

上海市杨浦区表土重金属污染的磁学响应

陈裕颖¹, 王冠¹, 陈姣¹, 余诗怡¹, 任非凡²

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: [目的] 揭示上海市杨浦区土壤重金属污染情况, 为环境磁学在城市表土重金属污染的应用提供科学依据。[方法] 结合磁学方法与传统化学方法, 对杨浦区 5 个功能区内的 17 个表土样品进行磁学特征和重金属浓度的分析。[结果] 杨浦区表土磁化率值平均值为 $2.42 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$, 磁性特征以低矫顽力的亚铁磁性矿物为主导, 颗粒较粗。除频率磁化率外, 磁学参数整体呈现工业区与交通区值较高的特点; 重金属 Zn, Pb, Cu, Cr 浓度值高于背景值, 且高值集中在工业区、交通区、居住区, 污染负荷指数 (PLI) 的值为 1.962, 属于轻度污染。除工业区外, 各功能区之间重金属含量与磁学参数的相关性较好 ($p < 0.05$), 磁化率 (χ_{H})、饱和等温剩磁 (SIRM)、硬剩磁 (HIRM) 对杨浦区表土重金属含量有良好的指示作用。[结论] 环境磁学方法可以快速简便地提供城市污染信息。

关键词: 环境磁学; 重金属; 表土; 污染负荷指数; 杨浦区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)03-0028-07

中图分类号: X830.2

文献参数: 陈裕颖, 王冠, 陈姣, 等. 上海市杨浦区表土重金属污染的磁学响应[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 28-34. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.005; Chen Yuying, Wang Guan, Chen Jiao, et al. Magnetic response of heavy metals pollution in urban topsoil of Yangpu District, Shanghai City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 28-34. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.005

Magnetic Response of Heavy Metals Pollution in Urban Topsoil of Yangpu District, Shanghai City

CHEN Yuying¹, WANG Guan¹, CHEN Jiao¹, YU Shiyi¹, REN Feifan²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: [Objective] The heavy metal pollution of topsoil from Yangpu District of Shanghai City was illustrated to provide scientific basis for the application of environmental magnetism in heavy metal pollution. [Methods] A systematic analysis of 17 topsoil samples collected from 5 functional areas in Yangpu District was conducted. The analysis involved magnetic characteristics and heavy metal concentration using magnetic method and traditional chemical method. [Results] The average magnetic susceptibility of the topsoil in Yangpu District was $2.42 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$, and the soil was characterized by low-coercivity magnetite and coarse grain size particles. The values of magnetic parameters, including magnetic susceptibility (χ_{H}) saturation isothermal remanent magnetization (SIRM), the susceptibility of anhysteretic remanent magnetization (χ_{ARM}), $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{H}}$, $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$, S-ratio (IRM-300/SIRM) and magnetically hard isothermal remanent magnetization (HIRM), were high in industrial and traffic area. The concentrations of Zn, Pb, Cu, and Cr were much higher than the background values. The relatively high heavy metal values were found concentrated in industrial, traffic and residential areas. Generally, the pollution loading index (PLI) value was 1.962, belonging to mild contamination. Except in industrial area, the contents of heavy metal in other areas were significantly correlated with magnetic parameters. χ_{H} , SIRM and HIRM can be generally regarded as good indicators of heavy metal concentration of topsoil in Yangpu District. [Conclusion] Environmental magnetism is capable of

收稿日期: 2016-09-19

修回日期: 2016-11-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“城市轨道交通颗粒物污染的磁学诊断及机理研究”(41001331); 上海市自然科学基金项目“城市不同功能区地表灰尘重金属及其磁学特征的季节变化响应特性研究: 以上海市为例”(15ZR1428700)

第一作者: 陈裕颖(1994—), 女(汉族), 江西省南昌市人, 硕士研究生, 研究方向为环境磁学与城市污染。E-mail: zxc1317798@sina.com.

通讯作者: 王冠(1981—), 女(汉族), 陕西省咸阳市人, 博士, 副教授, 主要从事城市污染研究。E-mail: wangguan@usst.edu.cn.

indicating heavy metal pollution in topsoil.

