

## 长江中下游不同湖泊沉积物中重金属污染物的累积及其潜在生态风险评价\*

邴海健<sup>1,2</sup>, 吴艳宏<sup>1\*\*</sup>, 刘恩峰<sup>1</sup>, 羊向东<sup>1</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 利用富集因子和 Hakanson 潜在生态风险指数法, 结合年代学结果, 对长江中下游湖泊太白湖、龙感湖、巢湖和西泔沉积物中重金属元素 Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 的富集程度进行了评价, 并比较分析了上述重金属的潜在生态风险。结果表明, 太白湖和龙感湖沉积物中各重金属富集程度均较低; 巢湖沉积物中 Co、Cr、Ni 的富集程度接近中等水平, 而 Cu、Pb、Zn 的富集已经达到中等水平; 西泔沉积物中 Co 的富集非常低, Cr、Ni 富集水平较低, Pb 达到中等富集, Cu、Zn 达到较高的富集水平。对 4 个湖泊沉积物中重金属的综合污染程度进行比较: 巢湖 > 西泔 > 龙感湖 > 太白湖。各湖泊沉积物中单一元素的潜在生态风险都较低, 但是, 根据多元素潜在生态评价指数, 各湖泊沉积物中重金属存在明显不同的潜在生态风险: 巢湖 > 西泔 > 龙感湖 > 太白湖。总体上看, 太白湖和巢湖沉积物重金属污染以及潜在生态风险自 1965 年以来一直在加重, 而龙感湖和西泔沉积物在表层有下降的趋势。这种差异与各个湖泊流域内人类活动的方式和强度密切相关。巢湖和西泔流域内城市化、工业化发展迅速, 人类活动导致大量重金属元素进入湖泊, 给湖泊带来明显的污染; 而龙感湖和太白湖流域内人类活动主要以农业活动为主, 人类活动对重金属的贡献相对较小。

**关键词:** 重金属; 污染指标; 生态风险; 湖泊沉积物; 长江中下游

## The accumulation and potential ecological risk evaluation of heavy metals in the sediment of different lakes within the middle and lower reaches of Yangtze River

BING Haijian<sup>1,2</sup>, WU Yanhong<sup>1</sup>, LIU Enfeng<sup>1</sup> & YANG Xiangdong<sup>1</sup>

(1: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

(2: *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

**Abstract:** The concentrations of Co, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in the sediments of Lake Taibai, Lake Longgan, Lake Chaohu and Lake Xijiu in the middle and lower reaches of Yangtze River, were determined. Combined with geochronology, enrichment factors and Hakanson Potential Ecological Risk Index were used to evaluate the accumulation degree and the potential ecological risk of heavy metals in the sediment. The results showed that the status of heavy metal enrichment in the sediment of Lake Taibai and Lake Longgan was in the lower level, while that of Co, Cr, Ni in the Lake Chaohu sediment was low, and Cu, Pb, Zn enrichment reached moderate level. In the sediment of Lake Xijiu, the status of heavy metal enrichment was different from heavy metals, which Co enrichment was very low, Cr and Ni enrichment was in the lower level, and Pb enrichment arrived at the moderate level, and Cu, Zn enrichment reached the higher level. The status of heavy metal contamination in the four lake sediments was ranked as Lake Chaohu > Lake Xijiu > Lake Longgan > Lake Taibai. The potential ecological risk index of single element was very low, however, based on the potential ecological risk index of multi-elements, there was obvious difference among these four lakes: Lake Chaohu > Lake Xijiu > Lake Longgan > Lake Taibai. Generally, the enrichment and potential ecological risk in the sediments of Lake Taibai and Lake Chaohu had been increasing since 1965, while those conditions in Lake Longgan and Lake Xijiu tended to decrease in the surface sed-

\* 国家自然科学基金项目(40772203)资助。2009-10-30 收稿; 2010-01-30 收修改稿。邴海健, 男, 1984 年生, 博士研究生; E-mail: binghaijian@sohu.com.

\*\* 通讯作者; E-mail: yhwu@niglas.ac.cn.

iment, all of which strongly correlated with the way and intensity of human activities in the catchment areas. In the catchments of Lake Chaohu and Lake Xijiu, the development of industrialization and economy was rapid, and lots of heavy metals were discharged into lakes by human activities, which made these lakes polluted. However, the way of human activities in Lake Longgan and Lake Xijiu catchments was mainly about agriculture, which contributed to a small portion of heavy metals into the sediment.

**Keywords:** Heavy metals; pollution index; ecological risk; lake sediment; the middle and lower reaches of Yangtze River

重金属是难以生物降解的重要污染物,一旦进入环境并且达到一定的浓度,就会对环境产生极大的危害. 湖泊沉积物是重金属元素的汇,进入到沉积物中的重金属元素不仅在沉积物中累积造成污染,而且也可以在生物体内累积,对生物体产生毒害作用<sup>[1]</sup>. 另外,重金属是具有潜在生态风险的污染物,由于水力条件改变、生物扰动、物理化学条件改变等一系列复杂的过程,重金属又会从沉积物中释放出来<sup>[2]</sup>,从而对水体产生“二次污染”.

