

\*\*\*\*\*  
研究  
简报  
\*\*\*\*\*

# 福州城市土壤 pH 值、有机质和磁化率特征研究

陈秀玲, 李志忠, 靳建辉, 刘建华, 吴美榕, 钟俊龙

(福建师范大学 地理研究所, 福建省湿润亚热带山地生态省部共建国家重点实验室培育基地, 福建 福州 350007)

**摘 要:** 研究了福州市不同功能区城市土壤的 pH 值、有机质和磁化率。结果表明, 福州市土壤 pH 值以中性和碱性为主, 可能是受城市化过程中碱性废弃物排放的影响所致; 土壤有机质含量总体较高, 各功能区的变化规律为: 工业区 > 商业区 > 城市风景区 > 生活文化区, 反映了土壤有机质含量的增加与高强度人类活动有直接关系; 土壤磁化率值总体偏高, 代表着福州市土壤普遍受到一定程度的重金属污染, 不同功能区的磁化率特征表现为: 工业区 > 商业区 > 生活文化区 > 城市风景区。不同功能区土壤的 pH 值、有机质和磁化率三者之间基本不存在相关关系, 这与自然土壤有较明显的区别。

**关键词:** 城市土壤; 有机质; pH 值; 磁化率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)05-0176-06

中图分类号: S152, S153

## Soil pH Value, Organic Matter and Magnetic Susceptibility in Different Urban Function Zones of Fuzhou City

CHEN Xiu-ling, LI Zhi-zhong, JIN Jian-hui, LIU Jian-hua, WU Mei-rong, ZHONG Jun-long

(*Institute of Geography, Fujian Normal University and Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology Funded by Ministry of Science and Technology and Fujian Province, Fuzhou, Fujian 350007, China*)

**Abstract:** A study on the pH value, organic matter and magnetic susceptibility of urban soil in different function zones was conducted systematically in Fuzhou City. The result shows that the pH of the soils ranged from neutral to alkaline, which may be contributed by the discharge of alkaline waste during the urbanization process. The contents of soil organic matter were high generally; the industrial zone, commercial zone, scenic zone and cultural zone had high to low organic matter content, respectively, reflecting the direct relationship between soil organic matter content and human activities. The overall high magnetic susceptibility values indicated that the soils in Fuzhou City subject to substantial heavy metal pollution. The magnetic susceptibility of the function zones in order is industrial zone > commercial zone > cultural zone > scenic zone. There is no correlation between the three variables, which is significantly different from the physiochemical properties of natural soils.

**Keywords:** urban soil; organic matter; pH value; magnetic susceptibility

城市是人类生产和生活的重要场所, 加快城市化进程对我国社会经济的发展进步和人民生活水平的稳步提高具有重要的意义。但是城市化过程中人类活动对自然环境影响的深度和广度日益强烈, 造成热岛效应、水质污染、土壤退化等诸多不容忽视的城市环境问题。

城市土壤作为城市自然环境的主要组成部分之一, 是城市各类污染物重要的源和汇, 直接影响到城市生态环境质量和人体健康<sup>[1]</sup>。过去, 人们更多注重对城市郊区的农业土壤开展研究, 但对城市土壤理化

性质及其影响因素的研究却一直较为薄弱, 直到最近数十年才得到人们的广泛关注。研究表明, 土壤有机质、pH 值以及磁化率性质与土壤的诸多理化性质密切相关。它们既能改变土壤的物理性质, 影响营养元素的传递和有效吸收, 同时又是影响金属元素和人为释放的污染物质在土壤中存在的形态和生物有效性的重要因素, 在一定程度上能够反映土壤污染状况。例如, 相关分析表明, 土壤 pH 值降低能够促进重金属元素的移动, 酸性越强, Cd, Pb, Cu, Zn 的淋失率越大, 酸性和强碱性环境均有利于 Pb 的溶出<sup>[2-4]</sup>; 土壤

收稿日期: 2010-12-24

修回日期: 2011-01-26

资助项目: 福建省自然科学基金项目“福州盆地不同土地利用方式重金属污染迁移规律研究”(2009J05094), “福州盆地第四纪红土沉积环境研究”(2009J01208); 福建省科技厅基金项目“福建内陆第四纪红土成因研究”(2009R10039-4)

