

城市道路区土壤的磁学性质及其发生学意义*

袁大刚^{1,2} 张甘霖^{1†}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 四川农业大学资源环境学院, 四川雅安 625014)

摘要 土壤磁学性质测定简便快捷, 且具有特定的土壤发生学意义。本研究以南京市主城区 11 个道路土壤剖面共 63 个样品为研究对象, 通过对低频磁化率和频率磁化率 2 个常用磁学性质以及土壤游离铁、活性铁、颗粒组成、有机碳、pH、碳酸钙相当物等土壤发生学特性的测定和相关性统计分析, 结果表明: 城市道路土壤磁性矿物来源和成土过程具有多样性; 磁性矿物主要来源于燃煤飞灰、汽车尾气中的粗粒磁性矿物, 其中可能伴生污染物质的输入; 较高的 pH 和碳酸盐不利于细粒磁性矿物的形成。城市土壤磁学性质与其他发生学特性的系统研究, 有利于阐明城市土壤的形成过程。

关键词 磁化率; 土壤发生学; 城市土壤; 道路土壤

中图分类号 S159 文献标识码 A

磁性是自然界存在的一种普遍现象, 土壤磁性基本上决定于它的矿物成分, 主要是各种氧化铁的贡献。磁学性质的剖面分布特征, 具有特定的土壤发生学意义, 加之磁学性质测定快速简便, 因而受到人们的普遍重视, 环境地质学和土壤学学者对中国各类自然土壤和农业土壤进行了广泛研究^[1], 而城市土壤的磁学研究报道较少, 主要是环境磁学方面的内容。旺罗^[2]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。卢瑛等^[3]研究了南京城市土壤的磁学特征, 并与重金属全量和有效态含量作了相关分析; 杨凤根等^[4]对南京市历史文化层土壤也做了类似研究。为判定土壤污染状况, 江化寨^[5]对福建三明城区表土做了磁化率测定, 并制做了磁化率等值线图。李晓庆等^[6]对上海宝山区工业土壤也进行了磁化率测定, 并与重金属元素进行相关与回归分析。Lu 和 Bai^[7]研究了杭州市不同功能区 0~5 cm 层土壤磁学性质及 Cu、Zn、Cd 和 Pb 重金属含量的关系, 同时研究了不同功能区土壤磁化率在 0~20 cm 以内的垂直分布情况。王学松和秦勇^[8,9]研究了徐州城市表层土壤磁学性质, 对徐州钢厂附

近土壤中重金属和硫的垂向分布及磁学响应做了研究。此外, 沈明洁等^[10]对北京石景山工业区一个污染土壤剖面进行了磁学性质的测定, 并与土壤重金属的剖面分布进行了比较。城市土壤磁学性质研究与其他土壤发生学特征的关系研究报道更少, 目前仅见王学松和秦勇^[11]对徐州城市表层土壤的磁化率特征与氧化铁形态、有机质和颗粒组成的关系的研究报道。鉴于此, 本文拟通过对南京市主城区受人类活动影响最大的道路土壤剖面进行磁化率特征研究, 探讨土壤磁化率与游离铁、活性铁、颗粒组成、有机质、pH 和碳酸钙相当物的关系, 以此探讨城市土壤磁化率研究的发生学意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区南京市位于北纬 32°03', 东经 118°47', 属北亚热带季风气候, 成土母质主要有人工制品、下蜀黄土、河流冲积物等, 土壤类型主要是人为土、淋溶土、雏形土和新成土等; 南京是中国古都、历史文化名城、长江三角洲现代重要经济城市, 主要工业有钢铁、汽车、石化、电力和电子等; 约 2 500 a 的

* 国家自然科学基金重点项目(40235054)和中国科学院知识创新工程方向性项目(KZCX3-SW-427)资助

† 通讯作者, E-mail: gzhang@issas.ac.cn; Tel: 025-86881279

作者简介: 袁大刚(1975-), 男, 重庆云阳人, 博士, 主要从事土壤资源可持续利用研究。E-mail: shiquanliu@sicau.edu.cn 或 gangday@sc.hu.com

