

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*

韩华玲^{1,2}, 陈静^{2**}, 孙千里², 陈中原², Alaa Salem³

(1: 华东师范大学地理系, 上海 200062)

(2: 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

(3: Kafrelshiekh University of Egypt, Egypt)

摘要: 埃及 Faiyum 盆地是尼罗河下游的泛滥平原, 沉积物主要来自尼罗河和撒哈拉沙漠. 本文通过对钻孔 FYAM (孔深 4.6m) 沉积物的粒度、磁化率的分析, 并结合石英形态、石膏和碳酸盐含量分析, 旨在寻找 Faiyum 盆地沉积物中代表风沙活动的粒度、磁化率特征. 研究结果显示, 钻孔沉积物中共发现 7 种粒度频率曲线类型, 主要为细粒组 (6–20 μm) 和粗粒组 (80–100 μm) 两个峰值组合而成的单峰或双峰曲线. 除去人类活动影响的高磁化率层以及高碳酸盐含量导致的低磁化率层外, 其余层位沉积物的磁化率随着曲线类型的不同呈现规律性变化, 当 80–100 μm 峰为主峰时, 磁化率明显偏低, 风成石英颗粒含量升高, 代表着风沙活动强烈, 当 6–20 μm 的峰为主峰时, 磁化率相对较高, 风成石英颗粒含量减少, 意味着风沙活动减弱, 以尼罗河物质输入为主.

关键词: 粒度频率曲线; 单峰; 双峰; 撒哈拉沙漠; 尼罗河; 石英形态; Faiyum 盆地

Grain-size distribution and magnetic susceptibility in Faiyum Depression sediments, Egypt and the implication for eolian activity

HAN Hualing^{1,2}, CHEN Jing², SUN Qianli², CHEN Zhongyuan² & Alaa Salem³

(1: *Department of Geography, East China Normal University, Shanghai 200062, P. R. China*)

(2: *State Key Laboratory of Estuarine & Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, P. R. China*)

(3: *Kafrelshiekh University of Egypt, Egypt*)

Abstract: The Faiyum Depression, a flood plain of the Nile downstream, receives sediments from the Nile and the Sahara Desert. By means of grain size and magnetic susceptibility analysis of sediments from core FYAM (4.6m deep), combined with surficial characteristic of quartz grains, occurrence of gypsum and carbonate contents, the paper is aiming to reveal some indicators for eolian activity in the Faiyum sediments. The results suggest that there are totally seven patterns of sediment grain-size distribution, including unimodal and bimodal patterns composed of a fine-grain peak (6–20 μm) and a coarse-grain peak (80–100 μm). These patterns have a close relation to magnetic susceptibility except for the sediments of two layers with high or low magnetic susceptibility caused probably by human activity and carbonate content. When the coarse-grain peak appears as a major pattern, the sediments are characterized by low magnetic susceptibilities, implying eolian quartz content increased, and strong sandstorms. When the fine-grain peak is dominated, the sediments were consistent with high magnetic susceptibility and less eolian quartz grains, probably revealing increasing sediment supply from the Nile.

Keywords: Grain-size distribution; unimodal pattern; bimodal pattern; Sahara Desert; the Nile; surficial quartz characteristic; Faiyum Depression

沉积物的粒度是重要的沉积特征之一, 能反映沉积环境和搬运营力. 湖泊沉积物具有物源简单、沉积环境稳定的特点, 其粒度变化可以很好地指示沉积环境变化^[1-3]. 尤其是干旱半干旱地区的湖泊, 物质来源稳

* 国家科技部中埃政府间合作项目(0703000)和华东师范大学河口海岸重点实验室开放课题联合资助. 2010-03-05 收稿; 2010-07-02 收修改稿. 韩华玲, 女, 1984 年生, 硕士研究生; E-mail: hanhualing102@163.com.

** 通讯作者; E-mail: jchen@geo.ecnu.edu.cn.

定,主要为流域输入和干、湿沉降的风尘物质,对于这两类不同动力机制下的沉积物,通过粒度特征可以将其区分开来^[4-8],从而可以进一步分析过去风沙活动发生的频率、强度以及与之相关的流域自然环境^[9-11]. 沉积物粒度分布的双峰形态指示着两种不同的动力特征^[12]. 在干旱半干旱区,尤其是沙漠边缘的湖泊沉积物中,这种双峰形态通常指示着风力和径流两种搬运沉积动力^[5-6,13],粗颗粒小峰代表了风力搬运物质的输入,而细颗粒部分受人湖径流量的影响很大^[13-17]. 同样,沉积物磁化率也是一个重要的环境代用指标. 天然湖泊沉积物的磁化率很大程度上反映了物质来源及沉积动力和次生条件的影响,当沉积环境相对稳定时,磁化率可以反映沉积物物源的变化^[18-21]. 干旱半干旱区湖泊沉积物的磁化率的低值可能指示着风力搬运入湖的沉积物占有较高比例,而磁化率增高可能意味着地表径流搬运入湖的物质增多^[19-25]. 如此可见,在一定程度上干旱半干旱区风沙活动的强弱可以在湖泊沉积物的粒度和磁化率特征上反映出来,而且粒度和磁化率的实验方法方便快捷,且对样品的破坏性小,在沉积环境研究中具有不可取代的优势.

