

卞勇, 欧阳婷萍, 万洪富, 匡耀求, 黄宁生. 广东韶关市农业土壤磁学性质的空间分布及其影响因素[J]. 热带地理, 2014, 34(3): 327-336.

# 广东韶关市农业土壤磁学性质的空间分布及其影响因素

卞勇<sup>1,2</sup>, 欧阳婷萍<sup>1</sup>, 万洪富<sup>3</sup>, 匡耀求<sup>1</sup>, 黄宁生<sup>1</sup>

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 广东省生态环境与土壤研究所, 广州 510650)

**摘要:** 环境磁学方法具有快速、经济、非破坏性等优点, 在农业土壤方面具有较高的研究价值与应用潜力。选取广东省韶关市范围内的32个耕地和65个林地表层土壤样品进行环境磁学分析, 测试其高、低频磁化率, 非磁滞剩磁与饱和等温剩磁等磁学参数, 分析农业土壤磁学性质的空间分布特征及其影响因素, 以及磁学指标之间的相关性。结果表明: 韶关市农业土壤磁学参数在空间上存在较大变异性, 曲江、新丰和乐昌北部的磁性矿物质量分数较高, 乳源、武江、始兴南部和翁源北部的磁性矿物粒度较细。土地利用方式是研究区内农业土壤磁学性质的主要影响因素, 耕地的磁性颗粒粒径比林地粗, 磁性矿物质量分数比林地低。母质类型对农业土壤磁学性质的影响程度不及土地利用类型, 可能由于农业土壤受人为因素的影响比母质更显著。人为排放源, 包括工业活动和交通运输, 对农业表层土壤磁性有明显的增强效应, 对磁性物质的粒径分布也有一定的影响。

**关键词:** 农业土壤; 磁学性质; 对应分析; 韶关市

中图分类号: S153

文献标志码: A

文章编号: 1001-5221(2014)03-0327-10

DOI:10.13284/j.cnki.rddl.002566

环境磁学是近年来发展较快的基于物质磁学性质的研究手段, 因其测试快速、经济、非破坏性等优点, 已被广泛应用于古环境<sup>[1-5]</sup>和物源分析<sup>[6-9]</sup>等领域。土壤磁性在指示沉积物源、大气污染、考古、古气候代用指标等方面<sup>[10]</sup>具有诸多应用价值。目前, 国内外已有较多关于土壤磁学性质影响因素方面的研究。母质类型被认为是土壤磁性的决定性因素<sup>[10-12]</sup>, 母质中铁元素的供给量决定了在风化过程中次生亚铁磁性矿物形成的数量<sup>[13-14]</sup>。气候是影响土壤磁性的另一个主要因素, 在由气候因子决定的一系列成土过程中, 原生矿物转化成次生磁性矿物<sup>[15]</sup>, 这些过程控制着铁元素的供给能力<sup>[14]</sup>, 从而影响土壤的磁性。排水状况对土壤中磁性矿物的转化有重要的影响, 一般来说, 排水状况不良的土壤中, 磁性矿物易于还原、溶解或流失, 磁性强度大幅降低<sup>[12,16-17]</sup>。除自然因素外, 工业活动或交通运输排放的污染物中携带亚铁磁性物质, 这些物质在土壤中的积累, 能显著增强土壤的磁性强度<sup>[18-20]</sup>。

农业土壤是与人们生活和健康息息相关的环境介质, 对农业土壤磁学性质的研究可为快速反映土壤肥力<sup>[21]</sup>和污染状况等信息提供新的视角和手段。然而, 我国目前对农业土壤的环境磁学研究较少, 相关研究主要为对工业污染物的检测<sup>[22-23]</sup>, 对象主要集中在水稻土<sup>[24-26]</sup>。本文以广东省韶关市为研究区, 基于在区域内采集的农业土壤表层样品的磁学测试数据, 利用空间插值得出农业土壤磁学参数的空间分布状况, 运用相关分析和多重对应分析等统计方法, 分析影响亚热带农业土壤磁学性质的自然因素和人为因素。以为环境磁学在农业土壤方面的应用研究提供理论基础及开拓思路。

## 1 研究区自然环境概况

韶关市位于广东省北部, 总面积  $1.86 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 地理位置为  $23^\circ 53' - 25^\circ 31' \text{ N}$ ,  $112^\circ 50' - 114^\circ 45' \text{ E}$ 。区域内地貌以低山和丘陵为主, 地势由西北向东南倾斜。研究区位于珠江水系北江流域, 北江发源于

收稿日期: 2014-03-01; 修回日期: 2014-04-07

基金项目: 国家自然科学基金委员会-广东联合基金项目(U1201131); 广东省中国科学院全面战略合作项目(2012B090400045); 广东省科技计划项目(2011B030500031)

作者简介: 卞勇(1986-), 男, 广州人, 博士研究生, 主要从事环境磁学及区域环境变化研究, (E-mail) bianyong@gig.ac.cn.

江西省南部信丰县,依次流经南雄市、始兴县、浈江区和曲江区;主要支流有墨江、锦江和武江。山间河流处分布有河谷盆地,曲江、乐昌和仁化有较大的冲积平原。山地的主要成土母质岩性为花岗岩和砂页岩,丘陵的主要成土母质岩性为石灰岩和砂页岩,平原区域的成土母质则为河流冲积物质和红壤性沉积物<sup>[27]</sup>。天然土壤类型主要为红壤和黄壤。

## 2 样品采集与分析测试

本研究农业土壤样品由广东省生态环境与土壤研究所于2007—2008年在韶关市内采集并记录采样信息。样品总数为97个,均匀分布于韶关市境内

(图1)。样品按土地利用类型可分为32个耕地样品和65个林地样品;按母质类型可分为46个沉积岩残、坡积母质,36个火成岩残、坡积母质和15个其他母质(包括海相沉积母质、流水冲积沉积母质等样品数量较少的类别)。耕地的发生学土壤类型主要为水稻土,其次为潮土;耕作方式主要为平翻耕,灌溉方式主要为漫灌。林地的发生学土壤类型主要为红壤和黄壤;耕作方式为免耕,灌溉方式为无灌溉;植被为天然或人工的阔叶林、针叶林或针阔叶混交林。母质类型方面,沉积岩残、坡积母质发育的土壤主要以砂页岩和石灰岩残积和坡积物为母质;火成岩残、坡积母质发育的土壤主要以花岗岩残积和坡积物为母质。

