

金华城区表层土壤剖面磁化率变化规律

赵庆磊, 李凤全, 王天阳, 叶 玮, 朱丽东, 周国成, 岳明珠

(浙江师范大学 地理与过程实验室, 浙江 金华 321004)

摘 要:以金华城区表层土壤剖面为研究对象,分析土壤剖面磁化率的分布特点。结果表明:19 个土壤剖面的磁化率分布在 $11.22 \times 10^{-8} \sim 94.29 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 之间;19 个剖面土壤磁化率在 0—10 cm 的垂向剖面上的变化有三种不同形式:一是先增大后减小且在 3 cm 左右出现极值,二是单调变化,又可细分为单增和单减,三是波动变化,也可细分为波动增加和波动减小;通过对比不同采样间隔下磁化率的变化情况,结合土壤磁化率垂向分布特征和统计结果,建议以 1—3 cm 作为采样深度可以更好地揭示人类活动对土壤磁化率的影响。

关键词:表层土壤剖面;磁化率;采样方式;金华市

中图分类号:P531

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)02-0340-05

Research for Variation Rule of Magnetic Susceptibility of Surface Soil in Jinhua City

ZHAO Qinglei, LI Fengquan, WANG Tianyang, YE Wei, ZHU Lidong, ZHOU Guocheng, YUE Mingzhu

(Laboratory of Geography Process, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

Abstract: Urban surface soils in Jinhua were selected as the research examples. The distribution characteristics of surface soil magnetic susceptibility were analyzed to explore the optimization problem of sampling way. Magnetic susceptibility of selected 19 soil samples ranged from 11.22×10^{-8} to $94.29 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ in urban area. Sampling interval is set to 1 cm, statistics showed that each depth level of 19 susceptibility profiles has different value. Soil magnetic susceptibility in the depth of 0 to 10 cm changes in three different forms, the first presents the first increase and then decreases, the peak occurs in the depth of about 3 cm, the second is monotonous, and can be subdivided into single increase and decrease, the third demonstrates the fluctuation change, can also be subdivided into fluctuation increase and decrease. Considering the profile magnetic susceptibility variation and studying the magnetic susceptibility of soil profile, we had better to select the investigated soils in the typical research areas, analyze the change character of magnetic susceptibility in the profile, and then determine the optimal sampling thickness or layer. It can be better reflect profile susceptibility peak by using 1—3 cm profile layer to represent the whole soil profile in terms of the general estimate.

Keywords: surface soil; magnetic susceptibility; sampling way; Jinhua

随着现代化进程的加快,人类活动包括工业活动和交通运输等,会产生许多依附有重金属元素的磁性颗粒,带来的各种污染已经影响到自身健康和城市的生态环境;而土壤是城市中分布广泛的物质,会承载着城市污染的信息,那么当这些颗粒沉降到土壤中时,会使土壤磁性和污染物含量同步增加^[1-4],城市环境中土壤磁化率和磁性参数一般可以揭示重金属污染的程度^[5-7]。传统的污染研究主要依赖精确完善的化学分析技术,具有耗时多、成本高、工作量大的缺点,而最近兴起的环境磁学方法克服了传统的分析方

法的不足,且众多研究表明其可以较好的表征区域污染特征^[8-13],因而对城市土壤磁学特征的研究逐渐引起了相关学者的关注。

相关的学者对运用各自的采样方式获得的土壤剖面进行研究,袁大刚等研究了南京市主城区 11 个道路土壤剖面,深 2 m,以约 20 cm 为间隔所采集的样品的磁化率^[14];沈明洁等以 0.5 cm 为间隔采集并研究北京地区土壤剖面,深 80 cm,发现污染物导致土壤剖面 0—3 cm 范围内的磁性和重金属含量增强,3—10 cm 重金属含量与磁性矿物含量均具有逐渐下降的趋势,3

收稿日期:2014-01-22

修回日期:2014-06-06

资助项目:国家自然科学基金项目(41071002)、(41371206)

