

## 武汉市东湖沉积物重金属与城市污染环境的关系\*

刘振东<sup>1,2</sup>, 刘庆生<sup>3</sup>, 杜 耘<sup>1</sup>, 王志勇<sup>1,2</sup>

(1: 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100039)

(3: 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 武汉 430074)

**摘 要:**应用主成份分析原理,按照主成份提取的信息超过原始信息 84% 的原则,对武汉市东湖的主体湖区(郭郑湖和塘林湖)的 0 cm–7 cm 的沉积物 30 个代表性样品 12 种元素进行分析,确定其沉积物的重金属的污染源的主要类型. 结果表明,郭郑湖第一污染源(占 56%)为湖区周围的工业燃煤尘埃,其次(占 16%)为交通尾气、生活污水和雨水片流,再次(占 12%)为电镀、印刷等行业的工业污水. 塘林湖第一污染源(占 65%)为湖区周围的生产性煤燃烧的粉尘,其次(17%)为生活污水、医院污水和周围土壤的淋溶作用,再次(占 9%)为废旧电池、报章杂志和农用物资等. 采用均方根综合污染指数法评价分析东湖主体湖区的沉积物的污染程度为轻度污染,其中郭郑湖的污染程度高于塘林湖.

**关键词:**湖泊沉积物; 重金属元素; 污染环境; 武汉东湖

## Characteristics of heavy elements in sediments of Lake Donghu (Wuhan) and relations to urban pollution

LIU Zhendong<sup>1,2</sup>, LIU Qingsheng<sup>3</sup>, DU Yun<sup>1</sup> & WANG Zhiyong<sup>1,2</sup>

(1: *Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, P. R. China*)

(2: *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, P. R. China*)

(3: *Institute of Geophysics and Geometrics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, P. R. China*)

**Abstract:** In order to determine the main types of pollution origins of the heavy metals of sediments of Lake Donghu, Wuhan, based on principle of principal components and the rule of picked-up information which is over 84% of original ones, we have analyzed twelve elements of thirty representative samples of 0–7 cm sediments of Lake Guozheng and Lake Tanglin, which are the main sub lake of Lake Donghu, Wuhan city. The results indicate that for Guozheng Lake sediments, the first pollution origin (56%) is industry coal dust around the lake, the second origins (16%) are tail gas, domestic sewage and rain flow, and the third parts(12%) are industry sewage with electroplate and press etc. For Lake Tanglin, the first pollution origin (65%) is atmosphere dust which is from industry coal combustion, the second origins (17%) are sewage with household, hospital and soil etc, and the third parts(9%) are disused battery, newspapers and farming materials etc. Employing the comprehensive pollution indexes of heavy metals, which were calculated by root mean square on the background values, to evaluate the pollution degree of sediments of main sublakes of Lake Donghu, it is found that both of them belong to light contamination and the pollution degree of Lake Guozheng is higher than that of Lake Tanglin.

**Keywords:** Lake sediments; heavy elements; urban pollution; Lake Donghu(Wuhan)

城市内陆湖泊沉积物的重金属成份及含量记录了城市经济发展乃至人文环境变化的信息. 湖沉积物携带的重金属通常不易被微生物分解,除少量通过鱼类等的捕捞带出水体外,大部分沉淀在湖底沉积物中,且有明显的分布规律. 因此,湖泊沉积物的重金属的含量可以反映周边与此相关环境的污染程度<sup>[1–4]</sup>. 近

\* 国家自然科学基金(40474025,40174007)、973 计划(2003CB415201)联合资助.

2004–12–28 收稿;2005–05–08 收修改稿. 刘振东,男,1966 年生,讲师;E-mail:zhendong@asch.whigg.ac.cn.

