

李 勇,李海燕,刘 慧. 石英尾砂对濠河中、下游沉积物磁学性质的影响及其环境意义. 地球物理学报, 2011, **54**(10):2620~2630, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.10.019

Li Y, Li H Y, Liu H. Magnetic influence of Quartz tail-sands on sediments in the middle and lower reaches of the Haohe River and its environmental implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(10):2620~2630, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.10.019

石英尾砂对濠河中、下游沉积物磁学性质的影响及其环境意义

李 勇¹,李海燕²,刘 慧¹

1 安徽科技学院理学院,安徽凤阳 233100

2 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室,北京 100083

摘 要 为监测石英尾砂对濠河沉积物的影响,采用环境磁学方法进行研究.在濠河中、下游采集了三条典型沉积物剖面,通过详细的岩石磁学参数与 SiO₂ 质量分数($w(\text{SiO}_2)$)测量,结果表明濠河中、下游沉积物中的主要磁性矿物是磁铁矿.三条典型沉积物剖面在纵向上按磁性参数曲线的变化特征均可分成四个磁性层,第二、第三、第四层沉积物受石英尾砂稀释作用的影响显著, $w(\text{SiO}_2)$ 的平均值高达 80%,这三层沉积物的磁学性质由石英尾砂控制.濠河中、下游沉积物的磁性参数(χ 、SIRM 和 χ_{ARM})随 $w(\text{SiO}_2)$ 增加而减少,两者存在负相关关系($-0.88 \leq R \leq -0.81$),表明磁性参数可用于分析石英尾砂对濠河沉积物的影响.同时,沉积物磁性参数的变化也能指示沉积环境的变化.

关键词 石英尾砂,沉积物,环境磁学,濠河

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.10.019

中图分类号 P318

收稿日期 2010-09-27,2011-09-27 收修定稿

Magnetic influence of Quartz tail-sands on sediments in the middle and lower reaches of the Haohe River and its environmental implications

LI Yong¹, LI Hai-Yan², LIU Hui¹

1 College of Sciences, Anhui Science and Technology University, Anhui Fengyang 233100, China

2 State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract To monitor environmental influences of quartz tail-sands on sediments around the Haohe River, mineral magnetic parameters and SiO₂ content ($w(\text{SiO}_2)$) were measured on three representative sedimental in the middle and lower reaches of the Haohe River. The results show that the main magnetic mineral in the sediments was magnetite. These three representative sedimentary sections can be divided into four sub-layers. The second, the third and the fourth sub-layers were more influenced by quartz tail-sands than the first one, with an average value of $w(\text{SiO}_2)$ more than 80%. And magnetic property of sediments from the three layers was controlled by the quartz tail-sands. Magnetic susceptibility (χ), saturation isothermal remanence (SIRM) and susceptibility of anhysteretic remanent magnetization (χ_{ARM}) of sediments in the

基金项目 安徽省优秀青年人才基金项目(2010SQRL097),安徽省自然科学基金一般项目(KJ2010B293)和安徽科技学院重点建设课程项目(AKXX20102-2)联合资助.

作者简介 李 勇,男,1975年生,硕士,讲师,主要从事磁学和环境磁学研究. E-mail:liyong197510@163.com

middle and lower reaches of the Haohe River decreased with increasing $w(\text{SiO}_2)$, and there was a negative correlation ($-0.88 \leq R \leq -0.81$) between the concentration of magnetic minerals and SiO_2 content. Therefore, we concluded that magnetic parameters can be used to monitor the influences of quartz tail-sands on sediments. Meanwhile, variations of sediment magnetic parameters might indicate changes of the depositional environment.

Keywords Quartz Tail-sands, Sediments, Environmental magnetism, Haohe River

1 引言

环境磁学是一门介于地学、磁学和环境科学之间的新兴交叉学科^[1]. 环境磁学方法因样品用量少、灵敏度高、操作简单快捷、无破坏性和成本低等特点,逐渐引起了人们的关注,现已发展成为监测环境污染的间接代用指标^[2~5].

近 30 年来,环境磁学方法广泛应用于河流^[5~7]、湖泊^[8~9]、海洋^[10~12]等沉积物的研究,人们利用沉积物的磁性特征提取沉积环境信息^[13~15]、识别物源^[1,16~17]和评价环境污染^[2,5,18]. 因为沉积物的磁性特征蕴含了丰富的环境信息,与沉积物的物源、沉积动力以及沉积后的次生变化等相关联^[1]. 沉积物的磁性参数能反映沉积系列中磁性矿物组合的差异,指示流域或水体环境变化的历史,已有研究指出沉积物的磁化率(χ)、非磁滞剩磁磁化率(χ_{ARM})等磁性参数可用来表征水动力强弱^[6,19].

濠河是淮河的一条支流,发源于安徽凤阳县官沟水库和凤阳山水库(图 1),在官沟水库一支的上游分布有 400 多家以湿法生产的石英砂企业. 近十年来,随石英砂产量的逐年递增,石英尾砂排放量也急剧增加,经雨水冲刷,大量石英尾砂涌入濠河,对濠河产生了严重的不良影响,如堵塞河道、抬高河床等. 本文通过对濠河中、下游典型剖面上的沉积物磁性参数测量,分析了沉积物中 SiO_2 质量分数($w(\text{SiO}_2)$)的变化规律,初步探讨了石英尾砂对濠河中、下游沉积物磁学性质所产生的影响,以及沉积物磁性特征与沉积环境的关系,为应用环境磁学方法监控、评估及治理濠河提供新的依据.

2 样品采集与实验方法

安徽凤阳县是我国石英砂生产基地,主要采用湿法生产,濠河为该县的石英砂生产提供了大量的水资源,然而,在生产过程中产生的石英尾砂大量地被冲进濠河,影响了濠河沉积物的磁学性质. 为了弄

清石英尾砂对濠河中、下游沉积物磁学性质的影响,本文在濠河河床采集具有代表性的样品进行测试分析.

本文选择濠河的枯水季节,在濠河中游、下游和濠河入淮河口未受人为干扰的河床上,从河床地表一直到黑色淤泥层,以平均 4 cm 的间距采集样品. 采集样品的沉积物剖面 HH1、HH2 和 HH3 的平面位置如图 1 所示. 其中,剖面 HH1 深 120 cm,剖面 HH2 深 116 cm,剖面 HH3 深 80 cm. 剖面 HH1、HH2 和 HH3 的中部和浅部沉积物的主要成分是石英尾砂,分层较明显. 以颜色为划分依据,这三条剖面纵向上均可分四层. 剖面 HH1:120~106 cm 呈灰黑色,为河床淤泥层,不见石英尾砂,106~74 cm 呈白色,74~31 cm 呈黄色,中间含泥土夹层,31~0 cm 呈白色;剖面 HH2:116~98 cm 呈黑色,为河床淤泥层,不见石英尾砂,98~62 cm 呈浅黄色,62~30 cm 呈黄色,中间含泥土夹层,30~0 cm 呈白色;剖面 HH3:80~62 cm 呈深黑色,为河床淤泥层,不见石英尾砂,62~40 cm 呈白色,40~24 cm 呈灰色,24~0 cm 呈灰白色.

