

徐新文, 强小科, 符超峰等. Bartington MS2 和 Kappabridge MFK1-FA 不同频率的磁化率在黄土、红粘土和湖相沉积物中的应用. 地球物理学报, 2012, 55(1): 197-206, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 01. 019.

Xu X W, Qiang X K, Fu C F, et al. Characteristics of frequency-dependent magnetic susceptibility in Bartington MS2 and Kappabridge MFK1-FA, and its application in loess-paleosol, red clay and lacustrine sediments. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(1): 197-206, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 01. 019.

## Bartington MS2 和 Kappabridge MFK1-FA 不同频率的磁化率在黄土、红粘土和湖相沉积物中的应用

徐新文<sup>1,2</sup>, 强小科<sup>1\*</sup>, 符超峰<sup>1,3</sup>, 赵 辉<sup>1,2</sup>, 陈 艇<sup>1,2</sup>, 孙玉芳<sup>1,2</sup>

1 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 西安 710054

**摘 要** 通过 Bartington MS2 和 Kappabridge MFK1-FA 两种仪器对黄土-古土壤、红粘土和湖相沉积物样品进行了 5 个频率的磁化率测试, 并计算得到了 4 个频率磁化率. 通过对比分析不同类型样品磁化率-频率变化曲线可知, 当样品中细颗粒磁性矿物含量较高时, 磁化率在较低频率即可达到峰值, 而当样品中细颗粒磁性矿物含量较低时, 磁化率在较高频率时才能达到峰值. 因此, 在黄土-古土壤等样品的应用中, 成壤作用较强, 细颗粒亚铁磁性矿物含量较高, Bartington MS2 的低频(465 Hz)与 Kappabridge MFK1-FA 的  $F_1$ (976 Hz)和  $F_2$ (3905 Hz)频率均处于磁化率峰值区域, 可以检测到 SP/SD 阈值区域颗粒的信息, 但是对于红粘土和湖相沉积物等细颗粒亚铁磁性矿物含量较低的样品, 磁化率峰值对应的频率较高, MS2 型磁化率仪无法有效地检测其中细颗粒的含量, 而 MFK1-FA 中  $F_2$ (3905 Hz)和  $F_3$ (15616 Hz)两个频率间的频率磁化率则可以较好地完成这一任务.

**关键词** 频率磁化率, Bartington MS2 和 Kappabridge MFK1-FA 磁化率仪, 细颗粒亚铁磁性矿物

doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 01. 019

中图分类号 P318

收稿日期 2010-12-10, 2011-12-07 收修定稿

## Characteristics of frequency-dependent magnetic susceptibility in Bartington MS2 and Kappabridge MFK1-FA, and its application in loess-paleosol, red clay and lacustrine sediments

XU Xin-Wen<sup>1,2</sup>, QIANG Xiao-Ke<sup>1\*</sup>, FU Chao-Feng<sup>1,3</sup>, ZHAO Hui<sup>1,2</sup>,  
CHEN Ting<sup>1,2</sup>, SUN Yu-Fang<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education of China & Chang'an University, Xi'an 710054, China

**Abstract** Magnetic susceptibility (MS) of typical samples from Luochun loess-paleosol sequence, Zhuanglang core red clay, and Heqing core lacustrine sediments had been measured by

**基金项目** 国家自然科学基金(41072142, 40872114), 中国科学院知识创新工程重要方向项目群(KZCX2-YW-Q09-04), 黄土与第四纪国家重点实验室开放基金(SKLLQG0913)及自主部署项目(LQ0701)资助.

**作者简介** 徐新文, 男, 1981 年生, 博士研究生, 岩石磁学、环境磁学方向. E-mail: xuxinwen@ieecas. cn

\* **通讯作者** 强小科. E-mail: qiangxk@loess. llqg. ac. cn

Bartington MS2 and Kappabridge MFK1-FA meters. These two devices have five frequencies (two in MS2 and three in MFK1-FA) in all, and could get four frequency-dependent susceptibilities. MS achieve its peak value in low and high frequency when samples contain more and less fine grained particles respectively. Because of strong pedogenesis, loess-paleosol samples contain more fine grained particles, and could be detected by frequency-dependent susceptibility in both devices. However, for application in red clay and lacustrine sediments which lack fine grained ferrimagnetic particles, the low-frequency (465 Hz) in Bartington MS2 can not achieve peak value of magnetic susceptibility, and frequency-dependent susceptibility can not indicate the concentration of fine grained particles well. But Kappabridge MFK1-FA can do it well for its higher low-frequency ( $F_1$  is 976 Hz, and  $F_2$  is 3905 Hz).

**Keywords** Frequency-dependent magnetic susceptibility, Bartington MS2 and Kappabridge MFK1-FA magnetic susceptibility meter, Fine grained particles

## 1 引言

近年来,随着岩石磁学、环境磁学的不断发展和应用领域的日益拓宽,频率磁化率在古环境、古气候和现代环境演化过程的研究中扮演着非常重要的作用<sup>[1-9]</sup>. 在著名的中国黄土高原风成沉积序列的研究中,频率磁化率被认为可以表征成土过程中细颗粒(SD/SP 阈值区域,表示粒径介于超顺磁性颗粒和单畴颗粒间)磁性矿物的含量<sup>[7-17]</sup>. 虽然频率磁化率在众多海洋和湖泊研究中<sup>[6, 18-24]</sup>,以及现代土壤研究<sup>[7, 10, 16]</sup>和环境污染监测<sup>[19, 24]</sup>方面也得到的广泛的应用,但是对其物理意义的研究还无法达到黄土-古土壤序列的研究程度,在实际应用中存在诸多令人费解的现象,如频率磁化率极小(小于2%)<sup>[6, 19, 21-23]</sup>、甚至小于等于0<sup>[18, 20, 25]</sup>,这些现象对其环境和气候学意义的理解受到了极大的制约.

通常测试磁化率所使用的仪器为 MS2 Bartington 磁化率仪(误差为1%),高频为 4650 Hz,低频为 465 Hz. 频率磁化率也是在这两个频率下磁化率的差值. 近年来,AGICO 公司生产的 MFK1-FA 卡帕桥磁化率仪(误差为 0.1%)可进行 3 个频率下磁化率的测量(分别为 976 Hz、3905 Hz 和 15616 Hz),为在更多的频率下研究磁化率的变化提供了基础. 本文通过两台仪器共 5 个频率对黄土、红粘土和湖相沉积物进行了磁化率的测定,并计算了频率磁化率值,探讨频率磁化率在不同沉积物当中应用的可行性和局限性.

## 2 理论基础

磁化率从本质上来说是指物质磁化性能的度

量,有体积磁化率( $\kappa$ )和质量磁化率( $\chi$ )两种表达方式,数值上等于磁化强度( $M$ )/磁场强度( $H$ ). 磁化率的表达式和涉及的理论,前人已经做了不少工作<sup>[10-12, 26-31]</sup>. 本研究将侧重磁畴大小对磁化率的影响以及频率磁化率的实际应用. 单畴颗粒具有较高的稳定性,磁化率值不具有频率特性:

$$\chi_{SD} = 2/(3M_s/H_k), \quad (1)$$

其中, $M_s$  为饱和磁化强度, $H_k$  为微观矫顽力<sup>[12, 26]</sup>.

