

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2012.04.002

南四湖表层底泥重金属空间分布及污染程度评价

李 爽 ,张祖陆

(山东师范大学人口·资源与环境学院 ,山东 济南 250014)

摘要 测试南四湖湖区 29 个表层底泥中重金属 Hg、Cd、Cr、Pb、Ni、Cu、Zn 和类金属 As 的质量比,得到南四湖湖区重金属污染的空间分布特征。结合地质积累指数法和潜在生态风险指数法,对南四湖重金属污染程度进行评价。结果表明,南四湖已受到重金属元素的污染,属于中等程度污染湖泊,其中以 As、Hg、Cd、Pb 元素污染严重。除了 As、Cd 元素在下级湖表层底泥中的质量比略高外,其他重金属元素在上级湖的污染程度普遍比在下级湖的高;二级坝以北的昭阳湖湖区潜在生态危害最为严重,其次是南阳湖、微山湖、独山湖和二级坝以南的昭阳湖湖区。

关键词 南四湖;表层底泥;重金属污染;空间分布;地质积累指数法;潜在生态风险指数法
中图分类号:X502 文献标识码:A 文章编号:1004-6933(2012)04-0006-06

Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediments of Nansihu Lake

LI Shuang, ZHANG Zu-lu

(College of Population, Resources and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: The contents of heavy metals, including Hg, Cd, Cr, Pb, Ni, Cu, and Zn, and As, which is a metalloid, in 29 samples of surface sediments in Nansihu Lake were investigated. The spatial distribution characteristics of the heavy metals were obtained. The index of geo-accumulation and potential ecological risk index methods were used to assess the heavy metal pollution in Nansihu Lake. The results show that the lake has been moderately polluted by heavy metals. As, Hg, Cd, and Pb have caused serious pollution in the lake. The heavy metal pollution in the lakes to the north of a grade-II dam was more serious than to the south, except for As and Cd, which caused more serious pollution in the lakes to the south of the dam than to the north. Zhaoyang Lake to the north of the dam had the highest potential ecological risk index, followed by Nanyang Lake, Weishan Lake, Dushan Lake, and Zhaoyang Lake to the south of the dam.

Key words: Nansihu Lake; surface sediments; heavy metal pollution; spatial distribution; index of geo-accumulation; potential ecological risk index

湖泊底泥是水体各种污染物的源和汇。一方面,输入到水体中的各种污染物被水中悬浮物吸附,最终沉积到表层底泥中;另一方面,通过动植物、微生物等的作用,污染物又会被重新释放到水体中,造成水环境的二次污染^[1-2]。表层底泥所含的重金属元素通常比水体中所含的重金属元素要高几个数量级,且易受到各种自然和人为因素的影响,具有较高的潜在生态危害性,因此表层底泥被誉为湖泊水环

境重金属污染的“指示剂”^[3],表层底泥中的重金属元素质量比成为评价湖泊水环境污染程度的重要指标^[4-7]。对湖泊表层底泥重金属质量比的空间分布特征进行研究,能有效揭示人类活动对湖泊环境的影响^[8]。

南四湖位于山东省西南部,是南水北调东线工程的重要调蓄枢纽,由南阳湖、独山湖、昭阳湖和微山湖由北到南相连构成,最大湖水面积约为 1 266

基金项目:山东省自然科学基金(Y2008E13)、国家水体污染控制与治理重大科技专项(2009ZX07210-007-01)

作者简介:李爽(1984—),女,博士研究生,研究方向为遥感和地理信息系统在水资源与水环境中的应用。E-mail: ls8412519@163.com

通讯作者:张祖陆,教授。E-mail: zulzhang@126.com

km² 集水总面积约为 30453 km²。1960 年,在昭阳湖最窄处兴建了二级坝,将昭阳湖隔成坝上和坝下两部分。南四湖被分隔成二级坝以北的上级湖和以南的下级湖,其中南阳湖、独山湖和二级坝以北的昭阳湖位于上级湖,二级坝以南的昭阳湖和微山湖位于下级湖。南四湖内的重金属一部分来自于自然积累,一部分来自于人为积累。近年来,随着经济的发展,人为污染严重,南四湖表层底泥中很多重金属的质量比远高于当地自然背景值,水体污染严重。南四湖流域是山东省重要工业区,流域内分布着化工、造纸、煤炭、冶金等重污染企业,大量工业废水和生活污水未经处理直接排入湖中,致使南四湖底泥中某些重金属元素快速积累,重金属污染严重^[3]。