样品采回后,置于室内自然风干,然后过 60 目

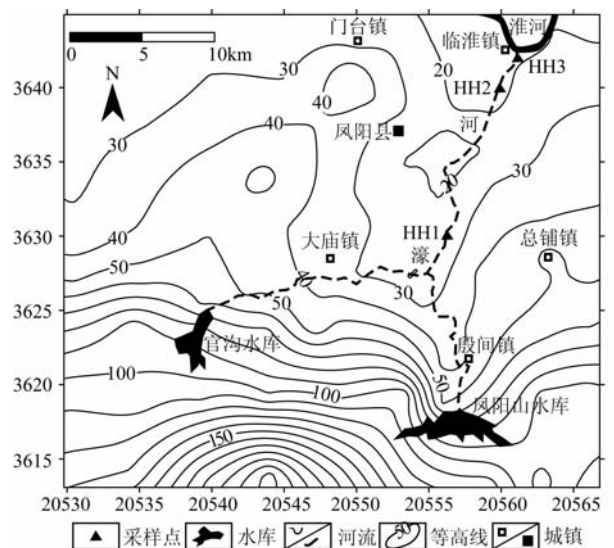


图 1 采样点位置分布图

Fig. 1 Distribution map of sampling locations

筛,再将过筛的样品装入 8 cm^3 方形无磁性塑料样品盒,压实、称重(每个样品的质量约 5 g),进行岩石磁学参数测量.具体测量步骤如下:

(1) 用 KLY-4S 卡帕桥磁化率仪测量低场体积磁化率(κ);

(2) 用 D-2000 交变退磁仪测量非磁滞剩磁(交变场峰值为 100 mT ,稳定直流磁场为 0.05 mT);

(3) 用 IM10-30 脉冲磁化仪在 300 mT 的脉冲磁场中获得等温剩磁($\text{IRM}_{300\text{ mT}}$),在 1 T 的脉冲磁场中获得饱和等温剩磁(SIRM),通过公式 $S_{\text{ratio}} = \text{IRM}_{300\text{ mT}}/\text{SIRM}$, $\text{HIRM} = 0.5 \times (\text{SIRM} - \text{IRM}_{300\text{ mT}})$ 计算 S_{ratio} 和 HIRM ^[20~21].选取典型样品测量等温剩磁获得曲线和反向退磁曲线;

(4) 用 KLY-4S 卡帕桥磁化率仪和 CS-3 温度控制系统在氩气环境下测量典型样品的磁化率随温度变化特征(κ - T 曲线).

所有剩磁测量均在 JR-6A 旋转磁力仪上完成.经质量校正后得到质量磁化率(χ)、饱和等温剩磁(SIRM)、非磁滞剩磁(ARM)、非磁滞剩磁磁化率(χ_{ARM})以及比值参数 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 和 χ_{ARM}/χ .岩石磁学参数测量在中国地质大学(北京)古地磁学与环境磁学实验室完成.完成岩石磁学参数测量后,再用氢氟酸法测量所有样品的 SiO_2 质量分数($w(\text{SiO}_2)$), $w(\text{SiO}_2)$ 的测试在安徽科技学院实验中心完成.

此外,本文还对石英尾砂样品进行了等温剩磁获得曲线和反向退磁曲线的测量,对石英尾砂样品及濠河中、上游的旱地表土样品进行了 $w(\text{SiO}_2)$ 的测试,石英尾砂样品及濠河上游的旱地表土样品取自文献[22],相关磁性参数参考文献[22].

3 实验结果分析

3.1 磁性参数随深度的变化特征

不同的磁性参数具有不同的矿物含义.例如,磁化率(χ)的大小能粗略反映样品中磁性矿物含量,饱和等温剩磁(SIRM)反映样品中所有具有携带剩磁能力的磁性颗粒的含量^[1].非磁滞剩磁(ARM)和非磁滞剩磁磁化率(χ_{ARM})对单畴和较小的准单畴磁铁矿颗粒最为敏感^[23],但同时受到携磁矿物含量的影响^[24],而比值参数 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 、 χ_{ARM}/χ 则可以消除磁性矿物含量因素的影响,反映磁性颗粒粒度的相对变化,比值越大指示磁性颗粒粒度越细^[15,25]. S_{ratio} 、HIRM 及剩磁矫顽力(B_{cr})主要反映不完整反铁磁性矿物与亚铁磁性矿物的相对比例.

S_{ratio} 值随不完整反铁磁性矿物含量的增加而下降.相对亚铁磁性矿物,不完整反铁磁性矿物具有较高的 HIRM 和 B_{cr} 值.

在濠河中、下游沉积物的典型剖面上,样品的磁性参数随采样深度的不同出现规律性的变化(图 2). χ 和 SIRM 的原始测量值随深度的增加而增大,中间有起伏变化(图 2a, b).其中,以剖面 HH1 的测量值最低,剖面 HH3 的测量值最高,剖面 HH2 的测量值较剖面 HH1 略高,三条剖面中的最小值相近.这也表明在这三条剖面中,剖面 HH3 的磁性矿物的平均含量最高. ARM 和 χ_{ARM} 随深度的变化关系与 χ 和 SIRM 随深度变化的关系相似(图 2c, d),深部的值明显高于中部和浅部.如剖面 HH1 和 HH2,深部的最大值是中部和浅部最小值的近 30 倍,这表明三条剖面中磁性矿物颗粒大小相差较大,且在同一条剖面中的磁性矿物颗粒大小差异悬殊,深部的磁性矿物颗粒大小较中部和浅部的细.图 2(a~d)还显示出 χ 和 SIRM 值较高的样品,其 ARM 和 χ_{ARM} 值也较高,说明这些样品中随磁性矿物含量增高,磁性矿物的粒度减小. S_{ratio} 整体上是深部略低于中部和浅部, HIRM 是深部略高于中部和浅部(图 2e, f),这表明深部低矫顽力的软磁成分相对偏低,浅部和中部略高,而高矫顽力的硬磁成分的相对含量是深部略高,中部和浅部略低.三条剖面所有样品的 S_{ratio} 都大于 84.0% ,典型样品在 300 mT 脉冲磁场作用下至少获得其饱和等温剩磁的 91% ,剩磁矫顽力(B_{cr})最大值为 39.0 mT (图 3(a~d)).这表明三条剖面 and 石英尾砂的主要成分是软磁性的亚铁磁性矿物.比值参数 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 和 χ_{ARM}/χ 随深度的变化规律与 ARM、 χ_{ARM} 基本一致,同样是深部高于中部和浅部(图 2g, h).三条剖面深部样品的 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM} > 6 \times 10^{-4}\text{ m/A}$, $\chi_{\text{ARM}}/\chi > 4$,中部和浅部绝大多数样品的 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM} < 6 \times 10^{-4}\text{ m/A}$, $\chi_{\text{ARM}}/\chi < 4$,说明三条剖面中部和浅部样品中的磁性矿物以较粗的准单畴和多畴颗粒为主^[25],而深部样品中含有一定量的单畴颗粒.

