

# 电厂周围土壤磁化率对重金属污染的指示意义

刘 雯, 卢新卫\*, 陈灿灿, 周小龙

(陕西师范大学 旅游与环境学院 陕西 西安 710062)

**摘要** 采集西安灞桥燃煤电厂周围土壤, 测定土壤样品中 Cu、Pb、Zn 的含量和土壤磁化率, 分析磁化率与 Cu、Pb、Zn 的关系。结果表明, 燃煤电厂周围土壤的低频磁化率和高频磁化率均值分别为  $156.26 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  和  $145.95 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ , 随着到电厂距离的增大, 土壤的低频磁化率和高频磁化率在减小, 而频率磁化率在增大。Cu、Pb、Zn 的含量分别为 20.4 ~ 531.8  $\text{mg kg}^{-1}$ 、19.3 ~ 204.7  $\text{mg kg}^{-1}$  和 51.6 ~ 315.8  $\text{mg kg}^{-1}$ , 均高于陕西表层土壤元素背景值。土壤中 Cu、Pb、Zn 的含量及污染水平与低频和高频磁化率显著正相关, 与频率磁化率显著负相关。磁化率可用于指示土壤中 Cu、Pb、Zn 的污染状况。

**关键词** 燃煤电厂 土壤 磁化率 重金属 单项污染指数

中图分类号 X833 文献标识码: A 文章编号 0564-3945(2013)04-0993-05

近年来, 磁学方法被广泛应用于环境研究领域, 尤其在土壤和沉积物重金属污染监测方面得到较广泛的应用。磁学测量方法具有快速、简便、对样品无破坏、能现场作业、测量参数多等特点<sup>[1]</sup>。土壤磁学参数与重金属关系研究表明, 表征磁学特征的磁性参数与重金属污染水平密切相关<sup>[2]</sup>。磁化率是磁性测量中的一个重要磁学参数, 是土壤在外磁场中感应产生的磁化强度与外加磁场强度的比值<sup>[3,4]</sup>。磁化率的高低可以反映土壤磁性的强弱以及土壤中铁磁性矿物的含量<sup>[5]</sup>, 且与土壤中部分重金属含量有密切关系<sup>[6-9]</sup>。

随着经济发展过程中电力需求的快速增长, 大量燃煤电厂相继建成, 或电厂装机容量不断扩增, 燃煤发电的环境安全问题逐渐引起人们的广泛关注<sup>[10-14]</sup>。为快速诊断燃煤发电活动对周围土壤重金属含量与污染水平的影响, 本研究以西安灞桥燃煤电厂为例, 在电厂周围土壤样品采集、磁化率分析、重金属含量测试的基础上, 研究土壤磁化率与土壤重金属含量及污染水平之间的关系, 探讨磁化率对重金属污染的指示意义, 为磁学方法在重金属污染快速监测方面的应用提供进一步的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

灞桥燃煤电厂位于西安的东北角, 1951 年建成, 年发电量达到  $3.7 \times 10^9 \text{ kWh}$ , 烟尘高度 150 m。电厂每年燃煤量 860000 t, 燃煤主要来自于陕西省的渭北

煤矿区。每年的粉煤灰和底灰的产量达到 184000 t。为减少燃煤污染, 2003 年安装了静电除尘系统。电厂周围土壤样品的采集以热电厂为中心, 分别在距离电厂 100 m (1 ~ 12 采样点)、400 m (13 ~ 32 采样点) 和 1000 m (33 ~ 44 采样点) 处布设采样点 (图 1), 共采取土壤样品 44 个。每个采样点采集  $2 \times 2 \text{ m}$  的正方形的 4 个顶点表层 (0 ~ 20 cm) 土壤, 均匀混合, 用四分法取 1.5 kg 左右土样, 装入聚乙烯塑料袋, 编号, 并记录采样点周围环境状况。所有样品带回实验室, 在通风、避光、室温的条件下自然风干。然后破碎, 所有样品先过 10 目 (2 mm) 的尼龙筛以剔除小石子、碎片、植物根系等外来物, 然后过 20 目筛子 (0.9 mm) 装袋并做好标记, 用于后续的实验分析。

