

黔中喀斯特山区不同土地利用方式下土壤的矿物磁性特征研究

吕明辉¹, 后立胜², 王红亚¹, 蔡运龙¹

(1. 北京大学环境学院, 北京 100871; 2. 中国地质调查局, 北京 100011)

摘要:对黔中典型喀斯特地区, 对不同土地利用方式下的土壤矿物磁性做了研究。研究结果显示, 典型喀斯特地区发育的土壤的磁性矿物组成一致, 基本上是以亚铁磁性矿物为主, 多畴颗粒 (MD Multi-Domain, $> 0.04 \mu\text{m}$)、稳定单畴颗粒 (SSD Stable Single Domain, $0.02 \sim 0.04 \mu\text{m}$) 和超顺磁颗粒 (SP Super Paramagnetism, $< 0.02 \mu\text{m}$) 三种颗粒都含有。不同的土地利用方式对土壤的磁性特征有着明显的影响, 林地和耕地的磁性矿物中含有较多的细颗粒物质, 而撂荒地、草地和灌丛地则相对较少; 土壤中细颗粒的磁性物质的含量又与土壤本身的黏粒含量有明显的相关关系; 土壤中反铁磁性矿物的含量均较少, 其中耕地的反铁磁性物质的含量明显高于其他土壤, 可能与长期渍水和耕种翻作有关。

关键词:喀斯特地区; 土地利用类型; 土壤; 磁性矿物; 磁性参数

中图分类号: F301.24; S152

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)03-0195-05

Study on Magnetic Characteristics of Soils in Different Land Use in Karst Mountain Area, the Middle Part of Guizhou Province

LV Ming-hui¹, HOU Li-sheng², WANG Hong-ya¹, CAI Yun-long¹

(1. College of Environment Science, Peking University, Beijing 100871, China;

2. China Geological Survey, Beijing 100011, China)

Abstract: Study on magnetic susceptibility, frequency dependent susceptibility, anhysteretic remanent magnetization, acquisition curve of isothermal remanent magnetization, saturation isothermal remanent magnetization and demagnetization parameters on soils of different land uses in Karst mountain area. The result shows that the magnetic mineral is mainly composed of ferrimagnetic with different grain sizes, such as multi-domain, stable single domain and super-paramagnetism. The different land uses of soils will impact the composition of magnetic minerals. The soils in woodland and cultivated land will have more fine grain size than those in grassland, fallow field and shrub land. The content of fine magnetic minerals is also correlated with the clay particle content, and the content of anti-ferrimagnetic minerals in cultivated land are more than other four types, it is maybe related to paddy soil's farming and perennial waterlogging.

Key words: karst; land use; soil; magnetic mineral; magnetic parameter

喀斯特地区是世界上主要的生态脆弱带, 而我国西南成片分布的喀斯特地区, 则被称为“是世界上最大的喀斯特连续带”^[1], 主要分布在我国滇、黔、桂三个省区面积约 54 万 km^2 , 居住着约 1 亿人口^[2]。由于地形破碎, 土层薄瘠, 水土流失和旱涝灾害严重, 加上人口和经济发展的压力, 使得当地的土地资源开发强度过大, 导致严重的土壤侵蚀、土地退化和生态失衡, 其中最突出的表现就是石漠化, 严重威胁着区域土地资源的可持续性利用。

近年来, 对喀斯特地区的生态环境问题的研究, 主要集中在喀斯特地区的植被退化, 土壤侵蚀, 石漠化的分布、危害和形成机理以及生态恢复与重建, 区域经济的可持续发展等方面^[3,4]。本文以贵州省中部的典型喀斯特地区的土壤作为研究对象, 对不同土地利用方式下的土壤进行矿物磁性研究。

1 研究区概况

1.1 采样点概况

采样点位于贵州省黔南州长顺县北部丘原区的广顺镇

境内 (E106°22'15.7" ~ 31.1", N26°12'0.9" ~ 37.2") (图 1), 属于乌江上游的猫跳河流域, 该流域内气候温和, 年平均温度为 15 左右, 绝对高温可达 37, 最低为 -10。冬季多北风及东北风, 夏季多南风及东南风。流域年平均雨量约 1200 ~ 1350 mm, 最高达到 1800 mm, 最少约 1000 mm。降雨在时间上的分布很不均匀, 汛期中 5、6、7 三个月降雨量约占年雨量 60% 暴雨集中、强度大、雨日多是本区的特点, 一年中有雨日大约在 170 d, 最长达 207 d, 连续降雨日数长达 28 d。

