

中国湖泊底泥的重金属污染评价研究

滑丽萍, 华 璐, 高 娟, 张振贤, 尹逊霄, 朱风云, 王学东

(首都师范大学资源环境与 GIS 北京市重点实验室, 北京 100037)

摘 要: 本文根据相关研究, 搜集了中国不同区域湖泊底泥重金属含量及其某些湖泊底泥中重金属含量背景值, 对数据进行处理和分析, 统计了中国湖泊底泥中重金属含量的范围, 分析了不同湖泊底泥重金属的浓度情况, 对几个重点湖泊底泥重金属污染程度进行了评价, 提出了防治湖泊底泥重金属污染的措施。

关键词: 湖泊底泥; 重金属; 污染评价; 中国

中图分类号: X524; X82

湖泊是重要的多功能地表水资源, 具有灌溉、防洪、航运、养殖等功能, 对调节气候、维持生态平衡有着重要的生态功能^[1]。底泥作为湖泊生态环境的重要组成部分, 在湖泊水体环境中具有特殊的重要性。一方面, 底泥可以吸附水体中的污染物, 降低水质污染程度, 一旦条件发生变化, 污染物会重新释放出来, 影响上覆水体的水质; 另一方面, 底泥又是底栖生物的主要生活场所和食物来源, 其中的污染物质可直接或间接地对水生生物产生致毒致害作用, 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^[2-3]。随着工业经济的不断发展, 湖泊底泥的污染已严重妨碍了湖泊功能的正常发挥, 因此, 弄清底泥污染机理对恢复湖泊生态环境有重要意义。

重金属污染问题是我国水环境研究人员最早关注的重要问题之一, 由于底泥在水环境中的重要作用, 多数学者在研究水相中的重金属污染状况时, 也会同时对水体底泥的重金属污染状况进行同步采样分析。20 世纪 80 年代以来, 广大学者对我国不同地理区域的湖泊底泥重金属污染状况进行了较广泛的研究, 研究所涉及的重金属元素包括 Fe、Mn、Hg、Cd、Zn、Cu、Cr、As、Ni、Se、Co、Ni 等, 积累了丰富的数据^[4]。但是, 以前的研究主要是针对某一具体区域的某一具体湖泊而进行底泥重金属污染的实验研究, 到目前为止, 对我国不同区域的众多湖泊底泥的重金属含量及污染情况从整体上进行比较和分析的相关资料还比较少。本文通过对不

同区域湖泊重金属元素 (主要为 Cu、Cd、Pb、Zn、Hg、As、Ni、Cr 8 种重金属) 含量及背景值数据的搜集和处理加工, 对我国湖泊底泥中重金属污染情况进行了比较和分析, 并对重点湖泊底泥重金属污染程度作出了评价。

1 中国湖泊底泥重金属含量分析

1.1 中国湖泊底泥重金属含量

本研究主要搜集了贵州红枫湖、云南洱海、滇池的内草海和外草海、江西鄱阳湖、浙江西湖、湖北东湖、江苏阳澄湖、江苏太湖、江苏梅梁湖、上海淀山湖、安徽巢湖、南京玄武湖、山东荣城月湖、山东南四湖、河北白洋淀、北京未明湖、北京昆明湖、长春南四湖、吉林长白湖、吉林松花湖、黑龙江镜泊湖 21 个湖泊的资料。图 1 为所研究湖泊的区域分布图。这些湖泊主要分布在东部和南部沿海地区。表 1 是中国主要湖泊底泥中重金属含量的平均值, 从平均值分析, 可以看出, 滇池中 Cu、Zn、Pb、Cd 和 Ni 的浓度在这些湖泊中是最高的, 分别为: 920, 2208, 647, 164.8 和 466 mg/kg, 底泥中 Cr 的最高浓度出现在洱海, 为 130 mg/kg, Hg 的最高浓度出现在松花江, 为 2.10 mg/kg, As 的最高浓度出现在太湖, 为 21.4 mg/kg。Cu、Zn、Cr、Pb、Cd、Hg、Ni 和 As 的最低浓度分别出现在北京未名湖 12.0 mg/kg、山东月湖 17.3 mg/kg、吉林长白湖 35.7 mg/kg、山东月湖 6.7 mg/kg、山东月湖 0.15 mg/kg、江西鄱阳湖 0.03 mg/kg、吉林长白湖 20.0 mg/kg、黑

①基金项目: 首都师范大学资源环境与 GIS 北京市重点实验室项目资助。

* 通讯作者

作者简介: 滑丽萍 (1979—), 女, 河北人, 硕士研究生, 主要从事生态环境与调控机制—湖泊底泥污染治理研究, E-mail: yuguang1024@163.com



