

秦红. 太湖沿岸湖区底泥重金属污染分布特征及生态风险评价[J]. 净水技术, 2024, 43(6):161-168,178.

QIN H. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments in coastal area of Taihu Lake [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 161-168,178.

## 太湖沿岸湖区底泥重金属污染分布特征及生态风险评价

秦 红\*

(上海市青浦区水文勘测队,上海 201799)

**摘 要** 为进一步探究太湖底泥污染状况及环境治理措施,研究以太湖各沿岸湖区底泥重金属为研究对象,通过测定 229 个样点底泥中 8 种重金属的含量,分析了其分布特征、来源及生态风险。结果显示,太湖表层底泥中 Zn、Cr、Ni、Cu、Pb、As、Cd、Hg 的平均值分别为  $(126.86 \pm 73.31)$ 、 $(90.25 \pm 47.66)$ 、 $(44.62 \pm 24.30)$ 、 $(39.36 \pm 28.46)$ 、 $(36.86 \pm 7.84)$ 、 $(11.65 \pm 5.33)$ 、 $(0.86 \pm 1.31)$ 、 $(0.08 \pm 0.04)$  mg/kg,除 Hg 外,其余 7 种重金属含量均高于背景值。地积累指数评价表明,Hg、As、Cr、Cd 整体上呈清洁状态,Cu、Zn、Pb、Ni 整体上呈轻度污染状态;潜在生态风险评价结果显示,除在 0~30 cm 深度内,西北沿岸区为重度潜在生态风险和竺山湖为中等生态风险外,其他湖区在 0~100 cm 内均为低潜在生态风险。相关分析及主成分分析(PCA)结果表明,Zn、Cu、Ni、Cr、Hg 和 Pb 间具有很强的同源性,为污染物的第一主成分,多为工业污染源;Cd 为第二主要污染物,和其他组分同源性小,与农业污染源有关。相较 2003 年,太湖表层底泥各沿岸湖区平均的 Cr、Cu 含量上升,Hg、Pb 含量降低。

**关键词** 重金属 底泥 分布特征 生态风险评价 太湖

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)06-0161-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.06.019

## Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Coastal Area of Taihu Lake

QIN Hong\*

(Shanghai Qingpu District Hydrological Survey Team, Shanghai 201799, China)

**Abstract** To further explore the pollution status and environmental treatment measures of the sediments in Taihu Lake, this study monitored the contents of eight heavy metals in the sediments of 229 sampling points in different bays of Taihu Lake, analyzed their distribution characteristics, sources and ecological risks. The results showed that the average content of Zn, Cr, Ni, Cu, Pb, As, Cd, Hg in the surface sediments of Taihu Lake was  $(126.86 \pm 73.31)$ ,  $(90.25 \pm 47.66)$ ,  $(44.62 \pm 24.30)$ ,  $(39.36 \pm 28.46)$ ,  $(36.86 \pm 7.84)$ ,  $(11.65 \pm 5.33)$ ,  $(0.86 \pm 1.31)$ ,  $(0.08 \pm 0.04)$  mg/kg, except for Hg were higher than its background value. The geoaccumulation index indicated that the Hg, As, Cr, and Cd were generally non-polluted, the Cu, Zn, Pb and Ni amount to a low pollution state. The results of potential ecological risk index showed that, except for the northwestern coastal area had a strong potential ecological risk and the Zhushan Lake had a medium ecological risk in the depth of 0~30 cm, the other lake bays had a low potential ecological risk within the depth of 0~100 cm. Correlation analysis and PCA analysis showed that Zn, Cu, Ni, Cr, Hg and Pb had strong homology, and they were the first major component of pollutants, mostly from industrial pollution sources. Cd was the second major pollutant, which had little homology with other components and was related to agricultural pollution sources. Compared to 2003, the average Cr and Cu contents in the surface sediment of coastal lake areas has increased, while the contents of Hg and Pb has decreased.

**Keywords** heavy metal sediment distribution characteristic ecological risk assessment Taihu Lake

[收稿日期] 2023-10-21

[通信作者] 秦红(1974—),女,硕士,高级工程师,主要从事水文水资源监测与分析评价工作,E-mail:13817333325@163.com。

重金属因其强毒性、不可降解特性、持久性及生物富集效应等特征<sup>[1]</sup>,成为影响水环境质量的重要因素。底泥是重金属在湖泊生态系统中的主要累积库<sup>[2]</sup>。外源输入的重金属随悬浮物等通过吸附、沉

淀等迁移作用在底泥中不断蓄积<sup>[3]</sup>,当沉积物-水界面物化条件改变时,易造成二次污染<sup>[4]</sup>,并通过食物链等途径对水生态系统构成潜在危害风险<sup>[5]</sup>,对人体健康造成威胁<sup>[6]</sup>。底泥疏浚是治理湖泊内源污染的有效手段<sup>[7]</sup>。

太湖是我国第三大淡水湖泊,湖泊水域面积为 2 356.3 km<sup>2</sup>,为典型的浅水湖泊。太湖流域是我国城市化水平最高的地区之一,故污染负荷重,重金属外来污染源主要有工业生活废水、农村面源污染、船舶污染等。太湖湖湾众多,生态类型多样,水-土界面物质交换的环境条件和规律复杂。近年来,相关学者对太湖湖区及流域沉积物重金属的分布特征<sup>[8]</sup>、赋存形态<sup>[9]</sup>、迁移转化<sup>[10]</sup>、污染历史<sup>[11]</sup>等情况进行了探究。太湖自 2008 年起进行生态清淤,至 2017 年累计清淤面积达到 131 km<sup>2</sup>,总计 3 910 万 m<sup>3</sup>,在一定程度上缓解了太湖的富营养化问题。

