

# 武汉市东湖沉积物的磁性特征与 重金属含量之间的关系

刘振东<sup>1,2</sup>, 刘庆生<sup>3</sup>, 汪汉胜<sup>1</sup>, 王志勇<sup>1,2</sup>, 杨涛<sup>3</sup>, 曹国栋<sup>3</sup>

1. 中国科学院测量与地球物理研究所, 湖北武汉 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, 湖北武汉 430074

**摘要:** 对武汉市东湖主湖区的郭郑湖和塘林湖 114 个沉积物样品的磁化率与代表性样品的频率磁化率系数、磁滞回线参量和重金属元素进行系统分析, 综合区域环境背景, 探讨应用岩石磁性方法技术评价大型城市内陆湖泊沉积物污染程度的可行性及其效果。结果表明, 在主成分中, 郭郑湖沉积物没有一个主成分占绝对优势, 仅有少数重金属元素含量与磁化率相关, 磁化率  $\chi$  与重金属富集强度的相关性较差; 而塘林湖沉积物有一个“工业源”的主成份占绝对优势, Fe(全铁)、Co、V、Mn、Ti、Ba、Cr、Ni、Cu 等元素与饱和等温剩磁 SIRM、 $\chi$  关系密切(相关系数大于 0.87)。郭郑湖与塘林湖的沉积物的饱和等温剩磁与重金属富集强度的相关程度高于磁化率, 因此, 可以用其(SIRM)作为环境污染程度的指示参量。

**关键词:** 湖沉积物; 磁性参数; 重金属; 武汉市东湖。

中图分类号: P631

文章编号: 1000-2383(2006)02-0266-07

收稿日期: 2005-05-28

## Relationship between Magnetic Properties and Heavy Metals of Sediments in Donghu Lake, Wuhan, China

LIU Zhen-dong<sup>1,2</sup>, LIU Qing-sheng<sup>3</sup>, WANG Han-sheng<sup>1</sup>, WANG Zhi-yong<sup>1,2</sup>,  
YANG Tao<sup>3</sup>, CAO Guo-dong<sup>3</sup>

1. *Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China*

2. *Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*

3. *Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

**Abstract:** In order to probe the relationship between urbanization processes and the extent of water contamination, measurements were taken the magnetic susceptibility ( $\chi$ ) of 114 samples, and of the frequency-dependent susceptibility and magnetic hysteresis parameters and heavy metal of representative samples from sediments of Guozheng Lake and Tanglin Lake, Wuhan, Hubei Province. Results show that in Guozheng Lake no principal component predominates and the correlation between susceptibility and heavy metal content is low. However, in Tanglin Lake, a principal component originating from industry predominates. Fe (total iron), Co, V, Mn, Ti, Ba, Cr, Ni and Cu are highly correlated with saturation ( $M_s$ ), isothermal remanent magnetization (SIRM) and  $\chi$  and the correlation coefficients are generally higher than 0.87. For sediments of both lakes, the correlation of SIRM with contents of heavy metals is higher than that of  $\chi$ . So, saturation isothermal remanent magnetization (SIRM) can be considered as a proxy of the extent of heavy metal pollution.

**Key words:** lake sediments; magnetic parameters; heavy metals; Donghu Lake, Wuhan City.

地表原位的磁化率测量是一种快速、简便、经济、无污染的测量方法, 目前被广泛的应用于环境污

染研究领域. 大量研究揭示, 城市道路、土壤和大气尘埃中的重金属含量与磁性参量之间存在着某些相互关系(Shu *et al.*, 2001; Pitambar *et al.*, 2004; 张玉芬等, 2005). Charlesworth and Lees(2001)认为: 英国 Coventry 城 Wyken 湖粒度  $< 2$  mm 沉积物的高磁化率是由工业或者城市排污口物质中颗粒较细的铁的氧化物引起, 磁化率与重金属含量之间存在很强的成因关系, 而 Coventry 城 Swanswell 湖  $< 63 \mu\text{m}$  的沉积物的磁化率与重金属含量无关. Hullet *et al.* (1980) 研究指出, 一些过渡性元素, 例如 V、Cr、Mn、Co、Ni 等, 在煤燃烧过程中, 能混入磁铁矿的晶格结构, 从而改变磁铁矿的磁性特征. Li *et al.* (2001) 发现城市表层土壤和街道尘埃的磁性矿物颗粒表面能吸附重金属元素. Sun *et al.* (1996) 利用磁学方法剖析了江苏固城湖沉积物的沉积历史. 最近几十年, 武汉市发展迅速, 城市交通与工业生产的污染对环境的影响日趋严重, 为了经常性的监测与评价环境污染的程度, 需要寻找快速的、经济的环境监测方法技术. 物质磁性测量具有灵敏、高效、对环境不造成二次污染的特点, 是值得尝试的环境监测手段. 本文通过对东湖主湖区郭郑湖和塘林湖的沉积物 114 个样品的磁化率和代表性样品的频率磁化率系数、磁滞回线参量、重金属含量的分析, 找出沉积物磁性与重金属富集强度之间的关系, 并据此作为评价湖泊环境污染程度的基础.

