

滇池内湖滨带重金属污染及其生态风险评价

焦伟^{1,2}, 卢少勇², 李光德¹, 金相灿², 包裕尉², 张焱^{2,3}

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271000; 2. 中国环境科学研究院湖泊环境研究中心, 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012; 3. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘要 水体沉积物是重金属元素的重要载体, 其含量高低能反映水环境质量现状。采集滇池内湖滨带沉积物样品, 分析了滇池内湖滨带表层沉积物中 Pb、Cd、Cu、Zn、Cr、Ni、Fe、Mn 8 种重金属元素含量特征, 并用 Hakanson 潜在生态危害指数法评价其生态危害, 旨在为合理预防和治理滇池内湖滨带的重金属污染以及内湖滨带生态系统的修复提供基础资料。结果表明, 与“全国土壤环境质量标准”对比, 表层沉积物中主要是 Cd、Cu、Zn 超标, 重金属污染强度总体上是草海>外海。不同重金属间的相关性分析结果表明, Cu-Cd 之间呈极显著相关, 说明这两种元素污染源可能相同, 几种污染重金属与胶体矿物元素 Fe、Mn 间的相关性不大, 说明在所调查沉积物中 Fe/Mn 氧化物或氢氧化物共沉淀或吸附 Pb、Cd、Cu、Zn、Cr、Ni 元素量较少。由潜在生态风险评价结果可知, 滇池内湖滨带表层沉积物已具极强生态危害, 各重金属对滇池内湖滨带生态风险影响程度由高到低依次为: Cd>Cu>Pb>Ni>Zn≈Cr。

关键词 滇池; 内湖滨带; 重金属污染; 生态风险

中图分类号: X820.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2010)04-0740-06

Heavy Metals Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Inner Lakeside Belt of Lake Dianchi

JIAO Wei^{1,2}, LU Shao-yong², LI Guang-de¹, JIN Xiang-can², BAO Yu-wei², ZHANG Ye^{2,3}

(1. Resource and Environmental College, Shandong Agricultural University, Taian 271000, China; 2. Research Center of Lake Environment, Chinese Research Academy of Environment Sciences, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Beijing 100012, China; 3. Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract Heavy metals are mainly carried in sediment of water body, their contents play important role on the environmental quality of the water body. Aim of this study is to control heavy metal pollution in Lake Dianchi and provide the basic information of ecosystem recovery of inner lakeside belt. The content and characteristics of eight heavy metals (Pb, Cd, Cu, Zn, Cr, Ni, Fe and Mn) of surface sediments from the inner lakeside belt of Lake Dianchi were analyzed. Ecological risk index presented by Hakanson to assess the potential ecological risk of Lake Dianchi was utilized. The results showed that the inner lakeside belt of Lake Dianchi was polluted mainly by Cd, Cu and Zn compared with the "Environmental quality standard for soils", and the overall intensity of heavy metal pollution of Lake Caohai was stronger than that of Lake Waihai. According to the correlation analysis of various heavy metals, there was a remarkable correlation between Cu and Cd, which suggested their origin was the same. While the correlation between Fe, Mn and other heavy metals was weak, which indicated that Pb, Cd, Cu, Zn, Cr and Ni deposited or adsorbed by Fe/Mn oxides or hydroxides was less in the investigated water body. Based on the potential ecological risk assessment results, the surface sediment from the inner lakeside belt of Lake Dianchi had reached a high ecological risk level, and the order of ecological risk of heavy metals in inner lakeside belt of Lake Dianchi in the decline order was Cd>Cu>Pb>Ni>Zn≈Cr.