Keywords: environmental magnetism; heavy metal; topsoil; pollution loading index; Yangpu District

由交通运输、化石燃料燃烧、工业生产等人为活动产生的污染物通常含有大量的重金属、挥发性有机物等有害物质,它们可通过各种途径进入城市土壤系统,最终严重破坏土壤质量,同时这些有害物质极易被农作物吸收,被人体皮肤接触、吸收、摄入后,将对人体造成不可估计的伤害。其中,重金属污染具有难降解性,并且可通过食物链被生物富集,产生生物放大作用,危害较大。因此重金属污染的监测防治已成为研究的热点问题^[1]。

环境磁学具有快速简便、经济、对样品无破坏性的优点,被广泛应用于城市的土壤监测研究中^[2-13]。目前磁学方法已陆续成功应用于东欧^[2]、土耳其^[3]、日本^[4]等国家,在土壤重金属污染研究的空间变化特征、来源分析、污染范围确定等方面,取得了较多成果。大量研究结果^[5-8]表明,受污染的土壤磁性矿物与自然成土作用下产生的磁性矿物的种类、含量、粒度大小均存在一定差异,并且土壤的重金属(Cd, Cr, As, Cu, Pb, Zn, Fe)含量与磁化率、饱和等温剩磁等磁学参数之间存在良好的相关性。与国外研究相比,国内关于城市土壤磁性特征的研究较少,主要集中在表土磁学参数的空间分布,讨论磁学参数与重金属含量的关系,尝试建立关于磁参数指示污染的半定量化学模型^[5-6]。Lu等^[7]发现洛阳市工业区、公路附近的表土磁化率较高,公园、绿地等磁化率值较低,说明工业生产、交通尾气排放磁性颗粒物,导致土壤磁性增强;王博等^[8]研究表明兰州市表土的主要磁矿物为低矫顽力磁铁矿,磁参数高低值的空间分布与污染负荷指数(pollution loading index, PLI)的分布相吻合,同时通过进一步分析,获得重金属污染的磁学半定量模型;杨涵等^[9]发现饱和等温剩磁和软剩磁对石河子市工业区具有良好的指示作用,而在化工区则需要结合频率磁化率判断。上述研究均揭示磁学方法研究城市污染的可行性,但由于土壤磁性受成土作用、土壤母质发育影响,地区差异性大,磁学参数对污染的敏感性存在不同程度的差异^[9]。目前有关上海市的磁学研究相对较少。

上海市作为中国的经济与金融中心,人口规模和密度居中国第一,因此对上海市环境质量的监测具有重要意义。目前,关于上海市土壤重金属污染的磁学研究多集中于嘉定,青浦,宝山等郊区^[10-11],以上研究主要针对工业、农业、交通等用地方式较单一的郊区,未对人为干扰较大的居住、商业用地进行调查。相对

于郊区,中心城区土地利用方式比较复杂,土地更新翻耕比较快,监测干扰大。关于上海市中心城区的研究鲜见报道。杨浦区属于上海市的中心城区,教育业发达,也是老工业区。本研究尝试结合磁学手段与传统化学分析方法探讨上海市杨浦区不同用地类型背景下的表土的磁性特征及重金属含量,以期能为日后环境磁学在城市土壤重金属研究中的应用提供一定的参考作用。

1 研究区概况

杨浦区位于上海市中心城区东北部,地处黄浦江下游西北岸。与浦东新区相邻,西临虹口区,北接宝山。区内南部年均降雨量为1 060 mm,北部为1 040~1 060 mm。杨浦区地处北亚热带南缘,属于亚热带季风气候。杨浦区是上海的老工业区,也是近代工业的摇篮。杨浦区内曾分布大量的工厂,包括纺织、机械、电力、造船、轻工业等,这些企业设备陈旧,技术落后,对环境造成严重破坏。如今,杨浦区仍保留部分工业仓储与机械生产用地,同时商贸业、教育业发展迅速,交通道路不断完善,集商业、生活、教育、工业为一体,用地类型十分复杂。

2 材料与方 法

2.1 样品采集

本研究采取均匀布点与实际情况相结合的原则,根据土壤主要利用类型,将杨浦区分为工业区(GY)、交通区(JT)、商业区(SY)、居住区(JZ)、清洁区(QJ)5种不同功能区,于2015年3月连续3 d干燥无雨的天气下,采用塑料铲子收集表土样品,放入自封袋密封保存。共采集17个表土样品(0—2 cm),考虑到样品的代表性和受人为扰动的影响,每个采样点选自典型功能区,远离施工、修路等其他因素影响,均在土地耕新较慢的草地,乔木群落下,由多点混合而成。

2.2 试验分析

样品在40℃左右烘箱内烘干,去除碎石、枯枝杂草等杂质后,称取4 g左右样品,装入磁学专用样品盒并压实,测量样品的高频磁化率 χ_{hf} (4 700 Hz)、低频磁化率 χ_{lf} (470 Hz)、非磁滞剩磁(ARM)、饱和等温剩磁(SIRM),及等温剩磁(IRM₁₀₀, IRM₁₀₀, IRM₃₀₀)等参数。高低频磁化率使用Bartington MS2磁化率仪测量,非磁滞剩磁、饱和等温剩磁(SIRM)、等温剩磁(IRM₁₀₀, IRM₃₀₀)使用交变退磁仪对样品退磁,退磁后的样品采用脉冲磁化仪与