1.2 采样点选择

采样点为丘原区, 系峰丛洼地和丘陵宽谷的交错地带区内出露地层主要为二迭系, 岩性多为以白云岩为主的质地较纯的碳酸盐岩类, 发育有典型的喀斯特景观土壤发育状况极差, 山地区土壤几乎均为石灰土, 土层厚度多小于 20 cm, 兼之地下水位低, 保水保肥能力弱, 致使本地区的石漠化情况非常严重研究区内耕地多为水稻田, 山地地带则多为裸露草山、坡耕地以及撂荒地, 林地则基本上是村寨附近的风水林地。

* 收稿日期: 2006-11-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (40335046)

作者简介: 吕明辉 (1972 -), 女, 博士研究生, 主要从事土地科学研究。

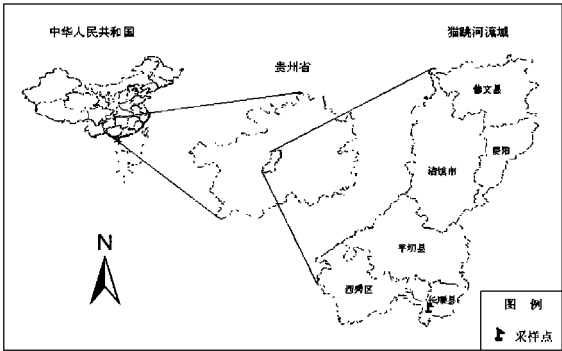


图 1 猫跳河流域区位图及采样点位置示意图

2 样品采集与研究方法

2.1 样品采集

样品采集在每个采样点周围 2~3 m 的范围内,用荷兰 Eijkelpkamp 公司所生产的土壤原土核心取样器,采集表层土壤 2~3 份,进行充分混合,获得土壤样品共计 28 个。

2.2 研究方法

将土样自然风干,取部分用研钵打散后进行磁性测量。所用仪器为英国 Bartington MS2 磁化率仪、Molspin 交变退磁仪、脉冲磁化仪和 Minispin 旋转磁力仪。测定的项目包括磁化率 ($10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$)、非滞后剩磁 ARM ($10^{-6} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$)、等温剩磁 IRM ($10^{-8} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$) 和饱和等温剩磁 SIRM ($10^{-8} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$)。并计算了频率磁化率 f_d (%)、硬剩磁 (SIRM - IRM_{300mT})、磁化系数 IRM_{300mT}/SIRM (%)、退磁系数 S_{-100mT} (%), $(S_{-100mT} \%) = [(SIRM - IRM_{-100mT}) / (2 \times SIRM)] \times 100 \%$ 等磁性比值参数。土壤粒度的测定,使用英国 MALVERN 公司 mastersizer - 2000 型激光粒度仪测定其各粒级百分含量。

3 结果与讨论

(1) 样品的母质是以白云岩为主的质地较纯的碳酸盐类岩,此类岩石属弱磁性岩石,岩石的磁化率为 $0.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$,饱和等温剩磁也仅为 $0.5 \times 10^{-8} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$,一般含很少的磁性矿物^[5],因此在由它们发育的土壤中的磁性矿物,主要是成土过程中的新生矿物^[6]。表 1 中列出了土壤样品的九类磁性指标的范围和平均值,结果表明,与母质相比,这些土壤样品均含有较多的磁性物质。

和 SIRM 是土壤磁性强弱的指标,主要反映磁性矿物含量的大小^[7]。从表 1 中可以看出,与母质相比,和 SIRM 的值均较大,因此可初步认为,这些土壤样品均为发育较为成熟的土壤,其中所含的大量磁性物质,系在成土过程中生成的。

f_d (%) 对超顺磁颗粒 (SP Super Paramagnetism) ($< 0.02 \mu\text{m}$) 较为敏感,顾通常被用来指示土壤中 SP 颗粒的存在和相对含量^[8]。从表 1 可以看出,土壤样品的频率磁化率值除耕地的最大值为 11.21 %,其余的基本上都介于 4 %~10 %之间,因此,表示样品中的磁性物质是以多畴 (MD Multi - Domain, $> 0.04 \mu\text{m}$)、单畴 (SSD Stable Single Domain, $0.02 \sim 0.04 \mu\text{m}$) 和超顺磁颗粒 (SP Super Paramagnetism, $< 0.02 \mu\text{m}$) 等几种形式同时存在的^[9]。