第一作者:赵庆磊(1989—),男,山东新泰人,硕士研究生,主要从事地理信息技术和城市生态环境研究。E-mail:zqlsdx05@163.com

通信作者:李凤全(1971—),男,黑龙江五常人,中科院博士后,副教授,主要从事地理信息技术及其在环境地理中的应用研究。E-mail:lygl45@zjnu.cn

cm 左右出现峰值^[15-17];王学松,秦勇研究了以 5 cm 为间隔取自徐州钢铁厂附近的深 50 cm 土壤样芯^[18];张果,胡雪峰等以 5 cm 为间隔并采取混合采样的方式采集了上海市宝山区不同功能区深 120 cm 土壤剖面,发现其磁化率在 5 cm 左右出现峰值^[19];李珊,胡雪峰等在上海嘉定区采集表层 0—5 cm 混合样,并将附近 5 个样点样品混合,分析磁学特征^[20];旺罗等研究了首都钢厂、北京三环和二环沿线以及拉萨贡嘎机场公路两旁顶部 1 cm 土壤磁化率特征,并与未污染第四纪黄土、玄武岩母质土壤、合成污染样品和污染物进行对比^[21],此类研究较多,在此不一一列举。

目前土壤剖面磁性参数的研究大部分集中在磁学参数以及其与某元素的依附变化关系^[18-27],往往剖面深度较大,采样间隔也较大。表层土壤是目前城市土壤污染重点关注的对象,采样时,一般采取表层土壤的混合样品,而对表层土壤剖面磁化率垂向变化特点研究还比较薄弱。因此,本文以 1 cm 为间隔分层次采集金华市城区 19 个表层土壤剖面(10 cm)并分层测定磁化率,并重点分析每个剖面磁化率变化特征。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

金华市位于浙江省中部,经纬度范围:119°14′—120°46′30″E,28°32′—29°41′N,城区常住人口大约 50 万。金华市处于金衢盆地东段,是浙中丘陵盆地地区,土壤以红壤和黄壤为主,金华市三产业结构为 5.2 : 51.8 : 43.0;在农业上,经济作物占主导;在工业上,重工业产值多于轻工业,但轻工业增速要较快^[26];城区中部有东西流向的金华江穿过,金华城市沿金华江两岸分布。金华气候属于亚热带季风气候,年主导风向为东北偏东风,盆地小气候多样,有一定的垂直差异,年平均气温 17.3~18.2℃,全年总降水量为 1 109.0~1 305.2 mm。

表 1 19 个土壤剖面各深度层磁化率

	10 ⁻⁷ m ³ /kg					
深度	0—1 cm	1—2 cm	2—3 cm	3—4 cm	4—7 cm	7—10 cm
均值	4.912	4.991	4.880	4.686	4.225	4.172

而不同功能区土壤剖面(分别统计每个剖面各深度层次均值作为本剖面的磁化率)的磁化率均值以及各深度层次的磁化率均值见表 2。

由表 2 可见,不同功能区表层土壤剖面磁化率均值的最高值和最低值分别出现在文教区和交通区,但差异不明显。

经过对不同功能区各层磁化率进行统计,可以发现,各功能区表层土壤剖面磁化率最高值出现层次大体相似,以 2 cm 左右为主。其中,居民区在 3—4 cm

1.2 采样方案和分析方法

本次采样时间在 2013 年 8 月。为了便于分析,采样地点基本上限制在金华市城区二环以内;将采样区域划分为居住区、工业区、绿地、文教、商服和交通用地等 6 个功能区,每种类型的功能区按地理位置选择 3~4 个土壤剖面,共选择 19 个剖面,均匀的分布在金华城区;采样方案设计为,每个土壤剖面以 1 cm 为间距等间隔分层次采样,每个剖面每个深度层次单独作为一份保存。

采集的土壤样品在实验室首先自然风干,挑出石子、树根等,之后烘干、研磨,混合均匀,取部分样品过筛,称重后,用塑料保鲜膜包紧,装入磁学专用样品盒内并压实,用来做磁化率的测定。

本试验土壤磁化率的测定在浙江师范大学地理过程实验室进行,使用 Bartington 仪器公司生产的 MS2 型磁化率测量仪测定灰尘的高频(4 700 Hz)磁化率 χ_{hf} 和低频(470 Hz)磁化率 χ_{lf} ;并计算求出频率磁化率($\chi_{fd}=[(\chi_{lf}-\chi_{hf})/\chi_{lf}]\times 100$)的值。