作者简介: 陈秀玲(1978—), 女(汉族), 福建省福州市人, 博士, 副教授, 研究方向为土壤地球化学。E-mail: xiulingchen@163.com。

有机质与 Cd, Cu, Zn, Ni 和 Hg 等元素存在极显著的正相关,与 As 呈极显著负相关<sup>[5-6]</sup>;土壤磁化率与土壤重金属元素的全量、DTPA 提取量以及活化率存在极显著的正相关<sup>[7-9]</sup>。实际生产中,可以通过它们对土壤状况,特别是土壤重金属分布状况进行大致的估计,并有助于更进一步了解污染物迁移规律,从而对治理各种污染问题提出更好的建议。本文对福州市不同功能区城市土壤的有机质、pH 值和磁化率进行研究,尝试探讨城市不同功能区土壤与它们之间的关系,为提升城市人居环境质量提供有利的参考。

## 1 研究区概况

福州地处中国东南沿海福建省东部的闽江口,东经 118°08′—120°31′,北纬 25°15′—26°29′。福州市区所在地属于典型的河口盆地,盆地四周被群山峻岭所环抱,海拔多在 600~1 000 m,地势自西向东倾斜。福州市属海洋性亚热带季风气候,全年冬短夏长,温暖湿润,年均气温在 16~20 °C,年均降水量为 900~2 100 mm,年相对湿度约 77%。

福州盆地周边海拔较高处的地带性土壤为红壤,有机质含量变化于 2.57%~6.07%,pH 值的变化范围为 4.5~5.5。市区河漫滩和河流阶地上的隐域性土壤类型为潴育水稻土,A 层有机质的平均含量为 2.97%,pH 值为 5.5~6.5。

## 2 样品采集与实验分析

根据福州市区不同功能区城市土壤的形成背景和利用历史,在工业区、生活文化区、商业区、城市风景区内选取具有代表性的城市绿地进行样品采集。工业区包括福州硫酸厂、福州锅炉厂、化工路、二化和金山工业区 5 个样点;生活文化区包括上海新村、福建师范大学仓山校区、王庄新村和金山生活区 4 个样点;商业区包括宝龙城市广场、东街口、中亭街、五一广场和六一北路 5 个样点;城市风景区包括左海公园、西湖公园、森林公园、南江滨公园、金山公园 5 个样点。每个样点内均采取多点、随机取土方式以获得代表性的土壤样品,采样深度为 0—5 cm(表层)和 5—10 cm(表下层),共采集 4 类不同功能区土壤样品 38 个。土壤样品经自然风干后,剔除杂质,分别过 2 mm 筛和 0.25 mm 筛待测。土壤有机质的测定采取重铬酸钾—浓硫酸消煮法<sup>[10]</sup>,pH 值采用奥立龙 818 型酸度计进行测定<sup>[11]</sup>,磁化率采用英国 Bartington MS 2 双频磁化率仪进行测定。整个实验分析过程均在福建师范大学地理科学学院福建省湿润亚热带山地生态省部共建国家重点实验室培育点完成。

## 3 结果与分析

### 3.1 pH 值特征

试验结果发现,福州不同功能区土壤以中性到碱性为主,表层土(0—5 cm)的 pH 值平均值为 7.47,变幅为 6.38~8.52,下层土(>5 cm)的 pH 值平均值为 7.61,变化幅度比上层略大,为 5.92~8.68。其中生活文化区土壤的 pH 值表层土(0—5 cm)和下层土(>5 cm)的 pH 值变化分别为 6.78~8.52 和 7.21~8.16,平均 7.62 和 7.73。工业区土壤表层土的 pH 值变化范围为 6.91~8.2,平均 7.66,下层土壤的 pH 值变化范围为 7.02~8.62,平均 7.99,总体以中性—弱碱性为主,下层土壤的 pH 值比上层略高。商业区土壤的表层土的 pH 值与前面 2 个区差不多,在 6.84~7.97 间变化,平均为 7.43,但其下层土的 pH 值略高,变化范围 7.05~8.68,平均 8.05,仍然表现出下层比上层略高的特点。

城市风景区的 pH 值变化特征与前面的功能区表现有所不同,其表层土仍以中性到弱碱性土为主,pH 值为 6.38~8.22,平均 7.18,但是下层的土壤却表现出中性到弱酸性的特征,pH 值变化范围降至 5.92~7.62,平均 6.77,其中森林公园土壤的表下层土壤的 pH 值为 5.92,表现出地带性土壤的酸性特征(图 1)。

