

南四湖表层底泥重金属污染及其风险性评价*

杨丽原^{1,4} 沈吉¹ 张祖陆² 朱育新¹ 孙庆义³

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2: 山东师范大学地理系, 济南 250014;

3: 济宁市水利局, 济宁 272119; 4: 中国科学院研究生院, 北京 100039)

提 要 通过对南四湖表层底泥中的重金属元素浓度分析, 揭示出南四湖不同湖区重金属污染物空间分布特征。利用潜在生态风险指数(RI)和地质积累指数(I_{geo})两种指标相结合的方法对表层底泥中重金属污染程度进行评价。结果表明, 南四湖上级湖的重金属污染主要以汞为主, 并依据潜在生态风险指数将南四湖上级湖分为三个生态风险功能区: 昭阳湖轻污染区; 独山湖中等污染区和南阳湖重污染区。

关键词 南四湖 底泥 重金属污染 风险性评价

分类号 P343.3 X524

湖泊表层底泥是水体污染物的重要宿体, 由汇水区得到补充的重金属被水体悬浮物吸附并最终沉积到湖泊水体表层底泥中^[1], 但其中的污染物又可以通过微生物、底栖动物及水生植物的作用重新进入生态系统, 从而对水体生态系统构成长期威胁^[2]。通常底泥中的

金属浓度比水中的元素浓度高几个数量级且有明显的分布规律, 因此可以把底泥视作水环境中重金属污染程度的“指示剂”, 这使我们有可能通过对湖泊底泥研究来评价人类活动产生的污染物的影响。

南四湖位于山东省西南部(34°27' -35°20' N, 116°34' -117°21' E), 为南阳湖、独山湖、昭阳湖和微山湖四个相互连贯的湖泊总称(图 1)。湖泊呈东南—西北向延伸, 湖西平原广阔, 是黄河和废弃黄河间的黄泛地区, 地势平缓; 湖东平原狭窄, 部分地区泰沂山脉已临近湖岸。该湖总面积 1266km², 流域面积 30453km², 平均水深 1.46m。自 1960 年在湖腰处建成二级坝后, 把南四湖分成上、下级湖, 坝北为上级湖注入河流 29 条, 集流面积 26934km², 占总集流面积的 88.4%, 目前入湖污染物主要集中于此^[3]; 南四湖作为华北地区最大的淡水湖泊, 是一个多用途的水体, 具有饮用水

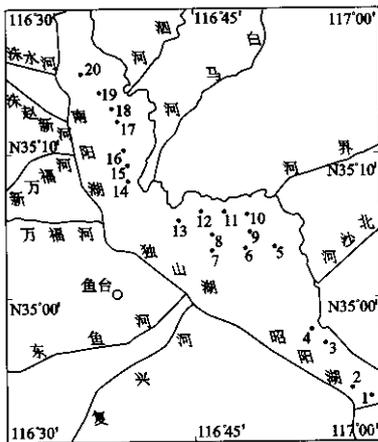


图 1 采样点位

Fig.1 Sampling sites in Nansihu Lake

* 中国科学院南京地理与湖泊研究所知识创新课题(CXNIGLAS-A02-04)、山东省自然科学基金重点资助项目(Z2000E01)联合资助。2002-07-26 收稿; 2003-02-25 收修改稿。杨丽原,男,1970 年生,博士研究生,Email:yangly@niglas.ac.cn

源、洪水控制、水产水运、污水排放及农业水源等作用。

自 20 世纪 70 年代以来,随着南四湖区域城市和工业的发展,排入南四湖的污染物逐年增加,导致南四湖许多水域水质恶化^[3]。为调查重金属元素在南四湖表层底泥中的积累和分布,并给南水北调东线南四湖段区域生态环境的整治与改善提供基础数据,2002 年 4 月,作者在南阳湖、独山湖和昭阳湖三个湖区采取了底泥表层(0-1cm)样品 20 个(图 1),本文针对重金属元素浓度的实验结果,分析了南四湖不同湖区重金属污染物的特征,并对重金属的污染程度进行了潜在生态风险评价。

1 材料与方法

1.1 样品采集

样品是利用重力采样器采集的。样点分布如图 1,1 号点至 4 号点位于昭阳湖区,其中 1 号点和 2 号点位于二级坝北部附近,5 号点至 13 号点位于独山湖区,14 号点至 20 号点位于南阳湖区内。现场采取样品,厚度为 1cm,置于密封的塑料袋中,带回实验室储存在 4℃的冷藏室内冷藏以备分析。

