

长江三角洲全新世地层中潮滩沉积磁性特征及其古环境意义

白雪莘¹ 张卫国¹ 董艳^{1,2} 潘大东¹ 王张华¹ 孙千里¹
陈静¹ 陈中原¹ 刘晋嫣¹

(1.华东师范大学河口海岸学国家重点实验室 上海 200062;2.南通大学地理科学学院 江苏南通 226007)

摘要 对长江三角洲北翼江苏南通地区 NT 钻孔(长 60.9 m)进行了系统的环境磁学分析,并结合岩性特征、粒度、漫反射光谱(DRS)等手段,探讨了全新世早、晚期潮滩沉积的磁性特征及其古环境意义。NT 孔自下而上可分为 6 层(U1~U6 层),其中 U2 层下部(49.9~44.8 m)和 U6 层(7.5~0.3 m)为潮滩沉积,具有较低的退磁参数 S 比值及较高的硬剩磁(HIRM)和 SIRM/X,表明反铁磁性矿物如赤铁矿、针铁矿等含量和比例较高。结合漫反射光谱(DRS)分析,发现 U6 层上部盐沼(1.5~0.3 m)赤铁矿和针铁矿富集,U2 层下部的盐沼仅富集赤铁矿。这一差异与 U2 层和 U6 层形成的时期和沉积环境有关。U2 层形成于晚更新世晚期至早全新世,且曾长期暴露地表,有利于赤铁矿的形成,其后随着海平面的持续上升,盐沼不断垂向加积,始终处于水下环境,不利于针铁矿的形成;U6 层形成于晚全新世三角洲海岸的进积过程中,氧化还原相互交替的环境有利于针铁矿的形成,后期成陆后的成土作用生成了较多的磁赤铁矿和赤铁矿。研究表明,全新世三角洲发育过程中,不同时期形成的盐沼具有不同的磁性特征,磁性特征的研究可以提供潮滩沉积环境演变的信息,对三角洲古环境重建研究具有重要意义。

关键词 全新世 潮滩 磁性特征 针铁矿 赤铁矿 长江三角洲

第一作者 白雪莘 女 1991 年出生 硕士研究生 环境磁学 E-mail:baixuexin@126.com

通讯作者 张卫国 男 研究员 E-mail:wgzhang@sklec.ecnu.edu.cn

中图分类号 P534.63*2 P736.22 **文献标识码** A

0 引言

全新世最大海侵时,形成了以镇江—扬州为顶点的古河口湾,此后长江带来的大量泥沙在河口堆积,沉积速率大于海平面上升速率,长江三角洲开始发育,其地层呈现出海陆相互层的特性^[1-2]。前人就长江三角洲地层层序、地貌发育模式及沉积环境演变等方面进行了大量研究,采用了包括粒度、磁学参数、地球化学元素、孢粉、有孔虫等多种指标,以提取该地区的古气候、古环境信息^[3-11]。

环境磁学是研究古气候、古环境变化的重要手段,磁性矿物的含量、颗粒大小以及矿物类型等特征可以用来提取沉积物来源、搬运、沉积过程及沉积后成岩作用等信息^[12]。对长江三角洲地区第四纪以来沉积物的环境磁学研究,已有不少报道,沉积物磁性特征及其与粒度、成岩作用、物源等的关系,被用来追

踪沉积环境演变及其与气候、海平面变化以及人类活动的关系^[7,13-15]。潮滩是三角洲地层中常见的地层单元,在由陆向海或由海向陆的转变阶段都可以形成。潮滩根据高程和水动力特征,可分为低、中、高潮滩,在高潮滩及其相邻的潮上带往往发育盐沼,因此沉积地层中潮滩的垂向堆积序列,可以指示海岸的进积或退积过程^[10]。磁性矿物在沉积环境中的形成和转化机制,对古环境信息提取具有重要的意义,如 Dong *et al.*^[15]对长江三角洲北翼苏北滨海地区全新世钻孔的研究发现,现今出露地表、发育于晚全新世海岸进积过程中的潮滩相上部盐沼富集针铁矿、赤铁矿,反映了氧化还原交替条件下的成岩和成壤作用。在全新世早期,随着海平面的上升,一些陆相环境遭受海侵,形成潮滩并在其上部发育盐沼,之后随着海侵程度的加深,最终被淹没形成河口湾—浅海环境^[4]。这一海侵过程中形成的潮滩沉积物磁性特

征,与前述海退成陆过程中潮滩沉积物磁性特征是否存在差异,值得探讨。

本文以长江三角洲北翼南通市采集的 NT 钻孔为例(图 1),综合运用粒度、磁学和漫反射光谱(DRS)方法,探讨全新世三角洲海侵海退过程中发育的潮滩沉积物的磁性特征及其控制因素,为利用磁性特征提取三角洲环境演变信息提供科学依据。

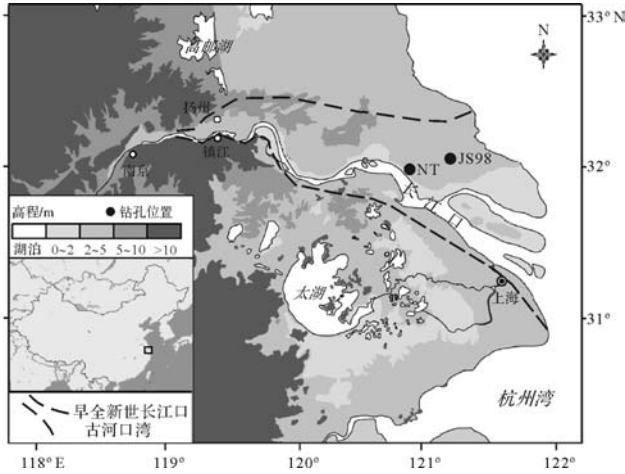


图 1 研究区域和 NT 钻孔及其邻近 JS98 钻孔^[16] 站位

Fig.1 The study area and the sampling site of core NT and JS98^[16]

1 样品和方法

NT 钻孔(32°3.94' N, 120°51.40' E)采集于江苏南通市,所在位置位于长江三角洲下切古河谷(图 1),地面海拔高度为 3.99 m,钻孔总长 60.90 m。

对钻孔 8 个深度挑选的测年材料(深度 45.62 m 处为植物碎屑,其余各测年样均为贝壳)进行 AMS¹⁴C 测年(美国 Beta 实验室),测年结果利用 Calib 7.04 程序和 Marine 13 校正曲线进行日历年龄校正^[17],校正年龄见图 2。NT 孔深度 45.62 m 沉积物年龄为 10 575~10 725 cal. yr B.P.,因此该深度以上为全新世以来堆积。

以 40 cm 为间隔,取 5 cm 厚沉积物样,共 152 个样品。所有样品在 40°C 下低温烘干,以备分析。

粒度分析采用 Coulter LQ-100Q 激光粒度仪。待测样品中先加入 5 mL 10% HCl 去除碳酸盐,再加入 5 mL 30% H₂O₂ 去除有机质,用蒸馏水清洗样品 2~3 次,以去除样品中所加稀盐酸。加入 10 mL 0.5% 六偏磷酸钠((NaPO₃)₆)溶液,超声振荡 10 min 使其颗粒充分分散,随后上机测量^[18]。

