

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

刘恩峰¹, 沈吉¹, 杨丽原², 朱育新¹, 孙庆义³, 王建军¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2. 济南大学城市发展学院, 济南 250022; 3. 济宁市水利局, 济宁 272119)

摘要:采用 BCR(SM&T)方法对南四湖及主要入湖河流丰水季节表层沉积物中 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn 6 种重金属元素的酸提取态、可还原态、可氧化态及残渣态进行了连续提取, 分析了各水体单元表层沉积物重金属元素的形态组合特征、人为污染状况及潜在生态风险。研究结果表明, 泗河、京杭运河、洙赵新河、洸府河上游、上级湖南部湖区及下级湖区表层沉积物中 Cr、Cu、Ni、Zn 以残渣态为主, 其含量可占到该元素总量的 80% ~ 90%, 人为污染程度较弱; 老运河、洸府河入湖口、白马河表层沉积物中 Cr、Cu、Ni、Zn 的残渣态含量明显降低, 而可提取态(酸提取态、可还原态、可氧化态)含量可增至 80% 以上, 其中以可氧化态、酸提取态为主, 人为污染程度较重; 各水体单元表层沉积物中 Pb、Mn 以残渣态和可氧化态为主, 其含量占 Pb、Mn 含量的 95%、70% 左右, 基本未受人为污染。随着表层沉积物中有机物的矿化分解及环境条件的改变, 老运河、洸府河入湖口、白马河等重金属人为污染较重的沉积物中 Cr、Cu、Ni、Zn 的可氧化态、酸提取态及可还原态可发生活化, 具有较高的潜在生态风险。

关键词: 表层沉积物; 重金属形态; 人为污染; 南四湖

中图分类号: X143; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)06-1377-07

Chemical Fractionation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Nansihu Lake and Its Main Inflow Rivers, China

LIU En-feng¹, SHEN Ji¹, YANG Li-yuan², ZHU Yu-xin¹, SUN Qing-yi³, WANG Jian-jun¹

(1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. School of City Development, Jinan University, Jinan 250022, China; 3. Jining Bureau of Water Resource, Jining 272119, China)

Abstract: Chemical forms of Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn in the surface sediments of Nansihu Lake and its main inflow rivers are determined by the BCR sequential extraction method. The chemical fractionation composition characteristics, pollution state and potential ecological effects of the heavy metals are discussed. Cr, Cu, Ni and Zn in the sediments of Sihe River, Jinghang Canal, Zhuzhaoxin River, Guangfu River, south area of the Upper Lakes, and Down Lakes mainly exist in residual fraction, which account for 80% ~ 90% of their content, mainly reflecting the natural characteristics of the heavy metals; but for the sediment of Old Canal, Guangfu River estuary, Baima River, nearly 80% of Cr, Cu, Ni and Zn exist in extractable fractions due to human pollution, especially with high oxidizable and acid extractable fractions content. Pb and Mn mainly exist in residual fraction and oxidizable fraction in the sediment of Nansihu Lake and its main inflow rivers, which account for 95% and 70% of the content of Pb and Mn, similar to other unpolluted sediments. With the mineralization and decomposition of organic matter and change of environment condition of the surface sediment, the extractable fractions of Cr, Cu, Ni, Zn in the polluted sediment can be reactivated, bringing on ecological harm to the water ecological system.

Key words: surface sediment; chemical forms of heavy metal; human pollution; Nansihu Lake

水体沉积物中的重金属以不同的结合态存在, 主要包括可交换态、碳酸盐结合态、Fe-Mn 氧化物结合态、有机物及硫化物结合态、残渣态, 前 4 种结合态统称为可提取态^[1~5]。未受人为污染的沉积物中的重金属元素具有相对稳定的形态组成, 而沉积物受到重金属人为污染之后, 重金属元素的可提取态含量会明显增加, 由此可判断重金属的人为污染程度^[4,6,7]。重金属元素以可提取态赋存的部分在一定的环境条件下可发生形态的转化, 对生态环境具有潜在的危害^[8~12]。通过沉积物中重金属元素形态组成的分析, 不仅可以有效地识别重金属的人为污染

