

武汉乌金港底泥重金属和磷污染特征及清淤深度的确定

杨 俊, 王祖辉, 李 昂, 胡 泊

(中交第二公路勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要: 【目的】武汉经济开发区(汉南区)26个重点湖泊中水质劣于Ⅳ类标准的湖泊有16个。研究武汉乌金港底泥中重金属和磷的污染特性, 分析确定合适的清淤深度, 对该区域类似的小微水体污染防治及环保清淤具有重要意义。【方法】以乌金港为例, 通过2组实验分析乌金港底泥重金属和磷的污染特性: ①对乌金港3个点位0~60 cm深度的底泥进行分层采样, 分析6种重金属(铜、汞、砷、铅、镉、镍)的分布规律, 采用地累积指数和潜在生态风险指数法对底泥重金属污染特征及风险进行分析评价。②采用综合污染指数法对3个点位污染层(0~15 cm)、过渡层(15~30 cm)和正常层(30~50 cm)底泥中磷质量分数进行分析评价, 并通过解析实验分析底泥中可溶性活性磷与总磷的释放规律。【结果】乌金港底泥重金属污染特性: 重金属质量分数随着深度的增加呈下降趋势, 40~50 cm重金属质量分数趋于稳定, 50 cm深度以下重金属质量分数接近土壤背景值或土壤环境质量二级标准; 地累积指数(I_{geo})分析可知: 重金属污染程度大多处于轻度-中度污染, 潜在生态风险指数值均小于40, 风险较低。乌金港底泥中磷的污染特性: 污染层、过渡层、正常层总磷质量分数呈现显著的递减规律; 污染层和过渡层释放的可溶性活性磷质量浓度与总磷质量分数高于原上覆水, 正常层不论是短期还是长期释放的可溶性活性磷与总磷均最低。【结论】乌金港底泥中的污染主要集中在污染层和过渡层, 铜和铅是主要的生态风险因子, 但处于低生态风险。为了更好地清除内源污染, 综合分析底泥重金属和磷的污染特性, 确定小微水体乌金港最优清淤深度为40 cm。图3表6参14

关键词: 重金属; 磷; 污染特性; 清淤深度; 地累积指数; 潜在生态风险

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2022)03-0653-09

Heavy metal and phosphorus pollution characteristics and dredging depth in sediment of Wujin Port, Wuhan

YANG Jun, WANG Zuhui, LI Ang, HU Bo

(CCCC Second Highway Consultants Co. Ltd., Wuhan 430056, Hubei, China)

Abstract: [Objective] 16 out of 26 key lakes in Wuhan Economic Development Zone (Hannan District) have water quality worse than Class IV standard. The purpose is to study the pollution characteristics of 6 heavy metals and phosphorus in the sediment, analyze and determine the appropriate dredging depth, which is of great significance to the prevention and control of similar small and micro water pollution and environmental dredging in this area. [Method] Taking Wujin Port as an example through 2 sets of experiments, the pollution characteristics of heavy metals and phosphorus in the sediment of Wujin Port were analyzed: (1) Stratified samples were taken from the sediment in the depths of 0–60 cm at 3 points, and the contents and the distribution pattern of 6 heavy metals (Cu, Hg, As, Pb, Cd and Ni) were analyzed. Geo-accumulation index and potential ecological risk index method were used to analyze and evaluate the pollution characteristics and risks of heavy metals in the sediment. (2) Comprehensive pollution index method was used to analyze and evaluate the phosphorus content in the sediment of polluted layer (0–15 cm), transition layer (15–30 cm) and normal layer

收稿日期: 2021-07-03; 修回日期: 2022-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51708431)

作者简介: 杨俊 (ORCID: 0000-0002-6660-0936), 高级工程师, 从事环境生态与景观设计等研究。E-mail: 723817565@qq.com

(30–50 cm) at 3 points, and the soluble active phosphorus (SRP) and total phosphorus (TP) in the sediment were analyzed through analytical experiments. [Result] With regard to the heavy metal pollution characteristics in the sediment, the contents of heavy metals decreased with the increase of depth, those in 40–50 cm tended to be stable, and those below 50 cm were close to the soil background value or the soil environmental quality Level II standard. Geoaccumulation index (I_{geo}) showed that the degree of heavy metal pollution was mostly mild to moderate, and the potential ecological risk index value was less than 40, so the risk was low. The pollution characteristics of phosphorus in the sediment showed that TP content in polluted layer, transition layer and normal layer displayed an obvious decreasing law. The concentration of SRP and TP released from polluted layer and transition layer was higher than that from the original overlying water. SRP and TP released from the normal layer in both short term and long term were the lowest. [Conclusion] The pollution in the sediment of Wujin Port is mainly concentrated in polluted layer and transition layer. Cu and Pb are the main ecological risk factors, but they are at low ecological risk. In order to better remove endogenous pollution, it is determined that the optimal dredging depth of the small and micro water body in Wujin Port is 40 cm, based on the comprehensive analysis of the pollution characteristics of heavy metals and phosphorus in the sediment. [Ch, 3 fig. 6 tab. 14 ref.]