而超顺磁性颗粒则稳定性较差,交流磁化率受测量频率的影响较大,与测量频率成反比.

$$\chi_{SP} = \mu_0 / [(1 + \omega^2 \tau^2) M_s^2 / (3kT)], \quad (2)$$

其中, $\omega$  为测量频率, $\tau$  为弛豫时间, $k$  为玻尔兹曼常量, $T$  为绝对温度<sup>[26, 32]</sup>.

传统的磁学理论认为,磁畴位于单畴和超顺磁(SD/SP)阈值区域的颗粒,磁化率值与磁性弛豫时间有关( $\tau$ ),当测量间隔大于此时间时,这些颗粒显示稳定单畴的信息,磁化率值较低,而当测量间隔小于此时间时,颗粒显示超顺磁性特征,磁化率非常高<sup>[10-12, 26]</sup>. 测量频率与测量时间为倒数关系,当测量频率较低时,测量间隔比磁性弛豫时间慢,SD/SP 阈值区域的颗粒在磁化过程中可以达到平衡态,磁化率较高;反之,当测量频率较高时,测量间隔比磁性弛豫时间快,SD/SP 阈值区域的颗粒在磁化过程中无法达到平衡态,磁化率较低. 因此,在不同频率下测定的磁化率的差值可以用来表征磁畴位于 SD/SP 阈值区域内磁性颗粒的含量<sup>[7-8, 10-14, 26]</sup>.

通常测试磁化率所使用的仪器为 MS2 Bartington 磁化率仪,高频为 4650 Hz,低频为 465 Hz. 显示屏的读数实际上是体积磁化率,采用探头为 MS2B,测量精度最高可达  $0.1 \times 10^{-5}$  SI,相对误差小于 1%. 由于矫正时采用  $10 \text{ cm}^3$  水,读数为  $-0.9 \times 10^{-5}$  SI,将体

积磁化率乘以水的密度( $1.0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )即可得到质量磁化率( $\chi$ ), 值为  $-0.9 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . 然而在实际应用中, 样品的初始磁化率较小可能会增加测量误差, 在我们实验室多年来的应用当中, 认为重复测量后, 磁化率的分辨值小于  $0.3 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . 近年来, AGICO 公司生产的 MFK1-FA 卡帕桥磁化率仪可进行 3 个频率下磁化率的测量(分别为 976 Hz、3905 Hz 和 15616 Hz), 该仪器在 976 Hz 和 400 A/m 下, 体积磁化率的分辨率可达  $10^{-7} \text{ SI}$ , 矫正依据公式

$$\kappa_T = (V/V_0) \kappa_B, \quad (3)$$

其中,  $\kappa_T$  为总磁化率,  $\kappa_B$  表示块样的磁化率,  $V$  代表样品的实际体积,  $V_0$  对于卡帕桥系列仪器为  $10 \text{ cm}^3$ .

MFK-FA 在测量磁化率时可以选择体积和质量两种模式, 那么同理质量磁化率的校正只需将上述公式(3)中体积磁化率变成质量磁化率, 而体积则变为相应的质量即可.

由于两台仪器的误差分别为 1% 和 0.1%, 磁化率的最大分辨率分别为  $10^{-5} \text{ SI}$  和  $10^{-7} \text{ SI}$ , 同时所测得样品的磁化率读数均大于  $5 \times 10^{-5} \text{ SI}$ , 这种情况下, 不同仪器测得的磁化率值可以进行比较.

### 3 样品选取和实验方法

从经典的洛川剖面选取黄土(L1-L6)和古土壤(S0-S5)样品共 151 块, 在庄浪孔选取典型的红粘土样品 61 块, 在鹤庆孔选取典型的湖相沉积物样品 82 块. 取各类型样品重约 10 g, 首先使用 Bartington MS2 磁化率仪分别测试样品的高频(4650 Hz)和低频(465 Hz)磁化率, 并计算频率磁化率; 然后使用 MFK1-FA 卡帕桥磁化率仪测试样品在  $F_1$  (976 Hz)、 $F_2$  (3905 Hz) 和  $F_3$  (15616 Hz) 3 个频率下的磁化率, 并计算频率磁化率.

此外, 对洛川剖面典型的黄土和古土壤样品各 6 块进行了 CBD(citrate-bicarbonate-dithionite, 柠檬酸钠-重碳酸钠-连二亚硝酸钠)去细颗粒磁性物质处理, 获得了处理后的样品 4 g, 在两台仪器上测量 5 个不同频率下的磁化率. 每个样品取原样重 1 g, 在玛瑙研钵中磨碎块状样品, 然后加入到 CBD 处理所得的样品中, 将其混合均匀, 在两台仪器上测量 5 个不同频率下的磁化率. 将这一过程重复两遍, 这样就得到了 CBD 处理后样品与 1 g、2 g 和 3 g 原样的混合样品, 并测得了每个混合样品在 5 个频率下的磁化率值.

由于试验中用到了 5 个频率, 将 465、976 Hz、

3905、4650 Hz 和 15616 Hz 下测得的磁化率分别记做  $\chi_1$ 、 $\chi_2$ 、 $\chi_3$ 、 $\chi_4$  和  $\chi_5$ , 不同频率间计算所得频率磁化率做如下表示, 1 和 4 频率间的频率磁化率记做  $\chi_{fd14}$  及  $\chi_{fd14} \%$ , 为排除仪器不同造成的影响, 只计算了  $\chi_{fd14}$  (MS2 高低频之差) 及  $\chi_{fd23}$ 、 $\chi_{fd25}$  和  $\chi_{fd35}$  (MFK1-FA 获得的  $F_1$ 、 $F_2$  和  $F_3$  之间的差值).

## 4 结果

### 4.1 黄土-古土壤样品

黄土-古土壤样品磁化率为  $(20 \sim 200) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  不等, 变化较大. 磁化率最高值为 976 Hz 下测得, 而最低值为 4650 Hz 下测得,  $\chi_1 < \chi_2 > \chi_3 > \chi_4 < \chi_5$  (图 1). 不同频率测得的磁化率均可以很好地显示黄土-古土壤沉积旋回, 之间的线性相关系数均可达 0.99, 不同频率测得的磁化率与频率磁化率线性相关系数均可达 0.98 以上(表 1).

