

武汉典型湖泊沉积物中重金属累积特征及其环境风险*

唐阵武^{1,2}, 程家丽¹, 岳 勇^{2,3}, 陈玉敏²

(1: 华北电力大学能源与环境研究中心, 北京 102206)

(2: 水环境模拟国家重点实验室, 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

(3: 中国石油集团安全环保技术研究院, 北京 100083)

摘 要: 采集武汉市 8 个典型湖泊的表层沉积物, 分析 11 种重金属的含量及其不同形态组成, 研究了不同湖泊金属元素的富集与污染程度, 探讨了沉积物中重金属的污染来源及其潜在生态风险. 结果表明, 沉积物中重金属 Cd 累积最严重, Zn 和 Hg 也发生明显累积. 龙阳湖污染较重, 南太子湖和墨水湖污染中等, 其它湖泊污染总体较轻. 沉积物性质对重金属累积的影响不显著, 城市工业活动强烈影响着重金属的分布. 不同重金属的形态分布差异较大, Cd 生物可利用态含量最高, 其次为 Mn、Zn、Co、Cu 和 Pb; 而 Sb 和 Hg 以残留态占绝对优势, 生态风险较小. 相关分析和主成分分析表明, 化石燃料燃烧、金属冶炼等是武汉市湖泊沉积物中重金属来源的主要贡献者, 同时岩石风化等地球化学过程也影响着重金属的污染.

关键词: 湖泊沉积物; 重金属地累积指数; 形态; 主成分分析; 武汉

Accumulations and risks of heavy metals in the sediments from 8 typical lakes in Wuhan, China

TANG Zhenwu^{1,2}, CHENG Jiali¹, YUE Yong^{2,3} & CHEN Yumin²

(1: *Energy and Environmental Research Center, North China Electric Power University, Beijing 102206, P.R.China*)

(2: *State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, P.R.China*)

(3: *Institute of Safety and Environment Protection Technology of China National Petroleum Corporation, Beijing 100875, P.R.China*)

Abstract: The content and species of 11 heavy metals in surface sediments from 8 typical lakes located in Wuhan, China, were investigated, and the accumulation, contamination, potential ecological risks and possible sources of metals were discussed in this paper. According to the metal geoaccumulation indexes, the results showed that the lake sediments had heavily polluted by Cd and evidently by Zn and Hg. On the whole, heavy pollutions of metals were observed in Lake Longyang and medium pollution in Lake Nantaizi and Lake Moshui, whereas the slight pollution in other lakes. Distribution of metals in sediments was observed to be not significant correlation with physicochemical properties of sediments, whereas distinctly influenced by urban industries. 11 metals distributed differently in lake sediments. The largest percentage of the form of available speciation was Cd in the lake sediments, with much higher potential ecological hazards, followed by Mn, Zn, Co, Cu and Pb. In contrary, As, Sb and Hg were dominantly associated with the residual fraction, indicating rare adverse biological effects. Correlation analysis and principal component analysis indicated that the heavy metal accumulation in the lake sediments were mainly attributed to the combustion of fossil fuel accompanied with metal refining, and followed with the effects of the biogeochemical processes of earth weathering.

Keywords: Lake sediments; heavy metals; index of geoaccumulation; speciation; principal component analysis; Wuhan

由于一些重金属的难降解性、普遍的生物毒性、生物易累积性和生物放大作用, 环境中重金属污染—

* 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2003CB415204)和华北电力大学校博士基金项目(200822020)联合资助. 2008-05-26 收稿; 2008-10-21 收修稿稿. 唐阵武, 男, 1975 年生, 博士, 讲师; E-mail: zwtang@ncepu.edu.cn.

直倍受关注^[1-3]. 进入水环境的很多重金属, 易被水体中颗粒物吸附进而通过沉淀作用转移到沉积相中; 然而在一定条件下, 沉积物中的部分重金属又可释放到上覆水体, 成为二次污染源^[4-5]. 沉积物中重金属含量通常被认为是水体环境质量的重要表征之一, 也是沉积物重金属污染生态风险评价的基础.

仅了解重金属的含量还不足以准确评价重金属污染的生态风险. 沉积物中重金属通常以不同的地球化学形态存在. 不同形态的重金属不但表现出不同的物理化学行为, 而且生物可利用性也不同^[4-5]. 近年来, 通过重金属元素形态组成的分析, 较好的了解重金属污染的潜在生态风险^[6-7]. 沉积物中重金属的来源极其复杂, 除来源于矿物岩石的风化淋溶过程、矿山开发、工业废水和生活污水等, 很多研究还发现大气沉降、工业点源、交通运输等也是沉积物重金属污染的重要来源^[8-10].