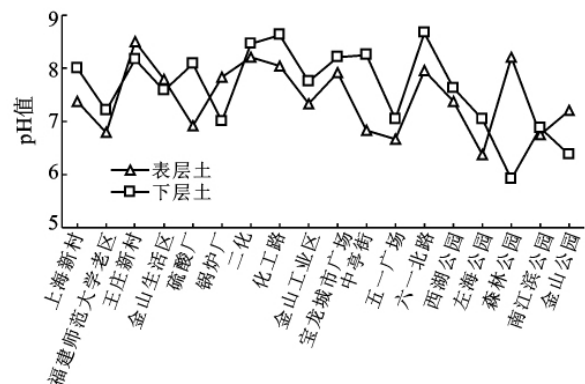


图 1 福州市不同功能区各采样点土壤 pH 值

总体而言,福州市不同功能区土壤的 pH 值特征表现为中性到碱性为主,表层土壤的 pH 值呈现出由城市风景区—商业区—生活文化区—工业区逐渐增加的趋势,土壤 pH 值在剖面上呈无规律分布(表 1)。

表 1 福州市不同功能区土壤 pH 值平均值特征

样品	生活文化区	工业区	商业区	城市风景区
表层土	7.62	7.66	7.43	7.18
下层土	7.73	7.99	8.05	6.77

### 3.2 有机质特征

福州市不同功能区土壤的有机质含量变化幅度较大,变化幅度从最低含量 0.9% 跨越到 8.3%,表层土壤(0—5 cm)的有机质变化幅度为 1.15%~8.30%,平均 4.07%,下层土壤(>5 cm)的有机质迅速降为 0.90%~4.60%,均值为 2.26%。其中,生活文化区土壤的有机质含量较低,表层土有机质含量为 1.76%~3.86%,平均 2.77%,下层土壤的有机质含量变化范围为 0.90%~3.47%,平均 2.00%,除了样点上海新村,总体表现出表层含量高,下层低的特点。工业区土壤的有机质明显升高,表层土有机质含量为 4.05%~8.30%,平均 6.40%,下层土壤含量为 1.26%~4.6%,平均 2.98%,表层高下层低,其中硫酸厂、锅炉厂等老工业区土壤的有机质含量最高。商业区土壤表层土的有机质含量为 2.32%~5.93%,平均 3.79%,下层土壤有机质含量的平均值为 2.24%,变化范围为 0.90%~3.80%,其中六一北路等老商业区有机质含量则相对更高。较为异常的是,城市风景区土壤的有机质含量在所有功能区中并不是最高的,而是相对较低,其表层土有机质含量变化范围为 1.10%~4.80%,平均 3.09%,均比工业区和商业区低,仅比生活文化区略高,下层则更低,含量变化范围为 1.07%~3.15%,平均 1.76%,在所有功能区土壤中含量最低,其中森林公园与金山公园的含量最低(图 2)。

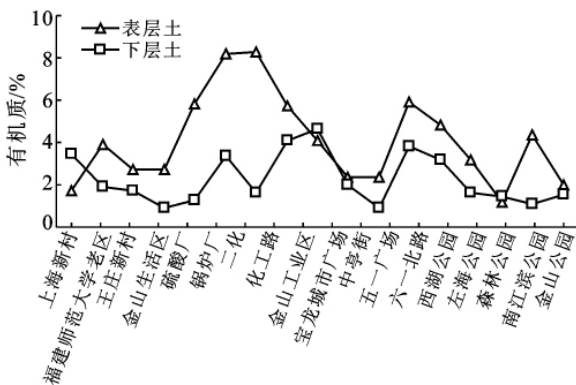


图 2 福州市不同功能区土壤有机质特征

总体而言,福州市不同功能区的有机质含量较高,土壤表层的含量普遍比下层高,均值含量由高到低的变化规律为工业区>商业区>城市风景区>生活文化区。但城市风景区的有机质平均值较高,主要是由于位于老商业区的西湖公园和左海公园土壤的有机质含量较高,除此之外城市风景区的有机质含量均值急剧下降,成为所有功能区中含量最低的区域(表 2)。

