

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. 地球物理学报, 2006, 49(6):1665~1673  
Shen M J, Hu S Y, U. Blaha, et al. A magnetic study of a polluted soil profile at the Shijingshan industrial area, Western Beijing, China.  
*Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(6):1665~1673

## 北京石景山工业区附近一个污染 土壤剖面的磁学研究

沈明洁<sup>1,2</sup>, 胡守云<sup>1</sup>, U. Blaha<sup>3</sup>, 闫海涛<sup>1,2</sup>, W. Rösler<sup>3</sup>, V. Hoffmann<sup>3</sup>

1 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 德国图宾根大学地球物理研究所, 图宾根 72076

**摘要** 对北京西郊石景山工业区附近的土壤剖面进行环境磁学研究, 结合粒度、金属元素分析、磁学指标测试和多元统计分析, 发现磁参数( $\chi$ , ARM, SIRM)与重金属元素(Mn, Cu, Fe, Pb, Zn, Al, Sr)含量呈同步垂向变化趋势。来源于工业区附近工业生产排放(钢铁厂、发电厂、水泥厂)的污染物是土壤剖面上部(0~3 cm)磁性和金属含量增强的主要原因, 由富集在细粉砂和中粉砂的多畴磁铁矿主导了样品的磁性特征。3~10 cm 重金属含量逐渐下降, 土壤的磁性特征与上层相似, 但磁性矿物含量降低, 属于剖面中的迁移过渡阶段。10 cm 以下, 土壤基本未受到污染, 磁性矿物和重金属含量都低, 磁性颗粒大小变化稳定, 基本代表了该地区土壤的自然背景。指标聚类和相关分析表明, 土壤磁参数与重金属元素含量显著相关。结合模糊聚类分析, 磁参数可用于追踪、识别工业污染物质在土壤剖面中的富集、迁移状态, 揭示不同深度土壤的污染程度。

**关键词** 土壤剖面, 工业污染, 磁参数, 重金属, 多元统计

文章编号 0001-5733(2006)06-1665-09 中图分类号 P318 收稿日期 2005-07-10, 2006-08-09 收修定稿

### A magnetic study of a polluted soil profile at the Shijingshan industrial area, Western Beijing, China

SHEN Ming-Jie<sup>1,2</sup>, HU Shou-Yun<sup>1</sup>, U. Blaha<sup>3</sup>, YAN Hai-Tao<sup>1,2</sup>, W. Rösler<sup>3</sup>, V. Hoffmann<sup>3</sup>

1 Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Institute of Geosciences, University of Tuebingen, 72076 Tuebingen, Germany

**Abstract** A soil profile of 74 cm length was sampled in the hillside close to Beijing Muslim's Cemetery, which is located in the Yingshan Forest Park near the Shijingshan industrial area. Coal-fired power plants, a steel mill, and a cement factory are located close to the sampling site. Gray-black pollutants can be found within the uppermost part of the soil. Magnetic measurements, grain size and geochemical analysis, as well as multivariate statistics were performed. Magnetic proxies show similar trends compared to heavy metal elements with higher concentrations at the top and lower concentrations in the lower part. The anthropogenic dust input from industrial activity is the predominant cause for strong magnetic signals in the uppermost soil horizon (0~3

**基金项目** 国家自然科学基金面上项目(40374021, 40172102)、国家重点基础研究发展计划(2002CB412300)以及德国 DFG 课题(AP 34/21)共同资助。

**作者简介** 沈明洁,女,1977年生,2003级博士研究生,曾在德国图宾根大学地质与古生物研究所作访问学者,主要从事环境磁学及应用研究。

E-mail: mingjie\_shen@hotmail.com

cm). The main magnetic component is magnetite contained in the grain size fractions of 4~16  $\mu\text{m}$  and 16~32  $\mu\text{m}$ . These pollutants are observed up to about 10 cm depth. Below 10 cm, there is little pollution in soil with lowest concentration of magnetic minerals and heavy metals comparable to natural background values. Multivariate statistics and fuzzy C-means cluster analysis show positive correlation of  $\chi$ , ARM, SIRM and Mn, Cu, Fe, Pb, Zn, Al and Sr. Based on the results, it can be concluded that magnetic parameters can be used as a sensitive indicator for screening heavy metal pollution.

**Keywords** Soil profile, Industrial pollution, Magnetic parameter, Heavy metal, Multivariate statistics

## 1 引言

随着现代化进程的日益加快,人类活动引起的各种污染已经严重影响了生态环境质量和人类的健康与安全.钢铁生产、金属冶炼和火力发电等是工业化社会不可缺少的生产活动,但其产生的降尘含有多种有害重金属元素,这是周围环境的一个重要污染源.它们通过大气在地表沉降,直接堆积、渗透在土壤里,严重污染了土壤环境<sup>[1,2]</sup>.而且已有的研究表明,这种降尘同时也富含磁性颗粒,多与重金属伴生出现,导致其沉降的表土发生重金属污染,这使得利用磁学手段研究污染成为可能<sup>[3,4]</sup>.

