

文章编号: 1000-0550(2008)02-0300-08

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^①

周开胜^{1 3} 孟翊² 刘苍宇² 张卫国² 洪雪晴³

(1. 蚌埠学院食品与生物工程系 安徽蚌埠 233030 2. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室 上海 200062
3. 华东师范大学地理系 上海 200062)

摘要 通过对兴隆沙 XL2 孔沉积物磁性特征研究, 发现该地区沉积物的磁性矿物以低矫顽力的亚铁磁性矿物为主。按磁化率 χ 等磁参数曲线的变化特征将 XL2 孔划分出 4 个磁性层, 同时对比沉积物的粒度特征和微古分析结果, 探讨了长江口北支兴隆沙沉积环境的演化过程, 以及沉积物磁性特征与沉积环境的关系。

关键词 兴隆沙 磁性特征 沉积环境

第一作者简介 周开胜 男 1970 年出生 讲师 资源、环境与可持续发展 E-mail: zks606@yahoo.com.cn

通讯作者 孟翊 ymeng@sklec.ecnu.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

沉积物的矿物磁性研究始于 20 世纪 70 年代^[1], 因磁性测量方法具有便捷、对样品无破坏性和高分辨率等优点, 近年来环境磁学在我国已被广泛应用于沉积研究^[2~9], 环境磁学指标在反映过去环境信息变化机制与精度上也取得了较大的进展。磁性矿物一般可分为两类, 即低矫顽力、强磁性的亚铁磁性矿物(如磁铁矿、磁赤铁矿)和高矫顽力、弱磁性的不完整反铁磁性矿物(如赤铁矿、针铁矿), 磁铁矿一般主导了沉积物的磁性特征。根据磁铁矿晶粒的形状大小可划分为几类磁畴, 多畴(MD > 10 μm)、假单畴(PSD, 0.50 ~ 10 μm)、单畴(SD, 0.03 ~ 0.50 μm)和超顺磁(SR < 0.03 μm)。不同的沉积环境, 其沉积物所含的磁性矿物类型、含量和晶粒大小往往不同, 这主要与沉积物的来源、沉积物在搬运和沉积过程中所发生的一系列变化有关。

本文基于对长江口北支兴隆沙 XL2 钻孔样芯的磁参数测量, 结合沉积特征分析, 探讨了沉积物磁性特征与沉积环境的关系, 为进一步揭示潮汐河口潮流沉积的磁性特征和建立长江口沉积相序提供新的手段, 并在拓展环境磁学的应用领域方面进行有益的探索。

1 研究区域概况

长江口自徐六径以下, 由崇明岛将其分为南支和北支。南支为长江口主泓, 下有北港、北槽和南槽三

个入海汉道, 北支是一条独流入海的汉道(图 1)。据历史资料和图件分析, 北支曾是长江口的主泓, 18 世纪中叶以后, 长江口主泓转向南支, 1915 年北支径流分流量尚占长江口总径流量的 25%, 20 世纪 50 年代以来, 北支径流量骤减, 以至从以径流为主的落潮槽转变为以涨潮流为主的涨潮槽。近年来, 北支的径流分流量已不到 5%, 潮流成为塑造北支的主要动力^[10], 在北支水道中央形成了与潮流方向平行的带状沙体——潮流沙脊, 沙脊从三和港向下断续分布, 长达 60 km。

兴隆沙(又称黄瓜沙)是位于北支水道中的一个狭长沙洲, 据历史海图和实地调查访问, 兴隆沙所在处曾是北支的汉道, 后因主流改道, 泥沙在此沉积而形成暗沙。该沙洲于 20 世纪 70 年代出露水面^[10], 后经人工围堤成陆, 现在已构建人工锁坝与永隆沙相连, 成为崇明岛的组成部分。XL2 孔(31°43'37.13" N 121°38'50.18"E)即位于兴隆沙上。

2 样品与分析

本研究于 2003 年 6 月下旬, 在长江口北支的兴隆沙上用江苏无锡探矿厂生产的 SH-30 型钻机(口径 130 mm, 内径 110 mm)活塞式取样器, 重锤少击法采取土试样品, 取得钻孔样芯, 孔深 5 m 全取芯。样品取回后, 根据岩性描述, 对 XL2 孔的样芯, 以大