## 1 武汉市东湖地区环境背景

东湖是武汉市的一个大型内陆湖泊, 位于长江南岸, 面积约为  $34 \text{ km}^2$ . 东湖的主体湖区以沿湖大道为界, 南半部为郭郑湖、北半部为塘林湖, 中间在落雁桥处水体相连. 东湖南靠珞珈山, 山体植被覆盖率高(约为 85%); 北依大型国有企业武汉钢铁公司, 每年有因生产性燃烧排放的大量尘埃飘落湖中; 东临磨山风景区; 西部为湖北省政府行政机关、科研院所、高等院校、居民生活区以及文化出版机构所在地, 大量生产、生活污水未经处理直接排入湖区; 市结核病医院、东湖医院、梨园医院以及中南医院分别位于东湖东西两侧. 郭郑湖四周有环湖公路围绕, 南部、西部交通流量较大(张良轶和韦进宝, 1998), 湖面为水上娱乐区, 从梨园医院到磨山风景区的汽艇观光是东湖风景区的娱乐项目之一. 塘林湖四周被东湖其他湖泊包围, 从梨园医院到黄家湾

的货物运输以柴油机船为主.

## 2 样品采集和实验方法

在郭郑湖沿十字剖面分别采集沉积物样品 38 个(南北)、39 个(东西), 在塘林湖沿南北剖面采集 37 个沉积物样品(上层湖泥  $0 \sim 8 \text{ cm}$ , 大约为最近 30 a 的沉积物(张良轶和韦进宝, 1998)), 样品采集时间为 2003 年 11 月, 采集点距为 100 m, 采集路线及点位分布如图 1 所示. 郭郑湖南北剖面从武汉大学的北校门开始(NS-1 点), 到沿湖大道的落雁桥终止(NS-38 点); 东西剖面从黄鹄湾开始(WE-1), 到磨山风景区(WE-39)结束. 塘林湖南北剖面从落雁桥开始(NS-39 点), 到小潭湖结束(NS-75 点).

样品磁化率测量在中国地质大学(武汉)岩石物性试验室利用捷克生产的 KLY-3S 型磁化率仪完成. 仪器的灵敏度为  $3 \times 10^{-8} \text{ SI}$ , 稳定性为 0.1%, 频率为 875 kHz. 重金属含量分析在中国地质大学(武汉)测试中心用  $\chi$  射线荧光光谱仪 SRS-303 进行. 磁化率值能大致反映样品中磁性矿物的相对含量(Zoe *et al.*, 1999; Hanesch and Scholger, 2002; Peters and Dekkers, 2003); 频率磁化率系数  $\chi_{\text{FD}}\%$  用于估计磁性颗粒的相对大小(Zoe *et al.*, 1999; Oldfield, 1991; Gedye *et al.*, 2000); 饱和等温剩磁 SIRM 主要受铁磁性矿物的含量、结构和颗粒度的影响(Yu *et al.*, 1990; Oldfield, 1991;