为进一步探究太湖底泥重金属的污染特征,本研究以 2018 年太湖污染底泥调查成果为依据,通过与 2003 年底泥调查成果进行对比,分析了底泥重金属含量的历史变化,探究太湖重点沿岸湖区底泥重

金属的平面及垂直分布特征,运用累积指数和潜在生态危害指数对重金属的生态风险进行评价,并利用相关性分析和主成分分析(PCA)追溯重金属的来源,以为生态修复治理提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 样点与样品采集

太湖底泥采样于 2018 年 10 月—11 月进行,竺山湖、梅梁湖、贡湖、东太湖以 2 km×2 km 正方形网格布设取样点;西北沿岸区及西南沿岸区,沿岸线 50 m 和 1 500 m 布设采样线,在采样线上间隔 1 500 m 布设采样点;主要入湖河口在沿水流方向向湖区 1 km 处采样;沿岸各湖区边界外扩 5 km 设置“湖心区近岸边”区域取样。采样点集中分布在蓝藻重点暴发区域、出入湖口和取水区域、太湖清淤工程区域,部分点位参照 2003 年底泥调查,共设置 229 个采样点。采样点分布如图 1 所示。

2018 年底泥于 0~100 cm 深度分 5 层(0~10、10~20、20~30、30~50、50~100 cm)采集,不同层位的底泥,每层取样 2 L,去除上部残余湖水后搅拌均匀装入密封袋,样品均冷藏保存,并于取样当天运回

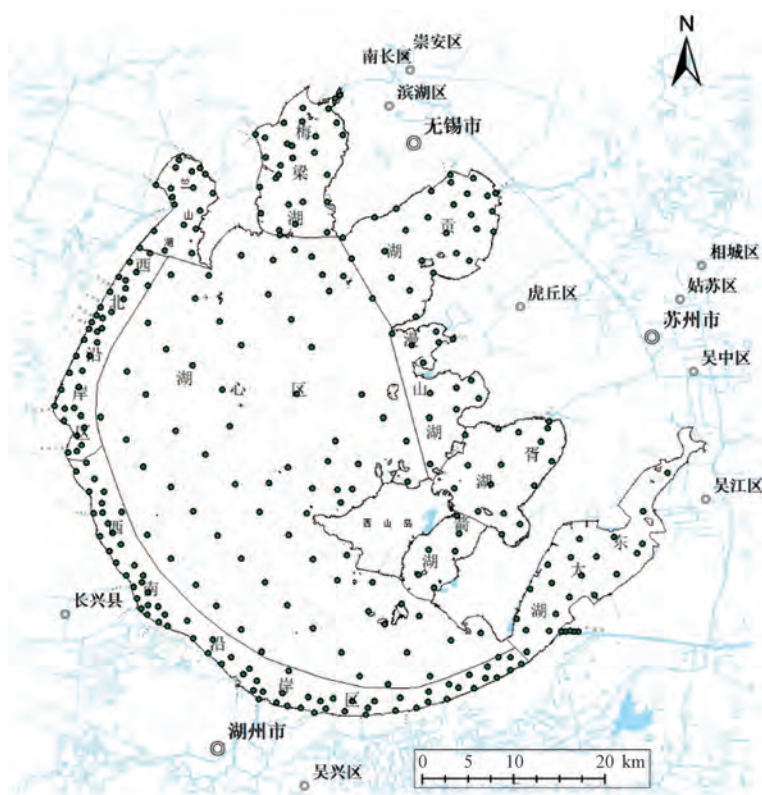


图 1 太湖湖区划分及采样点

Fig. 1 Regions and Sampling Sites of Taihu lake

实验室化验检测 8 种重金属砷 (As)、汞 (Hg)、铜 (Cu)、铅 (Pb)、锌 (Zn)、镉 (Cd)、镍 (Ni)、铬 (Cr)。2003 年底泥化验指标为 Hg、As、Cu、Pb、Cr。

### 1.2 样品分析测试方法

准确称取 0.250 0 g 经风干、研磨至粒径小于 0.149 mm (100 目) 的样品, 运用硝酸-氢氟酸-高氯酸 (HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>) 法进行消解后, 采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪 (ICP-MS) 测定 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb, 浓度直接读取; 称取 0.2~0.3 g 试料, 在沸水浴中用硝酸-盐酸 (HNO<sub>3</sub>-HCl) 进行消解, 以硼氢化钾 (KBH<sub>4</sub>) 为还原剂, 冷原子荧光法测定 Hg; 吸取消解试液, 用硫脲溶液+抗坏血酸混合溶液稀释, 以 KBH<sub>4</sub> 溶液为还原剂, 氢化物原子荧光法测定 As; 运用重铬酸钾氧化-还原容量法测定有机质 (OM) 含量。

### 1.3 评价方法

#### 1.3.1 地累积指数法

地累积指数法由德国学者 Muller 于 1969 年提出<sup>[12]</sup>, 目前被广泛应用于底泥沉积物重金属污染的评价方法。计算如式 (1)。

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (k \times B_i)] \quad (1)$$

其中:  $C_i$ ——底泥中第  $i$  种重金属的质量分数, mg/kg;

