

黄河三角洲潮滩沉积物磁性特征与沉积环境分析

彭 俊^{1,2}, 陈洪全¹, 马随随¹, 李志文¹

(1. 盐城师范学院城市与资源环境学院, 江苏 盐城 224002; 2. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 环境磁学方法作为沉积记录研究的重要手段, 已在黄土、湖泊和陆架沉积物中得到广泛应用, 但将此方法应用于潮滩沉积环境的研究并不多。因此, 通过测量黄河三角洲潮滩 YDZ1 柱样沉积物磁学和粒度参数, 结合 AMS¹⁴C 测年数据, 对末次冰盛期后黄河三角洲潮滩沉积物磁性特征与沉积环境进行分析。结果表明: 以假单畴 (PSD)~多畴 (MD) 晶粒为主的亚铁磁性矿物主导了潮滩沉积物的磁性特征, 磁学参数中的 χ_{ARM} , $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 和 χ_{ARM}/χ 可视为粘土 (<4 μm) 或细粒级组分 (<32 μm) 含量的代用指标。潮滩沉积相序自上而下为泛滥平原相、河流相、三角洲前缘相、浅海相、潮坪相和河流相, 沉积环境表现为强 (陆相)、弱 (海相)、强 (陆相) 的演变过程。

关 键 词: 黄河三角洲; 潮滩; 磁性特征; 沉积环境

中图分类号: P736

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2014)10-1262-08

环境磁学是 20 世纪 70 年代中期以来发展起来的一门新兴边缘学科, 以磁性测量为核心手段, 磁性矿物为载体, 通过分析物质的磁性矿物组合和特征, 揭示不同时空尺度的环境作用、环境过程和环境问题。1986 年 Thompson 等^[1]出版的《Environmental Magnetism》一书系统地论述了如何将矿物的磁学性质应用于不同的环境研究, 对磁学在环境科学研究中的普及与应用起到极大的推动作用, 标志着环境磁学作为一门相对独立的分支学科正式建立。

由于磁性矿物是沉积物中普遍存在的组分, 磁性矿物的类型、含量和晶粒大小等特征, 与沉积物的物质来源^[2]、搬运能力^[3]和早期成岩作用^[4]等有关, 而这些因素的变化在很大程度上受到气候和环境变化的驱动。因此, 通过分析沉积物磁性特征, 可以提取沉积物来源^[2,3], 物源变化^[5], 沉积环境变化^[6-8], 以及沉积物源与沉积环境的耦合作用^[9]等信息。

就研究对象而言, 环境磁学主要集中在黄土^[10-12]、湖泊^[7, 13, 14]和海洋沉积物^[4, 15, 16]上, 而针对潮滩沉积物的则比较少。目前, 国外研究较多的是英国 Irish 海沿岸潮滩^[17-20], 国内是长江口潮滩^[3, 5, 21-24], 而

针对黄河三角洲潮滩的研究则较少, 尤其是利用磁学方法来研究潮滩沉积环境演变。因此, 本文通过测量黄河三角洲潮滩 YDZ1 柱样沉积物磁学参数, 结合粒度分析和 AMS¹⁴C 测年数据, 在分析黄河三角洲潮滩沉积物磁性特征的基础上, 对潮滩沉积环境演变进行研究。

1 研究区概况

现代黄河三角洲是以利津为顶点, 北起徒骇河口, 南到小清河口, 面积约 5 450 km² 的扇形区域, 地处 117°31'E~119°18'E 和 36°55'N~38°16'N 之间, 沉积物类型主要为粉砂和粘土质粉砂。现代黄河三角洲形成于 1855 年, 位于渤海盆地东部的济阳断陷和埕宁隆起之间, 它的形成与发展与渤海盆地的演化密切相关^[25]。15 万 aB.P. 左右黄河切穿三门峡后, 15~0.23 万 aB.P. 是黄河泥沙建造华北平原的主要时期, 0.23 万 aB.P. 以来黄河泥沙主要被输送入海, 其中 1 kaB.P. 以来年均入海沙量高达 11~12 亿 t。历史上黄河在广阔的华北平原上大幅度摆动入海, 泥沙大量沉降, 形成众多古黄河三角洲。1855 以来黄河入海流路改道 9 次, 其中 1855~1953 年自然改道 6 次, 这一时期黄河三角洲

收稿日期: 2013-05-06; 修订日期: 2013-10-26

基金项目: 河口海岸学国家重点实验室开放课题基金 (SKLEC-KF201305)、国家自然科学基金 (41306077) 资助。

作者简介: 彭 俊 (1980-), 男, 安徽宁国人, 讲师, 博士, 主要从事河口海岸沉积动力与地貌动力学研究。E-mail: ipengjun800506@

163.com

基本处于自然淤涨状态。1953年以后,入海流路人工改道3次,其中1953~1976年分别从神仙沟和刁口河流路入海,致使三角洲东北部迅速淤涨;1976年至今从清水沟流路入海,形成向三角洲东南方向凸出的河口沙嘴,其间于1996年在清水沟流路8号断面附近实施人工出汉,使入海口门向北摆动。

