

· 争鸣与探索 ·

磁化率对土壤重金属污染的指示作用

方芳 李晓燕

(上海市松江区环境监测站, 上海 201613)

摘要:选择工业区、农业区、交通影响区 3 个功能区,开展土壤磁性组分特征及土壤磁性增强与重金属累积间的关系研究。结果表明,各功能区土壤均已受到重金属污染,土壤重金属污染程度分布情况为工业区 > 交通影响区 > 农业区。工业区土壤重金属污染最严重,污染元素以 Cr、Zn 为主;农业区土壤以 Zn、Cu 污染为主;交通影响区土壤以 Cr、Pb 污染为主。土壤磁化率与磁性组分在 $p < 0.01$ ($R = 0.87$, $n = 35$) 水平上显著相关,说明磁性颗粒侵入是土壤磁性增强的主要原因,土壤磁性组分中重金属污染元素显著富集。进一步研究表明,土壤重金属污染与土壤磁化率增加有密切的联系,土壤磁化率平均值为工业区 > 交通影响区 > 农业区,且工业区和交通影响区土壤的一些重金属元素与磁化率存在极显著正相关性,表明用磁学方法监测土壤重金属污染可行。

关键词:土壤; 重金属污染; 磁化率

中图分类号: X825

文献标识码: B

文章编号: 1006-2009(2011) S₀-0078-06

Study on the Indication of Magnetic Susceptibility to Heavy Metal Pollution in the Soils

FANG Fang, LI Xiao-yan

(Song Jiang Environmental Monitoring Station, Shanghai 201613, China)

Abstract: This text chooses three function areas: an industrial area, a traffic-affected area and an agricultural area to study the contents of magnetic fractions in the soils and the relationship between magnetic enhancement and heavy metal accumulation. The results show that the soils from the three function areas are heavily polluted, with the pollution sequence of the industrial area > the traffic-affected area > the agricultural area. The soils in the industrial area are most heavily polluted, with Cr and Zn as main pollutants. The soils in the agricultural zone is mainly polluted by Zn and Cu. The soils in the traffic-affected area is mainly polluted by Cr and Pb. Magnetic susceptibility of the soils is positively significantly correlated with the amount of magnetic fractions in them at $p < 0.01$ level, suggesting that the magnetic enhancement is mainly attributed to the addition of magnetic particles. It was also observed that heavy metals are accumulated in the magnetic fractions in the soils. Further study indicates that there is a close relationship between heavy metal pollution and magnetic enhancement in the soils. The mean values of magnetic susceptibility of the soils from the three function areas are in the sequence of the industrial area > the traffic-affected area > the agricultural area. Moreover, some heavy metals in the industrial and traffic-affected areas are positively significantly correlated with magnetic susceptibility values. This suggests that it is feasible to monitor soil pollution in Shanghai with magnetic techniques.

Key words: Soils; Heavy metals pollution; Magnetic susceptibility

土壤中包含大量的磁性矿物颗粒,它们是土壤的重要组成部分。这些磁性矿物颗粒有的来源于母岩,有的来源于成土过程,但是大部分来源于人为排放,如工业排放的飞灰、金属冶炼和矿石燃烧。

人为排放的磁性颗粒物是土壤磁学信号的主要载

收稿日期: 2011-11-08

作者简介: 方芳(1985—),女,上海人,助理工程师,本科,从事环境监测工作。

体在很大程度上影响着土壤磁性特征^[1]。

在所有的磁性颗粒物中,决定土壤磁性特征的物质是氧化铁,如磁铁矿(Fe_3O_4)、磁赤铁矿($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)、赤铁矿($r\text{-Fe}_2\text{O}_3$)、针铁矿($\alpha\text{-FeOOH}$)、纤铁矿($r\text{-FeOOH}$)、水铁矿($5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)等。其中磁铁矿、磁赤铁矿为铁磁性矿物,赤铁矿、针铁矿为不完整反铁磁性矿物,这两类矿物的相对含量和晶粒大小决定了土壤的磁性特征,其含量可通过土壤磁化率来表征。

土壤磁化率(x_{H})是土壤在外磁场中受感应产生的磁化强度与外加磁场强度的比值,是环境磁学的常用测量参数,能够反映土壤中磁性矿物(磁铁矿和磁赤铁矿)的含量。

1 材料与方法

1.1 材料

根据土地利用方式的多样性和空间分布的均匀性,分别在工业区、农业区、交通影响区共 25 个代表性样点采集土壤样品。

对采集的土壤去除石头和植物的根、叶等,放在通风处自然风干后磨碎,过 10 目筛,供磁化率测量使用。再用四分法取部分土样进一步研磨,使其完全通过 100 目筛,供重金属测定使用。

