

首钢工业区土壤剖面重金属含量及其结合态的磁指示作用的研究

段雪梅^{1,2}, 沈明洁³, 胡守云^{1,2}, U. Blaha⁴,
W. Rösler⁴, E. Appel⁴, V. Hoffmann⁴

(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 100039;

3. 华东师范大学地理系, 上海 200062; 4. 德国图宾根大学地球科学系, 德国图宾根 72076)

摘要 对取自首钢钢铁厂附近的土壤样芯进行了重金属含量、形态分析和磁学测量. 探讨了利用磁参数追踪和指示重金属污染和有机结合态和铁锰氧化结合态重金属的可行性. 结果表明: 土壤样芯中 Cu、Pb、Zn、Fe 和 Mn 的含量与 χ 、SIRM 和 ARM 存在着十分相似的垂向变化特征, 且相关关系显著 ($0.98 > R > 0.86$). 进一步对磁化率和 Cu、Pb、Zn、Fe 和 Mn 各结合态进行相关分析表明: 五种元素的有机结合态与铁锰结合态和磁化率呈显著相关关系 ($0.98 > R > 0.56$), 而交换态和残渣态重金属与磁化率基本不存在相关关系. 反映了磁性矿物和重金属在赋存状态的本质联系. 表明了磁性测量可作为工业区土壤重金属污染及有机结合态与铁锰结合态重金属记录信息提取的辅助手段.

关键词 重金属, 重金属形态, 磁参数

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)02-0225-08

Magnetic properties as a proxy for contents and forms of heavy metal : case study on a core form Shougang industrial areas

DUAN Xue-mei^{1,2}, SHEN Ming-jie³, HU Shou-yun¹,
U. Blaha⁴, W. Rösler⁴, E. Appel⁴, V. Hoffmann⁴

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

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

3. Department of Geography, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

4. Institute for Geoscience, University of Tübingen, Tübingen 72076, German)

Abstract Contents and the each form of Pb, Cu, Zn, Cd, Fe, Mn and magnetic parameters' values (χ , ARM, SIRM) were measured on a soil core collected near Shougang iron plant. Whether the parameters values can be used as a proxy for heavy metal contents and forms were discussed. The results showed that vertical variations of magnetic parameters were in good agreement with the contents of heavy metals and there is a very significant correlation between magnetic parameters and elevated concentrations of element (Correlation coefficient ($0.98 > R > 0.86$)). The correlation between the heavy metal forms and magnetic susceptibility were further analyzed. The results showed that there was a significant correlation between magnetic susceptibility and Fe-Mn oxide and the organically bound of heavy metals, Which showed that there was a basic connection between magnetic mineral and heavy metal form. It indicated magnetic measurement can be as a efficiency method to provide the polluting information.

Keywords heavy metal, heavy metal form, magnetic parameter

收稿日期 2007-03-10; 修回日期 2007-06-20.

基金项目 国家自然科学基金面上项目(40374021, 40674033, 40172102)和德国 DFG 课题(AP 34/21)联合资助.

作者简介 段雪梅, 女, 1974 年生, 河南南阳人, 博士研究生. 主要从事环境重金属污染的磁学研究, 发表论文 2 篇. (E-mail: xmduan@

niglas.ac.cn)
万方数据

0 引言

环境磁学作为一门介于地学、磁学和环境科学之间的新兴边缘学科,由于其具有样品用量少、灵敏度高、方法简单快速、非破坏性、费用较低等常规化学分析方法不可比拟的优点。围绕古气候、古环境演变,对黄土、湖泊沉积物等方面进行了大量的环境磁学研究,取得了许多重要成果^[1~7]。近年来,随着工业的发展和城市化进程的进一步加快,化石燃料的燃烧、工业生产、交通等产生的重金属颗粒粉尘的输入所导致的城市土壤和沉积物重金属污染日益加剧并成为目前全球所共同关注的一个问题之一。尽管我国在土壤重金属污染的监测和治理方面取得了重要的成果,但采用传统的化学分析方法,难以大面积、快速、动态的监测土壤重金属污染状况,为污染的防治提供及时的参考信息。磁扫描技术,作为一种简便、快速、经济、灵敏度高和非破坏性的新方法,因其具有更加系统完善的采样方法体系,在目标选取和识别典型的污染区域方面,可以弥补现有的化学方法布点比较盲目的不足。此外,研究发现^[8,9]:工业活动(发电厂、交通和水泥厂及钢铁冶炼)等生产或是燃烧过程所释放的粉尘中“磁小球颗粒”总是和重金属相互共生和富集。磁性矿物和和重金属之间这种密切联系,从而使磁学重金属污染监测成为可能。依据工业和城市周围人类活动所导致的土壤表土磁化率增强机制,磁测既可以在较大范围内(大城市、工业区)获取土壤污染分布状况,圈定典型污染区域,追踪污染物的来源^[10~16]同时也可以深入了解工业活动(电厂、冶铁工业、钢铁厂等)所产生的磁污染物质在土壤中的垂向分布迁移特征,分离人类活动和自然成土作用的贡献^[17~23]。尽管利用各种污染介质的环境磁学性质,监测和研究环境污染状况,示踪污染源等正逐步成为环境监测领域一项新的技术和手段^[24~33],然而,目前关于磁指标和重金属的形态之间联系却知之甚少,相关方面的研究报道较少。本文以位于首钢工业生产区的污染土壤样芯为例,结合系统的土壤重金属含量、形态分析和磁学指标测试,以期建立磁指标和重金属及重金属各结合态之间的联系,探索磁指标在指示和监测土壤重金属及重金属结合态的可行性。