①国家重点基础研究发展规划项目(编号: 2002CB4124); 国家自然科学基金项目(批准号: 40676028)及国家自然科学基金青年基金(批准号: 40206013), 蚌埠学院优秀人才培养计划专项资助。

收稿日期: 2007-06-06 收修修改稿日期: 2007-07-24

致 5 cm 间距取样 100 块, 对全部样品作了粒度分析。根据粒度测试结果及岩性变化特征, 又对样芯在 1 ~ 3 m 深度, 以大致 10 cm 间距取样; 样芯 3 m 以下按 15 cm 间距取样, 共取得样品 44 块做磁性测量。



图 1 兴隆沙 XL2 孔位置

Fig 1 Position of Core XL1 on Xinglong Sand

样品均在低于 40 °C 的烘箱内烘干, 并轻轻敲打成粉末状, 将其置于聚乙烯保鲜袋中密封保存, 然后称 10 g 左右的样品装入塑料样品盒内, 压实固定后即可进行磁性测量。所有样品均按序作系统测量, 具体步骤如下: ①低频 (0.47 kHz) 和高频 (4.7 kHz) 弱磁场中的磁化率 (χ_{lf} , χ_{hf}); ②在交变磁场峰值 100 mT, 直流磁场 0.04 mT 下测得非磁滞剩磁 ARM, 再据公式 $\chi_{ARM} = ARM / 0.3184$ (0.3184 为生成 ARM 的直流磁场数值) 计算出非磁滞剩磁磁化率 χ_{ARM} ; ③样品在 20 mT, 300 mT 磁场中磁化后所带的剩磁 (IRM_{20mT} , IRM_{300mT}); ④经 1 T 强度的磁场磁化后的饱和等温剩磁 (SIRM); ⑤带饱和等温剩磁的样品经不同强度反向磁场退磁后的剩磁 (IRM_{-20mT} , IRM_{-40mT} , IRM_{-100mT})。最后根据以上测量结果, 计算出单位质量磁化率 χ 饱和等温剩磁 SIRM, 以及比值参数 $\chi_{fd\%}$, $SIRM/\chi$, S_{-100mT} , 和 F_{300mT} 等。

不同的磁参数分别具有不同的矿物含义, 其中 χ 和 SIRM 通常反映了样品中亚铁磁性矿物的含量, 而 χ 对 SP 比较敏感, SIRM 不仅可以反映铁磁性矿物的含量, 而且还可以表现出磁畴特征, 其测值不受到逆磁性和顺磁性矿物的影响, 但对单畴晶粒却比较敏感^[12], $\chi_{fd\%}$ 可用来指示样品中超顺磁亚铁磁性矿物的含量, χ_{ARM} 是对单畴晶粒比较敏感的参数。比值参数 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 可指示磁性矿物晶粒的大小, 但 $\chi_{ARM}/SIRM$ 由于不受 SP 颗粒的影响, 较低的比值则

反映了较粗的 MD 颗粒。 F_{300mT} 、 S_{-100mT} 、SIRM/ χ 及 Bcr 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, F_{300mT} 和 S_{-100mT} 随不完整反铁磁性矿物比例的增加而下降, 相对亚铁磁性矿物, 不完整反铁磁性矿物具有较高的 SIRM/ χ 及 Bcr 值。

磁化率测量采用的是英国 Bartington 仪器公司生产的 MS2 磁化率测量仪, 非磁滞剩磁 (ARM) 和等温剩磁 (IRM) 测量用英国 Molspin 公司生产的交变退磁仪、脉冲磁化仪和旋转磁力仪; 粒度分析采用美国 Beckman Counter 公司生产的 LSI 3320 激光粒度仪。

在对样品进行粒度分析和环境磁学分析的基础上, 对 XL2 孔样芯再按 20 cm 间隔选取一个样品的原则, 共取 25 个样品作微古分析。

有孔虫是海相地层中最重要的一类微体化石, 大多数有孔虫营底栖生活, 少数在海面浮游。长江口为潮汐河口, 有孔虫埋葬群, 具有壳体细小、皆属钙质类型等特点, 并兼有广盐性与窄盐类型, 成为河口沉积的重要标志。其中 *Epistominella naraensis* 和 *Ammonia conexidorsa* 是潮汐河口埋葬群优势种, 是潮汐带来的有孔虫分子, 其含量可作为潮汐作用强弱的指标, 一般二者之和所占的比例大于 20%, 可以认为潮汐作用较强, 小于 20% 则认为潮汐作用较弱, 不含有这两种有孔虫则一般认为几乎不受潮汐作用的影响。而 *Ammonia conexidorsa* 属广盐性种, 在我国黄海和东海长江口邻近陆架丰富, 尤其是长江口区; *Epistominella naraensis* 属窄盐性种, 我国东海陆架主要见于内陆架, 尤其在长江口、杭州湾附近海区最多, 数量丰富, 在河口内未见活个体, 常由潮汐带入。