本文试图对尼罗河下游 Faiyum 盆地钻孔沉积物进行粒度和磁化率分析,并借助其他一些指标,寻找出风沙活动在湖泊沉积物中的粒度和磁化率特征,从而为进一步的古环境演变提供良好的指标体系.

1 背景资料

埃及 Faiyum 盆地是撒哈拉沙漠的一沙漠绿洲,四周被沙漠所包围,只在东南方通过一条狭窄的水道与尼罗河相连(图 1). 目前仅在盆地西北部存在一个萎缩的加隆湖(Quran 湖),湖面位于现代平均海平面 45m 以下,水深 8m,面积 200km²,盐度为 37.6g/L^[26-28]. 该地区常年受信风的影响,普遍干旱,降水稀少,夏季受西南信风的影响以干旱为主,冬季受东北信风的影响有少量降水,年平均降水量不到 10mm^[28-29]. 尼罗河是该盆地主要的补给水源,洪水季节来临时大片农田被淹没,洪水退后留下一层厚厚的河泥,形成肥沃的土壤,长期以来一直是埃及的重要的农业区^[26,28-29].

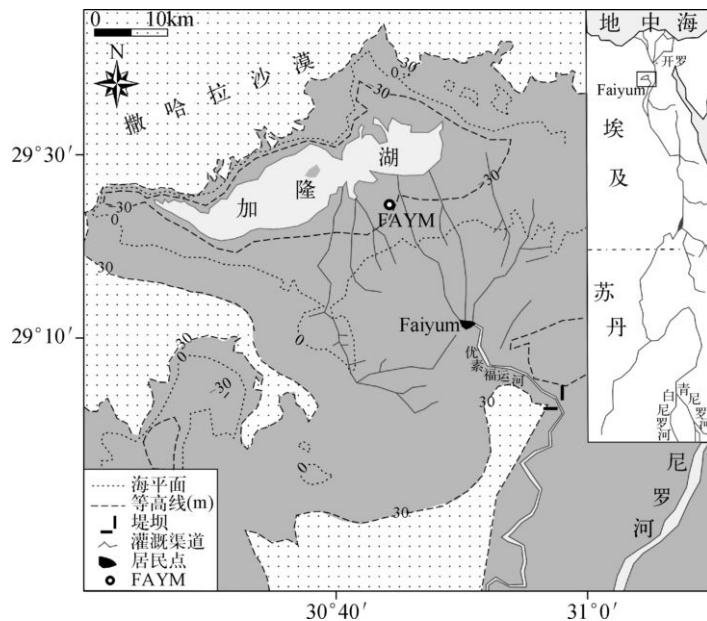


图 1 钻孔位置图

Fig. 1 Core location in Faiyum Depression, Egypt

Faiyum 盆地的基岩主要是始新世的石灰岩,其上覆盖的是更新世和全新世的淤积层^[30-31]. 该盆地形成于 180 万年前,四周被沙丘所包围. 大约 7 万年前,泛滥的尼罗河水第一次冲过了 Faiyum 洼地周围的矮山,形成了加隆湖以及周围的沼泽地^[26]. 在全新世时期,加隆湖湖面有多次波动^[26,28,32]. 早全新世时,加隆湖的面积很大,湖面位于海平面以上 12-24m,并在不断上升,在 7000aBP 出现第一次衰退,但在中全新世湖面又

开始上升,湖面位于海平面上 20m,在 5000-4000aBP 出现第二次衰退,随后又开始上升,直到 2000aBP 由于尼罗河水减少,加隆湖进入全面衰退期,在 1922 年湖面已经位于平均海平面 45m 以下.尼罗河水是该区的唯一水源,湖面的波动主要是源于尼罗河洪水的变化.在早中全新世时尼罗河水量较大,加隆湖属于淡水湖,进入晚全新世后尼罗河水量锐减,加之该区一直处于干旱区,背靠沙漠,一直受风沙活动的影响,蒸发率很高,湖面也在不断的萎缩,该湖逐渐变为咸水湖^[28,32-33].

2 材料与方法

2008 年 10 月取得 FAYM 钻孔(29°21'42.10"N,30°46'30.95"E),该钻孔位于埃及 Faiyum 盆地,加隆湖以东(图 1),孔深 4.6m.由于 1m 以上扰动厉害,所取样品深度为 1-4.6m,大约间隔 2-3cm 取样,共取样品 163 个,除 4 个样品进行测年外,其余 159 个样品进行粒度分析和磁学测量.根据粒度实验和磁化率测试的结果,自上而下选取 20 个样品进行不同形态石英统计,10 个样品对石膏和碳酸盐颗粒进行统计.

