

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202312036



# 厦门集美杏林湾水库底泥 重金属污染状况评价

唐雪平<sup>1</sup>, 李静<sup>2</sup>, 庄马展<sup>1</sup>, 李飞<sup>2</sup>, 周真明<sup>2</sup>

(1. 厦门市环境科学研究院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为了研究厦门市集美区杏林湾水库底泥重金属污染状况,利用相关性分析、地积累指数法、潜在生态风险指数法和污染负荷指数法,对杏林湾水库底泥中重金属污染特征和生态风险进行评价。结果表明:底泥中 Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Cd, Hg, As 质量比平均值分别为 270.00, 76.94, 38.88, 88.38, 48.13, 0.41, 0.07, 3.85  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,除了 As 和 Pb 质量比平均值低于背景值外, Cd, Cu, Zn, Ni, Cr, Hg 质量比平均值分别达到背景值的 13.67, 6.52, 4.61, 2.99, 3.03, 2.33 倍; Zn, Cu 和 Cr 变异系数均大于 50%,尤其是 Cu 和 Cr,变异系数均超过 100%,其空间分布不均匀,受人为因素影响较大; Zn 和 Cu 的质量比空间分布呈现沿水流方向逐渐减小的特征, Ni 和 Cr 的质量比空间分布呈现从后溪汇入处至入海口处逐渐增加,从九天湖排洪渠和董任排洪渠交汇处至入海口处逐渐减小的特征, Pb, Hg, As 的质量比空间分布较为均匀, Cd 的质量比空间分布随着水流方向起伏较大;底泥中重金属污染主要来自周边人类活动排放和上游支流汇入;除 Pb, As 为无污染状态外, Zn, Cu, Ni, Cr, Cd 和 Hg 均呈现不同程度的污染,且 Cd 的污染程度最高;杏林湾水库底泥重金属潜在生态风险整体处于强至很强之间。

**关键词:** 底泥; 重金属; 污染特征; 生态风险; 杏林湾水库

中图分类号: X 825

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)02-0262-09

## Evaluation of Heavy Metal Pollution Status of Sediment in Xinglin Bay Reservoir Jimei Xiamen

TANG Xueping<sup>1</sup>, LI Jing<sup>2</sup>, ZHUANG Mazhan<sup>1</sup>,  
LI Fei<sup>2</sup>, ZHOU Zhenming<sup>2</sup>

(1. Xiamen Institute of Environmental Science, Xiamen 361021, China;

2. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to study the pollution status of heavy metals in the sediment of Xinglin Bay Reservoir Jimei District, Xiamen City, the methods of the correlation analysis, geo-accumulation index, potential ecological risk index and pollution load index are used to evaluate the characteristics and ecological risk of heavy metals pollution in the sediment of Xinglin Bay Reservoir. The results show that the average values of the mass ratios of Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Cd, Hg and As in the sediment are 270.00, 76.94, 38.88, 88.38, 48.13, 0.41, 0.07, 3.85  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively, except average mass ratios of As and Pb less than the background values, the average mass ratios of Cd, Cu, Zn, Ni, Cr and Hg are 13.67, 6.52, 4.61, 2.99, 3.03 and 2.33 times greater than the background values of respectively. The variation coefficients of Zn, Cu and Cr are all greater

收稿日期: 2023-12-29

通信作者: 周真明(1981-),男,教授,博士,主要从事水环境修复技术的研究。E-mail: zhenming@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878300);福建省厦门市自然科学基金资助项目(3502Z202373041)

than 50%, especially the variation coefficients of Cu and Cr are all greater than 100%, their spatial distribution are not uniform and highly influenced by human factors. The spatial distribution of the mass ratios of Zn and Cu show a gradual decrease characteristics along the direction of water flow, the spatial distribution of the mass ratios of Ni and Cr show a gradual increase characteristics from the confluence of Hou River to the estuary, and a gradual decrease characteristics from the confluence of Jiutian Lake and DongRen Drainage Canals to the estuary, the spatial distribution of the mass ratios of Pb, Hg and As are relatively uniform, and the spatial distribution of the mass ratio of Cd has a great fluctuation with the direction of water flow. The heavy metals pollution in the sediment is mainly from discharges from neighboring human activities and inflows from upstream tributaries. Except non-pollution state of Pb and As, Zn, Cu, Ni, Cr, Cd and Hg are all polluted to different degrees, and Cd has the highest degree of pollution. The potential ecological risk of heavy metals in the sediment of Xinglin Bay Reservoir is generally between strong and very strong.

**Keywords:** sediment; heavy metal; pollution characteristics; ecological risk; Xinglin Bay Reservoir

杏林湾水库位于福建省厦门市集美区南部,兼具市政供水、景观用水、农业灌溉和防洪功能。杏林湾水库汇入支流水环境质量的恶化已经影响到下游杏林湾水库的环境质量和集美新城的开发建设<sup>[1]</sup>。因此,为了改善杏林湾水库水质,实现杏林湾水库的生态修复,需要研究其污染状况。杏林湾水库底泥作为重金属的主要蓄积库,其重金属污染特征和生态风险程度可以反映水体受重金属污染的状况<sup>[2-3]</sup>,对杏林湾水库水环境安全、水体重金属污染防治及流域周边区域经济的可持续发展具有借鉴和指导意义。基于此,本文通过相关性分析获得重金属指标间的内在联系,并应用地积累指数法、潜在生态风险指数法和污染负荷指数法对杏林湾水库中重金属污染状况进行评价。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点的布设