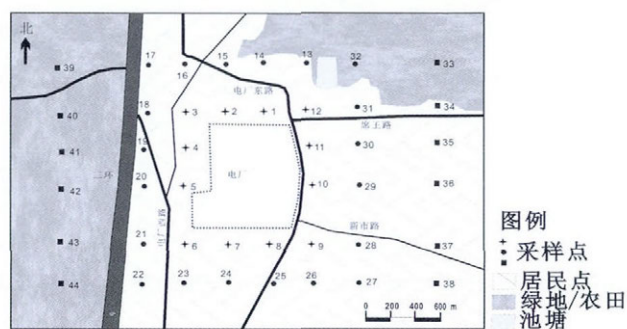


图 1 西安灞桥燃煤电厂周围土壤采样点示意图

Fig. 1 The sketch map of the soil sample sites around Baqiao coal-fired power plant of Xi'an City

### 1.2 实验方法

称取过 0.9 mm 的土壤样品 10 g, 用英国 Bartington

收稿日期 2012-09-03, 修订日期 2012-10-31

基金项目 国家自然科学基金 (41271510)、教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-05-0861) 和中央高校基本科研业务费专项资金项目 (GK200901008) 资助

作者简介 刘 雯 (1989-), 女, 陕西礼泉人, 硕士研究生, 研究方向为环境污染与修复。E-mail: wenliu@stu.snnu.edu.cn

\* 通讯作者 E-mail: luxinwei@snnu.edu.cn

的 MS-2 磁化率仪测定样品的低频和高频磁化率 (0.47 kHz 和 4.7 kHz), 每个样品连续测定三次, 最后取平均值。频率磁化率采用公式  $\chi_{fd}(\%) = (\chi_{LF} - \chi_{HF}) / \chi_{LF} \times 100$  计算, 公式中  $\chi_{LF}$  和  $\chi_{HF}$  分别表示高频和低频磁化率<sup>[3]</sup>。用四分缩分法取 100g 土样, 研磨后过 0.075mm 尼龙筛。称取过 0.075mm 样品 4g 和 2g 硼酸制成压片。用 X-Ray 荧光光谱仪(PW2403, 荷兰帕纳科仪器公司)测定样品中 Cu、Pb、Zn 的含量。实验过程中采用 GSS-1 和 GSD-12 标准物质及重复样进行质量控制, 误差及偏差均在 5% 以内。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤磁学特征

西安灞桥燃煤电厂周围土壤磁化率特征如表 1 所示。由表 1 可见, 西安灞桥燃煤电厂周围土壤的低频磁化率为  $36.8 \times 10^{-8} \sim 620.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ , 平均值为  $156.26 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ , 高频磁化率为  $35.5 \times 10^{-8} \sim 604.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ , 平均值为  $145.95 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 。高频磁化率可反映环境介质中是否存在顺磁性矿物和

反铁磁性矿物<sup>[16]</sup>。频率磁化率在 2.0% ~ 10.3% 之间, 平均值为 7.1%, 说明土壤样品中磁性矿物含量高, 超顺磁性颗粒和粗颗粒混合存在, 以粗颗粒为主<sup>[15]</sup>。频率磁化率的大小可以反映超顺磁性颗粒的相对含量, 一般超顺磁晶粒大约在 0.001 ~ 0.01  $\mu\text{m}$ <sup>[17]</sup>。低频和高频磁化率的最大值均出现在距离燃煤电厂 100 m 处, 最小值均出现在距离电厂 1000 m 处。

图 2 显示, 随着到电厂距离的增大, 土壤的低频磁化率和高频磁化率在减小, 而频率磁化率在增大。汪罗等<sup>[18]</sup>研究指出, 土壤频率磁化率越低, 低频或高频磁化率越高, 表明样品中重金属的污染程度越严重。电厂周围土壤的低频磁化率高于西安城市公园土壤的低频磁化率, 而频率磁化率低于西安城市公园土壤的频率磁化率<sup>[19]</sup>。同时, 燃煤电厂周围土壤的高频和低频磁化率也均高于西安市郊农田土壤磁化率<sup>[20]</sup>, 这说明燃煤发电活动已经影响到周围土壤的环境质量状况, 燃煤电厂周围土壤的污染程度较西安市郊农田土壤和城市公园土壤严重。

表 1 西安灞桥燃煤电厂周围土壤磁化率特征

Table 1 The magnetic susceptibility characteristics in soil around of Xi'an Baqiao coal-fired power plant

