

# 珠江三角洲农业土壤磁化率空间分布特征 及其影响因素分析\*

欧阳婷萍<sup>①</sup> 万洪富<sup>②</sup> 张金兰<sup>③</sup> 黄宁生<sup>①</sup> 朱照宇<sup>①</sup> 田成静<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>中国科学院广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室, 广州 510640;

<sup>②</sup>广东省生态环境与土壤研究所, 广州 510650; <sup>③</sup>广东工贸职业技术学院, 广州 510510)

**摘要** 在珠江三角洲范围内选取 300 件农业土壤样品进行磁化率及频率磁化率分析。结果表明, 300 件土壤样品的磁化率在  $1.29 \times 10^{-8} \sim 185.89 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  范围内变动, 平均值为  $31.20 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。珠江三角洲农业土壤磁化率具有明显的空间分异特征, 呈南高北低、中心区高东西两翼低的空间分布格局; 全区具 4 个明显的磁化率高值区, 分布在: 珠海、深圳、惠阳及顺德。因子分析结果表明灌溉方式、土地利用类型和母岩与母质、土壤类型对农业土壤磁化率高起主要作用。同时, 重金属污染对农业土壤的磁性具有明显的增强作用。

**主题词** 农业土壤 磁化率 空间分布 影响因素 珠江三角洲

**中图分类号** X142 **文献标识码** A

## 1 引言

现代环境监测是环境磁学的主要应用领域之一, 磁化率是环境磁学研究最基本也是最易获取的磁学参数之一<sup>[1,2]</sup>。随着环境磁学在污染监测领域的广泛应用, 越来越多的研究表明土壤磁化率可有效地指示土壤污染程度<sup>[3-12]</sup>, 可以作为土壤重金属污染监测的替代性指标。然而, 国内外针对土壤污染的磁学研究普遍局限于城市、矿山或工业区土壤<sup>[13-20]</sup>, 由于农业土壤本身的复杂性, 目前环境磁学的应用较少涉及直接影响到农产品安全的农业土壤<sup>[21]</sup>。

改革开放以来的三十多年里, 中国经济取得了举世瞩目的跨越式发展, 作为改革开放的前沿阵地, 珠江三角洲地区一跃成为中国乃至世界范围内的经济较活跃地区之一<sup>[22,23]</sup>。据统计<sup>[24]</sup>, 珠江三角洲地区 2010 年生产总值近 4 万亿元, 其中工农业生产总值超过 50%; 人口普查结果表明研究区在 2000 年的城市化水平超过 70%, 已进入城市化高级阶段<sup>[25]</sup>; 据遥感影像处理获得的土地利用情况表明本地区主要景观包括城镇建设用地、水体及林地、耕

地等农业用地, 其中 2005 年农业用地(包括水田、旱地、林地、园地等)超过 70%<sup>[26]</sup>。

本文以经济较发达的珠江三角洲地区为例, 研究区域内农业土壤磁化率的空间分布特征并分析其影响因素, 探讨农业土壤磁化率的环境指示意义, 以为环境磁学在农业土壤污染监测、土壤修复等领域中的应用奠定基础。

## 2 样品来源及研究方法

广东省生态环境与土壤研究所针对广东省农业土壤污染进行了系统的调查研究, 已完成重金属含量分析测试<sup>[27,28]</sup>, 本研究所用样品全部由该研究所提供。根据采样点特征及该研究所前期分析结果, 在珠江三角洲经济区范围内(图 1)选取土壤发育良好、肥力一般或中等、植被长势良好的 300 件农业土壤 0~20cm 表层样品, 各类土壤样品数量见表 1。所有样品在实验室自然晾干后, 去除砂、砾和植物根系, 研磨至 100 目, 用卡帕桥多频各向异性磁化率仪(MFK1-FA)进行低频(976Hz)和低频(15616Hz)磁化率(分别用  $\chi_{lf}$  和  $\chi_{hf}$  表示)测试, 并换算为质量磁化率; 根据公式  $\chi_{fd}(\%) = (\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf} \times 100$  计算频

第一作者简介: 欧阳婷萍 女 35 岁 副研究员 环境科学专业 E-mail: oyangtp@gig.ac.cn

\* 广东省科技计划项目(批准号: 2011B030500031)、广东省中国科学院全面战略合作项目(批准号: 2011B090300052)、国家自然科学基金青年基金项目(批准号: 40702057)和广东省自然科学基金团队项目(批准号: 04201163)共同资助

