ( SPI = 5.617 ) 均处在中风险级别 , 大田庄沉积物污染指数相对较高. 沉积物整体 ( 以均值表示 ) 风险指数相对应等级为低风险级别 ( SPI = 1.85 < 5 ) , 说明重金属污染程度尚不严重 , 整体污染水平不高.

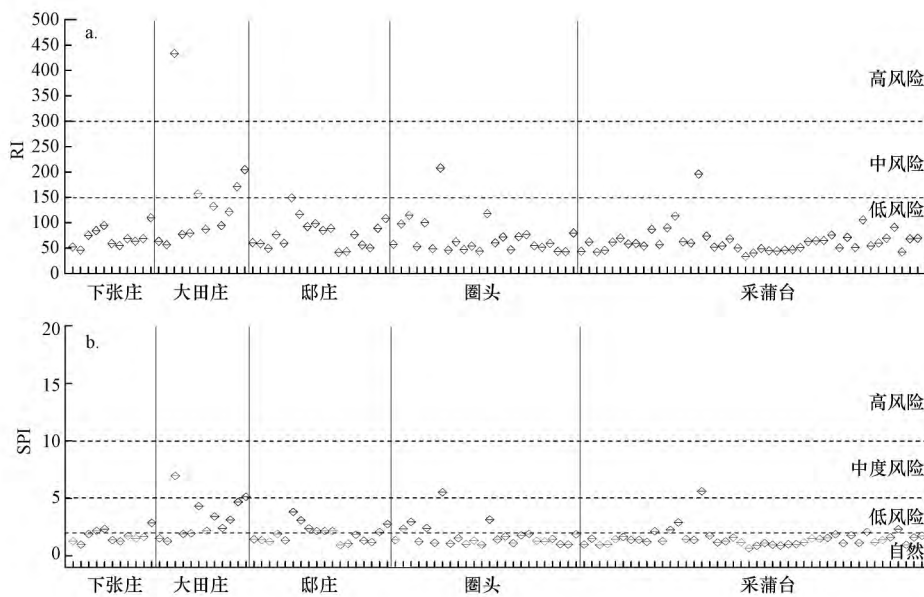


图6 沉积物潜在生态危害指数( a) 和沉积物污染指数( b)

Fig.6 Potential ecological risk index( a) and sediment pollution index( b) of heavy metals in sediments

3.5 沉积物急性生物毒性

白洋淀淀中村水域沉积物的生物毒性抑光率最高值可达 76% , 平均值为 23% , 共有 10 个点位达到高等毒性 , 主要位于邸庄周边沟壕水域. 宋力等 ( 2014 ) 研究发现 , 沉积物生物毒性受生活污水影响明显 , 易受村落污水影响的水道中点位 DZ16、DT3 沉积物属于高等毒性. 此外 , 邸庄沟壕点位 DZ13、

DZ17、DZ18 和 DZ19 的沉积物发光抑制率达到 67% ~ 76% , 呈现高等生物毒性. 沟壕水域四周有芦苇台田环绕 , 水体流动性较差 , 污染物进入水体后易沉积 , 导致沉积物生物毒性高. 淀中村周边部分水域组成成分复杂 , 生物毒性高的沉积物直接影响底栖生境的恢复和淀泊水生态健康安全 , 该区域在白洋淀内源综合治理中应当予以重点关注.