表 1 黄土-古土壤样品不同频率间磁化率值的相关性  
Table 1 Correlations between different frequency-dependent magnetic susceptibility of Loess-Paleosol

	$\chi_2$	$\chi_3$	$\chi_4$	$\chi_5$	$\chi_{fd14}$	$\chi_{fd23}$	$\chi_{fd25}$	$\chi_{fd35}$
$\chi_1$	0.9994	0.9992	0.9999	0.9983	0.9934	0.986	0.9871	0.9787
$\chi_2$		0.9999	0.9993	0.9994	0.9923	0.9846	0.9853	0.9767
$\chi_3$			0.9992	0.9996	0.9911	0.9822	0.9836	0.9754
$\chi_4$				0.9986	0.9914	0.9843	0.9856	0.9773
$\chi_5$					0.9891	0.9795	0.9788	0.9693

表 2 显示, CBD 处理后样品磁化率均大幅度降低, 黄土样品在 5 个频率下平均值为  $(20.66 \sim 23.74) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  不等, 但是总体变化幅度较小, 所有频率下的平均值为  $22.34 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 古土壤样品在 5 个频率下磁化率平均值为  $(20.53 \sim 23.69) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  不等, 变化幅度也很小, 所有频率下的平均值为  $22.23 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . 黄土和古土壤样品在 CBD 处理后磁化率值较为相似, 因此 CBD 有效地去除了成壤成因的细颗粒磁性矿物, 样品主要反映来自源区粗颗粒磁性矿物的信息, 即代表了粉尘磁化率的本底值(在本研究中为约为  $22.28 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ). 当 CBD 处理后所获样品中加入不同量的原样时, 混合样品的磁化率迅速升高, 达到原样中磁化率的水平.  $\chi_{fd14}$  (MS2 高低频之差) 为  $(0.45 \sim 1.07) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $\chi_{fd23}$ 、 $\chi_{fd25}$  和  $\chi_{fd35}$  为  $(0.77 \sim 1.29) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , 百分含量表示方法下均小于 6%.

表 2 黄土-古土壤样品 CBD 处理前后的磁化率变化

Table 2 Magnetic susceptibility of Loess-Paleosol samples before and after CBD treatment

	黄土	不同频率下测得的磁化率 $\chi / (10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$					古土壤	不同频率下测得的磁化率 $\chi / (10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$				
		$\chi_1$	$\chi_2$	$\chi_3$	$\chi_4$	$\chi_5$		$\chi_1$	$\chi_2$	$\chi_3$	$\chi_4$	$\chi_5$
CBD 处理前	LC-1-20	64.28	57.18	55.32	59.18	51.80	LC-3-9	173.47	178.71	168.37	154.23	153.07
CBD 处理后		25.69	28.33	28.75	24.63	27.05		26.13	29.07	29.52	25.69	28.02
加入 1g 原样		32.00	34.30	34.81	30.45	32.13		56.55	59.46	58.53	51.90	53.58
加入 2g 原样		36.13	38.15	38.27	33.63	35.75		77.13	79.57	77.72	69.33	71.00
CBD 处理前	LC28-4	56.20	58.72	56.70	51.80	52.78	LC21-9	239.93	246.44	230.79	211.39	207.48
CBD 处理后		23.44	25.41	25.76	22.69	24.19		23.81	26.19	26.70	23.38	25.16
加入 1g 原样		28.85	31.03	31.24	27.35	28.87		68.90	71.14	69.23	61.30	62.66
加入 2g 原样		33.75	35.79	35.72	31.38	33.31		100.67	103.34	99.48	89.25	89.62
CBD 处理前	LC43-8	80.32	83.17	78.99	72.18	72.45	LC40-1	206.72	211.86	198.53	182.52	179.07
CBD 处理后		22.44	24.47	24.75	21.56	23.26		21.94	24.46	24.64	21.31	23.16
加入 1g 原样		37.90	39.87	39.62	34.95	36.56		56.80	59.20	57.84	50.80	52.49
加入 2g 原样		45.29	47.64	46.55	41.46	42.84		81.50	84.19	81.13	71.71	73.22
CBD 处理前	LC64-4	40.44	42.55	41.28	37.65	38.69	LC57-11	162.13	165.78	155.54	142.43	140.39
CBD 处理后		19.38	21.14	21.34	18.88	20.14		18.38	20.18	20.48	17.75	19.41
加入 1g 原样		23.20	25.14	25.41	21.95	23.86		42.50	44.10	43.37	37.85	39.26
加入 2g 原样		26.13	27.68	27.83	24.75	26.07		63.46	65.91	63.83	56.25	57.45
CBD 处理前	LC93-7	60.70	62.74	59.96	55.22	55.84	LC78-1	210.74	215.64	202.28	186.49	182.23
CBD 处理后		18.25	20.10	20.24	17.50	18.94		18.13	19.63	19.81	17.19	18.74
加入 1g 原样		26.05	27.53	27.47	24.35	25.48		51.00	53.16	51.56	45.75	46.83
加入 2g 原样		32.29	33.76	33.51	29.58	30.75		79.38	82.33	79.72	70.54	71.23
CBD 处理前	LC99-11	73.90	79.28	75.19	66.90	68.11	LC102-8	263.80	269.70	251.52	233.30	225.23
CBD 处理后		19.63	21.52	21.65	18.75	20.53		18.94	20.77	20.99	17.88	19.75
加入 1g 原样		30.50	32.33	32.07	28.10	29.55		65.70	67.52	65.44	57.90	58.96
加入 2g 原样		38.75	40.67	40.03	35.75	36.47		99.63	102.27	98.57	87.83	88.13

## 4.2 红粘土

红粘土样品磁化率为  $(17 \sim 40) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  不等, 变化幅度总体较小. 磁化率最高值为 976 Hz 或 3950 Hz 下测得, 而最低值为 4650 Hz 下测得,  $\chi_1 < \chi_2 (\chi_3) > \chi_4 < \chi_5$  (图 1). 不同频率间所测得的磁化率线性相关系数均可达 0.99, 磁化率与频率磁化率的相关性变化较大,  $\chi_2$ 、 $\chi_3$ 、 $\chi_5$  与  $\chi_{fd25}$ 、 $\chi_{fd35}$ 、 $\chi_{fd23}$  (卡帕桥所得数据) 相关系数可达 0.86 甚至更高, 但  $\chi_1$ 、 $\chi_4$  与  $\chi_{fd14}$  (MS2 所得数据则) 相关系数仅为 0.46 (表 3).

## 4.3 湖相沉积物

湖相沉积物样品磁化率为  $(7.17 \sim 154.61) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  不等, 总体变化幅度较大. 磁化率最高值为 976 Hz 或 3950 Hz 下测得的值, 而最低值为 4650 Hz 下测得的值,  $\chi_1 < \chi_2 (\chi_3) > \chi_4 < \chi_5$  (图 1).