Key words: heavy metal; phosphorus; pollution characteristics; dredging depth; geoaccumulation index; potential ecological risk

底泥作为湖泊水环境的重要组成部分,当堆积达到一定边界条件后,会将积累的污染物转移至悬浮颗粒释放到周围水体,从而对水环境造成污染。陈星等^[1]将湖泊底泥分为3个部分,自上而下依次为污染层、过渡层和正常湖泊沉积层。近几年,研究热点多集中于水污染评价、重金属沉积物污染等方面。底泥沉积物能从侧面较好地反映水体污染程度,探析湖泊水体底泥沉积物整体的污染特征,对揭示水环境污染及风险评价具有重要意义。环保清淤主要是挖走污染层和部分过渡层的沉积物。清淤深度与工程成本密切相关,环保清淤深度也是值得关注的问题。张奇等^[2]研究发现:若清淤深度控制不当,就会导致深层底泥的污染物释放进入上覆水体。有研究表明:打破原有湖水底泥磷溶解释放平衡,导致底泥向水体释放磷的速率成倍增加^[3],从而引起清淤后水体磷浓度高于清淤前浓度的现象。

2020年监测数据表明:武汉经济开发区(汉南区)26个重点湖泊中水质劣于Ⅳ类标准的湖泊有16个,水质达标的仅8个。部分水体仍有恶化趋势,氮、磷超标较突出,水体生态结构破坏,生态功能退化现象严重^[4]。申秋实等^[5]认为:随着城市发展和功能定位进一步提升,水污染形势愈发严峻,水污染防治工作任务将更加艰巨。本研究以武汉经济技术开发区小微水体乌金港为研究对象,通过2组实验对乌金港底泥中的重金属和磷的污染特性进行分析:其一是检测分析不同点位不同深度底泥中重金属污染分布特征,采用地累积指数和潜在生态风险指数法对底泥重金属污染特征及风险进行分析评价;其二是采用综合污染指数法对3个点位的污染层(0~15 cm)、过渡层(15~30 cm)和正常层(30~50 cm)底泥中磷质量分数进行分析评价,并通过底泥磷解析实验分析底泥中可溶性活性磷(SRP)与总磷(TP)的释放规律,综合分析底泥重金属和磷的污染特性,确定小微水体乌金港最佳清淤深度,以期为汉南区小微水体、湖泊流域污染控制和环保清淤等提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

乌金港位于武汉经济技术开发区通顺河水系周家墩汇水区,30°22′26.67″~30°22′17.99″N,114°5′38.40″~114°5′47.78″E,水域面积为38.09 hm²,最大水深约5.0 m,与虾子湖相邻,为典型的郊野型湖泊。该区年降水量为1100 mm。根据HJ/T 91—2002《地表水和污水监测技术规范》和生态环境部发布的《湖泊河流环保疏浚工程技术指南》,结合乌金港水域面积、垂线采样点数、布点网格大小等规范和指南要求,确

定 3 个采样点：1 号采样点 (30°22'37.18"N, 114°05'39.87"E)，2 号采样点 (30°22'27.38"N, 114°05'40.87"E)，3 号采样点 (30°22'17.58"N, 114°05'44.97"E)。

根据底泥受人为污染的感官程度和自然沉降的特点，将乌金港底泥由上而下划分为污染层 (0~15 cm)、过渡层 (15~30 cm) 和正常层 (30~50 cm) 3 个层次。污染层有臭味，呈黑-灰黑色，稀浆、流塑状；过渡层呈黑-灰色，软塑、密实；正常层呈黄色、灰黄色，密实。

1.2 样品收集与处理

本研究采样使用柱状沉积物采样器^[6]。根据 HJ/T 91—2002《地表水和污水监测技术规范》和《湖泊河流环保疏浚工程技术指南》，采集乌金港 3 个采样点垂直剖面的底泥样品，取 2 组柱状样。为确保实验结果的准确性，本研究采用平行实验方式，每个点位每种重金属分别测量 3 次，其中 2 次为平行样。分析底泥重金属和磷的污染特性。将所得的柱状底泥样品放入聚乙烯容器中，避免重力干扰。在送回实验室的运输过程中保证取样管密封，减少底泥与空气的接触。采集的所有样品均经过沉淀、自然空气干燥、残渣去除、研磨和筛分等预处理。

重金属质量分数测定根据 CJ/T 221—2005《电感耦合等离子体发射光谱法》以及 CJ/T 221—2005《原子荧光光谱法》的相关要求，参照杨盼等^[7]报道的方法：对 3 个采样点采集 0~60 cm 的底泥采用 10 cm 的间隔分层取样，准确称取等量样品置于坩埚中，利用微波酸化 ($\text{HNO}_3\text{-HCl-HF-HClO}_4$) 消解后，采用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 进行分析，最终得到所有样品中铜、汞、砷、铅、镉、镍质量分数。为了更加真实和系统性地模拟底泥磷释放的过程以及释放量，本研究将 3 个采样点的污染层 (0~15 cm)、过渡层 (15~30 cm) 和正常层 (30~50 cm) 分层取样，根据 GB 11893—1989《钼酸铵分光光度法》，定时对 SRP 和 TP 采用钼酸铵分光光度法，参照张占梅等^[8]的方法，在酸性条件下预处理后，加水稀释至标线，分别进行显色与测定。具体的流程如图 1 所示。