Argico JR6 旋转磁力仪完成测量。计算百分频率磁化率 $\chi_{fd}\%$ $\{\chi_{fd}\% = [(\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf}] \times 100\%$ }, 硬剩磁 HIRM $\{HIRM = (SIRM + IRM_{-300}) / 2\}$, S-ratio (S-ratio = $IRM_{-300} / SIRM$), χ_{ARM} / χ_{lf} , $\chi_{ARM} / SIRM$ 等。磁学试验在华东师范大学环境磁学国家重点实验室完成。

样品经玛瑙研钵研磨后,称取 0.2 g 样品,加入约 20 ml 氢氟酸—硝酸—高氯酸混合液,在电热板上经 180 °C 高温加热消解处理后,采用等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定 Co, Ni, Cu, Pb, Zn, Mn, Fe, Cr 等 8 种重金属元素浓度的全量。为保证试验结果的精确性和可靠性,随机抽取 20% 样品作平行样测定,测量误差小于 $\pm 10\%$, 并采用水系沉积物成分分析标准物质(GSD-9)进行质量控制。重金属含量的测定在上海理工大学环境与建筑学院实验室完成。

3 结果与分析

3.1 表土磁性特征

χ_{lf} 作为最常用的磁学参数之一,通常反映在外加磁场作用下物质的磁化能力,主要指示亚铁磁性矿物的含量。杨浦区表土样品的基本磁学参数如表 1 所示,可知杨浦区表土的磁化率变化范围在 $2.223 \times 10^{-7} \sim 9.984 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$, 平均值达到 $2.415 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。与宝山区、青浦区等地的表土磁化率

(分别是 1.801×10^{-6} , $3.27 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ ^[10] 相比,可见杨浦区表土的磁化率较高,说明杨浦区亚铁磁性矿物含量较高。图 1 反映不同功能区磁学参数的空间分布变化,磁性矿物的含量工业区、交通区较高,居住区、商业区、清洁区较低。相关研究表明工业区^[12]与公路周边^[13]的表土磁性明显增强,磁化率值增加。而商业区的值偏低可能是由于采样点位于商业区的绿化带上,绿化土均为外来土,经常翻新,受人为扰动影响,因而值出现异常。清洁区的车流量相对较小,远离工业区,因而磁化率值偏低。

χ_{ARM} 主要反映细粒级假单畴(PSD)和稳定单畴(SSD)亚铁磁性矿物的含量。SIRM 可反映亚铁磁性矿物和不完整反铁磁性矿物的含量。杨浦区表土的 χ_{ARM} 的平均值为 $1.556 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$, 变化范围在 $6.518 \times 10^{-7} \sim 1.044 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$, 而 SIRM 的平均值为 $3.535 \times 10^{-2} \text{ Am}^2/\text{kg}$, 变化范围在 $3.286 \times 10^{-3} \sim 1.512 \times 10^{-1} \text{ Am}^2/\text{kg}$ (表 1)。 χ_{ARM} 与 SIRM 也呈现出高值分布在工业区与交通区,其他 3 个区值较低的趋势,与磁化率的分布情况十分相似(图 1)。HIRM 的值主要由反铁磁性矿物贡献,其平均值为 $3.433 \times 10^{-2} \text{ Am}^2/\text{kg}$, 变化范围在 $3.182 \times 10^{-2} \sim 1.488 \times 10^{-1} \text{ Am}^2/\text{kg}$ (表 1)。工业区、交通区的 HIRM 值高,表明工业区、交通区的反铁磁性矿物较多,居住区次之,商业区、清洁区的值最小(图 1)。

表 1 上海市杨浦区表土样品的基本磁学参数

磁学参数	最小值	最大值	平均值	标准差
$\chi_{lf} / (10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	22.228	998.412	241.510	251.605
$\chi_{fd} / \%$	0.253	5.551	2.398	1.588
$SIRM / (10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	328.596	15 117.365	3 535.361	3 642.136
$HIRM / (10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$	318.150	14 879.710	3 432.891	3 529.566
$\chi_{ARM} / (10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	65.175	10 440.673	1 556.006	3 128.640
χ_{ARM} / χ_{lf}	1.110	12.500	3.927	2.909
$\chi_{ARM} / SIRM / (10^{-3} \text{ m} \cdot \text{A}^{-1})$	0.067	0.954	0.271	0.217
S-ratio	0.854	0.990	0.946	0.035

S-ratio 值指示亚铁磁性矿物和不完整的反铁磁性矿物的相对含量,S 值越接近 1,说明亚铁磁性矿物含量越高。表 1 反映杨浦区表土的 S-ratio 平均值为 0.946,在 0.854~0.990 波动,说明杨浦区表土样品由亚铁磁性矿物主导,并有不完整反铁磁性矿物的贡献。

