

文章编号:1000-582X(2012)11-136-08

太湖沉积物重金属的形态特征及生态风险评价

王沛芳,周文明,王超,钱进,侯俊,郑莎莎

(河海大学 a. 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室;b. 环境学院,南京 210098)

摘要:对太湖 29 个点位表层沉积物中主要的重金属 Cd、Pb、Cu、Cr 含量及分布特征进行了研究,采用 BCR 提取法分析各种重金属赋存形态,并依据各种重金属的形态特征进行了生态风险评价。结果表明:表层沉积物中 Cr 含量最高,Cd 最低;各湖区各种重金属含量分布不同,梅梁湾、竺山湾和贡湖湾的 Cu 和 Cr 含量较高,南部沿岸区 Cu 含量最低,湖心区 Cr 含量最低;各种重金属的赋存形态中,Cd 可提取态所占比例最高,而 Pb、Cu 和 Cr 均以残渣态为主,表明 Cd 的迁移性最强。运用次生相与原生相比值法(RSP)对重金属潜在生态风险进行评价,发现 Pb、Cu 和 Cr 在全太湖处于无污染水平,而 Cd 在竺山湾和西部沿岸区入湖河口处于中度污染水平,在东太湖、胥湖湾、贡湖湾部分采样点处于轻度污染水平,说明 Cd 污染分布较广且污染较重,四种重金属的潜在生态风险由大到小的顺序为: Cd>Pb>Cu>Cr;从湖区平均值分析,南部沿岸区、湖心区和贡湖湾处于无污染水平,其它湖区处于轻度污染水平。但贡湖湾已接近轻污染水平。

关键词:沉积物;重金属;形态;分布;生态风险;太湖

中图分类号:X524

文献标志码:A

The distribution characteristics and evaluation of ecological risk of heavy metals in the surface sediment of Taihu Lake

WANG Peifang, ZHOU Wenming, WANG Chao, QIAN Jin, HOU Jun, ZHENG Shasha

(a. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes,
Ministry of Education;

b. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Research on the contents of heavy metals, such as Cd, Pb, Cu, Cr and their distribution characteristics in the surface sediments of 29 sampling sites in Taihu Lake, are conducted. Meanwhile, the distribution characters of the specific chemical forms of these heavy metals are analyzed with the method of BCR. Results show that the content of Cr has the highest values, while Cd has the lowest values, and contents of the four metals are different in different parts of Taihu Lake. The content of Cu and Cr in Meiliang Bay, Zhushan Bay and Gonghu Bay is high; while, the content of Cu in southern coast of the lake is the lowest; and the middle lake has the lowest content of Cr. Among the specific chemical forms of these heavy metals, the proportion of the extractable form of Cd is the highest, and Pb, Cu and Cr mainly exist in the residual form. This suggests Cd has the highest mobility among the four kinds of heavy metals. Furthermore, the potential ecological risk of these four kinds of heavy metals is evaluated by using the ratio of minor phase and progenetic phase(RSP). It shows that Pb, Cu and Cr are at pollution-free level in all

收稿日期:2012-05-03

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50830304);国家基础研究“973”课题资助项目(2008CB418203);江苏省自然科学基金重点资助项目(BK2010076)

作者简介:王沛芳(1973-),女,河海大学教授,博士生导师,主要从事水环境保护研究,(E-mail)pfwang2005@hhu.edu.cn。

parts of the lake. However, Cd is at moderate-polluted level in the sampling sites of river inlets of Zhushang Bay and western coastal lake, and at light-polluted level in parts of sites of Eastern Taihu Lake, Xuhu Bay, and Gonghu Bay. It indicates that Cd is the more serious pollutant in the whole lake of Taihu. And the descending order of the potential ecological risks of these heavy metals is $Cd > Pb > Cu > Cr$. Meanwhile, in terms of the different parts of the lake, southern coastal, middle lake and Gonghu Bay are at non-polluted level, and the others are at light-polluted level. However, the pollution level of Gonghu Bay is close to light-polluted level.

Key words: sediments; heavy metals; specific chemical forms; distribution; potential ecological risk; Taihu Lake

重金属与其他污染物类不同,引起特别关注之处在于它的环境危害持久性、地球化学循环性和生态风险性。进入水体的重金属绝大部分迅速由水相转入固相,结合到悬浮物和沉积物中,而沉积物不仅可以直接反映水体的污染历史,还能在一定条件下会向上覆水体释放影响水质^[1-3]。同时,沉积物中的重金属可直接或间接地对水生生物产生致毒致害作用,并进一步影响陆地生物和人类^[4-6]。

太湖流域因为其重要的社会经济地位而备受重视。80年代以来就有学者陆续对太湖沉积物中的重金属开展了相关研究^[7-9],也有部分学者分析研究了太湖主要湖区的表层沉积物重金属的分布^[10-12],但由于近年来太湖进行过多次的清淤,加上2003年以来望虞河大规模调水工程的实施而至今仍关于贡湖湾的成果报道很少,因此,全太湖的沉积物重金属分布特点及生态风险研究具有重要的实践意义。

