

文章编号: 1674-5566(2013)04-0593-10

## 昆山主要水体沉积物4种重金属的分布及污染状况评估

陈辰<sup>1</sup>, 蔡桢<sup>1,2</sup>, 刘艳<sup>1</sup>, 袁林<sup>1</sup>, 王琼<sup>1</sup>, 吴惠仙<sup>1</sup>, 陆建红<sup>3</sup>,  
陈文银<sup>1</sup>

(1. 上海海洋大学水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306; 2. 浙江省湖州市环境保护检测中心站, 浙江湖州 313000; 3. 江苏省昆山市渔政监督管理站, 江苏昆山 215300)

**摘要:** 对昆山湖泊、河道和养殖池塘主要水体沉积物中的 Cu、Zn、Pb、Cd 含量的空间分布进行了分析, 结果表明, 湖泊样点沉积物中 Cu 含量在 6.54 ~ 333.99 mg/kg 之间, 均值为 136.60 mg/kg; 河道沉积物中 Cu 含量在 11.00 ~ 475.88 mg/kg 间, 均值为 126.78 mg/kg; 养殖池塘沉积物中 Cu 含量在 31.73 ~ 155.78 mg/kg 间, 均值为 84.73 mg/kg。4 种重金属对昆山水域生态风险构成危害的顺序为 Cd > Cu > Pb > Zn。其中 Cu、Pb、Zn 的潜在生态危害系数均低于 40, 为低生态风险, Cd 的潜在生态危害系数高于 320, 且所有采样点的 Cd 污染总体潜在生态风险指数均大于 600, 呈现严重生态风险, 重金属的总体潜在生态风险程度顺序为: 河道 > 湖泊 > 池塘。

**研究亮点:** 以昆山地区水域为示范, 对太湖流域经济发达地区水网主要水体(湖泊、河流和池塘)进行系统地沉积物毒重金属分布特征及污染程度研究, 为昆山乃至长三角地区水域生态环境保护和渔业健康可持续发展提供基础, 并为长三角地区社会经济和水生态环境保护协调发展提供科学依据。  
**关键词:** 昆山水域; 重金属; 空间分布; 污染评价

中图分类号: X 503

文献标志码: A

重金属大多具有一定毒性且不能降解<sup>[1]</sup>, 在水体中虽含量甚微, 但极易被大颗粒物吸附并沉积于水体底质中, 在沉积物中其浓度可达水溶液中的数百倍至数十万倍<sup>[2]</sup>; 当环境条件变化时部分积累在沉积物中的污染物会释放到上覆水中, 造成二次污染<sup>[3-4]</sup>, 某些释放到水体中的重金属甚至可在微生物作用下转化为毒性更强的金属化合物<sup>[5]</sup>, 经过水生生物食物链的放大作用, 在较高级水生生物体内成千上万倍地富集起来<sup>[6]</sup>, 然后通过食物进入人体, 危害身体健康。重金属污染因其具有隐蔽性、长期性和不可逆性等特点而引起日益广泛的关注和重视, 而沉积物作为污染物载体和“蓄积库”, 无论在研究环境中重金属污染现状及分布, 或者追踪重金属污染源都有非常重要的理论和现实意义<sup>[7-8]</sup>。昆山境内雨量充沛, 河网密布, 水系发达, 渔业条件得天独厚。近

年来昆山经济快速发展, 生态环境问题引起了社会和政府的广泛关注, 其中对重金属污染尤其重视。本研究对昆山湖泊、河道和养殖池塘等主要水体沉积物中的 Cu、Zn、Pb、Cd 含量的空间分布进行了分析, 以期阐明昆山水体重金属的分布现状, 并对水体的重金属污染状况进行科学评估, 为昆山及周边水域生态环境的保护, 渔业资源的开发利用和渔业安全生产提供科学依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 采样点分布

2008年6月在昆山水域设36个采样点, 其中河道21个, 湖泊9个及池塘6个(图1)。其中, S1-2、S4、S6-11、S13-18、S22、S25-28、S31为河道; S3、S5、S19-21、S23-24、S29-30为湖泊; S33-36、S38、S39为人工池塘。36采样

收稿日期: 2013-06-18 修回日期: 2013-06-25

基金项目: 上海市教育委员会重点学科建设项目(J50701)

作者简介: 陈辰(1992—), 女, 研究方向为水域生态学。E-mail: she920812@126.com

通信作者: 陈文银, E-mail: wychen@shou.edu.cn

点分别为:S1 七浦塘西、S2 七浦塘东、S3 阳澄湖北、S4 杨林塘西、S5 阳澄湖南、S6 楼江河西、S7 杨林塘东、S8 超英河和平村段、S9 太仓塘东、S10 斜泾河东、S11 瓦浦河大同桥段、S13 吴淞江西、S14 吴淞江青阳港口、S15 吴淞江东、S16 大直江钱塘港口、S17 支浦江垵坵港口、S18 千灯浦中、S19 千灯浦淀山湖口、S20 白莲湖西口、S21 汪洋湖大朱砂口、S22 道褐浦上洪北、S23 淀山湖东、S24 澄湖场部、S25 长白荡明镜荡口、S26 急水港则同港口、S27 周庄中心河北、S28 长牵路西、S29 白蚬湖吴江交界处、S30 淀山湖中心河东、S31 道褐浦红星村南、S33 花桥天福片、S34 陆家陈港江、S35 周市东明村汉浦塘、S36 巴城夏东村北界泾、S38 巴城武城村毛浜河、S39 巴城夏东村雒城河。