状况, 而且能够对重金属潜在的生态风险作出科学评价, 已被广泛应用于水体沉积物重金属污染研究中^[4,6,13]。

南四湖位于山东省的西南部, 是华北地区典型的浅水湖泊, 湖泊面积 1 266 km², 平均水深 1.5 m。自 1960 年二级坝建成后, 南四湖就被人为地分成上级湖区与下级湖区, 其中上级湖区面积 602 km², 是

收稿日期: 2006-07-04; 修订日期: 2006-08-28

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-348); 中国科学院南京地理与湖泊研究所所长基金项目

作者简介: 刘恩峰(1976~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为湖泊沉积与环境地球化学, E-mail: elfliu@niglas.ac.cn

南四湖主要的汇水区(图 1).近 20a 来,随着污染物入湖量的不断增加,南四湖水环境状况日趋恶化.杨丽原等对南四湖上级湖区沉积物重金属人为污染特征进行了研究^[14,15],但对沉积物中重金属污染元素的入湖来源、形态组成缺乏深入地研究,从而无法科学地评价沉积物中重金属污染元素潜在的生态危害.本实验通过对南四湖主要入湖河流及湖区丰水季节表层沉积物中 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn 形态组成的分析,研究了南四湖流域不同水体单元沉积物中重金属的形态组成特征、人为污染状况及潜在生态风险,这对南四湖流域重金属污染治理具有一定的参考价值.

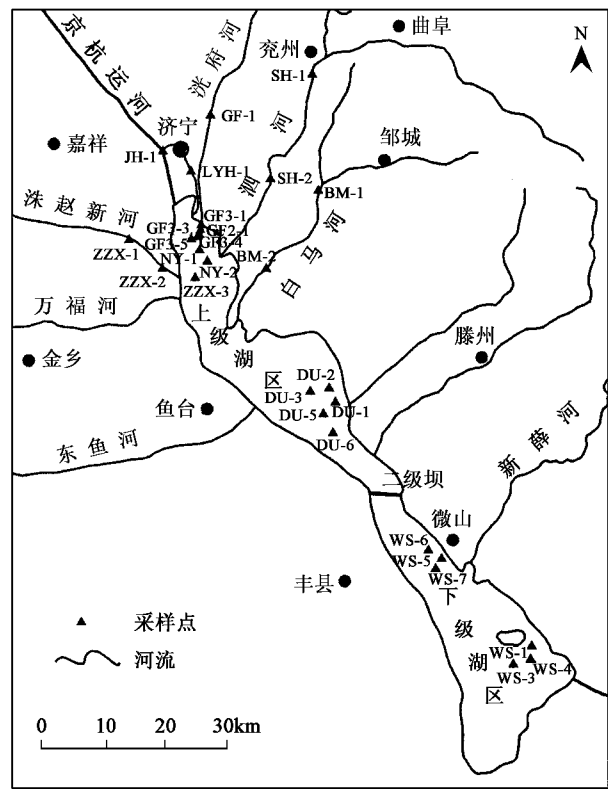


图 1 南四湖及主要入湖河流表层沉积物采样点位置
Fig.1 Sample sites of Nansihu Lake and its main inflow rivers

1 材料与方法

2005-09 在南四湖主要入湖河流及湖区采集了 28 个表层(0~1 cm)沉积物样品(图 1),现场进行

pH、Eh 测定,样品装入密封袋中低温运回实验室,冷冻干燥后进行沉积物粒度组成、重金属元素形态、TOC 含量等分析.

重金属元素形态组成连续提取采用 BCR (SM&T)方法^[2,3,5],可提取态包括:酸提取态(可交换态及碳酸盐结合态)、可还原态(Fe-Mn 氧化物结合态)、可氧化态(有机物及硫化物结合态),剩余为残渣态.重金属元素总量及残渣态分析均采用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 硝化法,重金属元素含量采用 ICP-AES 进行测定.

沉积物样品分别经过 5% 的 HCl 与 5% 的 H₂O₂ 处理后,采用 Mastersizer-2000 型激光粒度仪进行沉积物粒度组成测定.沉积物样品中 TOC 含量测定采用 CE440 型元素分析仪.

2 结果与分析

2.1 重金属元素测定结果精度

重金属元素硝化法分析精度控制采用中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所提供的沉积物参考物质 GSD-11,进行 3 个平行分析,各元素分析结果最大误差均小于 5%(表 1),说明 HCl-HNO₃-HF 硝化法及 ICP-AES 分析具有较高的精度和稳定性.