20 年来,武汉钢铁工业与周边印刷业等高污染企业的发展以及生活污水的排放,导致东湖重金属的污染呈加重趋势<sup>[1]</sup>. 而以往专家学者对东湖的研究主要侧重在富营养化程度方面<sup>[5-7]</sup>,尤其对重金属的空间分布规律及来源研究不够. 如况琪军等认为,东湖湖区周围人口密度不断增加,工农业生产、水产养殖以及旅游业的迅猛发展,大量营养物质进入东湖,使东湖的富营养化程度加剧<sup>[5]</sup>;而造成东湖水质恶化与富营养化日趋严重的原因,除去外源污染外,还有湖体的过渡分割以及分割之后的过渡开发(如渔业、旅游)<sup>[6]</sup>;杨扬认为,实施洗涤剂禁(限)磷措施后,城市周围水域的富营养化程度明显改善<sup>[8]</sup>. 本文通过对东湖 30 个代表性样品的 12 种元素的分析,结合湖泊周边环境状况,阐明东湖沉积物重金属的空间分布特征及其与城市污染环境的关系,为环境治理和保护提供科学依据.

1 武汉东湖环境背景

武汉东湖属于城市内陆型湖泊,位于市东北部,面积 34 km<sup>2</sup>,其水位涨落与地面径流以及沿湖排放的城市污水量有关. 湖区周围有武汉大学、磨山风景区、市结核病医院、武汉钢铁公司及梨园医院等单位,年入湖污水达 27 × 10<sup>4</sup> t<sup>[9]</sup>. 东湖的主体湖区以沿湖大道为界,南部为郭郑湖、北部为塘林湖,水体在落雁桥处相连. 郭郑湖有环湖公路围绕,南部、西部交通流量大. 东湖兼有淡水养殖与游览观光等功能.

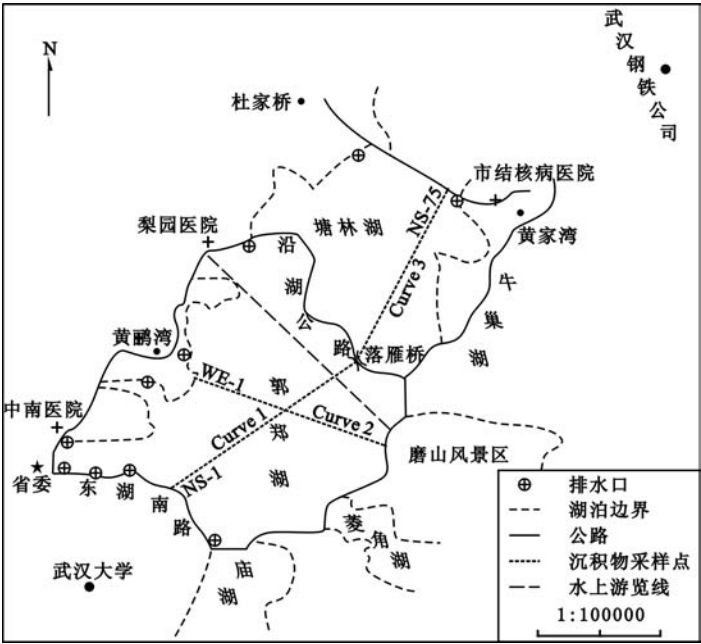


图 1 东湖现代沉积物采样点分布

Fig. 1 Location of samples in the Lake Donghu, Wuhan

2 样品采集和实验方法

湖泊表层沉积物的重金属含量的变化特征与现代污染源的空间分布密切相关<sup>[9]</sup>. 东湖沉积物的沉积速率大约为 0.33 cm/a<sup>[1]</sup>,最近 20 年的沉积厚度约为 7 cm. 样品采集时间为 2003 年 11 月. 为了有代表性的采集东湖表层沉积物(0-7 cm)的样品,采集方法沿‘十’字剖面进行. 东西(WE)剖面从郭郑湖的黄鹄湾(WE-1)开始到磨山风景区(WE-39)结束取样 39 个,南北(NS)剖面从武汉大学(NS-1)开始到小潭湖(NS-75)结束,在郭郑湖、塘林湖分别采样 38、37 个. 从采集的 114 个样品中挑选 30 个样品,在中国地质大学(武汉)测试中心利用 X 射线荧光光谱仪 SRS-303 做重金属分析,所分析的元素有 Zn、V、Ti、Pb、Ni、Mn、Cr、Cu、Co、Ba、TFe(全铁)和 P 共 12 种.