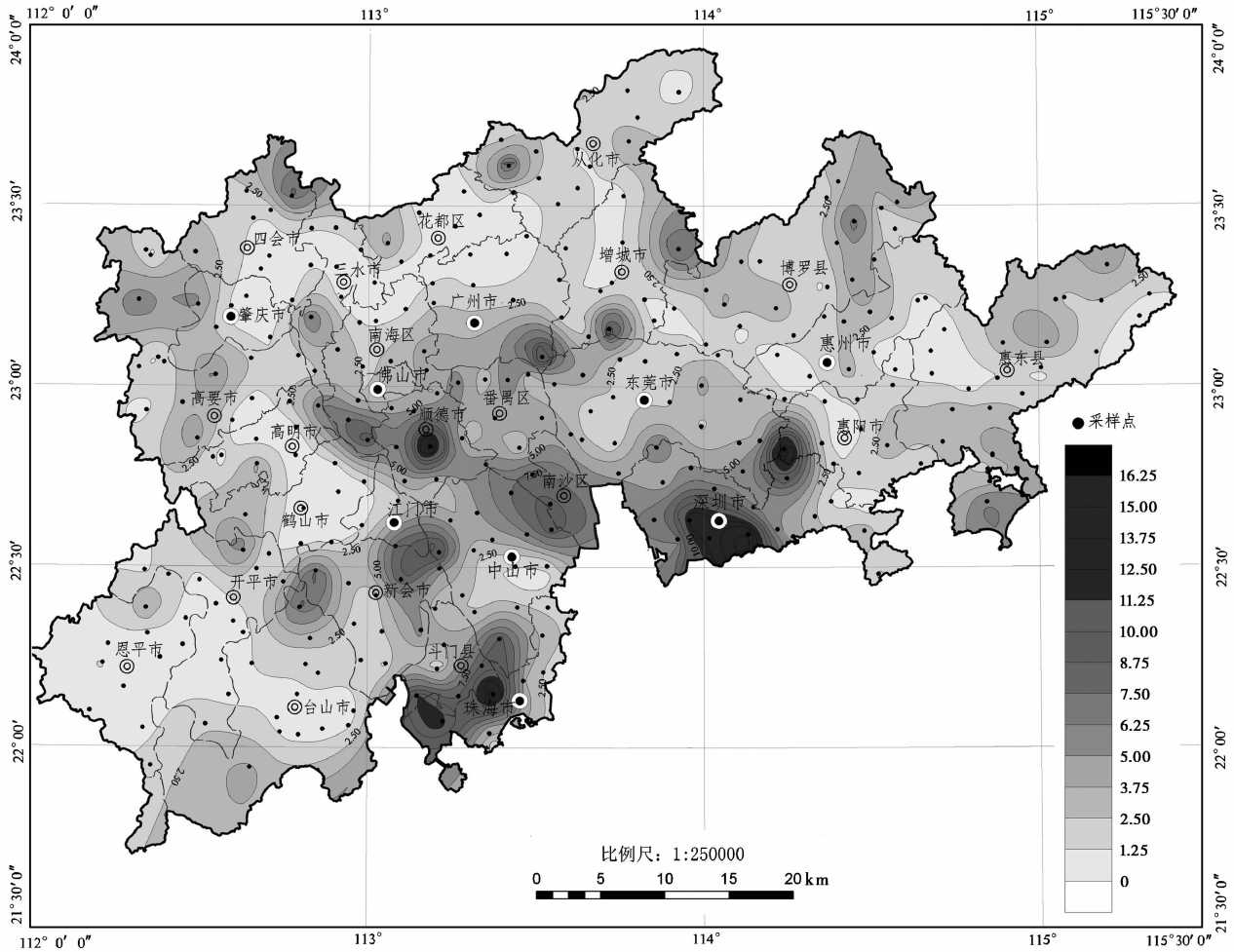


图1 珠江三角洲农业土壤磁化率( $10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ )空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of agricultural soil magnetic susceptibility within the Pearl River Delta

率磁化率系数。

利用 MapGIS 软件通过克里格插值方法对获得的所有样品磁化率结果作等值线图后将等值线图与珠江三角洲行政区划图进行叠加分析。按不同标准对所有样品归类后进行描述性统计分析;充分考虑土壤母岩与母质、土壤类型、土地利用类型、灌溉方式、耕作方式及地形条件等影响因素,选取磁化率及上述变量在 SPSS 软件中进行因子分析。将样品来源单位给出的土壤重金属含量结果与中国土壤环境质量二级标准进行对比以分析重金属污染对磁化率的影响,本文将有任一种重金属含量高于土壤环境质量标准(GB 15618-1995)二级标准值的样品定义为污染样品(123 件),其余定义为未污染样品(177 件)。

### 3 研究结果

300 件土壤样品的磁化率在  $1.29 \times 10^{-8} \sim 185.89 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  范围内变动,平均值为  $31.20 \times$

$10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。根据采样点位置(经纬度),通过 MapGIS 软件将磁化率测试结果作等值线图,并将结果与珠江三角洲行政区划图进行叠合(图 1)。

从磁化率等值线图看,珠江三角洲农业土壤磁化率具有明显的空间分异特征,呈南高北低、中心区高东西两翼低的空间分布格局。全区具 4 个明显的磁化率高值区,分别分布在:珠海、深圳、惠阳和顺德。按所在地进行统计分析,结果表明磁化率平均值按江门(57 件)、肇庆(27 件)、惠州(64 件)、广州(49 件)、东莞(21 件)、佛山(37 件)、中山(14 件)、深圳(18 件)、珠海(13 件)依次增加(见图 1)。全区磁化率的最高值出现在陶瓷工业基地顺德和以电子工业为主的惠阳,而平均值的高值出现在全国最早的两个经济特区珠海和深圳,低值出现在工业化、城市化水平相对较低的东西两翼,如江门、肇庆和惠州。上述农业土壤磁化率空间分布与当地的工业布局 and 城市化发展空间格局基本一致<sup>[29,30]</sup>,说明工业

生产、城市居民生活等人类活动对周围农业土壤影响较大,很有可能是农业土壤磁化率增强的主要影响因素之一。同时,统计分析结果发现各地市农业土壤磁化率结果的标准差较大,数据较离散,表明农业土壤磁化率高低可能受多种因素影响。