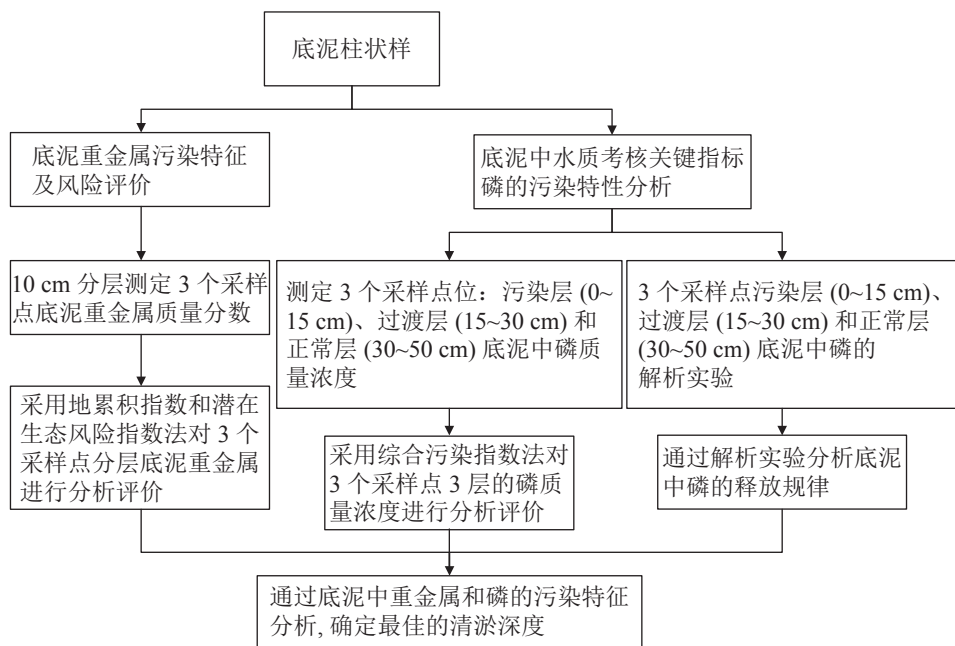


图 1 本研究的技术路线图

Figure 1 Technical route in the study

1.3 评价方法

1.3.1 地累积指数法 地累积指数 (I_{geo}) 综合了自然地质与人类活动对重金属污染的影响，是用于评价河流、海洋底泥中重金属污染程度的指标^[9]。 I_{geo} 不仅可以反映重金属的自然分布状态，还可以反映人类活动对重金属分布的影响。 I_{geo} 的计算公式为： $I_{\text{geo}} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5B_n} \right]$ 。其中： C_n 为样品中元素 n 的质量分数； B_n 为元素 n 的背景质量分数；1.5 为修正指数，通常用来表征沉积特征、岩石地质及其他影响。

武汉湖泊表层沉积物中重金属镉、锌、砷、铜、铅、铬、汞、镍的背景值分别为 0.200、79.000、14.300、32.200、34.500、88.000、0.075、35.000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。根据 I_{geo} ，重金属污染程度分为 7 个

等级(表1)。

1.3.2 潜在生态风险指数法 Hakanson 潜在生态风险指数法是一种国际认可的沉积物、土壤重金属元素潜在生态风险评价的标准方法,被广泛运用^[10-12],综合考虑了重金属元素的生态、环境和毒理效应。潜在生态风险指数(I_R)计算如下:

$$E_i = T_i C_i / C_{ir};$$

$$I_R = \sum_{i=1}^n E_i。$$

其中: E_i 是单因素潜在生态风险指数; I_R 为潜在生态风险指数; C_i 是重金属元素的质量浓度; C_{ir} 是重金属元素的参考值; T_i 是各元素的毒性反应系数(铜、铅、镍为5,镉为30,铬为2,锌为1), i 为重金属元素数量($i=1, 2, \dots, n$)。潜在风险指数法分级标准如表2所示。

表2 潜在风险指数法分级标准

Table 2 Grading standard of potential risk index method

风险级别	E_i	I_R	生态危害程度	风险级别	E_i	I_R	生态危害程度
A级	<40	<150	轻微危害	D级	160~320	>600	很强危害
B级	40~80	150~300	中等危害	E级	≥ 320		极强危害
C级	80~160	300~600	强危害				

说明:取值范围为上限排除法

1.3.3 综合污染指数法 本研究采用综合污染指数评价方法^[13]对底泥中的总磷进行评价。评价过程中采用过渡层和正常层中总磷的均值作为基准值,各实测值除以基准值得到污染指数(I_{NP})。总磷分级标准按表3进行等级划分。

1.4 数据处理

采用 Excel 2013 进行统计分析;利用 ArcGIS 10.2 绘制水体总磷分布图;采用方差分析和最小显著性差异法(LSD)进行差异显著性分析($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 底泥中重金属污染特征及风险评价