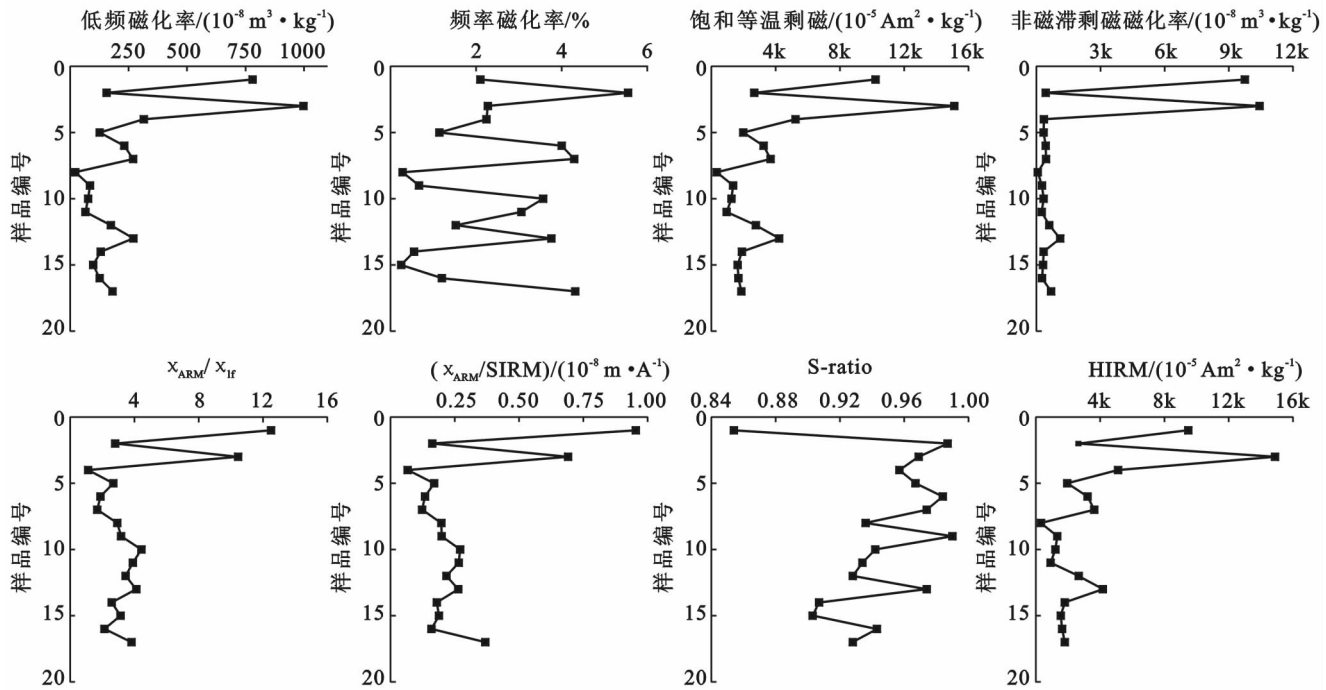
$\chi_{fd}\%$ 与 2 个比值参数 χ_{ARM} / χ_{lf} , $\chi_{ARM} / SIRM$ 主要用来指示磁性矿物颗粒的粒度大小。有研究^[14]表明,若 $\chi_{fd}\% < 2\%$, 样品中基本无超顺磁颗粒 SP 的存

在, $\chi_{fd}\%$ 在 $2\% \sim 10\%$, SP 与粗颗粒混合存在。杨浦区表土的 $\chi_{fd}\%$ 在 $0.253\% \sim 5.551\%$, 平均值为 2.398% , 说明杨浦区表土中超顺磁性颗粒的百分含量较低。自然发育的土壤中超顺磁性颗粒含量较高,而人为活动会造成土壤中假单畴和多畴磁性物质含量高,受污染的土壤往往具有磁化率较大,频率磁化值较低的特点^[15]。

χ_{ARM} / χ_{lf} , $\chi_{ARM} / SIRM$ 也可指示磁铁矿粒度大小,对于大于 SP 颗粒而言,值越小,反映样品中颗粒越粗。

整体上,杨浦区表土的 $\chi_{ARM}/SIRM$ 的平均值为 $0.271 \times 10^{-3} \text{ m/A}$,变化范围在 $0.067 \sim 0.954 \times 10^{-3} \text{ m/A}$,

χ_{ARM}/χ_{IF} 的平均值为 3.927,变化范围在 1.11~12.50,说明杨浦区的表土颗粒相对较粗。



注:样点 1—4 位于工业区;样点 5—7 位于交通区;样点 8—10 位于商业区;样点 11—14 位于居住区;样点 15—17 位于清洁区。下同。

图 1 杨浦区各功能区表土样品磁学参数变化

3.2 土壤重金属含量与评价

从表 2 可以看出,表土中的 Zn,Pb,Cu,Cr,Ni,Co,Mn,Fe 的平均值浓度分别为 202.25,60.15,69.79,65.54,27.97,11.47,505.62 mg/kg,和