收稿日期: 2007-01-07; 收到修改稿日期: 2007-05-07

建城历史为研究城市土壤发育演变提供了良好的场所。

1.2 样品采集与指标测定

在南京市主城区采集工业区、商业区、居民区和风景名胜区道路路基土壤剖面 11 个, 共 63 个土层, 即 63 个样品。

1.2.1 低频磁化率和频率磁化率测定 将过 10 目筛的土壤样品装入 20 ml 的塑料盒, 称重, 盖好塑料盖, 25℃ 室温下在低频 (0.47 kHz) 和 4.7 kHz 磁场中 Bartington MS2 型双频磁化率仪测定。将所得值换算成质量磁化率 ($\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$), 并计算样品的频率磁化率 $X_{fd} = 100 \times (X_{lf} - X_{hf}) / X_{lf}$, 式中 X_{lf} 、 X_{hf} 分别表示低频磁化率和高频磁化率。

1.2.2 氧化铁形态测定 全铁 ($\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{g kg}^{-1}$) 氢氟酸-高氯酸酸溶, 邻啡罗啉比色法^[12]; 游离铁 ($\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{g kg}^{-1}$) 连二亚硫酸钠-柠檬酸-重碳酸钠浸提, 邻啡罗啉比色法^[12]; 活性铁 ($\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{g kg}^{-1}$) 酸性草酸铵浸提, 邻啡罗啉比色法^[12]。

1.2.3 颗粒组成(体积百分比)测定 称过 10 目筛的土样 0.1 g 于 50 ml 的烧杯中, 1:1 盐酸去碳酸盐, 双氧水去有机质, 用分散剂超声分散, 最后用

Coulter LS230 激光粒度仪。

1.2.4 总有机碳 ($\text{C}, \text{g kg}^{-1}$) 测定 重铬酸钾-硫酸消化法^[12]。

1.2.5 土壤 pH (土水比 1:2.5) 测定 电位法^[12]。

1.2.6 土壤碳酸钙相当物 (g kg^{-1}) 测定 气量法^[12]。

2 结果与分析

2.1 低频磁化率与频率磁化率概况

低频磁化率反映强磁性矿物的总量, 而频率磁化率可指示超顺磁颗粒的含量^[1]。南京市城区道路土壤低频磁化率与频率磁化率的频率分布如图 1。低频磁化率最低值 $23 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, 最高值 $627 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, 平均值 $137.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, 变异系数 70.93, 较大的变异可能与城市环境中磁性矿物来源和成土过程的多样性有关。频率磁化率最低值 1.6%, 最高值 12.2%, 平均值 6.28%, 变异系数 42.33, 总体较低, 表明成土过程产生的细粒磁性矿物较少, 土壤发育较弱。

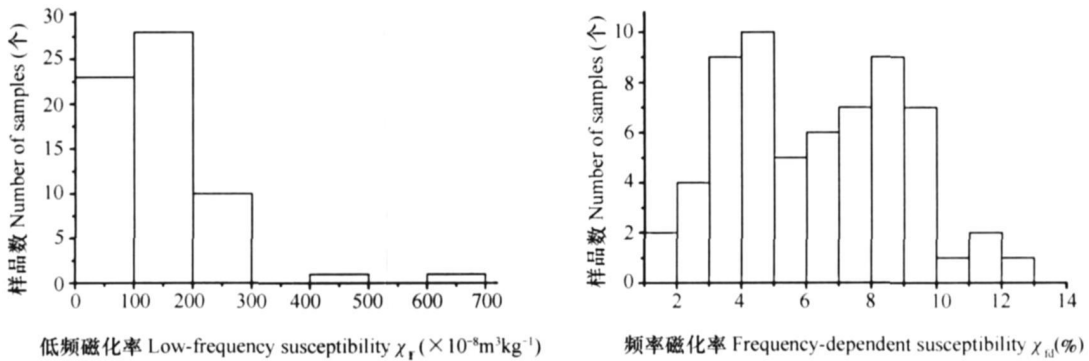


图 1 城市道路土壤低频磁化率与频率磁化率的频率分布

Fig 1 Histogram of low frequency susceptibility and frequency dependent susceptibility