3 结果

3.1 东湖沉积物重金属的一般分布特征

从表 1 可看出,含量最高的元素有铁、钛、锰,约占沉积物总量的 9%。各点位之间元素含量变化最大的是有机质 P(变异系数 0.39),P 与湖泊的富营养化程度有关;较小是 Ti(变异系数 0.05),Ti 是典型的地壳元素<sup>[10]</sup>。人类活动对湖泊的影响主要表现在重金属和有机物(P)含量的增加<sup>[7]</sup>。据报道,在 30–5 cm 的范围内,郭郑湖沉积物的 P 含量由底层向表层逐渐增大,在 5–0 cm 范围内又逐渐变小<sup>[7]</sup>。东湖是典型的城郊型湖泊,它的富营养化程度与居民生活和工农业废水的大量输入有机物(P)有关<sup>[5–7]</sup>。

表 1 东湖沉积物重金属含量的统计结果<sup>1)</sup>  
Tab. 1 Statistics of the heavy metals content in sediments of Lake Donghu

元素	郭 郑 湖			塘 林 湖		
	变化范围	平均值	变异系数	变化范围	平均值	变异系数
TFe	49.4–82.1	72.9	0.12	32.1–78.1	68.6	0.19
Zn	104–177	141.1	0.1	104–148	128.7	0.11
V	85.8–149	130.9	0.12	66.8–140	122.9	0.16
Ti	4371–5549	5151.7	0.05	4131–5484	5118	0.07
Pb	30.6–47.9	39.1	0.14	25.9–48.9	42.9	0.14
P	549–1566	898.7	0.38	548–1552	767.9	0.39
Ni	25.8–50.8	42.6	0.15	20.3–48.4	40.2	0.19
Mn	712–1610	1116.3	0.18	590–1610	1000.2	0.25
Cr	77.5–114	103.1	0.1	71.5–105	94.8	0.1
Cu	38.9–63.7	55.5	0.11	33.4–65.1	55.2	0.18
Co	17.1–26.5	22.4	0.11	12.7–26.5	21.4	0.17
Ba	441–712	617.8	0.12	364–663	579.8	0.14

1) TFe 的单位为 g/kg,其余元素的单位为 mg/kg,变异系数无量纲。

元素含量的背景值采用 MR–GL–CNS–0245 地质矿产 GBW(E)070007 水系沉淀物成分分析标准<sup>①</sup>。图 2 显示,12 个元素中,有 2/3 的元素高于背景值,其中 Cr、Ni 高于背景值两倍以上,说明东湖沉积物污染元素种类较多,富营养化程度较高(P 是背景值的 1.35 倍)。南北两湖相比,郭郑湖有 7 种元素(TFe、Zn、V、Ti、P、Mn、Cr)的含量高于塘林湖,表明郭郑湖的沉积物比塘林湖污染更严重与更富营养化,人类活动对郭郑湖的影响更大<sup>[7,9]</sup>。

3.2 重金属含量的区域分布特征

武汉钢铁公司位于东湖的东北角,距塘林湖约 2 km,估计每年大约有 2 t 的烟尘飘落东湖<sup>[2,11–14]</sup>。图 3 显示,从南到北,Mn 的含量逐渐增加;Zn 的含量逐渐减少,P 的含量变化剧烈。对于郭郑湖,湖心 Pb 含量较低、周围高;Cr 是湖心高、四周低;Pb、Co、Ti、Cu 是东高西低。对于塘林湖,Cu、Ba、Co、Cr、V、Mn、Ti、Ni、TFe 在湖中心含量较高。郭郑湖的东部是东湖水面的主要娱乐区域,每年有众多的游客乘坐汽艇观光游览。郭郑湖的水质呈中偏碱性(pH 值为 8.0),Cr 离子极易被有机质吸附而沉淀于湖底<sup>[14]</sup>。