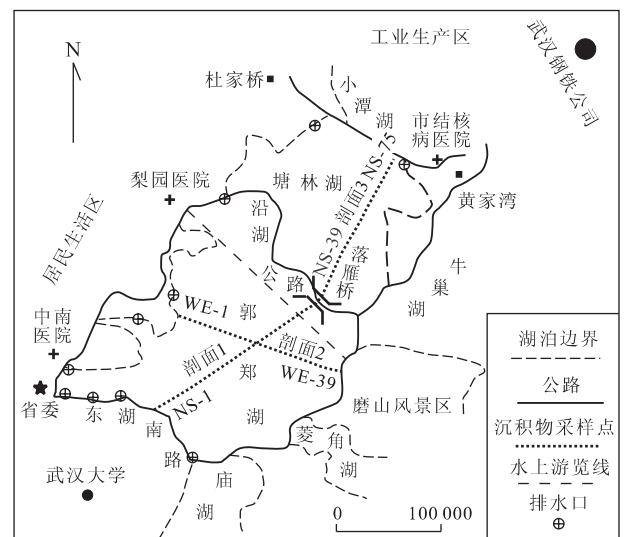


图 1 东湖沉积物采样点分布

Fig. 1 Location of samples of sediments in Donghu Lake

Georgeaud *et al.*, 1997; Zoe *et al.*, 1999; Gedye *et al.*, 2000; Peters and Dekkers, 2003); 沉积物的矫顽力(本征矫顽力  $H_c$  和剩磁矫顽力  $H_{cr}$ )是反映样品磁性硬度的参量,与磁性矿物的类型和颗粒度密切相关,且不受磁性矿物富集程度的影响.以本征矫顽力为例,对于多畴磁铁矿颗粒, $H_c$  约为 10 mT,而小的单畴颗粒可达 50 mT(Peters and Thompson, 1998; Petrovský *et al.*, 2001; Kapička *et al.*, 2001).  $\chi_{FD}\%$ 和磁滞回线参数(SIRM、 $M_s$ 、 $H_c$ 、 $H_{cr}$ )的测试在中国科学院地质与地球物理研究所古地磁实验室利用双频(465 Hz 和 4 650 Hz)Bartington-MS2 磁化率仪和 Micromag2900 型变梯度磁力仪(最大磁场 3T)完成.

### 3 结果

#### 3.1 东湖沉积物的磁性特征

从图 2 中可以看出,塘林湖(39~75)沉积物的磁化率整体高于郭郑湖,且中间高、两边低;郭郑湖(1~38)是中间低两边高.以平均值为例,郭郑湖磁化率为  $87.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ,塘林湖为  $178.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ,塘林湖磁化率是郭郑湖磁化率的 2.04 倍.

从表 1 中看到,郭郑湖与塘林湖沉积物的磁化率和频率磁化率系数相差较大,而饱和等温剩磁和矫顽力值相近.频率磁化率系数与样品中的磁性颗粒大小近似成逆相关关系(Oldfield, 1991).实验结果指出,当频率磁化率系数  $\chi_{FD}\%$  为 5% 左右时,样品含超顺磁性颗粒较多,当  $\chi_{FD}\% > 10\%$ ,以超顺磁性颗粒为主(Oldfield, 1991).郭郑湖沉积物  $\chi_{FD}\%$  的平均值为 3.0%,变异系数为 0.6(塘林湖的 1.5 倍),磁性颗粒粗细不均,含稳定单畴、超顺磁性颗粒较多;塘林湖  $\chi_{FD}\%$  的平均值为 1.4%,磁性颗粒较粗,以多畴磁性颗粒为主.饱和等温剩磁与磁性矿物

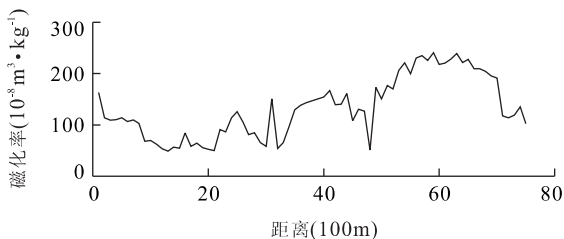


图 2 东湖沉积物磁化率剖面(1~38 位于郭郑湖,39~75 位于塘林湖)

Fig. 2 Susceptibility profile of sediments in Donghu Lake

的晶格结构密切相关,一种元素的渗入就可能改变整个矿物的磁性.塘林湖沉积物的磁化率是郭郑湖的 2.04 倍,但饱和等温剩磁和矫顽力的平均值相差很少.磁性矿物主要以磁铁矿为主.

#### 3.2 重金属和磷含量分析

沉积物中含量较高的元素有铁(Fe)、钛(Ti)、锰(Mn),它们大约占元素含量的 9%,不同点位之间元素含量的变异系数均小于 0.26.以平均值为例,除铅外,郭郑湖所有元素含量均高于塘林湖.以 MR-GL-CNS-0245 地质矿产 GBW(E)070007 水系沉淀物成分分析标准为东湖沉积物的背景值<sup>①</sup>,元素含量统计结果如表 2 所示.显然,Cr 污染最重,郭郑湖、塘林湖 Cr 的含量分别是水系沉淀物成分分析标准的 2.95 和 2.71 倍. Cu 含量最低,仅为分析标准的 1/6.

### 4 讨论

#### 4.1 沉积物磁性与重金属含量之间的关系

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独立变量的一种多元统计分析方法,用公式表示为:  $F_i = u_{i1}x_1 + u_{i2}x_2 + \dots + u_{ij}x_j$ ,其中  $u_{ij}$  为主成分  $F_i$  的荷载系数,它的意义表示主成分与变量  $x_j$  之间的相关程度,它的大小用变量之间的相关系数矩阵的特征值对应的特征向量表示(Charlesworth and Lees, 1997).当提取的主成分的特征值之和占相关系数矩阵全部特征值之和的比重大于 84% 时,意味着主成分提取的信息占原始信息的 84%.主成分荷载系数用 SPSS 统计软件计算.