3.2 磁化率随温度的变化特征

样品的 κ - T 曲线能有效地反映热处理过程中磁性矿物的转化特征^[26,27].从剖面 HH1、HH2、HH3 及石英尾砂中挑选具有代表性的典型样品测量 κ - T 曲线(图 4),结果显示所测样品的 κ - T 曲线特征基本一致,当加热至 $580\text{ }^\circ\text{C}$ 左右时,所有样品的磁化率急剧降至零值附近,这表明样品中主要磁性矿物是磁铁矿.所有样品的冷却曲线均高于加热曲

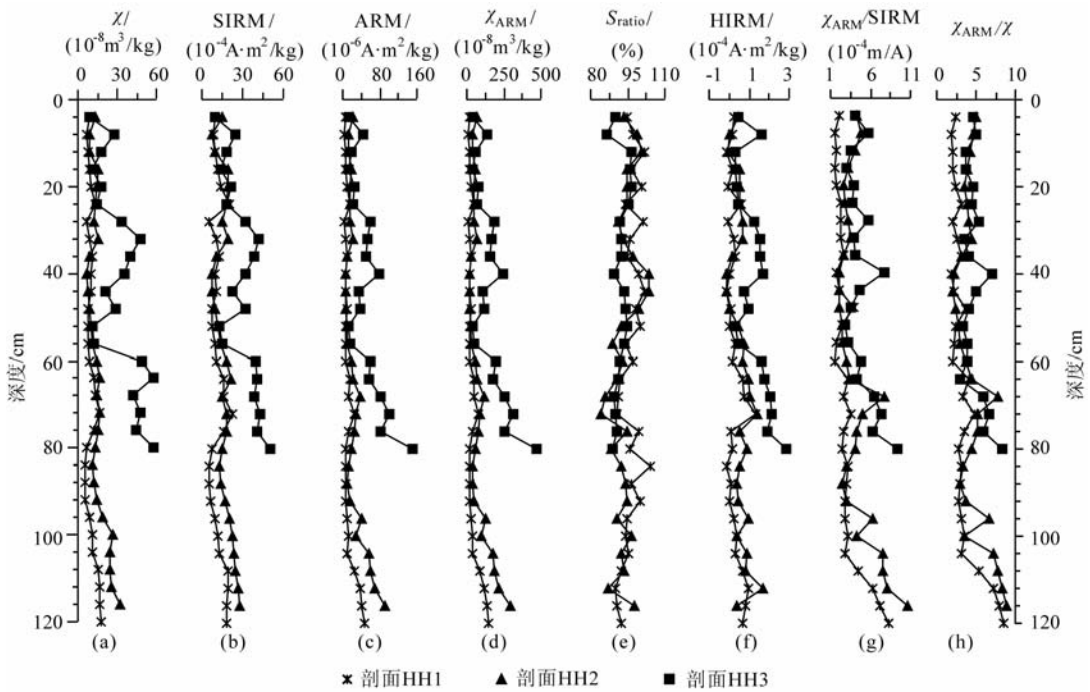


图 2 濠河典型剖面上的沉积物的磁性参数随采样深度的变化
Fig. 2 Magnetic parameters of sediments of the representative section in the Haohe River varied with sampling depth

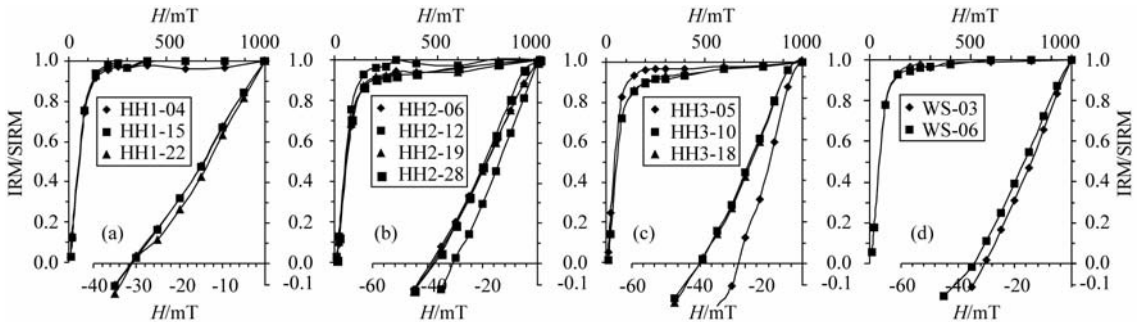


图 3 濠河典型剖面上的沉积物及典型石英尾砂样品的等温剩磁获得曲线和反向场退磁曲线
(a)~(c) 沉积物样品; (d) 石英尾砂样品。

Fig. 3 IRM acquisition curves and DC demagnetization curves for sediments of the representative section in the Haohe River and the typical quartz tail-sands samples
(a)~(c) sediments samples; (d) quartz tail-sands samples.

线,且在 580 °C 以下磁化率随温度的降低而急剧升高,并在 450 °C 附近升至最高,这表明样品在加热过程中有磁铁矿生成。

3.3 SiO₂ 含量随深度的变化特征

石英尾砂的主要成分是逆磁性物质 SiO₂, 实验测得石英尾砂中 $\omega(\text{SiO}_2)$ 的平均值是 92.7%。濠河中、上游旱地表土 $\omega(\text{SiO}_2)$ 的平均值是 33.8%, 剖面 HH1、HH2、HH3 的样品中 $\omega(\text{SiO}_2)$ 整体上随深度增加呈递减趋势, 中间有起伏变化(图 5)。其中, 剖面 HH1 样品 $\omega(\text{SiO}_2)$ 的平均值最高, 是 82.7%,

剖面 HH3 样品 $\omega(\text{SiO}_2)$ 的平均值最低, 是 65.8%, 剖面 HH2 样品 $\omega(\text{SiO}_2)$ 的平均值居于剖面 HH1 与剖面 HH3 之间, 是 78.4%。剖面 HH1、HH2 的中部和浅部样品 $\omega(\text{SiO}_2)$ 的平均值高达 80%, 与石英尾砂 $\omega(\text{SiO}_2)$ 平均值 92.7% 较为接近, 远大于濠河中、上游旱地表土 $\omega(\text{SiO}_2)$ 的平均值 33.8%, 这说明石英尾砂严重影响了濠河中、下游的沉积物。三条剖面 $\omega(\text{SiO}_2)$ 随深度的变化特征反映了石英尾砂对濠河沉积物的影响过程, 沉积物中 $\omega(\text{SiO}_2)$ 越高, 表明石英尾砂对濠河沉积物的影响越大。

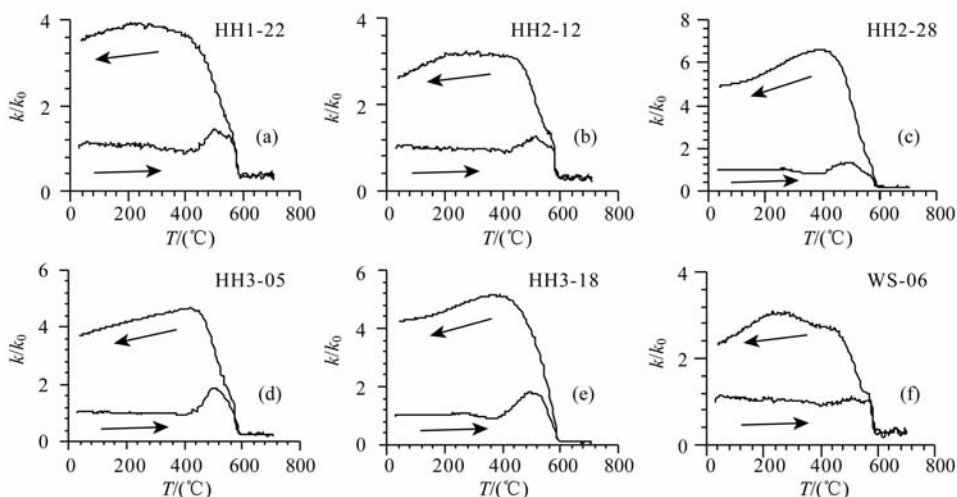


图4 濠河典型剖面上的沉积物及典型石英尾砂样品的 κ - T 曲线

(a)~(e) 沉积物样品;(f) 石英尾砂样品.