表 2 福州市不同功能区土壤有机质含量平均值特征 %

样品	生活文化区	工业区	商业区	城市风景区
表层土	2.77	6.40	3.79	3.09
下层土	2.00	2.98	2.25	1.76

### 3.3 磁化率特征

研究区的磁化率值与城市功能区存在着较大的关系,磁化率值的大小随着区域功能的变化而变化。生活文化区土壤的磁化率值总体较低,表层土的含量范围为  $1.35 \times 10^{-6} \sim 1.77 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,平均  $1.56 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,下层土则更低,为  $0.52 \times 10^{-6} \sim 1.24 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,平均  $0.98 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,总体表现出上层高、下层低的特征。工业区土壤的磁化率值则总体较高,表层土壤的磁化率为  $1.64 \times 10^{-6} \sim 5.81 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,平均为  $3.26 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,下层土壤略有降低,在  $0.65 \times 10^{-6} \sim 5.28 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$  间变化,平均为  $2.18 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,其中金山工业区和硫酸厂、锅炉厂等地的值较低。商业区表层土的磁化率值为  $1.43 \times 10^{-6} \sim 7.57 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,平均  $2.97 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,下层土为  $0.75 \times 10^{-6} \sim 7.97 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,平均  $3.09 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,其中五一广场的磁化率值较高,剔除这个点后,商业区土壤的磁化率值为中等,均值分别为  $1.83 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$  和  $1.47 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。城市风景区土壤磁化率值跟我们预期的一样是所有功能区中最低的,表层土变化范围为  $0.64 \times 10^{-6} \sim 2.31 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,均值为  $1.13 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,下层土壤的磁化率为  $0.52 \times 10^{-6} \sim 2.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,平均  $1.34 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,除左海公园点略高外,其它地区的磁化率值均小于  $1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ (图 3)。

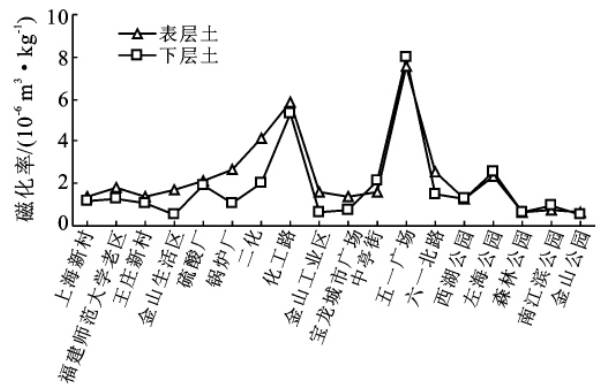


图 3 福州市不同功能区土壤磁化率特征

总体而言福州市不同功能区土壤的磁化率含量特征表现为工业区>商业区>生活文化区>城市风景区。但是新工业区(金山工业区)的磁化率值仅略高于城市风景区,位于较繁华地段的商业区磁化

率值却较高,例如左海公园和西湖公园。而老商业区的磁化率也有可能由于受到过于拥挤的车流量等原因而导致磁化率值高于工业区土壤,例如五一广场地区,其磁化率值高达  $7.6 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ (表 3)。

表 3 福州市不同功能区土壤磁化率平均值  $10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$

样品	生活文化区	工业区	商业区	城市风景区
表层土	1.56	3.26	2.98	1.14
下层土	0.98	2.18	3.09	1.34

### 3.4 相关关系研究

对福州市不同功能区土壤的 pH 值、有机质和磁化率进行相关性研究,发现它们彼此之间的相关性差,基本无相关。这可能是由于受到频繁密集的工业、交通运输、建筑等人类活动的影响,各功能区土壤遭受强烈的人为干扰,其形成过程与自然土壤存在较大区别,原生土壤剖面遭受严重改造,土壤层次紊乱,相互之间基本没有发生学上的联系,因而形成了上述特殊的理化性状和相关模式<sup>[11-12]</sup>。

## 4 讨论

### 4.1 pH 值特征

土壤 pH 值是反映土壤质量的重要理化性质,对土壤的一系列其它性质有着深刻的影响。自然状态下的土壤酸碱性主要受到气候、母质、植被等成土因子的影响,经过漫长的地质大循环和生物小循环,形成了稳定的地带性土壤南酸北碱的格局。除此之外,土壤酸碱度特别是城市土壤在很大程度上还会受到人为因素的影响。福州位于亚热带中部,中国的东南沿海,其自然土壤普遍呈酸性,表层土壤的 pH 值多在 4.5~5.5 之间<sup>[12]</sup>。