综合考虑杏林湾水库水文特征、河道情况、周边布局及支流汇水等情况,确定 8 个可反映水库总体情况的代表性断面布设采样点(XLWN01~XLWN08),其分布及经纬度如图 1,表 1 所示。



图 1 杏林湾水库采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Xinglin Bay Reservoir

表 1 杏林湾水库采样点经纬度

Tab.1 Latitude and longitude of sampling sites in Xinglin Bay Reservoir

采样点	经度/(°)	纬度/(°)
XLWN01	118.050 6	24.605 4
XLWN02	118.060 9	24.599 3
XLWN03	118.076 3	24.595 6
XLWN04	118.085 6	24.594 5
XLWN05	118.075 1	24.574 3
XLWN06	118.088 2	24.575 8
XLWN07	118.052 5	24.589 9
XLWN08	118.046 6	24.592 1

### 1.2 采集与测定

采用 HP-55 型杆持式柱状底泥采样器采集表层底泥样品(采样深度为 0~20 cm),各采样点采集 10 kg 样品,现场人工挑拣,去除碎石、螺蛳和枯叶等杂质,用注射器吸去上覆水,再装入 PE 自封袋密封,带回实验室。

参照 GB 17378.5—2007《海洋监测规范第 5 部分:沉积物分析》,对底泥重金属进行测定,实验中每个样品设定 3 个平行样,以平均值为结果进行分析。底泥重金属的测定方法:Hg 采用硝酸-盐酸消解、原子荧光法,检出限为 0.002 mg·kg<sup>-1</sup>;As 采用王水消解、原子荧光法,检出限为 0.060 mg·kg<sup>-1</sup>;Pb 采用硝酸-高氯酸消解、火焰原子吸收分光光度法,检出限为 3.000 mg·kg<sup>-1</sup>;Cu 采用硝酸-高氯酸消解、火焰原子吸收分光光度法,检出限为 2.000 mg·kg<sup>-1</sup>;Ni 采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消解、火焰原子吸收分光光度法,检出限为 3.000 mg·kg<sup>-1</sup>;Zn 采用硝酸-高氯酸消解、火焰原子吸收法,检出限

为  $6.000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; Cr 采用硝酸-高氯酸消解、无火焰原子吸收分光光度法, 检出限为  $2.000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; Cd 采用硝酸-高氯酸消解、火焰原子吸收分光光度法, 检出限为  $0.050 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.3 评价方法

1.3.1 地积累指数法 地积累指数法是一种用于研究底泥重金属污染程度的定量指标<sup>[4-7]</sup>, 它兼顾了自然成土过程中地质背景和人为活动对重金属污染的影响, 常用于反映重金属的富集程度<sup>[5-6,8-9]</sup>。

地积累指数( $I_{\text{geo}}$ )的计算公式为

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [\omega_s^i / (K\omega_n^i)] \quad (1)$$

式(1)中: $\omega_s^i$  为重金属  $i$  在底泥中的实测质量比; $\omega_n^i$  为底泥中重金属  $i$  的地球化学背景值, 参照文献<sup>[1]</sup>, 最终确定背景值为厦门市 C 层土壤元素背景值(算术平均值)<sup>[10]</sup>;  $K$  为考虑各地岩石差异可能会导致背景值的变动而取的系数(通常取  $1.5^{[5,11]}$ )。

根据计算得到的  $I_{\text{geo}}$ , 可将杏林湾水库中底泥污染程度划分为 7 个等级。

1.3.2 潜在生态风险指数法 潜在生态风险指数法是对底泥中重金属的潜在生态风险进行定量评估的一种方法<sup>[12]</sup>。该方法将污染物和生物毒性联系在一起, 既可以对污染物在不同区域的潜在生态风险程度进行定量划分, 又可以反映多种重金属污染物对水环境的综合影响。

潜在生态风险指数(RI)的计算公式为

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \omega_i^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{\omega_s^i}{\omega_n^i} \quad (2)$$

式(2)中: $E_r^i$  为重金属  $i$  的潜在生态风险系数; $n$  为重金属种类; $T_r^i$  为重金属  $i$  的毒性系数, Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Cd, Hg, As 的毒性系数分别为 1.00, 5.00, 5.00, 2.00, 5.00, 30.00, 40.00, 10.00<sup>[6]</sup>;  $\omega_i^i$  为单因子污染物污染参数。

潜在生态风险程度分级, 如表 2 所示。

1.3.3 污染负荷指数法 污染负荷指数法<sup>[13]</sup>是一种被广泛应用于土壤和水体重金属污染评价的方法<sup>[6,14]</sup>, 它可以反映重金属在整个区域的变化趋势, 在计算上用累积代替累加, 可在一定程度上避免单一元素对综合评价带来的影响<sup>[14-15]</sup>。

某采样点污染负荷指数(PLI)的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} PLI &= \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \cdots \times CF_n} \\ CF_i &= \omega_s^i / \omega_n^i \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)中: $CF_i$  为某金属的最高污染系数。