4 讨论

4.1 重金属污染物来源分析

重金属污染物主要来源于人类的生产、生活排放的废水、废气、废物<sup>[15–21]</sup>。用主成分分析法确定东湖

① 水系沉淀物成分分析标准(2004/9/20):Zn(153),V(76.4),Ti(3500),Pb(73.9),P(616),Ni(18.6),Mn(718),Cr(35),Cu(309),Co(13),Ba(818),TFe(46.4)。TFe 的单位为 g/kg,其余元素的单位为 mg/kg。

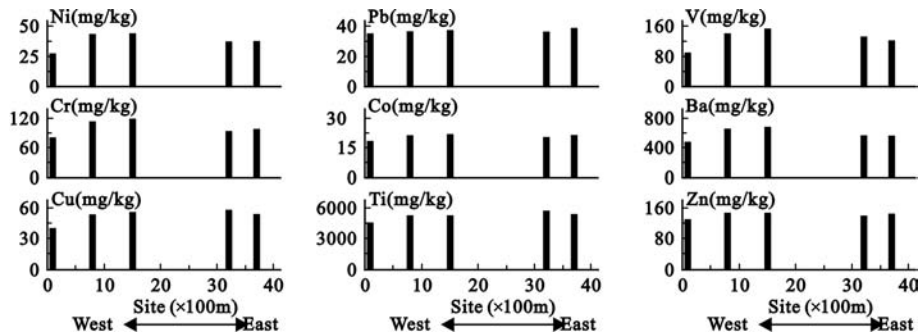


图 2 东湖沉积物的重金属含量平均值的背景标准化分布

直方图 1: 郭郑湖 NS; 直方图 2: 郭郑湖 WE; 直方图 3: 塘林湖 NS

Fig. 2 The background standardized contents of the heavy metals in Donghu Lake  
Bar chart 1: Guozheng NS; Bar chart 2: Guozheng WE; Bar chart 3: Tanglin NS

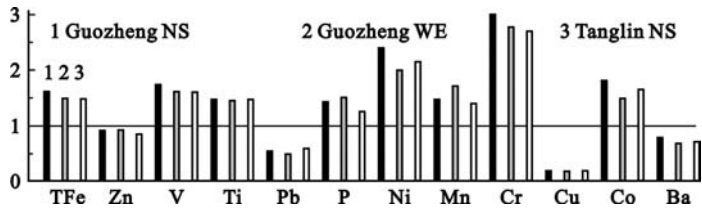


图 3 东湖沉积物南北剖面的重金属变化趋势

Fig. 3 Variation curves of the heavy metal contents of sediments of north-south profile in the Lake Donghu, Wuhan

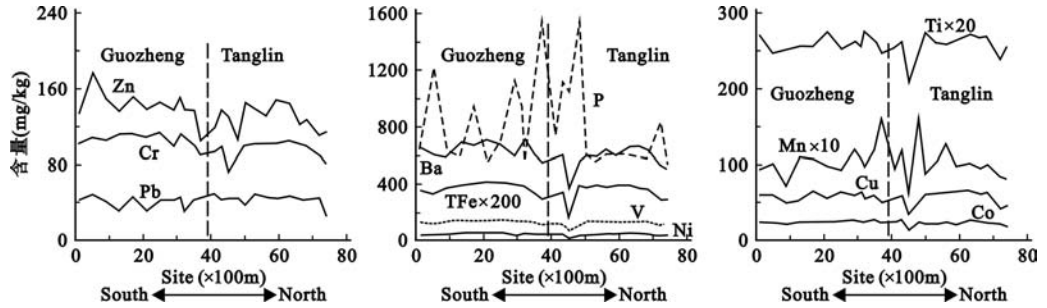


图 4 郭郑湖沉积物的重金属 WE 区域分布

Fig. 4 Histograms of the heavy metal contents of west-east profile in Lake Guozheng