3 结果与讨论

3.1 XL2 孔样芯的磁性特征

3.1.1 XL2 孔样芯的磁性矿物类型

退磁参数 S_{-100mT} 和磁化参数 F_{300mT} 是反映样品中亚铁磁性矿物与不完整反铁磁性矿物相对比例的重要参数, 该孔沉积物的退磁参数 S_{-100mT} 和磁化参数 F_{300mT} 分别介于 85.3% ~ 86.8% 和 92% ~ 94%, 显示亚铁磁性矿物主导了该孔样芯的磁性特征, 剩磁矫顽力 Bcr 值低, 也表明低矫顽力的亚铁磁性矿物居主导地位, 但也含有一定数量的不完整反铁磁性矿物。而指示不完整反铁磁性矿物含量的硬剩磁 HIRM 也同样反映该孔含有数量不等的完整反铁磁性矿物, 且自下而上含量有增加的趋势。

3.1.2 XL2 孔样芯的亚铁磁性矿物晶粒特征

非滞剩磁磁化率 χ_{ARM} 对 SD 晶粒十分敏感, χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 可指示亚铁磁性矿物晶粒的大小, 其值一般随粒级的变细而增大, 一般以 $\chi_{ARM}/\chi < 4 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $\chi_{ARM}/SIRM < 60 \times 10^{-5} \text{ mA}^{-1}$ 作为 PSD/MD 晶粒主导的指标^[13]。XL2 孔绝大多数样品的 $\chi_{ARM}/\chi < 4 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, $\chi_{ARM}/SIRM < 40 \times 10^{-5} \text{ mA}^{-1}$, 由 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 磁参数曲线变化特征可以看出 XL2 孔沉积物中 SD 的含量自下而上呈增加趋势变化。由此可见, 该孔沉积物中的磁性矿物以

PSD/MD 晶粒为主。频率磁化率 $\chi_{fd\%}$ 主要反映 SP 晶粒对磁化率 χ 的贡献, 该孔绝大多数样品 $\chi_{fd\%} < 4$ 指示沉积物中含有数量不等的 SP 晶粒磁铁矿。

3.1.3 XL2 孔样芯的沉积特征及磁性特征垂向变化

根据长江口北支兴隆沙 XL2 孔样芯磁参数的垂向变化, 并参照相应的沉积物粒度分析和微体古生物分析结果, 可以将全孔划分为 4 层, 现将 XL2 孔的沉积特征及磁性特征分层描述如下 (图 2)。

