

广西八仙天池表层沉积物中 磁性矿物源-汇过程探讨*

韦若梅, 杨小强, 张玲, 周绮娴, 张庭伟

中山大学地球科学与工程学院 / 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东 珠海 519082

摘要: 湖泊沉积物中的磁性矿物由于源区复杂或成岩作用过程中可能发生矿物转化, 导致利用磁性参数重建古环境时存在诸多不确定性。阐明沉积物中磁性矿物的来源以及磁性参数在沉积物的源区和汇区可能发生的变化, 是准确理解磁性参数环境意义的基础。本文选择位于广西武宣县的一个封闭性岩溶湖泊, 采取湖区汇水面积区域表层土壤样品和表层沉积物样品, 进行较为详细的岩石磁学测量, 分析磁性矿物从湖区周围的表层土壤搬运至湖泊沉积之后, 磁性参数和磁性矿物在浓度、类型和粒度等方面的变化。结果表明, 湖泊表层沉积物与土壤样品均以磁铁矿为主要的载磁矿物, 其中, 前者以单畴 (SD) 磁铁矿为主, 后者磁铁矿粒度较粗并含有大量的超顺磁 (SP) 矿物和纤铁矿等物质。两组样品的磁性特征差异指示湖泊表层沉积物存在后期改造, 导致碎屑成因的磁性矿物发生一定程度的还原溶解和生物成因的磁性矿物生成。详细区分湖泊沉积物中磁性矿物“从源到汇”的转换过程, 是利用环境磁学恢复沉积环境的必要前提。

关键词: 岩溶封闭性湖泊; 湖区表层土壤; 湖泊表层沉积物; 岩石磁学; 磁性矿物

中图分类号: P318.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2021) 04-0076-14

The transformation of magnetic minerals in source-sink process for surface sediments of Baxian Tianchi, Guangxi

WEI Ruomei, YANG Xiaoqiang, ZHANG Ling, ZHOU Qixian, ZHANG Tingwei

School of Earth Science and Engineering / Guangdong Provincial Key Laboratory of Geodynamics and Geohazards, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

Abstract: The diverse sources of magnetic minerals in lake sediments usually cause uncertainties in the reconstruction of the paleoenvironment using the magnetic parameters. Clarifying the sources of magnetic minerals and the possible changes in magnetic parameters for the source and the sink area of the sediment respectively, is the basis for a more accurate interpretation of the magnetic parameters representing the environmental significance. In this paper, the sediments of a closed karst lake in Wuxuan County, Guangxi Province was selected to discuss this transform. Surface soil samples from the catchment area and top sediments samples in the lake were taken respectively for performing the detailed rock magnetic measurements, then discussing the variations of the magnetic minerals in concentration, assemblage and domain state. The results show that the magnetic minerals of lake surface sediments and catchment soil samples dominated mainly by the magnetite, however, the lake sediments are mainly composed of SD magnetite while the soil samples characterized mainly by the PSD magnetite, containing higher percent-

* 收稿日期: 2020-02-11 录用日期: 2020-03-27 网络首发日期: 2021-04-19

基金项目: 国家自然科学基金 (41672162)

作者简介: 韦若梅 (1992年生), 女; 研究方向: 第四纪地质学; E-mail: weirm3@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 杨小强 (1972年生), 男; 研究方向: 第四纪地质学; E-mail: eesyxq@mail.sysu.edu.cn

age of superparamagnetic minerals and lepidocrocite. The difference in magnetic properties between the two groups of samples indicates the post-depositional effects in the surface sediments of the lake, which resulted in a degree of reduction and dissolution of the detrital magnetic minerals and the formation of biogenic magnetic minerals. Therefore, the magnetic susceptibility (χ), frequency dependent susceptibility (χ_{fd}), saturation magnetization (M_s) and related magnetic parameters of the sediment may remain some uncertainties for reconstructing the environmental background during deposition. The anhysteretic remanent magnetisation (ARM) and saturation isothermal remanence (M_{rs} or SIRM) are less affected by post-depositional alternation and may be good substitute indicators for recovering environmental information when sediments were formed.

Key words: closed karst lake; catchment surface soils; lake surface sediments; rock magnetism; magnetic minerals

湖泊作为物质运输的最终场所之一, 往往记录了相对连续且丰富的环境变化信息, 是研究古环境演变的理想载体。过去数十年来, 利用环境磁学参数, 重建湖泊沉积物记录的季风强弱变化^[1-4]、流域侵蚀作用和植被覆盖状况^[5]、气候冷暖转换^[6-8]以及干湿程度^[9]等, 取得了一系列的成果, 为客观认识过去地球环境的特征提供了丰富的资料。

沉积物中反映环境变化的各种磁学参数, 其变化的根源在于其中包含的磁性矿物的类型、粒度和含量的变化。随着对湖泊沉积物磁性矿物和磁学参数认识的加深, 人们逐渐意识到磁性参数对环境的响应具有普遍的多解性。磁性矿物在沉积之后的成岩作用过程中, 可能发生溶解或生成新的磁性矿物, 极大地改变了原始的环境信息^[10-12]。同时, 磁性矿物在随着碎屑物质从源区向汇区搬运的过程中, 混杂了不同来源、不同地质环境下形成的成分, 导致湖泊沉积物中磁学参数反映的是一个混合信息, 而非单一环境的体现。因此, 在利用环境磁学方法重建古环境的研究时, 需要系统厘定从源区至汇区过程中, 磁性矿物在类型、粒度等方面的转变。

对开放型湖泊而言, 由于河流的输入, 磁性矿物来源复杂, 阐述上述变化过程具有很大的挑战。而选择封闭性、汇水面积较小的湖泊, 以此类湖泊汇水面积区的周边土壤和湖泊表层沉积物为突破口, 是认识磁性矿物从源区到汇区转换的有效途径。本文以位于广西武宣县的一个封闭性小型湖泊八仙天池为例, 通过研究湖泊汇水面积区表层土壤和表层沉积物的岩石磁学参数, 探讨磁性矿物从风化形成到湖泊沉积之后, 其发生的

转变过程, 为利用磁学方法恢复古环境提供有益的参考资料。

1 区域背景

八仙天池 (23.540 9°N, 109.651 7°E, 海拔 213 m) 是一封闭性的岩溶湖泊, 位于广西壮族自治区来宾市武宣县八仙山上 (图 1), 属于降水补给的天然封闭型湖泊。湖泊面积大约为 0.01 km², 最大湖深为 4 m, 平均深度 2.8 m。湖泊周围地形陡峭, 平均坡度在 30°~40°之间。基岩为灰色灰岩, 风化土壤层厚约 30~50 cm。属于岩溶塌陷后形成的封闭性湖泊。区域平均年降水量为 1 500 mm, 平均年气温为 20.5 °C, 属于亚热带季风气候。主要的植被类型为马尾松和常绿落叶阔叶林^[13]。

2 样品与分析

首先在湖泊汇水区域四周, 约等间距采取 5 个表层土壤样品, 依次编号 BX-S2, -S3, -S4, -S5 和 BX-S6 (图 1(b)), 以代表湖泊汇水面积区表层土壤的整体性质。然后用重力柱状采样器, 在湖泊水体中心采取一长约 1.5 m 的岩芯样品 (编号为 BXC2-02, 23.540 64°N, 109.651 02°E)。从距岩心顶部 80 cm 处开始往上用 1 cm×1 cm×1 cm 的陶瓷盒子和密封袋对样品进行连续采样, 依次编号为 BXC2-1~65。应用于本研究的主要样品为岩心 BXC2-02 顶部 6 个沉积物样品 BXC2-55、BXC2-61~65 (分别位于深度 12.5, 5.0, 3.75, 2.5, 1.25 和 0 cm 处) 和 5 个表层土壤样品 BX-S2~6。同时为便于观察湖泊沉积物中磁性矿物的变化, 位于 25 cm 和 62 cm 两处的样品也被选取进行透射电镜和能谱分析。

对所有样品先进行低、高频磁化率测量, 测

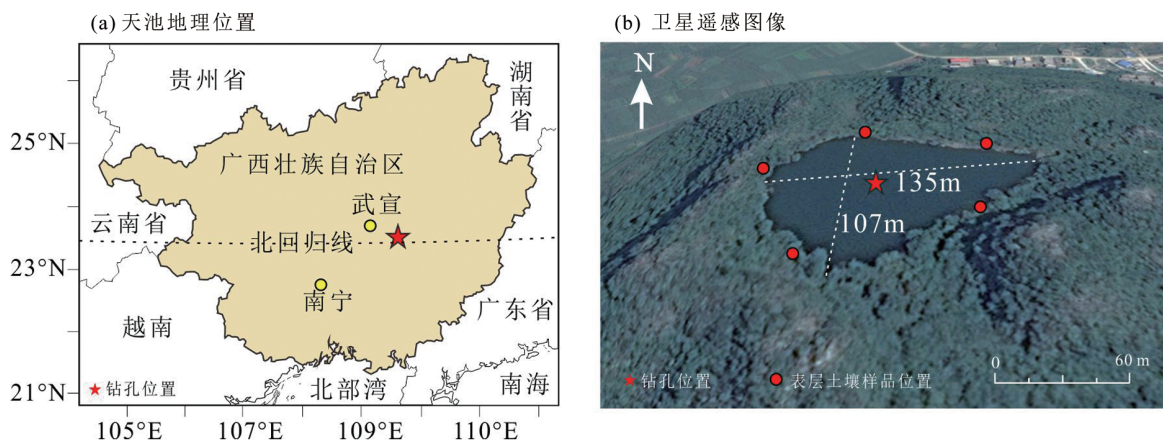


图 1 广西八仙天池地理位置 (a) 及其汇水区卫星遥感图像 (b)

