

巢湖表层沉积物中重金属污染的时空变化特征及潜在生态风险评价

石志芳^{1,2}, 姜霞², 杨苏文², 金相灿², 程积民¹

(1.西北农林科技大学动物科技学院,陕西 杨凌 712100;2.中国环境科学研究院湖泊创新基地,北京 100012)

摘要: 2008年3月至7月连续对巢湖8个采样点的表层沉积物中Zn、Hg、Cr、Pb、Ni和Cu 6种重金属含量进行分析,据此探讨巢湖表层沉积物中重金属污染程度及时空分布特征,评价巢湖重金属污染的潜在生态风险并筛选出主要生态风险因子。结果表明:3月至7月期间,全湖范围内表层沉积物中重金属含量逐渐降低,河流入湖区的污染程度高于其他区域,Zn、Cu、Pb的污染程度高于其他重金属,表层12 cm沉积物中的重金属含量随深度增加污染情况呈加重趋势;从潜在生态风险角度分析,巢湖表层沉积物总体只具有轻微潜在生态风险,生态风险指数排名前两位的区域是南淝河入湖区和十五里河入湖区,3月至7月期间重金属潜在生态风险级别逐渐降低,巢湖生态安全主要风险因子为Hg,其次是Pb和Cu。

关键词: 巢湖;沉积物;重金属;时空变化特征;潜在生态风险

中图分类号: X820.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2010)05-0948-07

The Spatial and Temporal Variation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Chaohu, China

SHI Zhi-fang^{1,2}, JIANG Xia², YANG Su-wen², JIN Xiang-can², CHENG Ji-min¹

(1.College of Animal Science and Technology, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2.Center for Lake Eco-Environment, Chinese Research Academy of Environment Sciences Research, Beijing 100012, China)

Abstract: Based on the monitoring of six heavy metal elements (Zn, Hg, Cr, Pb, Ni and Cu) in the surface sediments from eight samples sites of Chaohu from March to July in 2008, temporal and spatial variation characteristics and contamination degree of heavy metal pollution was discussed, and their potential ecological risk and key ecological risk indexes were assessed. The concentrations of heavy metals in the surface sediments of Chaohu reduced gradually during investigation period. The contamination in the inflow lake region was higher than others. Zn, Cu and Pb were the main contaminants compared with other heavy metals. Heavy metal pollution from 12 cm depth surface sediments became aggravated with depth increasing. In addition, the surface sediments from Chaohu appeared slight potential ecological risk, and the first two regions were Nanfei inflow river area and Shiwuli inflow river area. The potential ecological risk levels of heavy metals reduced gradually from March to July. The result also showed that the main factors influencing ecological safety in Chaohu were Hg, Pb and Cu.

Keywords: Chaohu; sediment; heavy metals; characteristics of temporal and spatial variation; potential ecological risk

巢湖位于安徽省中部,是我国五大淡水湖之一。巢湖不仅具有航运、渔业、农灌、防洪等多种功能^[1],更

是合肥市及沿湖城市工农业生产和人民生活的重要水源。然而,近些年来,流域人口剧增,工农业发展迅速,导致重金属污染物经由各种途径进入巢湖中,这些重金属污染物在悬浮物和表层沉积物的吸附作用下沉积到水体底部,成为水体污染的内源,持续危害湖泊生态环境,并通过食物链危害人类健康^[2-3]。重金属污染已经成为巢湖生态安全的重要威胁因素。

在遭受重金属污染的水体中,水相中重金属的含

收稿日期:2009-12-05

基金项目:中央院所公益项目(2009KYYW15);国家重大水专项(2008ZX07101-010)

作者简介:石志芳(1984—),女,硕士研究生。

E-mail:shizhifang83158@163.com

责任作者:姜霞 E-mail:jiangxia@craes.org.cn

量很低,而且随机性很大,随着排放状况和条件的不同,含量分布也往往毫无规则,但沉积物中重金属的含量却比相应水相中的重金属含量高,并表现出较明显的含量分布规律^[4]。因此,沉积物是水环境中重金属污染程度的“指示剂”^[5],能明显地反映湖泊受重金属污染状况,并对湖水具有持久影响^[4,6]。已有关于湖泊重金属污染的文献多集中于反映沉积物中重金属含量的空间变化特征^[7-11],但沉积物中重金属污染的时间变化特征则少有文献报道。本文于2008年3月至7月连续5个月对巢湖表层沉积物进行采样和测定,分析了表层沉积物中Zn、Hg、Cr、Pb、Ni和Cu 6种重金属的时空含量变化特征,并采用潜在生态危害指数法^[12]对不同时空条件下重金属的污染情况进行生态风险评价。

