

## 湖泊沉积物磁学特征指示的埃及 Faiyum 盆地全新世以来的环境演变\*

江俊<sup>1</sup>, Alaa Salem<sup>2</sup>, 赖晓鹤<sup>1</sup>, 张卫国<sup>1</sup>, Leszek Marks<sup>3</sup>, Fabian Welc<sup>4</sup>, 徐立辰<sup>1</sup>, 陈静<sup>1</sup>, 陈中原<sup>1</sup>, 孙千里<sup>1\*\*</sup>

(1: 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

(2: Department of Geology, Faculty of Science, Kafrelsheikh University, Egypt)

(3: Faculty of Geology, University of Warsaw, Poland)

(4: Institute of Archaeology, Wyzynski University in Warsaw, Poland)

**摘要:** 利用埃及北部 Faiyum 盆地获得的高取芯率沉积物岩芯, 进行沉积物多种磁性参数的测量, 结合有机碳、介形虫、粒度等分析, 在 AMS<sup>14</sup>C 加速器测年的基础上, 建立全新世以来湖泊沉积物磁性特征变化的时间序列。结果表明, 粒度效应以及沉积后的各种次生作用对沉积物的磁性特征没有明显的影响, 磁性变化主要反映了沉积物不同来源组成的相对变化。全新世前沉积物磁性较弱, 主要含不完全反铁磁性矿物, 与周边沙漠的物质相似, 结合其粒度特征, 沉积物来源应以近源物质为主。全新世早中期(约 10—5.4 ka BP)沉积物磁性变化相对稳定, 有机质含量也较高, 指示了来自尼罗河较为稳定的物质供应; 而大约 5.4 ka BP 尤其最近约 4.2 ka BP 以来, 磁性的明显变化反映了流域降水减少情况下, 来自青尼罗河物质贡献的相对增加; 最近约 2.0 ka BP 以来沉积物的磁性变化, 则更多地与盆地人类活动的强化有关。总体而言, Faiyum 盆地全新世以来的环境演变主要受控于全新世以来尼罗河与盆地的水力学联系。即: 全新世前盆地未与尼罗河连通时, 沉积物主要来源于周边沙漠的风成物质; 而受全新世早-中期来流域季风降水增加的影响, 泛滥的尼罗河为盆地提供了相对稳定的物质供应, 湖泊也处于高湖面; 全新世晚期以来, 随着流域干旱化的加剧, 尼罗河与盆地的连通性开始减弱, 来自高磁性的青尼罗河物质贡献开始相对增加。最近约 2.0 ka BP 以来, 虽然仍有人工运河连接尼罗河与盆地, 但沉积物磁性的显著变化更多地反映了盆地人类活动的不断强化。

**关键词:** Faiyum 盆地; 环境磁学; 全新世; 湖泊沉积; 尼罗河

## Sediment magnetism of Faiyum basin (Egypt) and its implications for the Holocene environment change

JIANG Jun<sup>1</sup>, ALAA Salem<sup>2</sup>, LAI Xiaohe<sup>1</sup>, ZHANG Weiguo<sup>1</sup>, LESZEK Marks<sup>3</sup>, FABIAN Welc<sup>4</sup>, XU Lichen<sup>1</sup>, CHEN Jing<sup>1</sup>, CHEN Zhongyuan<sup>1</sup> & SUN Qianli<sup>1\*\*</sup>

(1: State Key Laboratory of Estuary and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, P.R.China)

(2: Department of Geology, Faculty of Science, Kafrelsheikh University, Egypt)

(3: Faculty of Geology, University of Warsaw, Poland)

(4: Institute of Archaeology, Wyzynski University in Warsaw, Poland)

**Abstract:** Sediment magnetism, integrated with organic carbon, grain-size and ostracods analyses were conducted on a sediment core (FA-1) retrieved from Faiyum basin, north Egypt. The time sequences of sediment magnetism were established on the AMS<sup>14</sup>C-dated chronology. The result showed that grain-size and secondary alternation had minor effects on the characteristics of the sediment magnetism, and changes in sediment magnetism basically reflected the relative proportion of different sources contributing to the basin. Prior to the Holocene, weak sediment magnetism featured by incomplete antiferro magnetic minerals, together with the

\* 国家自然科学基金项目(41272194)和波兰科学基金项目(DEC-2012/05/B/ST10/00558)联合资助。2015-11-17 收稿; 2016-03-01 收修改稿。江俊(1988~), 男, 硕士研究生; E-mail: junj007@foxmail.com.

\*\* 通信作者; E-mail: qlsun@sklec.ecnu.edu.cn.

grain-size distribution similar to the surrounding desert deposits, indicating an aeolian origin. The sediment magnetism kept relatively stable with high organic content during the early-to-middle Holocene at *ca.* 10–5.4 ka BP, suggesting the stable material inputs to the basin from the Nile. The last *ca.* 5.4 ka BP especially since the last *ca.* 4.2 ka BP, evident variations in sediment magnetism indicated the increasing contribution of material from the Blue Nile when rainfall declined in the Nile catchment. Of note, the change of sediment magnetism since the last *ca.* 2.0 ka BP largely exhibited the intensified human involves. Briefly, the environment settings of Faiyum basin since the Holocene were controlled by the hydrological linkage between the basin and the Nile. The sediment was primarily of Aeolian origin when no hydrological connection occurred between the basin and the Nile prior to the Holocene. During the early-to-middle Holocene (*ca.* 10–5.4 ka BP), the sediment source in the lake basin was mainly of fluvial origin when the Nile drained into the basin, largely driven by intensified monsoon activities in the Africa. With weakening hydrological linkage with the Nile in the late Holocene from declining monsoon rainfall, the basin was fed by relatively more magnetic materials from the Blue Nile. The rapid increase in sediment magnetism in the last *ca.* 2.0 ka BP had recorded the accelerated basin soil erosion by increasing human activities such as reclamation and farming rather than natural forcing.

**Keywords:** Faiyum basin; sediment magnetism; the Holocene; lacustrine sediment; the Nile

湖泊沉积物作为流域物质循环与运移的最终归宿之一, 往往保留丰富且相对连续的历史环境变化信息, 是进行古气候和环境演变研究的理想材料<sup>[1-4]</sup>. 利用湖泊沉积物磁性特征进行古环境演变的研究是环境磁学的重要应用领域之一<sup>[5]</sup>. 沉积物的磁性特征虽然直接反映的是磁性矿物含量、类型和颗粒大小等信息, 但这些变化往往是沉积物物源、搬运和沉积动力变化以及沉积后次生变化等综合作用的结果, 进而间接地反映了气候、环境变化和人类活动等<sup>[6]</sup>. 如可以利用沉积物的磁性变化特征来追溯其物源组成的相对变化<sup>[5]</sup>, 人类用火垦荒、湖盆土壤侵蚀等信息往往也可在沉积物的磁性特征变化上加以反映<sup>[5-6]</sup>.

处于干旱~半干旱地区的湖泊大都具有相对封闭的沉积环境, 其沉积物常能够被用来进行不同时间尺度的气候和环境演化研究<sup>[7-10]</sup>. 但在非洲北部沙漠地区, 现存湖泊较少, 且长期的干旱易造成沉积的不连续, 在一定程度上限制高分辨率的气候与环境演化的研究. 位于埃及尼罗河下游 Faiyum 断陷盆地的加隆湖 (Lake Qarun) 是非洲北部少有的现存湖泊, 四周被撒哈拉沙漠所包围, 目前只在东南方向通过人工水道与尼罗河相连. 其独特的地理位置和相对封闭的沉积环境为研究非洲北部地区的全新世气候、环境变化以及该地区与尼罗河的历史水文学联系提供了难得的契机.

目前有关 Faiyum 盆地气候、环境演变的已有研究包括: 利用钻孔沉积物的孢粉信息, 研究了近 400 年来盆地的水文变化及其与尼罗河洪水事件的关系<sup>[11-12]</sup>; 利用湖盆不同位置沉积物的硅藻特征以及软体动物的碳氧同位素差异, 恢复了千年尺度 Faiyum 盆地全新世以来湖面变化的宏观框架及其与尼罗河的水力学联系<sup>[13]</sup>; 通过沉积物有孔虫壳体碳氧同位素, 恢复了盆地中心加隆湖 (Qarun) 近 500 年来盐度的多次变化<sup>[14]</sup>; 基于沉积物磁学特征的研究, 探讨约 2000 年以来盆地物质来源的相对变化<sup>[15]</sup>. 可以看出, 已有的研究主要集中在最近约 2000 以来的晚全新世时段<sup>[15-16]</sup>或仅限于全新世环境的框架性讨论, 涵盖整个全新世以来高分辨率、多指标的气候、环境研究仍有待深入.

