

韩非, 王芙仙, 李金华等. 2016. 北京密云水库表层沉积物磁性矿物的鉴别. 地球物理学报, 59(8):2937-2948, doi:10.6038/cjg20160818.

Han F, Wang F X, Li J H, et al. 2016. Identification of magnetic minerals in surface sediments of Miyun Lake, Beijing. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 59(8):2937-2948, doi:10.6038/cjg20160818.

## 北京密云水库表层沉积物磁性矿物的鉴别

韩非<sup>1,2,3</sup>, 王芙仙<sup>1,2,3</sup>, 李金华<sup>1,2,5</sup>, 秦华峰<sup>1</sup>,  
邓成龙<sup>1,3,4</sup>, 潘永信<sup>1,2,3,5\*</sup>

1 中国科学院地质与地球物理研究所古地磁与年代学实验室, 北京 100029

2 中国科学院中-法生物矿化与纳米结构联合实验室, 北京 100029

3 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

4 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

5 中国科学院地球与行星物理重点实验室, 北京 100029

**摘要** 本文对密云水库表层沉积物中的磁性矿物进行了岩石磁学和透射电子显微学的综合研究. 本实验建立的磁选方法实现将 70%~85% 左右的磁性矿物从沉积物中分离出来. 岩石磁学研究表明, 密云水库沉积物中的磁性矿物以多畴和单畴磁铁矿为主, 还含有少量高矫顽力弱磁性载磁矿物(可能为赤铁矿). 对磁选矿物的透射电镜观测表明, 样品中部分单畴磁铁矿具有纳米尺寸和化学纯度高等特点, 为拉长的立方-八面体磁铁矿, 是趋磁细菌产生的化石磁小体; 多畴磁铁矿多数具有微米尺寸, 形状不规则, 为碎屑成因; 超顺磁磁铁矿粒径约为 5~20 nm, 且含硅、铝等元素, 可能为自生成因. 研究结果表明, 岩石磁学和透射电子显微学的综合应用可以更全面、准确地分析沉积物中磁性矿物的成分、含量、粒径和化学成分等信息, 为环境磁学、生物地磁学和古地磁学研究提供依据.

**关键词** 沉积物; 岩石磁学; 透射电子显微学; 磁选; 磁小体

doi:10.6038/cjg20160818

中图分类号 P318

收稿日期 2015-12-17; 2016-02-03 收修定稿

## Identification of magnetic minerals in surface sediments of Miyun Lake, Beijing

HAN Fei<sup>1,2,3</sup>, WANG Fu-Xian<sup>1,2,3</sup>, LI Jin-Hua<sup>1,2,5</sup>, QIN Hua-Feng<sup>1</sup>,  
DENG Cheng-Long<sup>1,3,4</sup>, PAN Yong-Xin<sup>1,2,3,5\*</sup>

1 *Paleomagnetism and Geochronology Lab, Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2 *France-China Biomineralization and Nano-Structure Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

3 *School of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

4 *State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

5 *CAS Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

**Abstract** Understanding the magnetic properties of natural sediments, which include magnetic concentration, composition and grain size, is fundamental in paleomagnetic and paleoenvironmental

**基金项目** 国家自然科学基金项目(41330104)资助.

**作者简介** 韩非,男,1989年生,中国科学院地质与地球物理研究所博士研究生,主要从事磁性地层学和生物地磁学研究.

E-mail: hanfei@mail.iggcas.ac.cn

**\* 通讯作者** 潘永信,男,1964年生,中国科学院地质与地球物理研究所研究员,博士生导师,主要从事古地磁学和生物地磁学研究.

E-mail: yxpan@mail.iggcas.ac.cn

studies. Systematic magnetic measurements and non-magnetic methods (e. g., transmission electron microscopy, TEM) provide detailed information of magnetic minerals. In this paper, we established a high efficient magnetic extraction method to separate magnetic minerals from surface sediments of Miyun lake in Beijing. We analyzed the bulk samples, magnetic extracts and residues. Saturation magnetization ( $M_s$ ), volume magnetic susceptibility ( $\kappa$ ) and saturation isothermal remanent magnetization (SIRM) of the magnetic extracts is about 85%, 75% and 70% of the bulk samples, respectively. Multiple-parameter rock magnetic measurements indicated that the major magnetic minerals in sediments are multi-domain (MD) and single domain (SD) magnetite. TEM analyses revealed detrital MD titanomagnetite, biogenic SD magnetite (magnetofossils) and authigenic superparamagnetic (SP) magnetite. We propose that the combination of rock magnetism and TEM observations is useful to accurately identify the magnetic minerals in sediments.

**Keywords** Sediment; Rock magnetism; Transmission Electron Microscopy (TEM); Magnetic extraction; Biogenic magnetite

## 1 引言

沉积物和岩石中磁性矿物颗粒的化学成分、粒径、含量、磁性等特征蕴含着丰富的古环境信息和古地磁场信息,准确鉴别岩石和沉积物中磁性矿物的来源和组成特征是环境磁学和古地磁学研究的重要基础.自然样品中磁性矿物的来源复杂,既有经风力搬运、流水搬运的碎屑组分,又有在原地经物理化学作用形成的自生组分.越来越多的研究发现,海洋和湖泊沉积物中存在生物成因的磁性矿物(如化石磁小体)(Petersen et al., 1986; Stolz et al., 1986; 潘永信等, 2004; Kopp and Kirschvink, 2008; Roberts et al., 2012; Liu et al., 2015).磁小体是由趋磁细菌在细胞体内合成的纳米级(50~120 nm)、生物膜包被、多呈链状排列的磁铁矿或胶黄铁矿颗粒,细菌死后有机质降解,但这些磁性矿物可在沉积物中保存,成为沉积物磁性信号载体,即化石磁小体.化石磁小体不仅可能记录古地磁场信息,而且是重建古环境甚至是寻找地球早期生命和地外生命的重要研究对象(Hesse, 1994; 潘永信等, 2004; Kopp and Kirschvink, 2008; 潘永信和朱日祥, 2011; Chang et al., 2012; Liu et al., 2015).岩石磁学方法因其快速、无损、有效等优点,被广泛地应用于确定岩石和沉积物中磁性矿物的成分、粒径、含量等特征(符超峰等, 2009; Liu et al., 2012).然而,岩石磁学方法获得的是样品中磁性矿物的总体信号,较难准确区分不同来源的磁性矿物信息,而厘清不同物源磁性矿物所携带的磁学信息对环境磁学和古地磁学研究均有重要的意义(胡守云等, 2001; 夏敦胜等, 2006;

张卫国等, 2007; 符超峰等, 2009; 韩玉林等, 2010; Liu et al., 2011, 2012; Chen et al., 2013; Tang et al., 2015).例如,对于湖相沉积物,许多情况下都是碎屑和生物成因磁性矿物共存,只有剔除生物成因组分后才能揭示碎屑来源组分信息(Hatfield and Masher, 2009).另一方面,定量估计样品中生物成因磁性矿物有助于评价古地磁记录的可靠性(Heslop et al., 2013).透射电镜显微学方法能够提供磁性矿物的超微观结构、形貌、晶体成分等信息,因此是鉴别化石磁小体不可或缺的手段(李金华和潘永信, 2015).在过去三十年中,通过透射电子显微镜和岩石磁学方法,前人对纳米尺度的(化石)磁小体进行了研究,使人们对(化石)磁小体的微观结构、形貌、晶体特征、生长拉长方向都有了深入的认识(Stolz et al., 1986; Mann et al., 1984, 1987; Hesse, 1994; Isambert et al., 2007; Schumann et al., 2008; Kopp and Kirschvink, 2008; Chang et al., 2012; Li et al., 2010, 2015; Liu et al., 2015).

本文将结合透射电子显微学和岩石磁学两种方法对密云水库沉积物的磁性矿物进行研究.我们首先对沉积物中的磁性矿物进行磁选,然后对磁选前、磁选物和磁选后的残余样品进行系统的岩石磁学分析,同时对磁选获得的磁性矿物进行透射电子显微镜学分析,并通过对比磁选前后样品的磁学参数和透射电镜分析结果评估了所建立磁选方法的效率.