Fig. 4 κ - T curves for sediments of the representative section in the Haohe River and the representative samples of quartz tail-sands

(a)~(e) sediments samples; (f) quartz tail-sands samples.

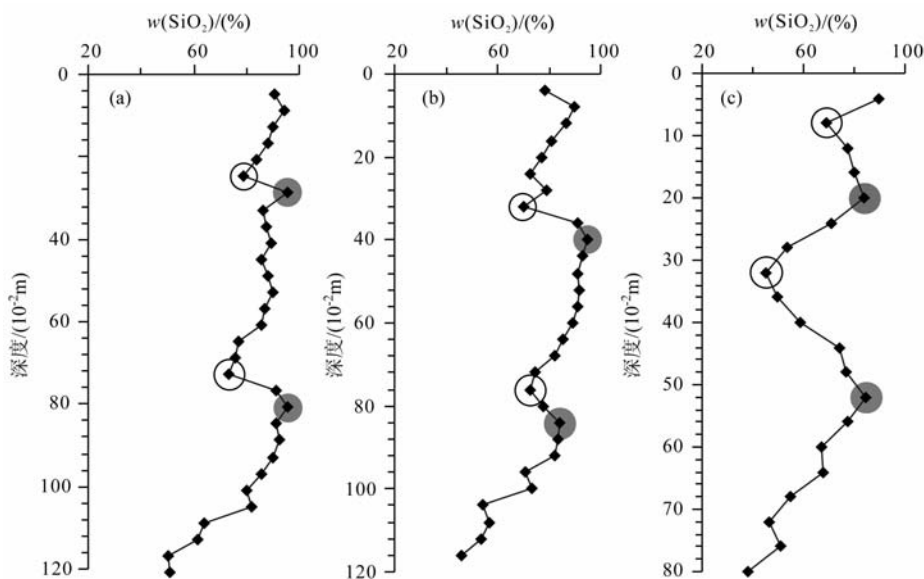


图5 濠河典型剖面上的沉积物 $w(\text{SiO}_2)$ 随采样深度的变化

(a) 剖面 HH1;(b) 剖面 HH2;(c) 剖面 HH3.

Fig. 5 $w(\text{SiO}_2)$ of sediments of the representative section in the Haohe River varied with depth

(a) HH1 section; (b) HH2 section; (c) HH3 section.

4 讨论

4.1 沉积物磁学特征对比分析

饱和等温剩磁与磁化率(SIRM- χ)散点图可以反映磁性矿物类型的变化. 当样品中含有多种磁性矿物时,SIRM- χ 无明显线性关系;而样品中一种磁性矿物占绝对优势或仅有一种磁性矿物时,SIRM- χ

将具有明显的线性关系^[1,28]. 图 6a 是剖面 HH1、HH2、HH3 所有样品的 SIRM- χ 散点图,该图中的投影点呈强线性相关关系($R_1 = 0.96$, $R_2 = 0.93$, $R_3 = 0.98$),说明沉积物中的一种磁性矿物含量占绝对优势. 结合样品的 κ - T 曲线分析(图 4)知沉积物中的该磁性矿物是磁铁矿. 图 6a 显示剖面 HH1 的 SIRM- χ 散点图中的投影点明显低于剖面 HH2 和 HH3,而剖面 HH1 的 SIRM- χ 散点图的斜率 k_1

明显高于剖面 HH2 和 HH3 的斜率 k_2 、 k_3 。这也说明剖面 HH1 中磁性矿物含量较剖面 HH2、HH3 低,剖面 HH1 中磁性矿物的粒度较剖面 HH2、HH3 粗。非磁滞剩磁磁化率与磁化率的比与磁化率 (χ_{ARM}/χ) 散点图反映不同粒度磁性矿物对磁化率的贡献^[1],图 6b 显示在剖面 HH1、HH2、HH3 中,随磁化率的增加,细粒磁性矿物对磁化率的贡献也在不断增加,但剖面 HH3 单畴颗粒对磁化率贡献明显趋缓,这说明剖面 HH3 磁化率的增加还由磁性矿物含量控制。图 6a 显示从剖面 HH1 到剖面 HH3, χ 和 SIRM 值逐渐增加,表明剖面 HH3 磁性矿物含量高于剖面 HH1 和 HH2。在同一条剖面中,深部样品的 χ 和 SIRM 值高于浅部和中部(图 2a, b),表明深部样品磁性矿物含量高于中部和浅部,而反映磁性矿物粒度特征参数(图 2c~h)显示剖面 HH3 中细颗粒磁性矿物含量最高,剖面 HH1 中细颗粒磁性矿物含量最低。在同一条剖面中,深部样品的磁性矿物粒度细,中部和浅部样品的磁性矿物粒度较粗。由于石英尾砂中磁性矿物含量较低,磁性矿物的粒度较粗^[22],当大量石英尾砂涌入濠河后,在其稀释作用下,沉积物的磁学特征已发生了明显改变,与河流受其他工业污染导致沉积物磁性增强不同^[1],石英尾砂使濠河沉积物的磁性减弱,磁性矿物的粒度变粗。

4.2 沉积物中 $w(\text{SiO}_2)$ 与磁性参数相关性分析

在剖面 HH1、HH2、HH3 上,图 2 显示中部和浅部样品的磁性参数 (χ 、SIRM 和 χ_{ARM}) 值低于深部,图 5 显示中部和浅部样品的 $w(\text{SiO}_2)$ 高于深部,说明在濠河沉积物样品中, $w(\text{SiO}_2)$ 随磁性参数

(χ 、SIRM 和 χ_{ARM}) 值的增大而减小。剖面 HH1、HH2、HH3 中沉积物样品的 $w(\text{SiO}_2)$ 与磁性参数 (χ 、SIRM 和 χ_{ARM}) 线性回归分析表明(图 7),两者之间呈负相关关系 ($-0.88 \leq R \leq -0.81$),这说明沉积物的磁性参数 (χ 、SIRM 和 χ_{ARM}) 与 $w(\text{SiO}_2)$ 都可用于分析石英尾砂对濠河沉积物的影响。当沉积物中 $w(\text{SiO}_2)$ 越高,磁性参数 (χ 、SIRM 和 χ_{ARM}) 越低时,石英尾砂对濠河沉积物的影响就越大。