因此, 本文试图通过对 Faiyum 盆地获得的沉积物岩芯 (FA-1, 长 21.25 m) 进行粒度、有机碳、介形虫以及环境磁学等分析, 在 AMS<sup>14</sup>C 测年基础上, 首先揭示沉积物磁学特征反映的流域物源变化信息, 结合其它代用指标所反映的气候、环境变化信息, 讨论 Faiyum 盆地全新世气候、环境演化历史及其与尼罗河之间的可能水动力联系.

## 1 研究区自然地理状况

Faiyum 盆地位于开罗西南部约 80 km, 是撒哈拉沙漠北部的一个大型沙漠绿洲 (29°05'~29°35'N, 30°23'~31°05'E), 面积约为 12000 km<sup>2</sup> (图 1). 盆地北部以连续的单面悬崖为边缘, 海拔高度高于 250 m, 沿东西方向延伸<sup>[17]</sup>, 盆地海拔高度从东南部边缘的大约 40 m 降至西北部加隆湖 (Qarun) 的低于海平面 45 m. 盆地内出露地层主要为始新世的石灰岩、渐新世的火山碎屑岩, 顶部为中新世地层所覆盖, 盆地东部边缘与尼罗河谷地被宽度约 10~25 km 始新世石灰岩台地所分隔<sup>[17-19]</sup>. 大约 180 万年前, 风沙活动形成盆地的雏形, 至晚更新世中期, 尼罗河水被认为第一次冲过了盆地周围的矮山, 形成盆地中心的湖泊以及周围的沼泽

地<sup>[17,20]</sup>. 全新世盆地湖泊曾占据大部分盆地, 最高水位据认为曾超过海拔 40 m, 并经历过多次大幅波动<sup>[11,21-24]</sup>. 目前, 加隆湖仅存在于盆地的西北部, 湖面高程位于海平面下约 45 m, 平均水深约 4m, 最大深度在西部可达 8.8 m, 湖面面积约 200 km<sup>2</sup>, 盐度约 37.6 g/L<sup>[23-25]</sup>.

研究区属热带沙漠气候, 常年受北半球信风的影响, 降水稀少, 仅在冬季受东北信风的影响而有少量降水, 年平均降水量仅为 10 mm 左右<sup>[24,26]</sup>. 目前, 加隆湖全年得到的补给水量约为 3.38×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 而蒸发损失的水量约为 4.15×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 加上工业用水为 1.9×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup><sup>[27]</sup>, 总体湖泊水量入不敷出. 历史上, 尼罗河洪水季节的泛滥为 Faiyum 盆地提供了大量的来水以及肥沃的土壤, 使该区成为埃及重要的农业区. 目前, 盆地居民的日常和农业用水, 也主要依靠与尼罗河之间的一条人工水道获得<sup>[23-24,26]</sup>.

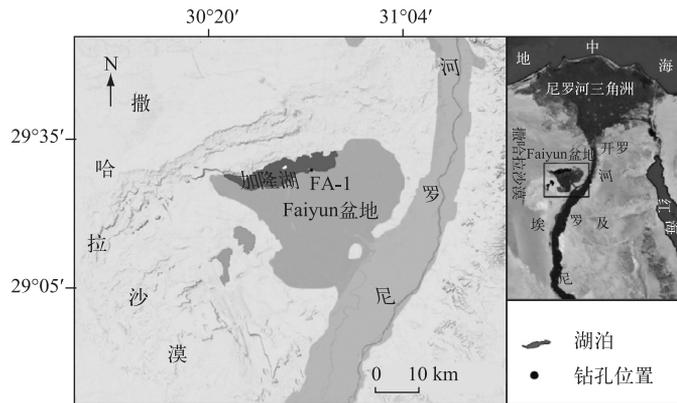


图 1 研究区域及 FA-1 钻孔位置

Fig.1 Study area-Nile River delta and Faiyum basin where sediment core FA-1 is located

## 2 材料与方法

本研究所选用的沉积物钻孔 (FA-1)<sup>[28]</sup>, 位于 Faiyum 盆地加隆湖南侧岸边, 地表海拔约为 -45 m (图 1). 岩芯钻取深度为 21.25 m, 每回次进尺为 1 m, 每回次接头的样品均得到保留, 故岩芯的整体取芯率大于 97%, 可满足高分辨率研究的要求. 岩芯表层部分由于现代人类扰动的原因未取样, 用于研究的取样深度为 1.9~21.25 m. 岩芯在实验室按 10 cm 间隔分样, 共采集 187 个样品用于粒度、有机质以及磁学参数的测试, 另采集了 4 个样品用于年代学分析. 沉积物有机碳含量、粒度和磁学参数测试在华东师范大学河口海岸学国家重点实验室完成. 沉积物有机碳含量测定采用油浴加热-重铬酸钾容量法<sup>[29]</sup>; 粒度的测量在 Coulter LS13320 型激光粒度仪上完成, 实验步骤如下: (1) 低温烘干样品 (<40℃); (2) 取约 0.5 g 左右样品于 100 ml 的烧杯中, 先加入 10 ml 10% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 加热 20 min, 待其反应数分钟后, 再加入 10 ml 浓度为 10% 的 HCl, 加热 15 min, 分别去除有机质和钙质结核. 然后将烧杯注满蒸馏水, 静置一夜后, 抽去上覆清液, 反复此酸洗步骤, 直至溶液变为中性; (3) 加入 10 ml 0.5 mol/L 的六偏磷酸钠 (NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> 分散剂, 搅拌均匀, 用超声波仪分散约 20 min, 然后再到 LS13320 激光粒度仪上测试样品; 介形虫的分析在波兰华沙大学进行<sup>[30]</sup>, 样品首先过 63 mm 的筛子, 保留大于 63 mm 的组分, 然后筛选出大于 150 μm 的组分, 经去离子水浸泡后, 在镜下挑选, 进行种属的鉴定. 年代学测试在波兰华沙大学加速器 (AMS<sup>14</sup>C) 实验室完成, 测年材料均为炭屑<sup>[30]</sup>, <sup>14</sup>C 年代的校正采用 Calib.601 程序以及 IntCal13 的数据库 (<http://intcal.qub.ac.uk/intcal13/>)<sup>[31]</sup>.

磁学实验前处理: 把一定量样品置于 40℃ 下低温烘干, 然后在玛瑙研钵内轻压使其分散, 并搅拌均匀. 因本批样品量比较少, 取 4 g 左右的样品称重, 置于 10 ml 容量的圆柱状聚乙烯样品盒内压实、固定. 具体磁学参数测试如下: 利用 Bartington MS2 双频磁化率仪测量低频 (0.47 kHz) 和高频 (4.7 kHz) 磁化率 ( $\chi_{LF}$ ,  $\chi_{HF}$ ), 并计算频率磁化率百分比  $\chi_{fd}\% = (\chi_{LF} - \chi_{HF}) / \chi_{LF} \times 100$ ; 利用 Molspin 交变退磁仪 (交变磁场峰值 100 mT, 直流磁场 0.1 mT) 获得非磁滞剩磁 ( $ARM$ ), 以 Minispin 旋转磁力仪测定, 并计算非磁滞剩磁磁化率 ( $\chi_{ARM}$ ); 利用

Molspin 脉冲磁化仪获得样品在 1 T、-100 mT 和 -300 mT 磁场下的等温剩磁 (*IRM*), 并利用旋转磁力仪测定. 本文中将 1 T 磁场获得的 *IRM* 称为饱和等温剩磁 (*SIRM*), 并计算了硬剩磁  $HIRM = (SIRM + IRM_{-300mT}) / 2$ <sup>[32]</sup>, 退磁参数  $S_{-100mT} = 100 \times (SIRM - IRM_{-100mT}) / (2 \times SIRM)$  和  $S_{-300mT} = 100 \times (SIRM - IRM_{-300mT}) / (2 \times SIRM)$ <sup>[33]</sup>, 以及比值参数  $SIRM/\chi_{ARM}/\chi$  和  $\chi_{ARM}/SIRM$ . 根据上述测试结果, 选择代表性样品, 利用 MFK1-FA 磁化率仪在氩气环境下完成热磁曲线的测量.

### 3 结果

#### 3.1 年代学框架及沉积速率

4 个加速器质谱 ( $AMS^{14}C$ ) 测年数据显示, FA-1 钻孔大约涵盖了 10 ka BP 以来的沉积 (表 1). 沉积物的深度-年龄曲线显示整个岩芯沉积速率的变化基本稳定 (图 2). 表层 3.95~0 m 间的沉积速率约为 0.283 cm/a, 17.63~3.95 m 深度间沉积速率大约为 0.2 cm/a, 17.63 m 以下深度按照 0.2 cm/a 的沉积速率推算, 据此建立了沉积物岩芯的年代学框架, 岩芯底部黄色中-细砂沉积物年龄应早于全新世 (图 2).