表 3 红粘土样品不同频率间磁化率值的相关性

Table 3 Correlations between different frequency-dependent magnetic susceptibility of red clay

	$\chi_2$	$\chi_3$	$\chi_4$	$\chi_5$	$\chi_{fd14}$	$\chi_{fd23}$	$\chi_{fd25}$	$\chi_{fd35}$
$\chi_1$	0.7791	0.7625	0.9913	0.7465	0.4559	0.7193	0.8814	0.8089
$\chi_2$		0.9987	0.7842	0.9971	0.2945	0.6249	0.8603	0.8507
$\chi_3$			0.7684	0.9987	0.2838	0.5896	0.8408	0.8481
$\chi_4$				0.7532	0.364	0.7088	0.874	0.8055
$\chi_5$					0.2738	0.5839	0.8214	0.8218

不同频率间所测得的磁化率线性相关系数均可达 0.99, 磁化率与频率磁化率的相关性变化较大, 各频率下测得的磁化率与  $\chi_{fd35}$  的相关性较好, 相关系数可达 0.89, 与  $\chi_{fd25}$  的相关性一般, 相关系数为约 0.6, 与  $\chi_{fd23}$  和  $\chi_{fd14}$  不相关 (表 4).

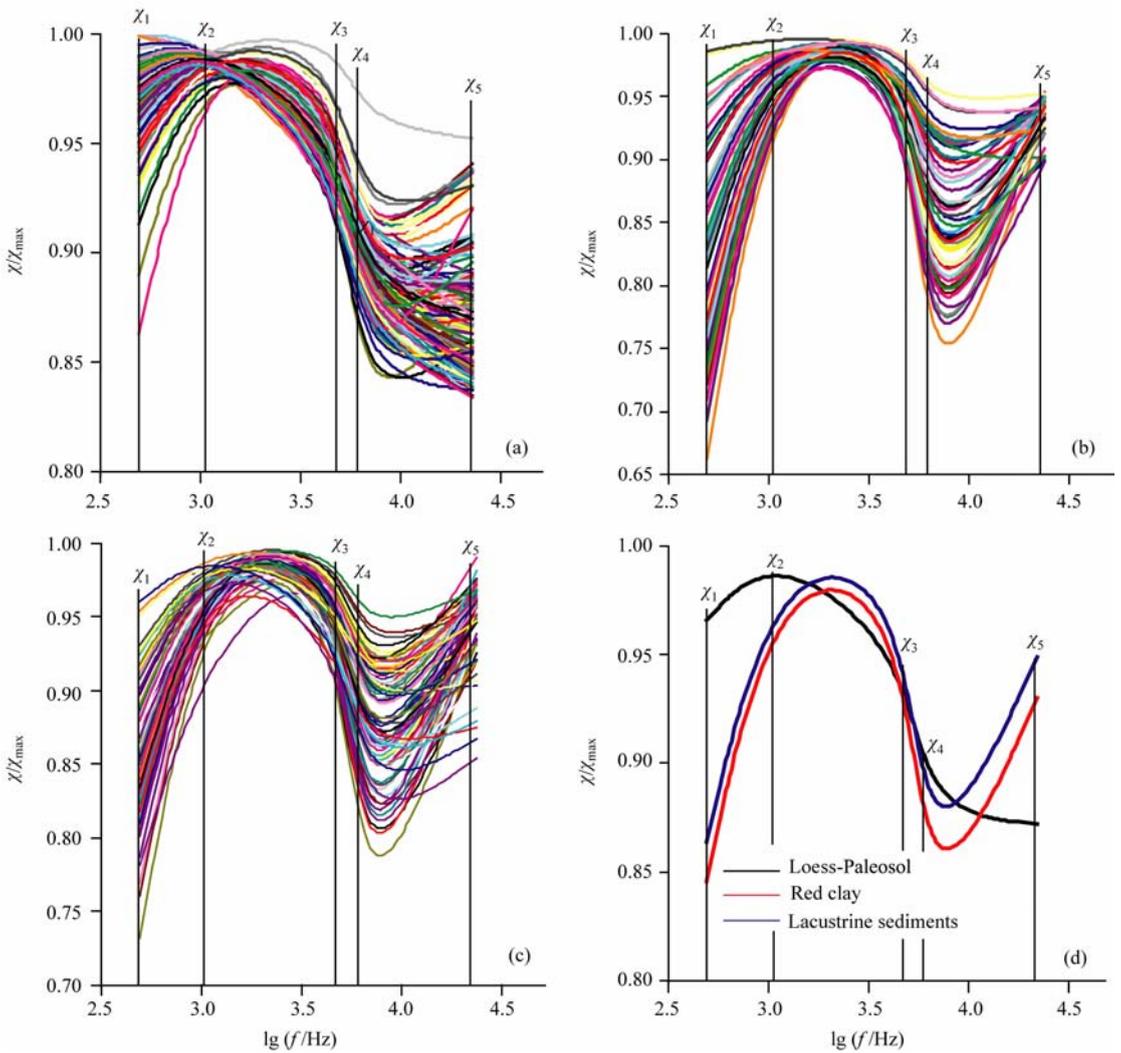


图 1 不同类型样品磁化率 ( $\chi$ ) 随频率变化曲线

(a) 为黄土-古土壤样品; (b) 红粘土样品; (c) 为湖相沉积物样品; (d) 为各类型样品标准化后取平均值获得的曲线, 其中图 a-c 中不同样品曲线采用颜色不同, 频率采用对数坐标,  $\chi_1$ - $\chi_5$  为 5 个频率下测得的磁化率值。

Fig. 1 Magnetic susceptibility ( $\chi$ ) of three types of samples verse frequency curve

Frequency use logarithmic coordinates,  $\chi_1$ - $\chi_5$  is  $\chi$  value in frequency 1-5. (a) Loess-Paleosol; (b) Red clay;

(c) Lacustrine sediments; (d) Average curve of three types of samples; different color in Fig 1(a-c) means different curve of samples.

表 4 湖相沉积物不同频率间磁化率值的相关性

Table 4 Correlations between different frequency-dependent magnetic susceptibility of lacustrine sediments

	$\chi_2$	$\chi_3$	$\chi_4$	$\chi_5$	$\chi_{fd14}$	$\chi_{fd23}$	$\chi_{fd25}$	$\chi_{fd35}$
$\chi_1$	0.9965	0.9967	0.996	0.996	0.0095	0.1995	0.6191	0.8987
$\chi_2$		0.9997	0.9994	0.9932	0.0084	0.189	0.6191	0.8922
$\chi_3$			0.9938	0.9998	0.0079	0.2034	0.6045	0.8909
$\chi_4$				0.9935	0.0012	0.2078	0.5966	0.8964
$\chi_5$					0.0073	0.205	0.5952	0.8819

## 5 讨论

### 5.1 不同频率磁化率在黄土-古土壤中的应用

黄土-古土壤样品中, 不同频率测得的磁化率间

相关性非常好, 相关系数可达 0.99 以上, 表明磁化率的增强与磁性矿物的含量升高有关; 不同磁化率和频率磁化率的相关性也很高, 相关系数达 0.98 以上, 表明样品中成壤过程中形成的细颗粒 (SP 和 SD) 磁性矿物的含量决定了磁化率的高低; 频率磁化率的百分含量  $\chi_{fd23}$  %、 $\chi_{fd25}$  % 和  $\chi_{fd35}$  % (MFK1-FA 测得) 分别在约 6.5%、16% 和 12% 趋于饱和,  $\chi_{fd14}$  % 在约 12% 趋于饱和 (图 2), 由此可见, 样品中细颗粒磁性矿物的相对含量趋于饱和, 表明成壤过程中形成的磁性矿物粒径分布基本恒定<sup>[15-17]</sup>. 此外,  $\chi_{fd25}$  %、 $\chi_{fd35}$  % 和  $\chi_{fd14}$  % 的最小值均为约 4%, 表明黄土-古土壤的频率磁化率百分含量的背景值为 4%<sup>[11, 15, 33]</sup>.