2.1 粒度分析

粒度分析采用美国 Coulter 公司 LS13 320 型激光粒度仪,其测试范围为 0.04-2000 μm .所有样品均在测试范围内,实验步骤如下:(1)低温烘干样品(<40℃);(2)取样约 0.5g 左右于 100ml 的烧杯中,先加入 10ml 10% 的 H_2O_2 ,加热 20min,待其反应数分钟后,再加入 10ml 浓度为 10% 的 HCl,加热 15min,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,反复此洗酸步骤,直至溶液变为中性;(3)加入 10ml 0.5mol/L 的六偏磷酸钠(NaPO_3)₆分散剂,搅拌均匀,用超声波仪分散约 20min,然后再到 LS13 320 激光粒度仪上测试样品.

2.2 磁化率测试

磁化率测试使用英国 Bartington 公司生产的 MS2 磁化率仪,其实验步骤如下: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 5g 左右的样品称重,置于 10ml 容量的圆柱状聚乙烯样品盒内压实、固定,进行低频(0.47kHz)磁化率和高频(4.7kHz)磁化率的测试.

2.3 石英、石膏、碳酸盐颗粒的统计

(1)称取 10g 左右的样品,放入 1000ml 的烧杯中,加满蒸馏水,静置 1d 后,将其过 250 目的水筛,用清水尽量将矿物表面的泥冲洗干净,以减少镜下鉴定的困难.将冲洗干净的样品低温烘干待用.(2)将烘干后的样品均匀取出少量置于有格子的载破片上,并将其均匀铺开,取中间的大约 300 粒矿物将其它矿物划到两侧备用.将 300 粒矿物均匀铺在若干格子内,置于显微镜下,对球形石英、棱角状石英进行计数统计.然后间隔选取样品对石膏颗粒、碳酸盐颗粒进行计数统计.

3 实验结果

FAYM 整个钻孔沉积物比较细,1.00-1.68m 为褐黄色泥质粉砂,1.68-2.00m 为青灰色泥质粉砂,2.00-3.20m 为青灰色粉砂质泥,3.20-3.53m 为灰黄色砂质粉砂,3.53-4.60m 为青灰色泥质粉砂.

3.1 垂向粒度、磁化率及其他指标特征

根据粒度组分及磁化率的变化规律,可以划分出 7 个不同的层位(自下而上 I-VII 层),具体特征如下(图 2):

I 层(4.60-4.03m):中值粒径变化范围为 4.64-8.27 μm ,变化不大,属于粉砂.该层以粘土和粉砂粒级为主,粘土约占 40%,粉砂占 57%,砂的含量极少.该层磁化率较稳定,变化范围为 73.9×10^{-8} - $88.1 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$,平均值为 $84.1 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$.圆状石英和棱角状石英的比(圆/棱石英比)接近 1,但小于 1.石膏、碳酸盐的含量较低.

II 层(4.03-3.43m):中值粒径变化范围为 4.41-14.38 μm ,粘土、粉砂和砂粒级含量分别约为 35%、50% 和 15%,粒度明显粗于 I 层.磁化率变化范围为 68.7×10^{-8} - $83.7 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$,平均值为 $75.4 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$,较 I 层稍小.圆/棱石英比逐渐增大且大于 1.石膏含量有所增加,变化不大,碳酸盐的含量有所减少.

Ⅲ(3.43-3.30m):中值粒径最大值达76.9 μm ,最小为24.5 μm ,是整个剖面粒径最粗的层位.从粒级组上看,粘土占15%,粉砂占45%,砂占40%,该层以粉砂和砂为主.磁化率总体较低,变化范围为 17.3×10^{-8} - $96.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$.圆/棱石英比最大,最大值为2.33.石膏含量有所增加,碳酸盐的含量变化不大,较上层稍低.