由前述分析我们可以得知,福州市各功能区的土壤以中性和碱性为主,pH 值明显偏高,这可能是由于不断加快的城市化进程,使得现代工业、交通建设和城市建设等飞速发展,大量建筑废弃物、水泥、砖块和其它碱性混合物等城市垃圾进入周围土壤,城市  $\text{CO}_2$  浓度的增加迫使这些垃圾堆放物的钙镁等盐类物质释放到土壤中,加上混凝土风化向土壤释放的钙镁使得城市土壤的酸碱度不断升高。另外,大量含碳酸盐的灰尘和沉降进入土壤,也导致城市土壤趋向于碱性,与自然土壤差异明显<sup>[11-13]</sup>。这与许多城市土壤的研究结果相一致<sup>[11-16]</sup>。

研究还发现,在所有的功能区中,城市风景区的 pH 值最低,表现出中性到弱酸性的特征,并且在土壤层的垂直变化上不同于其它区的土壤,表现为下层土的 pH 值比上层略高(表 1),其中森林公园土壤的

下层土壤的 pH 值为 5.92,表现出地带性土壤的酸性特征(图 1),这可能是由于城市风景区的主要功能以绿化和休闲游览为主,受到建筑废弃物等垃圾堆放物的影响较小,所受到的人为翻动也较小,即使有人为扰动也以土壤表层为主,因而下层土壤特别是森林公园的土壤下层,保留了原始土壤的酸碱度分布特征。

从以上结果我们可以看出,虽然影响土壤 pH 值的因素很多,但福州市各功能区土壤主要受人为活动的影响,因此 pH 值空间变化强烈,土壤质量发生与环境不相适应的退化。为确保福州市城市土壤的持续利用和生态环境的改善,在城市建设和规划过程中应尽早采取有效措施加以调控,注意适地适树、适地适花(草);或者通过施用土壤改良剂改良土壤的酸碱性,满足城市植物生长的要求<sup>[17]</sup>。

### 4.2 有机质值特征

土壤有机质是土壤的重要组成部分,直接影响土壤的理化性质和生物特性,是土壤肥力的重要保障,同时也是衡量土壤环境质量的重要综合指标,能较好地指示生态系统发展优劣状况。福州市不同功能区土壤的有机质含量在 0.9%~8.3%之间,平均 4.07%,总体处于较高水平,含量由高到低的变化规律为工业区>商业区>城市风景区>生活文化区。研究还表明,不同功能区土壤的有机质含量总体表现出表层高于下层的趋势,但也有个别样区表现异常,例如上海新村等,这可能是由于城市土壤人为翻动严重,层次性差。

城市土壤的有机质除了来自于其生长的植物外,大量的人为带入也是其重要来源之一,这些人为带入包括生活垃圾(食物、燃料的残余物等)、城市工业有机废弃物等。福州老工业区和商业区历史悠久,道路绿化良好并且时间较长,同时这里人流、车流量大,燃料的残余物和生活垃圾等在土壤长时间大量积累,因而有机质含量整体较高,而新工业区由于建成时间短,一般只有 5~10 a,土壤多为外来客土,并且其主要位于新开发区,人车流量均较少,因而有机质含量较低。沈阳等地的城市土壤研究也发现类似的特征<sup>[18]</sup>。

在所有城市功能区中,生活文化区和城市风景区(特别是金山公园和森林公园)的土壤有机质含量比其它 2 个区的低很多。尤其是城市风景区,如果去除位于商业区的左海公园和西湖公园的点,则表层土壤的有机质含量平均值迅速降至 1.76%。这可能是由于风景区土质中砂石成分较多,土壤持水量下降,同时城市园林的枯枝落叶、修剪的枝叶等被较快清除,

土壤有机质的补给较少<sup>[17,19-20]</sup>。这一部分城市土壤由于有机质含量的不断减少可能面临如压实问题等的土壤退化现象,因而应重视土壤中有有机质的补给。建议通过施用有机肥料、利用有机质含量高的生活垃圾和城市污水厂污泥等城市废弃物、归还凋落物等方式增加有机质的积累,改善土壤理化性质<sup>[21]</sup>。