选取样品 BM-1 及 LYH-1,分别进行 3 平行提取分析,并把重金属元素的各结合态之和与总量分析结果进行对比,以检验 BCR 方法在南四湖沉积物重金属形态提取中的提取效率及稳定性,结果见表 2.除了 BM-1 样品中 Cu 的可还原态、Pb 的可氧化态的含量相对误差较大之外,其余结果相对误差均小于 10%,而且各元素 4 种结合态之和与直接采用硝化法获得的重金属元素含量基本一致.因此,采用 BCR 方法获得的南四湖沉积物重金属形态提取结果具有较高的精度与稳定性.

2.2 沉积物理化性质

南四湖主要入湖河流及湖区表层沉积物 pH 为 7.0~7.6; Eh 为 -40~-440 mV,为弱还原环境.沉积物氧化还原电位与水体深度呈负相关,相关系数为 -0.46,这可能是较深的水体抑制了表层沉积物与大气的氧气交换,使沉积物氧化还原电位偏低.

表 1 重金属元素硝化法分析精度

Table 1 Error analysis of heavy metals nitration method

分析项目	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
ICP-AES 检测限/mg·L ⁻¹	0.004	0.005	0.01	0.005	0.005	0.01	0.005
平行分析样品中元素平均含量/mg·L ⁻¹	34.96	75.68	31 489.2	2 313.89	15.52	579.50	358.12
平行分析结果最大误差/%	2.79	2.47	1.53	3.49	2.41	2.85	2.54

表 2 沉积物重金属元素形态 BCR 连续提取 3 平行样误差分析¹⁾

Table 2 Error analysis of BCR sequential extraction results for the parallel sediments

样品	元素	平行分析各形态平均含量/mg·L ⁻¹					平行分析各形态最大相对误差/%					平均提取率/%
		F1	F2	F3	F4	Σ	F1	F2	F3	F4	Σ	
BM-1	Cr	3.489	4.616	82.579	46.272	136.956	5.37	-4.41	-7.24	-2.72	-5.34	107.63
	Cu	1.237	1.085	3.059	21.543	26.924	-4.77	20.62	-3.10	3.34	2.82	107.82
	Mn	149.056	46.298	29.820	167.727	392.902	-3.43	-4.08	3.96	-1.44	-1.29	97.04
	Ni	4.905	4.848	6.232	17.460	33.445	5.03	-2.71	-7.15	3.90	3.11	93.77
	Pb	BR	1.094	5.203	11.900	18.197		-4.88	-17.06	-2.24	-6.14	94.68
	Zn	15.352	18.254	9.424	49.260	92.289	2.51	7.42	-9.71	-4.47	-3.07	106.64
LYH-1	Cr	0.308	0.279	131.485	36.083	168.153	-3.99	2.12	-2.26	0.28	-1.81	113.01
	Cu	5.175	0.525	223.382	51.433	280.516	-1.64	5.15	-1.62	-1.35	-1.10	91.93
	Mn	81.616	36.433	36.963	76.380	231.393	7.84	2.96	-0.72	-3.69	3.24	95.34
	Ni	19.414	9.666	36.263	11.949	77.291	3.62	-2.36	-0.98	1.35	-1.17	92.75
	Pb	BR	BR	5.377	48.607	53.984			-7.19	-0.99	0.94	93.11
	Zn	268.260	267.333	355.367	97.426	988.386	5.64	3.45	-2.60	1.23	-0.68	114.16

1) F1: 酸提取态; F2: 可还原态; F3: 可氧化态; F4: 残渣态; Σ: 4 种结合态之和; BR: 未检出

沉积物粒度组成较细,细粉砂与粘土含量占到 45% ~ 86%;河流沉积物中二者含量相对略低,湖区沉积物中粘土及细粉砂含量较高(图 2).沉积物中 TOC 含量主要介于 1% ~ 11%,最高可达 23.46%(图 2).沉积物中 TOC 含量代表了其有机质含量的

变化^[16],除了 BM-1、LYH-1、GF3-3、GF3-4 样点之外,其余入湖河流表层沉积物有机质含量较低.水草较发育的湖区中沉积物有机质含量较高,而水草不发育的湖区,沉积物中有机质含量较低.