湖泊是一类相对较为封闭的水体. 重金属污染物一旦进入湖泊就较难通过水流冲刷等作用被排出, 会对湖泊生态系统造成长期的影响. 武汉是长江中游最大的工业城市, 也是我国湖泊最多的城市之一. 武汉市大小湖泊接受了大量的地表径流、工业废水和生活污水. 同时, 这些湖泊也是武汉市重要的水产养殖水域, 其沉积物中重金属污染水平直接关系到水产品质量安全. 以前的研究虽调查了武汉市一些湖泊沉积物中部分重金属污染水平, 但对沉积物中重金属形态组成、重金属元素的入湖来源缺乏深入的研究, 以致于无法科学地评价沉积物中重金属污染潜在的生态危害^[11-13]. 本文选取了武汉市市区和近郊区具有代表性的湖泊, 通过调查沉积物中 11 种重金属元素含量及形态赋存特征, 阐明典型重金属分布规律, 准确评价重金属污染的生态风险, 揭示湖泊沉积物中重金属污染的主要来源, 以期为武汉湖泊重金属污染的风险管理和污染治理提供理论依据和决策支持.

1 材料和方法

1.1 样品采集

根据武汉市产业布局和湖泊分布特点, 优化选取了位于市区和近郊区的具有代表性的 8 个湖泊(图 1). 用 Van Veen 采泥器(Eijkelamp, 荷兰)分别在每个湖泊采集 3 个表层 5cm 的沉积物, 混匀后置于聚乙烯塑料袋中, 于实验室内自然风干, 剔除动植物残体和石块, 研磨, 过 200 目尼龙筛, 装瓶待测.

1.2 分析测定

样品的处理采用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 消煮, 感应耦合等离子体光学发射光谱法(ICP-AES, IRIS Instrepid II 型, 美国热电公司)测定钴、铬、铜、锰、镍、锌, 感应耦合等离子体质谱法(ICP-MS, X Series II 型, 美国热电公司)测定镉、铅、铈, 氢化物-原子荧光光谱法(XGY-1011A 型, 中国地质科学院物理化学探测所)测定锑, 冷蒸气-原子荧光光谱法(XGY-1011A 型, 中国地质科学院物理化学探测所)测定汞. 分析所用试剂均为优级纯, 所用的水均为超纯水, 分析过程均加入国家标准土壤参比物质(GSS 1, GSS 8, GSS 9, GSS 10)进行质量控制, 其结果符合质控要求.

参考相关的连续提取方法^[14-16], 将沉积物中重金属按可溶解和可交换态(EXC)、碳酸盐态(CARB)、易还原氧化物态(ERO)、有机质态(OM)、残余氧化物态(RO)和残渣态(RES-R)依次提取. 6 种提取态重金属的回收率(各提取态之和与重金属元素总含量之比)大多在 85%–115%, 提取实验结果可靠.

称取 10.0g 沉积物, 用 10.0ml 沸腾后冷却的去离子水充分溶解, 放置 30min, 用 pH 计(Sartorius, 德国)测定 pH 值^[17]. 称取一定量风干沉积物, 用 1.6%(v/v)的盐酸去除无机碳, 然后经 60℃烘干后用 Liqui TOC 分析仪(Elementar, 德国)测定沉积物有机碳(TOC)含量(燃烧温度为 950℃)^[17]. 沉积物粒径分析见参考文献[18], 即用 20%的 $(\text{NaPO}_3)_6$ 作分散剂, SADL-3001 激光粒度分析仪(日本)测定. 沉积物水分含量的测定用 105℃烘 12 h 后质量损失法计算^[17].

1.3 风险评价方法

地累积指数(I_{geo})是德国学者于 1979 年提出的一种基于重金属总浓度与背景值的关系来确定重金属污染程度的参数, 其计算公式为^[19]:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_n}{1.5 \times B_n} \quad (1)$$

式中, C_n 是小于 $2\mu\text{m}$ 沉积物中元素 n 的含量, B_n 为粘质沉积岩(即普通岩)中该元素的地球化学背景值; 1.5 是考虑了各地岩石差异可能会引起的变动而取的系数.