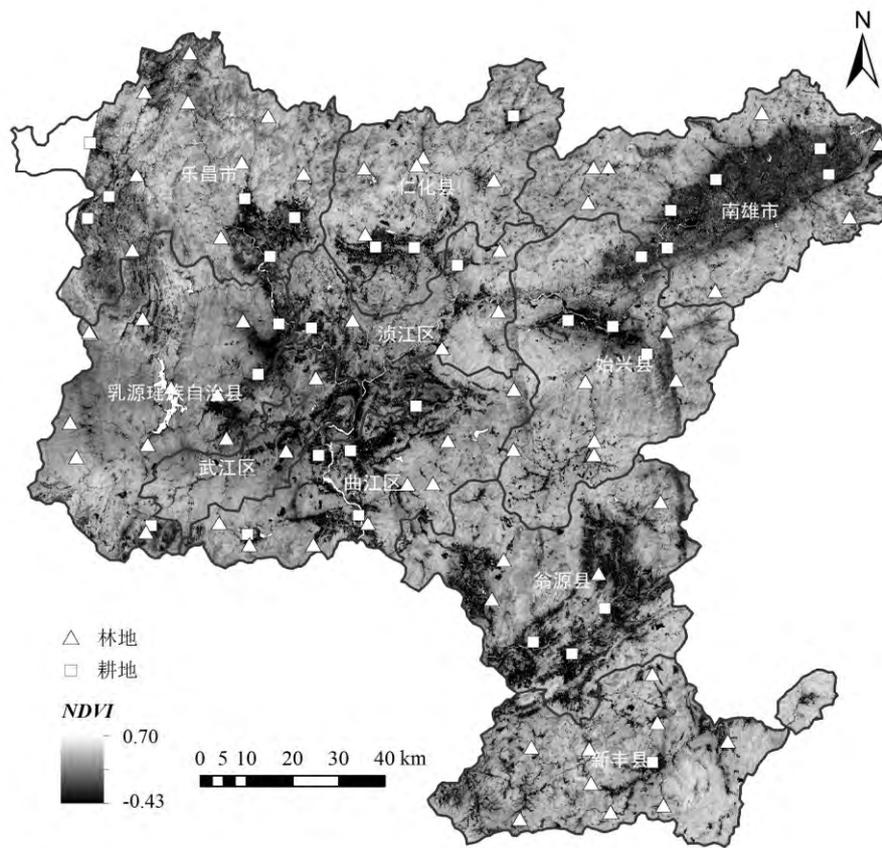


图1 样品采样点分布及其土地利用类型以及韶关市2007年归一化差值植被指数(NDVI)

Fig.1 Sampling sites and their land-use types, with the background of Normalized-Difference Vegetation Index (NDVI) of Shaoguan in 2007

所采集的样品为表层0~20 cm土壤,去除砂砾和植物根系,在室温下晾干后研磨至过100目网筛。对样品准确称重(精确至mg)后装入边长为2 cm的无磁性塑料立方盒。用卡帕桥多频各向异性磁化率仪(MFK1-FA)测量样品的低频(976 Hz)和高频(15 616 Hz)磁化率(分别表示为 $\chi_{lf}$ 和 $\chi_{hf}$ )

并作质量归一化处理。根据公式(1)计算频率磁化率系数 $\chi_{fd}$ 。样品在交变退磁仪D-2000场强为100 mT的交变退磁场中退磁,同时施加弱直流磁场0.05 mT,使样品获得非磁滞剩磁(ARM),换算为质量归一化的磁化率形式 $\chi_{ARM}$ 。将样品置于脉冲磁力仪(IM-10-30)产生的2 T磁场下获得的等温剩磁视为

饱和等温剩磁 (*SIRM*)。 *ARM* 和 *SIRM* 均在旋转磁力仪 (JR-6A) 上测试。磁学参数测试在中国科学院广州地球化学研究所环境磁学实验室完成。

$$\chi_{fd} = (\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf} \times 100\% \quad (1)$$

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 磁学参数描述性统计结果

全部样品、不同土地利用类型和母质类型的样品磁学参数测试的描述性统计结果列于表 1。其中,  $\chi_{lf}$ 、 $\chi_{ARM}$  和 *SIRM* 均指示磁性矿物的质量分数,  $\chi_{fd}$

指示超顺磁 (SP) 和单畴 (SD) 粒径边界处附近磁性颗粒的相对质量分数<sup>[28]</sup>; 比值  $\chi_{ARM}/SIRM$  指示非 SP 颗粒的粒径大小<sup>[13]</sup>, 值越大代表细颗粒越多。由表 1 可知, 母质之间各参数的均值相差不大, 而在土地利用类型的比较中, 林地各参数均值均比耕地大。表征磁性矿物质量分数的参数的变异系数比表征磁性颗粒粒度的参数的变异系数大, 说明样品中磁性矿物质量分数比粒径的变异性大。耕地各参数变异系数均比林地大, 反映影响耕地磁学参数的因素可能比林地复杂, 参数变化范围较大。

表 1 样品磁学参数的描述性统计结果

Tab. 1 Descriptive statistics results of magnetic parameters

磁学参数	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数	
全部样品 (97 个)	$\chi_{lf}$ ( $10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	3.73	386.49	42.77	56.93	1.331
	$\chi_{ARM}$ ( $10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	1.73	968.78	158.19	192.53	1.217
	<i>SIRM</i> ( $10^{-3} \text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.17	21.88	3.11	3.92	1.262
	$\chi_{fd}/\%$	2.01	17.80	9.96	4.47	0.448
	$(\chi_{ARM}/SIRM) / (10^{-3} \text{m} \cdot \text{A}^{-1})$	0.02	1.71	0.63	0.42	0.678
耕地 (32 个)	$\chi_{lf}$ ( $10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	3.73	251.63	27.75	46.86	1.689
	$\chi_{ARM}$ ( $10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	1.73	907.30	111.57	178.95	1.604
	<i>SIRM</i> ( $10^{-3} \text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.17	17.05	2.79	3.69	1.320
	$\chi_{fd}/\%$	3.50	17.13	6.84	3.31	0.485
	$(\chi_{ARM}/SIRM) / (10^{-3} \text{m} \cdot \text{A}^{-1})$	0.03	1.47	0.42	0.28	0.667
林地 (65 个)	$\chi_{lf}$ ( $10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	4.17	386.49	50.17	60.24	1.201
	$\chi_{ARM}$ ( $10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	3.17	968.78	181.14	196.13	1.083
	<i>SIRM</i> ( $10^{-3} \text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.38	21.88	3.26	4.06	1.242
	$\chi_{fd}/\%$	2.01	17.80	11.50	4.16	0.362
	$(\chi_{ARM}/SIRM) / (10^{-3} \text{m} \cdot \text{A}^{-1})$	0.02	1.71	0.73	0.45	0.615
沉积岩残、 坡积母质 (46 个)	$\chi_{lf}$ ( $10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	4.03	251.63	45.40	53.60	1.180
	$\chi_{ARM}$ ( $10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	3.74	968.78	173.34	228.90	1.321
	<i>SIRM</i> ( $10^{-3} \text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.17	21.88	3.12	4.10	1.313
	$\chi_{fd}/\%$	2.01	17.80	9.96	4.60	0.462
	$(\chi_{ARM}/SIRM) / (10^{-3} \text{m} \cdot \text{A}^{-1})$	0.03	1.63	0.63	0.43	0.688
火成岩残、 坡积母质 (36 个)	$\chi_{lf}$ ( $10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	5.03	386.49	41.59	69.99	1.683
	$\chi_{ARM}$ ( $10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	1.73	710.46	137.67	162.57	1.181
	<i>SIRM</i> ( $10^{-3} \text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.38	17.05	3.02	4.13	1.367
	$\chi_{fd}/\%$	2.10	17.62	10.43	4.38	0.420
	$(\chi_{ARM}/SIRM) / (10^{-3} \text{m} \cdot \text{A}^{-1})$	0.02	1.71	0.67	0.47	0.693
其他母质 (15 个)	$\chi_{lf}$ ( $10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	3.73	84.87	37.53	26.23	0.699
	$\chi_{ARM}$ ( $10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	9.24	463.93	160.97	133.57	0.830
	<i>SIRM</i> ( $10^{-3} \text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.25	11.83	3.27	2.98	0.910
	$\chi_{fd}/\%$	3.69	15.68	8.85	4.34	0.490
	$(\chi_{ARM}/SIRM) / (10^{-3} \text{m} \cdot \text{A}^{-1})$	0.18	1.13	0.51	0.28	0.541