2 结果与分析

2.1 土壤磁化率的总体分布特征

磁化率(χ),在弱磁场中样品的感应磁化强度与磁场强度之比,它反映了在外磁场作用下物质磁化的能力^[27]。金华市城区 19 个土壤剖面(分别统计每个剖面各深度层次均值作为本剖面的磁化率)的磁化率在 $1.122\times 10^{-7}\sim 9.429\times 10^{-7}$ m³/kg 之间,均值为 4.679×10^{-7} m³/kg,最高值出现在乾西工业区剖面,最低值出现在保集半岛附近剖面;统计 19 个剖面各深度层次的磁化率均值得表 1,由表 1 可知,0—1 cm 均值 4.912×10^{-7} m³/kg;1—2 cm 均值 4.991×10^{-7} m³/kg;2—3 cm 均值 4.88×10^{-7} m³/kg;等。金华城区土壤剖面各层次的磁化率存在差异,并且在 1—2 cm 层次出现最高值 4.991×10^{-7} m³/kg。

层,工业区在 1—2 cm 层,绿地区、交通区在 2—3 cm 层,商服区在 0—1 cm 层,文教区在 7—10 cm 层。

频率磁化率($\chi_{fd}\%$)可以表征样品中超顺磁性颗粒的含量,有研究认为, $\chi_{fd}\%=5\%$ 可作为土壤中超顺磁性颗粒存在与否的临界值^[2],徐州城市土壤的频率磁化率在 0.97%~6.78%的范围,平均值为 3.59%,成土过程较弱,人为影响为主要原因^[1];南京市主城区的频率磁化率为 1.6%~12.2%,平均值 6.28%,说明成土过程形成的超顺磁性颗粒较少,土

壤发育比较弱^[7];上海嘉定区的 80% 的土壤样品频率磁化率小于 3%,表示基本不含成土过程中的超顺磁性颗粒^[13];朱艳明等分析北京城郊各区县土壤的 χ_{fd} % 变动范围为 0.83%~9.14%,平均值为 4.36%,这些表层土壤中的超顺磁性颗粒含量较

少,成土作用不是导致 χ_{lf} 升高的主要原因^[18]。金华城区土壤的 χ_{fd} % 绝大部分接近或小于 5%,其频率磁化率即超顺磁性颗粒含量均较低,这表明其所含的磁性颗粒并非成土过程导致,大部分源于人为污染。

表 2 不同功能区土壤剖面各深度层磁化率 10⁻⁷ m³/kg

区域	0—1 cm	1—2 cm	2—3 cm	3—4 cm	4—7 cm	7—10 cm	剖面均值
居民区(4)	50.35	48.55	46.57	56.75	45.97	29.27	46.41
工业(3)	65.47	66.41	50.71	42.27	42.58	54.47	46.10
绿地(3)	39.82	51.68	63.13	56.70	54.56	22.03	47.34
文教(3)	54.20	53.33	54.44	47.26	45.72	70.87	47.61
商服(3)	50.80	50.39	43.96	44.74	32.94	36.29	42.77
交通(3)	44.26	38.04	47.38	40.10	40.16	42.55	42.06

金华市表层土壤剖面磁化率总体分布特征可能受众多的因素影响,如土壤的质地、利用类型、堆积时间、分布位置等。

2.2 表层土壤磁化率垂向变化特征

利用 Excel 软件绘制出 19 个剖面磁化率垂向变化折线图,经对比,表层土壤剖面磁化率的变化可以概括为三种基本形态:一是先增大后减小且在 3 cm 左右出现极值,二是单调变化,又可细分为单增和单减,三是波动变化,也可细分为波动增加和波动减小;由于篇幅所限,各个变化类型(结合功能区)选取 1 到 2 个剖面作为代表,见图 1。