## 4 农业土壤磁化率影响因素分析

### 4.1 自然和人为因素

在众多自然和人为影响因素中分别选取土壤类型(包括滨海盐土和石灰土各2件,这两种类型土壤样品数量少,不具代表性,因此不予统计)、母岩与母质(其中2件为其他类型母质,不予统计)、地形条件和耕作方式、灌溉方式、土地利用类型等因素对农业土壤磁化率结果进行统计分析。结果如表1所示,所有样品磁化率平均值的变化次序依次为:潮土>赤红壤>水稻土;海相沉积母质>流水冲积、沉积母质>沉积岩残、坡积母质>火成岩残、坡积母质;丘陵>平原>山地。垄作耕>免耕>平翻耕;其他灌溉方式>无灌溉>漫灌;旱田>林地>水田。

从表1所列结果来看,在各影响因素中,在不同

地形条件下,平原、丘陵、山地土壤磁化率平均值之间差别不显著,单一的地形因素对磁化率高低的影响有限。不同土壤类型、灌溉方式、土地利用类型间土壤磁化率存在显著差别,各类型中磁化率最低值分别出现在水稻土、漫灌、水田土壤,这几种类型的共同特点是土壤长期被水所覆盖,处于还原性条件,这种还原性条件可能导致亚铁磁性矿物的破坏分解,因此其具有较低的磁化率;与刘秀铭等<sup>[31]</sup>对不同地区黄土-古土壤剖面磁化率研究得出在高湿的还原成壤条件下磁化率相对较低的结果类似。另外,不同耕作方式之间土壤磁化率也存在显著区别,垄作耕和免耕比平翻耕土壤磁化率高出2倍多,究其原因,可能是由于平翻耕的频繁翻动导致土壤中铁元素的大量流失<sup>[32]</sup>。与前人研究结果类似<sup>[33]</sup>,不同母岩与母质发育的土壤磁化率差异较大,冲、沉积型母质土壤磁化率普遍高于残、坡积型母质土壤,这应该是源于土壤母质中铁锰等元素含量的区别<sup>[34,35]</sup>。同时,表1中所列各类型土壤磁化率变化范围广,标准差都较大,数据离散,磁化率的高低很可能是多种因素共同作用的结果。

表1 不同类型农业土壤磁化率( $10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ )统计结果

Table 1 Statistical results of magnetic susceptibility for different type of agricultural soil

影响因素	类型(样品数量)	平均值	标准差	污染样品			未污染样品		
				范围	平均值	标准差	范围	平均值	标准差
土壤类型*	潮土(116)	39.36	36.60	3.17 ~ 185.89	49.74	41.19	3.62 ~ 129.26	25.66	23.58
	赤红壤(81)	34.28	34.91	12.18 ~ 183.72	51.34	54.12	4.46 ~ 151.60	30.41	28.04
	水稻土(99)	18.05	22.10	4.22 ~ 126.05	29.62	29.70	1.29 ~ 43.36	9.88	7.53
母岩与母质*	流水冲积沉积母质(65)	33.94	33.02	3.17 ~ 177.05	51.58	39.10	3.61 ~ 55.65	17.85	14.67
	火成岩残坡积母质(118)	29.79	44.63	6.08 ~ 185.89	38.73	39.88	1.29 ~ 131.94	23.88	25.35
	海相沉积母质(13)	41.17	32.61	10.03 ~ 104.85	37.88	40.23	4.00 ~ 151.60	43.22	49.78
	沉积岩残坡积母质(102)	30.05	33.41	4.22 ~ 183.72	43.70	42.77	3.59 ~ 86.29	21.24	20.87
地形条件	平原(215)	30.20	32.82	3.17 ~ 185.89	43.07	38.48	1.29 ~ 129.26	17.91	19.74
	丘陵(51)	37.95	42.51	4.22 ~ 183.72	53.64	59.72	3.62 ~ 151.60	32.58	34.21
	山地(34)	27.40	16.02	12.18 ~ 43.08	27.46	12.56	3.84 ~ 70.34	27.39	16.73
耕作方式	垄作耕(150)	36.27	36.84	3.17 ~ 185.89	46.31	38.82	3.59 ~ 129.26	24.15	22.90
	免耕(94)	35.54	31.03	6.75 ~ 183.72	53.77	50.71	3.84 ~ 151.60	29.29	27.64
	平翻耕(56)	10.33	8.86	4.22 ~ 48.07	15.79	12.89	1.29 ~ 30.05	7.95	4.96
灌溉方式	漫灌(56)	10.33	8.86	4.22 ~ 48.07	15.79	12.89	1.29 ~ 30.05	7.95	4.96
	无灌溉(58)	35.58	36.43	12.18 ~ 177.05	50.23	46.89	3.84 ~ 131.94	32.53	25.34
	其他(186)	36.12	30.36	3.17 ~ 185.89	47.77	41.34	3.59 ~ 151.60	23.68	25.12
土地利用类型	旱田(11)	38.11	20.80	26.93 ~ 65.39	42.17	16.66	6.30 ~ 71.54	34.37	27.68
	林地(148)	32.20	36.16	4.22 ~ 185.89	46.62	46.49	3.59 ~ 131.94	22.91	23.78
	水田(141)	29.61	30.90	3.17 ~ 177.05	40.77	35.90	1.29 ~ 151.60	21.58	23.90