2.3 重金属元素形态组成特征

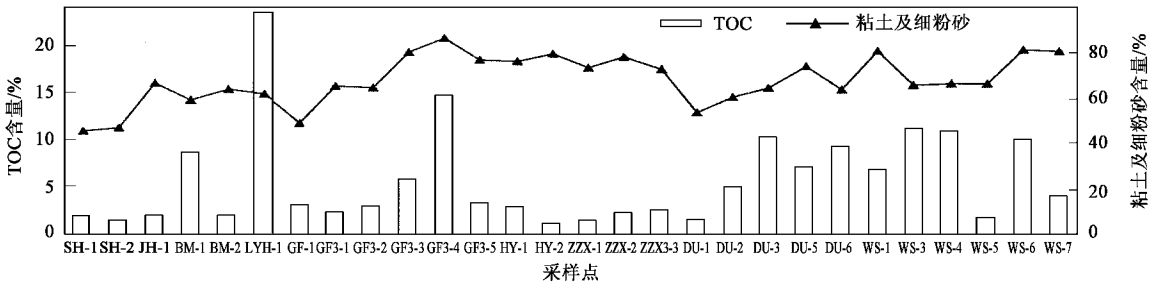


图 2 沉积物 TOC 含量及粒度组成

Fig.2 TOC content and grain size composition in the sediments

沉积物中 Cr、Cu、Ni、Zn 的形态组成及变化规律基本相似(图 3),所有样点可分为 2 大类:第 1 类包括上级湖南部湖区、下级湖区、泗河、京杭运河、洙赵新河、洸府河上游,第 2 类包括白马河、老运河、洸府河入湖口(上级湖北部湖区).第 1 类样点沉积物中, Cr、Cu、Ni、Zn 均以残渣态为主. Cr 的残渣态含量占 90%左右; Cu 的残渣态含量占 80%左右,其次是可氧化态,而酸提取态及可还原态含量较低; Ni 的残渣态含量占 70% ~ 80%,其次是可氧化态; Zn 主要集中于残渣态,其含量占 70% ~ 80%.第 2 类样点沉积物中, Cr、Cu、Ni、Zn 的残渣态含量明显降低,可提取态含量升高. Cr 的可提取态含量可占到 80%,其中可氧化态的含量最高; Cu 的可提取态含量最高可

达 75%,其中以可氧化态为主; Ni 的可提取态含量最高达 80%,以可氧化态、酸提取态为主; Zn 的可提取态含量可达 90%以上,其 3 种可提取态含量依次为酸提取态、可还原态、可氧化态.

除老运河之外,其它沉积物中 Pb 的含量变化不大,主要以残渣态及可氧化态存在,二者含量占 95%以上;老运河沉积物中 Pb 的含量较高,但主要是 Pb 的残渣态含量偏高.

沉积物中 Mn 的富集规律与其它元素不同,其高值区分布于洙赵新河入湖口、上级湖南部湖区、下级湖区,而在白马河、老运河及洸府河入湖口处,其含量相对偏低.从形态组成来看, Mn 主要是赋存于酸提取态及残渣态,其含量均分别占到 30% ~