目前对南四湖重金属污染的研究主要集中在上级湖或各主要入湖河流^[9-13],而对全湖的重金属污染及上级湖和下级湖对比分析的研究较少。刘恩峰等^[8]、孟祥华等^[13]对全湖常量元素和重金属分布进行了总体评价,但侧重于对各个入湖河流的重金属污染情况和金属组成形态进行分析,未对全湖的重金属污染程度进行评价,未能得到全湖的重金属分布等级图。

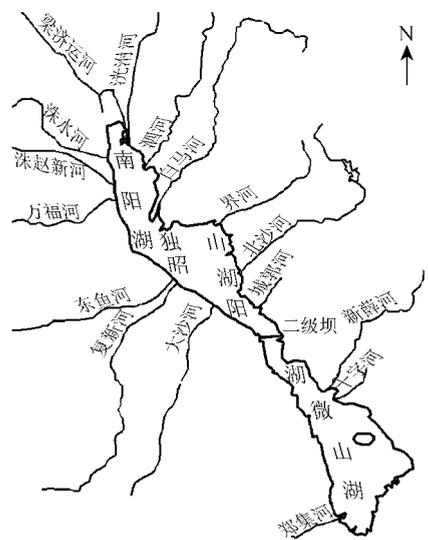
笔者根据二级坝的位置和湖区的分布,将南四湖划分为 5 个湖区,即,南阳湖、独山湖、坝北昭阳湖(位于二级坝以北的昭阳湖)、坝南昭阳湖(位于二级坝以南的昭阳湖)、微山湖,见图 1。通过对南四湖 29 个采样点表层底泥中的重金属质量比进行分析,了解上级湖、下级湖及南四湖 5 个湖区的重金属污染特征,并采用地质积累指数法和潜在生态风险指数法对 5 个湖区和上下级湖表层底泥中几类污染严重的重金属质量比进行评价,以识别重金属污染重点区域及污染的可能性来源,并用 ArcGIS 地统计方法得到南四湖 As、Hg、Cd、Pb 元素分布图,旨在为南水北调东线工程南四湖段的水体污染治理提供参考和依据。

1 样品采集与污染程度评价

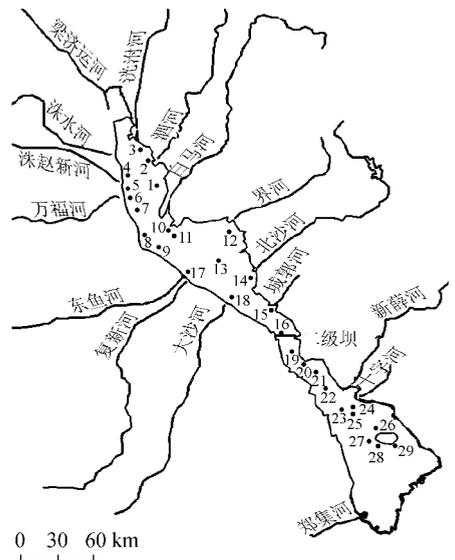
1.1 样品采集

2010 年 9 月 15 日—9 月 21 日,利用重力采样器在南四湖采集了表层底泥(0~2 cm)样本 29 个,各点利用 GPS 定位,采样点分布位置见图 1。其中,样点 1~9 位于南阳湖内,10~15 位于独山湖内,16~18 位于坝北昭阳湖内,19~22 位于坝南昭阳湖内,23~29 位于微山湖内。