1 材料与方法

1.1 样品采集

使用GPS进行导航定位,对巢湖8个采样点进行采样,见图1。1#杭埠河入湖区;2#派河入湖区;3#十五里河入湖区;4#南淝河入湖区;5#姥山;6#湖心点;7#巢湖中埠乡;8#裕溪河口。用柱状采样器(04.23 BEEKER, Eijkelkamp, NL)采集表层12 cm的沉积物样品,按照0~2、2~7、7~12 cm的间隔进行分层,分别装入封口袋内,排出袋内空气,密封,带回实验室冷冻干燥后,除去植物和贝类等残体,玛瑙研钵研磨,过100目筛,低温避光保存。采样同时用虹吸管收集柱状采泥器内距底泥表层0.5 m处水样用于现场测定水温、溶解氧(YSI2000 DO仪)、pH值(PHB-1便携式pH计)等水体理化指标。

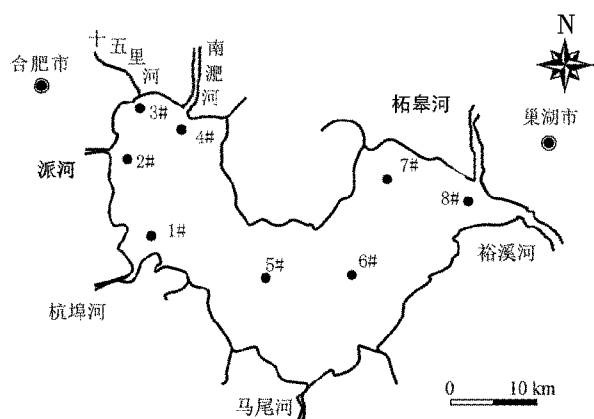


图1 巢湖采样点分布图

Figure 1 Sampling sites locations in Chaohu Lake

1.2 样品前处理和测定

依据JY/T 015—1996电感耦合等离子体原子发射光谱方法通则进行样品消解,即Cr、Cu、Ni、Pb、Zn称取0.100 0 g干燥底泥样品,依次加入一定量的盐酸、硝酸、氢氟酸、高氯酸,电热板消解赶酸,用超纯水定容到20 mL;Hg取样0.200 0 g样品,消解方法同上。Cr、Cu、Ni、Pb、Zn采用PE5300DV型电感耦合等离子直读光谱仪进行检测,检出限为Cr $0.4 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、Cu $0.2 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、Ni $0.6 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、Pb $3 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、Zn $6 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。Hg采用AF-610A原子荧光光谱仪进行分析,仪器检出限小于 $0.008 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

1.3 数据处理方法

所有实验均重复进行3次,以提高精确度和减小随机误差,试验结果取平均值用于分析。试验数据采用Excel 2003和SPSS 16.0软件进行分析。

2 结果与讨论

2.1 巢湖表层沉积物中重金属含量时空变化特征

将全部0~12 cm深度范围内沉积物中重金属含量的平均值作图,见图2。由图可知,3月至7月期间表层沉积物中重金属含量逐渐降低,尤其是7月份的含量比3月至6月的平均值出现较大程度的下降,Cr含量下降15.4%,Zn含量下降14.7%,Cu含量下降12.3%,Hg含量下降12.6%,Ni和Pb的含量分别下降4.6%和1.6%。分析认为,巢湖表层沉积物中重金属含量随着时间的这种变化特征可能与水体温度、pH值、沉积物中有机质含量以及藻类活动等因素具有密切关系。由表1可知,从3月至7月期间,水体温度缓慢上升,根据分子热运动理论,温度升高有利于底泥中重金属向水相的迁移以及释放,pH值的逐渐降低也促进了碳酸盐和氢氧化物结合态重金属的溶解与释放^[13],沉积物中有机质含量的减少降低了重金属在沉积物中的吸附作用,从而使一部分重金属发生解吸转移到间隙水或者上覆水中,另外,水体中藻类对于重金属具有吸附和生物富集作用,3月到7月期间巢湖藻类大幅度增加(以Chla含量表征),大量重金属被藻类吸附或富集,从而降低了沉积物中重金属的含量。

