

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897-20140919001

张光贵, 田琪, 郭晶. 洞庭湖表层沉积物重金属生态风险及其变化趋势研究[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(3): 184-191

Zhang Guanggui, Tian Q, Guo J. Heavy metal ecological risk of surface sediments in Dongting Lake and its trend [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2015, 10(3): 184-191 (in Chinese)

洞庭湖表层沉积物重金属生态风险及其变化趋势研究

张光贵*, 田琪, 郭晶

湖南省洞庭湖生态环境监测中心, 岳阳 414000

收稿日期: 2014-09-19 录用日期: 2014-10-29

摘要: 尽管针对洞庭湖沉积物中重金属的研究工作较多, 但是针对其生态风险及其变化趋势的研究工作比较少见。基于 2012 年 2 月和 2013 年 4 月对洞庭湖 9 个具有代表性监测点位的采样分析以及相关监测历史资料的收集, 采用 Hakanson 生态危害指数法, 研究了洞庭湖表层沉积物中重金属的生态风险及其变化趋势。结果表明, 洞庭湖表层沉积物中 Cd、Hg、As、Cu 和 Pb 的含量分别为 $0.60\sim 20.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.090\sim 0.640\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $10.4\sim 83.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $17.9\sim 70.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $16.9\sim 95.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其大小顺序为 $\text{Pb}>\text{Cu}>\text{As}>\text{Cd}>\text{Hg}$ 。洞庭湖表层沉积物中重金属单因子生态风险程度顺序为 $\text{Cd}>\text{Hg}>\text{As}>\text{Pb}>\text{Cu}$, Cd 和 Hg 为主要重金属风险污染物, 其中 Cd 为首要污染物; 全湖 RI 值在 117.10~589.80 之间, 平均 289.99, 在空间分布上, 表现为南洞庭湖区>西洞庭湖区>东洞庭湖区; 根据 Hakanson 提出的分级标准, 南洞庭湖区 Cd 具有极高的生态风险, 全湖生态风险程度为中。初步分析结果表明, 30 年来, 除 Hg 外, 其它重金属生态风险均有一定上升, 其中以 Cd 的上升趋势较明显, 全湖重金属生态风险程度由低生态风险上升到中生态风险, 提高了一个等级。因此, 洞庭湖流域重金属污染治理应以湘江和资水的 Cd 为重点。

关键词: 重金属; 污染; 生态风险; 变化趋势; 洞庭湖; 表层沉积物

文章编号: 1673-5897(2015)3-184-08 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Heavy Metal Ecological Risk of Surface Sediments in Dongting Lake and Its Trend

Zhang Guanggui, Tian Qi, Guo Jing

Dongting Lake Eco-Environmental Monitoring Center of Hunan Province, Yueyang 414000, China

Received 19 September 2014 accepted 29 October 2014

Abstract: Although there are many studies on heavy metals in Dongting Lake sediments, the information regarding heavy metal ecological risk and its trend is little. This paper discussed the heavy metal ecological risk of surface sediments in Dongting Lake and its trend, based on sampling analysis of 9 representative monitoring sites in February 2012 and April 2013 and some historical monitoring data. Hakanson's Potential Ecological Risk Index (RI) Method was employed in this paper. The results show that the contents of Cd, Hg, As, Cu and Pb in surface sediments range from $0.60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $20.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.090\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $0.640\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $10.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $83.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $17.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $70.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $16.9\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $95.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. The descending order is as follows: $\text{Pb}>\text{Cu}>\text{As}>\text{Cd}>\text{Hg}$. The potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Dongting Lake can be arranged as $\text{Cd}>\text{Hg}>\text{As}>\text{Pb}>\text{Cu}$. Cd and Hg are the main heavy metal risk pollutants, and Cd is the primary

pollutant. The *RI* values of the whole lake are between 117.10 and 589.80, with an average value of 289.99. The spatial distribution of *RI* average values has certain characteristics. South Dongting Lake is the highest area, West Dongting Lake is the middle one, and East Dongting Lake is the lowest region. According to the classification standard proposed by Hakanson, the Cd in South Dongting Lake has extremely high ecological risk. The ecological risk level of Dongting Lake is medium. In terms of the preliminary analysis, the ecological risks of other heavy metals have risen, to some extent, in the past 30 years, except Hg. And Cd's rising trend is obvious. The heavy metal ecological risk level in Dongting Lake has changed from low risk to medium. Therefore, heavy metal pollution control in Dongting Lake basin should focus on Cd in Xiangjiang River and Zishui River.