样品置于密封的塑封袋中带回实验室,剔除底泥样品中的贝壳、砂石等杂质,自然风干,将干透的样品研磨,并过 100 目筛,分袋装,保存备用。



(a) 南四湖湖区位置



(b) 南四湖采样点位置

图 1 湖区位置及采样点位置示意

1.2 测试方法

本研究对南四湖表层底泥中几种重金属和类金属的质量比进行分析,这些重金属和类金属主要包括砷(As)、汞(Hg)、镉(Cd)、铬(Cr)、铅(Pb)、铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)。检测分析依据是 GB/T 5009—2003、DZG 20.03—1987 等有关国家标准。Cr、Ni 和 Pb 的测定利用全谱直读等离子体发射光谱仪;As 和 Hg 的测定利用双道原子荧光分光光度计;Cu、Zn 和 Cd 的测定利用等离子体质谱仪测定。样品的测定均在国土资源部济南矿产资源监督检测中心完成。通过随机抽取平行样对比分析,使得测试误差控制在 10% 以内。

1.3 污染程度评价

评价底泥中重金属污染程度的方法有很多,常用的方法有地质积累指数法和潜在生态风险指数

法。本研究运用这两种评价方法,并进行综合分析,以期得到更具可靠性的结果。

1.3.1 地质积累指数法

地质积累指数法是由 Müller^[14]提出的,被广泛应用于沉积物重金属污染程度的定量评价。其表达式为

$$I_{geo} = \log(C_n/kB_n) \quad (1)$$

式中: I_{geo} 为地质积累指数; C_n 为元素 n 在表层底泥中的质量比; B_n 为元素 n 的环境背景值; k 为各地岩石差异可能引起的背景值变动系数(一般取1.5)。

地质积累指数法主要用于描述单个元素对环境污染的程度^[15]。根据 I_{geo} 值的大小对污染强度进行分级:小于0为无污染,0~1为轻-中污染,1~2为中等污染,2~3为中-强污染,3~4为强污染,4~5为强-极严重污染,大于5为极严重污染。

1.3.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法是由瑞典学者 Hakanson^[16]提出的,用于评价重金属潜在的生态危害。其表达式为

$$C_f^i = C^i/C_n^i \quad (2)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (3)$$

$$R_1 = \sum_{i=1}^m E_r^i \quad (4)$$

式中: C_f^i 为金属 i 的污染系数,也称为富集系数; C^i 为金属 i 的实测质量分数; C_n^i 为金属 i 的环境背景值; E_r^i 为金属 i 潜在生态风险因子; T_r^i 为金属 i 的生物毒性加权系数; R_1 为多种重金属的潜在生态风险指数,即单个金属潜在生态风险因子之和。

潜在生态风险指数不仅反映了单一重金属元素对生态环境潜在的危害,还反映了多种重金属元素对环境的综合影响。根据 E_r^i 值和 R_1 值对污染强度进行定量分级,见表^[16-17]。

表1 E_r^i 和 R_1 的阈值区间和污染强度分级

E_r^i	污染强度	R_1	污染强度
≤ 40	I 轻微生态污染	≤ 50	I 无污染
40~80	II 中等生态污染	50~120	II 轻污染
80~160	III 强的生态污染	120~240	III 中等污染
160~320	IV 很强的生态污染	240~400	IV 重污染
≥ 320	V 极强的生态污染	≥ 400	V 极重污染

由于南四湖地处黄河泛滥的黄泛平原区,因此,本研究环境背景值的选取综合考虑了黄河干流沉积物的重金属质量比和南四湖流域未受污染土壤中的重金属质量比。根据南四湖各重金属元素的污染情况和前人的研究^[18],本研究设定各式中的重金属生

物毒性加权系数: As 为10, Hg 为30, Cd 为30, Pb 为5。

2 结果与分析

2.1 重金属的空间分布

南四湖表层底泥中8类重金属质量比、质量比平均值和环境背景值如图2所示。

南四湖各采样点的表层底泥中, As 、 Hg 、 Cd 、 Pb 的总平均质量比均高于环境背景值,说明南四湖受 As 、 Hg 、 Cd 、 Pb 污染严重; Cr 、 Ni 、 Cu 、 Zn 的平均质量比与环境背景值接近,说明湖区尚未受到这些金属的污染威胁。