\* 土壤类型中滨海盐土和石灰土各2件未予统计,母岩与母质中2件其他类型未予统计,见正文部分

## 4.2 重金属污染

近年来,国内外大量研究表明土壤重金属含量的高低与土壤磁化率之间存在明显的正相关关系,由于重金属元素对磁性颗粒的吸附等耦合或伴生关系,因而,重金属污染往往伴随着土壤磁性增强<sup>[36-38]</sup>。那么受众多因素共同影响的农业土壤情况又如何呢?本文对不同类型土壤重金属污染和未污染样品的磁化率进行了统计分析,300 件土壤样品中有 100 件的磁化率高于平均值,其中 61 件(只有 15 件采自东西两翼的惠州、江门和肇庆三地,其余均分布在工业化和城市化水平较高的珠江三角洲核心区)受到重金属污染,足见人类活动对农业土壤的影响。123 件受到重金属污染土壤样品磁化率变化范围为  $3.17 \times 10^{-8} \sim 185.89 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,平均值为  $43.55 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ;与之相对应,177 件未受污染土壤样品磁化率在  $1.29 \times 10^{-8} \sim 151.60 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  之间变化,平均值为  $22.62 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,尽管污染样品和未受污染样品磁化率变化范围有所重合,但其平均值之间存在显著区别。

在表 1 所列的 6 种因素中,所有人为因素影响的土壤样品重金属污染样品的磁化率均显著高于未污染样品,虽然重金属污染导致的土壤磁性增强机制尚不清楚,但这种结果至少说明人类活动导致的重金属污染对农业土壤磁性同样具明显的增强作用。分别对污染样品和未污染样品磁化率与各重金属元素含量进行相关分析。土壤磁化率与重金属元素含量间的相关系数如表 2 所示,未污染样品磁化率仅与具磁性的 Ni 和抗磁性的 Cu 呈显著正相关关系,而污染样品除与 Ni 和 Cu 显著正相关外,还与非磁性金属 Zn 和 Cr 之间呈显著正相关关系(表 2),这可能是人为源导致磁性颗粒和重金属含量同时增加造成的,也可能是土壤中重金属含量增加后导致

磁性颗粒通过各种耦合或伴生关系富集的结果;目前尚难以确定土壤磁性增强的发生机制,但可以认为人为原因造成土壤重金属污染对农业土壤磁化率高低起重要影响。

表 2 土壤磁化率与重金属元素含量的相关系数  
Table 2 Correlation coefficients between soil magnetic susceptibility and heavy metal contents

	Cu	Zn	Ni	Pb	Cr	Cd	As	Hg
污染样品 (123 件)	0.55 **	0.40 **	0.35 **	0.08	0.20 *	0.11	0.05	0.01
未污染样品 (177 件)	0.25 **	0.13	0.27 **	0.15	0.13	0.00	0.16	-0.16

\* 表示在 95% 的置信水平下显著相关

\*\* 表示在 99% 的置信水平下显著相关

## 4.3 因子分析

对母岩与母质、土地利用类型、土壤类型、灌溉方式、耕作方式及地形条件等描述性指标进行赋值后与低频磁化率一起利用 SPSS 软件进行的因子分析(迭代方法:主成分分析法),方差解释及因子矩阵结果如表 3 所示。前 3 个因素能解释总方差的 68.4%,其中第一个因子代表的是灌溉方式,能解释总方差的 30.5%,说明农业土壤磁化率主要反映的是土壤所处的氧化还原条件变化;第二个因子代表土地利用类型及母岩与母质,能解释总方差的 20.9%;第三个因子代表土壤类型,能解释总方差的 17.0%。因此,可以认为,农业土壤磁化率是上述各种因素综合影响的结果,其中以人为因素为主。因子分析的这种结果与前述分析基本一致,农业土壤磁化率的高低不仅取决于土壤发育母质中磁性物质含量的区别,在利用过程中土壤氧化还原环境的改变对土壤磁化率起更重要的决定性作用。

表 3 方差解释及因子矩阵

Table 3 Variances explanation and factor matrix

因子	初始特征值			变量					
	总特征值	方差百分数	累积百分数	母岩与母质	土地利用类型	耕作方式	灌溉方式	土壤类型	地形条件
1	2.135	30.50	30.50	-0.369	-0.286	0.691	0.902	0.247	0.724
2	1.462	20.88	51.38	0.783	0.828	0.126	0.221	0.101	0.252
3	1.194	17.05	68.43	0.036	-0.033	-0.462	0.027	0.575	0.407
4	0.914	13.05	81.48						
5	0.658	9.39	90.87						
6	0.471	6.73	97.60						
7	0.168	2.40	100.00						

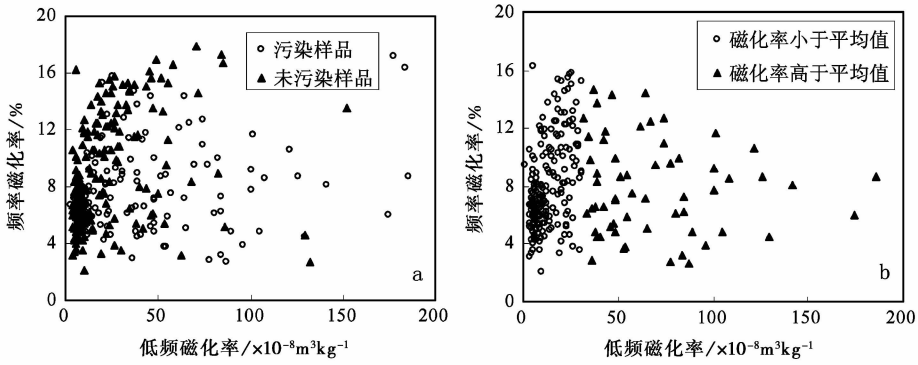


图2 低频磁化率与频率磁化率(%)的相关关系

Fig.2 Correlation between low-field magnetic susceptibility and frequency dependence susceptibility(%)