人类活动对湖泊沉积物中重金属的污染起着非常重要的作用,湖泊流域内不同的人类活动方式和强度导致了湖泊沉积物中重金属污染程度存在明显的差异. 对于不同类型的湖泊,其沉积物中重金属污染程度会存在较大差异. 湖泊流域内人类活动以农业活动为主的湖泊,如太白湖和龙感湖,人类活动方式较为单一(主要以农业活动为主)、强度较弱,湖泊沉积物中重金属的污染程度就相对较低;而靠近市区和工业区的湖泊,如巢湖、太湖,由于人类活动的方式多样、强度较大,重金属污染一般较为严重. 长江中下游地区是我国湖泊密集区之一,随着近年来长江流域经济的快速发展,很多湖泊受到重金属的污染,这引起了许多学者的关注. 范成新等<sup>[3]</sup>分析了太湖宜溧河水系沉积物中重金属的污染特征;吴艳宏等<sup>[4]</sup>的研究表明人类活动对湖滨湿地的破坏导致其对重金属的拦截作用减弱,从而加速了湖泊生态环境的恶化;刘恩峰等<sup>[5]</sup>利用回归分析探讨了太湖表层沉积物中重金属元素的来源;乔胜英等<sup>[6]</sup>针对武汉地区6个湖泊沉积物进行了重金属的潜在生态风险评价的研究;陈洁等<sup>[7]</sup>对巢湖10种重金属进行总量和形态分析,探讨了不同形态重金属的有效性;Wu等<sup>[8]</sup>利用地球化学和统计方法区分了太湖流域东沱湖泊沉积物中重金属元素的人为来源;姚书春等<sup>[9]</sup>在定年的基础上,对沉积物中铅污染进行了研究. 所有这些研究都揭示了在人类活动的影响下,长江中下游地区湖泊沉积物中重金属的污染程度在逐步增加.

近年来,国内外众多学者从沉积学角度提出了多种重金属污染的评价方法,包括地质累积指数( $I_{geo}$ )、富集因子( $EFs$ )、沉积物质量基准法、潜在生态风险指数法、污染负荷指数法、脸谱图法等等. 地质累积指数和富集因子是较为常用的评价重金属污染程度的方法,目前得到了广泛地应用<sup>[2,10-13]</sup>. 利用重金属的 $I_{geo}$ 和 $EFs$ 能够反映人类活动对重金属富集的影响,而且,结合年代学,还可以揭示出重金属的富集过程以及确定重金属的来源. 沉积物质量基准法是目前美国、加拿大、北欧等国家和地区进行评价沉积物重金属质量基准的方法<sup>[14]</sup>,我国起步较晚,应用还不成熟. 瑞典著名地球化学家 Hakanson<sup>[15]</sup>提出的潜在生态风险指数法是目前常用的评价重金属污染程度的方法<sup>[16-20]</sup>. 该方法涉及到单项污染系数、重金属毒性响应系数以及潜在生态危害系数,不仅考虑了土壤重金属的含量,而且将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起,采用可比的、等价属性指数分级法进行评价<sup>[21]</sup>. 而且,将地质累积指数或者富集因子与该方法结合使用将会增加重金属污染评价的可靠性<sup>[18]</sup>.

本文选取长江中下游地区典型湖泊——太白湖、龙感湖、巢湖和西沱,通过沉积物中重金属元素的浓度,结合年代学结果,利用富集因子和 Hakanson 潜在生态风险评价法对沉积物中重金属的富集程度及其潜在生态风险进行评价. 同时,比较不同湖泊沉积物中重金属的富集程度及其潜在生态风险,旨在为湖泊环境质量的综合评价和污染治理提供科学依据.

## 1 研究区域介绍

太白湖位于湖北省东部,横跨黄梅县和武穴市,原有面积约 69.2 km<sup>2</sup>,围垦后现有面积 25.1 km<sup>2</sup>,平均水深 3.2 m,流域面积 960 km<sup>2</sup>. 湖水依赖地表径流和湖面降水补给,主要入湖河流有荆竹河、考田河等. 该湖属于典型的过水性湖泊,湖水大部分从南向东流经梅济港泄入龙感湖后排入长江,少量直接流入长江<sup>[22]</sup>.

龙感湖位于安徽和湖北两省交界的宿松和黄梅境内,系古长江变迁与跨长江两岸古彭蠡泽解体后的残

迹湖。原有湖泊面积 578.95km<sup>2</sup>，此后由于大量围垦，湖泊面积不断缩小到现有的 316.20km<sup>2</sup>，平均水深 3.78m。该湖为过水性湖泊，湖水依赖地表径流和湖面降水补给，纳凉亭、二郎、黄梅、荆竹和梅川等河流来水，经湖泊调蓄后，一路由八一港经小池入长江；另一路入黄大湖、泊湖经华阳闸和杨湾闸分别注入长江<sup>[22]</sup>。

巢湖是我国五大淡水湖之一，位于安徽省中部，跨巢湖市、合肥市、肥西县、肥东县和庐江县。湖区面积 769.55km<sup>2</sup>，平均水深 2.69m。湖泊依赖地表径流和湖面降水补给。由于人类活动的影响，巢湖流域生态环境受到严重破坏，湖盆淤积，水质恶化，目前已成为长江中下游地区典型的富营养湖泊<sup>[22]</sup>。

西沱位于江苏省宜兴市境内，是宜溧河入太湖前的水域，汇集了宜溧河流域所输送的物质。西沱面积 12.40km<sup>2</sup>，平均水深 1.85m。宜溧河是太湖主要入湖河流之一，流域内林草、耕地等农业用地占流域面积的 50% 左右。但是，20 世纪 70 年代以来，随着流域内城市化进程的加快，工业和经济迅猛发展，特别是有色金属冶炼、电镀等高污染企业的发展，增加了流域内的污染物负荷量，加速了水体和土壤的环境污染<sup>[23]</sup>。