$B_i$ ——第  $i$  种重金属的地球化学背景值, 本研究中 As、Hg、Cr、Pb、Cd、Cu、Zn、Ni 的背景值分别取 9.4、0.11、79.3、15.7、0.27、18.9、59、19.5 mg/kg<sup>[13]</sup>;

$I_{geo}$ ——地累积指数值;

$k$ ——校正各地区背景值差异取 1.5。

$I_{geo}$  与重金属污染等级的关系如表 1 所示。

表 1  $I_{geo}$  与污染程度分级

Tab. 1  $I_{geo}$  and Pollution Degree Classification of Sediments

$I_{geo}$	≤0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5
污染等级	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	清洁	轻度污染	偏中度污染	中度污染	偏重污染	重污染	严重污染

#### 1.3.2 潜在生态危害指数

潜在生态危害指数法是根据重金属性质及环境行为特点, 从沉积学角度对重金属污染进行评价的方法。该方法综合考虑了重金属含量、多元素协同作用、污染浓度以及环境对重金属污染敏感性等因素。计算如式 (2)~式 (3)。

$$E_i = T_i \frac{C_i}{C_o} \quad (2)$$

$$R_1 = \sum_{i=1}^n E_i \quad (3)$$

其中:  $E_i$ ——重金属  $i$  的潜在生态风险指数;

$C_o$ ——重金属  $i$  的地理背景值, mg/kg;

$R_1$ ——综合潜在生态风险指数 (RI) 的值;

$T_i$ ——重金属  $i$  的毒性响应因子, 取 As=10, Cd=30, Cr=2, Cu=5, Hg=40, Ni=2, Pb=5, Zn=1。

RI 等级划分如表 2 所示。

### 1.4 数据统计分析

运用 Excel 2019 进行数据统计, SPSS 22.0 进行 Person 相关性分析和 PCA, 采用 ArcGIS 10.2 和

表 2 潜在生态风险指数分级等级

Tab. 2 Potential Ecological Risk Index and Classification

$E_i$	单项风险等级	RI	综合潜在生态风险等级
$E_i < 40$	低	RI < 150	低潜在生态风险
$40 \leq E_i < 80$	中	$150 \leq RI < 300$	中潜在生态风险
$80 \leq E_i < 160$	较重	$300 \leq RI < 600$	较高潜在生态风险
$160 \leq E_i < 320$	重	RI ≥ 600	很高潜在生态风险
$E_i \geq 320$	严重		

Origin 2017 进行重金属及污染风险的空间分布图绘制。

## 2 结果与讨论

### 2.1 底泥重金属的分布特征

太湖各沿岸湖区表层底泥平均重金属含量如图 2 所示。Zn、Cr、Ni、Cu、Pb、As、Cd、Hg 的湖区均值分别为各自背景值的 2.15、1.14、2.29、2.08、2.35、1.24、3.19、0.73 倍, 综上, 除 Hg 外, 各重金属均高于其背景值<sup>[13]</sup>。太湖沿岸湖区表层底泥 (0~10 cm) 各重金属含量的平面分布如表 3 所示。

各重金属的变异系数 (CV) 位于 21.27%~152.33%。CV>20% 表明人为活动是其空间差异的

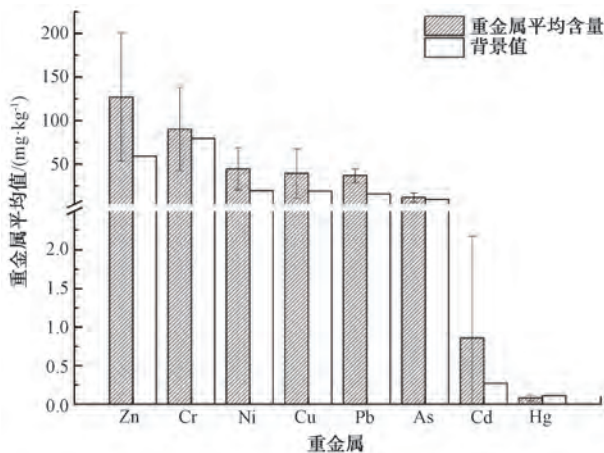


图2 太湖表层底泥湖区平均重金属含量

Fig. 2 Average Content of Heavy Metals in Surface Sediments Area of Taihu Lake

主要驱动因素<sup>[8]</sup>。表层底泥中竺山湖的 Hg、Cu、Pb、Zn、Ni 和 Cr 含量明显高于其他湖区, As 和 Cd 的含量也较高, 推测因为主要入湖河口太滬运河、殷村港、雅浦港等的工农业废水和生活污水排入, 湖湾流水不畅致污染物累积, 且竺山湖藻类聚集严重。梅梁湖和西北沿岸区的重金属含量次之, 西南沿岸区和东太湖含量较低。

太湖各湖区在 0~100 cm 底泥深度内重金属含量的分布如图 3 所示。Hg、Cu、Zn、Pb、Ni、Cr、Cd 含量的垂向变化趋势具有相似性, 重金属集中分布在 0~30 cm 深度内, 而在 30~100 cm 内含量相对较低, 呈浅层含量高于深层的趋势。重金属在底泥的富集过程受众多因素影响, 因其在沉积物的迁移能力差, 易于在表层积累<sup>[1]</sup>, 可能与 20 世纪 50 年代

表3 不同湖区表层底泥(0~10 cm)重金属含量

Tab. 3 Heavy Metal Contents in Surface Sediments (0~10 cm) of Different Lake Areas