磁学测量首先采用 Bartington MS2 双频磁化率

仪分别测量低频(0.47 kHz)和低频(4.7 kHz)磁化率(χ_{lf} 、 χ_{hf}),计算 $\chi_{fd}\% = (\chi_{lf} - \chi_{hf})/\chi_{lf} \times 100$ 。使用 Molspin 交变退磁仪(直流磁场 0.04 mT,交变磁场峰值 100 mT,型号: Dtech 2000),获得非磁滞剩磁(ARM,文中表示为 χ_{ARM}),使用 Minispin 旋转磁力仪测量。使用 MMPM 10 脉冲磁化仪获得 1 T 条件下的等温剩磁,本文将定义为饱和等温剩磁(SIRM)。之后将样品在 100 mT 和 300 mT 反向磁场中退磁,用旋转磁力仪测量 $SIRM/IRM_{-300mT}/IRM_{-300mT}$ 。并计算硬剩磁 $HIRM = (SIRM + IRM_{-300mT})/2$,退磁参数 $S_{-100} = 100 \times (SIRM - IRM_{-100mT})/(2 \times SIRM)$, $S_{-300} = 100 \times (SIRM - IRM_{-300mT})/(2 \times SIRM)$,以及比值参数 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 。

根据上述磁学测量结果,挑选代表性样品进行 IRM 获得曲线和热磁曲线测试。IRM 获得曲线利用 MMPM10 脉冲磁化仪对样品进行磁化,其最大磁场可达 7 T。所加磁场从 11 mT 变化到 5 T,按磁场对数值等间距设置了 39 个磁场强度。根据测试结果,利用 Kruvier *et al.*^[19] 的方法进行磁性矿物组分分析。利用 MFK1-FA 测量磁化率随温度变化曲线,测试在氩气环境下进行。

漫反射光谱利用 Perkin Elmer Lambda 950 紫外—可见光分光光谱仪测试,测试波长范围 400~700 nm,步长为 1 nm。根据测量结果计算红度,定义为红色波段(630~700 nm)的反射率占该样品可见光波段(400~700 nm)总反射率的百分比,通常反映了赤铁矿的含量^[20]。在 DRS 一阶导数图谱上,赤铁矿的特征峰位置在 565~575 nm,而针铁矿的主峰位于 535 nm,次强峰位于 435 nm^[21]。由于黏土矿物如伊利石和绿泥石在 440 nm 处有特征峰^[22],而针铁矿在 300°C 时完全脱水转化为赤铁矿,针铁矿主峰消失,次峰变得扁平,周玮等^[23]提出比较沉积物加热 300°C 前后 DRS 曲线的方法,可将针铁矿与其他矿物区分开来。

2 结果

2.1 岩性特征

NT 孔除表层 30 cm 沉积物受人工扰动外,自下而上分为 6 层(U1~U6 层),其岩性描述如下(图 2):

U1 层(60.9~49.5 m):下部(60.9~55.9 m)为灰色黏土质粉砂,夹黏土和细砂薄层,上部(55.9~49.5 m)为灰色粉砂、细砂夹黏土薄层,见少量泥质结核。

U2 层(49.5~35.1 m):棕灰色、灰色黏土质粉砂,

夹砂质粉砂和砂层,自下至上粒度变粗,总体较 U1 层细,见少量植物根茎和虫孔。44.6~44.8 m 见大量泥砾,夹贝壳碎屑,44.8 m 处为侵蚀面,接触面上有泥炭质泥,夹贝壳碎屑。

U3 层(35.1~24.7 m):棕灰色、深灰色黏土质粉砂和粉细砂,夹细砂薄层。总体随深度变浅沉积物呈

变粗趋势。见少量贝壳碎屑。

U4 层(24.7~20.3 m):灰色黏土质粉砂,夹砂层或砂质透镜体,粒度较上、下相邻地层为细。在 21.0~21.5 m 处,砂层厚约 10 cm,其他部分厚度约为 2 cm。

U5 层(20.3~7.5m):青灰色、灰色细砂,夹少量

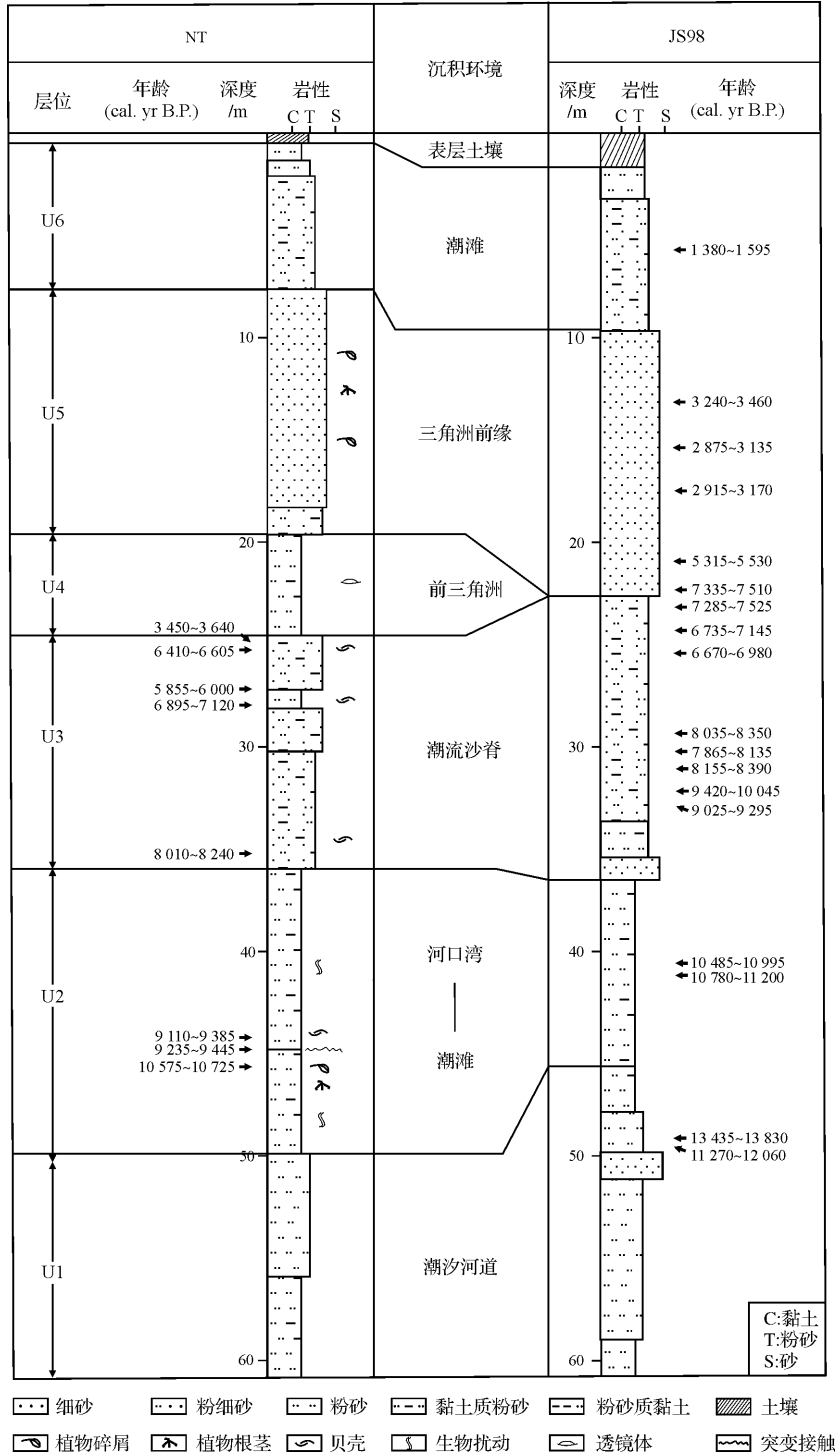


图2 NT 钻孔岩性特征及其与邻近 JS98 钻孔^[16]的地层对比

Fig.2 Lithology of Core NT and its stratigraphic correlation Core JS98^[16]