低频磁化率与频率磁化率呈极显著负相关 ($r = -0.483, p = 0.000$), 与西北黄土^[2]、南方网纹红土^[13] 低频磁化率与频率磁化率呈极显著正相关不同, 而与污染土壤低频磁化率与频率磁化率呈极显著负相关的特征一致^[2], 这反映了磁性起源在城市道路土壤与自然土壤之间的差异, 也即两者间磁性矿物来源的不同。已有研究证实, 城市表层土壤磁学特征主要由人为产生的多畴磁铁矿矿物主导^[8], 工业区表层土壤中也是富集于细粉砂和中粉砂的多畴磁铁矿占主导地位^[10], 而有一定发育的自然土壤的

磁化率主要受成土过程中形成的超顺磁磁性矿物主导。

2.2 低频磁化率与频率磁化率的剖面分布

低频磁化率与土层深度没有显著相关性 ($r = -0.169, p = 0.184$), 表明城市土壤上下层之间物质组成具有来源多样性和分布不均匀性, 如作为母质的下蜀黄土, 其低频磁化率一般在 $200 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 以下^[14, 15], 而含有粉煤灰的土体中表现较高的低频磁化率, 可达 $627 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ (图 2)。频率磁化率与土层深度呈极显著正相关 ($r = 0.402, p =$

0.001), 即从总体上讲, 频率磁化率随土层深度增加而增大。图 2 中的折线是一个典型城市道路土壤的磁化率剖面。按照北方黄土与红黏土频率磁化率增大意味着成土过程增强的观点^[16], 其土体下部由于人为扰动作用相对较弱, 原有成土过程产生的磁性

细粒矿物仍被保存下来而保持较高的频率磁化率, 并有可能继续形成新的细粒磁性矿物; 而表层较低的频率磁化率暗示有较多外源粗粒磁性矿物颗粒的输入, 这种磁性颗粒可能来自于燃煤飞灰、汽车尾气排放^[17-21]。

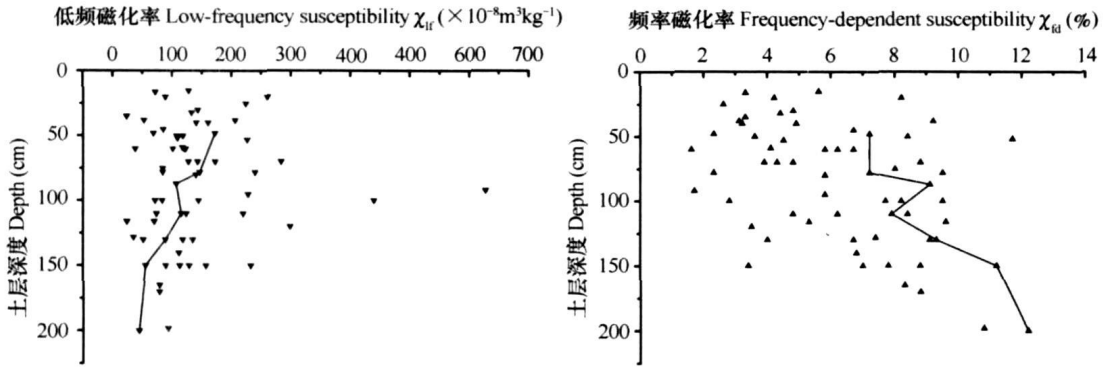


图 2 城市道路土壤低频磁化率和频率磁化率的剖面分布

Fig. 2 Vertical distribution of low frequency susceptibility and frequency dependent susceptibility