Fig. 1 Geographical location of Baxian lake in Guangxi (a) and satellite remote sensing image of its catchment area (b)

试频率分别为 976 和 15 616 Hz, 场强为 200 A/m。样品磁化率随温度变化的测量在氩气环境中进行(场强为 200 A/m, 频率为 976 Hz), 从室温加热至 700 °C 后再降到室温。以上实验均在卡帕桥 MFK1-FA 磁化率仪和 CS-4 加热装置上进行。随后利用 JR-6A 旋转磁力仪对所有样品进行非磁滞剩磁 (ARM) 和等温剩磁 (IRM) 测量。获得 ARM 的交变磁场的峰值为 80 mT, 相应的直流场为 50 μ T。用振动样品磁力仪 (VSM3900) 对湖泊沉积物样品和流域土壤样品进行磁滞回线 (LOOP)、等温剩磁获得曲线 (IRM)、反向场退磁曲线 (DCD) 和一阶反转曲线 (FORC) 测量。磁滞回线最大磁场强度为 ± 1 T, 步长为 10 mT; 反向场退磁曲线测量之前施加的饱和磁场强度为 1.5 T, 剩磁获得曲线最大磁场强度为 1 T, 选择非线性增加场强。样品的 FORC 曲线测量使用的饱和磁场强度为 1 T, 步长为 1.4 mT, 平均时间为 2 s, 曲线条数为 120 条。磁滞回线数据采用仪器自带软件 MicroMag VSM 进行顺磁校正与平滑处理, FORC 数据则运用 FORCinel 程序在 IGOR PRO 软件中进行处理^[14]。从磁滞回线中提取饱和磁化强度 (M_s)、饱和剩余磁化强度 (M_{rs})、矫顽力 (B_c) 和高场磁化率等参数; 从反向场退磁曲线中提取剩磁矫顽力 (B_{cr})、IRM_{-300mT} 参数, 并从中计算低矫顽力矿物与高矫顽力矿物的相对比例 S-ratio ($S\text{-ratio} = \text{IRM}_{-300\text{mT}} / M_{rs}$) 以及指示高矫顽力矿物绝对含量的硬饱和剩磁 (HIRM) $= (M_{rs} + \text{IRM}_{-300\text{mT}}) / 2$ 。

选择湖泊顶层沉积物样品, 在 Quantum Design 公司的 VersaLab 测试剩磁随低温变化曲线特征。样品首先降温至 50 K, 随后置于 3 T 中获得剩磁, 5 min 后撤去磁场。以 2 K/min 的速率进行升温, 获

得样品从 50 K 升温至 300 K 的 ZFC 剩磁曲线。之后, 样品首先降温至 50 K, 随后置于 2.5 T 中, 以 2 K/min 的速率进行升温, 获得样品从 50 K 升温至 300 K 的 FC 剩磁曲线。以上实验均在中山大学地球科学与工程学院磁学实验室完成。

将一个表层土壤样品和不同深度的 3 个湖泊沉积物样品进行磁分选, 将磁选之后的颗粒置于双面铜网之上, 用场发射透射电镜 JEM2100 TEM (200 kV 加速电压, 配置能谱分析仪) 观察矿物形貌特征和元素含量, 该实验在中国科学院地质与地球物理研究所完成。

3 实验结果

3.1 磁性矿物类型

磁滞回线参数表明, 所有样品在磁场升高到 500 mT 时基本可以达到饱和磁化, 磁滞回线形态呈现典型的软磁性矿物特征 (图 2)。但是表层土壤样品和湖泊表层沉积物样品的 IRM 获得曲线和反向场退磁曲线具有不同的特征 (图 3)。湖泊表层沉积物样品的 IRM 在 100 mT 时达到了饱和等温剩磁的 80% 以上, 在 300 mT 左右达到饱和等温剩磁的 90%, 剩磁矫顽力在 35 mT 左右; 而表层土壤样品在 100~300 mT 之间具有明显的弧度, IRM 增加的速率低于前者, 在 100 mT 时 IRM 为饱和等温剩磁的 70% 左右, 在 300 mT 时达到 SIRM 的 90% 左右, 剩磁矫顽力在 15~35 mT 之间。与表层土壤样品相比, 湖泊沉积物样品剩磁矫顽力分布更为集中且数值更大。这些数据表明, 湖泊沉积物和表层土壤样品的剩磁主要由低矫顽力矿物贡献, 但存在少量的高矫顽力矿物^[15-16]。

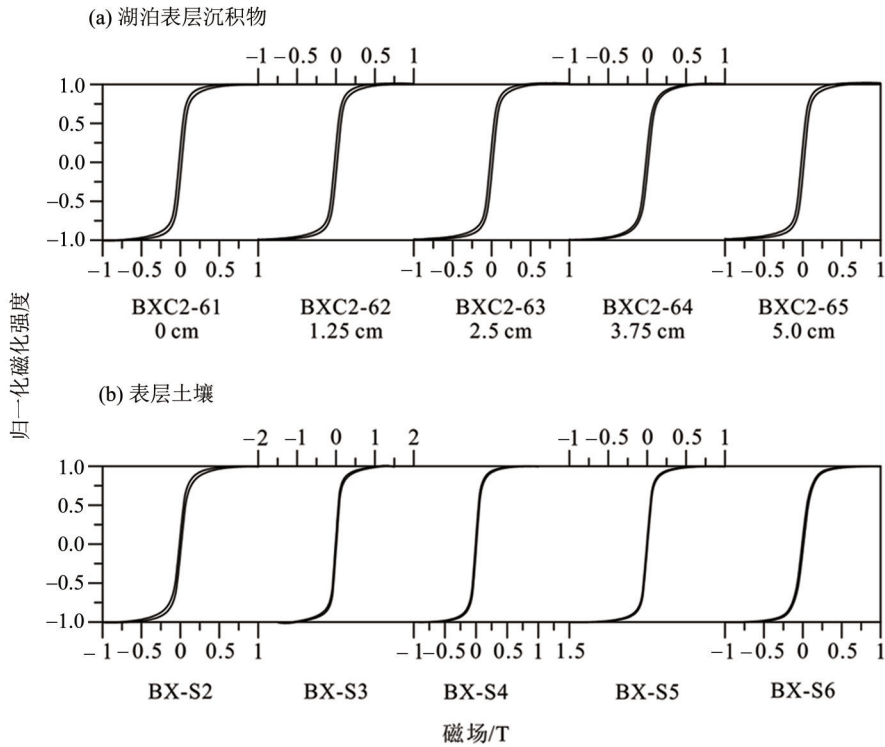


图2 湖泊表层沉积物和汇水面积区域表层土壤样品磁滞回线图 (所有样品均经过顺磁校正)

Fig. 2 Hysteresis loop diagram for lake surface sediments(a) and catchment soil samples(b)

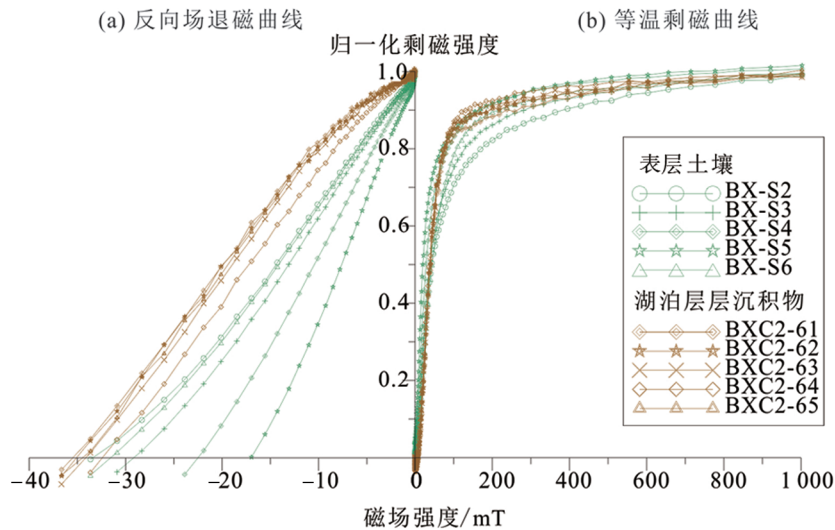


图3 湖泊表层沉积物与汇水面积区域表层土壤样品反向场退磁曲线 (a) 和等温剩磁获得曲线 (b)