整个评价区域的污染负荷指数( $PLI_{\text{zone}}$ )的计算公式为

$$PLI_{\text{zone}} = \sqrt[m]{PLI_1 \times PLI_2 \times PLI_3 \times \cdots \times PLI_m} \quad (4)$$

式(4)中: $m$  为采样点的数量。

根据污染负荷指数划分污染等级, 可划分为 0, I, II, III<sup>[16]</sup>(表 3)。

表 3 污染等级与污染程度的划分

Tab. 3 Classification of pollution levels and pollution degrees

指标	PLI < 1	1 ≤ PLI < 2	2 ≤ PLI < 3	PLI ≥ 3
污染等级	0	I	II	III
污染程度	无污染	中等污染	强污染	极强污染

## 2 实验结果与分析

### 2.1 统计分析结果

杏林湾水库底泥中重金属的相关参

数, 如表 4 所示。表 4 中: $\omega_{\text{max}}$  为质量比最大值; $\omega_{\text{min}}$  为质量比最小值; $\omega_{\text{ave}}$  为质量比平均值; $\sigma$  为标准差; CV 为变异系数。

由表 4 可知: 水库底泥中重金属质量比平均值从大到小排序为 Zn, Cr, Cu, Pb, Ni, As, Cd, Hg; 除了 As, Pb 质量比平均值低于背景值外, 其余重金属的质量比平均值均超出背景值较多, Cd, Cu, Zn, Ni,

Cr, Hg 质量比平均值分别达到背景值的 13.67, 6.52, 4.61, 2.99, 3.03, 2.33 倍。

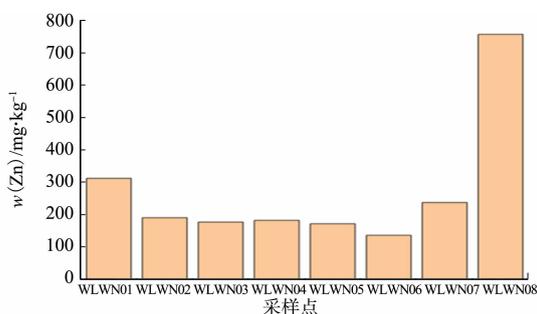
表 4 杏林湾水库底泥中重金属的相关参数

Tab. 4 Related parameters of heavy metals in sediment of Xinglin Bay Reservoir

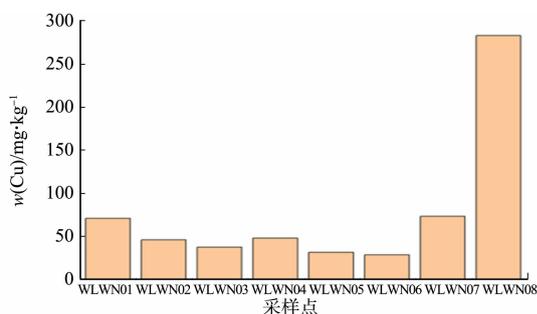
参数	Zn	Cu	Ni	Cr	Pb	Cd	Hg	As
$w_{\max}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	757.00	283.00	79.00	332.00	70.85	0.76	0.08	4.46
$w_{\min}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	135.50	28.00	23.00	32.00	39.10	0.19	0.06	3.14
$w_{\text{ave}}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	270.00	76.94	38.88	88.38	48.13	0.41	0.07	3.85
$\sigma$	190.67	79.43	16.76	93.27	9.11	0.17	0.01	0.39
CV/%	70.62	103.24	43.11	105.53	18.93	42.18	8.57	10.24
$w_i^j/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	58.60	11.80	13.00	29.20	56.80	0.03	0.03	5.10

文献[8, 11]的研究表明, 变异系数能够反映重金属元素空间分布的均匀程度, 以及受人为因素的影响程度, 变异系数越大, 表明受人为因素的影响导致元素空间分布越不均匀; 当变异系数大于 50% 时, 表明可能存在外来污染源。由表 4 还可知: 杏林湾水库底泥中重金属 Zn, Cu 和 Cr 的变异系数均较大 (>50%), 表明这些元素空间分布不均匀, 受人为因素的影响较大, 其中, Zn 的变异系数达到 70.62%, 属于中等强度变异, Cu, Cr 的变异系数分别达到 103.24%, 105.53% (均超过 100%), 属于非常强变异性, 表明受人为因素的影响十分严重; 其余元素 Ni, Pb, Cd, Hg, As 的变异系数均较小 (<50%), 表明这些元素空间分布较均匀, 受人为因素的影响较一致。

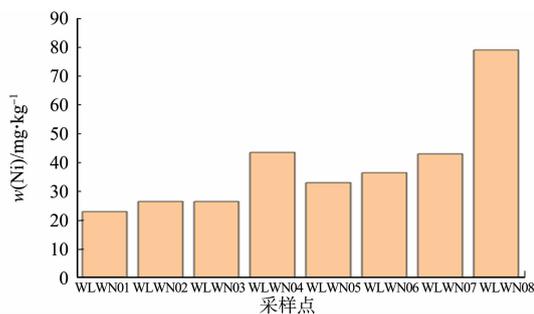
杏林湾水库底泥中重金属元素的空间分布图, 如图 2 所示。图 2 中:  $w$  为质量比。由图 2 可知: Zn, Cu 的质量比空间分布呈现沿水流方向逐渐减小的特征, 且在支流汇入处的质量比较高, 推测杏林湾水