磁化系数和退磁系数,主要反映土壤中磁性矿物的类型和颗粒大小,但这五种土地利用方式下土壤的磁化系数和退磁系数值均很接近,可以推断土壤样品中的氧化铁矿物的组成比较相近^[6]。

图 2 是所有土壤样品的 和 SIRM 关系图,SIRM ~ 之间的散点图能指示磁性矿物种类的变化,当样品的 和 SIRM 值呈直线关系时,表明土壤中的磁性矿物组成极为一致,或者说主要是由一种磁性矿物占优势。

表 1 研究区不同土地利用类型下土壤磁性参数范围

磁性参数		风水林地	灌丛地	草地	撂荒地	耕地
磁化率 ($10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$)	范围	47.72~160.7	107.9~319.4	99.22~280.9	75.91~415.4	44.45~274.1
	平均值	101.3	168.3	193.7	187.8	145.1
频率磁化率 f_d (%)	范围	7.52~9.54	4.81~6.69	6.94~9.19	5.62~9.2	6.56~11.21
	平均值	8.736	6.05	8.315	7.5	9.25
饱和等温剩磁 SIRM ($10^{-8} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$)	范围	5009~25251	7419~33903	11771~32374	6076~62795	5570~67458
	平均值	10500	16179	21489	22258	27646
非磁滞剩磁 ARM ($10^{-6} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$)	范围	116.4~312.7	108.5~326.7	210.1~437	99.1~947.8	133.3~646.8
	平均值	191.7	193.7	339.8	337.8	360.7
ARM 磁化率 α_{arm} ($10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$)	范围	303~814.2	282.4~850.8	547.1~1138	258.1~2468	347.1~1684
	平均值	499.2	504.5	884.8	879.8	939.3
软剩磁 ($10^{-6} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$)	范围	1382~5043	3734~16145	4674~10333	2616~11077	1316~10573
	平均值	3060	7413	7424	5752	4889
硬剩磁 ($10^{-6} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$)	范围	324~2071	137.4~1195	378.7~2848	164.8~5682	371.9~7038
	平均值	732.1	453.9	1263	1583	2704
磁化系数 IRM _{300mT} /SIRM (%)	范围	90.66~95.36	95.44~98.49	89.68~97.96	90.95~98.82	89.57~93.32
	平均值	93.44	97.35	94.79	93.95	91.94
退磁系数 S _{-100mT} (%)	范围	80.47~89.84	90.58~95.54	80.38~94.11	80.92~95.84	78.25~83.58
	平均值	85.87	93.36	88.99	89.29	81.6

(2) 根据样品等温剩磁的测定结果,做出五种土地利用类型下土壤的等温剩磁获得曲线(图 3)和退磁曲线(图 4)。

等温剩磁获得曲线显示,样品均较易获得剩磁。根据 Thompson 和 Oldfield^[10] 所做的研究,亚铁磁性矿物在很低的磁场中就可以很容易获得较强的剩磁,基本上在 200 mT 的场强下就比较接近饱和,因此,亚铁磁性矿物的这种特征

又被称为“软”剩磁。从图 3 可以看出,在 20 mT 的场强下,耕地获得的等温剩磁最小,只有 15 %,灌丛地最大 45 %,草地林地和撂荒地分别为 25 %、30 %和 32 %而在场强 $< 300 \text{ mT}$ 的过程中,五种土地利用类型下土壤获得剩磁的能力稍有差别,基本上是按照灌丛地 $>$ 草地 $>$ 风水林地 $>$ 撂荒地 $>$ 耕地的顺序,但在 300 mT 的磁场中,土壤获得了 85 %~

95 % 的等温剩磁,基本上接近饱和等温剩磁,由此可以推断,五种土地利用类型下土壤样品中的磁性物质以亚铁磁性矿物为主。而最先接近饱和等温剩磁的磁场强度是 300 mT,这一场强大于 200 mT 的原因,可能是这些土壤样品中含有数量较少的反铁磁性矿物。