磁化率 Magnetic susceptibility	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	中值 Mediam	标准偏差 Standard deviation	变异系数 CV
低频磁化率 ( $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ )	620.5	36.8	156.3	141.9	90.4	58%
高频磁化率 ( $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ )	604.2	35.5	146.0	130.5	88.3	61%
频率磁化率 (%)	10.3	2.0	7.1	7.1	2.0	27%

### 2.2 土壤 Cu、Pb、Zn 含量特征

燃煤电厂周围土壤中重金属 Cu、Pb、Zn 含量分别为 20.4 ~ 531.8、19.3 ~ 207.1 和 51.6 ~ 315.8  $\text{mg kg}^{-1}$ , 其平均值分别为 40.3、34.7 和 83.7  $\text{mg kg}^{-1}$ , 均高于陕西表层土壤元素背景值<sup>[21]</sup>。图 3 显示, 距离电厂 100 m 处土壤中 Cu、Pb、Zn 的平均含量分别为 76.6、50.8 和 108.0  $\text{mg kg}^{-1}$ , 分别是陕西土壤背景值<sup>[21]</sup>的 3.6、2.4 和 1.6 倍。电厂周围土壤中 Cu、Pb、Zn 的含量呈现出随着到电厂距离的增大而减小的趋势, 这一变化特征与土壤低频磁化率和高频磁化率变化规律相同, 而与频率磁化率变化趋势相反。土壤中 Cu、Pb、Zn 含量与磁化率的相关分析结果(表 2)也充分证实这一点。表 2 显示, 土壤高频和低频磁化率与土壤中 Cu、Pb、Zn 含量呈显著正相关, 而频率磁化率与 Cu、Pb、Zn 含量呈显著负相关, 说明土壤中 Cu、Pb 和 Zn 含量的高低与土壤中磁性矿物的多少以及磁性矿物的种类有关, 即与土壤磁化率有关。因此, 电厂周围土壤 Cu、Pb、Zn 的含量及污染状况可用磁化率表征。土壤磁化率与重金属含量的这一关系在其他相关研究中也类似发现。例

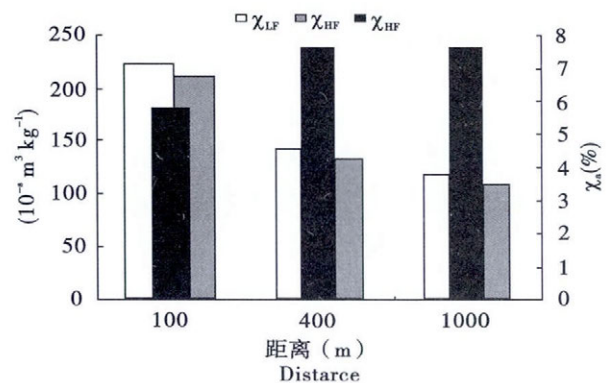


图 2 磁化率的空间分布图

Fig. 2 The spatial variation of magnetic susceptibility

如, 刘志峰等<sup>[22]</sup>研究发现, 武汉市东湖周边土壤磁化率与土壤中 Ca、Cu、Pb、Sr、Zn 的质量分数显著相关。姜月华等<sup>[23]</sup>对湖州市土壤磁化率与重金属分布规律研究表明, 表层土壤磁化率与重金属元素 Cd、Hg、Pb、As 和 Cr 含量之间存在明显相关性。Duan XueMei 等<sup>[24]</sup>研究发现南京钢铁公司周围土壤磁化率与土壤中重金属含量也具有一定的相关性。

2.3 磁化率对土壤 Cu、Pb、Zn 污染的指示

为利用磁化率指示土壤中 Cu、Pb、Zn 的污染状况,本文利用回归分析法对土壤磁化率与土壤中 Cu、Pb、Zn 的单项污染指数进行了拟合。单项污染指数采用样品中 Cu、Pb、Zn 的含量比上陕西表层土壤背景值进行计算。拟合结果见图 4。由图 4 可见,灞桥燃煤电厂周围土壤低频磁化率和高频磁化率与土壤中 Cu、Pb、Zn 的单项污染指数均呈现幂指数关系,且相关系

数较高,土壤频率磁化率与 Cu、Pb、Zn 的单项污染指数均呈现二阶多项式关系,然而相关系数相对较小。说明,土壤低频磁化率和高频磁化率更能反映土壤中 Cu、Pb、Zn 的污染状况,通过快速测定土壤低频磁化率或者高频磁化率,依据拟合关系方程可以推算出土壤中 Cu、Pb、Zn 的污染指数,进而判断土壤中 Cu、Pb、Zn 的污染状况。