湖区	项目	As/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	Hg/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	Cu/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	Pb/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	Zn/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	Ni/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	Cd/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	Cr/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
竺山湖	范围	7.53~19.90	0.08~0.28	29.80~211.00	21.60~60.80	97.20~525.00	35.20~170.00	0.48~1.47	65.10~412.00
	均值	15.00±3.92	0.17±0.05	115.41±49.13	45.89±11.00	322.66±112.57	109.32±34.92	0.84±0.23	214.3±85.96
梅梁湖	范围	5.59~14.80	0.05~0.11	22.00~68.20	20.90~71.40	69.00~185.00	27.80~69.70	0.24~0.55	54.50~125.00
	均值	9.85±1.93	0.08±0.01	43.16±11.47	36.51±8.45	130.20±30.08	52.17±7.93	0.37±0.07	96.44±14.59
贡湖	范围	6.46~41.50	0.03~0.12	24.20~77.80	24.80~49.60	71.10~269.00	27.60~65.30	0.14~1.81	58.10~130.00
	均值	16.01±7.93	0.06±0.02	40.80±14.12	37.61±7.10	131.13±49.83	46.97±9.66	0.56±0.38	95.77±18.72
西北沿岸区	范围	4.84~10.60	0.06~0.13	17.20~48.20	19.00~46.00	64.10~184.00	17.90~81.20	0.30~13.90	41.30~121.00
	均值	8.49±1.52	0.08±0.02	33.85±6.22	35.13±7.87	122.27±24.01	39.94±11.91	2.53±2.50	73.89±16.07
西南沿岸区	范围	6.49~39.60	0.05~0.11	14.40~47.70	24.10~48.50	67.00~141.00	20.20~56.80	0.21~1.39	47.20~101.00
	均值	11.65±5.35	0.07±0.01	26.56±4.86	36.49±6.05	95.50±14.64	32.22±6.11	0.55±0.22	72.06±12.70
东太湖	范围	4.51~22.80	0.03~0.09	15.20~34.80	22.00~44.30	45.70~115.00	15.40~46.20	0.12~0.49	41.20~97.50
	均值	11.29±4.81	0.06±0.02	27.02±5.72	33.92±6.15	83.43±17.91	32.25±8.55	0.25±0.11	69.40±15.51
湖心区	范围	5.51~15.90	0.05~0.10	21.90~34.00	27.40~45.70	67.20~128.00	23.00~57.60	0.22~1.09	55.10~93.80
	均值	10.85±2.40	0.07±0.01	29.34±3.65	38.39±5.05	101.36±15.12	41.04±9.05	0.50±0.21	76.54±9.98
近岸边	范围	4.51~41.50	0.03~0.28	14.40~211.00	19.00~71.40	45.70~525.00	15.40~170.00	0.12~13.90	41.20~421.00
	平均	11.65±5.33	0.08±0.04	39.36±28.46	36.86±7.84	126.86±73.31	44.62±24.30	0.86±1.31	90.25±47.66

以来太湖流域工业经济快速发展有关。Hg、Pb、Cd 具有大致相同的垂向变化趋势, 在 0~30 cm 深度含量变化不大, 在 30~100 cm 深度含量显著降低且相对稳定; Cu、Zn、Ni、Cr 在竺山湖表现出随深度增加而减小的趋势, 在其他湖区垂直方向的变化不明显。As 含量的垂向变化无明显规律, 竺山湖和贡湖在 0~30 cm 深度内含量较高, 深度向下 As 含量快速降

低, 其他湖区的含量最低值在深度 20~30 cm。深度为 0~30 cm, 竺山湖的 Hg、Cu、Pb、Zn、Ni 和 Cr 含量明显高于其他湖区, 西北沿岸区的 Cd 浓度显著较高。