在沉积物重金属生态风险评价方面,当前主要有地累积指数法^[13]、脸谱图^[14]、潜在生态危害指数法^[15]、回归过量分析法^[16]、SEM/AVS值法^[17-19]和次生相与原生相比值法^[20]等,这些评价方法各具特色,适用范围不一,应用也各有局限性。目前,国内外对太湖沉积物重金属污染的研究已较多,但多数是研究太湖流域或环太湖主要进出河流的沉积物重金属污染程度,也有少数学者对整个太湖开展了相关研究,但其风险评价方法多是采用潜在生态危害指数法,其结果可以一般性地了解重金属的污染程度,难以反映沉积物中重金属的化学活性和生物可利用性,不能有效地评价重金属的迁移特性和可能的潜在生态危害。金属的生物毒性和生态效应与其赋存形态密切相关^[21-22],因此生态风险评价必须考虑金属形态的影响。陈静生提出了次生相与原生相比值法(RSP),是基于重金属赋存形态的潜在生态风险评价,它从重金属的来源、化学活性和生物

可利用性来考虑沉积物重金属的污染程度,更为合理完善。

为全面掌握近年来太湖沉积物重金属的污染特征和生态风险,笔者在2009年4月,对全太湖布置了29个采样点(如图1所示),分湖区用次生相与原生相比值法对重金属的潜在生态风险进行了评价,旨在为太湖流域水环境质量的综合评价及污染治理等提供科学依据。

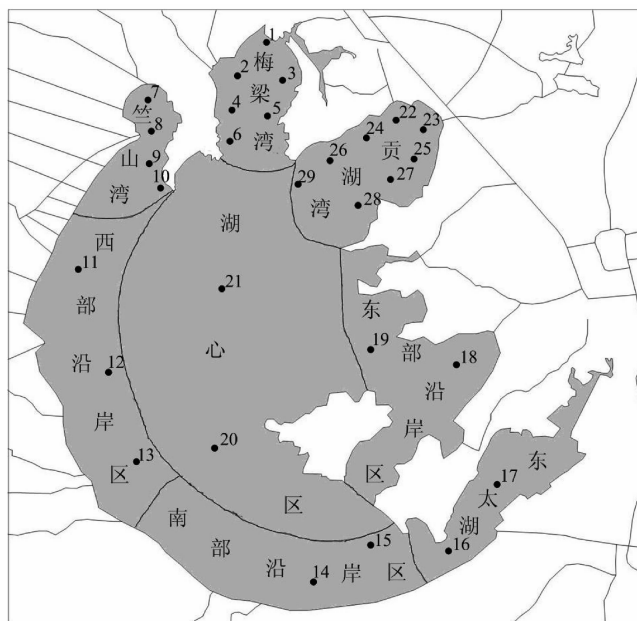


图 1 太湖采样点位置

1 材料与方法

1.1 沉积物样品的采集

利用彼得森采泥器,于2009年4月在太湖29个点位采集表层(0~10 cm)沉积物样品,各点位按照地理位置和湖岸的沿岸特征,划分为8个湖区,见表1。

表 1 湖区采样点分布

湖 区	采样点
梅梁湾	1, 2, 3, 4, 5, 6
竺山湾	7, 8, 9, 10
西部沿岸区	11, 12, 13
南部沿岸区	14, 15
东太湖	16, 17
东部沿岸区	18, 19
湖心区	20, 21
贡湖湾	22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29

为保证采样的代表性,每个点采样 3 次,混匀后分装。采集的样品保存于洁净的聚乙烯密封袋中(排出空气),迅速带回实验室。样品冷经冻干燥后,剔除大小砾石、贝壳及动植物残体等杂质,研磨至 100 目,放入密封瓶中保存备用。

1.2 沉积物样品的分析方法

1.2.1 沉积物的理化指标测定

pH 值利用便携式 pH 计直接测定,含水率采用烘干法(105 °C, 24 h)测定,总有机碳(TOC)在对样品进行酸化处理后,采用 TOC 仪(Multi N/C2100)进行测定,粒度采用全自动激光粒度分析仪(LS13320)进行分析。

1.2.2 沉积物重金属总量分析

取 0.2 g 待测样品于聚四氟乙烯消解罐中,加入 6 mL HNO₃,静置半小时后依次加入 4 mL HF 和 1 mL H₂O₂,在 Berghof MWS-3⁺微波消解系统中消解。冷却后转移到聚四氟乙烯烧杯中,加入 0.5 mL HClO₄,200 °C 蒸至近干,加 1 mL(1+1)硝酸溶解残渣,定容至 25 mL,4 °C 保存备用。ICP-AES 测定 Cd、Pb、Cu、Cr 的含量。

1.2.3 沉积物重金属的形态提取方法

对于沉积物中重金属赋存形态的划分有许多观点,常用的提取方法有 Tessier 的“五步连续提取法”^[23]、Forstner 的“连续提取法”^[24]以及 BCR 提取方法^[25]等。其中,因 BCR 方法提取步骤相对较少,形态之间萃取效应较低,并且重现性好而得到广泛的应用。因此,试验选取改进的 BCR 分级提取方法对沉积物样品中金属的赋存形态和含量进行研究^[26],利用 ICP-AES 测定每次提取后上清液中 Cu、Cd、Cr、Pb 的含量。其中,酸溶态(F₁)、可还原态(F₂)和可氧化态(F₃)生物可利用性较大,残渣态 F₄较为稳定。通常将这前 3 种形态定义为重金属总可提取态 TEM,即 TEM=F₁+F₂+F₃。