南四湖5大区域表层底泥中各重金属质量比的平均值见表2。由表2可见,下级湖表层底泥中 As 和 Cd 的质量比略高于上级湖,其他各重金属的质量比均是上级湖明显高于下级湖。

由表3可见,南四湖 As 、 Hg 、 Cd 、 Pb 的总平均富集系数均远大于1,说明湖区这4类元素出现了较重的富集现象,而 Cr 、 Ni 、 Cu 和 Zn 的总平均富集系数与1接近,表明这些元素暂未出现明显富集现象。

微山湖表层底泥中的 As 和 Cd 平均富集系数最大,分别为2.26和3.38,其次是坝北昭阳湖、南阳湖、坝南昭阳湖、独山湖。

坝北昭阳湖表层底泥中的 Hg 和 Pb 富集最为严重,平均富集系数分别为3.80和1.93,其次是南阳湖、独山湖。其中, Hg 的平均质量比均超出环境背景值3倍多, Pb 的平均质量比均超出环境背景值近2倍,富集现象主要位于上级湖。

As 、 Hg 、 Cd 、 Pb 都为生物毒性显著的重金属,它们在南四湖表层底泥中的平均质量比高于环境背景值多倍。 Cr 、 Cu 、 Zn 、 Ni 为一般毒性的重金属,它们的平均质量比与环境背景值相近,富集系数在1.00左右。

2.2 污染程度评价结果

由以上分析可以看出,南四湖已经开始受到多种重金属的污染。为对南四湖各类重金属污染程度及其潜在的生态风险作出定量评价,综合地质积累指数和潜在生态风险指数两种方法,对南四湖5个区域的表层底泥所含的的4类富集系数较高的重金属(As 、 Hg 、 Cd 、 Pb)作出污染程度综合评价。

对5个湖区4类重金属元素运用地质积累指数进行污染程度评价,评价结果见表4。

由表4可以看出, As 和 Pb 元素在各个湖区都处于轻-中污染程度;而 Hg 元素在上级湖处于中等污染程度,在下级湖属于轻-中污染程度; Cd 元素在微山湖处于中等污染程度,在其他湖区属于轻-中污染程度。

—●— 质量比 — 质量比平均值 - - - - 环境背景值

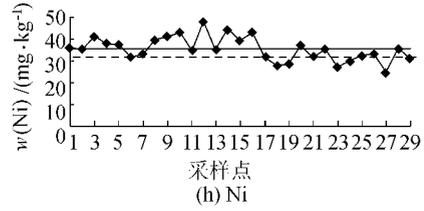
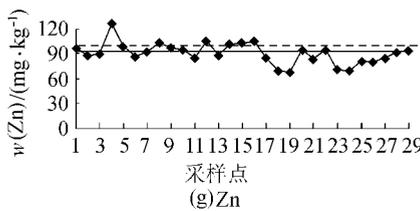
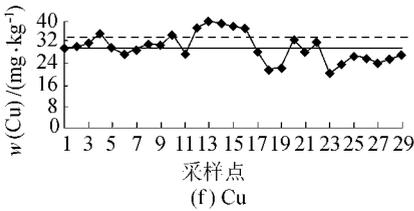
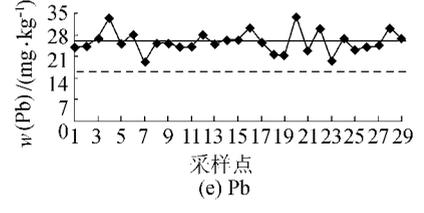
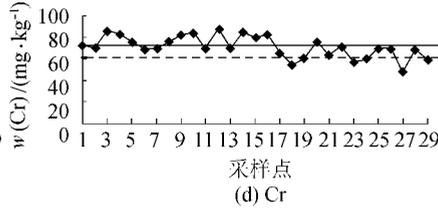
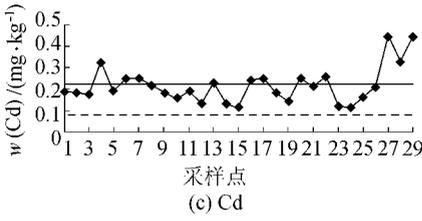
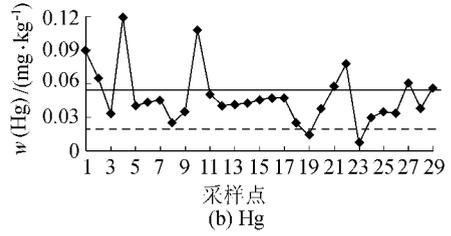
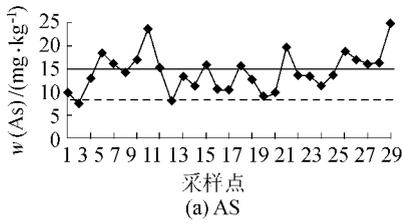