2 研究资料和方法

2010年4月30日~5月3日在黄河三角洲五号桩附近潮滩上钻取YDZ1柱样,孔深为31.66 m,采样率为90.6%,孔口坐标为38°01.08' N, 118°54.46' E。柱样采集后现场封存,运回实验室进行剖样和描述(颜色、气味和粒度),在有碳或贝壳处采集样品用于¹⁴C测年(送样到北京大学加速质谱实验室测定)。描样完成后以5 cm长度分样,用于磁学和粒度测定。

磁学测量样品经40℃左右低温烘干后,倒入玛瑙研钵内,挑出生物碎屑后磨成粉末状,称取10 g左右样品装入圆柱状聚乙烯样品盒内并压实,然后按照下列次序进行磁性测量:低频磁化率和高频磁化率;非磁滞剩磁(ARM, 交变磁场峰值100_{mT}、直流磁场0.04_{mT});饱和等温剩磁(SIRM, 磁场强度为1000_{mT});具有饱和等温剩磁的样品在-100_{mT}和-300_{mT}磁场中退磁后所带的剩磁(IRM_{-100mT}、IRM_{-300mT})。磁化率测量仪器为英国Bartington MS₂磁化率仪,非磁滞剩磁和等温剩磁测量仪器为英国Molspin公司生产的交变退磁仪、脉冲磁化仪和Minispin旋转磁力仪。根据测量结果,计算各磁学参数和比值参数,分别为单位质量磁化率 $c(\times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg})$ 、频率磁化率 $c_{\text{fd}}(\%)$ 、非磁滞剩磁磁化率 $c_{\text{ARM}}(\times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg})$ 、饱和等温剩磁 $\text{SIRM}(\times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg})$ 、硬剩磁 $\text{HIRM}(\times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg})$ 、退磁参数 $S_{-100}(\%)$ 、 $S_{-300}(\%)$ 、 c_{ARM}/c 、 $c_{\text{ARM}}/\text{SIRM}(\times 10^{-5} \text{ m/A})$ 、 $\text{SIRM}/c(\text{kA/m})$ 。

粒度测量采用Mastersize 2000型激光型粒度仪。测量前,先进行样品制备:将单个样品充分混合均匀后,取适量放入烧杯中,注入10 mL左右蒸馏水后,加入1~2滴浓度为30%的H₂O₂去除有机质,用超声波清洗机稍微振荡,加入1~2滴浓度为10%的HCl,使其充分反应去除钙质等,将烧杯注满蒸馏水静置24 h后抽去上层蒸馏水,加入1~2滴分散剂用超声波清洗机振荡后进行测量。

3 研究结果

根据磁性特征和岩性的垂向变化,可将YDZ1沉积柱样自下而上分为7层:第1层(31.66~24.0 m)、第2层(24.0~22.1 m)、第3层(22.1~13.5 m)、第4层(13.5~7.4 m)、第5层(7.4~3.6 m)、第6层(3.6~2.0 m)和第7层(2.0~0 m),各层的磁性特征变化如图1所示。

3.1 磁性矿物的含量

c 和SIRM通常指示样品中亚铁磁性矿物的含量,与 c 不同的是,SIRM不受顺磁性和抗磁性物质的影响^[1]。YDZ1柱样中 c 和SIRM呈显著的正相关性(图2),反映了 c 的变化主要由亚铁磁性矿物所贡献。HIRM通常反映了样品中不完整反铁磁性矿物的含量^[1]。第1层的 χ 、SIRM和HIRM向上呈波动增加趋势,在28 m和31 m深度附近存在小的峰值,全剖面HIRM均值最低出现在该层(表1);第2层的 χ 和SIRM比较稳定,全剖面这两个参数均值最低出现在该层,但HIRM却与第1层相当(表1);第3层的 χ 、SIRM和HIRM比第2层的明显增加,其中 χ 向上呈显著的增加趋势,在14.5 m深度附近出现全剖面的最大值,SIRM变化不大,但在21.5 m深度附近出现全剖面的最大值,HIRM呈波动增加趋势;第4层和第5层的 χ 、SIRM和HIRM向上均呈波动变化趋势,且第5层的波动幅度比第4层的大,在第4层9 m深度附近 χ 存在一个小的谷值,而HIRM存在一个小的峰值;第6层的 χ 、SIRM和HIRM呈剧烈波动趋势,其均值为全剖面最高(表1);第7层的 χ 、SIRM和HIRM向表层呈减小趋势。

χ_{ARM} 对稳定单畴亚铁磁性矿物颗粒极为敏感^[1]。从图1可以看出,除第6层和第7层外, χ_{ARM} 的变化趋势与 χ 基本一致。自第1层向第3层, χ_{ARM} 呈现波动上升趋势,其中在14.5 m深度附近出现最大值。第4层到第6层的 χ_{ARM} 呈现低-高-低的变化趋势,第7层的 χ_{ARM} 向表层呈现增加趋势,这与 χ 在该层的变化趋势相反。

3.2 磁性矿物的晶粒变化特征

磁性矿物的磁畴结构随晶粒大小而变化,通常分为多畴(MD, >10 mm)、假单畴(PSD, 0.1~10 mm)、稳定单畴(SSD, 0.04~0.06 mm)和超顺磁(SP, <0.03 mm)晶粒。沉积物的磁性特征随磁畴结构而改变,因此,通过磁畴可以获取磁性矿物晶粒大小信息。