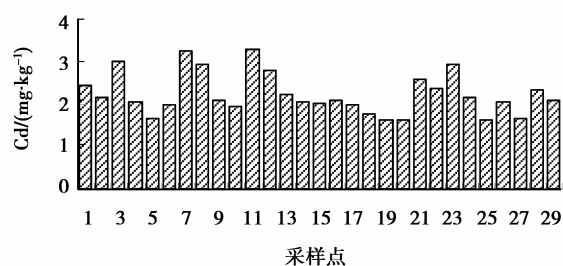
2 结果与分析

2.1 沉积物的理化性质

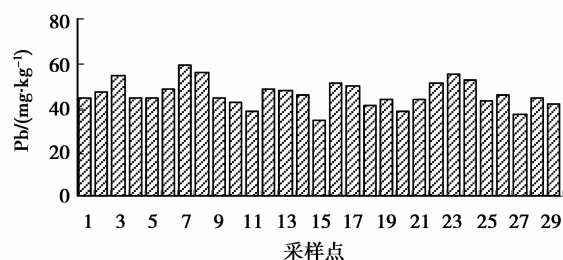
经测定表明太湖表层沉积物含水率在 43.1%~72.6%之间。pH 值在 6.99~7.74 之间,均呈弱碱性。粘粒(<2 μm)、粉粒(2~50 μm)、沙粒(50~2 000 μm)的质量分数分别在 3%~9%、77%~88%、3%~19%之间,各采样点均以粉粒为主。TOC 含量在 7.3~50.5 g/kg 之间,位于东太湖的 16、17 号采样点 TOC 含量显著高于其他点,位于梅梁湾、贡湖湾、竺山湾和东部沿岸区采样点 TOC 含量也较高。

2.2 表层沉积物重金属含量及分布特征

太湖表层沉积物 29 个测点中 Cd、Pb、Cu、Cr 的含量如图 2 所示。沉积物重金属总量的范围分别是: Cd 1.62~3.29 mg/kg、Pb 34.3~59.3 mg/kg、Cu 24.0~75.4 mg/kg、Cr 59.5~138.5 mg/kg。从数值上看,太湖沉积物中 Cr 含量最高, Cd 含量最低。Cd 在 3、7、8、11、12、21 和 23 号点的含量显著高于其他点,19、20 和 25 号点含量相对较低,表明, Cd 在梅梁湾、竺山湾和西部沿岸区的含量较高,东部沿岸区含量最低。Pb 在 3、7、8、23 和 24 号点的含量略高于其他点,15 号点含量最低,各个湖区的含量差别不大,南部沿岸区含量最低,竺山湾最高。Cu 在 1、2、3、7、8、22 和 23 号点的含量显著高于其他点,10 和 20 号点最低, Cr 在 7、8 号点的含量显著高于其他点,10 和 15 号点相对最低。可见,梅梁湾、竺山湾和贡湖湾的 Cu 和 Cr 含量较高,南部沿岸区 Cu 含量最低,湖心区 Cr 含量最低。



(a) Cd



(b) Pb

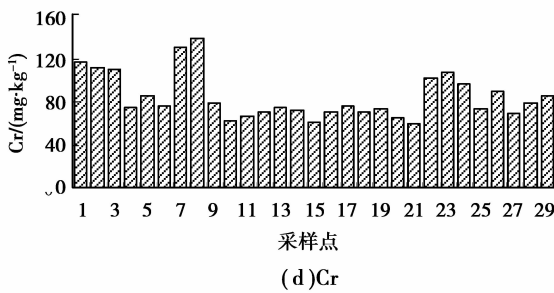
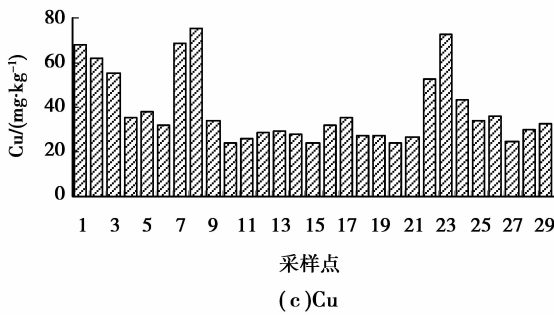