2.00%。其中 Zn,Pb,Cu,Cr 的浓度超标,分别是上海市土壤背景值^[16]的 2.49,2.41,2.57,1.04 倍。由此可见上海市杨浦区表土的重金属含量存在一定程度的富集。

表 2 上海市杨浦区表土样品的重金属元素含量

项目	表土样品的重金属元素含量				
	最小值	最大值	平均值	标准差	上海市表层土壤背景值
Zn/(mg · kg ⁻¹)	57.50	855.50	202.25	176.30	81.30
Pb/(mg · kg ⁻¹)	1.25	198.00	60.15	61.48	25.00
Cu/(mg · kg ⁻¹)	2.25	354.00	69.79	77.40	27.20
Cr/(mg · kg ⁻¹)	4.50	204.25	65.54	43.96	70.20
Ni/(mg · kg ⁻¹)	4.00	107.25	27.97	21.50	29.90
Fe/%	0.61	2.62	2.00	0.54	3.16
Co/(mg · kg ⁻¹)	2.00	18.00	11.47	4.69	12.40
Mn/(mg · kg ⁻¹)	45.50	825.00	505.62	239.43	548.00

图 2 显示土壤重金属浓度在不同功能区的变化情况。总体上,重金属在工业区、交通区、居住区的浓度较大,在清洁区、商业区的浓度较小。与工业排放有关的重金属 Zn,Cr^[17] 的高值出现在杨树浦发电厂(GY₁)和景昶工业园(GY₄)。

Pb,Cu 的浓度与工业生产、交通污染有关^[17-19],在工业区的值较高,在居住区的 JZ₂,JZ₃ 采样点达到最大。JZ₂,JZ₃ 小区位于主干道附近,人口居住密集,

车流来往较多,交通污染是造成居住区 Pb,Cu 富集的主要原因。而交通区的 Pb,Cu 含量低于居住区的浓度,这可能是由于受采样条件限制,采样点位于公路两侧绿化带离马路较远的一侧,且马路车流量不大,绿化带上长有乔木,对污染起到一定的净化吸收作用,导致测得的 Pb,Cu 的含量不高。Fe,Co,Mn,Ni 的浓度均小于背景值,波动较大,在各功能区的变化特征不明显。