## 2 材料与方法

研究样品取自北京市密云水库的表层沉积物(0~20 cm).密云水库流域由潮河、白河两大水系

组成,西北部流域基岩主要为燕山期的花岗岩和二长花岗岩,而东部流域多低山、丘陵,基岩以太古宇的麻粒岩相变质岩为主.前人已在该水库沉积物中发现了多种不同类型的趋磁细菌(Lin et al., 2009),暗示密云水库沉积物中可能有(化石)磁小体.因此,密云水库表层沉积物中的磁性矿物来源复杂,既可能有碎屑成因、自生成因,还可能有生物成因.

## 2.1 样品磁选处理方法

将沉积物样品在厌氧条件下自然风干,然后进行如下处理:(1)研磨:将沉积物样品研磨至 200 目( $\sim 70 \mu\text{m}$ );(2)原样岩石磁学测量:称取 0.5 g 研磨样品 8 份,8 份原样分别记作 MYbn( $n=1\sim 8$ ),并分别用塑料薄膜包好装入  $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$  无磁塑料盒中进行岩石磁学测量;(3)水溶液分散:将岩石磁学测量后的 8 个原样分别倒入 8 个 500 mL 烧杯中,加入 250 mL 蒸馏水,用无磁性玻璃棒充分搅拌;(4)超声分散:将装有样品的烧杯放入超声波清洗机(40 kHz, 200 W)中超声 20 min(清洗机中加入足量冰块,防止超声过程中样品受热氧化),超声分散过程中继续用玻璃棒不断搅拌;(5)静置磁选:将装有钕铁硼强磁铁(圆片状,直径 24 mm,高度 4 mm,中心磁场强度约 200 mT,边缘磁场强度约 270 mT)的塑料管放入超声分散处理后的样品中静置 10~12 h;(6)纯化富集:将吸附在塑料管表面的颗粒用蒸馏水冲洗在 50 mL 烧杯中,缩短静置时间至 10 min 再重复收集 5 次;(7)离心收集:将 50 mL 烧杯中的溶液转移到 1 mL 离心管中,在  $8000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  速度下离心 2 min,收集离心管下部的沉淀物(磁选物)并在厌氧箱中自然风干后称重,磁选物分别对应地记做 MYen( $n=1\sim 8$ ).磁选后剩下的残余物全部收集并在厌氧箱中自然风干并称重,残余物分别对应记为 MYrn( $n=1\sim 8$ ).最后将磁选物和残余物样品作岩石磁学测量和透射电子显微镜观察.

## 2.2 磁学测量

磁化率( $\chi$ )测量由卡帕桥多频磁力仪(AGICO MFK1-FA)完成,使用的测量频率为 976 Hz 和 15616 Hz,施加的磁场强度为  $200 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ .频率磁化率百分数( $\chi_{\text{fd}}\%$ )定义为: $\chi_{\text{fd}}\% = (\chi_{\text{lf}} - \chi_{\text{hf}}) / \chi_{\text{lf}} \times 100\%$ ,式中  $\chi_{\text{lf}}$  为低频磁化率, $\chi_{\text{hf}}$  为高频磁化率.超顺磁(SP)/单畴(SD)临界点(25 nm)附近的颗粒对频率磁化率百分数的影响最大,因此频率磁化率百分数主要反映了 25 nm 左右粒径颗粒的贡献

(Thompson and Oldfield, 1986).

磁化率随温度变化曲线( $\kappa-T$ )由卡帕桥多频磁力仪(AGICO MFK1-FA)完成.测量所加的磁场强度为  $200 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ ,频率为 976 Hz,测量温度区间为  $25\sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ,温度变化率约为  $12 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ,所有测量均在氩气环境中进行.通过  $\kappa-T$  曲线可判断样品中磁性矿物的种类、粒径等信息(Deng et al., 2001).

磁滞回线、反向场退磁曲线、等温剩磁获得曲线和一阶反转曲线(FORC)均通过 MicroMag 3900 振动样品磁力仪测量完成,该仪器灵敏度为  $5 \times 10^{-10} \text{ Am}^2$ .通过磁滞回线、反向场退磁曲线的测量可得到矫顽力( $B_c$ )、剩磁矫顽力( $B_{cr}$ )、饱和磁化强度( $M_s$ )和饱和等温剩磁( $M_{rs}$ )等磁学参数.FORC 测量使用的饱和磁场强度为 1 T,步长( $\delta_H$ )为 1.31 mT,测量条数为 150 条(Roberts et al., 2000).采用 FORCme 软件对 FORC 测量数据进行处理,并可得到 95% 的置信区间(Heslop and Roberts, 2012).

## 2.3 透射电子显微镜观察

透射电子显微学分析由 JEM-2100HR 型透射电子显微镜完成,该仪器的电子发射源为六硼化镧,最大加速电压为 200 kV,点分辨率为 0.23 nm,线分辨率为 0.14 nm.该透射电镜还装配有 Oxford X-MAX 能量色散谱仪(EDS),允许对样品进行微观形貌电镜观测的同时进行化学成分分析.透射电子显微镜观察样品为磁选后的样品 MYe1-MYe8.

# 3 结果

## 3.1 $\kappa-T$ 曲线

图 1 为样品 MY8 的  $\kappa-T$  曲线.原样样品 MYb8(图 1a)和残余物样品 MYr8(图 1c)的升温曲线显示磁化率从室温逐渐升高至  $285 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $265 \text{ }^\circ\text{C}$ ,这可能是样品中的细颗粒(SP/SD)磁性矿物受热逐渐解阻所致(Deng et al., 2005).随后磁化率稳步降低到  $400\sim 450 \text{ }^\circ\text{C}$ ,这通常被认为是亚稳态的磁赤铁矿分解为赤铁矿的信号(Stacey and Banerjee, 1974; Deng et al., 2001).随后磁化率急剧升高, $530\sim 555 \text{ }^\circ\text{C}$  左右出现明显的峰值,该温度段( $450\sim 550 \text{ }^\circ\text{C}$ )磁化率随温度的变化受样品中含铁盐/粘土矿物受热分解以及磁性颗粒解阻效应的双重影响.在  $580 \text{ }^\circ\text{C}$  附近磁化率急剧下降,指示样品的载磁矿物为磁铁矿.磁选物样品 MYe8(图 1b)的升温曲线显示磁化率从室温逐渐升高至  $285 \text{ }^\circ\text{C}$ ,随后稳步降低到  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  附近,与样品 MYb8 和 MYr8 的变化趋势一致.随

后磁化率逐渐升高至 580 °C 附近急剧下降,在 600 °C 附近接近零. 磁选物样品 MYe8 的升温曲线中,在 400~580 °C 的变化主要由磁性矿物的受热解阻导致,显示出明显的 Hopkinson 峰,说明主要的磁性矿物为磁铁矿. MYb8、MYe8、MYr8(图 1(a-c))降温曲线均显示加热后样品中磁铁矿占主导,证明加热过程中有磁铁矿生成.

### 3.2 磁滞回线及 Day 图

图 2a—2f 显示沉积物原样(如 MYb1、MYb8)

和磁选物样品(如 MYe1、MYe8)的磁滞回线均在接近 300 mT 时闭合,矫顽力为 9~10 mT;残余物样品(如 MYr1、MYr8)的磁滞回线在接近 500 mT 时闭合,矫顽力为 13~16 mT. 说明残余物样品中硬磁组分含量比原样和磁选物高,但所有样品均以软磁性矿物为主. 表 1 为 MYb(原样)、MYe(磁选物)以及 MYr(残余物)的主要岩石磁学参数数据. 从表中数据看,磁选物样品的  $B_c$  和  $B_{cr}$  均比原样和残余物样品小(同号样品比较),磁选物的  $M_s$  和  $M_{rs}$  接近于

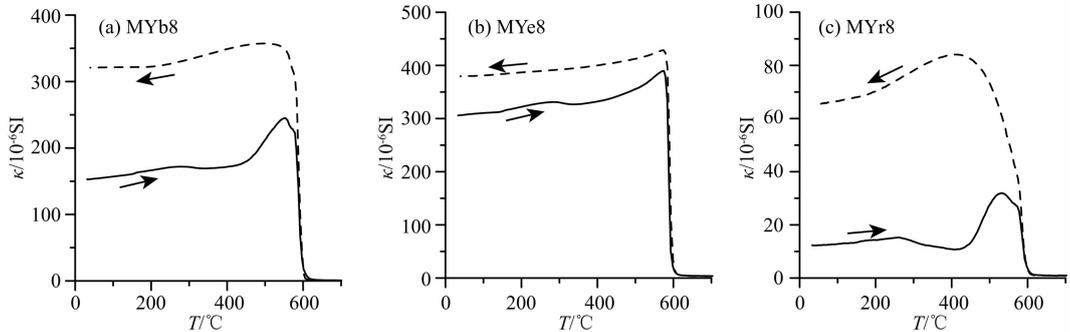


图 1 密云水库沉积物代表样品磁化率( $\kappa$ )随温度( $T$ )变化曲线

实线(虚线)为样品的升温(降温)曲线,MYb8、MYe8 和 MYr8 分别为第 8 号样品的原样、磁选物和残余物.