在图 4 的退磁曲线中,五种土地利用类型下,土壤样品的剩磁矫顽力值稍显分散,基本上是耕地>撂荒地>风水林地>草地>灌丛地,但实际上五种类型均在 20~40 mT 之间。由于亚铁磁性矿物的剩磁矫顽力较小,一般都<50 mT,因此可以看出所采的土壤样品中磁性物质仍然是以亚铁磁性矿物为主^[11]。

(3) 将不同土地利用方式下的土壤的磁性参数进行平均,分别做出 IRM_{20mT} 、 ARM 、 $f_d\%$ 、 $S_{100mT}\%$ 和 $SIRM$ -

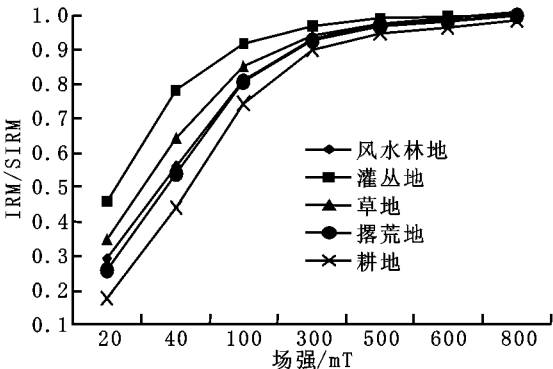
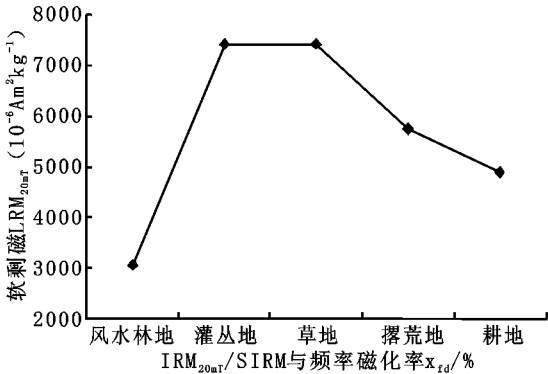


图 3 研究区不同土地利用类型下土壤的等温剩磁获得曲线图

(1) 软剩磁 IRM_{20mT} 。对较粗的铁磁晶粒反应灵敏,从图 5 - a 可以看出,研究区灌丛地和草地的软剩磁最大,其次是撂荒地和耕地,最小的是林地,这表明在林地下的土壤,由于都是在风水林地中采集,人为扰动少,时间上都大于 60 年以上,基本属于自然成土过程,且植被覆盖条件好,土壤显然不容易因受侵蚀,从而保留了土壤中细颗粒物质,因而粗粒的磁性晶体会相对较少,这和其稳定的环境是相一致的。而在灌丛地和草地下的土壤,由于土层本身就很薄,植被覆盖较差,易受侵蚀,小颗粒的物质很容易被水蚀带走,留下大颗粒



a. 土壤软剩磁变化图

IRM_{300mT} 等参数的变化趋势图(图 5 - 图 9)。从中看出:

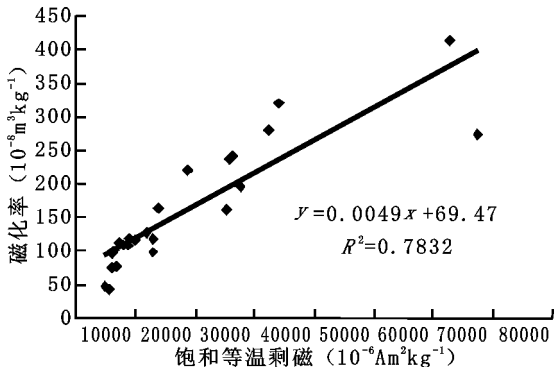


图 2 研究区磁化率和饱和等温剩磁关系

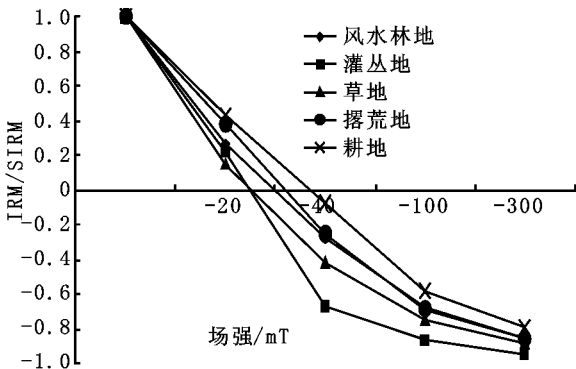
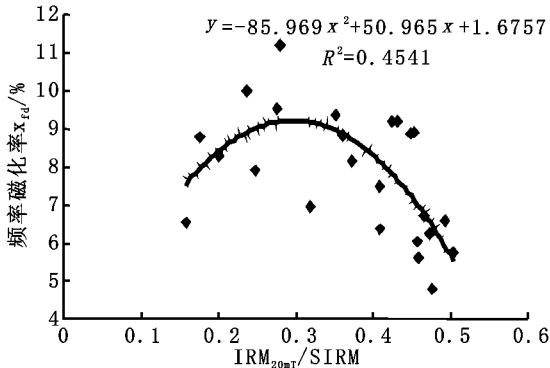


图 4 研究区不同土地利用类型下土壤的退磁曲线图
的物质撂荒地与耕地的相比较,软剩磁值稍大,大概原因是撂荒地弃耕之后,植被生长处于不平衡状态,相对耕地来讲更易受侵蚀,因此粗颗粒物质的相对含量会有所上升。

由于软剩磁仅对磁性颗粒中的多畴颗粒敏感,因此将 $IRM_{20mT}/SIRM$ 与 $f_d\%$ 进行比较,如果土壤中多畴颗粒的磁性物质占主导,则两者呈现不相关,相反多畴颗粒的磁性物质不占主导,则两者呈现相关^[12]。从图 5 - b 中可以看出, $IRM_{20mT}/SIRM$ 与 $f_d\%$ 呈明显的负相关。因此,表明土壤样品中含有的多畴颗粒并不在所有的磁性物质中占主导。



b. $IRM_{20mT}/SIRM$ 与频率磁化率 $f_d\%$ 的关系图

图 5 不同土地利用类型下土壤软剩磁变化图及 $IRM_{20mT}/SIRM$ 与频率磁化率 $f_d\%$ 的关系图

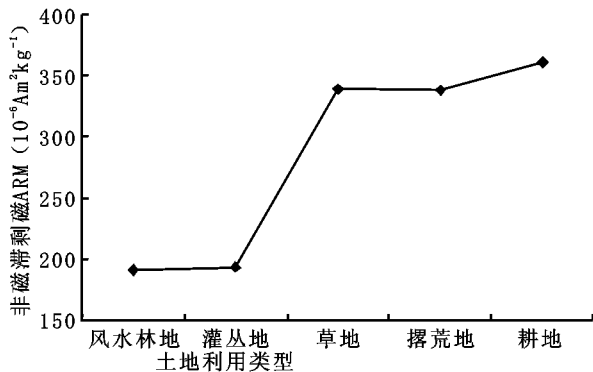
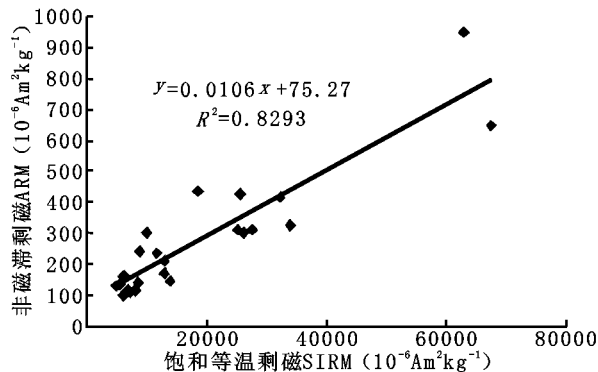
(2) ARM 可以反映样品中较细的稳定单畴的亚铁磁性颗粒的含量,前提是 $SIRM$ 与 ARM 的高度相关^[13],从图 6 - a 中可以看出所有土壤样品中的 $SIRM$ 与 ARM 的相关系数为 $R^2 = 0.8293$ 。因此可以用 ARM 来反映样品中的稳定单畴颗粒含量的多少。图 6 - b 显示,在五种土地利用类型下,林地土壤和灌丛地的 ARM 值较小,草地、撂荒地和耕地的 ARM 值较大,其中以耕地为最大,可能是与耕地的土壤熟化过程有关,而林地较小,则可能是由于亚热带条件下林

