

盘龙江口滇池沉积物重金属的分布及污染评价^①

李仁英^{1,3,4}, 杨浩², 陈捷¹, 余天应¹, 金峰¹

(1 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; 2 南京师范大学地理科学学院, 南京 210097; 3 南京信息工程大学应用气象系, 南京 210044; 4 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 对盘龙江口滇池沉积物重金属的分布进行了研究并对其污染状况进行了评价。结果表明: Cd、Cr、Cu 和 Zn 在表层沉积物中的含量较高 (Pb 在中层的含量较高), 且随采样深度的增加含量递减, 这几种元素的含量顺序基本为 $Zn > Cu > Cr = Pb > Cd$ 。表层沉积物中各元素之间的相关性较差, 中层和底层的相关性较好。表层沉积物重金属与颗粒的相关性较差。除底层沉积物中的重金属与有机质达到显著或极显著相关外, 表层和中层的相关性都较差。所研究重金属 (除 Pb 外) 随与河口距离的增加, 含量降低。利用地积累指数对该河口重金属的污染进行评价, 发现重金属污染都在中等程度上, 其污染程度顺序为: $Cd > Zn > Cu = Pb > Cr$, 表明盘龙江入滇池口区的沉积物已受到严重污染。

关键词: 滇池; 盘龙江口; 重金属; 分布; 污染评价

中图分类号: X131.2

滇池位于昆明市西南面, 是昆明市及周边地区工农业生产及生活的主要水源, 又是昆明市工业废水及生活污水的接纳处, 因此, 滇池对昆明市乃至周边地区的发展有着重大影响。但是随着湖泊周围人口的不断增加和国民经济的迅速发展, 未经处理的大量生活污水、工业废水及农田灌溉回归水直接排入滇池, 造成滇池生态环境恶化, 水质污染日趋严重^[1]。目前, 滇池已属于严重富营养化, 出现了全湖水质超 V 类的严重状况^[2]。

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, 缺乏对滇池重金属污染状况的系统调查。重金属作为对人类及牲畜具有严重危害的污染物应引起关注。

重金属进入滇池的途径主要有点源和面源。而这两种污染源都可汇入河流而进入滇池。注入滇池的河流有 20 多条, 盘龙江是年径流量及流域面积最大的一条^[3], 源于梁王山, 经嵩明、松花坝水库穿越昆明市区汇入滇池^[4]。同时, 盘龙江沿岸又分布着较多的企业^[5]。其中的一些企业会造成盘龙江的重金属污染。据研究, 1988 年通过盘龙江进入滇池的面源水量为 6780 万 m^3 , 悬浮物含量为 1.6 万 t,

点源污水量为 2490 万 m^3 , 悬浮物含量为 1200 t^[3]。可见, 通过盘龙江进入滇池的污水量和悬浮物量是巨大的, 被带入的重金属量也应当是可观的。而目前对盘龙江重金属的污染及其对滇池的贡献研究较少。因此, 本文对盘龙江口滇池沉积物重金属的分布及污染状况进行了初步研究, 目的是了解盘龙江对滇池重金属分布的影响及为滇池重金属的治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样点布局及样品采集

样点是采用从盘龙江河口到滇池中央方向的扇形布局, 样点基本分布在 3 个弧线上, 即 3 个站位上 (见图 1 中标有 1, 2 和 3 的 3 个分区)。由于近河口受河流的影响较大, 因此采样密度较高, 各样点之间的距离大约为 320 m, 共 5 个样点, 为站位 1。随着与河口距离的增大, 样点之间的距离逐渐增大。在站位 2 和站位 3 上各有 3 个样点。样点分布如图 1 所示。

沉积物样品于 2003 年 11 月用奥地利产的重力取样器 (UWITEC-CORER-016001) 采集。每个样

^① 基金项目: 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金 (2005406711) 和土壤与农业可持续发展国家重点实验室项目 (5022505) 资助。

作者简介: 李仁英 (1975—), 女, 山东泰安人, 博士, 讲师, 主要从事于重金属在土壤与水体环境中的化学行为方面的研究。E-mail: ryli75@163.com