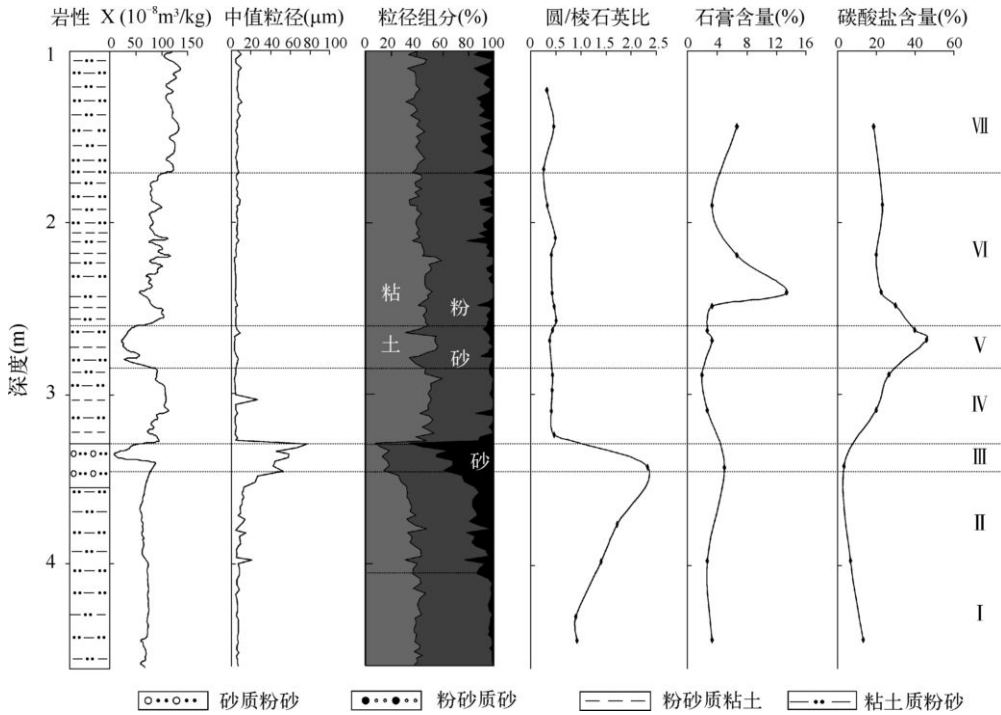


图2 FAYM 钻孔粒度、磁化率、石英、石膏以及碳酸盐垂向变化

Fig. 2 Grain size, magnetic susceptibility, quartz ratio, gypsum and carbonate content in the sediments of FAYM core

Ⅳ(3.30-2.86m):中值粒径明显变小,变化范围为2.91-26.77 μm .粒级组分以粘土和粉砂为主,可达95%,砂的含量极少.该层磁化率值升高,波动明显,变化范围为 81.5×10^{-8} - $122.3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$.圆/棱石英比在该层明显减小,其值在0.5以下.石膏的含量有所减小,碳酸盐含量增加.

Ⅴ(2.86-2.60m):中值粒径没有明显变化,变化范围为3.23-8.71 μm .粒级组分仍以粘土和粉砂为主,其含量可达97%,砂的含量很少.磁化率值明显变小,变化范围为 29.6×10^{-8} - $65.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$.圆/棱石英比在该层变化不大,其值在0.5左右波动.石膏含量无明显变化,碳酸盐含量为全孔最高,高达46%.

Ⅵ(2.60-1.68m):中值粒径稳定,变化范围为2.94-8.75 μm .从粒级组上看,粘土占44%,粉砂占52%,砂占4%.磁化率变化范围为 62.9×10^{-8} - $124.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$.圆/棱石英比变化不大,石膏的含量出现最高值达13%,后又减小但较下层大,碳酸盐含量较下层减少.

Ⅶ(1.68-1.00m):中值粒径向上逐渐变大,变化范围4.38-11.13 μm .仍以粘土和粉砂为主,砂仅占5%左右.磁化率稳定,变化范围为 104.4×10^{-8} - $136.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,达全孔中最大.圆/棱石英比变化不大,石膏含量有所增加,达到7%,碳酸盐含量较下层减少.

3.2 粒度频率曲线类型及相关磁化率

将全孔沉积物样品的粒度频率曲线进行对比,总结出7种类型(a-g),主要为6-20 μm 和80-100 μm 两个峰值组合而成的单峰或双峰曲线(图3).通过进一步与其相应的磁化率比较,发现除了第Ⅴ层和Ⅶ层沉积物外,粒度频率曲线类型和磁化率有良好的对应关系.第Ⅴ层沉积物粒度频率曲线主要以单峰为主,类似于a型曲线,但是磁化率明显偏低.该层碳酸盐含量丰富(图2),碳酸盐颗粒主要由方解石、文石以及白云石

组成,这些矿物都是逆磁性矿物,能稀释磁性矿物的浓度,对磁化率的大小具有显著的负作用^[34-36]. 第Ⅶ层沉积物粒度频率曲线也以单峰为主,类似于b型曲线,其磁化率却明显增加,可能是人类活动导致的侵蚀加强所致^[35]. 本文重点在于讨论风沙活动引起的粒度以及磁化率的变化,而这两层沉积物磁化率异常都非物源变化引起,所以在本文中暂不作为分析对象.

a型曲线为单峰型,峰宽,接近正态分布,峰值主要在 $6\mu\text{m}$. 磁化率范围 $81.1 \times 10^{-8} - 122.3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,平均 $98.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,该类型的曲线主要集中在第Ⅳ、Ⅵ层. b型曲线峰宽,偏态分布,峰值主要在 $20\mu\text{m}$. 磁化率范围 $80.7 \times 10^{-8} - 104.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,平均 $88.3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,主要集中在第Ⅵ层. c型曲线峰高、窄,峰值主要在 $80\mu\text{m}$. 磁化率范围 $17.3 \times 10^{-8} - 54.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,平均 $34.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,主要集中在第Ⅲ层. d型曲线细峰为 $6\mu\text{m}$,峰宽、高,粗峰为 $100\mu\text{m}$,峰很低且窄. 磁化率范围 $73.9 \times 10^{-8} - 108.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,平均 $96.7 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,主要集中在第Ⅳ、Ⅵ层. e型曲线细峰和粗峰值分别为16和 $100\mu\text{m}$,细峰宽、高,粗峰窄、低. 磁化率范围 $81.1 \times 10^{-8} - 101.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,平均 $88.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,主要集中在第Ⅵ层. f型曲线细峰和粗峰分别在20和 $80\mu\text{m}$ 附近,细峰宽、高,粗峰窄,相对较低,但高于d和e型的粗峰. 磁化率范围 $73.9 \times 10^{-8} - 88.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,平均 $84.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,主要集中在第Ⅰ层. g型曲线细峰和粗峰分别在6和 $80\mu\text{m}$ 附近,细峰宽、低,粗峰窄、高. 磁化率范围 $68.7 \times 10^{-8} - 86.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,平均 $75.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,主要集中在第Ⅱ层.