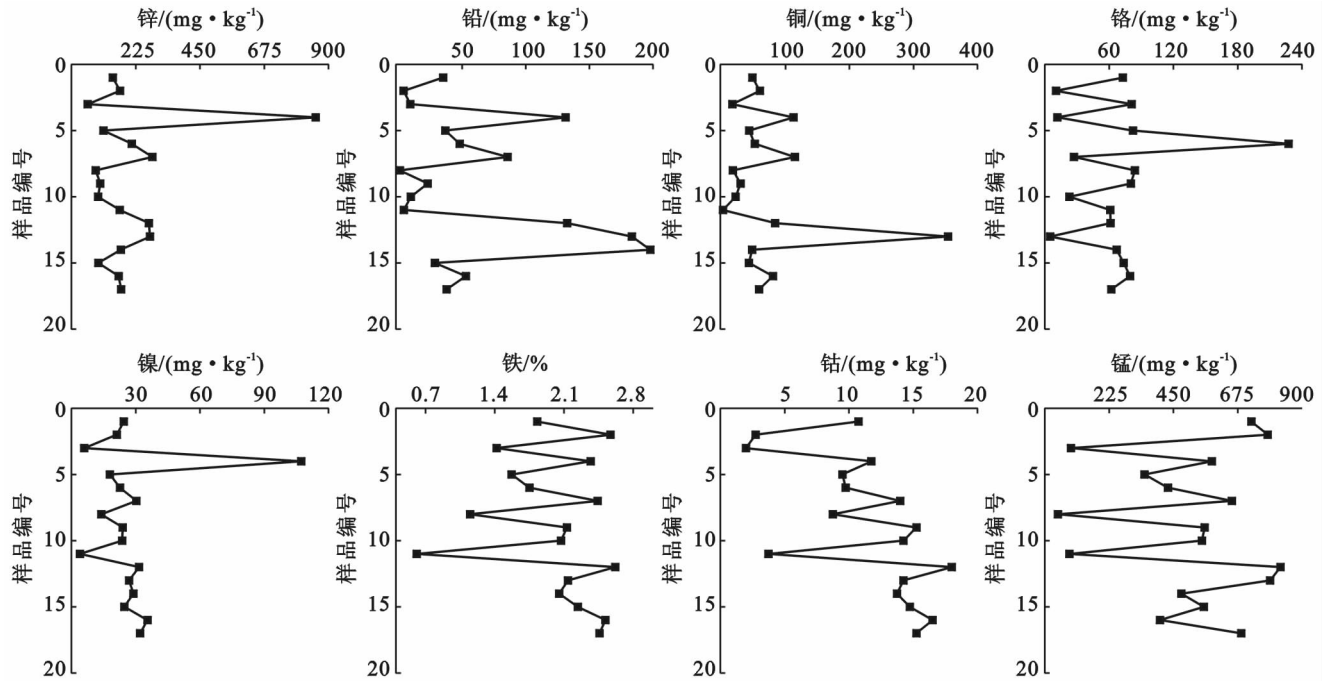


图 2 杨浦区各功能区表土样品重金属含量变化

常见的重金属污染评价方法包括富集因子法和污染负荷指数法,富集因子(EF)法用来判断和评价元素的来源(自然来源和人为来源),计算公式为

$$EF = \frac{(C_i/C_n)_{\text{重金属}}}{(C_i/C_n)_{\text{背景}}}$$

式中: C_i ——元素*i*的浓度(mg/kg); C_n ——被选定的参考元素的浓度(mg/kg); $(C_i/C_n)_{\text{重金属}}$ ——土壤中 C_i 元素的相对浓度; $(C_i/C_n)_{\text{背景}}$ ——地壳中 C_i 元素的参考浓度。当 $EF > 10$ 时,样品中该元素的富集是由人为活动造成的,当 $EF < 1$ 时,则该元素主要来源于地壳或土壤, EF 在 $1 \sim 10$,则受人为来源和自然来源共同控制^[20]。本文选取Fe作为参考元素,计算结果表明,Zn,Pb,Cu,Cr,Ni,Co,Cr的富集因子在 $1 \sim 10$,部分采样点的EF大于10,说明它们受人为来源和自然来源共同作用。结合上述分析结果得出重

金属的人为来源包括交通污染和工业活动。进一步列出各功能区富集因子的平均值比较,结果如表3所示,杨浦区的重金属都受到人为活动的影响,清洁区、商业区的EF值相对较低,但EF值均大于1,说明重金属含量受到人为活动的作用。居住区、交通区、工业区较高,其中居住区、交通区Cu,Pb,Zn的EF值偏高,说明表土受交通污染影响严重,工业区内,整体EF值都偏高,受工业活动影响较大。污染负荷指数(PLI)可以综合各元素的污染情况,全面地评判地区的污染情况^[21]。当 $PLI < 1$ 时,表示该地区无污染; $1 \leq PLI < 2$,表示该地区污染等级为I,属于轻度污染; $2 \leq PLI < 3$,表示该地区污染等级为II,属于中度污染,当 $PLI \geq 3$ 时,表示该地区污染等级为III,属于重度污染。计算结果表明,杨浦区样品的PLI值为1.962,在 $1 \sim 2$ 之间,属于污染等级I,轻度污染。

表 3 不同功能区表土重金属的富集因子的比较

功能区	不同功能区表土重金属的富集因子							
	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
清洁区	1.642	1.536	2.901	1.000	1.322	1.344	2.077	2.313
居住区	1.684	1.082	6.524	1.000	1.527	1.200	7.586	5.799
商业区	1.837	1.051	1.544	1.000	1.092	1.228	0.699	2.153
交通区	1.476	1.161	4.035	1.000	1.418	1.300	3.631	3.999
工业区	0.850	2.054	3.176	1.000	1.459	1.883	2.618	5.325

3.3 表土土壤磁学参数与重金属含量的相关关系

经SPSS软件分析,不同功能区的重金属含量与磁学参数的相关性分析结果表明,清洁区表土的 χ_{Hf} ,

SIRM,HIRM与PLI,Cr,Cu,Ni,Fe,Zn的含量相关性显著($p > 0.05$), $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{Hf}}$ 与Cr,Mn的相关性较好($P > 0.05$), $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 与PLI,Cr,Cu,Mn,Zn的含