沉积物 12 个元素的主要污染源类型. 主成分分析是把一些具有错综复杂关系的变量归结为数量较少的几个综合变量的一种多元统计分析方法, 用公式表示为:  $F_i = u_{i1}x_1 + u_{i2}x_2 + \dots + u_{im}x_m$ ,  $u_{ij}$  为主成份荷载系数, 它的大小表示主成分与变量之间的相关程度. 变量之间的相关系数矩阵的特征值对应的特征向量即为主

成份荷载系数<sup>[16,17]</sup>. 当最大的  $m$  个特征值之和占全部特征值之和的比重大于 84% 时,意味着  $m$  个特征值对应的主成份提取的信息占原始信息的 84%. 荷载系数的计算用 SPSS10 统计软件完成(表 2).

郭郑湖沉积物主要提取三类污染源(主成份). 第一类污染源(占 56%)与(燃煤尘埃有关的)金属元素 Ni、Ba、Cr、V、TFe、Co(表 2)关系密切(相关系数大于 0.84),与 P 反相关(−0.72),它不可能来自于与有机质相关的污染源,推测来自于湖区周围武汉钢铁公司、青山热电厂等的工业燃煤尘埃<sup>[16-18]</sup>. 例如,北京北辛安区大气污染主要来自于首钢工业燃煤的尘埃,大气尘埃中重金属元素 Fe、Ni、Cr、V 和 Ba 的浓度比其它地区高几倍<sup>[17]</sup>. 第二污染源(占 16%)与 Pb、Cu、Co 的相关系数较高(相关系数大于 0.67),与 P 正相关(0.41). 根据重金属在郭郑湖的分布特征,Pb、Cu、Co 的含量既有污水排放和雨水片流,又有相当一部分为汽车尾气沉降引起<sup>[22]</sup>. 由于 Pb 比重大,汽车及东湖航船使用的含 Pb 汽油(燃油)燃烧排出的废气将很快沉降在湖底<sup>[3,19,20]</sup>. 另外,城市生活污水中也含有 P、Pb、Cu、Co 等元素<sup>[1,15]</sup>. 第三污染源(占 12%)与 Zn 关系极其密切(相关系数 0.91)、与 Cr 关系中等(相关系数 0.42),与 P 负相关(−0.34). 郭郑湖南岸排污管较多,图 3 显示,Zn 从南到北逐渐减少,且与 Pb 关系较弱,不可能来自于交通污染,Zn 来自于电镀、印刷、垃圾焚烧等行业的污水;Cr 来自于电镀、皮革、制药、颜料等工业的污水<sup>[15,19,20]</sup>.

表 2 东湖沉积物污染源因子荷载矩阵  
Tab.2 Factor loadings matrix of sediments in Lake Donghu

主成份		Zn	V	Ti	Pb	P	Ni	Mn	Cr	Cu	Co	Ba	TFe	比例
郭郑湖	1	0.14	0.86	0.34	−0.17	−0.72	0.93	−0.43	0.87	0.43	0.54	0.93	0.84	56.0%
	2	0.23	−0.02	0.02	0.90	0.41	0.16	0.08	0.14	0.71	0.67	0.14	0.04	16.3%
	3	0.91	0.17	−0.04	0.19	−0.34	0.12	−0.68	0.42	0.24	−0.23	0.14	0.29	11.9%
塘林湖	1	0.27	0.97	0.95	0.13	−0.33	0.96	0.54	0.92	0.93	0.81	0.97	0.95	64.6%
	2	−0.73	−0.19	−0.21	0.06	0.84	−0.12	0.75	−0.23	−0.25	0.29	−0.08	0.1	17.4%
	2	0.34	0.01	−0.18	0.95	0.25	0.14	0.19	0.3	0.21	0.26	0.12	0.07	9.4%