1.2 分析测定

样品在实验室里自然风干后,在 55℃的温度下烘干,经磨细至<100 目,取 0.120-0.125g 放入消化罐,加入浓硝酸 5mL,氢氟酸 2mL 后,在 Berghofmws-3 微波消解系统中反应,定量转入聚四氟乙烯烧杯中后,加入 0.5mL 的高氯酸,加热蒸发干燥冷却后,再加入 2mL 稀硝酸(1:1)及 2-3 滴双氧水,微热冷却后,将溶液定量转入 25mL 比色管中,定容至 25mL,用 ICP-AES 原子发射光谱仪测定。为检查化学分析过程的可靠性,将标准参考材料同样品一起测试,分析结果与标准总值相吻合。Hg 和 As 由中国科学院南京土壤研究所分析测试中心采用 HG-AFS 原子荧光光谱仪测定,其它元素在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境开放实验室分析。

1.3 风险评价方法

地质积累指数(I_{geo})是 Müller 等^[4]人利用重金属总浓度与背景值的关系来确定重金属污染程度的参数,其优点是给出很直观的重金属污染级别,是用来反映沉积物中重金属富集程度的常用指标,但其侧重单一金属,未引入生物有效性和相对贡献比例及地理空间差异;而潜在生态风险指数(RI)则体现了生物有效性和相对贡献比例及地理空间差异等特点,是综合反映底泥中重金属对生态环境影响潜力的指标,但其毒性加权系数带有主观性,因此需要 I_{geo} 和 RI 的相互补充和借鉴^[5]。选择评价的参数主要考虑对水生生物毒性大的汞、砷、铅、铜、锌等元素。

地质积累指数(I_{geo})的计算公式为

$$I_{geo} = \ln C_n / B_n \quad (1)$$

式中, C_n 为重金属元素总浓度; B_n 为重金属元素的环境背景值。潜在生态风险评价的指标包括:某一金属污染系数 C_f^i , 某一金属生物毒性响应因子 T_r^i , 某一金属潜在生态风险因子 E_r^i 。多金属潜在生态风险指数 RI, 其关系^[5]如下:

$$C_f^i = C_D^i / C_R^i; \quad E_r^i = T_r^i \times C_f^i; \quad RI = \sum_{i=1}^m E_r^i \quad (2)$$

式中, C_D^i 代表样品实测浓度, C_R^i 代表沉积物背景参考值, T_r^i 反映了金属在水相、沉积

表 1 E_f^i 、RI、 I_{geo} 的阈值区间及污染强度分级

Tab.1 Critical range and grades of E_f^i , RI, I_{geo}

单一金属对应阈值区间	风险因子程度分级
$E_f^i < 40$	I 轻微生态污染
$40 \leq E_f^i < 80$	II 中等生态污染
$80 \leq E_f^i < 160$	III 强的生态污染
$160 \leq E_f^i < 320$	IV 很强的生态污染
$E_f^i \geq 320$	V 极强的生态污染

5 种金属对应阈值区间	风险指数程度分级
$RI < 50$	A 无污染
$50 \leq RI < 120$	B 轻污染
$120 \leq RI < 240$	C 中等污染
$240 \leq RI < 400$	D 重污染
$RI \geq 400$	E 极重污染

I_{geo} 阈值区间	I_{geo} 分级
0	0
0-1	1
1-2	2
2-3	3
3-4	4
4-5	5
>5	6

固相和生物相之间的响应关系, 即生物毒性加权系数. 结合南四湖重金属污染特征并参照刘文新等^[5]人文献, 设定了 5 种重金属生物毒性响应因子 T_r^i 的数值分别为: Hg, 30; As, 10; Cu, 5; Pb, 5; Zn, 1. 据此确定的指标 E_f^i 、RI、 I_{geo} 污染强度分级标准见表 1.

2 结果与讨论

2.1 重金属浓度和空间分布特征

由于南四湖湖盆本身为洼地被黄河泛滥的泥沙淤塞而成^[6, 7], 因此在本研究环境中背景值采用黄河沉积物的地球化学基础资料^[8, 9], 从各个湖区表层底泥重金属浓度的平均值与环境背景值的对比及富集系数(重金属在表层底泥中的实测浓度与环境背景值比值)看, 汞、砷、铅、铜、钴、锰总平均值均高于环境背景值, 镍、锌的平均含量与环境背景值相近, 而铬则稍小于环境背景值.