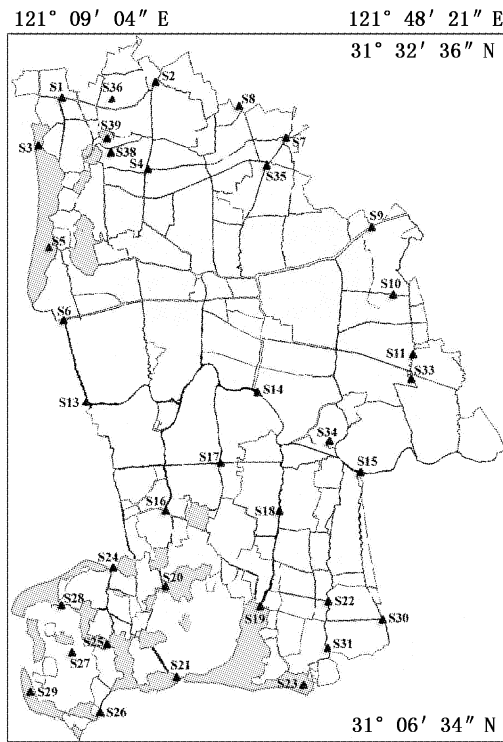


图 1 昆山水域采样点分布示意图

Fig.1 The distribution of sampling sites in Kunshan

表 1 地累积指数 ( $I_{geo}$ ) 与污染程度的关系

Tab.1 Index of geoaccumulation ( $I_{geo}$ ) and the pollution grades

级别	0	1	2	3	4	5	6
$I_{geo}$	$\leq 0$	$>0 \sim \leq 1$	$>1 \sim \leq 2$	$>2 \sim \leq 3$	$>3 \sim \leq 4$	$>4 \sim \leq 5$	$>5$
污染指标	清洁	轻度污染	偏中等污染	中度污染	偏重污染	重污染	严重污染

1.3.2 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法<sup>[14]</sup> (potential ecological risk index) 的计算公式是:

1.2 样品采集及分析

沉积物重金属的采样方法根据《水质湖泊和水库采样技术指导》(GB/T 14581—93)<sup>[9]</sup>进行;4种元素 Cu、Zn、Pb 和 Cd 根据《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)<sup>[10]</sup>、土壤元素的近代分析方法<sup>[11]</sup>和水和废水监测分析方法<sup>[12]</sup>进行样品处理及测定。

所有样品迅速带回实验室进行前处理,将沉积物放置在超净实验室自然风干,然后在 60 °C 下干燥至恒重,去除样品中石头和动植物残体,用玛瑙研钵研磨后,过 200 目尼龙筛,保存于干燥洁净的样品瓶中,备用。

样品分析过程为防止引入干扰离子,造成偶然误差,避免样品与金属器皿直接接触,所用聚四氟乙烯和玻璃容器,量具均事先用 1:3 的硝酸溶液浸泡 24 h,并用去离子水冲洗后低温干燥。样品测定过程进行了重复样和标样测定,测定结果相对标准偏差小于 3%。其中,泥样品用 HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub> 消解,Cu、Pb、Zn、Cd 的测定采用火焰原子吸收分光光度法。所用实验试剂均为 GR 级,实验用水为二次去离子水。

1.3 数据分析

1.3.1 地累积指数法

地累积指数法 (Index of geoaccumulation) 是德国海德堡大学沉积物研究所的科学家 Muller 于 1979 年提出的<sup>[13]</sup>,其计算公式为

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{k B_n} \tag{1}$$

式中: $C_n$  为实测重金属浓度 ( $\times 10^{-6}$ ); $B_n$  为黏质沉积岩 (即普通页岩) 中该元素的地球化学背景值; $k$  为考虑各地岩石差异可能会引起背景值的变动而取的系数 (一般取值为 1.5)。地累积指数 ( $I_{geo}$ ) 与污染程度的对应关系见表 1。

$$C_r^i = \frac{C^i}{C_n^i} \tag{2}$$

式中: $C_r^i$  表示单个重金属污染系数 (富集系数);

$C^i$  为沉积物中重金属浓度的实测值 ( $\times 10^{-6}$ );  $C_n^i$  为计算所需的参比值或标准。

$$C_T = \sum_{i=1}^m C_r^i \quad (3)$$

式中:  $C_T$  表示沉积物重金属污染度(多种重金属污染系数之和);  $m$  为不同重金属的数量。

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i \quad (4)$$

式中:  $E_r^i$  表示某种重金属的潜在生态危害系数;  $T_r^i$  为第  $i$  种重金属的毒性系数, 反应生物对其污染的敏感程度。

$$I_R = \sum_{i=1}^m E_r^i \quad (5)$$

式中:  $I_R$  表示  $m$  种重金属的潜在生态危害指数; 毒性影响系数<sup>[15]</sup> 则依次取 Cd 为 30, Pb、Cu 为 5, Cr 为 2, Zn 为 1。

$$I_R = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^m T_r^i \times \frac{C^i}{C_n^i} \quad (6)$$

式中: 潜在生态危害系数 ( $E_r^i$ ) 和潜在生态危害指数 ( $I_R$ ) 与危害程度的关系如表 2。

表 2 潜在生态风险评价指标与分级关系

Tab. 2 Indices and grades of potential ecological risk assessment

生态危害程度	轻微	中等	强	很强	极强
$E_r^i$	< 40	40 ~ 80	80 ~ 160	160 ~ 320	$\geq 320$
$I_R$	< 150	150 ~ 300	300 ~ 600	$\geq 600$	

### 1.3.3 重金属元素背景值的选择

目前我国没有评价沉积物中重金属含量的标准值, 昆山水域沉积物重金属也无可查的背景值资料, 本研究主要采用昆山农田土壤背景值<sup>[16]</sup> 的地球化学基础资料作为水体沉积物重金属的环境背景值(表 3)。

表 3 昆山市农田土壤重金属背景值统计  
Tab. 3 Heavy metal background values of the farm land soils in Kunshan City

重金属	平均值/ (mg/kg)	标准差/ (mg/kg)	变异系数	背景值上限值/ (mg/kg)
Cu	28.9	5.15	0.18	39.2
Zn	84.6	10.82	0.13	106.24
Pb	26.8	2.62	0.10	32.04
Cd	0.11	0.03	0.15	0.17

