

陈曦,张卫国,俞立中. 赤铁矿与磁铁矿混合比例对磁性参数的影响. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 82~88

Chen X, Zhang W G, Yu L Z. The dependence of magnetic parameters on the mixing proportion of hematite and magnetite. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, 24(1): 82~88

## 赤铁矿与磁铁矿混合比例对磁性参数的影响

陈 曦, 张卫国, 俞立中

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘 要** 本文通过将磁铁矿与赤铁矿进行人工混合, 其中磁铁矿含量固定为 0.3%, 而赤铁矿含量则变化于 0%~9%, 并根据磁铁矿颗粒大小分为两个系列(纳米级磁铁矿+赤铁矿, 系列 1; 假单畴磁铁矿+赤铁矿, 系列 2), 探讨了磁性参数对上述磁性矿物混合比例的响应关系. 结果显示: 退磁参数  $S$  比值和  $H_{cr}/H_c$  不仅与磁铁矿和赤铁矿混合比例相关, 同时也受到磁铁矿颗粒大小的影响, 对于系列 1 而言,  $S$  比值对赤铁矿含量小于 2% 的混合样品较敏感, 随着赤铁矿含量增加显著下降;  $H_{cr}/H_c$  则在赤铁矿含量大于 3% 时变化较大. 通常用于指示亚铁磁性矿物颗粒大小的参数  $\chi_{ARM}/\chi$  与  $\chi_{ARM}/SIRM$ , 也受到磁铁矿与赤铁矿混合比例的影响, 对于磁铁矿颗粒较细的系列 1 而言, 当赤铁矿含量小于 3% 时,  $\chi_{ARM}/SIRM$  随着赤铁矿含量增加存在较为显著的下降现象. 上述结果表明, 当使用磁性参数进行环境解释时, 需要同时考虑磁性矿物颗粒大小以及不同矫顽力矿物混合比例的影响, 特别是磁铁矿以超顺磁颗粒为主的样品.

**关键词** 磁铁矿, 赤铁矿, 磁性参数, 混合比例

**中图分类号** P315

**文献标识码** A

**文章编号** 1004-2903(2009)01-0082-07

## The dependence of magnetic parameters on the mixing proportion of hematite and magnetite

CHEN Xi, ZHANG Wei-guo, YU Li-zhong

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062)

**Abstract** In this study, magnetic measurements were conducted on two series of hematite and magnetite mixtures, with the purpose to study the response of magnetic parameters to the mixture of magnetic minerals with different coercivities. Series 1 and 2 were formed by mixing 0.3% superparamagnetic and pseudo-single-domain magnetite with varying proportions (0~9%) of hematite in a  $\text{CaCO}_3$  matrix, respectively.  $S$  ratios and  $H_{cr}/H_c$ , which are sensitive to the mixture of magnetic minerals with different coercivities, and are also impacted by the grain size of magnetite.  $S$  ratios of series 1 decline more dramatically than those of coarse-grained series 2 when the content of hematite is less than 2%. For series 1,  $H_{cr}/H_c$  ratios display larger variations when the hematite content is more than 3%. The results demonstrate that the widely used magnetic grain size indicators  $\chi_{ARM}/\chi$  and  $\chi_{ARM}/SIRM$  are also influenced by the proportions of ferrimagnetic versus antiferromagnetic minerals. For series 1 with fine-grained magnetite,  $\chi_{ARM}/SIRM$  shows an evident decline with increasing hematite content up to 3%. Meanwhile, this study indicates that there should be cautions in the interpretations of magnetic parameters. The influence of magnetite grain size on the coercivity indicators should be properly addressed, especially in the case of mixture composed of superparamagnetic magnetite and hematite.

**Keywords** magnetite, hematite, magnetic parameters, mixture proportion

**收稿日期** 2008-06-10; **修回日期** 2008-11-20.

**基金项目** 国家自然科学基金(40771201)、教育部科学技术研究重点项目(107048)联合资助.

**作者简介** 陈曦, 女, 1983 年生, 陕西西安人, 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室硕士研究生, 主要从事海洋化学与环境磁学方面的研究. (E-mail: 51062601008@ecnu.cn)

## 0 引 言

由于铁是地壳中丰度第四的元素,氧化铁是土壤、沉积物中普遍存在的组分<sup>[1]</sup>.从环境磁学的角度,不同形式的氧化铁具有不同的磁性特征,如磁铁矿( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )与磁赤铁矿( $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ )是亚铁磁性矿物,赤铁矿( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ )与针铁矿( $\alpha\text{FeOOH}$ )属于不完整反铁磁性矿物,前者相对后者具有较强的磁性和较低的矫顽力<sup>[2~4]</sup>.自然界中,土壤或沉积物中的氧化铁往往是多种矿物的混合物,因而样品测量所得的磁性参数也是不同氧化铁贡献的结果.不同的氧化铁具有不同的来源或形成条件,从而蕴含了物源、成土作用、成岩作用等环境信息,因此定量表达不同形式的氧化铁,成为当前环境磁学研究领域的一个热点问题<sup>[5~15]</sup>.