1 样品采集与制备

柱状样品取自北京首钢钢铁厂下风向,永定河的西南方向,鹰山森林公园西侧的回民公墓的山坡
万方数据

上,基本未受人为扰动的空地,柱长为 44 cm。按深度变化对样芯以 1 cm 为间隔进行分样,样品密封在塑料套管内带回实验室。

元素含量分析:样品自然风干后,在 40 ℃下烘干,经磨细小于 100 目,在 Berghof MWS-3 微波消解系统中按 EPA3052 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 LABSPROFILE 电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP2 AES)测定了 Cu、Pb、Zn、Fe 和 Mn 等 5 种重金属元素的含量。采用美国 SPEXTM 混合标准溶液,NISTSRM 1646a 作为标准参考物质。

元素结合态:选用 BCR^[34] 提取法对 Cu、Pb、Zn、Fe 和 Mn 重金属形态进行分级提取。重金属的有效态主要分可交换态和碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态,残渣态采用元素总含量与有效结合态之差表示。

磁指标测试:使用 Bartington 频率磁化率仪测得样品的低频磁化率(κ_{lf} , 0.47 kHz),质量磁化率(χ)由样品的低频磁化率经质量归一获得。非磁滞剩磁(ARM)应用美国 2G-719 交变退磁仪和 ARM 装置(交变磁场峰值为 100 mT,稳定磁场 50 T)获得。应用 MMPM9 脉冲磁化仪(英国 Magnetic Measurement 公司生产)在峰值 1T 的磁场下所获得的剩磁,视为 SIRM。

2 结果与讨论

2.1 元素的含量与富集来源

钢铁工业产业中化石燃料的燃烧、金属冶炼和厂区内车辆运输所产生的各种各样重金属粉尘颗粒在各种物化、生化、地化条件下产生吸附、络合、迁移转化。最终沉降在工业区土壤的表层并形成异常高值区。而土壤作为过去环境信息变化的储存源,记录着自然和人为因子对其发生过程的影响。因此,土壤中重金属元素的含量、变化可以深刻反映土壤沉积过程中重金属元素的历史变化并能追踪其富集来源。

由钢铁厂周围土壤环境中的土壤中样芯的重金属垂向分布可以看出,各元素含量均表现为上层 0~10 cm 含量明显高于下层的土壤,具有明显的表层富集现象,且都出现不同程度的向下迁移。普遍认为,环境中的 Pb、Zn 来源十分相似^[35]。对比该样芯中铅和锌的垂向分布特征,可以发现:两者呈极为相