## 2 结果

### 2.1 昆山主要水体沉积物重金属的空间分布特征

#### 2.1.1 湖泊沉积物

湖泊样点沉积物中 Cu 含量在 6.54 ~ 333.99 mg/kg 之间, 均值为 136.60 mg/kg, S19 样点最高, S21 样点最低; Zn 含量在 83.69 ~ 266.58 mg/kg 间, 均值为 124.55 mg/kg, 最高值为 S5 样点, 最低值为 S3 样点; Pb 含量在 6.05 ~ 86.27 mg/kg 间, 均值为 22.38 mg/kg, 最高值为 S5 样点, 最低值为 S21 样点; Cd 含量在 3.77 ~ 10.23 mg/kg

间, 均值为 6.00 mg/kg, 最高值为 S5 样点, 最低值为 S29(图 2)。

#### 2.1.2 河道沉积物

河道沉积物中 Cu 含量在 11.00 ~ 475.88 mg/kg 间, 均值为 126.78 mg/kg, 各样点间波动较大; Zn 的含量在 55.93 ~ 130.35 mg/kg 间, 均值为 94.78 mg/kg, 样点间的 Zn 含量的波动相对 Cu 的含量小; Pb 含量在 3.36 ~ 26.47 mg/kg 间, 不同样点间波动较大, 最大差异近 10 倍, 均值为 13.64 mg/kg, S9 样点未检测出沉积物中 Pb 的存在。

#### 2.1.3 养殖池塘沉积物

养殖池塘沉积物中 Cu 含量在 31.73 ~ 155.78 mg/kg 间, 均值为 84.73 mg/kg。最高为 S36 样点, 最低值为 S33; Zn 含量在 57.88 ~ 101.10 mg/kg 间, 均值为 77.85 mg/kg。Pb 含量在 11.01 ~ 40.00 mg/kg 间, 均值为 24.54 mg/kg; Cd 含量在 3.12 ~ 7.25 mg/kg 间, 均值为 4.40 mg/kg。

### 2.2 昆山水体重金属污染评价

#### 2.2.1 湖泊沉积物

地累积指数评价结果显示(表 4), 昆山主要水体中湖泊沉积物中重金属总体显示为轻度污染, 重金属污染的大致顺序为: Cd(4 级) > Cu(1 级) > Zn(1 级) > Pb(1 级); 样点受重金属污染程度的大致顺序为: S5(2 级) > S19(2 级) > S30(1 级) > S29(1 级) > S23(1 级) > S24(1

级) > S3(1级) > S20(1级) > S21(0级)。其中,Pb 在湖泊各样点的地累积指数除了 S5 为 0.76 之外都小于 0, 整体为清洁水平; Zn 在湖泊各样点的地累积指数显示其污染级别大多在 0 ~ 1 之间, 平均显示为轻度污染; Cu 在各湖泊样点的污染程度整体为轻度污染, 其中呈中度污染的有 2 个样点, 分别为 S19 和 S30, 呈偏中等污染的为 S5 和 S29, 呈轻度污染的样点则为 S23, 其余样

点均呈清洁水平; Cd 在各样点的污染水平较高, 整体呈偏重污染水平, 其中以 S5 样点污染程度最为严重, 达 5 级, 为重污染, 其次达到 4 级偏重污染水平的样点有 4 个, 分别为 S3、S19、S20、S24, 其余样点均达到中度污染水平。整体而言, 各湖泊样点中, 重金属污染呈现三类, S5 和 S19 为偏中等污染, S21 为清洁水平, 其余样点均为轻度污染水平。