点采集6个沉积物柱样,并分成0~5、5~10和10~20 cm 3个层次,相同层次的样品混合作为一个样品。

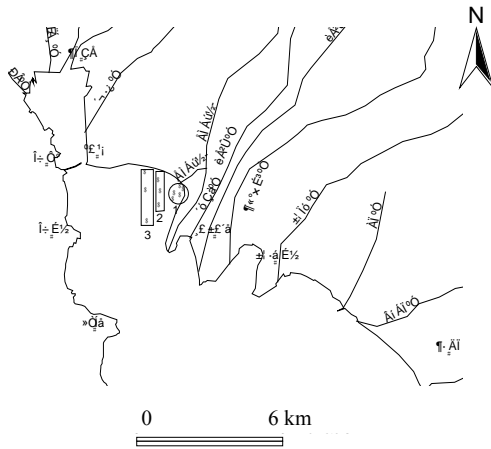


图1 盘龙江口采样点的分布

Fig. 1 Distribution of sample sites in the estuary of the Panlongjiang River

1.2 样品处理及分析

重金属采用 HF-HClO₄-HNO₃ 消化, ICP-AES 测定^[6]; 有机质采用重铬酸钾外加热法测定^[6]; 粒度采用美国 Coulter 公司制造的 LS230 粒度分析仪测定。以上项目均为每5个样品重复1次,且测定过程中插入标准样品以进行质量控制。采样及分析过程中所用的塑料瓶及玻璃容器均在15%的HNO₃溶液中浸泡24 h以上。实验用水为超纯水。

2 结果与分析

2.1 沉积物中重金属含量与剖面分布

表1是重金属的含量情况。从表1可知,沉积物中Cd、Cr、Cu、Pb和Zn的含量较高,大于中国土壤背景值^[7]。它们在表层沉积物中含量顺序为Zn(平均值为660.42 mg/kg) > Cu(平均值为121.89 mg/kg) > Cr(平均值为100.15 mg/kg) > Pb(平均值为89.53 mg/kg) > Cd(平均值为4.99 mg/kg); 在中层及底层沉积物中的含量顺序为Zn > Cu > Pb > Cr > Cd。沉积物中重金属元素含量的高低主要与集水区母岩类型和土壤类型有关,大气降水、地表径流及人类活动对沉积物中的重金属元素含量也有重要影响^[8]。石灰岩发育的土壤中,Cu、Zn和Cr的背景值较高^[9]。石灰岩和玄武岩发育的红壤中Zn的含量较高,玄武岩发育的土壤中Cu的含量大于片岩、页岩、花岗岩和砂岩发育的土壤的含量^[7]。Cr、Pb和Cd在土壤及岩石圈的含量顺序为Cr > Pb > Cd^[7]。由于滇池流域分布的母岩多为石灰岩、页岩、玄武岩和古红壤,因此,造成表层沉积物中Zn > Cu > Cr > Pb > Cd。所研究的5种重金属元素的剖面分布,除Pb在5~10 cm的平均含量较高外,其他都遵从同一个规律,即:表层含量较高,随着深度的增加含量降低。这表明滇池重金属的污染是逐年增加的。表层沉积物中较高的重金属含量主要与改革开放初期湖区经济的迅猛发展使排入湖泊的废水量猛增等原因有关^[10]。

表1 盘龙江口沉积物中重金属元素的剖面分布特征 (mg/kg)

Table 1 Profile distribution of heavy metals in sediments in the estuary of the Panlongjiang River

深度 (cm)	分析项目	重金属元素				
		Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
0~5	含量范围	4.54~5.85	83.29~122.25	91.92~167.81	52.28~124.52	417.38~1066
	平均值±标准差	4.99±0.34	100.15±10.98	121.89±27.92	89.53±15.75	660.42±196.71
	变异系数	6.75	10.97	22.90	17.59	29.79
5~10	含量范围	3.79~5.21	65.42~121.69	82.84~174.54	77.89~114.80	478.07~915.02
	平均值±标准差	4.29±0.47	92.38±18.96	110.78±31.88	95.23±12.01	642.91±147.50
	变异系数	11.06	20.52	28.78	12.61	22.94
10~20	含量范围	2.77~4.92	61.63~101.89	77.56~148.34	50.25~121.98	490.43~967.99
	平均值±标准差	3.52±0.66	72.99±16.33	95.11±25.10	77.13±20.51	618.59±149.28
	变异系数	18.91	22.38	26.40	26.59	24.13

2.2 重金属元素间的相互关系

重金属元素之间的相关性研究可揭示重金属的来源及污染程度。从表2可知,表层沉积物重金属元素中除Cu与Cr、Zn与Cr、Zn与Cu等元素间的

关系达到了极显著相关外,其他元素间的关系不显著;中层沉积物重金属元素间都达到了显著或极显著相关;底层沉积物重金属元素间除Cd与Cr、Zn与Cr外,其他元素间都呈显著或极显著相关。如果