4 粒度频率曲线形态、磁化率对风沙活动的指示意义

埃及 Faiyum 盆地沉积物来源于尼罗河和撒哈拉沙漠^[26-33,37-38] (图1),很大程度上, Faiyum 盆地沉积物的粒度及磁化率特征会受到这两种物质来源组合的影响.

从本文的研究结果来看,除了第Ⅴ和Ⅶ层沉积物以外(原因如前述),其余层位沉积物的粒度和磁化率表现出良好的规律性(图2和图3). 7种粒度频率曲线类型主要为 $6 - 20\mu\text{m}$ 和 $80 - 100\mu\text{m}$ 两个峰值组合而成的单峰或双峰曲线,细单峰的沉积物磁化率最高,粗单峰的磁化率最低,双峰的磁化率介于中间,取决于细峰和粗峰的形态. 一般来讲,单成因组分的频率分布为单峰光滑曲线,多成因组分的频率曲线是多峰分布的连续光滑曲线,峰值的高低说明此种成因组分对样品整体贡献率的大小^[12,39]. 本文中单峰型曲线a、b和c三种,峰值分别为6、20和 $80\mu\text{m}$ (图3),表明主要受一种作用力影响. 其中,曲线a、b的峰宽,分选较差,且磁化率值高,可能代表着尼罗河河流物质贡献率主导,因为尼罗河沉积物主要来源于上游的青尼罗河,相对来讲距离较远,搬运至盆地的物质细颗粒较多,且青尼罗河发源于玄武岩发育的埃塞俄比亚高原,其沉积物中含有大量的铁磁性矿物,磁性较强^[40-42]. 曲线c峰高而窄,说明分选性极好,粒度组成集中在砂粒级,磁化率值很低,风沙沉积普遍具有此特征^[4,14,21,23]. 研究表明,风力携带物质到达湖区时已经过分选,因此沉降入湖的粗颗粒相对均一,表现为粒径相对集中的窄峰^[14,15,17],且沙漠沉积物主要矿物成分为石英,铁磁性矿物含量很少^[37,43-44],近源风成物质以粗颗粒为主,其沉积物磁化率偏低^[23,45-46]. 由此推断,曲线c反映的是风力作用沉积,盆地沉积物主要来源于邻近撒哈拉沙漠风沙活动. 双峰形态曲线有4种(图3d、e、f、g),细峰集中于 $6 - 20\mu\text{m}$,粗峰位于 $80\mu\text{m}$ 以上,四者都是细峰宽、粗峰窄,且磁化率值介于上述单峰曲线之间,表明沉积物由河流和风沙活动两种不同的动力条件共同作用形成. d和e曲线形态都是细峰高、粗峰低,磁化率相对较高,但是低于a和b型,指示着河流贡献相对较大;f曲线粗峰明显增高,g曲线为细峰低、粗峰高,它们的磁化率值依序逐渐降低,显示出河流沉积物贡献在逐渐减少,而风沙活动变强.

另外,这一推断也被石英和碳酸盐指标所证实. 石英具有较大的硬度和较高的化学稳定性,因而其颗粒表面特征也能很好地反映沉积环境^[47-55]. 在风成环境中,由于沉积介质的低缓冲作用、颗粒运动的高速度以及强烈频繁的温度、湿度和pH值的变化,形成了高机械能和高化学能环境,所造成的石英颗粒具有很高的磨圆度,且碟形坑也很发育,透明度低^[48-52]. 而在水成环境中,石英颗粒以贝壳状断口、V形坑和棱角状形态组合为主^[48-50,54]. 本文发现沉积物中这两种形态的石英共同存在着,说明该区沉积物来源于河流和风沙活动. 磨圆度很高的石英颗粒较大,表面被一层膜所覆盖,透明度低,和前人发现的撒哈拉沙漠石英的特征吻合^[53],而棱角状石英颗粒普遍较小,表面干净,透明度高,具有典型的水成环境特征. 圆状石英和棱角状石英的比值可以反映出风沙活动对沉积物的相对贡献. Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ层沉积物中圆状石英和棱角状石英比明显高