表 1 FA-1 沉积物岩芯加速器质谱 ( $AMS^{14}C$ ) 测年结果<sup>[30]</sup>

Tab.1 Results of  $AMS^{14}C$  dating in FA-1 sediment core

实验室编号	深度/m	测年材料	$^{14}C$ 年龄/a BP	校正年龄 $2\sigma$ /cal a BP
Poz-63658	3.95	炭屑	1360±30	1257—1336
Poz-63661	13.05	炭屑	5160±30	5890—5990
Poz-63854	16.10	炭屑	6660±35	7472—7588
Poz-63591	17.63	炭屑	7480±40	8198—8378

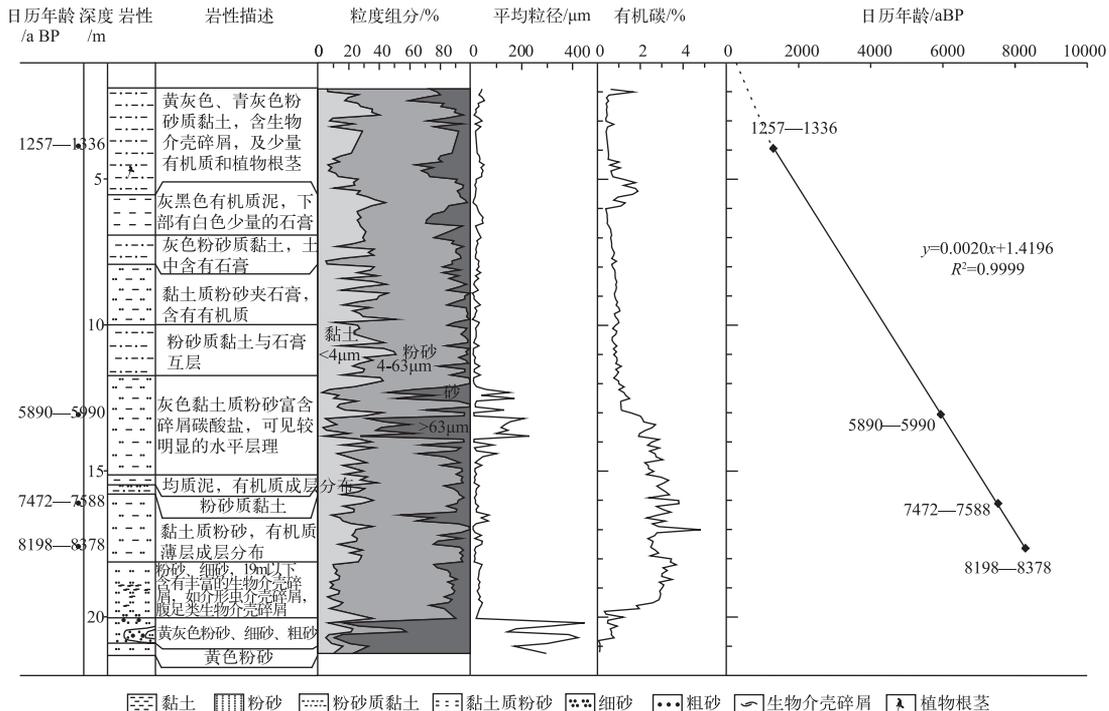


图 2 FA-1 沉积物岩芯综合信息

Fig.2 General information of sediments in core FA-1

### 3.2 沉积物粒度组成

FA-1 沉积物岩芯的粒度分析显示:沉积物整体上以黏土质粉砂为主(图 2),岩芯上段(0~20 m)粉砂(4~63  $\mu\text{m}$ )平均含量约为 58%左右,黏土(<4  $\mu\text{m}$ )平均含量约占 36%左右,砂(>63  $\mu\text{m}$ )含量一般小于 6%。其中,20.0~13.9 m 段以粉砂、黏土为主,含量变化不大;13.9~12.1 m 段以细~粉砂为优势;12.1 m 以上以粉砂为主,但粗颗粒含量呈明显增加趋势。岩芯约 20 m 以下段以中~细砂为主,砂的含量可达 40%以上,最大约为 89%。

沉积物样品粒度的频率分布曲线显示(图 3):岩芯底部及中部典型样品的频率曲线主要为单峰态(图 3c,h,i),峰值对应的粒径均在 300  $\mu\text{m}$  以上,且分选较好。岩芯中部约 20 m 以上大部分样品(图 3a,b,d,e)的频率曲线也近似为单峰态,分选较好,但峰值所对应的粒径在 10  $\mu\text{m}$  左右;在岩芯下部约 20.4~20.3 m 段,样品的频率曲线显示为明显的多峰态(图 3f,g),分选较差,最大峰值在 1000  $\mu\text{m}$  左右。

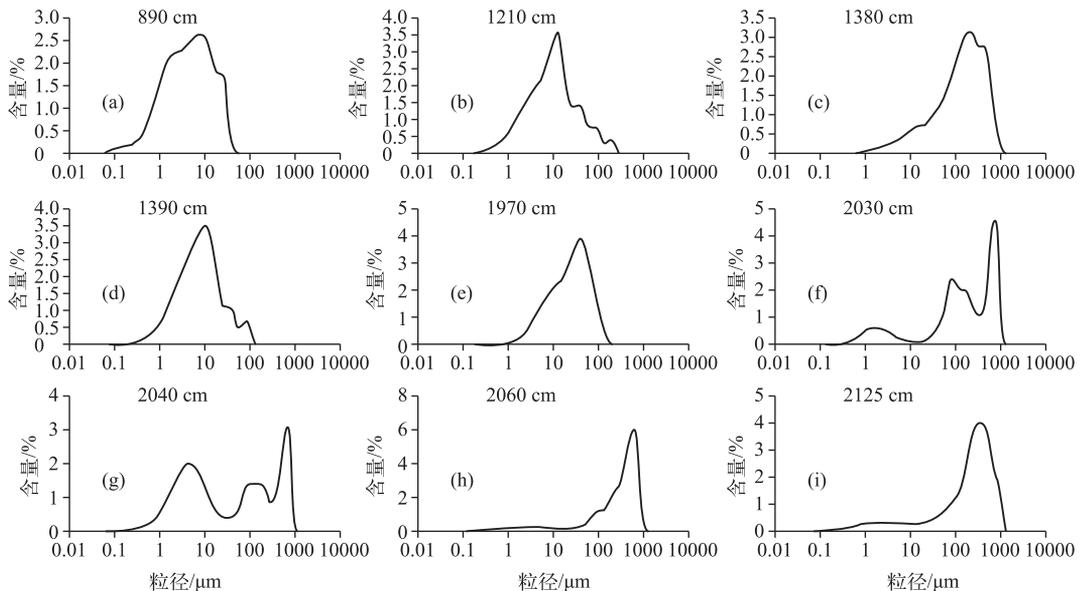


图 3 FA-1 沉积物岩芯典型样品粒度频率分布曲线

Fig.3 Typical grain size frequency distribution curves of sediments in core FA-1

### 3.3 有机碳含量变化

FA-1 沉积物岩芯有机碳含量变化总体上从下向上逐渐减少(图 2),可划分为 5 个明显的变化阶段。在大约 10—9.4 ka BP 期间(岩芯 21.25~20.00 m 段),有机碳含量一般低于 1%;而大约 9.4—5.5 ka BP 期间(岩芯 20.00~13.00 m 段),有机碳含量为岩芯最高阶段,平均含量大于 3%;最近 5.5 ka BP 以来(岩芯 13.00 m 以上),有机碳含量基本小于 2%,且呈逐渐减少趋势,但在约 2.2—1.8 ka BP 期间(岩芯 6.0~4.8 m 段)曾出现明显的增加。

### 3.4 沉积物的磁性特征

沉积物岩芯的磁性参数整体来看(图 4):自下而上  $\chi$ 、 $SIRM$  和  $HIRM$  的变化趋势基本一致,向上均逐渐增大;而  $\chi_{ARM}/SIRM$  呈现增大—减小—增大—减小的变化趋势,最大为  $1.7 \times 10^{-3} \text{ mA}^{-1}$ ,均值为  $0.59 \times 10^{-3} \text{ mA}^{-1}$ ;  $\chi_{ARM}$ 、 $\chi_{ARM}/\chi$  整体上呈现先增加,但在顶部突然减少的趋势; $\chi_{fd}$  在整个岩芯的值都很小,大部分值介于 0~3% 之间,只有底部曾短暂接近于 10%; $S_{-300\text{mT}}$  和  $S_{-100\text{mT}}$  值均较高,均值分别为 89% 和 97%,表现为先快速增加后基本保持稳定的特征。 $SIRM/\chi$  整体上呈增加趋势,但都小于  $20.0 \times 10^3 \text{ Am}^{-1}$ ,只在岩芯下部有明显波动,均值为  $10.7 \times 10^3 \text{ Am}^{-1}$ 。岩芯各段磁学特征的具体变化如下:

大约 ~10.0~8.3 ka BP(岩芯 21.25~18.1 m),沉积物  $\chi$ 、 $SIRM$ 、 $\chi_{ARM}$ 、 $HIRM$  处于整个岩芯的低值,且变化

幅度都不大。 $\chi_{fd}$  以及  $S_{-300mT}$  分别在约 10.0 ka BP 前分别出现岩芯的最高值(8.33%)和最低值(80%)。在约 10.0—8.3 ka BP,  $\chi_{ARM}/SIRM$ 、 $S_{-100mT}$  以及  $S_{-300mT}$  出现明显的增大,  $\chi_{ARM}/SIRM$  由 21 m 以下的不到  $40 \times 10^{-3} \text{ mA}^{-1}$ , 增大到接近  $70 \times 10^{-3} \text{ mA}^{-1}$ ,  $S_{-100mT}$  和  $S_{-300mT}$  则由 21 m 以下的最大值不到 80% 增大到均值分别为 83% 和 96%。大约 8.3—5.9 ka BP (岩芯 18.1~13.0 m), 沉积物  $\chi$ 、 $SIRM$ 、 $\chi_{ARM}$ 、 $HIRM$ 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 、 $\chi_{ARM}/\chi$ 、 $S_{-100mT}$  以及  $S_{-300mT}$  等值较上段明显增加, 但整体变化稳定。大约 5.9—4.2 ka BP 期间(岩芯 13.0~9.8 m), 沉积物  $\chi$ 、 $SIRM$ 、 $\chi_{ARM}$ 、 $HIRM$ 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 、 $\chi_{ARM}/\chi$ 、 $S_{-100mT}$  以及  $S_{-300mT}$  等值较上段均逐渐增加。大约 4.2—2.1 ka BP (岩芯 9.8~5.5 m), 沉积物  $\chi$ 、 $SIRM$  以及  $HIRM$  出现岩芯的高值阶段, 同时  $\chi_{ARM}$ 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 、 $\chi_{ARM}/\chi$  出现整个岩芯的最高值阶段, 而  $S_{-100mT}$  以及  $S_{-300mT}$  值基本保持不变。在约 2.1~1.8 ka BP 期间(岩芯 5.5~5.0 m), 沉积物  $\chi$ 、 $SIRM$ 、 $\chi_{ARM}$ 、 $HIRM$ 、 $\chi_{ARM}/SIRM$  以及  $\chi_{ARM}/\chi$  均出现快速下降。最近约 1.8 ka BP 以来(岩芯 5.0 m~), 沉积物  $\chi$ 、 $SIRM$ 、 $\chi_{ARM}$  以及  $HIRM$  值快速上升, 并最终达到了岩芯的最高值, 而  $\chi_{ARM}/SIRM$ 、 $\chi_{ARM}/\chi$ 、 $S_{-100mT}$  以及  $S_{-300mT}$  则保持相对稳定。

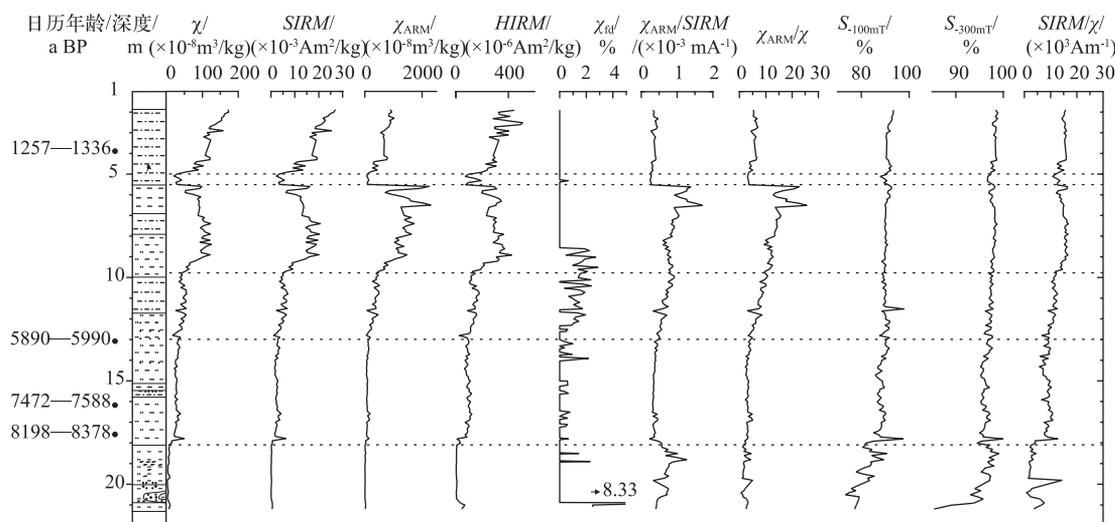


图 4 FA-1 沉积物岩芯的磁学参数曲线

Fig.4 Magnetic parameters of sediments in core FA-1

6 个典型样品的热磁曲线(图 5)显示:所有样品的加热曲线都在 580℃ 左右发生转折, 显示典型的磁铁矿特征<sup>[5]</sup>。其中 510 cm 处样品加热自 300℃ 左右开始磁性增强, 在 450~500℃ 达到峰值, 后急剧下降, 这一变化反映了样品在加热过程中存在弱磁性矿物向强磁性矿物转变, 造成这种结果的可能因素包括黏土矿物的分解、黄铁矿和菱铁矿的转变以及氧化铁的还原等<sup>[33-34]</sup>。而冷却后磁化强度是加热前的 2.5 倍左右, 指示了样品在加热过程中生成了新的强磁性矿物<sup>[35-37]</sup>。1780 cm 处样品在加热的前期  $\chi$  增加非常缓慢, 300℃ 左右  $\chi$  急剧增大, 并在 500℃ 左右达到峰值, 反映生成新的磁铁矿。而加热过程中新生成的磁铁矿, 很可能是在来自含铁硅酸盐或者黏土矿物, 因为并没有胶黄铁矿的信号在温度低于 320℃ 的加热曲线中出现<sup>[34, 38-40]</sup>。

## 4 讨论

### 4.1 沉积物磁性特征及其影响因素

沉积物磁学参数中的  $\chi$  和  $SIRM$  通常用来反映样品中亚铁磁性矿物含量, 与  $\chi$  不同的是,  $SIRM$  不受顺磁性和抗磁性矿物的影响<sup>[5]</sup>。 $\chi_{ARM}$  对单畴(SD)磁性颗粒变化极为敏感, 其通常随 SD 颗粒的增加而增大<sup>[33, 41]</sup>; 而  $HIRM$  通常随样品中不完全反铁磁性矿物(如赤铁矿、针铁矿)的相对含量增加而增大<sup>[5]</sup>。 $\chi_{fd}$  反映了超顺磁(SP)与单畴(SD)颗粒界限附近的粘滞颗粒对磁化率的贡献<sup>[5, 42]</sup>。 $\chi_{ARM}/SIRM$  和  $\chi_{ARM}/\chi$  常用作磁性矿物颗粒大小的指示<sup>[33, 43]</sup>, 对于粗于 SP 的颗粒而言, 随着颗粒变粗, 两个参数呈现下降趋势<sup>[44]</sup>。 $S_{-300mT}$  和

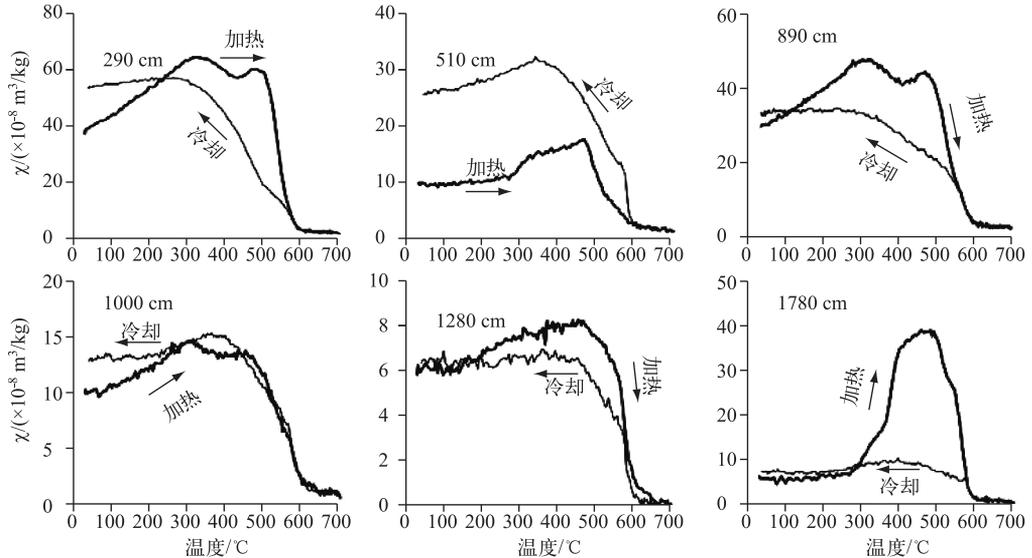


图 5 FA-1 沉积物岩芯典型样品热磁曲线

Fig.5 Typical thermomagnetic curves of sediments in core FA-1

$S_{-100mT}$  通常反映不完全反铁磁性矿物(如赤铁矿、针铁矿)和亚铁磁性矿物(如磁铁矿)的相对比例,其比值随着不完全反铁磁性矿物的比例增加而下降<sup>[5]</sup>。总体而言,FA-1 岩芯沉积物  $\chi$  与  $SIRM$  呈高度相关性,且  $S_{-300mT}$  和  $S_{-100mT}$  值都很高,均值分别为 89% 和 97%,说明  $\chi$  主要由亚铁磁性矿物所贡献。