#### 3.2 土壤磁学参数空间分布

图 2 为  $\chi_{lf}$ 、 $\chi_{ARM}$ 、*SIRM*、 $\chi_{fd}$  以及比值  $\chi_{ARM}/SIRM$  在 ArcGIS 软件里通过普通 Kriging 插值得到的空间分布等值线图。各参数在空间上呈现出较大的变异性,  $\chi_{lf}$ 、 $\chi_{ARM}$  和 *SIRM* 均在曲江和乐昌境内呈现高

值。  $\chi_{lf}$  和 *SIRM* 在空间分布上较相似, 在新丰也显示为高值区, 而仁化东部、南雄西部、浈江东部和始兴北部是主要的低值区。  $\chi_{fd}$  和  $\chi_{ARM}/SIRM$  空间分布较相似, 不连续的高值区分布在韶关中部的翁源、始兴、武江和乳源。

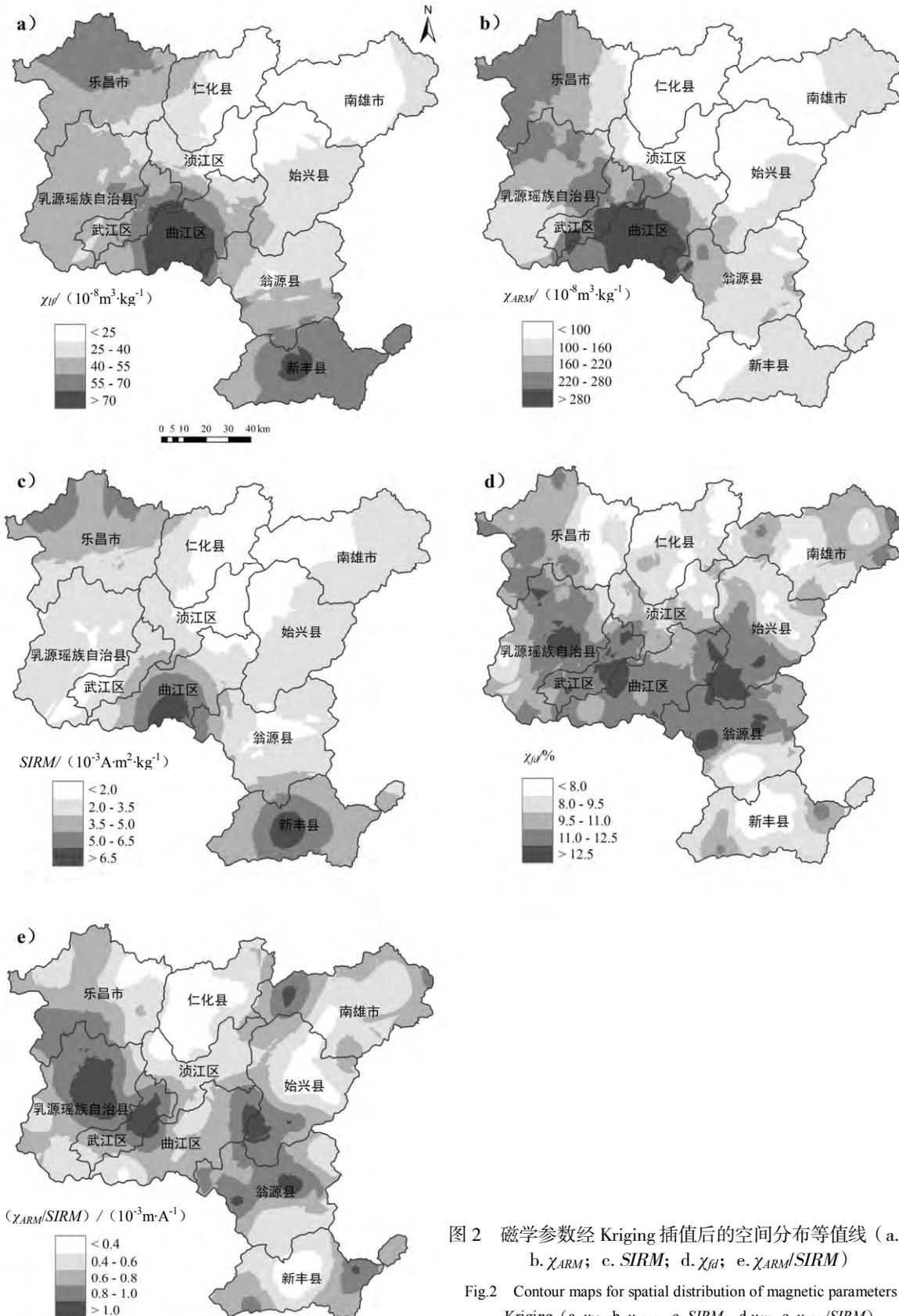


图2 磁学参数经 Kriging 插值后的空间分布等值线 (a.  $\chi_{lf}$ ; b.  $\chi_{ARM}$ ; c.  $SIRM$ ; d.  $\chi_{fd}$ ; e.  $\chi_{ARM}/SIRM$ )

Fig.2 Contour maps for spatial distribution of magnetic parameters via Kriging (a.  $\chi_{lf}$ ; b.  $\chi_{ARM}$ ; c.  $SIRM$ ; d.  $\chi_{fd}$ ; e.  $\chi_{ARM}/SIRM$ )