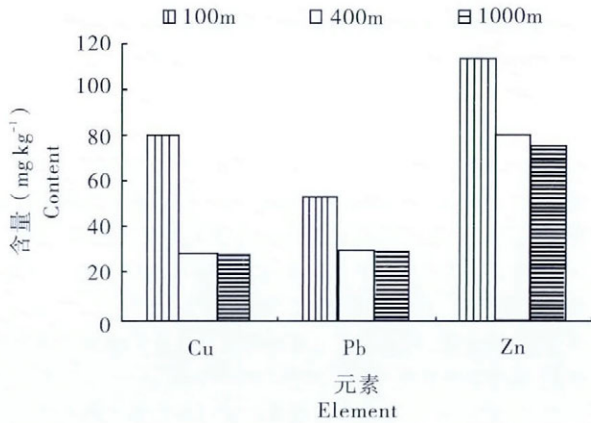


图 3 重金属含量的空间分布图  
Fig. 3 The spatial variation of heavy metal contents

表 2 磁化率与重金属含量相关分析结果

Table 2 The correlation results of magnetic susceptibility and heavy metal contents

指标 Indexes	$\chi_{LF}$	$\chi_{HF}$	$\chi_{td}$	Cu	Pb	Zn
$\chi_{LF}$	0.999**	-0.456**		0.824**	0.885**	0.883**
$\chi_{HF}$		-0.481**		0.832**	0.892**	0.887**
$\chi_{td}$				-0.383*	-0.447**	-0.415**
Cu					0.956**	0.901**
Pb						0.959**
Zn						