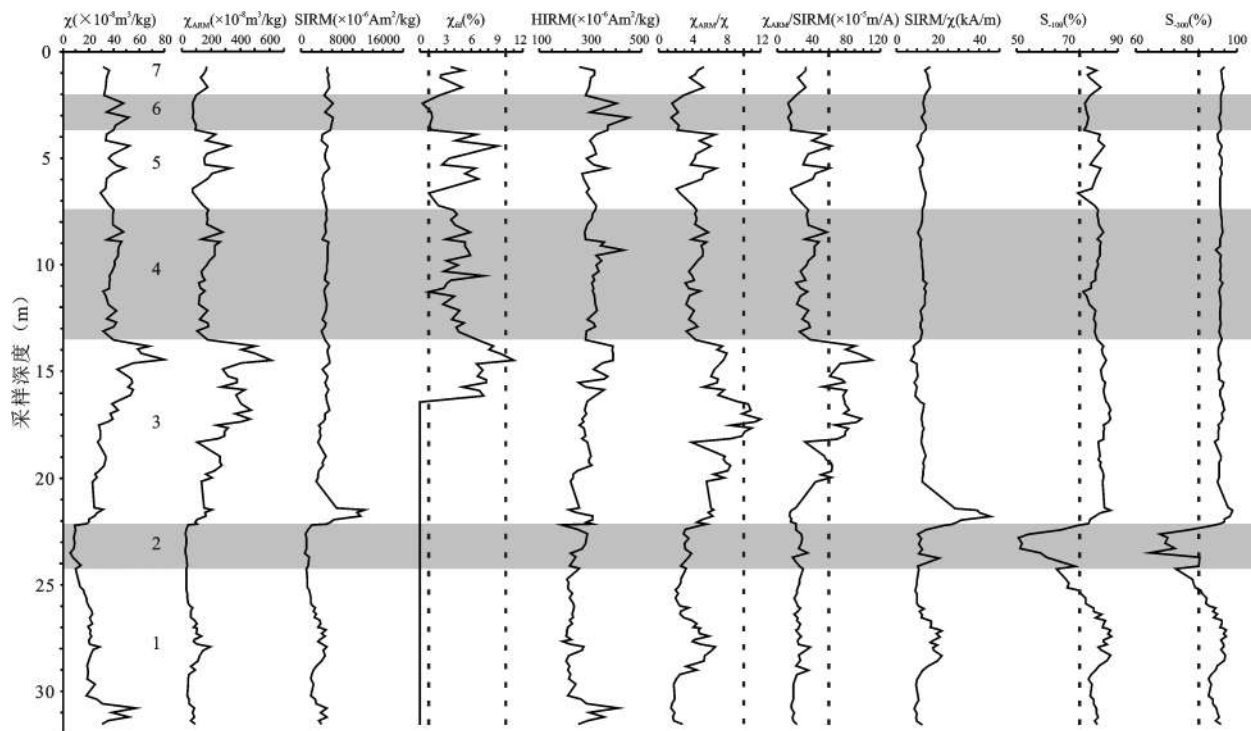


图1 YDZ1柱样磁性特征的垂向变化

Fig.1 Vertical variations of magnetic properties in the core YDZ1

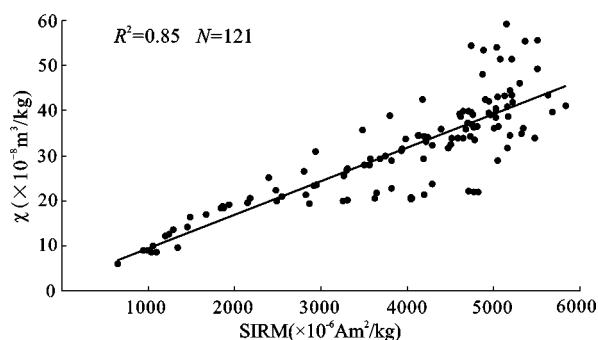


图2 SIRM与\$\chi\$之间的关系

Fig.2 Relationship between SIRM and \$\chi\$ of the core YDZ1

16 m 以下由于高频磁化率测量时的不稳定,造成 $c_{fd}\%$ 值为负值,在数据处理中默认为零处理。当 $c_{fd}\% < 1\%$,表明样品中几乎不含有超顺磁(SP)晶粒^[1]。除极个别样品外,16 m 以上 YDZ1 柱样沉积物的 c_{fd} 在 1%~10% 之间波动(图 1),显示了超顺磁(SP)晶粒的存在。

比值参数 c_{ARM}/c 可指示磁性矿物晶粒的大小,高值反映了较细的稳定单畴晶粒较多,低值指示了较粗的多畴晶粒或大量的超顺磁晶粒^[28,29]。比值参数 $c_{ARM}/SIRM$ 与 c_{ARM}/c 类似,也可指示磁性矿

物晶粒的大小,但由于不受超顺磁晶粒的影响,低值则反映了较粗的多畴晶粒。在 YDZ1 柱样中,这两个参数呈现一致的变化,且绝大多数的 $c_{ARM}/c < 10$ 、 $c_{ARM}/SIRM < 60 \times 10^{-5} \text{ m/A}$ (图 1),指示了磁性矿物以假单畴~多畴晶粒为主。在 13.5~18.2 m 深度的 $c_{ARM}/SIRM > 60 \times 10^{-5} \text{ m/A}$ (图 1),表明稳定单畴—假单畴晶粒主导了样品的磁性特征。