如图 1 所示,环北公园和金华广电大学是先增大后减小,在 3 cm 左右出现极值,其中环北公园剖面磁化率是由上层的 $2.807 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$,在 3 cm 处增大到 $6.157 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$,之后减小到 $2.203 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$,金华广电大学是由上层的 $5.519 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$,在 3 cm 处增大到 $8.243 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$,之后减少到 $5.514 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$,光华印务、金磐开发区、上海财大浙江学院、婺州公园、保集半岛附近、人民广场、人民路与八一街路口附近、丽泽花园等处样品亦属这种情况,占总剖面数的 52.63%;乾西工业区是单减变化,剖面由上层的 $1.3405 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$,在约 2—3 cm 处有一个转折点,之后垂直往下一直减少到 $6.384 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$,李义绿地、回溪公园等样品亦符合单减形态,占总剖面数的 15.8%;广厦公园剖面属单增变化,由上层的 $3.192 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$,在约 2—3 cm 处有一个转折点,之后垂直往下一直增加到 $9.721 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$,占总剖面数的 5.26%;江滨小区和金华汽车西站剖面是波动变化,其中江滨小区剖面由表层的 $5.334 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$,在 2—3 cm 处有一个转折点,之后垂直往下波动增加到 $6.122 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$,占总剖面数的 5.26%,金华汽车西站剖面由上层的 $5.409 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ 垂直往下减小到 4.387×10^{-7}

m³/kg,浙师大、永盛新阳光、柳湖花园等处剖面属于此类,占总剖面数的 21.05%。

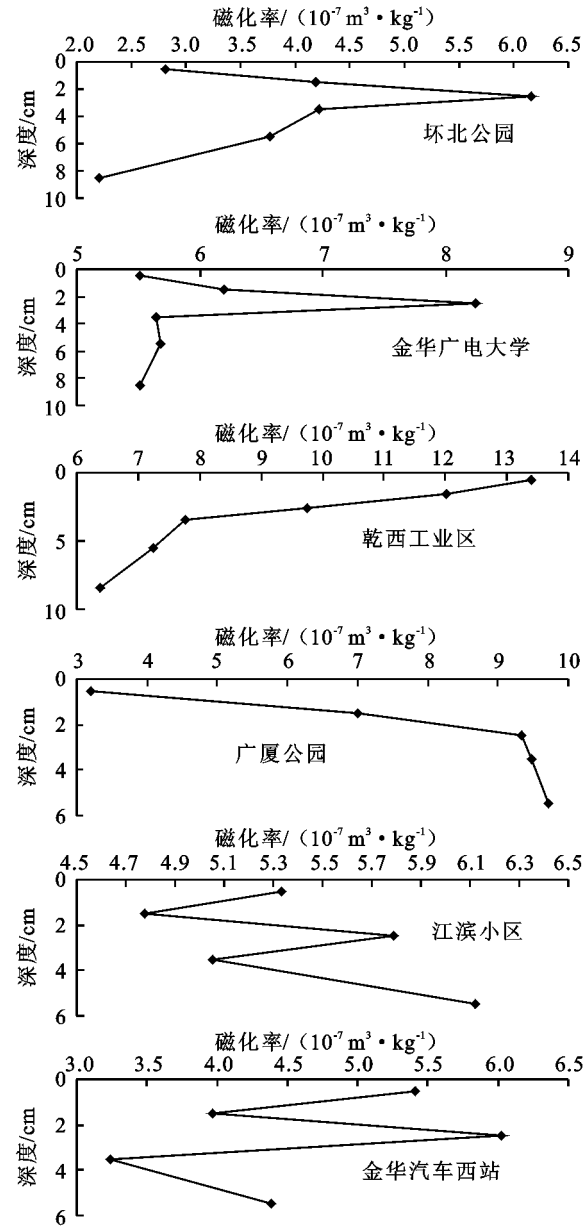


图 1 土壤剖面磁化率变化

3 讨论

城市表层土壤中的磁性颗粒除来自母质成壤作用外,交通运输、化石燃料燃烧等人类活动往往会导致一部分磁性物质进入表层土壤,后者磁性颗粒具有高磁化率、低频率磁化率的特点,且其矿物粒径会较粗,正因如此,往往表层土壤磁化率会存在空间差异。通过上文对不同功能区表层土壤剖面磁化率均值分析(见表2)可知,不同功能区表层土壤剖面磁化率差异不明显。因此,在金华市如仅采用不分层的表层土壤混合样品磁化率代表表层土壤磁学性质,难以揭示磁化率的空间差异状况。另外,从总体上分析,不同功能区表层土壤磁化率的垂向分布特征略有差异,工业区、绿地区、交通区、商服区磁化率最高值位置较浅,而居民区和文教区的磁化率最高值出现位置相对较深。这可能是由于居民区和文教区土壤受人类活动扰动较深刻,土壤结构相对疏松,磁性矿物更容易产生迁移,甚至在个别地区表层土壤被翻耕至深层的原因。