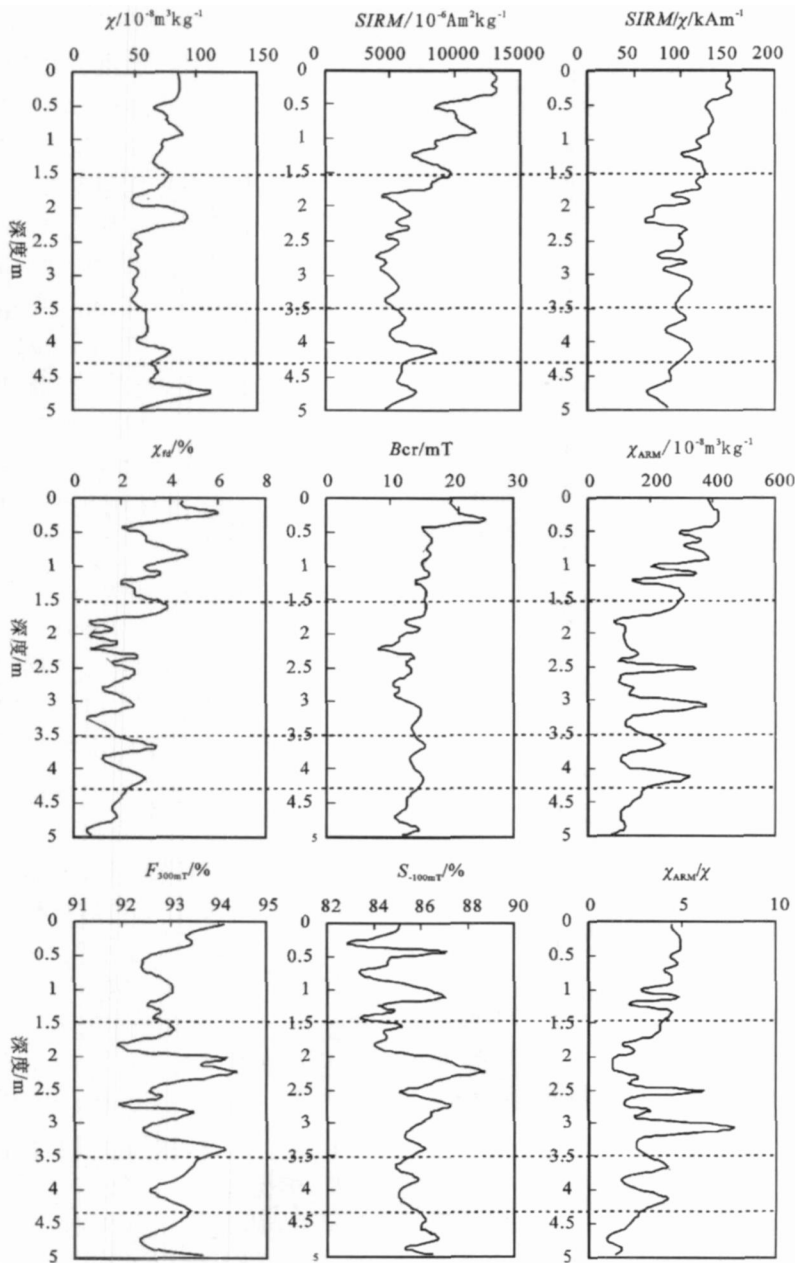


图 2 XL2 孔磁参数曲线和分层

Fig 2 Magnetic measurements and stratigraphy of Core XL2 on Xinglong Sand

层 1 (5.0 ~ 4.35 m): 该层为灰黄色—黄褐色粉砂, 平均粒径 29.7 ~ 116.9 μm , 其中 76.9% 的样品平均粒径 > 63 μm , 具水平、波状、透镜状和包卷层理。有孔虫为奈良小上口虫 (*Epistominella naraensis*)—凸背卷转虫 (*Ammonia convexidorsa*)—缝裂希望虫 (*Elphidium magellanicum*) 组合, 其中 *Epistominella naraensis* 和 *Ammonia convexidorsa* 之和占样品总数的 24%, 反映潮流作用显著的沉积环境。而该层磁化率 χ 较高, 说明铁磁性矿物含量较高, 而饱和等温剩磁 SIRM 为全孔最低, 说明粗颗粒的磁性矿物多, 而指示磁性矿物晶粒大小的主要参数 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 和 $\chi_{\text{fd}}\%$ 值低, 说明主导该层磁性特征的磁性矿物以 MD 和 PSD 为主, 单畴 (SD) 和超顺磁 (SP) 性矿物晶粒少, 而以 PSD/MD 晶粒占优势。

层 2 (4.35 ~ 3.5 m): 该层为灰黄色粉砂与粘土互层, 平均粒径 9.3 ~ 43.3 μm , 具水平、波状层理。有孔虫为凸背卷转虫 (*Ammonia convexidorsa*)—奈良小上口 (*Epistominella naraensis*)—毕克卷转虫 (*Ammonia beccarii* vars) 组合, 其中 *Epistominella naraensis* 和 *Ammonia convexidorsa* 之和占样品总数的 40%, 反映潮流作用为主导的沉积动力环境。磁化率 χ 较层 1 低, 说明铁磁性矿物含量低于层 1, 饱和等温剩磁 SIRM 较层 1 增大, 说明磁性矿物的 SD 晶粒较层 1 有所增加, 而指示磁性矿物晶粒大小的主要参数 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 和 $\chi_{\text{fd}}\%$ 均较层 1 增大, 说明单畴 (SD) 和超顺磁 (SP) 晶粒有所增加。