Keywords: Lake Dianchi; inner lakeside belt; heavy metals pollution; ecological risk

滇池位于东经 102°02'~102°47', 北纬 24°40'~25°02', 是云南高原最大淡水湖, 我国第六大淡水湖。

收稿日期 2009-09-02

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008X07101); 国家重点基础研究发展计划项目(2008CB418200)

作者简介: 焦伟(1985—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 从事环境生态学。E-mail: jiaowei19856261@163.com

通讯作者: 李光德 E-mail: liguangde@sdau.edu.cn

湖体南北走向, 略呈弓状, 北部近东西向海埂, 将全湖分为两部分, 北部为水草生长的沼泽化湖湾草海, 水深仅 1.5 m。南部为外海, 是滇池主体, 主要湖区水深 5~6 m^[1]。滇池从 20 世纪 70 年代后期开始受到明显污染, 进入 90 年代污染速度加剧, 目前全湖水质为劣 V 类^[2]。

湖滨带是水陆生态系统间的过渡与缓冲区域, 有

保持物种多样性、调节物流和能流、净化水体及减少污染等功能^[3]，湖滨带是湖泊的生态保护屏障，是健康湖泊生态系统的重要组成部分^[4]。根据《滇池保护条例》，湖滨带为滇池水域的变化带和保护滇池水域的过渡带，是滇池水体不可分割的水陆交错地带，其具体范围是正常高水位 1 887.4 m 水位线向陆地延伸 100 m 至湖内 1 885.5 m 之间的地带^[5]。滇池四周有防浪堤，防浪堤以内的湖滨带称为内湖滨带。

近年来，德国、英国和瑞典等国研究者均从沉积学角度提出重金属污染评价法^[6-10]。其中 Hakanson 生态风险指数法不仅反映某一特定环境中各种污染物影响，而且反映多种污染物的综合影响，并用定量方法划分出潜在生态风险程度^[11]。目前来看，在研究沉积物对环境的影响评价中，生态风险指数法应用最广，在国际上影响较大^[12]。水系沉积物中重金属间相关性可判断其来源是否相同。若元素间显著相关，则说明它们出自同一来源可能性较大，这既可能是地球化学来源，也可能是人为活动造成的复合污染所致^[13]。

目前，国内外对滇池的研究主要集中于滇池富营养化、滇池面源污染及藻类等方面，缺乏对滇池内湖滨带重金属污染状况的系统调查^[14]。重金属作为对人类及牲畜有严重危害的污染物应引起关注。本文通过对滇池内湖滨带表层沉积物初步调查采样监测，初步评价滇池内湖滨带重金属污染、分布及其生态风险，旨在为合理地预防和治理滇池重金属污染及内湖滨带生态系统修复提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 采样点布设及样品采集

2008 年 10 月，对滇池内湖滨带进行实地考察，共采集 19 个点位表层沉积物样。麦哲伦 315 型定位仪(美国麦哲伦公司生产)进行导航定位，具体采样点位见图 1。

在各样点用彼德森采泥器采集 3 个表层沉积物样(0~10 cm)，现场立即均匀混合，装入洁净聚乙烯塑料袋后，迅速运回实验室后低温(4℃)保存。

1.2 样品处理与分析

样品经冷冻机干燥后，用玻璃棒压散，剔除大小砾石、贝壳及动植物残体等杂质，四分法取其 1/4 作试样，经玛瑙研钵研细过 200 目尼龙筛后，储于聚乙烯瓶中待测。HNO₃/HCl/HClO₄ 分解法消解，AA370MC 型火焰原子吸收法测定表层沉积物样中 Fe、Mn、Pb、Cd、Cu、Zn、Cr、Ni 含量^[15]。同时进行回收率测定，各元素测定



图 1 采样点地理位置图

Figure 1 Geographic position of sampling sites

回收率均在 95%~105% 范围内，所测样品设置两个平行样，测量分析的相对标准偏差均保持在 10% 以内，所有分析结果均以沉积物干重计。

2 结果与讨论

2.1 滇池内湖滨带重金属空间分布

世界各国已有研究表明，在受重金属污染水体中，沉积物中重金属含量可达水溶液中数百倍至数十万倍，分析和评价沉积物中污染物是环境调查评价中重要内容之一^[16-17]。滇池内湖滨带表层沉积物中各金属含量详见图 2。