2.3 低频磁化率与土壤发生学性质的关系

土壤低频磁化率与全铁含量无显著相关性(表 1), 与卢瑛等^[3]对南京市城区 23 个剖面 79 个土壤样品研究结果一致。李晓庆等^[6]对上海宝山区工业表层土壤研究表明, 土壤低频磁化率与土壤全铁含量极显著正相关; 王学松和秦勇^[11]在对徐州城市表层土壤的研究中, 低频磁化率与全铁含量呈显著正相关; 王爱华等^[22]对宁沪高速公路句容段两侧表层土壤的研究, 也发现低频磁化率与全铁呈显著正相关。出现上述两种不同的情况, 可能与土壤基质组成和磁性矿物类型有关。众所周知, 在基础设施建

设中, 地基土往往是多种基质的混合体, 而表层土壤由于绿化的需要主要由相对单一的基质构成。上述低频磁化率与土壤全铁含量呈显著或极显著相关的现象均发生在表层土壤上, 因为磁性矿物的增加与全铁含量的升高在相对均匀的表层土壤中是一致的。本研究所采土样均为路基土, 基质组成较为复杂, 低频磁化率的高低主要受磁性矿物类型的影响, 城市道路路基中炉渣、燃煤飞灰、汽车尾气输入的强磁性矿物 Fe_3O_4 , 增加极少的量也将导致低频磁化率大幅度增加, 而全铁可能增加很少, 从而产生低频磁化率与全铁含量无显著相关性的现象。

表 1 低频磁化率、频率磁化率与土壤理化性质之间的相关分析(Pearson 相关)
Table 1 Correlation between magnetic susceptibility and other physical and chemical properties (Pearson)

	全铁 Fet	游离铁 Fed	活性铁 Feo	黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	有机碳 OC	pH	碳酸钙相当物 CaCO ₃
低频磁化率 Low-frequency susceptibility χ_{lf}	0.165	0.096	0.593**	-0.443**	-0.552**	0.570**	0.791**	0.142	0.064
频率磁化率 Frequency-dependent susceptibility χ_{fd}	-0.057	-0.124	-0.197	0.493**	0.533**	-0.562**	-0.554**	-0.371**	-0.456**

** 表示在 $p \leq 0.01$ 水平上显著 The symbol ** represents significance level of $p \leq 0.01$

低频磁化率与游离铁的相关关系也没有达到显著水平(表 1), 与西北黄土-古土壤序列、热带亚热带岩成土和亚热带富铁土中低频磁化率与游离铁呈极显著正相关的结果不一致^[23-25], 与南方网纹红

土低频磁化率与游离铁含量呈显著负相关的结果也不一致^[3]。王学松和秦勇^[11]在对徐州城市表层土壤的研究中, 低频磁化率与游离铁含量呈显著正相关, 但没有对这一现象作具体解释。本研究认为其

主要原因在于所研究的自然土壤和城市表层土壤具相对均匀性, 而城市路基土壤物质来源的多样性, 打破了均匀母质土壤低频磁化率主要受游离铁含量表征的磁性矿物含量控制的这种规律性。

然而, 低频磁化率与活性铁呈极显著正相关(表 1), 与王学松和秦勇^[11]对徐州城市表层土壤的研究结果一致, 与胡雪峰^[23]对西北黄土-古土壤序列的研究结果也是一致的。因为活性铁主要受土壤水分状况和有机质含量的制约, 而这两个因子在土壤中最活跃, 所以无论是表层土壤还是全剖面土壤, 低频磁化率与活性铁的关系均有一致性。