土壤或沉积物中,弱磁性的不完整反铁磁性矿物,其含量一般远高于磁铁矿,但由于其磁性很弱,往往磁学参数的总体行为为后者所主导<sup>[4]</sup>.目前常用的环境磁学参数中,磁化率( $\chi$ )和饱和等温剩磁(SIRM)主要反映了亚铁磁性矿物的含量,硬剩磁(HIRM)则可视作不完整反铁磁性矿物的度量.退磁参数 $S_{-100}$ 和 $S_{-300}$ 反映了亚铁磁性和不完整反铁磁性矿物的相对比例,随着亚铁磁性矿物比例的上升而增加.此外,常用的Day图<sup>[16]</sup>中,随着不完整反铁磁性矿物的存在,样品在Day图上的位置会向 $H_{cr}/H_c$ 和 $M_{rs}/M_s$ 增大的方向偏移<sup>[17]</sup>.上述参数虽然能定性表达磁性矿物混合的信息,但要定量地建立磁性矿物含量与上述参数的关系,还存在较大的不确定性,这是因为磁性参数不仅受氧化铁的类型和含量的影响,还与磁性矿物的颗粒大小、杂质含量等有关<sup>[18]</sup>.

本文将化学合成的赤铁矿与磁铁矿按一定比例进行人工混合,测量磁性参数随着两类矿物相对比例的变化,比较退磁参数以及Day图对不同矫顽力磁性矿物混合比例响应的灵敏程度,以期对环境磁学参数的定量解释提供基础资料.由于土壤中亚铁磁性颗粒大小对磁性参数有很大影响,故本文采用了两种不同颗粒大小的磁铁矿参与混合实验.

## 1 样品制备及分析

### 1.1 样品制备

本文制备两组系列进行研究,依次为赤铁矿( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,分析纯)与纳米级磁铁矿的混合系列,定为系列1;赤铁矿( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,分析纯)与假单畴磁铁矿

( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,化学纯)的混合系列,定为系列2.赤铁矿及假单畴磁铁矿样品由中国上海山海工学团实验二厂合成,纳米级磁铁矿由华东师范大学物理系姜继森教授提供.每组系列均有6个样品,以碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )作为基质,按表1称取赤铁矿和磁铁矿,保持总质量均为4g,磁铁矿的含量保持0.3%不变,赤铁矿含量逐渐增加,其中 $f$ 为赤铁矿的质量百分比( $f = m_{\text{Fe}_2\text{O}_3} / 4 \times 100$ ),之后用针筒分别加入5 mL丙酮溶液(分析纯,上海溶剂厂),用玻棒充分搅拌均匀后,放入超声波振荡器中振荡30 s左右,最后低温( $< 40^\circ\text{C}$ )烘干<sup>[19]</sup>.

表1 样品磁铁矿和赤铁矿混合比例

Table 1 The proportions of magnetite and hematite in the mixtures

样品编号	$m_{\text{CaCO}_3}$ (g)	$m_{\text{Fe}_3\text{O}_4}$ (g)	$m_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ (g)	$f$ (%)	$m_{\text{Fe}_2\text{O}_3} / m_{\text{Fe}_3\text{O}_4}$
1	3.988	0.012	0.000	0.0	0
2	3.928	0.012	0.060	1.5	5:1
3	3.868	0.012	0.120	3.0	10:1
4	3.808	0.012	0.180	4.5	15:1
5	3.748	0.012	0.240	6.0	20:1
6	3.688	0.012	0.300	7.5	25:1