2.1.1 沉积物中 Cd 污染现状

由图 2 可见，与《全国土壤环境质量标准》(GB-15618-1995) 相比，本次监测的各点位底质样品中 Cd 含量均超过土壤环境质量三级标准，平均值为 16.33 mg·kg⁻¹，最高值位于 8# 点位(184.05 mg·kg⁻¹)，最低值位于 18# 点位(1.53 mg·kg⁻¹)。

2.1.2 沉积物中 Cu 污染现状

Cu 含量平均值为 159.54 mg·kg⁻¹，超过土壤环境质量二级标准，其中 32% 底质样品 Cu 含量达到土壤环境质量一级标准，10% 样点中 Cu 含量达到土壤环境质量二级标准，58% 样点中 Cu 含量超过土壤环境质量二级标准，最高值位于 8# 点位(1 041.41 mg·kg⁻¹)，最低值位于 15# 点位(10.52 mg·kg⁻¹)。

2.1.3 沉积物中 Zn 污染现状

Zn 含量平均值为 219.86 mg·kg⁻¹，达到土壤环境

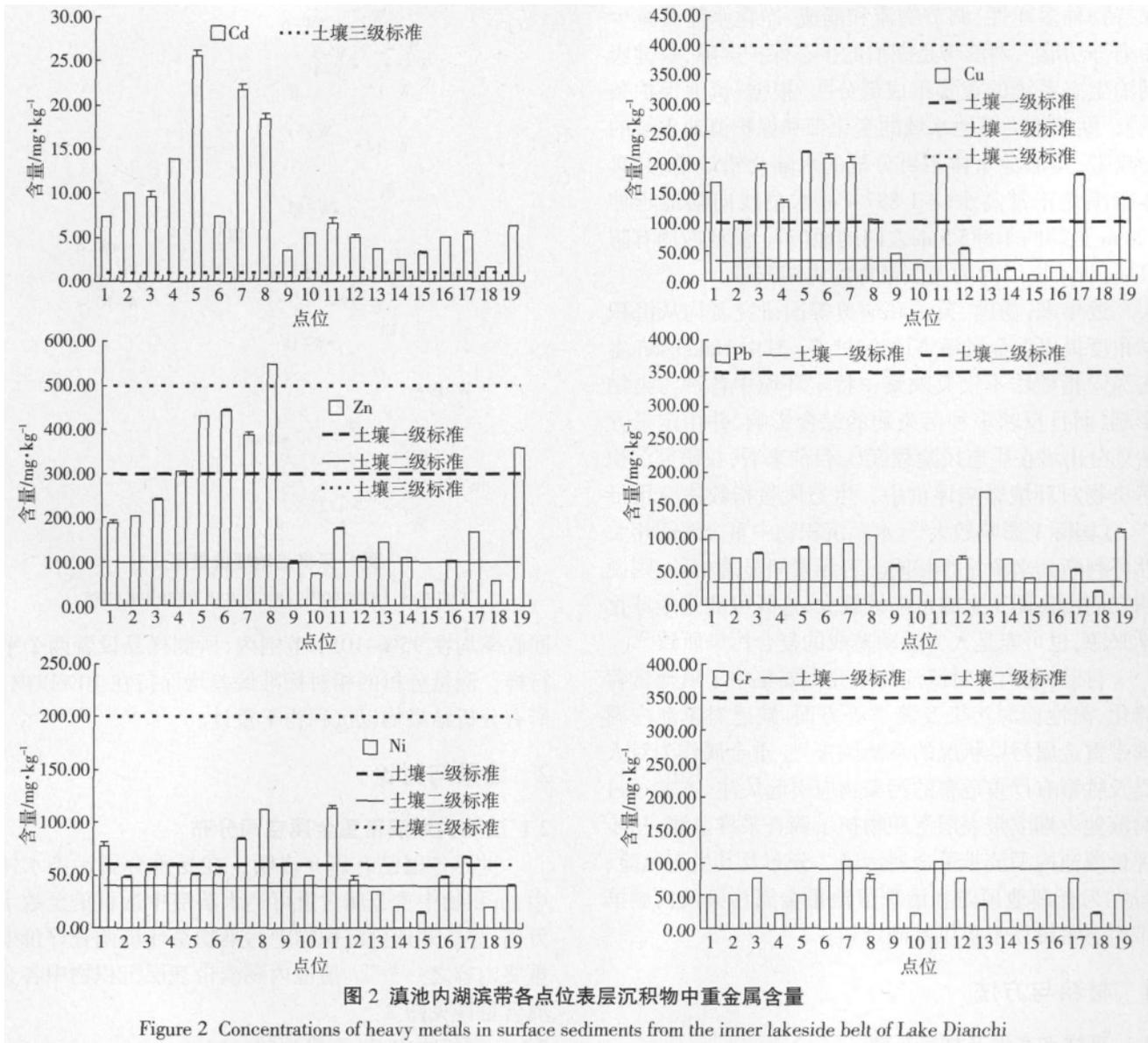


图2 滇池内湖滨带各点位表层沉积物中重金属含量

Figure 2 Concentrations of heavy metals in surface sediments from the inner lakeside belt of Lake Dianchi

质量二级标准,其中21%底质样品Zn含量达到土壤环境质量一级标准,47%样点中Zn含量达到土壤环境质量二级标准,32%样点中Zn含量超过土壤环境质量二级标准,最高值位于8#点位($548.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),最低值位于15#点位($47.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

2.1.4 沉积物中Pb污染现状

Pb含量平均值为 $78.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超过土壤环境质量一级标准,其中11%底质样品Pb含量达到土壤环境质量一级标准,89%样点中Pb含量达到土壤环境质量二级标准,最高值位于13#点位($169.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),最低值位于18#点位($20.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