## 4 讨论

### 4.1 磁学参数在母质类型与土地利用类型间的差异

磁学参数按母质类型和土地利用类型分组制作误差棒图(图3)。可以发现,不同母质类型的样品在各种磁性矿物质量分数和粒度参数比较上均没有显著性差异,反映了不同母质发育的土壤中磁性矿物的质量分数及粒径等特征差异不大。在不同土地利用类型的比较中,耕地的 $\chi_{fd}$ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 比林地小,说明2种类型的磁性矿物粒度存在显著性差异,耕地比林地含有更多粗颗粒磁性矿物;2组的 $\chi_{fd}$ 和 $\chi_{ARM}$ 也有一定的差异,耕地的值比林地小,但不如

磁性矿物粒度参数的差异显著(误差棒存在区间重合)。不同土地利用类型的磁性粒度参数有显著的差异,磁性矿物质量分数参数也表现出一定程度的差异性,而不同母质类型的磁学性质没有显著的差异,这说明农业土壤在长期强烈的人类活动影响下,母质中的原生磁性矿物已发生较大改变。不同土地利用方式对土壤理化性质的改变有显著差异,从而使不同土地利用类型的土壤磁学性质有显著的差异,这也消除了不同母质类型之间的磁学性质差异。因此,人类活动对土壤表层磁学性质的影响比母质类型的影响更显著,这与 Hanesch 等<sup>[12]</sup>的结论相一致。

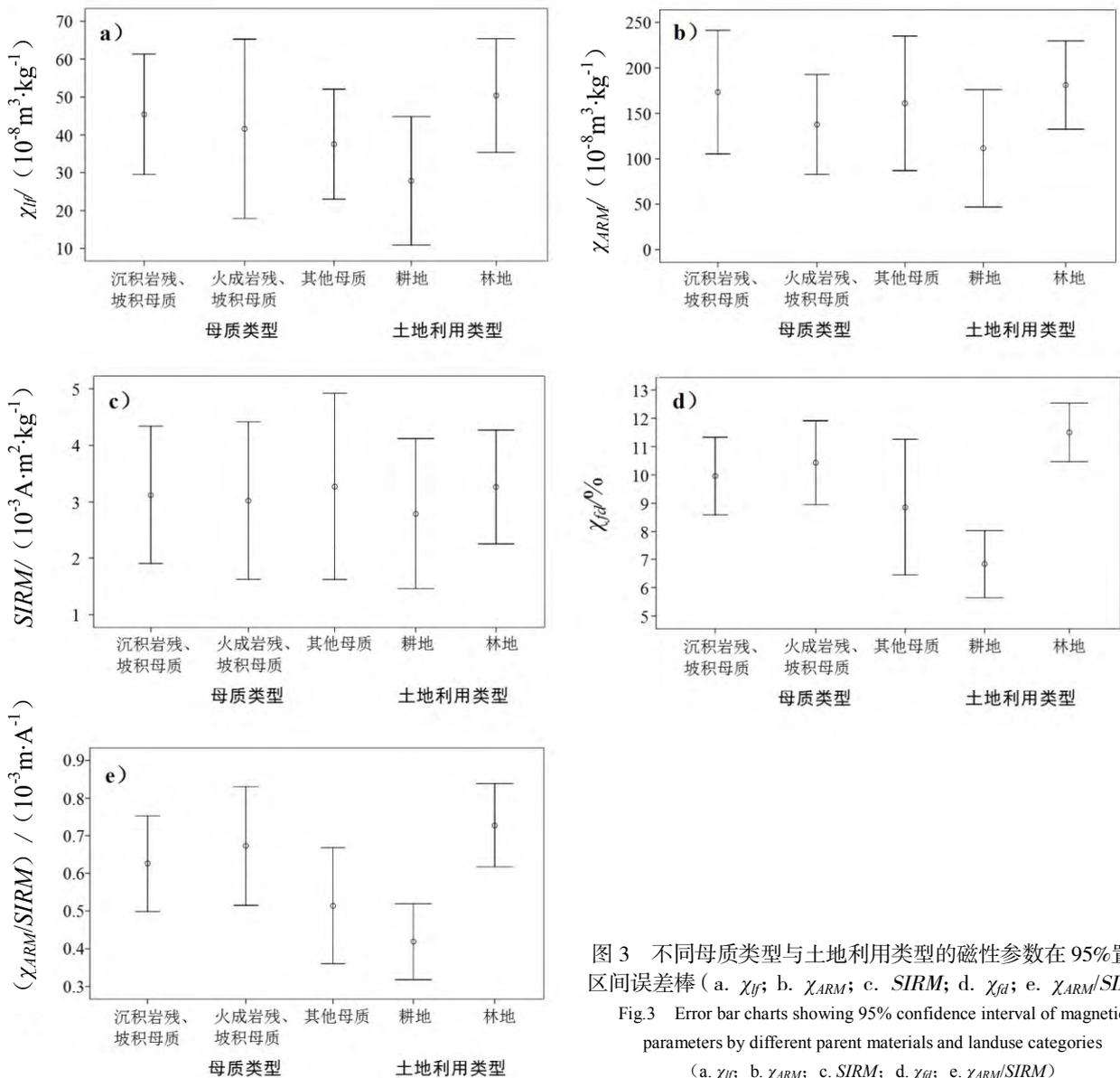


图3 不同母质类型与土地利用类型的磁性参数在95%置信区间误差棒。a.  $\chi_{fd}$ ; b.  $\chi_{ARM}$ ; c.  $SIRM$ ; d.  $\chi_{fd}/\%$ ; e.  $\chi_{ARM}/SIRM$

Fig.3 Error bar charts showing 95% confidence interval of magnetic parameters by different parent materials and landuse categories

(a.  $\chi_{fd}$ ; b.  $\chi_{ARM}$ ; c.  $SIRM$ ; d.  $\chi_{fd}/\%$ ; e.  $\chi_{ARM}/SIRM$ )

耕地土壤磁性矿物质量分数较低,可能由于耕作土壤被频繁翻动导致磁性矿物易于流失<sup>[29-30]</sup>,而且因为耕地样品中大部分为水稻土,土壤长期处于被水淹没的还原条件下,磁性矿物易于溶解或发生转化<sup>[16,31]</sup>。耕地的磁性颗粒粒度比林地粗,则可能由于上述磁性颗粒的流失和溶解过程更容易发生在小粒径范围内<sup>[24]</sup>。林地受耕作活动影响较小,含有较多细小的天然成土过程形成的超顺磁和单畴亚铁磁性颗粒,而这些颗粒是土壤磁性的主要贡献来源,因此林地土壤磁性比耕地强。

