# 滇池沉积物金属污染及潜在生态风险研究

陈云增 1,2,杨浩3,金峰2,吕俊杰2,张振克4,秦明周1

(1河南大学资源与环境研究所,河南开封 475001; 2土壤与农业可持续发展国家重点实验室 (中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 3 南京师范大学地理科学学院,南京 210097; 4 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室,南京 210093)

摘 要: 对滇池 126 个采样点沉积物 0~5 cm、5~10 cm 和 10~20 cm 中 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、Hg 和 As 等 7 种金属的含 量进行了分析测定,各金属含量测定结果均高于相应的参比值,表明滇池沉积物受到了不同程度的金属污染。各金属含量的水 平分布很不均衡,Zn、Pb、Cd、Hg 和 As 含量随沉积物深度的减小而增大,Cu 和 Cr 含量则随沉积物深度减小而减小,表明滇 池沉积物中 Cu 和 Cr 污染整体上出现了减缓的趋势,而 Zn、Pb、Cd、Hg 和 As 污染在不断加剧。用 Håkånson 潜在生态风险指数对滇池沉积物金属污染的生态风险进行了分析,结果表明: 滇池沉积物存在轻微的 Cu、Zn、Pb、Cr 和 As 污染生态风险,以 及中等的 Hg 和 Cd 污染生态风险;全湖沉积物金属污染的平均生态风险指数 *RI* 值为 205.03,属中等生态风险,但有快速加大的趋势。

关键词: 沉积物; 金属污染; 生态风险指数; 滇池 中图分类号: X824

近年来,沉积物污染及其引发的生态风险问题引 起了众多研究者的关注<sup>[1]</sup>。研究表明,水体环境质量 的变化与沉积物的环境质量有着极为密切的关系<sup>[2]</sup>。 沉积物中的污染物除对底栖生物产生直接危害外<sup>[3]</sup>, 还在一定条件下 (扰动、pH 和 Eh 的变化、生物作用 等),通过不同方式 (解吸、间隙水扩散、再悬浮、生 物转化等)进入水体,对上覆水体的环境质量产生持 久影响[4-5]。因此沉积物中金属污染状况调查及生态风 险分析成为目前研究的重点问题之一。潜在生态风险 指数 (The Potential Ecological Risk Index) 是瑞典科学 家 Håkånson 从沉积学角度提出的沉积物金属污染评 价方法,并得到较为广泛的应用60。该方法不仅反映 了特定沉积物中各单一污染物的生态风险,同时也注 意了多种污染物的综合作用,并且用定量的方法划分 出沉积物污染的生态风险等级。我国一些研究者用该 方法对中国主要河口、乐安江、珠江口、太湖以及香 港河等水域沉积物金属污染的生态风险进行了研究 [7-11],但由于沉积物金属参比值选择及采样点数量的限 制,研究结果的可靠性也受到一定限制。

滇池是我国污染最为严重的湖泊之一,滇池沉积 物中的金属污染物对底栖生物产生危害并对上覆水体 水质状况产生影响<sup>[12]</sup>。通过高密度采样,可较全面地 了解滇池沉积物中金属污染物的分布及污染状况,揭示由于沉积物金属污染而造成的潜在生态风险,为滇 池污染治理提供科学依据。

## 1 材料与方法

#### 1.1 样品采集和处理

样品采集分两次进行,2002年4~6月和2005年 6月分别用Uwitec和Anderson重力采样器在滇池采集 126个沉积物样品,采样深度20cm,样点位置在全湖 均匀布设,GPS定位(图1)。样品采集后于样品架上 静置,然后用乳胶管吸除上覆水层,再用分样装置将 样品沉积物按0~5cm,5~10cm,10~20cm分段切割 装入样品袋密封,带回实验室用于分析沉积物中各金 属元素含量。

#### 1.2 分析测定方法

沉积物样品中 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 和 As 含量测 定采用 HF-HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub> 消化, ICP-AES 测定, Hg 采用硝酸,硫酸,五氧化二钒消化,冷原子吸收光谱 法 CVAA 测定。

# 1.3 沉积物金属污染潜在生态风险分析方法

沉积物金属污染潜在生态风险指数分析基于元素 丰度和释放能力原则<sup>[6]</sup>,并有如下前提:①各金属元

①基金项目:中国科学院土壤与农业可持续发展国家重点项目 (5022505) 和国家自然科学基金项目 (40471128) 资助。 作者简介:陈云增 (1965—),男,河南邓州人、博士,主要从事湖泊沉积物环境质量研究。E-mail: yzchen@henu.edu.cn