黏土质粉砂薄层和黏土质粉砂团块,与下伏地层突变接触。黏土质粉砂薄层厚数毫米至3 cm,黏土质粉砂团块厚约2~3 cm。见植物碎屑。

U6层(7.5~0.3 m):7.5~3.9 m以灰色粉砂质砂、砂质粉砂为主,3.9~1.5 m以灰色和灰黄色、粉细砂、粉砂和砂质粉砂为主,1.5~0.3 m为棕黄色泥质粉砂,见大量铁锈。随深度变浅,粒度逐渐变细。

2.2 粒度特征

如图3所示,NT孔粒度垂直变化较大。U1层下部(60.9~55.9 m)较细,砂含量1%~48%,粉砂含量39%~80%,黏土含量7%~23%;上部(55.9~49.5 m)较粗,砂含量9%~78%,粉砂含量17%~73%,黏土含量5%~18%。自U2层向上至U3层,黏土含量呈现下降趋势,由U2层底部最高的29%变为U3层顶部的3%,而砂含量呈现相反的变化趋势,由2%变化为83%。U4层较上、下相邻层位为细,以粉砂为主,其中中、粗粉砂含量占51%~67%,粒度垂向变化较小。U5层向上至U6层,总体上随深度变浅粒度变细,在U5层中,砂含量总体呈下降趋势,而粗粉砂呈现增加趋势;在U6层中(除顶部样品外),随深度变浅,粗粉砂呈现下降趋势,而<32 μm组分随深度变浅而增加。

2.3 磁性特征

NT孔磁学参数垂向变化见图4。 χ 和SIRM近似指示了样品中磁性矿物含量,特别是亚铁磁性矿物(如磁铁矿)的含量^[12]。在NT孔中, χ 和SIRM除了在21.1 m处及钻孔顶部出现峰值,整体垂向变化不

大。 χ_{ARM} 可以反映磁性矿物晶粒的大小,比如稳定单畴(SD)亚铁磁性矿物晶粒的 χ_{ARM} 要明显大于超顺磁(SP)和多畴(MD)晶粒^[24]。NT孔中 χ_{ARM} 相对稳定,在0.3 m(U6层)、21.1 m(U4层)和45.5 m(U2层)处有较高的值。 $\chi_{fd}\%$ 反映了超顺磁颗粒(SP)和单畴颗粒(SD)边界的细黏性颗粒对磁化率的贡献^[12],所有层位中 $\chi_{fd}\%$ 基本小于2%,表明SP颗粒对磁化率的贡献不大。HIRM通常用来估算高矫顽力矿物(如赤铁矿和针铁矿)的含量^[25],除在U2层下部、U4层顶部及U6表层有较高值外,其他层位变化不大。

$\chi_{ARM}/SIRM$ 通常可以指示亚铁磁性矿物的颗粒大小,随着颗粒增大 $\chi_{ARM}/SIRM$ 减小^[24]。 χ_{ARM}/χ 也可以指示磁性矿物颗粒大小,一般而言,比值较高反映了单畴颗粒富集,而比值较低则反映了多畴或超顺磁颗粒较多^[26]。这两个参数除表层0.7 m处有较高的值外,其他深度变化不大。影响SIRM/ χ 的因素很多,高矫顽力矿物含量较多会导致SIRM/ χ 偏高^[12],总体上该参数与HIRM有较为相似的变化形式。退磁参数 S_{-300} 和 S_{-100} 反映了样品中亚铁磁性矿物与不完全反铁磁性矿物(如针铁矿、赤铁矿)的相对含量,而且随不完全反铁磁性矿物比例的增大而降低^[25]。这两个参数在U2和U6层中明显低于其他层位,表明这两层中、高矫顽力矿物相对含量较高。此外,U4层21.1 m处也具有较高的SIRM/ χ 比值(38.81 kAm⁻¹),但S比值并不低,与胶黄铁矿特征较为吻合^[27-28],扫描电镜分析也确认了胶黄铁矿的存在(未显示),与董艳^[18]报道的结果类似。