为深入分析影响农业土壤磁学性质的因素,利用 SPSS 16.0 软件进行多重对应分析。多分类变量的多重对应分析是研究同一变量或不同变量类别间的相关程度的分析方法,可用较少的维度表示类别间的关系,既达到数据降维的目的,又能发现其他分析方法不易捕捉到的信息,在自然科学和社会科学领域均有成功应用的报道<sup>[32-35]</sup>。在对应的分析结果图中,点的分布位置越接近,代表相应类别间的联系越紧密;点的分布距离原点越远,代表该类别具有越显著的特征<sup>[36]</sup>。

为实现多重对应分析,按以下方法把磁性参数变量转换成分类变量。表征磁性矿物质量分数的  $\chi_{lf}$ 、 $\chi_{ARM}$  和  $SIRM$  近似服从对数正态分布,  $\chi_{fd}$  和  $\chi_{ARM}/SIRM$  近似服从正态分布,为使所有参数分布相同且参数分类后各类别数量相当,将前 3 个参数取对数值后连同  $\chi_{fd}$  和  $\chi_{ARM}/SIRM$  共 5 个参数,按照以下规则重新赋值:比均值小且差值 < 1 倍标准差的赋值为 2;比均值小且差值  $\geq 1$  倍标准差的赋值为 1;同理,比均值大且差值小于和  $\geq 1$  倍标准差的分别赋值为 3 和 4。如此,所有样品的每个磁学参数都赋予了分类变量,从 1 到 4 代表参数值从小到大的递增。对转换为分类变量的磁学参数以及母质类型和土地利用类型共 7 个分类变量,采用多重对应分析方法进一步探讨磁学参数的影响因素,结果如图 4 所示。

如图 4 所示,母质类型的 3 个类别几乎都在特征值较大的第一因子轴的原点上,在第二因子轴的分布上也非常接近原点,这进一步说明了不同母质类型的农业土壤磁学性质几乎没有差异。表示磁性矿物质量分数较低类别(实心符号 1 和 2)和磁性颗粒粒度较粗类别(空心符号 1 和 2)与耕地分布在对应分析图右侧;相反,磁性矿物质量分数较高(实心符号 3 和 4)和粒度较细类别(空心符号 3 和 4)与林地分布在左侧,这说明耕地和林地的磁

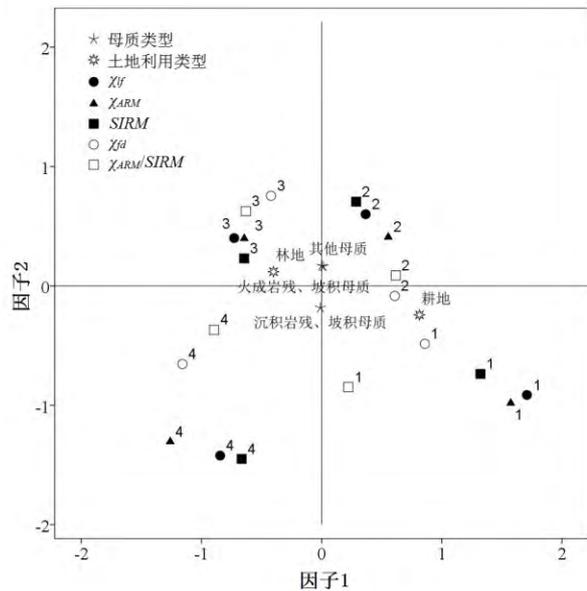


图 4 土壤磁学性质与土壤类别的多重对应分析

Fig.4 Multiple correspondence analysis result for magnetic properties and soil categories

学性质有一定程度的差异,即耕地的磁性颗粒质量分数较低与较粗,林地的磁性颗粒质量分数较高与较细,这与图 3 的描述相一致。

然而,表示磁性矿物质量分数最高的类别(实心符号 4)在图上的分布与林地或耕地均有较大的距离,说明磁性矿物质量分数最高的样品并非对应耕地或林地,即土地利用类型的差异并非导致这些样品磁性矿物质量分数高的主要原因。表征磁性颗粒最大的  $\chi_{ARM}/SIRM$  类别(空心方块符号 1)与耕地有一定的距离,说明较粗的粒径分布并非完全由耕地耕作活动导致的;该类别在一定程度上偏向磁性矿物质量分数最高的类别 4 区域,这可能指示磁性颗粒最大和磁性矿物质量分数最高的土壤磁学特征受某种共同的因素作用所致。

#### 4.2 磁学参数相互间的相关性

采用 Spearman 相关系数研究磁学参数间的相关性(表 2)。 $\chi_{lf}$ 、 $\chi_{ARM}$  和  $SIRM$  这 3 个参数均受样品中的磁性矿物质量分数控制,因此相互间达到了较高的相关性;与粒径相关的  $\chi_{fd}$  和比值  $\chi_{ARM}/SIRM$  的相关性也达到较显著的水平。 $\chi_{lf}$  和  $SIRM$  的相关系数比它们和  $\chi_{ARM}$  的相关系数大,可能由于  $\chi_{ARM}$  的影响因素和前两者有所差异,在图 2 中  $\chi_{lf}$  和  $SIRM$  的空间分布相似性也能体现这一点。考虑到土地利用类型对磁学性质有一定的影响,分别另外计算耕地和林地样品的磁学参数相关系数。耕地和林地的

表 2 磁学参数间的 Spearman 相关系数

Tab.2 Bivariate spearman correlation coefficients of magnetic parameters

磁学参数	$\chi_{lf}$	$\chi_{ARM}$	$SIRM$	$\chi_{fd}$	$\chi_{ARM}/SIRM$
全部样品	$\chi_{lf}$	1	—	—	—
	$\chi_{ARM}$	0.798**	1	—	—
	$SIRM$	0.855**	0.699**	1	—
	$\chi_{fd}$	0.439**	0.535**	0.162	1
	$\chi_{ARM}/SIRM$	0.129	0.541**	-0.159	0.687**
耕地	$\chi_{lf}$	1	—	—	—
	$\chi_{ARM}$	0.827**	1	—	—
	$SIRM$	0.913**	0.877**	1	—
	$\chi_{fd}$	0.599**	0.638**	0.591**	1
	$\chi_{ARM}/SIRM$	-0.12	0.183	-0.238	0.233
林地	$\chi_{lf}$	1	—	—	—
	$\chi_{ARM}$	0.753**	1	—	—
	$SIRM$	0.910**	0.662**	1	—
	$\chi_{fd}$	0.256*	0.444**	0.037	1
	$\chi_{ARM}/SIRM$	-0.007	0.492**	-0.247*	0.685**