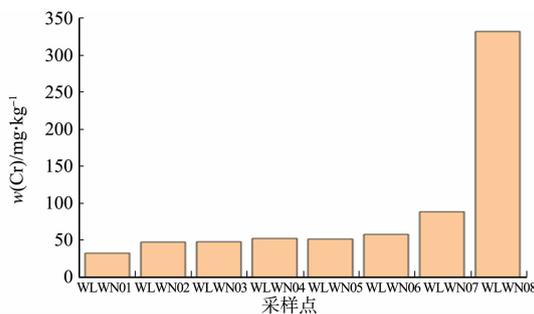
(a) Zn



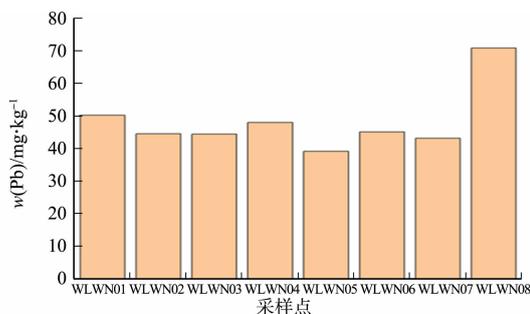
(b) Cu



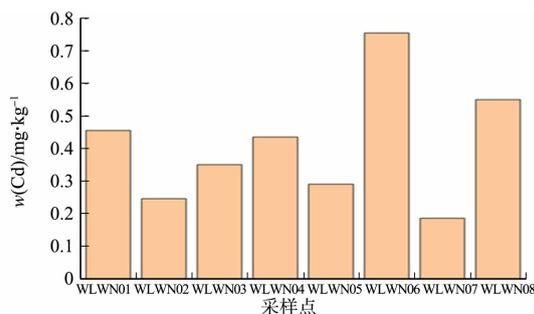
(c) Ni



(d) Cr



(e) Pb



(f) Cd

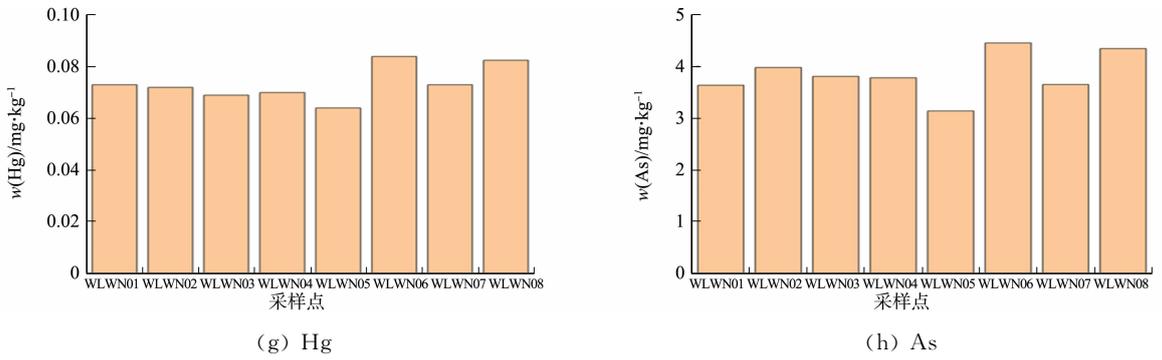


图2 杏林湾水库底泥中重金属元素的空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metal elements in sediment of Xinglin Bay Reservoir

库底泥中 Zn, Cu 可能主要来自于外源输入; Ni, Cr 的质量比空间分布呈现从后溪汇入处至入海口处逐渐增加, 从九天湖排洪渠和董任排洪渠交汇处至入海口处逐渐减小的特征, 推测从后溪汇入处至入海口处沿岸可能分布着 Ni, Cr 的污染源, 且大部分的 Ni, Cr 可能是由上游排洪渠汇入; Pb, Hg, As 的质量比空间分布较为均匀, 且 Hg, As 的质量比空间分布特征相似; Cd 的质量比空间分布随着水流方向起伏较大, 推测可能是受到周边农业活动的影响。

重金属元素的相关系数矩阵, 如表 5 所示。表 5 中: 上标“\*”“\*\*”“\*\*\*”分别表示  $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ ,  $P < 0.001$ 。

表5 重金属元素相关系数矩阵

Tab. 5 Matrix of correlation coefficients of heavy metal elements

元素	Zn	Cu	Ni	Cr	Pb	Cd	Hg	As
Zn	1.00	—	—	—	—	—	—	—
Cu	0.99*	1.00	—	—	—	—	—	—
Ni	0.84**	0.89	1.00	—	—	—	—	—
Cr	0.95*	0.98	0.94	1.00	—	—	—	—
Pb	0.96**	0.95	0.83	0.91	1.00	—	—	—
Cd	0.23**	0.23*	0.29***	0.26*	0.42***	1.00	—	—
Hg	0.50**	0.53*	0.54***	0.56*	0.62***	0.75***	1.00	—
As	0.38**	0.43*	0.45***	0.48*	0.56***	0.70***	0.91***	1.00