塘林湖沉积物的污染源(主成份)主要提取三类. 第一类污染源占 65%,与高温成因的 V、Ba、Ni、Ti、TFe(全铁)、Cu、Cr、Co 关系密切(相关系数大于 0.81),与 P 反相关(−0.33),应该来源于武汉钢铁公司等生产性煤燃烧的大气尘埃(表 2)<sup>[16,19]</sup>;第二污染源占 17%,与 P、Mn 关系较密切(相关系数大于 0.75),且 P 在沉积物中含量变化剧烈(图 3),P 来源于水产养殖投饵,生活污水、医院污水和周围土壤的淋溶作用<sup>[5-8]</sup>,化肥中也含有 P、Mn 等元素. 据报道,磷肥中 Mn 的含量范围介于 2.86–232.1 mg/kg<sup>[21]</sup>;第三污染源占 9%,与铅关系极其密切(相关系数大于 0.95),与其它元素的关系较弱,与 P 的关系为弱正相关(相关系数 0.25). 塘林湖周围交通流量小,可能源于废旧电池、报章杂志、农用物资(农膜)等<sup>[13,24-27]</sup>. 笔者多次骑车对塘林湖沿岸周围进行实地考察,发现被丢弃的废旧电池、生活垃圾、塑料薄膜随处可见<sup>[13]</sup>.

4.2 沉积物重金属的综合污染指数和污染程度评价

由于东湖沉积物重金属含量变异系数较小(小于 0.39),为了定性地分析沉积物中重金属的污染状况,采用均方根综合污染指数法评价分析东湖沉积物的污染程度<sup>[2,22]</sup>,计算公式为:

$$\Phi = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{C_i}{S_i} \right]}$$

式中, $\Phi$  为污染综合指数; $n$  为参加评价的元素种类; $C_i$  为元素  $i$  的实测值 (mg/kg); $S_i$  为评价标准,即所选元素  $i$  的背景值 (mg/kg).

沉积物重金属实测值转换为各重金属污染分指数  $\Phi_i(C_i/S_i)$  及污染综合指数  $\Phi$  的计算结果见表 4. 结果表明,郭郑湖和塘林湖的污染等级皆为 1,沉积物属轻度污染(其中郭郑湖  $\Phi$  的平均值为 1.65,标准差为 0.06;塘林湖  $\Phi$  的平均值为 1.50,标准差为 0.18. 郭郑湖沉积物的污染程度高于塘林湖.