注: \*\*和\*分别表示相关性在 0.01 和 0.05 水平下达到显著。

$\chi_{lf}$ 、 $\chi_{ARM}$  和  $SIRM$  相互间的相关系数均达到极显著水平。不难看出, 在  $\chi_{fd}$  和  $\chi_{ARM}/SIRM$  的相关系数比较中, 可能由于耕地更频繁的耕作活动对磁性矿物产生的流失和溶解等作用对不同粒径强度不同(对细颗粒的作用更强烈), 耕地磁性矿物粒径相关的 2 个参数之间的相关系数比林地小, 而且不显著。同理, 由于  $\chi_{ARM}$  对单畴颗粒敏感, 而单畴颗粒的  $\chi_{ARM}/SIRM$  较大, 因此在耕作活动较弱的林地土壤中, 这 2 个参数的相关系数比细颗粒(包括单畴颗粒)流失和溶解作用更强的耕地大。

#### 4.3 人为排放源对土壤磁学性质的影响

图 1 叠加了由中国科学院对地观测数据共享计划网站提供的两景镶嵌而成的 Landsat-5 TM 遥感图像计算的归一化差值植被指数  $NDVI$ , 用以指示地物种类的大致分布。2 景图像成像日期均为 2007-04-19, 条带号为 122, 行编号分别为 42 和 43, 可覆盖韶关市绝大部分范围。归一化差值植被指数计算方法<sup>[37]</sup>:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (2)$$

式中:  $NIR$  为近红外波段反射率;  $R$  为红波段反射率, 该指数可反映地表植被覆盖度。

计算改进型归一化差异水体指数  $MNDWI$ , 将其  $> 0.15$  视为地表水体在  $NDVI$  中扣除, 消除水体低  $NDVI$  值的信息,  $MNDWI$  计算方法见文献[38]。

通过与 Google Earth 影像对比, 发现  $NDVI$  较低的区域(像元偏暗)对应城市和农村建成区以及农田, 主要位于河流冲积带或平原区域;  $NDVI$  较高

的区域(像元偏亮)对应森林覆盖区, 主要位于丘陵或山地。因此,  $NDVI$  可大致指示韶关市地表覆盖类型的分布。

对比  $\chi_{fd}$ 、 $\chi_{ARM}/SIRM$  和  $NDVI$  的分布(见图 1), 始兴南部至翁源北部、乳源以及南雄西部的  $NDVI$  高值区是磁性颗粒粒径较细的区域, 而磁性颗粒粒径较粗的区域主要位于人口较密集的建成区及周边的农田, 这些粒度分布特征与图 3 所显示的特征相符。然而, 正如图 3 所示, 耕地和林地的磁性矿物质量分数差异不及磁性粒度差异显著, 代表磁性矿物质量分数的  $\chi_{lf}$ 、 $\chi_{ARM}$  和  $SIRM$  的分布与  $NDVI$  的相关程度也不及代表磁性粒度的  $\chi_{fd}$ 、 $\chi_{ARM}/SIRM$  与  $NDVI$  的相关程度高, 如  $\chi_{lf}$ 、 $\chi_{ARM}$  和  $SIRM$  在新丰和乐昌的高值区是  $NDVI$  较高的区域, 但这 3 个参数在曲江的高值区却位于建成区及其周边农田, 即  $NDVI$  低值区。由 4.1 节的讨论可知, 磁性矿物质量分数异常高值主要是由母质和土地利用以外的因素引起的, 下文将探讨导致这些磁异常区的因素。

Yan 等<sup>[25]</sup>指出, 耕作强度较大的水稻土磁性背景值较低且稳定, 人为排放的磁性颗粒能使表土磁性显著增强。而在本研究中, 以水稻土为主的耕地土壤样品磁性矿物质量分数与耕作活动较弱的林地没有显著性差异, 因此推测除土地利用导致的差异外, 农业土壤磁学性质还可能受到工业活动或交通运输等排放源携带的磁性颗粒影响。图 5 为韶关市 2004-2006 年 10 个区县市 4 种代表性污染源(可能产生重金属污染并且携带磁性矿物的污染源, 包括工业废水排放量、烟尘排放量、工业粉尘排放量和工业固体废物产生量)的相对排放强度, 数据来源于 2005-2007 年《韶关统计年鉴》。相对排放强度计算方法本文定义如下:

$$I_{i,k} = I_{i,k} / (\sum_k I_{i,k} / n) \quad (3)$$

$$I_{i,k} = e_{i,k} / S_k \quad (4)$$

式中:  $e_{i,k}$  为行政区  $k$  污染物  $i$  的 3 a 排放或产生总量;  $S_k$  为  $k$  的面积;  $I_{i,k}$  为排放强度;  $n$  为行政区总数 10;  $I_{i,k}$  为排放强度除以全部行政区排放强度的平均值, 即相对排放强度。

作为工业重镇, 曲江的各类污染物排放强度均为最高且远高于其他区县市(见图 5), 其高值区内的采样点均位于工业区及其周边或火电厂附近, 据此可推测其磁性矿物质量分数极高值区很可能是由工业污染源中携带的磁性物质导致的。除曲江外, 乐昌北部和新丰均显示出磁性高值区, 但它们的工业排放强度和曲江相比很小。根据野外采样记录,

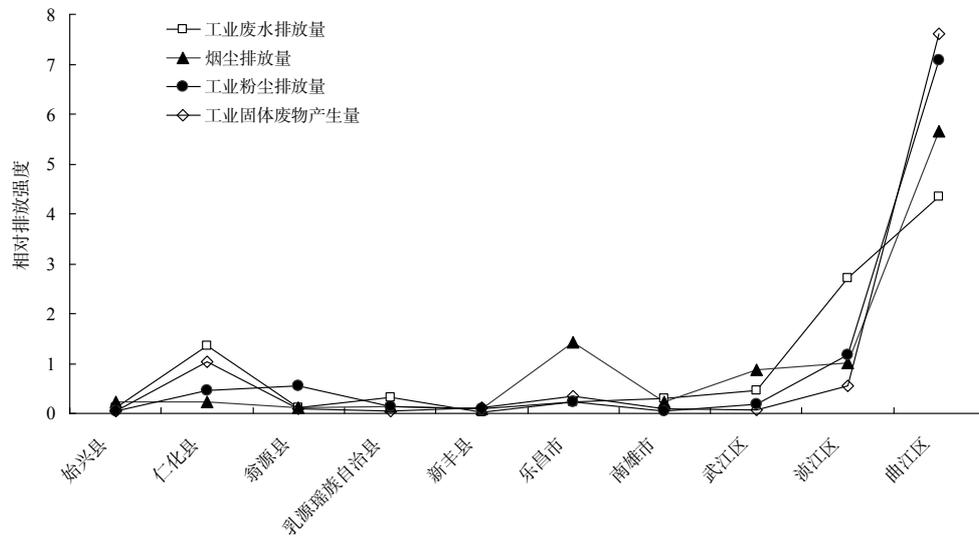


图5 韶关各区县市工业废水、烟尘、工业粉尘和工业固体废物相对排放强度

Fig.5 Relative emission intensity of industrial wastewater, smoke dust, industrial dust and industrial solid waste by districts and counties in Shaoguan