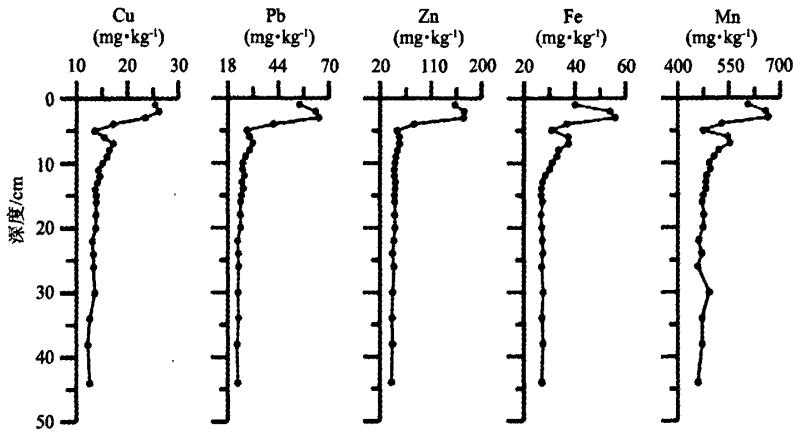


图 1 样芯中部分元素含量的垂向变化

Fig. 1 Vertical variations of heavy metal for soil core

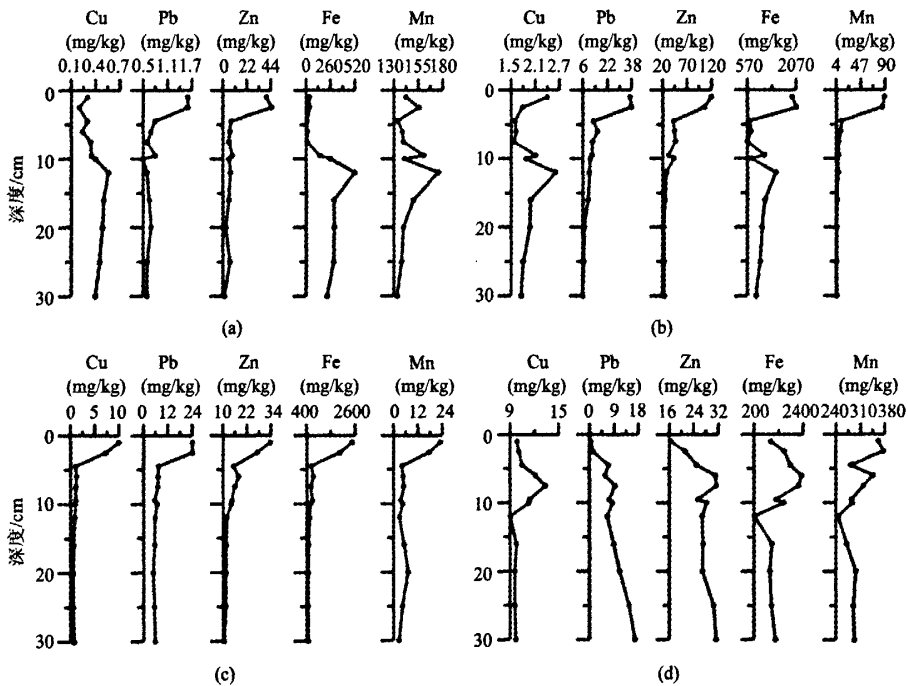


图 2 各元素结合态的垂向变化特征

A:可交换态 B:Fe/Mn 氧化结合态 C:有机结合态为主 D:残渣态

Fig. 2 Vertical distribution of Chemical forms of heavy metals for soil core

似的垂向变化规律. 均在样芯上部的 3 cm 出现最高值, 含量分别高出各自背景值^[36]的 2.6 倍和 3 倍, 8 cm 之下, Pb、Zn 含量逐渐降低并维持在一较低水平. 整体来看, 除在样芯的 3 cm 处出现明显的分布峰区外, Pb、Zn 的绝对含量并不高, 基本上在各自的

背景值附近. Pb、Zn 在样芯的 0~3 cm 明显富集可能与该区的产业类型有关. 因首钢工业区主要以钢铁冶炼为主, 冶炼本身就容易导致环境中的 Zn 增加^[35]. 此外, 由于运输量较大等原因, 该地的交通也相对密集, 也是导致该区土壤 Zn 含量普遍较高的

原因之一。而车辆运输和化石燃料的燃烧,又被认为是导致土壤样品 Pb 浓度普遍较高重要原因^[35]。结合样芯 Cu、Pb、Zn 垂向变化非常一致,并且 Cu 与 Pb、Zn 相关系数分别为 0.98 和 0.85。显示了三者具有较为一致的来源,表明首钢工业生产及该区的机动车辆排放是导致该样芯中重金属表层含量升高的主要原因。土壤中 Fe 和 Mn 的质量分数较高,因而一般认为它们不属土壤污染元素。由该样芯中 Fe 和 Mn 与 Cu、Pb 和 Zn 具有同样的垂向变化,表明了这些元素具有类似的化学特性或类似的环境地球化学循环过程在他们的分布上起了主导作用。

2.2 样芯重金属结合态垂向分布特征

土壤中的重金属不仅存在于无机物、有机物和生物体之中,还与土壤中各种固相物质表面产生复杂的化学反应,所以土壤重金属元素在介质中的存在形态是衡量其环境效应的关键参数。结合上述元素含量的垂向分布特征,采用样芯 10 cm 为界限,把整个剖面分成上下两个部分,采用不等间隔对剖面深度为 30 cm 共选取 12 个样品,采用 BCR 方法测定各元素的结合态,测定统计结果见图 2 所示。