通常沉积物的磁性参数主要受粒度、沉积物物源以及沉积后的次生作用等因素的影响<sup>[5,32]</sup>,与区域气候、环境变化以及人类活动特征密切相关<sup>[5]</sup>。

对比 FA-1 岩芯沉积物的粒度特征与磁性变化特征(图 6),可以发现二者没有明显的相关性。岩芯下部(21.25~20.00 m)及中部局部(13.90~12.10 m)较粗的沉积物对应相对较弱的磁性特征;中部大部分岩芯(约 20.00~9.80 m)沉积物粒径相对较细,磁性也较弱;而岩芯上部(9.80 m 以上)较细的沉积物粒径却对应岩芯的最高磁性阶段。这些变化表明,粒度不是引起 FA-1 岩芯沉积物磁性参数变化的主要原因,这也与前人对湖心钻孔沉积物磁性特征的分析结果相一致<sup>[15]</sup>。

影响沉积物磁性的次生作用包括磁性矿物的溶解成岩作用、磁细菌作用和自生铁硫化物等。早期成岩作用对沉积物磁性特征的影响已在湖泊、海洋沉积物的研究中得到广泛证实<sup>[45-48]</sup>。其通常表现为还原环境下磁铁矿的选择性溶解,即细晶粒磁性颗粒优先溶解,从而导致沉积物中磁性矿物类型、含量和颗粒大小发生变化的过程<sup>[45]</sup>。一般用所有磁性参数的向下的快速下降,特别是  $\chi_{ARM}/SIRM$  和  $\chi_{ARM}/\chi$  的同时快速下降作为存在磁性矿物溶解的证据<sup>[15]</sup>。FA-1 岩芯沉积物中,岩芯从上往下未见  $\chi_{ARM}/SIRM$  和  $\chi_{ARM}/\chi$  明显的同时快速下降;同时,热磁曲线也未见明显的黄铁矿、菱铁矿和胶黄铁矿等信号<sup>[45,49]</sup>(图 6),且  $SIRM/\chi$  值均值为  $10.7 \times 10^3 \text{ Am}^{-1}$ ,最大值也不超过  $20 \times 10^3 \text{ Am}^{-1}$ ,也说明胶黄铁矿、黄铁矿信号不明显<sup>[15,48]</sup>。这些总体上表明早期成岩作用在整个全新世时段不明显。

磁细菌作用也是影响沉积物磁性特征的一个重要因素,其  $\chi_{ARM}/SIRM$  比值一般都超过  $2 \times 10^{-3} \text{ mA}^{-1}$ <sup>[48]</sup>,而 FA-1 岩芯沉积物  $\chi_{ARM}/SIRM$  最大值为  $1.7 \times 10^{-3} \text{ mA}^{-1}$ ,均值为  $0.59 \times 10^{-3} \text{ mA}^{-1}$ ,这表明磁细菌作用不足以明显影响沉积物的磁学特征。但是单独的  $\chi_{ARM}/SIRM$  比值并不能完全排除来自次生和土壤携带的亚铁磁性矿物的贡献。一般而言,当存在明显次生和土壤携带的亚铁磁性矿物时,其  $\chi_{fd}$  值范围为 4%~16%<sup>[48]</sup>,而 FA-1 岩芯沉积物这一参数在全新世时段基本小于 2%,仅在岩芯 21.0 m 下短暂出现大于 4% 的情况。总体上看,全新世次生和土壤携带的亚铁磁性矿物对沉积物磁性变化的贡献也可以忽略,前人对 Faiyum 盆地短岩芯的结果也证实次生作用对沉积物磁性变化的影响不大<sup>[15]</sup>。

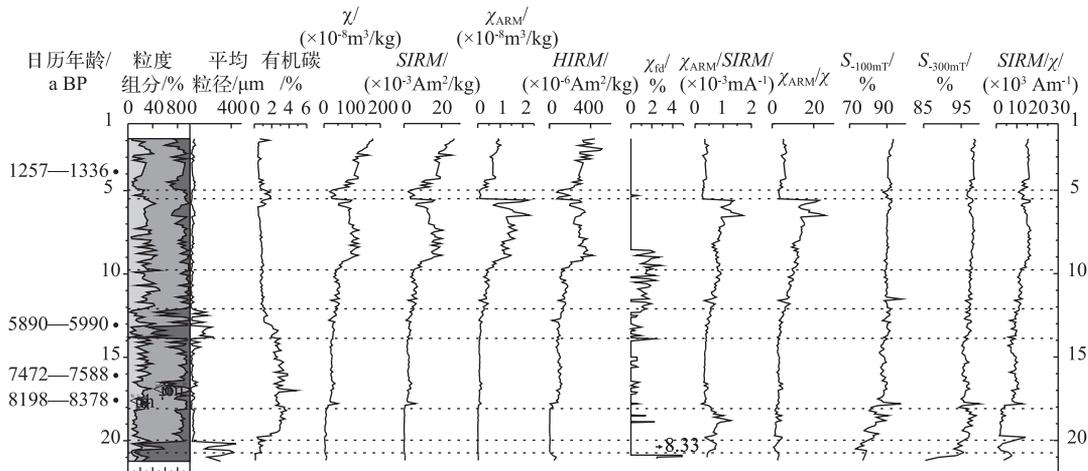


图 6 FA-1 沉积物岩芯的磁学参数、有机碳含量和粒度变化

Fig.6 Magnetic parameters, TOC and particle size of sediments in core FA-1

排除了沉积物粒度、早期成岩作用以及次生和土壤携带的亚铁磁性矿物对沉积物磁性参数的明显影响,那么沉积物物源的变化就成为可能影响 FA-1 岩芯沉积物磁性特征的主要因素. Faiyum 盆地的地貌特点决定了其沉积物只可能主要来源于周边撒哈拉沙漠和尼罗河的物质输入<sup>[23-26]</sup>(图 1),而粉尘对沉积物的贡献被认为小于 1%,可以忽略<sup>[15]</sup>. 从沉积物的磁学参数上看,岩芯下部磁性较低,但在约 10 ka BP 前(岩芯 21 m 以下)出现  $\chi_{fd}$  % 的高值(8.33%)以及  $S_{-300mT}$  和  $S_{-100mT}$  的低值阶段,显示不完全反铁磁性矿物和超顺磁晶粒的比例相对较高,与其上段岩芯的磁学特征有明显不同. 考虑到现今撒哈拉沙漠沉积物主要矿物成分为石英,铁磁性矿物含量很少、磁化率偏低且以近源风成粗颗粒为主的情况<sup>[16,50-54]</sup>,本段岩芯较粗的粒径、较好的分选(图 3i)以及较低的磁性可能指示了沉积物主要源于盆地周边沙漠物质的输入. 此后约 10.0—4.2 ka BP(岩芯 21.0~9.8 m)期间,沉积物的各种磁性参数经历了小幅上升的过程,但总体上仍保持稳定,指示了湖泊沉积物相对稳定的物质来源. 同时,磁性参数以及粒度分布特征上与此前阶段的明显不同,显示沉积物可能以来自尼罗河的物质占主导. 最近约 4.2—2.1 ka BP(岩芯约 9.8~5.0 m)期间,沉积物的磁性呈明显的增加趋势,而其粒度特征并未有明显的变化,仍以细颗粒物质为主. 其它磁学指标如  $\chi_{ARM}/SIRM$  和  $\chi_{ARM}/\chi$  也呈现显著的增加,这不同于上段岩芯缓慢增加的趋势. 这些表明沉积物的来源总体上并未有明显的变化,但 SD 磁性颗粒的贡献明显增加. 在没有明显周边物质贡献的情况下(主要是粗颗粒近源风成物质),沉积物磁性的变化很可能与来自尼罗河不同支流物质比例的相对改变有关. 尼罗河有 3 条主要的支流,分别是青尼罗河(Blue Nile)、白尼罗河(White Nile)和阿特巴拉河(Atbara River). 其中,青尼罗河和阿特巴拉河流经地区的基岩主要为新生代的玄武岩<sup>[55-56]</sup>,具有较高的磁性;而白尼罗河主要流经磁性相对较低的前寒武结晶岩地区<sup>[57]</sup>. 前人的研究表明,当尼罗河流量减少时,青尼罗河是尼罗河泥沙的主要来源<sup>[57]</sup>,那么沉积物磁性在约 4.2—2.1 ka BP 期间的显著增加,可能指示了尼罗河水量减少时,来自青尼罗河的物质对 Faiyum 盆地的贡献相对增加,而其本身可能携带了更多的 SD 颗粒. 最近约 2.1 ka BP(岩芯 5.5 m~)以来,沉积物磁性经历了快速下降后又迅速上升的过程,但总体仍较高, $\chi_{ARM}/SIRM$  和  $\chi_{ARM}/\chi$  处于整个岩芯最低值阶段,显示沉积物磁性颗粒明显变粗. 这与前段沉积物磁性增加而磁性颗粒相对较小的情况不同,暗示了其它因素可能影响了沉积物的磁性变化,如盆地的人类活动的影响.