Fig. 3 The isothermal remanent magnetization acquisition curves and back field demagnetization curves for lake surface sediments (green line) and catchment soil (brown line) samples

为了进一步获取湖泊表层沉积物和表层土壤样品中不同矫顽力的组分信息, 对其进行了IRM矫顽力谱分析 (图4和表1)^[17]。结果表明, 湖泊表层沉积物含有3种矫顽力组分, 组分1和2应该为不同粒度大小的低矫顽力矿物, 组分3为赤铁矿等高矫顽力矿物^[18]; 而表层土壤样品存在4种不同矫顽力组分, 组分1为超细粒的低矫顽力矿

物^[19], 组分2和组分3亦为低矫顽力矿物, 但组分3的粒度可能更细, 且可能受到表面氧化作用的影响^[17, 20], 组分4为高矫顽力矿物。湖泊表层沉积物和表层土壤样品中的低矫顽力矿物对剩磁的贡献大于80%, 但前者各组分所占比例较为一致, 均以组分2占绝对优势; 后者各组分所占比例差别较大。

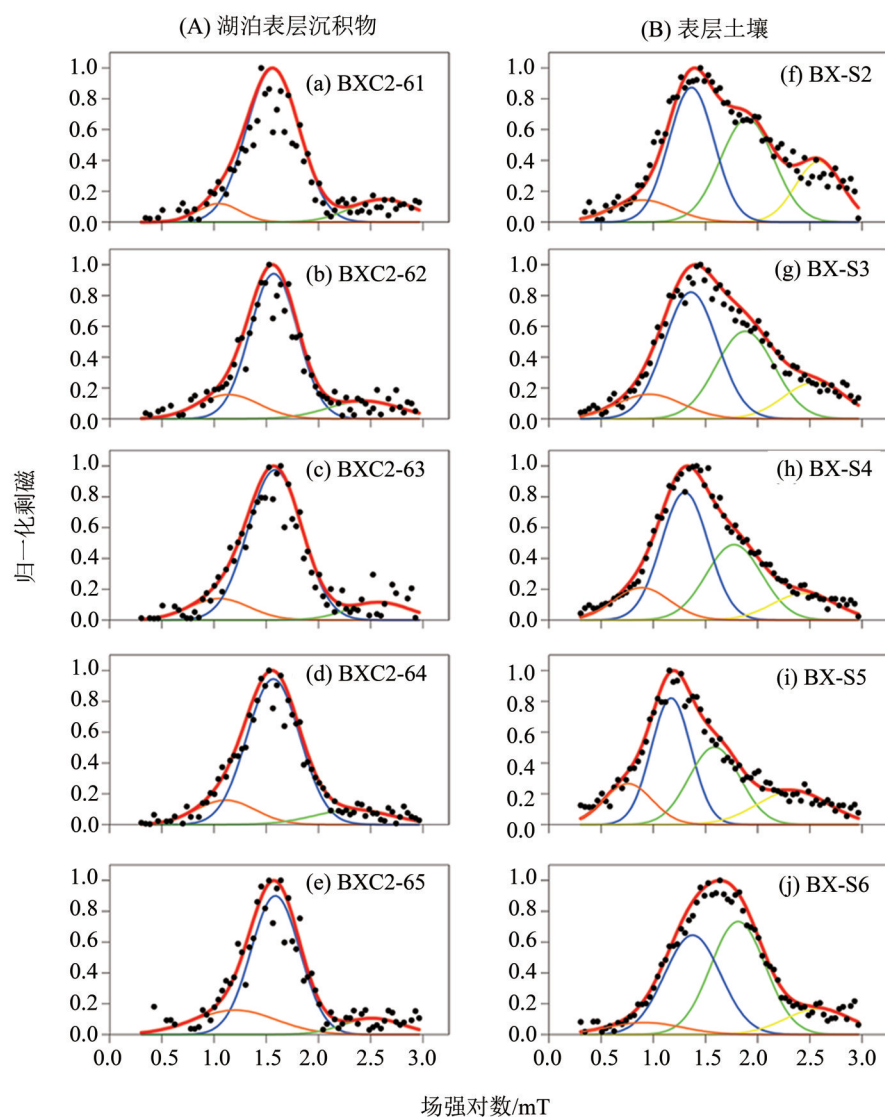


图4 湖泊表层沉积物(a~e)与汇水面积区域表层土壤(f~j)样品IRM梯度获得曲线
黑色实心圆点为测量数据,红色粗线为拟合曲线,橙色、蓝色、绿色和黄色细线分别为矫顽力组分1、2、3和4,
处理软件为pyIRM(<https://github.com/botaoxiangyong/pyIRM>)

Fig. 4 The gradient of acquisition plot(GAP)of IRM for lake surface sediments(a~e) and catchment soil samples(f~j)

磁化率随温度变化的结果显示(图5),在加热过程中,湖区表层土壤样品除了BX-S6外,其它几个样品的磁化率在260℃左右出现显著的峰值,随后磁化率随温度的增加而降低直至400℃左右,这一变化可能来自于土壤中的纤铁矿受热转变成磁赤铁矿,而磁赤铁矿随着温度升高逐渐转变为赤铁矿^[22]。在约400~500℃之间磁化率达到峰值,580℃左右磁化率趋近最小值,冷却曲线远远位于加热曲线之上,低于580℃之后逐渐增加,这些特征说明样品中其它含铁矿物在加热过程中转变为磁铁矿^[23]。

湖泊表层沉积物的磁化率随温度变化特征与表层土壤样品相比具有截然不同的特征。加热曲

线仅是在400~500℃出现非常显著的峰值,峰的形状较之土壤样品尖锐,峰值更大。此外,热处理后的湖泊表层样品磁化率增强幅度亦较土壤样品大,表明湖泊沉积物样品在加热过程中同样也存在由含铁硅酸盐矿物转变为磁铁矿的现象,但是新生成的磁铁矿的含量较土壤样品高。500℃左右磁化率在加热曲线上的峰值较土壤样品明显,说明除了因为含铁硅酸盐/粘土矿物受热分解形成磁铁矿而导致磁化率值增加之外,还可能是因为湖泊沉积物中SD磁铁矿较多导致Hopkinson峰较明显^[23-25]、有机质含量较多而导致赤铁矿等铁氧化物更多的被还原为磁铁矿^[26]。

湖泊顶层沉积物样品剩磁强度随低温变化的

表1 湖泊表层沉积物与汇水面积区域表层土壤样品矫顽力组分的数目及参数¹⁾

Table 1 Numbers and parameters of IRM coercivity components of lake surface sediments and catchment soil samples

样品	组分1			组分2			组分3			组分4		
	$M_n/\%$	$B_{1/2}/mT$	DP	$M_n/\%$	$B_{1/2}/mT$	DP	$M_n/\%$	$B_{1/2}/mT$	DP	$M_n/\%$	$B_{1/2}/mT$	DP
BXC2-61(5.00 cm)	7	11.13	0.20	79	36.51	0.25	12	414.17	0.31			
BXC2-62(3.75 cm)	15	13.74	0.29	72	37.25	0.23	12	273.57	0.35			
BXC2-63(2.50 cm)	12	11.24	0.29	78	38.27	0.26	9	379.91	0.30			
BXC2-64(1.25 cm)	14	12.89	0.28	75	37.03	0.25	10	213.97	0.37			
BXC2-65(0 cm)	20	15.92	0.39	70	38.67	0.23	9	331.07	0.29			
BX-S2	8	7.92	0.30	38	23.19	0.22	35	79.27	0.26	17	385.52	0.22
BX-S3	10	9.17	0.32	43	22.88	0.25	32	75.81	0.28	13	352.84	0.30
BX-S4	13	7.71	0.27	44	20.00	0.23	30	59.36	0.27	11	278.06	0.3
BX-S5	14	5.71	0.23	37	14.80	0.19	29	38.53	0.24	17	218.50	0.34
BX-S6	6	8.29	0.35	39	23.76	0.27	43	64.88	0.26	10	380.30	0.32

1) M_n 为各矫顽力组分对全岩IRM曲线的贡献; $B_{1/2}$ 为各矫顽力组分获得其饱和等温剩磁值的一半时所施加的磁场大小, 反映各组分的平均矫顽力; DP为离散系数, 反映各组分的矫顽力分布, 对应数-高斯函数的一个标准偏差^[17, 21]。