## 2 方法

### 2.1 样品的采集与处理

2007 年 10 月利用重力采样器分别在太白湖(TN)、龙感湖(LS)和巢湖(CH)采集沉积岩芯 75cm、100cm 和 100cm，2004 年 9 月利用重力采样器在西沱(XJ)采集沉积物岩芯 56cm。太白湖点样品采于北部湖心处，其它点样品全部在湖心处采集。对所获得沉积物柱样均按 1cm 间隔取样分析。用于重金属元素地球化学分析的样品，室内常温下晾干待用。

### 2.2 元素分析

Al、Co、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 等元素分析的样品用硝酸-氢氟酸-高氯酸湿法溶解后，采用美国 LEEMAN LABSPROFILE 电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)测定其浓度，利用美国 SPEX™ 标准溶液，水系沉积物 GSD-9 和 GSD-11 为参考物质。样品分析误差小于 ±10%。

### 2.3 数据分析

2.3.1 年代学 沉积物的定年采用<sup>210</sup>Pb、<sup>137</sup>Cs 以及沉积物的特征来确定，对于定年的描述详见文献[23]。西沱和龙感湖沉积物年代数据引用 Wu 等<sup>[23-24]</sup>的结果，而太白湖和巢湖沉积物年代引用刘恩峰等<sup>[25]</sup>的结果。

2.3.2 标准化元素的确定 对沉积物样品进行标准化处理可以消除沉积物粒度大小和矿物组成对元素含量变化的干扰。通常，可以作为标准化的元素有：Al、Li、Fe、Sc 等<sup>[8,26-28]</sup>。Al 常被用作标准化元素主要是由其化学性质决定：Al 在天然水体中的溶解度相当低，从而沉积物中 Al 的含量与其在母岩中的含量具有较好的可比性；另外，风化过程中 Al 属于惰性元素，迁移能力差，沉积物中 Al 随粒度减小而线性增大。

2.3.3 元素背景值的确定 根据年代学结果，太白湖 44.5cm 处对应 1834 年，龙感湖 35.5cm 处对应 1896 年，巢湖 42cm 处对应 1824 年，西沱 56cm 处对应 1886 年。由此可见，岩芯最底部均处在工业化之前，人类活动对湖泊沉积物中重金属的贡献较小。因此，太白湖、龙感湖和巢湖均采用岩芯最底部 10cm 元素浓度均值作为其背景值，而西沱采用底部 6cm 元素浓度均值作为其背景值，计算得到的各元素背景值见表 1。

表 1 湖泊沉积物中重金属元素的背景值(mg/kg)  
Tab.1 The baselines of heavy metals in lake sediments

元素	太白湖	龙感湖	巢湖	西沱
Co	18.0	14.9	11.2	14.0
Cr	95.9	74.1	50.4	68.2
Cu	27.4	27.5	12.1	30.0
Ni	39.4	28.1	19.4	34.5
Pb	37.6	35.6	20.4	39.3
Zn	66.6	73.7	39.0	105.6

2.3.4 重金属环境风险评价方法 本研究均取上部 50cm 岩芯进行分析。

(1) 重金属的富集系数(EFs)按以下公式计算<sup>[11]</sup>：

$$EFs = (M/Al)_s / (M/Al)_B \quad (1)$$

式中，(M/Al)<sub>s</sub>是样品中重金属与 Al 元素的浓度比，(M/Al)<sub>B</sub>是背景样品中重金属与 Al 元素浓度比。

(2) Hakanson 潜在生态风险评价。A. 单一元素污染参数 C<sub>f</sub><sup>i</sup>为：

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

式中,  $C_i^i$  为沉积物中元素的实测值;  $C_n^i$  为沉积物中元素的背景值.  $C_f^i$  的污染程度划分为:  $C_f^i < 1$ , 污染程度低;  $1 \leq C_f^i < 3$ , 中等污染;  $3 \leq C_f^i < 6$ , 较高污染;  $C_f^i \geq 6$  很高污染.

单一污染元素的潜在生态风险参数  $E_r^i$  为:

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \tag{3}$$

式中,  $T_r^i$  为单个污染元素的毒性响应参数. Co、Cr、Cu、Pb、Ni、Zn 的毒性响应参数分别为 5, 2, 5, 5, 5 和 1<sup>[16, 29]</sup>. 不同  $E_r^i$  值所对应的潜在生态风险为:  $E_r^i < 40$ , 低风险;  $40 \leq E_r^i < 80$ , 中等风险;  $80 \leq E_r^i < 160$ , 较高风险;  $160 \leq E_r^i < 320$ , 高风险;  $E_r^i \geq 320$ , 很高风险.