2.1.1 底泥中6种重金属污染特征 由图2可知:不同采样点的底泥中的重金属质量分数有较大的差异;同一采样点中,重金属质量分数随深度差异的变化差异显著($P<0.05$)。在上层底泥中,6种重金属质量分数波动最大。在不同采样点,底泥中铜的质量分数为200~1200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且随着底泥深度的增加铜质量分数逐渐减少,在30 cm以下显著减少($P<0.05$)。底泥中汞仅在0~20 cm范围内有检出,为1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其余深度均未检出,表明汞只存在于表层底泥。底泥中砷质量分数变化趋势与铜相似,最高为275 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,随着深度的增加,逐渐减少,在30 cm以下显著减少($P<0.05$),最低为80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。底泥中铅质量分数也有着显著的点位分布差异,不同采样点铅质量分数变化较大,最高为890 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,随着底泥深度加深,呈现减少的趋势,在40 cm以下显著减少($P<0.05$),最小为300 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;镉质量分数也随着底泥深度增加逐渐减少,在30 cm以下显著减少($P<0.05$)。底泥中镍质量分数也存在显著的采样点分布差异,也是在30 cm以下显著减少($P<0.05$),最高为400 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。总之,随着底泥深度的增加,重金属质量分数逐渐减少。在所检测的6种重金属中,质量分数从高到低依次为铜、铅、镍、砷、镉、汞。

张茜等^[14]研究发现:在0~30 cm底泥中,随着底泥深度增加,重金属污染程度增大。本研究进一步分析了30~60 cm底泥处重金属污染程度,通过对3个采样点0~60 cm底泥采样结果分析,发现有以下

表1 地累积指数(I_{geo})分级标准

Table 1 Grading standard of geo-cumulative index

污染等级	I_{geo}	污染程度	污染等级	I_{geo}	污染程度
0	<0	无	4	3~4	重污染
1	0~1	轻度-中度污染	5	4~5	重-极重污染
2	1~2	中度污染	6	5~10	极重污染
3	2~3	中度-重度污染			

说明:取值范围为上限排除法

表3 总磷污染指数分级评价表

Table 3 Grading evaluation of TP pollution index of sediment

序号	I_{NP}	污染等级	序号	I_{NP}	污染等级
1	<1.00	清洁(安全)	3	1.25~2.00	中度污染
2	1.00~1.25	轻度污染	4	≥ 2.00	重污染

说明:取值范围为上限排除法

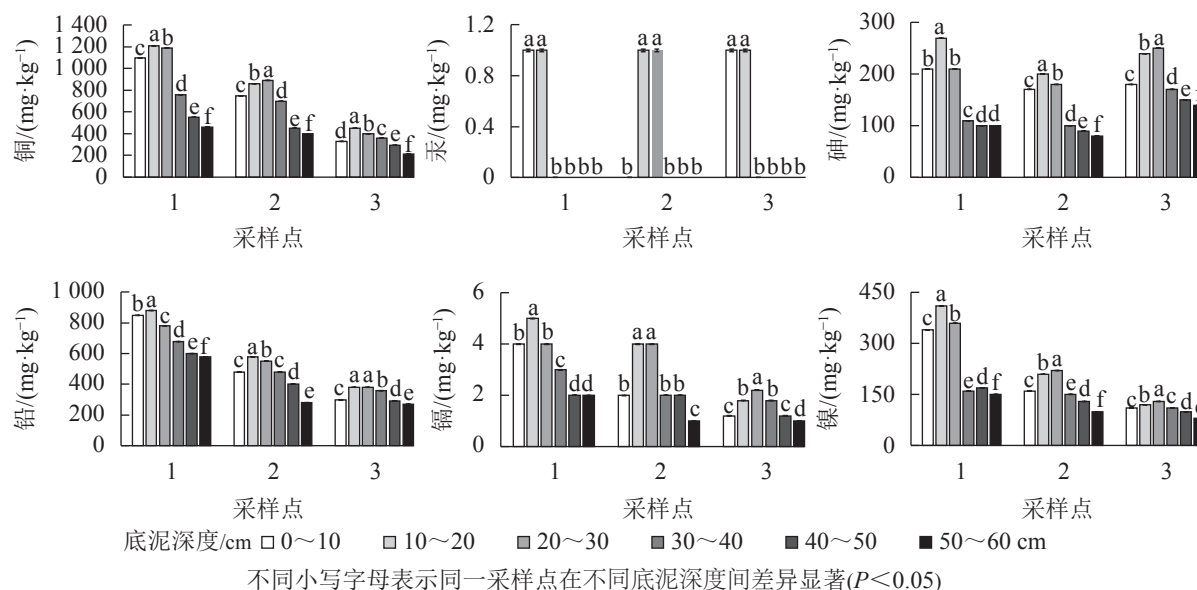


图2 乌金港底泥重金属质量分数分布

Figure 2 Distribution of heavy metal content in sediments of Wujin Port

共同点: 重金属集中在污染层和过渡层, 随着深度的增加, 重金属质量分数有下降的趋势, 且在 40~50 cm 底泥趋于稳定, 50 cm 深度以下 3 个采样点重金属质量分数均低于湖泊底泥土壤背景值 (镉为 $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 砷为 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 铜为 $600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 铅为 $650 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 汞为 $0.075 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 镍为 $180 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

2.1.2 底泥中重金属污染现状评价 由表 4 可知: 底泥重金属污染程度均为“轻度-中度污染”。在不同采样点之间, 各金属污染程度有较大区别。1 号位底泥重金属平均地累积指数从大到小依次为铜、铅、镍、砷、镉、汞; 2 号位从大到小依次为铜、铅、镍、砷、镉、汞; 3 号位从大到小依次为铜、铅、砷、镍、镉、汞。由此可知: 各采样点重金属排序相似度较高, 其中污染程度较为严重的重金属是铜和铅, 较为轻微的是镉和汞, 但均处于轻度-中度污染。