层 3 (3.5 ~ 1.5 m): 该层为灰黄—黄褐色粉砂与粘土互层, 平均粒径 2.6 ~ 150.6 μm , 有 90% 的样品其平均粒径 > 32 μm , 平均粒径 > 63 μm 的样品达 57.5%, 具水平、块状层理和植物根系扰动构造, 层内有铁质胶膜。有孔虫为奈良小上口虫 (*Epistominella naraensis*)—凸背卷转虫 (*Ammonia convexidorsa*)—缝裂希望虫 (*Elphidium magellanicum*) 组合, 其中 *Epistominella naraensis* 和 *Ammonia convexidorsa* 之和占样品总数的 32.72%, 反映潮流作用较为显著的沉积环境。磁化率 χ 最低, 饱和等温剩磁 SIRM 也较低, 说明铁磁性矿物含量降低, 指示磁性矿物晶粒大小的主要参 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 和 $\chi_{\text{fd}}\%$ 的值均低于层 2, 说明单畴 (SD) 和超顺磁性 (SP) 颗粒较层 2 减少。

层 4 (1.5 ~ 0 m): 为黄褐色粘土, 平均粒径 0.9 ~ 50.3 μm , 有 86.2% 的样品的平均粒径 < 32 μm 而平均粒径 < 16 μm 的样品达 62.1%, 具水平、块状结构和植物根系扰动构造, 层内多铁质胶膜。有孔虫为

毕克卷转虫 (*Ammonia beccarii* vars) —缝裂希望虫 (*Elphidium magellanicum*) —奈良小上口虫 (*Epistominella naraensis*) 组合, 其中 *Epistominella naraensis* 和 *Ammonia convexidorsa* 之和占样品总数的 12%, 反映潮流作用明显减弱的沉积环境。: 磁化率 χ 和饱和等温剩磁 SIRM 最高, 指示磁性矿物晶粒大小的主要参数 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 和 $\chi_{\text{fd}}\%$ 也最高, 说明该层沉积物中单畴 (SD) 和超顺磁性 (SP) 颗粒含量较其他 3 层显著增高。

3.2 磁性特征与沉积动力环境

天然物质的磁化率 χ 主要取决于磁铁矿的含量, 因而一般常以 χ 作为一种快速测定磁铁矿富集程度的代用量^[1]。已有研究表明^[14], 磁铁矿是该地区源于长江流域的特征重矿物之一, 在长江口重矿物中含量从 0.5% ~ 27% 不等, 而碎屑成因的磁铁矿含量和分布又往往受到了水动力条件影响, 磁铁矿在河口沙坝沉积中含量较高, 其次为河口汊道, 而在河口边滩或潮滩沉积中含量较低。因此, 磁化率 χ 的高低常被用来作为判别水动力能量相对强弱的标志^[14-15]。然而, 磁化率 χ 与水动力能量之间的关系比较复杂, 这是因为 χ 不仅与磁铁矿含量有关, 还与磁铁矿晶粒大小有关。

在 XL2 孔中, 层 1 的粒度最粗, 平均粒径介于 29.7 ~ 116.9 μm , 其中 76.9% 以上样品平均粒径 > 63 μm 表明沉积时的水动力能量为全孔最强, 但层 1 的 χ 并不是最低, 其平均值为 $73.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, 而指示磁性矿物晶粒大小的主要参数 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 和 $\chi_{\text{fd}}\%$ 值最低 (表 1), 说明单畴 (SD) 和超顺磁 (SP) 性矿物晶粒少。层 2 平均粒径介于 9.3 ~ 43.3 μm 之间, 平均粒径 < 32 μm 的样品达 50%, 说明沉积时的水动力能量相对层 1 变弱, 但磁化率 χ 却为全孔次低值, 而指示磁性矿物晶粒大小的主要参数 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 和 $\chi_{\text{fd}}\%$ 值较层 1 高。层 3 的平均粒径介于 2.6 ~ 150.6 μm , 其中 57.5% 的样品平均粒径 > 63 μm 而平均粒径 > 32 μm 的样品有 90%, 指示该层水动力能量较强, 但该层的 χ 却为全孔最低, 平均值达 $60.7 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, 而指示磁性矿物晶粒大小的主要参数 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 和 $\chi_{\text{fd}}\%$ 值较层 2 低。层 4 平均粒径 0.9 ~ 50.3 μm 有 86.2% 的样品的平均粒径 < 32 μm 而平均粒径 < 16 μm 的样品达 62.1%, 沉积物为全孔最细层, 反映沉积水动力最弱, 而磁化率 χ 却为全孔最高, 而指示磁性矿物晶粒大小的主要参数 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 和 $\chi_{\text{fd}}\%$ 值为全孔最高。