传统的环境监测依赖于精确完善的化学分析技术(如 AAS, ICP-MS 等)<sup>[5,6]</sup>,但不足之处在于成本高、耗时多、工作量大.这就促使科学界要发展快速、经济的扫描(Screening)技术,同时结合已有的标准化学方法对整个污染监测策略进行优化.近年来,利用土壤磁学性质和重金属的相关关系进行重金属污染调查是国际上正在兴起的一种有效手段<sup>[7~9]</sup>.而且环境磁学方法所具有的样品用量少、灵敏度高、简便快速、非破坏性、费用低等特点,对土壤重金属污染研究提供了新方法<sup>[10]</sup>.一些工业区附近的磁学研究揭示,磁化率的增高与火电厂、钢铁厂、水泥厂有关,而且这种磁性增强与强磁性铁氧化物的含量具有一定的相关性.磁学手段已作为评价一些工业区和城市环境污染的主要工具之一<sup>[11~14]</sup>.因此,正确认识工业污染,尤其是重金属污染的磁学机理,阐明土壤污染与磁性参量之间的关系,运用环境磁学开展污染研究具有重要的科学意义与应用前景.作者在北京石景山工业区附近选择了典型的污染土壤剖面,结合磁学、地球化学、粒度等分析手段,并借助多元统计分析等方法,探索重金属污染与磁学指标的联系,旨在揭示土壤剖面中磁性矿物与重金属的垂向迁移特点.

## 2 样品采集和测量

石景山工业区位于北京城西部,西五环以西、永定河以东地区,主要包括首都钢铁公司所辖的一系列钢铁铸造厂、石景山热电厂、水泥与化工等生产企业.采样地点紧靠工业区,位于永定河南西南方向,鹰山森林公园西侧的回民公墓山坡上(图 1).利用土壤取样器采集 12 个土壤柱样,所有剖面上部均呈灰黑色,下部颜色逐渐变浅.现场利用土壤磁化率仪(Soil Magnetic Susceptibility Meter SM-400, 欧洲 MAGPROX 工作组研制)对所有土壤柱样进行测试,结果相似(图 2),因此选择其中一个剖面(BJ904S)做详细研究.利用小铲自下而上以 0.5~4 cm 间距不等采集样品 58 个,其中 0~16 cm 每 0.5 cm 一个样,16~26 cm 每 1 cm 一个样,26~40 cm 每 2 cm 一个样,40~74 cm 每 4 cm 一个样.样品用封口塑料袋密封,在封口袋上标明样号、深度,运回实验室测试分析.

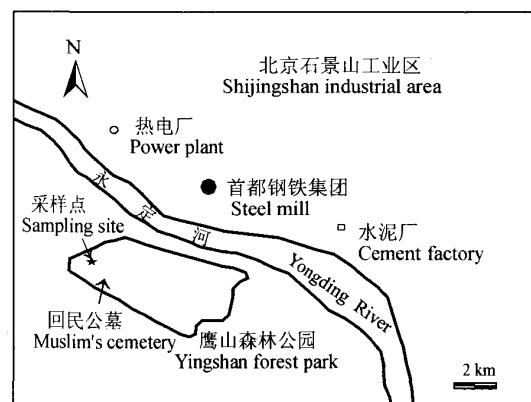


图 1 研究区地理位置图

Fig. 1 Map showing geographical location of the study area

在实验室中将样品装入 2 cm × 2 cm × 2 cm 的聚乙烯样品盒中待测,其中体积磁化率( $\kappa$ )是在南京大学地球科学系地球物理实验室,使用捷克 AGICO

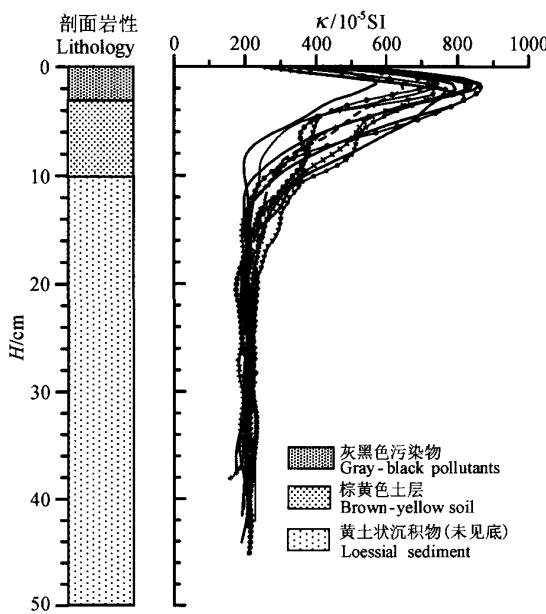


图 2 土壤剖面基本岩性和 12 个原始  
磁化率  $\kappa$  随深度  $H$  变化曲线图

Fig. 2 Lithostratigraphy and 12 magnetic susceptibility  $\kappa$  curves along with depth  $H$  of the soil profile

公司的 KLY-3 卡帕桥仪器完成。非滞后剩磁 (Anhysteretic Remanent Magnetization, ARM) 是使用 Molspin 交变退磁仪和 ARM 装置在  $50 \mu\text{T}$  的直流偏置场和  $0.1 \text{ T}$  的交变磁场峰值下获得。饱和等温剩磁 (Saturation Isothermal Remanent Magnetization, SIRM) 是使用 Molspin 脉冲磁化仪在  $1 \text{ T}$  的磁场下获得, 再在其反方向加  $300 \text{ mT}$  磁场获得等温剩磁 ( $\text{IRM}_{300 \text{ mT}}$ ), 其比值 ( $\text{IRM}_{300 \text{ mT}}/\text{SIRM}$ ) 视为  $S_{\text{ratio}}$ 。剩磁测量选用 Minispin 旋转磁力仪获得。根据测量结果, 计算单位质量磁化率  $\chi$ , ARM, SIRM 及各种比值参数。