量相关性较好($p > 0.05$);居住区表土的 χ_{lf} , SIRM, HIRM与PLI,所有重金属的含量相关性显著($p > 0.05$), χ_{ARM}/χ_{lf} , $\chi_{ARM}/SIRM$ 仅与Zn的含量相关性显著($p > 0.05$);商业区 χ_{lf} , SIRM, HIRM与所有重金属的含量相关性显著($p > 0.05$);交通区内, χ_{lf} , SIRM, HIRM与PII及所有重金属的浓度相关性较好($p > 0.05$);工业区磁学参数与重金属的相关性较差,主要原因可能是工业区采样点均位于工业园区内,园区的工业企业类型复杂,污染来源受多种因素作用,干扰人为活动产生的磁性物质,使得重金属含量与磁学参数的相关性变差。由上述分析可知,杨浦区磁学参数与重金属含量间的关系受用地类型影响,不同功能区内相关性不一致,其中 χ_{lf} , SIRM, HIRM与大部分重金属的相关性较好,可以指示杨浦区污染情况,粒度指示参数仅与个别重金属相关性较好,对杨浦区表土的重金属含量并不敏感。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文主要探讨杨浦区内5种不同土地利用方式下的土壤磁性和重金属浓度,结果显示 χ_{lf} , SIRM, HIRM, χ_{ARM} 等磁学参数和重金属浓度的高值都出现在工业区、交通区、居住区,具有较好的空间一致性。研究^[22]表明,土壤的磁性受3种因素作用:土壤母质,风化成土作用,人为活动输入。与上海市土壤磁化率背景值 $[(2.91 \pm 0.98) \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}]$ 相比^[23],杨浦区磁化率值高,磁性较强,说明杨浦区磁性颗粒来源以人为活动输入为主。有研究^[24]表明化石燃料产生铁磁性颗粒,这些磁性颗粒粒径小,对重金属有很强的吸附能力。部分重金属也可以通过同晶替换进入磁性矿物的晶格^[25],因此重金属常与磁性颗粒共存,重金属浓度与磁学参数存在密切联系。本研究表明,高磁化率,低频率磁化率的采样点,其重金属浓度相对较高。相关性分析进一步表明,清洁区、商业区、交通区、居住区的磁学参数 χ_{lf} , SIRM, HIRM与Cr, Cu, Fe, Mn, Pb等重金属元素呈现良好的相关性,该结论与上海市嘉定区、宝山区、青浦区^[10-11]的结果一致,说明磁学方法对上海市表土重金属污染有一定的指示作用。

本研究只讨论磁学参数与Mn, Co, Cr, Cu, Ni, Fe, Pb, Zn的相关性,这种相关性是否对更多重金属仍成立?工业区重金属与磁学参数的相关性差,污染来源多样化会对结果产生什么样的影响?哪些因素共同作用会削弱磁学参数与重金属浓度的相关性?这些都值得进一步探讨。

4.2 结论

(1) 杨浦区表土磁化率值平均值为 $2.415 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$,磁性特征以低矫顽力的亚铁磁性矿物为主导,并有不完全反铁磁性矿物的贡献,颗粒较粗。除 $\chi_{fd}\%$ 外,其他磁学参数的高值分布在工业区、交通区,低值分布在居住区、商业区、清洁区。

(2) 重金属Zn, Pb, Cu, Cr浓度值高于背景值,高值集中在工业区、交通区、居住区。富集因子的结果显示,绝大多数EF的值在1~10,表土中的重金属受自然来源和人为来源共同作用。PLI的值为1.962,属于污染等级I,轻度污染。

(3) 不同功能区内,重金属的含量与磁学参数间的相关性不同。由于工业区重金属的来源比较复杂,磁学参数与重金属含量的相关性不太好。其他功能区内,表土的重金属的含量与 χ_{lf} , SIRM, HIRM有着良好的相关性($p > 0.05$)。因此, χ_{lf} , SIRM, HIRM对杨浦区的表土重金属含量具有很好的指示作用。

[参 考 文 献]

- [1] 郭伟,孙文惠,赵仁鑫,等.呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价[J].环境科学,2013,34(4):1561-1567.
- [2] Bityukova L, Scholger R, Birke M. Magnetic susceptibility as indicator of environmental pollution of soils in Tallinn[J]. Physics & Chemistry of the Earth (Part A): Solid Earth & Geodesy, 1999,24(9):829-835.
- [3] Canbay M, Aydin A, Kurtulus C. Magnetic susceptibility and heavy-metal contamination in topsoils along the Izmit Gulf coastal area and IZAYTAS (Turkey) [J]. Journal of Applied Geophysics, 2010,70(1):46-57.
- [4] Kawasaki K, Horikawa K, Sakai H. Environmental magnetism of roadside soil contamination in the restricted Bijyodaira Area of Mt. Tateyama, Toyama, Japan[J]. Asian Journal of Water Environment and Pollution, 2015,12(2):1-11.
- [5] Liu Dexin, Ma Jianhua, Sun Yanli, et al. Spatial distribution of soil magnetic susceptibility and correlation with heavy metal pollution in Kaifeng City, China[J]. Cate-na, 2016,139: 53-60.
- [6] 王学松,秦勇.徐州城市表层土壤中金属元素的磁学响应[J].科技导报,2006,24(5):39-43.
- [7] Lu S G, Bai S Q, Xue Q F. Magnetic properties as indicators of heavy metals pollution in urban topsoils: A case study from the city of Luoyang, China[J]. Geophysical Journal International, 2007,171(2):568-580.
- [8] 王博,夏敦胜,余晔,等.兰州城市表层土壤重金属污染的环境磁学记录[J].科学通报,2012,57(32):3078-3089.