低频磁化率与游离铁无显著相关性, 而与活性铁呈极显著正相关, 可能还有如下原因: 城市土壤往往接受较多来自燃煤飞灰和汽车尾气的粗粒亚铁磁性矿物颗粒^[17~21], 而酸性草酸铵较连二亚硫酸钠-柠檬酸-重碳酸钠能提取更多的亚铁磁性矿物^[26]。

低频磁化率与黏粒和粉粒均呈极显著负相关, 而与砂粒呈极显著正相关(表 1)。卢升高^[24]在对浙江西部第三纪——白垩纪红砂岩发育的红砂土和白垩纪紫色砂页岩发育的紫色土的研究中, 低频磁化率与黏粒呈显著正相关, 这表明, 与自然土壤不同, 城市土壤磁性矿物主要集中于粗颗粒物。由于成壤过程中的磁性矿物主要集中于黏粒物质, 说明城市土壤磁性矿物是外源输入的, 包括燃煤飞灰、汽车尾气排放的磁铁矿、磁黄铁矿等^[17~21]。这与前面低频磁化率与活性铁呈极显著正相关的结果一致。

低频磁化率与有机碳含量呈极显著正相关(表 1), 与胡雪峰^[23]对西北黄土-古土壤序列的研究结果一致, 而与王学松和秦勇^[11]对徐州城市表层土壤的研究结果“低频磁化率与有机质含量呈显著负相关”不同。在本研究中, 低频磁化率与有机碳呈极显著正相关, 原因如下: 一是有机质的存在有利于磁赤铁矿等亚铁磁性矿物的形成, 包括生物成磁和化学成磁^[23, 27, 28]; 二是道路土壤均呈中性至强碱性反应(pH 6.8~10.3), 有机质分解对磁性矿物的破坏不产生显著影响^[29]; 三是磁性矿物与有机碳伴生, 如燃煤飞灰和汽车尾气中磁铁矿与黑炭共同存在^[21]。王学松和秦勇并未提供土壤 pH 数据, 对其研究结果的解释是, 有机质(特别是富里酸)能有效溶解土壤中多畴或单畴磁性矿物, 而对超顺磁粒径的磁性矿物不能有效溶解。在酸性(pH 4~6)条件下, 伴随有机质分解, 形成的还原条件确实有利于磁性矿物的破坏, 低频磁化率将大幅度降低^[29]。所以, 低频磁化率与有机碳含量之间出现上述两种截然相反情

况并不矛盾。

2.4 频率磁化率与土壤发生学性质的关系

频率磁化率可指示粒径介于单畴(SD, 粒径 30~70 nm)和超顺磁(SP, 粒径<30 nm)边界上的磁性颗粒(15~30 nm)的含量。本研究中, 频率磁化率与全铁、游离铁和活性铁均无显著相关性, 与黏粒和粉粒均呈极显著正相关, 这与王学松和秦勇^[11]对徐州城市表层土壤的研究结果一致, 表明城市土壤细粒磁性矿物主要存在于黏粒和粉粒中; 胡雪峰^[23]在对西北黄土-古土壤序列的研究中, 频率磁化率与游离铁含量呈极显著正相关; 卢升高^[24, 25]在对浙江西部第三纪——白垩纪红砂岩发育的红砂土和白垩纪紫色砂页岩发育的紫色土及云南、广西、湖南、江西和浙江等亚热带富铁土的研究中, 频率磁化率与游离铁含量和黏粒含量均呈显著正相关。上述不一致现象表明城市土壤中由成土过程产生的细粒磁性矿物的贡献不大。

频率磁化率与有机碳呈极显著负相关, 进一步证明土壤磁性矿物与燃煤飞灰、汽车尾气排放的粗粒磁性矿物有关。前人研究表明, 城市表层土壤频率磁化率与有机质无显著相关性^[11], 可能与其所采土壤样品的数量较少、类型复杂有关。