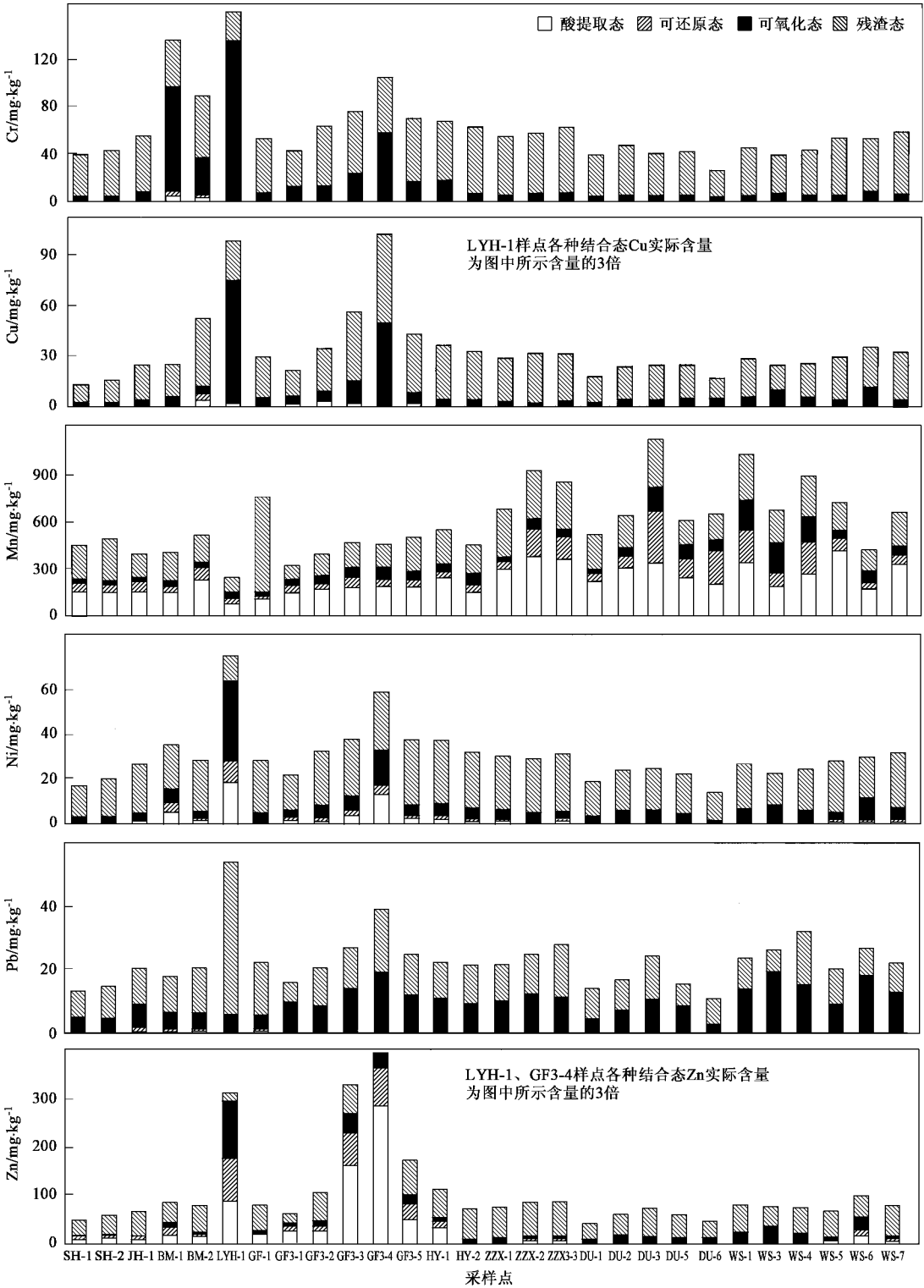


图 3 沉积物重金属元素形态组成

Fig.3 Chemical forms of the heavy metals in the sediments

50%, 其次是可还原态, 而可氧化态含量较低。

3 讨论

采样时正值南四湖地区的雨季, 所取样品反映

了南四湖主要入湖河流及湖区丰水季节表层沉积物重金属元素的形态组成特征及污染状况。泗河、洙赵新河以及京杭运河近年来人为污染相对较轻, 表层约 0.5 cm 厚的淤泥均为新生沉积物。参考次生相富

集系数法^[7],采用 SH-1、SH-2、ZZX-1、ZZX-2、JH-1 这 5 个样点作为南四湖流域水体沉积物重金属元素形态组成的参比点,得到重金属元素形态组成背景值(表 3).采用公式:

$$K_{PEF}^i = \frac{M_{sec(a)}^i / M_{tot(a)}^i}{M_{sec(b)}^i / M_{tot(b)}^i}$$

式中 K_{PEF}^i 为样品中 i 元素的次生相富集系数;
 $M_{sec(a)}^i$ 、 $M_{sec(b)}^i$ 分别为沉积物样品、未受污染的参比点样品中 i 元素的可提取态含量, $M_{tot(a)}^i$ 、 $M_{tot(b)}^i$ 分别为样品中 i 元素各种结合态的总含量.由此获得各样点重金属元素次生相的富集系数(图 4).富集系