可以看出, 汞在南阳湖中的平均浓度最高, 达 0.121mg/kg, 富集系数为 6-11 倍; 独山湖次之, 平均值为 0.074mg/kg, 超出背景值 4-6 倍, 昭阳湖最低, 平均值为 0.043mg/kg, 高出环境背景值约为 1.7-4 倍(表 2). 据实际调查, 这与

济宁市的生活污水及工业废水的直接排放进入洸府河、老运河等河流, 流入南阳湖有关. 而湖水通常由南阳湖经独山湖最后汇到昭阳湖, 因此昭阳湖的污染相对较轻. 砷、铅、锰在独山湖中的含量最高, 平均值分别为 14.2mg/kg、20.1mg/kg、995mg/kg, 这与独山湖富含有机质有关. 铬与其背景值(铬 60 mg/kg)没有明显的变化, 其富集系数为 1.0 左右. 铜、镍、钴、锌等为毒性一般的元素, 它们都是在昭阳湖、南阳湖中含量较高, 而在独山湖中的含量较低.

由以上的分析显示出南四湖上级湖三个湖区表层底泥基本已受到重金属污染, 底泥的质量已经退化或恶化. 为能够定量评价南四湖表层底泥的重金属污染程度和潜在生态危害性, 本文采用潜在生态风险指数(RI)和地质积累指数(I_{geo})两种方法相结合来进行南四湖表层底泥中重金属综合污染评价.

2.2 评价结果

根据公式(1)、(2)计算出的生态风险评价的指标和地质积累指数(表3)显示, 砷、铅、铜、锌等元素的单一元素潜在生态风险因子 E_f^i 均小于 40, 地质积累指数均小于 2 级, 属于低生态风险元素, 而汞的潜在生态风险因子 E_f^i 值最高, $I_{geo}(Hg)$ 均在 2 级以上, 为高生态风险元素, 也是生态风险指数增高的主要因子, 尽管在自然界地壳中汞的平均值为 0.08mg/kg, 在土壤中为 0.16mg/kg, 前面已述, 南四湖湖盆本身为洼地被黄河泛滥的泥沙淤塞而成, 相对于黄河沉积物中汞的平均值(0.015mg/kg)而言, 南四湖上级湖表层底泥中汞的含量有较高富集, 因此可以认为, 南四湖湖区表层底泥环境中重金属污染主要以汞为主。

表 2 不同湖区表层底泥重金属的平均浓度(mg/kg)及富集系数

Tab.2 Metal mean concentrations and enrichment factors of surface sediment samples in different lake area

元素名称		As	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
昭阳湖	平均值	11.0	19.1	59.8	42.5	0.043	701	35.6	17.4	84.5
	富集系数	1.3-1.7	1.7-4.0	1.0-1.4	0.8-1.2	1.2-2.0	0.9-1.6	1.0-1.7	0.9-1.4	0.6-1.2
独山湖	平均值	14.2	14.2	49.7	35.1	0.074	995	30.3	20.1	76.7
	富集系数	1.5-2.4	4.0-6.0	1.2-1.6	0.5-1.1	0.8-1.8	0.8-1.3	1.2-2.5	0.7-1.3	0.7-1.2
南阳湖	平均值	9.8	15.6	57.3	39.4	0.121	596	31.7	17.9	97.6
	富集系数	1.1-1.5	6.0-11.0	1.1-1.3	0.9-1.0	1.3-1.5	1.1-1.3	0.9-1.5	1.0-1.1	1.0-1.4
总平均值		12.2	15.6	54.5	38.9	0.092	834	31.8	19.1	89.6
环境背景值		7.5	11.6	60	33.9	0.015	513	31.6	15	90

表 3 不同湖区潜在生态风险因子 E_f^i 、生态风险指数 RI、 I_{geo} Tab.3 Risk factor, Risk index and I_{geo} for different lake areas

湖 区	$E_f^i(Hg)$	$E_f^i(As)$	$E_f^i(Pb)$	$E_f^i(Cu)$	$E_f^i(Zn)$	RI	污染等级	$I_{geo}(Hg)$	$I_{geo}(As)$	$I_{geo}(Pb)$	$I_{geo}(Cu)$	$I_{geo}(Zn)$
昭阳湖	86.0	14.7	5.8	6.3	0.9	113.7	轻污染	2.1	1.1	0.8	0.9	0.5
独山湖	148.0	18.9	6.7	5.2	0.9	179.7	中等污染	2.9	1.5	1.0	0.6	0.4
南阳湖	242.0	13.1	6.0	5.8	1.1	267.9	重污染	3.6	1.0	0.8	0.8	0.7