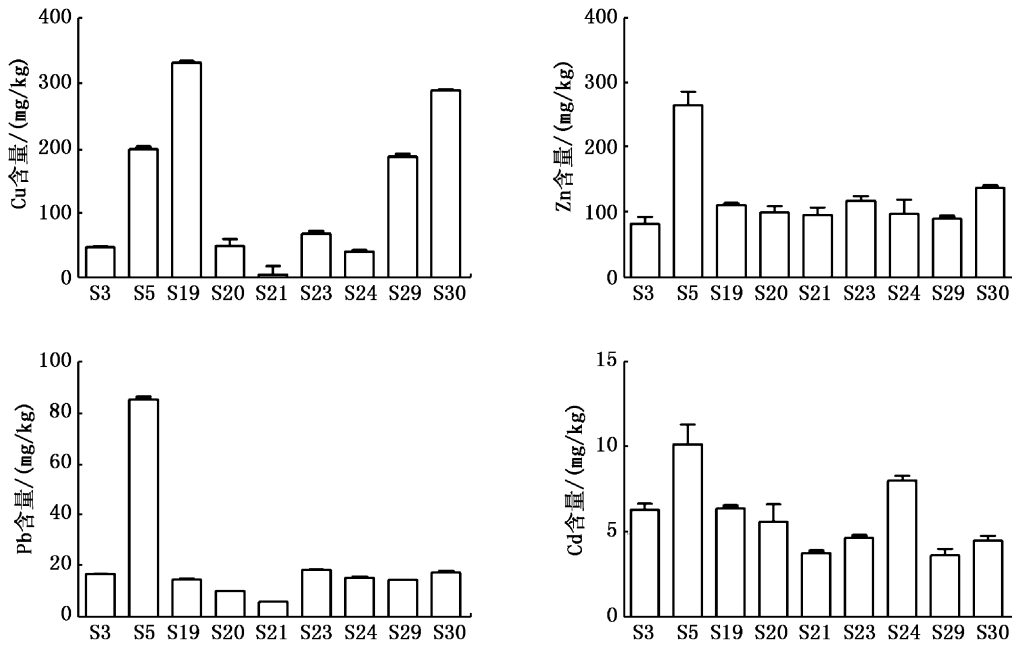


图 2 昆山湖泊沉积物中 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的含量

Fig. 2 The contents of Cu, Zn, Pb and Cd in Kunshan lake sediment

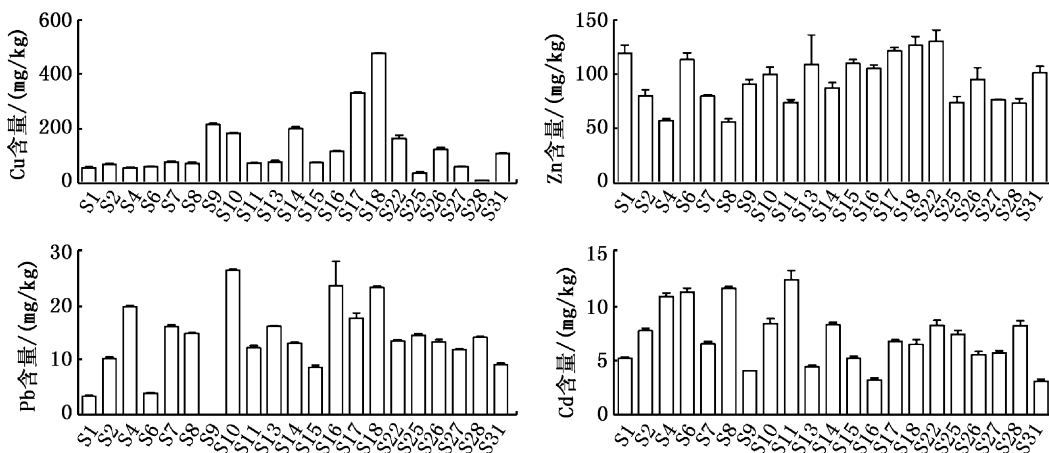


图 3 昆山地区河道采样点沉积物的 Cu、Zn、Pb 和 Cd 含量

Fig. 3 The contents of Cu, Zn, Pb and Cd in Kunshan river sediment

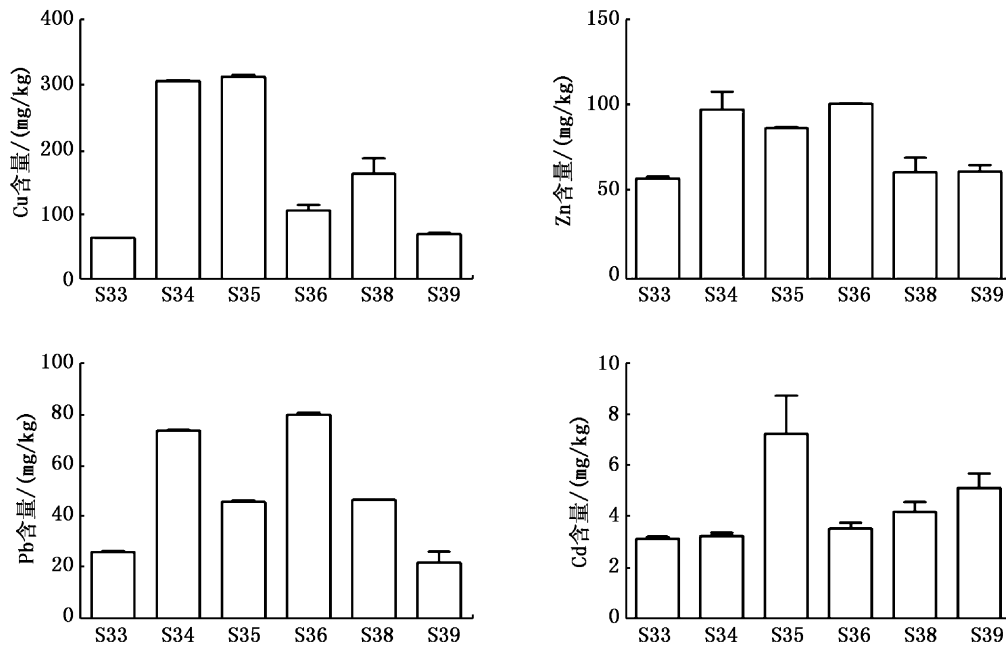


图 4 昆山养殖池塘采样点沉积物的 Cu、Zn、Pb 和 Cd 含量

Fig. 4 The contents of Cu, Zn, Pb and Cd in Kunshan aquaculture ponds sediment

表 4 昆山地区湖泊采样点沉积物中重金属污染的地累积指数及其分级

Tab. 4 Index of geoaccumulation ( $I_{geo}$ ) and grades of the lake sediment heavy metals in Kunshan

样点	Cu		Zn		Pb		Cd		平均	
	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级
S03	-0.48	0	-0.36	0	-1.58	0	3.42	4	0.25	1
S05	1.56	2	1.31	2	0.76	1	4.09	5	1.93	2
S19	2.31	3	0.07	1	-1.77	0	3.44	4	1.01	2
S20	-0.42	0	-0.08	0	-2.30	0	3.25	4	0.11	1
S21	-3.37	0	-0.13	0	-3.07	0	2.70	3	-0.97	0
S23	0.04	1	0.16	1	-1.44	0	2.99	3	0.44	1
S24	-0.70	0	-0.12	0	-1.70	0	3.76	4	0.31	1
S29	1.48	2	0.38	1	-1.80	0	2.65	3	0.68	1
S30	2.11	3	-0.08	0	-1.53	0	2.94	3	0.86	1
平均	0.28	1	0.13	1	-1.60	0	3.25	4	0.51	1

表 5 昆山地区湖泊采样点的潜在生态危害系数和危害指数

Tab. 5 The potential ecological risk coefficient and index at different lake sampling sites in Kunshan