样品自然风干后, 在  $55^{\circ}\text{C}$  下烘干, 经磨细  $< 100$  目, 在 Berghof MWS-3 微波消解系统中按 EPA 3052 方法消化反应, 再加少量高氯酸蒸干溶液, 最终待测溶液酸度为 5% 硝酸。采用 LEEMAN LABS PROFILE 电感耦合等离子体原子发射光谱仪 (ICP-AES) 测定 Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Sr 等 7 种金属元素的含量。采用美国 SPEX<sup>TM</sup> 混合标准溶液, NIST SRM 1646a 作为标准参考物质。

粒度分析采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer2000 型激光粒度仪。样品先加 30% 双氧水滤去有机质, 再加入离散剂六偏磷酸钠, 超声波振荡后测量。

以上实验除磁化率均在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境开放实验室完成。

热磁分析曲线是在德国图宾根大学古地磁实验室, 使用 KLY-3 卡帕桥及 CS3 温度装置自动监测完成。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤剖面的磁性特征

土壤剖面的磁参数曲线可以反映土壤中磁性矿物随深度的变化特征。 $\chi$  与 SIRM 近似地指示了样品中亚铁磁性矿物(如磁铁矿)的含量。 $S_{\text{ratio}}$  反映了样品中亚铁磁性矿物与斜交反铁磁性矿物(如赤铁矿、针铁矿)的相对比例, 它随着斜交反铁磁性矿物贡献的增加而下降<sup>[15, 16]</sup>。由图 3 看出, 整个土壤剖面中  $\chi$ , ARM 与 SIRM 随深度的变化特征极为相似, 都在 3 cm 处有一个高峰值, 样品呈灰黑色, 3 cm 以上  $\chi$  平均值为  $950.58 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , 3 ~ 10 cm 左右,  $\chi$  值明显低于上部的, 平均值为  $516.14 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , 剖面颜色也变浅至棕黄。再往下  $\chi$  值更趋向稳定, 平均值为  $136.56 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , 样品颜色较上部变得更浅。这些反映磁性矿物浓度的参数说明亚铁磁性矿物在不同深度的不同贡献。整个土壤剖面的  $S_{\text{ratio}}$  都在 90% 以上, 说明亚铁磁性矿物主导了样品的磁性特征, 但同时存在少量斜交反铁磁性矿物的贡献。

$\text{ARM}/\chi$ 、 $\text{ARM}/\text{SIRM}$ 、 $\text{SIRM}/\chi$  等磁参数比值通常可以用来指示磁性矿物的颗粒粗细特征<sup>[17, 18]</sup>。因为 ARM 受到磁性矿物晶粒大小的显著影响, 尤其对细颗粒单畴磁性矿物更为敏感。磁性矿物的颗粒越小,  $\text{ARM}/\chi$ 、 $\text{ARM}/\text{SIRM}$  的比值越大, 而低值则反映样品中以粗颗粒的多畴(MD)或接近多畴的假单畴(PSD)为主。 $\text{SIRM}/\chi$  能指示磁性矿物种类的变化, 如果土壤中有多相磁性矿物存在, 其  $\text{SIRM}/\chi$  呈分散的点分布, 线性差; 相反如果沉积物中只有一种磁性矿物存在或是一种磁性矿物含量占绝对优势, 即使磁性矿物颗粒大小发生变化,  $\text{SIRM}/\chi$  也将呈线性相关<sup>[19]</sup>。

如图 3 所示: 剖面上部(0 ~ 10 cm 左右),  $\text{ARM}/\chi$ 、 $\text{ARM}/\text{SIRM}$  比值相对较低, 反映了土壤中磁性矿物以粗颗粒的 PSD 或 MD 为主, 表明工业区附近土壤中磁性矿物都以粗颗粒为主, 上部由于受到工业污染物质的影响, 出现了数值的波动, 这种显著的高