1.2 样品分析

土壤样品分析包括磁化率和重金属(Cu、Zn、Pb、Ni、Cr、Mn、Fe)总量。为了确保重金属测定数据的准确性,在分析中采用国家标准土壤样品(GSS-6)进行全过程质量控制,分析结果与参考数值标准相一致,大部分元素测定值的差异 $<5\%$ (Cr $<10\%$)。将所有样品的重金属测定原始数据标准化,求出各类土壤的重金属含量平均值和标准差,并作相关性分析。

1.2.1 重金属总量测定

重金属总量测定前需进行样品消解,然后采用火焰原子吸收分光光度法测定 Cu、Zn、Pb、Ni、Cr、Fe、Mn,每四五个样品间检测标准样品,确保测定结果的准确性。

1.2.2 土壤磁化率测定

称取 10 g 左右自然风干、过 10 目筛的土壤样品,置于 10 mL 圆柱状聚乙烯样品盒中,压实、固定后作磁性测量。测量项目包括低频(0.47 kHz)和

高频(4.7 kHz)弱磁场中的体积磁化率,采用英国 Bartington MS-2 型双频磁化率仪(Dual-frequency Magnetic Susceptibility Meter)^[2]。

容积磁化率(k)在低频和高频磁场中均测量,低频质量磁化率(x_{lf})通过下式计算:

$$x_{\text{lf}} = 10k_{\text{lf}}/m$$

式中 m 为质量(g)。

频率磁化率(x_{fd})的换算式为:

$$x_{\text{fd}} = (x_{\text{lf}} - x_{\text{hf}}) / x_{\text{lf}} \times 100\%$$

式中 x_{lf} 为低频磁化率; x_{hf} 为高频磁化率。磁化率的测量相对误差 $<0.3\%$ 。

1.3 评价方法

采用地质累积指数(Geoaccumulation Index, I_{geo})作为评价重金属元素污染情况的指标。地质累积指数通常称为 Muller 指数^[3-4],是 20 世纪 60 年代末期在欧洲发展起来的广泛用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标^[5],其表达式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_n / (K \times B_n)]$$

式中 C_n 为元素 n 在沉积物中的含量; B_n 为沉积物中该元素的地球化学背景值; K 为修正指数,值为 1.5,通常用来表征沉积特征、岩石地质及其影响。

地质累积指数可分为 7 个级别(见表 1),0~5 级表示污染程度由无到极强,最高级(6 级)的元素含量可能是背景值的几百倍。

表 1 地质累积指数等级

Table 1 Geoaccumulation index

地质累积指数	分级	污染程度
$5 < I_{\text{geo}} \leq 10$	6	极严重污染
$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	5	强-极严重污染
$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	4	强污染
$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	3	中等-强污染
$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	2	中等污染
$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	1	轻度-中等污染
$I_{\text{geo}} \leq 0$	0	无污染

2 结果与讨论

2.1 土壤中重金属质量比

对典型土壤中重金属(Cu、Zn、Pb、Ni、Cr、Mn、Fe)做测定,统计结果见表 2 和表 3。

表 2 表层土壤中重金属质量比^①Table 2 The amount of heavy metals in the surface soil^①

重金属元素		Zn	Cr	Ni	Cu	Pb	Mn	Fe
农业区 (n = 15)	最大值 $w/(mg \cdot kg^{-1})$	609	100	69.9	150	113	1.18	46.6
	最小值 $w/(mg \cdot kg^{-1})$	89.3	54.4	43.5	29.7	34.4	0.40	31.9
	平均值 $w/(mg \cdot kg^{-1})$	173	72.4	52.2	50.1	67.2	0.60	36.2
	标准偏差 $w/(mg \cdot kg^{-1})$	134	13.1	6.80	36.6	21.8	0.18	4.40
	RSD/%	0.8	0.2	0.1	0.7	0.3	0.3	0.1
交通影响区 (n = 10)	最大值 $w/(mg \cdot kg^{-1})$	310	400	72.6	70.1	140	1.00	41.5
	最小值 $w/(mg \cdot kg^{-1})$	103	69.0	45.9	31.8	17.5	0.54	32.3
	平均值 $w/(mg \cdot kg^{-1})$	161	136	57.0	42.9	89.6	0.69	36.6
	标准偏差 $w/(mg \cdot kg^{-1})$	57.8	103	8.20	12.9	34.3	0.15	3.80
	RSD/%	0.4	0.8	0.1	0.3	0.4	0.2	0.1
工业区 (n = 10)	最大值 $w/(mg \cdot kg^{-1})$	2 385	1 044	69.3	227	218	4.27	85.6
	最小值 $w/(mg \cdot kg^{-1})$	112	40.0	44.0	26.0	52.5	0.67	33.6
	平均值 $w/(mg \cdot kg^{-1})$	514	398	55.7	99.5	119	1.51	50.3
	标准偏差 $w/(mg \cdot kg^{-1})$	688	352	7.10	88.1	61.2	1.08	16.6
	RSD/%	1.3	0.9	0.1	0.9	0.5	0.7	0.3
上海土壤环境背景值 $w/(mg \cdot kg^{-1})$		85.8	44.8	33.1	25.8	46.1	0.56	31.3