表 1 XL2孔沉积物磁参数特征

Table 1 Magnetic properties of Core XL2 on Xinglong Sand

层序	变化范围	χ	SIRM	χ_{fd}	χ_{ARM}/χ	SIRM/ χ	B _c	χ_{ARM}	$\chi_{ARM}/SIRM$	F ₃₀₀	S ₋₁₀₀
		/10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹	/10 ⁻⁶ Am ² kg	%	/10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹	/kAm ⁻¹	/mT	/10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹	/10 ⁻⁵ mA ⁻¹	%	%
层 4 0~1.5m	均值	77.7	10 317.7	3.5	4.3	13.2	17.4	333.4	32.2	93	84.8
	最大	88.9	13 211.7	6	4.9	15.4	25.2	415.7	40.3	94	87
	最小	64.2	6 703.5	2	2.1	9.96	14.2	143	21.3	92	82.9
层 3 1.5~3.5m	均值	60.7	5 786.6	1.9	3.0	9.7	13	172.5	29.7	93	86
	最大	92.5	9 663.0	3.9	7.8	12.6	15.8	378.4	71.3	94	88.7
	最小	44.8	3 925.7	0.6	1.3	6.2	8.3	88.4	17.9	92	84
层 2 3.5~4.35m	均值	61.7	6 131.2	2.3	3.2	9.9	14.5	198	31.5	93	85.3
	最大	77.7	8 592.8	3.4	4.2	11.1	15.5	324.5	39.3	94	85.9
	最小	51.9	4 975.4	1.2	1.8	8.3	13.2	110.9	22.3	93	84.9
层 1 4.35~5m	均值	73.1	5 699.1	1.3	1.7	8	12.6	116.6	20.5	93	86.1
	最大	111.3	7 067.9	2	2.4	8.7	14.7	166.9	28	94	86.8
	最小	53.5	4 569.0	0.6	0.9	6.4	10.9	74.3	14.5	92	85.3

由上述分析可见,从层 1 至层 4 沉积物粒度变化为粗—细—粗—细相间变化,反映相应的沉积水动力能量为强—弱—强—弱的变化。在磁化率 χ 上却反映出较高—次低—低—高的变化;而指示磁性矿物晶粒大小的主要参数 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 和 $\chi_{fd}\%$ 的值,却反映出低—高—低—高的变化,但总的变化趋势是自下而上增大;而既可以反映磁性矿物含量,又可以反映磁畴特征的 SIRM 的值也表现出低—高—低—高的变化,表明磁畴自下而上的粗细相间变化与沉积物的粒度变化相一致;反映不完整法铁磁性矿物含量高低的 SIRM/ χ 及 B_c 值自下而上呈低—高—低—高的变化趋势。有孔虫的丰度上却表现出高—低—高—低的变换趋势,反映沉积速率的快—慢—快—慢的变化。导致这些差异的原因就在于层 1 至层 4 的磁性矿物晶粒含量和氧化还原条件以及潮流作用强弱不同造成的。由于 SP 晶粒对磁化率 χ 的贡献率比与其等量的稳定单畴 (SD) 或多畴 (MD) 颗粒对 χ 的贡献率要大得多,因而在沉积物样品中,只要有一小部分 SP 晶粒就可以对该样品的 χ 起重要作用^[1]。氧化还原条件对亚铁磁性矿物含量也会有不同程度的影响。此外,人类活动的影响也不容忽视,如在 XL2 孔附近有一砖瓦厂,其飞灰的沉降必然对层 1 的磁化率 χ 产生影响,导致磁化率显著升高。据报道^[7],在长江口区磁化率 χ 与沉积物粒度的相关性较低,这一特性在 XL2 孔沉积物中也得到证实,而沉积物粒度往往反映沉积水动力条件的强弱。由此可见,以 χ 值高低来作为长江口北支的水动力强弱的判据是有其局限性的,或者说是有条件的,只有当沉积物粒度在细砂粒级以下,且 SP 晶粒含量很少以致