从 RI 的结果看, 南阳湖的污染较重, 独山湖为中等污染水平, 昭阳湖相对污染较轻, 根据 RI 值与污染等级, 南四湖底泥的重金属污染大致可以分为三个区段, 即生态风险功能区: 昭阳湖轻污染区(二级坝以北)、独山湖中等污染区和南阳湖重污染区, 从空间上看, 从北到南重金属污染又重到轻, 这与湖水由北到南的汇聚方向一致, 说明来自济宁的城市生活污水和工业废水是南四湖上级湖的污染的主要来源。

通过比较, RI 和 I_{geo} 两种定量指标对湖泊表层底泥中的重金属污染的总体趋势反映基本一致, 说明这两种方法结合使用, 达到了相互补充和印证的目的。

考虑到当地的社会、经济和技术条件, 可相应地制定出污染沉积物的初步管理对策, 即按流域内潜在生态风险的功能区划, 有针对性分段加以治理, 例如, 针对南阳湖区的污染, 首先要对来自济宁市的生活污水及工业废水进行废水达标排放, 在污染源头上管理好;

其次针对湖区底泥的重污染区可以进行疏浚处理。

3 结论

根据以上分析,流域内金属污染的空间分布呈现由北到南,由南阳湖、独山湖到昭阳湖依次由重到轻,这与湖水流动方向基本一致,据此划分出3个生态功能区。南四湖表层底泥中汞的风险因子远高于其它元素,是构成了潜在的生态危害的主要因素,在今后区域生态环境的治理与恢复工程中,应特别关注汞对生态环境影响。

致谢 在野外采样过程中,得到刘兴起博士、张恩楼博士大力帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 范成新,朱育新,吉志军等.太湖宜溧河水系沉积物的重金属污染特征.湖泊科学,2002,14(3):235-241
- 2 Müller H W, Schwaighofer B, Kalman W. Heavy metal contents in river sediments. Water, Air, and Soil Pollution., 1994, 72: 191-203
- 3 张祖陆,孙庆义,彭利民等.南四湖地区水环境问题探析.湖泊科学,1999,11(1):86-90
- 4 Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. Geojournal, 1969 2(3):108-118
- 5 刘文新,栾兆坤,汤鸿霄.乐安江沉积物中金属污染的潜在生态风险评价.生态学报,1999,19(2):206-211
- 6 郭永胜.历史上山东湖泊的变迁.海洋湖沼通报.1990(1):15-22
- 7 沈吉,张恩楼,张祖陆等.山东南四湖成湖时代浅析.湖泊科学,2000,12(1):91-93
- 8 赵一阳,鄢明才.黄河、长江、中国浅海沉积物化学元素丰度比较.科学通报,1992,37(13):1202-1204
- 9 张朝生,章申,王立军等.长江与黄河沉积物金属元素地球化学特征及其比较.地理学报,1998,53(4):314-322

Distribution and Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in Superficial Sediments of Nansihu Lake

YANG Liyuan^{1,4}, SHEN Ji¹, ZHANG Zulu², SUN Qingyi³ & Zhu Yuxin¹

(1: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, 210008, P.R. China;

2: Department of Geography, Shandong Normal University, Jinan, 250014, P.R. China;

3: Jining Bureau of Water Resource, Jining, 272119, P.R. China;

4: The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100039, P.R. China)

Abstract

Heavy metal concentrations (As, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn) of superficial sediments in the Nansihu Lake were investigated in April, 2002. The determination of the heavy metal distribution of the lake's superficial sediments was carried out by ICP-AES. The potential ecological risk index (*RI*) and geological accumulation index (I_{geo}), as the quantitative diagnostic tools, were used to evaluate the pollution degree of various heavy metals in the sediments. The results show the distribution of pollutants in the sediments could be divided into three sections with different ecological risk characteristics: (1) light pollution area in Zhaoyang Lake, (2) medium pollution area in Dushan Lake, and (3) heavy pollution area in Nanyang Lake.

Keywords: Nansihu Lake; sediment; heavy metal pollution; risk assessment