由表 5 可知: 单因素潜在生态风险指数 (E_i^p) 均小于 40, 风险较低, 这与地累积指数评价结果一致; 重金属在乌金港沉积物各采样点平均潜在生态风险指数 (I_R) 为 120, 小于其限值 150, 属于轻微危害。从重金属潜在生态风险指数来看, 不同采样点数值差异较为显著, 说明其受空间差异的影响较大。

2.2 底泥磷的污染特征及风险评价

2.2.1 底泥中磷的分布特征及综合污染指数评价 通过乌金港底泥总磷分层检测结果可以看出 (表 6): 污染层、过渡层、正常层总磷质量分数呈现出显著的递减规律。通过综合污染指数对乌金港底泥中总磷的评价结果可以看出 (表 6): 总磷污染程度较高的是在污染层和过渡层。这个评价结果与底泥解析实验中可溶性活性磷和总磷释放结果是相吻合的。

2.2.2 底泥中磷的释放规律分析 由图 3A 可见: 在浸泡试验中, 污染层底泥可溶性活性磷质量浓度为 $0.085 \sim 0.184 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均质量浓度为 $0.093 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。可溶性活性磷释放曲线整体变化比较平稳, 除第 1 天的 $0.184 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 比较高以外, 第 2 天起可溶性活性磷质量浓度基本上未超过原上覆水可溶性活性磷的 $0.088 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 第 7 天开始可溶性活性磷质量浓度在 $0.085 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上下波动, 差异不显著。在浸泡试验中, 总磷质量浓度为 $0.050 \sim 0.742 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均质量浓度为 $0.189 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

过渡层 (15~30 cm) 底泥释放的总磷和可溶性活性磷质量浓度波动较小 (图 3B)。可溶性活性磷质量浓度为 $0.020 \sim 0.237 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均质量浓度为 $0.052 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。总磷质量浓度为 $0.040 \sim 0.270 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均质量浓度为 $0.091 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由图 3B 可以发现: 可溶性活性磷质量浓度和总磷质量分数变化曲线差别不大, 均在第 1 天大量释放后, 大幅度降低至一个范围内波动。底泥释放到水体中的可溶性活性磷最高是第 1 天, 为 $0.237 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 第 3 天后水体中的可溶性活性磷质量浓度即降到原上覆水的 $0.083 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 可溶性活性磷平均质量浓度低于同期污染层 (0~15 cm) 底泥磷释放的质量浓度。总磷的波动比可溶性活性磷要略大, 从第 6 天起, 总磷质量浓度均在原上覆水总磷质量浓度的 $0.098 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 总磷平

表 4 乌金港重金属污染程度评价表

Table 4 Evaluation of pollution degree of heavy metal in Wujin Port

采样点	深度/cm	铜		汞		砷	
		I_{geo}	污染程度	I_{geo}	污染程度	I_{geo}	污染程度
1	0~10	0.51	轻度-中度污染	0.15	轻度-中度污染	0.29	轻度-中度污染
	10~20	0.65	轻度-中度污染	0.15	轻度-中度污染	0.65	轻度-中度污染
	20~30	0.62	轻度-中度污染		轻度-中度污染	0.29	轻度-中度污染
	30~40	0.98	轻度-中度污染		轻度-中度污染	0.36	轻度-中度污染
	40~50	0.51	轻度-中度污染		轻度-中度污染	0.22	轻度-中度污染
	50~60	0.25	轻度-中度污染		轻度-中度污染	0.22	轻度-中度污染
2	0~10	0.96	轻度-中度污染	0.15	轻度-中度污染	0.99	轻度-中度污染
	10~20	0.15	轻度-中度污染	0.15	轻度-中度污染	0.22	轻度-中度污染
	20~30	0.20	轻度-中度污染		轻度-中度污染	0.07	轻度-中度污染
	30~40	0.86	轻度-中度污染		轻度-中度污染	0.22	轻度-中度污染
	40~50	0.22	轻度-中度污染		轻度-中度污染	0.07	轻度-中度污染
	50~60	0.05	轻度-中度污染		轻度-中度污染	0.90	轻度-中度污染
3	0~10	0.77	轻度-中度污染	0.15	轻度-中度污染	0.07	轻度-中度污染
	10~20	0.22	轻度-中度污染	0.15	轻度-中度污染	0.48	轻度-中度污染
	20~30	0.05	轻度-中度污染		轻度-中度污染	0.54	轻度-中度污染
	30~40	0.90	轻度-中度污染		轻度-中度污染	0.99	轻度-中度污染
	40~50	0.59	轻度-中度污染		轻度-中度污染	0.81	轻度-中度污染
	50~60	0.12	轻度-中度污染		轻度-中度污染	0.71	轻度-中度污染
采样点	深度/cm	铅		镉		镍	
		I_{geo}	污染程度	I_{geo}	污染程度	I_{geo}	污染程度
1	0~10	0.04	轻度-中度污染	0.74	轻度-中度污染	0.70	轻度-中度污染
	10~20	0.09	轻度-中度污染	0.06	轻度-中度污染	0.97	轻度-中度污染
	20~30	0.91	轻度-中度污染	0.74	轻度-中度污染	0.78	轻度-中度污染
	30~40	0.72	轻度-中度污染	0.32	轻度-中度污染	0.61	轻度-中度污染
	40~50	0.54	轻度-中度污染	0.74	轻度-中度污染	0.70	轻度-中度污染
	50~60	0.49	轻度-中度污染	0.74	轻度-中度污染	0.51	轻度-中度污染
2	0~10	0.21	轻度-中度污染	0.74	轻度-中度污染	0.61	轻度-中度污染
	10~20	0.49	轻度-中度污染	0.74	轻度-中度污染	0.00	轻度-中度污染
	20~30	0.41	轻度-中度污染	0.74	轻度-中度污染	0.07	轻度-中度污染
	30~40	0.21	轻度-中度污染	0.74	轻度-中度污染	0.51	轻度-中度污染
	40~50	0.95	轻度-中度污染	0.74	轻度-中度污染	0.31	轻度-中度污染
	50~60	0.44	轻度-中度污染	0.74	轻度-中度污染	0.93	轻度-中度污染
3	0~10	0.54	轻度-中度污染	0.00	轻度-中度污染	0.07	轻度-中度污染
	10~20	0.88	轻度-中度污染	0.58	轻度-中度污染	0.19	轻度-中度污染
	20~30	0.88	轻度-中度污染	0.87	轻度-中度污染	0.31	轻度-中度污染
	30~40	0.80	轻度-中度污染	0.58	轻度-中度污染	0.07	轻度-中度污染
	40~50	0.49	轻度-中度污染	0.20	轻度-中度污染	0.93	轻度-中度污染
	50~60	0.38	轻度-中度污染	0.74	轻度-中度污染	0.61	轻度-中度污染