图2 南四湖表层底泥中8类重金属质量比、质量比平均值及环境背景值

表2 南四湖5大区域表层底泥中重金属质量比及富集系数

区域	AS			Hg			Cd			Cr		
	质量比范围/ (mg·kg ⁻¹)	质量比平均值/ (mg·kg ⁻¹)	平均富集系数	质量比范围/ (mg·kg ⁻¹)	质量比平均值/ (mg·kg ⁻¹)	平均富集系数	质量比范围/ (mg·kg ⁻¹)	质量比平均值/ (mg·kg ⁻¹)	平均富集系数	质量比范围/ (mg·kg ⁻¹)	质量比平均值/ (mg·kg ⁻¹)	平均富集系数
上级湖												
南阳湖	7.49~23.79	15.03	2.00	0.025~0.119	0.055	3.67	0.17~0.33	0.22	2.86	69.38~85.77	79.95	1.27
独山湖	7.90~16.20	11.65	1.55	0.040~0.108	0.055	3.66	0.11~0.23	0.16	2.08	37.88~68.9	79.14	1.32
坝北昭阳湖	13.36~19.61	15.55	2.07	0.038~0.077	0.057	3.80	0.21~0.26	0.24	3.12	63.74~75.27	70.27	1.17
下级湖												
坝南昭阳湖	8.91~15.67	11.79	1.57	0.014~0.047	0.033	2.20	0.14~0.25	0.20	2.60	54.20~82.68	65.53	1.09
微山湖	11.39~24.93	16.97	2.26	0.006~0.061	0.037	2.47	0.11~0.45	0.26	3.38	47.70~69.24	61.52	1.03
区域	Pb			Cu			Zn			Ni		
	质量比范围/ (mg·kg ⁻¹)	质量比平均值/ (mg·kg ⁻¹)	平均富集系数	质量比范围/ (mg·kg ⁻¹)	质量比平均值/ (mg·kg ⁻¹)	平均富集系数	质量比范围/ (mg·kg ⁻¹)	质量比平均值/ (mg·kg ⁻¹)	平均富集系数	质量比范围/ (mg·kg ⁻¹)	质量比平均值/ (mg·kg ⁻¹)	平均富集系数
上级湖												
南阳湖	18.85~33.45	25.64	1.71	27.3~35.6	30.78	0.91	86.7~125.7	96.98	1.08	31.6~41.65	37.02	1.17
独山湖	23.78~28.27	25.62	1.71	27.9~40.2	36.30	1.07	84.5~104.4	95.87	1.07	34.58~48.10	40.69	1.29
坝北昭阳湖	22.70~33.84	28.91	1.93	28.2~33.4	31.27	0.92	82.9~95.8	90.83	1.01	31.3~36.76	34.29	1.09
下级湖												
坝南昭阳湖	21.21~30.2	24.74	1.65	22.2~37.5	27.65	0.82	67.0~104.9	81.25	0.90	27.33~42.88	32.60	1.03
微山湖	19.49~30.2	24.99	1.67	20.6~27.4	24.99	0.74	68.6~94.6	81.43	0.90	27.15~35.53	60.56	0.97