对 χ 的变化微不足道时,才能够以 χ 作为判断水动力强弱的标志。

综上所述,在众多磁参数中,其实指示磁铁矿晶粒大小的参数 $\chi_{fd}\%$ 、 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 在判别水动力能量上更有价值,这是因为在自然状况下磁铁矿颗粒同样地遵循水力学原理,按其粒径大小进行分异和沉积,以 XL2 孔来看,从层 1 向上,沉积物的粒径粗细相间的变化,却可反映水动力能量向上的强弱变化规律,而 $\chi_{fd}\%$ 、 χ_{ARM} 、 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 值向上的低—高—低—高的变化(图 2、表 1),对应沉积物粒度的粗—细—粗—细变化,亦即上述磁参数值与平均粒径呈负相关,与粘土含量呈正相关,其原因在于超细超顺磁和单畴晶粒多集中在粘土中,沉积物越细,其中所含细晶粒磁铁矿越多。由此可见, $\chi_{fd}\%$ 、 χ_{ARM} 等显示晶粒大小的磁参数比之 χ 、SIRM 等指示磁性矿物含量的磁参数,更能有效地反映沉积动力环境。

3.3 磁性特征与地球化学环境

Fe 是一种变价元素,它的赋存状态与地球化学环境有着十分密切的关系,因为磁铁矿是含有 Fe²⁺ 和 Fe³⁺ 的氧化铁,在还原条件下,Fe³⁺ 可向 Fe²⁺ 转化而形成铁的硫化物(如黄铁矿等);而在氧化环境下,Fe²⁺ 可向 Fe³⁺ 转化,形成赤铁矿、针铁矿等。正是由于在这种特定条件下,沉积物中铁的氧化物发生次生变化,导致沉积物磁性特征的某种改变,从而成为环境磁学解读地球化学环境的重要依据。

从 XL2 孔样芯磁性特征的某些变化,也能找到地球化学环境变化的一些踪迹。如层 1 的 χ 值较高而 SIRM 较低值,表明亚磁铁矿含量相对较高,且以

粗颗粒的磁性矿物为主, 而该层的 $\chi_{fd}\%$ 、 χ_{ARM} 等参数为全孔最低值, 也指示了磁铁矿晶粒较粗。其原因主要是层 1 中的细晶粒磁铁矿在还原条件下优先发生溶解, 并因细晶粒的优先溶解而导致磁铁矿晶粒相对粗化。已有研究表明^[8], 沉积物中普遍存在的无定形铁的磁性远远低于磁铁矿, 在还原条件下, 要优先于磁铁矿充当电子受体, 因此, 即使其发生大量的还原溶解, 也不会造成 χ SIRM 的明显下降。从层 1 样芯呈灰色也印证了该层处于相对还原的地球化学环境。而层 3 由于植物深层根部的呼吸作用, 导致该层氧的含量明显低于层 4 而处于相对还原状态, 也使得细晶粒磁铁矿在还原条件下优先发生溶解, 而导致磁铁矿晶粒相对粗化。层 4 由于植物地上部分向地下浅层根部输送氧气以及表层土壤空隙游离氧的存在而处于氧化环境, 不完整反铁磁性矿含量显著增多, 加之沉积水动力减弱, 细颗粒的磁性矿在该层富集较多而该层 χ SIRM 等指示磁性矿物含量和指示磁性矿物类型的磁化参数 SIRM / χ Bcr 和 HIRM 以及指示磁性矿物晶粒大小的 χ_{ARM} 、 $\chi_{ARM} / \chi_{ARM} / SIRM$ 和 $\chi_{fd}\%$ 等参数值均为全孔最高。因此, 一般可以依 χ χ_{ARM} 和 $\chi_{fd}\%$ 、 χ_{ARM} / χ 同时处于低水平作为还原环境的标志。又如层 4 的 SIRM / χ Bcr 和 HIRM 均为该孔最大值, 而 S_{-100mT} 均值降至 84.8%, 显示层 4 中不完整反铁磁性矿物含量显著增加, 这与氧化作用增强有关, 因