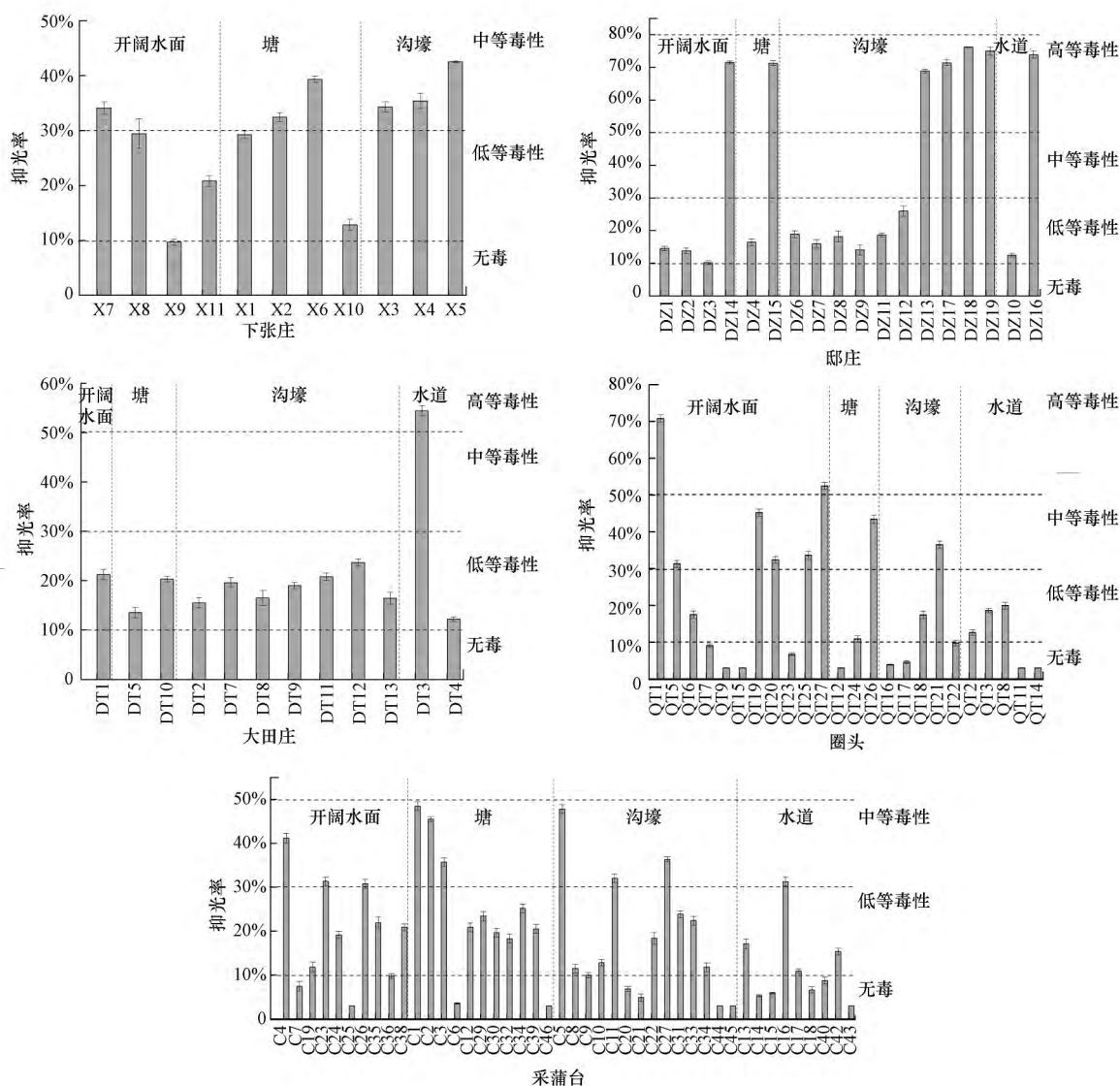


图7 白洋淀淀中村水域沉积物急性生物毒性

Fig.7 Acute bitoxicity of sediments around the village in Baiyangdian Lake

### 3.6 多元统计分析

**3.6.1 相关性分析** 利用 Pearson 相关系数对 6 种重金属、营养元素和急性生物毒性之间的相关性进行分析,衡量变量因素之间的相关程度(表 5)。自然界中,Fe 元素受到人为活动的影响较小且分布广泛,通常为自然源。在  $p < 0.01$  显著性水平上,Fe 分别与 Cr( $r = 0.774$ )、Ni( $r = 0.554$ ) 呈显著正相关,因此, Cr 和 Ni 主要来源为自然源; Cu、Zn 和 P 具有显著相关性, Cd 与 OM 亦具有显著相关性。营养元素与重金属元素之间存在“同源性”,可能是由于相关工业生产、居民生活过程产生的污染物集中排放导致。