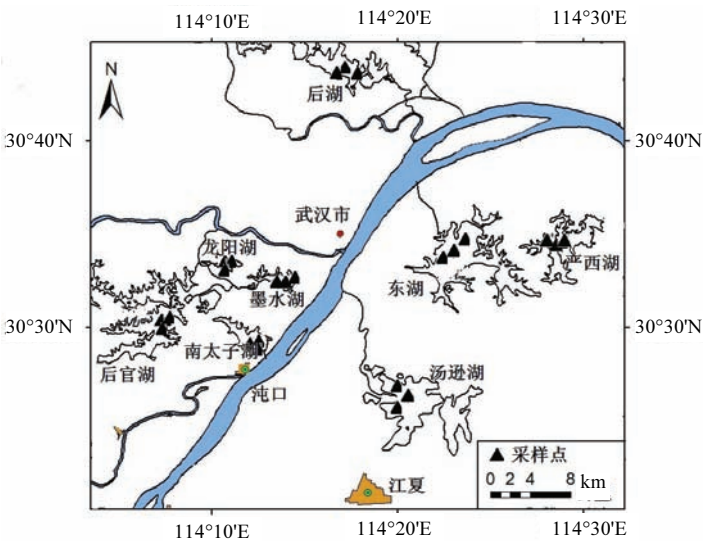


图 1 湖泊表层沉积物采样点位置
Fig.1 Sampling sites of surface sediments from different lakes

I_{geo} 与污染程度的关系如表 1 所示^[19]. 需要指出的是, 通常地累积指数计算中选用工业化前全球沉积物重金属的平均背景值为参比值, 而不同地球化学背景可能造成各地所获得的重金属污染信息的差异, 因此本文采用湖北省土壤重金属背景值作为计算标准(表 2).

表 1 地累积指数与污染分级标准
Tab.1 Index of geoaccumulation and series of degree

I_{geo}	<0	0-1	>1-2	>2-3	>3-4	>4-5	>5
分级	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	无-中	中	中-强	强	强-极强	极强

2 结果与讨论

2.1 重金属累积特征

沉积物中各重金属呈现出不同的富集累积特征, Cd、Cu、Hg、Pb 和 Zn 的 I_{geo} 平均大于 0, 有一定程度的累积, 其中以 Cd 累积最为明显; 其余各重金属 I_{geo} 基本小于 0, 湖泊沉积物污染较轻(表 2). 各湖泊沉积物中重金属污染程度也迥异. 龙阳湖重金属累积最为明显, 除 Co、Mn 和 Ni 外, 其余重金属的 I_{geo} 均大于 0, Hg、Pb、Zn、Cd 和 Cu 污染达到了中等到较强的污染水平. 龙阳湖位于武汉汉阳工业区腹地, 钢铁、化工、合金制造、油漆燃料等工业星罗棋布, 而且大量的生活污水也直接排入了该湖泊. 位于汉阳的南太子湖和墨水湖, 沉积物中 Cd、Hg、Pb 和 Zn 也发生了污染. 位于近郊的严西湖、后官湖、汤逊湖和后湖沉积物中各重金属 I_{geo} 基本小于 0, 表明其重金属污染程度较轻. 城市市区特别是工业区湖泊重金属含量高于郊区湖泊, 这一现象明显反映了城市活动对水环境重金属污染的贡献.

2.2 重金属形态赋存

由于地球化学性质的差异, 不同重金属在环境中以不同的形态存在. 不同形态的重金属有着不同的生物有效性. 为更准确了解重金属的生物有效性和潜在的环境风险, 分析了湖泊沉积物中重金属的可溶解和可交换态、碳酸盐态、易还原氧化物态、有机质态、残余氧化物态和残渣态 6 种形态的分布(图 2).

表2 不同湖泊沉积物各重金属元素的地积累指数及污染指数分级*

Tab.2 The indexes of geoaccumulation (I_{geo}) and series of I_{geo} for metals in sediments from different lakes