#### 图 1 滇池沉积物样点位置图

Fig. 1 Distribution of sediment sampling sites in Dianchi Lake

素的毒性响应具有差异,金属的毒性和稀少性之间存 在一定比例关系,其生物毒性可根据"丰度原则"区 别,由此可确定出金属污染物的"沉积学毒性系数" (表1),金属毒性系数反映金属的毒性水平和生物对 重金属污染的敏感程度;②多种金属污染的潜在生物对 生态危害具有加和性,即多种金属污染的潜在生态风 险更大,Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、As和 Hg 是优先考 虑对象;③潜在生态风险指数(the potential ecological risk index, RI)随沉积物中金属污染程度的加重而增 加。据此,沉积物中第 i 种金属的潜在生态风险系数 *E<sup>i</sup>*, (the potential ecological risk factor)及多种金属污染 沉积物的 *RI* 可分别表示为:

 $E_r^i = T_r^i \times C_f^i$ ,  $C_f^i = C_s^i / C_n^i$ ;

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E_{r}^{i} = \sum_{i=1}^{n} T_{r}^{i} \times C_{f}^{i} = \sum_{i=1}^{n} T_{r}^{i} \times C_{s}^{i} / C_{n}^{i}$$

式中,  $T_r$  为单一金属 i 的毒性响应系数(the toxic response factor, 表 1);  $C_f$  为单一金属 i 的污染系数(the factor of contamination);  $C_s^i$  为沉积物中金属 i 的实测 含量;  $C_n^i$  为计算选用的参比值<sup>[13]</sup> (表 1)。

潜在生态风险系数 E<sup>i</sup><sub>r</sub>和 RI 与风险程度等级划分 关系<sup>[13]</sup>见表 2。

表1 各种金属的毒性系数和参比值								
		Table 1 Toxici	ty coefficients of me	etals their respective	reference values			
	Hg	Cd	As	Pb	Cu	Cr	Zn	
$T^{i}_{r}$	40	30	10	5	5	2	1	
$C_{n}^{i}$ (mg/kg)	0.25	0.50	15.00	25.00	30.00	60.00	80.00	

表 2 E<sup>i</sup>,和 RI 与风险程度等级划分关系

Table 2 Relationship of grading of ecological risks with  $E_r^i$  and RI

潜在生态风险程度等级	$E^{i}_{r}$	RI
轻微	$E^{i}_{r} < 40$	<i>RI</i> <150
中	$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \le RI < 300$
强	$80 \le E_{r}^{i} < 160$	$300 \le RI \le 600$
很强	$160 \le E_r^i < 320$	$RI \ge 600$
极强	≥320	

# 2 结果与讨论

#### 2.1 滇池表层沉积物中金属含量及空间分布

滇池表层沉积物(0~20 cm)126个样点378个沉积物样品中金属含量分析结果见表3。

从表 3 可以看出, 滇池表层沉积物中金属平均含

量除 Hg 接近表 1 所列的金属参比值 C<sup>i</sup><sub>n</sub>外, Cu、Zn、Pb、Cd、Cr和As 的平均含量都远高于 C<sup>i</sup><sub>n</sub>,表明滇池 表层沉积物受到了多种金属污染。各金属含量水平分 布很不均衡,最高含量和最低含量间普遍存在数十倍 甚至百倍以上(Cd和 Hg)的差异,其中高值区多出 现在草海、外海北部、南部及入湖的河口区域,这些 区域毗邻城市及沿湖工矿区,反映出滇池金属污染物 来自点源的特点。从垂直分布上看,Cu和Cr含量随 沉积物深度减小而减小,表明滇池沉积物中Cu和Cr 污染整体上出现了减缓的趋势;Zn、Pb、Cd、Hg和 As含量则随沉积物深度的减小而增大,表明滇池沉积 物中Zn、Pb、Cd、Hg和As污染在不断加剧,其中 As在0~5 cm含量比 5~10 cm处略有减少,表明滇池

739

Table 3Metal concentrations in the sediment of Dianchi Lake							
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Hg
$0 \sim 5 \text{ cm}$	20.99~465.21	67.32~1717.80	16.81~591.56	$0.04 \sim 123.10$	12.07~1938.00	$7.04 \sim 162.42$	$0.02 \sim 4.10$
平均值	81.78	226.88	72.38	2.71	109.12	33.43	0.27
$5 \sim 10 \text{ cm}$	21.42~290.52	53.79~1113.00	15.78~309.24	$0.25\sim59.62$	22.53~387.20	7.13~118.88	$0.02 \sim 3.18$
平均值	83.02	207.18	63.99	1.55	83.44	34.80	0.24
$10 \sim 20 \text{ cm}$	23.63~187.65	43.48~806.51	18.22~167.56	$0.23 \sim 24.14$	24.73~4189.00	$5.16 \sim 80.92$	$0.03 \sim 3.89$
平均值	86.10	182.87	60.66	1.34	124.64	27.34	0.22
$0 \sim 20 \text{ cm}$							
平均值	83.63	205.64	65.68	1.87	105.73	31.86	0.24