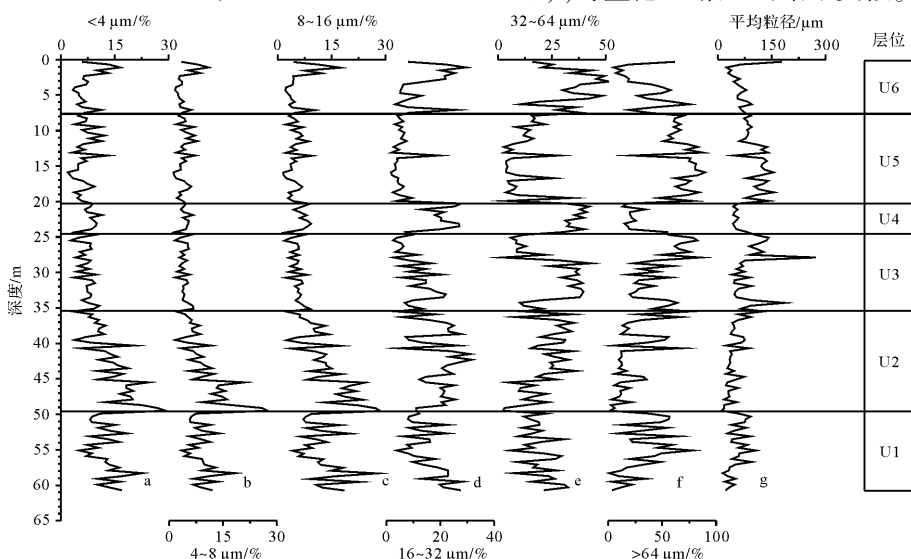


图3 NT钻孔粒度垂向变化

Fig.3 Particle size compositions of Core NT

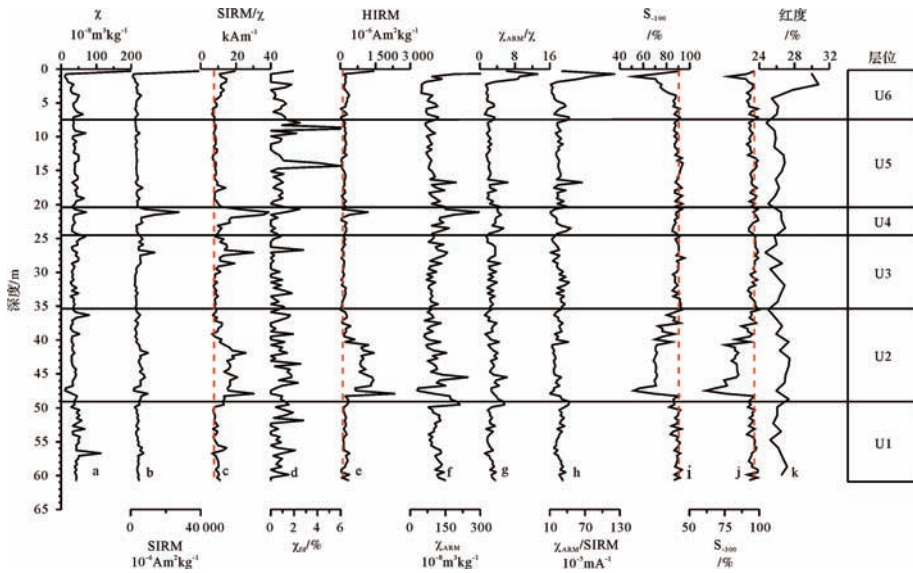


图 4 NT 钻孔磁性特征和红度的垂向变化

Fig.4 Vertical variation of magnetic properties and redness of Core NT

3 讨论

NT 钻孔岩性特征和粒度较大的垂向变化,反映了沉积环境的变化(图 2,3)。磁性参数除 U4 层极高的 SIRM/χ 显示胶黄铁矿^[18],0.7 m 处显示亚铁磁性矿物颗粒较细,以及表层 0.3 m 处极高的 χ 和 SIRM 外,极为显著的特征是,U2 和 U6 层具有较为显著的 HIRM、SIRM/χ 高值和较低的 S₋₃₀₀ 和 S₋₁₀₀ 比值。但 U2 层 S₋₃₀₀ 和 S₋₁₀₀ 比值自底部向上呈现增加趋势,而 U6 层中则相反(图 4)。因此,本文着重讨论这两层磁性特征的差异及其控制因素。

已有研究表明,长江三角洲古河口区冰后期以来地层自底部向上,可划分为河流、潮滩、河口湾、三角洲前缘、潮滩等单元,反映了一个海侵海退旋回^[2]。

根据岩性(图 2)和粒度特征(图 3),及其与相邻钻孔 JS98 地层^[16]的对比,本文将 U1 至 U6 层划分为潮汐河道、潮滩—河口湾、潮流沙脊、前三三角洲、三角洲前缘和潮滩等沉积单元(图 2)。其中 U2 层下部(49.5~44.8 m)和 U6 层均为潮滩相沉积物,但其粒度垂向变化趋势相反。U2 层底部沉积物为钻孔中最细,见植物根茎、虫孔、泥砾等,代表了潮滩上部生长有植物的盐沼环境^[29],在盐沼前缘由于侵蚀通常可见泥砾^[30]。两层典型样品粒度频率分布曲线见图 5,可见 U2 层中自底部向上,峰值粒径变粗,分选变好。从现代长江口潮滩沉积物的特征来看,自陆向海,随着高程的降低,由高潮滩盐沼向中、低潮滩,沉积物粒度变粗^[31]。U2 层自底部向上的粒度变化,揭示了从潮滩上部的盐沼向中、低潮滩过渡。潮滩的垂向堆积

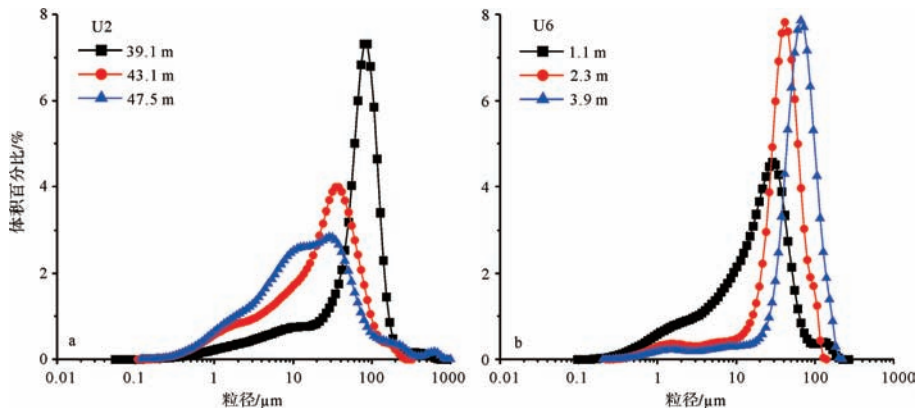


图 5 U2、U6 层典型样品粒度分布频率曲线

Fig.5 Particle size distribution frequency curves for representative samples in Unit U2 and U6

序列可以指示海岸的进积或退积过程^[10],进积是指在陆源物质供应速率很快的情况下,海岸线不断向海迁移的过程,并形成沉积物的堆积。退积刚好相反,通常是陆源物质供应速率很慢,小于海平面上升速率,造成了海岸线向陆后退,沉积层序上表现为海相堆积叠加在陆相沉积上。从测年资料及与JS98孔的对比(图2)来看,U2层下部盐沼地层年代形成于距今10 000年前甚至更早,当时是相对海平面快速上升时期^[16,32],U2层自下而上沉积物变化反映了海岸的退积过程,钻孔所在位置水深不断加深。随着水深增大,沉积动力增强,盐沼顶部沉积物遭受侵蚀形成侵蚀面。U6层则是晚全新世以来堆积,当时海平面已接近现代高度,并趋于稳定^[33],在泥沙供应充足的情况下,海岸线不断向海推进,钻孔所在位置水深逐渐淤浅,表现为由潮滩中、下部的较粗沉积物向上部细颗粒的盐沼转化,呈现粒度变细趋势,反映了海岸的进积过程,并最终成为陆地。最表层0.3 m粒度较粗,可能是受人类活动影响所致。

粒度是影响磁性特征的重要因素^[12, 18, 27]。粒度与磁学参数的相关分析显示(表1,2),反映磁性矿物颗粒大小的参数 χ_{ARM}/χ 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 与16 μm 以下细粒级组分有显著的正相关,表明细颗粒沉积物中具有较细的磁性矿物颗粒。对于主要反映磁性矿物含量的参数,与粒度的关系较为复杂。U2和U6两层中 χ 与>64 μm 组分皆呈正相关,但U2层中磁学参数SIRM与<4 μm 、8~16 μm 组分呈正相关,而U6层SIRM与各粒级均无显著相关,可见砂组分含量高的沉积物中相对高的 χ ,反映了顺磁性矿物的富集,这在一些研究中也得到发现,即砂组分中顺磁性矿物的富集,会导致磁化率的增强^[18];而SIRM反映的亚铁磁性矿物含量与粒度的关系不一,在U2层中细粒级组分中亚铁磁性矿物较多,U6层中则与粒度关系不大。两层沉积物中,磁学参数与粒度的相关关系不相同,说明磁性特征变化不仅受到粒度影响,还存在其他因素影响磁性特征。

U2层典型样品的热磁曲线(图6)显示, χ 在加

表1 U2层粒度与磁学参数的相关关系($n=36$)