2.1.5 沉积物中Ni污染现状

Ni含量平均值为 $55.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,略微超过土壤环境质量一级标准,其中26%底质样品Ni含量达到土

壤环境质量一级标准,42%样点中Ni含量达到土壤环境质量二级标准,32%样点中Ni含量超过土壤环境质量二级标准,最高值位于11#点位($114.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),最低值位于15#点位($15.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

2.1.6 沉积物中Cr污染现状

Cr含量平均值为 $54.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,达到土壤环境质量一级标准,其中89%底质样品Cr含量达到土壤环境质量一级标准,11%底质样品Cr含量达到土壤环境质量二级标准。

污染现状分析可见,滇池内湖滨带各点位表层沉积物中主要是Cd、Cu、Zn的超标污染,这3种金属分布特征基本相似,高值区与低值区也大致吻合,最高值均位于8#点位(大清河口),其中Cd含量最高值是平均值的11倍之多,Cu也达到了近7倍,这种突变

性应该与人类活动有关,且由于污染影响范围较小,在元素含量变化趋势图上显示为高值点异常突起,这种污染应该是点源污染引起。根据区域内各点位所处的地理位置,重金属污染程度总体上是草海>外海(表 1)。据研究,滇池流域 90% 以上的企业都分布在草海周围,主要污染企业有造纸厂、冶炼厂、制革厂等^[14],导致草海湖内水质严重恶化,底泥中重金属含量水平较高。

表 1 滇池内湖滨带表层沉积物中金属平均含量(mg·kg⁻¹)

Table 1 Average concentrations of heavy metals in surface sediments from the inner lakeside belt of Lake Caohai and Lake Waihai(mg·kg⁻¹)

区域	Pb	Cd	Cu	Zn	Cr	Ni
草海	84.17	13.61	174.36	313.02	61.28	61.34
外海	70.24	19.31	148.24	165.09	51.10	52.31