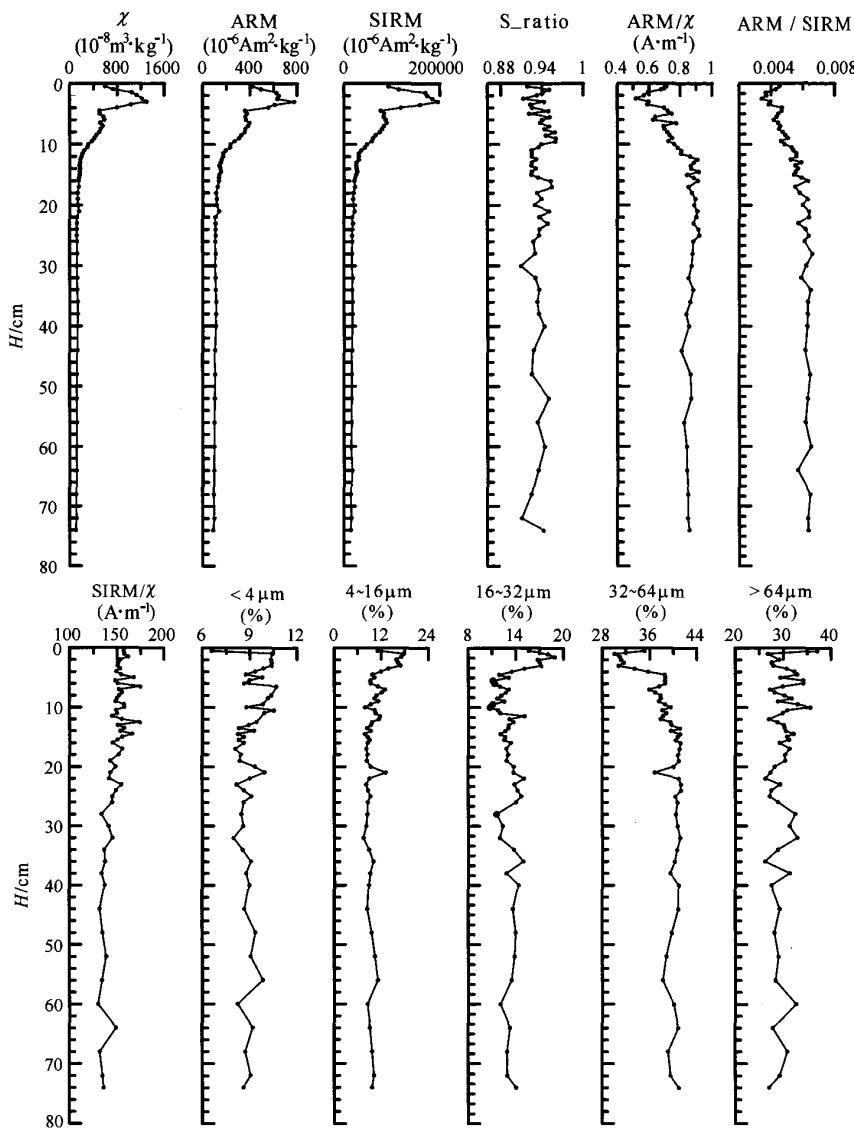


图 3 土壤剖面磁参数和不同粒径的垂向变化曲线

Fig.3 Vertical variations of magnetic parameters and grain size of the soil profile

磁化率和较粗的多畴颗粒往往是工业污染土壤的特征,和以往很多磁学污染研究结果一致<sup>[20,21]</sup>.而剖面下部  $\text{ARM}/\chi$ 、 $\text{ARM}/\text{SIRM}$  比值虽然发生轻微变化,但是仍然很低且比较稳定,主要是自然成因的土壤中磁性矿物因为受到低山丘陵区成土母质的影响,粒度较粗,且颗粒大小变化不大. $\text{SIRM}/\chi$  比值从上到下大致呈一条直线,相对摆动不大,反映土壤中主要以一种磁性矿物占绝对优势.

### 3.2 土壤粒度分析结果

沉积物和土壤粒度不仅是影响样品中矿物组成、元素含量的重要因素,还反映了搬运介质能量的

高低和沉积环境的变化,而且也影响到一些矿物的磁性特征<sup>[22,17]</sup>.图 3 显示了沉积物各个粒径体积百分含量随深度的垂直变化曲线,85% 的样品粘土( $< 4 \mu\text{m}$ )含量低于 10%.粉砂含量(4~64  $\mu\text{m}$ )为 58%~68% 之间,其中细粉砂(4~16  $\mu\text{m}$ )含量平均为 10.3%,中粉砂(16~32  $\mu\text{m}$ )含量平均为 13.5%,粗粉砂(32~64  $\mu\text{m}$ )含量平均为 38.6%,显然由粗粉砂主导了粉砂粒级,粘土含量百分比随深度变化不明显,砂( $> 64 \mu\text{m}$ )含量为 30%~40%.对比磁参数曲线,可以发现细粉砂、中粉砂与  $\chi$ , ARM, SIRM 等指标垂向变化较为相似.

### 3.3 重金属分析结果

在自然情况下,土壤中重金属主要来自于母岩和残落的生物物质,一般含量比较低,不会对人体及生态系统造成危害。但某些人类活动会对各种化学元素在土壤中的分布有重要影响,甚至使土壤遭受重金属污染的危害。来自许多工业生产过程的大量重金属元素通过大气、水体的输送,会直接或间接地降落在地表,与土壤中的有机物、腐殖质、胶体发生吸附、络合等作用进入沉积过程,造成大量重金属在

土壤中累积富集,因此土壤剖面中重金属元素的垂向分布特征是对污染历史的记录。

该剖面元素含量分布图表明土壤中 Al, Cu, Pb, Zn, Fe, Mn, Sr 等元素在 0~3 cm 深度含量很高(图 4),都在 3 cm 左右出现峰值;3~10 cm 范围内,含量逐渐降低;10 cm 以下,含量低而且相对稳定,与该区这些重金属的背景值相当<sup>[23]</sup>。从一定程度上反映了上部污染物质的输入,极大地增强了金属元素在剖面上部的沉积。