	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Sb	Sr	Zn
L1 I_{geo}	1.50	-0.50	-0.31	0.23	0.71	-0.62	-0.29	0.51	-0.22	-0.12	1.70
分级	2	0	0	1	1	0	0	1	0	0	2
L2 I_{geo}	2.72	-0.61	0.05	2.90	4.01	-1.22	-0.06	1.83	0.98	0.37	2.44
分级	3	0	1	3	5	0	0	2	1	1	3
L3 I_{geo}	0.81	-0.65	0.53	0.04	0.40	0.15	-0.50	0.41	0.37	-0.72	1.52
分级	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	2
L4 I_{geo}	1.49	-0.25	0.17	0.39	0.27	0.55	-0.15	0.74	0.20	-0.81	2.06
分级	2	0	1	1	1	1	0	1	1	0	3
L5 I_{geo}	0.54	-0.31	-0.62	-0.17	-0.43	-0.29	-0.42	0.12	-0.22	-1.06	-0.06
分级	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
L6 I_{geo}	-0.80	-1.01	-1.13	-1.13	-0.51	-0.98	-1.51	-0.61	-1.25	-1.57	-1.35
分级	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L7 I_{geo}	0.08	-0.53	-0.66	-0.51	-0.29	-0.78	-0.83	-0.03	-0.53	-1.57	-0.55
分级	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L8 I_{geo}	-0.03	-0.29	-0.50	-0.42	-0.88	-0.95	-0.47	-0.04	-0.71	-1.14	-0.55
分级	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
背景值(mg/kg)	0.172	15.40	86.00	30.70	0.080	712.0	37.30	26.70	1.65	116.0	83.6

* L1 为南太子湖, L2 为龙阳湖, L3 为东湖, L4 为墨水湖, L5 为严西湖, L6 为后官湖, L7 为汤逊湖, L8 为后湖; 背景值为湖北省土壤重金属含量背景值。

Cd的可溶解和可交换态组成最大, 分别占其总量的14.7%–52.0%, 平均为41%; 其次为Sr和Mn, 分别占其总量的32.2%和20.3%。Mn、Co、Cd和Zn的碳酸盐态含量较高, 为26.6%–39.4%, 其它重金属较低; 可溶解和可交换态重金属多为吸附在粘土、腐殖质及其它成分上的金属, 易于迁移转化, 被生物吸收^[14]; 碳酸盐态金属由于与碳酸盐矿物结合, 对环境条件特别是pH值敏感, 当pH值下降时易重新释放而进入环境中^[14]。由于被调查的8个湖泊沉积物pH值为6.24–7.30, 大部分为酸性, 有利于碳酸盐态重金属的释放。因此, Cd、Mn、Co、Sr和Zn的生物有效性较大, 存在较大潜在生态风险。这与太湖和南京的玄武湖的研究结果有所不同^[7,20–21]。

易还原氧化物态金属是金属元素与Fe-Mn氧化物吸附结合或本身就成为氢氧化物沉淀的部分。铁锰氧化物和氢氧化物具有较大的比表面积, 对重金属有很大的离子交换和吸附容量。这部分金属属于较强的离子键结合的化学形态, 所以不易释放^[21]。当水体中氧化还原电位降低时, 或者缺氧时, 这种结合形态的重金属键被还原, 可能造成对水体的二次污染^[21]。本研究中, 易还原氧化物态组成较高的金属为Zn、Pb、Mn、Co和Cd, 分别占其总量6.7%–22.7%, 6.8%–15.2%, 7.9%–10.3%, 9.0%–12.4%, 5.1%–11.0%。Zn在土壤和沉积物中与Fe-Mn氧化物相结合具有高稳定常数^[22]; Mn可能是有相当一部分以还原态 Mn^{2+} 存在, 因为在大多数天然水体中, Mn^{2+} 的氧化过程比 Fe^{2+} 慢得多^[20]。Pb的氧化态含量比较高, 这可能是由于我国南方土壤发育于玄武岩, 铁锰氧化物高且具有很强的吸附性能^[23]。

有机质态重金属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, 只有在强氧化条件下才可以分解^[20]。有机质态Cu高于易还原氧化物态, 有机质态Pb远低于易还原氧化物态, 其它金属这两种相态组成相当。Pb、Cu、Co和Ni的残余氧化态多为10%–20%, 其它金属多在10%以下。残余氧化态重金属是指与晶体铁氧化物结合的重金属, 这部分当外界条件发生变化时也会释放出来, 但释放难度相对较大^[24]。因此, 在有机质态和残余氧化态中, 除Cu、Pb和Co具有一定的释放潜力外, 其它金属释放潜力有限。