Fig. 1 Temperature-dependence of magnetic susceptibility of representative samples of Miyun Lake

Solid (dashed) lines represent heating (cooling) cycles, MYb8, MYe8 and MYr8 represent the No. 8 bulk sample, extract and residue, respectively.

表 1 密云水库沉积物磁选样品的岩石磁学数据

Table 1 Rock magnetism parameters of magnetically extracted samples of Miyun Lake

样品	$B_{cr}/\text{mT}$	$B_c/\text{mT}$	$B_{cr}/B_c$	$M_{rs}/\times 10^{-5} \text{Am}^2$	$M_s/\text{Am}^2$	$M_{rs}/M_s$	$\chi_{fd} \%$
MYb1	36.29	9.58	3.79	1.76	$1.93 \times 10^{-4}$	0.09	3.19%
MYb2	36.92	9.43	3.91	1.87	$2.13 \times 10^{-4}$	0.09	3.24%
MYb3	36.82	9.81	3.75	1.72	$1.84 \times 10^{-4}$	0.09	3.05%
MYb4	36.01	9.01	4.00	1.91	$2.29 \times 10^{-4}$	0.08	3.39%
MYb5	36.85	9.61	3.83	1.77	$1.92 \times 10^{-4}$	0.09	3.04%
MYb6	37.78	10.66	3.54	1.72	$1.69 \times 10^{-4}$	0.10	2.80%
MYb7	37.81	10.00	3.78	1.92	$2.01 \times 10^{-4}$	0.10	3.11%
MYb8	37.35	9.83	3.80	1.75	$1.94 \times 10^{-4}$	0.09	3.26%
MYe1	28.94	8.96	3.23	1.64	$1.58 \times 10^{-4}$	0.10	4.04%
MYe2	30.26	9.00	3.36	1.66	$1.79 \times 10^{-4}$	0.09	3.57%
MYe3	30.16	9.57	3.15	1.56	$1.53 \times 10^{-4}$	0.10	2.49%
MYe4	28.10	8.44	3.33	1.83	$1.94 \times 10^{-4}$	0.09	2.91%
MYe5	28.87	9.38	3.08	1.83	$1.64 \times 10^{-4}$	0.11	5.99%
MYe6	32.90	10.17	3.24	1.47	$1.44 \times 10^{-4}$	0.10	6.74%
MYe7	32.58	9.66	3.37	1.60	$1.68 \times 10^{-4}$	0.10	6.06%
MYe8	31.16	9.71	3.21	1.71	$1.74 \times 10^{-4}$	0.10	0.67%
MYr1	38.04	12.93	2.94	0.324	$2.03 \times 10^{-5}$	0.16	11.19%
MYr2	38.46	14.60	2.63	0.253	$1.09 \times 10^{-5}$	0.23	21.36%
MYr3	39.17	14.91	2.63	0.217	$8.63 \times 10^{-6}$	0.25	17.99%
MYr4	37.90	14.76	2.57	0.272	$1.17 \times 10^{-5}$	0.23	18.21%
MYr5	36.90	14.16	2.61	0.245	$9.61 \times 10^{-6}$	0.26	15.65%
MYr6	39.48	15.31	2.58	0.307	$1.28 \times 10^{-5}$	0.24	11.43%
MYr7	39.33	14.54	2.71	0.299	$1.30 \times 10^{-5}$	0.23	16.67%
MYr8	40.75	16.16	2.52	0.307	$1.26 \times 10^{-5}$	0.24	12.88%

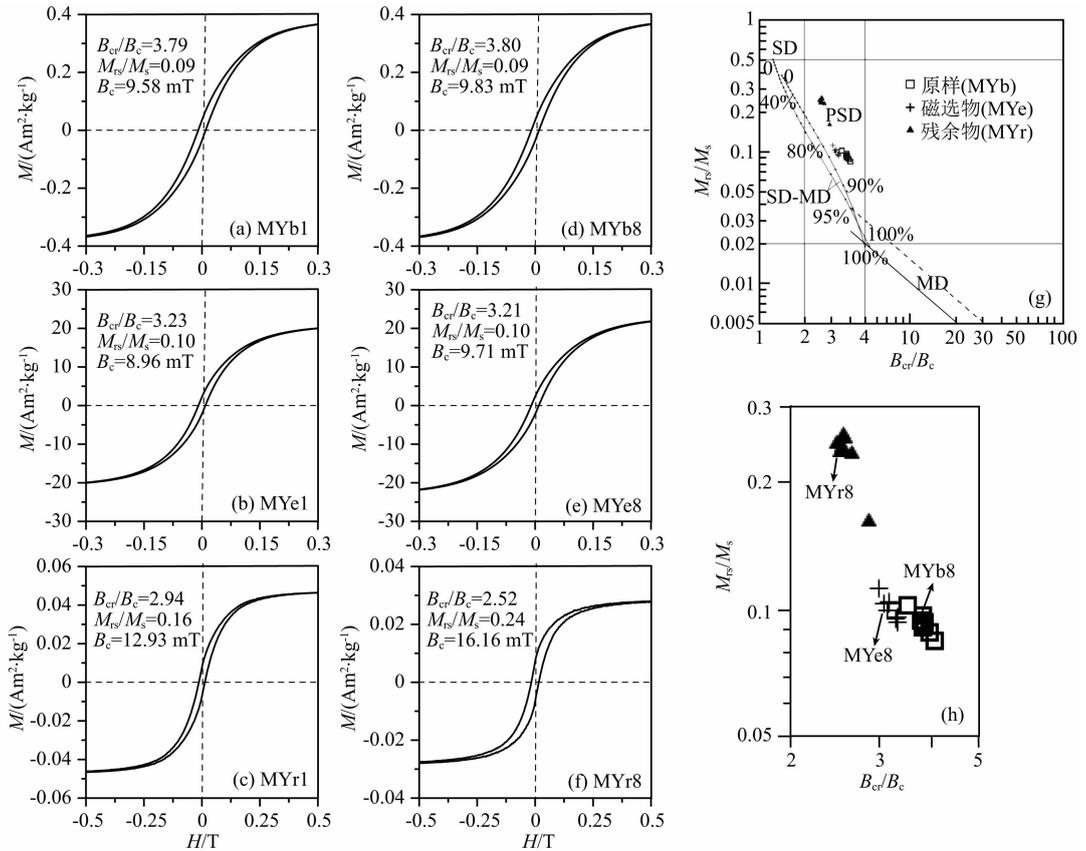


图2 密云水库沉积物代表样品的磁滞回线及 Day 图

(a)–(f) 顺磁校正后的磁滞回线, 实验中最大加场为 1 T, 图中原样和磁选物展示  $[-0.3 \text{ T}, 0.3 \text{ T}]$ , 残余物展示  $[-0.5 \text{ T}, 0.5 \text{ T}]$ ; (g)–(h) 所有样品的 Day-plot 投图结果(样品见表 1), 其中 (h) 为 (g) 的局部放大图, (h) 图例参考 (g); MYb1(MYb8), MYe1(MYe8) 和 MYr1(MYr8) 分别为第 1(8) 号样品的原样、磁选物和残余物。

Fig. 2 The hysteresis loops and Day-plot of representative samples of Miyun Lake

(a)–(f) Hysteresis loops after paramagnetic adjustment, the top magnetic field in measurement is 1 T; (g)–(h) Day-plot for all samples (see Table 1), (h) is partial enlarged image of (g), the legend of (g) and (h) are same. MYb1(MYb8), MYe1(MYe8) and MYr1(MYr8) represent No. 1(8) bulk sample, extract and residue.