结合图1的图形变化规律分析,三种不同的剖面磁化率垂向变化在各个功能区都有分布,仅是数值上有所不同,如绿地区的环北公园和文教区的金华广电大学,均属于先增大后减小且在3 cm左右出现极值,变化形式相似。有研究显示,土壤剖面磁化率在某一深度会有个极大值,此深度以上属于铁磁性矿物富集区,若研究区土壤结构在剖面上较疏松,会导致磁性颗粒在剖面上有一定的迁移^[16],因此,磁化率最高值不一定会出现在土壤的最表层。金华市区52.63%的剖面土壤磁化率在3 cm处出现极大值而不是在0—1 cm层,原因可能是磁性颗粒在复杂的环境下发生一系列的迁移渗透的原因。15.8%由表层到深层单减的样点,磁性颗粒是在表层富集较多,可能由于样点土壤结构较致密,渗透作用不明显。而由表层到深层递增或者波动变化的样点原因比较复杂,有可能是人类对其表层进行了翻耕,造成土壤层次扰动的缘故,具体机制还有待进一步探讨。

土壤采样设计对于研究工作具有重要的作用。采样设计包括采样方式和采样数目,其是决定采样成本和估测精度的关键因素。目前表层土壤研究中,鉴于不同的目的,有的学者以5—10 cm作为取样深度间隔^[14,18-20],有的学者以2 cm作为取样深度间隔^[30],有的学者以0.5—1 cm作为取样间隔^[15,17,21]。为表明采样间隔对结果的影响,受篇幅限制,本文仅以5 cm作为例,与1 cm进行对比,加以说明。而从上文分析可知,以1 cm为采样间隔时,金华市城区表

层土壤剖面磁化率有三种基本变化类型。假如分别将上文中列举的环北公园、乾西工业园区、江滨小区三个剖面0—5 cm层次样品磁化率求平均(相当于以5 cm为垂向采样间隔),那么其磁化率由 $4.344 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ 直接减小到 $2.986 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$,在3 cm处的极值就会被掩盖;对于乾西工业区这种单调增加类型,其磁化率由 $1.0735 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ 直接变化到 $6.817 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$,削弱了其原本变化特征;同样,对于江滨小区这种波动变化类型,其磁化率由 $5.238 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ 增大到 $6.122 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$,则忽略掉了其波动变化的形态。最终可能会导致原本隶属于三种类型的磁化率变化曲线趋于一致,掩盖了表层土壤剖面磁化率某些峰值与变化规律。这表明,采样间隔的不同会影响土壤磁化率垂向变化规律的结果,即研究结果受采样间隔的影响。

金华市城区19个土壤剖面(10 cm混合样品)的磁化率在 $1.122 \times 10^{-7} \sim 9.429 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ 之间,平均值为 $4.679 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$,而统计各剖面峰值处的磁化率(1 cm间隔样)则分布在 $1.263 \times 10^{-7} \sim 1.3405 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ 之间,均值为 $6.269 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$,两者差异较大。因此,在研究金华城区表层土壤磁性特征时,将10 cm表层土壤混合采样,得到的土壤磁化率比剖面峰值处的磁化率要低,忽略掉了峰值,掩盖了土壤磁化率增高的现象,降低了人类活动对土壤磁化率的影响程度。鉴于以上分析,在研究金华城区表层土壤磁化率时,结合表1与磁化率垂向变化曲线,本区域大部分土壤剖面磁化率以1—3 cm为最高,建议在研究人类活动对表层土壤磁化率的影响时,可以采集本层次土壤作为代表样品。

4 结论

本文以金华市城区土壤剖面磁化率为研究对象,分析了土壤剖面磁化率的分布特点,得出以下结论:

1) 金华市城区19个土壤剖面(10 cm)磁化率在 $1.122 \times 10^{-7} \sim 9.429 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ 之间,平均值为 $4.679 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。

2) 城区表层土壤剖面由上到下的磁化率变化特征有三种形式:先增大后减小,在3 cm左右出现极值;单调变化,可细分为单增与单减;波动变化,可进一步划分为波动增加和波动减小。剖面磁化率最高值主要出现在1—3 cm处,磁性颗粒有向下迁移的现象。