Table 1 Correlation coefficients between magnetic properties and particle size in U2

	<4 μm	4~8 μm	8~16 μm	16~32 μm	32~64 μm	>64 μm	平均粒径
χ	-0.18	-0.10	-0.19	-0.44*	-0.26	0.44*	0.36
$\chi_{\text{fd}}\%$	0.17	0.18	0.08	-0.36**	-0.40**	0.19	0.11
χ_{ARM}	0.64*	0.69*	0.63*	-0.01	-0.54*	-0.37**	-0.39**
SIRM	0.34**	0.31	0.34**	0.16	-0.28	-0.24	-0.27
HIRM	0.33**	0.25	0.35**	0.29	-0.22	-0.30	-0.33**
S_{-100}	-0.17	-0.07	-0.16	-0.30	-0.06	0.27	0.28
S_{-300}	-0.27	-0.19	-0.28	-0.26	0.11	0.29	0.30
χ_{ARM}/χ	0.79*	0.78*	0.78*	0.23	-0.48*	-0.61*	-0.60*
$\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$	0.40**	0.48*	0.40**	-0.10	-0.32	-0.22	-0.21
SIRM/ χ	0.46*	0.37**	0.47*	0.44*	-0.17	-0.50*	-0.49*

注: **表示在0.05水平下显著相关,*表示在0.01水平下显著相关。

表2 U6层粒度与磁学参数的相关关系($n=19$)

Table 2 Correlation coefficients between magnetic properties and particle size in U6

	<4 μm	4~8 μm	8~16 μm	16~32 μm	32~64 μm	>64 μm	平均粒径
χ	-0.36	-0.31	-0.32	-0.38	-0.37	0.53**	-0.33
$\chi_{\text{fd}}\%$	-0.32	-0.30	-0.29	-0.28	-0.26	0.42	-0.31
χ_{ARM}	-0.06	-0.03	-0.03	-0.12	-0.39	0.29	-0.04
SIRM	-0.20	-0.17	-0.17	-0.22	-0.33	0.37	-0.18
HIRM	-0.19	-0.14	-0.15	-0.24	-0.30	0.35	-0.16
S_{-100}	-0.75*	-0.73*	-0.74*	-0.74*	-0.11	0.74*	-0.75*
S_{-300}	-0.53**	-0.57*	-0.58*	-0.34	0.08	0.38	-0.56*
χ_{ARM}/χ	0.70*	0.69*	0.69*	0.51**	-0.27	-0.40	0.70*
$\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$	0.69*	0.68*	0.68*	0.47**	-0.29	-0.37	0.69*
SIRM/ χ	0.25	0.23	0.22	0.31	0.05	-0.28	0.24

注: **表示在0.05水平下显著相关,*表示在0.01水平下显著相关。

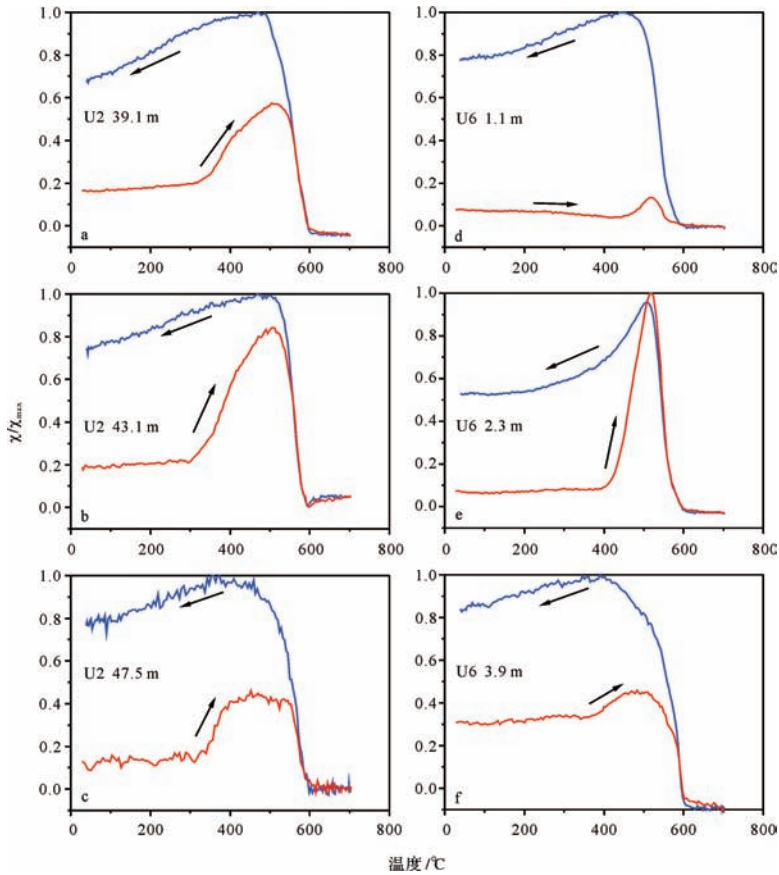


图 6 U2、U6 层典型样品热磁曲线(其中红线为加热曲线,蓝线为冷却曲线)

Fig.6 Typical thermomagnetic susceptibility curves for sediment samples in Unit U2 and U6 (Red lines represent heating curves and blue lines represent cooling curves, respectively)

热到 300°C 前变化较小,在 300°C~350°C 左右开始迅速上升,在 500°C 附近出现峰值,这通常表明样品加热过程中弱磁性矿物如黄铁矿、菱铁矿或黏土矿物向亚铁磁性矿物的转变^[34-35]。当加热温度到达 580°C,χ 显著下降,与磁铁矿的居里温度一致。加热曲线低于冷却曲线,说明加热过程中生成了强磁性矿物,如亚铁磁性矿物。U6 层典型样品的热磁曲线显示,加热过程中,χ 在 400°C~450°C 时开始上升,峰值出现在 500°C~550°C 之间。

在 U6 层中,随深度变浅,S₋₃₀₀、S₋₁₀₀ 减小,HIRM 相应增大。这表明,在 U2 层和 U6 层中,由盐沼向潮滩中、下部位环境转化,随着沉积物粒度变粗,不完整反铁磁性矿物的相对和绝对含量下降。潮滩由于周期性的潮水淹没和出露,形成氧化-还原交替的环境,周期性氧化-还原环境的波动有利于水铁矿向针铁矿的转化^[36],针铁矿脱水可形成赤铁矿。典型样品 IRM 获得曲线分峰结果如图 7 所示,磁性矿物包括一个低矫顽力组分(~30 mT)、一个中矫顽力组分