表3 南四湖表层底泥中重金属质量比总平均值情况

元素	质量比总平均值/ (mg·kg ⁻¹)	环境背景值/ (mg·kg ⁻¹)	总平均富集系数
As	14.410	7.500	1.92
Hg	0.048	0.015	3.20
Cd	0.220	0.077	2.86
Cr	71.100	60.000	1.19
Pb	25.690	15.000	1.71
Cu	30.140	33.900	0.89
Zn	87.550	90.000	0.97
Ni	35.330	31.600	1.12

表4 不同湖区 I_{geo} 及污染等级

元素	上级湖			下级湖		
	南阳湖	独山湖	坝北昭阳湖	坝南昭阳湖	微山湖	
	I _{geo}	污染等级	I _{geo}	污染等级	I _{geo}	污染等级
As	0.42	I	0.05	I	0.47	I
Hg	1.29	II	1.29	II	1.34	II
Cd	0.93	I	0.47	I	1.06	I
Pb	0.19	I	0.19	I	0.36	I

对 5 个湖区的 4 类重金属元素运用潜在生态风险指数 (R_1) 进行风险评价, 评价结果见表 5。

表 5 南四湖 5 个湖区的 R_1 及污染等级

元素	上级湖				下级湖					
	南阳湖		独山湖		坝北昭阳湖		坝南昭阳湖		微山湖	
	E_r^i	污染等级								
As	20.04	I	15.53	I	20.73	I	15.72	I	22.63	I
Hg	110.00	III	110.00	III	114.00	III	66.00	III	74.00	III
Cd	85.71	III	62.34	II	93.51	III	77.92	II	101.30	III
Pb	8.55	I	8.54	I	9.64	I	8.25	I	8.33	I
R_1	224.30	III	196.41	III	237.88	III	167.89	III	206.26	III

由 E_r^i 的结果可以看出, As 和 Pb 元素在各个湖区有轻微的潜在生态风险; Hg 元素在上级湖具有强的潜在生态风险, 下级湖具有中等强度的潜在生态风险; Cd 元素在南阳湖、坝北昭阳湖和微山湖具有强的潜在风险, 在独山湖和坝南昭阳湖具有中等强度的潜在生态风险。

由 R_1 评价结果看, 各湖区的 4 类重金属污染都处于中等污染水平, 其中坝北昭阳湖 R_1 指数最大; 其次为南阳湖, 再次为微山湖, 独山湖和坝南昭阳湖重金属元素的污染程度比其他湖区要低。

由表 4 和表 5 可知, 南四湖各个湖区有不同程度的 As、Hg、Cd 和 Pb 污染, I_{geo} 、 E_r^i 和 R_1 的评价结果趋于一致。利用 ArcGIS 地统计方法, 得到 4 类重金属元素在全湖的污染(根据污染程度的轻重, 将其分为 1~5 级)分布趋势图, 见图 3。

由图 3 可以明显看出, As 和 Cd 在下游湖污染较重, 而 Hg 和 Pb 则主要聚集在上级湖。

2.3 重金属污染源讨论

南四湖表层底泥中的重金属元素除了自然的累积外, 工业、生活污水的排放也是其直接可能来源。为进一步探究两者之间的相互关系, 对 8 类金属元

素之间的相关系数做了对比, 结果见表 6。

由表 6 可知, Cr、Cu、Zn、Ni 之间具有较高的相关系数(0.7~0.959), 说明其具有同源性, 且表层底泥中这 4 类元素的平均质量比与环境背景值相近, 富集系数都在 1.00 左右, 属于以自然沉积为主, 受人为干扰小。As、Hg、Cd、Pb 与受人为干扰小的 Cr、Cu、Zn、Ni 相关性较小, 甚至出现负相关, 且 As、Hg、Cd、Pb 的平均质量比远高于环境背景值, 富集现象显著, 表明 As、Hg、Cd、Pb 的污染以人为因素为主。

表 6 8 类金属元素之间的相关系数

重金属	As	Hg	Cd	Cr	Pb	Cu	Zn	Ni
As	1							
Hg	-0.081	1						
Cd	0.607**	0.327	1					
Cr	-0.68	0.294	-0.333	1				
Pb	-0.012	0.275	0.150	0.095	1			
Cu	-0.004	0.386*	-0.117	0.800**	0.156	1		
Zn	0.298	0.574**	0.256	0.738**	0.165	0.775**	1	
Ni	-0.076	0.229	-0.319	0.959**	0.061	0.814**	0.711**	1