原样样品, 而残余物的  $M_s$  和  $M_{rs}$  远远小于原样样品。  $M_{rs}/M_s$  和  $B_{cr}/B_c$  这两个比值对各种磁畴状态和磁性矿物浓度(磁相互作用)反应灵敏, 因此可用来指示磁性矿物的粒径或浓度变化 (Day et al., 1977; Dunlop, 2002a, 2002b; Li et al., 2012)。 Day 图(图 2g–2h) 显示原样和磁选样品中磁性矿物以假单畴(PSD)为主, 磁选物与原样相似, 而残余物的投点位置则更接近 SD 区域。

另外, 表 1 中数据显示原样(MYb)和磁选物(MYe)的  $\chi_{td}\%$  值比较接近, 而残余物(MYr)的  $\chi_{td}\%$  值相对更大, 说明原样和磁选物样品中 SP/SD 磁性颗粒含量接近, 而残余物样品中 SP/SD 磁性颗粒含量更多, 与 Day 图指示的信息一致。

### 3.3 FORC 图

图 3a–3i 为 MY1、MY4、MY8 样品的一阶反转曲线(FORC)图, FORC 图的横纵坐标分别代表

磁性矿物的矫顽力( $B_c$ )和磁相互作用力( $B_u$ )。 图中显示, 原样(MYb1、MYb4、MYb8)与磁选样品(MYe1、MYe4、MYe8)的峰值矫顽力约为 10 mT, 在中间存在闭合的等值线(单畴颗粒特征), 外围存在不闭合的大开口等值线(多磁畴颗粒特征), 指示原样样品与磁选样品的磁性颗粒整体上表现出单磁畴(SD)与多磁畴(MD)颗粒混合的特征 (Pike et al., 1999; Roberts et al., 2000)。 残余物样品(MYr1、MYr4、MYr8)的 FORC 图显示为闭合的等值线, 矫顽力峰值约为 12 mT, 中央区域的矫顽力较原样和磁选物分布更宽且磁相互作用力更小, 指示 SD 颗粒的存在 (Egli et al., 2010; Li et al., 2012)。 图 3j–3l 为样品 MY8 的磁相互作用力分布图, 原样样品(MYb8)、磁选样品(MYe8)、残余物样品(MYr8)相互作用力最大强度的 50% 分布范围分别为  $[-11 \text{ mT}, 14 \text{ mT}]$ 、  $[-11.5 \text{ mT}, 13 \text{ mT}]$ 、  $[-2 \text{ mT}, 3 \text{ mT}]$ ,

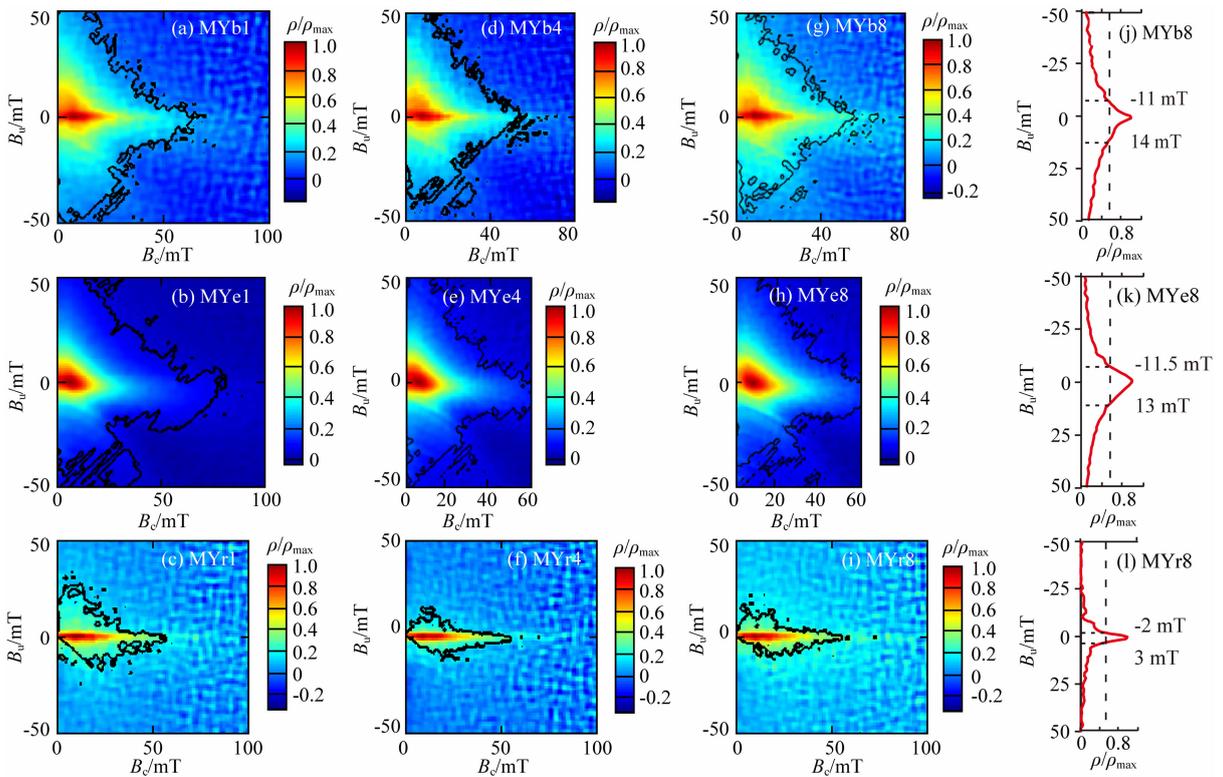


图3 密云水库沉积物代表样品的一阶反转曲线

(a)—(f) FORC 图(图中加粗实线代表 95% 置信区间), FORC 图处理过程中平滑因子(SF)均为 3; (j), (k), (l) 分别为 (g), (h), (i) 等值线中心处沿纵轴的磁相互作用力分布图; MYbn, MYen 和 MYrn 分别为第  $n$  号样品的原样、磁选物和残余物。

Fig. 3 FORC diagrams of representative sample of Miyun Lake

(a)—(f) FORC diagrams (the thick contour lines indicate the regions of the FORC distribution that are significant at the 0.05), the smoothing factor are 3; (j), (k), (l) represent magnetostatic interactions distribution of (g), (h), (i), respectively. MYbn, MYen and MYrn represent No.  $n$  bulk sample, extract and residue.

说明残余物样品(MYr)的磁相互作用力最小,磁选物样品(MYe)的磁相互作用力略小于原样样品(MYb)的磁相互作用力。

### 3.4 矫顽力谱分析

利用累积对数高斯模型(Robertson and France, 1994; Stockhausen, 1998; Kruiver et al., 2001)对样品的等温剩磁获得曲线(IRM)进行矫顽力谱分析,可得到样品中磁性矿物的不同矫顽力组分。一般将  $B_{1/2}$  作为衡量矫顽力大小的参数(Kruiver et al., 2001),  $B_{1/2}$  为每种组分的饱和等温剩磁(SIRM)获得一半时外场的大小,理论上与剩磁矫顽力( $B_{cr}$ )相等。根据不同矫顽力组分的饱和等温剩磁大小,还可以定量地计算不同矫顽力组分的百分含量。图 4a—4c 表明,原样、磁选物与残余物中的矫顽力均可分解成低( $<20$  mT)、中(约 60 mT)、高( $>600$  mT)三种组分。图 4d 展示了所有样品不同矫顽力组分的平均百分含量,原样样品的低、中、高三种矫顽力组分的百分含量为 13.7%、82.9%、3.4%,磁选物样品低、中、高三种矫顽力组分的百分含量为 16.9%、

82.5%、0.6%,残余物样品低、中、高三种矫顽力组分的百分含量为 9.6%、81.8%、8.6%。磁选物与原样不同矫顽力组分之间的比例十分接近,说明磁选物具有较理想的代表性(详见下文讨论部分)。原样样品中高矫顽力组分(631 mT)可能为赤铁矿。

### 3.5 透射电子显微镜分析

图 5 为磁选物 MYe8 的透射电子显微镜照片及 X-射线能谱图(EDS, Energy Dispersive Spectra)。图 5a 中的矿物呈棱角状、大小混杂、粒径 0.4~1  $\mu\text{m}$ ,图 5d 显示其主要组成元素为 Fe、O、Ti,再结合  $\kappa$ -T 曲线信息,可判断图 5a 中的矿物是碎屑成因的 MD 钛磁铁矿,很可能为流域附近的火山碎屑钛磁铁矿经河流搬运至密云水库中沉积下来的。图 5b 中的矿物粒径较小,约为 5~20 nm,图 5d 指示其主要组成元素为 Fe 和 O,再结合图 5c 计算出的晶面间距参数,可判断图 5b 中的矿物为 SP 磁铁矿。另外,图 5d 指示图 5b 中的矿物含有 Si、Al 等元素,证明这种 SP 磁铁矿很可能是沉积物中的含铁硅酸盐/粘土矿物(如绿泥石)经过化学作用、生物作用和