## 2.2 $I_{geo}$ 评价

各湖区深度(0~100 cm)底泥中  $I_{geo}$  均值结果如表 4 所示, 湖区平均的  $I_{geo}$  均值为 Ni>Pb>Zn>Cu>

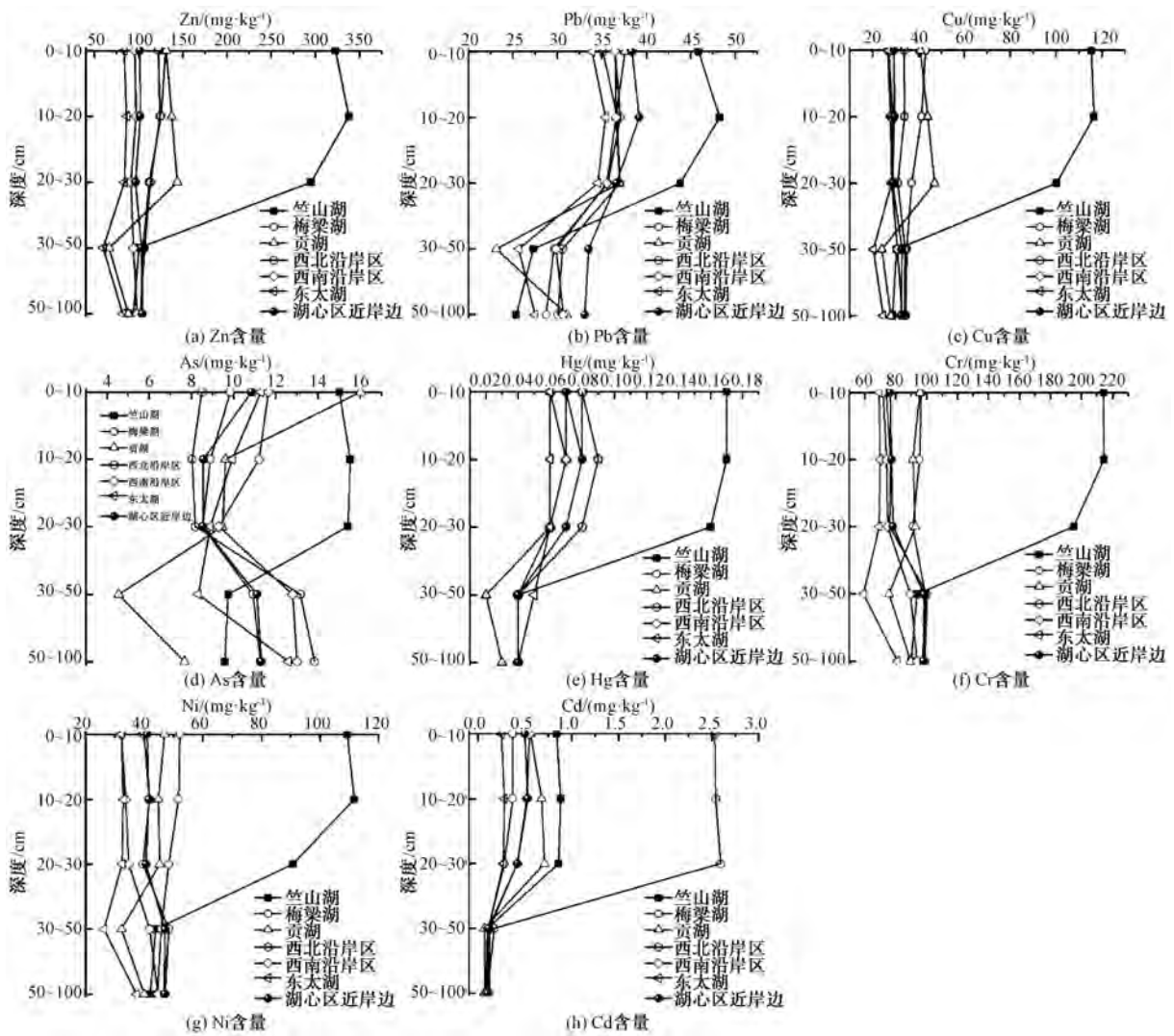


图3 不同湖区重金属含量垂向变化

Fig. 3 Vertical Distributions Characteristics of Heavy Metals in Different Lake Areas

Cr>As>Hg。As 和 Hg 的  $I_{geo}$  在各湖区均小于 0, 可视为无污染状态。Cd(除西北沿岸区)和 Cr(除竺山湖)  $I_{geo}$  反映的污染水平总体为无污染状态。Pb 在各湖区的  $I_{geo}$  值均为 1, 均为轻度污染。Cu 和 Zn 在各湖区的污染等级除在东太湖为无污染, 在竺山湖为偏中度污染外, 其他湖区均为轻度污染。Ni 在各重金属中污染程度最高, 在竺山湖为中度污染, 其他湖区均为轻度污染。除 Cd 的  $I_{geo}$  最大值出现在西北沿岸区外, 其他重金属  $I_{geo}$  的最高值均出现在竺山湖, 表明竺山湖的 As、Hg、Cu、Pb、Zn、Ni、Cr 金属污染最重, 而西北沿岸区的 Cd 污染最严重。

### 2.3 RI 评价

各湖区底泥 RI 结果如图 4 所示。太湖各湖区

RI 呈现随深度下降趋势。各湖区平均在 0~30 cm 深度(RI 均值为 160.49~164.52) 重金属污染均为中等潜在生态风险, 在 30~100 cm 内, 各湖区平均(RI 均值为 65.63~66.76) 处于低潜在生态风险。深度为 0~30 cm, RI 值及潜在生态风险为西北沿岸区>竺山湖>贡湖>西南沿岸区>梅梁湖>东太湖。梅梁湖、贡湖、西南沿岸区、东太湖和湖心区近岸边在 0~100 cm 深度内, RI 均值均<150, 重金属污染较轻, 均处于低潜在生态风险。竺山湖在 0~30 cm 深度(RI 均值为 229.47~245.46) 重金属污染为中等生态风险, 其后随深度下降为低潜在生态风险(RI 均值为 57.60~63.52)。西北沿岸区部分湖域在 0~30 cm 深度内(RI 均值为 349.04~353.54) 重金属为

表 4 太湖各湖区底泥重金属  $I_{geo}$  与污染等级  
Tab. 4  $I_{geo}$  and Pollution Grade of Heavy Metal in Sediments of Taihu Lake

湖区	As		Hg		Cu		Pb		Zn		Cd		Ni		Cr	
	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级
竺山湖	-0.15	0	-0.81	0	1.20	2	0.65	1	1.16	2	-0.19	0	1.31	2	0.33	1
梅梁湖	-0.52	0	-1.48	0	0.43	1	0.50	1	0.38	1	-0.91	0	0.73	1	-0.31	0
贡湖	-0.69	0	-1.93	0	0.33	1	0.47	1	0.30	1	-0.61	0	0.50	1	-0.42	0
西北沿岸区	-0.49	0	-1.41	0	0.24	1	0.52	1	0.36	1	0.94	1	0.56	1	-0.50	0
西南沿岸区	-0.29	0	-1.60	0	0.04	1	0.52	1	0.10	1	-0.53	0	0.34	1	-0.56	0
东太湖	-0.48	0	-1.63	0	-0.14	0	0.40	1	-0.17	0	-1.21	0	0.13	1	-0.78	0
湖心区近岸边	-0.50	0	-1.52	0	0.11	1	0.62	1	0.20	1	-0.63	0	0.57	1	-0.48	0
湖区平均	-0.39	0	-1.44	0	0.38	1	0.53	1	0.38	1	-0.12	0	0.63	1	-0.36	0