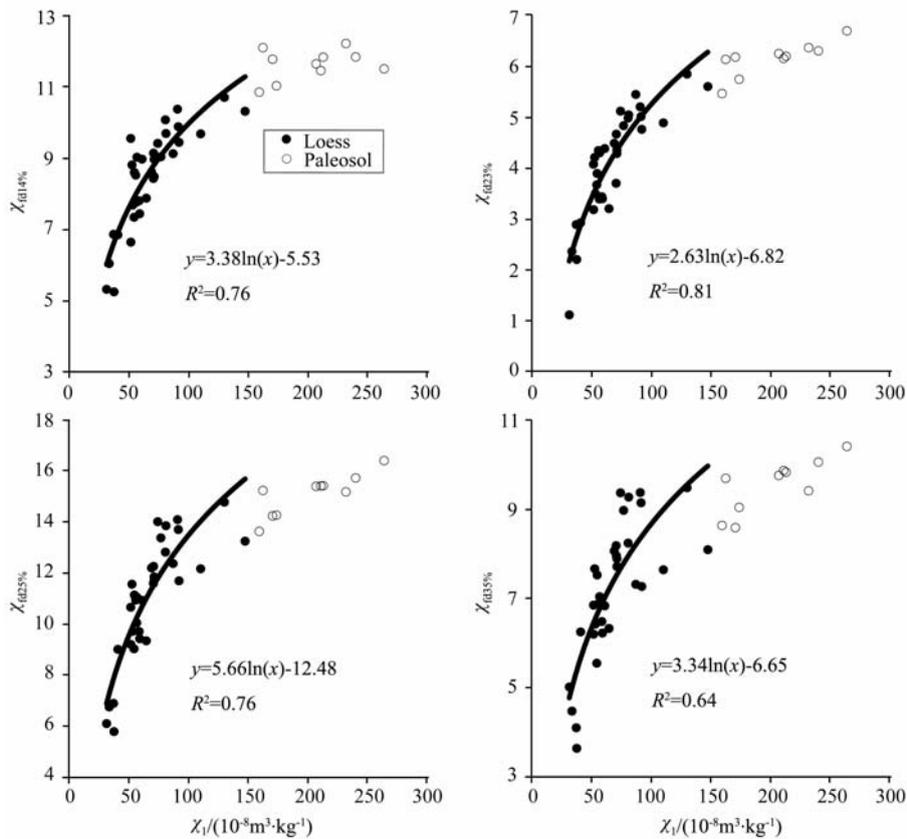


图 2 黄土-古土壤样品不同频率磁化率与磁化率的相关性变化

Fig. 2 Correlation between different frequency-dependent magnetic susceptibility of Loess-Paleosol

由图 1a 可知,磁化率随频率的变化较大, $\chi_1 < \chi_2 > \chi_3 > \chi_4 (\chi_5)$ , $\chi_2$  明显大于  $\chi_1$  和  $\chi_3$ , $\chi_1$  和  $\chi_3$  明显大于  $\chi_4$  和  $\chi_5$ . 对比分析  $\chi_1$ 、 $\chi_2$ 、 $\chi_3$ 、 $\chi_4$ 、 $\chi_5$  与  $\chi_{fd23}\%$ 、 $\chi_{fd25}\%$ 、 $\chi_{fd35}\%$ 、 $\chi_{fd14}\%$  的相关关系可知, $\chi_1$  与  $\chi_{fd14}\%$  的对数相关系数最好,为 0.82,其次为  $\chi_2$  与  $\chi_{fd23}\%$ ,对数相关系数为 0.78. 前者为 MS2 测得的数据,后者为 MFK1-FA 测得的数据(表 1). 因此,黄土-古土壤研究中 MS2 用的频率可以较好地反映磁化率的频率特性,MS2 型磁化率仪非常适用于黄土-古土壤研究. MFK1-FA 所用的频率可以较好地反映磁化率的频率特性,但以  $\chi_2$  和  $\chi_3$  及  $\chi_{fd23}\%$  效果最好,建议在黄土-古土壤研究中可采用其  $F_1$  (976 Hz) 和  $F_2$  (3905 Hz) 效果最好.

## 5.2 不同频率磁化率在红粘土中的应用

红粘土样品中,不同频率测得的磁化率间相关性非常好,相关系数可达 0.99 以上,表明磁化率的增强与磁性矿物的含量升高有关. 频率磁化率百分含量与磁化率没有明显的相关关系,且均比较小,各频率磁化率的平均值均小于 6%,表明红粘土中细颗粒磁性矿物的相对含量较低. 不同磁化率和频率磁化率的相关性较好,表明磁化率主要与细颗粒磁

性矿物的含量有关. 由图 1b 可知,磁化率在 976 或 3905 Hz 时达到最高值,而在 4650 Hz 时最小, $\chi_{fd35}$  和  $\chi_{fd25}$  为可以较好反映 SD/SP 阈值区颗粒的含量,而  $\chi_{fd23}$  和  $\chi_{fd14}$  则部分出现负值,不适合应用于实际工作中. 不同频率的磁化率与  $\chi_{fd25}$  和  $\chi_{fd35}$  的相关系数可达 0.86,与  $\chi_{fd23}$  的相关系数为 0.6~0.7,而与  $\chi_{fd14}$  的相关系数较差. 由此可见,MS2 在红粘土中的应用受到了一定的限制,但 MFK1-FA 则可以较好的表现出磁化率的频率特性,建议在红粘土研究中尤其是对其频率磁化率的应用应该采用 MFK1-FA.

## 5.3 不同频率磁化率在湖相沉积物中的应用

湖相沉积物样品中,不同频率测得的磁化率间相关性非常好,相关系数可达 0.99 以上,表明磁化率的增强与磁性矿物的含量升高有关. 频率磁化率百分含量与磁化率没有明显的相关关系,且均比较小,各频率磁化率大多小于 4%,表明湖相沉积物中细颗粒磁性矿物的相对含量非常低. 如图 1c 所示,磁化率在 976 或 3905 Hz 时达到最高值,而在 4650 Hz 时最小, $\chi_{fd35}$  和  $\chi_{fd25}$  为可以较好反映 SD/SP 阈值区颗粒的含量,而  $\chi_{fd23}$  和  $\chi_{fd14}$  则部分出现负值,不适合

应用于实际工作中. 各频率下测得的磁化率与  $\chi_{fd35}$  和  $\chi_{fd25}$  的相关性较好, 相关系数可达 0.89 与 0.6, 因此磁化率与细颗粒磁性矿物的绝对含量相关. 在湖相沉积物中, 磁性矿物颗粒普遍会受到还原成岩过程的改造, 与黄土序列的粒径分布存在明显差别<sup>[6, 18 20, 25, 34, 35]</sup>, MS2 两个频率下测得的磁化率在频率变化曲线中均处于低值区, 频率磁化率并不能完全反映沉积物中细颗粒的含量, 但 MFK1-FA 中磁化率峰值介于  $F_2$  和  $F_3$  两个频率间, 其频率磁化率可以较好地反映细颗粒含量的变化, 其使用在湖相沉积物研究中应该值得推广.