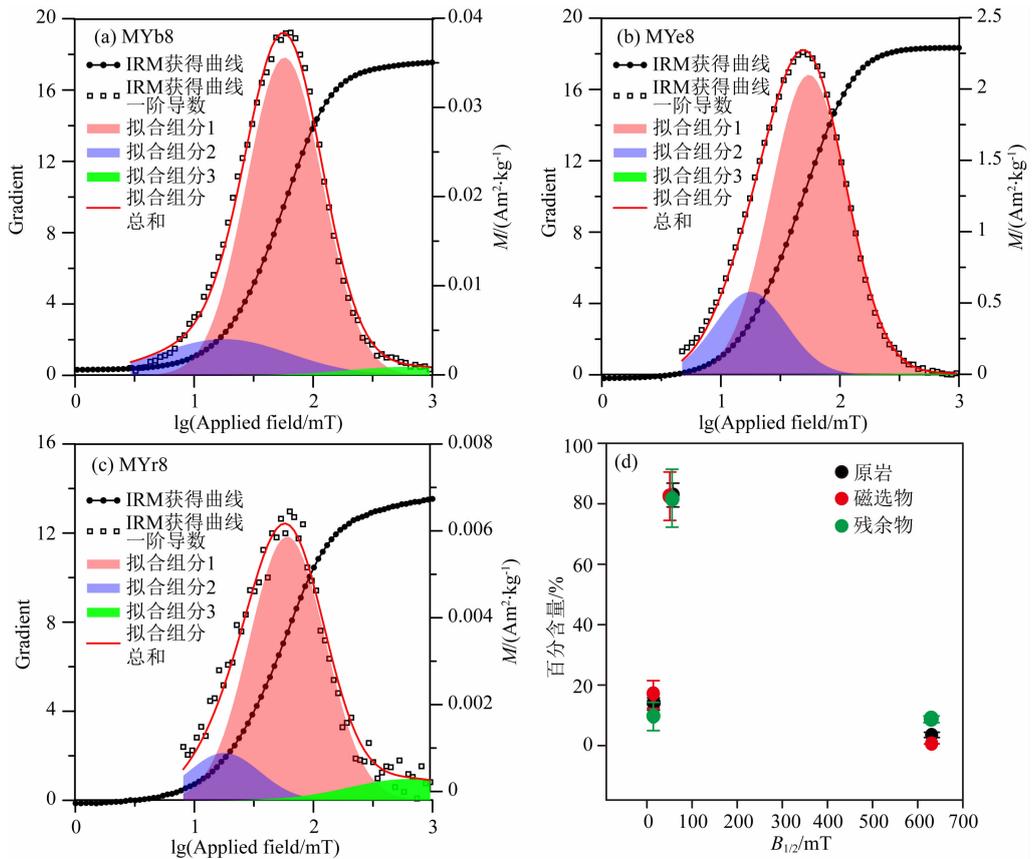


图4 密云水库沉积物样品矫顽力谱分析结果

(a)–(c) IRM 获得曲线及其分解曲线; (d) 所有原样、磁选物以及残余物样品不同矫顽力组分的百分含量统计结果。

MYb8、MYe8 和 MYr8 分别为第 8 号样品的原样、磁选物和残余物。

Fig. 4 Isothermal remanent magnetization (IRM) acquisition curves and gradient of acquisition plots (GAD) of representative sample from Miyun Lake

(a)–(c) Isothermal remanent magnetization acquisition curves and gradient of acquisition plots; (d) The percent result of different coercivity components of all samples. MYb8, MYe8 and MYr8 represent No. 8 bulk sample, extract and residue.

生物化学作用形成. 图 5、6 表明磁选物中包含有 SP、SD、MD 等不同粒径范围的磁铁矿, 且 X-射线能谱图揭示了磁性矿物的元素信息, 为研究磁性矿物的物源、赋存状态提供了线索.

## 4 讨论

### 4.1 磁选方法的效率

磁选物是否具有代表性可从磁选物中磁性矿物的总量、成分、粒径及其分布等方面来考量. Hounslow 和 Maher(1996)将磁选物中磁性矿物总量占原样的百分比用参数 Eff (efficiency) 表达.  $Eff_{M_s}$ 、 $Eff_{SUS}$ 、 $Eff_{SIRM}$  分别代表磁选物的饱和磁化强度 ( $M_s$ )、磁化率 (susceptibility) 以及饱和等温剩磁 (SIRM) 占原样的百分比. 如:  $Eff_{M_s} = M_{s(\text{磁选物})} / M_{s(\text{原样})} \times 100\%$ . 本文将残余物中磁性矿物总量占原样的百分比也用该参数表示. 计算参数 Eff 均不需质量归一化, 即计

算时  $M_s$  和 SIRM 的单位是  $Am^2$ , 磁化率为体积磁化率 (单位是 1).  $M_s$  可以衡量磁选物/残余物中磁性矿物的总含量. 而磁化率不但与磁性矿物的类型和含量相关, 还与磁性颗粒的粒径、测量的温度和频率相关 (刘青松和邓成龙, 2009), 本实验均在常温 ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ ) 测量, 且  $Eff_{SUS}$  采用低频磁化率 ( $\chi_r$ , 976 Hz) 计算, 因此本实验参数  $Eff_{SUS}$  的主要影响因素为磁性矿物类型和粒径. 饱和等温剩磁 (SIRM) 反映的是磁性矿物的剩磁强度, 因此  $Eff_{SIRM}$  参数表达的是磁选物/残余物中除 SP 颗粒外其他磁性矿物的含量百分比.

从表 2 可得, 磁选物的质量百分比 ( $M\%$ ) 为  $1.78\% \pm 0.30\%$ , 而其  $Eff_{M_s}$ 、 $Eff_{SUS}$ 、 $Eff_{SIRM}$  分别为  $84.75\% \pm 2.21\%$ 、 $75.90\% \pm 4.71\%$ 、 $72.21\% \pm 4.26\%$  ( $n=8$ ). 说明: 1) 原样中约 85% 的磁性矿物被磁选出来, 且得到很大程度上的纯化 (饱和磁化强度质量归一化后, 磁选物约为原样的 43 倍). 2) 磁选物