Keywords: heavy metals; pollution; ecological risk; trend; Dongting Lake; surface sediments

近年来湖泊重金属污染问题日益严重,成为国内外十分关注的环境问题之一。一般情况下,湖泊沉积物是各种污染物质的“汇”,但在一定条件下沉积物中的重金属又会释放到上覆水中,沉积物转成水体污染的“源”^[1],严重影响湖泊上覆水体的质量,造成水环境的“二次污染”和生态风险^[2-6]。此外,表层沉积物是水体中底栖生物的重要生活场所和食物来源,沉积物中的重金属可直接或间接地对水生生物产生毒害作用,并通过生物富集、食物链放大等过程进一步影响陆地生物和人类^[7]。目前,沉积物中重金属的生态毒性或生态风险已引起了研究者的广泛关注^[8],因此研究沉积物中重金属的潜在生态风险及其变化趋势对防控湖泊水体重金属污染有重要指导意义。

洞庭湖是目前长江中游荆江段唯一与长江干流直接相通的湖泊,具有调蓄、饮用、渔业、灌溉、航运、调节湖区气候、旅游和生物多样性保护等重要生态功能。相关研究结果表明,洞庭湖水系已受到不同程度的污染^[9],重金属健康风险不断增加^[10],洞庭湖水质呈总体下降趋势^[11-12]。尽管近年来有学者针对洞庭湖沉积物重金属开展了相关研究,如姚志刚等^[13]对洞庭湖各水系入湖口和湖区沉积物的重金属环境地球化学特征进行了研究,祝云龙等^[14]对洞庭湖不同湖区沉积物中重金属含量及其空间分布、污染状况与来源进行了研究,万群等^[15]对东洞庭湖沉积物中重金属的分布特征、污染程度与来源进行了研究,唐晓娇等^[16]和李飞等^[17]分别采用基于盲数理论的水体沉积物重金属污染评价模型和基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型对洞庭湖沉积物重金属污染状况进行了评价,左兰兰等^[18]利用潜在生态危害指数法对洞庭湖沉积物中重金属生态风险进行了评价,祝慧娜等^[8]在潜在生态危害指数法的基础上,引入区间排序法对洞庭湖沉积物中重金属生态风险进行了分析,但对洞庭湖沉积物中重

金属生态风险变化趋势的研究尚未见报道。目前,沉积物重金属污染生态风险评价方法较多,具有代表性的主要有地累积指数法、潜在生态危害指数法、沉积物质量基准法等^[7],由于潜在生态危害指数法不仅考虑了重金属含量,而且将重金属的生态、环境与毒理学联系在一起,同时也顾及了背景值的地区差异性^[19],因而得到了广泛应用与认可^[20-21]。本研究通过对洞庭湖表层沉积物中镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铜(Cu)和铅(Pb)等重金属含量的测定,利用潜在生态危害指数法对其潜在生态风险现状进行评价,同时搜集洞庭湖沉积物中重金属监测的历史资料,对洞庭湖表层沉积物中重金属生态风险变化趋势进行分析,以期为了解和掌握洞庭湖沉积物中重金属生态风险状况及其变化趋势、防控洞庭湖水体重金属污染提供参考和依据。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区概况

洞庭湖位于湖南省北部、长江中游荆江南岸,北接长江松滋、太平、藕池三口,南纳湘、资、沅、澧四水,经城陵矶汇入长江,湖体呈近似“U”字形,总流域面积 25.72 万 km²,集水面积 104 万 km²,水位 33.50 m 时(岳阳站,黄海基面),湖长 143.00 km,最大湖宽 30.00 km,平均湖宽 17.01 km,湖泊面积 2 625 km²,最大水深 23.5 m,平均水深 6.39 m,相应蓄水量 167 亿 m³,是我国第二大淡水湖。受泥沙淤积、筑堤建垸等自然和人类活动的影响,洞庭湖现已明显地分化为西洞庭湖、南洞庭湖和东洞庭湖 3 个不同的湖泊水域。洞庭湖为一典型的过水性洪道型湖泊^[22],兼具河流与湖泊双重属性,其水流方向大致为西洞庭湖→南洞庭湖→东洞庭湖→长江^[23]。