说明：空白表示无此项

表 5 潜在生态风险指数评价结果

Table 5 Evaluation result of potential ecological risk index of Wujin Port

采样点	深度/cm	铜			汞			砷		
		E_i	I_R	生态危害程度	E_i	I_R	生态危害程度	E_i	I_R	生态危害程度
1	0~10	15	110	轻微危害	17	111	轻微危害	15	148	轻微危害
	10~20	31	132	轻微危害	28	108	轻微危害	30	111	轻微危害
	20~30	35	141	轻微危害	28	111	轻微危害	12	133	轻微危害
	30~40	28	125	轻微危害	22	115	轻微危害	29	137	轻微危害
	40~50	23	139	轻微危害	35	127	轻微危害	28	118	轻微危害
	50~60	10	108	轻微危害	11	129	轻微危害	27	110	轻微危害
2	0~10	29	129	轻微危害	19	91	轻微危害	39	93	轻微危害
	10~20	38	128	轻微危害	25	109	轻微危害	14	105	轻微危害
	20~30	23	126	轻微危害	38	94	轻微危害	39	140	轻微危害
	30~40	23	110	轻微危害	31	133	轻微危害	31	126	轻微危害
	40~50	26	97	轻微危害	17	116	轻微危害	21	115	轻微危害
	50~60	20	110	轻微危害	29	126	轻微危害	18	143	轻微危害
3	0~10	37	114	轻微危害	23	135	轻微危害	11	130	轻微危害
	10~20	26	116	轻微危害	18	101	轻微危害	33	144	轻微危害
	20~30	26	91	轻微危害	30	137	轻微危害	22	129	轻微危害
	30~40	19	126	轻微危害	11	91	轻微危害	37	101	轻微危害
	40~50	33	99	轻微危害	23	126	轻微危害	20	105	轻微危害
	50~60	18	147	轻微危害	16	90	轻微危害	25	96	轻微危害

点位	深度	铅			镉			镍		
		E_i	I_R	生态危害程度	E_i	I_R	生态危害程度	E_i	I_R	生态危害程度
1	0~10	10	117	轻微危害	25	134	轻微危害	29	108	轻微危害
	10~20	36	134	轻微危害	17	101	轻微危害	38	105	轻微危害
	20~30	31	96	轻微危害	28	112	轻微危害	34	146	轻微危害
	30~40	13	135	轻微危害	31	144	轻微危害	10	120	轻微危害
	40~50	13	96	轻微危害	37	143	轻微危害	20	94	轻微危害
	50~60	24	122	轻微危害	38	124	轻微危害	32	121	轻微危害
2	0~10	11	123	轻微危害	27	122	轻微危害	16	103	轻微危害
	10~20	10	102	轻微危害	23	123	轻微危害	18	124	轻微危害
	20~30	35	140	轻微危害	21	99	轻微危害	28	140	轻微危害
	30~40	13	93	轻微危害	36	108	轻微危害	15	124	轻微危害
	40~50	25	128	轻微危害	23	115	轻微危害	10	116	轻微危害
	50~60	21	110	轻微危害	24	111	轻微危害	11	140	轻微危害
3	0~10	13	111	轻微危害	23	119	轻微危害	25	106	轻微危害
	10~20	13	96	轻微危害	36	130	轻微危害	25	138	轻微危害
	20~30	29	96	轻微危害	11	90	轻微危害	35	147	轻微危害
	30~40	22	105	轻微危害	33	123	轻微危害	20	97	轻微危害
	40~50	11	102	轻微危害	22	132	轻微危害	27	122	轻微危害
	50~60	23	113	轻微危害	17	145	轻微危害	15	90	轻微危害