表 2 不同深度沉积物中重金属元素之间的 person 相关分析
Table 2 Correlation analysis of heavy metals in sediments different in depth

	表层沉积物 (0 ~ 5 cm)				中层沉积物 (5 ~ 10 cm)						底层沉积物 (10 ~ 20 cm)				
	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
Cd	1					1					1				
Cr	0.47	1				0.92**	1				0.56	1			
Cu	0.07	0.82**	1			0.96**	0.87**	1			0.87**	0.84**	1		
Pb	0.52	-0.22	-0.62	1		0.89**	0.95**	0.78*	1		0.87**	0.69*	0.88**	1	
Zn	0.24	0.92**	0.93**	-0.35	1	0.90**	0.85**	0.95**	0.77*	1	0.87**	0.52	0.71*	0.82**	1

注：*表明在 $P<0.05$ 水平上显著相关，**表明在 $P<0.01$ 水平上极显著相关，下同。

按照滇池的沉积速率为 $2.9 \text{ mm/年}^{[11]}$ 计算，那么，表层沉积物 (0~5 cm)、中层沉积物 (5~10 cm) 和底层沉积物 (10~20 cm) 沉积的年代分别对应于 20 世纪 80 年代以后、70—80 年代及 70 年代以前。由于受到人为活动的影响，20 世纪 80 年代以后是滇池环境恶化最为显著和迅速的时期，因此，其重金属之间的相关性较差；70—80 年代应该是人类活动比较频繁的时期，滇池受到的人为影响比较大，但此时期重金属之间的相关性却比较好，这可能与所研究的重金属在此时期的污染源相同有关，但具体原因还有待进一步的研究；70 年代之前，人类生活比较落后，城市化进程比较缓慢，滇池主要受自然因素的影响，这时，底层沉积物处于大致相似的区域地质背景下，重金属主要来自周边岩石的天然风化产物，因此，重金属之间的相关性较好。

2.3 沉积物中重金属与有机质和颗粒组成的关系

一般来讲，沉积物中的重金属主要被黏粒和有机质吸附，沉积物中的重金属应与有机质和黏粒相关，但本研究的结果表明，表层和中层沉积物中的重金属与有机质的相关性较差，除表层沉积物中 Zn，中层沉积物中的 Cd 与有机质达到显著正或负相关外，其他都没有相关性，但底层沉积物中的大部分重金属与有机质达到了显著或极显著相关（表 3）。表层沉积物中重金属与黏粒、粉粒和砂粒都没有相关性（表 4）。表层沉积物中重金属与有机质和颗粒的相关性差的原因主要有以下几个方面：①如上所述，表层沉积物是 20 世纪 80 年代以后沉积的物质，这一时期人类的活动比较频繁，因此，人类活动影响了它们之间的相关性；②采样点处于盘龙江口，进入河流中的复杂物质首先在河口沉积物中淀积，造成河口沉积物的成分比较复杂；③由于滇池的风浪较大，在河口中淀积的重金属随同细小颗

粒被带入滇池的中心部位。而底层沉积物由于受到的人类活动及外在影响较小，因此，相关性较好。

表 3 沉积物中重金属与有机质的 person 相关分析

Table 3 Relationship between heavy metals and organic matter in sediments

深度 (cm)	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
0~5	-0.05	-0.62	-0.63	0.11	-0.68*
5~10	0.68*	0.53	0.66	0.59	0.49
10~20	0.82**	0.74*	0.85**	0.65	0.74*

表 4 表层沉积物中重金属元素与粒度的关系

Table 4 Relationship between heavy metals and particle size in the surface layer of sediments

颗粒组成	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
黏粒	0.11	-0.08	-0.36	0.38	-0.22
粉粒	0.03	-0.08	-0.12	-0.30	-0.16
砂粒	-0.13	0.15	0.46	-0.10	0.36

2.4 沿河流方向滇池沉积物中重金属的分布

图 2 是表层沉积物中重金属在 3 个站位的分布情况。位于同一站位的样点取平均值作为该站位的重金属含量。从图 2 可知，随着与河口距离的增加，表层沉积物中重金属（Pb 除外）的含量逐步减少。这主要由于沉积物的吸附作用及污染物扩散等原因所致。盘龙江口的黏粒和有机质含量较高，前者为 268.3 g/kg ，后者为 105.4 g/kg 。黏粒部分的矿物以高岭石和水云母为主（分别为 400 g/kg 和 380 g/kg 左右）^[12]，这两种矿物属于层状硅酸盐，具有较强的吸附能力。加之有机质含有较多的官能团，能络合和吸附重金属元素。因此，重金属一旦进入沉积物，就被沉积物吸附而淀积。又由于通过盘龙江进入滇池的污染物是逐步向滇池中央扩散的（即符合污染物浓度扩散规律），因此，河口水体中的重金属