## 5 农业土壤磁化率的意义

频率磁化率反映的是超顺磁颗粒对磁化率的贡献<sup>[39]</sup>,黄土-古土壤的磁化率研究发现,成土过程中产生的超顺磁颗粒导致古土壤磁化率显著高于黄土,黄土-古土壤序列的磁化率可作为古气候古环境演变的代用指标<sup>[40-48]</sup>。对污染样品和未污染样品磁化率与频率磁化率进行相关关系分析发现,无论污染土壤样品还是未污染样品,磁化率与频率磁化率之间都存在一定的正相关关系(图2a),相关系数分别为0.186和0.315,说明农业土壤中含有相当比例的超细磁性颗粒并对磁化率起重要贡献。另外,在本次采集的表层农业土壤样品中,当磁化率小于平均值(200件样品)时,磁化率与频率磁化率呈显著正相关关系( $R^2=0.2142$ )(图2b),土壤发育形成过程中产生的超顺磁颗粒对磁化率起重要贡献;而磁化率大于平均值时,两者之间不存在明显相关关系(图2b),如前所述,磁化率高于平均值的100件土壤样品中大部分受重金属污染,说明受重金属污染的土壤中尚有其他来源的磁性矿物加入,因而磁化率普遍增强。因此,我们认为虽然重金属污染农业土壤的磁性增强机制尚待进一步的深入研究,但磁化率高低可间接指示农业土壤重金属污染程度。

## 6 结论

珠江三角洲农业土壤磁化率在 $1.29 \times 10^{-8} \sim 185.89 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 范围内变动,平均值为 $31.20 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,标准差达33.34,数据比较离散。珠江三角洲农业土壤磁化率具有明显的空间分异特征,呈北低南高、中心区高而东西两翼低的空间分布格局。磁化率平均值按江门、肇庆、惠州、广州、东莞、佛山、中山、深圳、珠海依次增加。

农业土壤磁化率的高低受多种自然与人为因素共同影响,其中又以人为因素为主。由于各种人类活动造成的土壤重金属污染对土壤磁化率高低起重要影响。同时,因子分析结果表明灌溉方式、土地利用类型和母岩与母质、土壤类型对农业土壤磁化率高低起主要作用,在较大空间尺度进行监测时,应特别注意上述各因素之间的区别。

农业土壤中含有相当比例的超细磁性颗粒并对磁化率起重要贡献。在本次采集的表层农业土壤样品中,当磁化率小于平均值时,磁化率与频率磁化率呈显著正相关关系;但当磁化率增高至超过平均值后这种相关性基本消失,受重金属污染的土壤中尚有其他来源的磁性矿物加入,磁化率普遍增强。虽然重金属污染农业土壤的磁性增强机制尚待进一步的深入研究,但磁化率高低可间接指示农业土壤重金属污染程度。

## 参考文献(References)

- 1 Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism. London: George Alien & Unwin, 1986. 22, 40
- 2 旺 罗, 刘东生, 吕厚远. 污染土壤的磁化率特征. 科学通报, 2000, **45**(10): 1091 ~ 1094  
Wang Luo, Liu Dongsheng, Lü Houyuan. Magnetic susceptibility properties of polluted soils. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(18): 1723 ~ 1726
- 3 Hoffmann V, Knab M, Appel E. Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution. *Journal of Geochemical Exploration*, 1999, **66**(1~2): 313 ~ 326
- 4 俞立中. 环境磁学在城市污染研究中的应用. 上海环境科学, 1999, **18**(4): 175 ~ 178  
Yu Lizhong. Application of environmental magnetism to urban pollution study. *Shanghai Environmental Science*, 1999, **18**(4): 175 ~ 178
- 5 Boyko T, Scholger R, Stanjek H *et al.* Topsoil magnetic susceptibility mapping as a tool for pollution monitoring: Repeatability of in situ

- measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 2004, **55** (3 ~ 4) : 249 ~ 259
- 6 王冠, 夏敦胜, 刘秀铭等. 兰州市城市街道尘埃磁学特征时空变化规律. *科学通报*, 2008, **53** (4) : 446 ~ 455  
Wang Guan, Xia Dunsheng, Liu Xiuming *et al.* Spatial and temporal variation in magnetic properties of street dust in Lanzhou City, China. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53** (12) : 1913 ~ 1923
- 7 李鹏, 强小科, 唐艳荣等. 西安市街道灰尘磁化率特征及其污染指示意义. *中国环境科学*, 2010, **30** (3) : 309 ~ 314  
Li Peng, Qiang Xiaoke, Tang Yanrong *et al.* Magnetic susceptibility of the dust of street in Xi'an and the implication on pollution. *China Environmental Science*, 2010, **30** (3) : 309 ~ 314
- 8 张崧, Heller F, 勒春胜等. 2006年4月17日北京降尘的粒度分布与磁学特征. *第四纪研究*, 2008, **28** (2) : 354 ~ 362  
Zhang Song, Heller F, Jin Chunsheng *et al.* Grain size distribution and magnetic characteristics of dust fall in Beijing on April 17, 2006. *Quaternary Sciences*, 2008, **28** (2) : 354 ~ 362
- 9 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. *第四纪研究*, 2007, **27** (6) : 1053 ~ 1062  
Zhang Weiguo, Dai Xuerong, Zhang Furui *et al.* Magnetic properties of sediments from the Chaohu Lake for the last 7000 years and their implications for the evolution of Asian monsoon. *Quaternary Sciences*, **27** (6) : 1053 ~ 1062
- 10 张春霞, 黄宝春, 骆仁松等. 钢铁厂附近树木年轮的磁学性质及其环境意义. *第四纪研究*, 2007, **27** (6) : 1092 ~ 1104  
Zhang Chunxia, Huang Baochun, Luo Rensong *et al.* Magnetic properties of tree ring samples close to a smelting factory and their environmental significance. *Quaternary Sciences*, 2007, **27** (6) : 1092 ~ 1104
- 11 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. *第四纪研究*, 2007, **27** (6) : 1113 ~ 1120  
Shen Mingjie, Hu Shouyun, Blaha U *et al.* Mineral magnetic properties of soil profile and their application in traffic pollution measurements; A case study from the capital airport expressway in Beijing. *Quaternary Sciences*, 2007, **27** (6) : 1113 ~ 1120
- 12 段雪梅, 胡守云, 杨涛. 武汉市汤逊湖沉积物重金属垂向变化的磁响应特征及环境意义. *第四纪研究*, 2007, **27** (6) : 1105 ~ 1112  
Duan Xuemei, Hu Shouyun, Yang Tao. Vertical variation of heavy metals and its magnetic response property and environmental significance in core sediment from Lake Tangxun, Wuhan, China. *Quaternary Sciences*, 2007, **27** (6) : 1105 ~ 1112
- 13 Bityukova L, Scholger R, Birke M. Magnetic susceptibility as indicator of environmental pollution of soils in Tallinn. *Physics and Chemistry of the Earth Part A—Solid Earth and Geodesy*, 1999, **24** (9) : 829 ~ 835
- 14 Wang Xuesong, Qing Yong. Correlation between magnetic susceptibility and heavy metals in urban topsoil; A case study from the city of Xuzhou, China. *Environmental Geology*, 2005, **49** (1) : 10 ~ 18
- 15 杨小强, 张轶男, 张澄博等. 矿山重金属污染土壤的磁化率特征及其意义——以广东大宝山多金属矿床为例. *中山大学学报(自然科学版)*, 2006, **45** (4) : 98 ~ 102  
Yang Xiaoqiang, Zhang Yinan, Zhang Chengbo *et al.* The magnetic susceptibility characteristics and its significance of heavy metals polluted soils in mine area—A case study in Dabaoshan polymetallic ore deposit, Guangdong. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2006, **45** (4) : 98 ~ 102
- 16 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. *Geophysical Journal International*, 2007, **171** (2) : 568 ~ 580
- 17 Blaha U, Appel E, Stanjek H. Determination of anthropogenic boundary depth in industrially polluted soil and semi-quantification of heavy metal loads using magnetic susceptibility. *Environmental Pollution*, 2008, **156** (2) : 278 ~ 289
- 18 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. *现代地质*, 2008, **22** (6) : 1034 ~ 1040  
Yu Tao, Yang Zhongfang, Cen Jing *et al.* The study of magnetic susceptibility as the indication of contaminated soil with heavy metals: The case of Xinchengzi district in Shenyang. *Geoscience*, 2008, **22** (6) : 1034 ~ 1040
- 19 Karimi R, Ayoubi S, Jalalian A *et al.* Relationship between magnetic susceptibility and heavy metals in urban topsoils in the arid region of Isfahan, Central Iran. *Journal of Applied Geophysics*, 2011, **74** (1) : 1 ~ 7
- 20 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. *土壤学报*, 2011, **48** (2) : 429 ~ 434  
Zhang Guo, Hu Xuefeng, Wu Xiaohong *et al.* Vertical distribution of magnetic susceptibility in urban soil profiles in Shanghai and its environmental implications. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, **48** (2) : 429 ~ 434
- 21 Matysek D, Raclavska H, Raclavsky K. Correlation between magnetic susceptibility and heavy metal concentrations in forest soils of the eastern Czech Republic. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2008, **13** (1) : 13 ~ 26
- 22 Lin G C S. Metropolitan development in a transitional socialist economy: Spatial restructuring in the Pearl River Delta, China. *Urban Studies*, 2001, **38** (3) : 383 ~ 406
- 23 Site V F S, Yang C. Foreign-investment-induced exo-urbanisation in the Pearl River Delta, China. *Urban Studies*, 1997, **34** (4) : 647 ~ 677
- 24 广东省统计局, 国家统计局广东调查总队. 2011 广东省统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2011  
Statistics Bureau of Guangdong Province, Guangdong Survey Office of National Bureau of Statistics. 2011 Guangdong Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2011
- 25 广东省人口普查办公室. 广东省 2000 年人口普查资料(一). 北京: 中国统计出版社, 2002  
Population Census Office of Guangdong Province. Tabulation on the 2000 Population Censuses of Guangdong Province (1). Beijing: China Statistics Press, 2002
- 26 高杨, 吴志峰, 刘晓南等. 珠江三角洲景观空间格局分析. *热带地理*, 2008, **28** (1) : 26 ~ 31  
Gao Yang, Wu Zhifeng, Liu Xiaonan *et al.* An analysis of landscape spatial pattern in the Pearl River Delta. *Tropical Geography*, 2008, **28** (1) : 26 ~ 31