4.3 磁性参数随深度变化的环境意义

在濠河中、下游沉积物剖面上,样品中 $w(\text{SiO}_2)$ 和磁性参数随深度变化规律基本相似。以颜色的不同可将沉积物剖面在纵向上划分成四个磁性层,如剖面 HH1、HH2、HH3 的沉积物样品(图 2、图 5)。而剖面越靠近上游的石英砂厂,其磁性层的形成和变化就越能反映石英尾砂对濠河沉积物的影响。以最靠近濠河上游石英砂厂的剖面 HH1 为例,由深至浅可分成第一、第二、第三、第四层(图 8),下面对各层的 $w(\text{SiO}_2)$ 及磁学特征进行描述并分析其形成过程及环境意义。

第一层(120~106 cm):呈黑色,属河床淤泥层,不见石英尾砂, $w(\text{SiO}_2)$ 的平均值为 56.7%,在整条剖面平均值中最小,与剖面 HH2、HH3 底部 $w(\text{SiO}_2)$ 平均值(52.9%、51.5%)相近。 χ 与 SIRM 的平均值分别为 $16.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $18.8 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$,在整条剖面中最高,接近濠河上游旱地表土 χ 和 SIRM 的平均值($27.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $21.7 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$)^[22]。表征磁性矿物粒度大小的参数 ARM、 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/SIRM 与 χ_{ARM}/χ 的平均值,在整条剖面中也是最高的,其中, χ_{ARM}/SIRM 和

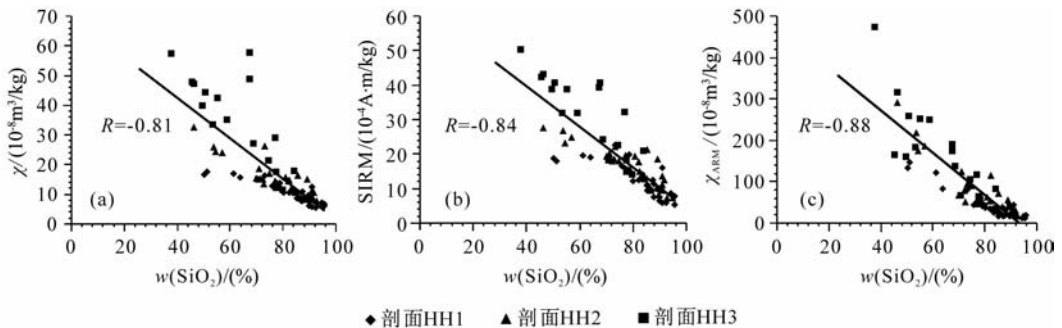


图 7 濠河典型剖面上的沉积物样品 $w(\text{SiO}_2)$ 与磁性参数线性相关图

(a) χ - $w(\text{SiO}_2)$ 相关图; (b) SIRM- $w(\text{SiO}_2)$ 相关图; (c) χ_{ARM} - $w(\text{SiO}_2)$ 相关图。

Fig. 7 Linear correlation map for $w(\text{SiO}_2)$ and magnetic parameters of sediments of the representative section in the Haohe River

(a) Correlation map for χ - $w(\text{SiO}_2)$; (b) Correlation map for SIRM- $w(\text{SiO}_2)$;

(c) Correlation map for χ_{ARM} - $w(\text{SiO}_2)$.

χ_{ARM}/χ 的平均值分别是 $6.5 \times 10^{-4} \text{ m/A}$ 和 7.3, 说明该层含有一定量的单畴颗粒^[25]. 而该层的磁性特征与石英尾砂无关^[22], 说明该层受石英尾砂的影响较小.

第二层(106~74 cm): 呈白色, 沉积物以石英尾砂为主, $w(\text{SiO}_2)$ 的平均值为 88.5%, 说明该层受石英尾砂影响严重. χ 与 SIRM 的平均值分别为 $8.3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $9.4 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$, 均为整条剖面中的最小值, 而 ARM、 χ_{ARM} 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 与 χ_{ARM}/χ 的平均值都远小于第一层, 其中, $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 和 χ_{ARM}/χ 的平均值分别为 $2.8 \times 10^{-4} \text{ m/A}$ 和 3.1, 说明该层磁性矿物以较粗的多畴为主^[25]. 该层磁性特征与石英尾砂基本一致^[22], 进一步说明该层受到石英尾砂影响严重.

第三层(74~31 cm): 呈黄色, 沉积物中含大量石英尾砂, 并夹有泥土层, $w(\text{SiO}_2)$ 的平均值为 84.2%, 说明该层受石英尾砂影响严重. χ 与 SIRM 的平均值分别为 $10.3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $12.1 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$, 处于第一层和第二层之间, 而 ARM、 χ_{ARM} 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 与 χ_{ARM}/χ 的平均值均较低, 其中, $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 和 χ_{ARM}/χ 的平均值分别为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ m/A}$ 和 3.0, 说明该层磁性矿物也以较粗的多畴为主, 该层磁性特征与石英尾砂基本相一致, 也说明该层受石英尾砂影响严重. 而中间的泥土夹层表明在形成这些夹层时涌入濠河的石英尾砂数量有限, 石英尾砂对这些泥土夹层的磁性性质影响不大. 第四层(31~0 cm): 呈白色, 沉积物以石英尾砂为主, $w(\text{SiO}_2)$ 的平均值高达 88.8%, 在整条剖面平均值中最大, 说明该层受石英尾砂影响严重. χ 和 SIRM 的平均值分别

为 $8.9 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $11.1 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$, 处于第二层与第三层之间, ARM、 χ_{ARM} 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 与 χ_{ARM}/χ 的平均值 ($6.8 \times 10^{-6} \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^1$ 、 $21.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $1.9 \times 10^{-4} \text{ m/A}$ 和 2.3) 均为整条剖面上的最小值, 说明该层磁性矿物以较粗的多畴为主. 该层磁性特征与石英尾砂基本一致, 也表明该层受石英尾砂影响严重.

通过对濠河典型剖面 HH1 的 $w(\text{SiO}_2)$ 和磁性参数随深度变化特征的分析, 得到濠河沉积物中除第一层受石英尾砂的影响较小外, 第二、第三、第四层受石英尾砂的影响都较大. 表现出的主要特征是沉积物中的 $w(\text{SiO}_2)$ 高, 磁性矿物含量低, 磁性矿物粒径粗. 然而, 第二、第三、第四层的沉积物中 $w(\text{SiO}_2)$ 与磁性参数都显示在形成这些层时, 濠河沉积物受石英尾砂的影响并不一致, 这可能是由降雨量与河水动力能量变化造成的. 已有研究指出^[5,19], 沉积物的 χ_{ARM} 、 χ 值可以用来判别水动力能量的相对强弱, 其中, χ_{ARM} 较 χ 更有效. 当年降雨量增大, 河水动力能量增大, 濠河上游被雨水冲下来的石英尾砂增多, 在濠河中、下游沉积下来的石英尾砂增厚.