图 2 太湖沉积物重金属含量

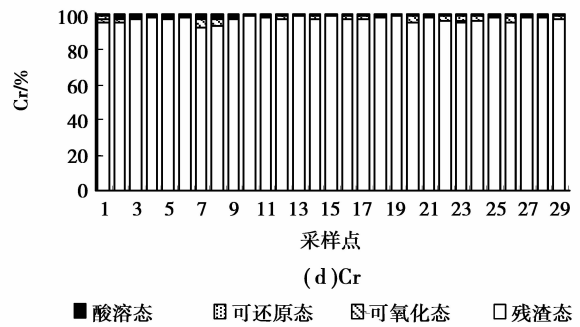
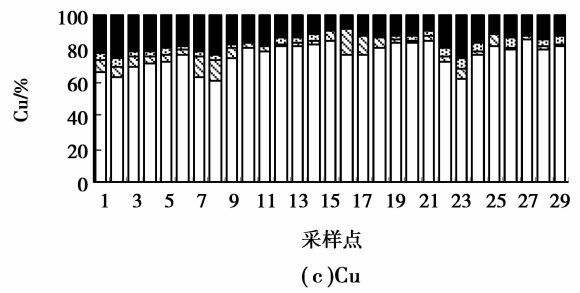
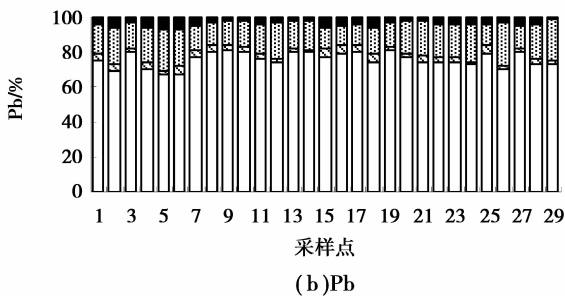
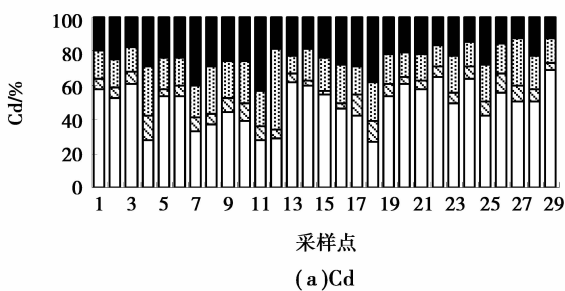


图 3 表层沉积物重金属形态比分布

2.3 重金属的赋存形态及其分布特征

采用 BCR 法对太湖表层沉积物中 Cd、Pb、Cu 和 Cr 4 种元素进行逐级提取,各形态的百分比分布情况如图 3 所示。本试验以逐级提取的回收率 $R\%$ 对实验样品的测定结果进行验证,结果显示,94% 的样品的逐级提取的回收率在 90%~110% 之间,表明本实验结果可信。

由图 3 可知: Cd 在大部分采样位点以残渣态为主,所占比重均值为 49%,而可氧化态所占比重最小(均值为 7%),酸溶态和可还原态所占比重接近,均值分别为 24% 和 20%; Pb 以残渣态为主,所占比重均值为 76%。可还原态次之,所占比重均值为 17%,酸溶态、可氧化态所占比重均值分别为 4% 和 3%; Cu 以残渣态为主,所占比重均值为 76%。酸溶态次之,所占比重均值为 16%,可还原态和可氧化态所占比重均值分别为 3% 和 5%; Cr 几乎全部以残渣态存在,所占比重均值为 97%。酸溶态次之、可还原态和可氧化态所占比重很小,均值分别为 1%、1% 和 2%。



通过以上对重金属不同形态含量和分布特征的分析,可知:不同重金属元素的总可提取态所占比重不同,Cd 可提取态所占的比重最高,而 Cr 则最低。在所有采样点不同重金属元素总可提取态所占比重的均值具体排序如下: Cd (50%) > Pb (24%)、Cu (23%) > Cr (3%)。因此,Cd、Pb、Cu、Cr 4 种重金属元素在太湖沉积物中,Cd 的迁移性最强,Pb、Cu 次之,Cr 最弱。不同重金属元素在 4 种不同形态中的分布模式也有所不同。酸溶态: Cd (24%) > Cu (16%) > Pb (4%) > Cr (1%); 可还原态: Cd (20%) > Pb (17%) > Cu (3%) > Cr (1%); 可氧化态: Cd (7%) > Cu (5%) > Pb (3%) > Cr (2%); 残渣态: Cr (97%) > Cu (76%)、Pb (76%) > Cd (49%)。

按照湖区点位特征归纳可知, Cd 形态间的分布模式在各湖区相同, 残渣态 > 酸溶态 > 可还原态 > 可氧化态; Pb 在除湖心区外, 其他湖区形态间的分布模式为残渣态 > 可还原态 > 酸溶态 > 可氧化态, 而湖心区的可氧化态所占比重大于酸溶态; Cu 在各湖区都是残渣态所占比重最大, 酸溶态次之, 可还原态和可氧化态所占比重非常小, 东太湖可还原态 Cu 含量最低; Cr 在各湖区都几乎全部以残渣态形式存在, 表明 Cr 在沉积物中主要以难溶矿物形式存在。

2.4 次生相与原生相比值法(RSP)

沉积物中的原生矿物称为原生相, 原生矿物的风化产物(如碳酸盐、铁锰氧化物等)和外来次生物质(如有机质等)统称为次生相。在水环境受到污染条件下, 人为来源的重金属主要吸附于颗粒物表面或与有机质结合, 存在于各种弱结合相中(碳酸盐相、有机质相等)。陈静生于 1987 年提出了次生相与原生相比值法^[20], 用存在于各次生相中金属的总质量与存在于原生相中金属的质量的比值来反映和评价沉积物中重金属的潜在生态风险, 评价标准为 $RSP < 1$ 为无污染, $1 \leq RSP < 2$ 为轻度污染, $2 \leq RSP < 3$ 为中度污染, $RSP \geq 3$ 为重度污染。这样, 通过计算研究区域次生相与原生相的比值, 可以区分重金属污染的来源, 更能反映和评价沉积物中重金属的污染水平。