注: I 为低潜在生态风险; II 为中潜在生态风险; III 为较高潜在生态风险; IV 为很高潜在生态风险。

图 4 潜在生态风险指数空间分布

Fig. 4 Spatial Distribution of Potential Ecological Risk

重度潜在生态风险,而在 30~100 cm (RI 均值为 67.37~75.82) 为低潜在生态风险。推测西北沿岸区的重金属污染与高含量的 Cd 有关。

#### 2.4 重金属与 OM 的相关性分析与重金属溯源分析

不同深度底泥重金属及 OM 的 Person 相关分

析结果如表 5 所示,PCA 结果如表 6 所示。太湖底泥重金属之间具有很强的相关性,表明重金属的污染源或地球化学行为具有相似性<sup>[14]</sup>,推测与人为工业污染源有关。太湖底泥中 OM 与 Hg 含量呈显著正相关,有机质和 Hg 之间存在较强的络合或螯合作用及吸附、离子交换等反应。OM 与其他重金

属相关性不显著,不是影响太湖底泥重金属的主要因子。Hg 和 Pb 与其他重金属均有显著的正相关性( $p < 0.05$ ), As、Cu、Zn、Ni、Cr 与除 Cd 外的其他 6 种重金属均显著正相关( $p < 0.05$ )。Cr 的污染源可能为皮革等工业企业。Pb 源自宜兴、武进的橡胶和聚氯乙烯(PVC)合成工业、航船的燃油燃烧,

以及含 Pb 尾气的大气沉降。Cu 与 Zn 的正相关系数很高(0.994),推测与周围金属加工业发达,电镀废水产生大量 Cu、Zn 有关。Ni 源于煤炭燃烧,无锡等地的能源消费结构中煤炭占主导地位<sup>[15]</sup>。Cd 仅与 Hg、Pb 极显著正相关( $p < 0.01$ ),即与其他组分的关系不密切。

表 5 底泥重金属含量与 OM 间的相关性  
Tab. 5 Correlations of Heavy Metals and OM in Sediments

指标	OM	Hg	As	Cu	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr
OM	1	0.336*	0.312	0.293	0.267	0.260	-0.047	0.227	0.225
Hg	-	1	0.419*	0.885**	0.880**	0.909**	0.448**	0.830**	0.784**
As	-	-	1	0.584**	0.398*	0.581**	-0.141	0.609**	0.642**
Cu	-	-	-	1	0.725**	0.994**	0.188	0.978**	0.972**
Pb	-	-	-	-	1	0.762**	0.431**	0.673**	0.605**
Zn	-	-	-	-	-	1	0.269	0.972**	0.959**
Cd	-	-	-	-	-	-	1	0.132	0.056
Ni	-	-	-	-	-	-	-	1	0.987**
Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	1

注: \* 表示在  $p < 0.05$  水平上显著相关, \*\* 表示在  $p < 0.01$  水平上极显著相关。

表 6 太湖底泥重金属及 OM 的 PCA 分析结果  
Tab. 6 Results of Principal Component Analysis in Sediments

项目	第一主成分	第二主成分
特征值	5.866	1.361
贡献率	65.18%	15.12%
累计贡献率	65.18%	80.30%
OM	0.347	-0.284
Hg	0.929	0.271
As	0.641	-0.511
Cu	0.981	-0.055
Pb	0.813	0.331
Zn	0.988	0.023
Cd	0.265	0.883
Ni	0.960	-0.113
Cr	0.940	-0.201

从太湖底泥污染物中提取出 2 个主成分,特征值分别为 5.866 和 1.361,反映了 80.30% 的污染物信息。第一主成分上 Zn、Cu、Ni、Cr、Hg 和 Pb 均具有较高的正载荷,解释了 65.18% 的总方差,且重金属 Zn、Cu、Ni、Cr、Hg 和 Pb 之间均有极显著的正相关性( $p < 0.01$ ),进一步反映了底泥重金属污染的同源性。第二主成分在 Cd 上具有较高正载荷,解释了 15.12% 的总方差,表明 Cd 也是太湖底泥的主要

污染物,但与其他重金属的同源性较小,推测与 Cd 污染集中于西北沿岸区,或者污染源除工业源外,多与传统肥料等农业面源污染<sup>[16]</sup>有关。

### 2.5 2018 年和 2003 年历史对比

如表 7 所示,2003 年—2018 年,太湖沿岸湖区平均的 Cr、Cu 含量呈上升趋势。各湖区底泥中 Cr 含量均上升,梅梁湖、贡湖和东太湖的 Cu 含量略微下降,而竺山湖、西北沿岸区、西南沿岸区的 Cu 含量增高。至 2018 年,除竺山湖的 Pb 含量基本不变外,其他湖湾的 Hg、Pb 均明显下降。As 含量为各湖湾整体略微降低,竺山湖、梅梁湖和西北沿岸区的 As 含量降低明显,贡湖基本不变,西南沿岸区和东太湖的 As 含量略微增加。