对照上述的重金属垂向变化特征(见图 2),结合图 2 中元素结合态的分布特征可以发现:该样芯五种元素的结合态与重金属的总量存在相似的变化趋势,即均在土壤样芯的 10 cm 处出现明显的变化界面;在 10 cm 之下,重金属各元素的结合态含量相对稳定,而 10 cm 之上,各元素重金属的结合态的变化较大。为了讨论方便,结合元素结合态和重金属的垂向变化特征,把整个剖面分成上下两个部分(见图

3),Cu 的结合态在样芯的下部主要以残渣态为主,百分含量为 76%。Fe/Mn 氧化态次之,百分含量为 15%,其余两种结合态含量较低。与剖面的下部相比:上部的残渣态的百分含量相对降低为 69%,而有机结合态的含量相对升高,含量 20%;的趋势表现为样芯上部有机结合态的含量略有升高,并主要以有机结合态为主,这与芜湖钢铁厂 Cu 的结合态具有一致的变化规律^[37]。

Pb 在整个样芯的形态分布变化较大。样芯下部,Pb 主要以有机结合态为主,残渣态次之。含量分别为:52%和 35%。可交换态和 Fe/Mn 氧化结合态的含量较低。与样芯下部相比:上部 Fe/Mn 氧化结合态的含量显著增高,含量为 54%。而残渣态、有机结合态则相对降低含量分别为 13%和 31%,可交换态含量基本保持不变。上部与下部相比,残渣态含量显著降低,有效态明显增加,且主要以 Fe/Mn 氧化结合态为主,显示了钢铁厂附近污染土壤 Pb 结合态的共同规律^[36]。

Zn 的在样芯下部主要以残渣态为主,含量为 67%。其余结合态含量差别不大。样芯上部,残渣结合态的含量明显降低,含量为 28%。Fe/Mn 氧化结合态和有机结合态的含量相对增加,含量分别为 53%和 31%。上部与下部相比,残渣态含量显著降低,有效态明显增加,且主要以 Fe/Mn 氧化结合态为主。Fe 和 Mn 的结合态在样芯的上部、下部较为一致,均以残渣态为主,含量大于 50%。样芯上部与下部相比,有机结合态变化不大,上部和下部含量基本相同。

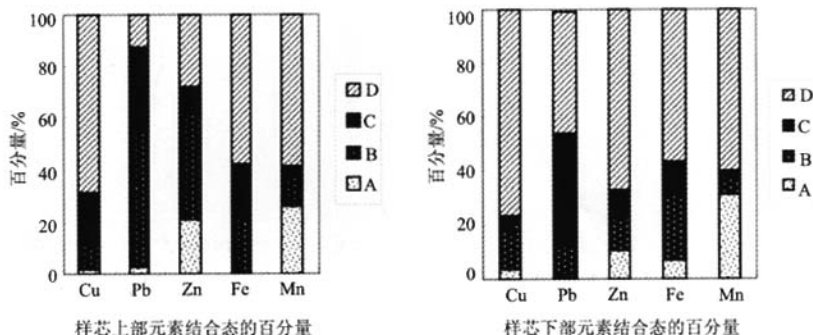


图 3 样芯中元素结合态的含量

A: 可交换态 B: Fe/Mn 氧化结合态 C: 有机结合态 D: 残渣结合态

Fig. 3 Chemical forms of heavy metals for soil core

结合上面的分析,可以发现样芯上部和下部相比,Cu、Pb、Zn 重金属的整体趋势表现为残渣态含量降低,而有效结合态的含量明显增高且主要以 Fe/Mn 氧化结合态和有机结合态为主. 约占有效态含量的 70% 左右. 这种现象表明了土壤样芯中重金属元素的来源比例发生了变化,来自物源岩性的比例减小,人为比例的相对增加^[38],反映了土壤表层 0~10 cm 的有效态增加主要受人类活动的影响所致,与首钢地区长期的工业污染相一致.

2.3 样芯部分磁指标的垂向变化特征

χ 、SIRM 通常用作亚铁磁性矿物含量的粗略量度^[39,40]. ARM 对样品中铁磁性矿物的浓度和颗粒都很敏感,尤其是对细颗粒单畴磁性矿物更为敏感^[41].