#### 4.2 沉积物特征反映的全新世 Faiyum 盆地的演化及其与尼罗河的水力学联系

干旱—半干旱区湖泊的演化过程通常受控于湖泊的水量平衡状况,而后者与湖泊流域的降水状况以及与外部河流的连通状况密切相关. 已有的研究表明全新世 Faiyum 盆地湖泊水位曾经历了多次大幅的变化,并在历史上与尼罗河有过紧密的水力学联系<sup>[13]</sup>. 但就整个全新世而言,Faiyum 盆地的湖泊演化及其与尼罗河的水力学联系仍缺乏细节的展示.

Faiyum 盆地沉积物的磁学特征、岩性变化、有机碳变化以及生物变化信息很好地反映了沉积物物源的相对变化及其与尼罗河的水力学联系历史. 大约 10.0 ka BP 以前, 沉积物与周边沙漠风成物质相似的粒度特征、低的磁化率和有机碳特征, 结合此时干旱的低湖面特征<sup>[13,22]</sup>, 指示沉积物可能主要来自周边沙漠物质的贡献, 这也暗示盆地与尼罗河基本处于未连通状态. 沉积物各项指标明显的变化发生在大约 10.0 ka BP 后, 以淡水介形类壳体生物开始出现、有机碳含量的增加以及沉积物粒度、磁性特征的变化为标志, 表明盆地的沉积环境发生了明显变化, 湖泊趋向淡水环境, 且流域生产力有明显增加. 对于非洲撒哈拉沙漠北部干旱区的湖泊而言, 单靠湖泊流域的降水远无法补偿流域高温带来的蒸发损失, 所以除非有外来的水量输入湖泊应始终处于低湖面或盐类积累阶段. 那么, 此时湖泊趋向淡水的环境, 应指示了尼罗河与 Faiyum 盆地水力学联系的建立. 岩芯沉积物有机质变化指示的高生产力情况一直持续到大约 5.4 ka BP, 沉积物磁性变化也相对较小, 这些总体上反映了湖泊相对稳定的沉积环境, 表明尼罗河仍与盆地保持了稳定的水力学联系, 这也与前人研究得出的该时期湖泊处于相对高湖面阶段的结果相一致<sup>[13,22]</sup> (图 7f). 虽然在大约 6.3—5.4 ka BP 期间粒度特征的变化, 显示有近源物质的贡献曾一度有所增加, 与尼罗河的水力学联系有所减弱. 最近大约 5.4 ka BP 以来, 尤其是最近约 4.2 ka BP 沉积物总体表现为以细颗粒占主导, 但呈现磁性不断增强、有机碳含量逐渐减少的特征, 同时岩芯中表征蒸发强烈的石膏沉积开始出现, 这也意味着即使尼罗河仍有水量进入盆地, 但入盆地的水量总体上已经不足于补充蒸发造成的水量损失, 指示尼罗河与盆地的自然

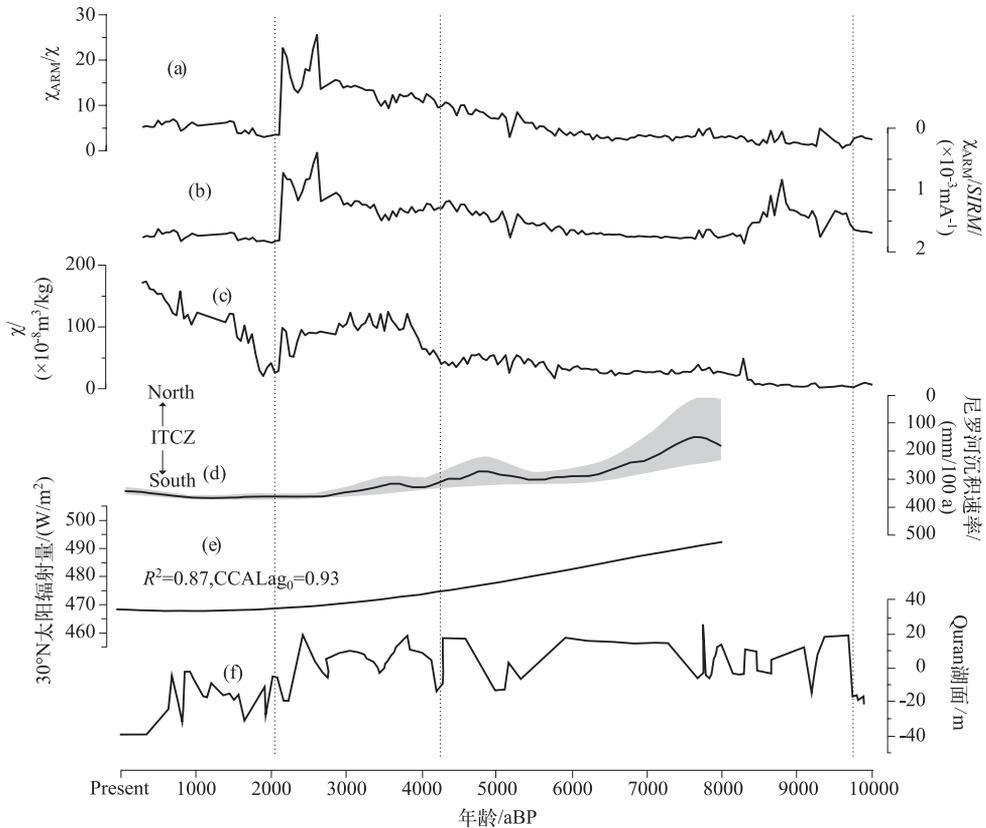


图 7  $\chi_{\text{ARM}}/\chi$  (a)  $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$  (b)  $\chi$  (c) 与尼罗河每百年沉积速率 (d)<sup>[59]</sup>、 $30^\circ\text{N}$  太阳辐射量 (e)<sup>[60]</sup>、Qarun 湖面 (f)<sup>[13,22]</sup> 的对比

Fig.7 Magnetic parameters  $\chi_{\text{ARM}}/\chi$  (a)  $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$  (b) and  $\chi$  (c) of sediments in core FA-1, and comparison with spatially averaged Nile delta sedimentation record, insolation curve at  $30^\circ\text{N}$ , reconstruction of lake level of Lake Qarun

水力学联系的开始呈现显著的减弱,湖泊的演化进入新的逐渐退缩阶段. 值得注意的是,大约 2.1 ka BP 前后,出现了有机碳含量增加而沉积物磁性显著减弱的情况,这可能暗示该段尼罗河与盆地短暂增强的水力学联系,而这或许与该时期人工运河的开通有关<sup>[58]</sup>. 最近 1.8 ka BP 以来,沉积物总体较上段偏粗,有机碳含量较低,磁性重新开始显著增强,但 $\chi_{\text{ARM}}/SIRM$   $\chi_{\text{ARM}}/\chi$  却保持稳定,这与以往与 $\chi$ 、 $SIRM$  同步变化的趋势有明显的不同,这暗示有其他因素影响到沉积物的磁性特征. 结合历史资料记录的最近 2.0 ka BP 以来盆地人类活动不断增强的事实<sup>[58]</sup>,沉积物磁性的增加或许反映了人类垦荒、农业生产所导致的土壤侵蚀的不断增强.