2.2 沉积物中重金属元素间的相关性分析

滇池内湖滨带表层沉积物中不同重金属含量间相关性分析结果表明(表 2),Cu-Cd、Zn-Cd、Zn-Cu、Ni-Cu、Ni-Cr 间有很高相关性,表明它们同源性很高,尤其 Cu-Cd 之间,相关系数达 0.964,呈极显著相关,说明底泥中这两种元素污染源可能相同,主要来自周围企业排放的工业废水和居民生活污水^[13]。几种污染重金属元素与胶体矿物元素 Fe、Mn 间相关性不大,说明在所调查沉积物中,Fe/Mn 氧化物或氢氧化物共沉淀或吸附 Pb、Cd、Cu、Zn、Cr、Ni 元素量较少。

2.3 重金属潜在生态风险评价

选用潜在生态风险指数法评价滇池内湖滨带表层沉积物,以了解各金属对滇池生态环境的潜在危害程度。据此法,某区域沉积物中第 *i* 种重金属的潜在

表 2 滇池内湖滨带表层沉积物中各金属含量间的相关矩阵
Table 2 Relative matrix between the metals in surface sediment from the inner lakeside belt of Lake Dianchi

元素	Fe	Mn	Pb	Cd	Cu	Zn	Cr	Ni
Fe	1							
Mn	0.751**	1						
Pb	0.331	0.043	1					
Cd	0.045	0.091	0.242	1				
Cu	0.198	0.186	0.293	0.964**	1			
Zn	0.133	0.083	0.484*	0.625**	0.735**	1		
Cr	0.561*	0.248	0.246	0.247	0.415	0.452	1	
Ni	0.567*	0.481*	0.216	0.547*	0.671**	0.504*	0.734**	1

注 * 显著性相关(样本数 *n*=19,显著性水平 *P*<0.05),** 极显著性相关(样本数 *n*=19,显著性水平 *P*<0.01)。

生态危害系数 E_i^p 及沉积物中多种重金属的潜在生态危害指数 RI 可分别表示为:

$$E_i^p = T_i \times C_j^i \quad (1)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i^p = \sum_{i=1}^n T_i \times C_j^i = \sum_{i=1}^n T_i \times C_i^i / C_n^i \quad (2)$$

式中 C_j^i 为重金属富集系数 ($C_j^i = C_i^i / C_n^i$); C_i^i 为表层沉积物中重金属 *i* 浓度实测值; C_n^i 为所需参比值,采用现代工业化前沉积物中重金属的正常最高背景值^[18](表 3); T_i 为重金属 *i* 的毒性系数(分别为 Cd=30、Pb=5、Cu=5、Ni=5、Cr=2、Zn=1),它主要反映重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度^[11]。沉积物重金属生态危害程度划分标准见表 4。

表 3 重金属元素背景参考值(mg·kg⁻¹)

Table 3 Background reference values of heavy metals(mg·kg⁻¹)