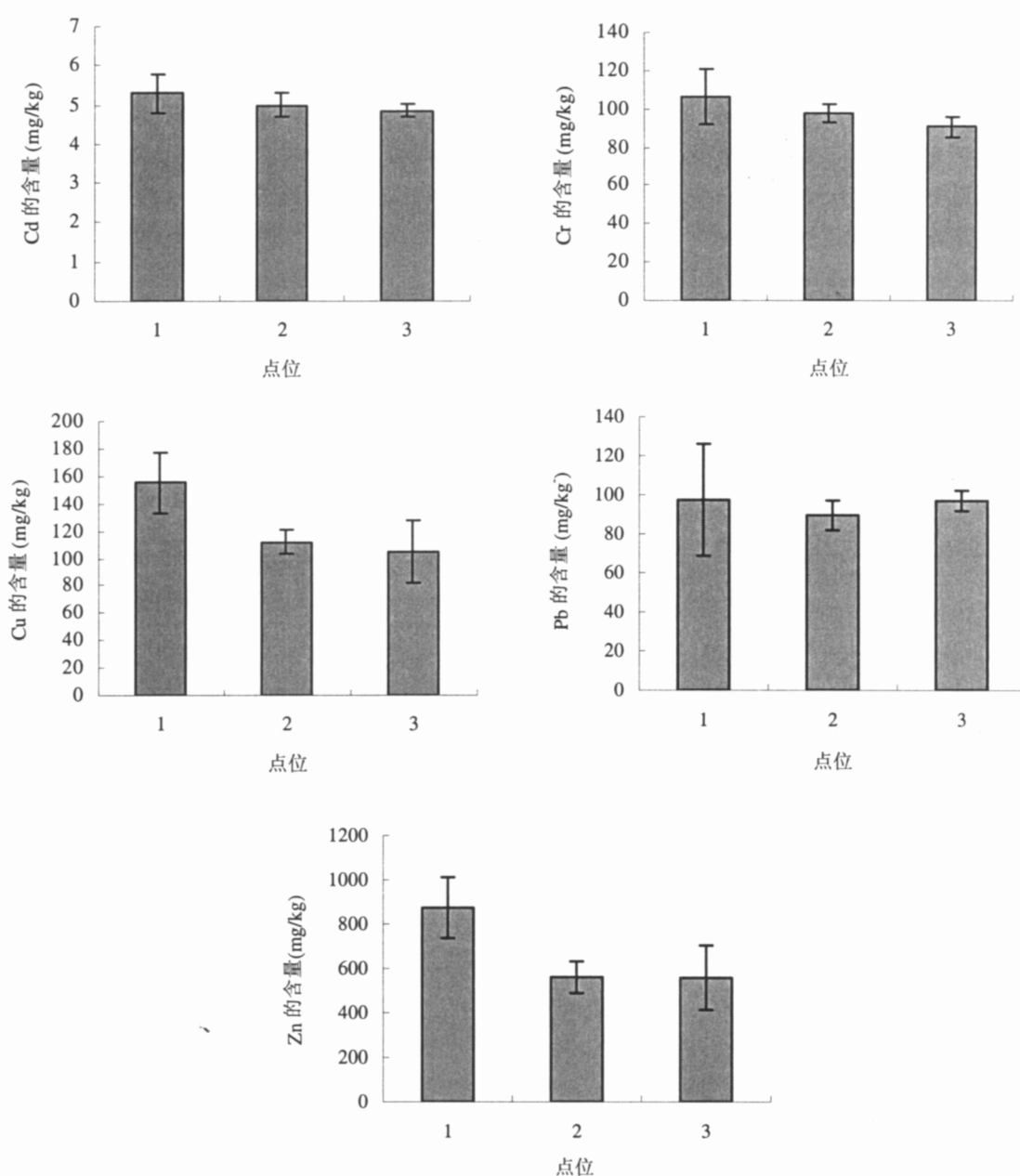


图2 表层沉积物重金属在3个站位的分布

Fig. 2 Distribution of heavy metals in the surface layer of sediments in several sites of Dianchi Lake