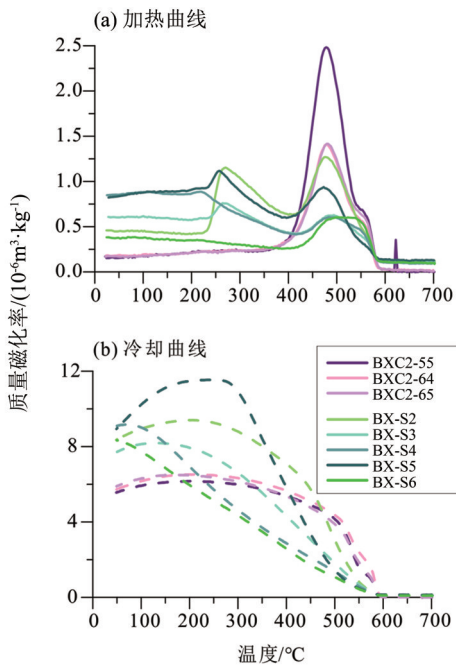


图5 湖泊表层沉积物(BXC)与汇水面积区域表层土壤(BX)磁化率随温度变化曲线

Fig. 5 Temperature dependence of magnetic susceptibility for lake surface sediments (BXC) and catchment soil samples (BX)

特征, 尽管在0和2.5 T磁场两种条件下, 剩磁强度均没有显著变化; 但是对2.5 T场强下的磁化强度数据进行一阶求导之后, 在约82 K发生快速的跳变, 显示了生物成因的磁铁矿存在^[27] (图6)。

3.2 磁性矿物浓度变化

从图7和表2可以看出, 湖泊表层样品的质量磁化率(χ)、频率磁化率(χ_{fd})和饱和磁化强度

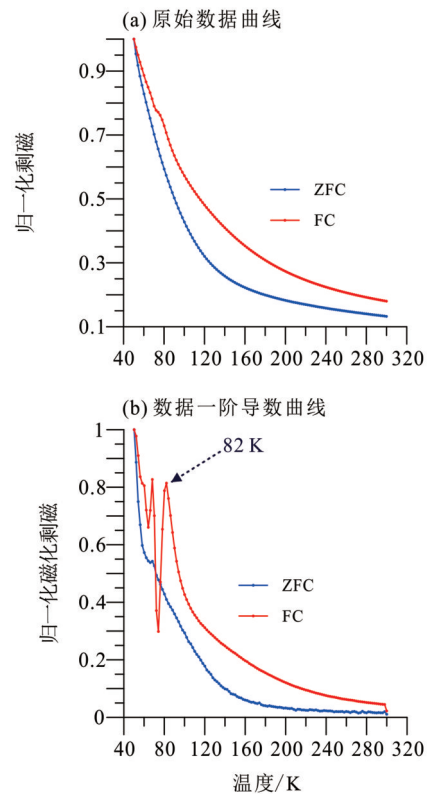


图6 湖泊表层沉积物剩磁随低温变化曲线 ZFC和FC分别为0和2.5 T磁场条件下的剩磁
Fig. 6 Low-temperature remanence warming curves after zero-field cooled (ZFC) and field-cooled (FC) conditions for lake sediments

(M_s)明显较土壤样品低, 而饱和等温剩磁(M_n)和非磁滞剩磁(ARM)值稍大。这表明表层土壤样品中含有大量超顺磁颗粒^[27]。也就是说, 当样品中存在少部分的超顺磁颗粒, 就可以对该样品

的磁化率起重要贡献^[20]。从图6中可以看出代表超顺磁矿物含量的频率磁化率与质量磁化率的曲线变化相似,说明土壤中超顺磁颗粒含量较多,对质量磁化率的贡献较大。高场磁化率(χ_{high}) (0.5~1 T之间磁滞回线的线性段)可以反映顺磁性矿物的大致含量^[25],土壤样品与湖泊表层沉积物样品的高场磁化率值差异较小,说明顺磁性矿物含量不是导致这两组样品质量磁化率差异较大的原因。 M_s 与ARM不受样品中超顺磁颗粒和顺磁性矿物的影响,可以反映样品中单畴或准单畴磁性矿物含量的相对变化^[20],湖泊沉积物样品和表

层土壤样品二者的值相差不大,表明铁磁性矿物含量在两种介质中是基本一致的,但ARM反映的细粒磁性矿物含量在湖泊沉积物中稍高。HIRM可以用来指示样品中赤铁矿和针铁矿等高矫顽力矿物的绝对含量,S-ratio则指示低矫顽力矿物与高矫顽力矿物的相对含量^[28]。土壤样品和湖泊表层样品的S-ratio和HIRM数值接近,且S-ratio均大于80%,表明两组样品均以低矫顽力矿物为主,高矫顽力矿物的绝对含量和相对含量差别不大(表2)。

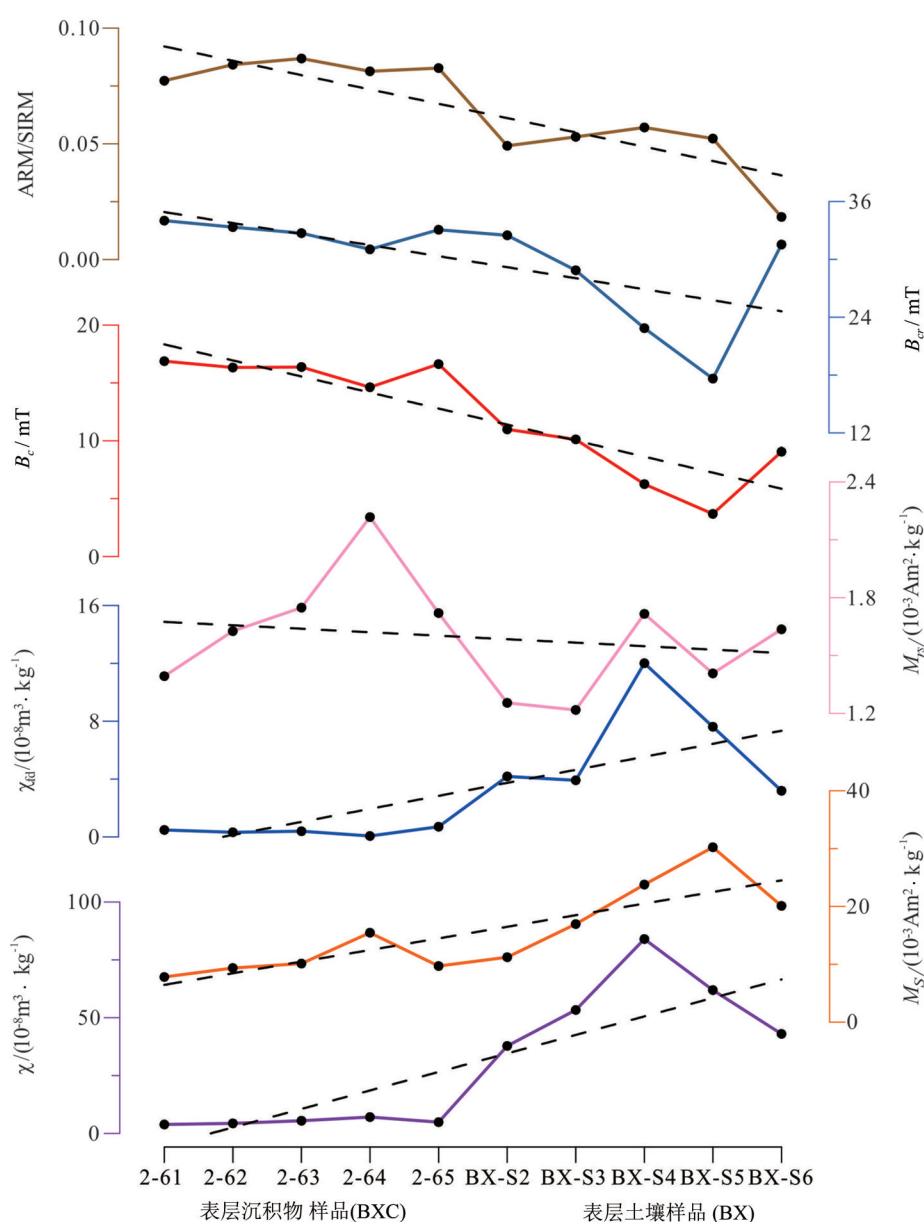


图7 湖泊表层沉积物(BXC)与表层土壤样品(BX)磁性参数对比

Fig. 7 Comparison of magnetic parameters between lake surface sediments (BXC) and catchment soil samples (BX)

表2 八仙天池表层沉积物与汇水面积区域表层土壤样品的相关磁性参数

Table 2 Relevant magnetic parameters of lake surface sediments and catchment soil samples