全新世以来尼罗河与 Faiyum 盆地的水力学联系深刻地反映了尼罗河在下游地区的泛滥历史,这与全新世以来非洲中北部的气候变化以及由此引发的流域降水变化密切相关. 全新世初期以来地球轨道参数变化使得北半球地表接受更多地的太阳辐射,推动热带辐合带北移,非洲夏季风向北推进,在全新世早中期给非洲中北部带来大量的降水. 而尼罗河与 Faiyum 盆地大约 10 ka BP 前后开始的水力学联系,恰巧与非洲夏季风北进,季风降水增加,非洲沙哈拉沙漠南部地区的出现高湖面的状况相吻合<sup>[13,22,59]</sup>. 这表明,全新世初期尼罗河流域显著的降水增加是引发尼罗河水进入 Faiyum 盆地的主要原因,并引发了盆地湖泊的扩张. 而尼罗河与 Faiyum 盆地相对稳定的水力学联系延续至全新世中期,也与持续至全新世中期强劲的非洲夏季风有关. 流域强劲的季风降水,不仅使撒哈拉北部地区出现大面积绿洲,内陆湖泊出现高湖面,也加大了尼罗河在下游低洼地区泛滥的几率,使得更多的水和沉积物进入盆地,造成了盆地全新世中期的高湖面<sup>[13,22]</sup>. 随着全新世中后期热带辐合带向南迁移,非洲夏季风从北至南在撒哈拉地区逐渐衰退,造成了整个尼罗河流域降水的逐渐减少,沙漠地区绿洲的萎缩以及湖泊水位的下降. 对 Faiyum 盆地而言,流域来水的减少,降低了下游尼罗河泛滥的几率,进入盆地的水量和沉积物相应会减少,这也是岩芯记录揭示的尼罗河与盆地水力学联系开始减弱发生在大约 6.3—5.4 ka BP 期间的主要原因. 最近约 5.4 ka BP 以来,随着流域非洲夏季风降水的不断减少,尼罗河水进入 Faiyum 盆地的几率也进一步减少,湖泊沉积物中蒸发性盐类以及沉积物磁性不断增加,正是对这一趋势的反映. 虽然,为了应对盆地干旱气候以及尼罗河来水减少的状况,最近 4.2 ka BP 以后人工开挖的 Hawara 运河(1991—1802 BC)<sup>[58]</sup>,也就是现在的 Bahr Yousef 运河的前身,为盆地提供额外水源. 但全新世后期尼罗河流域总体干旱的气候,加剧了尼罗河下游流量的衰减,使得在自然状态下很难再实现尼罗河与盆地的联通,加之人类生产、生活用水的不断增长,外来水源也无法阻止湖泊趋向进一步萎缩. 此时,沉积物磁性的不断增加所反映的正是湖泊不断萎缩的氧化沉积环境以及人类活动的不断增强.

## 5 结论

Faiyum 盆地钻孔沉积物的粒度、有机碳、生物以及磁性特征,反映了全新世以来盆地沉积物环境的变化,与气候变化导致的全新世以来尼罗河与盆地的水力学联系有关. 大约 10—5.4 ka BP 期间,盆地沉积物细颗粒、高有机碳含量、低磁性特征,总体反映了高湖面、偏还原性的环境特征,这与全新世早中期非洲夏季风受热带辐合带北移而加强,在给整个尼罗河流域带来更多的降水的同时,所引发的下游低洼地区的泛滥、大量河水流入 Faiyum 盆地有关. 期间,大约 6.3—5.4 ka BP 尼罗河与 Faiyum 盆地的水力学联系减弱则与非洲夏季风降水在撒哈拉地区的衰退相吻合. 而最近 5.4 ka BP 以来,热带辐合带的不断南移,导致流域夏季风降水也随之减弱,尼罗河泛滥的几率减少,Faiyum 盆地与尼罗河的连通性变得困难,并在随后的大约 4.2 ka BP 后变得尤为明显. 虽然,随后人工开挖的运河(1991—1802 BC)使得盆地与尼罗河重新建立起水力学联系,但这种人工的水力学联系,在人类活动不断强化背景下,显然未能阻止湖泊的进一步萎缩.

## 6 参考文献

- [ 1 ] Oldfield F, Bamosky C, Leopold EB *et al.* Mineral magnetic studies of lake sediments. *Hydrobiologia*, 1983, **103**: 37-44. DOI: 10.1007/978-94-009-7290-26.
- [ 2 ] Oldfield F, Dearing JA, Thompson R *et al.* Some magnetic properties of lake sediments and their possible links with erosion rates. *Polksie Archive Hydrobiologia*, 1978, **25**: 321-331.
- [ 3 ] Wang Sumin, Li Jianren. Lake sediment as an effective method for studying past climate: case studies from Qinghai Lake

- and Daihai Lake. *Chinese Science Bulletin*, 1991, (1): 54-56 (in Chinese). [王苏民, 李健仁. 湖泊沉积——研究历史气候的有效手段——以青海湖、岱海为例. 科学通报, 1991, (1): 54-56.]
- [ 4 ] Hilton J, Lishman JP. The effect of redox change on the magnetic susceptibility of sediments from a seasonally anoxic lake. *Limnology and Oceanography*, 1985, **30**: 907-909.
- [ 5 ] Thompson R, Oldfield F. *Environmental Magnetism*. London: Allen and Unwin, 1986: 1-227.
- [ 6 ] Zhang Weiguo, Yu Lizhong, Xu Yu. Brief reviews on environmental magnetism. *Progress in Geophysics*, 1995, **10**(3): 95-105 (in Chinese with English abstract). [张卫国, 俞立中, 许羽. 环境磁学研究的简介. 地球物理学进展, 1995, **10**(3): 95-105.]
- [ 7 ] Gasse F, Fontes JC *et al.* Biological remains, geochemistry and stable isotopes for the reconstruction of environmental and hydrological changes in the Holocene lakes from North Sahara. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1987, **60**: 1-46.
- [ 8 ] Gasse F. Hydrological change in the African tropics since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, 2000, **19**: 189-211.
- [ 9 ] Fritz SC. Paleolimnological records of climatic change in North America. *Limnology and Oceanography*, 1996, **41**: 882-889.
- [ 10 ] Holzmann P, Gasse F, Dupont L. Paleoenvironmental changes in the arid and sub arid belt (sahara-Sahel-Arabian Peninsular) from 150 kyr to present. In: Battabee R, Gasse F, Stickley CE eds. Past climate variability through Europe and Africa. Dordrecht; Kluwer Academic, 2004: 219-256.
- [ 11 ] Mehringer PJ, Patersen KL, Hassan FA. A pollen record from Birket Qarun and the recent history of the Fayum, Egypt. *Quaternary Research*, 1979, **11**: 238-256.
- [ 12 ] Peglar SM, Birks HH, Birks HJ. Terrestrial pollen record of recent land-use changes around nine North African lakes in the CASSARINA Project. *Aquatic Ecology*, 2001, **35**: 431-448.
- [ 13 ] Hassan A, Hamdan MA, Flower RJ. The oxygen and carbon isotopic records in Holocene freshwater mollusc shells from the fayum paleolakes, Egypt: Their paleoenvironmental and paleoclimatic implications. *Quaternary International*, 2012, **266**: 175-187.
- [ 14 ] Ramadan H, Kevin AZ, Flower RJ *et al.* Benthic foraminifera and their stable isotope composition in sediment cores from Lake Qarun, Egypt: changes in water salinity during the past ~500 years. *Journal of Paleolimnology*, 2011, **45**: 167-182. DOI: 10.1007/s10933-010-9489-2.
- [ 15 ] Fester IDL, Oldfield F, Flower RJ. Mineral magnetic signatures in a long core from Lake Qarun, Middle Egypt. *Journal of Paleolimnology*, 2008, **40**: 835-849. DOI: 10.1007/s10933-008-9202-x.
- [ 16 ] Han Hualing, Chen Jing, Sun Qianli *et al.* Grain-size distribution and magnetic susceptibility in Faiyum Depression sediments, Egypt and the implication for eolian activity. *J Lake Sci*, 2011, **23**(2): 303-310 (in Chinese with English abstract). DOI:10.18307/2011.0222. [韩华玲, 陈静, 孙千里等. 埃及 Faiyum 盆地沉积物中粒度和磁化率对风沙活动的指示意义. 湖泊科学, 2011, **23**(2): 303-310.]
- [ 17 ] Beadnell HJL. The topography and geology of Faiyum Province of Egypt. Cairo: Geological Survey of Egypt, 1905: 88.
- [ 18 ] Wendorf F, Schild R, Lissawi B. Prehistory of the Nile Valley. New York: Academic Press, 1976: 68.
- [ 19 ] Said R. The river Nile: geology hydrology and utilisation. Amsterdam: Elsevier, 1993: 45.
- [ 20 ] Taha AA. Quaternary landforms of Qatrani Area, Western Desert. *Egyptian Journal of Geology*, 1982, **2**: 87-100.
- [ 21 ] Caton-Thompson G, Gardener EW. Recent work on the problem of Lake Moeris Discussion. *The Geographical Journal*, 1929, **73**(1): 58-60. DOI: 10.2307/1782278.
- [ 22 ] Hassan FA. Holocene lakes and prehistoric settlements of the western Faiyum, Egypt. *Journal of Archaeological Science*, 1986, **13**(5): 483-501.
- [ 23 ] Hewison RN. The Fayum history and guide. Cairo: The American University, 2001: 103.
- [ 24 ] El-Shabrawy GM, Dumont HJ. The Fayum Depression and its lakes. In: Dumont HJ ed. The Nile, Monographiae Biologicae. Netherland: Springer, 2009, **89**: 95-124.
- [ 25 ] Tesemma ZK. Long term hydrologic trends in the Nile Basin. New York: Cornell University, 2009: 6.
- [ 26 ] Soliman GF. Observations on some physical conditions of lake Qamh. In: El-Racy M ed. Regional symposium of environmental studies (UNARC). Alexandria: University of Alexandria, 1990: 588-601.