浓度高，被沉积物吸附的也多，随着与河口距离的增大，吸附量减少。重金属的这种分布趋势也可以间接说明盘龙江水体对滇池重金属污染的贡献。

2.5 重金属污染评价

以上结果反映出盘龙江口已受到重金属污染，表层沉积物已经恶化。为了定量描述重金属的污染水平，本文利用地积累指数（I-geo）^[13]对沉积物中重金属的污染程度进行了评价，其计算式如下：

$$I\text{-geo} = \log_2 (C_n/B_n)$$

式中 C_n 是沉积物中重金属元素 n 的含量，本文用各样点的重金属平均值作为 C_n ， B_n 是重金属元素 n 的背景值。

由于目前缺少滇池重金属的背景值，因此用中国土壤背景值来代替^[7]（表5）。

表5 中国土壤元素背景值

Table 5 Background values of heavy metals in soils in China

元素	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
背景值 (mg/kg)	0.097	61	22	26	100

盘龙江口沉积物中重金属的地积累指数列于表 6。从表 6 中可知盘龙江口的污染较为严重, 所研究的重金属元素一般都在中等污染的水平。由于盘龙江流域是滇池流域中主要工业区之一, 它通过点源和面源对滇池造成的污染是相当严重的, 因此被列为城市及工业污染治理区^[14]。对于点源污染而言, 盘龙江收纳黑龙潭、茨坝、岗头村、下马村至南坝一带的污水, 且主要污染源为重机厂、锻压机床厂、

铣床厂、拖拉机配件厂和电子管厂等工矿企业, 其污水中含有较高的重金属。因此, 在盘龙江流域, 点源对滇池重金属的污染是严重的。对于面源污染而言, 由于该流域乡镇企业和村庄相对集中, 农村生活废弃物和企业污物都随着地表径流汇入滇池, 加之, 农田的不合理耕作及不合理施肥, 水土流失加剧, 这也在一定程度上加剧了盘龙江口重金属的污染。

表 6 盘龙江口表层沉积物中重金属地积累指数和污染程度

Table 6 Index of geoaccumulation and pollution level of heavy metals in the surface layer of sediments in the estuary of the Panlongjiang River

元素	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
I-geo	5.1	0.13	1.88	1.20	2.14
I-geo 级别	6	1	2	2	3
污染程度	极强	无-中	中	中	中-强

比较这几种重金属元素的污染水平可知, Cd 和 Zn 的污染是严重的, 分别达到了极强度和强-中度的污染, Cr 污染相对较轻, 在无-中度的污染程度, 其污染程度顺序为: $Cd > Zn > Cu = Pb > Cr$ (表 6)。由于盘龙江流域分布了昆明纺织厂、云南毛巾厂和云南纺织厂等纺织印染企业^[5], 这些企业是重金属 Cd 的重要来源。同时盘龙江流域还有冶金机械厂, 它不但是 Cd 的污染源同时也是 Zn 的污染源。另外, 盘龙江流域的一些化工企业也是 Cd 和 Zn 的重要来源。因此, 盘龙江口 Cd 和 Zn 的严重污染可能与盘龙江流域的污水含有较高的 Cd 和 Zn 及两者具有相同的污染源等原因有关。

重金属是具有潜在危害的重要污染物^[15], 它们不易被微生物降解^[16-17], 只能在环境中转移并通过食物链在生物体内累积^[18]而危害生物。鉴于此, 应加强工矿企业排污量的控制及污水的达标排放, 并改善现有的污染状况从而减轻重金属污染的危害。

3 结论

(1) 重金属在盘龙江口表层沉积物中的含量顺序为: $Zn > Cu > Cr > Pb > Cd$, 在中层和底层的含量顺序为: $Zn > Cu > Pb > Cr > Cd$ 。在所研究的几种重金属元素的剖面分布中, 除 Pb 在 5 ~ 10 cm 的平均含量较高外, 其他几种都是表层中平均含量较高, 随着深度的增加, 含量降低。

(2) 表层沉积物中重金属间的相关性较差, 中层和底层沉积物中重金属间的相关性较好。

(3) 表层和中层沉积物中的重金属与有机质的相关性较差, 但底层沉积物中的重金属与有机质达到了显著或极显著相关。表层沉积物中重金属与黏粒、粉粒和砂粒的相关性较差。

(4) 表层沉积物中重金属含量随着与河口距离的增加逐步减少 (Pb 除外)。

(5) 滇池在盘龙江口的污染较为严重, 所研究的元素一般都达到了中等污染, 其中 Cd 达到了极强污染程度, Cr 污染相对较轻, 其污染程度顺序为: $Cd > Zn > Cu = Pb > Cr$ 。