变量(重金属与磁参数  $\chi$ 、SIRM、 $\chi_{FD}\%$ 、 $H_{cr}$ )之间的关系采用主成分法分析.主成分的特征值越大,主成分所携带的信息越多.郭郑湖占原始信息 89% 的最大 4 个主成分的特征值分别为 6.2、3.5、2.7 和 1.8;塘林湖占原始信息 92% 的最大 3 个主成分的特征值分别为 11.3、1.9 和 1.4.变量之间的关系如主成分平面图 3 所示,两变量矢量的夹角的余弦表示变量之间的相关程度;矢量的长度表示变量在主成分所占比重(Petrovský *et al.*, 2001; Kapička *et al.*, 2001; Shu *et al.*, 1995).

由图 3a、3b 可知,郭郑湖磁化率  $\chi$  与 Pb 关系密切,相关系数为 0.85;SIRM 与 Cu、Cr、Zn 关系密

①水系沉淀物成分分析标准: 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,其余单位 mg/kg.

表 1 东湖沉积物磁性参数统计结果

Table 1 Statistics of the magnetic parameters of sediments in Donghu Lake

磁参数	磁化率 ( $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ )	频率磁化率 (%)	饱和磁化强度 ( $10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$ )	饱和等温剩磁 ( $10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$ )	本征矫顽力 (mT)	剩磁矫顽力 (mT)
郭郑湖 变化范围	14.3~163.1	1.1~6.3	6.2~71.5	0.5~7.3	5.9~10.9	27.7~31.4
郭郑湖 平均值	86.2	3.0	24.7	2.7	9.1	30.1
郭郑湖 变异系数	0.4	0.6	0.86	0.8	0.19	0.04
塘林湖 变化范围	50.8~240.9	0.6~2.2	12.4~50.2	0.9~4.2	7.6~12.7	26.3~41.2
塘林湖 平均值	176.6	1.4	30.3	2.8	9.0	29.9
塘林湖 变异系数	0.3	0.4	0.49	0.5	0.20	0.17

表 2 东湖沉积物重金属元素含量统计结果

Table 2 Statistics of the heavy metal contents of sediments in Donghu Lake

元素	郭郑湖				塘林湖			
	变化范围	平均值	倍数	变异系数	变化范围	平均值	倍数	变异系数
TFe	49.4~82.1	72.9	1.57	0.12	32.1~78.1	68.6	1.48	0.19
Zn	104~177	141.1	0.92	0.10	104~148	128.7	0.84	0.11
V	85.8~149	130.9	1.71	0.12	66.8~140	122.9	1.61	0.16
Ti	4 371~5 549	5 151.7	1.47	0.05	4 131~5 484	5 118	1.46	0.07
Pb	30.6~47.9	39.1	0.53	0.14	25.9~48.9	42.9	0.58	0.14
Ni	25.8~50.8	42.6	2.29	0.15	20.3~48.4	40.2	2.16	0.19
Mn	712~1 610	1 116.3	1.55	0.18	590~1 610	1 000.2	1.39	0.25
P	549~1 566	898.7	1.46	0.38	548~1 552	767.9	1.25	0.39
Cr	77.5~114	103.1	2.95	0.10	71.5~105	94.8	2.71	0.10
Cu	38.9~63.7	55.5	0.18	0.11	33.4~65.1	55.2	0.18	0.18
Co	17.1~26.5	22.4	1.72	0.11	12.7~26.5	21.4	1.65	0.17
Ba	441~712	617.8	0.76	0.12	364~663	579.8	0.71	0.14

TFe 的单位为 g/kg,其余元素单位皆 mg/kg,倍数指高于背景值的倍数.

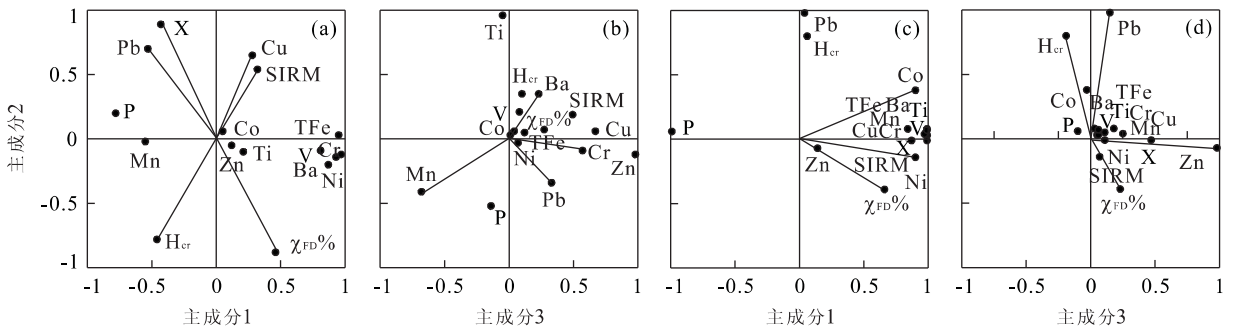


图 3 东湖沉积物主成分

Fig. 3 Component plots of reflected relationship between magnetic and heavy metals of sediments in Donghu Lake  
a, b. 表示郭郑湖; c, d. 表示塘林湖