### 1.2 样品分析

称取3g左右样品,置于10 mL的圆柱状聚乙烯样品盒中,压实、固定后进行磁性测量.具体步骤如下:(1)弱磁场中的低频磁化率( $\chi_{\text{LF}}$ , 0.47 kHz)和高频磁化率( $\chi_{\text{HF}}$ , 4.7 kHz);(2)非磁滞剩磁(ARM, 交变磁场峰值100 mT, 直流磁场0.04 mT, 本文表达为磁化率形式 $\chi_{\text{ARM}}$ );(3)饱和等温剩磁(SIRM, 磁场强度为1T);(4)具有饱和等温剩磁的样品在磁场强度-100 mT、-300 mT 磁场退磁后所携带的剩磁.磁化率测量采用英国 Bartington MS2 磁化率仪;非磁滞剩磁(ARM)和等温剩磁(IRM)测量由英国 Molspin 公司生产的交变退磁仪、脉冲磁化仪和 Minispin 旋转磁力仪完成.根据测量结果,计算单位质量磁化率 $\chi$ , 饱和等温剩磁 SIRM, 硬剩磁 HIRM ( $\text{HIRM} = [\text{SIRM} + \text{IRM}_{-300\text{mT}}] / 2$ ), 非磁滞剩磁磁化率( $\chi_{\text{ARM}}$ )以及各种比值参数,如频率磁化率 $\chi_{\text{fd}\%}$  ( $\chi_{\text{fd}\%} = [\chi_{\text{LF}} - \chi_{\text{HF}}] / \chi_{\text{LF}} \times 100$ ),  $\chi_{\text{ARM}} / \chi$ ,  $\chi_{\text{ARM}} / \text{SIRM}$ ,  $\text{SIRM} / \chi$ ,  $S_{-100}$  ( $S_{-100} = [\text{SIRM} - \text{IRM}_{-100\text{mT}}] / [2 \times \text{SIRM}] \times 100$ ),  $S_{-300}$  ( $S_{-300} = [\text{SIRM} - \text{IRM}_{-300\text{mT}}] / [2 \times$

SIRM]  $\times 100$ ) 等. 具体测量方法和磁学参数的含义可参照文献[20]. 利用 MMVFTB 多功能磁性测量仪器测量磁滞回线、IRM 退磁曲线和居里(奈尔)温度等磁性参数.

## 2 研究结果

### 2.1 端元矿物的磁性特征

用于本文研究的赤铁矿与磁铁矿的磁学性质见表 2、图 1 与图 2. 从表 2 与图 1 看出, 纳米级磁铁矿的  $\chi_{fd\%}$  值较高, 磁滞回线是完全可逆的, 表明其具有超顺磁的特征, 同时, 从图 4 也可看出用于系列 2 的磁铁矿落在 PSD 区域, 而纳米级磁铁矿落在 MD+

SP 区域. 由图 2 可知, 热磁曲线显示磁铁矿样品的居里温度在 580°C 左右, 赤铁矿样品的奈耳温度在 680°C 左右, 这与两种矿物的居里(奈耳)温度报道值一致, 经过加热后, 纳米级磁铁矿的磁化强度大幅度下降, 反映了加热过程中细颗粒的磁铁矿基本转化为弱磁性的氧化铁. 赤铁矿的饱和磁化强度  $M_s$  值与已有报道值一致<sup>[21]</sup>, SIRM 值比文献值偏低<sup>[20]</sup>, 这可能与样品的纯度、仪器的饱和磁场偏低等因素有关. 利用 Molspin 测得的纳米级磁铁矿的 SIRM 值要低于 VFTB 获得的  $M_{rs}$  值, 可能是由超顺磁颗粒在两个仪器中测量所用时间差异所致. 假单畴磁铁矿的  $M_s$  值亦与报道值相近<sup>[22]</sup>.

表 2 用于混合试验的赤铁矿与磁铁矿的磁学特征

Table 2 The magnetic parameters of hematite and magnetite used in the present artificially mixing study

磁学参数	$\chi$ $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	$\chi_{fd\%}$	SIRM $\text{Am}^2 \text{ kg}^{-1}$	HIRM $\text{Am}^2 \text{ kg}^{-1}$	$\chi_{ARM}$ $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	$H_{cr}$ mT	$H_e$ mT	$M_{rs}$ $\text{Am}^2 \text{ kg}^{-1}$	$M_s$ $\text{Am}^2 \text{ kg}^{-1}$
赤铁矿	0.375	0	0.06	0.043	2.2	430	421	0.06	0.19
磁铁矿(纳米级)	520	4.76	0.5	0	568	11	1.32	0.8	25
磁铁矿(假单畴)	503	0.75	11.6	0	227	36	15	12	90