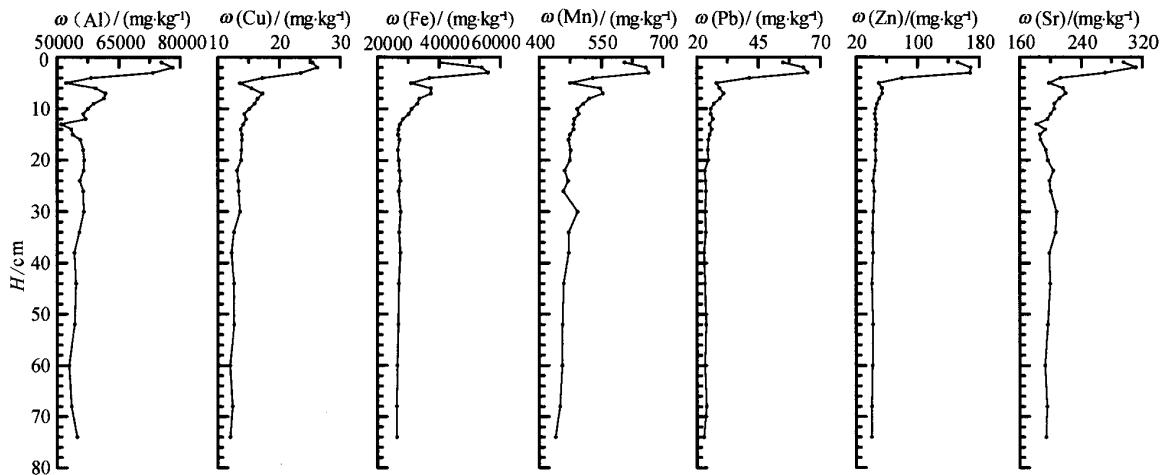


图 4 土壤剖面重金属含量  $\omega$  的垂向变化

Fig. 4 Vertical variations of heavy metal contents  $\omega$  of the soil profile

### 3.4 热磁分析特征

热磁分析可揭示磁性矿物在加热过程中的转变

规律,有助于识别沉积物中所赋存的磁性矿物的种类,进而提供有关土壤污染源的信息<sup>[24]</sup>。图 5 给出

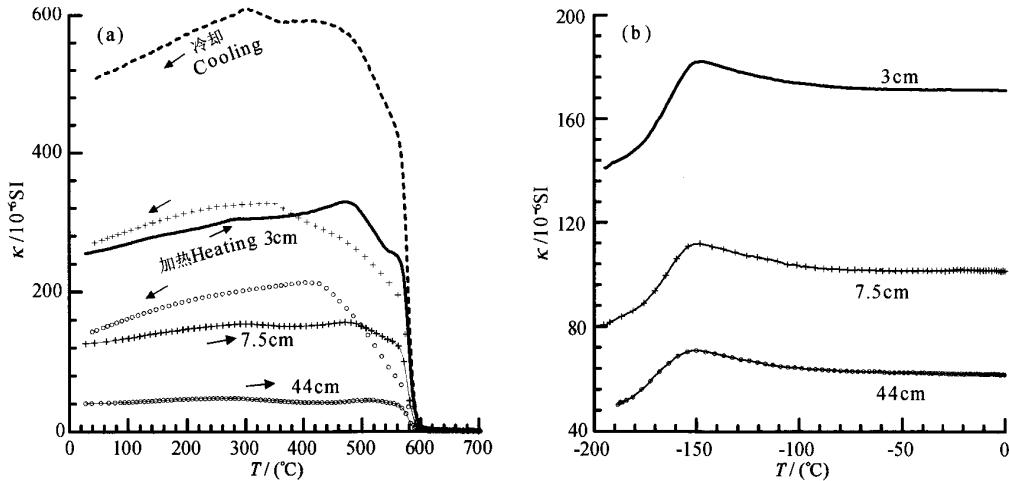


图 5 土壤样品的热磁变化曲线

(a) 高温变化,其中实线表示加热过程,虚线表示冷却过程;(b) 低温变化.

Fig. 5 Thermomagnetic runs ( $\kappa - T$ ) for the raw soil samples

(a) High-temperature curves, solid line represents heating, dashed line represents cooling; (b) Low-temperature curves.

了土壤剖面中不同深度样品的热磁分析结果,其中3 cm 深度的样品从室温到250℃呈现磁化率缓慢的上升,至470℃附近出现峰值,随后磁化率逐渐下降,在580℃附近出现急剧转折,迅速下降,显示出磁铁矿的居里温度,表明该样品的主要磁性矿物为磁铁矿。7.5 cm 和 44 cm 处的样品同样都揭示了磁铁矿的存在。由图上表示的样品初始磁化率值可以看出,随着深度的差异,样品中的磁铁矿含量显著不同,上部来自工业污染的磁性矿物的输入极大地增强了磁讯号,磁铁矿含量最高。7.5 cm 深度样品含有与上部相同的磁性矿物组合但含量相对减少,表明其与污染物质的迁移有关。底部样品中磁铁矿含量相对较低。所有样品冷却过程磁化率曲线明显高于加热过程,说明在热处理过程中,有大量新的磁铁矿生成。低温磁化率测试(图 5b)显示,所有样品都在-150℃经历了明显的 Verwey 磁性转变,同样证实了磁铁矿的存在<sup>[25~27]</sup>。

## 4 讨 论

为综合讨论磁性矿物富集与沉积物粒度、金属元素含量的相互关系,更好地揭示出污染物质及其磁性矿物在土壤剖面中的分布和垂直迁移情况,对上述土壤样品的磁学、粒度、元素指标进行多元统计分析。