样点	Cu		Zn		Pb		Cd		危害指数	
	$E_r^i$	危害程度	$E_r^i$	危害程度	$E_r^i$	危害程度	$E_r^i$	危害程度	$I_R$	危害程度
S03	8.54	轻微	1.00	轻微	3.37	轻微	1 603.97	极强	1 616.89	极强
S05	35.16	轻微	3.19	轻微	17.02	轻微	2 556.56	极强	2 611.93	极强
S19	58.86	中等	1.35	轻微	2.94	轻微	1 624.33	极强	1 687.48	极强
S20	8.90	轻微	1.21	轻微	2.04	轻微	1 428.82	极强	1 440.98	极强
S21	1.15	轻微	1.17	轻微	1.19	轻微	972.83	极强	976.34	极强
S23	12.22	轻微	1.43	轻微	3.70	轻微	1 194.49	极强	1 211.84	极强
S24	7.35	轻微	1.18	轻微	3.09	轻微	2 029.71	极强	2 041.33	极强
S29	33.21	轻微	1.67	轻微	2.90	轻微	941.77	极强	979.55	极强
S30	51.27	中等	1.21	轻微	3.48	轻微	1 150.89	极强	1 206.85	极强
平均	24.07	轻微	1.49	轻微	4.41	轻微	1 500.38	极强	1 530.35	极强

根据生态危害系数和危害指数评价昆山地区湖泊样点重金属的潜在生态风险,结果显示:湖泊样点整体重金属的潜在生态风险极强,平均危害指数高达1 530.35(表5),所有样点均体现极强的生态危害,不同样点间重金属潜在生态危害程度依次为S5>S24>S19>S3>S20>S23>S30>S29>S21。而不同重金属潜在生态危害程度依次为Cd>Cu>Pb>Zn,其中Cd潜在生态危害系数各样点均值达到1 500.38,表现为极强的生态危害程度,Cu、Pb、Zn则均低于40,体现为轻微的生态危害程度。其中,Cd在各样点间的生态危害系数变化范围为976.34~2 611.93,均体现为极强的潜在生态危害;Cu在各样点间的生态危害系数变化范围为1.15~58.86,除了S19和S30两样点生态危害系数高于40,体现中等生态危害程度外,其余样点均为轻微程度的生态危害;Zn在各样点间的生态危害系数均较小,变化范围为1.00~3.19,均体现为轻微的生态危害程度;Pb在各样点间的生态危害系数变化范围为1.19~17.02,均体现为轻微程度的生态危害。

综合重金属污染的地累积指数及潜在生态危害指数,昆山地区主要水域湖泊样点重金属污染最严重和潜在生态危害最强的点均为S5样点,污染最轻及潜在生态危害最弱的均为S21样点,各样点均以Cd污染最为严重,Zn和Pb两种重金属污染最轻。

### 2.2.2 河道沉积物

地累积指数评价结果显示(表6),昆山主要水体中河道沉积物中重金属总体显示为轻度污染(1级),重金属污染的大致顺序为: Cd(4级)>Cu(1级)>Zn(0级)>Pb(0级);样点受重金属污染程度的大致顺序为: S18(2级)>S17(2级)>S10(2级)>S22(1级)>S14(1级)>S16(1级)>S26(1级)>S11(1级)>S4(1级)>S8(1级)>S7(1级)>S13(1级)>S2(1级)>S15(1级)>S27(1级)>S6(1级)>S25(1级)>S31(1级)>S1(1级)>S28(0级)>S9(0级)>S5(0级)。其中,Pb在河道各样点的地累积指数都小于0,整体为清洁水平;Zn在河道各样点的地累积指数显示其污染级别大多在0~1之间,平均地累积指数为-0.23,显示为清洁水平,各河道样点Zn的污染级别为1级的有7个样点,分别为S1、S6、S13、S15、S17、S18、

S22。

Cu在各河道样点的地累积指数平均值为0.49,污染程度整体为轻度污染,其中,呈中度污染的有2个样点,分别为S17和S18;呈偏中等污染的样点有4个,为S9、S10、S14、S22;呈轻度污染的样点有9个,为S2、S7、S8、S11、S13、S15、S16、S26、S31,其余样点均呈清洁水平;Cd在各样点的污染水平较高,整体呈偏重污染水平,其中以S4、S6、S8、S11样点污染程度最为严重,达5级,为重污染,其次达到3级中度污染水平的样点有4个,分别为S9、S13、S16和S31,其余样点均达到中度污染水平。整体而言,各河道样点中,重金属污染也呈现三类,样点S10、S17、S18为偏中等污染,样点S1、S9、S28为清洁水平,其余样点均为轻度污染水平。

根据生态危害系数和危害指数评价昆山地区河道样点重金属的潜在生态风险,结果显示:河道样点整体重金属的潜在生态风险极强,平均危害指数高达1 711.43(表7),所有样点均体现极强的生态危害,不同样点间重金属潜在生态危害程度依次为S11>S8>S6>S4>S10>S14>S22>S28>S2>S25>S17>S18>S7>S27>S26>S15>S1>S13>S9>S16>S31。而不同重金属潜在生态危害程度依次为Cd>Cu>Pb>Zn,其中Cd潜在生态危害系数各样点均值达到1 797.94,体现为极强的生态危害程度;Cu、Pb、Zn则均低于40,呈轻微程度的生态危害。其中,Cd在各样点间的生态危害系数变化范围为776.38~3 118.65,均体现为极强的潜在生态危害;Cu在各样点间的生态危害系数变化范围为1.94~83.87,除了S17呈中等程度生态危害和S18呈强程度生态危害外,其余样点均为轻微程度的生态危害;Zn在各样点间的生态危害系数均较小,变化范围为0.67~1.56,均体现为轻微的生态危害程度;Pb在各样点间的生态危害系数变化范围为0~5.22,除S9样点未检测到潜在生态危害外,均体现为轻微程度的生态危害。

综合重金属污染的地累积指数及潜在生态危害指数,昆山地区主要水域河道样点重金属污染最严重的点为S11样点,最轻的为S31样点,潜在生态危害最强的为S18样点,最弱的为S5样点;各样点均以Cd污染最为严重,Zn和Pb两种重金属污染最轻。