#### 4.3 磁化率特征

研究表明,土壤磁化率与土壤重金属元素的全量、DTPA 提取量、活化率存在极显著的正相关,磁化率在一定程度上反映土壤重金属的污染情况<sup>[7-9]</sup>。同时磁学研究具有样品用量少、简单快速、灵敏度高、不易损坏样品和费用低等特点,因此磁化率作为一种简单、有效的指标已被广泛应用于城市土壤重金属污染监测和研究工作<sup>[22-29]</sup>。

福州市城市土壤的磁化率研究表明,其磁化率值总体偏高,明显地表现出城市土壤磁性增强的现象,这一结果与杭州、洛阳、上海等地的研究结果相一致<sup>[25-27]</sup>,可能代表着福州市土壤普遍受到了一定程度的重金属污染。不同功能区的磁化率值特征与区域功能存在着较大的联系,总体特征表现为工业区>商业区>生活文化区>城市风景区。我国杭州不同功能区的磁化率研究也发现不同区块的平均磁化率依次为工业区>交通沿线>居民与商业区>公园与绿地区<sup>[27]</sup>。

由于城市环境中的磁性颗粒主要来自于人类活动、工业活动、燃料燃烧、汽车尾气等污染物中的亚铁磁性矿物,这些亚铁磁性矿物可直接引起表土磁化率升高<sup>[28-29]</sup>,因而靠近工业中心的工业区土壤以及人、车流量大的商业区磁化率值处于明显的高值。福州城市土壤元素分析也表明重金属元素在城市中心和老工业区的土壤中含明显高于其它地区的土壤<sup>[29]</sup>。

但是我们同时发现金山工业区的磁化率值仅略高于城市风景区,这可能是由于金山工业区是一个新开发的工业区,表土损失,客土回填,受到工业污染的影响还较小,土壤中各类金属积累尚不明显,所以磁化率值还比较低,而硫酸厂和锅炉厂等所在区域虽然是老工业区,但近十几年来由于功能的改变和市政府各类有效的措施,许多污染严重工业企业逐渐搬迁,土壤质量已经有了较大的改善,不仅土壤中金属含量明显降低,有机质含量也显著提高,达到了研究区域的最高值。

## 5 结论

(1) 由于现代工业、交通建设和城市建设的发

展,大量建筑废弃物、水泥、砖块和其它碱性混合物等城市垃圾进入土壤,福州市各功能区的土壤 pH 值明显偏高,以中性和碱性为主,与自然土壤差异明显,土壤质量表现出明显的退化,因而在未来城市建设和规划过程中应尽早采取有效措施加以调控,以确保福州市城市土壤的持续利用和生态环境的改善。

(2) 福州市不同功能区土壤有机质研究表明福州市城市土壤的有机质含量总体较高,含量由高到低的变化规律为工业区>商业区>城市风景区>生活文化区,总体表现出表层高于下层的趋势。但是城市风景区特别是去除位于商业区的左海公园和西湖公园的样点后的土壤有机质含量过低,应重视风景区土壤中有有机质的补给。建议可以通过施用有机肥料、利用有机质含量高的生活垃圾和城市污水厂污泥等城市废弃物、归还凋落物等方式增加有机质的积累,改善土壤理化性质。

(3) 对福州市城市土壤的磁化率研究发现,各功能区土壤的磁化率值总体偏高,可能表明福州市土壤普遍受到一定程度的重金属污染。不同功能区的磁化率值特征与区域功能存在的较大的联系,总体特征表现为工业区>商业区>生活文化区>城市风景区。

(4) 由于受到频繁的人类生活、密集的工业生产、高强度交通运输的影响,城市土壤遭受强烈的人为干扰,土壤理化性质与自然土壤存在较大区别,福州市不同功能土壤的 pH 值、有机质和磁化率之间基本无相关。

#### [参 考 文 献]

- [1] 廖自基. 环境中微量重金属元素的污染危害与迁移转化[M]. 北京:冶金工业出版社, 1986:1-325.
- [2] 陈凤,濮励杰. 昆山市农业土壤基本性质与重金属含量及二者的关系[J]. 土壤, 2007, 39(2):291-296.
- [3] 景丽洁,王敏. 不同类型土壤对重金属的吸附特性[J]. 生态环境, 2008, 17(1):245-248.
- [4] Naidu R, Bolan N S, Kookana R S, et al. Ionic strength and pH effects on the sorption of cadmium and the surface charge of soils [J]. *Ear. J. Soil Sci.*, 1994, 45: 419-429.
- [5] 刘铮. 中国土壤微量元素[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1996:152-253.
- [6] 陈怀满,龚子同,鲁如坤,等. 土壤—植物系统中的重金属污染[M]. 北京:科学出版社, 1996:1-344.
- [7] 沈明洁,胡守云, Blaha U, 等. 土壤剖面的磁学特征及其对交通污染的指示意义:以北京首都机场高速公路为例[J]. 第四纪研究, 2007, 27(6):1113-1120.
- [8] 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.