①Mn 和 Fe 测定值的单位为 g/kg。

表 3 各功能区土壤中重金属平均质量比与上海市土壤环境背景值的比值

Table 3 The multiple of the amount of heavy metals in the soils of each function areas to the background value of shanghai soils

功能区	Zn	Cr	Ni	Cu	Pb	Mn	Fe
农业区	2.019 8	1.616 1	1.577 0	1.941 9	1.457 7	1.071 4	1.156 5
交通影响区	1.877 6	3.026 8	1.722 1	1.662 8	1.943 6	1.232 1	1.169 3
工业区	5.984 8	8.892 9	1.682 8	3.856 6	2.574 8	2.696 4	1.607 0

由表 2 可见, 7 种重金属元素的质量比均超过上海市土壤环境背景值^[6], 表明研究区域的土壤已经遭受重金属污染。除 Ni 外, 其他 6 种重金属测定的最大值和平均值最大值均出现在工业区土壤中。

由表 3 可见, 工业区土壤中 Cr 的平均质量比远远超过上海市土壤环境背景值, 说明研究区域土壤 Cr 污染最严重。此外, 农业区、交通影响区、工业区土壤中 Zn 的平均质量比分别为背景值的 2.0 倍、1.9 倍、6.0 倍, Cu 的平均质量比分别为背景值的 1.9 倍、1.7 倍、3.9 倍, 由此可见, Zn、Cu 污染为工业区 > 农业区 > 交通影响区。进一步比较得出, Cr、Pb、Mn、Fe 污染为工业区 > 交通影响区 > 农业区, Ni 污染为交通影响区 > 工业区 > 农业区, 说明工业区土壤重金属污染比较严重, 农业区已经受到污染, 其中 Zn、Cr 污染比较严重。

综上所述, 不同土地利用方式的土壤重金属累积分异明显, 工业区重金属污染最严重, 多为多种

重金属的复合污染, Cr、Zn 为主要污染元素; 农业区以 Zn、Cu 为主要污染元素; 交通影响区以 Cr 为主要污染元素。

2.2 地质累积指数

对工业区、农业区、交通影响区的 25 个样点按上海市土壤环境背景值进行地质累积指数计算, 数值经统计处理, 结果见表 4。

由表 4 可见, 污染程度分布情况为工业区 > 交通影响区 > 农业区。工业区污染最严重, 7 种重金属元素都有不同程度污染, 其中以 Zn 和 Cr 污染最严重, 为中等污染; 交通影响区未受 Mn 和 Fe 污染, 其余均为轻度 - 中等污染, Zn、Cr、Pb 为主要污染元素; 农业区未受 Pb、Mn、Fe 污染, 其余均为轻度 - 中等污染, Zn 和 Cu 为主要污染元素。