表 3 滇池沉积物中金属污染物含量 (干重, mg/kg)

2.2 滇池沉积物中各单一金属潜在生态风险

滇池沉积物各金属的污染系数*C<sub>f</sub>*和生态风险系数 *E<sub>r</sub>*计算结果见表 4 和表 5。

从 E', 值计算结果看, 滇池表层沉积物中 Cu、Zn、 Pb、Cr 和 As 在 0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm 处的平 均 E', 值均低于 40, 表明滇池表层沉积物存在轻微的 Cu、Zn、Pb、Cr 和 As 污染生态风险。Hg 在 0~5 cm 处的平均 E', 值>40, 即出现了中度的 Hg 污染生态风 险, 而 5~10 cm 和 10~20 cm 处 Hg 的平均 E', 值均低 于 40, 即为轻微生态风险等级。Cd 在 0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm 处以及 0~20 cm 处的平均 E', 值均>80, 而 0~5 cm 处平均 E', 值高于 160, 说明滇池沉积物中 Cd 存在强生态风险,而在 0~5 cm 深度存在很强生态风险。除 Cu 外,各金属的平均 E<sup>i</sup>,值均随沉积物的深度减小而增大,而以 Cd 增加幅度最大,表明滇池沉积物金属污染的生态风险在不断加大。总体上,滇池表层沉积物 Cu、Zn、Pb、Cr 和 As 污染生态风险较低,Hg 和 Cd 污染生态风险较高,尤以 Cd 污染的生态风险最为突出。

从 0~20 cm 处金属平均 *E*, 值在全部 126 个采样 点的分布(图 2)看, Zn 和 Cr 全部样点的平均 *E*, 值 均<40, Cu、Pb和 Cr 分别有 1.6%、1.6%和 2.38% 的样点平均 *E*, 值高于 40, 但低于 80, 即个别样点有 中度 Cu、Pb和 Cr 污染的生态风险。Hg 有 85%的样

样品 (cm)		Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Hg
0~5	范围值	0.70~15.51	0.84~21.47	0.67~23.66	0.08~246.20	0.20~32.30	0.47~10.83	$0.08 \sim 8.20$
	平均值	2.73	2.84	2.90	5.42	1.82	2.29	1.08
5~10	范围值	0.71~9.68	0.67~13.91	0.63~12.37	0.50~119.24	0.38~6.45	0.48~7.93	0.08~6.36
	平均值	2.77	2.59	2.60	3.10	1.39	2.32	0.96
$10 \sim 20$	范围值	0.79~6.26	0.54~10.08	$0.72 \sim 6.70$	0.46~48.28	0.41~69.82	0.34~1.35	0.06~7.78
	平均值	2.87	2.29	2.43	2.68	2.08	1.82	0.88
$0 \sim 20$	平均值	2.79	2.57	2.63	3.74	1.76	2.12	0.96

表 4 滇池沉积物各金属的污染系数  $C_f^i$ Table 4 Contamination factor  $C_f^i$  of metals in the sediment of Dianchi Lake

#### 表 5 滇池沉积物各金属的生态风险系数

Table 5 Potential ecological risk factor  $E_r^i$  of metals in the sediment of Dianchi Lake

样品 (cm)	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Hg	
0~5	$13.6\pm7.8$	$2.8 \pm 2.5$	$14.4 \pm 11.6$	$162.6\pm700.5$	$3.6\pm7.6$	$22.9\pm10.9$	$43.8\pm67.4$	
$5 \sim 10$	$13.8 \pm 5.7$	$2.5 \pm 1.9$	$12.8\pm7.2$	$93.0\pm335.2$	$2.7 \pm 1.2$	$23.2 \pm 9.1$	$38.3\pm52.6$	
$10 \sim 20$	$14.3 \pm 4.7$	$2.29 \pm 1.5$	$12.1 \pm 5.5$	$80.4 \pm 201.1$	$4.1 \pm 12.7$	$18.2 \pm 7.7$	$35.2 \pm 57.7$	
$0 \sim 20$	$13.9 \pm 5.1$	$2.5 \pm 1.8$	$13.1 \pm 7.1$	$112.2 \pm 378.1$	$3.5 \pm 6.2$	$21.2 \pm 8.0$	$38.4\pm57.7$	
								-