频率磁化率与 pH 和碳酸钙相当物含量呈极显著负相关, 原因是较高的钙、镁等盐基的存在不利于铁从原生矿物游离出来, 较高的 pH 不利于微生物的活动, 不利于生物成磁(细粒磁性矿物)^[28]。Dong 等^[29]的研究也发现, 在碱性(pH 10)条件下, 有机质分解对磁学性质不产生显著影响, 即碱性环境不利于磁性矿物的转化。城市道路土壤 pH 最低值 6.8, 最高值 10.3, 为中性到强碱性。碳酸钙相当物含量普遍较高, 最高达 321 g kg⁻¹, 具有极强的石灰性, 氧化铁类型的转换受到阻碍, 细粒磁性矿物难以形成。

3 结 论

本文通过对南京城市道路土壤低频磁化率和频率磁化率的基本情况、剖面分布及与土壤发生学特性的统计分析, 结果表明, 道路土壤低频磁化率和频率磁化率变异系数较大, 分别为 70.93 和 42.33, 指示磁性矿物来源和成土过程的多样性; 土壤频率磁化率与低频磁化率呈极显著负相关, 表现污染土壤的特征, 表明城市土壤伴随有污染物质的输入过程; 随土层深度增加, 城市土壤频率磁化率增大, 指示上部土层发育较弱, 下部土层受人类活动较小; 低频磁

化率与活性铁呈极显著正相关而与游离铁相关性不显著, 以及低频磁化率与砂粒呈极显著正相关而与粉、黏粒呈极显著负相关, 指示土壤发育较弱, 成土过程产生的细粒磁性矿物较少; 低频磁化率与有机碳呈极显著正相关, 而频率磁化率与有机碳呈极显著负相关, 指示城市道路土壤磁性矿物主要为来源于燃煤飞灰、汽车尾气等的粗粒磁性矿物; 频率磁化率与 pH 和碳酸钙相当物均呈极显著负相关, 表明较高的 pH 和碳酸盐不利于成土过程中铁氧化物的形成和转化, 细粒磁性矿物的形成受到阻碍。