由此可见, 由地质累积指数得出的结论与由土壤重金属测定值得出的结果大致相同, 进一步证明了所得结果的准确性, 为进一步推论奠定了基础。

表 4 地质累积指数计算值及其分级情况
Table 4 The geoaccumulation index and its classification

重金属元素		Zn	Cr	Ni	Cu	Pb	Mn	Fe
工业区 (n=10)	平均值	1.255 4	1.805 3	0.156 3	0.878 1	0.614 7	0.610 3	0.033 5
	最小值	-0.205 7	-0.748 5	-0.174 3	-0.573 8	-0.397 4	-0.317 6	-0.482 7
	最大值	4.212 1	3.957 5	0.481 1	2.551 0	1.653 2	2.344 4	0.866 5
	分级	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	污染程度	中等污染	中等污染	轻度-中等污染	轻度-中等污染	轻度-中等污染	轻度-中等污染	轻度-中等污染
交通影响区 (n=10)	平均值	0.257 8	0.761 9	0.187 3	0.099 5	0.209 9	-0.306 4	-0.367 7
	最小值	-0.324 2	0.038 1	-0.113 3	-0.283 3	-1.982 4	-0.649 8	-0.539 6
	最大值	1.268 3	2.573 5	0.548 2	0.857 1	0.694 4	0.253 0	-0.178 0
	分级	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0	0
	污染程度	轻度-中等污染	轻度-中等污染	轻度-中等污染	轻度-中等污染	轻度-中等污染	无污染	无污染
农业区 (n=15)	平均值	0.199 6	0.085 2	0.061 6	0.162 3	-0.116 3	-0.531 4	-0.384 9
	最小值	-0.416 9	-0.304 9	-0.190 8	-0.362 6	-1.007 3	-1.053 2	-0.557 6
	最大值	2.242 2	0.573 5	0.493 5	1.955 5	0.706 0	0.492 4	-0.010 8
	分级	1.0	1.0	1.0	1.0	0	0	0
	污染程度	轻度-中等污染	轻度-中等污染	轻度-中等污染	轻度-中等污染	无污染	无污染	无污染

2.3 土壤中的磁性组分

对工业区、农业区和交通影响区 3 种典型土壤的磁性组分作监测,通过统计方法,得到的结果见表 5。

由表 5 可见,磁性组分测定值之间有很大的差异性,并呈现一定的趋势,即工业区 > 交通影响区 > 农业区。

对土壤磁性组分中的重金属做分析,并采用数学统计方法,得到各功能区磁性组分中重金属质量比,结果见表 6。

由表 2 和表 6 可见,磁性组分与表层土壤中重金属的质量比和 RSD 变化趋势均相同,即工业区 > 交通影响区 > 农业区。在磁性组分中,除 Pb、Cu 外, Zn、Cr、Mn、Fe、Ni 的质量比都显著高于其在土

表 5 各功能区土壤中磁性组分测定值比较 %

Table 5 The contents of magnetic fractions in the soils in each function areas %

功能区	磁性组分	
农业区	最大值	9.87
	最小值	5.88
	平均值	7.47
	RSD	0.1
交通影响区	最大值	21.65
	最小值	7.80
	平均值	13.61
	RSD	0.4
工业区	最大值	60.02
	最小值	6.73
	平均值	28.97
	RSD	0.6

表 6 土壤磁性组分中重金属的质量比^①

Table 6 The amount of heavy metals in the magnetic fractions^①

重金属元素		Zn	Cr	Ni	Cu	Pb	Mn	Fe
农业区	最大值 w/(mg·kg ⁻¹)	541	139	97.2	166	57.1	4.72	147
	最小值 w/(mg·kg ⁻¹)	192	88.5	64.5	21.8	22.6	1.24	105
	平均值 w/(mg·kg ⁻¹)	266	118	79.5	46.4	34.8	1.97	130
	标准偏差 w/(mg·kg ⁻¹)	91.3	15.3	8.60	38.1	8.90	0.88	13.2
	RSD/%	0.3	0.1	0.1	0.8	0.3	0.4	0.1
交通影响区	最大值 w/(mg·kg ⁻¹)	507	549	131	111	94.0	2.35	141
	最小值 w/(mg·kg ⁻¹)	219	101	58.6	32.4	39.3	1.10	73.6
	平均值 w/(mg·kg ⁻¹)	317	188	73.5	57.3	60.0	1.66	118
	标准偏差 w/(mg·kg ⁻¹)	108	155	21.5	25.7	19.0	0.42	21.3
	RSD/%	0.3	0.8	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2

续表

重金属元素		Zn	Cr	Ni	Cu	Pb	Mn	Fe
工业区	最大值 $w/(mg \cdot kg^{-1})$	1 731	2 579	104	268	494	7.64	194
	最小值 $w/(mg \cdot kg^{-1})$	278	160	42.4	43.6	56.0	1.90	89.5
	平均值 $w/(mg \cdot kg^{-1})$	836	534	66.1	101	156	3.70	141
	标准偏差 $w/(mg \cdot kg^{-1})$	563	724	18.4	75.7	132	2.13	30.6
	RSD/%	0.7	1.4	0.3	0.7	0.8	0.6	0.2