切,相关系数分别为 0.69、0.50、0.47;  $\chi_{FD}\%$  与 Ba (相关系数为 0.61)、V (0.58)、Ni (0.55)、Cr (0.51)、TFe (0.45) 关系密切;  $H_{cr}$  与重金属含量关系不大. 重金属与磁参数之间的关系如表 3 所示.

根据多元线性统计分析理论,利用 SPSS 软件得出:  $Pb = 27.26 + 0.08\chi - 1.20\chi_{FD}\% + 0.15SIRM + 0.25H_{cr}$ , 其中 Pb 的单位为  $10^{-6}$ ,  $\chi$  的单位为  $\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ,  $\chi_{FD}\%$  的单位为 %, SIRM 的单位为

$10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$ ,  $H_{cr}$  的单位为 mT, 决定系数为 0.72 (解释应变量 72% 的信息), 标准差为 5.24;  $Cu = 76.03 + 0.15\chi + 3.41\chi_{FD}\% + 1.09SIRM - 1.63H_{cr}$ , 决定系数为 0.73, 标准差为 3.96.

塘林湖沉积物来源简单,有一个“工业源”的主成分占主导地位,它的特征值是第二主成分特征值的 5.95 倍. 磁参数  $\chi$  和 SIRM 与重金属含量关系密切,相关系数一般大于 0.5. 它们之间的关系可以用

表 3 郭郑湖磁参数与重金属元素相关系数

Table 3 Correlation coefficients between magnetic parameters and heavy metal content in Guozheng Lake

磁参数	Zn	V	Ti	Pb	P	Ni	Mn	Cr	Cu	Co	Ba	TFe
$\chi$	-0.10	-0.53	-0.17	0.85	0.46	-0.53	0.18	-0.43	0.45	0.02	-0.54	-0.36
$\chi_{FD}(\%)$	0.20	0.58	0.22	-0.84	-0.58	0.55	-0.34	0.51	-0.35	0.06	0.61	0.45
SIRM	0.47	0.19	0.15	0.31	-0.23	0.37	-0.47	0.50	0.69	-0.33	0.42	0.43
SIRM/Ms	0.36	0.57	0.31	-0.67	-0.70	0.65	-0.58	0.69	-0.11	-0.43	0.80	0.61
$H_{cr}$	0.04	-0.28	0.31	-0.39	0.03	-0.32	0.090	-0.26	-0.59	-0.18	-0.06	-0.40
$H_{cr}/H_c$	-0.49	-0.39	-0.07	0.22	0.57	-0.59	0.64	-0.74	-0.22	0.66	-0.70	-0.64

Ms 表示饱和磁化强度,单位与 SIRM 相同; $H_c$  表示矫顽力,单位为 mT.

表 4 塘林湖沉积物磁参数与重金属相关系数

Table 4 Correlation coefficients between magnetic parameters and heavy metal content in Tanglin Lake

磁参数	Zn	V	Ti	Pb	P	Ni	Mn	Cr	Cu	Co	Ba	TFe
$\chi$	0.57	0.88	0.87	0.10	-0.92	0.91	0.83	0.90	0.96	0.76	0.88	0.88
$\chi_{FD}(\%)$	0.32	0.61	0.63	-0.36	-0.73	0.61	0.52	0.55	0.71	0.33	0.58	0.56
SIRM	0.23	0.87	0.92	-0.13	-0.93	0.85	0.59	0.84	0.91	0.74	0.88	0.84
SIRM/Ms	-0.54	0.31	0.28	0.47	-0.18	0.22	0.24	0.24	0.17	0.50	0.30	0.31
$H_{cr}$	-0.22	0.03	0.08	0.71	-0.02	-0.04	-0.04	-0.01	0.08	0.28	0.08	0.04
$H_{cr}/H_c$	0.83	0.18	0.27	0.08	-0.28	0.23	0.04	0.25	0.38	0.16	0.22	0.19