(~100 mT)和两个高矫顽力组分(~500 mT,~2 300 mT),通常情况下分别代表了磁铁矿、磁赤铁矿、赤铁矿和针铁矿^[19,37]。总体上,U6 层沉积物中矫顽力组分(~100 mT)较 U2 层更为显著,说明磁赤铁矿含量较多^[37]。U6 表层样品(1.1 m)和 U2 层底部样品(47.5 m)高矫顽力(~500 mT)的组分较为明显(图 7d, c),说明赤铁矿含量较高,与较低的 S₋₃₀₀ 值所反映不完整反铁磁性矿物含量较高相符,图 4k 也表明这两个深度具有较高的红度值,说明赤铁矿含量较高,其中 U6 层上部为全孔最高,说明赤铁矿含量最高。DRS 结果如图 8 所示,U2 层样品针铁矿和赤铁矿峰的峰高较低,加热前后 U2 层样品针铁矿主峰变化不显著,而 U6 层 1.1 m 和 2.3 m 深度样品则有显著降低,说明 U2 层相比 U6 层,赤铁矿和针铁矿含量较低。U6 层上部样品较 3.9 m 深度,具有较高的赤铁矿和针铁矿的峰高,说明 U6 层上部样品中含有较多的赤铁矿和针铁矿,即 U6 层中随深度变浅,赤铁矿逐渐增多,且含有较多的针铁矿。U2 层中各部分

尽管赤铁矿峰高差异不显著(与U6层相比),但结合S比值的变化(图4i, j)以及IRM获得曲线的分峰结果(图7),可以看出 S_{-300} 、 S_{-100} 低值的深度对应反铁磁性矿物含量高的层位,即U2层下部相比上部,赤铁矿含量较高。

不同的是,U2层下部盐沼中赤铁矿较多,而针铁矿含量较低,而U6层上部盐沼赤铁矿和针铁矿均有富集,且磁赤铁矿也较为显著。U6层在钻孔中接近地表,与Dong *et al.*^[15]研究的苏北沿海钻孔的结果相一致,因此磁性矿物特征也相似。他们的研究表明,盐沼在氧化还原交替的情况下易于形成针铁矿,沉积物呈棕黄色、灰黄色,有锈斑出现,同时沉积物表现为矫顽力增大^[15,18]。同时,在随后成陆过程中,随着地下水位的下降,透气性变强,接近地表相对氧化条件下,盐沼中存在的水铁矿逐渐形成磁赤铁矿,最终转化为赤铁矿,因而同时出现磁赤铁矿和赤铁矿富

集^[15]。但U2层下部仅赤铁矿富集,针铁矿较少。本文中U2层底部无年代数据,但根据与JS98孔^[16]的对比(图2),U2层发育盐沼时,处于晚更新世晚期至早全新世的过渡阶段,当时海平面的上升速率变化较大^[32],很可能在海平面上升相对缓慢的时候,发育的盐沼曾有一段时间长期暴露于空气中,经历了较为干燥的环境,因而不利于针铁矿的形成,之后随着早全新世海平面的快速上升,盐沼处于一个不断垂向加积的阶段,因而沉积物始终处于水下环境,不存在干湿交替的现象,也不利于针铁矿的形成。

潮滩位于海陆交界处,海平面变化和岸线变迁会导致潮滩的演化模式不同。当海平面逐渐下降时,岸线向海进积,潮滩上部发育盐沼,离岸成陆,发育土壤(U6层);相反,当早全新世海平面上升时,陆相环境受海水影响,发育盐沼,随着海平面持续上升处于不断加积环境,最终被水淹形成中、低潮滩和潮下带的

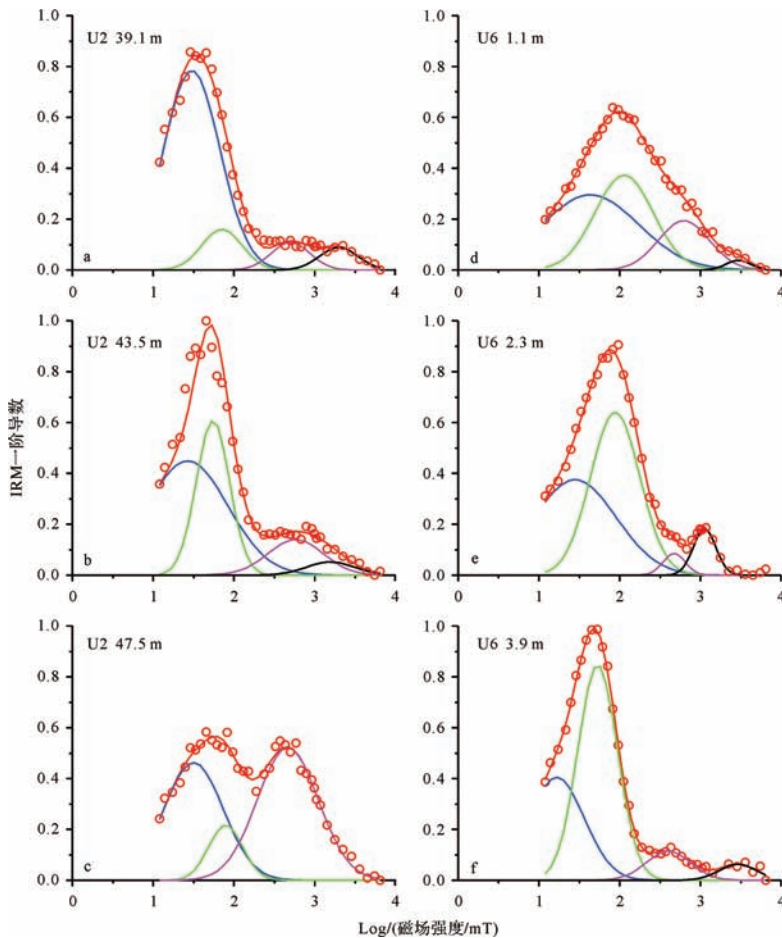


图7 U2、U6层典型样品IRM获得曲线磁性组分分析结果

圆圈为测量值的一阶导数,红线为拟合值,四种组分包括低矫顽力组分(蓝线)、中矫顽力组分(绿线)和两种高矫顽力组分(粉红、黑线)。

Fig.7 Unmixing of isothermal remanent magnetization (IRM) acquisition curves for typical samples in Unit U2 and U6

The circle represents the measured value and the red line is the fitted curve. Four components are identified, including a low-coercivity (blue), a medium-coercivity (green) and two high-coercivity (purple and black) components.