#### 5.4 频率磁化率对磁性矿物粒径变化的响应

黄土-古土壤中, 频率磁化率百分含量随磁化率的增大呈对数增大, 并且很快趋于饱和, 不同研究中饱和值略有不同. 区别分析黄土和古土壤样品则可知, 黄土样品存在明显的对数增长变化, 但古土壤样品则基本都位于饱和区域(图 2), 即古土壤样品不存在对数增长变化, 其磁性矿物粒径分布恒定, 细颗粒相对含量不变. 由磁化率的频率变化曲线可知, 古土壤样品的峰值区域较窄, 主要位于频率略小于 976 Hz 的范围内, 而黄土样品的峰值区域则要宽的多(图 3). 频率磁化率主要反映粒径处于 25~30 nm 间颗粒的含量, 那么推测古土壤样品中接近 25 nm 的颗粒较多, 而黄土样品则相对较少, 即成壤作用产生了更多的接近 25 nm 的细颗粒磁性矿物, 或者认为古土壤的 SP/SD 阈值粒径小于黄土样品.

CBD 处理后, 磁化率随频率变化曲线上峰值区

域向右偏移, 更靠近 3905 Hz 处, 指示了峰值区域粒径增大(图 4(a, b)). 由此可见, CBD 处理较为有效地去除了黄土-古土壤样品中细颗粒尤其是成壤过程中形成的大量接近 25 nm 的磁性矿物. 那么, 向 CBD 处理后的样品中加入不同量的原始样品将增加上述部分颗粒的相对含量. 结果显示, 磁化率随频率变化曲线中, 随着接近 25 nm 颗粒比例的增大, 976 Hz 处磁化率值增大较快, 磁化率峰值逐渐趋于 976 Hz 附近. 由上述结果可知, 磁化率的频率特性反映的并不仅仅是成壤过程中形成的接近 25 nm 颗粒的含量, 其真实反映的粒径范围要更广, 但接近 25 nm 部分对频率的变化最敏感.

通过前述讨论可知, 细颗粒磁性矿物含量在 CBD 处理后的样品中极低, 湖相沉积物中低, 红粘土中较低, 而黄土中较高, 古土壤中高. 对比分析它们的磁化率随频率变化曲线(图 4c)可知, 当细颗粒含量低时, 磁化率峰值处频率大, 处于 976~3905 Hz 间, 而当细颗粒含量高时, 磁化率峰值处频率较小, 略小于 976 Hz. 红粘土和湖相沉积物的磁化率随频率变化曲线相似, 磁化率峰值区域处于 976~3905 Hz 间, 可能主要归因于所含细颗粒更接近 SP/SD 阈值的上限, 下限处颗粒较少或缺失. 湖相沉积物普遍受到还原成岩过程的影响<sup>[25, 34, 35]</sup>, 而红粘土则形成于强烈氧化的环境. 细颗粒亚铁磁性矿物(主要为磁铁矿和磁赤铁矿)由于具有较大的比表面积, 易于被还原溶解或氧化成为不完全反铁磁性的赤铁矿, 致使磁化率大幅度降低, 细颗粒亚铁磁性矿物不易保存.

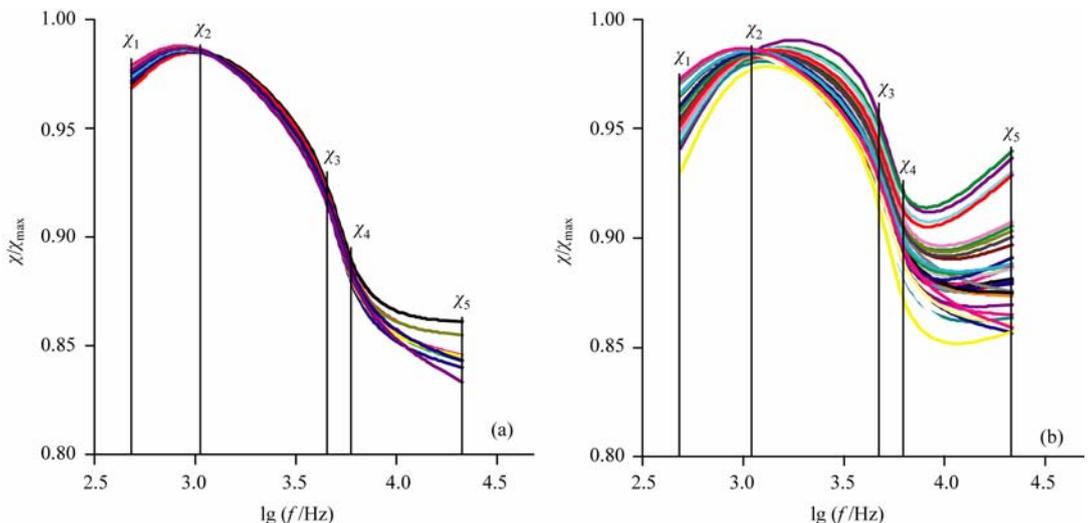


图 3 黄土-古土壤样品磁化率随频率变化曲线

(a) 黄土样品; (b) 古土壤样品. 频率采用对数坐标.

Fig. 3 Magnetic susceptibility of Loess-Paleosol samples verse frequency curve

(a) Loess; (b) Paleosol. Frequency use logarithmic coordinates.