图 4 可以看出 χ 随深度与 SIRM、ARM 呈现相同的变化趋势. χ 的平均值在上部 0~3 cm 为 $950.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$,随之在 3~4 cm 降至 $516.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$,最终在 14 cm 下部其值大小较低且维持稳定. 平均值仅为 $136.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. ARM 对于单畴(SD)和准单畴(PSD)的磁性矿物颗粒比较敏感,图 4 中 ARM 随深度的变化曲线和 χ 、SIRM 呈现相同的变化趋势,说明 ARM 值受磁性矿物含量的影响掩盖了其所受的粒度大小差异的影响.

2.4 磁指标和重金属的相关分析

土壤的磁性增强可由典型的磁性矿物如磁铁矿、赤铁矿等产生,或可以由近铁元素如 Mn、Ni、Co、Cr、Ti、Al、Mg 等形成的矿物产生,此外或可由重金属元素 Cd、Hg、Pb、Cr 和 As 等与含铁或近铁元素结合形成的含磁细菌的络合物、螯合物或其它化合物产生^[42],所以土壤中的磁性矿物与重金属存在十分密切的联系. 对比磁指标 χ 、SIRM 和 ARM 与元素 Cu、Pb、Zn、Fe 和 Mn 的垂向变化曲线,可以看出前者与后者间表现为极为相似的垂向变化规律. 值得注意的是:样芯中 χ 、SIRM 和 ARM 从地表至地下发生突变的深度都在地表以下 14 cm 处,反映了地表磁化率的不寻常增强机制,这种机制显然不同于黄土-古土壤磁化率增强的机制^[43,44],而与表层土壤上强烈的人类活动影响有关,结合重金属及重金属结合态垂向分布特征,可以认为表层土壤磁性的显著增强主要是与首钢工业生产产生的工业粉尘输入有关.

此外,由表 1 元素含量和磁指标的相关系数可以看出: χ 、SIRM、ARM 和 Cu、Pb、Zn、Fe 和 Mn 间呈现及为显著的相关性,相关系数 ($0.98 > R >$

0.86),表明了土壤中高浓度磁性矿物和元素之间的相互依存和共生,上述分析也表明了重金属含量与磁性参数间存在密切的相关性,表明磁性测量可作为工业重金属污染记录信息提取的辅助手段.

表 1 磁参数和元素的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between the content of total heavy metal and χ , SIRM and ARM

	Cu	Pb	Zn	Fe	Mn
χ	0.89	0.94	0.89	0.98	0.94
SIRM	0.90	0.86	0.93	0.97	0.94
ARM	0.88	0.86	0.91	0.98	0.94

2.5 磁化率和重金属形态的相关性探讨

对比图 4 和图 2 元素结合态和磁指标的垂向变化曲线,可以发现元素结合态和磁指标的垂向并不呈现完全一致的变化规律. 其中所有元素的有机结合态 Fe/Mn 氧化结合态与磁指标表现出较为一致的变化规律,但其余两种元素的结合态与磁指标基本上呈现为完全相反的变化趋势. 为了进一步明确元素各结合态和磁化率之间的关系,对磁化率和元素结合态进行相关分析,分析结果见表 2.

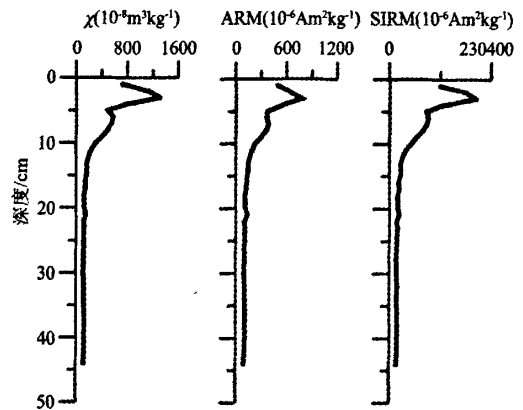


图 4 样芯中 χ 、SIRM 和 ARM 垂向变化特征

Fig. 4 Vertical distribution of χ , ARM and SIRM

由表 2 可以看出磁化率与上述所有元素的有机结合态显著相关关系 ($0.97 > R > 0.87$),此外磁化率和元素的 Fe/Mn 氧化结合态之间也呈现较为明显的相关关系 ($0.98 > R > 0.56$). 而在可交换态与碳酸盐结合态中,磁化率除了与元素 Cu 和 Fe 呈现显著相关关系外,与另外三种元素的基本不存在相