1.2 样品采集

为较好地反映沉积物中重金属污染状况,克服单次监测点位少、数据代表性不够的缺陷,本研究选

择在沉积物环境相对稳定的非汛期(枯水期)进行了两次监测。分别于 2012 年 2 月和 2013 年 4 月,采用抓斗式采泥器采集洞庭湖表层沉积物样品,采样深度约 0~10 cm,每个采样点采集 3 个平行样品现场混匀,装入封口袋,4℃ 保存。采样点的布设参考了洞庭湖水质常规监测断面,共设置 9 个采样点,其中西洞庭湖区 3 个,分别是南嘴(S1)、蒋家嘴(S2)和小河嘴(S3),南洞庭湖区 3 个,分别是万子湖(S4)、横岭湖(S5)和虞公庙(S6),东洞庭湖区 3 个,分别是鹿角(S7)、东洞庭湖(S8)和洞庭湖出口(S9),所有采样点采用便携式 GPS 定位,采样点位置见图 1。

1.3 样品处理及分析

所采沉积物样品经冷冻干燥后去除各种杂质,再经玛瑙研钵研磨处理后过 100 目尼龙筛,分装于塑料袋中密封以待测。

Cd 采用石墨炉原子吸收分光光度法测定,Hg 采用冷原子吸收分光光度法测定,As 采用原子荧光法测定,Cu、Pb 采用火焰原子吸收分光光度法测定。为保证分析的准确性,实验每个样品设置 2 个平行样,平行分析误差<5%,取平均值为结果。

1.4 评价方法

1.4.1 潜在生态危害指数

潜在生态危害指数法^[24]由瑞典科学家 Hakan-

son 于 1980 年提出,是一种相对快速、简单和标准的用于划分沉积物污染程度及水域潜在生态风险的方法。潜在生态危害指数计算公式如下:

$$C_r = C_i / C_n;$$

$$E_i = T_i \times C_r;$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n (T_i \times C_i).$$

式中: C_r 为沉积物中重金属 i 的富集系数; C_i 为沉积物中重金属 i 的实测值; C_n 为计算所需沉积物中重金属 i 的参比值; E_i 为沉积物中重金属 T_i 的潜在生态危害指数; T_i 为沉积物中重金属 i 的毒性系数; RI 为沉积物中多种重金属的潜在生态危害指数。

1.4.2 生态风险贡献率

为了找出沉积物中重金属的主要风险污染物,引入生态风险贡献率 k_i ,并将 k_i 按从大到小的顺序累加,确定 $\sum k_i > 80\%$ 的前几项污染物为主要风险污染物。

$$k_i = E_i / RI \times 100\%$$

1.4.3 评价参数的确定

C_n 采用洞庭湖水系水体沉积物中重金属背景值的上限值^[25], T_i 反映沉积物中重金属的毒性水平和生物对其污染的敏感程度,Hakanson^[24] 主要从“元素