重金属来源之间的关系常用相关性进行分析<sup>[17-18]</sup>, 重金属相关性较好时, 表明重金属之间可能存在某种同源关系或者经历相同的迁移转化过程<sup>[19]</sup>。Zn 和 Cu, Ni, Cr, Pb 之间均有显著的相关性, 因此, 可将 Zn 作为其余 4 种元素的代表性元素进行监测。福建沿海地区和杏林湾水库流域上游分布着众多小型铅锌矿, 铅锌矿矿山尾矿和冶炼厂排放的废渣、含尘废气含有较多的 Cu, Pb, Zn 和 Ni<sup>[1,20]</sup>, 矿石开采产生的废水、废渣和粉尘经过地表径流和雨水冲刷进入上游流域, 最后汇入杏林湾水库, 在底泥中富集, 故底泥中的 Cu, Pb, Zn 和 Ni 可能来源于采矿活动。Cr 主要用于金属表面处理和皮革行业中<sup>[1]</sup>, 杏林湾水库周边分布着一些电子电气产品生产企业, 故推测底泥中 Cr 可能来源于工业生产活动。此外, Hg 和 As 之间也存在着很强的相关性, Hg 和 As 易受到化肥与农药的使用、牲畜粪便和生活垃圾影响<sup>[21]</sup>, 杏林湾水库上游分布着大量的农业用地, 附近人口密集, 故推测底泥中的 Hg, As 可能来源于周边生活垃圾和农业活动。Cd 元素和其他元素之间几乎没有相关性, 说明 Cd 有特殊来源, Cd 一般被看成使用农药或化肥的标志性元素<sup>[20]</sup>, 因此, 可推测杏林湾水库中的 Cd 可能来源于农业活动。

## 2.2 污染风险评价

对杏林湾水库底泥中的重金属进行污染风险评价可以了解杏林湾水库的具体污染状况。目前, 对底泥中重金属的污染情况进行评价的方法众多, 但各有不同侧重点和局限性<sup>[22-23]</sup>。为了更加全面科学地对杏林湾水库底泥中重金属污染状况进行评价, 将地积累指数法、潜在生态风险指数法、污染负荷指数法相结合进行综合评价。

2.2.1 地积累指数法 杏林湾水库底泥中重金属的  $I_{geo}$  值及评价结果, 分别如表 6, 7 所示。表 7 中:  $\eta$  为不同污染程度的采样点在所有采样点中所占比例。

表 6 杏林湾水库底泥中重金属的  $I_{geo}$  值

Tab. 6  $I_{geo}$  values of heavy metals in sediment of Xinglin Bay Reservoir

采样点	$I_{geo}$							
	Zn	Cu	Ni	Cr	Pb	Cd	Hg	As
XLWN01	1.83	1.99	0.24	-0.45	-0.76	3.24	0.85	-1.07
XLWN02	1.11	1.36	0.44	0.10	-0.94	2.35	0.83	-0.94
XLWN03	1.01	1.06	0.44	0.12	-0.94	2.87	0.77	-1.01
XLWN04	1.05	1.42	1.16	0.25	-0.83	3.18	0.79	-1.02
XLWN05	0.96	0.81	0.76	0.22	-1.12	2.59	0.66	-1.29
XLWN06	0.62	0.66	0.90	0.39	-0.92	3.98	1.05	-0.78
XLWN07	1.43	2.04	1.14	1.01	-0.98	1.95	0.85	-1.07
XLWN08	3.11	4.00	2.02	2.92	-0.27	3.52	1.03	-0.81
平均值	1.39	1.67	0.89	0.57	-0.85	2.96	0.85	-1.00

表 7 重金属地积累指数法的评价结果

Tab. 7 Evaluation results of heavy metals geo-accumulation index method

数据范围	污染程度	$\eta/\%$							
		Zn	Cu	Ni	Cr	Pb	Cd	Hg	As
$I_{geo} < 0$	无	0	0	0	12.5	100.0	0	0	100.0
$0 < I_{geo} < 1$	轻度	25.0	25.0	62.5	62.5	0	0	75.0	0
$1 \leq I_{geo} < 2$	偏中度	62.5	50.0	25.0	12.5	0	12.5	25.0	0
$2 \leq I_{geo} < 3$	中度	0	12.5	12.5	12.5	0	37.5	0	0
$3 \leq I_{geo} < 4$	偏重度	12.5	0	0	0	0	50.0	0	0
$4 \leq I_{geo} < 5$	重度	0	12.5	0	0	0	0	0	0
$I_{geo} \geq 5$	严重	0	0	0	0	0	0	0	0

由表 6 可知:杏林湾水库底泥中重金属元素地积累指数平均值从大到小为 Cd,Cu,Zn,Ni,Hg,Cr,Pb,As;重金属的地积累指数范围为-1.29~4.00,不同污染程度的采样点比例差别较大;Zn,Cu,Ni,Cr 和 Pb 的地积累指数在 XLWN08 处均较大,因为此处位于九天湖排洪渠和董任排洪渠交汇处,受上游铅锌矿开采活动和周边工业生产活动的影响,大量的 Zn,Cu,Ni,Cr 和 Pb 进入水体并在底泥中富集,故此处 Zn,Cu,Ni,Cr 和 Pb 的污染程度较高;Cd,Hg 在 XLWN01~XLWN04 的累积水平较高,因为这些采样点位于后溪支流汇入口下游,后溪流域上游和杏林湾水库周边分布着许多农业用地,大量含有 Cd,Hg 的农业废水随着地表径流进入杏林湾水库,在底泥中富集。