1 云南洱海 2 云南滇池 3 贵州红枫湖 4 江西鄱阳湖 5 浙江西湖 6 湖北东湖 7 江苏阳澄湖 8 江苏太湖 9 安徽巢湖 10 南京玄武湖 11 山东南四湖 12 山东荣成湾月湖 13 河北白洋淀 14 北京未名湖 15 北京颐和园昆明湖 16 吉林长白山 17 长春南湖 18 吉林松花湖 19 黑龙江镜泊湖

图1 中国不同区域主要湖泊地理分布图

Fig. 1 Distribution map of main lakes in China

龙江镜泊湖 7.3 mg/kg。由此可以看出，滇池、太湖、松花湖底泥重金属含量较高，污染较严重，而月湖、长白湖、镜泊湖和鄱阳湖底泥某种重金属含量较低，尤其是月湖，3种重金属元素浓度均为最低值。

对所研究湖泊不同采样点底泥重金属浓度数据进行处理，得出中国湖泊底泥重金属含量范围列于表2。研究表明，中国湖泊底泥中重金属含量变化较大，一方面是不同的重金属元素的浓度有很大差异，底泥中浓度最大值为重金属 Zn，其最高浓度 2208 mg/kg；浓度最低的 Hg，其最小浓度为 0.01 mg/kg，两者差值高达 2000 mg/kg 之多。另一方面，同一种重金属在不同湖泊底泥中的差值也很大：差值最大的重金属为 Zn，其浓度最大值与最小值相差 2206.4 mg/kg；相差倍数最多的是 Hg 的浓度，最大值是最小值的 4609 倍。可见，由于湖泊所在区域不同决定了湖泊及其周围的自然生态环境也不相同，因此所受到重金属污染的程度有较大差异。从表2中还可以看出，中国湖泊底泥中平均浓度最高的重金属是 Zn (160.64 mg/kg)，其次为：Cr (67.55 mg/kg) > Ni (53.02 mg/kg) > Cu (48.03 mg/kg) > Pb (38.03

表1 主要湖泊底泥中重金属元素含量平均值^[5-26] (mg/kg)

Table 1 Average concentrations of heavy metals in sediments of the main lakes

湖泊	Cu	Zn	Cr	Pb	Cd	Hg	Ni	As
贵州红枫湖	32.0	177.4		26.6	0.89	0.42		
云南洱海	111.0	127.0	130.0	60.0	0.59		80.0	
云南外草海	100.0	157.0	35.0	94.0	5.92		89.0	
云南内草海	920.0	2208.0	55.0	647.0	164.85		466.0	
江西鄱阳湖	22.0	64.4	51.7	28.7	<0.5	0.03		
浙江西湖	20.6	88.6	68.5		0.43	1.50		17.75
湖北东湖	53.0	240.0		45.0	2.63			
江苏阳澄湖	38.7	132.0	111.0	60.1	0.28		37.7	
江苏太湖	97.5	223.1	96.2	72.5	0.49	0.09	40.3	21.44
江苏梅梁湖	20.1	70.6	31.7	13.3	0.90		30.3	
安徽巢湖			52.8	43.0	0.46	0.24		8.90
南京玄武湖	56.6	592.3	73.8	36.9	0.27	1.77	52.1	11.03
山东月湖	13.1	17.3	36.1	6.7	0.15			
山东南四湖	38.9	89.6	54.5	19.1		0.09	40.3	12.20
河北白洋淀	32.2	121.2		55.7	6.89			
北京未明湖	12.0	153.6	104.0	26.0				
北京昆明湖			66.5	28.7	1.90	0.06		
长春南湖	27.8	239.7		15.8	0.59			
吉林长白山	29.3	196.0	35.7	50.0	2.00		20.0	
吉林松花湖	137.3	224.1	85.6	34.3	0.82	2.10	101.2	
黑龙江镜泊湖	22.4	84.6	82.8	12.1	0.48	0.11	39.3	7.28

表 2 中国湖泊底泥中重金属含量范围^[5-26] (mg/kg)

Table 2 Ranges of heavy metal concentrations in sediments of the main lakes in China