参考文献:

- [1] 卢升良. 滇池的污染及其控制对策. 重庆环境科学, 1997, 19 (3): 1-4
- [2] 齐素华, 艾萍, 王趁义. 滇池的富营养化现状分析及其防治对策. 江苏环境科技, 2000, 13 (4): 27-29
- [3] 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛, 章宗涉, 朱萱主编. 中国湖泊富营养化. 北京: 中国环境科学出版社, 1990
- [4] 胡斌, 段昌群, 李琴, 梁晓峰. 昆明盘龙江水质的突变性研究. 重庆环境科学, 1997, 19 (6): 14-18
- [5] 金相灿. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社, 1992
- [6] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- [7] 刘铮主编. 中国土壤微量元素. 南京: 江苏科学技术出版社, 1996
- [8] 张新英, 宋书巧. 重金属元素背景值研究. 广西师院学报(自然科学版), 1999, 16 (4): 98-101

- [9] 廖天成, 王惠琪, 郑春江. 环境背景值研究. 中国环境科学, 1990, 10 (4): 255-262
- [10] 吴瑞金, 项亮, 钱君龙, 朱育新, 吉磊. 云南滇池近代环境恶化的沉积记录. 中国科学院地理与湖泊研究所集刊, 1995: 1-9
- [11] 于银亭, 李培泉, 吴润, 孟伟, 刘玉生, 邹兰. 昆明滇池沉积速率的测定. 海洋与湖沼, 1996, 27 (1): 41-45
- [12] 高丽, 杨浩, 周健民, 陈捷. 滇池沉积物磷酸盐吸附和矿物学特征的研究. 农业环境科学学报, 2004, 23 (2): 259-262
- [13] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geo. Journal*, 1969, 2: 108-118
- [14] 杨文龙, 杨树华. 滇池流域非点源污染控制区划研究. 云南环境科学, 1996, 15 (3): 3-7
- [15] 吴新民, 潘根兴. 影响城市土壤重金属污染因子的关联度分析. 土壤学报, 2003, 40 (6): 921-928
- [16] Zhou DM, Chen HM, Hao XZ, Wang YJ. Fractionation of heavy metals in soils as affected by soil types and metal load quantity. *Pedosphere*, 2002, 12 (4): 309-319
- [17] 周秀艳, 王恩德, 王宏志. 辽西滨海矿集区重金属污染与评价. 土壤, 2004, 36 (4): 387-391
- [18] 蒋辉主编. 环境水化学. 北京: 化学工业出版社, 2003

Distribution and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Sediments of Lake Dianchi in the Estuary of the Panlongjiang River

LI Ren-ying^{1,3,4}, YANG Hao², CHEN Jie¹, YU Tian-ying¹, JIN Feng¹

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

2 College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China;

3 Department of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

4 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Distribution of heavy metals (Cd, Cr, Cu, Pb and Zn) in sediments of Lake Dianchi in the estuary of the Panlongjiang River was studied. Pollution degree of heavy metals was also evaluated based on the geological accumulation index (I-geo). The results showed that the concentration of heavy metals (except Pb) decreased with the increasing sampling depth. In terms of concentration, the heavy metals followed a decreasing order of $Zn > Cu > Cr \approx Pb > Cd$ in the sediments. Relativities were found insignificant between heavy metals in the surface sediments (0 ~ 5 cm), and were, however, significant in the layers 5 ~ 10 cm and 10 ~ 20 cm in depth. Relationship between most of the heavy metals and organic matter weren't significant in the layers, 0 ~ 5 cm and 5 ~ 10 cm in depth, but significant in the layer 10 ~ 20 cm in depth. Relationship between the heavy metals and sediments particles size (clay fraction, silt fraction and sand fraction) weren't significant in the layer 0 ~ 5 cm in depth. Concentrations of the heavy metals (except Pb) decreased with the increasing distance from the estuary of the Panlongjiang River. The heavy metals were evaluated based on I-geo index, indicating moderate to strong contamination of Cu, Pb and Zn, extremely strong contamination of Cd, and little contamination to moderate contamination of Cr, which means pollution degrees of the heavy metals followed the sequence of $Cd > Zn > Cu = Pb > Cr$.

Key words: Dianchi Lake, Estuary of the Panlongjiang River, Heavy metals, Distribution, Pollution evaluation