根据文献^[20] 计算太湖各采样点沉积物中 Cd、Pb、Cu 和 Cr 次生相与原生相的比值, 如表 2。由表 2 可知, Pb、Cu 和 Cr 在所有采样点的 RSP 值均小于 1, 按照次生相与原生相比值法污染评价的标准, 这 3 种金属均处于无污染水平。但 Cd 在 4、7、11、12 和 18 号采样点的 RSP 值介于 2 和 3 之间, 处于中度污染水平; 在 8、9、10、16、17、23、25 和 28 号点的 RSP 值介于 1 和 2 之间, 处于轻度污染水平。由此可知, 4 种重金属在太湖沉积物中 Cd 的含量虽然最低, 但它的潜在生态风险最大, 而 Cr 的含量虽然最高, 但潜在生态风险最小, 4 种重金属的潜在生态风险由大到小的顺序为: $Cd > Pb > Cu > Cr$ 。

表 2 太湖表层沉积物中各元素次生相与原生相的比值表

湖区	采样点	RSP_{Cd}	RSP_{Pb}	RSP_{Cu}	RSP_{Cr}
梅梁湾	1	0.73	0.33	0.52	0.05
	2	0.90	0.44	0.59	0.05
	3	0.66	0.25	0.46	0.03
	4	2.59	0.43	0.40	0.02
	5	0.88	0.49	0.38	0.03
	6	0.85	0.48	0.32	0.02

续表 2

竺山湾	7	2.04	0.29	0.58	0.08
	8	1.71	0.24	0.63	0.07
	9	1.25	0.23	0.34	0.03
	10	1.58	0.24	0.25	0.01
西部沿岸区	11	2.55	0.31	0.27	0.02
	12	2.50	0.36	0.24	0.03
	13	0.62	0.25	0.23	0.01
南部沿岸区	14	0.67	0.25	0.21	0.03
	15	0.82	0.29	0.18	0.01
东太湖	16	1.17	0.26	0.31	0.03
	17	1.35	0.24	0.31	0.03
东部沿岸区	18	2.79	0.34	0.24	0.02
	19	0.86	0.23	0.20	0.01
湖心区	20	0.64	0.30	0.20	0.06
	21	0.74	0.34	0.18	0.02
贡湖湾	22	0.53	0.34	0.38	0.04
	23	1.04	0.34	0.61	0.05
	24	0.57	0.37	0.30	0.04
	25	1.38	0.26	0.23	0.02
	26	0.78	0.42	0.27	0.05
	27	0.98	0.24	0.17	0.02
	28	1.00	0.36	0.26	0.02
	29	0.44	0.37	0.23	0.03

以各湖区内不同采样点的重金属各提取态的平均值表示该湖区的相应数值, 对不同湖区沉积物中 Cd、Pb、Cu 和 Cr 次生相与原生相的比值进行计算, 并绘图如图 4。由图 4 知, Pb、Cu 和 Cr 在各湖区的 RSP 值均小于 1, 处于无污染水平。而 Cd 在梅梁湾、竺山湾、西部沿岸区、东太湖和东部沿岸区的 RSP 值介于 1 和 2 之间, 处于轻度污染水平, 其中西部沿岸区、东部沿岸区和竺山湾污染程度最高; Cd 在西部沿岸区、湖心区和贡湖湾的 RSP 值均小于 1, 处于无污染水平, 但其中贡湖湾的风险程度最高 ($RSP=0.84$)。结合 Cu 和 Pb 在各湖区的 RSP 值进行分析, 可以看出梅梁湾、竺山湾、西部沿岸区、东太湖和东部沿岸区以及贡湖湾的污染程度较高, 湖心区和南部沿岸区污染程度最低。这与各湖区沿岸的周边环境密切相关, 因为太湖北部、西部和东部地区人口密集, 工农业发达, 尤其是太湖北部经济相对发达的无锡工业区, 生活与工业污染严重, 水体严重富营养化, 周围重点工业源较多, 每年有大量的工业污水和生活污水进入湖体, 其中包含大量的重金属, 如生产橡胶的工厂多用稳定剂产生的 Cd、Pb 和 Zn, 金属电镀过程和生活污水产生的 Cu 和 Zn。而南部沿岸区, 受人类活动影响较小。因此, 说明湖泊底泥中的