项目		Cu	Cd	Pb	Zn	Hg	As	Ni	Cr
含量	最大值	920	164	647	2208	46.9	64	332	155
	最小值	0.09	0.02	2.81	1.60	0.01	2.10	10	11.70
	平均值	48.03	0.94	38.03	160.64	0.64	13.55	53.02	67.55
重金属浓度最高的湖泊		滇池	滇池	滇池	滇池	松花湖	太湖	松花湖	太湖
重金属浓度最低的湖泊		月湖	月湖	月湖	月湖	鄱阳湖	巢湖	西湖	月湖

mg/kg) > As (13.55 mg/kg) > Cd (0.94 mg/kg), 最小为 Hg (0.64 mg/kg), 但这并不代表各种重金属对水体造成的污染程度。各种重金属元素在生物体内需求量和毒性是不同的, 一些重金属是生命正常生理代谢所必不可少的, 称之为生命必需微量元素, 如 Cu、Zn, 生命必需微量重金属元素超过一定剂量时, 可能对生物体产生毒害或负面影响。其他一些重金属元素, 如 Cr、Cd、Hg、Pb、As 等是生命非必需重金属元素, 环境中的这些重金属元素往往对生物和人体具有很大的毒害作用。因此衡量各种重金属在底泥中是否超标的标准值也有很大差别。

由湖泊所有采样点底泥中重金属浓度来看 (统计浓度最高值和最低值均排除未检测或未测出值的样本), 这 8 种重金属元素浓度最高值的湖泊主要集中在滇池、松花湖和太湖这 3 个湖泊, Cu、Cd、Pb、Zn 4 种重金属的最高浓度值都出现在滇池的内草海, 松花湖和太湖分别占据两种重金属浓度最高值; 底泥中重金属浓度最低值主要分布在月湖, 月湖底泥中 5 种重金属在所统计的样本中都是最低值, 其次为鄱阳湖、巢湖和西湖。这种分析结果与表 1 得出的结论基本相同, 但有一定差距。总体上, 污染较严重的都是滇池、松花湖和太湖, 这与 3 个湖泊所在的地理区位周围多分布中小型无环保措施的工矿企业有关。重金属含量均较低的主要为山东月湖, 其中 5 种重金属元素 Cu、Cd、Pb、Zn、Cr 均为最低浓度, 月湖底泥沉积物处于自然沉积状态,

没有出现污染现象^[18], 而从平均值来看, 还有长白湖和镜泊湖, 以及位于北京大学校园内的未名湖, 这主要是因为这些湖泊均远离城市工业区, 未受到人类活动的强烈干扰。而从采样点分析来看, 鄱阳湖、巢湖和西湖底泥均属某一种重金属浓度较低, 局部底泥重金属浓度很高, 而且其底泥中不同重金属污染程度也有很大差异。

重金属含量的平均值以全国土壤质量标准作为参照 (表 3)。由图 2 可以看出, 除 As、Cr 外, 其他 6 种重金属元素都已超标, 超过标准 I 级的有 6 种重金属元素, 其中 Cd 超标高达 3.7 倍, Hg 超标高达 3.3 倍, 其余都在 1 倍以内。超过标准 II 级的仍然有 3 种, Cd 超标仍高达 2.1 倍; 相对于全国土壤标准 III 级和农用污泥控制标准来说, 湖泊底泥中重金属浓度的平均值还未超标。但是就所统计的重金属浓度范围值而言, 有很多超出这两个衡量标准。

2 湖泊底泥重金属污染评价

由表 1 可知, 湖泊底泥中重金属浓度最高值主要集中在滇池的内草海、太湖和松花湖, 采用污染指数法^[26, 28]评价污染物重金属的污染程度, 其公式如下所示:

$$P_i = C_i / C_0$$

式中 P_i 为污染指数; C_i 为底泥中 i 元素浓度; C_0 为背景底泥中 i 元素中的浓度。

根据公式分别计算出内草海、太湖、松花湖和

表 3 底泥中重金属含量参照标准^[27] (mg/kg)

Table 3 Reference standard of heavy metals in sediments

项目	Cu	Cd	Pb	Zn	Hg	As	Ni	Cr
全国土壤质量标准	35	0.2	35	100	0.15	15	40	90
	100	0.3	300	250	0.50	25	50	300
	400	1.0	400	500	1.50	30	200	400
农用污泥控制标准	500	20	1000	1000	15	75	200	1000