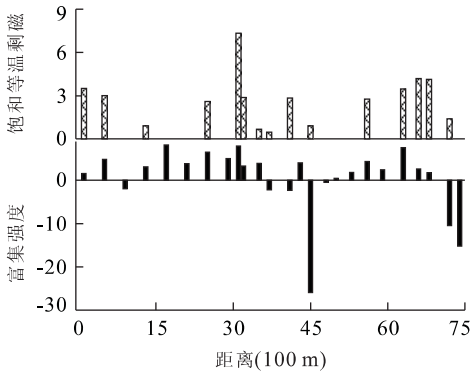


图 4 东湖沉积物 SIRM 和重金属富集强度剖面

Fig. 4 Profiles of SIRM and the enrichments of heavy metals in Donghu Lake

1~38. 郭郑湖;39~74. 塘林湖

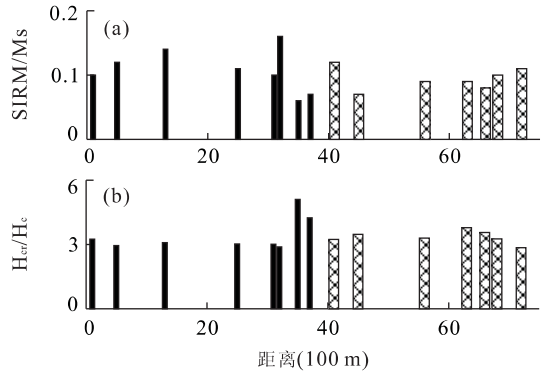


图 5 东湖沉积物 SIRM/Ms 剖面(a)和  $H_{cr}/H_c$  剖面(b)

Fig. 5 SIRM/Ms values (a) and  $H_{cr}/H_c$  values (b) in Donghu Lake

1~38. 郭郑湖;39~74. 塘林湖

多元回归公式算出:例如  $V = 56.90 + 0.27\chi - 16.71\chi_{FD}\% + 13.89SIRM - 0.08H_{cr}$ , 决定系数为 0.87, 标准差为 16.26;  $Cu = 14.43 + 0.16\chi - 2.87\chi_{FD}\% + 3.89SIRM + 0.15H_{cr}$ , 决定系数为 0.97, 标准差为 3.59(图 3c, 3d).

与塘林湖相比,显然郭郑湖沉积物磁性与重金属关系较差,可能的原因是,郭郑湖沉积物来源复杂,提取的最大主成分特征值为 6.2、3.5、2.7 和 1.8,没有一个主成分占绝对优势.另外,郭郑湖沉积物磁性颗粒较小,以单畴颗粒为主( $\chi_{FD}\%$ 为 3.0%),磁性颗粒吸附重金属元素较多(Oldfield, 1991),而

表 5 东湖沉积物磁参数与重金属富集强度的相关系数  
Table 5 Correlation coefficients between magnetic parameters and enrichments of heavy metals in Donghu Lake

富集强度	郭郑湖				
	$\chi$	$\chi_{FD}(\%)$	SIRM	SIRM/Ms	$H_{cr}/H_c$
	-0.40	0.10	0.66	0.25	-0.41
富集强度	塘林湖				
	$\chi$	$\chi_{FD}(\%)$	SIRM	SIRM/Ms	$H_{cr}/H_c$
	0.58	0.57	0.85	0.28	0.27

磁化率较低.塘林湖沉积物来源简单,有一个主成分占绝对优势,沉积物的磁性与重金属关系普遍密切,沉积物的磁性颗粒以多畴为主( $\chi_{FD}\%$ 为 1.4%).



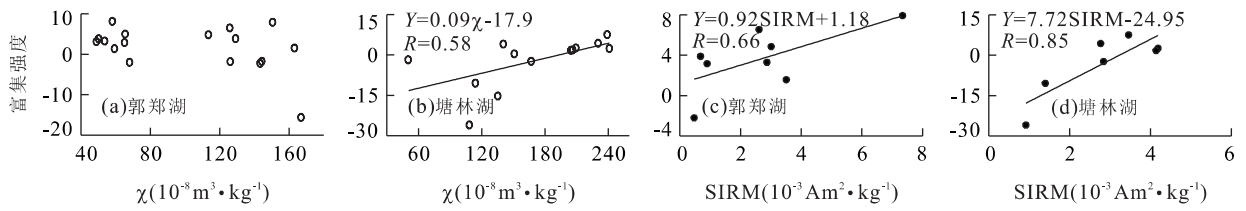


图 6 东湖沉积物磁化率(a, b)和 SIRM(c, d)与重金属富集强度相互关系散点

Fig. 6 Scattergrams between susceptibility (a, b) SIRM (c, d) and heavy metals in sediments

a, b. 表示郭郑湖; c, d. 表示塘林湖

#### 4.2 沉积物磁性与污染程度之间的关系

湖泊沉积物重金属的含量通常可以反映沉积物被污染的程度 (Sigh *et al.*, 1997; Hu *et al.*, 2003). 利用公式  $x_i = (x_i^0 - \bar{x})/s$  ( $x_i^0$  为  $i$  点  $x$  元素的原始读数,  $\bar{x}$  为  $x$  的算术平均值,  $s$  为  $x$  的标准差), 将各点所有的元素含量标准化并累加, 得到东湖沉积物的重金属的富集强度剖面分布 (图 4) (Bityukova *et al.*, 1999). 郭郑湖沉积物的重金属的富集强度高于塘林湖.