重金属污染主要是工业污染及沿岸排污所致。

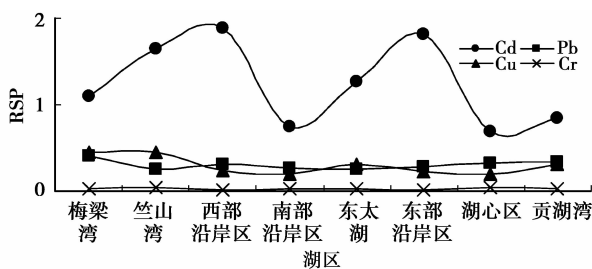


图 4 太湖不同湖区沉积物中各元素次生相与原生相的比值图

3 讨论

3.1 太湖沉积物重金属分布规律

本次试验结果从总体上看,太湖北部的梅梁湾、竺山湾和贡湖湾沉积物中重金属的含量较高,且河口区的含量明显高于其他点,这与河口区污染负荷较高有关。这种分布趋势符合污染物质迁移和分布规律,即沉积物从河道输入湖泊后,流速减缓,颗粒物吸附的重金属首先沉降在河口区,随着离河口距离的增加,受河道输入的影响减小,沉积物中重金属的含量也随之降低。前人的研究也表明,太湖北部湖区沉积物中重金属的含量相对其他湖区较高^[7-8],大浦港沉积物中的 Cd 超出中国土壤一级自然背景值,表现为 Cd 污染型^[27]。

3.2 沉积物重金属的形态特征

通过对重金属不同形态含量和分布特征的分析,可知: Cd 可提取态所占的比重最高,而 Cr 则最低。在所有采样点不同重金属元素总可提取态所占比重的均值具体排序如下: Cd(50%) > Pb(24%)、Cu(23%) > Cr(3%)。因此, Cd、Pb、Cu、Cr 4 种重金属元素在太湖沉积物中, Cd 的迁移性最强, Pb、Cu 次之, Cr 最弱。刘红磊^[28]等用五步提取法对太湖梅梁湾岸边带底泥中重金属形态的研究中也说明了这点。袁旭音^[29]等用五步提取法对太湖沉积物重金属形态的研究也表明 Pb、Cu、Cr 的残渣态含量都在 50% 以上, Cd 和 Cu 的酸溶态相对较高,两者含量都在 15%~25% 之间。王海^[30]等用 BCR 方法对太湖表层沉积物重金属形态的研究说明 Cd 和 Cu 的酸溶态含量也都在这个范围以内。而 Pb 的可还原态平均含量为 17%, 这一形态主要为 Fe/Mn 结合态,属于较强的离子键结合的化学形态,不易释放。刘恩峰^[31]等应用 BCR 提取法在太湖沉积物的研究中说明了 Pb 的 Fe/Mn 结合态含量也较高,可氧化态是以重金属离子为中心离子,以有机质活性

基团为配位体的结合或是硫离子与重金属生成难溶于水的物质。笔者发现 4 种重金属的可氧化态含量都很低,且在东太湖以及东部沿岸区和竺山湾重金属 Cu 和 Cd 可氧化态含量较高。这与 3 个区域 TOC 的含量较高有关。而且太湖是浅水湖泊,受风浪的扰动,水体中含氧条件较好,使得硫化物含量减少,因此各种重金属可氧化态含量都不高。

3.3 沉积物重金属的生态风险评价

向勇^[32]等用潜在生态危害评价法对太湖 20 个点点位的沉积物重金属进行了风险评价,其中 Cd、Pb、Cu、Cr 的潜在生态风险指数 E_i^p 平均值分别是 9.74、7.24、5.49、1.20,均低于 40,属无污染水平。但个别点 Cd 的 E_i^p 值达到了 22.8,说明 Cd 的潜在生态风险程度较高。笔者采用原生相与次生相比值方法评价结果也表明 Pb、Cu 和 Cr 在各采样点 RSP 均小于 1,都处于无污染水平。但 RSP 法结果说明 Cd 的污染程度较高(29 个采样点中 44.8% 的点 RSP_{Cd} 值大于 1,为轻度污染;17.2% 的点 RSP_{Cd} 值大于 2,达到中度污染水平),体现了形态分析法能有效识别重金属的人为污染情况,更能反映和评价沉积物中重金属的来源和污染水平。焦伟^[33]等用 Hakanson 潜在生态危害指数法对环太湖主要进出口河流重金属污染的评价表明 Cd 的生态风险最高,且北部河流高于南部,与本研究结果相同,说明 RSP 法关于 Cd 污染较重的结果是成立的。孙照斌^[34]等用潜在生态风险评价法对太湖流域西沭湖沉积物岩芯中重金属 Cd、Pb、Cu、Zn、Cr 的研究表明, Cd 污染最严重,其他 4 种元素则轻的多。这与 RSP 法评价结果一致,但采用多种污染元素综合评价表明沉积物重金属污染处于“较高”污染,“很高”的潜在生态风险状态,主要是因为西沭湖位于太湖之西,是上游宜溧河水注入的湖泊,宜兴市大量的污染物质被排入其中,因此各种重金属污染物含量都较高。石志芳^[35]通过应用潜在生态危害指数法和沉积物质量基准法 2 种方法基于重金属总量分别评价太湖表层沉积物中重金属污染状况,结果也表明太湖北部的竺山湾、梅梁湾、胥口湖以及西部沿岸是太湖重金属污染比较严重的区域。

4 结论

1) 在太湖表层沉积物中, Cr 的含量最高, Cd 最低,而且在各个湖区各种重金属含量分布不同,梅梁湾、竺山湾和贡湖湾的 Cu 和 Cr 含量较高,南部沿岸区 Cu 含量最低,湖心区 Cr 含量最低,并且太湖北部的梅梁湾、竺山湾和贡湖湾沉积物中重金属的含量