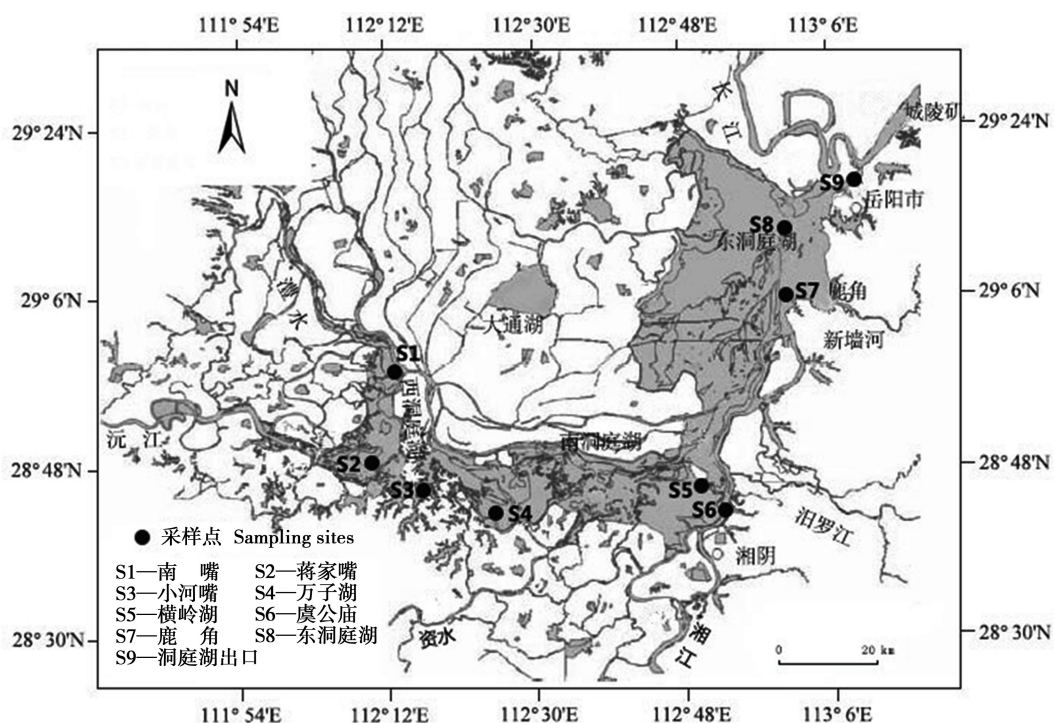


图 1 洞庭湖采样点分布

Fig. 1 Sampling sites in Dongting Lake

丰度原则”和“元素释放度原则”角度考虑并处理此问题,即认为某一重金属的潜在毒性与其丰度成反比,与“元素释放度”(在水中含量与在沉积物中含量的比值)有关,易于释放者对生物的潜在毒性大。沉积物中重金属的参比值和毒性系数具体见表 1。

表 1 沉积物中重金属的参比值和毒性系数
Table 1 C_n and T_n of heavy metals in sediments

评价参数 Evaluation parameters	Cd	Hg	As	Cu	Pb
$C_i/(mg \cdot kg^{-1})$	0.76	0.211	37.6	33.3	40.0
T_i	30	40	10	5	5

1.4.4 生态危害程度划分标准

根据 E_i 和 RI 值划分风险等级的标准尚不一致^[26-28],本研究采用 Hakanson 提出的分级标准^[24],具体见表 2。

表 2 沉积物中重金属生态危害程度分级标准
Table 2 Classification of ecological hazard level of heavy metals in sediments

E_i	RI	潜在生态风险程度 Potential ecological risk level
$E_i < 40$	$RI < 150$	低 Low
$40 \leq E_i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中 Medium
$80 \leq E_i < 160$	$300 \leq RI < 600$	高 High
$160 \leq E_i < 320$	$600 \leq RI < 1200$	很高 Very high
$E_i \geq 320$	$RI \geq 1200$	极高 Extremely high

2 结果(Results)

2.1 沉积物中重金属的含量

洞庭湖表层沉积物中重金属的监测结果见表 3。由表 3 可知,洞庭湖表层沉积物中 Cd 在 $0.60 \sim 20.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $5.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Hg 在 $0.090 \sim 0.640 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.225 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; As 在 $10.4 \sim 83.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 26.2

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Cu 在 $17.9 \sim 70.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $39.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Pb 在 $16.9 \sim 95.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $53.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。同一重金属在不同样点间的变异程度不同,其中 Cd 的变异系数最大,As、Hg、Pb 次之,Cu 的变异系数最小。洞庭湖表层沉积物中重金属含量的大小顺序为 $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$ 。

2.2 沉积物中重金属的生态风险评价

洞庭湖表层沉积物中重金属生态风险评价结果见表 4。由表 4 可知,Cd 的 E_i 值在 $82.50 \sim 438.30$ 之间,平均 227.83,属很高生态风险,其风险贡献率为 78.57%,其中南洞庭湖区所有点位的 E_i 值均大于 320,属极高生态风险;Hg 的 E_i 值在 $19.60 \sim 113.20$ 之间,平均 42.62,属中生态风险,其风险贡献率为 14.70%;As 的 E_i 值在 $3.50 \sim 19.90$ 之间,平均 6.97,属低生态风险,其风险贡献率为 2.40%;Cu 的 E_i 值在 $3.50 \sim 9.30$ 之间,平均 5.86,属低生态风险,其风险贡献率为 2.02%;Pb 的 E_i 值在 $2.50 \sim 11.50$ 之间,平均 6.71,属低生态风险,其风险贡献率为 2.31%。洞庭湖表层沉积物中重金属 E_i 值的大小顺序为: $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cu}$,Cd 和 Hg 的生态风险贡献率之和为 93.27%,大于 80%,表明 Cd 和 Hg 是洞庭湖表层沉积物中重金属的主要风险污染物,其中 Cd 为首要污染物。