- 27 杨国义,罗薇,张天彬等. 珠江三角洲典型区域农业土壤中镍的含量分布特征. 生态环境, 2007, **16**(3): 818 ~ 821  
Yang Guoyi, Luo Wei, Zhang Tianbin *et al.* The distribution of Ni contents in agricultural soils in the Pearl River Delta, China. *Ecology and Environment*, 2007, **16**(3): 818 ~ 821
- 28 杨国义,张天彬,万洪富等. 广东省典型区域农业土壤中重金属污染空间差异及原因分析. 土壤, 2007, **39**(3): 387 ~ 392  
Yang Guoyi, Zhang Tianbin, Wan Hongfu *et al.* Spatial distribution and sources of heavy metal pollution of agricultural soils in the typical areas of Guangdong Province, China. *Soils*, 2007, **39**(3): 387 ~ 392
- 29 张文忠,王传胜,吕昕等. 珠江三角洲土地利用变化与工业化和城市化的耦合关系. 地理学报, 2003, **58**(5): 677 ~ 685  
Zhang Wenzhong, Wang Chuansheng, Lü Xin *et al.* Coupling relationship between land use change and industrialization & urbanization in the Zhujiang River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 2003, **58**(5): 677 ~ 685
- 30 Ouyang T P, Kuang Y Q, Hu Z Y *et al.* Urbanization in the Pearl River delta economic zone, China. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2005, **12**(1): 48 ~ 54
- 31 刘秀铭,夏敦胜,刘东生等. 中国黄土和阿拉斯加黄土磁化率气候记录的两种模式探讨. 第四纪研究, 2007, **27**(2): 210 ~ 220  
Liu Xiuming, Xia Dunsheng, Liu Tungsheng *et al.* Discussion on two models of paleoclimatic records of magnetic susceptibility of Alaskan and Chinese loess. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(2): 210 ~ 220
- 32 吕世华,刘本洪,胡思农. 不同耕作方式下石灰性土壤锰、铁形态的研究. 土壤通报, 1995, **26**(2): 70 ~ 72  
Lü Shihua, Liu Benhong, Hu Sinong. Study on calcareous soil manganese, iron form under different tillage. *Chinese Journal of Soil Science*, 1995, **26**(2): 70 ~ 72
- 33 饶志国,朱照宇,吴翼等. 华南地区发育于不同母岩之上的表土磁化率特征及其意义. 第四纪研究, 2007, **27**(4): 651 ~ 652  
Rao Zhiguo, Zhu Zhaoyu, Wu Yi *et al.* Magnetic susceptibility of top soil developed from different parent rock in Southern China and its implications. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(4): 651 ~ 652
- 34 廖新荣,陈飞,黄顺忠等. 广东省杨村华侨柑桔场土壤微量元素含量与分布的研究. 热带亚热带土壤科学, 1998, **7**(1): 41 ~ 46  
Liao Xinrong, Chen Fei, Huang Shunzhong *et al.* Study on the content and distribution of trace element in the soils of Yangcun Overseas Chinese Orange Farm in Guangdong. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1998, **7**(1): 41 ~ 46
- 35 陶澍,曹军,李本纲等. 深圳市土壤微量元素含量成因分析. 土壤学报, 2011, **38**(2): 248 ~ 255  
Tao Shu, Cao Jun, Li Bengang *et al.* Distribution pattern of trace elements in soil from Shenzhen area. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, **38**(2): 248 ~ 255
- 36 Petrovsky E, Kapicka A, Jordanova N *et al.* Low-field magnetic susceptibility: A proxy method of estimating increased pollution of different environmental systems. *Environmental Geology*, 2000, **39**(3 ~ 4): 312 ~ 318
- 37 D'Emilio M, Cagguabi R, Coppola R *et al.* Magnetic susceptibility measurements as proxy method to monitor soil pollution: The case study of S. Nicola di Melfi. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **169**(1 ~ 4): 619 ~ 630
- 38 琚宜太,王少怀,张庆鹏等. 福建三明地区被污染土壤的磁性物质及其环境意义. 地球物理学报, 2004, **47**(2): 282 ~ 288  
Ju Yitai, Wang Shaohuai, Zhang Qingpeng *et al.* Mineral magnetic properties of polluted topsoils: A case study in Sanming City, Fujian Province, South East China. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, **47**(2): 282 ~ 288
- 39 刘青松,邓成龙. 磁化率及其环境意义. 地球物理学报, 2009, **52**(4): 1041 ~ 1048  
Liu Qingsong, Deng Chenglong. Magnetic susceptibility and its environmental significances. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, **52**(4): 1041 ~ 1048
- 40 Maher B A, Thompson R. Paleorainfall reconstructions from pedogenic magnetic susceptibility variations in the Chinese loess and paleosols. *Quaternary Research*, 1995, **44**(3): 383 ~ 391
- 41 韩家懋,姜文英,褚骏. 黄土和古土壤中磁性矿物的粒度分布. 第四纪研究, 1997, (3): 281 ~ 287  
Han Jiamao, Jiang Wenying, Chu Jun. Grain size distribution of magnetic minerals in loess and paleosol. *Quaternary Sciences*, 1997, (3): 281 ~ 287
- 42 乔彦松,赵志中,王燕等. 川西甘孜黄土磁性地层学研究及其古气候意义. 第四纪研究, 2006, **26**(2): 250 ~ 256  
Qiao Yansong, Zhao Zhizhong, Wang Yan *et al.* Magnetostratigraphy and its paleoclimatic significance of a loess-soil sequence from Ganzi area, west Sichuan Plateau. *Quaternary Sciences*, 2006, **26**(2): 250 ~ 256
- 43 邓成龙,刘青松,潘永信等. 中国黄土环境磁学. 第四纪研究, 2007, **27**(2): 193 ~ 209  
Deng Chenglong, Liu Qingsong, Pan Yongxin *et al.* Environmental magnetism of Chinese loess-paleosol sequences. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(2): 193 ~ 209
- 44 夏敦胜,陈发虎,马剑英等. 新疆伊犁地区典型黄土磁学特征及其环境意义初探. 第四纪研究, 2010, **30**(5): 902 ~ 910  
Xia Dunsheng, Chen Fahu, Ma Jianying *et al.* Magnetic characteristics of loess in the Ili area and their environmental implication. *Quaternary Sciences*, 2010, **30**(5): 902 ~ 910
- 45 贾佳,夏敦胜,魏海涛等. 耀县黄土记录的全新世东亚冬夏季风非同步演化. 第四纪研究, 2009, **29**(5): 966 ~ 975  
Jia Jia, Xia Dunsheng, Wei Haitao *et al.* Asynchronous evolution of East Asia summer and winter monsoons of the Holocene recorded by Yao County loess. *Quaternary Sciences*, 2009, **29**(5): 966 ~ 975
- 46 咎金波,杨胜利,方小敏等. 西昆仑山黄土的岩石磁学特征及其磁化率增强机制. 第四纪研究, 2010, **30**(1): 46 ~ 53  
Zan Jinbo, Yang Shengli, Fang Xiaomin *et al.* Rock-magnetic characteristics and the enhancing mechanism of magnetic susceptibility for west Kunlun Mountains loess. *Quaternary Sciences*, 2010, **30**(1): 46 ~ 53
- 47 刘秀铭,毛学刚,丁仲礼等. 黄土古气候变化趋势与青藏高原隆升关系初探. 第四纪研究, 2009, **29**(5): 988 ~ 999  
Liu Xiuming, Mao Xuegang, Ding Zhongli *et al.* Study on the relation between loess paleoclimate trend and uplift of Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences*, 2009, **29**(5): 988 ~ 999
- 48 刘秀铭,马明明, Hesse P 等. 澳大利亚黄土磁学性质及环境意义. 第四纪研究, 2011, **31**(5): 837 ~ 848  
Liu Xiuming, Ma Mingming, Hesse P *et al.* Magnetic properties of loess deposits in Australia and its environmental significances. *Quaternary Sciences*, 2011, **31**(5): 837 ~ 848