参数	湖泊表层沉积物样品(BXC)						表层土壤样品(BX)					
	2-61	2-62	2-63	2-64	2-65	平均值	BX-S2	BX-S3	BX-S4	BX-S5	BX-S6	平均值
$\chi/(10^{-8}\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1})$	3.85	4.34	5.45	7.09	4.90	5.13	37.83	53.35	83.99	61.92	42.97	56.01
ARM/($10^{-5}\text{Am}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	9.20	10.89	13.38	15.88	10.12	11.89	9.81	12.27	18.60	11.58	6.81	11.81
$M_s/(10^{-3}\text{Am}^2\cdot\text{kg}^{-1})$	7.82	9.34	10.13	15.47	9.71	10.49	11.22	16.97	23.78	30.23	20.11	20.46
$M_n/(10^{-3}\text{Am}^2\cdot\text{kg}^{-1})$	1.39	1.63	1.75	2.22	1.72	1.74	1.25	1.22	1.72	1.41	1.64	1.45
B_s/mT	16.88	16.33	16.37	14.63	16.63	16.17	10.99	10.12	6.25	3.68	9.06	8.02
B_{cr}/mT	34.02	33.34	32.73	31.03	33.08	32.84	32.50	28.87	22.86	17.63	31.54	26.68
$\chi_{\text{fd}}/(10^{-8}\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1})$	0.48	0.32	0.40	0.06	0.70	0.39	4.19	3.92	12.01	7.62	3.19	6.19
$\chi_{\text{fd}}/\%$	12.48	7.38	7.25	0.88	14.37	8.47	11.06	7.35	14.30	12.31	7.42	10.49
ARM/SIRM	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08	0.08	0.05	0.05	0.06	0.05	0.02	0.05
$\chi_{\text{fd}}/(10^{-8}\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1})$	9.52	9.77	9.68	10.00	10.45	9.88	10.27	9.98	8.92	11.59	6.97	9.54
(SIRM/ χ)/($10^3\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$)	30.88	29.75	28.24	27.56	24.97	28.28	5.28	4.34	3.88	3.58	8.62	5.14
χ_{ARM}/χ	59.98	62.98	61.63	56.32	51.91	58.57	6.52	5.78	5.57	4.70	3.98	5.31
S-ratio	0.88	0.89	0.91	0.93	0.89	0.90	0.81	0.87	0.92	0.92	0.90	0.88
HIRM/($10^{-5}\text{Am}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	13.91	14.35	12.80	13.58	15.89	14.10	19.24	15.73	12.52	12.31	12.54	14.47

3.3 磁性矿物磁畴状态变化

ARM/SIRM (非磁滞剩磁/饱和等温剩磁)、SIRM/ χ (饱和等温剩磁/质量磁化率) 和 χ_{ARM}/χ (非磁滞剩磁磁化率/质量磁化率) 通常用来指示磁性矿物粒度大小, 值越高说明磁性矿物粒度越细^[3, 5, 7]。湖区表层土壤样品中 SIRM/ χ 和 χ_{ARM}/χ 明显低于湖泊表层沉积物样品 (表2), 说明土壤样品中含有的 SP 颗粒较多, 湖泊表层沉积物中含有更多接近单畴颗粒的磁性矿物。SIRM 和 ARM 不受超顺磁颗粒的影响, 湖泊沉积物的 ARM/SIRM 高于土壤样品, 表明前者磁性矿物的粒度相对较细。湖泊沉积物样品的矫顽力 (B_c) 和剩磁矫顽力 (B_{cr}) 均大于表层土壤样品 (表2), 也可能受到粒度大小的影响。

样品的一阶反转曲线 (FORC) 可以进一步比较准确的判断磁性矿物的矫顽力分布、磁性矿物颗粒之间的磁相互作用强弱和磁性矿物种类及磁畴状态^[29-30]。图8显示湖泊表层沉积物样品的 FORC 图呈现典型的单畴状态 (SD), 沿 $B_u=0$ 等值线闭合, 矫顽力分布在 20~30 mT 之间, 沿纵轴 (B_c) 的延伸很小, 表明无相互作用或相互作用非常弱。表层土壤样品则沿纵轴成开口形态, 矫顽力值在 10 mT 左右, 呈现为弱相互作用的 PSD 状态^[31-32]。但由于土壤样品中存在一定量的 SP 颗粒, 因此 FORC 呈现出的 PSD 状态也可能是 SP 颗粒与

SD 颗粒混合所导致的。

3.4 磁性矿物透射电镜特征

表层土壤样品和湖泊表层沉积物样品的透射电镜及其能谱分析结果显示 (图9)。表层土壤中磁性矿物粒度较大, 可以观察到 300~400 nm 粒径的磁铁矿, 磁铁矿晶格中有被 Ti 等原子替代, 形状多不规则。而湖泊沉积物中, 既有形状类似土壤样品的不规则状的磁铁矿, 颗粒大小也与土壤样品基本一致, 但同时存在近似八面体形状的磁铁矿, 长、短轴的直径分别约为 75 nm 和 62 nm。两种形态矿物的 Fe、O 原子含量有显著差别, 形状不规则矿物的 Fe/O 原子之比远小于近八面体的矿物 (表3)。

4 讨论

4.1 八仙天池湖泊表层沉积物的来源

通常情况下, 湖泊沉积物中磁性矿物主要来自两种渠道, 一是汇水面积区域由风化作用形成的磁性矿物的搬运^[1, 3, 5, 7-8, 33-34], 二是在湖泊环境中, 由生物因素参与形成的磁铁矿^[6, 9-10, 35-36]和还原作用对碎屑磁铁矿等进行改造形成铁硫化物^[11, 37-39]。磁性矿物来源不同, 对环境的指示有着显著的差别。八仙天池是位于山脉之上的小型封闭湖泊, 碎屑物质的主要来源只能是汇水面积区域的风化层土壤。分析湖区表层土壤与湖泊沉积物样品中磁学

表3 湖泊汇水面积区域表层土壤样品与湖泊沉积物样品能谱分析结果¹⁾
Table 3 Elemental mapping of EDXS for surface soil and lake sediments samples

项目	土壤		表层沉积(25 cm)		上部沉积(46 cm)		上部沉积(62 cm)	
	i	ii	i	ii	i	ii	i	ii
$w(\text{Fe})/\%$	43.9	38.8	33.2	22.6	20.9	22.7	46.8	24.3
$w(\text{O})/\%$	23	22.3	20.8	28	1.4	9.1	4.9	23.2
$w(\text{Fe})/w(\text{O})$	1.91	1.74	1.6	0.81	14.9	2.5	9.6	1.0

1) i, ii 编号与图9相同

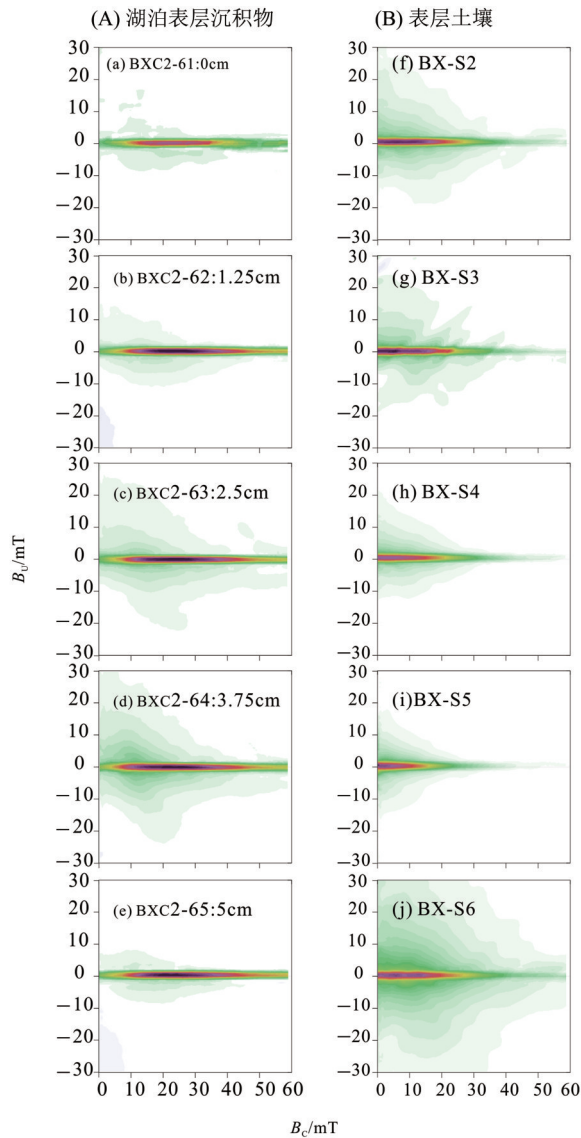


图8 湖泊表层沉积物与表层土壤样品 FORC 图解

Fig. 8 FORC(First-order reversal curve) diagrams for lake surface sediments(a-e) and catchment soil samples(f-j)

矿物类型, 尽管二者都以软磁组分的磁铁矿为主要载磁矿物, 但是在磁学矿物类型、粒度和浓度等方面二者显著不同。首先, 土壤样品中含有明显的超顺磁矿物和纤铁矿, 但是在湖泊沉积物中这两者的含量或者大幅度减少, 或者缺失。第二