注: ** 表示在 0.01 水平下显著相关, * 表示在 0.05 水平下显著相关。

总体而言, 南四湖上级湖的污染比下级湖严重, 这与刘恩峰等^[8-12]的研究结果一致。南四湖上级湖的重金属污染严重, 主要由于: ①南四湖的入湖河流主要集中在上级湖, 大量含重金属的污染水通过河流进入南四湖; ②上级湖距济宁、兖州等城市较近, 大量工业和生活污水的排放入湖, 且南四湖的水自北向南流动, 造成上级湖污染较重。

南四湖 5 个湖区受重金属污染最严重的是坝北昭阳湖, 其次是南阳湖、微山湖、独山湖、坝南昭阳湖。这与刘恩峰等^[8-12]认为上级湖污染程度是南阳湖 > 独山湖 > 昭阳湖的结论有所不同。坝北昭阳湖之所以成为重金属污染区, 一方面因为其位于上级湖, 另一方面与二级坝的位置也有关系: 受二级坝拦

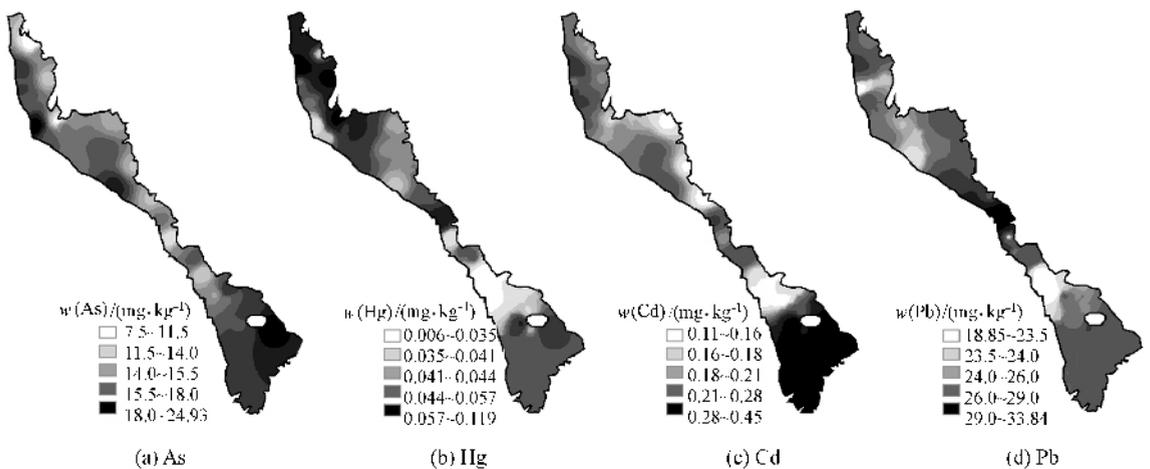


图 3 南四湖 As、Hg、Cd、Pb 污染分布趋势

截,水中依附着重金属元素的悬浮物在此容易沉积。济宁的生活、工业废水大量排放入南阳湖,可能是南阳湖重金属污染较重的原因。而微山湖中作为重要旅游岛屿的微山岛对周围湖水的污染较严重。

南四湖各个湖区内都受到了 As、Hg、Cd、Pb 不同程度的污染,尤其以 Hg 污染最为严重。

Hg 在南四湖表层底泥中质量比最高,且主要集中在上级湖,这主要由于产于南四湖流域最大的煤炭基地兖州煤炭所致,煤炭中 Hg 的质量比约 0.188 mg/kg^[19],煤炭中的 Hg 经燃烧后经废水、废弃、粉尘等各种形式最终汇于南四湖。As 主要来源于医药、纺织和印染等行业排放的含 As 废水,以及燃烧煤的排放^[3],另外含 As 农药也是 As 的重要来源。Cd 主要来自采矿、冶金和电镀业^[20],南四湖流域内微山湖周边的枣滕煤炭、微山县的矿区及周边的纺织印染等工业,都是微山湖 As、Cd 富集的主要原因。Pb 主要来源于煤炭的燃烧。兖州煤炭的 Pb 含量较高^[3],Pb 在煤炭燃烧过程中释放,而大气中的 Pb 经降水和雨水冲刷等作用,大部分最终汇入南四湖的上级湖。