较高,且河口区的含量明显高于其他点。

2)在各种重金属的赋存形态中,Cd可提取态所占比重较大,而Pb、Cu和Cr均以残渣态为主。因此,Cd的迁移性最强,Pb、Cu次之,Cr最弱。

3)运用次生相与原生相比值法(RSP)对重金属潜在生态风险进行评价,发现Pb、Cu和Cr在全太湖各个湖区所有采样点均处于无污染水平,而Cd在4、7、11、12和18号采样点处于中度污染水平,在8、9、10、16、17、23、25和28号采样点处于轻度污染水平,在其他采样点处于无污染水平。4种重金属的潜在生态风险由大到小的顺序为: Cd>Pb>Cu>Cr。

4)分湖区评价结果说明,除去文献报道的竺山湾、西部沿岸区、胥湖湾沉积物受到Cd污染外,近年来引江济太望虞河调水入太湖后,贡湖湾沉积物重金属Cd也存在较高的生态风险威胁。

参考文献:

- [1] Almeida C M, Mucha A P, Vasconcelos M T. Influence of the sea rush *Juncus maritimus* on metal concentration and speciation in estuarine sediment colonized by the plant[J]. *Environmental Science Technology*, 2004, 38(11):3112-3118.
- [2] Bryan G W, Langston W J. Bioavailability, accumulation and effect of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: A review[J]. *Environmental Pollution*, 1992, 76(2): 89-131.
- [3] 唐阵武,程家丽,岳勇,等.武汉典型湖泊沉积物中重金属累积特征及其环境风险[J].*湖泊科学*, 2009, 21(1):61-68.
TANG Zhenwu, CHENG Jiali, YUE Yong, et al. Accumulations and risks of heavy metals in the sediments from 8 typical lakes in Wuhan, China[J]. *Journal of Lake Science*. 2009, 21(1):61-68.
- [4] 刘红磊,尹澄清,唐运平.太湖梅梁湾岸边带底泥中重金属的形态与分布[J].*中国环境科学*, 2010, 30(3): 389-394.
LIU Honglei, YIN Chengqing, TANG Yunping. Distribution and speciation of heavy metals in sediments at a littoral zone of Meiliang Bay of Taihu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(3):389-394.
- [5] Arnason J G, Fletcher B A. A 40-year record of Cd, Hg, Pb, and U deposition in sediments of Patroon Reservoir, Albany County, NY, USA [J]. *Environmental Pollution*, 2003, 123(3):383-391.
- [6] Singh K P, Mohan D, Singh V K, et al. Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments: A tributary of the Ganges, India[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 312(1/2/3/4):14-27.
- [7] 张于平,瞿文川.太湖沉积物重金属的测定及环境意义[J].*岩矿测试*, 2001, 20(1):34-36.
ZHANG Yuping, QU Wenchuan. Determination of heavy metal contents in the sediments from Taihu Lake and its environmental significance [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2001, 20(1):34-36.
- [8] 石俊哲,刘光玉.太湖沉积物重金属污染及生态风险评估[J].*环境监测管理与技术*, 2001, 13(3):24-26.
SHI Junzhe, LIU Guangyu. The heavy metal pollution and ecological risk assessment of sediment in the Taihu Lake [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2001, 13(3):24-26.
- [9] 朱广伟,秦伯强,高光,等.太湖近代沉积物中重金属元素的累积[J].*湖泊科学*, 2005, 17(2):143-150.
ZHU Guangwei, QIN Boqiang, GAO Guang, et al. Accumulation characteristics of heavy metals in the sediments of Lake Taihu, China[J]. *Journal of Lake Science*, 2005, 17(2):143-150.
- [10] 王海,王春霞,王子健.太湖表层沉积物中重金属的形态分析[J].*环境化学*, 2002, 21(5):430-435.
WANG Hai, WANG Chunxia, WANG Zijian. Speciation of heavy metals in surface sediment of TaiHu Lake [J]. *Environmental Chemistry*, 2002, 21(5): 430-435.
- [11] 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[J].*上海环境科学*, 2001, 20(2):71-74.
DAI Xiuli, SUN Cheng. The characteristics of heavy metals distribution and pollution in sediment from Lake TaiHu [J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2001, 20(2):71-74.
- [12] Liu E F, Shen J, Liu X Q. Geochemical features of heavy metals in core sediments of northwestern TaiHu Lake, China[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2005, 24(1): 73-81.
- [13] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 2:108-118.
- [14] Chernoff H. The use of faces to represent points in k-dimensional space graphically[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1973, 68(342):361-368.
- [15] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [16] Hilton J A, Davison W, Ochsnein U. A mathematical model for analysis of sediment core data: Implications for enrichment factor calculations and trace-metal transport mechanisms [J]. *Chemical Geology*, 1985, 48(1/2/3/4):281-291.
- [17] Di Toro D M, Mahony J D, Hansen D J, et al. Toxicity of cadmium in sediments: the role of acid-volatile sulfide [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1990, 9(12):1487-1502.
- [18] Di Toro D M, Mahony J D, Hansen D J, et al. Acid-