郭郑湖、塘林湖沉积物 SIRM/ $M_s$  的平均值分别为 0.108 和 0.094,  $H_{cr}/H_c$  的平均值分别为 3.445 和 3.353, 它们的分布趋势如图 5 所示. 沉积物磁性参数与重金属富集强度之间的关系如表 5 所示. 由于郭郑湖沉积物的重金属富集强度与磁化率相关系数较小, 不能用磁化率作为重金属富集强度的代用指标; 塘林湖沉积物相对来源简单, 有一个“工业源”的主成分占绝对优势, 重金属富集强度与磁化率相关系数较大, 它们之间的关系用线性回归公式表示为:  $Y=0.09\chi-17.9$  ( $Y$  表示富集强度, 无量纲,  $\chi$  表示磁化率). 由于磁化率测量简单, 携带仪器方便, 短时间内能获得大量数据, 可以利用该公式评估塘林湖沉积物重金属的相对污染程度 (图 6).

表 5 显示, 饱和等温剩磁与重金属的富集强度相关系数较大, 可以利用该参数作为重金属污染程度的代用指标 (Petrovský *et al.*, 2001; Charlesworth and Lees, 2001; Anju, 2003), 它们之间的关系如图 6 所示.

#### 4 结论

(1) 郭郑湖沉积物来源复杂, 没有一个主成分占绝对优势, 只有部分重金属元素含量与磁性相关, 例如 Pb 与  $\chi$ 、Cu 与 SIRM; 与之相反, 塘林湖沉积物有一个与“工业源”污染相关的主成分占绝对优势, 重金

属 TFe(全铁)、Co、V、Mn、Ti、Ba、Cr、Ni 和 Cu 与磁参数 SIRM、 $\chi$  关系密切, 相关系数一般大于 0.87.

(2) 对于郭郑湖, 可以利用下列多元统计回归公式估计重金属的含量 (mg/kg):  $Pb = 27.26 + 0.08\chi - 1.20\chi_{FD}\% + 0.15SIRM + 0.25H_{cr}$ , 决定系数为 0.72, 标准差为 5.24;  $Cu = 76.03 + 0.15\chi + 3.41\chi_{FD}\% + 1.09SIRM - 1.63H_{cr}$ , 决定系数为 0.73, 标准差为 3.96. 对于塘林湖, 重金属的含量 (mg/kg):  $V = 56.90 + 0.27\chi - 16.71\chi_{FD}\% + 13.89SIRM - 0.08H_{cr}$ , 决定系数为 0.87, 标准差为 16.26;  $Cu = 14.43 + 0.16\chi - 2.87\chi_{FD}\% + 3.89SIRM + 0.15H_{cr}$ , 决定系数为 0.97, 标准差为 3.59.

(3) 郭郑湖沉积物重金属元素富集强度高于塘林湖, 与磁化率相关系数较小 ( $-0.40$ ), 不能用磁化率作为重金属富集强度的代用指标. 塘林湖沉积物重金属富集强度与磁化率相关系数较大, 它们之间的关系可以用线性回归公式  $Y=0.09\chi-17.9$  ( $Y$  表示富集强度,  $\chi$  表示磁化率) 表示.

(4) 不管是郭郑湖, 还是塘林湖, 可以用饱和等温剩磁 SIRM 作为重金属富集强度的代用指标, 它们之间的关系分别为: 前者  $Y=0.92SIRM+1.18$ , 后者  $Y=7.72SIRM-24.95$ .

#### References

Anju, D. K., 2003. Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi, India. *Environmental Pollution*, 123:95-105.

Bityukova, L., Scholger, R., Birke, M., 1999. Magnetic susceptibility as indicator of environmental pollution of soils in Tallinn. *Physics and Chemistry of the Earth (A)*, 24(9):829-835.