由表2可见,巢湖表层沉积物中重金属含量在空间分布上存在较大差别。通过将不同采样点沉积物中重金属含量与背景值^[14]的比较发现,杭埠河入湖区较为清洁,除Zn的含量超过背景值的1.5倍外,其他5种重金属含量均低于背景值;派河入湖区Cu、Pb含

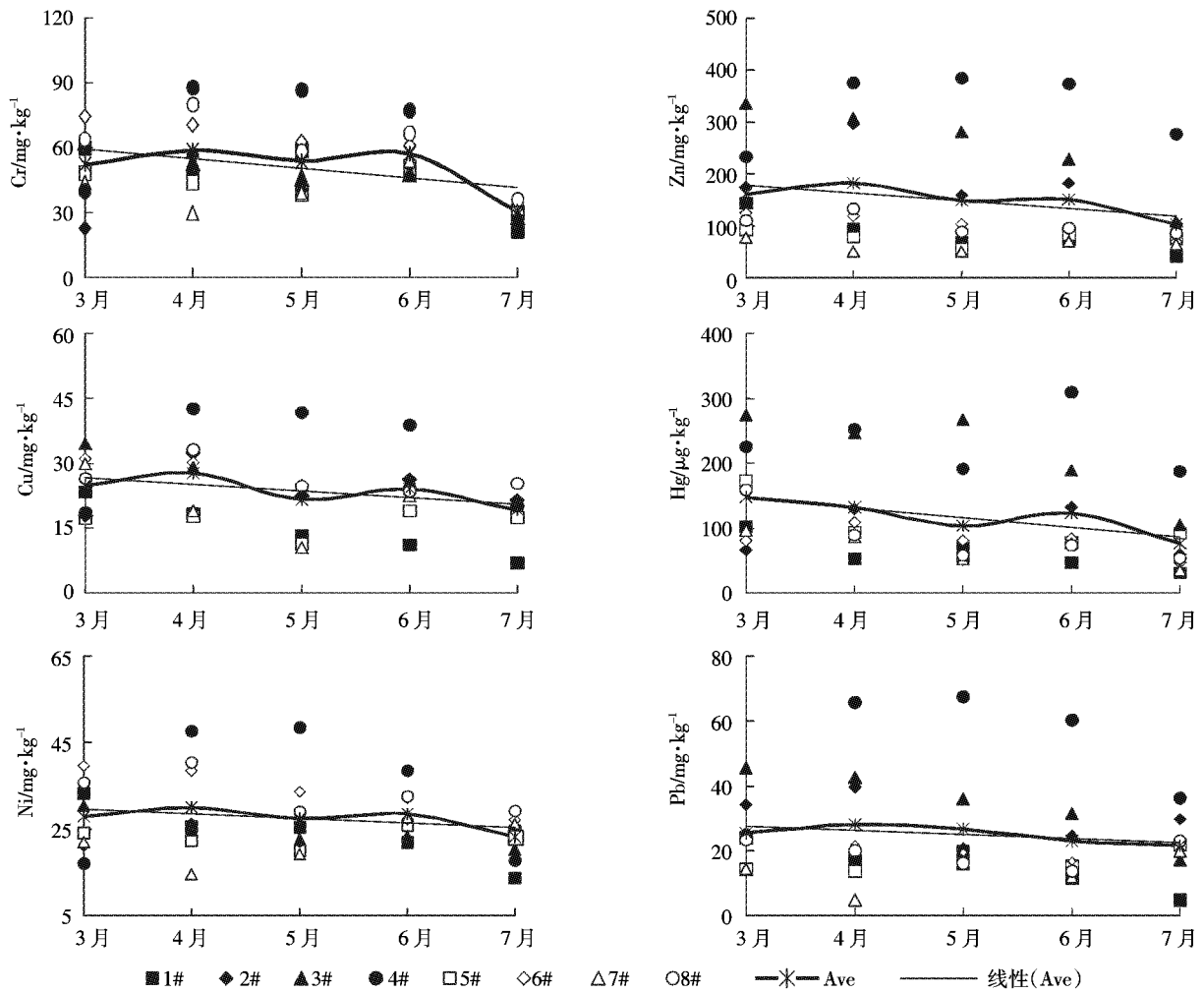


图 2 巢湖表层沉积物中重金属含量随时间变化曲线
Figure 2 Curve of heavy metals content in sediment with time changes in Chaohu