注: \*表示  $P < 0.05$  水平上具有显著性, \*\*表示在  $P < 0.01$  水平上具有显著性。

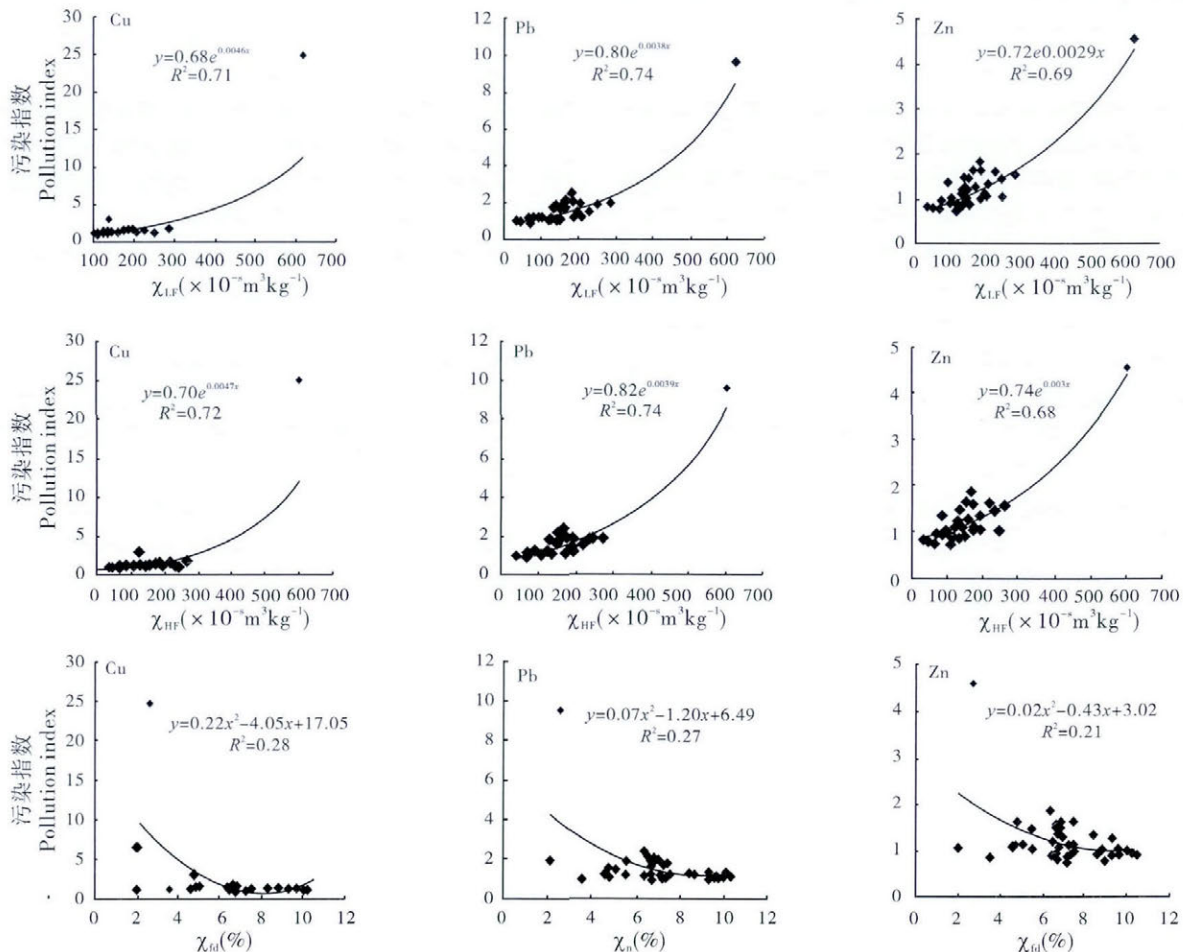


图 4 磁化率与 Cu、Pb、Zn 污染指数间的关系  
Fig. 4 The relationship between the magnetic susceptibility and the pollution index of Cu, Pb and Zn

### 3 结论

(1) 燃煤电厂周围土壤中 Cu、Pb、Zn 的含量高于陕西表层土壤背景值, 污染程度较西安市郊农田土壤和城市公园土壤严重。

(2) 燃煤电厂周围土壤磁性矿物含量较高, 以粗颗粒为主。随着到燃煤电厂距离的增大, 土壤的低频磁化率和高频磁化率在减小, 而频率磁化率在增大, 电厂周围土壤中 Cu、Pb、Zn 的含量呈现出随着到电厂距离的增大而减小的趋势, 说明燃煤发电活动已经影响到周围土壤的环境质量状况。

(3) 燃煤电厂周围土壤的低频磁化率和高频磁化率均高于西安市郊农田土壤及公园土壤, 而频率磁化率低于西安市郊农田土壤及公园土壤。土壤低频磁化率和高频磁化率与土壤中 Cu、Pb、Zn 含量的变化趋势相同, 呈现显著的正相关关系。磁化率与 Cu、Pb、Zn 污染指数拟合结果显示, 低频磁化率和高频磁化率可以很好地用于指示土壤 Cu、Pb、Zn 的污染水平。