3.3 磁性矿物的类型

S_{100} 和 S_{300} 通常反映了样品中亚铁磁性矿物(如磁铁矿)和不完整反铁磁性矿物(如赤铁矿、针铁矿)的相对比例,它们的值随着不完整反铁磁性矿物的增加而下降^[26,27]。样品 S_{300} 比较高时,说明亚铁磁性矿物主导了样品的磁性特征,不完整反铁磁性矿物的贡献相对较小;反之则说明样品中亚铁磁性矿物较少,不完整反铁磁性矿物的贡献相对较大。 S_{100} 除了受磁性矿物类型的影响,还受到磁性矿物晶粒大小的影响,较低的 S_{100} 反映了较多的稳定单畴晶粒。

除第 2 层外, YDZ1 柱样的 S_{300} 值在 86%~96% 之间波动(图 1),平均值为 93%,即经 300 mT 磁场磁化后,样品所剩剩磁已接近饱和,说明亚铁磁性矿物主导了样品的磁性特征,但同时存在不完整

表1 YDZ1柱样各层的磁学参数均值

Table 1 Average value of magnetic parameters in each layer of the core YDZ1

层段	χ	SIRM	$\chi_{fd\%}$	χ_{ARM}	χ_{ARM}/χ	$\chi_{ARM}/SIRM$	HIRM	S ₋₁₀₀	S ₋₃₀₀
1	24.43	3285.13		78.02	3.37	23.41	239.08	82.03	91.97
2	9.97	1229.98		30.75	3.19	25.95	241.08	63.15	78.59
3	38.48	5203.04		298.14	7.67	62.58	295.44	84.01	93.78
4	39.03	4843.00	4.29	169.97	4.30	34.93	316.17	81.26	93.46
5	38.33	4638.21	4.67	183.94	4.66	39.17	304.86	81.21	93.39
6	41.21	5557.74	1.32	85.25	2.15	15.70	361.28	77.80	93.52
7	34.25	5240.71	3.69	157.45	4.61	30.04	297.96	79.95	94.31

反铁磁性物质的贡献。沉积物的 S₋₁₀₀ 值在 75%~90% 之间波动(图 1), 平均值为 82%, 同样说明了亚铁磁性矿物主导了样品的磁性特征。第 2 层的 S₋₃₀₀ 值在 66%~85% 之间波动, S₋₁₀₀ 值在 51%~70% 之间波动, 说明不完整反铁磁性矿物的贡献相对较大且稳定单畴晶粒相对较多。

4 讨 论

4.1 磁性特征与粒度组成的关系

在自然状况下, 磁铁矿晶粒会遵循水力学原理, 按其粒径大小分异和沉积。沉积物粒径逐渐减小, 粘土含量逐渐增加, 表明水动力环境逐渐减弱, 指示磁铁矿晶粒大小的磁学参数 χ_{ARM} 、 $\chi_{fd\%}$ 、 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 值逐渐增加, 即与粘土含量成正相关, 原因在于单畴和超顺磁晶粒多富集在粘土中, 沉积物越细, 其所含细晶粒亚铁磁铁矿越多。

Thompson 等^[1]提出将 χ_{ARM} 和 $\chi_{fd\%}$ 视为粘土 (<4 μm), 甚至是细粒级组分 (<32 μm) 含量的替代性指标。Oldfield 等^[17]在对爱尔兰海滨沉积物研究中发现, χ_{ARM} 和 χ_{ARM}/χ 与细粒级组分 (<32 μm) 含量高度相关, 提出可用这两个参数作为沉积物细粒级组分含量的代用指标。张卫国等^[23]对长江口潮滩沉积物磁学特征研究表明, χ_{ARM} 等指示细晶粒亚铁磁性矿物的参数与粘土 (<4 μm), 甚至 <32 μm 的细粒级组分含量高度正相关, 可作为沉积物细粒级组分的代用指标。

根据分析发现, 黄河三角洲潮滩 YDZ1 柱样沉积物磁学参数中的 χ_{ARM} 、 $\chi_{fd\%}$ 、 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 与沉积物中的粘土 (<4 μm) 和细粒级组分 (<32 μm) 含量之间显著的正相关(图 3), 其中 χ_{ARM} 的相关程度最高, 其次为 $\chi_{ARM}/SIRM$, 然后为 $\chi_{fd\%}$, 最后为 χ_{ARM}/χ 。沉积物细粒级组分与 χ_{ARM} 等参数具有高度正相关性, 说明沉积后的次生变化对磁性特征的影响

较小, 否则细晶粒磁性矿物在早期成岩过程中的优先溶解, 可能会使其与沉积物细粒级组分的相关性丧失。由表 1 和图 4 可以发现, YDZ1 柱样沉积物中粘土含量最高, 平均粒径 Φ 值最大的第 3 层, 其 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 值也最大, 吻合了细晶粒亚铁磁铁矿主要富集在细粒级组分中(尤其是粘土)这一现象。在第 3 层中粘土含量向上呈现增加趋势, 与 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 的变化趋势一致, 这表明确晶粒物质增加, 而较粗的假单畴~多畴晶粒含量减少。