B. 多种污染元素的综合评价方法. 沉积物污染程度  $C_d$  计算公式为:

表 2  $C_d$  和  $RI$  值变化范围及其对应的污染程度和潜在生态风险

Tab. 2 The changes of  $C_d$  and  $RI$  corresponding the pollution degree and potential ecological risk

$C_d$	污染程度	$RI$	潜在生态风险程度
$C_d < 5$	低	$RI < 50$	低
$5 \leq C_d < 10$	中等	$50 \leq RI < 100$	中等
$10 \leq C_d < 20$	较高	$100 \leq RI < 200$	较高
$C_d \geq 20$	很高	$RI \geq 200$	很高

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_f^i \tag{4}$$

潜在生态风险指数  $RI$  计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \tag{5}$$

因为本文研究的污染元素 (Co、Cr、Cu、Pb、Ni、Zn) 少于 Hakanson 提出的 8 种, 所以需要对  $C_d$  和  $RI$  进行相应的调整<sup>[18-19]</sup>. 重新定义后的重金属元素  $C_d$  和  $RI$  范围见表 2.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 重金属元素的浓度变化

太白湖和龙感湖沉积物中各重金属的含量均超过它们的背景值, 浓度变化不剧烈, 说明整个岩芯重金属均达到不同程度的富集, 但是重金属浓度与背景值差距小, 富集程度较低; 巢湖沉积物中重金属除 Cu 的部分浓度小于其背景值外, 其它元素的浓度均超出背景值 (表 3). 其中, Cu、Ni 的最高含量是其背景值的 2 倍多, Pb 3 倍多, Zn 更是达到 5 倍多; 西泇沉积物中 Co、Cr、Ni 的浓度在背景值附近变化不大, 而 Cu、Pb、Zn 的浓度均超出背景值, 其中 Cu 的最大值是其背景值的 4 倍, Pb 达到背景值的 2 倍, Zn 甚至达到背景值的 6 倍.

表 3 湖泊沉积物中重金属浓度的变化范围及平均值

Tab. 3 The changes of heavy metal concentrations and their averages in the lake sediment

湖泊	浓度	Co (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
太白湖	变化范围	19.5 - 25.8	96.6 - 118.4	29.3 - 34.9	39.2 - 49.0	40.9 - 58.6	71.8 - 100.0
	均值	21.7	104.6	31.9	43.9	48.6	86.2
龙感湖	变化范围	13.2 - 22.5	77.9 - 114.2	30.1 - 46.2	29.1 - 46.2	34.7 - 54.1	64.7 - 122.8
	均值	18.6	101.6	40.8	39.4	44.5	94.5
巢湖	变化范围	12.3 - 20.8	59.1 - 98.4	15.4 - 46.1	24.2 - 46.5	26.5 - 67.9	53.0 - 227.3
	均值	17.3	78.1	24.8	35.1	41.5	106.1
西泇	变化范围	7.8 - 14.2	51.0 - 90.9	30.8 - 118.6	23.4 - 47.5	39.7 - 90.1	123.1 - 644.8
	均值	11.1	72.4	66.5	33.2	62.9	360.3

通过重金属浓度与背景值的比较, 对比 4 个湖泊, 太白湖和龙感湖沉积物重金属浓度相对较低; 巢湖沉积物中各重金属的浓度均较高; 西泇沉积物中 Co、Cr、Ni 浓度较低, 而 Cu、Pb、Zn 浓度较高. 但是, 仅根据重金属浓度变化很难确定其富集程度, 从而需要借助其它指标加以佐证.

#### 3.2 沉积物中重金属污染现状分析

3.2.1 单一元素的污染现状分析 根据重金属富集因子 ( $EFs$ ) 和单一元素污染参数 ( $C_f^i$ ) 变化 (表 4), 太白湖沉积物中元素 Pb 和 Zn 的富集程度最高, 其它元素的  $EFs$  均小于 1.0. Pb 和 Zn 的  $C_f^i$  最高, 其次是 Co 和

Cu, Cr 和 Ni 最低. 从而, 太白湖沉积物中重金属富集程度较低. 龙感湖沉积物中 Cu 的富集程度最高, 其它元素均较低. Cu 的  $C_f^i$  值也最高, 之后依次是 Zn、Ni、Cr、Co、Pb. 总体上看, 龙感湖沉积物中重金属的累积程度也较低, 但高于太白湖.

表 4 重金属富集因子 ( $EF_s$ ) 和单一元素污染参数 ( $C_f^i$ ) 变化

Tab. 4 The changes of enrichment factors ( $EF_s$ ) and the index of single element pollution of heavy metals

湖泊	参数	Co(均值)	Cr(均值)	Cu(均值)	Ni(均值)	Pb(均值)	Zn(均值)
太白湖	$EF_s$	1.0-1.3(1.1)	0.9-1.2(1.0)	0.9-1.3(1.1)	0.9-1.2(1.0)	1.0-1.3(1.2)	1.0-1.4(1.2)
	$C_f^i$	1.1-1.4(1.2)	1.0-1.2(1.1)	1.1-1.3(1.2)	1.0-1.2(1.1)	1.1-1.6(1.3)	1.1-1.5(1.3)
龙感湖	$EF_s$	0.9-1.2(1.0)	1.0-1.3(1.1)	1.0-1.5(1.2)	1.0-1.3(1.1)	0.9-1.1(1.0)	0.8-1.3(1.0)
	$C_f^i$	0.9-1.5(1.2)	1.1-1.5(1.4)	1.1-1.7(1.5)	1.0-1.6(1.4)	1.0-1.5(1.2)	0.9-1.7(1.3)
巢湖	$EF_s$	0.8-1.4(1.0)	0.9-1.4(1.0)	1.0-2.4(1.4)	1.0-1.8(1.2)	1.0-2.2(1.4)	1.1-3.8(1.8)
	$C_f^i$	1.1-1.9(1.5)	1.2-2.0(1.5)	1.3-2.8(2.1)	1.3-2.4(1.8)	1.3-3.3(2.0)	1.4-5.8(2.7)
西沱	$EF_s$	0.8-1.1(0.9)	1.0-1.7(1.3)	1.0-5.3(2.7)	1.0-1.3(1.1)	1.0-2.7(1.9)	1.2-8.5(4.1)
	$C_f^i$	0.6-1.0(0.8)	0.7-1.3(1.1)	1.0-4.0(2.2)	0.7-1.4(1.0)	1.0-2.3(1.6)	1.2-6.1(3.4)