# SPATIAL DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF AGRICULTURAL SOILS AND ANALYSIS OF ITS INFLUENCING FACTORS FOR THE PEARL RIVER DELTA, CHINA

Ouyang Tingping<sup>①</sup> Wan Hongfu<sup>②</sup> Zhang Jinlan<sup>③</sup> Huang Ningsheng<sup>①</sup> Zhu Zhaoyu<sup>①</sup> Tian Chengjing<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640;

<sup>②</sup>Guangdong Institute of Eco-environment and Soil Sciences, Guangzhou 510650; <sup>③</sup>Guangdong College of Industry and Commerce, Guangzhou 510510)

## Abstract

Magnetic susceptibility is one of the most basic and easy to be obtained magnetic parameters. A large number of research indicated that it can be used as a proxy for the monitoring of soil heavy metal pollution. Three hundred agricultural soil samples, including 123 samples polluted by heavy metal and 177 samples without heavy metal pollution, were selected from the Pearl River Delta (PRD), which has become one of the most vigorous economic regions in China, and even in the world since late 1970s. Both low (976Hz) and high (15616Hz) frequency susceptibility ( $\chi_{lf}$  and  $\chi_{hf}$  respectively) were determined using a Kappabridge MFK1-FA triple frequency susceptibility meter (AGICO). Frequency-dependence magnetic susceptibility ( $\chi_{fd}$ ) was calculated from the expression  $\chi_{fd}(\%) = [(\chi_{lf} - \chi_{hf})/\chi_{lf}] \times 100$ . The results showed that MS of these 300 samples ranged from  $1.29 \times 10^{-8}$  to  $185.89 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , and the average value was  $31.20 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ . Overlay analysis for contour map of MS and administrative map of the PRD indicated that significant spatial distributed difference of agricultural soil MS existed within the PRD. MS of agricultural soil was higher at southern area but lower at northern area, and higher within central area but lower within the eastern and western areas. Four regions with obvious high magnetic susceptibility values were distributed at Zhuhai, Shenzhen, Huiyang and Shunde. Considering many factors including natural and anthropogenic activities, factor analysis was performed using statistical software SPSS 13.0. The results indicated that MS of agricultural soil was mainly controlled by irrigation method, land-use type, mother rock type, and soil type. Difference of these factors should be paid much attention during large spatial scale monitoring. Meanwhile, average MS value of heavy metal polluted samples was much higher than that of non-polluted samples, possibly indicating that MS of agricultural soil was enhanced obviously by heavy metal pollution. Though the mechanism of magnetic enhancement for heavy metal polluted agricultural soil retains unclear, soil magnetic susceptibility can indicate heavy metal pollution degree for agricultural soil.

**Key words** agricultural soil, magnetic susceptibility, spatial distribution, influencing factor, the Pearl River Delta