### 4.1 指标相关分析

由于一般的实验研究存在多参数指标,数据量庞大复杂,一时很难对结果作出判断,利用指标聚类不仅可以简化整个数据分析过程,而且可以抽取所有变量间的本质联系。这不仅向研究者提供按实际问题要求的分类数目,同时也可以得到相应各子类的构成,找出它们之间的相互关系和亲近程度,有效地揭示指标间的联系<sup>[28]</sup>。运用 SPSS 软件进行指标聚类分析,结果由分类树状图形象地反映(图 6)。图中横坐标代表了不同指标间的距离(相似性或亲疏关系),距离越近,表明两者越相似。图 6 表明各项参数和指标之间经过若干次合并最终聚合成一类,从已经聚合的各类指标中挑选出一个有代表性的指标作为典型指标。由图可知,χ, ARM, SIRM 与 Fe, Mn 经过一次聚类就成为一组,距离最近(小于 5),与其余金属元素距离也很近(小于 10),反映了这些元素具有共同的来源或相似的地球化学行为。另外相关分析也佐证了这一点,土壤的磁学参数与金属元素含量有极为显著的相关性(表 1),表明土壤中磁性

组分与这些痕量重金属相互依存,这些磁参数可以作为这些重金属含量变化的代用指标。研究证实,沉积物中的金属与氧化铁有很密切的关系,可通过吸附、沉淀等形式与氧化铁结合,铁锰氧化物是非残渣态重金属的主要赋存形态,很大程度上控制了其他金属元素的地球化学循环<sup>[29]</sup>。因此该工业区土壤顶层的磁性和重金属含量异常不是由于土壤成因和母质引起的,而与工业污染有关,这些污染物中往往含有较粗的多畴亚铁磁性矿物,并与重金属相互富集,主导了受污染土壤的磁性特征。因此利用磁测数据,能够较为简捷地评价土壤剖面中重金属含量的变化趋势,反映出各种重金属污染分布状况,从而能提取有关污染程度的信息。

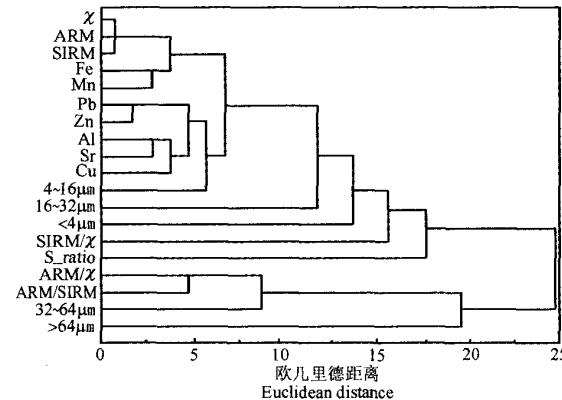


图 6 土壤剖面各项指标的树状聚类图

Fig. 6 Tree diagram of 19 parameters of the soil profile

另外,上述指标与粒径 4~16 μm, 16~32 μm 的距离最近,表明铁磁性矿物主要赋存在这些粒径中。磁性参数与沉积物粒径组成的相关分析也表明(表 1),χ, ARM, SIRM 与 4~16 μm, 16~32 μm 等粒级皆呈较为显著的正相关关系,与 32~64 μm 呈负相关。而 ARM/χ, ARM/SIRM 与 4~16 μm, 16~32 μm 呈负相关,与 32~64 μm 正相关最为显著,其余相关性不明显。这些结果表明,磁性矿物主要赋存在粉砂中,主要是在细粉砂和中粉砂富集。而且由于磁性矿物的颗粒大小和种类与其含量之间没有直接的联系,因此图上表示的一些比值参数(S\_ratio, ARM/χ, SIRM/χ, ARM/SIRM)与反映浓度的磁参数(χ, ARM, SIRM)以及重金属含量间的距离较远,相似性也不明显。

### 4.2 模糊聚类分析

通过上述指标聚类选取其中有代表性的 10 个指标(χ, ARM, S\_ratio, ARM/χ, SIRM/χ, 4~16 μm,

表 1 土壤剖面磁学参数与不同粒径和重金属元素含量的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of magnetic parameters, grain size and heavy metals of the soil profile

	$\chi$	ARM	SIRM	ARM/ $\chi$	ARM/SIRM	SIRM/ $\chi$
< 4 $\mu\text{m}$	0.466**	0.484**	0.471**	-0.472**	-0.474**	0.251
4 ~ 16 $\mu\text{m}$	0.827**	0.815**	0.827**	-0.728**	-0.662**	-0.233**
16 ~ 32 $\mu\text{m}$	0.511**	0.467**	0.512**	-0.330**	-0.268**	0.043
32 ~ 64 $\mu\text{m}$	-0.907**	-0.903**	-0.908**	0.833**	0.775**	-0.302**
> 64 $\mu\text{m}$	-0.013	0.019	-0.016	-0.102	-0.129	-0.101
Al	0.844**	0.816**	0.844**	-0.772**	-0.724**	0.327**
Cu	0.893**	0.881**	0.897**	-0.804**	-0.806**	0.468**
Fe	0.976**	0.951**	0.973**	-0.899**	-0.841**	0.375**
Mn	0.943**	0.923**	0.942**	-0.870**	-0.845**	0.432
Pb	0.935**	0.914**	0.934**	-0.800**	-0.759**	0.365**
Zn	0.831**	0.798**	0.833**	-0.768**	-0.696**	0.281**
Sr	0.885	0.856**	0.885**	-0.745**	-0.745**	-0.700**

注:参与统计样品数量  $n = 29$ , 显著水平\*\*  $\alpha < 0.01$ .