#### 参考文献:

- [1] 符超峰, 强小科, 宋友桂, 等. 磁学方法及其在环境污染研究中的应用[J]. 东华理工大学学报, 2008, 31(3): 249 - 254.
- [2] STRZYSZCZ Z, MAGIERA T. Magnetic susceptibility and heavy metals contamination in soils of southern Poland [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1998, 23: 1127 - 1131.
- [3] 姜月华, 王润华, 康晓钧. 长三角湖州市土壤磁化率与铜、锌有效量和全量分布规律[J]. 资源调查与环境, 2006, 27(3): 223 - 231.
- [4] 方 芳, 李晓燕. 磁化率对土壤重金属污染的指示作用[J]. 环境监测管理与技术, 2011, 23: 78 - 83.
- [5] 依艳丽, 谷微微, 张大庚, 等. 葫芦岛市土壤磁化率与重金属元素分布规律及其相关性研究[J]. 土壤, 2008, 40(5): 806 - 811.
- [6] 闫 倩, 戴 霜, 刘海娇, 等. 兰州某钢厂附近土壤磁化率特征及其环境意义[J]. 中国环境科学, 2011, 31(10): 1732 - 1737.
- [7] 沈明洁, 胡守云, U.BLAHA, 等. 北京石景山工业区附近一个污染土壤剖面的磁学研究 [J]. 地球物理学报, 2006, 49 (6): 1665 - 1673.
- [8] TAO YANG, QINGSHENG LIU, HAIXIA LI, et al. Anthropogenic magnetic particles and heavy metals in the road dust: Magnetic identification and its implications[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44: 1175 - 1185.
- [9] Q.MORTON-BERMEA E HERNANDEZ E MARTINEZ-PICHARDO, et al. Mexico City topsoils: Heavy metals vs. magnetic susceptibility [J]. Geoderma, 2009, 151: 121 - 125.
- [10] XINWEI LU, XIAOXUR LI, PUJUN YUN, et al. Measurement of natural radioactivity and assessment of associated radiation hazards in soil around Baoji second coal-fired thermal power plant, China[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2012, 148(2): 219 - 226.
- [11] XINWEI LU, XIAOPENG YANG, LINGQING WANG. Spatial analysis and hazard assessment of mercury in soil around the coal-fired power plant: a case study from the city of Baoji, China[J]. Environmental Geology, 2008, 53(7): 1381 - 1389.
- [12] LINGQING WANG, XINWEI LU. Natural radionuclide concentrations in soils around Baoji coal-fired power plant, China[J]. Radiation Effects & Defects in Solids, 2007, 162(9): 677 - 683.
- [13] 李晓雪, 卢新卫, 任春辉, 等. 宝鸡二电厂周边农田土壤重金属污染特征及评价[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 220 - 224.
- [14] 王凌霄, 卢新卫, 王利军, 等. 宝鸡燃煤电厂周围土壤环境 Hg 污染及其评价[J]. 土壤通报, 2007, 38(3): 622 - 624.
- [15] 卢升高, 白世强. 杭州城区土壤的磁性及磁性矿物学及其环境意义[J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 762 - 769.
- [16] 张春霞, 黄宝春. 环境磁学在城市环境污染监测中的应用和进展 [J]. 地球物理学进展, 2005, 20(3): 705 - 711.
- [17] 张卫国, 俞立中, 许 羽. 环境磁学研究的简介 [J]. 地球物理学进展, 1995, 10(3): 95 - 105.
- [18] 旺 罗, 刘东生, 吕厚远. 污染土壤的磁化率特征 [J]. 科学通报, 2000, 45(10): 1091 - 1094.
- [19] 黄 静. 西安市公园土壤的重金属含量水平及理化性质研究[D]. 西安: 陕西师范大学旅游与环境学院, 2009: 26 - 27.
- [20] 王凌霄, 卢新卫, 贾晓丹. 西安市郊农田土壤环境地球化学研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2007(3): 113 - 117.
- [21] 陈景辉, 卢新卫, 翟 萌. 西安城市路边土壤重金属来源与潜在风险[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1810 - 1816.
- [22] 刘志峰, 杨 涛, 韩 松, 等. 武汉市东湖周边近地表土壤磁化率特征及其环境意义[J]. 地质科技情报, 2009, 28(4): 137 - 142.
- [23] 姜月华, 殷鸿福, 王润华, 等. 湖州市土壤磁化率与重金属元素分布规律及其相关性研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35 (5): 653 - 666.
- [24] DUAN XUEMEI, HU SHOUYUN, YANHAITAO, et al. Relationship between magnetic parameters and heavy element contents of arable soil around a steel company, Nanjing [J]. Science China: Earth Sciences, 2010, 53: 411 - 418.

## The Indicating Significance of Magnetic Susceptibility of Soil Around Coal-Fired Power Plant for Heavy Metal Pollution

LIU Wen, LU Xin-wei<sup>\*</sup>, CHEN Can-can, ZHOU Xiao-long

(College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

**Abstract:** The magnetic susceptibility and concentrations of Cu, Pb and Zn in soil around Xi'an Baqiao coal-fired power plant are determined for analyzing their relationship. The results show that the average values of low and high frequency magnetic susceptibility are  $156.26 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  and  $145.95 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ , respectively. The means of magnetic susceptibility are decreasing and the frequency magnetic susceptibility is increasing with the distance expanding. The concentrations of Cu, Pb and Zn in soil around Xi'an Baqiao coal-fired power plant are 20.4 - 531.8, 19.3 - 204.0 and 51.6 - 315.8  $\text{mg kg}^{-1}$  respectively, which are higher than the corresponding background values of Shaanxi soil. The concentrations of Cu, Pb and Zn are positively correlated with the low and high frequency magnetic susceptibility significantly and heavy metals pollution levels, while are negatively correlated with the frequency magnetic susceptibility. The magnetic susceptibility can indicate the pollution level of Cu, Pb and Zn in soil.

**Key words:** Coal-fired power plant; Soil; Magnetic susceptibility; Heavy metal; Single pollution index