底泥中重金属地积累指数箱线图,如图 3 所示。图 3 中:IQR 为四分差。

由表 7 和图 3 可知:污染程度最高的 Cd 为偏中度-偏重度污染,偏中度污染、中度污染和重度污染的采样点比例分别为 12.5%,37.5%,50.0%;Zn 为轻度-偏重度污染,轻度污染、偏中度污染和偏重度污染采样点比例分别为 25.0%,62.5%和 12.5%;Cu 为轻度-重度污染,轻度污染、偏中度污染、中度污染和重度污染采样点比例分别为 25.0%,50.0%,12.5%和 12.5%;Ni 为轻度-中度污染,轻度污染、偏中度污染和中度污染采样点比例分别为 62.5%,25.0%,12.5%;Cr 有 12.5%的采样点为无污染状态,其余采样点为轻度-中度污染,轻度污染、偏中度污染和中度污染的采样点比例分别为 62.5%,12.5%,12.5%;Hg 为轻度-偏中度污染,轻度污染和偏中度污染采样点比例分别为 75.0%,25.0%;Pb,As 在各采样点的地积累指数均小于 0,为无污染状态。

由此可知,杏林湾水库底泥除 Pb,As 为无污染状态,Zn,Cu,Ni,Cr,Cd,Hg 均有不同程度的污染,且 Cd 的污染程度最高。

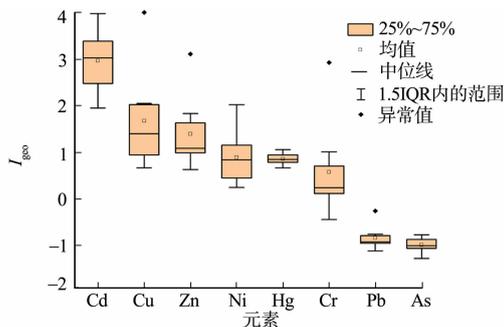


图 3 底泥中重金属地积累指数箱线图  
Fig. 3 Box plot of geo-accumulation index of heavy metals in sediment

2.2.2 潜在生态风险指数法 底泥中重金属的  $E_r^i$  值和 RI 值,如表 8 所示。由表 8 可知:杏林湾水库底泥中重金属潜在生态风险系数平均值从大到小为 Cd,Hg,Cu,Ni,As,Cr,Zn,Pb。

表 8 底泥中重金属的  $E_r^i$  值和 RI 值Tab. 8  $E_r^i$  values and RI values of heavy metals in sediment

采样点	$E_r^i$								RI	潜在风险
	Zn	Cu	Ni	Cr	Pb	Cd	Hg	As		
XLWN01	5.32	29.87	8.85	2.19	4.41	426.56	108.15	7.13	592.48	强
XLWN02	3.24	19.28	10.19	3.22	3.91	229.69	106.67	7.80	384.00	强
XLWN03	3.01	15.68	10.19	3.25	3.91	328.13	102.22	7.47	473.86	强
XLWN04	3.10	20.13	16.73	3.56	4.22	407.81	103.70	7.41	566.67	强
XLWN05	2.92	13.14	12.69	3.49	3.44	271.88	94.81	6.15	408.52	强
XLWN06	2.31	11.86	14.04	3.94	3.97	707.81	124.44	8.75	877.12	很强
XLWN07	4.04	30.93	16.54	6.03	3.79	173.44	108.15	7.16	350.08	强
XLWN08	12.92	119.92	30.38	22.74	6.24	515.63	122.22	8.53	838.57	很强
平均值	4.61	32.60	14.95	6.05	4.24	382.62	108.80	7.55	561.41	强

底泥中重金属潜在生态风险指数法评价结果,如表 9 所示。表 9 中: $\delta$  为不同风险等级的采样点在所有采样点中所占比例。

表 9 底泥中重金属潜在生态风险指数法评价结果

Tab. 9 Evaluation results of potential ecological risk index method of heavy metals in sediment

$E_r^i$	风险等级	$\delta/\%$							
		Zn	Cu	Ni	Cr	Pb	Cd	Hg	As
<40	低	100.0	87.5	100.0	100.0	100.0	0	0	100.0
40~80	中等	0	12.5	0	0	0	0	0	0
80~160	较强	0	0	0	0	0	0	100.0	0
160~320	强	0	0	0	0	0	37.5	0	0
$\geq 320$	极强	0	0	0	0	0	62.5	0	0

底泥中重金属潜在生态风险系数箱线图,如图 4 所示。由表 8,9 和图 4 可知:Zn,Ni,Cr,Pb 和 As 潜在生态风险系数最大值均小于 40,潜在生态风险程度属于低风险;而 Cu 除了在 XLWN08 处潜在生态风险程度为中等风险,其他采样点潜在生态风险均为低风险;Cd 有 37.5% 的采样点潜在生态风险程度为强风险,62.5% 的采样点潜在生态风险程度为极强风险,应引起重视,这也与地积累指数法评价结果相符;Hg 的潜在生态风险系数均位于 80~160,潜在生态风险程度属于较强风险。