注:表中数值为平均值 ±标准差。

土





in sediment sampling sites in Dianchi Lake

点属轻微生态风险,10%的样点为中度生态风险,5% 样点为强或很强生态风险;Cd有71%的样点属中度 生态风险,近15%的样点为强、很强和极强生态风险, 表明滇池沉积物的局部区域存在严重的Cd和Hg污染 和很高的生态风险。

2.3 滇池沉积物金属污染的潜在生态风险指数 (RI)

滇池表层沉积物金属污染的 RI 计算结果见表 6。 从表 6 看,滇池沉积物金属污染的 RI 值在 0~5 cm、5 ~10 cm、10~20 cm 以及 0~20 cm 处的平均值均在 150 ~300 之间,按表 2 的生态风险程度等级划分标准,均 属于中等生态风险等级。但从不同层次的 RI 值看,生 态风险指数随沉积物深度的减小而增大,特别是 0~10 cm 间增加迅速,0~5 cm 处的 RI 值已接近 300,表明 滇池表层沉积物金属污染在不断加重,由此造成的生 态风险也在快速加大。

#### 表 6 滇池各沉积物层次金属污染的潜在生态风险指数 RI 值和生态风险评价结果

Table 6 Values of potential ecological risk index RI in the sediment of Dianchi Lake

	$0 \sim 5 \text{ cm}$	$5 \sim 10 \text{ cm}$	$10 \sim 20 \text{ cm}$	0~20 cm (平均)
<i>RI</i> 值	263.31	186.62	166.73	205.03
生态风险等级	中	中	中	中

#### 2.4 讨论

(1) 潜在生态风险指数(RI) 在分析沉积物金属 污染的生态风险时,不仅注意了各单一金属的污染及 其引发的生态风险,同时也注意到多种金属的共同作 用,因而其分析结果具有一定的参考价值。但 RI 的求 取采用各金属污染系数 E<sup>i</sup>,值简单相加的方法,则过于 简单化,在分析的金属元素种类很多的情况下,即使 各单一金属的污染系数 E<sup>i</sup>,值很低,但仍可能得到较高 的 RI 值,因而会导致对金属污染所造成生态风险的夸 大。

(2) Håkånson 提出以现代工业化前全球沉积物 金属的最高背景值或以全球沉积物金属平均值为参比 值<sup>[6]</sup>,其他研究者也提出了不同的计算参比值<sup>[8]</sup>,这些 参比值均有一定的指导意义。但把固定的参比值或生 态风险等级划分方法用于不同环境条件、不同理化性 质的沉积物,会造成评价结果与沉积物污染实际之间 的差异<sup>[14-15]</sup>。

(3) 沉积物中存在多种金属结合相,研究表明 <sup>[16-17]</sup>,沉积物中的细颗粒物质(<63 μm)、酸可挥发 性硫化物 (acid volatile sulfide, AVS) 和有机碳(TOC) 是沉积物中最主要的金属结合相,能吸附或结合沉积 物中的金属离子,使其不再具有生物毒性。因此,沉 积物金属污染的生态风险分析应当针对特定沉积物中 的金属结合相进行风险指数的修正,以提高结果的准 确性和可靠性。

## 3 结论

(1) 滇池表层沉积物(0~20 cm)金属污染存在中等的生态风险,并在近年有不断增大的趋势。

(2) 滇池表层沉积物金属污染的生态风险为 Cd> Hg>As>Cu>Pb>Cr>Zn, Cu、Zn、Pb、Cr 和 As 污染的生态风险比较轻微; Hg 为中度或接近中度的生 态风险; Cd 污染的生态风险最为突出,大部分区域存 在中度生态风险,局部区域存在强或很强的生态风险。

(3) 除 Cu 和 As 外,其他金属污染的生态风险都 有加大的趋势,说明滇池沉积物金属污染仍在不断加 重。

## 参考文献:

- 李任伟. 沉积物污染和环境沉积学. 地球科学进展, 1998, 13(4): 388-402
- [2] USEPA (United States Environmental Protection Agency). The incidence and severity of sediment contamination in surface waters of the United States. Office of Science and Technology,