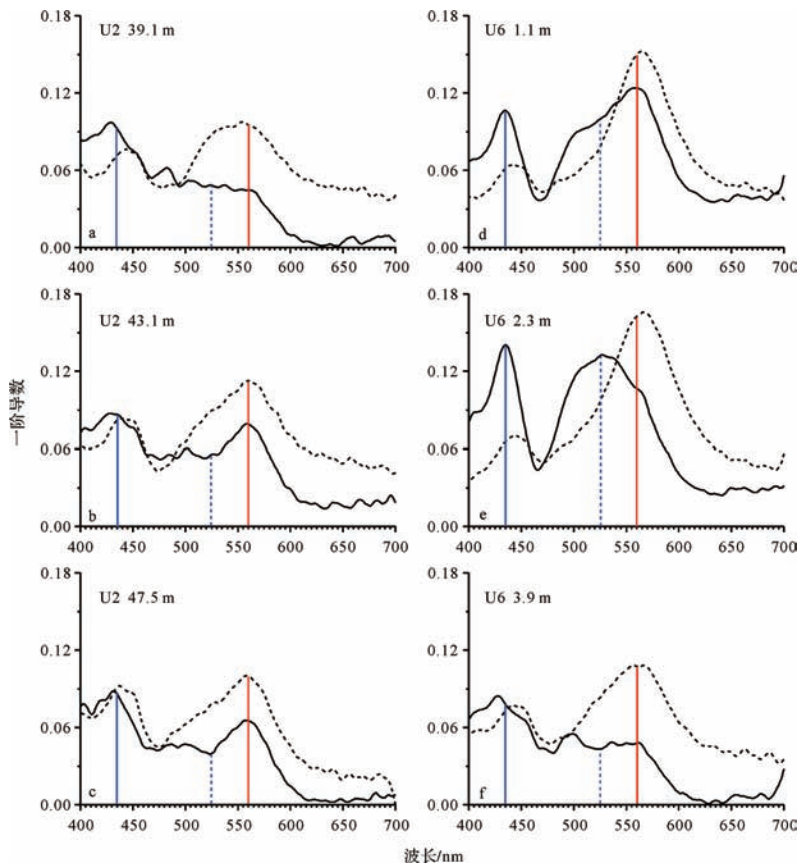


图8 U2、U6层典型样品漫反射一阶导数曲线

黑色实线和虚线分别为加热前后(300°C)的曲线;蓝色实线和虚线分别为435 nm和525 nm,反映针铁矿;红色实线为560 nm,反映赤铁矿。

Fig.8 First derivative curve of diffuse reflectance spectroscopy (DRS) of selected samples in Unit U2 and U6

The black solid and dotted lines indicate the samples before and after heating at 300°C, respectively; The blue and dotted lines indicate the peaks of goethite at 435 nm and 525 nm. The red line indicates the hematite peak at 560 nm.

河口湾环境(U2层)。这两种情形下,形成的盐沼由于处于不同的沉积环境,具有不同的磁性特征,因而有可能通过磁性特征的研究,深化对沉积环境演变的认识。

4 结论

长江三角洲北翼 NT 钻孔中,U2层底部和U6层表层均有潮滩相沉积,但其粒度变化分别表明了早全新世海岸退积(U2层)和晚全新世海岸进积(U6层)的演变过程。U2和U6层的磁性特征均表现为较低的退磁参数S比值和较高的HIRM、SIRM/X值,指示了较高含量的反铁磁性矿物,但U2层下部盐沼中赤铁矿较多,而针铁矿含量较低;U6层上部盐沼赤铁矿和针铁矿富集,磁赤铁矿也较为显著。由此可知,在三角洲全新世不同时期形成的盐沼,沉积物的磁性特征存在差异。因此,结合环境磁学和漫反射光谱分析方法对沉积物磁性特征进行研究,能够更好地认识沉

积环境的演变过程。

参考文献 (References)

- 1 严钦尚,许世远.长江三角洲现代沉积研究[M].上海:华东师范大学出版社,1987:1-438. [Yan Qinshang, Xu Shiyuan. Recent Yangtze Delta Deposits [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 1987: 1-438.]
- 2 李从先,汪品先.长江晚第四纪河口地层学研究[M].北京:科学出版社,1998:114-172. [Li Congxian, Wang Pinxian. Late Quaternary Stratigraphy of the Changjiang Delta [M]. Beijing: Science Press, 1998: 114-172.]
- 3 Chen Zhongyuan, Wang Zhanghua, Schneiderman J, et al. Holocene climate fluctuations in the Yangtze delta of eastern China and the Neolithic response[J]. The Holocene, 2005, 15(6): 915-924.
- 4 李保华.冰后期长江下切河谷体系与河口湾演变[D].上海:同济大学,2005. [Li Baohua. The Changjiang incised-valley system and estuary evolution during the postglacial period [D]. Shanghai: Tongji University, 2005.]
- 5 张玉兰.长江三角洲前缘地区晚第四纪沉积的孢粉与环境研究

- [J]. 海洋学报, 2005, 27(4): 82-87. [Zhang Yulan. Studies on spore-pollen and environment of Late Quaternary on the front edge of Changjiang River Delta[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(4): 82-87.]
- 6 杨守业, 李从先. 长江三角洲晚新生代沉积物有机碳、总氮和碳酸盐组成及古环境意义[J]. 地球化学, 2006, 35(3): 249-256. [Yang Shouye, Li Congxian. Compositions of organic elements and carbonate in the Late Cenozoic sediments of the Changjiang Delta; implication for paleoenvironmental changes[J]. Geochimica, 2006, 35(3): 249-256.]
 - 7 王张华, 张丹, 李晓, 等. 长江三角洲晚新生代沉积物磁性特征和磁性矿物及其指示意义[J]. 中国地质, 2008, 35(4): 670-682. [Wang Zhanghua, Zhang Dan, Li Xiao, et al. Magnetic properties and relevant minerals of Late Cenozoic sediments in the Yangtze river delta and their implications[J]. Geology in China, 2008, 35(4): 670-682.]
 - 8 Liu Jian, Saito Y, Kong Xianghui, et al. Sedimentary record of environmental evolution off the Yangtze River estuary, East China Sea, during the last ~13,000 years, with special reference to the influence of the Yellow River on the Yangtze River delta during the last 600 years[J]. Quaternary Science Reviews, 2010, 29(17/18): 2424-2438.
 - 9 Song Bing, Li Zhen, Saito Y, et al. Initiation of the Changjiang (Yangtze) delta and its response to the mid-Holocene sea level change[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 388: 81-97.
 - 10 Wang Zhanghua, Zhan Qing, Long Haiyan, et al. Early to mid-Holocene rapid sea-level rise and coastal response on the southern Yangtze delta plain, China[J]. Journal of Quaternary Science, 2013, 28(7): 659-672.
 - 11 王晓燕, 郭启梅, 李保华. 长江三角洲 DY03 孔有孔虫群落演化及其古环境意义[J]. 古生物学报, 2014, 53(1): 85-91. [Wang Xiaoyan, Guo Qimei, Li Baohua. Foraminiferal record of core DY03 at the Southern Yangtze Delta and its paleoenvironmental implications[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2014, 53(1): 85-91.]
 - 12 Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism[M]. London: Allen & Unwin, 1986.
 - 13 俞立中, 许羽, 许世远, 等. 太湖沉积物的磁性特征及其环境意义[J]. 湖泊科学, 1995, 7(2): 141-150. [Yu Lizhong, Xu Yu, Xu Shiyuan, et al. Paleoenvironmental implication of magnetic measurements on sediment cores from Taihu Lake, East China[J]. Journal of Lake Sciences, 1995, 7(2): 141-150.]
 - 14 陈艇, 王张华, 强小科, 等. 太湖平原 WJ 孔矿物磁学特征以及晚第四纪海侵事件[J]. 地球物理学报, 2013, 56(8): 2748-2759. [Chen Ting, Wang Zhanghua, Qiang Xiaoke, et al. Magnetic properties of minerals recorded by the borehole WJ and Late Quaternary transgressions in the Taihu plain, southern Yangtze Delta[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(8): 2748-2759.]
 - 15 Dong Yan, Zhang Weiguo, Dong Chenyin, et al. Magnetic and diffuse reflectance spectroscopic characterization of iron oxides in the tidal flat sequence from the coastal plain of Jiangsu province, China[J]. Geophysical Journal International, 2014, 196(1): 175-188.
 - 16 Hori K, Saito Y, Zhao Quanhong, et al. Evolution of the coastal depositional systems of the Changjiang (Yangtze) River in response to Late Pleistocene-Holocene sea-level changes[J]. Journal of Sedimentary Research, 2002, 72(6): 884-897.
 - 17 Stuiver M, Reimer P J. Extended ¹⁴C data base and revised CALIB 3.0 ¹⁴C age calibration program[J]. Radiocarbon, 1993, 35(1): 215-230.
 - 18 董艳. 南通滨海地区全新世沉积物磁性特征及其古环境意义[D]. 上海: 华东师范大学, 2014. [Dong Yan. Magnetic properties and their paleoenvironmental implications of sediments in Holocene from Nantong coastal region[D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.]
 - 19 Kruiver P P, Dekkers M J, Heslop D. Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetisation[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 189(3/4): 269-276.
 - 20 季峻峰, 陈骏, Balsam W, 等. 黄土剖面中赤铁矿和针铁矿的定量分析与气候干湿变化研究[J]. 第四纪研究, 2007, 27(2): 221-229. [Ji Junfeng, Chen Jun, Balsam W, et al. Quantitative analysis of hematite and goethite in the Chinese loess-paleosol sequences and its implication for dry and humid variability[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(2): 221-229.]
 - 21 Ji Junfeng, Balsam W, Chen Jun, et al. Rapid and quantitative measurement of hematite and goethite in the Chinese loess-paleosol sequence by diffuse reflectance spectroscopy[J]. Clays and Clay Minerals, 2002, 50(2): 208-216.
 - 22 Ji Junfeng, Zhao Liang, Balsam W, et al. Detecting chlorite in the Chinese loess sequence by diffuse reflectance spectroscopy[J]. Clays and Clay Minerals, 2006, 54(2): 266-273.
 - 23 周玮, 季峻峰, Balsam W, 等. 利用漫反射光谱鉴定红粘土中针铁矿和赤铁矿[J]. 高校地质学报, 2007, 13(4): 730-736. [Zhou Wei, Ji Junfeng, Balsam W, et al. Determination of goethite and hematite in red clay by diffuse reflectance spectroscopy[J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(4): 730-736.]
 - 24 Maher B A. Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites[J]. Geophysical Journal International, 1988, 94(1): 83-96.
 - 25 Bloemendal J, Liu Xiuming. Rock magnetism and geochemistry of two plio-pleistocene Chinese loess-paleosol sequences-implications for quantitative palaeoprecipitation reconstruction[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2005, 226(1/2): 149-166.
 - 26 Banerjee S K, King J, Marvin J. A rapid method for magnetic granulometry with applications to environmental studies[J]. Geophysical Research Letters, 1981, 8(4): 333-336.
 - 27 Walden J, Oldfield F, Smith J. Environmental Magnetism: A Practical Guide. Technical Guide, No. 6[M]. London: Quaternary Research Association, 1999: 1-243.
 - 28 Snowball I, Thompson R. A stable chemical remanence in Holocene sediments[J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95(B4): 4471-4479.
 - 29 杨世伦. 海滨盐沼沉积物的特征[J]. 地理科学, 1987, 7(4): 374-382. [Yang Shilun. Characteristics of sediments in seashore salt marshes[J]. Scientia Geographica Sinica, 1987, 7(4): 374-382.]