全湖 RI 值在 $117.10 \sim 589.80$ 之间,平均 289.99,生态风险程度为中,西洞庭湖区、南洞庭湖区和东洞庭湖区的 RI 值分别为 194.00、496.37 和 179.62,表现为南洞庭湖区 $>$ 西洞庭湖区 $>$ 东洞庭湖区,南洞庭湖区具有高生态风险,西洞庭湖区和东洞庭湖区的生态风险为中。

2.3 生态风险变化趋势分析

为了分析洞庭湖表层沉积物重金属生态风险变化趋势,本研究还搜集了洞庭湖表层沉积物中重金属监测的历史资料^[13,15-16,29],利用相同方法对重金属生态风险进行评价,并将其评价结果与上述评价结果进行比较,具体见表 5、图 2。

表 3 洞庭湖表层沉积物重金属监测结果统计

Table 3 Statistics of heavy metals monitoring results in surface sediments from Dongting Lake

项目 Item	样本数 Sample number	最小值/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Minimum/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	最大值/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Maximum/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	平均值/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Average/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	标准差/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Standard deviation/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	变异系数 Coefficient of variation
Cd	18	0.60	20.7	5.77	6.45	1.12
Hg	18	0.090	0.640	0.225	0.153	0.68
As	18	10.4	83.7	26.2	20.8	0.79
Cu	18	17.9	70.9	39.1	12.6	0.32
Pb	18	16.9	95.8	53.7	28.8	0.54

表 4 洞庭湖表层沉积物中重金属生态风险评价结果

Table 4 Ecological risk assessment results of heavy metals in surface sediments from Dongting Lake

点位 Sites		$E_i(\text{Cd})$	$E_i(\text{Hg})$	$E_i(\text{As})$	$E_i(\text{Cu})$	$E_i(\text{Pb})$	RI	风险程度 Risk level
西洞庭湖区 West Dongting Lake	S1	82.50	19.60	3.50	6.90	4.60	117.10	低 Low
	S2	204.90	63.20	4.00	3.90	2.80	278.80	中 Medium
	S3	135.90	40.40	3.80	3.50	2.50	186.10	中 Medium
	平均 Average	141.10	41.07	3.77	4.77	3.30	194.00	中 Medium
南洞庭湖区 South Dongting Lake	S4	361.20	28.80	3.80	4.95	3.15	401.90	高 High
	S5	435.90	113.20	19.90	9.30	11.50	589.80	高 High
	S6	438.30	30.80	10.30	7.10	10.90	497.40	高 High
	平均 Average	411.80	57.60	11.33	7.12	8.52	496.37	高 High
东洞庭湖区 East Dongting Lake	S7	132.60	28.40	6.60	5.25	8.80	181.65	中 Medium
	S8	125.40	28.40	5.40	5.45	9.45	174.10	中 Medium
	S9	133.80	30.80	5.40	6.40	6.70	183.10	中 Medium
	平均 Average	130.60	29.20	5.80	5.70	8.32	179.62	中 Medium
全湖平均 Average of the whole lake		227.83	42.62	6.97	5.86	6.71	289.99	中 Medium
ki /%		78.57	14.70	2.40	2.02	2.31		
风险程度 Risk level		很高 Very high	中 Medium	低 Low	低 Low	低 Low		

表 5 重金属生态风险评价结果比较

Table 5 Comparison of ecological risk assessment results of heavy metals

年份 Year	$E_i(\text{Cd})$	$E_i(\text{Hg})$	$E_i(\text{As})$	$E_i(\text{Cu})$	$E_i(\text{Pb})$	RI	风险程度 Ecological risk level	参考文献 Reference
1984	61.20	74.40	4.30	3.40	4.55	147.85	低 Low	湖南省国土委员会 办公室 ^[29]
2004	125.10	46.00	6.60	7.10	6.85	191.65	中 Medium	姚志刚 ^[13] Yao Z G ^[13]
2008	121.50	36.40	5.50	6.15	4.00	173.55	中 Medium	万群 ^[15] , 唐晓娇 ^[16] Wan Q ^[15] , Tang X J ^[16]
2012~2013	227.83	42.62	6.97	5.86	6.71	289.99	中 Medium	本研究 This study