- volatile sulfide predicts the acute toxicity of cadmium and nickel in sediments[J]. *Environmental Science & Technology*, 1992, 26(1):96-101.
- [19] Ankley G T, Hoke R A, Giesy J P, et al. Evaluation of the toxicity of marine sediments and dredge spoils with the Microtox bioassay[J]. *Chemosphere*, 1989, 18:2069-2075.
- [20] 陈静生,董林,邓宝山,等.铜在沉积物各相中分配的实验模拟与数值模拟研究:以潘阳湖为例[J].*环境科学学报*, 1987, 7(2):140-149.
CHEN Jingsheng, DONG Lin, DENG Baoshan, et al. Modeling study on copper partitioning in sediments, a case study of PoYang Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1987, 7(2):140-149.
- [21] Wang C, Li X C, Zou L M, et al. Pb, Cu, Zn and Ni concentrations in vegetables in relation to their extractable fractions in soils in suburban areas of Nanjing, China[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2007, 16(2):199-207.
- [22] 张立,袁旭音,邓旭.南京玄武湖底泥重金属形态与环境意义[J].*湖泊科学*, 2007, 19(1):63-69.
ZHANG Li, YUAN Xuyin, DENG Xu. Speciation of heavy metals in sediments from Lake Xuanwu and their environmental significance[J]. *Journal of Lake Science*, 2007, 19(1):63-69.
- [23] Tessier A, Ccompell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7):844-850.
- [24] Forstner U. *Metal pollution in aquatic environment*[M]. Berlin: Springer, Verlag (Second Edition), 1981:128-132.
- [25] Fernández Alborés A, Pérez Cid B, Fernández Gómez E, et al. Comparison between sequential extraction procedures and single extractions for metal partitioning in sewage sludge samples[J]. *Analyst*, 2000, 125(7):1353-1357.
- [26] Rauret G, López-Sánchez J F, Sahuquillo A, et al. Improvement of the BCR three-step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999(1):57-61.
- [27] 郑乐平,刘玉梅,钱显文,等.太湖、巢湖沉积物中重金属污染的总量特征及其区域性差异[J].*环境化学*, 2009, 28(6):883-888.
ZHENG Leping, LIU Yumei, QIAN Xianwen, et al. The characteristics and regional differences of heavy metal contents in the sediments of Taihu Lake[J]. *Environmental Chemistry*, 2009, 28(6):883-888.
- [28] 刘红磊,尹澄清,唐运平.太湖梅梁湾岸边带底泥中重金属的形态与分布[J].*中国环境科学*. 2010, 30(3):389-394.
LIU Honglei, YIN Chengqing, TANG Yunping. Distribution and speciation of heavy metals in sediments at a littoral zone of Meiliang Bay of Taihu Lake[J]. *China Environmental Science*. 2010, 30(3):389-394.
- [29] 袁旭音,王爱华,许乃政.太湖沉积物中重金属的地球化学形态及特征分析[J].*地球化学*, 2004, 33(6):611-618.
YUAN Xuyin, WANG Aihua, XU Naizheng. Chemical partitioning of heavy metals and their characteristics for sediments from Lake Taihu[J]. *Geochimica*, 2004, 33(6):611-618.
- [30] 王海,王春霞,王子健.太湖表层沉积物中重金属的形态分析[J].*环境化学*, 2002, 21(5):430-435.
WANG Hai, WANG Chunxia, WANG Zijian. Speciation of heavy metals in surface sediment of TaiHu Lake[J]. *Environmental Chemistry*, 2002, 21(5):430-435.
- [31] 刘恩峰,沈吉,朱育新.重金属元素 BCR 提取法及在太湖沉积物研究中的应用[J].*环境科学研究*, 2005, 18(2):57-60.
LIU Enfeng, SHEN Ji, ZHU Yuxin. Determination of heavy metal chemical forms by BCR method for Taihu Lake sediments [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(2):57-60.
- [32] 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[J].*南京气象学院学报*, 2006, 29(5):700-705.
XIANG Yong, MIAO Qilong, FENG Jiangfan. Pollution of heavy metals in the bottom mud of Lake Taihu and its assessment of potential ecological risk[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2006, 29(5):700-705.
- [33] 焦伟,卢少勇,李光德,等.环太湖主要进出河流重金属污染及其生态风险评价[J].*应用与环境生物学报*, 2010, 16(4):577-580.
JIAO Wei, LU Shaoyong, LI Guangde, et al. Heavy metal pollution of main inflow and outflow rivers around the Taihu Lake and assessment of its potential ecological risk [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2010, 16(4):577-580.
- [34] 孙照斌,邴海健,无艳宏,等.太湖流域西沭湖沉积岩芯中重金属污染及潜在生态风险[J].*湖泊科学*, 2009, 21(4):563-569.
SUN Zhaobin, BING Haijian, WU Yanhong, et al. Contamination and potential ecological risk of heavy metals in lacustrine sediment core from Lake Xijiu, Taihu Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(4):563-569.
- [35] 石志芳.太湖沉积物中重金属污染特征及生态风险评价[D].陕西:西北农林科技大学, 2010.