- 30 王颖,朱大奎,曹桂云. 潮滩沉积环境与岩相对比研究[J]. 沉积学报,2003,21(4):539-546. [Wang Ying, Zhu Dakui, Cao Guiyun. Study on tidal flat environment and its sedimentary facies comparative [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(4): 539-546.]
- 31 徐志明. 崇明岛东部潮滩沉积[J]. 海洋与湖沼,1985,16(3):231-239. [Xu Zhiming. The eastern flat sedimentation of the Chongming Island[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1985, 16(3): 231-239.]
- 32 Bard E, Hamelin B, Arnold M, et al. Deglacial sea-level record from Tahiti corals and the timing of global meltwater discharge[J]. Nature, 1996, 382(6588): 241-244.
- 33 Zong Yongqiang. Mid-Holocene sea-level highstand along the southeast coast of China[J]. Quaternary International, 2004, 117(1): 55-67.
- 34 Roberts A P. Magnetic properties of sedimentary greigite (Fe_3S_4) [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1995, 134(3/4): 227-236.
- 35 Pan Yongxin, Zhu Rixiang, Banerjee S K, et al. Rock magnetic properties related to thermal treatment of siderite: behavior and interpretation[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2000, 105(B1): 783-794.
- 36 Pedersen H D, Postma D, Jakobsen R, et al. Fast transformation of iron oxyhydroxides by the catalytic action of aqueous Fe(II) [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(16): 3967-3977.
- 37 Yamazaki T, Ikehara M. Origin of magnetic mineral concentration variation in the Southern Ocean [J]. Paleoceanography, 2012, 27(2): PA2206.

Magnetic Properties of Holocene Tidal Flats in the Yangtze Delta and Their Paleoenvironmental Implications

BAI XueXin¹ ZHANG WeiGuo¹ DONG Yan^{1,2} PAN DaDong¹ WANG ZhangHua¹
SUN QianLi¹ CHEN Jing¹ CHEN ZhongYuan¹ LIU JinYan¹

(1. State Key Laboratory of Estuary and Coastal, East China Normal University, Shanghai 200062, China;
2. School of Geography, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226007, China)

Abstract: In this paper, a core (NT, 60.9 m in length) in the northern part of the Yangtze River Delta, from Nantong, Jiangsu province, were subjected to environmental magnetic analysis. In combination with analysis of lithology, particle size and diffuse reflectance spectroscopy (DRS), this paper discusses the magnetic properties of tidal deposits formed in early and late Holocene and its paleoenvironmental implications. Core NT can be divided into six depositional units, namely U1 to U6, from bottom to top, among which the lower part of U2 (49.9~44.8 m) and U6 (7.5~0.3 m) are interpreted to be tidal flat facies. They are characterized with lower S-ratios and higher hard isothermal remanent magnetization (HIRM) and SIRM/ χ values, which indicates higher concentration and proportion of antiferromagnetic minerals such as hematite and goethite. In combination with DRS, it is found that the enriched hematite and goethite occur in the upper part of U6, while only hematite is enriched in the lower part of U2. Such a difference in magnetic mineralogy is related to the sedimentary environments when these sediments are deposited. Sediments in U2 were formed during late stage of late Pleistocene to early Holocene and has been in subaerial condition for a long period, which favors hematite formation and preservation. With the rising sea-level during early Holocene, the salt marsh accreted vertically and eventually inundated, which does not favor the formation of goethite. In contrast, sediments in U6 were formed during the late Holocene. The oscillating redox condition favors the formation of goethite. Abundant maghemite and hematite were formed due to pedogenesis after land formation at a later stage. This study shows that sediments in salt marsh formed in different stages of the Holocene exhibits different magnetic properties. As a result, magnetic properties of sediments can provide information about the evolution of tidal flat, which has important implication for delta paleoenvironmental reconstruction.

Key words: Holocene; tidal flat; magnetic properties; hematite; goethite; the Yangtze Delta