生物毒性与重金属、N、P 无显著相关性,说明重金属总量可能不是导致淀中村沉积物生物毒性的主要原因。如图 7 所示,处于高等毒性的点位重金属含量基本低于背景值,如点位 DZ13 的重金属 Cd( $0.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、Cr( $44.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、Cu( $19.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、Ni( $24.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、Pb( $11.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、Zn( $70.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 含量均低于背景值。已有研究表明,白洋淀表层沉积物所含 OCPs 组分中的  $\gamma$ -HCH 生态风险较高(许妍等,2020),沉积物及孔隙水中都有 PPCPs 等化合物检出(张盼伟,2018),沉积物中污染物组成的复杂性可能会造成生物毒性较高。

表5 白洋淀5个淀中村沉积物重金属、营养元素和Q67发光抑制率的相关系数

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Fe	Al	P	N	S	OM	Q67
Cd	1.000												
Cr	0.471**	1.000											
Cu	0.512**	0.207*	1.000										
Ni	0.505**	0.865**	0.327**	1.000									
Pb	0.652**	0.360**	0.428**	0.257**	1.000								
Zn	0.569**	0.214*	0.976**	0.314**	0.538**	1.000							
Fe	0.380	0.744**	0.181	0.554**	0.477**	0.188	1.000						
Al	-0.200*	0.249**	-0.080	0.122	-0.130	-0.124	0.331**	1.000					
P	0.666**	0.273**	0.920**	0.289**	0.606**	0.933**	0.301**	-0.125	1.000				
N	0.153	0.122	0.076	0.122	0.506**	0.109	0.409**	-0.155	0.156	1.000			
S	0.666**	0.273**	0.920**	0.289**	0.606**	0.933**	0.301**	-0.125	1.000**	0.156	1.000		
OM	0.798**	0.483**	0.473**	0.532**	0.545**	0.526**	0.464**	-0.129	0.581**	0.075	0.581**	1.000	
Q67	0.027	-0.005	0.157	0.067	-0.116	-0.138	-0.238*	-0.174	0.078	-0.124	0.078	-0.013	1.000

注: \*\*表示在0.01级别(双尾)相关性显著,\*表示在0.05级别(双尾)相关性显著.

**3.6.2 主成分分析** 从主成分分析中可以获取有关污染源信息的因素组合,利用降维法把多个变量由高维简化为低维(夏建东等,2020),从而体现主成分分析对沉积物表征的作用.本研究主成分分析提取3个主成分,第1主成分以Cd、Cu、Pb、Zn、TN、TP、TS、OM为主,解释了49.36%的总方差,第2主成分以Fe、Cr、Ni为主,解释了18.59%的总方差,第3主成分以Al为主,解释了11.06%的总方差,累计方差贡献率为87.61%.指标元素距中心越远,证明与主成分之间的相关系数越大(王蒙蒙,2020).通过图8可直观看出各个指标间的关系,Fe、Cr、Ni聚成一团,说明Cr和Ni主要来源为自然源.Cd、Cu、Pb、Zn、TN、TP、TS、OM聚成一团,距中心较远,说明其团体内部关系密切.