表 6 昆山地区河道采样点沉积物中重金属污染的地累积指数及其分级

Tab. 6 Index of geoaccumulation ( $I_{geo}$ ) and grades of the river sediment heavy metals in Kunshan

样点	Cu		Zn		Pb		Cd		平均	
	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级
S01	-0.23	0	0.15	1	-3.93	0	3.12	4	-0.22	0
S02	0.05	1	-0.43	0	-2.31	0	3.69	4	0.25	1
S04	-0.24	0	-0.91	0	-1.37	0	4.19	5	0.42	1
S06	-0.13	0	0.08	1	-3.70	0	4.23	5	0.12	1
S07	0.25	1	-0.42	0	-1.66	0	3.45	4	0.40	1
S08	0.10	1	-0.94	0	-1.78	0	4.28	5	0.42	1
S09	1.67	2	-0.24	0	-13.32	0	2.76	3	-2.28	0
S10	1.44	2	-0.11	0	-0.95	0	3.81	4	1.05	2
S11	0.13	1	-0.54	0	-2.05	0	4.38	5	0.48	1
S13	0.23	1	0.02	1	-1.66	0	2.88	3	0.37	1
S14	1.56	2	-0.30	0	-1.96	0	3.79	4	0.77	1
S15	0.19	1	0.03	1	-2.55	0	3.13	4	0.20	1
S16	0.81	1	-0.03	0	-1.11	0	2.42	3	0.52	1
S17	2.29	3	0.18	1	-1.53	0	3.50	4	1.11	2
S18	2.82	3	0.24	1	-1.13	0	3.43	4	1.34	2
S22	1.28	2	0.28	1	-1.92	0	3.78	4	0.85	1
S25	-0.81	0	-0.53	0	-1.81	0	3.63	4	0.12	1
S26	0.89	1	-0.17	0	-1.93	0	3.20	4	0.50	1
S27	-0.12	0	-0.49	0	-2.09	0	3.25	4	0.14	1
S28	-2.62	0	-0.55	0	-1.85	0	3.77	4	-0.31	0
S31	0.70	1	-0.23	0	-2.47	0	2.37	3	0.09	1
平均	0.49	1	-0.23	0	-1.99	0	3.48	4	0.48	1

表 7 昆山地区河道采样点的潜在生态危害系数和危害指数

Tab. 7 The potential ecological risk coefficient and index at different river sampling sites in Kunshan

样点	Cu		Zn		Pb		Cd		危害指数	
	$E_r^i$	危害程度	$E_r^i$	危害程度	$E_r^i$	危害程度	$E_r^i$	危害程度	$I_R$	危害程度
S01	10.17	轻微	1.42	轻微	0.66	轻微	1 306.58	极强	1 318.83	极强
S02	12.28	轻微	0.95	轻微	2.03	轻微	1 934.84	极强	1 950.11	极强
S04	10.09	轻微	0.68	轻微	3.90	轻微	2 729.02	极强	2 743.70	极强
S06	10.91	轻微	1.36	轻微	0.77	轻微	2 815.78	极强	2 828.81	极强
S07	14.10	轻微	0.96	轻微	3.18	轻微	1 642.51	极强	1 660.75	极强
S08	12.76	轻微	0.67	轻微	2.94	轻微	2 919.32	极强	2 935.69	极强
S09	37.94	轻微	1.08	轻微	0.00	无	1 016.63	极强	1 055.66	极强
S10	32.38	轻微	1.19	轻微	5.22	轻微	2 101.50	极强	2 140.29	极强
S11	13.00	轻微	0.88	轻微	2.42	轻微	3 118.65	极强	3 134.96	极强
S13	13.99	轻微	1.30	轻微	3.19	轻微	1 107.14	极强	1 125.63	极强
S14	35.19	轻微	1.04	轻微	2.58	轻微	2 079.14	极强	2 117.96	极强
S15	13.53	轻微	1.31	轻微	1.71	轻微	1 313.99	极强	1 330.55	极强
S16	20.79	轻微	1.26	轻微	4.67	轻微	803.14	极强	829.85	极强
S17	58.30	中等	1.45	轻微	3.50	轻微	1 695.49	极强	1 758.74	极强
S18	83.87	强	1.52	轻微	4.60	轻微	1 621.45	极强	1 711.43	极强
S22	28.88	轻微	1.56	轻微	2.66	轻微	2 056.51	极强	2 089.60	极强
S25	6.81	轻微	0.88	轻微	2.87	轻微	1 855.28	极强	1 865.85	极强
S26	22.04	轻微	1.14	轻微	2.63	轻微	1 381.39	极强	1 407.21	极强
S27	10.92	轻微	0.91	轻微	2.35	轻微	1 431.08	极强	1 445.27	极强
S28	1.94	轻微	0.87	轻微	2.80	轻微	2 050.86	极强	2 056.47	极强
S31	19.32	轻微	1.09	轻微	1.81	轻微	776.38	极强	798.61	极强
平均	22.34	轻微	1.12	轻微	2.69	轻微	1 797.94	极强	1 824.09	极强

## 2.2.3 养殖池塘沉积物

地累积指数评价结果显示(表8),昆山主要水体中池塘沉积物中重金属总体显示为轻度污染,重金属污染的大致顺序为: Cd(3级) > Cu(1级) > Zn(0级) > Pb(0级); 样点受重金属污染程度的大致顺序为: S35(1级) > S34(1级) > S36(1级) > S38(1级) > S39(0级) > S33(0级)。其中, Zn和Pb在池塘各样点的地累积指数均小于0, 整体为清洁水平; Cu在各池塘样点的

污染程度整体为轻度污染, 其中呈偏中度污染的有2个样点, 分别为S34和S35, 呈轻度污染的样点则为S38, 其余样点均呈清洁水平; Cd在各样点的污染水平较高, 整体呈中污染水平, 其中以S35和S39样点污染程度最为严重, 达4级, 为偏重污染水平, 其余样点均达到中度污染水平。整体而言, 各池塘样点中, 重金属污染呈现二类, S34、S35、S36、S38 4个样点为轻度污染水平, S33、S39两个样点为清洁水平。