4.2 磁性特征的沉积环境意义

15 kaB.P. 前, 中国东海岸线的海平面从末次冰盛期的低海平面以 1.67 mm 年均速率上升, 到达黄河三角洲地区约在 8.8 kaB.P., 6 kaB.P. 左右达到最高海平面^[30]。因此, 末次冰盛期后黄河三角洲地区经历了全新世海侵。现代黄河三角洲是一个非常年轻的三角洲, 基底大致以 1855 年古海岸线为界。根据 YDZ1 柱样沉积物磁性特征变化, 结合粒度分析(粘土百分含量、平均粒径)和 AMS¹⁴C 测年数据, 对末次冰盛期后黄河三角洲潮滩沉积环境进行了划分(图 4)。

根据 AMS¹⁴C 测年, YDZ1 柱样沉积层在 22.91 m 处的年龄为 (8 645±35) aB.P., 在 27.05 m 处的年龄为 (13 355±50) aB.P., 因此, 全新世海侵层基底应该在 22.91~27.05 m 之间。在约 24 m 处, 沉积物粘土含量, 平均粒径和磁学参数 χ_{ARM} 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 值出现明显的趋势变化。24 m 以下粘土含量减少, 平均粒径 Φ 值减小, 沉积物变粗趋势明显, 磁学参数 χ_{ARM} 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 值呈减小趋势, 表明沉积物中磁性矿物晶粒变大。24 m 往上沉积物粘土含量逐渐增加, 平均粒径 Φ 值增大, 沉积物变细趋势明显, 磁学参数 χ_{ARM} 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 值增大, 表明沉积物中磁性矿物晶粒变小。因此, 将 24 m 处作为全新世

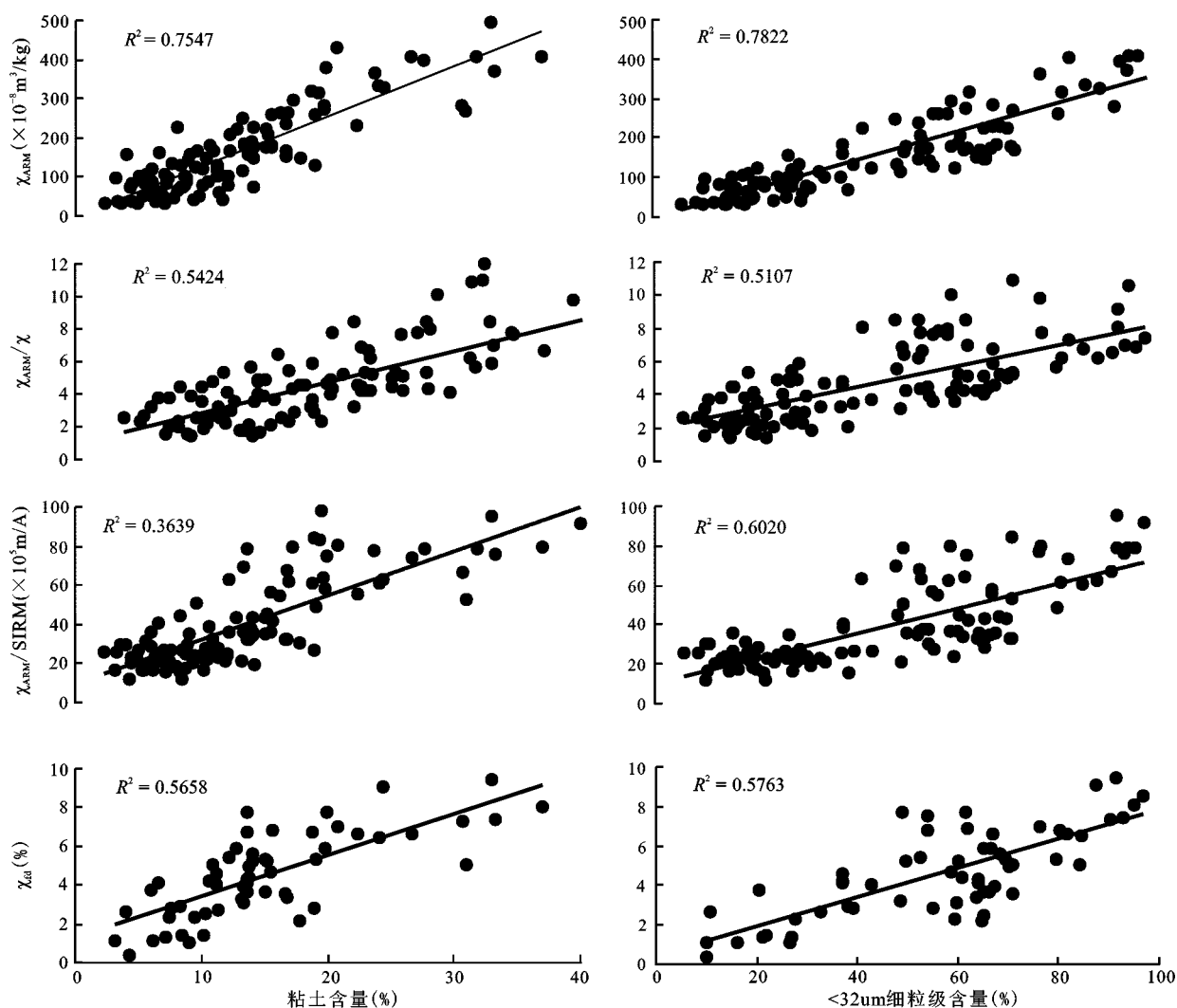


图3 磁学参数与粘土(<4 μm)和细粒级组分(<32 μm)含量之间的关系

Fig.3 Relationships between magnetic parameters, contents of clay (<4 μm) and fine grain size (<32 μm)