关关系,同样也可以看出磁化率和元素的残渣结合态之间也基本无相关关系,那么,样芯中元素 Fe/Mn 氧化结合态和有机结合态与磁化率所表现出的显著相关性在某种程度上体现了工业区粉尘中的磁性矿物与重金属赋存状态之间的本质的联系。

表 2 磁化率和元素结合态的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between the magnetic susceptibility and its each form

	Cu	Pb	Zn	Fe	Mn
可交换态与碳酸盐结合态	-0.41	0.85	0.94	-0.55	0.02
Fe/Mn 氧化结合态	0.56	0.98	0.94	0.70	0.96
有机结合态	0.92	0.87	0.95	0.97	0.94
残渣结合态	0.36	-0.87	-0.77	0.20	0.30

研究表明:钢铁冶炼是大气中磁性颗粒的主要来源之一。且在钢铁生产过程中,通过燃烧产生的铁磁性矿物颗粒多与 Cu、Pb、Zn、Ni 和 Mn 等微量元素富集共生,并且这些元素主要与铁、锰以及铝的氧化物有关^[45]。此外,土壤、沉积物等系统不管外源输入的铁磁性矿物或是土壤本身所含有的铁磁性矿物含有的 Fe/Mn 氧化物,由于其巨大的比表面积,对重金属具有强烈的结合能力。导致磁化率和重金属 Fe/Mn 氧化结合态之间具有显著相关关系。

土壤中枯草层和表层中重金属主要以有机质相关的形态存在,并且向下该比例下降,表明表层有机质的积累可促进重金属向有机结合态形式转化^[46]。这部分与有机质有关的重金属主要以土壤腐殖质结合存在。结合前面提及的重金属有结合态的垂向分布特征(图 2),我们可以也发现这一规律的存在。而土壤腐殖层作为土壤中磁性最强的一层,使得该层中有机配位体的铁磁性矿物远远高于土壤的其他层,根据配位体理论它们很容易与重金属结合,所以,反映在样芯表现为表层的重金属的有机结合态和磁性矿物相对富集,向下比例相对下降。并且使得两者间呈现显著相关关系。

重金属形态分析的主要目的是确定具有生物毒性的重金属的含量,其分析的难度比测定元素总量的难度大得多,因而发展可靠的分析方法和检测仪器,准确地测定环境中痕量元素的化学形态仍是目前的主要问题,结合本次的分析,能否考虑利用磁指标来追踪、指示工业污染区有机结合态和铁锰结合态的重金属垂向分布和变化,还需要进一步分析和

证明,当然建立磁化率和重金属结合态之间的定量关系是关系磁指标能否被广泛应用的重要前提。

3 结 论

(1)钢铁厂周围土壤环境中的土壤中样芯的重金属垂向分布元素含量均表现为 0~10 cm 含量明显高于下层的土壤,并在的表层 0~3 cm 产生明显富集现象。表层重金属富集与首钢工业生产和该区域的交通运输有关。

(2)样芯五种元素的结合态的在土壤样芯的 10 cm 处出现明显的变化界面。在 10 cm 之下,重金属各元素的结合态含量相对稳定,主要以残渣态重金属为主。0~10 cm 各元素结合态的变化较大,总体表现为残渣态含量减小,有效态含量增加,并主要以 Fe/Mn 氧化结合态和有机结合态为主,表明样芯 0~10 cm 有效态含量的增加系人类活动所致。

(3)磁指标 χ 、SIRM 和 ARM 与元素 Cu、Pb、Zn、Fe 和 Mn 呈现相同的垂向变化特征,且相关性显著, ($0.98 > R > 0.86$),表明磁性测量可作为工业重金属污染记录信息提取的辅助手段。

(4)磁化率和元素 Cu、Pb、Zn、Fe 和 Mn 的 Fe/Mn 氧化结合态和有机态存在显著相关关系 ($0.98 > R > 0.56$),揭示了工业污染土壤重金属和磁性矿物在赋存状态的本质规律,表明了磁测可以追踪、指示工业污染区有机结合态和铁锰结合态的重金属垂向分布和变化。

参 考 文 献 (References):