表8 昆山地区池塘采样点沉积物中重金属污染的地累积指数及其分级

Tab.8 Index of gcoaccumulation ( $I_{geo}$ ) and grades of the pond sediment heavy metals in Kunshan

样点	Cu		Zn		Pb		Cd		平均	
	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级	$I_{geo}$	等级
S33	-1.09	0	-0.89	0	-1.96	0	2.38	3	-0.39	0
S34	1.18	2	-0.13	0	-0.47	0	2.43	3	0.75	1
S35	1.21	2	-0.30	0	-1.15	0	3.59	4	0.84	1
S36	-0.35	0	-0.09	0	-0.35	0	2.55	3	0.44	1
S38	0.26	1	-0.80	0	-1.13	0	2.80	3	0.28	1
S39	-0.96	0	-0.79	0	-2.21	0	3.09	4	-0.22	0
平均	0.04	1	-0.50	0	-1.21	0	2.81	3	0.28	1

根据生态危害系数和危害指数评价昆山地区池塘样点重金属的潜在生态风险, 结果显示: 池塘样点整体重金属的潜在生态风险极强, 平均危害指数高达1 120.92(表9), 所有样点均体现极强的生态危害, 不同样点间重金属潜在生态危害程度依次为 S35 > S39 > S38 > S36 > S34 > S33。而不同重金属潜在生态危害程度依次为 Cd > Cu > Pb > Zn, 其中 Cd 潜在生态危害系数各样点均值达到1 100.21, 体现为极强的生态危害程度, Cu、Pb、Zn 则均低于40, 体现为轻微的生态危害程度。其中, Cd 在各样点间的生态危害系数变化范围为788.13 ~ 1 844.75, 均体现为极强的

潜在生态危害; Cu 在各样点间的生态危害系数变化范围为5.59 ~ 27.46, 均为轻微程度的生态危害; Zn 在各样点间的生态危害系数均极小, 变化范围为0.73 ~ 1.21, 均体现为轻微的生态危害程度; Pb 在各样点间的生态危害系数变化范围为2.17 ~ 7.89, 均体现为轻微程度的生态危害。

综合重金属污染的地累积指数及潜在生态危害指数, 昆山地区主要水域池塘样点重金属污染最严重和潜在生态危害最强的点均为S35样点, 污染最轻及潜在生态危害最弱的均为S33样点, 各样点均以Cd污染最为严重, Zn和Pb两种重金属污染最轻。

表9 昆山地区池塘采样点的潜在生态危害系数和危害指数

Tab.9 The potential ecological risk coefficient and index at different pond sampling sites in Kunshan

样点	Cu		Zn		Pb		Cd		危害指数	
	$E_r^i$	危害程度	$E_r^i$	危害程度	$E_r^i$	危害程度	$E_r^i$	危害程度	$I_R$	危害程度
S33	5.59	轻微	0.69	轻微	2.58	轻微	779.26	极强	788.13	极强
S34	26.89	轻微	1.17	轻微	7.27	轻微	806.05	极强	841.38	极强
S35	27.46	轻微	1.04	轻微	4.53	轻微	1 811.72	极强	1 844.75	极强
S36	9.31	轻微	1.21	轻微	7.89	轻微	878.19	极强	896.60	极强
S38	14.25	轻微	0.73	轻微	4.60	轻微	1 045.58	极强	1 065.16	极强
S39	6.10	轻微	0.74	轻微	2.17	轻微	1 280.47	极强	1 289.48	极强
平均	14.93	轻微	0.93	轻微	4.84	轻微	1 100.21	极强	1 120.92	极强



### 3 讨论

沉积物中重金属的分布与工业活动、污水灌溉和土壤性质密切相关。昆山经济高速发展的同时,工业废水、废气、工业粉尘、固体废弃物总排放量、农用化肥和农药施用量均显著增加<sup>[17]</sup>,这直接导致昆山地区土壤重金属污染严重超标。以 2007 年为例,苏州市降水 pH 年均值 4.77,酸雨发生频率为 79.6%,酸雨使得昆山土壤酸化严重<sup>[18-19]</sup>,土壤中重金属被活化。活化的重金属很容易通过食物链、地下水和地表水径流进入水系,进而给人类的健康和生活带来危害。本研究发现,昆山水系沉积物重金属 Cd 污染较为严重,Cu 为轻度污染,湖泊、河道和池塘 3 种水体沉积物重金属的潜在生态风险极强。

昆山水体沉积物重金属的总体潜在生态风险趋势为:河道大于湖泊,湖泊大于池塘。昆山地区城区内主要以河道型水体居多,工农业、交通和人类活动也多集中于城区内,这些污染源对河道水体沉积物重金属的影响较为严重。因此,昆山河道沉积物污染大于湖泊和池塘水体。加之,昆山地区湖泊和池塘型水体主要分布在北部和南部郊区,受到外源污染源的影响较轻,因此,湖泊型和池塘型水体沉积物重金属的污染低于河道型水体。

昆山地区河道 21 个样点沉积物重金属空间分布总体表现为东北向西南逐渐减少,其中最高值区域位于中部经济开发区的电镀专营区及其周围区域(即 S14~18),该区域内有大量电镀工厂,大量电镀工业残渣等是造成该区域内沉积物重金属超标的主要污染物<sup>[20]</sup>。样点 S25~28 位于南部郊区,工农业等污染较少,加之其四周围绕众多小型湖泊,重金属污染物流入的过程中,在其周围的湖泊中有一个沉降过程,从而减少了 S25~28 样点的重金属流入量,减轻污染情况。S20、21、24 和 29 样点 Cu、Zn 和 Pb 的含量明显高于 S25 和 S28。