巢湖沉积物中 Co、Cr、Ni 的  $EF_s$  和  $C_f^i$  变化显示 (表 4), Co、Cr、Ni 的富集处在低到中等水平; 而 Cu、Pb、Zn 的  $EF_s$  和  $C_f^i$  值相对较高, 表明 Cu、Pb、Zn 污染达到中到较高的富集水平. 西沱沉积物中 Co 的  $EF_s$  和  $C_f^i$  值很小, 说明 Co 的富集水平低; 而从 Cr、Ni、Pb 的  $EF_s$  和  $C_f^i$  的变化来看, Cr、Ni 的富集水平较低, Pb 的富集达到中等水平; Cu、Zn 的  $EF_s$  和  $C_f^i$  值均较高, 表明 Cu、Zn 的富集已经达到较高水平.

3.2.2 多元素污染现状分析 根据多元素污染评价参数  $C_d$  的变化 (图 1), 太白湖和龙感湖沉积物中多种重

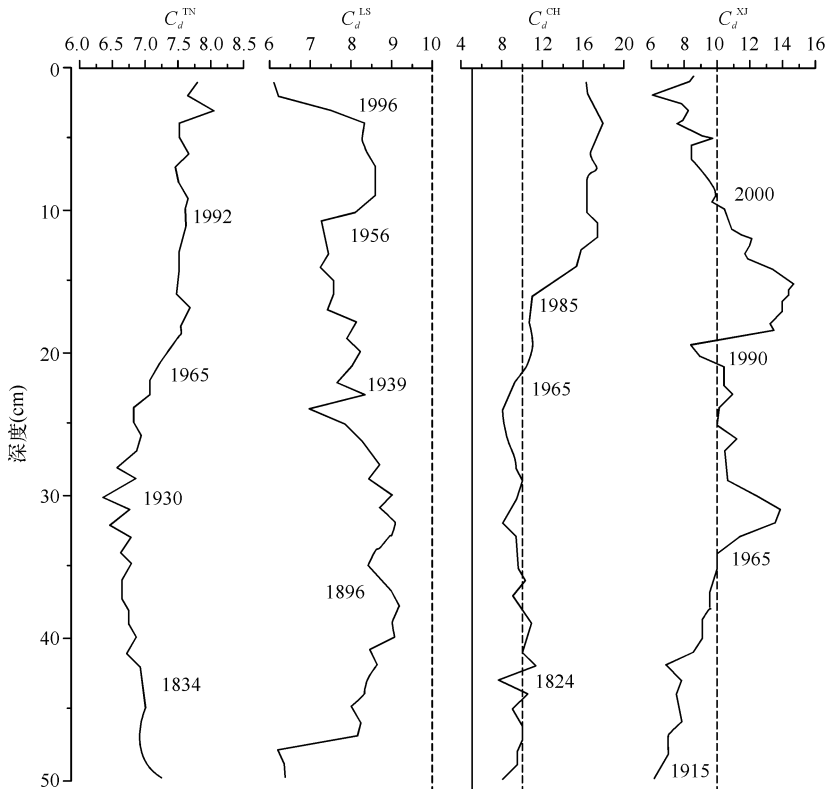


图 1 湖泊沉积物中多种金属元素的污染程度变化曲线

Fig. 1 The curves of pollution degree of multi-elements in the lake sediments

金属的  $C_d$  值分别在 6.3–8.1 和 6.2–9.2 之间变化, 平均值分别为 7.2 和 8.0. 太白湖自 1965 年开始,  $C_d$  一直大于 7.0, 污染程度一直在加重; 而龙感湖整个岩芯中绝大部分  $C_d$  都在 7.0–9.0 之间变化, 1996 年之后才逐渐下降, 但是目前仍然大于 6.0. 因此, 整体上讲, 太白湖和龙感湖沉积物中重金属处于中等污染水平, 而且各种重金属对总体污染的贡献大体相当.

巢湖和西沱沉积物中多种重金属的  $C_d$  值分别在 7.6–17.9 和 6.0–14.6 之间变化, 平均值分别为 11.7 和 10.1. 巢湖自 1965 年开始, 沉积物  $C_d$  值一直处于 10.0 以上, 而且目前仍然在增加, 此前  $C_d$  值也都在 6.0–10.0 之间, 说明巢湖沉积物中重金属污染比较严重. 而西沱沉积物中重金属  $C_d$  值在 1965–2000 年均大于 10.0, 其它时间  $C_d$  值处于 6.0–10.0 之间. 虽然在 20 世纪 90 年代中后期逐渐降低, 但是目前沉积物中重金属污染仍处于较高的水平. 在各元素对总体污染的贡献方面, 巢湖沉积物中各元素对总体污染的贡献为: Zn > Cu > Pb > Cr > Co, Ni, 而西沱沉积物中各元素对总体污染的贡献为: Zn > Cu > Pb > Cr, Ni > Co. 根据多元素污染评价参数  $C_d$  的变化, 4 个湖泊沉积物中重金属污染程度的关系为: 巢湖 > 西沱 > 龙感湖 > 太白湖.