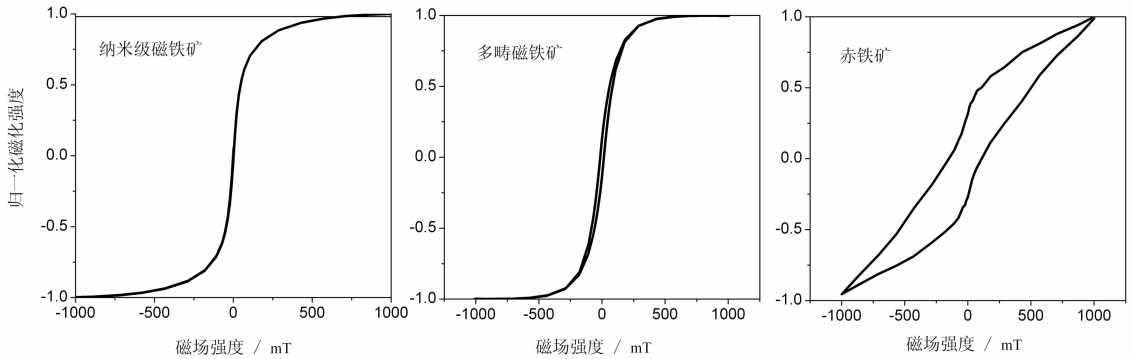


图 1 端元样品磁滞回线

Fig. 1 Hysteresis loops of the end-members

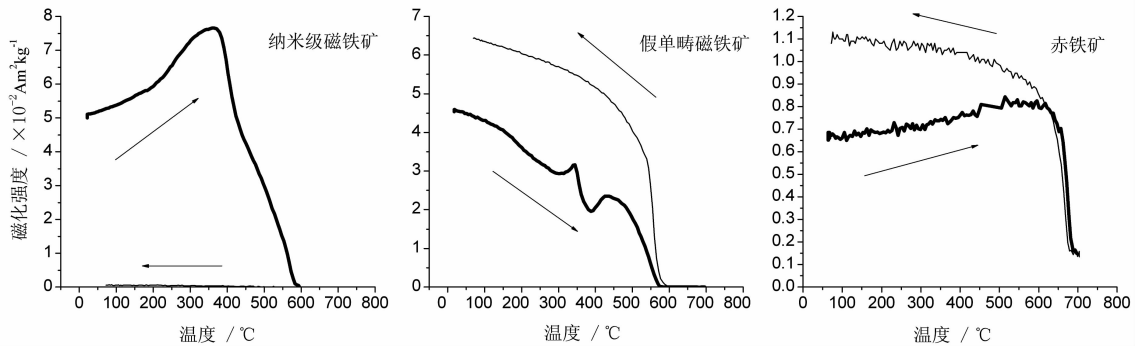


图 2 端元样品热磁曲线

粗线和细线分别代表加热和冷却曲线, 空气中加热, 磁场为 34mT

Fig. 2 Thermomagnetic curves of the end-members

The bold and thin lines represent the heating and cooling curves, respectively

The samples are heated in the air in the field of 34 mT.

## 2.2 混合系列的磁性特征

从图 3 我们可以看到,就同一系列而言,不同磁性参数随赤铁矿含量增加的变化趋势是不同的,其中,对系列 1 而言,磁化率  $\chi$  与频率磁化率  $\chi_{fd\%}$  的变化趋势大致相同,均受赤铁矿含量增加的影响较小,而饱和等温剩磁 SIRM、硬剩磁 HIRM、SIRM/ $\chi$ 、 $\chi_{ARM}/\chi$ 、 $H_{cr}/H_c$  随赤铁矿含量增加都有所增大,只

是上升的幅度不一,退磁参数 S 比值与  $\chi_{ARM}/SIRM$  的比值随赤铁矿含量的增加呈下降趋势;同时,同一磁性参数对于不同系列而言也会有差异. 系列 2 的饱和等温剩磁 SIRM、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 、 $H_{cr}/H_c$  的变化趋势与系列 1 不同,其中 SIRM 随赤铁矿含量上升呈下降趋势,另外两个参数变化不大. 就退磁参数 S 比值而言,系列 1 的下降趋势明显大于系列 2.