太湖多湖湾的 Cr 含量升高,竺山湖的 Cu 含量增大,西南沿岸区和东太湖 As 含量增高,均与湖湾周围的重工业企业发展有关。20 世纪 80 年代以来,无锡和常州为主要的化工聚集地通过多条运河排放污染入湖,太滬运河和殷村港等入湖河口的 Cr、Cu 含量均明显高于竺山湖及其他湖区。

各湖湾的 Hg、Pb 含量降低,竺山湖、梅梁湖和西北沿岸区的 As 含量降低,均与周围工业行业整治及生态修复有关。2007 年之后国家大力整治及关闭化工、电镀行业,处理城镇生活污水。此外,梅梁

表 7 2018 年和 2003 年太湖表层底泥重金属含量对比  
Tab. 7 Comparison of Heavy Metals Contents in Surface Sediments of Taihu Lake in 2003 and 2018

湖湾	Cr/(mg·kg <sup>-1</sup> )		Cu/(mg·kg <sup>-1</sup> )		Hg/(mg·kg <sup>-1</sup> )		Pb/(mg·kg <sup>-1</sup> )		As/(mg·kg <sup>-1</sup> )	
	2018 年	2003 年	2018 年	2003 年	2018 年	2003 年	2018 年	2003 年	2018 年	2003 年
竺山湖	214.36	63.00	115.41	54.30	0.17	0.60	45.89	47.93	15.00	25.96
梅梁湖	96.44	68.76	43.16	54.82	0.08	0.41	36.51	48.75	9.85	13.63
贡湖	95.77	95.83	40.80	60.98	0.06	0.42	37.61	58.14	16.01	16.10
西北沿岸区	73.89	43.81	33.85	27.09	0.08	0.19	35.13	44.49	8.49	20.23
西南沿岸区	72.06	43.46	26.56	25.80	0.07	0.20	36.49	46.51	11.65	8.07
东太湖	69.40	59.95	27.02	34.54	0.06	0.16	33.92	56.07	11.29	8.37
湖心区近岸边	76.54	-	29.34	-	0.07	-	38.39	-	10.85	-
湖区平均	88.94	55.07	38.40	36.80	0.08	0.29	37.01	52.28	11.57	13.47

湖的 Cu、Hg 含量西部较东部湖区下降明显,推测与西部湖区的生态清淤有关。

### 3 结论

太湖湖区平均表层底泥的 Zn、Cr、Ni、Cu、Pb、As、Cd、Hg 质量分数为(126.86±73.31)、(90.25±47.66)、(44.62±24.30)、(39.36±28.46)、(36.86±7.84)、(11.65±5.33)、(0.86±1.31)、(0.08±0.04) mg/kg,除 Hg 外均超过背景值。重金属的平面分布主要受人为活动影响,竺山湖含量为沿岸湖区最高。垂向分布呈现表层富集,随深度下降的趋势。

地积累指数评价结果中,Cu、Pb、Ni、Zn 在各湖区多为轻度污染水平,As、Hg、Cd、Cr 多为无污染水平。潜在生态风险评估结果表明,各湖区底泥在 30~100 cm 多为低潜在生态风险;0~30 cm 深度,西北沿岸区部分存在重度潜在生态风险,竺山湖和梅梁湖的部分区域为中度潜在生态风险,其他湖区为低潜在生态风险。

太湖底泥中 OM 与 Hg 含量呈显著正相关,存在较强的络合或螯合作用及吸附、离子交换等反应。OM 与其他重金属相关性不显著,各重金属间呈显著的正相关关系。

PCA 与相关性分析进行的源分析结果表明,Zn、Cu、Ni、Cr、Hg 和 Pb 元素间的关系密切且具有很强的同源性,作为污染物的第一主成分,推测多与人为工业污染有关。Cd 作为第二主成分的主要污染物,与其他重金属同源性小,和农业面源污染有关。

相比 2003 年,太湖沿岸湖区平均的 Cr、Cu 含量呈上升趋势,各湖湾的 Hg、Pb 含量降低,As 在各湖湾整体含量略微降低。

### 参考文献

- [1] 魏伟伟,李春华,叶春,等.基于底泥重金属污染及生态风险评价的星云湖疏浚深度判定[J].环境工程技术学报,2020,10(3):385-391.  
WEI W W, LI C H, YE C, et al. Determination of dredging depth of Xingyun Lake based on heavy metal pollution and ecological risk assessment of sediment[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(3): 385-391.
- [2] WANG J J, BAO J G, LI L Q. Sources of heavy metal pollutions in sediments of lake Donghu and their relationship with anthropogenic activities [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(4): 84-90.
- [3] WAKIDA F T, LARA-RUIZ D, TEMORES-PEÑA J, et al. Heavy metals in sediments of the Tecate River, Mexico [J]. Environmental Geology, 2008, 54(3): 637-642.
- [4] 付镇,林娟,唐婉莹.太湖梅梁湾沉积物中典型重金属的形态分布与污染评价[C].西安:《环境工程》2019 年全国学术年会论文集(下册),2019.  
FU Z, LIN J, TANG W Y. Morphological distribution and pollution assessment of typical heavy metals in sediments of Meiliang Bay, Taihu Lake [C]. Xi'an: Proceedings of the 2019 National Academic Conference on Environmental Engineering (Volume 2), 2019.
- [5] 李必才,何连生,杨敏,等.白洋淀底泥重金属形态及竖向分布[J].环境科学,2012,33(7):2376-2383.  
LI B C, HE L S, YANG M, et al. Speciation and vertical distribution of heavy metals in sediments of Baiyangdian Lake [J]. Environmental Science, 2012, 33(7): 2376-2383.
- [6] 陈志凡,徐薇,化艳旭,等.开封城市河流底泥重金属积累生态风险评价及同位素源解析[J].环境科学学报,2020,40(4):1321-1330.  
CHEN Z F, XU W, HUA Y X, et al. Ecological risk assessment and isotope source analysis of heavy metals accumulated in sediments of Kaifeng urban rivers [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(4): 1321-1330.