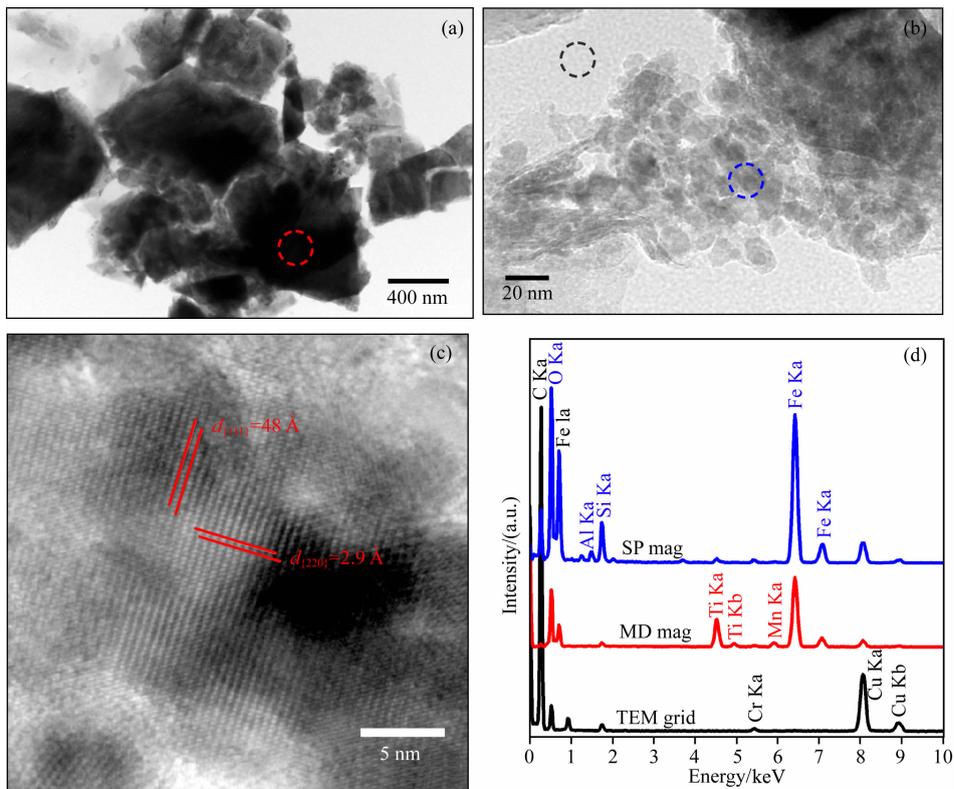


图 5 密云水库沉积物磁选样品 MYe8 的透射电镜照片及 X-射线能谱图

(a) 碎屑状 MD 磁铁矿晶体; (b) 自生 SP 磁铁矿晶体; (c) 为(b)的局部放大图, (c)中的平行线代表晶面间距, (d)中的蓝色曲线为(b)中蓝色虚线圆圈采点处的能谱结果、红色曲线为(a)中红色虚线圆圈采点处的能谱结果、黑色曲线代表(b)中黑色虚线圆圈采点处的能谱结果(铜网,背景值)。

Fig. 5 Transmission electron microscopy (TEM) analyses and X-ray energy dispersive spectra (EDS) of the extract MYe8 (a) Detrital MD magnetite; (b) Authigenic SP magnetite; (c) Enlarged image of (b); (d) EDS results of selected areas in (a) and (b). Blue, red, and black curve in (d) represents the X-ray EDS of the area indicated by the blue, red, and black dashed circles in (a) and (b). Note the black curve in (d) from copper grid.

表 2 密云水库沉积物样品磁选效率参数值  
Table 2 Parameters of magnetic extraction efficiency for surface sediments of Miyun Lake

Sample	Mass/g	M%	Eff <sub>Ms</sub>	Eff <sub>SUS</sub>	Eff <sub>SIRM</sub>
MYe1	0.008	1.50%	81.77%	68.42%	68.98%
MYe2	0.010	1.96%	84.22%	79.10%	78.41%
MYe3	0.008	1.56%	83.23%	70.60%	73.52%
MYe4	0.012	2.40%	84.76%	78.62%	75.19%
MYe5	0.009	1.80%	85.38%	83.10%	76.75%
MYe6	0.008	1.68%	85.41%	76.31%	68.82%
MYe7	0.009	1.82%	83.85%	76.33%	67.98%
MYe8	0.008	1.50%	89.35%	74.74%	68.00%
平均值	0.009	1.78%	84.75%	75.90%	72.21%
MYr1	0.433	86.62%	10.51%	8.06%	8.45%
MYr2	0.426	85.22%	5.10%	5.68%	6.34%
MYr3	0.428	85.68%	4.70%	6.24%	6.23%
MYr4	0.450	89.96%	5.13%	5.61%	5.95%
MYr5	0.449	89.74%	5.01%	6.12%	5.63%
MYr6	0.448	89.54%	7.57%	7.92%	8.23%
MYr7	0.464	92.76%	6.47%	6.12%	6.23%
MYr8	0.446	89.20%	6.48%	6.35%	7.49%
平均值	0.443	88.59%	6.37%	6.51%	6.82%

注:表中 M%代表质量百分数, M%=磁选物或残余物的质量/原样质量(原样质量均为 0.5 g)。

Eff<sub>SUS</sub>、Eff<sub>SIRM</sub> 值比 Eff<sub>Ms</sub> 低,很可能是粒径因素引起,从磁滞参数和 FORC 图看,残余物中含有更高比例的细颗粒(SP 和 SD),即相对于 MD 颗粒,磁选物丢失了更多的 SD 和 SP 颗粒.而相对于 MD 颗粒,SP 颗粒具有更高的磁化率,SD 颗粒具有更稳定的携带剩磁能力,因此磁选物 Eff<sub>SUS</sub>、Eff<sub>SIRM</sub> 值比 Eff<sub>Ms</sub> 低。

$\kappa-T$  曲线中的 Hopkinson 峰以及最大解阻温度指示原样和磁选物中的主要载磁矿物为磁铁矿,透射电镜观察也表明磁选物中的磁性矿物主要为碎屑成因的(钛)磁铁矿以及少量生物成因的 SD 磁铁矿(见图 6)和自生成因的 SP 磁铁矿,说明原样样品和磁选物样品在成分信息上具有一致性.从 Day 图、 $\chi_d\%$ 、FORC 图等可以反映磁性矿物粒径的结果来看,磁选物与原样中的磁铁矿为 SD 和 MD 颗粒,再结合矫顽力谱分析结果来看,磁选物与原样不同粒径组分的百分含量相当.因此,从成分、粒径和含量等信息来看,磁选物中磁性颗粒的信息可以代表原样磁性矿物的信息,说明本磁选方法对密云水库表

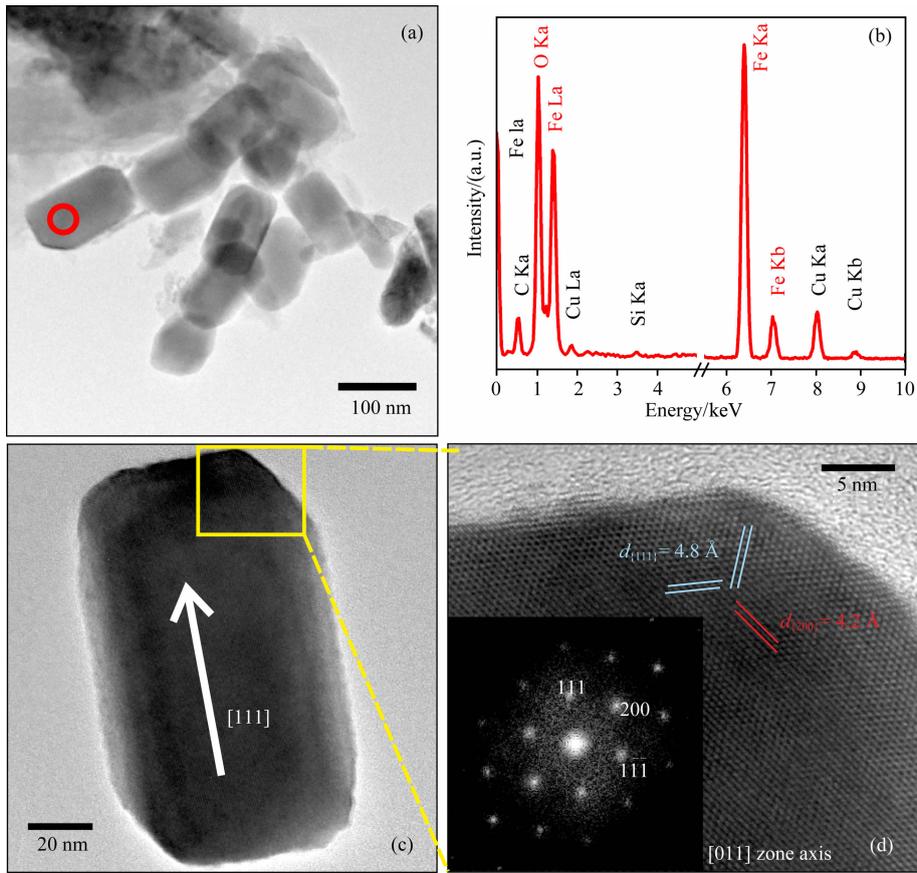


图6 密云水库沉积物磁选样品 MYe8 中化石磁小体 TEM 照片及 X 射线能谱图

(a) 链状排列的化石磁小体; (b) 为(a)中红色圆圈采点处的能谱结果; (c) 棱柱形磁小体,沿[111]晶轴拉长;  
(d) 为(c)的局部放大图,(d)图左下角为晶体的傅里叶变换。

Fig. 6 Transmission electron microscopy (TEM) analyses and X-ray energy dispersive spectra (EDS) of magnetofossils in sample MYe8

(a) Chain-arranged structure of magnetofossils; (b) EDS of the area indicated by the red circle in (a); (c) High resolution TEM image of a typical prismatic magnetite recorded from [011] zone axis, and the Fast Fourier Transform (FFT) pattern indicate that this particle is elongated along the [111] direction of magnetite; (d) Enlarged image of (c). The image at the left bottom of (d) is FFT of the magnetite crystal.