表 1 巢湖水体基本理化性质及沉积物中有机质含量
Table 1 The basic physical and chemical properties of water and organic matter of sediment in Chaohu

时间	温度/℃	pH 值	Chla/mg·m ⁻³	有机质/%
3 月	13.6±2.2	8.78±0.42	19.38±9.98	2.55±0.13
4 月	15.4±2.1	8.08±1.96	33.67±8.61	2.37±0.11
5 月	21.6±3.2	7.82±1.13	58.43±5.47	2.48±0.23
6 月	25.4±1.9	7.86±0.77	139.09±21.07	2.15±0.17
7 月	28.4±2.7	7.54±0.92	187.56±18.87	2.14±0.11

量略高于背景值,Zn 含量是背景值的 3.3 倍;十五里河入湖区重金属污染问题较为突出,Cu、Pb、Zn 和 Hg 的含量是背景值的1.4 倍、1.3 倍、4.5 倍和1.1 倍;南淝河入湖区的重金属污染情况最为严重,6 种重金属含量全部高于背景值,其中 Zn 含量 365.95 mg·kg⁻¹ 是背景值的 6.5 倍;湖心区的姥山沉积物较清洁,只有 Zn 和 Ni 含量略高于背景值;巢湖中埠乡有轻微Zn

污染;裕溪河口 Cu、Zn 含量略高与背景值。
巢湖 6 种重金属元素的含量的相关性分析结果表明(见表 3),6 种重金属之间存在不同程度的相关关系,说明巢湖表层沉积物中的重金属具有相近的来源。西部合肥市的工业污染是巢湖重金属的主要污染源,集中对十五里河和南淝河两条入湖河流进行治理是巢湖重金属污染治理的关键。

由图 3 可见,沉积物中的 6 种重金属在垂直方向上表现出一致的分布特性,越到沉积物表层,重金属的含量越高。其中表层 0~7 cm 的沉积物中的重金属含量较高且没有明显差别,7~12 cm 处的重金属含量明显降低,降低幅度为 15%~65%。这也表明巢湖重金属污染正处于逐渐加重态势,需要引起政府及其相关部门与社会的关注。

2.2 巢湖表层沉积物中重金属的潜在生态风险评价

采用瑞典学者 Hakanson 提出的沉积物潜在生态

表 2 巢湖不同采样点重金属含量分布特征
Table 2 Heavy metals content in surface sediment from different sampling points in Chaohu

采样点	Cr/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Ni/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Hg/mg·kg ⁻¹
杭埠河入湖区	47.17±10.81	14.68±3.98	23.97±5.89	15.35±7.49	84.57±4.82	0.060±0.017
派河入湖区	41.00±6.42	24.05±5.08	24.59±10.02	29.70±3.82	183.80±20.68	0.087±0.013
十五里河入湖区	47.73±9.77	27.03±8.83	24.29±5.73	34.54±5.87	252.54±39.82	0.216±0.021
南淝河入湖区	69.74±13.09	32.33±6.92	33.87±4.98	50.83±6.98	365.95±15.76	0.233±0.032
姥山	42.54±9.73	16.55±5.69	23.38±7.37	16.37±7.77	77.26±11.07	0.098±0.018
湖心区	60.20±11.63	26.18±7.82	34.17±5.41	20.70±2.98	102.08±10.98	0.080±0.012
巢湖中埠乡	40.71±10.38	20.37±9.21	21.94±6.89	13.50±2.59	62.83±6.79	0.069±0.008
裕溪河口	60.99±17.39	26.59±8.76	33.35±3.44	19.23±7.44	102.89±10.00	0.086±0.011
背景值	67	20.2	31.6	26	56.3	0.20

表 3 巢湖表层沉积物中重金属元素含量的相关性分析
Table 3 Correlation analysis heavy metals in surface sediment from Chaohu