- [1] 朱日祥,李春景,吴汉宁,等. 中国黄土的磁学性质与古气候意义[J]. 中国科学(B), 1994, 24(9): 992~997.
- [2] 卢升高,董瑞斌,俞劲炎,等. 中国东部红土的磁性及其环境学意义[J]. 地球物理学报, 1999, 42(6): 764~771.
- [3] 邓成龙,袁宝印,朱日祥,等. 陕西交道全新世黄土-黑垆土磁化率的 CBD 研究[J]. 地球物理学报, 2000, 43(4): 505~514.
- [4] 卢升高. 亚热带富铁土的磁学性质及其磁性矿物学[J]. 地球物理学报, 2000, 43(6): 498~504.
- [5] 胡守云,王苏民,Appel E,等. 呼伦湖沉积物磁化率变化的环境磁学机制[J]. 中国科学(D), 1998, 28(4): 334~339.
- [6] 李万伦,陈杰,范俊喜,等. 三门峡盆地晚新生代沉积物磁性载体类型[J]. 地球物理学报, 2001, 44(4): 520~527.
- [7] 田莉丽,朱日祥,潘永信. 张北汉诺坝玄武岩的岩石磁学性质研究[J]. 地球物理学报, 2002, 45(6): 832~838.
- [8] Heller F, Strzyszc Z, Magiera T. Magnetic record of industrial pollution in forest soils of Upper Silesia, Poland[J]. J Geophys Res, 1998, 103(B8): 17767~17747.
- [9] Bitukova L, Scholger R, Birke M. Magnetic susceptibility as indicator of environmental pollution of soils in Tallinn[J].

- Phys Chem Earth A, 1999, 24: 829~835.
- [10] Hay K L, Dearing J A, Baban S M J. A Preliminary attempt to identify atmospherically-derived pollution particles in English topsoils from Magnetic Susceptibility Measurements[J]. Phys. Chem. Earth, 1997, 22(1-2): 207~210.
 - [11] Hanesch M, Scholger R. Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements[J]. Environmental Geology, 2002, 42: 857~870.
 - [12] Lecoanet H F, Leveque J. Combination of magnetic parameters; an efficient way to discriminate soil-contamination sources (south France)[J]. Environmental Pollution, 2003, 122(2): 229~234.
 - [13] Strzyszc, Z, Magiera T, Heller F. The influence of industrial immissions on the magnetic susceptibility of soils in Upper Silesia[J]. Studia Geophysica and Geodesia, 1996, 40: 276~286.
 - [14] Strzyszc, Z, Magiera T. Magnetic susceptibility and heavy metals contamination in soils of southern Poland [J]. Phys. Chem. Earth, 1998, 23: 1127~1131.
 - [15] Gautam P, Blaha U, Appel E. Environmental magnetic approach towards the quantification of pollution in Kathmandu urban area, Nepal [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2004, 29: 973~984.
 - [16] 据宜太, 王少怀, 邓成龙, 等. 福建三明地区被污染土壤的磁学性质及其环境意义[J]. 地球物理学报, 2004, 47(2): 282~288.
 - [17] Durza O. Heavy metals contamination and magnetic susceptibility in soils around metallurgical plant [J]. Physics and Chemistry of Earth, 1999, 24: 541~543.
 - [18] Petrovsky E, Kapicka A, Jordanova N, *et al.* Magnetic properties of alluvial soils contaminated with lead, zinc and cadmium [J]. Journal of Applied Geophysics, 2001, 48: 127~136.
 - [19] Spiteri C, Kalinski V, Rosler W, *et al.* Magnetic screening of a pollution hotspot in the Lausitz area, Eastern Germany: correlation analysis between magnetic proxies and heavy metal contamination in soils [J]. Environ Geol, 2005, 49: 1~9.
 - [20] Lecoanet H, Leveque F, Ambrosi J P. Magnetic properties of salt-marsh soils contaminated by iron industry emissions southeast France[J]. Journal of Applied Geophysics, 2001, 48: 67~81.
 - [21] 王学松, 秦勇. 徐州钢铁厂附近土壤中重金属及硫的垂向分布特征与磁学响应[J]. 环境科学学报, 2005, 25(12): 1669~1675.
 - [22] 同海涛, 胡守云, Appel E, 等. 土壤剖面中粉煤灰垂向迁移的磁响应[J]. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1392~1399.
 - [23] 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.
 - [24] 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.
 - [25] Scholger R. Heavy metal pollution monitoring by magnetic susceptibility measurements applied to sediments of river Mur (Styria Austria) [J]. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 1998, 3: 25~37.
 - [26] Muxworthy A R, Matzka J, Petersen N. Comparison of magnetic parameters of urban atmospheric particulate matter with pollution and meteorological data[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35 (26): 4379~4386.
 - [27] Shu J, Dearing J A, Morse A P, *et al.* Determining the sources of atmospheric particles in Shanghai, China from magnetic and geochemical properties[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35: 2615~2625.
 - [28] Versteeg J, Morris W, Rukavina N. The utility of magnetic properties as a proxy for mapping contamination in Hamilton Harbour [J]. Great Lakes Res, 1995, 21: 71~83.
 - [29] 张卫国, 俞立中, 陆敏. 长江口潮流沉积物氧化铁与磁性特征的关系[J]. 地球物理学报, 2003, 45(1): 81~87.
 - [30] Desenfant F, Petrovsky E, Rochette P. Magnetic signature of industrial pollution of stream sediments and correlation with heavy metals; case study from South France [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2004, 152: 297~312.
 - [31] 俞立中, 张卫国. 利用磁性测量研究长江口潮流重金属污染的探讨[J]. 环境科学进展, 1993, 1(5): 37~44.
 - [32] 张卫国, 俞立中, Hutchinson S M. 长江口南岸潮流沉积物重金属污染记录的磁诊断方法[J]. 海洋与湖泊, 2000, 31(6): 616~623.
 - [33] Zhang C X, Huang B C, Li Z Y, *et al.* Magnetic properties of highroad-side pine tree leaves in Beijing and their environmental significance[J]. China Sci Bull, 2006, 51(24): 3041~3052.
 - [34] 陈世俭, 胡嵩堂. 土壤铜形态及有机质的影响[J]. 长江流域资源与环境, 1995, 4(4): 367~369.
 - [35] 郑袁明, 宋波, 陈同斌, 等. 北京市不同土地利用方式下土壤锌积累及其污染风险[J]. 自然资源学报, 2006, 21(1): 64~71.
 - [36] Chen T B, Zheng Y M, *et al.* Background concentrations of soil heavy metals in Beijing [J]. Environmental Science, 2004, 25: 117~122.
 - [37] 王兴明, 刘登义, 徐俊芳, 等. 芜湖钢铁厂周边土壤及油菜籽中镉、铜、锌、铅含量和形态分布研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1924~1931.
 - [38] 弗斯特纳 U, 维特曼 G T W. 水环境的重金属污染[M]. 王忠玉, 姚重华译. 北京: 海洋出版社.
 - [39] 孙知明, 胡守云, 马醒华. 现代湖泊沉积物中磁性矿物的研究及其环境意义[J]. 地球物理学报, 1996, 39(2): 178~187.
 - [40] 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.
 - [41] 俞立中, 许羽, 张卫国. 湖泊沉积物的矿物磁性测量及其环境应用[J]. 地球物理学进展, 1995, 10(2): 12~24.
 - [42] Dearing J A, Hannam J A, Anderson A S, *et al.* Magnetic geochemical and DNA properties of highly magnetic soils in England[J]. Geophysical Journal International, 2001, 144: 183~196.
 - [43] Maher B A, Thompson R. Paleoclimatic significance of the