Cd 是昆山地区土壤中主要的重金属污染物<sup>[18,21]</sup>,已有的研究中昆山土壤中 Cd 含量均值为 0.154 mg/kg 和 1.199 mg/kg,但远小于昆山水体沉积物中 Cd 的含量(湖泊沉积物种中 Cd 含量均值为 6.00 mg/kg;河道沉积物中 Cd 含量均值为 7.19 mg/kg;池塘沉积物中 Cd 含量均值为

4.40 mg/kg)。可见,昆山地区水体沉积物重金属污染现状极为严重。因水体中沉积物对重金属的吸附作用,重金属呈现富集现象。在水环境条件稳定的前提下,会出现沉积物中重金属含量逐年增加的现象。因此,需严加监控昆山水环境的变化,避免环境变化造成沉积物中重金属再次释放到水中,带来更加严重的“二次污染”。

鉴于昆山市城区点源污染比较严重,应大力加强污染治理,并对污染底质进行修复。首先,可以从源头上加大力度遏制废液、废弃物等的非法排放;其次可以定期对河道、湖泊、池塘进行清淤,对底泥进行集中处理;最有效的办法可以在水体中根据实际情况种植适宜的大型水生植物等进行生态修复,富集和移除重金属。

### 参考文献:

- [1] ADAMSW J, KIMERLE R A, BARNETT J W. Sediment quality and aquatic life assessment [J]. *Environmental science & technology*, 1992, 26(10): 1865-1875.
- [2] BARK A J M, BROOKS R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. A review of the distribution ecology and phytochemistry [J]. *Biorecovery*, 1989, 1:81-126.
- [3] DAVID E S, INGRID J P, ROGER C P, et al. Metal accumulation by aquacultured seedlings of Indian mustard [J]. *Environmental Science and Technology*, 1997, 31: 1636-1644.
- [4] 陈江麟,刘文新,刘书臻,等.渤海表层沉积物重金属污染评价[J]. *海洋科学*, 2004, 28(12): 16-21.
- [5] 陈洁,李升峰.巢湖表层沉积物中重金属总量及形态分析[J]. *河南科学*, 2007, 25(2): 303-307.
- [6] 陈静生,周加义.中国水环境重金属研究[M].北京:中国环境科学出版社,1992.
- [7] 陈怀满,郑春荣,周东美,等.土壤中化学物质的行为与环境质量[M].北京:科学出版社,2002.
- [8] 戴树桂.环境化学[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [9] 国家环境保护局.GB/T14581.93,湖泊和水样采样技术指导[S].北京:中国标准出版社,1993.
- [10] 环境保护部.GB15618—2008,土壤环境质量标准[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [11] 中国环境监测总站.土壤元素的近代分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,1992.
- [12] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [13] MULLER G. Schwermetalle in den Sediment des Rheims [J]. *Veraenderungen seit*, 1979, 79: 778-783.
- [14] 霍文毅.河流颗粒物重金属污染评价方法比较研究[J].

- 地理科学, 1997, 17(1): 81-86.
- [15] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sediment logical approach [J]. *Water Research*, 1980, 14: 975-1001.
- [16] 陈凤, 濮励杰. 快速城市化地区土壤重金属污染物的分布——以昆山市为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(1): 54-57.
- [17] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽, 等. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1266-1273.
- [18] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 长江三角洲地区土壤重金属生物有效性的研究: 以江苏省昆山市为例[J]. *土壤学报*, 2008, 45(2): 240-248.
- [19] 万红友, 周生路, 赵其国. 苏南典型区土壤基本性质时空变化: 以昆山市为例[J]. *地理研究*, 2006, 25(2): 303-310.
- [20] 钟晓兰, 周生路, 赵其国, 等. 长三角典型区土壤重金属有效态的协同区域化分析、空间相关分析与空间主成分分析[J]. *环境科学*, 2007, 28(12): 2758-2765.
- [21] 陈凤, 濮励杰, 赵翠薇. 昆山市农用地土壤重金属污染现状及评价[J]. *淮阴工学院学报*, 2006, 15(1): 59-62.

## Distribution and pollution evaluation of four kinds of sediment heavy metal in major water bodies of Kunshan

CHEN Chen<sup>1</sup>, CAI Zhen<sup>1,2</sup>, LIU Yan<sup>1</sup>, YUAN Lin<sup>1</sup>, WANG Qiong<sup>1</sup>, WU Hui-xian<sup>1</sup>, LU Jian-hong<sup>3</sup>, CHEN Wen-yin<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Aquatic Genetic Resources and Aquacultural Ecology Certificated by the Ministry of Agriculture; Shanghai Ocean University; Shanghai 201306, China*; 2. *Huzhou Environmental Monitoring Center, Huzhou 313000, Zhejiang, China*; 3. *Jiangsu Kunshan Fishery Monitoring Station, Kunshan 215300, Jiangsu, China*)

**Abstract:** Four kinds of sediment heavy metal samples (Zn, Cu and Pb and Cd) were collected from lakes, rivers, and aquaculture ponds in Kunshan for analysing distribution pattern and evaluating pollution status of these sediment heavy metals. The results show that, the Cu value at sampling sites of lakes varied between 6.54-333.99 mg/kg, and the mean value was 136.60 mg/kg. The Cu value at sampling sites of rivers varied between 11.00-475.88 mg/kg, and the mean value was 126.78 mg/kg. The Cu value at sampling sites of aquaculture ponds varied between 31.73-155.78 mg/kg and the mean value was 84.73 mg/kg. The ecological risks of these four heavy metal elements in Kunshan waters was Cu > Cd > Zn > Pb. The potential ecological risk index of Pb, Zn, Cu was under 40. It showed the three kinds of heavy metals were at low ecological risk. And the potential ecological risk indexes of Cd all exceed 320. What's more, the potential ecological risk indexes of Cd in all sites were more than 600, and present serious ecological risks. The general potential ecological risk level of heavy metals was in the order: aquaculture ponds > lakes > rivers.

**Key words:** Kunshan water bodies; heavy metals; spatial distribution; pollution evaluation