	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
Cr	1.000					
Cu	0.912*	1.000				
Ni	0.983**	0.923**	1.000			
Pb	0.930**	0.945**	0.913*	1.000		
Zn	0.763	0.847*	0.709	0.932**	1.000	
Hg	0.729*	0.827*	0.654	0.879*	0.978**	1.000

注:* 相关系数在 0.05 水平上显著(双尾检验);** 相关系数在 0.01 水平上显著(双尾检验)。

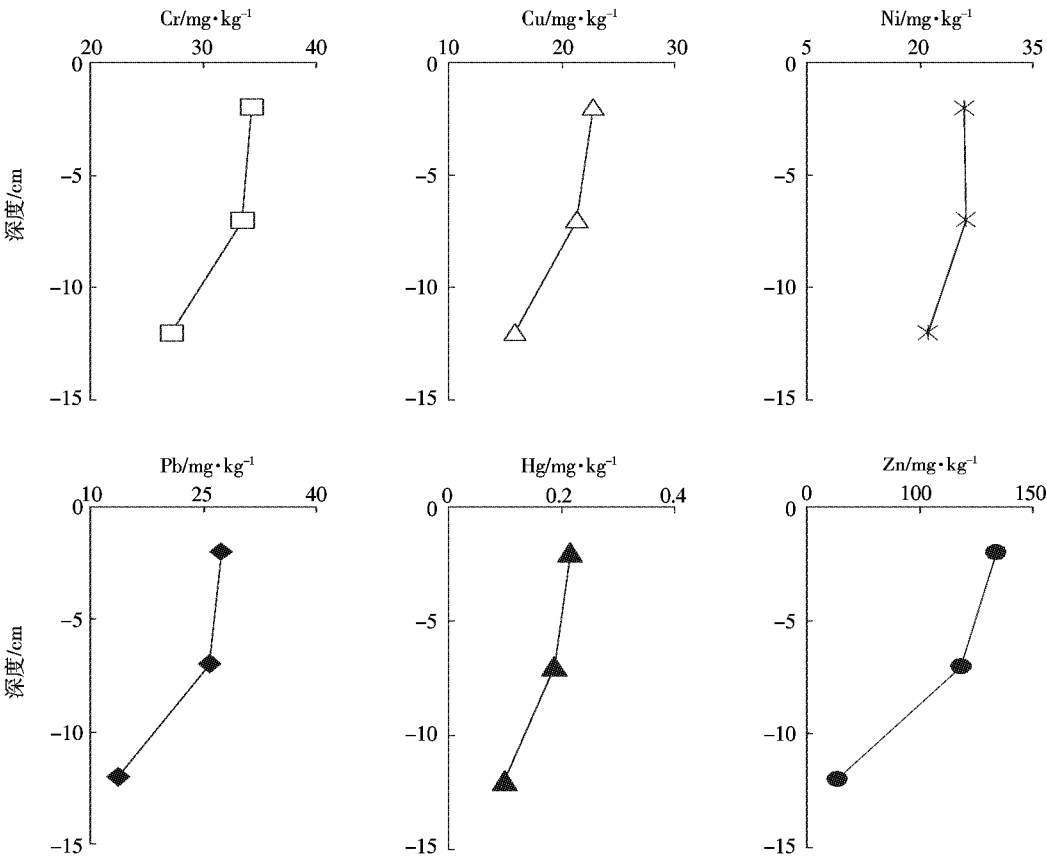


图 3 巢湖表层重金属含量垂直变化情况
Figure 3 Vertical changes of heavy metals content in Chaohu surface sediment

危害指数评价方法对巢湖重金属污染状况进行评价。其中沉积物中单一重金属的潜在生态风险指数为:

$$E_r^i=T_r^i\times C_f^i$$

式中: E_r^i 为单一重金属潜在生态风险指数; T_r^i 为金属的生物毒性响应因子,反映了重金属在水相、固相和生物相之间的响应关系,Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 和 Hg 的生物毒性响应因子分别为 2、5、5、5、1 和 40; C_f^i 为单一重金属污染指数。不同的 E_r^i 值范围所对应的潜在生态风险为: $E_r^i<40$,低潜在生态风险; $40\leq E_r^i<80$,中潜在生态风险; $80\leq E_r^i<160$,较高潜在生态风险; $160\leq E_r^i<320$,高潜在生态风险; $E_r^i\geq 320$,很高潜在生态风险。