①Mn 和 Fe 测定值的单位为 g/kg。

壤中的质量比,分别约为 1.7 倍、1.9 倍、2.6 倍、3.4 倍、1.9 倍,且在磁性组分和土壤中的质量比变化基本相同,说明磁性组分能很好地富集这 5 种元素。

图 1(a)(b)(c)(d)更直观地说明了工业区污染 > 交通影响区污染 > 农业区污染,且磁性组分中的重金属质量比高于土壤,表明重金属显著地富集于磁性组分中。

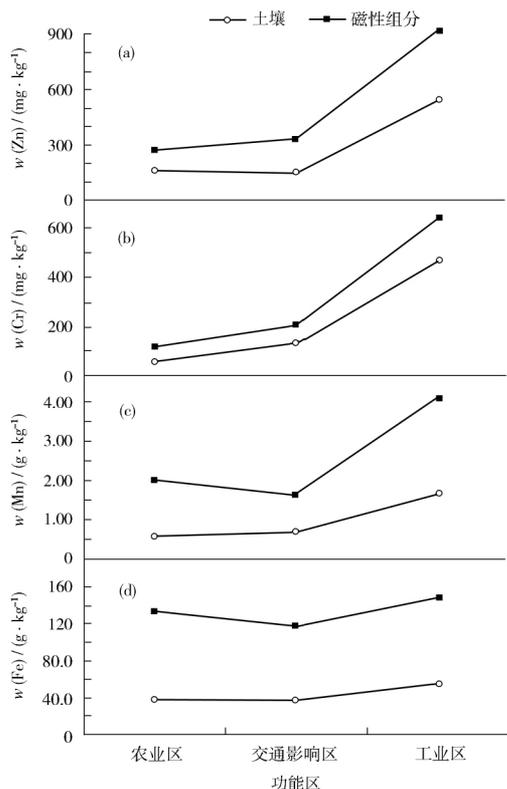


图 1 各功能区土壤和磁性组分中的重金属质量比
Fig. 1 The amount of heavy metals in the soils and magnetic fractions in each function areas

综上所述,土壤中的重金属元素除 Pb、Cu 外,Zn、Cr、Mn、Fe、Ni 都能显著地富集于磁性颗粒中,

可以用磁性组分中这 5 种元素来评价土壤污染情况。

2.4 土壤磁化率特征

对工业区、农业区、交通影响区 25 个样点的磁化率作监测,数据统计分析结果说明了重金属累积与磁化率之间的关系(见表 7)。

表 7 土壤磁性参数

Table 7 The magnetic parameter of the soils

功能区	参数	最大值	最小值	平均值	RSD ^①
农业区	磁化率/ $(10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1})$	59.0	17.1	38.8	0.30
	频率磁化率/%	3.24	0.44	1.81	0.45
	磁性组分测定值/%	9.87	5.88	7.47	0.13
交通影响区	磁化率/ $(10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1})$	278.73	78.28	173.15	0.40
	频率磁化率/%	2.10	0.01	1.15	0.63
工业区	磁化率/ $(10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1})$	1 052.75	74.15	450.33	0.80
	频率磁化率/%	1.06	0.03	0.55	0.52
	磁性组分测定值/%	60.02	6.73	28.97	0.60

①RSD 单位为 %。

由表 7 可见,土壤中磁性组分平均值为工业区 > 交通影响区 > 农业区;磁化率平均值为工业区 > 交通影响区 > 农业区;频率磁化率平均值为农业区 > 交通影响区 > 工业区,且均 < 3%。鉴别污染土壤的标准^[1]是 $x_{if} > 38 \times 10^{-8} m^3/kg$ 和 $x_{fd} < 3\%$,由此进一步证明了研究区域的土壤已受到污染。同时还可以观察到,污染土壤磁化率越大,频率磁化率就越小,即污染表土的频率磁化率与磁化率呈负相关。土壤磁化率与磁性组分在 $p < 0.01$ ($R = 0.87$ $n = 35$) 水平上显著相关,频率磁化率与磁性组分在 $p < 0.01$ ($R = -0.45$ $n = 35$) 水平上呈显著负相关,说明土壤磁性主要源于磁性组分,也进一步证明了通过磁学方法监测土壤污染的可行性。

为了进一步研究重金属累积与磁化率的关系,对表层土壤磁化率与 7 种重金属质量比进行相关

性分析,结果见表 8。

表 8 表层土壤磁化率与重金属质量比的相关性分析
Table 8 The correlation between susceptibility to the heavy metals