$\text{Cu}, \text{Fe}, \text{Pb}, \text{Zn}$ ) 进行模糊 C 均值聚类分析 (Fuzzy C-means cluster analysis, FCM), 它是以模糊数学为基础, 计算样品对于每个类的隶属度, 据此确定其所属类别, 并可以结合研究对象的实际情况, 寻找合理的聚类效果<sup>[30]</sup>. 先对每个指标的数据减去该指标的平均值, 再除以平均值, 得到一组新的标准化的数据, 运用 Matlab 软件进行聚类分析, 结果由图 7 表示. 由图表明土壤剖面上部 1 ~ 3 cm 的样品明显属于第 1 类, 其隶属度平均达到 90% 以上, 因为第 1 类土壤

的磁性特别强,  $\text{Cu}, \text{Fe}, \text{Pb}, \text{Zn}$  含量也异常高, 都高出 2 个标准偏差以上; 3 ~ 10 cm 土壤样品属于第 2 类的隶属度在 60% ~ 90% 之间, 样品各项参数都处于其余两类的平均水平, 很明显, 这类土壤具有剖面上部和下部过渡带的特征; 10 cm 以下, 土壤属于第 3 类的隶属度也在 60% ~ 90% 之间,  $\chi, \text{ARM}, S_{\text{ratio}}$  值偏低, 金属元素含量也降低了二分之一, 表明该地区这些重金属的本底值并不高, 也说明土壤下部受人类活动和工业生产的影响不大.

从整个聚类的过程来看, 其上部、中部与底部土壤都有明显差异, 主要是由于不同深部样品的磁性矿物含量、金属元素含量等差异造成. 来源于工业生产的污染物质因携带大量金属矿物, 包括铁磁性矿物, 在土壤顶层累积富集, 使得剖面上部重金属含量显著增大, 磁性异常增强. 另外由于研究区内土壤结构相对疏松, 导致金属矿物和磁性颗粒在土层内产生一定的迁移, 底部土壤则基本未受到污染物质的影响.

## 5 结 论

综合以上磁学、地球化学、粒度特征的相关分析及多元统计分析表明:

整个土壤剖面明显可以分为 3 层, 剖面上部 0 ~ 3 m 为工业污染物质累积的集中反映, 亚铁磁性矿物与重金属含量高, 由富集在细粉砂和中粉砂的多畴磁铁矿主导了样品的磁性特征, 污染程度较高; 3 ~ 10 cm 属于污染渗透层, 重金属含量逐渐下降, 土壤的磁性特征与上层相似, 但磁性矿物含量降低, 属于剖面中的迁移过渡阶段; 10 cm 以下是土壤背

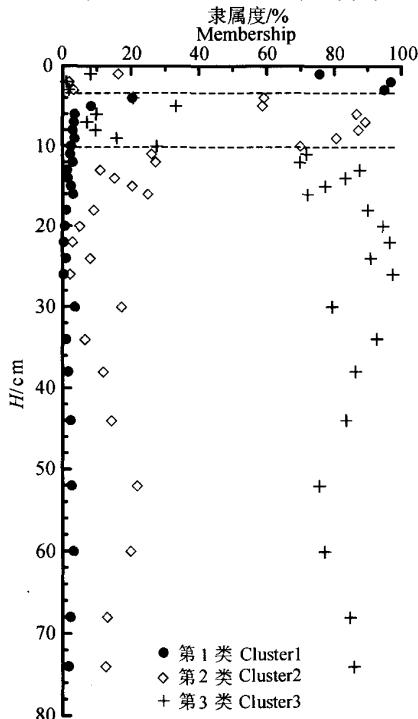


图 7 模糊 C 均值聚类分析图

Fig. 7 Results of fuzzy C-means cluster analysis

景层,磁性矿物和重金属含量都很低,颗粒变化相对较小,主要是受成土作用和母岩影响,基本代表了该地区土壤的自然背景.

指标聚类和相关分析表明,土壤磁参数( $\chi$ , ARM, SIRM 等)与重金属元素(Mn, Cu, Fe, Pb, Zn, Al, Sr)含量显著相关,磁参数可以作为这些重金属的一种代用指标进行污染调查.从而能够快速、灵敏地反映重金属污染的分布变化状况,降低工作成本和大大提高污染监测的工作效率.

模糊聚类分析有助于清楚准确地划分样品的类别,识别不同类别的组合特征.结合测试结果,能够分辨污染物质的累积富集状态、迁移特征及未污染土壤背景,揭示不同深度土壤的污染程度.

致谢 衷心感谢德国图宾根大学地球物理研究所提供了中方人员在德工作的经费资助及磁学实验室的便利条件,以及南京地理与湖泊研究所朱育新副研究员测试了金属元素含量.