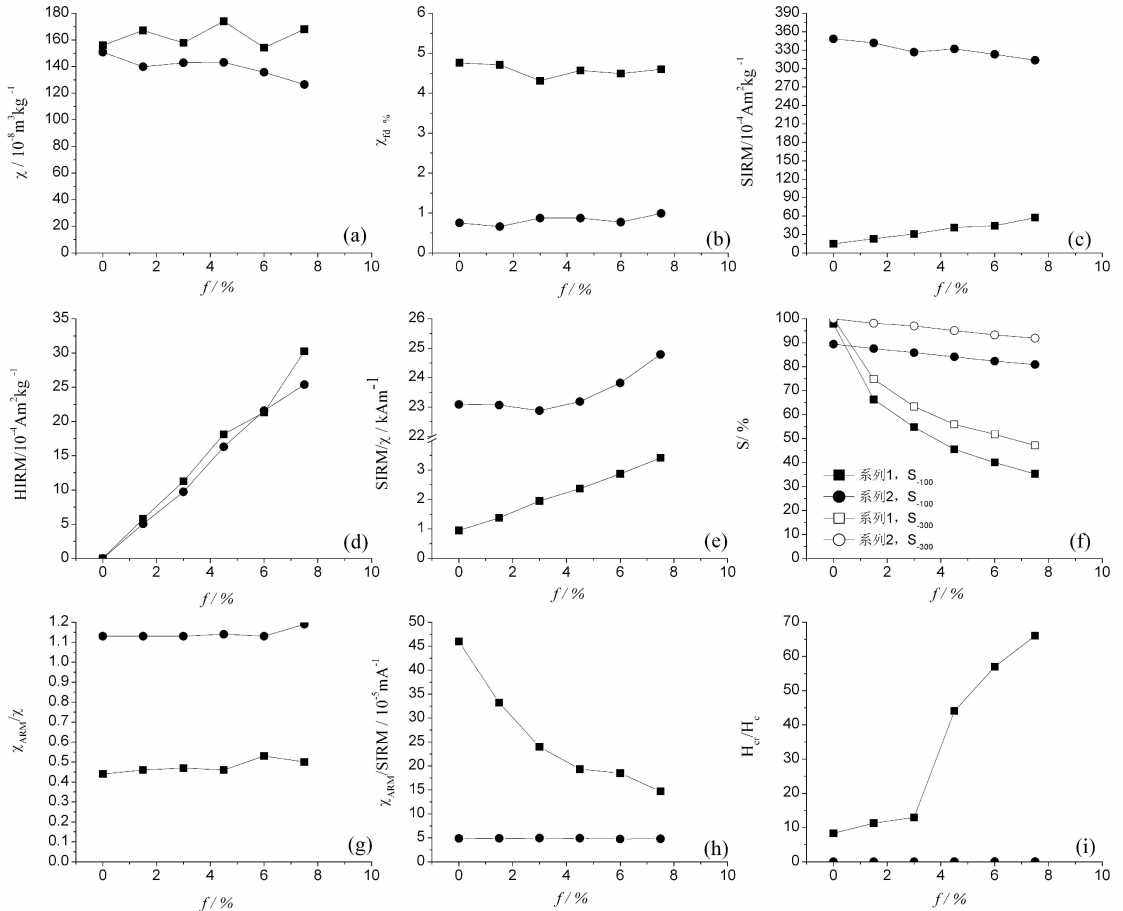


图 3 系列 1 与系列 2 磁性参数随赤铁矿含量 (f) 的变化

实心框和实心圆分别代表系列 1 和 2

Fig. 3 Dependence of magnetic parameters on hematite content (f) for series 1 and 2

Symbol (■) and (●) represent series 1 and 2, respectively

## 3 讨论

### 3.1 $\chi$ 和 SIRM 对混合系列的响应

$\chi$  一般反映了磁性矿物的含量,由于磁铁矿的  $\chi$  值要高于赤铁矿三个数量级左右<sup>[20]</sup>,因此, $\chi$  对赤铁矿的含量并不敏感.  $\chi_{fd\%}$  反映超顺磁 (SP) — 稳定单畴 (SSD) 界限附近的细粘滞性超顺磁性颗粒对磁化率的贡献<sup>[1]</sup>. 由于系列 1 含有纳米级磁铁矿,因此相比系列 2,其显示较高的  $\chi_{fd\%}$  值 (图 3b). SIRM 也近似地指示

了样品中磁性矿物含量,与  $\chi$  不同的是,SIRM 不受顺磁性、抗磁性矿物的影响,主要反映亚铁磁性矿物 (如磁铁矿) 的含量. 同时,超顺磁的磁铁矿尽管磁化率很高,但不携带剩磁. 一般情况下,颗粒粗于 SP 的磁铁矿的 SIRM 值是赤铁矿 SIRM 值的 50 倍左右<sup>[1]</sup>,其差异要小于相应的磁化率,因而 SIRM 能对赤铁矿含量的增加做出较为灵敏的响应.