(下转第 178 页)



- Technology, 2020, 39(3): 59-63.
- [ 3 ] 杨磊三, 李骏飞, 李德强, 等. 广东某污水厂二期扩建污水和初期雨水处理工程设计[J]. 中国给水排水, 2022, 24(38): 47-52.
- YANG L S, LI J F, LI D Q, et al. Design of phase-II expansion project for sewage and initial rainwater treatment in a wastewater treatment plant in Guangdong [J]. China Water & Wastewater, 2022, 24(38): 47-52.
- [ 4 ] 周传庭, 郭葵香, 赵国志. 初期雨水就地调蓄处理工程方案[J]. 净水技术, 2020, 39(8): 44-48.
- ZHOU C T, GUO K X, ZHAO G Z. Engineering proposal of on-site regulation and storage and treatment for initial rainwater[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(8): 44-48.
- [ 5 ] 王子龙. 多段多级 AO 工艺处理低碳氮比污水的效能及碳排放分析[J]. 净水技术, 2023, 42(s1): 146-153.
- WANG Z L. Efficiency and carbon emission analysis of step-feed multistage AO process in low C/N wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(s1): 146-153.
- [ 6 ] 徐文征. 城市污水处理厂接纳初期雨水的可行性分析[J]. 净水技术, 2012, 31(4): 13-16.
- XU W Z. Feasibility analysis of initial rainwater disposal by wastewater treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2012, 31(4): 13-16.

## (上接第 168 页)

- [ 7 ] 钟继承, 范成新. 底泥疏浚效果及环境效应研究进展[J]. 湖泊科学, 2007, 19(1): 1-10.
- ZHONG J C, FAN C X. Advance in the study on the effectiveness and environmental impact of sediment dredging[J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(1): 1-10.
- [ 8 ] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2202-2210.
- ZHANG J, GUO X Y, ZENG Y, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu Basin[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2202-2210.
- [ 9 ] 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 等. 太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征[J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4291-4299.
- QIN Y W, ZHANG L, ZHENG B H, et al. Speciation and pollution characteristics of heavy metals in the sediment of Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2012, 33(12): 4291-4299.
- [ 10 ] 杨陈, 王沛芳, 刘佳佳, 等. 太湖沉积物中重金属的垂向分布特征及迁移转化[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 548-557.
- YANG C, WANG P F, LIU J J, et al. Vertical distribution and migration of heavy metals in sediment cores of Taihu Lake[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(3): 548-557.
- [ 11 ] 刘恩峰, 沈吉, 刘兴起, 等. 太湖沉积物重金属和营养盐变化特征及污染历史[J]. 中国科学: 地球科学, 2005, 35(s2): 73-80.
- LIU E F, SHEN J, LIU X Q, et al. Changes of heavy metals and nutrients in sediments of Taihu Lake and their pollution history [J]. Scientia Sinica(Terrae), 2005, 35(s2): 73-80.
- [ 12 ] 郭晶, 李利强, 黄代中, 等. 洞庭湖表层水和底泥中重金属污染状况及其变化趋势[J]. 环境科学研究, 2016, 29(1): 44-51.
- GUO J, LI L Q, HUANG D Z, et al. Assessment of heavy metal pollution in surface water and sediment of Dongting Lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(1): 44-51.
- [ 13 ] YIN H B, GAO Y N, FAN C X. Distribution, sources and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from Lake Taihu, China [J]. Environmental Research Letters, 2011, 6(4): 044012. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/044012.
- [ 14 ] 李梁, 胡小贞, 刘娉婷, 等. 滇池外海底泥重金属污染分布特征及风险评价[J]. 中国环境科学, 2010, 30(s1): 46-51.
- LI L, HU X Z, LIU P T, et al. Heavy metals distribution characteristics and potential ecological risk evaluation in the sediment of outer area of Lake Dianchi [J]. China Environmental Science, 2010, 30(s1): 46-51.
- [ 15 ] 孙恬, 王延华, 叶春, 等. 太湖北部小流域沉积物重金属污染特征与评价[J]. 中国环境科学, 2020, 40(5): 2196-2203.
- SUN T, WANG Y H, YE C, et al. Characteristics and assessment of heavy metals pollution in the sediments from a small catchment in northern Taihu Basin [J]. China Environmental Science, 2020, 40(5): 2196-2203.
- [ 16 ] 刘强, 梁雷, 王峰源, 等. 辽河干流消落区沉积物重金属污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2013, 33(12): 2220-2227.
- LIU Q, LIANG L, WANG F Y, et al. Characteristics of heavy metals pollution in sediments of the hydro-fluctuation belt in the Liao River of Liaoning Province, Northeast China [J]. China Environmental Science, 2013, 33(12): 2220-2227.