功能区	Zn	Cr	Ni	Cu	Pb	Mn	Fe
工业区($n=10$)	0.624 7	0.284 1	0.578 4	0.641 9 ^①	0.739 9 ^①	0.412 7	0.633 3 ^①
农业区($n=15$)	-0.181 4	0.007 2	0.010 7	0.295 3	0.123 9	-0.327 2	-0.278 7
交通影响区($n=10$)	0.724 3 ^①	0.537 3	0.513 2	0.752 1 ^①	0.074 5	0.523 9	0.876 7 ^②

①在 $p=0.05$ 水平上相关;②在 $p=0.01$ 水平上相关。

由表 8 可见,工业区的 Cu、Pb、Fe 与各样点的磁化率存在相关性;交通影响区的 Zn、Cu 与各样点的磁化率存在相关性,Fe 与各样点的磁化率存在显著相关性;农业区的重金属元素与各样点的磁化率不存在相关性。说明土壤中 Cu、Pb、Fe、Zn 的来源与磁性矿物颗粒有关,工业生产和交通活动释放出的飞灰与冶金尘埃是引起土壤 x_{if} 明显增强的主要原因。而重金属元素能吸附在飞灰与尘埃上,随着大气沉降进入土壤,由此引起 x_{if} 与重金属含量同步增加的现象。因此,工业生产和交通污染是引起土壤磁化率随重金属含量而增加的主要原因。

3 结论

根据土壤磁性增强与重金属累积间的关系,对工业区、交通影响区、农业区 3 个功能区的土壤进行研究,主要结论如下:

(1) 3 个功能区土壤中 7 种重金属元素(Cu、Zn、Pb、Ni、Cr、Mn、Fe)的质量比均超过上海市土壤环境背景值,表明 3 个功能区的土壤均已受到不同程度的污染。土壤中污染程度分布情况为工业区 > 交通影响区 > 农业区。工业区污染最严重,多为重金属复合污染,Cr、Zn 为主要污染元素;农业区以 Zn、Cu 为主要污染元素;交通影响区以 Cr、Pb 为主要污染元素。

(2) 磁性组分中的重金属元素质量比高于土壤,说明土壤磁性颗粒能富集重金属,也表明可以用磁性组分中的重金属元素质量比来评价土壤重金属污染情况。

(3) 由地质累积指数计算得出,3 个功能区污染程度分布情况为工业区 > 交通影响区 > 农业区。工业区以 Zn、Cr 污染最严重,为中等污染;交通影响区未受 Mn 和 Fe 污染,其余均为轻度-中等污染,Zn、Cr、Pb 为主要污染元素;农业区未受 Pb、

Mn、Fe 污染,其余均为轻度-中等污染,Zn 和 Cu 为主要污染元素。

(4) 土壤中各功能区的磁化率平均值为工业区 > 交通影响区 > 农业区,土壤磁化率与磁性组分在 $p < 0.01$ ($R = 0.87$ $n = 35$) 水平上显著相关。工业区的 Cu、Pb、Fe 与各样点的磁化率存在相关性;交通影响区的 Zn、Cu 与各样点的磁化率存在相关性,Fe 与各样点的磁化率存在显著相关性;农业区的重金属元素与各样点的磁化率不存在相关性。说明土壤中磁性增强与重金属富集有密切的联系,用磁学方法可以监测土壤重金属污染。

[参考文献]

- [1] PETROVSKY E, ELLWOOD B B. Magnetic monitoring of air-land, and water-pollution[M]//MAHER B A, THOMPSON R. Quaternary climates, environments and magnetism. UK: Cambridge University Press, 1999: 279-322.
- [2] 张卫国,俞立中, HUTCHINSON S M. 长江口南岸边滩沉积物重金属污染记录的磁诊断方法[J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(6): 616-623.
- [3] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969(2): 108-118.
- [4] FORSTNER U, MULLER G. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments: geochemical background, man's influence and environmental impact[J]. Geojournal, 1981(5): 417-432.
- [5] FORSTNER U, ALF W, CALMANO W, et al. Sediment criteria development-contributions from environmental geochemistry to water quality management[J]//HELING D, ROTHE P, FORSTNER U, et al. Sediments and environmental geochemistry selected Peatsandesehistories. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1990, 12(6): 311-338.
- [6] HU X F, SU Y, YE R, et al. Magnetic properties of the urban soils in Shanghai and their environmental implications[J]. Catena, 2007, 2(3): 108.