地形成的超顺磁颗粒的磁性物质较多,使得其中稳定单畴颗粒的相对含量减少的原因。

(3) $f_d\%$ 前面已经指出范围处在 2%~10% 之间,表明各类土壤中多畴颗粒、稳定单畴颗粒和超顺磁性颗粒同时存在。从图 7 - a 可以看出耕地的 $f_d\%$ 最高,其次是林地,草地和撂荒地,最低的是灌丛地。耕地和林地的 $f_d\%$ 高,表明其中的超顺磁颗粒含量较高,细颗粒的物质多系土壤自生成因,草地和撂荒地,灌丛地少,则可能多与其易受侵蚀有关。

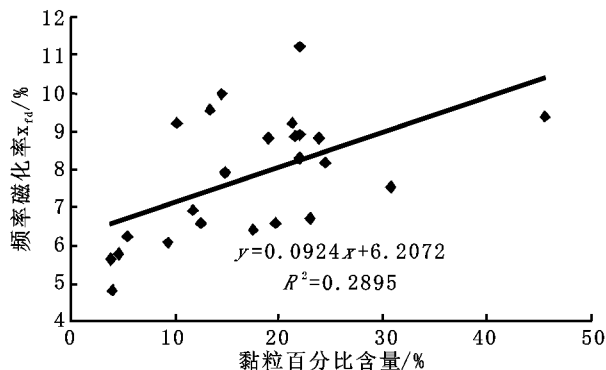
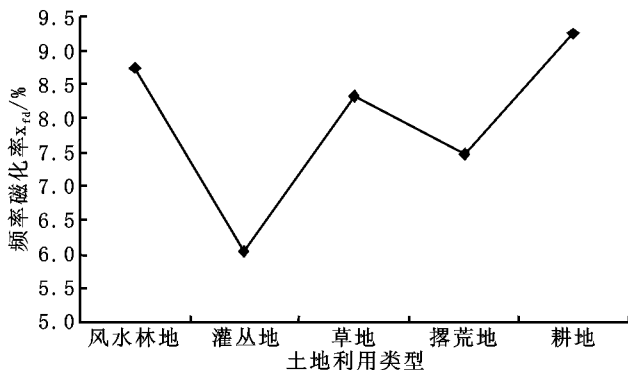
从本研究来看,在喀斯特地区,由于土层薄,侵蚀严重,因此除非在少有人为干扰的情况下,用 f_d % 应该只能反映其当

前的超顺磁颗粒的含量,这种含量与其成土过程及其自然状况和人为干扰都有关系。



(a. ARM 与 SIRM 的关系图 b. 土壤非磁滞剩磁变化图)

图 6 ARM 与 SIRM 的关系图及不同土地利用类型下土壤非磁滞剩磁的变化图



(a. 土壤频率磁化率变化图 b. 频率磁化率与土壤黏粒百分比的关系图)

图 7 不同土地利用类型下土壤频率磁化率的变化图及频率磁化率和土壤黏粒百分比的关系图

卢升高在红砂土和紫色土的研究中,指出土壤的频率磁化率是岩成土发育程度的定量指标,并可在土壤的发生分类、成土环境研究中应用^[6]。超顺磁颗粒的粒径范围 $< 0.02 \mu\text{m}$,因此我们做出土壤黏粒百分比与频率磁化率的相关关系图,从图 7 - b 中可以看出,其相关系数为 $R^2 = 0.2895$ ($R^2 = 0.1303$, $P < 0.05$, $R^2 = 0.2143$, $P < 0.01$),表明两者之间还是有较为明显的相关关系,亦说明在喀斯特地区发育的土壤频率磁化率的大小仍然是与土壤细颗粒物质的含量有很大的关系。

完全的反铁磁性矿物最多,其他的撂荒地、草地和林地依次减少,最少的是灌丛地。而耕地中硬剩磁的增加,可能还与其多为水稻土,处于长期渍水下,亚铁磁性颗粒的还原环境中分解产生反铁磁性矿物的原因^[15,16]。