濠河各沉积层的形成受降雨量与河水动力能量变化的影响. 图 8a 是凤阳县近 30 年来年降雨量统计图(数据来自凤阳县气象局), 1979~1983 年的 5 年间, 年降雨量较少, 加上这段时期内凤阳县刚开始建厂生产石英砂, 石英砂年产量很低, 石英尾砂的排放量少, 从而排入濠河的石英尾砂也较少, 濠河沉积物受石英尾砂的影响也较少, 这时形成濠河沉积物中的第一个沉积层. 20 世纪 80 年代中期, 在我国开始

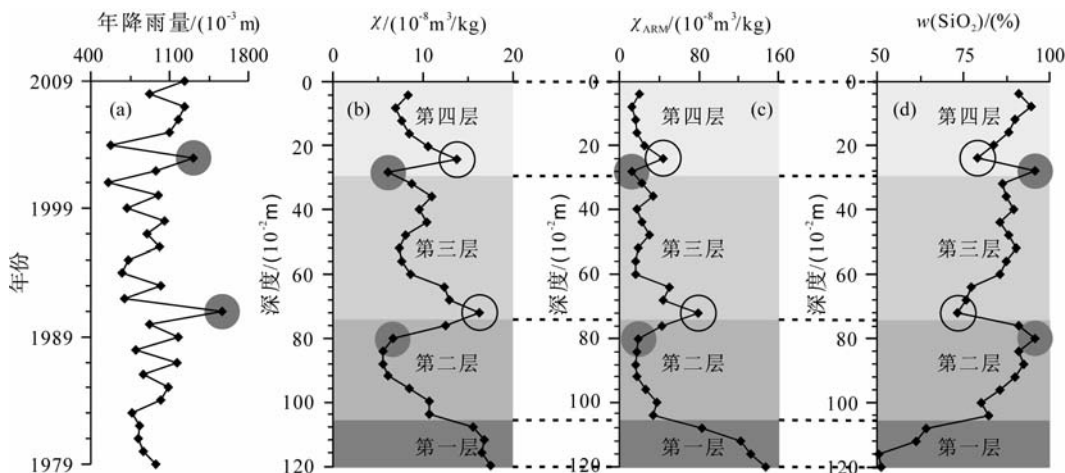


图 8 濠河典型剖面上的沉积物样品中 $w(\text{SiO}_2)$ 和磁性参数 (χ 、 χ_{ARM}) 随采样深度变化对照图

Fig. 8 The comparison drawing for $w(\text{SiO}_2)$ and magnetic parameters (χ , χ_{ARM}) varied with sampling depth of sediments of the representative section in the Haohe River

推广浮法玻璃技术,凤阳县的石英砂生产也相应进入快速发展时期,当年降雨量增加时,被雨水冲入濠河的石英尾砂明显增多,特别是在 1991 年,凤阳县的年降雨量激增至近三十年的最高值,这一年的夏季淮河流域出现了一次大的洪水,淮河、濠河水位都达到历史高位,被雨水冲入濠河的石英尾砂急剧增多,从而沉积物中的 $\omega(\text{SiO}_2)$ 创历史新高,沉积物的 χ_{ARM} 和 χ 值大幅降低,这时形成濠河沉积物中的第二个沉积层,如剖面 HH1 中 80 cm 处的极值点可能在这一时段形成(图 8). 接下来的十年内,凤阳县加强对濠河环境的整治力度,伴随年降雨量的减少与石英砂企业生产用水的增加,濠河沿官沟水库这一支的上游逐渐出现断流现象,造成排入濠河的石英尾砂大量减少,沉积物中 $\omega(\text{SiO}_2)$ 降低,黏土含量增加,沉积物的 χ_{ARM} 和 χ 值升高,于是形成濠河沉积物中第三个沉积层,如剖面 HH1 中 72 cm 处的极值点可能在这个时段内形成(图 8). 2001~2009 年期间,由于全国石英砂的需求量增加,凤阳县石英砂年产量也急剧增加,石英尾砂的排放量也达到了历史峰值,随降雨量与河水动力能量的增加,尤其是 2003 年凤阳县的年降雨量达到近 30 年的第二个高峰,淮河流域又出现了一次大的洪水,淮河和濠河的水位达到了历史高位,被雨水冲入濠河的石英尾砂急剧增加,沉积物中 $\omega(\text{SiO}_2)$ 再创新高, χ_{ARM} 、 χ 降至新的谷点,这时形成了濠河沉积物中的第四个沉积层,如剖面 HH1 中 28 cm 处的极值点(图 8)可能在这个时段形成.

沉积物的沉积速率随濠河的平面位置不同而不等. 而相同时间段内的沉积物具有较强的相似性,如剖面 HH2 和 HH3 的 $\omega(\text{SiO}_2)$ 及磁性参数随深度的变化规律与剖面 HH1 基本一致(图 5, 图 2),为了较为准确的将这些参数进行横向的对比,需要先消除沉积速率的影响,在剖面 HH1、HH2、HH3 中,以剖面 HH3 的 4 个磁性层为标准,用线性内插的方法将剖面 HH1 与 HH2 中的各样品的磁性参数在纵向上投影到剖面 HH3 的采样深度范围内,并用比值法消除石英尾砂中 SiO_2 对沉积物磁性参数的稀释作用. 经上述处理后,濠河剖面 HH1、HH2、HH3 沉积物中的 $\omega(\text{SiO}_2)$ 及磁性参数随深度的变化如图 9. 其中,剖面 HH1、HH2、HH3 的第一层(80~62 cm)中 χ 、SIRM、 χ_{ARM} 值存在明显差别,剖面 HH1 的值最小,剖面 HH3 的值最大,剖面 HH2 的值居中(图 9a, b, c),这与图 2 相一致. 但剖

面 HH1、HH2、HH3 第二、第三、第四层(62~0 cm)的 χ 、SIRM、 χ_{ARM} 值无明显差异(图 9a, b, c).

石英尾砂中的 SiO_2 对沉积物磁性参数产生较强的稀释作用. 图 9 显示在剖面 HH1、HH2、HH3 中,第二、第三、第四层(62~0 cm)的 (χ 、SIRM) 平均值分别是 ($80.7 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, $93.0 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$)、($83.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, $96.1 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$)、($85.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, $86.9 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$),彼此比较接近. 剖面 HH1、HH2 第二、第三、第四层(62~0 cm)的 (χ 、SIRM) 的平均值均较第一层(80~62 cm)的平均值 ($39.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, $44.3 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$)、($64.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, $59.9 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$) 高,剖面 HH3 第二、第三、第四层(62~0 cm)的 (χ 、SIRM) 的平均值与第一层(80~62 cm)的平均值 ($108.7 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, $91.2 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$) 相近. 而图 2(a, b) 的数据显示,剖面 HH1、HH2、HH3 中第一层(80~62 cm)的 (χ 、SIRM) 平均值都明显高于第二、第三、第四层(62~0 cm),说明消除石英尾砂对沉积物磁性参数的影响后,剖面 HH1、HH2、HH3 的样品中的 (χ 、SIRM) 值显著增大,证实了受石英尾砂的稀释作用,沉积物中磁性矿物的含量将大大降低.