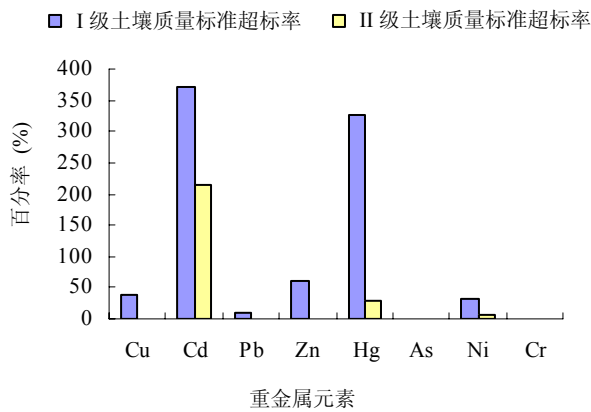


图 2 底泥重金属相对全国土壤质量标准超标率

Fig. 2 Overstandard rates of heavy metals in sediments

鄱阳湖底泥重金属的污染指数如表 4 所示。

分析表 4 可知，属于滇池一部分的内草海，底泥重金属污染指数是很高的，Cd 的污染指数高达 659.4，最低的 Cr 污染指数也达到了 2.29，Hg 和 As 在此过程中没有检测数据。底泥重金属污染程度严重与滇池所处的地理区位是分不开的，滇池位于

昆明工业区和昆明城区的下游，沉积物中的重金属浓度受到工矿废水和生活污水流入的影响，滇池底泥重金属污染严重，但湖水中各重金属元素的含量除内草海以外仍然很低，这一事实也说明了湖泊沉积物对排入水体中的重金属元素有很大的吸附净化能力^[6-7]。内草海是比较特殊的，其底泥重金属元素浓度在所统计的样本中，Cu、Cd、Pb、Zn 的浓度远远超出其他样本值许多倍。

太湖底泥中这 8 种重金属基本上都有一定程度的污染，相对于其他 3 个湖泊 As 的污染就相对严重，除了 Hg、Cr、As 某些测点没有形成污染外，其他元素均是其背景值的近 2 倍。太湖底泥中的重金属污染差别比较大，在局部区域已较为严重，太湖为中国第三大淡水湖泊，由于人为因素的干扰，富营养化、重金属污染日益严重，特别是位于太湖北部的五里湖、梅梁湾离无锡、常州等城市和工业污水源较近，上述现象尤为突出。太湖沿岸入湖河流众多，由径流或河流入湖的污染物对湖水造成了不同程度的污染^[12-13]。

表 4 湖泊底泥重金属污染系数

Table 4 Pollution coefficients of heavy metals in sediments

项目	Cu	Cd	Pb	Zn	Hg	Cr	Ni	As	
内草海	11.95	659.40	12.44	35.61		2.29	8.63		
太湖	最大值	15.00	3.40	7.30	6.10	2.27	1.95	5.08	6.81
	最小值	3.00	1.20	2.46	1.50	0.07	0.72	1.67	0.79
	平均	5.16	1.81	3.72	3.77	0.85	1.21	2.57	2.28
松花湖	最大值	16.06	10.20	4.17	3.14	1022.00	8.83	18.97	
	最小值	2.34	0.60	0.31	1.16	1.20	4.50	2.05	
	平均	7.04	8.20	2.02	2.70	52.60	7.13	5.78	
鄱阳湖	最大值	18.95	0.80	3.28	3.49	1.41	2.76		
	最小值	0.84	<0.67	0.72	0.59	0.16	0.51		
	平均	4.63	0.69	2.30	1.41	0.47	1.74		

注：污染系数≤1 为未污染。

松花湖底泥中除未检测到 As 的污染外，其他 7 种重金属元素均构成比较严重的污染，由于大量未经处理的废水、废渣排入松花湖及入湖干流水系，造成湖区的水体污染。特别是湖区上游苇沙河两岸的国营和个体大、中、小型金矿排出选矿和洗矿废水，更加重了湖区的污染。上游二道岔的小金厂成

为松花湖入湖河流 Hg 的主要污染源^[25-26]，从表 4 也可以看出松花湖 Hg 的污染是非常严重的，平均达到背景值的 52.6 倍，最高值达到背景值的 1022 倍。松花湖的 Hg 浓度在所统计的样本中也是最高的。

我国的第一大淡水湖—鄱阳湖底泥重金属污染

相对较轻, Hg、Cr、As、Ni 均未构成污染, 某些元素的污染比较严重也只是局部性的。受江西德兴铜矿开采的影响^[8], 鄱阳湖沉积物的重金属含量明显增高, 特别是 Cu。