参考文献

- [1] 卢升高. 中国土壤磁性与环境. 北京: 中国高等教育出版社, 2003. Lu S G. Magnetism of Soils in China and Its Environment Implication (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2003
- [2] 旺罗, 刘东升, 吕厚远. 污染土壤的磁化率特征. 科学通报, 2000, 45(10): 1 091~ 1 094. Wang L, Liu D S, Lu H Y. Magnetic susceptibility properties of polluted soils (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 2000, 45(10): 1091~ 1 094
- [3] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 城市土壤磁化率特征及其环境意义. 华南农业大学学报, 2001, 22(4): 26~ 28. Lu Y, Gong Z T, Zhang G L. The magnetic susceptibility characteristic of urban soil and its environmental significance (In Chinese). Journal of South China Agricultural University, 2001, 22(4): 26~ 28
- [4] 杨凤根, 张甘霖, 龚子同, 等. 南京市历史文化层中土壤重金属元素的分布规律初探. 第四纪研究, 2004, 24(2): 203~ 212. Yang F G, Zhang G L, Gong Z T, *et al.* Distribution of heavy metals in cultural layers of urban soils in Nanjing (In Chinese). Quaternary Sciences, 2004, 24(2): 203~ 212
- [5] 江化寨. 福建省三明城区现代土环境磁学研究. 地质找矿论丛, 2004, 19(B12): 43~ 47, 75. Jiang H Z. Research of modern topsoil environment magnetism of Sanming city area, Fujian Province (In Chinese). Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2004, 19(B12): 43~ 47, 75
- [6] 李晓庆, 胡雪峰, 孙为民, 等. 城市土壤污染的磁学监测研究. 土壤, 2006, 38(1): 66~ 74. Li X Q, Hu X F, Sun W M, *et al.* Magnetic techniques used for monitoring urban soil pollution (In Chinese). Soils, 2006, 38(1): 66~ 74
- [7] Lu S G, Bai S Q. Study on the correlation of magnetic properties and heavy metals content in urban soils of Hangzhou City, China. Journal of Applied Geophysics, 2006, 60(1): 1~ 12
- [8] 王学松, 秦勇. 徐州城市表层土壤的磁学特征. 科技导报, 2005, 23(11): 14~ 19. Wang X S, Qin Y. Magnetic characteristics of Xuzhou urban topsoils (In Chinese). Science & Technology Review, 2005, 23(11): 14~ 19
- [9] 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. 环境科学学报, 2005, 2(12): 1 669~ 1 675. Wang X S, Qin Y. Vertical distribution of heavy metals and sulfur in contaminated soils near Xuzhou Iron Steel Plant and its magnetic response (In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 2(12): 1 669~ 1 675
- [10] 沈明洁, 胡守云, Blaha U, 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): 1 665~ 1 673. Shen M J, Hu S Y, Blaha U, *et al.* A magnetic study of a polluted soil profile at the Shijingshan industrial area, Western Beijing, China (In Chinese). Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(6): 1 665~ 1 673
- [11] 王学松, 秦勇. 徐州城市表层土壤中铁的氧化物、有机质以及粒径组成与磁学参数的关系. 科技导报, 2006, 24(2): 30~ 33. Wang X S, Qin Y. Relationship between iron oxides, organic matter, grain sizes and magnetic parameters in Xuzhou urban topsoil (In Chinese). Science & Technology Review, 2006, 24(2): 30~ 33
- [12] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. ed. Analytical Methods of Soil Physical and Chemical Properties (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978
- [13] 胡雪峰, 程天凡, 巫和昕. 南方网纹红土内是否可能存在多个“沉积—成土”过程的旋回? 科学通报, 2003, 48(9): 969~ 975. Hu X F, Cheng T F, Wu H X. Do multiple cycles of aeolian deposit pedogenesis exist in the reticulate red clay sections in southern China? (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 2003, 48(9): 969~ 975
- [14] 张建新, 蔡明理, 张兆千, 等. 南京下蜀黄土古气候序列的初步研究. 江苏地质, 1994, 18(3/4): 189~ 194. Zhang J X, Cai M L, Zhang Z Q, *et al.* A preliminary research on the paleoclimatologic succession of Xiaoshu Loess in Nanjing (In Chinese). Jiangsu Geology, 1994, 18(3/4): 189~ 194
- [15] 李福春, 谢昌仁, 潘根兴. 南京老虎山黄土剖面的磁化率及 Rb 和 Rb/Sr 对古气候的指示意义. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(4): 47~ 52. Li F C, Xie C R, Pan G X. Paleoclimatic implication of distribution of Rb, Rb/Sr and magnetic susceptibility in loess and paleosols from Laohushan profile, Nanjing (In Chinese). Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22(4): 47~ 52
- [16] 强小科, 安芷生, 常宏. 佳县红黏土堆积序列频率磁化率的古气候意义. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(3): 91~ 96. Qiang X K, An Z S, Chang H. Paleoclimatic implication of frequency dependent magnetic susceptibility of red clay sequences in the Jixian profile of northern China (In Chinese). Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(3): 91~ 96
- [17] 闫海涛, 胡守云, Appel E, 等. 土壤剖面中粉煤灰垂向迁移的磁响应. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1 392~ 1 399. Yan H T, Hu S Y, Appel E, *et al.* Magnetic responses to vertical migration of fly ash in a soil profile (In Chinese). Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(6): 1 392~ 1 399
- [18] 单红丹, 卢升高. 火电厂粉煤灰的矿物磁性及其环境意义. 矿物学报, 2005, 25(2): 141~ 146. Shan H D, Lu S G. Mineral magnetism of power plant fly ash and its environmental implication (In Chinese). Acta Mineralogica Sinica, 2005, 25(2): 141~ 146
- [19] Lu S G, Bai S Q, Cai J B, *et al.* Magnetic properties and heavy metal contents of automobile emission particulates. Journal of Zhejiang University Science B, 2005, 6(8): 731~ 735