### 3.2 S 比值

$S_{-100}$  与  $S_{-300}$  通常用于反映样品中亚铁磁性矿

### 本页插入表 3

表 3 赤铁矿与磁铁矿混合系列磁性参数\*

Table 3 The magnetic parameters of the mixtures of hematite and magnetite

样品 编号	$f$ /%	$\chi$ / $10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$	$\chi_{fd}\%$ /%	SIRM / $10^{-6} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$	HIRM / $10^{-6} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$	SIRM $\chi$ / $\text{kAm}^{-1}$	S <sub>-100</sub> /%	S <sub>-300</sub> /%	$\chi_{\text{ARM}}$ / $10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$	$\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ $10^{-5} \text{mA}^{-1}$	$H_{\text{cr}}$ /mT	$H_c$ /mT	$M_{\text{rs}}$ / $10^{-6} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$	$M_s$ / $10^{-6} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$	$H_{\text{cr}}/H_c$	$M_{\text{rs}}/M_s$	
系列 1	1	0	156.0	4.76	1482.3	0.0	0.95	97.9	101.2	68.18	46.00	11.00	1.32	2400	98000	8.34	0.02
	2	1.5	167.1	4.71	2299.4	578.3	1.38	66.3	74.9	76.37	33.21	18.27	1.62	3200	101500	11.31	0.03
	3	3	157.8	4.31	3079.3	1125.9	1.95	54.8	63.4	73.89	24.00	28.49	2.20	4100	100100	12.97	0.04
	4	4.5	174.1	4.57	4121.9	1815.4	2.37	45.5	56.0	79.78	19.35	118.00	2.68	4500	91400	44.05	0.05
	5	6	154.2	4.49	4423.9	2132.8	2.87	40.0	51.8	81.93	18.52	174.80	3.07	5600	97200	57.00	0.06
	6	7.5	168.1	4.6	5730.1	3029.0	3.41	35.3	47.1	84.29	14.71	230.30	3.49	6100	94300	66.05	0.06
	7	9	3.4	-5.56	5373.8	3852.2	159.22	13.7	28.3	19.88	3.70	429.95	243.63	5200	5537	1.76	0.94
系列 2	1	0	150.9	0.75	34834.7	0.0	23.09	89.5	100.5	170.26	4.89	36.22	14.68	36000	273100	2.47	0.13
	2	1.5	139.9	0.53	34189.8	505.0	23.07	87.6	98.2	134.00	4.91	37.29	15.12	31700	233800	2.47	0.14
	3	3	142.9	0.87	32692.1	972.6	22.88	85.9	97.0	161.69	4.95	37.57	15.26	34900	252700	2.46	0.14
	4	4.5	143.2	0.87	33199.3	1630.4	23.19	84.1	95.1	163.54	4.93	38.76	15.55	36600	261800	2.49	0.14
	5	6	135.7	0.77	32321.7	2158.1	23.82	82.3	93.3	153.74	4.76	39.33	15.94	36700	256500	2.47	0.14
	6	7.5	126.5	0.99	31363.7	2538.9	24.79	80.9	91.9	150.79	4.81	39.87	16.13	37200	252600	2.47	0.15
	7	9	3.4	-5.56	5373.8	3852.2	159.22	13.7	28.3	19.88	3.70	429.95	243.63	5200	5537	1.76	0.94

\* 磁铁矿含量固定为 0.3%,  $f$  代表赤铁矿百分含量.

物(如磁铁矿)与不完整反铁磁性矿物(如赤铁矿、针铁矿)的相对组成,它随着不完整反铁磁性矿物的贡献的增加而下降<sup>[1]</sup>.从图 3f 可以看出,相比  $S_{-300}$ ,  $S_{-100}$  随两种矿物混合比例的变化更为显著.系列 1 的  $S_{-100}$  与  $S_{-300}$  值随赤铁矿含量增加呈明显下降趋势,其中  $S_{-100}$  从 97.9% 下降至 35.3%,而系列 2 的  $S_{-100}$  与  $S_{-300}$  值下降幅度不大,  $S_{-100}$  值从 89.5% 降到 80.9%.这意味着,同样的磁铁矿与赤铁矿混合比例,会因磁铁矿颗粒大小不同,而导致 S 比值不同.因此,在将其作为磁性矿物混合比例的指标时,必须要考虑磁铁矿颗粒的大小.

### 3.3 Day 图

Day 图常用来指示亚铁磁性矿物的颗粒大小<sup>[16]</sup>,但也受到不完整反铁磁性矿物的影响<sup>[23]</sup>.图 4 表明,系列 1 中,自样品 1 到样品 3,随着赤铁矿的含量逐渐增高,  $H_{cr}/H_c$ 、 $M_{rs}/M_s$  的值呈增加趋势,但相对而言,  $M_{rs}/M_s$  变化幅度更大;自样品 4 到样品 6,随着赤铁矿的含量逐渐增高,  $H_{cr}/H_c$  的变化幅度更大些.这是因为赤铁矿具有较高的  $H_{cr}$ ,随着赤铁矿含量的增加,  $H_{cr}/H_c$  会增加,当赤铁矿含量达到一定程度时,赤铁矿的影响占主导地位,而  $H_c$  变化相对较小,故  $H_{cr}/H_c$  显著增加.系列 2 与系列 1 相比,不同赤铁矿含量的样品,在 Day 图不能很好区分,这一现象与图 3i 相符合,其中  $H_{cr}/H_c$  在系列 1 中随赤铁矿含量增加呈明显上升,由样品 1 至样品 6,其值由 8.3 上升至 66.1,尤其是样品 4 至样品 6,上升幅度较大;而系列 2 中变化较小,说明这些参数对粗颗粒磁铁矿占主导的混合样品中赤铁矿含量变化的响应不敏感.