### 3.3 重金属潜在生态风险评价

3.3.1 单一元素潜在生态风险评价 4 个湖泊沉积物中各种重金属元素的单一潜在生态风险指数均小于 40.0 (表 5), 即各湖泊沉积物中单一元素的潜在生态风险都很低. 但是, 不同的湖泊进行对比可以发现, Co、Cr、Ni 的潜在生态风险变化情况类似: 巢湖 > 太白湖、龙感湖 > 西沱; 对于 Cu、Pb, 巢湖 > 西沱 > 太白湖、龙感湖; Zn, 西沱 > 巢湖 > 太白湖、龙感湖.

表 5 湖泊沉积物中单一污染元素的潜在生态风险参数 ( $E_r$ ) 变化

Tab. 5 The changes of potential ecological risk of single element ( $E_r$ ) in the lake sediment

湖泊	$E_r$	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
太白湖	变化范围	5.4–7.2	2.0–2.5	5.3–6.4	5.0–6.2	5.4–7.8	1.1–1.5
	均值	6.0	2.2	5.8	5.6	6.5	1.3
龙感湖	变化范围	4.4–7.5	2.1–3.1	5.5–8.4	5.2–8.2	4.9–7.6	0.9–1.7
	均值	6.2	2.7	7.4	7.0	6.2	1.3
巢湖	变化范围	5.5–9.3	2.3–3.9	6.4–19.1	6.3–12.0	6.5–16.7	1.4–5.8
	均值	7.7	3.1	10.3	9.1	10.2	2.7
西沱	变化范围	2.8–5.1	1.5–2.7	5.1–19.6	3.4–6.9	5.1–11.5	1.2–6.1
	均值	4.0	2.1	11.1	4.8	8.0	3.4

3.3.2 多元素潜在生态风险评价 根据多元素潜在生态风险指数 ( $RI$ ) 变化 (图 2), 太白湖沉积物中重金属  $RI$  值在 24.4–31.0 间变化, 平均值为 27.3; 龙感湖沉积物中重金属  $RI$  值在 23.3–35.5 间变化, 平均值为 30.9. 太白湖和龙感湖沉积物中重金属  $RI$  值均小于 50.0, 处于低的潜在生态风险, 但是太白湖的  $RI$  值处于逐步上升状态, 这应当引起重视.

巢湖沉积物中重金属  $RI$  值在 28.7–62.9 间变化, 平均值为 43.0; 西沱沉积物中重金属  $RI$  值在 20.1–45.1 间变化, 平均值为 33.4. 巢湖沉积物中重金属  $RI$  值在 1985 年后一直大于 50.0, 而且处于逐渐增加的趋势, 目前已经处于中等潜在生态风险程度; 西沱沉积物中重金属  $RI$  值虽然总体上小于 50.0, 处于低生态风险, 但是其  $RI$  值曾一度非常接近中等生态风险, 近些年随着对重金属污染的重视, 西沱沉积物中重金属的生态风险在逐渐降低.

总体上看, 各湖泊沉积物中重金属潜在生态风险程度为: 巢湖 > 西沱 > 龙感湖 > 太白湖. 但是, 就目前的情况来看, 龙感湖和西沱表层沉积物中重金属的潜在生态风险在逐步下降, 这主要是由于 20 世纪 90 年代中后期开始, 国家和当地政府加大了对流域工业发展的控制. 以太湖流域为例, 90 年代中后期, 宜兴市关闭了一大批高污染的中小型企业<sup>[23]</sup>, 重金属来源的减少使累积到沉积物中的重金属含量有明显下降趋势 (图 1), 进而重金属对水体的潜在危害程度有所降低.

### 3.4 人类活动对湖泊沉积物中重金属的影响

通过各种元素污染评价参数和潜在生态风险的对比, 各湖泊沉积物中重金属的污染程度及其潜在生态

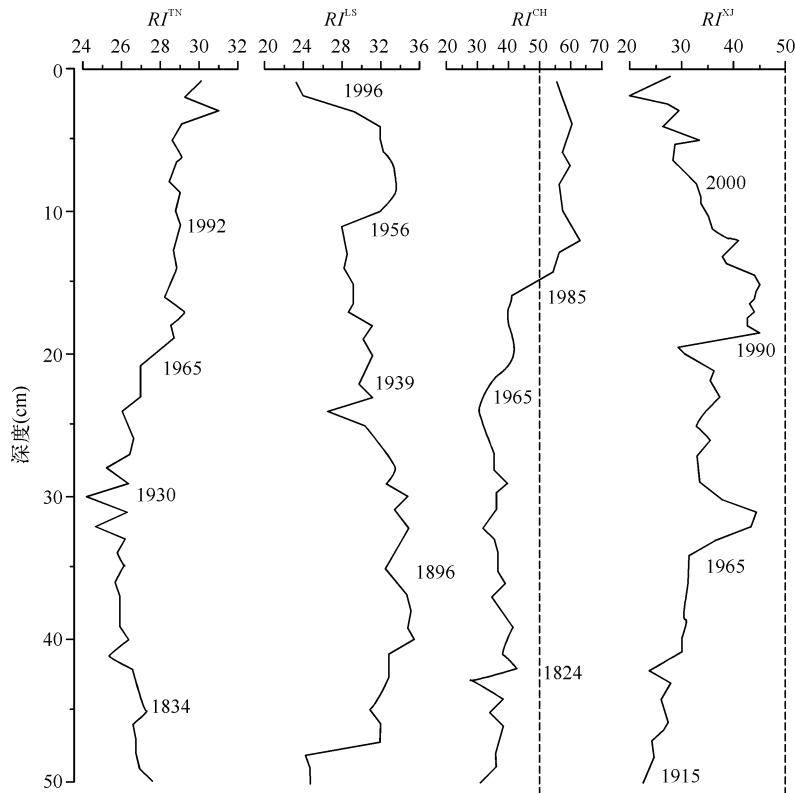


图2 湖泊沉积物中重金属潜在生态风险指数(RI)变化曲线

Fig. 2 The curves of potential ecological risk index of heavy metals in the lake sediments