表3 沉积物污染综合指数  $\Phi$   
Tab.3 Comprehensive pollution indexes of sediments

点位		重 金 属 污 染 指 数 $\Phi_i$												综合 指数	污染 等级
		Zn	V	Ti	Pb	P	Ni	Mn	Cr	Cu	Co	Ba	TFe		
郭 郑 湖	NS-1	0.87	1.68	1.56	0.57	1.04	2.21	1.28	2.89	0.19	1.8	0.8	1.55	1.54	1
	NS-5	1.16	1.54	1.41	0.65	2	2.14	1.4	3.09	0.19	1.77	0.75	1.45	1.63	1
	NS-9	0.97	1.75	1.44	0.55	1.04	2.24	0.99	3.00	0.16	1.58	0.72	1.61	1.53	1
	NS-13	0.89	1.88	1.46	0.42	0.96	2.73	1.53	3.20	0.17	1.85	0.85	1.69	1.70	1
	NS-17	0.99	1.78	1.47	0.62	1.54	2.66	1.48	3.20	0.21	1.80	0.82	1.72	1.72	1
	NS-21	0.90	1.90	1.58	0.41	0.90	2.61	1.34	3.11	0.18	1.77	0.87	1.77	1.66	1
	NS-25	0.95	1.91	1.44	0.58	1.15	2.64	1.27	3.26	0.2	1.85	0.82	1.76	1.70	1
	NS-29	0.90	1.73	1.50	0.58	1.84	2.18	1.67	2.81	0.19	2.04	0.73	1.71	1.66	1
	NS-31	0.99	1.78	1.47	0.62	1.54	2.66	1.48	3.20	0.21	1.80	0.82	1.66	1.71	1
	NS-32	0.90	1.90	1.58	0.41	0.90	2.61	1.34	3.11	0.18	1.77	0.87	1.64	1.65	1
塘 林 湖	NS-35	0.90	1.73	1.50	0.58	1.84	2.18	1.67	2.81	0.19	2.04	0.73	1.45	1.63	1
	NS-37	0.68	1.45	1.41	0.60	2.52	2.03	2.24	2.54	0.16	1.75	0.68	1.26	1.63	1
	Mean	0.92	1.75	1.48	0.55	1.44	2.41	1.47	3.02	0.19	1.82	0.79	1.61	1.65	
	STD	0.11	0.14	0.06	0.08	0.53	0.26	0.3	0.22	0.02	0.12	0.06	0.15	0.06	
	NS-41	0.77	1.57	1.45	0.66	1.18	2.09	1.27	2.67	0.18	1.86	0.73	1.41	1.48	1
	NS-43	0.90	1.73	1.50	0.58	1.84	2.18	1.67	2.81	0.19	2.04	0.73	1.48	1.64	1
塘 林 湖	NS-45	0.86	0.87	1.18	0.59	1.67	1.09	0.82	2.04	0.11	0.98	0.44	0.69	1.07	1
	NS-48	0.68	1.45	1.41	0.60	2.52	2.03	2.24	2.54	0.16	1.75	0.68	1.68	1.66	1
	NS-50	0.95	1.74	1.57	0.51	0.97	2.26	1.22	2.83	0.19	1.57	0.73	1.63	1.52	1
	NS-53	0.9	1.79	1.49	0.65	0.90	2.27	1.42	2.91	0.20	1.52	0.72	1.67	1.55	1
	NS-56	0.86	1.78	1.47	0.62	1.00	2.60	1.74	2.91	0.20	1.75	0.79	1.62	1.64	1
	NS-59	0.97	1.70	1.51	0.60	0.99	2.35	1.36	2.91	0.20	1.57	0.73	1.67	1.56	1
	NS-63	0.95	1.83	1.55	0.63	0.99	2.60	1.40	3.00	0.21	1.96	0.81	1.68	1.66	1
	NS-66	0.80	1.76	1.53	0.58	0.95	2.54	1.31	2.91	0.20	1.81	0.81	1.6	1.59	1
	NS-68	0.83	1.79	1.53	0.57	0.94	2.46	1.38	2.83	0.20	1.67	0.78	1.58	1.56	1
	NS-72	0.73	1.41	1.36	0.60	1.38	1.89	1.17	2.54	0.14	1.57	0.64	1.25	1.37	1
NS-74	0.75	1.47	1.46	0.35	0.89	1.75	1.12	2.31	0.14	1.32	0.61	1.27	1.26	1	
Mean	0.84	1.61	1.46	0.58	1.25	2.16	1.39	2.71	0.18	1.64	0.71	1.48	1.5		
STD	0.09	0.26	0.1	0.08	0.49	0.42	0.34	0.28	0.03	0.28	0.1	0.28	0.18		

1) Mean 为平均值,STD 为标准差;2) 据范成新等,2002<sup>[2]</sup>.

5 结论

应用主成份分析原理,确定出沉积物中重金属污染源的主要类型如下:

(1) 郭郑湖沉积物的污染源(主成份)分为三类:第一污染源(占 56%)为湖区周围(武汉钢铁公司、青山热电厂等)的工业燃煤尘埃;第二污染源(占 16%)为交通尾气、生活污水和雨水片流;第三污染源(占 12%)为电镀、印刷、垃圾焚烧、皮革、制药等行业的工业污水.

(2) 塘林湖的污染源分为三类,第一污染源(占 65%)为湖区周围的(武汉钢铁公司等)生产性煤燃烧的粉尘,第二污染源(17%)为水产养殖投饵,生活污水,医院污水和周围土壤的淋溶作用,第三污染源(占 9%)为废旧电池、报章杂志、农用物资(农膜)等.