- [27] Mashal AN, Morcos S. Evaporation from Lake Qarun and its water budget. *Bulletin of National Institute of Oceanography and Fisheries*, 1981, **7**: 474-483.
- [28] Marks L, Salem S, Welc F *et al.* Preliminary report on unique laminated Holocene sediments from the Qarun Lake in Egypt. *Studia Quaternaria*, 2016, **33**(1) (in Press).
- [29] Lu Rukun. Chemical analysis method of soil agricultural. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 638 (in Chinese). [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 638.]
- [30] Marks L, Salem S, Welc F *et al.* Holocene dynamics of climate change in northeastern Africa: new data from the core FA-1, Faiyum Oasis (Egypt). *Boreas*, 2016 (in press).
- [31] Reimer PJ, Bard E, Bayliss A *et al.* IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 2013, **55**(4): 1869.
- [32] Bloemendal J, Liu XM. Rock magnetism and geochemistry of two plio-pleistocene Chinese loess-palaeosol sequences—Implications for quantitative palaeoprecipitation reconstruction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, **226**(1): 149-166.
- [33] Maher BA. Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites. *Geophysical Journal International*, 1988, **94**(1): 83-96.
- [34] Pan YX, Zhu RX, Liu QS *et al.* Low-temperature magnetic behavior related to thermal alteration of siderite. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**(23): 2087. DOI: 10.1029/2002GL016021.
- [35] Nie Junsheng, Zan Jinbo, Song Yougui. Recent advances in red clay environmental magnetism on the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Sciences*, 2012, **32**(4): 576-587 (in Chinese with English abstract). [聂军胜, 咎金波, 宋友桂. 中国黄土高原红黏土磁学研究进展. 第四纪研究, 2012, **32**(4): 576-587.]
- [36] Zhao Jun, Lu Huayu, Wang Xiaoyong *et al.* Magnetic properties of loess deposit in easter Qinling Mountains and an investigation on the magnetic susceptibility enhancement. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, **26**(6): 1052-1062 (in Chinese with English abstract). [赵军, 鹿化煜, 王晓勇等. 东秦岭地区黄土堆积的岩石磁学特征及磁化率增强机制探索. 沉积学报, 2008, **26**(6): 1052-1062.]
- [37] Liu Xiuming, Xia Dunsheng, Liu Dongsheng *et al.* Discussion on two models of paleoclimatic records of magnetic susceptibility of Alaskan and Chinese loess. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(2): 210-220 (in Chinese with English abstract). [刘秀铭, 夏敦胜, 刘东生等. 中国黄土和阿拉斯加黄土磁化率气候记录的两种模式探讨. 第四纪研究, 2007, **27**(2): 210-220.]
- [38] Hu SY, Appel E, Hoffmann V *et al.* Identification of greigite in lake sediments and its magnetic significance. *Science in China (Series D)*, 2002, **45**(1): 81-87.
- [39] Roberts A. Magnetic properties of sedimentary greigite ( $\text{Fe}_3\text{S}_4$ ). *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, **134**(3): 227-236. DOI: 10.1016/0012-821X(95)00131-U.
- [40] Mohamed KJ, Rey D, Rubio B *et al.* Onshore-offshore gradient in reductive early diagenesis in coastal marine sediments of the Ria de Vigo, North West Iberian Peninsula. *Continental Shelf Research*, 2011, **31**(5): 433-447. DOI: 10.1016/j.csr.2010.06.006.
- [41] Liu Xiuming, Ma Mingming, Hesse P *et al.* Magnetic properties of loess deposits in Australia and its environmental Significances. *Quaternary Sciences*, 2011, **31**(5): 837-848 (in Chinese with English abstract). [刘秀铭, 马明明, Hesse P 等. 澳大利亚黄土磁学性质及环境意义. 第四纪研究, 2011, **31**(5): 837-848.]
- [42] Liu Qingsong, Deng Chenglong, Pan Yongxin. Temperature dependency and frequency dependency of magnetic susceptibility of magnetite and maghemite and their significance for environmental magnetism. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(6): 954-962 (in Chinese with English abstract). [刘青松, 邓成龙, 潘永信. 磁铁矿和磁赤铁矿磁化率的温度和频率特性及其环境磁学意义. 第四纪研究, 2007, **27**(6): 954-962.]
- [43] Banerjee SK, King J, Marvin AJ. Rapid method for magnetic granulometry with applications to environmental studies. *Geophysical Research Letters*, 1981, **8**: 333-336.
- [44] Hu Zhongxing, Zhang Weiguo, Dong Chenyan *et al.* Influence of early diagenesis on magnetic properties of inner shelf deposits of the East China Sea. *Quaternary Sciences*, 2012, **32**(4): 670-677 (in Chinese with English abstract). [胡忠行, 张卫国, 董辰演等. 东海内陆架沉积物磁性特征对早期成岩作用的响应. 第四纪研究, 2012, **32**(4): 670-677.]
- [45] Karlin R, Levi S. Diagenesis of magnetic minerals in recent haemipelagic sediments. *Nature*, 1983, **303**(5915): 327-330.

- DOI: 10.1038/303327a0.
- [46] Robinson SG, Sahota JTS. Rock-magnetic characterization of early, redoxomorphic diagenesis in turbiditic sediments from the Madeira Abyssal Plain. *Sedimentology*, 2000, **47**(2): 367-394.
- [47] Anderson N, Rippey B. Diagenesis of magnetic minerals in the recent sediments of a eutrophic lake. *Limnology and Oceanography*, 1988, **33**(6): 1476-1492.
- [48] Oldfield F. The rock magnetic identification of magnetic mineral and grain size assemblages. Environmental magnetism: a practical guide. *Technical Guide*, 1999, **6**: 98-112.
- [49] Oldfield F. Environmental magnetism—a personal perspective. *Quaternary Science Reviews*, 1991, **10**(1): 73-85. DOI: 10.1016/0277-3791(91)90031-0.
- [50] Oldfield F. Sources of fine-grained magnetic minerals in sediments: a problem revisited. *The Holocene*, 2007, **17**(8): 1265-1271.
- [51] Flower RJ, Stickley C, Rose NL *et al.* Environmental changes at the desert margin: an assessment of recent paleolimnological records in Lake Qarun, Egypt. *Journal of Paleolimnology*, 2006, **35**: 1-24.
- [52] Aref M. Classification and depositional environments of Quaternary pedogenic gypsum crusts (gypcrete) from east of the Fayum Depression, Egypt. *Sedimentary Geology*, 2003, **155**(1): 87-108.
- [53] Goudie A, Middleton N. Saharan dust storms: nature and consequences. *Earth Science Reviews*, 2001, **56**(1): 179-204.
- [54] Kukla G. Loess stratigraphy in Central China. *Quaternary Science Review*, 1987, **6**: 191-219. DOI: 10.1016/0031-0182(89)90143-0.
- [55] Walden J, Oldfield F, Smith J eds. Environmental magnetism, a practical guide. Technical Guide: Quaternary Research Association, 1999: 6.
- [56] Foster IDL, Boardman J, Keay BJ. The contribution of sediment tracing to an investigation of the environmental history of two small catchments in the uplands of the Karoo, South Africa. *Geomorphology*, 2007, **90**: 126-143.
- [57] Krom MD, Stanley JD, Cliff RA *et al.* Nileriver sediment fluctuations over the past 7000 yr and their key role in sapropel development. *Geology*, 2002, **30**: 71-74. DOI: 10.1130/0091-7613(2002)030<0071: NRSFOT>2.0.CO;2.
- [58] Ball J. Contributions to the Geography of Egypt. Cairo: Government Press, 1939: 334-335 (reprinted 1952 by Survey of Egypt, Cairo).
- [59] Marriner N, Flaux C, Kaniewski D *et al.* ITCZ and ENSO-like pacing of Nile delta hydro-geomorphology during the Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 2012, **45**: 73-84. DOI: 10.1016/j.quascirev.2012.04.022.
- [60] Xiao JL, Wu JT, Si B *et al.* Holocene climate changes in the monsoon/arid transition reflected by carbon concentration in Daihai Lake of Inner Mongolia. *The Holocene*, 2006, **16**(4): 551-560. DOI: 10.1191/0959683606hl950rp.