- mineral magnetic record of the Chinese loess and paleosols [J]. Quat Res, 1992, 37 (2):155~170. .
- [44] Maher B A, Thompson R. Pedogenesis and paleoclimate : interpretation of the magnetic susceptibility record of Chinese loess - paleosol sequences [J]. Geology, 1994, 22 (9): 857 ~858.
- [45] Lauf R J, Harris L A, Rawiston S S. Pyrite framboids as the source of magnetic spheres in fly ash. Environ Sci Technol [J]. 1982, 16; 218—220 .
- [46] 章明奎,方利平,周翠. 污染土壤中有机质结合态重金属的研究[J]. 生态环境,2005,14(5):650~653.

请查阅本刊网站了解以下详细内容
(<http://www.progeophys.cn>)

欢迎订阅《地球物理学进展》

2008 年《地球物理学进展》为双月刊,每年 6 期,每期定价 35 元,全年定价为 210 元。

订刊联系方式

- (1) 本刊编辑部(邮局汇款与单位电汇均可)

汇款地址 100029 北京市 9825 信箱《地球物理学进展》编辑部

电话传真 010-82998113,010-82998105,010-62369620

联系人 刘少华,肖台琴,赵 雷

电子邮件 shliu@cgs.org.cn, geophys@163.com

网 站 <http://www.progeophys.cn>

开户行 中国农业银行北京建德支行 账 号 190901040000456

收款单位 中国科学院地质与地球物理研究所

(务必在注释行写上:购《地球物理学进展》款,同时写上您的姓名和联系地址)

- (2) 天津全国非邮发联合证订服务部

邮编地址 300385 天津市大寺泉集北里别墅 17 号

电话传真 022-23973378,022-23962479

网 址 <http://www.LHZD.com>

E - mail LHZD@public.tpt.tj.cn