风险顺序为：巢湖 > 西沱 > 龙感湖 > 太白湖。这种污染差异与湖泊流域内人类活动的方式以及强度密切相关。

本研究中,由巢湖沉积物中 Cu、Pb、Zn 的污染指标 ( $EF_s$  和  $C_p^c$ ) 以及多元素污染指标 ( $C_d$ ) 可以发现 (表 4, 图 1), Cu、Pb、Zn 均处于较高污染水平,而且重金属的潜在生态风险也较高。近几年巢湖沉积物中重金属的污染水平和潜在生态风险一直处于上升状态,这反映了巢湖流域内人类活动对重金属的贡献。巢湖流域内拥有 2500 多家工矿企业和 150 多万城镇人口,每年通过河渠向湖中排放的各类工业废水、生活污水上亿吨<sup>[30]</sup>,其中合肥市占绝大部分。近年来,合肥、巢湖市区工业发展和城市建设步伐加快,人口明显增多,使湖泊沉积物中累积了大量的重金属元素,尤其是 Cu、Pb 和 Zn 浓度较高。

西沱位于宜兴市境内,随着流域内工业和经济的迅猛发展,特别是有色金属冶炼、电镀工业、印染等高污染企业的发展,增加了流域内的污染物负荷量,加速了水体的环境污染,尤其是 20 世纪 70 年代中期至 90 年代中期,重金属的污染状况非常严重 (图 1),虽然近些年各种政策的出台使污染状况有下降的趋势,但是目前西沱沉积物中重金属的污染水平仍然偏高<sup>[31]</sup>。其中,Cu 污染主要与西沱流域电镀工业有关,Cu 具有生物累积效应以及与有机物具有较强的结合能力,这可能是造成底泥 Cu 污染的主要原因。Pb 污染加重一方面与汽车及航船使用含铅汽油有关;另一方面,Pb 污染以工业污染源为主,燃煤、电镀工业、生产合成橡胶等都可能造成 Pb 污染。沉积物中 Zn 的污染与 Pb 类似。

与巢湖相比,西沱流域内人口相对较少,城市化进程低于巢湖流域内的城市化发展,这在很大程度上减缓了污染物向水体的排放,这也是西沱沉积物中重金属污染及其潜在生态风险低于巢湖的重要原因。太白湖和龙感湖各指标反映的重金属污染及其潜在生态风险较之巢湖和西沱明显偏低 (表 4, 图 1, 图 2)。太白湖和龙感湖流域主要以农业生产为主<sup>[32]</sup>,除化肥、农药等农业排放源及大气沉降之外,很少有其它重金属来

源,人类活动方式的单一以及活动强度较低使其对湖泊沉积物重金属的贡献相对较小,这是太白湖、龙感湖与巢湖、西沱沉积物中重金属含量差异显著的主要原因。

#### 4 结论

(1) 根据元素背景值、富集因子和单一元素污染参数,太白湖和龙感湖沉积物中各种重金属的富集程度均较低;巢湖沉积物中 Co、Cr、Ni 的富集程度接近中等水平,而 Cu、Pb、Zn 已达到中等水平;西沱沉积物中 Co 的富集非常低, Cr、Ni 富集水平较低, Pb 达到中等富集水平, Cu、Zn 达到较高的富集水平。

(2) 从总体上看,4 个湖泊沉积物中重金属的污染程度关系为:巢湖 > 西沱 > 龙感湖 > 太白湖。太白湖和巢湖的污染自 1965 年以来一直在加重,而龙感湖和西沱沉积物中重金属的富集在表层有下降的趋势。

(3) 太白湖、龙感湖、巢湖和西沱沉积物中单一元素的潜在风险都非常低 ( $E_r < 40$ ),但是根据多元素潜在生态风险指数,各湖泊沉积物中重金属的潜在生态风险还是存在明显的差异:巢湖 > 西沱 > 龙感湖 > 太白湖。与富集程度变化趋势类似,太白湖和巢湖的潜在生态风险一直在增加,而龙感湖和西沱随时间变化有下降的趋势。

(4) 各湖泊污染程度和潜在生态风险的差异与湖泊流域内人类活动的方式和强度密切相关。巢湖和西沱流域内城市、经济发展迅速,人口增多和工业化进程的加快给湖泊带来明显的污染;而龙感湖和太白湖流域人类活动主要以农业活动为主,人类活动的方式单一和强度较弱,对重金属污染的贡献相对较小。