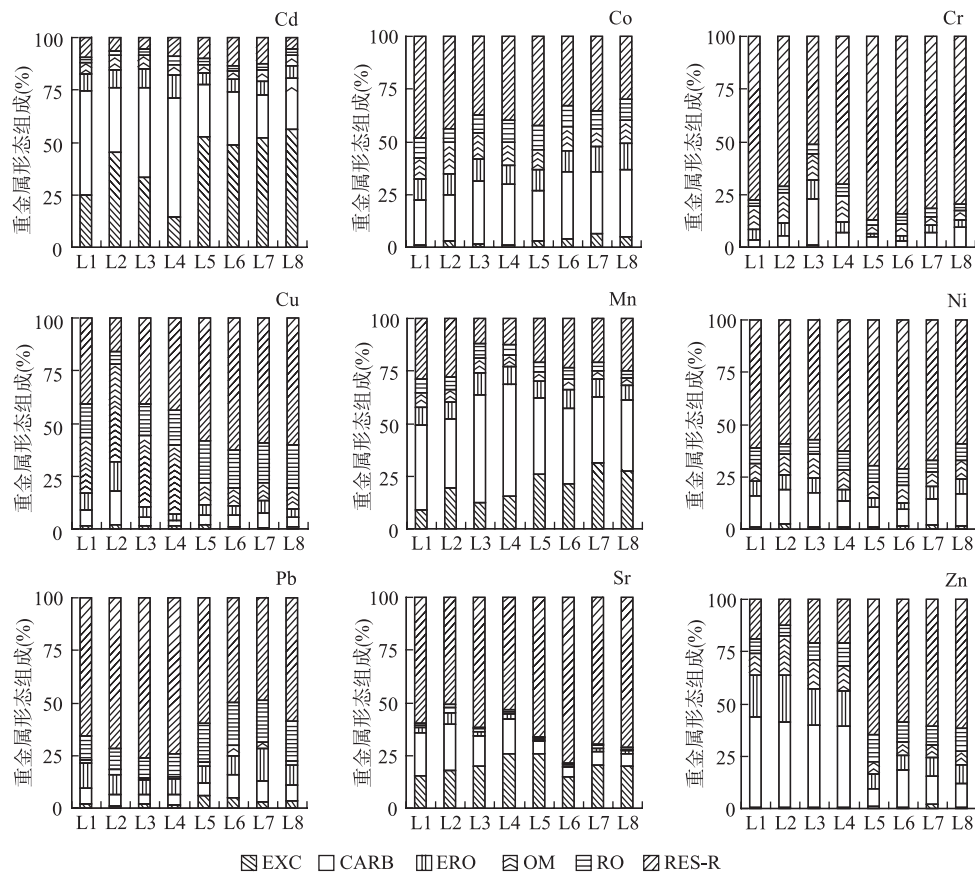


图 2 武汉典型湖泊中重金属的形态分布(EXC: 可溶解和可交换态; CARB: 碳酸盐态; ERO: 易还原氧化物态; OM: 有机质态; RO: 残余氧化态; RES-R: 残渣态)

Fig.2 Speciation of heavy metals in sediments of the lakes located in Wuhan(EXC: Soluble plus exchangeable fraction, CARB: Fraction bound to carbonate, ERO: Fraction bound to easily reducible oxides, OM: Fraction bound to organic matter, RO: Fraction bound to residual oxides, RES-R: Residual fraction)

Hg 和 Sb 以残渣态占绝对优势, 平均占 90%以上, 潜在生态风险较低; 高残渣态的 Hg 与黄浦江和官厅水库的研究结果不同^[25-26]. Cr、Pb 和 Ni 残渣态也在 50%以上. Cd 的残渣态仅占总量的 5.5%–13.2%, 平均仅为 8.9%, 为 11 种重金属中最低, 具有较强的活动性, 易发生再迁移过程, 这种现象也在很多其它研究中发现^[27-29].

除惰性的残渣态不能被生物利用外, 其余形态的重金属均能被生物利用, 称为生物可利用态. 武汉湖泊沉积物中重金属 Cd 的生物可利用态含量最高, 其次为 Mn、Zn、Co、Cu 和 Pb. 同时, 湖泊沉积物中 Cd 的累积程度最明显, 为中等污染程度(表 2), 因此重金属 Cd 污染的生态风险最大, 应引起足够的重视. Pb 虽然污染程度为低到中等, 但由于其生物可利用态含量较高和生物毒性较强, 也具有较大的潜在生态风险. Mn 和 Co 的地累积指数 I_{geo} 虽基本小于 0, 但其较高的生物可利用态存在形式表明其潜在的生态风险也不容忽视.