个方面, 虽然不能确定土壤样品 FORC 图中呈现出 PSD 特征是因为存在 PSD 颗粒还是因为 SP 颗粒与 SD 颗粒的混合, 或者两者都有, 但是通过岩石磁学分析和透射电镜观察表明, 表层土壤样品中磁铁矿的粒度确实较湖泊沉积物中 SD 磁铁矿大, 而且形状多不规则, 反映了成土作用过程中由风化作用形成的碎屑磁铁矿。八仙天池从周围风化土壤的碎屑物质源区到湖泊中沉积, 搬运距离在 10~50 m 范围之内, 搬运过程中不可能发生改造。超顺磁矿物和纤铁矿在湖泊沉积物中的减少或者缺失, 磁铁矿粒度的减小, 只能来自碎屑物质沉积之后在成岩过程中的改造和湖泊中由生物因素参与形成新的磁性矿物。

Oldfield^[40] 通过测量一系列天然土壤和沉积物样品的磁化率、频率磁化率和非磁滞剩磁磁化率, 发现碎屑成因的样品和非碎屑成因的样品分别位于两个明显不同的区间。这一方法常常被应用于快速的检测湖泊沉积物中是否存在生物成因磁铁矿, 但对介于碎屑和非碎屑分布范围之外的磁性矿物, 不同学者的判断有所不同^[8,10,41-43]。如一些学者在对位于英国西北部的布莱勒姆·塔恩 (Blelham Tarn) 沉积物^[41] 以及兄弟水 (Brothers Water) 湖泊沉积物^[10] 进行磁性研究时发现, 样品落在碎屑和细菌成因范围的过渡区间, 因此认为这两个湖泊沉积物的磁性特征既受流域来源的磁性矿物影响, 又受湖泊中细菌磁小体的影响。Sandeep 等^[8] 在对印度南部的普库特 (Pookot) 湖泊沉积物样品进行投图后发现大部分样品位于碎屑来源区间, 而有小部分样品位于 Brothers Water 湖泊样品的数值范围, 但根据所有 Pookot 湖泊样品的数值明显低于 Oldfield^[40] 划定的非碎屑成因区间、湖泊沉积物的 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 值很低、湖泊样品与湖区土壤样品磁性粒度相似等特点, 他们认为湖泊沉积物为碎屑成因。对汇水面积区域表层土壤和湖泊表层沉积物进行 $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{d}} - \chi_{\text{ARM}}/\chi$ 投图 (图 10), 可以发现表层土壤与湖泊沉积物分别位于截然不同的两个

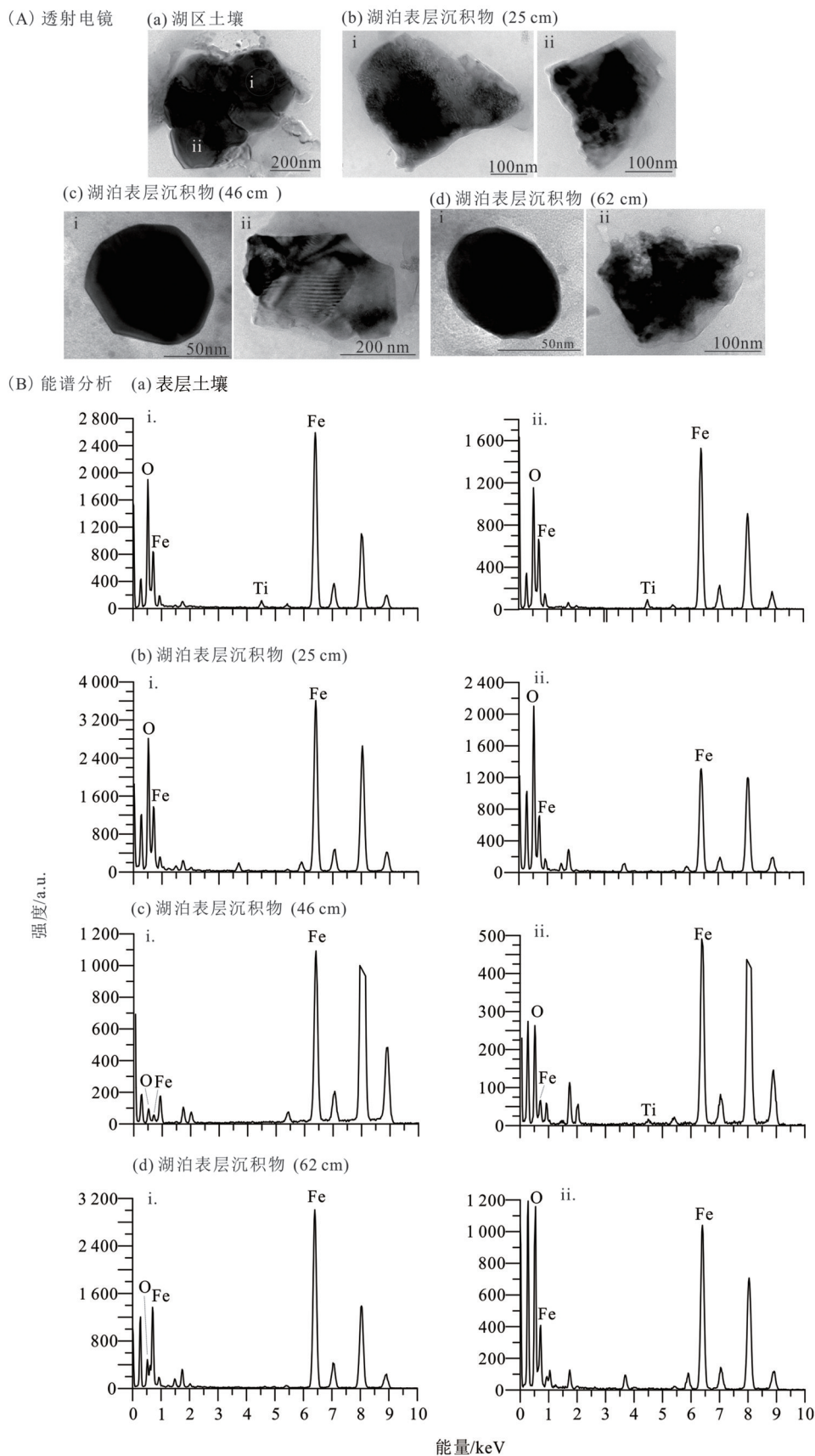


图9 表层土壤样品与湖泊沉积物样品透射电镜及其能谱分析结果

Fig. 9 Transmission electron microscope and energy dispersive X-ray spectrometry (EDXS) analyses of surface soil and lake sediments samples

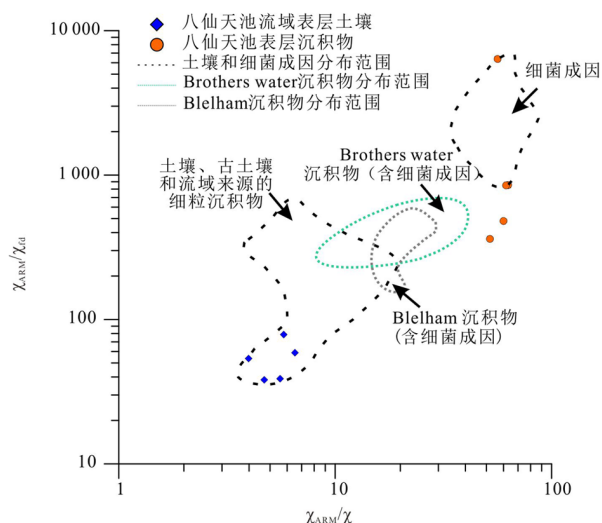


图 10 χ_{ARM}/χ_{fd} 与 χ_{ARM}/χ 二元图 (据文献 [10, 38-39])

Fig. 10 Bi-logarithmic plots of χ_{ARM}/χ_{fd} vs χ_{ARM}/χ for lake surface sediments and catchment soil samples [10, 38-39]

区间。湖泊沉积物更多位于含有细菌成因的磁性矿物的区间。尽管在湖泊沉积物中, 电镜观察时没有发现链状或者子弹头形状等典型的生物细菌成因的磁铁矿, 但是近八面体的良好晶形、单畴颗粒和非常高的 Fe/O 原子之比, 以及样品的剩磁在 82 K 的突变, 也指示了生物成因的磁铁矿 [27, 44]。通常认为, 湖泊沉积物中生物成因的铁磁性矿物, 形成于有机质丰富、气候温暖湿润时期 [43]。八仙天池位于亚热带区域, 表层沉积物处于近、现代沉积环境, 气候温暖湿润, 同时沉积物呈灰黑色, 有机质丰富。这些条件有利于生物成因磁铁矿的形成。