Hakanson 将 8 种单一重金属的潜在生态风险指数之和定义为多种重金属潜在生态风险指数 RI :

$$RI=\sum_{i=1}^8 E_r^i=\sum_{i=1}^8 T_r^i\times C_f^i$$

不同的 RI 值范围所对应的潜在生态风险为: $RI<150$,低潜在生态风险; $150\leq RI<300$,中潜在生态风险; $300\leq RI<600$,高潜在生态风险; $600\leq RI<1\ 200$,很高潜在生态风险; $RI\geq 1\ 200$,极高潜在生态风险。由于本文所考虑的仅为 6 种重金属,且这 6 种重金属的毒性系数 T_r 除 Hg 外都较小,故 RI 的范围可以参照

文献[15-16]调整为: $RI<140$,低潜在生态风险; $140\leq RI<280$,中潜在生态风险; $280\leq RI<560$,高潜在生态风险; $560\leq RI<1\ 100$,很高潜在生态风险; $RI\geq 1\ 100$,极高潜在生态风险。

表 4 给出了不同月份重金属的单一潜在生态风险指数 E_r^i 和总潜在生态风险指数 RI 的计算结果。从总的潜在生态风险 RI 看,研究时段内 6 种重金属只具有低潜在生态风险($RI<140$)。5 个月份的潜在生态风险指数排列为:3 月>4 月>6 月>5 月>7 月,即从 3 月到 7 月重金属的潜在生态风险在降低。从单一重金属潜在生态风险指数 E_r^i 来看,6 种重金属都只具有较低的生态风险($E_r^i<40$),Hg 的潜在生态风险指数 E_r^i 最高,为 6.23~61.78 (3 月至 7 月的平均值为 29.41、26.49、20.62、20.74 和 15.23),其次为 Cu、Pb、Zn 和 Ni,Cr 的生态风险指数最低。

表 5 给出了不同采样点重金属的单一潜在生态风险指数 E_r^i 和总潜在生态风险指数 RI 的计算结果。从总的潜在生态风险看,本文所研究的 8 个采样点均只具有低潜在生态风险 ($RI<140$),8 个采样点的潜在生态风险指数排列为:南淝河入湖区>十五里河入湖区>派河入湖区>裕溪河口>湖心点>姥山>巢湖中埠乡>杭埠河入湖区。河流入湖区污染程度高于其他区

表 4 巢湖沉积物不同月份重金属潜在生态危害评价及排序

Table 4 The potential ecological risk assessment and sort of heavy metals in surface sediment in different time in Chaohu

时间	E_r^i						RI	排序
	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg		
3 月	1.55±0.77	6.15±2.36	4.40±1.85	4.91±2.17	2.87±1.09	29.41±12.18	49.29	1
4 月	1.76±0.87	6.86±2.16	4.75±2.01	5.42±2.19	3.23±1.43	26.49±9.88	48.51	2
5 月	1.61±0.68	5.37±3.49	4.35±2.17	5.10±3.65	2.65±1.18	20.62±10.08	39.7	4
6 月	1.71±0.65	5.93±2.01	4.53±1.07	4.46±1.48	2.67±0.99	20.74±7.09	40.04	3
7 月	0.91±0.19	4.73±2.13	3.68±2.19	4.17±2.01	1.84±1.09	15.23±6.02	30.56	5

表 5 巢湖沉积物不同采样点重金属潜在生态危害评价及排序

Table 5 The potential ecological risk assessment and sort of heavy metals in surface sediment from different site in Chaohu

样点	E_r^i						RI	排序
	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg		
杭埠河入湖区	1.41±0.47	3.63±1.67	3.79±1.07	2.95±0.98	1.50±0.16	12.07±6.17	25.35	8
派河入湖区	1.22±0.19	5.95±1.03	3.89±0.98	5.71±2.11	3.26±0.98	17.56±2.19	37.59	3
十五里河入湖区	1.42±0.29	6.69±2.07	3.84±1.08	6.64±0.19	4.49±2.11	43.21±8.09	66.29	2
南淝河入湖区	1.90±0.37	8.00±2.07	5.36±1.06	9.77±2.08	5.83±1.78	46.63±3.03	77.49	1
姥山	1.27±0.33	4.10±1.56	3.70±0.98	3.15±0.77	1.37±0.35	19.68±3.19	33.27	6
湖心点	1.80±0.41	6.48±1.06	5.41±1.17	3.98±1.06	1.81±0.29	16.06±2.17	35.54	5
巢湖中埠乡	1.22±0.25	5.04±1.37	3.47±0.67	2.60±0.42	1.12±0.37	13.88±3.11	27.33	7
裕溪河口	1.82±0.39	6.58±1.82	5.28±2.07	3.70±0.11	1.83±0.28	17.29±2.16	36.5	4