2.3 污染源

为探讨沉积物地球化学性质对沉积物累积重金属的影响以及判断重金属的可能来源, 分析了重金属间以及重金属与沉积物有机碳含量、pH、水分含量、粒度分布之间的线性相关性(表 3). 结果表明, Cu、Hg、Cd、Pb、Sb、Sr 和 Zn 之间相关性显著或极显著, 反映了这些重金属具有相似的来源或受某些因素

共同控制;但这些重金属与 Mn 的相关性并不显著,表明湖泊沉积物中 Mn 的氧化物或氢氧化物共沉淀或吸附这些金属元素较少,也反映了人为来源对这些重金属的贡献^[30]. 重金属 Cr 和 Ni 相关性不显著,但它们却与 Pb、Sb、Sr 和 Zn 的相关性分别达到了显著性水平,反映了这两重金属和其它 4 个重金属有着部分相似的来源. Co 与其它金属相关性不显著,说明了 Co 的受控因素或来源与其它金属元素迥异(表 3). 一般认为沉积物 pH 和有机碳含量是影响重金属分布的俩个重要控制因子^[10],但本次研究中 pH、有机碳含量与重金属的相关性大多不显著. 而且沉积物水分含量、粒度分布与大多重金属的相关性也基本不显著,表明了湖泊沉积物中重金属分布受多种因素共同控制. 为进一步探讨重金属的污染来源,对沉积物中重金属进行了主成分分析. 主成分分析作为一种重要统计方法已在确定污染源以及自然和人为因素对重金属的贡献等方面得到广泛应用^[31-32]. 武汉湖泊沉积物重金属间具有较强的相关性,且 Bartlett 球度检验相伴概率为 0.000,小于显著性水平 0.01,因此适合于因子分析. 重金属含量的主成分分析结果表明,前两个主成分的累积贡献率为 86.63%,反映了全部数据大部分信息(表 4). 第一主成分的贡献率为 65.87%,Pb、Cd、Sb、Sr、Zn、Cu 和 Hg 具有较大的载荷,并且变化方向一致.

由沉积物重金属的分布特征可知,位于武汉市汉阳工业区腹地的龙阳湖沉积物中Cd、Cu、Hg、Pb、Sb和Zn含量远高于其它湖泊. 汉阳工业区布局着大量的化工、冶金、合金制造、电镀、油漆颜料制造等工业. 位于该区的墨水湖沉积物中Cd、Cu、Pb和Zn含量也明显高于其它湖泊(表2). Sb主要来源于垃圾燃烧、冶炼和煤炭和石油的燃烧^[33]; Pb主要来源于煤燃烧、含铅矿石的工业利用、原油和含铅汽油的燃烧^[34]; Cu、Zn主要来自于垃圾的焚烧和工业排放,部分也来自燃煤的排放^[26]; 人类对含镉矿物的开采、冶炼是引起沉积物镉污染的重要原因之一; 另外合金制造和电镀等工业均向环境排放大量的镉. 此外,煤、原油中均含有微量的镉,在燃烧过程中可以释放到大气,最终汇入沉积物^[35]. 并且由相关分析表明,第一主成分上载荷较高的7种重金属间相关性均显著或者极显著(表3),反映着相似的来源. 因此,第一主成分主要代表了化石燃料燃烧、金属冶炼等工业排放的贡献.

表 3 重金属元素间以及重金属与沉积物性质的相关性¹⁾
Tab.3 The correlation matrix of different metals, between metals and the characteristics of sediments

	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Sb	Sr	Zn
Co	0.07	1									
Cr	0.50	0.14	1								
Cu	0.86**	0.21	0.64*	1							
Hg	0.79**	-0.14	0.43	0.64*	1						
Mn	0.29	0.36	0.36	0.29	0.07	1					
Ni	0.71*	0.36	0.50	0.86**	0.50	0.14	1				
Pb	0.93**	0.14	0.57*	0.93**	0.71*	0.36	0.79**	1			
Sb	0.76**	0.04	0.69*	0.76**	0.69*	0.40	0.62*	0.84**	1		
Sr	0.86**	0.07	0.64*	0.86**	0.79**	0.14	0.71*	0.79**	0.76**	1	
Zn	0.91**	0.18	0.62*	0.98**	0.69*	0.33	0.84**	0.98**	0.82**	0.84**	1
TOC	0.50	0.00	0.43	0.50	0.43	0.07	0.50	0.43	0.62*	0.64*	0.47
粘土	-0.14	0.64*	-0.07	0.00	-0.36	0.29	0.14	-0.07	-0.18	-0.14	-0.04
砂石	0.21	-0.43	0.43	0.21	0.43	-0.07	0.07	0.29	0.40	0.21	0.26
pH	0.57*	0.07	0.50	0.57*	0.50	0.29	0.43	0.50	0.33	0.57*	0.55
水	0.36	0.43	0.57*	0.50	0.14	0.21	0.50	0.43	0.47	0.36	0.47

1) * $P<0.05$; ** $P<0.01$.