均释放质量浓度远低于污染层 (0~15 cm) 释放的平均质量浓度。

正常层 (30~50 cm) 底泥可溶性活性磷质量浓度为 $0.024\sim0.237\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 3C), 平均质量浓度为 $0.067\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。可溶性活性磷第 1 天释放质量浓度最高, 为 $0.237\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。之后, 释放到上覆水中的可溶性活性磷开始减少, 到第 5 天降到 $0.083\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。随后除了个别时间点外, 其余均在 $0.083\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 最低质量浓度是第 12 天的 $0.024\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。总磷质量浓度为 $0.040\sim0.341\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均质量浓度为 $0.138\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。总磷质量浓度也是第 1 天达到最高 $0.341\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后再降低, 到第 6 天, 总磷质量浓度降到 $0.098\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 并在小范围内略有波动。总的来说, 不论是短期还是长期, 正常层 (30~50 cm) 底泥中释放的可溶性活性磷与总磷均低于污染层 (0~15 cm) 和过渡层 (15~30 cm) 底泥, 且从第 6 天起, 释放的总磷质量浓度低于原上覆水中总磷质量浓度 (实测原上覆水总磷质量浓度为 $0.520\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。与第 1 天相比, 在不同底泥层中总磷释放变化比可溶性活性磷释放变化波动要大。

3 结论

通过 2 组实验对武汉市乌金港底泥重金属和磷污染特征分析结果显示: ①重金属主要集中在污染层和过渡层, 随着底泥深度的增加, 重金属质量分数有下降的趋势。在正常层 40~50 cm 处重金属质量分数趋于稳定, 50 cm 以下重金属质量分数和背景值相当, 即达到土壤环境质量二级标准; 由地累积指数可知: 乌金港底泥重金属污染程度大多处于轻度-中度污染, 污染程度由强到弱依次表现为铜、铅、镍、砷、镉、汞; 潜在生态风险指数均小于 40, 因此风险较低。②底泥分层采样检测数据表明: 乌金港底泥污染层、过渡层、正常层总磷质量分数呈现出显著的递减规律; 解析实验显示: 底泥污染层 (0~15 cm) 和过渡层 (15~30 cm) 释放的可溶性活性磷与总磷高于原上覆水, 正常层 (30~50 cm) 不论是短期还是长期释放的可溶性活性磷与总磷均最低, 且从第 6 天起, 释放的总磷质量分数低于原上覆水。总之, 乌金港底泥中的污染主要集中在底泥的污染层和过渡层, 铜和铅是主要的生态风险因子, 但处于低生态风险。为了更好地清除内源污染, 综合分析底泥重金属和磷的污染特征, 确定小微水体乌金港最优清淤深度为 40 cm。

4 参考文献

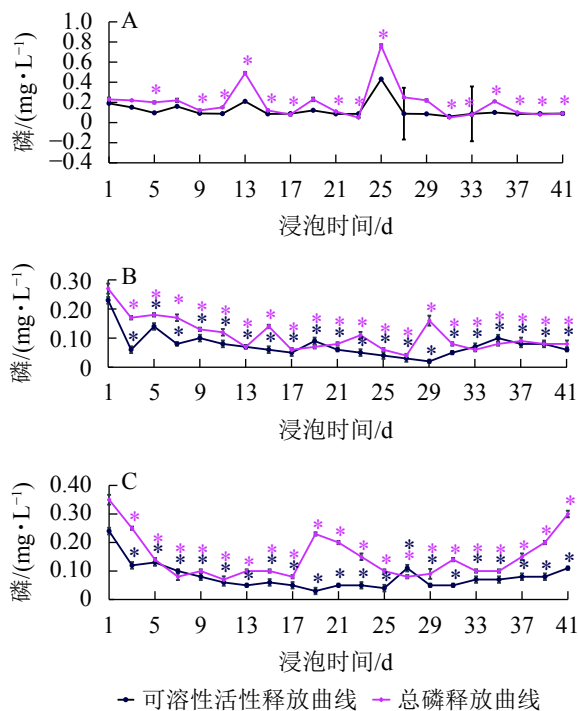
[1] 陈星, 陆莹, 黄威. 氧化-载钠改性黑臭河道底泥对磷削减的效果及机制[J]. 环境工程学报, 2017, 11(12): 6282 - 6289.