从多种重金属的综合潜在生态风险指数来看,平均值达到 561.41,最大值为 877.12,最小值为 384.00;底泥中重金属潜在生态风险整体处于强和很强之间;有 2 个采样点为很强风险,6 个采样点为强风险。各采样点重金属潜在生态风险指数从大到小的排序为 XLWN06,XLWN08,XLWN01,XLWN04,XLWN03,XLWN05,XLWN02,XLWN07。XLWN06 和 XLWN08 的生态风险最大,要尤为重视,建议有关部门加大对其周边和上游生活污水和工业废水乱排乱放的整治力度,并推广和鼓励可持续采矿实践,采用环保技术和设备,尽量减少重金属污染物的排放。

2.2.3 污染负荷指数法 采用污染负荷指数法可以了解重金属在各个采样点及整个评价区域的污染状况<sup>[24]</sup>。污染负荷指数法计算结果及评价结果,如表 10,11 所示。由表 10,11 可知:整个杏林湾水库底泥中重金属的 PLI 范围为 2.05~5.75;除了在 XLWN08 处污染程度为极强污染外,其他采样点污染程度均为强污染;经计算得杏林湾整个评价区域的污染负荷指数为 2.63,故杏林湾水库整体为强污染;水库污染负荷指数的空间分布总体呈现后溪支流汇入处和九天湖排洪渠与董任排洪渠交汇处至水

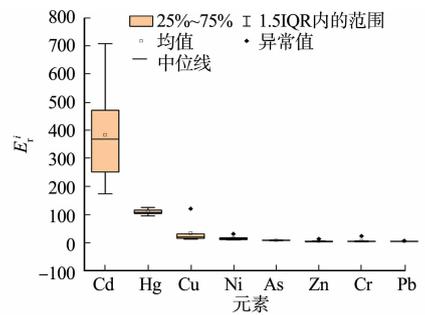


图 4 底泥中重金属潜在生态风险系数箱线图  
Fig. 4 Box plot of potential ecological risk factors of heavy metals in sediment

表 10 污染负荷指数法计算结果

Tab. 10 Calculation results of pollution load index method

采样点	CF <sub>i</sub>								PLI
	Zn	Cu	Ni	Cr	Pb	Cd	Hg	As	
XLWN01	5.32	5.97	1.77	1.10	0.88	14.22	2.70	0.71	2.49
XLWN02	3.24	3.86	2.04	1.61	0.78	7.66	2.67	0.78	2.18
XLWN03	3.01	3.14	2.04	1.63	0.78	10.94	2.56	0.75	2.18
XLWN04	3.10	4.03	3.35	1.78	0.84	13.59	2.59	0.74	2.52
XLWN05	2.92	2.63	2.54	1.75	0.69	9.06	2.37	0.61	2.05
XLWN06	2.31	2.37	2.81	1.97	0.79	23.59	3.11	0.87	2.50
XLWN07	4.04	6.19	3.31	3.01	0.76	5.78	2.70	0.72	2.60
XLWN08	12.92	23.98	6.08	11.37	1.25	17.19	3.06	0.85	5.75

库中心降低, 水库中心至入海口处升高的特征, 这与流域内水流走向一致, 推测杏林湾水库中重金属一方面来自于上游支流的汇入。此外, XLWN04 处污染负荷指数高于周边区域, 鉴于此处周围工业用地较多, 推测是受到周边地区工业废水排放的影响。

综上, 合理推测杏林湾水库底泥中重金属污染主要来源于周边地区人类活动排放和上游支流的汇入。

### 3 结论

1) 杏林湾水库底泥中除 As, Pb 的质量比平均值没有超过背景值外, Cd, Cu, Zn, Ni, Cr 和 Hg 质量比平均值分别达到背景值的 13.67, 6.52, 4.61, 2.99, 3.03, 2.33 倍。Zn, Cu, Cr 变异系数较大 (>50%), 尤其是 Cu 和 Cr, 变异系数均大于 100%, 受人为因素干扰显著。底泥中 Zn, Cu 的质量比空间分布呈现沿水流方向逐渐减小的特征, Ni, Cr 的质量比空间分布呈现为从后溪汇入处至入海口处逐渐增加, 从九天湖排洪渠和董任排洪渠交汇处至入海口处逐渐减小, Pb, Hg 和 As 的质量比空间分布较为均匀, Cd 的质量比空间分布随着水流方向起伏较大。

2) 相关性分析表明, 这 8 种重金属来源各有不同, 其中, Cu, Pb, Zn 和 Ni 可能来源于采矿活动, Hg, As 可能来源于周边生活垃圾和农业活动, Cd 可能来源于农业活动。

3) 地积累指数法评价结果表明, 除 Pb, As 为无污染状态外, Zn, Cu, Ni, Cr, Cd 和 Hg 均呈现不同程度的污染, 且 Cd 的污染程度最高。潜在生态风险指数法评价结果表明, 杏林湾水库底泥中重金属潜在生态风险整体处于强和很强之间, Cu 的潜在生态风险程度为低-中等风险, Cd 的潜在生态风险程度为强-极强风险, Hg 的潜在生态风险程度为较强风险, 其余重金属均为低风险。污染负荷指数法评价结果表明, 杏林湾水库底泥中重金属污染主要来源于周边地区人类活动排放和上游支流的汇入。

### 参考文献:

- [1] 沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 等. APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源[J]. 环境科学, 2022, 43(5): 2476-2488. DOI:10.13227/j.hj.kx.202108337.
- [2] ZHAI Bin, ZHANG Xilin, WANG Libo, *et al.* Concentration distribution and assessment of heavy metals in surface sediments in the Zhoushan Islands coastal sea, East China Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, 164(10): 112096. DOI:10.1016/j.marpolbul.2021.112096.
- [3] LIAO Jianbo, CUI Xinyue, FENG Hai, *et al.* Environmental background values and ecological risk assessment of heavy metals in watershed sediments: A comparison of assessment methods[J]. Water, 2021, 14(1): 51. DOI:10.3390/w14010051.
- [4] 张国涵, 苏涛, 杨耀雷, 等. 昆明市主城区主要入滇河道重金属污染评价[J]. 环境科学导刊, 2022, 41(3): 74-79.