域,南淝河入湖区和十五里河入湖区是污染最为严重的区域, RI 值分别为 77.49 和 66.29。从单一重金属潜在生态风险指数来看,除南淝河入湖区(46.63)和十五里河入湖区(43.21)中 Hg 具有中等生态风险,其他采样点各重金属都只具有较低的生态风险($E_i^p < 40$),不同采样点中 E_i^p 值最高的都为 Hg,其次是 Pb、Cu 和 Zn,最低的为 Cr。

总的说来,巢湖表层沉积物 6 种重金属污染总体较轻,但与陈洁等^[17]和陈杰等^[18]2006 年和 2007 年重金属污染状况相比已呈逐步加重的趋势。由于巢湖的富营养化已经很严重,湖泊生态环境相当脆弱,所以在巢湖的治理过程中除了考虑氮磷等营养物质对其如营养化的贡献外,还要防范巢湖重金属加速污染的态势,以免巢湖水环境质量的全面恶化。

表 6 列出了不同采样深度条件下重金属的单一潜在生态风险指数 E_i^p 和总潜在生态风险指数 RI 的计算结果。从总的潜在生态风险看,不同采样深度的沉积物都具有低潜在生态风险($RI < 140$),3 个采样深度沉积物的潜在生态风险指数排列为:0~2 cm > 2~7 cm > 7~12 cm。0~2 cm 和 2~7 cm 的值较为接近,说明 0~7 cm 表层沉积物的污染情况相似。

3 结论

巢湖表层沉积物重金属污染表现出 3 月至 7 月污染程度逐渐降低,入湖区污染程度高于其他区域,Zn、Cu、Pb 的污染程度高于其他重金属,垂直方向随深度减小污染情况加重的特征。

从潜在生态风险角度分析,3 月至 7 月重金属潜在生态风险逐渐降低,巢湖生态安全的主要风险因子为 Hg,其次是 Pb 和 Cu。巢湖表层沉积物总体只具有轻微潜在生态风险,生态风险指数排名前两位的区域是南淝河入湖区和十五里河入湖区,目前这两个区域污染并不严重,但有进一步恶化的趋势,需要引起注意并加强管理。

近年来,巢湖表层沉积物重金属污染程度和潜在生态风险程度均呈现增加趋势。

参考文献:

- [1] Shang G P, Shang J C. Spatial and temporal variations of eutrophication in western Chaohu Lake, China[J]. *Environ Monit Assess*, 2007, 130: 99–109.
- [2] 简敏菲,游海,倪才英. 鄱阳湖饶河段重金属污染水平与迁移特性[J]. 湖泊科学,2006,18(2):127–133.
JIAN Min-fei, YOU Hai, NI Cai-ying. Characteristics of heavy metals contaminant status and migration in Raohe River of Lake Poyang[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(2): 127–133.
- [3] Ikem A, Egiebor N O, Nyavor N O. Trace elements in water, fish and sediment from Tuskegee Lake, Southeastern USA[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2003, 149: 51–75.
- [4] 贾振邦,赵智杰,杨小毛,等. 洋涌河、茅洲河和东宝河沉积物中重金属的污染及评价[J]. 环境化学,2001,20(3):212–219.
JIA Zhen-bang, ZHAO Zhi-jie, YANG Xiao-mao, et al. Pollution and assessment of heavy metals in Yangchong River, Maozhou River and Dongbao River sediments, Shenzhen[J]. *Environmental Chemistry*, 2001, 20(3): 212–219.
- [5] Wojciech Tylmann. Lithological and geochemical record of anthropogenic changes in recent sediments of a small and shallow lake (Lake Pusty Staw, northern Poland)[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2005, 33: 313–325.
- [6] 尚英男,倪师军,张成江,等. 成都市河流表层沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 生态环境学报,2005,14(6): 827–829.
SHANG Ying-nan, NI Shi-jun, ZHANG Cheng-jiang, et al. Pollution of heavy metals in the surface sediments from rivers in Chengdu and their potential ecological risk[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2005, 14(6): 827–829.
- [7] 王永华,李晓光,金相灿. 沉积物重金属污染评价——以巢湖龟山区为例[J]. 中国环境监测,2007,23(6):52–56.
WANG Yong-hua, LI Xiao-guang, JIN Xiang-can. The estimation of heavy metals in sediments in the east area of Chaohu[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2007, 23(6): 52–56.
- [8] 陈云增,杨浩,张振克,等. 滇池沉积物金属污染及环境质量评价[J]. 湖泊科学,2008,20(4):492–499.
CHEN Yun-zeng, YANG Hao, ZHANG Zhen-ke, et al. Metal contamination and quality assessment of Lake Dianchi sediment[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(4): 492–499.
- [9] 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.
YANG Li-yuan, SHEN Ji, ZHANG Zu-lu, et al. Distribution and eco-