数据来源: 2005—2007年《韶关统计年鉴》。

导致乐昌和新丰磁性高值区的采样点位于主要交通线路旁,因此这些异常高值区可能由汽车尾气携带的磁性颗粒引起。除磁性强度外,人为排放源对农业土壤中磁性矿物粒径分布也有一定的影响。由于耕地和排放源均主要集中在平原区域,耕地土壤磁学性质更容易受到这些排放源的磁性物质影响。因此,排放源中的磁性粗颗粒可能是耕地土壤磁性颗粒分布比林地粗的另一个重要原因。同样地,耕地的 $\chi_{fd}$ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 相关性较低,也可能是在一定程度上由这些人为磁性粗颗粒增加了土壤磁性颗粒粒径分布的复杂性所导致。

## 5 结论

本研究分析了韶关市农业土壤磁学性质及其影响因素,得出以下结论:

1)韶关市农业土壤磁学参数在空间上存在较大变异性。 $\chi_{lf}$ 、 $\chi_{ARM}$ 和 $SIRM$ 在曲江和乐昌呈现高值区, $\chi_{lf}$ 和 $SIRM$ 在新丰还呈现另一个高值区;仁化东部、南雄西部、浈江东部和始兴北部是磁性矿物质量分数参数的主要低值区。 $\chi_{fd}$ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 空间分布相似,在乳源、武江、始兴南部和翁源北部均显示高值区,仁化和新丰为低值区。

2)在韶关市区域内,不同母质类型的农业土壤磁学性质没有显著差异,而不同土地利用类型(农业活动方式)的农业土壤磁学性质存在显著差异。不同土地利用类型的农业土壤中,耕地的磁性颗粒比林地粗,而磁性物质质量分数比林地低,可能是

由于耕作活动容易使磁性物质流失或分解,尤其是细颗粒磁性物质,从而也导致耕地的磁性矿物粒径分布比林地复杂,其 $\chi_{fd}$ 与 $\chi_{ARM}/SIRM$ 的相关性较低。

3)农业土壤磁性的影响因素较为复杂,除不同土地利用类型的影响外,农业土壤的磁性参数在空间上的分布还可能受到人为排放源的重要影响,主要是工业活动和交通运输污染排放中携带的磁性颗粒。人为源中的磁性物质能显著增强表层农业土壤的磁性,并且增加土壤中磁性物质粒径的复杂性。

本研究分析了韶关市农业土壤磁学性质的自然和人为影响因素,为环境磁学在农业土壤方面的研究提供了初步成果,可望为其在农业土壤方面的应用开拓新的思路和领域。为更全面地了解农业土壤磁性矿物学特征,对岩石磁学详细的分析可作为进一步深入研究的重点;另一方面,测试样品的元素质量分数,获得样品的实际污染状况,能更有效地讨论人为排放源对土壤磁性的影响。

## 参考文献:

- [1] GEISS C E, BANERJEE S K. A multi-parameter rock magnetic record of the last glacial interglacial paleoclimate from south-central Illinois, USA [J]. Earth And Planetary Science Letters, 1997, 152 (1): 203-216.
- [2] GUERRERO B O, THOMPSON R, FUCUGAUCHI J U. Magnetic properties of lake sediments from Lake Chalco, central Mexico, and their palaeoenvironmental implications[J]. Journal of Quaternary Science, 2000, 15 (2): 127-140.
- [3] LANCILL, HIRT A, LOTTER A, et al. A record of Holocene climate in the mineral magnetic record of Alpine lakes: Sägistalsee and