表 11 底泥中重金属污染负荷指数法评价结果

Tab. 11 Evaluation results of heavy metal pollution load index method in sediment

采样点	PLI	污染等级	污染程度
XLWN01	2.49	II	强污染
XLWN02	2.18	II	强污染
XLWN03	2.18	II	强污染
XLWN04	2.52	II	强污染
XLWN05	2.05	II	强污染
XLWN06	2.50	II	强污染
XLWN07	2.60	II	强污染
XLWN08	5.75	III	极强污染

DOI:10.13623/j.cnki.hkdk.2022.03.003.

- [5] 胡明,薛娇,严玉林,等.北京市特征河流沉积物重金属污染评价与来源解析[J].中国给水排水,2021,37(23):73-81. DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.23.013.
- [6] 王昕,霍吉祥,马福恒,等.宿鸭湖水库沉积物重金属含量分析与评价[J].人民黄河,2020,42(6):84-88. DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2020.06.017.
- [7] KARAOUZAS I,KAPETANAKI N,MENTZAFOU A, *et al.* Heavy metal contamination status in Greek surface waters: A review with application and evaluation of pollution indices[J]. Chemosphere,2021,263:128192. DOI:10.1016/j.chemosphere.2020.128192.
- [8] 汤金来,赵宽,胡睿鑫,等.滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价[J].环境科学,2023,44(6):3562-3572. DOI:10.13227/j.hjcx.202208031.
- [9] 马杰,刘萍,刘今朝,等.重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析[J].环境科学,2022,43(12):5698-5709. DOI:10.13227/j.hjcx.202202123.
- [10] 中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990.
- [11] 尹芳,封凯,尹翠景,等.青海典型工业区耕地土壤重金属评价及源解析[J].中国环境科学,2021,41(11):5217-5226. DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210506.002.
- [12] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. Water Research,1980,14(8):975-1001. DOI:10.1016/0043-1354(80)90143-8.
- [13] TOMLINSON D L,WILSON J G,HARRIS C R, *et al.* Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index[J]. Helgolander Meeresuntersuchungen,1980,33(1):566-575. DOI:10.1007/BF02414780.
- [14] 祝培甜,赵中秋,陈勇,等.江苏省某镇土壤重金属污染评价[J].环境工程学报,2017,11(4):2535-2541. DOI:10.12030/j.cjee.201601016.
- [15] 解兴春,白梅,李应飞,等.底泥重金属污染评价方法对比分析:以云南某地河流、湖泊为例[J].环境科学导刊,2022,41(2):79-85. DOI:10.13623/j.cnki.hkdk.2022.02.006.
- [16] 李军,李旭,李开明,等.基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析[J/OL].环境科学:1-16(2023-07-25)[2023-12-21]. <https://doi.org/10.132227/j.hjcx.202304165>.
- [17] 谢龙涛,潘剑君,白浩然,等.基于GIS的农田土壤重金属空间分布及污染评价:以南京市江宁区某乡镇为例[J].土壤学报,2020,57(2):316-325. DOI:10.11766/trxb201809010441.
- [18] 王海洋,韩玲,谢丹妮,等.矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价[J].环境科学,2022,43(4):2104-2114. DOI:10.13227/j.hjcx.202106218.
- [19] LUO Fei,ZHANG Fawang,ZHANG Wenting, *et al.* Distribution, ecological risk, and source identification of heavy metal(loid)s in sediments of a headwater of Beijiing River affected by mining in Southern China[J]. Toxics,2024,12(2):117. DOI:10.3390/TOXICS12020117.
- [20] WANG Yazhu,DUAN Xuanjun,WANG Lei. Spatial distribution and source analysis of heavy metals in soils influenced by industrial enterprise distribution: Case study in Jiangsu Province[J]. Science of the Total Environment,2020,710:134957. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.134953.
- [21] 韩双宝,袁磊,张秋霞,等.拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价[J/OL].环境科学:1-12(2023-08-25)[2023-12-21]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202305101>.
- [22] WANG Na. Ecological risk assessment of heavy metals in soils around mining area: Comparison of different assessment methods[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2020,525(1):012074. DOI:10.1088/1755-1315/525/1/012074.
- [23] 王斐,黄益宗,王小玲,等.江西钨矿周边土壤重金属生态风险评价:不同评价方法的比较[J].环境化学,2015,34(2):225-233. DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2015.02.2014061802.
- [24] 孙晶,李伟,吕学斌,等.中国重要湿地土壤中汞、砷的分布与污染概况[J].环境科学与技术,2021,44(9):100-110. DOI:10.19672/j.cnki.1003-6504.0648.21.338.

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)