第二主成分上载荷较大的金属主要为Mn和Co(表4)。重金属分布特征分析表明,各湖泊沉积物中Co分布没有明显的区域分异,位于市区的湖泊和郊区的湖泊差别不大;市区湖泊沉积物的Mn含量略高于郊区湖泊(表2)。保守元素Mn主要来源于地球化学过程,但Mn也是金属材料的常见元素,也可能受到钢铁冶炼和工业废水的影响。Co主要来源于岩石风化等过程,并且本研究中Co含量与粘土含量相关性显著。因此第二主成分主要反映了岩石风化等地球化学过程对沉积物中重金属污染的影响。

3 结论

武汉市典型湖泊表层沉积物中重金属污染水平为低到中等,市内工业区的湖泊沉积物重金属污染明显高于郊区湖泊。城市人为活动对湖泊重金属污染的贡献明显,化石燃料燃烧、金属冶炼等工业排放是武汉市湖泊沉积物中重金属来源的主要贡献者。由于累积水平和赋存形态的差异,湖泊沉积物中11种重金属潜在的生态风险迥异。重金属Cd含量较高且主要以生物可利用态形式存在,生态风险较大;Pb、Zn和Cu虽然污染程度为低到中等,但其生物可利用态含量较高,也具有较大的潜在生态风险。而沉积物中Hg虽然有一定程度的污染,但主要以残渣态存在,生态风险较小。

4 参考文献

[1] Coz A, Rodríguez-Obeso O, Alonso-Santurde R *et al.* Toxicity bioassays in core sediments from the Bay of Santander, northern Spain. *Environ Res*, 2008, **106**(3): 304-312.

[2] Nguyen HL, Leermakers M, Elskens M *et al.* Correlations, partitioning and bioaccumulation of heavy metals between different compartments of Lake Balaton. *Sci Total Environ*, 2005, **341**(1-3): 211-226.

[3] Dehn LA, Follmann EH, Thomas DL *et al.* Trophic relationships in an Arctic food web and implications for trace metal transfer. *Sci Total Environ*, 2006, **362**(1-3): 103-123.

[4] Almeida CM, Mucha AP, Vasconcelos MT. Influence of the sea rush *Juncus maritimus* on metal concentration and speciation in estuarine sediment colonized by the plant. *Environ Sci Technol*, 2004, **38**(11): 3112-3118.

[5] Bryan GW, Langston WJ. Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries: a review. *Environ Pollut*, 1992, **76**(2): 89-131.

[6] Alomary AA, Belhadj S. Determination of heavy metals (Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn) by ICP-OES and their speciation in Algerian Mediterranean Sea sediments after a five-stage sequential extraction procedure. *Environ Monit Assess*, 2007, **135**(1-3): 265-280.

[7] 张立, 袁旭音, 邓旭等. 南京玄武湖底泥重金属形态与环境意义. *湖泊科学*, 2007, **19**(1): 63-69.

[8] Lin C, He M, Zhou Y *et al.* Distribution and contamination assessment of heavy metals in sediment of the Second Songhua River, China. *Environ Monit Assess*, 2008, **137**(1-3): 329-342.

[9] 朱伟, 边博, 阮爱东. 镇江城市道路沉积物中重金属污染的来源分析. *环境科学*, 2007, **28**(7): 1584-1589.

[10] Ona LF, Melinda A, Alberto P *et al.* Levels of lead in urban soils from selected cities in a central region of the Philippines. *Environ. Sci Pollut Res In*, 2006, **13**(3): 177-183.