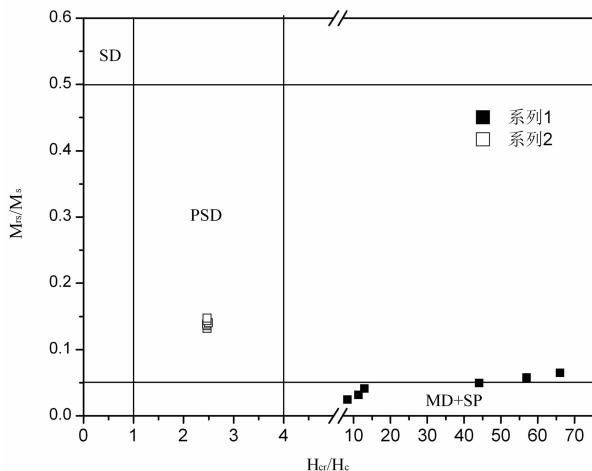


图 4 系列 1 和 2 样品在 Day 图中的位置

Fig. 4 Day plot of series 1 and 2

### 3.4 比值参数 $\chi_{ARM}/\chi$ 与 $\chi_{ARM}/SIRM$

$\chi_{ARM}/\chi$  一般用于指示亚铁磁性矿物晶粒的大小,高值反映了稳定单畴(SSD)晶粒,而低值则显示了较多的多畴(MD)或超顺磁(SP)晶粒.  $\chi_{ARM}/SIRM$  与  $\chi_{ARM}/\chi$  类似,但由于不受 SP 晶粒的影响,较低的比值则反映较粗的 MD 晶粒<sup>[24, 25]</sup>.由图 3h 可知,系列 1 的  $\chi_{ARM}/SIRM$  比值要高于系列 2,这与系列 1 磁铁矿主要是纳米粒级相吻合.但前者的  $\chi_{ARM}/\chi$  较低(图 3g),这是由于超顺磁颗粒影响所致.值得注意的是,系列 1 中,两个参数均随赤铁矿的含量增加而存在一定的变化,其中  $\chi_{ARM}/\chi$  随赤铁矿含量增加而上升,  $\chi_{ARM}/SIRM$  值则相反,随赤铁矿含量增加而下降.前者反映了赤铁矿对  $\chi_{ARM}$  的贡献,后者则反映了在赤铁矿与纳米粒级磁铁矿混合物中,赤铁矿对 SIRM 的显著贡献.因此,对于含有大量超顺磁磁铁矿的样品而言,比值参数  $\chi_{ARM}/\chi$  与  $\chi_{ARM}/SIRM$  不仅反映了亚铁磁性颗粒大小,而且还受到不同矫顽力矿物混合比例的影响.

## 4 结 论

本文探讨了磁性参数对磁铁矿与赤铁矿的混合比例的响应关系,结果表明,通常用于指示亚铁磁性矿物与不完整反铁磁性矿物混合比例的参数 S 比值,同时受到磁铁矿颗粒大小的影响,其中 S 比值对赤铁矿含量小于 2% 的混合物较为敏感,而  $H_{cr}/H_c$  在赤铁矿含量大于 3% 时变化较大.同样,  $\chi_{ARM}/\chi$  与  $\chi_{ARM}/SIRM$  不仅受磁铁矿颗粒大小的影响,同时与赤铁矿的混合比例也有关,尤其是当赤铁矿含量小于 3% 时,  $\chi_{ARM}/SIRM$  对其响应最为显著.因此,对常规磁性参数的解释,需要综合考虑亚铁此信矿物颗粒大小以及不同磁性类型矿物混合比例的影响.

## 参 考 文 献 (References):

- [1] Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism [M]. London: Allen and Unwin, 1986.
- [2] Dekkers M J. Environmental magnetism: an introduction [J]. Geologie en Mijnbouw, 1997, 76: 163~182.
- [3] Verosub K L, Roberts A P. Environmental magnetism: Past, present, and future [J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100: 2175~2192.
- [4] Evans M E, Heller F. Environmental magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics [J]. San Diego: Academic Press, 2003: 1~300.