湖泊沉积物中纤铁矿、超顺磁矿物的减少和碎屑磁铁矿粒度的减小, 应该来自沉积之后的还原作用。前人研究表明, 在以细菌为媒介且有机质作为还原剂的还原环境中, 首先是含铁矿物被溶解和还原, 导致 Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} [39, 44-46]。在含铁矿物中反应活性最高的是水铁矿和纤铁矿, 其次为针铁矿、磁铁矿和赤铁矿, 最后为含铁的硅酸盐和黏土矿物。当反应活性高的水铁矿和纤铁矿被大量消耗时, 才会出现 H_2S , 针铁矿、磁铁矿和赤铁矿这些反应活性较低的矿物将会与 H_2S 反应形成铁的硫化物 (生成的顺序为: 磁黄铁矿 \rightarrow 胶黄铁矿 \rightarrow 黄铁矿) [39, 46-50]。在湖泊表层沉积物的 FORC 图中, 中心等值线位于 $B_u=0$ 附近, 没有偏向 $B_u < 0$ 方向, 磁相互作用较弱、矫顽力分布在 20~30 mT 之间, 为典型的 SD 磁铁矿特征, 并没有显示出含有亚铁磁性铁硫化物的信息。此外, 湖泊

表层样品中的高矫顽力矿物含量与土壤样品差别不大, 同样说明了湖泊尚处于铁 (氢) 氧化物还原环境, 未达到硫酸盐还原环境。而纤铁矿和超顺磁颗粒的溶解、碎屑磁铁矿的部分溶解可能会为新的磁铁矿形成提供铁来源。

根据上面的分析, 我们认为八仙天池湖泊沉积物中的磁性矿物, 主要由两部分来源构成, 一是汇水面积区域由风化作用形成的磁性矿物, 但是其在湖泊环境中发生了改造, 粒度减小、超顺磁等矿物的含量减少; 二是在湖泊环境中由生物因素参与形成新的 SD 状态的磁铁矿。

4.2 表层沉积物磁性特征对环境磁学研究的启示

湖泊沉积物中, 通常用磁化率 (χ)、频率磁化率 (χ_{fd})、饱和磁化强度 (M_s)、饱和等温剩磁强度 (SIRM 或 M_{rs})、非磁滞剩磁 (ARM) 以及一些比值作为反映环境变化的替代性指标。通过对八仙天池汇水面积区域表层土壤和湖泊表层沉积物的磁性矿物在类型和粒度等方面的变化分析发现, 不同磁性参数表达的环境意义与沉积时的真实情况可能会存在一定差异。如 χ 、 M_s 、 χ_{fd} 是反映磁性矿物浓度的常用参数, 它们能够反映汇水面积区域风化时形成的磁性矿物浓度, 但是在湖泊沉积物中, 风化作用形成的碎屑物质中的超顺磁矿物和顺磁性矿物含量减少, 导致 χ 、 M_s 、 χ_{fd} 的值降低, 说明当时可能为偏还原的沉积环境, 导致大量的细粒物质溶解。

而 ARM 和 SIRM (或 M_{rs}) 与沉积物中的超顺磁和顺磁性矿物含量无关, 在表层土壤和沉积物之中平均值的差别不是十分显著, 更能反映沉积物形成时的环境。对封闭性湖泊而言, ARM 和 SIRM 与当时风化作用的强度相关。但是由于沉积之后, 生物成因的磁性矿物将影响 ARM 和 SIRM, 它们的比值 (ARM/SIRM) 反映的磁性颗粒的大小, 包含了当时的生物作用过程形成的矿物, 其值越高, 有可能代表温暖湿润的气候环境。如果在湖泊沉积物中能够提取明确的可以代表单畴颗粒 (SD) 的磁性矿物浓度变化的参数 (如通过 FORC 图的主成分分析), 其环境意义将会更为明确。此外, 用来指示高矫顽力矿物的相对含量和绝对含量的 S-ratio 和 HIRM 在湖泊表层样品与土壤样品中差别不大, 说明流域中的高矫顽力矿物被搬运至湖泊沉积后遭受的还原作用较微弱, 其含量可以很好的代表流域风化作用强弱。

5 结 论

八仙天池汇水面积区域表层土壤和湖泊表层沉积物的岩石磁学分析结果表明, 土壤样品与湖泊表层样品均以磁铁矿为主要的亚铁磁性矿物, 但土壤样品中的磁铁矿粒度较湖泊沉积物中的稳定单畴 (SSD) 磁铁矿要粗, 且土壤样品中含有更高含量的超顺磁矿物和纤铁矿等物质。碎屑成因

的磁性矿物在搬运到湖泊中之后, 发生一定程度的溶解作用, 使超顺磁矿物的含量减少, 磁铁矿的粒度减小。同时在沉积物形成之后, 可能在生物作用的参与下, 形成新的SD磁铁矿, 与碎屑成因的磁铁矿混合共同对湖泊沉积物的磁性起主要贡献。以上结果证明, 通过岩石磁学和环境磁学研究可以很好地了解沉积物源汇过程并恢复沉积环境。

参考文献:

- [1] 刘建宝, 陈发虎, 陈建徽, 等. 山西北武公海湖泊岩芯的环境磁学特征及中世纪暖期湿润气候探讨[J]. 科学通报, 2011, 56(31): 2580-2590.
LIU J B, CHEN F H, CHEN J H, et al. Humid Medieval Warm Period recorded by magnetic characteristics of sediments from Gonghai Lake, Shanxi, North China[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56 (31): 2464-2474.
- [2] DUAN Z Q, LIU Q S, YANG X Q, et al. Magnetism of the Huguangyan Maar Lake sediments, Southeast China and its paleoenvironmental implications[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2014, 395: 158-167.
- [3] RAWAT S, GUPTA A K, SRIVASTAVA P, et al. A 13 000 year record of environmental magnetic variations in the lake and peat deposits from the Chandra valley, Lahaul: Implications to Holocene monsoonal variability in the NW Himalaya[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 440: 116-127.
- [4] PENG J, YANG X Q, TONEY J L, et al. Indian Summer Monsoon variations and competing influences between hemispheres since ~35 ka recorded in Tengchongqinghai Lake, southwestern China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2019, 516: 113-125.
- [5] YE S S, ZHONG W, WEI Z Q, et al. Environmental magnetic record of a ~3000 years subalpine peat core from the western Nanling Mountains, South China [J]. Journal of Paleolimnology, 2019, 62(3): 229-244.
- [6] HIRT A M, LANCI L, KOINIG K. Mineral magnetic record of Holocene environmental changes in Sägistalsee, Switzerland [J]. Journal of Paleolimnology, 2003, 30 (3): 321-331.
- [7] CHEN F H, LIU J B, XU Q H, et al. Environmental magnetic studies of sediment cores from Gonghai Lake: implications for monsoon evolution in North China during the late glacial and Holocene[J]. Journal of Paleolimnology, 2013, 49(3): 447-464.
- [8] SANDEEP K, SHANKAR R, WARRIER A K, et al. The environmental magnetic record of palaeoenvironmental variations during the past 3100 years: A possible solar influence? [J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 118: 24-36.
- [9] WANG H Y, SONG Y Q, CHENG Y, et al. Mineral magnetism and other characteristics of sediments from a sub-alpine lake (3080 m a. s. l.) in central east China and their implications on environmental changes for the last 5770 years [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 452: 44-59.
- [10] OLDFIELD F, WU R J. The magnetic properties of the recent sediments of Brothers Water, NW England [J]. Journal of Paleolimnology, 2000, 23(2): 165-174.
- [11] LI W, MU G J, LIN Y C, et al. Magnetic mineral diagenesis in sediments of saline lake Lop Nur [J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(3): 548-560.
- [12] OLIVA-URCIA B, MORENO A. Discerning the major environmental processes that influence the magnetic properties in three northern Iberia mountain lakes [J]. Catena, 2019, 182: 1-12.
- [13] CHANG J, ZHANG E L, LIU E F, et al. A 60-year historical record of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) pollution in lake sediment from Guangxi Province, Southern China [J]. Anthropocene, 2018, 24: 51-60.
- [14] HARRISON R J, FEINBERG J M. FORC_{in}el: An improved algorithm for calculating first-order reversal curve distributions using locally weighted regression smoothing [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2008, 9(5): Q05016.
- [15] 卢升高, 白世强. 杭州城区土壤的磁性与磁性矿物学及其环境意义 [J]. 地球物理学报, 2008, 51(3): 762-769.
LU S G, BAI S Q. Magnetic characterization and magnetic mineralogy of the Hangzhou urban soils and its environmental implications [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51 (3): 762-769.
- [16] 洪晖, 关淇文, 王晓艳, 等. 黔北三星洞石笋记录的岩石磁学特征分析 [J]. 第四纪研究, 2016, 36(6): 1510-1517.
HONG H, GUAN Q W, WANG X Y, et al. Rock mag-