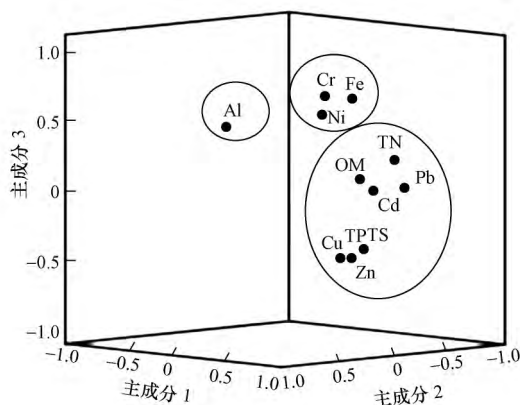


图8 白洋淀沉积物指标主成分分析

Fig.8 Principal component analysis for sediment parameters in Baiyangdian Lake

## 4 结论(Conclusions)

1) 白洋淀淀中村沉积物营养元素在空间分布上呈现差异性,村落水道和沟壕沉积中氮、磷含量较高,大田庄水域沉积物中C、N、P含量高于其它淀中村.基于有机污染指数和有机氮指数,发现淀中村水域沉积物呈现较高的有机氮和有机污染.

2) 白洋淀淀中村沉积物重金属整体污染水平和风险较低,大田庄水域部分点位重金属呈现中等-高等风险.Cr、Ni、Pb含量均值低于背景值,但Cd出现明显富集.结合富集系数(EF)、主成分分析和相关分析结果得出,重金属Cr、Pb和Ni的来源可能以自然源为主,Cd、Cu、Zn可能存在人为源输入.

3) 白洋淀淀中村沉积物总体呈现中等生物毒性,沉积物急性生物毒性排序为邱庄>下张庄>大田庄>圈头>采蒲台.高毒性的点位主要位于邱庄沟壕水域,其它村落水域沉积物毒性以中-低毒性为主.淀中村周边水域沉积物会为白洋淀淀泊带来潜在风险,影响白洋淀水生生态健康.

### 参考文献(References):

- Almeida L C, Jucelino Balbino da S J, Santos I F D, et al. 2020. Assessment of toxicity of metals in river sediments for human supply: Distribution, evaluation of pollution and sources identification[J]. Marine Pollution Bulletin, 158: 111423
- 陈雅丽,翁莉萍,马杰,等.2019.近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J].农业环境科学学报,38(10):2219-2238
- 甘树,卢少勇,秦普丰,等.2012.太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价[J].环境科学,33(9):3064-3069