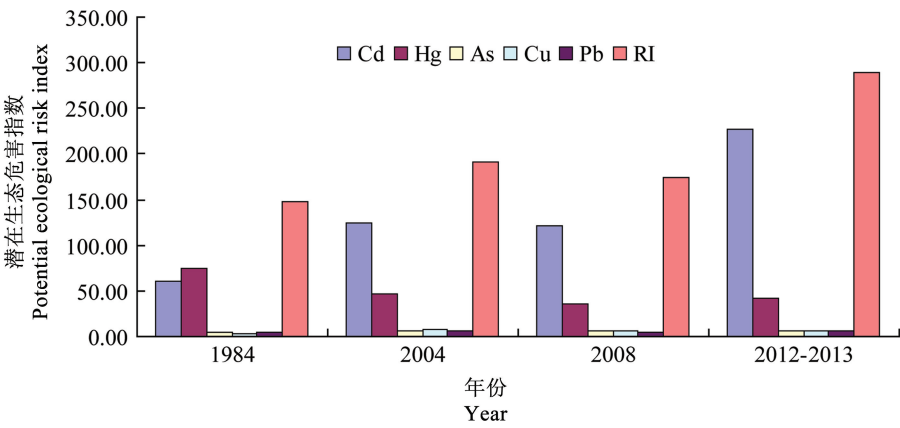


图 2 不同年份潜在生态危害指数比较

Fig. 2 Comparison of the potential ecological risk indexes in different years

从表5、图2可知,Hg的 E_r 值呈总体下降趋势,Cu的 E_r 值在2004年达到最高值,其后逐渐下降,但仍比1984年高,Pb的 E_r 值呈上下波动趋势,Cd和As的 E_r 值均呈总体上升趋势,其中以Cd的上升趋势较明显,全湖RI值从1984年的147.85上升到2012-2013年的289.99,生态风险程度由低生态风险上升到中生态风险,提高了一个等级。

3 讨论(Discussion)

洞庭湖表层沉积物中重金属生态风险以Cd最高,Hg次之,其它重金属较低,此评价结果与左兰兰等^[18]的基本一致。南洞庭湖区特别是横岭湖(S5)和虞公庙(S6)表层沉积物中重

金属生态风险较高,主要是受入湖河流湘江和资水的影响,有研究结果表明,南洞庭湖区湘江和资水入湖的河口三角洲上沉积物重金属含量最高^[14,30]。湖南素有“有色金属之乡”之称,矿产资源丰富,特别是湘江流域衡阳水口山的铅锌矿、郴州的钨矿、湘潭的锰矿和资水流域锡矿山的锑矿更是蜚声中外,然而随着矿产资源的开发和洞庭湖流域工业生产的迅速发展,洞庭湖水系水质已受到不同程度的重金属污染,尤以湘江和资水污染较为严重^[10]。西洞庭湖区的蒋家嘴(S2)表层沉积物中重金属生态风险相对较高可能与沅江河口沉积物中Hg和Cd含量较高有关^[13]。

30年来,尽管Cd和Hg仍是洞庭湖表层沉积物中重金属的主要风险污染物,但Cd和Hg的生态风险贡献率发生了相反的变化,即Cd的贡献率不断上升,Hg的贡献率不断下降,首要风险污染物由1984年的Hg变为2004年后的Cd。因此,洞庭湖流域重金属污染治理应以湘江和资水的Cd为重点。

万群等^[15]的研究结果表明,洞庭湖沉积物中Hg主要受工业废物排放和有色采冶支配,周军等^[31]的分析结果表明,2004~2008年,湖南省工业废水中Hg的排放量呈逐年下降趋势,洞庭湖表层沉积物中Hg的生态风险贡献率下降可能与洞庭湖流域工业企业Hg的排放量减少有关。

在洞庭湖表层沉积物重金属生态风险变化趋势分析中,没有考虑不同年份沉积物样品采集、前处理与分析方法等不一致可能带来的影响,这本身就存在一些不确定性,因此本研究所得生态风险变化趋势分析结论仅仅是初步结果。

参考文献(References):