3 结 论

本研究对南四湖 5 个区域表层底泥中的 8 类重金属元素质量比进行测定,得到了南四湖表层底泥中 8 类重金属元素的分布情况,并对污染较重的 4 类元素进行了污染评价,得到结论如下:

a. 南四湖已经受到 As、Hg、Cd、Pb 多种重金属元素的污染,其中以 Hg 污染最为严重。

b. 对 4 种污染严重的重金属进行污染程度评价,可知除了 As 和 Cd 元素在下级湖表层底泥中的质量比略高于上级湖外,其他重金属的污染程度上级湖明显高于下级湖。总体来看,坝北昭阳湖的潜在生态危害性最大,其次是南阳湖、微山湖、独山湖、坝南昭阳湖。

c. 对 8 类重金属元素进行相关性分析,可知 Cr、Cu、Zn、Ni 元素主要来源于自然沉积,而表层底泥中 As、Hg、Cd、Pb 的污染,则以人为因素为主。

致谢:对协助野外采样的杜臣昌、吕建树、张伦、于泉洲、孙京姐、程刚,表示真挚的感谢。

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[J].湖泊科学,2002,14(3):235-241.
[2] MÜLLER H W, SCHWAIGHOFER B, KALMAN W. Heavy metal contents in river sediments[J]. Water, Air, and Soil

Pollution, 1994, 72:191-203.

[3] 沈吉,张祖陆,杨丽原,等.南四湖环境与资源研究[M].北京:地震出版社,2008.
[4] 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[J].生态学报,1999,19(2):206-211.
[5] 沈吉,张恩楼,张祖陆,等.山东南四湖成湖时代浅析[J].湖泊科学,2000,12(1):91-93.
[6] 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[J].地理学报,1998,53(4):314-322.
[7] 霍文毅,黄风茹,陈静生,等.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.
[8] 刘恩峰,沈吉,杨丽原,等.南四湖及主要入湖河流表层沉积物重金属形态组成及污染研究[J].环境科学,2007,28(6):1377-1383.
[9] 杨丽原,沈吉,张祖陆,等.南四湖表层底泥重金属和营养元素的多元分析[J].中国环境科学,2003,23(2):206-209.
[10] 杨丽原,沈吉,张祖陆,等.南四湖表层底泥重金属污染及其风险性评价[J].湖泊科学,2003,15(3):252-256.
[11] 王素芬,张惠潼.南四湖表层底泥重金属污染的风险评价[J].山东水利,2009(9):22-24.
[12] 王晓军,潘恒健,杨丽原,等.南四湖表层沉积物重金属元素的污染分析[J].海洋湖沼通报,2005,3(2):155-158.
[13] 孟祥华,刘恩峰,杨丽原,等.南四湖及主要入湖河流沉积物金属空间分布特征与污染评价[J].环境科学研究,2010,23(1):1-6.
[14] MÜLLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969, 2(3):108-118.
[15] FORSTNER U, WITTMANN G T. Metal pollution in the aquatic environment[M]. Berlin: Springer, 1979.
[16] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8):975-1001.
[17] 王胜强,孙津生,丁辉.海河沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J].环境工程,2005,23(2):62-64.
[18] 吕文英,汪玉娟,刘国光.北江底泥中重金属污染特征及生态危害评价[J].中国环境监测,2009,25(3):69-72.
[19] 任建莉,周劲松,骆仲决,等.煤中汞燃烧过程析出规律试验研究[J].环境科学学报,2002,34(4):289-293.
[20] 张兴梅,赵玺灵,苗艳姝,等.天然气预重整对固体氧化物燃料电池性能模拟[J].煤气与热力,2008,28(3):35-39.

(收稿日期:2011-05-11 编辑:彭桃英)