某个湖泊底泥中重金属浓度最高, 并不意味着其底泥中该重金属污染就最严重, 底泥中重金属的污染程度是和当地沉积物中重金属含量的背景值有密切关系的, 因此, 评价底泥中重金属污染程度时就要看湖泊底泥中重金属浓度实测值相对于当地其背景值的污染系数是多大, 以判定底泥中重金属的污染程度。根据下面的公式可以计算出湖泊的污染程度。

$$P = \sqrt{(1/n) \sum_{i=1}^n P_i^2}$$

式中 P 为污染综合指数, 表示污染物对底质的综合污染程度^[14, 29]。

表 5 列出了湖泊底泥中重金属污染综合指数与污染程度级别的关系。

利用公式对滇池(内草海)、太湖、松花湖和鄱阳湖底泥中重金属污染综合指数进行计算, 得出这 4 个湖泊底泥中重金属污染状况(表 6)。可以看出, 内草海的污染综合指数达到 269.7, 远远超出极度污染指标, 内草海是滇池底泥重金属污染最严重的地方。松花湖也达到了极度污染程度, 太湖整体上虽然处于中度污染, 但其局部污染是很严重的; 鄱阳湖底泥中有些重金属未超过背景值, 但个别重金属浓度超出背景值很高, 因此, 各种重金属对鄱阳湖底泥的综合污染也已达中度污染程度, 属 2 级污染。

表 5 重金属污染综合指数与污染级别划分^[14, 29]

Table 5 Composite pollution index and pollution grades of heavy metals

项目	未污染	轻微污染	偏中度污染	中度污染	偏重度污染	重度污染	极度污染
P	≤1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6	>6
污染级别	0	1	2	3	4	5	6

表 6 湖泊底泥重金属污染程度与级别

Table 6 Degrees and grades of heavy metal pollution of the sediments

项目	滇池(内草海)	太湖	松花湖	鄱阳湖
P	269.70	3.06	20.63	2.33
污染程度	极度污染	中度污染	极度污染	偏中度污染
污染级别	>6	3	>6	2

3 底泥中重金属浓度分布及出现频次分析

图 3 为湖泊底泥中重金属浓度分布频次图。图 3 反映出, 在湖泊底泥中重金属 Cu、Pb 出现的频次是最高的, 也就是说湖泊底泥中基本都会出现 Cu、Pb 的污染, 其次是 Cd>Cr>Zn>Hg>Ni, As 出现的频次最少, 尚未对湖泊底泥构成重金属污染。

各种重金属在底泥中不仅出现的总频次不同, 浓度分布也是不均衡的。根据分布频次计算, Cu 的浓度主要分布在全国土壤质量标准 II 级(100 mg/kg)以内, 占到总出现频次的 87.7%; 有 64.6%