- Hinterburgsee [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 188 ( 1 ): 29–44.
- [4] MAHER B A. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols : paleoclimatic implications[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1998, 137 ( 1/2 ): 25–54.
- [5] 刘秀铭, 刘东生, SHAW J. 中国黄土磁性矿物特征及其古气候意义[J]. *第四纪研究*, 1993 ( 3 ): 281–287.
- [6] HOUNSLOW M W, MORTON A C. Evaluation of sediment provenance using magnetic mineral inclusions in clastic silicates: comparison with heavy mineral analysis[J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 171 ( 1/4 ): 13–36.
- [7] LIU H, ZHU R X, LI G X. Rock magnetic properties of the fine-grained sediment on the outer shelf of the East China Sea: implication for provenance[J]. *Marine Geology*, 2003, 193 ( 3/4 ): 195–206.
- [8] ZHANG W G, DONG C Y, YE L P, et al. Magnetic properties of coastal loess on the Midao islands, northern China: Implications for provenance and weathering intensity[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2012, 333: 160–167.
- [9] 田成静, 欧阳婷萍, 朱照宇, 等. 海南岛周边海域表层沉积物磁化率空间分布特征及其物源指示意义[J]. *热带地理*, 2013, 33 ( 6 ): 666–673.
- [10] BLUNDELL A, DEARING J A, BOYLE J F, et al. Controlling factors for the spatial variability of soil magnetic susceptibility across England and Wales [J]. *Earth–science Reviews*, 2009, 95 ( 3/4 ): 158–188.
- [11] FIALOVA H, MAIER G, PETROVSKY E, et al. Magnetic properties of soils from sites with different geological and environmental settings [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2006, 59 ( 4 ): 273–283.
- [12] HANESCH M, SCHOLGER R. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles[J]. *Geophysical Journal International*, 2005, 161 ( 1 ): 50–56.
- [13] DEARING J A, BIRD P M, DANN R J L, et al. Secondary ferrimagnetic minerals in Welsh soils: a comparison of mineral magnetic detection methods and implications for mineral formation[J]. *Geophysical Journal International*, 1997, 130 ( 3 ): 727–736.
- [14] DEARING J A, HAY K L, BABAN S M J, et al. Magnetic susceptibility of soil: An evaluation of conflicting theories using a national data set [J]. *Geophysical Journal International*, 1996, 127 ( 3 ): 728–734.
- [15] SINGER M J, VEROSUB K L, FINE P, et al. A conceptual model for the enhancement of magnetic susceptibility in soils[J]. *Quaternary International*, 1996 ( 34/36 ): 243–248.
- [16] LU S. Characterization of subtropical soils by mineral magnetic measurements[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2000, 31 ( 1/2 ): 1–11.
- [17] 俞劲炎, 詹硕仁, 吴芳生, 等. 亚热带和热带土壤的磁化率[J]. *土壤学报*, 1986, 23 ( 1 ): 50–56.
- [18] 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[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 156 ( 2 ): 278–289.
- [19] BLUNDELL A, HANNAM J A, DEARING J A, et al. Detecting atmospheric pollution in surface soils using magnetic measurements: A reappraisal using an England and Wales database[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157 ( 10 ): 2878–2890.
- [20] CHEN X, XIA X H, ZHAO Y, et al. Heavy metal concentrations in roadside soils and correlation with urban traffic in Beijing, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 181 ( 1/3 ): 640–646.
- [21] 俞劲炎, 童永忠, 唐家演, 等. 土壤磁学[J]. *土壤*, 1979 ( 2 ): 78–81.
- [22] DUAN X M, HU S Y, YAN H T, et al. Relationship between magnetic parameters and heavy element contents of arable soil around a steel company, Nanjing[J]. *Science China–Earth Sciences*, 2010, 53 ( 3 ): 411–418.
- [23] ZHANG C X, APPEL E, QIAO Q Q. Heavy metal pollution in farmland irrigated with river water near a steel plant–magnetic and geochemical signature[J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 192 ( 3 ): 963–974.
- [24] LU S G, ZHU L, YU J Y. Mineral magnetic properties of Chinese paddy soils and its pedogenic implications[J]. *Catena*, 2012, 93: 9–17.
- [25] YAN H T, HU S Y, BLAHA U, et al. Paddy soil–A suitable target for monitoring heavy metal pollution by magnetic proxies[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2011, 75 ( 2 ): 211–219.
- [26] 卢升高. 红壤与红壤性水稻土中磁性矿物特性的比较研究[J]. *科技通报*, 1999, 15 ( 6 ): 409–413.
- [27] 郁梦德. 粤北山地的土壤[J]. *土壤通报*, 1960 ( 6 ): 18–25.
- [28] VEROSUB K L, ROBERTS A P. Environmental magnetism–past, present, and future[J]. *Journal of Geophysical Research–Solid Earth*, 1995, 100 ( B2 ): 2175–2192.
- [29] MAGIERA T, ZAWADZKI J. Using of high-resolution topsoil magnetic screening for assessment of dust deposition: comparison of forest and arable soil datasets [J]. *Environmental Monitoring And Assessment*, 2007, 125 ( 1–3 ): 19–28.
- [30] DURZA O. Heavy metals contamination and magnetic susceptibility in soils around metallurgical plant [J]. *Physics and Chemistry Of The Earth Part A–solid Earth And Geodesy*, 1999, 24 ( 6 ): 541–543.
- [31] 李映强. 广东省主要土壤类型磁性的初步研究[J]. *华南农业大学学报*, 1995, 16 ( 4 ): 54–57.
- [32] 李克均, 冯丽云, 时松和, 等. 多重对应分析及其在工作满意度研究中的应用[J]. *中国卫生统计*, 2007, 24 ( 1 ): 19–21.
- [33] 刘少娟, 王丽明, 潘宝骏, 等. 出生季节、身高、性别与体重 4 个变量关系的同质分析试用结果[J]. *海峡预防医学杂志*, 2000, 6 ( 1 ): 7–9.
- [34] FEUILLET T. Statistical Analyses of Active Patterned Ground Occurrence in the Taillon Massif ( Pyrenees , France/Spain ) [J]. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2011, 22 ( 3 ): 228–238.
- [35] REIS A P, DE ALMEIDA L M, DA SILVA E F, et al. Assessing the geochemical inherent quality of natural soils in the Douro river basin for grapevine cultivation using data analysis and geostatistics [J]. *Geoderma*, 2007, 141 ( 3/4 ): 370–383.
- [36] 张文彤, 董伟. SPSS 统计分析高级教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [37] 郭妮. 植被指数及其研究进展[J]. *干旱气象*, 2003, 21 ( 4 ): 71–75.
- [38] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数 ( MNDWI ) 提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, 9 ( 5 ): 589–595.

## Spatial Distribution and Influencing Factors of Magnetic Properties of Agricultural Soil in Shaoguan, Guangdong

BIAN Yong<sup>1,2</sup>, OUYANG Tingping<sup>1</sup>, WAN Hongfu<sup>3</sup>, KUANG Yaoqiu<sup>1</sup>, HUANG Ningsheng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences,

Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Guangdong Institute of Eco-Environment and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China)

**Abstract:** Environmental magnetism method has advantages of rapidness, cost-effectiveness and non-destructiveness. It has great research value and application potential in the field of agricultural soil. Studies on magnetism of agricultural soil would help to extend the knowledge about its properties and develop the methodology of theoretical and applied researches on agricultural soil. However, relevant researches are limited. Shaoguan in Guangdong Province was chosen as a typical region for the research on magnetic properties in subtropical area. A set of 97 surface soil samples (32 were collected on farmland and 65 on forestland in the region) were used for magnetic measurements, including low- and high-frequency magnetic susceptibilities ( $\chi_{lf}$  and  $\chi_{hf}$ ), anhysteretic remanent magnetization ( $ARM$ , converted to mass-specific susceptibility form  $\chi_{ARM}$ ) and saturation isothermal remanent magnetization ( $SIRM$ ). Frequency-dependent susceptibility  $\chi_{fd}$  and the ratio  $\chi_{ARM}/SIRM$  were also calculated from the measured magnetic parameters. Analyses of spatial distribution characteristics of magnetic parameters in agricultural soil and their influencing factors, as well as correlation between magnetic parameters, were carried out. Results showed that there existed great spatial variations of magnetic parameters in agricultural soil throughout Shaoguan. Magnetic mineral abundance related parameters, i.e.  $\chi_{lf}$ ,  $\chi_{ARM}$ , and  $SIRM$ , showed high values in Qujiang, Xinfeng and northern Lechang, while magnetic grain size related parameters, i.e.  $\chi_{fd}$  and  $\chi_{ARM}/SIRM$ , showed high values in Ruyuan, Wujiang, southern Shixing, and northern Wengyuan, which meant finer magnetic grain size. In the studied region, land use type was the major influencing factor on magnetic properties of agricultural soil. Magnetic particles in farmland were coarser grained than in forestland, while magnetic mineral abundance in farmland was roughly lower than that in forestland. The magnetic property difference between these two land use types was attributed to the loss of magnetic minerals due to cultivation activity, and this effect was more essential on finer magnetic grains. This effect was also implied by the different bivariate correlation coefficients between farmland and forestland. Effect of parent material on magnetic properties of agricultural soil was less important than land use type, which was probably due to the more significant impacts from anthropogenic factors, such as agricultural activity. Result of multiple correspondence analysis indicated that anthropogenic emission sources, including industrial and transportation activities, may be responsible for the significant magnetic enhancement of agricultural soil in top layer, which was supported by the calculated industrial density derived from statistical data. Anthropogenic emission sources may also contribute to the magnetic grain size distribution to some extent.

**Key words:** agricultural soil; magnetic properties; correspondence analysis; Shaoguan