海侵层基底。在约 13.5 m 处,沉积物磁学和粒径参数又出现明显的趋势变化。13.5 m 以上,沉积物粘土含量减少,平均粒径 Φ 值减小,沉积物呈变粗趋势;磁学参数 χ_{ARM} 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 值在 13.5 m 处迅速减小,表明沉积物中磁性矿物晶粒变大,再往上变化趋势虽有所波动,但总体比较稳定。因此,将 13.5 m 处作为海侵层的顶界。

通过以上分析,可将末次冰盛期后黄河三角洲潮滩沉积环境自上而下划分为 3 个大的阶段:0~13.5 m 为第一陆相层,即现代黄河三角洲沉积;13.5~24 m 为第一海相层,即全新世海侵沉积,且沉积物上细下粗的粒径特征与海侵沉积层序吻合;24~31.66 m 为第二陆相层。然后再根据柱样沉积物粘土含量、平均粒径和磁学参数的变化(图

1),对 3 个大的沉积阶段进行亚相划分。

1) 第一陆相层:0~13.50 m

泛滥平原相(0~1.80 m),沉积物主要为黄色粉砂,粘土含量、平均粒径、 χ_{ARM} 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 的均值分别为 11.79%, 5.79 Φ , $157.45 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 4.61 和 $30.04 \times 10^5 \text{ m/A}$;

河流相(1.80~3.60 m),沉积物主要为黄色砂质粉砂和粉砂质砂,粘土含量、平均粒径、 χ_{ARM} 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 的均值分别为 7.11%, 4.24 Φ , $85.25 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $15.70 \times 10^5 \text{ m/A}$;

三角洲前缘沉积相(3.60~13.50 m),沉积物粘土含量、平均粒径、 χ_{ARM} 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 的均值分别为 13.24%, 5.32 Φ , $175.46 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $36.82 \times 10^5 \text{ m/A}$;其中 3.60~7.20 m 沉积物主要为黄色粉砂质砂