- [20] 琚宜太, 王少怀, 张庆鹏, 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 topsoils: a case study in Samming City, Fujian Province, southeast China (In Chinese). Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(2): 282~ 288
- [21] Shilton V F, Booth C A, Smith J P, *et al.* Magnetic properties of urban street dust and their relationship with organic matter content in the West Midlands, UK. Atmospheric Environment, 2005, 39(20): 3 651~ 3 659
- [22] 王爱华, 王力波, 周汉民. 宁沪高速公路句容段两侧土壤磁化率异常与重金属元素的关系研究. 江苏地质, 2006, 30(3): 172~ 176. Wang A H, Wang L B, Zhou H M. Relationship of soil magnetic susceptibility anomaly and heavy metal elements on both sides of Jurong Block, Nanjing-Shanghai Expressway (In Chinese). Jiangsu Geology, 2006, 30(3): 172~ 176
- [23] 胡雪峰. “黄土-古土壤”序列中氧化铁和有机质对磁化率的影响. 土壤学报, 2004, 41(1): 7~ 12. Hu X F. Influence of iron oxides and organic matter on magnetic susceptibility in the loess paleosol sequence (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1): 7~ 12
- [24] 卢升高. 岩成土的磁性测量及其与土壤发育的关系. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 1999, 25(6): 603~ 607. Lu S G. Magnetic measurements on rock soils and its relation to soil development (In Chinese). Journal of Zhejiang Agricultural University (Agric.& Life Sci.Ed.), 1999, 25(6): 603~ 607
- [25] 卢升高. 亚热带富铁土的磁学性质及其磁性矿物学. 地球物理学报, 2000, 43(4): 498~ 504. Lu S G. Magnetic properties of subtropical ferrisols and its magnetic mineralogical study (In Chinese). Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(4): 498~ 504
- [26] Hiller D A. Properties of Urban Anthrosols from an abandoned shunting yard in the Ruhr area, Gemany. Catena, 2000, 39: 245~ 266
- [27] Mullins C E. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science: A review. Journal of Soil Science, 1977, 28: 223~ 246
- [28] 贾蓉芬, 彭先芝, 高梅影, 等. 趋磁细菌——生物地球化学作用的范例. 第四纪研究, 2003, 23(5): 537~ 545. Jia R F, Peng X Z, Gao M Y, *et al.* Magnetotactic bacteria: an example of biogeochemistry (In Chinese). Quaternary Sciences, 2003, 23(5): 537~ 545
- [29] Dong R B, Zhang W G, Lu S G, *et al.* Effect of reduction associated with organic matter decomposition on magnetic properties of red soils. Pedosphere, 2003, 13(2): 103~ 110

MAGNETIC PROPERTIES OF URBAN SUBGRADE SOIL AND THEIR PEDOGENETIC IMPLICATIONS

Yuan Dagang^{1,2} Zhang Ganlin[†]

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 College of Resource and Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Yaan, Sichuan 625014, China)

Abstract Magnetic properties can be simply, rapidly and accurately measured, and their pedogenetic implications are significant. In this study, 63 soil samples collected from 11 subgrade soil profiles distributed in the downtown area of Nanjing were tested for low frequency susceptibility, frequency dependent susceptibility, free iron oxide, active iron oxide, particle size distribution, organic carbon, pH and calcium carbonate equivalents. Results show that magnetic mineral and soil-forming processes were highly diversified due to heterogeneity of parent materials and artificial input. Magnetic minerals were mainly derived from fly ash, automobile exhaust and so on. High pH and carbonate content retarded formation of fine magnetic minerals in urban environment. Magnetic susceptibility combined with other pedogenetic properties is very useful in illustrating the soil-forming processes in urban areas.

Key words Magnetic susceptibility; Pedogenesis; Urban soil; Subgrade soil