元素	Pb	Cd	Cu	Zn	Cr	Ni
含量	70.00	1.00	50.00	175.00	90.00	89.00*

注 * 文献未列出 Ni 含量背景值,本文选用地壳中该金属含量值^[20]。

表 4 重金属潜在生态危害系数 E_i^p 、潜在生态危害指数 RI 与污染程度的关系

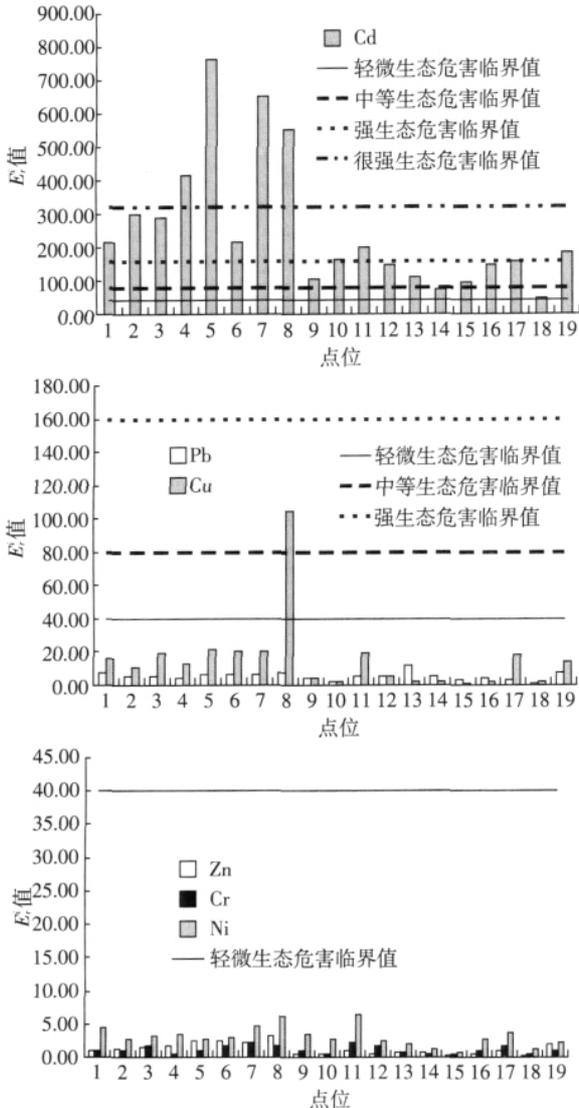
Table 4 Potential ecological risk factor(E_i^p) and potential ecological risk index(RI) about pollution level

E_i^p	RI	生态危害程度
$E_i^p < 40$	$RI < 55$	轻微
$40 \leq E_i^p < 80$	$55 \leq RI < 110$	中等
$80 \leq E_i^p < 160$	$110 \leq RI < 220$	强
$160 \leq E_i^p < 320$	$RI \geq 220$	很强
$E_i^p \geq 320$		极强

将实测滇池内湖滨带表层沉积物中各金属含量分别代入上式,可计算出潜在生态危害系数 E_i^p 和指数 RI ,分别代表各采样点处单个污染物潜在生态危害程度和总生态风险程度,评价结果详见图 3~图 5。

由图 3~图 5 可见,以单个重金属潜在生态危害系数评价,滇池内湖滨带表层沉积物中主要生态风险因子是元素 Cd,各采样点平均 E_i^p 值为 516.24,已具极强生态危害,其中最高值位于大清河口, E_i^p 值约为均值的 11 倍,其余 5 种元素 E_i^p 值均小于 40,属轻微生态危害。元素 Cu、Zn 虽在沉积物中含量较高,但因其相对较低生物毒性,不是主要生态风险因子,各重金属对滇池内湖滨带生态风险影响程度由高到低依次为: Cd>Cu>Pb>Ni>Zn≈Cr。

以多个重金属潜在生态危害指数评价,19 个采样点平均 RI 值为 543.01,远超过 220,说明滇池内湖滨带表层沉积物已具极强生态危害,特别是大清河



图中 Cd 在 8# 点位 E_i 值为实际计算值的 1/10。

图 3 滇池内湖滨带各点位重金属生态危害系数 E_i

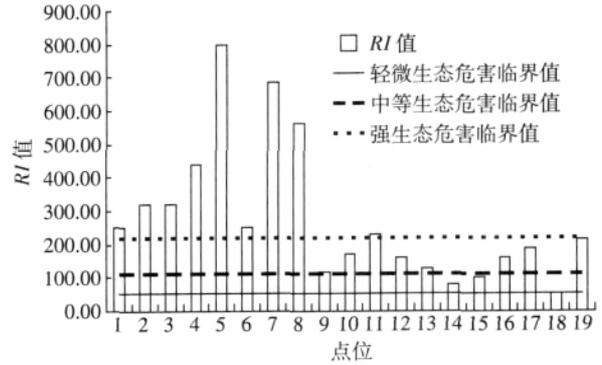
Figure 3 Potential ecological risk factor (E_i) of heavy metals from the inner lakeside belt of Lake Dianchi