图 9(c, d, e) 显示濠河剖面 HH1、HH2、HH3 中 χ_{ARM} 的最小值是 $147.9 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM} > 6 \times 10^{-4} \text{ m/A}$, $\chi_{\text{ARM}}/\chi > 4$,说明在消除石英尾砂中 SiO_2 对沉积物磁性参数的稀释作用后,濠河剖面 HH1、HH2、HH3 的样品中磁性矿物以单畴颗粒为主^[25]. 而图 2(d, g, h) 显示剖面 HH1、HH2、HH3 的中部和浅部样品中的磁性矿物以较粗的准单畴和多畴颗粒为主,这说明大量石英尾砂涌入濠河后,石英尾砂控制了濠河沉积物的磁学性质.

在濠河入淮河口处,沉积物的来源多,形成环境复杂. 当淮河水位升高时,在濠河入淮河口区域会出现淮河水向濠河倒灌的现象,这时淮河水中携带的泥砂等物质将会在濠河入淮河口区域沉降下来,导致沉积物中的 $\omega(\text{SiO}_2)$ 大幅减小,磁性参数值大幅增加. 图 9f 显示濠河入淮河口的剖面 HH3 的样品中, $\omega(\text{SiO}_2)$ 较远离淮河入口的剖面 HH1、HH2 的都要低. 剖面 HH3 上 32 cm 处的极值点可能是在河水向濠河倒灌时形成的(图 5、图 2). 濠河沉积物中的 $\omega(\text{SiO}_2)$ 和磁性参数随深度的变化关系还反映出石英尾砂在濠河中沉积的速度非常快,沉积后的次生变化并不明显.

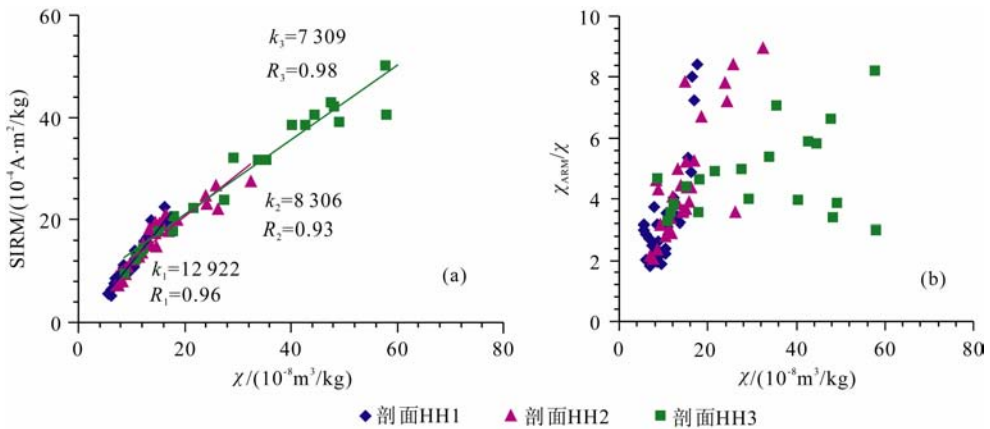


图 6 濠河典型剖面上的沉积物样品的磁学参数散点图

(a) SIRM- χ 散点图;(b) χ_{ARM}/χ - χ 散点图.

Fig. 6 Scatter plot of magnetic parameters for sediments samples of the representative section in the Haohe River

(a) Scatter plot for SIRM- χ ; (b) Scatter plot for χ_{ARM}/χ - χ .

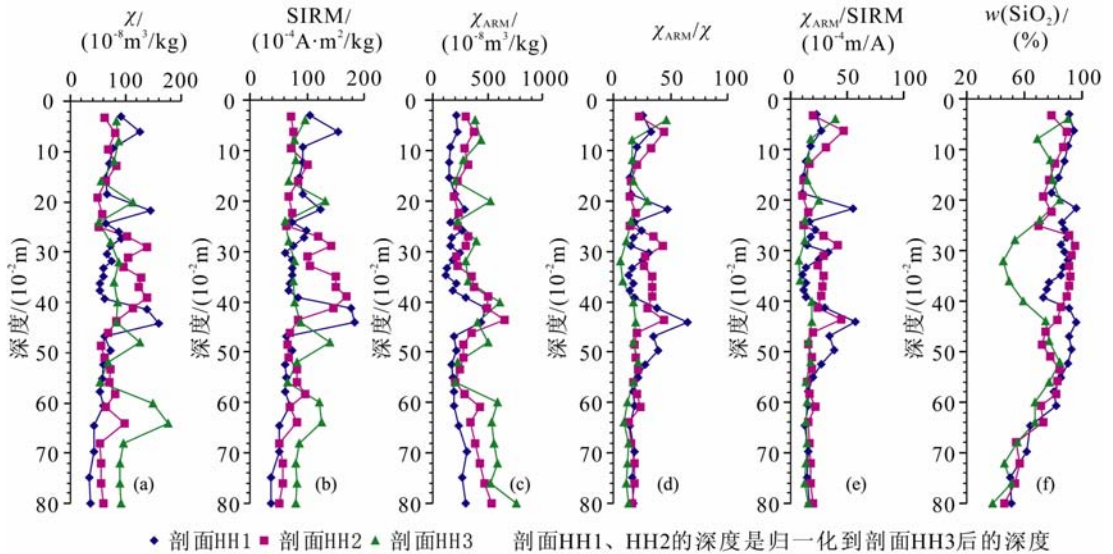


图 9 经归一化处理后濠河典型剖面上的沉积物的磁性参数随采样深度的变化

Fig. 9 Magnetic parameters of sediments of the representative section in the Haohe River varied with sampling depth after normalization

5 结 论

本文通过对濠河中、下游三条典型沉积物剖面上的样品的磁性参数和 $w(\text{SiO}_2)$ 的测量与分析,得出以下结论:

(1)濠河中、下游三条典型沉积物剖面中的磁性参数是上部和中部比下部低, $w(\text{SiO}_2)$ 是上部和中部比下部高,沉积物中的主要磁性矿物是磁铁矿.

(2)濠河沉积物在纵向上按磁性参数曲线的变

化特征可分成 4 个磁性层,其中,第二、第三、第四层沉积物受石英尾砂影响较大, $w(\text{SiO}_2)$ 平均值高达 80%,在石英尾砂稀释作用下,这三层沉积物的磁性减弱,磁性矿物的粒度变粗,其磁学性质由石英尾砂所控制.

(3)消除石英尾砂中 SiO_2 对沉积物磁性参数的稀释作用后,第二、第三、第四层沉积物的磁性参数 (χ 、SIRM、 χ_{ARM}) 显著增大,且与第一层沉积物的磁性参数无明显差异,指示濠河沉积物受石英尾砂稀释作用的影响显著.