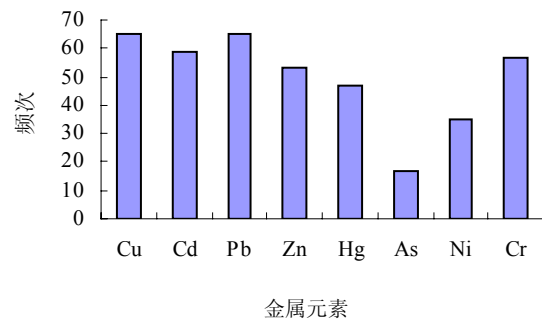


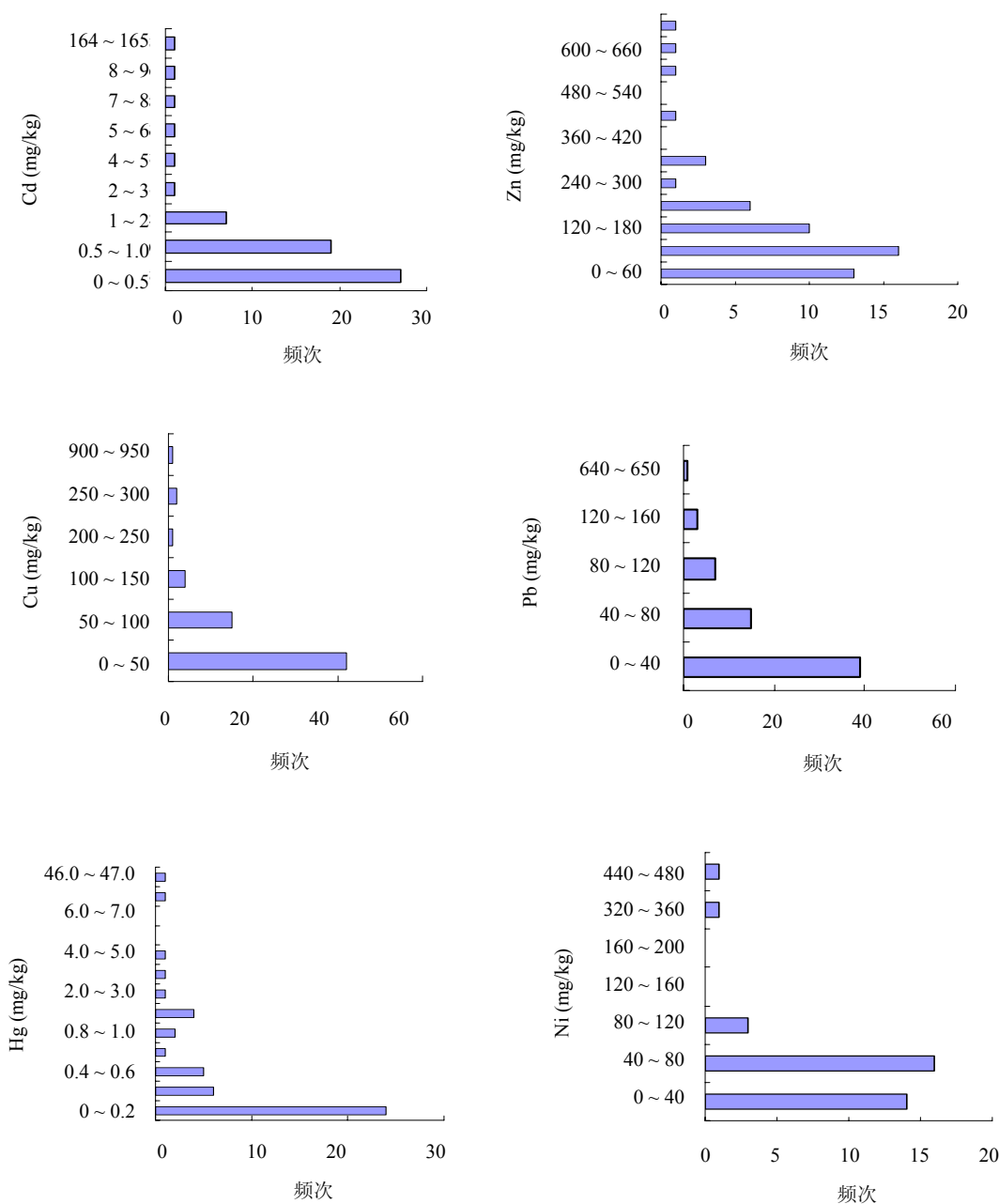
图 3 底泥中重金属出现的总频次

Fig. 3 Frequency of appearance of heavy metals in sediments

分布在 50 mg/kg 以内, 超过 II 级标准(400 mg/kg)的只有一个值, 达到 920 mg/kg。Cd 的浓度主要分

布在 I 级标准 (1.0 mg/kg) 以内, 占到 78%; 有 45.8% 分布在 0.5 mg/kg 以下。Pb 的浓度主要分布在低于 80 mg/kg, 占到总分布的 83.1%, 浓度低于 40 mg/kg (I 级标准为 35 mg/kg) 有 60%; 只有一个最高值 647 mg/kg 超出了 II 级标准。Zn 的浓度主要集中在 240 mg/kg (II 级标准为 250 mg/kg) 以内, 比例达到 85%, 浓度低于 120 mg/kg 的占到 55%, 有 3 个统计浓度值超过了 III 级标准。Hg 的浓度主要集中在 0.6 mg/kg (II 级标准为 0.5 mg/kg) 以下, 达到 74%, 浓度低于 0.2 mg/kg 的占 51%, 超过 III

级标准的仍有 15%。底泥中 Ni 的浓度 86% 低于 80 mg/kg, 在 I 级标准 (40 mg/kg) 以内的出现频次有 40%, 有 2 个统计值超出了 III 级标准, 占到 5.7%。As 浓度 100% 低于 80 mg/kg, 并且低于 I 级标准的值。Cr 的浓度 86% 低于 I 级标准, 100% 低于 II 级标准 (图 4)。由此也可以看出, Cd、Hg、Ni 3 种重金属的污染比较严重, 超过全国土壤质量标准 I 级的出现频次较多; 其次是 Cu、Zn、Pb 的污染也较严重, 污染程度最轻的是 Cr、As, 基本没有构成污染, 这和根据表 1 中的平均值来分析的结果基本相同。