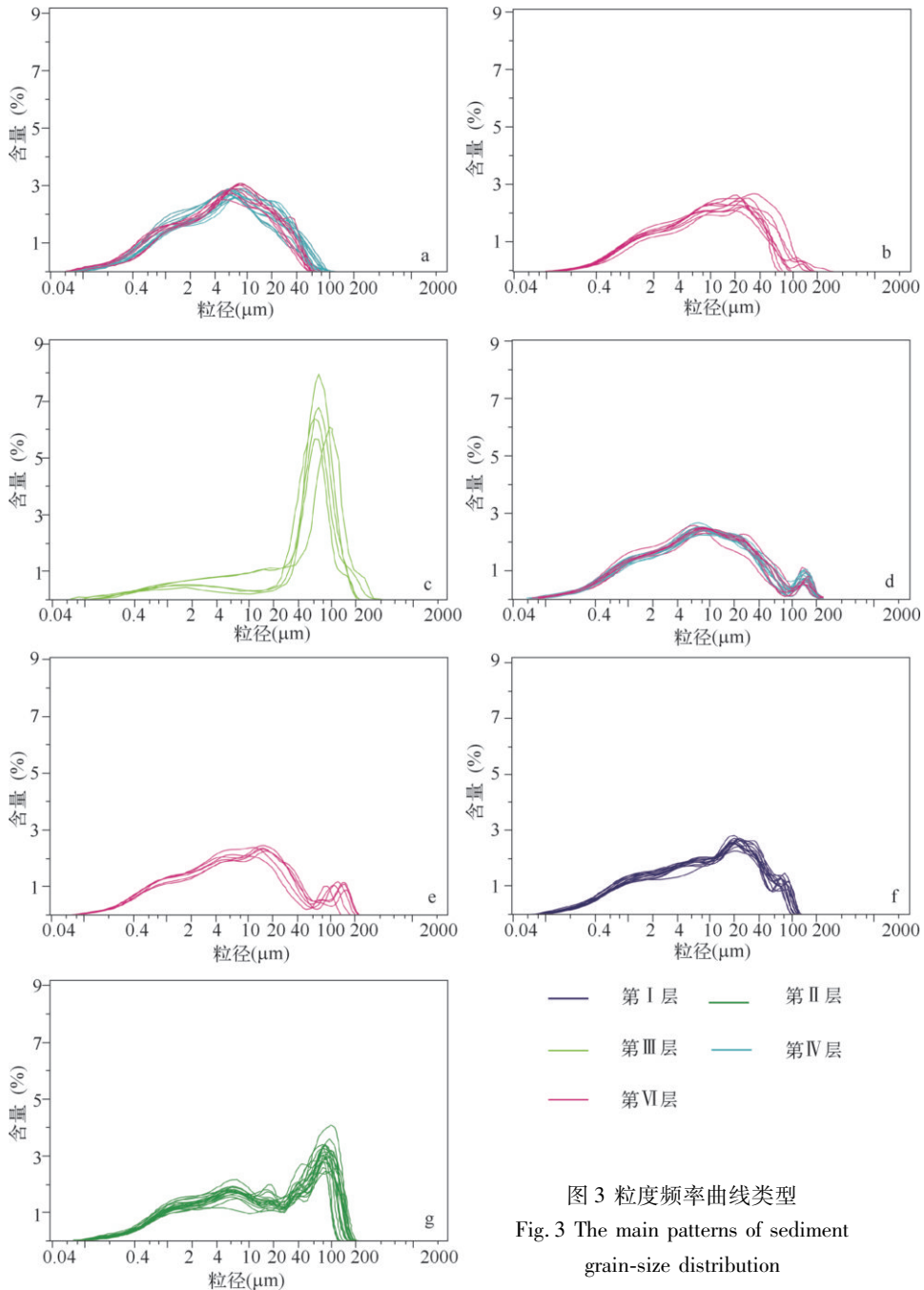


图 3 粒度频率曲线类型
Fig. 3 The main patterns of sediment grain-size distribution

于其他层位,且呈向上增加趋势,说明风沙活动越来越强烈,第 III 层基本以风沙活动沉积物为主.此阶段,碳酸盐含量较低,也说明湖水较浅^[56-57],河流来水来沙较少.这三层沉积物粒度频率曲线主要以 f、g 和 c 类型为主(图 3),也同样显示出风沙活动增强,河流贡献减弱,和该推断是非常吻合的. IV-VI 层沉积物的圆/棱石英比值低于 0.5,而碳酸盐含量增加,意味着河流泥沙贡献增加,风沙活动减弱.这些层位粒度频率曲线为 a、b、d、e 类型,这些类型也指示着河流贡献为主.