口 RI 值明显高于其他点 约是均值的 10 倍 故大清河 河口应引起环境监测和 environmental 治理部门关注。

3 结论

(1)与“全国土壤环境质量标准”对比 滇池内湖滨带表层沉积物中主要是 Cd、Cu、Zn 超标污染,这 3 种金属分布特征基本相似,高、低值区大致吻合。重金属污染强度总体上草海>外海。

(2)不同重金属含量间相关性分析表明,Cu-Cd 间呈极显著相关,说明这两种元素的污染源可能相同,几种污染重金属元素与胶体矿物元素 Fe、Mn 间相关性不大,说明在所调查沉积物中,Fe/Mn 氧化物



图中 Cd 在 8# 点位 RI 值为实际计算值的 1/10

图 4 滇池内湖滨带各点位生态危害指数 RI

Figure 4 Potential ecological risk index (RI) of the inner lakeside belt of Lake Dianchi

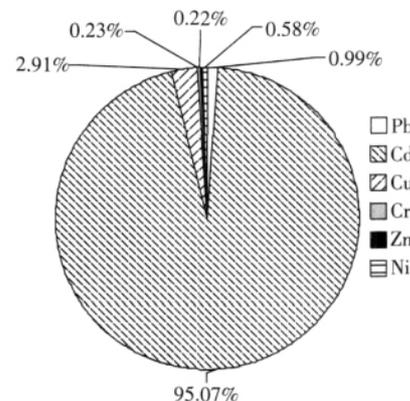


图 5 不同重金属对潜在生态危害指数的贡献图

Figure 5 Contribution of various heavy metals to potential ecological risk index

或氢氧化物共沉淀或吸附 Pb、Cd、Cu、Zn、Cr、Ni 元素量较少。

(3)由潜在生态风险评价结果可知,滇池内湖滨带表层沉积物已具极强生态危害,特别是大清河 河口 RI 值明显高于其他点 约是均值 10 倍。

(4)具体到单个污染物,滇池内湖滨带表层沉积物中主要生态风险因子是元素 Cd,已具极强生态危害,各重金属对滇池内湖滨带生态风险影响程度由高到低依次为: Cd>Cu>Pb>Ni>Zn≈Cr。

(5)无论以单个重金属潜在生态危害系数评价,还是以多个重金属潜在生态危害指数评价,大清河 河口都应引起环境监测和 environmental 治理部门关注。

参考文献:

[1] 彭丹,金峰,吕俊杰,等.滇池底泥中有机质的分布状况研究[J].土壤,2004,36(5):568-572.
 PENG Dan, JIN Feng, LV Jun-jie, et al. Content and distribution of organic matter in Dianchi sediment[J]. Soils, 2004, 36(5): 568-572.