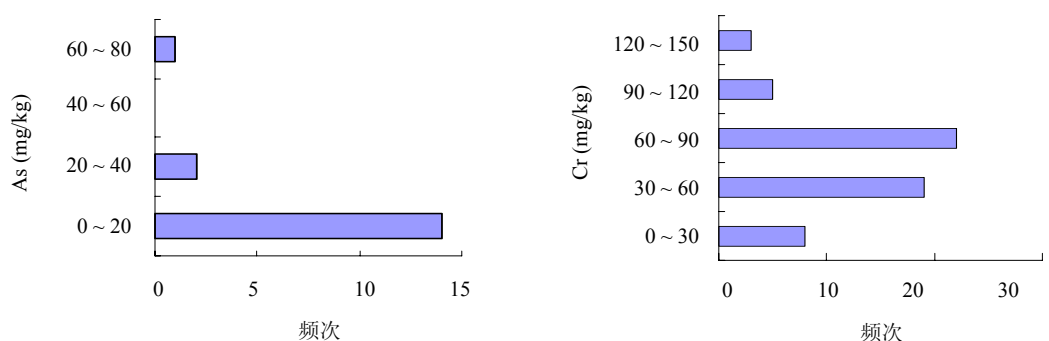


图 4 底泥中重金属浓度分布频次

Fig. 4 Distribution frequencies of heavy metal concentrations in sediments

4 小结

中国湖泊底泥重金属污染程度非常不均匀,基本上靠近工矿企业和人类活动频繁区的湖泊底泥重金属污染比较严重,远离人类居住和经济活动区的湖泊底泥尚未受到重金属污染,保持比较洁净的水体环境。滇池、太湖、松花湖这 3 个湖的底泥污染比较严重,尤其是滇池。南京的玄武湖虽属于风景区,应该属于污染较轻的湖泊,但其位于市内繁华区,湖泊底泥中金属的污染也相对较严重^[30]。山东荣城湾的月湖、云南的洱海、黑龙江的镜泊湖都远离城市,底泥中的重金属含量分布符合自然规律,溶解氧含量较高,水体的自净能力比较强,是少受污染的湖泊。在湖泊底泥重金属中,Cd、Hg、Ni 3 种重金属的污染比较严重,平均值均超过全国土壤质量标准 II 级,其次是 Cu、Zn、Pb 的污染也较严重,污染程度最轻的是 Cr、As,基本未构成污染,没有超出全国土壤质量标准 I 级。在湖泊底泥中重金属出现频次的统计中,Cu、Pb 出现的频次是最高的,湖泊底泥中基本都会出现 Cu、Pb 的污染,其次是 Cd>Cr>Zn>Hg>Ni>As,As 出现的频次最少,尚未对湖泊底泥构成重金属污染。

由于所搜集数据的局限性,有些数据距现在已近 10 年,经过 10 多年社会经济的发展变化,湖泊底泥中重金属沉积情况也会有所变化,对于远离城市环境的湖泊影响不大,而对于靠近城市和人类活动频繁地区的湖泊则会有很大的影响,因此通过实验性研究来更新数据对于从整体上来评价中国湖泊底泥重金属污染程度是很必要的。

参考文献:

- [1] 袁旭音. 中国湖泊污染状况的基本评价. 火山地质与矿产, 2000, 21(2): 128-136
- [2] 伍钧, 孟晓霞, 李昆. 铅污染土壤的植物修复研究进展. 土壤, 2005, 37 (3): 258-264
- [3] Zhang MK, Ke ZX. Heavy metals, Phosphorus and some other elements in Urban soil of Hangzhou City, China. *Pedosphere*, 2004, 14 (2): 177-185
- [4] 张利田. 中国东部主要河流与湖泊沉积污染物信息系统建立与应用研究 (博士后研究报告). 2002
- [5] 袁惠民, 陈文生. 红枫湖沉积物中主要重金属潜在生态危害性评价. 贵州环保科技, 1997, 3 (3): 39-43
- [6] 陈敬安, 玩过江, 黄荣贵. 洱海沉积物重金属地球化学相及其污染历史研究. 地质地球化学, 1998, 26 (2): 1-8
- [7] 黎秉铭, 万国江, 江成忠. 滇池、洱海水及沉积物中重金属元素行为. 环境科学, 1995, 16 (2): 50-52
- [8] 吕兰军. 鄱阳湖水及其沉积物中的重金属调查. 上海环境科学, 1994, 13 (5): 17-26
- [9] 杨丹敏, 陈春华, 王焰新. 武汉东湖沉积物中金属元素垂直分布研究. 安全与环境工程, 2004, 11 (2): 17-18
- [10] 胡勤海, 胡志强, 叶昭杰. 西湖沉积物中元素分布特征研究. 环境污染与防治, 1996, 18 (1): 8-10
- [11] 吉磊, 朱育新, 吴瑞金, 项亮, 钱君龙, 潘红玺. 阳澄湖近代沉积物的古湖泊学研究. 湖泊科学, 1997, 9 (1): 23-28
- [12] 张于平, 瞿文川. 太湖沉积物中重金属的测定及环境意义. 岩矿测试, 2001, 20 (1): 34-36
- [13] 戴秀丽, 孙成. 太湖沉积物中重金属污染状况及分布特征探讨. 上海环境科学, 2001, 20 (2): 71-74