3) 金华市表层土壤磁化率垂向特征受采样间隔影响较大。以1—3 cm层次为剖面代表样,在粗略估计人类活动对金华市城区土壤磁化率时较适宜。

参考文献:

- [1] Heller F, S trzyszc Z, Magiera T. Magnetic record of industrial pollution in forest soils of Upper Silesia, Poland[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103 (B8):767-774.
- [2] Lecoanet H, Leveque F, Ambrosi J-P. Magnetic properties of salt-marsh soils contaminated by iron industry emissions(southeast France)[J]. Journal Applied Geophysics, 2001, 48(2):67-81.
- [3] Magiera T, Strzyszc Z, Ferdyn M, et al. Screening of anthropo-genic dust pollutions in top soil by using magnetic proxies[J]. Environmental Engineering Studies, 2003:399-407.
- [4] 朱艳明,郭小蕾,周力平.北京地区表土磁性特征及其环境意义[J].科学通报,2010,55(17):1717-1735.
- [5] 余涛,杨忠芳,岑静,等.磁化率对土壤重金属污染的指示性研究;以沈阳新城子区为例[J].现代地质,2008,22(6):1034-1040.
- [6] 陈艳瑛,李凤全,王志刚,等.金华市各功能区表层土壤磁化率与重金属的相关性分析[J].广东微量元素科学, 2011,8(4):43-49.
- [7] Hanesch M, Scholger R. Mapping of heavy metals loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements [J]. Environmental Geology, 2002, 42(8):857-870.
- [8] 王学松,秦勇.徐州城市表层土壤的磁学特征[J].科技导报,2005,23(11):14-19.
- [9] 卢升高,俞劲炎,章明奎,等.长江中下游第四纪沉积物发育土壤磁性增强的环境磁学机制[J].沉积学报, 2000,18(3):336-340.
- [10] Hu Xue feng, Su Yu, Ye Rong et al. Magnetic properties of the urban soils in Shanghai and their environmental implications [J]. Catena, 2007, 70(3):428-436.
- [11] 夏敦胜,魏海涛,马剑英等.中亚地区现代表土磁学特征及其古环境意义[J].第四纪研究,2006,26(6):937-946.
- [12] 张卫国,戴雪荣,张福瑞,等.近7000年巢湖沉积物环境磁学特征及其指示的亚洲季风变化[J].第四纪研究,2007,27(6):1053-1062.
- [13] 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.
- [14] 袁大纲,张甘霖.城市道路区土壤的磁学性质及其发生学意义[J].土壤学报,2008,45(2):216-221.
- [15] 沈明洁,胡守云.土壤剖面的磁学特征及其对交通污染的指示意义:以北京首都高速机杨为例[J].第四纪研究,2001,27(6):1113-1120.
- [16] 沈明洁,胡守云,闫海涛.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.
- [17] 沈明洁,胡守云,闫海涛.北京东郊722土壤垂向剖面重金属污染的磁学响应及其统计意义[J].地球科学—中国地质大学学报,2006,31(3):399-404.
- [18] 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.
- [19] 张果,胡雪峰,吴小红,等.上海城市土壤磁化率的垂向分布特征及环境指示意义[J].土壤学报,2011,48(2):429-434.
- [20] 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.
- [21] 旺罗,刘东升,吕厚远.污染土壤的磁化率特征[J].科学通报,2000,45(10):1091-1094.
- [22] 李晓庆,胡雪峰,孙为民,等.城市土壤污染的磁学监测研究[J].土壤,2006,38(1):66-74.
- [23] 卢瑛,龚子同,张甘霖.城市土壤磁化率特征及其环境意义[J].华南农业大学学报,2001,22(4):26-28.
- [24] 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.
- [25] Blaha U, Appel E, Stanjek H. Determination of anthropogenic boundary depth in industrially polluted soil and semiquantification of heavy metal loads using magnetic susceptibility[J]. Environmental Pollution, 2008, 156:278-289.
- [26] 金华市统计局.2010金华统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2011.
- [27] 滕飞,叶玮,朱丽东.风尘沉积的磁学参数与环境意义[J].干旱区资源与环境,2012,26(5):52-58.