#### 5 参考文献

- [ 1 ] Bryan GW, Langston WJ. Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: A review. *Environmental Pollution*, 1992, **76**: 89-131.
- [ 2 ] Jara-Martin ME, Soto-Jimenez MF, Paez-Osuna F. Bulk and bioavailable heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) in surface sediments from Mazatlan Harbor (SE Gulf of California). *Bull Environ Contam Toxicol*, 2008, **80**: 150-153.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] 吴艳宏,王苏民,Battarbee RW.龙感湖小流域元素时空分布及湿地拦截功能探讨.湿地科学,2003,**1**(1):33-39.
- [ 5 ] 刘恩峰,沈吉,朱育新等.太湖表层沉积物重金属元素的来源分析.湖泊科学,2004,**16**(2):113-119.
- [ 6 ] 乔胜英,蒋敬业,向武等.武汉地区湖泊沉积物重金属的分布及潜在生态效应评价.长江流域资源与环境,2005,**14**(3):353-357.
- [ 7 ] 陈洁,李升峰.巢湖表层沉积物中重金属总量及形态分析.河南科学,2007,**25**(2):303-307.
- [ 8 ] Wu YH, Hou XH, Cheng XY *et al.* Combining geochemical and statistical methods to distinguish anthropogenic source of metals in lacustrine sediment: a case study in Dongjiu Lake, Taihu Lake catchment, China. *Environ Geol*, 2007, **52**: 1467-1474.
- [ 9 ] 姚书春,薛滨,朱育新等.长江中下游湖泊沉积物铅污染记录——以洪湖、固城湖和太湖为例.第四纪研究,2008,**28**(4):659-666.
- [ 10 ] Loska K, Cebula J, Pelczar J *et al.* Use of enrichment and contamination factors together with geoaccumulation indexes to evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Rybnik Water Reservoir in Poland. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1997, **93**: 347-365.
- [ 11 ] Soto-Jimenez M, Paez-Osuna F. Cd, Cu, Pb, and Zn in Lagoonal sediments from Mazatlan Harbor (SE Gulf of California): bioavailability and geochemical fractioning. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2001, **66**: 350-356.
- [ 12 ] Loska K, Wiechula D. Application of principle component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir. *Chemosphere*, 2003, **51**: 723-733.
- [ 13 ] Acevedo-Figueroa D, Jimenez BD, Rodriguez-Sierra CJ. Trace metals in sediments of two estuarine lagoons from Puerto Rico. *Environmental Pollution*, 2006, **141**: 336-342.
- [ 14 ] 王立新,陈静生,洪松等.水体沉积物重金属质量基准研究新进展——生物效应数据库法.环境科学与技术,2001,**24**(2):4-8.
- [ 15 ] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach. *Water Res*, 1980, **14**: 975-1001.



- [16] 刘 成,王兆印,何 耘等. 环渤海湾诸河口潜在生态风险评价. 环境科学研究,2002,**15**(5):33-37.
- [17] 周秀艳,李宇斌,王恩德等. 辽东湾湿地重金属污染及潜在生态风险评价. 环境科学与技术,2004,**27**(5):60-62.
- [18] 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. 湖泊科学,2003,**15**(3):252-256.
- [19] 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. 中国环境科学,2003,**23**(5):521-525.
- [20] 向 勇,缪启龙,丰江帆. 太湖底泥中重金属污染及潜在生态危害评价. 南京气象学院学报,2006,**29**(5):700-705.
- [21] 陈满荣. 长江口漫滩沉积物重金属污染研究. 上海:华东师范大学出版社,2009:168-169.
- [22] 王苏民,窦鸿身. 中国湖泊志. 北京:科学出版社,1998.
- [23] Wu YH, Jiang XZ, Liu EF *et al.* The enrichment characteristics of mercury in the sediments of Dongjiu and Xijiu, Taihu Lake catchment, in the past century. *Science in China Series D; Earth Sciences*, 2008, **38**(4): 471-476.
- [24] 吴艳宏,刘恩峰,酆海健等. 人类活动影响下的长江中游龙感湖近代湖泊沉积年代序列. 中国科学:地球科学, 2010,**40**(6):751-757.
- [25] 刘恩峰,薛 滨,羊向东等. 基于<sup>210</sup>Pb与<sup>137</sup>Cs分布的近代沉积物定年方法研究——以巢湖、太白湖为例. 海洋地质与第四纪地质,2009,**29**(6):89-94.
- [26] Loring DH. Lithium—a new approach for the granulometric normalization of trace metal data. *Mar Chem*, 1990,**29**: 155-168.
- [27] Herut B, Hornung H, Krom MD *et al.* Trace metals in shallow sediments from the Mediterranean coastal zone of Israel. *Mar Pollut Bull*, 1993,**26**: 676-682.
- [28] Grousset FE, Quétel CR, Thomas B *et al.* Anthropogenic vs. lithogenic origins of trace elements (As, Cd, Pb, Rb, Sb, Sc, Sn, Zn) in water column particles: northwestern Mediterranean sea. *Mar Chem*, 1995, **48**: 291-310.
- [29] 徐争启,倪师军,虞先国等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算. 环境科学与技术,2008,**31**(2): 112-115.
- [30] 董海燕. 巢湖水污染现状及防治对策. 巢湖学院学报,2009,**11**(3):106-109.
- [31] 谢红彬,陈 雯. 太湖流域制造业结构变化对水环境演变的影响分析——以苏锡常地区为例. 湖泊科学,2002,**14**(1):53-59.
- [32] 吴艳宏,王苏民. 龙感湖沉积物中人类活动导致的营养盐累积通量估算. 第四纪研究,2006,**26**(5):843-848.