Charlesworth, S. M., Lees, J. A., 2001. The application of some mineral magnetic measurements and heavy metal analysis for characterizing fine sediments in an urban catchment, Coventry, UK. *Journal of Applied Geo-*

- physics*, 48:113—125.
- Charlesworth, S. M., Lees, J. A., 1997. The use of mineral magnetic measurements in polluted urban lakes and deposited dusts, Coventry, UK. *Physics and Chemistry of the Earth*, 22(1—2):203—206.
- Gedye, S. J., Jones, R. T., Tinner, W. et al., 2000. The use of mineral magnetism in the reconstruction of fire history: A case study from Lago di Origlio, Swiss Alps. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164:101—110.
- Georgeaud, V., Rochette, P., Ambrosi, J., 1997. Relationship between heavy metals and magnetic properties in a large polluted catchment: The Etang de Berre (South of France). *Physics and Chemistry of the Earth*, 22:211—214.
- Hanesch, M., Scholger, R., 2002. Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. *Environmental Geology*, 42:857—870.
- Hu, S., Wang, Y., Appel, E., 2003. Magnetic responses to acidification in Lake Yangzonghai in Yunnan, SW China. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28:711—717.
- Hullet, L. D., Weisberger, A. J., Northcutt, K. J., et al., 1980. Chemical species in fly ash from coal-burning power plants. *Science*, 210:1356—1358.
- Kapická, A., Jordanova, N., Petrovský, E. et al., 2001. Effect of different soil conditions on magnetic parameters of power-plant fly ashes. *Journal of Applied Geophysics*, 48:93—102.
- Li, X. D., Poon, C. S., Liu, P. S., 2001. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong. *Applied Geochemistry*, 16:1361—1368.
- Oldfield, F., 1991. Environmental magnetism—A personal perspective. *Quaternary Sciences Reviews*, 10(1):73—85.
- Peters, C., Dekkers, M. J., 2003. Selected room temperature magnetic parameters as a function of mineralogy, concentration and grain size. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28:659—667.
- Peters, C., Thompson, R., 1998. Magnetic identification of selected natural iron oxides and sulphides. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 183:365—374.
- Petrovský, E., Kapička, A., Jordanova, N., et al., 2001. Magnetic properties of alluvial soils contaminated with lead, zinc and cadmium. *Journal of Applied Geophysics*, 48:127—136.
- Pitambar, G., Ulrich, B., Erwin, A., et al., 2004. Environmental magnetic approach towards the quantification of pollution in Kathmandu urban area, Nepal. *Physics and Chemistry of the Earth*, 29:973—984.
- Shu, J., John, A. D., Andrew, P. M., et al., 2001. Determining the sources of atmospheric particles in Shanghai, China, from magnetic and geochemical properties. *Atmospheric Environment*, 35:2615—2625.
- Shu, X. X., Liu, Z. W., Wang, H. Z., et al., 1995. The Magnetic properties of lake sediments from Dongying depression and their relation to the change of environment. *Acta Sedimentologica Sinica*, 13(Suppl.):96—101.
- Sigh, M., Ansari, A. A., Müller, G., et al., 1997. Heavy metals in freshly deposited sediments of the Gomati River (a tributary of the Ganga River): Effects of human activities. *Environmental Geology*, 29(3—4):246—252.
- Sun, Z. M., Hu, S. Y., Ma, X. H., 1996. A rock-magnetic study of recent lake sediments and its palaeoenvironment implication. *Acta Geophysica Sinica*, 39(2):178—187.
- Zhang, Y. F., Li, C. A., Chen, G. J., et al., 2005. Characteristics and Paleoclimatic Significance of Magnetic Susceptibility and Stable Organic Carbon Isotopes from a Bore in Zhoulao Town, Jiangnan Plain. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(1):114—120 (in Chinese with English abstract).
- Tian, Z., Liu, Q. S., 2003. A study for relationship between urban contamination and magnetic characteristics of road dust from the Chibi city, Hubei province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(6):701 (in Chinese with English abstract).
- Yu, L., Oldfield, F., Wu, Y., 1990. Paleoenvironmental implications of magnetic measurements on sediment core from Kunming basin, SW China. *J. Paleolimnol.*, 3:95—111.
- Zhang, L. Y., Wei, J. B., 1998. Study on pollution situation of East Lake in Wuhan and strategies of sustainable development. *Wuhan University Journal (Natural Science Edition)*, 44(6):665—668 (in Chinese with English abstract).
- Zoe, G. E., Bob, J., Janusz, D., et al., 1999. Possible evidence for dissimilatory bacterial magnetite dominating the magnetic properties of recent lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 168:1—6.

#### 附中文参考文献

- 张玉芬, 李长安, 陈国金, 等, 2005. 江汉平原湖区周老镇钻孔磁化率和有机碳稳定同位素特征及其古气候意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(1): 114—120.
- 张良轶, 韦进宝, 1998. 武汉东湖的污染现状与可持续发展对策研究. *武汉大学学报(自然科学版)*, 44(6): 665—668.