- [1] 袁旭音,王爱华,许乃政.太湖沉积物中重金属的地球化学形态及特征分析[J].地球化学,2004,33(6):611—618
Yuan X Y, Wang A H, Xu N Z. Chemical partitioning of heavy metals and their characteristics for sediments from Lake Taihu [J]. Geochimica, 2004, 33(6): 611—618 (in Chinese)
- [2] 滑丽萍,华路,高娟,等.中国湖泊底泥的重金属污染评价研究[J].土壤,2006,38(4):366—373
Hua L P, Hua L, Gao J, et al. Heavy metal pollution of sediments of lakes in China [J]. Soils, 2006, 38(4): 366—373 (in Chinese)
- [3] Wang S F, Jia Y F, Wang S Y. Fractionation of heavy metals in shallow marine sediments from Jinzhou Bay China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(1): 23—31
- [4] Liu H L, Li L Q, Yin C Q, et al. Fraction distribution and risk assessment of heavy metals in sediments of Moshui Lake [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20: 390—397
- [5] 刘成,邵世光,范成新,等.巢湖重污染汇流湾区沉积物重金属污染特征及生态风险[J].中国环境科学,2014,34(4):1031—1037
Liu C, Shao S G, Fan C X, et al. Pollution status and risk assessment of heavy metal in the sediment of the severe polluted confluence area of Lake Chaohu [J]. China Environmental Science, 2014, 34(4): 1031—1037 (in Chinese)
- [6] Rertin C, Bourg A. Trends in the heavy metal content (Cd, Pb, Zn) of river sediments in the drainage basin of smelting activities [J]. Water Research, 1995, 29(7): 1729—1736
- [7] 李娜,王珍珍.沉积物重金属污染生态风险评价方法浅析[J].内蒙古石油化工,2012,(23):11—12
Li N, Wang Z Z. Review in ecological risk assessment methods for heavy metal polluted [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2012, (23): 11—12 (in Chinese)
- [8] 祝慧娜,李莹,梁婕,等.基于区间数排序法的洞庭湖沉积物重金属生态风险分析[J].环境工程,2014,32(2):114—117,122
Zhu H N, Li Y, Liang J, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Dongting Lake based on ranking- method of interval numbers [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(2): 114—117, 122(in Chinese)
- [9] 张光贵.湖南省水污染防治对策研究[J].水资源保护,2003,19(4):43—45
Zhang G G. Measures for water pollution control in Hunan Province [J]. Water Resources Protection, 2003, 19(4): 43—45 (in Chinese)
- [10] 张光贵,黄博.湖南洞庭湖水系重金属健康风险评价