- [2] 杨健强. 滇池污染的治理和生态保护[J]. 水利学报, 2001, 5 :17-21.
YANG Jian-qiang. Measures for pollution remedy and ecological protection in Dianchi Lake[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 5 :17-21.
- [3] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京 :化学工业出版社, 2001 :147-153.
JIN Xiang-can. Eutrophication controls and management techniques of lake[M]. Beijing :Chemical Industry Press, 2001 :147-153.
- [4] 张 雷, 郑丙辉, 田自强, 等. 西太湖典型河口区湖滨带表层沉积物营养评价[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(5) :4-13.
ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, TIAN Zi-qiang, et al. Nutrition evaluation on surface layer sediment of typical aquatic-terrestrial ecotone in west Taihu Lake[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 29(5) :4-13.
- [5] 陈 静, 和丽萍, 李跃青, 等. 滇池湖滨带生态湿地建设中的土地利用问题探析[J]. 环境保护科学, 2007, 33(1) :39-41.
CHEN Jing, HE Li-ping, LI Yue-qing, et al. Analysis on land use problems for construction of ecological wetland along the lakeside of Dianchi Lake[J]. *Environmental Protection Science*, 2007, 33(1) :39-41.
- [6] Seralathan K B, Prabhu D B, Lee K J, et al. Assessment of heavy metals (Cd, Cr and Pb) in water, sediment and seaweed in the pulicat lake, southeast India[J]. *Chemosphere*, 2008, 71(7) :1233-1240.
- [7] Forstner U, Wittman G T. Metal pollution in the aquatic environment [M]. Berlin :Springer Verlag Press, 1979 :110-112.
- [8] Sadiq R, Husain T, Bose N, et al. Distribution of heavy metals in sediment pore water due to offshore discharges :An ecological risk assessment[J]. *Environmental Modeling & Software*, 2003, 18(5) :451-461.
- [9] Kwon Y T, Lee C W. Ecological risk assessment of sediment in wastewater discharging area by means of metal speciation[J]. *Micro-Chemical Journal*, 2001, 70(3) :255-264.
- [10] Brian R, Neil R, Han D Y, et al. An assessment of toxicity in profundal lake sediment due to deposition of heavy metals and persistent organic pollutants from the atmosphere[J]. *Environment International*, 2008, 34 (3) :345-356.
- [11] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control :A sediment logical approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8) :995-1001.
- [12] 陈伯扬. 重金属污染评价及方法对比——以福建浅海沉积物为例[J]. 地质与资源, 2008, 17(3) :213-218.
CHEN Bo -yang. Assessment of heavy metal pollution and method comparison :A case study of the shallow-sea sediments in Fujian[J]. *Geology and Resources*, 2008, 17(3) :213-218.
- [13] 王永华, 刘振宇, 刘 伟, 等. 巢湖合肥区底泥污染物分布评价与相关特征研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2003, 39(4) :502-506.
WANG Yong-hua, LIU Zhen-yu, LIU Wei, et al. Distribution and correlation characteristics between pollutants in sediment in Chaohu Lake, China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2003, 39(4) :502-506.
- [14] 李仁英, 陈 捷, 余天应, 等. 盘龙江口滇池沉积物重金属的分布及污染评价[J]. 土壤, 2006, 38(2) :186-191.
LI Ren-ying, CHEN Jie, YU Tian-ying, et al. Distribution and pollution evaluation of heavy metals in sediments of Lake Dianchi in the estuary of the Panlongjiang River[J]. *Soils*, 2006, 38(2) :186-191.
- [15] 吴君兰, 张国平, 朱 恩, 等. 土壤中重金属含量检测技术的研究[J]. 上海农业学报, 2005, 21(4) :82-85.
WU Jun-lan, ZHANG Guo-ping, ZHU En, et al. Study on the heavy metal content testing in soil[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2005, 21 (4) :82-85.
- [16] 程永前, 蒋大和, 马红梅, 等. 常州市河流重金属污染评价 [J]. 环境保护科学, 2007, 33(2) :76-78.
CHEN Yong-qian, JIANG Da-he, MA Hong-mei, et al. Evaluation of heavy metals pollution in Changzhou's rivers[J]. *Environmental Protection Science*, 2007, 33(2) :76-78.
- [17] 马德毅. 海洋沉积物的污染指示作用和监测方法[J]. 海洋通报, 1993, 12(5) :89-96.
MA De-yi. Pollution indicating effects and monitoring methodology of marine sediments[J]. *Marine Science Bulletin*, 1993, 12(5) :89-96.
- [18] 陈静生, 刘玉机. 中国水环境重金属研究[M]. 北京 :中国环境科学出版社, 1992 :168-170.
CHEN Jing-sheng, LIU Yu-ji. China water environment research on heavy metals[M]. Beijing :China Environmental Science Press, 1992 :168-170.