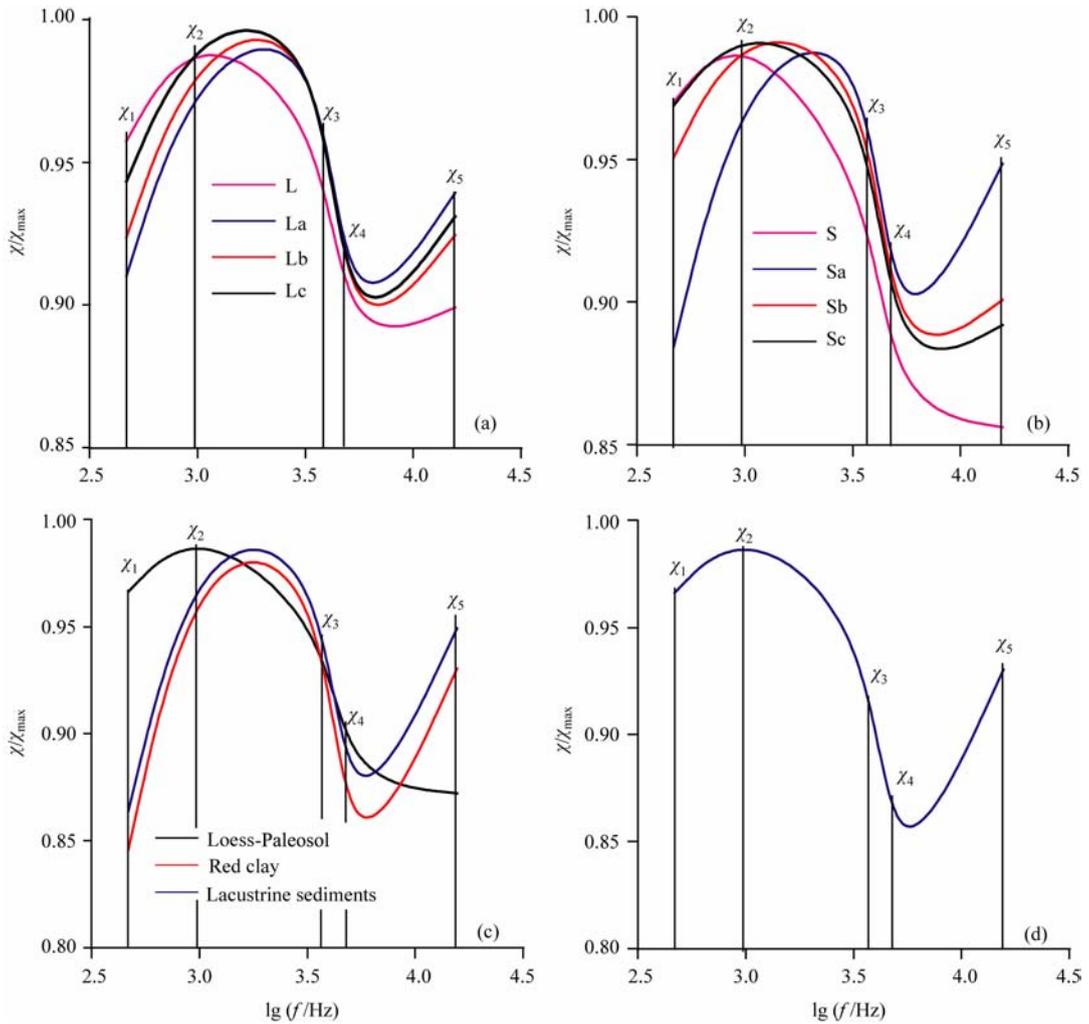


图 4 不同类型样品磁化率随频率变化曲线

频率采用对数坐标。(a)黄土样品;(b)古土壤样品;(c)各类型样品标准化后取平均值获得的曲线;(d)整合后的磁化率随频率变化曲线。

(a)和(b)图中L和S代表黄土和古土壤样品,a表示经CBD处理,b表示CBD处理后加入1g原始样品,c表示CBD处理后加入2g原始样品。

Fig. 4 Magnetic susceptibility of three types of samples verse frequency curve

Frequency use logarithmic coordinates. (a) Loess-Paleosol; (b) Red clay; (c) Lacustrine sediments; (d) Average curve of three types of samples; L (S)-Loess (Paleosol) sample, La (Sa)-Loess (Paleosol) sample after CBD treatment, Lb (Sb)- add 1 g Loess (Paleosol) powder before CBD treatment to the Loess (Paleosol) samples (about 4 g) after CBD treatment, Lc (Sc)- add 2 g Loess (Paleosol) powder before CBD treatment to the Loess (Paleosol) samples after CBD treatment.

黄土和古土壤样品的磁化率随频率变化曲线相似,更突出了细颗粒的变化,红粘土和湖相沉积物的磁化率随频率变化曲线相似.多畴颗粒在磁场中比单畴颗粒更容易被磁化<sup>[27-30]</sup>,理论上应该具有更高的磁化率,15616 Hz处磁化率的升高可能与多畴(MD)颗粒的相对含量升高有关.选取标准化曲线中黄土-古土壤的前3个点和红粘土、湖相沉积物的后2个点,试图建立一个可以完整表现细颗粒和粗颗粒磁性矿物磁化率随频率的变化曲线.在该曲线中(图4d),磁化率的峰值位于976 Hz处,谷值则位于4650 Hz处,若细颗粒磁性矿物含量较高时(接近阈值下限的颗粒较多),磁化率的峰值频率较低,两

种仪器的低频均可以有效检测到阈值区域内颗粒的磁化率信息,然而,当细颗粒磁性矿物含量较低时(接近阈值下限的颗粒较少),磁化率的峰值频率增大,处于976~3905 Hz间,MS2的低频(465 Hz)无法有效的检测到阈值区域内颗粒的磁化率信息,MS2型磁化率仪不再适用于频率磁化率的测量,而MFK1-FA型磁化率仪的 $F_1$ (976 Hz)和 $F_2$ (3905 Hz)则可以检测到阈值区域内颗粒的磁化率信息,对庄浪红粘土和鹤庆湖相沉积物的实践表明 $F_2$ 和 $F_3$ (15616 Hz)频率更适合此类情况下频率磁化率的测量.

由于两台仪器只能提供5个频率,得到的磁化

率峰值区域对应的频率可能不是非常精确,所以无法得到磁化率随频率变化的理论曲线,但文中所得到的结论在目前仪器的状况下可以解决应用中的问题。

## 6 结 论

通过对比分析 Bartington MS2 和 Kappabridge MFK1-FA 两种仪器对黄土-古土壤,红粘土和湖相沉积物在 5 个频率下测得的磁化率,认为频率磁化率可以较好地反映样品中细颗粒磁性矿物尤其是粒径接近 25 nm 颗粒的含量,但是对于不同的样品,磁化率峰值对应的频率不同,频率磁化率反映的粒径范围也不同,应采用不同的频率计算频率磁化率。黄土-古土壤等细颗粒含量较高的样品,磁化率峰值对应的频率较低, Bartington MS2 的低频(465 Hz)和 Kappabridge MFK1-FA 的  $F_1$  (976 Hz) 和  $F_2$  (3905 Hz) 频率均处于磁化率峰值区域,可以检测到 SP/SD 阈值区域颗粒的信息,但是对于红粘土和湖相沉积物等细颗粒亚铁磁性矿物含量较低的样品,磁化率峰值对应的频率较高, MS2 型磁化率仪无法有效的检测其中细颗粒的含量,而 MFK1-FA 中  $F_2$  (3905 Hz) 和  $F_3$  (15616 Hz) 两个频率间的频率磁化率则可以较好的完成这一任务。

**致 谢** 感谢邓成龙研究员提供有关 CBD 处理的程序。

## 参考文献 (References)

[1] An Z S, Kukla G J, Porter S C, et al. Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of central China during the last 130, 000 years. *Quaternary Research*, 1991, 36(1): 29-36.