- 高吉权,朱姗姗,刘鹏飞.2019.洞庭湖底泥沉积物重金属分布与生态风险评价[J].云南大学学报(自然科学版) 41(4): 851-859
- 高彦春,王金凤,封志明.2017.白洋淀流域气温、降水和径流变化特征及其相互响应关系[J].中国生态农业学报 25(4): 467-477
- 辜凌云,全向春,杨志峰.2012.基于二级模糊综合评价的白洋淀淀中村生活污水治理技术决策方法[J].环境工程学报,6(4): 1161-1166
- 郭杰,王珂,段辛斌,等.2020.长江中游航道整治工程区沉积物及有机质变化[J].水生态学杂志 41(1): 53-59
- 何延召,柯凡,冯慕华,等.2016.巢湖表层沉积物中生物易降解物质成分特征与分布规律[J].湖泊科学 28(1): 40-49
- 黄廷林,刘飞,史建超.2016.水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价[J].环境科学 37(1): 166-172
- 胡晓明,崔骏,裴元生.2019.秋冬交替季节白洋淀沉积物有机质特性研究[J].环境科学研究 32(4): 636-646
- Ji Z, Zhang H, Zhang Y, et al. 2019. Distribution, ecological risk and source identification of heavy metals in sediments from the Baiyangdian Lake, Northern China [J]. Chemosphere 237: 124425
- Jwa B, Xz A, Dx B et al. 2020. Chemical fractions, diffusion flux and risk assessment of potentially toxic elements in sediments of Baiyangdian Lake, China [J]. Science of the Total Environment, 724, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138046
- 鞠昌华,张卫东,朱琳,等.2016.我国农村生活污水治理问题及对策研究[J].环境保护 44(6): 49-52
- 匡荟芬,胡春华,吴根林,等.2020.结合主成分分析法(PCA)和正定矩阵因子分解法(PMF)的鄱阳湖丰水期表层沉积物重金属源解析[J].湖泊科学 32(4): 964-976
- Li F, Huang J, Zeng G, et al. 2013. Spatial risk assessment and sources identification of heavy metals in surface sediments from the Dongting Lake, Middle China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 132: 75-83
- 李琳琳,王国清,秦攀,等.2019.白洋淀水环境状况与治理保护对策[J].科技导报 37(21): 14-25
- 刘俊.2019.洞庭湖沉积物营养盐和重金属污染特征及评价研究[D].湘潭:湘潭大学
- 李振涵,张文强,雷沛,等.2018.巢湖西部河口区沉积物氮磷分布特征与原位扩散通量估算[J].环境科学学报 38(8): 2974-2982
- 鲁成秀.2016.富营养化湖泊沉积物—水界面重金属释放的生物化学过程研究[D].济南:山东师范大学
- 刘婷.2015.ICP-AES法测定纺织染整助剂中8种重金属元素[D].杭州:浙江大学
- Peng H, Chen Y L, Weng L P, et al. 2019. Comparisons of heavy metal input inventory in agricultural soils in North and South China: A review [J]. Science of the Total Environment 660: 776-786
- 宋力,蒋桂芳,黄民生,等.2014.温瑞塘河沉积物的生物毒性表征研究[J].中国环境科学 34(9): 2374-2379
- Wang J Z, Liu Z, Wei H, et al. 2020. Spatial characteristics, risk assessment, and source analysis of elements in surface sediments from the Baiyangdian Lake [J]. Environmental Science, 41(1): 224-231
- 王蒙蒙.2020.陆浑水库沉积物重金属分布特征及赋存形态研究[D].郑州:华北水利水电大学
- 王青,袁勇,李传哲,等.2013.白洋淀湿地土壤氮素空间分布特征研究[J].环境保护科学 39(4): 1-6
- 王圣瑞,倪栋,焦立新,等.2012.鄱阳湖表层沉积物有机质和营养盐分布特征[J].环境工程技术学报 2(1): 23-28
- 王旭,单保庆,郭伊苻,等.2017.滦河干流表层沉积物中营养元素和重金属含量分布特征及其风险评价[J].环境工程学报,11(10): 5429-5439
- 许妍,陈佳枫,徐磊,等.2020.白洋淀表层沉积物中有机氯农药和全多氯联苯的分布特征及风险评估[J].湖泊科学 32(3): 654-664
- 夏建东,龙锦云,高亚萍,等.2020.巢湖沉积物重金属污染生态风险评估及来源解析[J].地球与环境 48(2): 220-227
- 杨洋,刘其根,胡忠军,等.2014.太湖流域沉积物碳氮磷分布与污染评价[J].环境科学学报 34(12): 3057-3064
- 易雨君,林楚翘,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
- 翟婉盈,欧阳雪姣,周伟,等.2017.长江干流近岸沉积物重金属的空间分布及风险评估[J].环境科学学报 37(11): 4195-4201
- 张杰,郭西亚,曾野,等.2019.太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J].环境科学 40(5): 2202-2210
- 张盼伟.2018.海河流域典型水体中PPCPs的环境行为及潜在风险研究[D].北京:中国水利水电科学研究院
- Zhang W, Jin X, Liu D et al. 2017. Assessment of the sediment quality of freshwater ecosystems in eastern China based on spatial and temporal variation of nutrients [J]. Environmental Science and Pollution Research, 24(23): 19412-19421
- 中国环境监测总站.1990.中国土壤环境背景[M].中国环境科学出版社.
- Zhu Y Y, Jin X, Tang W Z et al. 2019. Comprehensive analysis of nitrogen distributions and ammonia nitrogen release fluxes in the sediments of Baiyangdian Lake, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 76: 319-328