从上述论证可知,Faiyum 盆地沉积物中粒度频率曲线很好地揭示风沙活动的强弱,在粒度频率曲线上 $>80\mu\text{m}$ 的峰值基本上是由风沙活动贡献的,这一峰值升高意味着风沙活动增强,同时沉积物磁化率变低。

另外,非常有趣的是 a 曲线($6\mu\text{m}$ 峰值)的沉积物磁化率要明显高于 b 曲线($20\mu\text{m}$ 峰值),d、e 和 f 的细峰值由 $6\mu\text{m}$ 逐渐增大为 $20\mu\text{m}$,而磁化率却逐渐降低(图 3),这可能和尼罗河沉积物来源的变化有关。尼罗河沉积物主要来源于两大支流:青尼罗河和白尼罗河,这两条河流物源区母岩成分不同,其河流沉积物组成上也有很大的差别,青尼罗河磁性矿物含量丰富,而白尼罗河匮乏^[31,41]。历史时期这两条河流对尼罗河泥沙的贡献变化可能会导致 Faiyum 盆地沉积物粒度和磁化率的变化。这只是初步推测,需要进一步的研究工作才能下结论。

5 参考文献

- [1] Tanner WF. Modification of sediment size distributions. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1964,**34**(1):156-164.
- [2] Ashley GM. Interpretation of polymodal sediments. *Journal of Geology*, 1978,**86**(4):411-421.
- [3] Bagnold RA, Barndorff-Nielsen O. The pattern of natural size distributions. *Sedimentology*, 1980,**27**(2):199-207.
- [4] 隆 浩,王乃昂,马海州等.腾格里沙漠西北缘湖泊沉积记录的区域风沙特征. *沉积学报*,2007,**25**(4):626-631.
- [5] 孙千里,周 杰,肖举乐.岱海沉积物粒度特征及其古环境意义. *海洋地质与第四纪地质*,2001,**21**(1):93-95.
- [6] Sun DH, Bloemendal J, Rea DK *et al.* Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components. *Sedimentary Geology*, 2002,**152**:263-277.
- [7] 蒋庆丰,刘兴起,沈 吉.乌伦古湖沉积物粒度特征及其古气候环境意义. *沉积学报*,2006,**24**(6):877-882.
- [8] 强明瑞,陈发虎,周爱锋等.苏干湖沉积物粒度组成记录尘暴事件的初步研究. *第四纪研究*,2006,**26**(6):915-922.
- [9] 成都地质学院陕北队. *沉积岩(物)粒度分析及应用*.北京:地质出版社,1978:21-23.
- [10] 薛积彬,钟 巍.干旱区湖泊沉积物粒度组分记录的区域沙尘活动历史:以新疆巴里坤湖为例. *沉积学报*,2008,**26**(4):647-654.
- [11] 汪 勇,沈 吉,羊向东等.陕北红碱淖沉积物粒度特征所揭示的环境变化. *沉积学报*,2006,**24**(3):349-355.
- [12] Folk RF, Ward WC. Brazos River bar, a study in the significance of grain-size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957,**27**(1):3-26.
- [13] Hassold N, Rea DK, Philip AM. Grain size evidence for variations in delivery of terrigenous sediments to a Middle Pleistocene interrupted sapropel from ODP Site 969, Mediterranean Ridge. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2003,**190**:211-219.
- [14] Windom HL. Aeolian contributions to marine sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1975,**45**:520-529.
- [15] Glaccum RA, Prospero JM. Saharan aerosols over the tropical North Atlantic-mineralogy. *Marine Geology*, 1980,**37**(3):295-321.
- [16] Middleton GV. Hydraulic interpretation of sand size distributions. *Journal of Geology*, 1976,**84**(4):405-426.
- [17] Boven KL, Rea DK. Partitioning of eolian and hemipelagic sediment in eastern Equatorial Pacific core TR163-31B and the late Quaternary paleoclimate of the northern Andes. *Journal of Sedimentary Research*, 1998,**68**(5):850-855.
- [18] 王 建,刘泽纯,姜文英等.磁化率与粒度、矿物的关系及其古环境意义. *地理学报*,1996,**51**(2):155-163.
- [19] 沈 吉,汪 勇,羊向东等.湖泊沉积记录的区域风沙特征及湖泊演化历史:以陕西红碱淖湖泊为例. *科学通报*, 2006,**51**(1):87-92.
- [20] 许 健.黑河下游木能诺尔湖泊沉积记录的环境演变信息研究[学位论文].上海:华东师范大学,2006:1-55.
- [21] 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. *中国科学(D 辑)*,1998,**28**(4):334-339.
- [22] Oldfield F. Toward the discrimination of fine grained ferrimagnets by magnetic measurements in lake and nearshore marine sediments. *Journal of Geophysical Research*, 1994,**99**:9045-9050.
- [23] Oldfield F. Sources of fine-grained magnetic minerals in sediments: a problem revisited. *The Holocene*, 2007,**17**(8):1265-1271.
- [24] Yu L, Oldfield F. Quantitative sediment source ascription using magnetic measurements in a reservoir catchment system near Nijar, SE Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1993,**18**(5):441-454.
- [25] Zheng H, Oldfield F, Yu L *et al.* The magnetic properties of particle-sized samples from the Luo Chuan loess section: evi-