[2] Bentley M S, Ball A J, Potter D K, et al. In situ multi-frequency measurements of magnetic susceptibility as an indicator of planetary regolith maturity. *Planetary and Space Science*, 2009, 57(12): 1491-1499.

[3] Evans M, Heller F. *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics*. New York: Academic Press, 2003.

[4] Evans M E, Heller F, Bloemendal J, et al. Natural magnetic archives of past global change. *Surveys in Geophysics*, 1997, 18(2-3): 183-196.

[5] Heller F, Evans M E. Loess magnetism. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(2): 211-240.

[6] Oldfield F, Dearing J. The role of human activities in past environmental change. *Paleoclimate, Global Change and the Future*. Berlin: Springer, 2003: 143-162.

[7] Maher B A. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, 137(1-2): 25-54.

[8] Thompson R, Oldfield F. *Environmental Magnetism*. London: Allen & Unwin, 1986.

[9] Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess. *Nature*, 1990, 346(6286): 737-739.

[10] Dearing J A, Dann R J L, Hay K, et al. Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geophysical Journal International*, 1996, 124(1): 228-240.

[11] Eyre J K. Frequency dependence of magnetic susceptibility for populations of single-domain grains. *Geophysical Journal International*, 1997, 129(1): 209-211.

[12] Worm H U. On the superparamagnetic-stable single domain transition for magnetite, and frequency dependence of susceptibility. *Geophysical Journal International*, 1998, 133(1): 201-206.

[13] Jackson M, Worm H U. Anomalous unblocking temperatures, viscosity and frequency-dependent susceptibility in the chemically-remagnetized Trenton limestone. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, 126(1-2): 27-42.

[14] Muxworthy A R. Effect of grain interactions on the frequency dependence of magnetic susceptibility. *Geophysical Journal International*, 2001, 144(2): 441-447.

[15] Liu Q S, Jackson M J, Banerjee S K, et al. Mechanism of the magnetic susceptibility enhancements of the Chinese loess. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: B12107, doi: 10.1029/2004JB003249.

[16] Liu Q S, Torrent J, Maher B A, et al. Quantifying grain size distribution of pedogenic magnetic particles in Chinese loess and its significance for pedogenesis. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110 (B11): B11102, doi: 10.1029/2005JB003726.

[17] Torrent J, Liu Q S, Bloemendal J, et al. Magnetic enhancement and iron oxides in the Upper Luochuan Loess-paleosol sequence, Chinese Loess plateau. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(5): 1570-1578.

[18] Reynolds R L, Rosenbaum J G, van Metre P, et al. Greigite ( $Fe_3S_4$ ) as an indicator of drought-The 1912~1994 sediment magnetic record from White Rock Lake, Dallas, Texas, USA. *Journal of Paleolimnology*, 1999, 21(2): 193-206.

[19] Yu L Z, Oldfield F, Wu Y S, et al. Paleoenvironmental implications of magnetic measurements on sediment core from Kunming Basin, Southwest China. *Journal of Paleolimnology*, 1990, 3(2): 95-111.

[20] 胡守云, 吉磊, 王苏民等. 呼伦湖地区扎赉诺尔晚第四纪湖泊沉积物的磁化率变化及其影响因素. *湖泊科学*, 1995, 7(1): 33-40.

Hu S, Ji L, Wang S, et al. Magnetic susceptibility of the late Quaternary lacustrine sediments and its influence factors Jula

- Nur, Hulun Lake area. *Journal of Lake Sciences* (in Chinese), 1995, 7(1): 33-40.
- [21] 殷勇, 方念乔, 王倩等. 云南中甸纳帕海湖泊沉积物的磁化率及环境意义. *地理科学*, 2002, 22(4): 413-419.  
Yin Y, Fang N, Wang Q, et al. Magnetic susceptibility of lacustrine sediments and its environmental significance: evidence from Napahai lake, Northwestern Yunnan, China. *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 2002, 22(4): 413-419.
- [22] 吴瑞金. 湖泊沉积物的磁化率、频率磁化率及其古气候意义——以青海湖、岱海近代沉积为例. *湖泊科学*, 1993, 5(2): 128-135.  
Wu R. Magnetic susceptibility ( $\chi$ ) and frequency dependent susceptibility ( $\chi_{fd}$ ) of lake sediments and their paleoclimatic implication—The case of recent sediments of Qinghai Lake and Daihai Lake. *Journal of Lake Sciences* (in Chinese), 1993, 5(2): 128-135.
- [23] 俞立中, 许羽, 张卫国. 湖泊沉积物的矿物磁性测量及其环境应用. *地球物理学进展*, 1995, 10(1): 11-22.  
Yu L, Xu Y, Zhang W. Magnetic measurement on lake sediment and its environmental application. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 1995, 10(1): 11-22.
- [24] Zhang W G, Yu L Z, Hutchinson S M. Diagenesis of magnetic minerals in the intertidal sediments of the Yangtze Estuary, China, and its environmental significance. *The Science of the Total Environment*, 2001, 266(1-3): 169-175.
- [25] Robinson S G, Sahota J T S, Oldfield F. Early diagenesis in North Atlantic abyssal plain sediments characterized by rock-magnetic and geochemical indices. *Marine Geology*, 2000, 163(1-4): 77-107.
- [26] Néel L. Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec applications aux terres cuites. *Annales Geophysicae*, 1949, 5: 99-336.
- [27] Dekkers M J. Environmental magnetism: an introduction. *Geologie en Mijnbouw*, 1997, 76(1-2): 163-182.
- [28] Dunlop D, Özdemir Ö. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. New York: Cambridge University Press, 1997.
- [29] 朱岗崑. 古地磁学——基础、原理、方法、成果与应用. 北京: 科学出版社, 2004.  
Zhu G K. *Paleomagnetism-Basis, Principles, Methods, Results and Applications* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2004.
- [30] Tauxe L. *Lectures in Paleomagnetism*, 2005. Available online, <http://earthref.org/MAGIC/books/Tauxe/2005/>.
- [31] 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 Q, Deng C. Magnetic susceptibility and its environmental significances. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(4): 1041-1048.
- [32] Stoner E C, Wohlfarth E P. A mechanism of magnetic hysteresis in heterogeneous alloys. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1948, 240(826): 599-642.
- [33] Xie Q Q, Chen T H, Xu H F, et al. Quantification of the contribution of pedogenic magnetic minerals to magnetic susceptibility of loess and paleosols on Chinese Loess Plateau: Paleoclimatic implications. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: B09101, doi: 10.1029/2008JB005968.
- [34] Snowball I, Thompson R. The occurrence of greigite in sediments from Loch Lomond. *Journal of Quaternary Science*, 1988, 3(2): 121-125.
- [35] Hu S Y, Deng C L, Appel E, et al. Environmental magnetic studies of lacustrine sediments. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(7): 613-616.

(本文编辑 汪海英)