采用均方根综合污染指数法评价分析东湖主体湖区的沉积物的重金属的污染程度,郭郑湖和塘林湖属于轻度污染,污染综合指数  $\Phi$  介于 1-2,其中郭郑湖  $\Phi$  的平均值为 1.65,塘林湖  $\Phi$  为 1.50。郭郑湖沉积物的污染程度高于塘林湖。

致谢:在本文写作过程中,得到汪汉胜研究员的精心指导,在此表示感谢。

## 6 参考文献

- [1] 杨汉东,农生文,蔡述明等. 武汉东湖沉积物的环境地球化学. 水生生物学报,1994,**3**:208-213.
- [2] 范成新,朱育新,吉志军. 太湖宜溧河水系沉积物的重金属污染特征. 湖泊科学,2002,**14**(3):235-241.
- [3] 刘恩峰,沈吉,朱育新等. 太湖表层沉积物重金属元素的来源分析. 湖泊科学,2004,**16**(2):113-119.
- [4] 王静雅,李泽琴,程温莹等. 湖相沉积物中重金属环境污染研究进展. 地球科学进展,2004,**19**(增刊):434-438.
- [5] 况琪军,夏宜琤. 武汉东湖主要湖区的藻类与营养型评价. 湖泊科学,1995,**7**(4):351-356.
- [6] 况琪军,夏宜琤,李植生等. 武汉东湖不同营养型子湖的水生生物与水域功能. 湖泊科学,1997,**9**(3):249-254.
- [7] 杨洪,易朝路,谢平等. 人类活动在武汉东湖沉积物中的记录. 中国环境科学,2004,**24**(3):261-264.
- [8] 杨扬,熊丽,刘明清等. 洗涤剂禁(限)磷对流域水质影响预测. 湖泊科学,2001,**13**(4):360-366.
- [9] 苏秋克,蒋敬业,姜益善等. 武汉城市湖泊环境地球化学研究——以东湖为例. 安全与环境工程,2003,**10**(3):20-23.
- [10] 陈畅,邢琪,陆春霞等. 广州市空气可吸入性颗粒物化学元素组成特征. 环境科学研究,1999,**12**(4):1-5.
- [11] Charlesworth S, Foster I. Sediment budgets and metals fluxes in two contrasting urban lake catchments in Coventry, UK. *Applied Geography*, 1999,**19**:199-210.
- [12] 刘桂建,杨萍玥,彭子成. 煤灰基本特征及其微量元素的分布规律. 煤炭转化,2003,**26**(2):81-86.
- [13] 范成新. 太湖流域重金属污染亟待重视. 水资源保护,2002,**4**:39-41.
- [14] 胡瑞春,刘光强,全浩理. 武汉东湖湖泊污染地球化学特征研究. 湖北地矿,2003,**17**(4):26-30.
- [15] 梅惠. 城郊部分菜地土壤重金属污染简述. 地质科技情报,2004,**23**(1):89-93.
- [16] 杨丽萍,陈发虎. 兰州市大气降尘污染物来源研究. 环境科学学报,2002,**22**(4):499-502.
- [17] 张晶,陈宗良,王玮. 北京市大气小颗粒物的污染源解析. 环境科学学报,1998,**18**(1):62-67.
- [18] Ta W, Xiao Z, Qu J *et al*. Characteristics of dust particles from the desert/Gobi area of northwestern China during dust-storm periods. *Environmental Geology*, 2003,**43**:667-679.
- [19] 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. 地球化学,2004,**33**(6):611-618.
- [20] 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.
- [21] 王起超,麻壮伟. 某些市售化肥的重金属含量水平及环境风险. 农村生态环境,2004,**20**(2):62-64.
- [22] 薛巧英,刘建明. 水污染综合指数评价方法与应用分析. 环境工程,2004,**22**(1):64-69.