- [J]. 水资源保护, 2014, 30(1): 14—17, 47
Zhang G G, Huang B. Health risk assessment of heavy metals in Dongting Lake water system in Hunan Province, China [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(1): 14—17, 47 (in Chinese)
- [11] 黄代中, 万群, 李利强, 等. 洞庭湖近 20 年水质与富营养化状态变化[J]. 环境科学研究, 2013, 26(1): 27—33
Huang D Z, Wan Q, Li L Q, et al. Changes of water quality and eutrophic state in recent 20 years of Dongting Lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(1): 27—33 (in Chinese)
- [12] 饶建平, 易敏, 符哲, 等. 洞庭湖水质变化趋势的研究[J]. 岳阳职业技术学院学报, 2011, 26(3): 53—57
Rao J P, Yi M, Fu Z, et al. Research on water quality changes in Dongting Lake [J]. Journal of Yueyang Vocational Technical College, 2011, 26(3): 53—57 (in Chinese)
- [13] 姚志刚, 鲍征宇, 高璞. 洞庭湖沉积物重金属环境地球化学[J]. 地球化学, 2006, 35(6): 629—638
Yao Z G, Bao Z Y, Gao P. Environmental geochemistry of heavy metals in sediments of Dongting Lake [J] *Geochimica*, 2006, 35(6): 629—638 (in Chinese)
- [14] 祝云龙, 姜加虎, 孙占东, 等. 洞庭湖沉积物中重金属污染特征与评价[J]. 湖泊科学, 2008, 20(4): 477—485
Zhu Y L, Jiang J H, Sun Z D, et al. Character and assessment of heavy metals in the sediments from Lake Dongting [J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(4): 477—485 (in Chinese)
- [15] 万群, 李飞, 祝慧娜, 等. 东洞庭湖沉积物中重金属的分布特征、污染评价与来源辨析[J]. 环境科学研究, 2011, 24(12): 1378—1384
Wan Q, Li F, Zhu H N, et al. Distribution characteristics, pollution assessment and source identification of heavy metals in the sediment of East Dongting Lake [J] *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(12): 1378—1384 (in Chinese)
- [16] 唐晓娇, 黄瑾辉, 李飞, 等. 基于盲数理论的水体沉积物重金属污染评价模型[J]. 环境科学学报, 2012, 32(5): 1104—1112
Tang X J, Huang J H, Li F, et al. Assessment model for heavy metal pollution in sediment based on the blind theory [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(5): 1104—1112 (in Chinese)
- [17] 李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 等. 基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2352—2358
Li F, Huang J H, Zeng G M, et al. Assessment model for heavy metal pollution in sediment based on trapezoidal fuzzy numbers and case study [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(7): 2352—2358 (in Chinese)
- [18] 左兰兰, 赵运林, 许永立. 洞庭湖沉积物的重金属污染及生态风险评估[J]. 江西农业学报, 2013, 25(6): 119—121
Zuo L L, Zhao Y L, Xu Y L. Pollution of heavy metals in sediment of Dongting Lake and their ecological risk assessment [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2013, 25(6): 119—121 (in Chinese)
- [19] 季斌, 杭小帅, 梁斌, 等. 湖泊沉积物重金属污染研究进展[J]. 污染防治技术, 2013, 26(5): 33—40
Ji B, Hang X S, Liang B, et al. Advances in heavy metals contamination of lake sediment [J]. *Pollution Control Technology*, 2013, 26(5): 33—40 (in Chinese)
- [20] 赵沁娜, 徐启新, 杨凯. 潜在生态危害指数法在典型污染行业土壤污染评价中的应用[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2005, (1): 111—116
Zhao Q N, Xu Q X, Yang K. Application of potential ecological risk index in soil pollution of typical polluting industries [J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science)*, 2005, (1): 111—116 (in Chinese)
- [21] 王鸣宇, 张雷, 秦延文, 等. 湘江表层沉积物重金属的赋存形态及其环境影响因子分析[J]. 环境科学学报, 2011, 31(11): 2447—2458
Wang M Y, Zhang L, Qin Y W, et al. Speciation of heavy metals in sediments from Xiang River and analysis of their environmental factors [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(11): 2447—2458 (in Chinese)
- [22] 李有志, 刘芬, 张灿明. 洞庭湖湿地水环境变化趋势及成因分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(8-9): 1295—1300
Li Y Z, Liu F, Zhang C M. Analysis of change trend of water environment and cause in the Dongting Lake wetland [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(8-9): 1295—1300 (in Chinese)
- [23] 张敏, 张伟军. 洞庭湖水质状况分析与水环境保护研究[J]. 长江工程职业技术学院学报, 2011, 28(4): 16—18, 23
Zhang M, Zhang W J. Water quality analysis and water environment protection in Dongting Lake [J]. *Journal of Changjiang Engineering Vocational College*, 2011, 28(4): 16—18, 23 (in Chinese)
- [24] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975—1001
- [25] 李健, 曾北危, 姚岳云, 等. 洞庭湖水系水体环境背景值调查研究[J]. 环境科学, 1986, 7(4): 62—68
Li J, Zeng B W, Yao Y Y, et al. Studies on environmental background levels in waters of Dongting Lake system [J]. *Environmental Science*, 1986, 7(4): 62—68 (in Chinese)
- [26] 胡朝晖, 张干, 邱耀文, 等. 我国渔港沉积物的重金属污

- 染及潜在生态风险评价[J]. 地球化学, 2010, 39(4): 297—304
- Hu Z H, Zhang G, Qiu Y W, et al. Heavy metal pollution and their ecological risk assessment in sediments from Chinese coastal fishing harbors [J]. *Geochimica*, 2010, 39(4): 297—304 (in Chinese)
- [27] 弓晓峰, 陈春丽, 周文斌, 等. 鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 732—736
- Gong X F, Chen C L, Zhou W B, et al. Assessment on heavy metal pollution in the sediment of Poyang Lake [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(4): 732—736 (in Chinese)
- [28] 陈丽莎, 陈志良, 肖举强, 等. 湘江流域长株潭段底泥重金属污染评价[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(8): 4603—4605
- Chen L S, Chen Z L, Xiao J Q, et al. Investigation on heavy metal pollution of sediments in Xiangjiang Rivre in Changzhutan [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(8): 4603—4605 (in Chinese)
- [29] 湖南省国土资源委员会办公室, 湖南省经济研究中心. 洞庭湖区整治开发综合考察研究专题报告[R]. 长沙: 湖南省国土资源委员会办公室, 1985
- [30] 王岚, 王亚平, 许春雪, 等. 长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(8): 2599—2606
- Wang L, Wang Y P, Xu C X, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments of the Yangtze River [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(8): 2599—2606 (in Chinese)
- [31] 周军, 杨瑜. 湖南工业废水污染现状分析[J]. 城市建设与商业网点, 2009, (19): 105—106 ◆