- dence for pedogenesis. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1991, **68**(3):250-258.
- [26] Hewison RN. The Fayum History and Guide. Cairo: The American University, 2001:103.
- [27] Tesemma ZK. Long term hydrologic trends in the Nile Basin[Thesis]. New York: Cornell University, 2009:6.
- [28] 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.
- [29] Soliman GF. Observations on some physical conditions of lake Qarun. In: El-Raey M ed. Regional symposium of environmental studies (UNARC). Alexandria: University of Alexandria, 1990:588-601.
- [30] Wendorf F, Schild R. Prehistory of the Nile Valley. New York: Academic Press, 1976:68.
- [31] Said R. The river Nile; geology, hydrology and utilisation. Amsterdam: Elsevier, 1993:45.
- [32] Hassan FA. Holocene lakes and Prehistoric settlements of the Western Faiyum, Egypt. *Journal of Archaeological Science*, 1986, **13**:483-501.
- [33] Ishak MM, Abdel-Malek SA. Some ecological aspects of Lake Qarun, Fayum, Egypt. Part I: physico-chemical environment. *Hydrobiologia*, 1980, **74**:173-178.
- [34] 谭红兵,马海州,张西营. 碳酸盐研究与其记录的环境变化. 盐湖研究, 2003, **11**(4):20-27.
- [35] Thompson R, Oldfield F. Environmental magnetism. London: George Allen and Unwin, 1986:57-59.
- [36] 杨小强,李华梅,周永章. 南海南部 NS935 孔沉积物磁化率特征及其对全球气候变化的记录. 海洋地质与第四纪地质, 2002, **22**(1):31-36.
- [37] 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.
- [38] Conway D. From headwater tributaries to international river: Observing and adapting to climate variability and change in the Nile basin. *Global Environmental Change*, 2005, **15**:99-114.
- [39] Ashley GM. Interpretation of polymodal sediments. *Journal of Geology*, 1978, **86**(4):411-421.
- [40] Garzanti E, Andoa S, Vezzoli G *et al.* Petrology of Nile River sands (Ethiopia and Sudan): Sediment budgets and erosion patterns. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, **252**:327-341.
- [41] Foster IDL, Oldfield F, Flower RJ *et al.* Mineral magnetic signatures in a long core from Lake Qarun, Middle Egypt. *Journal of Paleolimnology*, 2008, **40**(3):835-849.
- [42] Henry F, Lamba C, Richard B *et al.* Late Pleistocene desiccation of Lake Tana, source of the Blue Nile. *Quaternary Science Reviews*, 2007, **26**:287-299.
- [43] Aref MAM. Classification and depositional environments of Quaternary pedogenic gypsum crusts (gypcrete) from east of the Fayum Depression, Egypt. *Sedimentary Geology*, 2003, **155**:87-108.
- [44] Goudie AS, Middleton NJ. Saharan dust storms: nature and consequences. *Earth Science Reviews*, 2001, **56**:179-204.
- [45] 叶 玮. 新疆西风区黄土与古土壤磁化率变化特点. 中国沙漠, 2001, **21**(4):380-386.
- [46] Kukla G. Loess stratigraphy in Central China. *Quaternary Science Review*, 1987, **6**:191-219.
- [47] Mahaney WC. Atlas of sand grain surface textures and applications. Oxford: Oxford University Press, 2002:3-237.
- [48] 谢又予. 中国石英砂表面结构特征图谱. 北京:海洋出版社, 1984:3-17.
- [49] 江新胜,徐金沙,潘忠习. 鄂尔多斯盆地白垩纪沙漠石英沙颗粒表面特征. 沉积学报, 2003, **21**(3):416-422.
- [50] 王建力,方小敏,李吉均. 青藏高原东北部 15ma 以来的风沙沉积. 科学通报, 1999, **44**(12):1326-1331.
- [51] 周卫波. 苏北兴化钻孔沉积相初步研究[学位论文]. 南京:南京师范大学, 2006:1-72.
- [52] 陈清华,庞 飞. 苏北盆地白垩纪沙漠石英颗粒表面特征及环境意义. 特种油气藏, 2008, **15**(5):13-16.
- [53] Aleon J, Chaussidon M, Marty B *et al.* Oxygen isotopes in single micrometer-sized quartz grains: Tracing the source of Saharan dust over long-distance atmospheric transport. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, **66**(19):3351-3365.
- [54] 马 蜂,刘 力,王安平等. 图门江下游沙丘粒度分布与石英表面结构研究. 沉积学报, 2004, **22**(2):261-266.
- [55] Mahaney WC, Dirszowsky RW, Milner MW *et al.* Quartz microtextures and microstructures owing to deformation of glaciolacustrine sediments in the northern Venezuelan Andes. *Journal of Quaternary Science*, 2004, **19**(1):23-33.
- [56] 曹建廷,王苏民,沈 吉等. 近千年来内蒙古岱海气候环境演变的湖泊沉积记录. 地理科学, 2000, **20**(5):391-396.
- [57] 赵 强,王乃昂,李秀梅等. 青土湖地区 9500aBP 以来的环境变化研究. 冰川冻土, 2005, **27**(3):352-359.