- [14] 张泉荣, 吴朝明. 梅梁湖底泥重金属污染评价方法探讨. 环境水利, 2003 (9): 32-33
- [15] 庄云龙, 张沪春. 重金属在淀山湖沉积物上的吸附研究. 安全与环境学报, 2003, 3 (1): 37-39
- [16] 刘伟, 徐南妮, 刘振宇. 巢湖清淤合肥项目区域污染底泥调查研究. 环境导报, 2000 (2): 30-31
- [17] 朱敏, 王国祥, 王建, 陈灿. 南京玄武湖清淤前后底泥主要污染指标的变化. 南京师范大学学报 (工程技术版) 2004, 4 (2): 66-69
- [18] 殷效彩, 杨永亮, 乌大年, 李春雁, 牟晓燕, 薛允传, 贾建军. 山东荣城湾月湖沉积物底泥重金属研究. 青岛大学学报, 1999, 12 (4): 75-79
- [19] 杨丽原, 沈吉, 张祖陆, 朱育新, 孙庆义. 南四湖表层底泥重金属和营养元素的多元分析. 中国环境科学, 2003, 23 (2): 206-209
- [20] 杨卓, 李贵宝, 王殿武, 王学东, 李占雷. 白洋淀底泥化学性质在芦苇生境下的变化. 中国环境科学, 2005, 25 (4): 450-454
- [21] 贾振邦, 安凯, 赵智杰, 夏正楷, 郑公望. 北京大学未名湖沉积物中主要重金属 250 年以来的变化. 环境化学, 2003, 22 (1): 93-94
- [22] 黄成彦, 孔昭宸, 闵隆瑞, 庞其清, 浦庆余, 戢朝玉, 刘椿, 毛毓华, 杨安国, 尹战国. 北京颐和园昆明湖底泥沉积物对 3000 余年来自然环境变化的反映. 海洋地质与第四纪地质, 1994, 14 (2): 39-46
- [23] 孙胜龙, 丁蕴铮. 长春南湖底泥磷、氮和重金属元素环境地球化学行为研究. 环境科学研究, 1999, 12 (4): 37-41
- [24] 王晓君, 刘玉青, 余中盛. 镜泊湖沉积物中重金属的研究. 环境科学丛刊, 1990, 11 (1): 46-51
- [25] 邓书平, 毕德纯, 孙晓怡. 松花湖及入湖河流的重金属污染调查分析. 辽宁城乡环境科技, 2002, 22 (4): 28-30
- [26] 王宁, 朱颜明. 松花湖水源地重金属非点源污染调查. 中国环境科学, 2000, 20 (5): 419-421
- [27] 夏家淇. 土壤环境质量标准详解. 北京: 中国环境科学出版社, 1996: 1, 8, 72
- [28] 郑海龙, 陈杰, 邓文靖. 六合蒋家湾蔬菜基地重金属污染现状与评价. 土壤, 2004, 36 (5): 557-560
- [29] 范文宏, 陈静生. 沉积物中重金属生物毒性评价的研究进展. 环境科学与技术, 2002, 25 (1): 36-48
- [30] 吴新民, 潘根兴. 城市不同功能区土壤重金属分布初探. 土壤学报, 2005, 42 (3): 513-517

Heavy Metal Pollution of Sediments of Lakes in China

HUA Li-ping, HUA Luo, GAO Juan, ZHANG Zhen-xian, YIN Xun-xiao, ZHU Feng-yun, WANG Xue-dong
(The Key Lab of Resource Environment and Geographic Information System, Capital Normal University, Beijing 100037, China)

Abstract: Based on related researches and data collected of concentrations and background values on heavy metal in sediments of lakes in China, analysis of heavy metal pollution of sediments of the lakes was conducted, statistics taken for ranges of their concentrations, and evaluation of the pollution degrees of the sediments in some main lakes performed. After comparison with heavy metal concentrations in sediments of lakes and soil quality standards of some foreign countries, the authors set forth some countermeasures for control of heavy metal pollution of sediments of lakes.

Key words: Sediments of lake, Heavy metal, Evaluation on pollution, China