数较高的样点主要分布于老运河、洸府河入湖口及白马河,说明这些样点表层沉积物重金属元素明显受到了人为污染,主要污染元素为 Cr、Cu、Ni、Zn;南四湖湖区除 WS-5、WS-6、WS-7 样点沉积物中 Zn 的次生相富集系数偏高,可能受到人为污染之外,其它湖区沉积物 Cr、Cu、Ni、Zn 的次生相富集系数较低,人为污染程度较弱.南四湖流域各采样点沉积物中 Mn、Pb 等重金属元素的富集系数均较低,可提取态含量较稳定,与其它水体沉积物重金属元素形态组成也基本一致^[3,5,6,17],因此南四湖主要入湖河流及湖区表层沉积物中 Mn、Pb 的形态组成反映了其自

表 3 南四湖及主要入湖河流表层沉积物重金属元素形态组成背景值

重金属形态	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
可提取态含量/mg·kg ⁻¹	4.21	2.56	2 819.28	342.44	4.22	7.96	13.84
各结合态总量/mg·kg ⁻¹	49.24	22.74	32 255.42	592.32	24.73	19.16	65.26
可提取态百分含量/%	8.55	11.28	8.74	57.81	17.07	41.55	21.21

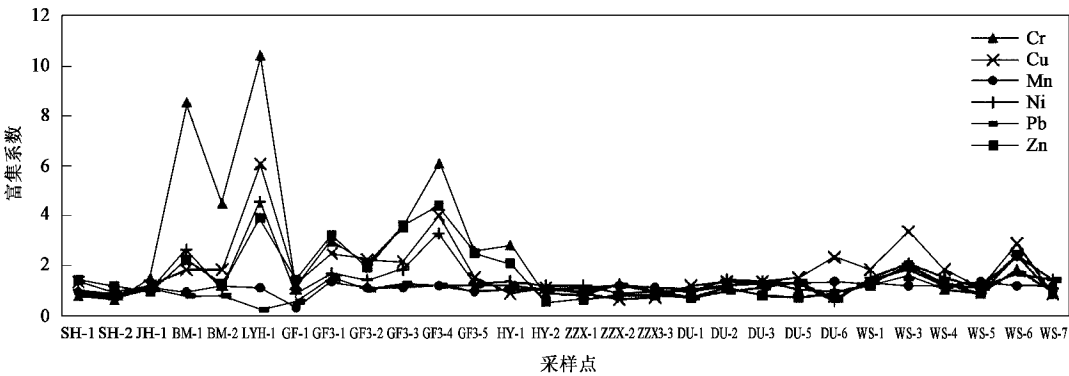


图 4 各采样点重金属元素可提取态含量相对富集系数

Fig.4 Relative enrichment coefficient of extractable fractions content for the heavy metals in the sediments

然来源的属性.

老运河为 1 条城市河流,接纳了济宁市大部分的生活及工业污水.其表层沉积物中 Cr、Cu、Ni、Zn 的绝对含量及可提取态含量远远高于背景值,次生相富集系数可达 3.9~10.5,明显受到人为污染,Cr 污染最为严重,其次是 Cu、Ni、Zn;虽然 Pb 的含量也较高,但主要是 Pb 的残渣态含量较高,其可提取态含量并未增加,因此老运河沉积物中 Pb 基本未受人为污染.

样点 GF-1、GF3-1、GF3-2、GF3-3、GF3-4、GF3-5、NY-1、NY-2 可以看作是由洸府河上游—入湖口—湖心的 1 条剖面,其沉积物中重金属污染程度呈先增加、后减小的规律.GF-1 点沉积物重金属元素含量

及次生相富集系数较低,基本未受到人为污染;洸府河在流经济宁市附近时,也接纳了部分济宁市污水,使得其下游地区(入湖口)沉积物重金属污染加重,污染程度由重到轻依次是 Cr、Zn、Cu、Ni.粒度分析结果表明,GF-1 到 GF3-4 点沉积物粒度组成逐渐变细,有机质含量逐渐增加(图 2),由于细颗粒物及有机物等对重金属元素有较强的吸附等结合能力^[4,12,16],使得 GF-1 到 GF3-4 点沉积物中重金属元素含量逐渐增加,污染程度呈逐渐加重的趋势.GF3-4到 NY-2 样点重金属污染程度逐渐降低,一方面由于 NY-1、NY-2 样点距离泗河口较近,泗河沉积物重金属污染较轻,沉积物粒度组成偏粗,有机质含量少,对重金属的吸附能力低,由于泗河物源物质的