- netism of stalagmite in Sanxing Cave, northern guizhou province [J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36 (6) : 1510-1517.
- [17] KRUIVER P P, DEKKERS M J, HESLOP D. Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetisation [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 189(3/4): 269-276.
- [18] PETERS C, DEKKERS M J. Selected room temperature magnetic parameters as a function of mineralogy, concentration and grain size[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28(16): 659-667.
- [19] 欧阳婷萍, 田成静, 朱照宇, 等. 南海南部 YSJD-86GC 孔沉积物磁性特征及其环境意义[J]. *科学通报*, 2014, 59(19): 1881-1891.
- OUYANG T P, TIAN C J, ZHU Z Y, et al. Magnetic characteristics and its environmental implications of core YSJD-86GC sediments from the southern South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59 (25): 3176-3187.
- [20] THOMPSON R, OLDFIELD F. *Environmental Magnetism* [M]. London: Allen and Unwin, 1986.
- [21] 韩志勇, 李徐生, 陈英勇, 等. 矫顽力组分定量分析揭示下蜀黄土磁化率异常降低的原因[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(6): 213-221.
- HAN Z Y, LI X S, CHEN Y Y, et al. Quantification of magnetic coercivity components reveals the cause of anomalous decrease of magnetic susceptibility of the Xiashu loess. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51 (6): 1835 - 1843.
- [22] 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-Solid Earth and Geodesy*, 2001,26(11/12): 873-878.
- [23] ZHU R X, LIN M, PAN Y X. History of the temperature-dependence of susceptibility and its implications: preliminary results along an E-W transect of the Chinese Loess Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(S1): 81-86.
- [24] 邓成龙, 朱日祥, 袁宝印. 黄土高原全新世风成沉积的岩石磁学性质及其古气候意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(4): 37-45.
- DENG C L, ZHU R X, YUAN B Y. Rock magnetism of the Holocene eolian deposits in the loess plateau: Evidence for pedogenesis [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22(4): 37-45.
- [25] 刘青松, 邓成龙. 磁化率及其环境意义[J]. *地球物理学报*, 2009, 52 (4): 1041-1048.
- LIU Q S, DENG C L. Magnetic susceptibility and its environmental significances [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52 (4): 1041-1048.
- [26] OCHES E A, BANERJEE S K. Rock magnetic proxies of Climate change from loess-paleosol sediments in Czech Republic [J]. *Studia Geophysica Et Geodaetica*, 1996, 40:287-300.
- [27] CHANG L, HESLOP D, ROBERTS A P, et al. Discrimination of biogenic and detrital magnetite through a double Verwey transition temperature [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121: 3-14.
- [28] 姜兆霞, 刘青松. 赤铁矿的定量化及其气候意义 [J]. *第四纪研究*, 2016, 36(3):676-689.
- JIANG Z X, LIU Q S. Quantification of hematite and its climatic significances [J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36(3): 676-689.
- [29] ROBERTS A P, PIKE C R, Verosub K L. First-order reversal curve diagrams: A new tool for characterizing the magnetic properties of natural samples [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105 (B12) : 28461-28475.
- [30] 秦华峰, 刘青松, 潘永信. 一阶反转曲线(FORC)图的原理及应用实例[J]. *地球物理学报*, 2008, 51 (3):743-751.
- QING H F, LIU Q S, PAN Y X. The first-order reversal curve (FORC) diagram: Theory and case study[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(3):743-751.
- [31] MUXWORTHY A R, DUNLOP D J. First-order reversal curve (FORC) diagrams for pseudo-single-domain magnetites at high temperature [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 203(1):369-382.
- [32] HARRISON R J, MURASZKO J, HESLOP D, et al. An improved algorithm for unmixing first-order reversal curve diagrams using principal component analysis [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2018, 19 (5) : 1595-1610.
- [33] 罗攀, 郑卓, 杨小强. 海南岛双池玛珥湖全新世磁化率及其环境意义[J]. *热带地理*, 2006, 26(3) : 211-217.
- LUO P, ZHENG Z, YANG X Q. Holocene magnetic susceptibility from shuangchi maar lake [J]. *Tropical Geography*, 2006, 26(3): 211-217.
- [34] 韩玉林, 谈晓冬, 陈忠, 等. 湖光岩玛珥湖表层沉积物磁性粒度特征及其来源[J]. *科学通报*, 2010, 55 (3):261-267.
- HAN Y L, TAN X D, CHEN Z, et al. Magnetic granulometry of recent sediments from the Huguang Maar and its implication for provenience [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(4): 418-424.
- [35] 韩非, 王芙仙, 李金华, 等. 北京密云水库表层沉积物磁性矿物的鉴别[J]. *地球物理学报*, 2016, 59 (8): 2937-2948.

- HAN F, WANG F X, LI J H, et al. Identification of magnetic minerals in surface sediments of Miyun Lake, Beijing [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(8): 2937-2948.
- [36] 章敏, 潘永信. 呼伦湖表层沉积物的磁性矿物组成特征[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(1): 42-47.
- ZHANG M, PAN Y X. Characterization of magnetic minerals in surface sediments of the Hulun Lake, Inner Mongolia [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(1): 42-47.
- [37] 胡守云, 王苏民, APPEL E, 等. 呼伦湖湖泊沉积物磁化率变化的环境磁学机制[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 1998, 28(4): 334-339.
- HU S Y, WANG S M, APPEL E, et al. Environmental magnetic mechanism of susceptibility changes in Hulunhu lake sediments [J]. Science in China (D), 28(4): 2175-2192.
- [38] 胡守云, APPEL E, HOFFMANN V, 等. 湖泊沉积物中胶黄铁矿的鉴定及其磁学意义[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2002, 32(3): 234-238.
- HU S Y, APPEL E, HOFFMANN V, et al. Identification of greigite in lake sediments and its magnetic significance [J]. Science in China (D), 2002, 45(1): 81-87.
- [39] ROBERTS A P. Magnetic mineral diagenesis [J]. Earth Science Reviews, 2015, 151: 1-47.
- [40] OLDFIELD F. Toward the discrimination of fine-grained ferrimagnets by magnetic measurements in lake and near-shore marine sediments [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(B5): 9045-9050.
- [41] POST K D, VAN DE OLDFIELD F, HAWORTH E Y, et al. A record of accelerated erosion in the recent sediments of Blelham Tarn in the English Lake district [J]. Journal of Paleolimnology, 1997, 18(2): 103-120.
- [42] 张卫国, 俞立中, 丛友滋. 赤道东太平洋 C-C 区硅质沉积物的磁性特征及细菌合成磁铁矿 [J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 467-472.
- ZHANG W G, YU L Z, CONG Y Z. Magnetic properties of siliceous sediments from the clarion-clipperton zone, northeastern equatorial Pacific, and the occurrence of bacterial magnetite [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(3): 467-472.
- [43] LIU S Z, DENG C L, XIAO J L, et al. Insolation driven biomagnetic response to the Holocene Warm Period in semi-arid East Asia [J]. Scientific Reports, 2015. DOI: 10.1038/srep08001.
- [44] LI J, LIU Y, LIU S, et al. Classification of a complexly mixed magnetic mineral assemblage in Pacific ocean surface sediment by electron microscopy and supervised magnetic unmixing [J]. Frontiers in Earth Science, 2020. doi: 10.3389/feart.2020.609058.
- [45] MAHER B A. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications [J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1998, 137(1): 25-54.
- [46] 刘健, 朱日祥, 李绍全, 等. 南黄海东南部冰后期泥质沉积物中磁性矿物的成岩变化及其对环境变化的响应[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2003, 33(6): 583-592.
- LIU J, ZHU R X, LI S Q, et al. Magnetic mineral diagenesis in the post-glacial muddy sediments from the southeastern South Yellow Sea: response to marine environmental changes [J]. Science in China (D), 33(6): 583-592.
- [47] 葛淑兰, 石学法, 吴永华, 等. 冲绳海槽北部 CSH1 孔岩石磁学特征及其早期成岩作用的影响[J]. 海洋学报, 2005, 27(6): 56-64.
- GE S L, SHI X F, WU Y H, et al. The rock magnetic behavior of gravity core CSH1 from the northern Okinawa Trough and the effect of early diagenesis [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(6): 56-64.
- [48] 艾莉, 强小科, 宋友桂, 等. 青海湖晚更新世沉积物中胶黄铁矿的发现及其环境指示意义[J]. 地球物理学报, 2011, 54(9): 2309-2316.
- AI L, QIANG X K, SONG Y G, et al. Identification of greigite in the late Pleistocene sediments of Lake Qinghai and its environmental implications [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(9): 2309-2316.
- [49] 郑妍, 郑洪波, 邓成龙, 等. 还原成岩作用对磁性矿物的影响及古气候意义: 以长江口水下三角洲岩芯 YD0901 沉积物为例[J]. 第四纪研究, 2012, 32(4): 655-662.
- ZHENG Y, ZHENG H B, DENG C L, et al. Diagenetic alteration on magnetic minerals and the paleoclimate implications, results from core YD9001 of Yangtze subaqueous delta [J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(4): 655-662.
- [50] 胡忠行, 张卫国, 董辰寅, 等. 东海内陆架沉积物磁性特征对早期成岩作用的响应[J]. 第四纪研究, 2012, 32(4): 670-678.
- HU Z X, ZHANG W G, DONG C Y, et al. Influence of early diagenesis on magnetic properties of inner shelf deposits of the East China Sea [J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(4): 670-678.