表4 湖泊沉积物中重金属主成分矩阵
Tab.4 Component matrix for heavy metals
in sediment form lakes

	第一主成分	第二主成分
特征值	7.245	2.284
贡献率(%)	65.868	20.766
累积贡献率(%)	65.868	86.634
Cd	0.983	-0.122
Co	0.068	0.693
Cr	0.578	0.591
Cu	0.922	-0.344
Hg	0.897	-0.410
Mn	0.029	0.917
Ni	0.810	0.454
Pb	0.984	-0.133
Sb	0.963	0.092
Sr	0.934	-0.164
Zn	0.929	0.232

- [11] 乔胜英, 蒋敬业, 向武等. 武汉市湖泊中重金属污染状况. 水资源保护, 2007, **23**(1): 45-48.
- [12] 苏秋克, 祁士华, 蒋敬业等. 武汉城市湖泊汞的环境地球化学评价. 地球化学, 2006, **35**(3): 221-226.
- [13] 乔胜英, 蒋敬业, 向武等. 武汉地区湖泊沉积物重金属的分布及潜在生态效应评价. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(3): 353-357.
- [14] Han FX, Banin A. Long-term transformations and redistribution of potentially toxic heavy metals in arid-zone soils. I: Under saturated conditions. *Water Air Soil Pollut*, 1997, **95**: 399-423.
- [15] Han FX, Banin A. Solid-phase manganese fractionation changes in saturated arid-zone soils: Pathways and kinetics. *Soil Sci Soc Am J*, 1996, **60**: 1072-1080.
- [16] 张平, 齐剑英, 杨春霞等. 分级提取-电感耦合等离子体质谱分析黄铁矿烧渣中重金属的化学形态. 冶金分析, 2006, **26**(6): 6-9.
- [17] Tang Z, Yang Z, Shen Z *et al.* Residue of organochlorine pesticides in sediments from typical catchment of Yangtze River, China. *Arch Environ Contam Toxicol*, 2007, **53**: 303-312.
- [18] Ding ZL, Sun JM, Liu TS *et al.* Wind-blown origin of the Pliocene red clay formation in the central Loess Plateau, China. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, **161**: 135-143.
- [19] 弓晓峰, 陈春丽, 周文斌等. 鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价. 环境科学, 2006, **27**(4): 732-736.
- [20] 王海, 王春霞, 王子健. 太湖表层沉积物中重金属的形态分析. 环境化学, 2005, **21**(5): 430-435.
- [21] 千娜, 金章东, 姚拓. 太湖梅梁湾沉积物中重金属的赋存相态及其对污染历史的示踪. 湖泊科学, 2007, **19**(4): 397-406.
- [22] González MJ, Ramos L, Hernández LM. Distribution of trace metals in sediments and their relationship with their accumulation in earthworms. *Int J Environ Anal Chem*, 1994, **57**: 135-150.
- [23] 罗金发, 孟维奇, 夏增禄. 土壤重金属(锡、铅、铜)化学形态的地理分异研究. 地理研究, 1998, **17**(2): 265-272.
- [24] Han FX, Banin A, Kingery WL *et al.* New approach to studies of heavy metal redistribution in soil. *Adv Environ Res*, 2003, **8**: 113-120.
- [25] 丁振华, 王文华, 刘彩娥等. 黄浦江江水和沉积物中汞的分布和形态特征. 环境科学, 2005, **26**(5): 62-66.
- [26] 刘晓端, 徐清, 葛晓立等. 密云水库沉积物中金属元素形态分析研究. 中国科学(D 辑), 2005, **35**(增刊 I): 288-295.
- [27] Fytianos K, Lourantou A. Speciation of elements in sediment samples collected at lakes Volvi and Koronia, N. Greece. *Environ Int*, 2004, **30**(1): 11-17.
- [28] Galán E, Gómez-Ariza JL, González I *et al.* Heavy metal partitioning in river sediments severely polluted by acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt. *Appl Geochem*, 2003, **18**(3): 409-421.
- [29] 朱广伟, 陈英旭, 周根娣等. 运河(杭州段)沉积物中重金属分布特征及变化. 中国环境科学, 2001, **21**(1): 65-69.
- [30] 蔡清海, 杜琦, 钱小明等. 福建三沙湾海洋沉积物中重金属和过渡元素来源分析. 地质学报, 2007, **81**(10): 1444-1448.
- [31] 李玉, 俞志明, 宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源. 环境科学, 2006, **27**(1): 137-141.
- [32] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. *Environ Pollut*, 2001, **114**(3): 313-324.
- [33] 何孟常, 万红艳. 环境中锑的分布、存在形态及毒性和生物有效性. 化学进展, 2004, **16**(1): 131-135.
- [34] Duzgoren-Aydin NS. Sources and characteristics of lead pollution in the urban environment of Guangzhou. *Sci Total Environ*, 2007, **385**(1-3): 182-195.
- [35] 唐阵武. 长江水系武汉段典型有毒物污染特征及生态风险[博士学位论文]. 北京: 北京师范大学, 2007.