(4)退磁系数 $S_{-100\text{mT}}$ % 可以较为灵敏的反映亚铁磁性矿物和不完整反铁磁性矿物的相对比例,随着不完整反铁磁性矿物的贡献的增加而下降。一般来讲,处于发育初期的土壤中反铁磁性物质会有很大的含量^[14]。从图 8 的退磁系数变化图可以看出来, $S_{-100\text{mT}}$ % 均大于 80 %,因此表明土壤中仍以“软”的亚铁磁性矿物为主,其中灌丛地最高,撂荒地其次,林地和耕地最小,说明其中所含的反铁磁性物质非常少,而林地和耕地则相对而言,含有少量的反铁磁性物质,林地土壤人为干扰少,其中含有成土过程中形成的反铁磁性矿物耕地则可能由于耕种翻土的过程中,将深层的土壤翻上,其中的反铁磁性矿物与表层土壤混合所致。

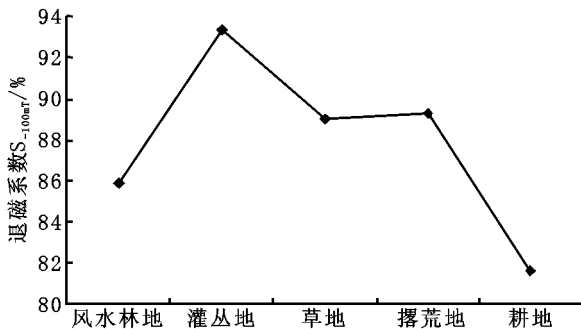


图 8 不同土地利用类型下土壤退磁系数 $S_{-100\text{mT}}$ % 的变化图

(5)研究者常用 SIRM 与 $\text{IRM}_{300\text{mT}}$ 的差值,来反映硬剩磁,在 300 mT 以上的磁场中,样品所获得的剩磁认为是不完整的反铁磁性矿物引起的。 $\text{SIRM} - \text{IRM}_{300\text{mT}}$ 的值随着不完整的反铁磁性矿物含量的增加而增大。在对不同土地利用类型下土壤的硬剩磁变化图中(图 9)可以看出,其变化大致与图 7 中退磁系数 $S_{-100\text{mT}}$ % 趋势相吻合,亦为耕地中不

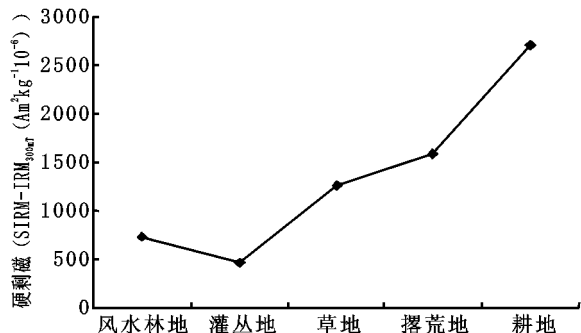


图 9 不同土地利用类型下土壤硬剩磁 $\text{SIRM} - \text{IRM}_{300\text{mT}}$ 的变化图

4 结 论

本研究所选取的土壤样品基本上涵盖了该地区的主要土壤类型,因此从研究结果可以看出,典型喀斯特地区发育土壤的 χ 和 SIRM 值均较母质的值高,其中所包含的磁性矿物,以亚铁磁性矿物为主。在碳酸盐岩为母质的土壤有着亚热带湿热条件下土壤发育的共同特点,土壤中的磁性矿物组成比较一致,基本上是以亚铁磁性矿物为主,同时也存在少量的反铁磁性矿物由于喀斯特地区的土层薄,侵蚀严重的特点,土壤中磁性矿物的颗粒大小,基本上多畴颗粒、稳定单畴颗粒和超顺磁颗粒三种颗粒都含有。

不同的土地利用方式对土壤的磁性特征有着明显的影响,从土壤的磁性指标的分析可以看出,一般情况下,林地和

耕地的磁性矿物中含有较多的细颗粒物质,而撂荒地、草地和灌丛地则相对较少,其原因可能与林地和耕地的植被及发育环境有很大的关系土壤中细颗粒的磁性物质的含量又与土壤本身的粘粒含量的呈相关关系研究区土壤中反铁磁性矿物的含量较少,但是不同的土地利用方式下,又有明显的区别,其中耕地的反铁磁性物质的含量明显高于其他土壤,可能与研究区大部分耕地是水稻土,由于长期处于渍水的还原环境下,导致亚铁磁性矿物分解形成反铁磁性矿物,同时由于土壤的耕种翻土,将底层土壤翻上,反铁磁性矿物与表层土壤混合的原因。