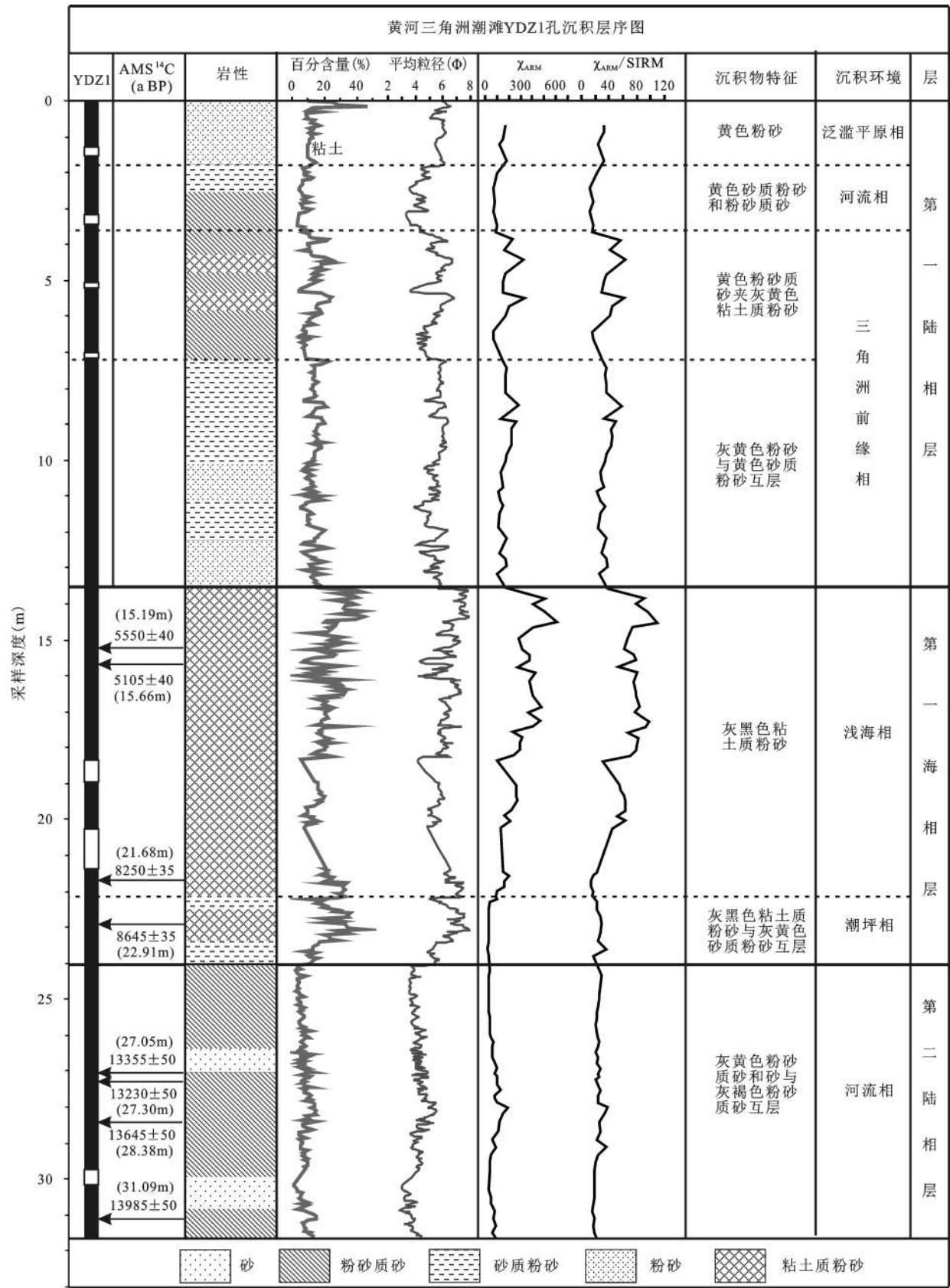


图4 黄河三角洲潮滩YDZ1柱样沉积相序

Fig.4 Sedimentary facies of core YDZ1 in tidal flat of the Yellow River Delta

夹灰黄色粘土质粉砂,可能为河口沙坝相;7.20~13.50 m 沉积物主要为灰黄色粉砂与黄色砂质粉砂互层,可能为远端沙坝相。

2) 第一海相层:13.50~24.00 m

浅海沉积相(13.50~22.10 m),沉积物主要为灰黑色粘土质粉砂,粘土含量、平均粒径、 χ_{ARM} 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 的均值分别为22.36%,6.34 Φ ,298.14 $\times 10^{-8}\text{m}^3/\text{kg}$ 和62.58 $\times 10^5\text{m}/\text{A}$;

潮坪相(22.10~24.00 m),沉积物主要为灰黑色粘土质粉砂与灰黄色砂质粉砂互层,粘土含量、平均粒径、 χ_{ARM} 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 的均值分别为21.65%,6.26 Φ ,30.75 $\times 10^{-8}\text{m}^3/\text{kg}$ 和25.95 $\times 10^5\text{m}/\text{A}$;

3) 第二陆相层:24.00~31.66 m

河流相,沉积物主要为灰黄色粉砂质砂和砂与灰褐色粉砂质砂互层。

由以上分析可知,末次冰盛期后黄河三角洲潮滩沉积动力环境大致经历了强(弱→强→弱)→弱(弱→强)→强的演变过程。

5 结 论

通过分析黄河三角洲潮滩 YDZ1 柱样沉积物磁学参数的变化特征,结合粒度信息和 AMS¹⁴C 测年数据,对末次冰盛期后黄河三角洲潮滩沉积环境进行了初步探讨,得出以下几点结论:

1) 亚铁磁性矿物主导了黄河三角洲潮滩沉积物的磁性特征,不完整反铁磁性矿物的贡献相对较小,亚铁磁性矿物以假单畴~多畴晶粒为主。

2) 黄河三角洲潮滩沉积物环境磁学参数中的 $\chi_{\text{fd}}\%$ 、 χ_{ARM} 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 和 χ_{ARM}/χ 可作为沉积物中粘土(<4 μm)或细粒级组分(<32 μm)含量的代用指标,用于指示沉积环境演变。

3) 黄河三角洲潮滩沉积相序自上而下依次为泛滥平原相,河流相,三角洲前缘相,浅海相,潮坪相和河流相,沉积动力环境表现为强(陆相),弱(海相),强(陆相)的演变过程。

参考文献:

- [1] Thompson R, Oldfield F. Environmental magnetism[M]. London: Allen & Unwin Press, 1986.
- [2] 俞立中, 张卫国. 沉积物来源组成定量分析的磁诊断模型[J]. 科学通报, 1998, 43(19): 2034~2041.
- [3] Zhang W G, Xu Y, Yu L Z, et al. Distinguishing sediments from the Yangtze and Yellow Rivers, China: a mineral magnetic approach[J]. Holocene, 2008, 18: 1139~1145.