稀释作用,使得距离浔府河口较远的水域重金属污染程度减弱;另一方面,在浔府河入湖口,由于水动力作用的减弱及细颗粒物、有机物等的吸附沉淀作用,来自浔府河上游的重金属污染元素在入湖口处的 GF3-1 到 GF3-4 点逐渐沉积,使得沉积物中重金属元素的含量由 GF3-4 点向湖心区域逐渐降低,污染程度逐渐减弱。

BM-1、BM-2 样点 Cr、Ni、Cu、Zn 的重金属总量及可提取态含量也偏高,其中 Cr 的次生相富集系数分别为 4.5、8.5, Ni、Cu、Zn 的次生相富集系数分别为 1.8~2.7、1.1~1.8,说明重金属污染源可能主要分布于白马河上游地区(邹城),由于颗粒物的吸附沉降等作用,沉积物重金属污染程度由上游到下游逐渐减弱。

总之,本次研究结果所反映的南四湖流域丰水季节重金属人为污染较重的水体为老运河、浔府河入湖口及白马河,沉积物中主要污染元素为 Cr、Cu、Ni、Zn,人为排放的重金属中 Cr、Cu、Ni 主要是富集于可氧化态, Ni 的酸提取态以及可还原态含量也较高, Cu 的酸提取态以及可还原态的含量略偏高; Zn 主要富集于酸提取态,其次是可还原态、可氧化态。

水体沉积物中重金属的形态组成以及环境条件决定了其潜在的生态毒性,重金属元素酸提取态中的可交换态组分最容易被生物吸收,碳酸盐结合态组分也较易被生物吸收;可还原态次之,可氧化态组分较难被生物所利用,残渣态组分几乎不被生物利用^[4]。环境条件(尤其是酸碱度及氧化还原状况)是影响重金属形态转化的主要因素,由还原环境向氧化环境转化过程中,重金属的可氧化态可大量转化为可交换态;由氧化环境向还原环境变化过程中,重金属的可还原态可发生生活化^[9,16];氧化还原条件的变化还会导致 pH 值的改变,影响重金属可还原态、可氧化态、酸提取态的稳定性^[8,11,16]。沉积物中有机质的矿化分解可加速重金属有机物结合态的释放,并可改变介质的氧化还原电位,使重金属活性、结合形态发生变化^[10,12,16]。

南四湖流域受到人为污染的老运河、浔府河入湖口及白马河沉积物中含有丰富的有机质,重金属元素的可氧化态含量较高,沉积物中的有机物在微生物作用下可发生矿化分解,这就会使部分以可氧化态(有机物结合态)存在的重金属发生生活化迁移,有可能进入上覆水体或被水生生物吸收;有机质矿化分解过程中,水土界面的氧化还原条件以及酸碱度可发生改变,进而使得重金属元素以酸提取态(碳

酸盐结合态)、可还原态(Fe-Mn 氧化物结合态)存在的组分发生生活化迁移;表层沉积物氧化还原状况与水体深度呈负相关,随着季节性水位的变化,表层沉积物氧化还原条件也会发生改变,进而使重金属元素的形态组成发生转化。因此,受到人为污染较重的老运河、浔府河入湖口及白马河表层沉积物重金属元素具有较高的潜在生态风险。

4 结论

丰水季节,南四湖流域泗河、京杭运河、洙赵新河、浔府河上游、上级湖南部湖区及下级湖区表层沉积物中重金属人为污染程度较弱,重金属元素形态组成主要反映了其自然属性, Cr、Cu、Ni、Zn 以残渣态为主, Pb、Mn 主要赋存于残渣态和可氧化态。老运河、浔府河入湖口、白马河表层沉积物中 Cr、Cu、Ni、Zn 的可氧化态、酸提取态、可还原态含量明显增加,其次生相富集系数最高达 10.5,明显受到人为污染,污染源主要是济宁市及白马河上游地区;随着表层沉积物中有机质的矿化分解及环境条件的改变,这些水体沉积物中 Cr、Ni、Cu、Zn 等重金属元素可发生形态转化,具有较高的潜在生态风险。

参考文献:

- [1] Filgueiras A V, Lavilla I, Bendicho C. Comparison of the standard SM&T sequential extraction method with small-scale ultrasound-assisted single extractions for metal partitioning in sediments [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2002, **374**(1): 103 ~ 108.
- [2] Quevauviller Ph, Rauret G, López-Sánchez J F, *et al.* Certification of trace metal extractable contents in a sediment reference material (CRM 601) following a three-step sequential extraction procedure [J]. *Science of the Total Environment*, 1997, **205**: 223 ~ 234.
- [3] Tokalioglu S, Kartal S, Elçi L. Determination of heavy metals and their speciation in lake sediments by flame atomic absorption spectrometry after a four-stage sequential extraction procedure [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2000, **413**: 33 ~ 40.
- [4] 金相灿. 沉积物污染化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992. 327 ~ 356.
- [5] Tüzün M. Determination of trace metals in the River Yeşilirmak sediments in Tokat, Turkey using sequential extraction procedure [J]. *Microchemical Journal*, 2003, **74**: 105 ~ 110.
- [6] Abd El-Azim H, El-Moselhy Kh M. Determination and partitioning of metals in sediments along the Suez Canal by sequential extraction [J]. *Journal of Marine Systems*, 2005, **56**: 363 ~ 374.
- [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] Chen S Y, Lin J G. Bioleaching of heavy metals from sediment: significance of pH [J]. *Chemosphere*, 2001, **44**: 1093 ~ 1102.

- [9] Saeki K, Okazaki M, Matsumoto S. The chemical phase changes in heavy metals with drying and oxidation of the lake sediments [J]. Water Research, 1993, 27: 1243 ~ 1251.
- [10] Tack F M, Callewaert O W J J, Verloo M G. Metal solubility as a function of pH in a contaminated dredged sediment affected by oxidation [J]. Environmental Pollution, 1996, 91(2): 199 ~ 208.
- [11] Teasdale P R, Apte S C, Ford P W, et al. Geochemical cycling and speciation of copper in waters and sediments of Macquarie Harbour, Western Tasmania [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 57: 475 ~ 487.
- [12] Wallschlager D, Desai M V M, Spengler M. How humic substances dominate mercury geochemistry in contaminated floodplain soil and sediments [J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 27: 1044 ~ 1054.
- [13] Perin G, Fabris R, Manente S, et al. A five-year study on the heavy metal pollution of Guanabara bay sediments (Rio de Janeiro, Brazil) and evaluation of the metal bioavailability by means of geochemical speciation [J]. Water Research, 1997, 31(12): 3017 ~ 3028.
- [14] 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): 251 ~ 256.
- [15] 杨丽原, 沈吉, 张祖陆, 等. 近四十年来山东南四湖环境演化的元素地球化学记录 [J]. 地球化学, 2003, 32(5): 453 ~ 460.
- [16] 弗斯特纳 U, 维特曼 G T W, 主编, 王忠玉, 姚重华, 译. 水环境的金属污染 [M]. 北京: 海洋出版社, 1988. 31 ~ 204.
- [17] 刘恩峰, 沈吉, 刘兴起, 等. 太湖 MS 岩芯重金属元素地球化学形态研究 [J]. 地球化学, 2004, 33(6): 602 ~ 610.

欢迎订阅 2007 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想,理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE; 美国工程索引 EI; 美国化学文摘 CA; 俄罗斯文摘杂志 AJ; 美国生物学文摘预评 BP; 美国医学索引 IM; 日本科学技术情报中心数据库 JICST; 英国动物学记录 ZR; 剑桥科学文摘 (CSA): Environmental Sciences; 剑桥科学文摘 (CSA): Pollution Abstracts; 剑桥科学文摘 (CAS): Life Sciences Abstracts 等; 国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库 (CSTPCD); 中文科技期刊数据库 (维普); 中国期刊全文数据库 (CNKI); 数字化期刊全文数据库 (万方); 中国科学引文数据库 (CSCD); 中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2007 年为 16 开本,40 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号: CN11-1895/X 国际标准刊号: ISSN 0250-3301

国外发行代号: M 0205 国内邮发代号: 2-821

编辑部地址: 北京市海淀区双清路 18 号 (2871 信箱) 邮编: 100085

电话: 010-62941102; 传真: 010-62849343; E-mail: hjkx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjkx.ac.cn