层沉积物中磁性矿物的分离富集是有效的。

另外, FORC 图和矫顽力谱分析结果显示残余物中含有 SD 颗粒磁铁矿和高矫顽力弱磁性矿物(可能为赤铁矿)。部分 SD 颗粒磁铁矿很可能是在其形成过程中被含铁硅酸盐/粘土矿物包裹,所以没有被磁选出来。另外,由于该磁选方法对弱磁性矿物(如赤铁矿、针铁矿)效果不理想,所以当原样中主要的载磁矿物为赤铁矿或针铁矿等弱磁性矿物时,本磁选方法获得的磁选物可能难以代表原样信息。

比较而言,本研究建立的磁选流程耗时较短,而 Hounslow 和 Maher (1996) 的实验流程需耗时 7 天,且他们实验的  $Eff_{SUS}$  值主要在 20%~60% 范围,只有极少样品能达到 75%,  $Eff_{SIRM}$  值为 60%~80%。另外,本磁选方法不需添加醋酸等物质溶解样品中的碳酸盐(Sun and Jackson, 1994; Hounslow and

Maher, 1996), 避免了细小铁氧化物的溶解。但是,我们的方法对于其他类型沉积物和沉积岩的实用性和效率值得今后进一步对比研究。

#### 4.2 化石磁小体的识别问题

由于碎屑来源磁性矿物的混合,沉积物中化石磁小体的识别往往比较困难。FORC 图是目前判别化石磁小体是否存在最有效的岩石磁学手段之一,一般将磁相互作用力微弱且等值线主要沿中央脊展布的 FORC 图认为是化石磁小体存在的标志(Egli et al., 2010; Kind et al., 2011; Roberts et al., 2011, 2012)。但是, FORC 图的这种展布特征并不为化石磁小体所特有,相互作用力微弱的非生物成因的 SD 磁铁矿也可能呈现出相似特征(Su et al., 2013; Wang et al., 2013)。另外,磁小体链的坍塌聚集也可能产生相互作用力较大的 FORC 分布(Li et

al., 2012). 因此, 仅仅依据 FORC 图的形态还无法断定样品中是否存在化石磁小体, 还必须结合透射电子显微学方法对样品中的磁性矿物进行进一步的确认(Li et al., 2013). 图 6a 中的矿物颗粒尺寸均一(约 120 nm)、棱柱状且成链状排列, 图 6b 显示其组成元素为 Fe 和 O, 图 6c 指示其晶体沿其[111]晶轴拉长, 图 6d 的晶面间距参数以及傅里叶变化均指示矿物为磁铁矿, 上述信息指示图 6 中的矿物为生物成因的 SD 磁铁矿(化石磁小体)(Pósfai, 2007; Li et al., 2013; Liu et al., 2015). 然而, 透射电子显微学方法的缺点是耗时和昂贵, 如果对大量样品进行观察, 成本会非常高. 如果先对样品进行系统的岩石磁学工作, 再结合磁学信息对样品进行有针对性的透射电子显微学观察, 往往可以取得较好的效果. 化石磁小体的低含量以及磁小体链的断裂、坍塌、部分氧化等因素, 都可能会导致其磁学特征信息不明显, 磁选和透射电子显微学工作(如图 6)则有助于识别化石磁小体. 如何实现沉积物中化石磁小体的快速和准确定量分析仍然具有挑战性, 值得进一步研究. 需要指出, 海洋中化石磁小体对沉积物磁性贡献大小比湖泊沉积物可能更为重要. 以上研究表明, 磁选、岩石磁学和透射电子显微学方法的联用可以更好地揭示样品中磁性矿物的成分、含量、粒径甚至是物源等信息.

## 5 结论

(1) 本实验建立的磁选方法可将密云水库表层沉积物中约 70%~85% 的磁性矿物分离出来, 达到了很好的富集纯化效果. 岩石磁学数据证明磁选物与原样的成分、粒径、含量等特征非常一致, 说明该磁选方法有效, 获得的磁选物可以代表原样的磁性矿物信息.

(2) 岩石磁学结果表明, 密云水库表层沉积物中的主要磁性矿物为单畴和多畴磁铁矿.

(3) 透射电子显微学结果表明, 沉积物中含有不规则形状、微米尺寸、碎屑成因的(钛)磁铁矿, 棱柱状、纳米尺寸、化学纯度高的化石磁小体, 以及自生成因的超顺磁颗粒磁铁矿. 研究表明, 岩石磁学和透射电子显微学方法的联用可以更好地揭示磁性矿物的物源信息以及赋存状态, 从而为环境磁学和古地磁学研究提供更为详细、准确的基础信息.

致谢 感谢 Greig A. Paterson、张春霞、刘素贞和谷立新等的有益讨论. 感谢两位匿名审稿专家提出

的宝贵修改建议.

## References

- Chang L, Roberts A P, Williams W, et al. 2012. Giant magnetofossils and hyperthermal events. *Earth & Planetary Science Letters*, 351-352: 258-269.
- Chen F H, Liu J B, Xu Q H, et al. 2013. Environmental magnetic studies of sediment cores from Gonghai Lake: implications for monsoon evolution in North China during the late glacial and Holocene. *Journal of Paleolimnology*, 49(3): 447-464.
- Day R, Fuller M, Schmidt V A. 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 13(4): 260-267.
- Deng C L, Zhu R X, Jackson M J, et al. 2001. Variability of the temperature-dependent susceptibility of the Holocene eolian deposits in the Chinese loess plateau: A pedogenesis indicator. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A*, 26(11-12): 873-878.
- Deng C L, Vidic N J, Verosub K L, et al. 2005. Mineral magnetic variation of the Jiaodao Chinese loess/paleosol sequence and its bearing on long-term climatic variability. *J. Geophys. Res.*, 110: B03103, doi: 10.1029/2004JB003451.
- Dunlop D J. 2002a. Theory and application of the Day plot ( $M_{rs}/M_s$  versus  $H_{cr}/H_c$ ) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 107(B3): EPM 4-1-EPM 4-22.
- Dunlop D J. 2002b. Theory and application of the Day plot ( $M_{rs}/M_s$  versus  $H_{cr}/H_c$ ) 2. Application to data for rocks, sediments, and soils. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 107(B3): EPM 5-1-EPM 5-15.
- Egli R, Chen A P, Winklhofer M, et al. 2010. Detection of noninteracting single domain particles using first-order reversal curve diagrams. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11: Q01Z11.
- Fu C F, Song Y G, Qiang X K, et al. 2009. Environmental magnetism and its application progress in Paleoclimatic and Paleoenvironmental changes. *Journal of Earth Sciences and Environment* (in Chinese), 31(3): 312-322.
- Han Y L, Tan X D, Chen Z, et al. 2010. Magnetic granulometry of recent sediments from the Huguang Maar and its implication for provenience. *Chinese Science Bulletin*, 55(4): 418-424.
- Hatfield R G, Maher B A. 2009. Fingerprinting upland sediment sources: particle size-specific magnetic linkages between soils, lake sediments and suspended sediments. *Earth Surface Processes & Landforms*, 34(10): 1359-1373.
- Heslop D, Roberts A P. 2012. Estimation of significance levels and confidence intervals for first-order reversal curve distributions. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13(5): Q12Z40.
- Heslop D, Roberts A P, Liao C, et al. 2013. Quantifying magnetite magnetofossil contributions to sedimentary magnetizations.