- [4] 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), 2003, 33(6): 583~592.
- [5] 张卫国, 贾铁飞, 陆敏, 等. 长江口水下三角洲 Y7 柱样磁性特征及其影响因素[J]. 第四纪研究, 2007, 27(6): 1063~1071.
- [6] 贾海林, 刘苍宇, 张卫国. 崇明岛 CY 孔沉积物的磁性特征及其环境意义[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 117~123.
- [7] 张卫国, 戴雪荣, 张福瑞, 等. 近 7000 年巢湖沉积物环境磁学特征及其指示的亚洲季风变化[J]. 第四纪研究, 2007, 27(6): 1053~1062.
- [8] 周开胜, 孟翊, 刘苍宇. 长江口北支潮流沉积物磁性特征与沉积环境分析[J]. 海洋通报, 2008, 17(5): 47~55.
- [9] 王张华. 东海陆架西湖凹陷北地区晚更新世沉积物磁性特征和磁性矿物—古环境和油气指示意义[D]. 上海: 华东师范大学, 2000.
- [10] 吕厚远, 韩家懋, 吴乃琴, 等. 中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义[J]. 中国科学(B辑), 1994, 24(12): 1290~1297.
- [11] Xie S, Dearing J A, Bloemendal J A. A partial susceptibility approach to analyzing the magnetic properties of environmental materials: a case study[J]. Geophysical Journal International, 1999, 138: 851~856.
- [12] 邓成龙, 袁宝印, 胡守云, 等. 环境磁学某些研究进展评述[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(2): 93~101.
- [13] 孙知明, 胡守云, 马醒华. 现代湖泊沉积物中磁性矿物的研究及其环境意义[J]. 地球物理学报, 1996, 39(2): 178~187.
- [14] 谢红霞, 张卫国, 顾成军, 等. 巢湖沉积物磁性特征及其对沉积动力的响应[J]. 湖泊科学, 2006, 18(1): 43~48.
- [15] 侯红明, 王保贵, 汤贤赞. 南极 15ka 以来海洋沉积物的环境磁学研究[J]. 极地研究, 1997, 9(1): 35~43.
- [16] 杨小强, 周文娟, 高芳蕾, 等. 近 13 万年来南沙沉积物中的剩磁记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(1): 59~66.
- [17] Oldfield F, Yu L. The influence of particle size variations on the magnetic properties of sediments from the north-eastern Irish Sea[J]. Sedimentology, 1994, 41: 1093~1108.
- [18] 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: 9045~9050.
- [19] Wheeler A J, Oldfield F, Orford J D. Depositional and post-depositional controls on magnetic signals from saltmarshes on the north-west coast of Ireland[J]. Sedimentology, 1999, 46: 545~558.
- [20] Clifton J, McDonald P, Plater A, et al. Derivation of a grain-size proxy to aid the modeling and prediction of radionuclide activity in salt marshes and mud flats of the Eastern Irish Sea[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 1999, 48: 511~518.
- [21] 张卫国, 俞立中, 许羽, 等. 沉积物磁性测量对铁还原的指示及其在重金属污染研究中的应用[J]. 科学通报, 1998, 43(19): 2114~2118.
- [22] 张卫国, 俞立中, Hutchinson S M. 长江口南岸边滩沉积物重金属污染记录的磁诊断方法[J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(6): 616~623.

- [23] 张卫国,俞立中.长江口潮滩沉积物的磁学性质及其与粒度的关系[J].中国科学(D辑),2000,**32**(9):783~792.
- [24] Zhang W G,Yu L Z.Magnetic properties of tidal flat sediments of the Yangtze Estuary and its relationship with particle size[J]. Science in China (Series D),2003,**46**(9):954-966.
- [25] 成国栋.黄河三角洲现代沉积作用及模式[M].北京:地质出版社,1991.
- [26] Verosurb K L,Roberts A P.Environmental magnetism: past, present, and future[J].Journal Geophysics Research,1995,**100**: 2175-2192.
- [27] Mooney S D,Geiss C,Smith M A.The use of mineral magnetic parameters to characterize archaeological ochres[J]. Journal of Archaeological Science,2002;**29**:1-13.
- [28] Banerjee S K,King J W,Marvin J A.Rapid method for magnetic granulometry with application to environmental studies[J].Geophysical Research Letters,1981,**8**(4):333-336.
- [29] King J W,Banerjee S K,Marvin J A.A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials: some results from lake sediments [J].Earth Planet Sciences Letters,1982,**59**: 404-419.
- [30] Li C X,Fan D D,Deng B,et al.The coasts of China, and issues of sea level rise[J].Journal of Coastal Research Special Issues, 2004,**43**:36-49.

Magnetic Properties of Sediment and Sedimentary Environment in Tidal Flat of the Yellow River Delta

PENG Jun^{1,2}, CHEN Hong-quan¹, MA Sui-sui¹, LI Zhi-wen¹

(1. School of Urban and Resources Environment, Yancheng Teachers University, Yancheng, Jiangsu 224002, China;

2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Environmental magnetism is a newly rising frontier science among earth science, environmental science and magnetism. It reveals environmental actions, environmental processes and environmental problems of different temporal and spatial scales through the magnetic measurement and analysis of the magnetic mineral assemblage and characteristics. Due to the type, the content and the grain size of magnetic mineral related to the sediment sources, sediment transport capacity and early diagenesis, and changes of these factors are heavily influenced by environmental changes, the information of sedimentary environment change can be extracted through the analysis of the magnetic characteristics of sediment. At present, environmental magnetic method has been widely used in loess, lake and shelf deposits as an normal mean for studying sedimentary record, but using this method on sedimentary environment in tidal flat is seldom. Hence, by measuring the magnetic parameters and the grain size parameters of the core YDZ1 in tidal flat of the Yellow River Delta, and combined with data of AMS¹⁴C dating, this paper analyzes the sediment magnetic properties and its sedimentary environment after the Last Glacial Maximum in tidal flat of the Yellow River Delta. The results show that the ferromagnetic mineral of pseudo-single domain (PSD) and multi-domain (MD) dominates the sediment magnetic properties of the core YDZ1. Among the magnetic properties of sediment, the parameters of χ_{ARM} , $\chi_{ARM}/SIRM$ and χ_{ARM}/χ can be regarded as the substituted indexes for the clay (<4 μm) content or the fine-grained component (<32 μm) content. The sedimentary facies from surface to bottom in tidal flat of the Yellow River Delta has experienced the floodplain facies, the river facies, the delta-front facies, the neritic facies, the tidal flat facies and the river facies, and the sedimentary dynamical environment had a variation process from strong to weak, and then strong again.

Key words: the Yellow River Delta; tidal flat; magnetic properties; sedimentary environment