(4)磁性参数对濠河沉积环境的变化十分敏感,

当降雨量增大,河水动力能量增大时,濠河上游被雨水冲下来的石英尾砂增多,在濠河中、下游沉积下来的石英尾砂增厚,对应沉积物的磁性参数值低, $\omega(\text{SiO}_2)$ 高,濠河中、下游沉积物的磁性参数(χ 、SIRM、 χ_{ARM})与 $\omega(\text{SiO}_2)$ 之间存在负相关关系($-0.88 \leq R \leq -0.81$),表明磁性参数可用于分析石英尾砂对濠河沉积物的影响。同时,濠河沉积物磁性参数的变化也指示沉积环境的变化。

致 谢 各位评审专家为本文提出了宝贵的修改意见,中国科学院地质与地球物理研究所赵应权博士在数据处理、图件整饰与文字修改上进行了多次指导,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献(References)

- [1] Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism. London: Allen and Unwin, 1986
- [2] Mayer T, Morris W A, Versteeg K J. Feasibility of using magnetic properties for assessment of particle-associated contaminant transport. *Water Qual. Res. J. Can.*, 1996, **31**: 741~752
- [3] 张春霞, 黄宝春, 刘青松. 钢铁厂周围不同污染介质的磁学性质及其环境意义. *地球物理学报*, 2009, **52**(11): 2826~2839
- Zhang C X, Huang B C, Liu Q S. Magnetic properties of different pollution receptors around steel plants and their environmental significance. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(11): 2826~2839
- [4] 据宜太, 王少怀, 张庆鹏等. 福建三明地区被污染土壤的磁学性质及其环境意义. *地球物理学报*, 2004, **47**(2): 282~288
- Ju Y T, Wang S H, Zhang Q P, et al. Mineral magnetic properties of polluted topsoil: A case study in Sanming city, Fujian province, southeast China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47**(2): 282~288
- [5] Scholger R. Heavy metal pollution monitoring by magnetic susceptibility measurements applied to sediments of river Mur (Styria, Austria). *Eur. J. Environ. Eng. Geophys.*, 1998, **3**: 25~37
- [6] 周开胜, 孟 翊, 刘苍宇等. 长江口北支兴隆沙 XL2 孔沉积物的磁性特征与沉积环境分析. *沉积学报*, 2008, **26**(2): 300~307
- Zhou K S, Meng Y, Liu C Z, et al. Magnetic properties and sedimentary environment of core XL2 on Xinglong sand in the north branch, the Yangtze Estuary. *Acta Sedimentologica Sinica* (in Chinese), 2008, **26**(2): 300~307
- [7] 张卫国, 俞立中, 陆 敏. 长江口滩涂沉积物氧化铁与磁性特征的关系. *地球物理学报*, 2003, **46**(1): 79~85
- Zhang W G, Yu L Z, Lu M. Relationship between iron oxides and magnetic properties in intertidal sediments of the Yangtze estuary, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, **46**(1): 79~85
- [8] Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J, et al. Influence of the inter tropical convergence zone on the East Asian monsoon. *Nature*, 2007, **445**(7123): 74~77
- [9] Doner L. Late-Holocene paleoenvironments of northwest Iceland from lake sediments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, **193**(3-4): 535~560
- [10] 李海燕, 张世红, 方念乔等. 孟加拉湾 MD77-181 岩芯磁学记录及其古环境意义. *科学通报*, 2006, **51**(18): 2166~2174
- Li H Y, Zhang S H, Fang N Q, et al. Magnetic records of Core MD77-181 in the Bay of Bengal and their environmental implications. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2006, **51**(18): 2166~2174
- [11] 李海燕, 张世红, 方念乔. 东帝汶海 MD98-2172 岩芯磁记录与还原成岩作用过程. *第四纪研究*, 2007, **27**(6): 1023~1030
- Li H Y, Zhang S H, Fang N Q. Mineral magnetic investigation of core MD98-2172 in eastern Timor Sea and reductive diagenesis process. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2007, **27**(6): 1023~1030
- [12] Sangode S J, Rajiv S, Phartiyal B, et al. Environmental magnetic studies on some Quaternary sediments of varied depositional settings in the Indian sub-continent. *Quat. Int.*, 2007, **159**(1): 102~118
- [13] Verosub K L, Roberts A P. Environmental magnetism: past, present, and future. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**(B2): 2175~2192
- [14] Dekkers M J. Environmental magnetism: an introduction. *Geologie en Mijnbouw*, 1997, **76**(1-2): 163~182
- [15] 牛军利, 杨作升, 李云海等. 长江与黄河河口沉积物环境磁学特征及其对比研究. *海洋科学*, 2008, **32**(4): 24~30
- Niu J L, Yang Z S, Li Y H, et al. The characteristics of the environmental magnetism in sediment from the river mouths of the Changjiang River and the Huanghe River and their comparison study. *Marine Sciences* (in Chinese), 2008, **32**(4): 24~30
- [16] Evans M E, Heller F. Environmental Magnetism. London: Academic Press, 2003
- [17] Yu L Z, Oldfield F. A multivariate mixing model for identifying sediment source from magnetic measurements. *Quaternary Research*, 1989, **32**(2): 168~181
- [18] Hu S, Wang Y, Appel E, et al. Magnetic, geochemical, and biological processes towards acidification of Yangzonghai Lake caused by a power plant in Yunnan, southwestern China. *Phys. Chem. Earth*, 2003, **28**: 711~717
- [19] 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
- Wang J, Liu Z C, Jiang W Y, et al. A relationship between susceptibility and grain-size and minerals, and their paleo-environmental implication. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1996, **51**(2): 155~163

- [20] Maher B A. Characterisation of soils by mineral magnetic measurements. *Phys. Earth Planet. Int.*, 1986, **42**(1-2): 76~92
- [21] Robinson S G. The late Pleistocene palaeoclimatic record of North Atlantic deep-sea sediments revealed by mineral magnetic measurements. *Phys. Earth Planet. Int.*, 1986, **42**(1-2): 22~47
- [22] 李 勇, 李海燕. 石英尾砂对旱地表土磁性的影响及其环境意义. *现代地质*, 2008, **22**(5): 889~894
Li Y, Li H Y. Magnetic influence of quartz tail-sands on the dry top soil and its environmental implications. *Geoscience (in Chinese)*, 2008, **22**(5): 889~894
- [23] Banerjee S K, King J, Marvin J. A rapid method for magnetic granulometry with applications to environmental studies. *Geophys. Res. Lett.*, 1981, **8**(4): 333~336
- [24] Yamazaki T, Ioka N. Cautionary note on magnetic grain-size estimation using the ratio of ARM to magnetic susceptibility. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**(7): 751~754
- [25] Oldfield F. Toward the discrimination of fine-grained ferrimagnets by magnetic measurements in lake and near-shore marine sediments. *J. Geophys Res.*, 1994, **99**(b5): 9045~9050
- [26] Dunlop D J, Ozdemir O. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. Cambridge (U. K.): Cambridge University Press, 1997
- [27] 李海燕, 张世红. 黄铁矿加热过程中的矿相变化研究-基于磁化率随温度变化特征分析. *地球物理学报*, 2005, **48**(6): 1384~1391
Li H Y, Zhang S H. Detection of mineralogical changes in pyrite using measurements of temperature-dependence susceptibilities. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(6): 1384~1391
- [28] Thompson R, Morton D J. Magnetic susceptibility and particle-size distribution in recent sediments of the Loch Lomond drainage basin. *Scotland. J. Sed. Petrol.*, 1979, **49**(3): 801~811

(本文编辑 汪海英)