- [9] Strzyszczyk Z, Magiera T, Heller F. The influence of industrial emissions on the magnetic susceptibility of soils in Upper Silesia[J]. *Stud. Geophys. Geod.*, 1996, 40: 276-286.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 107.
- [11] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤的特性及其分类的初步研究[J]. *土壤*, 2001, 33(1): 47-51.
- [12] 刘三宏. 浅议福州市山地土壤的开发利用[J]. *福建水土保持*, 1997(4): 21-24.
- [13] 王志刚, 赵永存, 廖启林, 等. 近 20 年来江苏省土壤 pH 值时空变化及其驱动力[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 702-727.
- [14] 于法展, 尤海梅, 李保杰, 等. 徐州市不同功能城区绿地土壤的理化性质分析[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(3): 85-88.
- [15] 孟昭虹, 周嘉. 哈尔滨城市土壤理化性质研究[J]. *哈尔滨师范大学学报*, 2005, 21(4): 102-105.
- [16] 项建光, 方海兰, 杨意, 等. 上海典型新建绿地的土壤质量评价[J]. *土壤*, 2004, 36(4): 424-429.
- [17] 卢瑛, 甘海华, 史正军, 等. 深圳城市绿地土壤肥力质量评价及管理对策[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 153-156.
- [18] 段迎秋, 魏忠义, 韩春兰, 等. 东北地区城市不同土地利用类型土壤有机碳含量特征[J]. *沈阳农业大学学报*, 2008, 39(3): 324-326.
- [19] 于法展, 尤海梅, 李保杰, 等. 徐州市不同功能城区绿地土壤的理化性质分析[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(3): 85-88.
- [20] 何跃, 张甘霖. 城市土壤有机碳和黑碳的含量特征与来源分析[J]. *土壤学报*, 2006, 43(2): 177-182.
- [21] 项建光, 方海兰, 杨意, 等. 上海典型新建绿地的土壤质量评价[J]. *土壤*, 2004, 36(4): 424-429.
- [22] 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.
- [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] 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.
- [25] Lu S G, Bai S Q, Xue Q F. Magnetic properties as indicators of heavy metals pollution in urban top soils: A case study from the city of Luoyang, China[J]. *Geophys. J. Int.*, 2007, 171: 568-580.
- [26] Hu X F, Su Y, Ye R, et al. Magnetic properties of the urban soils in Shanghai and their environmental implications[J]. *Catena*, 2007, 70: 428-436.
- [27] 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.
- [28] Kapicka A, Petrovsky E, Ustjakb S, et al. Proxy mapping of fly-ash pollution of soils around a coal-burning power plant: A case study in the Czech Republic[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1999, 66: 291-297.
- [29] 陈华英. 福州城市土壤中铜等 13 种元素的分布特征[J]. *福建地质*, 2008, 27(2): 211-218.

(上接第 68 页)

- [5] Li X Y. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of northwest China[J]. *Catena*, 2003, 2: 105-127.
- [6] Burns R G. Enzyme activity in soil: impation and a possible role in microbial ecology[J]. *Soil Biol. & Biochem.*, 1982, 12: 423-427.
- [7] Powl son D S, Brookes P C, Christensen B. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw in corporation[J]. *Soil Biol. Biochem.*, 1987, 19: 159-164.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 1-495.
- [9] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 1-304.
- [10] 周礼凯, 张志明. 土壤酶活性的测定方法[J]. *土壤通报*, 1980(5): 37-38.
- [11] 严健汉, 詹重慈. 环境土壤学[M]. 武汉: 华中师范大学, 1985: 154-155.
- [12] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 67-78, 180-201, 228-282.
- [13] 陈恩凤. 土壤肥料基础及调控[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 1-379.
- [14] 万忠梅, 吴景贵. 土壤酶活性影响因子研究进展[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2005, 33(6): 87-109.