致谢:本研究的磁性测量在华东师范大学河口海岸国家重点实验室完成,作者对于俞立中教授和张卫国副教授的大力支持,在此特表感谢。

参考文献:

- [1] Sweeting, M M.《喀斯特水文地貌学》序,载:谭明.喀斯特水文地貌学[M].贵阳:贵州人民出版社,1993.
- [2] 蔡运龙.中国西南岩溶石山贫困地区的生态重建[J].地球科学进展,1996,11(6):602-606.
- [3] 蔡运龙.中国西南喀斯特山区的生态重建与农林牧业发展:研究现状与趋势[J].资源科学,1999,21(5):37-41.
- [4] 熊康宁,等.喀斯特石漠化的遥感-GIS典型研究——以贵州省为例[M].北京:地质出版社,2002.
- [5] Thompson R, Oldfield F. Environmental magnetism[M]. London: George Allen & Unwin, 1986.
- [6] 卢升高,等.岩成土的磁性测量及其与土壤发育的关系[J].浙江大学学报,1999,25(6):603-607.
- [7] 张卫国,俞立中,等.环境磁学研究的简介[J].地球物理学进展,1995,(8):95-105.
- [8] Oldfield F, Yu L. The influence of particles size variations on the magnetic properties of sediments from the northeastern Irish Sea[J]. Sedimentology, 1994, 41: 1093-1108.
- [9] 董瑞斌,等.土壤和沉积物的磁参数及其在环境科学中的应用[J].科技通报,2000,16(6):479-483.
- [10] Thompson R. Modelling magnetization data using SIMPLEX[J]. Physics of Earth and Planetary Interiors, 1986, 42, 113-127.
- [11] Thompson R, Bloemendal J, Dearing J A, et al. Environmental applications of magnetic minerals[J]. Science, 1980, 207: 481-485.
- [12] Oldfield F. Environmental magnetism - a personal perspective[J]. Quaternary Science Review, 1991, 10: 73-85.
- [13] 卢升高.中国土壤磁性与环境[M].北京:高等教育出版社,2003.
- [14] 朱立军,傅平秋,万国江.贵州碳酸盐岩发育土壤磁性性质及其发生机理[J].土壤学报,1997,34(2):212-220.
- [15] 俞劲炎,卢升高.土壤磁学[M].南昌:江西科学技术出版社,1991.
- [16] Dearing, J A, B A Maher, F Oldfield. Geomorphological linkages between soils and sediments: the role of magnetic measurements[A]. In: K Richards, et al. (Ed.) Geomorphology and Soils[M]. London: G. Allen & Unwin, 1985. 245-266.

(上接第194页)

(1) 饱水状态下长期直剪流变试验研究,为软岩长期强度及流变参数的确定提供了有利的依据。试验研究结果表明,研究区内软岩具有明显的时效变形特性,在长期饱水状态下强度参数较快剪试验参数降低很多,长期强度参数 c 值在 57~160 kPa 之间, 值在 12~18° 之间,与饱水快剪强度参数 c 值 110~226 kPa、 值 18~27° 对比降低了约 60%。

参考文献:

- [1] 孔德坊.工程岩土学[M].北京:地质出版社,1991.
- [2] 杨绪波,黄润秋,等.紫坪铺水电站2#泄洪洞进水口边坡变形特征及其机理研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(12):2035-2040.
- [3] Vutukuri, V S, Lama, R D, Saluja, S S. Handbook on Mechanical Properties of Rocks[M]. 1974. - , 1978.
- [4] 邓荣贵,张倬元.锦屏水电站坝区绿片岩结构及力学特性研究[J].成都理工学院学报,2001,28(1):93-97.
- [5] 黄润秋,张倬元,王士天,等.黄河拉西瓦水电站高边坡稳定性的系统工程地质研究[M].成都:成都科技大学出版社,1991.
- [6] 曹树刚,边金,等.软岩蠕变试验与理论模型分析的对比[J].重庆大学学报自然科学版,2002,25(7):96-98.

(2) 研究区内软岩具有明显的时效变形特性,这是坝区多个开挖边坡可能沿软岩蠕滑拉裂破坏的潜在因素,特别是开挖后形成的多个高陡边坡,可能的破坏方式一定程度上是受到软岩带的影响,因此对于水库在长期运行期间是否安全,软岩的影响是不能忽视的。