- Earth & Planetary Science Letters*, 382: 58-65.
- Hesse P P. 1994. Evidence for bacterial palaeoecological origin of mineral magnetic cycles in oxic and sub-oxic Tasman Sea sediments. *Marine Geology*, 117(1-4): 1-17.
- Hounslow M W, Maher B A. 1996. Quantitative extraction and analysis of carriers of magnetization in sediments. *Geophysical Journal International*, 124(1): 57-74.
- Hu S Y, Deng C L, Appel E, et al. 2001. Environmental magnetic properties of the lake sediments. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 46(17): 1491-1494.
- Isambert A, Menguy N, Larquet E, et al. 2007. Transmission electron microscopy study of magnetites in a freshwater population of magnetotactic bacteria. *Am. Mineral.*, 92(4): 621-630.
- Kind J, Gehring A U, Winklhofer M, et al. 2011. Combined use of magnetometry and spectroscopy for identifying magnetofossils in sediments. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 12(8): Q08008.
- Kopp R E, Kirschvink J L. 2008. The identification and biogeochemical interpretation of fossil magnetotactic bacteria. *Earth Science Reviews*, 86(1-4): 42-61.
- Kruiver P P, Dekkers M J, Heslop D. 2001. Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetisation. *Earth & Planetary Science Letters*, 189(3-4): 269-276.
- Li J H, Pan Y X, Liu Q S, et al. 2010. Biomineralization, crystallography and magnetic properties of bullet-shaped magnetite magnetosomes in giant rod magnetotactic bacteria. *Earth & Planetary Science Letters*, 293(3-4): 368-376.
- Li J H, Wu W F, Liu Q S, et al. 2012. Magnetic anisotropy, magnetostatic interactions and identification of magnetofossils. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13: Q151.
- Li J H, Benzerara K, Bernard S, et al. 2013. The link between biomineralization and fossilization of bacteria: Insights from field and experimental studies. *Chemical Geology*, 359: 49-69.
- Li J H, Pan Y X. 2015. Applications of transmission electron microscopy in the earth sciences. *Scientia Sinica Terrae* (in Chinese), 45(9): 1359-1382.
- Li J H, Menguy N, Gatel C, et al. 2015. Crystal growth of bullet-shaped magnetite in magnetotactic bacteria of the Nitrospirae phylum. *Journal of the Royal Society Interface*, 12(103): 20141288.
- Lin W, Li J H, Schüler D, et al. 2009. Diversity analysis of magnetotactic bacteria in Lake Miyun, northern China, by restriction fragment length polymorphism. *Systematic & Applied Microbiology*, 32(5): 342-350.
- Liu J B, Chen F H, Chen J H, et al. 2011. Humid Medieval Warm Period recorded by magnetic characteristics of sediments from Gonghai Lake, Shanxi, North China. *Chinese Science Bulletin*, 56(23): 2464-2474.
- Liu Q S, Deng C L. 2009. Magnetic susceptibility and its environmental significances. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(4): 1041-1048, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.021.
- Liu Q S, Roberts A P, Larrasoana J C, et al. 2012. Environmental magnetism: Principles and applications. *Reviews of Geophysics*, 50(4): RG4002.
- Liu S Z, Deng C L, Xiao J L, et al. 2015. Insolation driven biomagnetic response to the Holocene Warm Period in semi-arid East Asia. *Scientific Reports*, 5: 8001.
- Mann S, Frankel R B, Blakemore R P. 1984. Structure, morphology and crystal growth of bacterial magnetite. *Nature*, 310(5976): 405-407.
- Mann S, Sparks N H C, Blakemore R P. 1987. Structure, morphology and crystal growth of anisotropic magnetite crystals in magnetotactic bacteria. *Proc. R. Soc. B: Biol. Sci.*, 231(1265): 477-487.
- Pan Y X, Deng C L, Liu Q S, et al. 2004. Biomineralization and magnetism of bacterial magnetosomes. *Chinese Science Bulletin*, 49(24): 2563-2568.
- Pan Y X, Zhu R X. 2011. A review of biogeophysics: The establishment of a new discipline and recent progress. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 56(17): 1335-1344.
- Petersen N, von Dobeneck T, Vali H. 1986. Fossil bacterial magnetite in deep-sea sediments from the South Atlantic Ocean. *Nature*, 320(6063): 611-615.
- Pike C R, Roberts A P, Verosub K L. 1999. Characterizing interactions in fine magnetic particle systems using first order reversal curves. *Journal of Applied Physics*, 85(9): 6660-6667.
- Pösfai M, Kasama T, Dunin-Borkowski R E. 2007. Characterization of bacterial magnetic nanostructures using high-resolution transmission electron microscopy and off-axis electron holography. // Schüler D. *Magnetoreception and Magnetosomes in Bacteria*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 197-225.
- Roberts A P, Pike C R, Verosub K L. 2000. First-order reversal curve diagrams: a new tool for characterizing the magnetic properties of natural samples. *Journal of Geophysical Research*, 105(B12): 28461-28475.
- Roberts A P, Florindo F, Villa G, et al. 2011. Magnetotactic bacterial abundance in pelagic marine environments is limited by organic carbon flux and availability of dissolved iron. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 310(3-4): 441-452.
- Roberts A P, Chang L, Heslop D, et al. 2012. Searching for single domain magnetite in the "pseudo-single-domain" sedimentary haystack: Implications of biogenic magnetite preservation for sediment magnetism and relative paleointensity determinations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117: B08104, doi: 10.1029/2012JB009412.
- Robertson D J, France D E. 1994. Discrimination of remanence-carrying minerals in mixtures, using isothermal remanent magnetisation acquisition curves. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 82(3-4): 223-234.
- Schumann D, Raub T D, Kopp R E, et al. 2008. Gigantism in unique biogenic magnetite at the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 105(46): 17648-17653.
- Stacey F D, Banerjee S K. 1974. *The Physical Principles of Rock*

- Magnetism. Amsterdam;Elsevier.
- Stockhausen H. 1998. Some new aspects for the modelling of isothermal remanent magnetization acquisition curves by cumulative log Gaussian functions. *Geophysical Research Letters*, 25(12): 2217-2220.
- Stolz J F, Chang S B R, Kirschvink J L. 1986. Magnetotactic bacteria and single-domain magnetite in hemipelagic sediments. *Nature*, 321(6073): 849-851.
- Su Y L, Gao X, Liu Q S, et al. 2013. Mineral magnetic study of lacustrine sediments from Lake Pumoyum Co, southern Tibet, over the last 19ka and paleoenvironmental significance. *Tectonophysics*, 588: 209-221.
- Sun W W, Jackson M. 1994. Scanning electron microscopy and rock magnetic studies of magnetic carriers in remagnetized early Paleozoic carbonates from Missouri. *Journal of Geophysical Research*, 99(B2): 2935-2942.
- Tang L, Wang X S, Zhang S Q, et al. 2015. High-resolution magnetic and palynological records of the last deglaciation and Holocene from Lake Xiarihur in the Hunshandake Sandy Land, Inner Mongolia. *Holocene*, 25(5): 844-856.
- Thompson R, Oldfield F. 1986. *Environmental Magnetism*. Allen and Unwin. London.
- Wang H P, Kent D V, Jackson M J. 2013. Evidence for abundant isolated magnetic nanoparticles at the Paleocene-Eocene boundary. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(2): 425-430.
- Xia D S, Ma J Y, Wang G, et al. 2006. Environmental magnetism concepts and their applications to environmental studies in arid regions, Northwest China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 13(3): 168-179.
- Zhang W G, Dai X R, Zhang F R, et al. 2007. Magnetic properties of sediments from the Chaohu Lake for the last 7000 years and their implications for the evolution of Asian monsoon. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 27(6): 1053-1062.

## 附中文参考文献

- 符超峰, 宋友桂, 强小科等. 2009. 环境磁学在古气候环境研究中的回顾与展望. *地球科学与环境学报*, 31(3): 312-322.
- 韩玉林, 谈晓冬, 陈忠等. 2010. 湖光岩玛珉湖表层沉积物磁性粒度特征及其来源. *科学通报*, 55(3): 261-267.
- 胡守云, 邓成龙, Appel E 等. 2001. 湖泊沉积物磁学性质的环境意义. *科学通报*, 46(17): 1491-1494.
- 李金华, 潘永信. 2015. 透射电子显微镜在地球科学研究中的应用. *中国科学: 地球科学*, 45(9): 1359-1382.
- 刘青松, 邓成龙. 2009. 磁化率及其环境意义. *地球物理学报*, 52(4): 1041-1048, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.021.
- 潘永信, 邓成龙, 刘青松等. 2004. 趋磁细菌磁小体的生物矿化作用和磁学性质研究进展. *科学通报*, 49(24): 2505-2510.
- 潘永信, 朱日祥. 2011. 生物地球物理学的产生与研究进展. *科学通报*, 56(17): 1335-1344.
- 夏敦胜, 马剑英, 王冠等. 2006. 环境磁学及其在西北干旱区环境研究中的问题. *地学前缘*, 13(3): 168-179.
- 张卫国, 戴雪荣, 张福瑞等. 2007. 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*, 27(6): 1053-1062.

(本文编辑 胡素芳)