- [5] Zhu R X, Liu Q S, Jackson M J. Paleoenvironmental significance of the magnetic fabrics in Chinese loess-paleosols since the last interglacial(<130ka)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 221(1~4): 55~69.
- [6] Liu Q S, Yu Y J, Pan Y X, *et al.* Determining the grain size distribution of pedogenic magnetic particles in Chinese loess and its significance on pedogenesis[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: B11102, doi: 10. 1029/2005JB003726.
- [7] 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 [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(2): 193~209.
- [8] Liu Q S, Deng C L, Torrent J, *et al.* Review of recent developments in mineral magnetism of the Chinese loess[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26: 368~385.
- [9] Deng C, Zhu R, Jackson M J, *et al.* Variability of the temperature-dependent susceptibility of the Holocene eolian deposits in the Chinese Loess Plateau: A pedogenesis indicator [J]. *Physics and Chemistry of the Earth (Part A)*, 2001, 26 (11~12): 873~878.
- [10] 沈明洁, 胡守云, U. Blaha, 等. 北京石景山工业区附近一个污染土壤剖面的磁学研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49 (6): 1665~1673.  
Shen M J, Hu S Y, Blaha U, *et al.* A magnetic study of a polluted soil profile at the Shijingshan industrial area, Western Beijing, China [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2006, 49 (6): 1665~1673.
- [11] 王红强, 邓成龙. 泥河湾层磁性地层学研究回顾[J]. *地球物理学进展*, 2004, 19(1): 26~35.  
Wang Hongqiang, Deng Chenglong. A review of magnetostratigraphic studies on the Nihewan formation[J]. *Progress in Geophysics*, 2004, 19(1): 26~35.
- [12] Peters C, Thompson R. Magnetic identification of selected natural iron oxides and sulfides [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1998, 183(3): 365~374.
- [13] 敖红, 邓成龙. 磁性矿物的磁学鉴别方法回顾[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(2): 432~442.  
Ao H, Deng C L. Review in the identification of magnetic minerals [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(2): 432~442.
- [14] 王勇, 潘保田, 高红山, 等. 祁连山东北缘黄土磁组构记录的古风向重建[J]. *地球物理学报*, 2007, 50 (4): 1161~1166.  
Wang Y, Pan B T, Gao H S, *et al.* Magnetic fabric based reconstruction of the paleowind direction from a loess sequence in the northeastern flank of the Qilian Mountains [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2007, 50 (4): 1161~1166.
- [15] 刘勇, 赵志军, 陈晔. 苏北盆地兴化钻孔沉积物的岩石磁学特征[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(3): 762~767.  
Liu Y, Zhao Z J, Chen Y. Rock magnetism characteristics of the deposits in Xinghua Core in the Northern Jiangsu Basin, China[J]. *Progress in Geophysics*. 2006, 21(3): 762~767.
- [16] Day R, Fuller M, Schmidt V A. Hysteresis properties of titaimagnetites; Grain-size and compositional dependence [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1977, 13 (.4): 260~267.
- [17] Dunlop D J. Theory and application of the Day plot(Mrs/Ms versus H<sub>cr</sub>/H<sub>c</sub>): 2. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B3): 2056, doi: 10. 1029/2001JB000487.
- [18] 张卫国, 俞立中, 许羽. 环境磁学的研究简介[J]. *地球物理学进展*, 1995, 10(3): 95~97.  
Zhang W G, Yu L Z, Xu Y. The progress of environmental magnetism [J]. *Progress in Geophysics*, 1995, 10(3): 95~97.
- [19] Van Oorschot I H M, Dekkers M J. Dissolution behavior of fine-grained magnetite and maghemite in the citrate-bicarbonate-dithionite extraction method [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 167: 284~285.
- [20] Walden J, Oldfield F, Smith J. Environmental magnetism: a practical guide [M]. London: Technical Guide, No. 6 Quaternary Research Association, 1999: 19~20.
- [21] Liu Q S, Roberts A P, Torrent J, *et al.* What do the HIRM and S-ratio really measure in environmental magnetism[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2007, 8 (9): Q09011, doi:10. 1029/2007GC001717.
- [22] Oldfield F. Environment magnetism-a personal perspective [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1991, 10: 73~85.
- [23] Dunlop D J. Theory and application of the Day plot(Mrs/Ms versus H<sub>cr</sub>/H<sub>c</sub>): 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B3): 2056, doi: 10. 1029/2001JB000486.
- [24] Maher B A. Magnetic properties of some synthetic submicron magnetites[J]. *Geophysical Journal*, 1988, 94: 83~96.
- [25] Banerjee S K, King J W, Marvin J A. Rapid method for magnetic granulometry with applications to environmental studies[J]. *Geophysical Research Letters*, 1981, 8: 333~336.