Washington, DC. 2004, EPA-823-R-04-007, 3.1-3.60

- [3] Canfield TJ, Dwyer FJ, Fairchild JF. Assessing contamination in Great Lakes sediments using benthic invertebrate communities and the sediment quality triad approach. Great Lakes Res., 1996, 22: 565–583
- [4] Peterson GS, Ankley GT, Leonard EN. Effect of bioturbation of metal-sulfide oxidation in surficial freshwater sediments. Environmental Toxicology and Chemistry, 1996, 15: 2147–2155
- [5] Meador JP. The interaction of pH, dissolved organic carbon, and total copper in the determination of ionic copper and toxicity. Aquatic Toxicology, 1991, 19: 13–32
- [6] Håkånson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. Water Res., 1980, 14(8): 975-1001
- [7] 何孟常,王子健,汤鸿霄.乐安江沉积物重金属污染及生态风
  险性评价.环境科学,1999,20(1):8-10
- [8] 刘文新, 栾兆坤, 汤鸿霄. 乐安江沉积物中重金属污染的潜在 生态风险性评价. 生态学报, 1999, 19(2): 206-211
- [9] 贾振邦,梁涛,林健枝,吕凤伟.香港河流重金属污染及潜在 生态危害研究.北京大学学报,1997,33(4):485-492
- [10] 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

- [11] 刘芳文,颜文,王文质,古森昌,陈忠.珠江口沉积物重金属 污染及其潜在生态危害评价.海洋环境科学,2002,21(3): 34-38
- [12] Lü JJ, Yang H, Gao L, Yu TY. Spatial variation of P and N in water and sediments of Dianchi Lake, China. Pedosphere, 2005, 15 (1): 78–83
- [13] 陈静生,周家义.中国水环境重金属研究.北京:中国环境科 学出版社,1992:168-170
- [14] 李志博, 骆永明, 宋静, 赵其国, 刘志全. 土壤环境质量指导 值与标准研究 II-污染土壤的健康风险评估. 土壤学报, 2006, 43 (1): 142-151
- [15] 李仁英,杨浩,陈捷,余天应,金峰.盘龙江口滇池沉积物重 金属的分布及污染评价.土壤,2006,38(2):186-91
- [16] Chen YZ, Yang H, Zhang ZK, Qin MZ, Jin F, Lu JJ. Application of equilibrium partitioning approach to the derivation of sediment quality guideline for metals in Dianchi Lake. Pedosphere, 2007, 17(3): 284–297
- [17] Di Toro DM, Mahony JD, Hansen DJ, Scott KJ, Hicks MB, Mayr SM, Redmond MS. Toxicity of cadmium in sediments: The role of acid volatile sulfide. Environmental Toxicology and Chemistry, 1990, 9: 1487–1502

### Metal Pollution and Potential Ecological Risk of the Sediment in Dianchi Lake

CHEN Yun-zeng<sup>1,2</sup>, YANG Hao<sup>3</sup>, JIN Feng<sup>2</sup>, LV Jun-jie<sup>2</sup>, ZHANG Zhen-ke<sup>4</sup>, QIN Ming-zhou<sup>1</sup> (1 Institute of Resources and Environment, Henan University, Kaifeng, Henan 475001, China;

2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;
 3 College of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China;

4 Key Laboratory of Coast and Island Development of MOE, Nanjing University, Nanjing 210093, China )

**Abstract:** Sediment samples were collected from 126 sites in the Dianchi Lake and tested for concentrations for copper, zinc, lead, cadmium, chromium, mercury, and arsenic in different layers ( $0 \sim 5 \text{ cm}$ ,  $5 \sim 10 \text{ cm}$  and  $10 \sim 20 \text{ cm}$ ). It was found that concentrations of these metals in these samples were much higher than their respective references, indicating that the sediments of Dianchi were polluted to a varying degree. metal concentrations in the sediment did vary significantly with depth and sampling site. Concentrations of Zn, Pb, Cd, Hg, and As were generally high in the upper layer except for Cu and Cr, which might suggest that the pollution of Zn, Pb, Cd, Hg, and As is getting more and more severe, while the pollution of Cu and Cr is put under control. With the Håkånson potential ecological risk index approach, ecological risk of the heavy metal pollution of the sediment in Dianchi Lake was analyzed. Results showed that the pollution of Cu, Zn, Pb, Cr, and As did not pose much ecological risk to the Dianchi Lake, while that of Cd and Hg did a moderate ecological risk. On the whole, the sediment in the Dianchi Lake was moderately polluted with heavy metals with a potential ecological risk index *RI* being 205.03, which was though moderate, but displays a trend of speeding up towards gravity.

Key words: Sediment, Metal contamination, Ecological risk index, Dianchi Lake