CHEN Xing, LU Ying, HUANG Wei. Effect evaluation and mechanism of phosphorus removal using oxidation- Na^+ -doped

表 6 乌金港底泥总磷分层检测结果及污染程度评价表

Table 6 Stratification test results and pollution degree evaluation table of total phosphorus in the sediments of Wujin Port

点位	层次	总磷/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	I_{NP}	总磷污染程度
1	污染层	0.75	1.21	轻度污染
	过渡层	0.68	1.10	轻度污染
	正常层	0.56	0.90	轻度污染
2	污染层	0.83	1.21	轻度污染
	过渡层	0.76	1.11	轻度污染
	正常层	0.61	0.89	清洁
3	污染层	0.71	1.21	轻度污染
	过渡层	0.63	1.08	清洁
	正常层	0.54	0.92	清洁



*表示在 $P < 0.05$ 水平上不同时间与第 1 天相比有显著差异。A. 0~15 cm 底泥磷释放曲线; B. 15~30 cm 底泥磷释放; C. 30~50 cm 底泥磷释放曲线

图 3 底泥中磷释放强度的变化

Figure 3 Variation of phosphorus release intensity with time

- sediment from malodorous river [J]. *Chin J Environ Eng*, 2017, **11**(12): 6282 – 6289.
- [2] 张奇, 喻庆国, 王胜龙, 等. 滇西北剑湖沉积物磷形态、空间分布及释放贡献[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(10): 3792 – 3803.
- ZHANG Qi, YU Qingguo, WANG Shenglong, *et al.* Phosphorus fractions, spatial distribution and release contributions in sediments of Jianhu Lake, Northwestern Yunnan Plateau, China [J]. *Acta Sci Circumstantiae*, 2017, **37**(10): 3792 – 3803.
- [3] 邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 等. 山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1389 – 1396.
- QIU Zukail, HU Xiaozhen, YAO Cheng, *et al.* Pollution characteristics and evaluation of nitrogen, phosphorus and organicmatter in sediments of Shanmei reservoir in Fujian, China [J]. *Environ Sci*, 2016, **37**(4): 1389 – 1396.
- [4] 冯强, 易境, 刘书敏, 等. 城市黑臭水体污染现状、治理技术与对策[J]. 环境工程, 2020, **38**(8): 82 – 88.
- FENG Qiang, YI Jing, LIU Shumin, *et al.* The pollution situation, treatment techniques and countermeasures of urban black and odors water in China [J]. *Environ Eng*, 2020, **38**(8): 82 – 88.
- [5] 申秋实, 邵世光, 保琦蓓, 等. 典型城郊湖泊沉积物重金属生态风险评价[J]. 监测与评价, 2014, **32**(10): 137 – 141, 75.
- SHEN Qiushi, SHAO Shiguang, BAO Qibei, *et al.* Potential environment risk assessment of sediment heavy metals in a typical suburban shallow lake [J]. *Environ Monit Assess*, 2014, **32**(10): 137 – 141, 75.
- [6] 王秀, 王振祥, 潘宝, 等. 南淝河水-沉积物中重金属的分布规律、环境评价与溯源研究[J]. 环境工程, 2017, **35**(4): 134 – 138.
- WANG Xiu, WANG Zhenxiang, PAN Bao, *et al.* Distribution, environmental implication and source characteristics of heavy metals in water and sediment in Nanfei River [J]. *Environ Eng*, 2017, **35**(4): 134 – 138.
- [7] 杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 等. 巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 712 – 722.
- YANG Pan, YANG Chunhui, MA Xinyu, *et al.* Sediment pollution characteristics and dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake [J]. *Environ Sci*, 2021, **42**(2): 712 – 722.
- [8] 张占梅, 黄大俊, 石瑞琦, 等. 重庆主城区河流底泥中重金属污染现状及生态风险分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, **39**(11): 122 – 127.
- ZHANG Zhanmei, HUANG Dajun, SHI Ruiqi, *et al.* Heavy metal pollution and its ecological risk analysis of river sediments in the main urban area of Chongqing [J]. *J Chongqing Jiaotong Univ Nat Sci*, 2020, **39**(11): 122 – 127.
- [9] 马迎群, 迟明慧, 温泉, 等. 嘉兴市北部湖荡区沉积物磷释放通量估算及影响因素研究[J]. 环境工程技术学报, 2020, **10**(2): 212 – 219.
- MA Yingqun, CHI Minghui, WEN Quan, *et al.* Fluxes and influencing factors of phosphorus release in sediments in northern lacustrine areas of Jiaxing City [J]. *J Environ Eng Technol*, 2020, **10**(2): 212 – 219.
- [10] 朱永青. 淀山湖底泥氮磷营养盐释放及其影响因素研究[J]. 环境污染与防治, 2014, **36**(5): 70 – 77, 82.
- ZHU Yongqing. Study on the releasing of nutrient from sediment of Dianshan Lake and its influencing factors [J]. *Environ Poll Control*, 2014, **36**(5): 70 – 77, 82.
- [11] GUO Weihua, LIU Xianbin, LIU Zhanguang, *et al.* Pollution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the sediments around Dongjiang Harbor, Tianjin [J]. *Procedia Environ Sci*, 2010, **2**: 729 – 736.
- [12] FANG S, JIA X, YANG Xiaoying, *et al.* A method of identifying priority spatial patterns for the management of potential ecological risks posed by heavy metals [J]. *J Hazardous Mater*, 2012, **237/238**: 290 – 298.
- [13] HOU Dekun, HE Jiang, LÜ Changwei, *et al.* Distribution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd) in water and sediments from Lake Dalinouer, China [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2013, **93**: 135 – 144.
- [14] 张茜, 冯民权, 郝晓燕. 上覆水环境条件对底泥氮磷释放的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2020, **42**(1): 7 – 11.
- ZHANG Qian, FENG Minquan, HAO Xiaoyan. Study on effect of overlying water environment on the nitrogen and phosphorus release of sediment [J]. *Environ Poll Control*, 2020, **42**(1): 7 – 11.