表 6 巢湖沉积物不同深度重金属潜在生态危害评价及排序

Table 6 The potential ecological risk evaluation and sorting of heavy metals in different depth of sediment in Chaohu

深度/cm	E_i^p						RI	排序
	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg		
0~2	1.02±0.19	5.63±1.21	4.08±0.98	3.81±1.37	2.38±0.67	37.21±12.04	54.13	1
2~7	1.00±0.23	5.28±1.04	4.15±1.67	3.61±1.07	2.11±0.59	37.47±8.91	53.61	2
7~12	0.81±0.08	3.95±0.38	3.35±1.38	1.91±0.53	1.13±0.59	19.86±7.63	31.01	3

- logical risk assessment for heavy metals in superficial sediments of Nansihu Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2003, 15(3):252–256.
- [10] 邹丽敏, 王超, 冯士龙. 玄武湖沉积物中重金属污染的潜在生物毒性风险评价[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 15(3):252–256.
ZOU Li-min, WANG Chao, FENG Shi-long. Potential biological toxicity assessment on heavy metal pollution in surface sediment of Xuanwu Lake [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 15(3): 252–256.
- [11] 张丽旭, 蒋晓山, 赵敏, 等. 长江口海域表层沉积物污染及其潜在生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2007, 16(2):389–393.
ZHANG Li-xu, JIANG Xiao-shan, ZHAO Min, et al. Pollution of surface sediments and its assessment of potential ecological risk in the Yangtze Estuary[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2007, 16(2): 389–393.
- [12] Lars Hanson. An ecological risk index for aquatic pollution control of sediment[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975–1001.
- [13] Barbier F, Due G, Petit Ramel M. Adsorption of lead and cadmium ions from aqueous solution to the montmorillonite/water interface[J]. *Colloids and Surfaces, A Physicochemical and Engineering Aspects*, 2000, 16: 153–159.
- [14] 王永华, 钱少猛, 徐南妮, 等. 巢湖东区底泥污染物分布特征及评价[J]. 环境科学研究, 2004, 17(6):22–26.
WANG Yong-hua, QIAN Shao-meng, XU Nan-ni, et al. Characteristics of distribution of pollutants and evaluation in sediment in the east area of Chaohu[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17(6): 22–26.
- [15] 刘成, 王兆印, 何耘, 等. 环渤海湾诸河口潜在生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2002, 15(5):33–37.
LIU Cheng, WANG Zhao-yin, HE Yun, et al. Evaluation on the potential ecological risk for the river mouths around Bohai Bay[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2002, 15(5):33–37.
- [16] 马德毅, 王菊英. 中国主要河口沉积物污染及潜在生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5):521–525.
MA De-yi, WANG Ju-ying. Evaluation on potential ecological risk of sediment pollution in main estuaries of China[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(5): 521–525.
- [17] 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.
CHEN Jie, LI Sheng-feng. Chemical speciation and total concentration of heavy metals for sediments from Lake Chaohu[J]. *Henan Science*, 2007, 25(2): 303–307.
- [18] 程杰, 李学德, 花日茂, 等. 巢湖水体沉积物重金属的分布及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1403–1408.
CHENG Jie, LI Xue-de, HUA Ri-mao, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Chaohu Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1403–1408.