## 参考文献(References)

- [ 1 ] Urszula K, Che F I, Malcolm E S, et al. Composition and element solubility of magnetic and non-magnetic fly ash fractions. *Environmental Pollution*, 2003, **123**: 255~266
- [ 2 ] Stanislav V V, Christina G V, Ali I K, et al. Phase-mineral and chemical composition of composite samples from feed coals, bottom ashes and fly ashes at the Soma power station, Turkey. *International Journal of Coal Geology*, 2005, **61**: 35~63
- [ 3 ] Petrovsky E, Kapicka A, Jordanova N, et al. Low-field magnetic susceptibility: a proxy method of estimating increased pollution of different environment systems. *Environmental Geology*, 2000, **39**(3~4): 312~318
- [ 4 ] Veneva L, Hoffmann V, Jordanova D, et al. Rock magnetic, mineralogical and micro-structural characterization of fly ashes from Bulgarian power plants and the nearby anthropogenic soils. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2004, **29**: 1011~1023
- [ 5 ] 王亚平,裴 韶,成杭新等. B 城近郊土壤柱状剖面中重金属元素分布特征研究. 矿物岩石地球化学通报, 2003, **22**(2): 144~148  
Wang Y P, Pei T, Cheng H X, et al. Research on the distribution characters of heavy metals in column profile of soil within B city. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry* (in Chinese), 2003, **22**(2): 144~148
- [ 6 ] Zhang M K, Ke Z X. Heavy metals, phosphorus and some other elements in urban soils of Hangzhou city, China. *Pedosphere*, 2004, **14**(2): 27~36
- [ 7 ] Desenfant F, Petrovsky E, Rochette P, et al. Magnetic signature of industrial pollution of stream sediments and correlation with heavy metals: Case study from South France. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, **152**: 279~312
- [ 8 ] Lecoanet H, Leveque F, Ambrosi J P, et al. Combination of magnetic parameters: An efficient way to discriminate soil contamination sources (south France). *Environmental Pollution*, 2003, **122**: 229~234
- [ 9 ] Strzyszc Z, Magiera T. Magnetic susceptibility and heavy metal contamination in soils of Southern Poland. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998, **23**: 1127~1131
- [ 10 ] Dekkers M J. Environmental magnetism: an introduction. *Geologie en Mijnbouw*, 1997, **76**: 163~182
- [ 11 ] Kapicka A, Petrovsky E, Ustjak S, et al. Proxy mapping of fly-ash pollution of soils around a coal-burning power plant: A case study in the Czech Republic. *Geochemical Exploration*, 1999, **66**: 291~297
- [ 12 ] Kapicka A, Jordanova N, Petrovsky E, et al. Magnetic stability of power-plant fly ash in different soil solutions. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2000, **25**: 431~436
- [ 13 ] Kapicka A, Jordanova N, Petrovsky E, et al. Effect of different soil conditions on magnetic parameters of power-plant fly ashes. *Journal of Applied Geophysics*, 2001, **48**: 93~102
- [ 14 ] Peter C, Thompson R, Harrison A, et al. Low temperature magnetic characterization of fire ash residues. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, **27**: 1355~1361
- [ 15 ] Maher B A. Characterization of soil by mineral magnetic measurements. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1986, **42**: 76~91
- [ 16 ] Kenneth L, Veerobud, Andrew P R. Environmental magnetism: past, present, and future. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**: 2175~2192
- [ 17 ] Oldfield F, Yu L Z. The influence of particle size variations on the magnetic properties of sediments from the north-eastern Irish Sea. *Sedimentology*, 1994, **41**: 1093~1108
- [ 18 ] Oldfield F. Toward the discrimination of fine-grained ferrimagnets by magnetic measurements in lake and near shore marine sediments. *Journal of Geophysical Research*, 1994, **99**: 9045~9050
- [ 19 ] 孙知明,胡守云.现代湖泊沉积物中磁性矿物的研究及其环境意义. 地球物理学报, 1996, **39**(2): 178~187  
Sun Z M, Hu S Y. A rock-magnetic study of recent lake sediments and its palaeo-environmental implication. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1996, **39**(2): 178~187
- [ 20 ] Hunt A. The application of mineral magnetic methods to atmospheric aerosol discrimination. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1986, **42**: 10~21
- [ 21 ] Hu S Y, Deng C L, Appel E, et al. Environmental magnetic studies of lacustrine sediments. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(7): 613~616
- [ 22 ] Zheng H, Oldfield F, Yu L Z. The magnetic properties of particle-sized samples from the Luo Chuan loess section: evidence for pedogenesis. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1991, **68**: 250~258
- [ 23 ] 陈同斌,郑袁明,陈 煌等.北京市土壤重金属含量背景值的系统研究. 环境科学, 2004, **25**(1): 117~122  
Chen T B, Zheng Y M, Chen H, et al. Background concentrations of soil heavy metals in Beijing. *Environmental Science*, 2004, **25**(1): 117~122

- [24] 塘宜太, 王少怀, 张清鹏等. 福建三明地区被污染土壤的磁学性质及其环境意义. 地球物理学报, 2004, 47(2): 282~288  
Ju Y T, Wang S H, Zhang Q P, et al. Mineral magnetic properties of polluted top soils: A case study in Sanming city, Fujian province, south east China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47 (2): 282~288
- [25] Verwey E J, Haayman P W, Romeijn F C. Physical properties and cation arrangement of oxides with spinel structures. *J. Chemical Physical*, 1947, 15: 181~189
- [26] Özdemir Ȑ, Dunlop D J, Moskowitz B M. The effect of oxidation on the Verwey transition in magnetite. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, 20: 1671~1674
- [27] Dunlop D J, Özdemir Ȑ. Rock Magnetism. London: Cambridge University Press, 1997. 50~52
- [28] 洪 南. SPSS for Windows 统计产品和服务解决方案教程. 北京: 清华大学出版社, 2003. 300~311  
Hong N. SPSS for Windows Statistic Product and Service Solving Project (in Chinese). Beijing: Tsinghua University Press, 2003. 300~311
- [29] Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism. London: Allen & Unwin Press, 1986. 34~36
- [30] Knab M, Appel E, Hoffmann V. Separation of the anthropogenic portion of heavy metal contents along a highway by means of magnetic susceptibility and fuzzy c-means cluster analysis. *European Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 2001, 6: 125~140

(本文编辑 何 燕)