- [9] 杨涵,熊黑钢,陈学刚. 石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究[J]. 环境科学, 2014, 35(9): 3537-3545.
- [10] 姜琪,胡雪峰,李珊,等. 上海宝山和青浦区表土磁性特征的差异及环境指示意义[J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 774-780.
- [11] 李珊,胡雪峰,杜艳,等. 上海嘉定区表土磁性强度的空间分异及环境指示意义[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 9-17.
- [12] 陈轶楠,张永清,张希云,等. 晋南某钢厂周边土壤重金属与磁化率分布规律及其相关性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(1): 85-91.
- [13] 毛应明,桑树勋,王学松,等. 公路边土壤的磁化率特征及其对污染的指示意义[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(35): 144-156.
- [14] Dearing J A. Environment Magnetic Susceptibility, Using the Bartington MS2 System[M]. Second edition England; Chi-Publishing, 1999.
- [15] 旺罗,刘东生,吕厚远,等. 污染土壤的磁化率特征[J]. 科学通报, 2000, 45(10): 1091-109.
- [16] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 339-483.
- [17] 于瑞莲,胡恭任,林燕萍,等. 泉州城市表层土壤中金属元素来源分析[J]. 矿物学报, 2012, 32(1): 156-164.
- [18] Olson K W, Skogerboe R K. Identification of soil lead compounds from automobile sources[J]. Environmental Science Technology, 2002, 9(3): 227-230.
- [19] 章明奎. 浙江省城市汽车站点地表灰尘中重金属含量及其来源研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2294-2304.
- [20] Zoller W H, Gladney E S, Duce R A. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole[J]. Science, 1974, 183(4121): 198-200.
- [21] Angulo E. The Tomlinson pollution load index applied to heavy metal "Mussel-Watch" data: A useful index to assess coastal pollution[J]. Science Total Environment, 1996, 187(1): 19-56.
- [22] Shi R, Cioppa M T. Magnetic survey of topsoils in Windsor-Essex County, Canada[J]. Journal of Applied Geophysics, 2006, 60(3): 201-212.
- [23] Hu Xuefeng, Su Yu, Ye Rong, et al. Magnetic properties of the urban soils in Shanghai and their environmental implications[J]. Catena, 2007, 70: 428-436.
- [24] Heller F, Strzyszczyk Z, Magiera T. Magnetic record of industrial pollution in forest soils of Upper Silesia, Poland[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1998, 103(B8): 17767-17774.
- [25] Cornell R M, Schwertmann U. The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and uses [M]. John Wiley & Sons, 2003.

(上接第 27 页)

- [16] Janson R W. Monoterpene emissions from Scots pine and Norwegian Spruce[J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(D2): 2839-2850.
- [17] 陈静,陈丽华,余新晓,等. 夏季油松及侧柏单萜烯变化规律及二次有机气溶胶生成潜势的估算[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 331-344.
- [18] Owen S, Harley P, Guenther A. Light dependency of VOC emissions from selected Mediterranean plant species[J]. Atmosphere Environment, 2002, 36(19): 3147-3159.
- [19] Estell R E, James D K, Fredrickson E L, et al. Within-plant distribution of volatile compounds on the leaf surface of *Flourensia cernua*[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2003, 48: 144-150.
- [20] 黄娟,莫江明,孔国辉,等. 植物源挥发性有机物对氮沉降响应研究展望[J]. 生态学报, 2011, 31(21): 6616-6623.
- [21] Loreto F, Schnitzler J. Abiotic stresses and induced BVOCs[J]. Trend in Plant Science, 2010, 15(3): 154-166.
- [22] 司徒淑婷,王雪梅, Guenther A, 等. 典型夏季珠江三角洲地区植被的异戊二烯排放[J]. 环境科学学报, 2009, 29(4): 822-829.
- [23] Tie Xuexi, Li Guohui, Ying Z M, et al. Biogenic emissions of isoprenoids and NO in China and comparison to anthropogenic emissions[J]. Science of The Total Environment, 2006, 371, 238-251.
- [24] 吕铃钥,李洪远,杨佳楠. 中国植物挥发性有机化合物排放估算研究进展[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(11): 83-89.
- [25] 常杰,任远,史琰,等. 亚热带城乡复合系统 BVOC 排放清单: 以台州地区为例[J]. 生态学报, 2012, 32(2): 641-649.
- [26] 朱轶梅. 亚热带城乡区域植物源 VOC 排放的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [27] 郑华. 北京市绿色嗅觉环境质量评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2002.
- [28] 孙宝国,何坚. 香精概论[M]. 北京: 化学工业出版社, 1996.
- [29] 高岩. 北京市绿化树木挥发性有机物释放动态及其对人体健康的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [30] 只木良也. 森林はなぜ必要か(環境と人間)[M]. 东京: 小峰書店, 1992.