为磁铁矿在氧化环境下容易转变为赤铁矿和针铁矿, 从而使该层沉积物中的赤铁矿和针铁矿含量增加。层 4 样芯呈黄褐色, 且含铁质胶膜也正是氧化作用的反映。层 2 和层 3 样芯呈暗灰色, 是还原环境的标志。因此, 一般可以 SIRM / χ Bcr 和 HIRM 的高值, 以及 S_{-100mT} 的低值作为氧化环境的判据。

3.4 沉积相序

不同层位的沉积物因其水动力条件和沉积地球化学环境的差异而具有不同的磁性特征, 因而据各磁参数的垂向变化, 将样芯划分出 4 个磁性层位。当磁性层与沉积物的岩性、沉积特征、微体古生物组合等相结合时, 便有了沉积相序的内涵。

纵观前文所述, 我们得出兴隆沙 XL2 孔揭示的沉积环境自下而上具有以下变化趋势: (1) 沉积物粒度由层 1 → 层 4 按粗 → 细 → 粗 → 细的趋势相间变化, 反映水动力能量经历了一个由强而弱的交替变化过程。(2) 指示磁性矿物晶粒大小的主要参数 χ_{ARM} 、 χ_{ARM} / χ 、 $\chi_{ARM} / SIRM$ 和 $\chi_{fd}\%$ 的值, 却反映出低—高一—低—高的变化, 但总的变化趋势是自下而上增大; 反映不完整反铁磁性矿物含量高低的 SIRM / χ 及 Bcr 值自下而上呈低—高一—低—高的变化趋势。(3) 沉积构造显示出典型的潮汐层理构造, 并表现为由水平、波状、波痕交错层理过渡为透镜状、水平互层和包卷层理等, 表明该孔所揭示的地层形成于潮汐作用影响

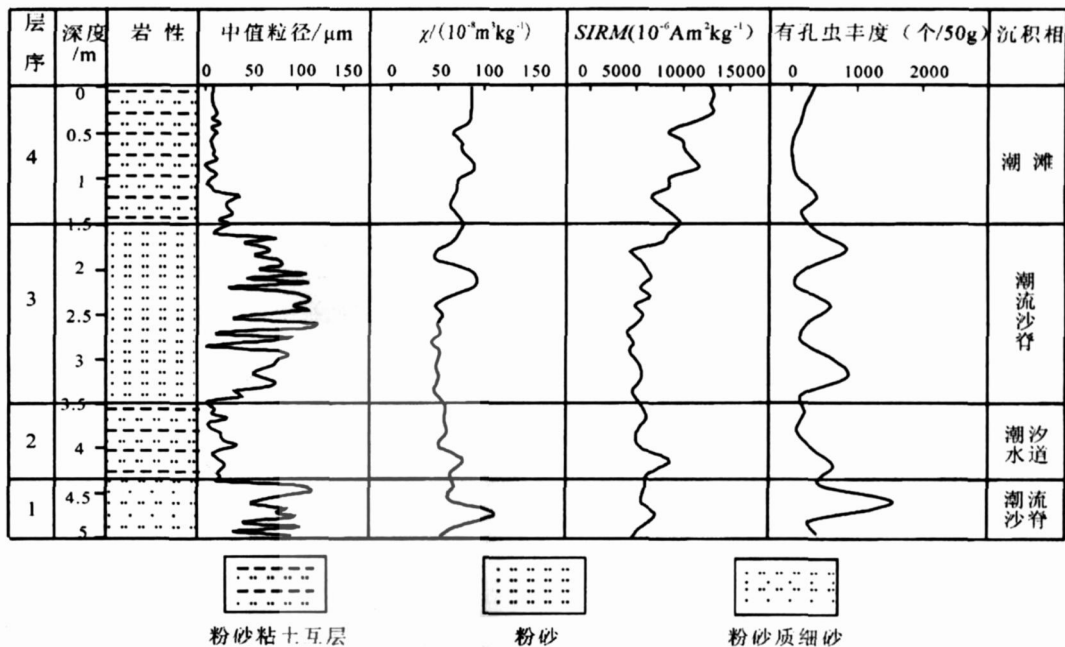


图 3 XL2 孔综合柱状图

Fig 3 Composite column of core XL2 on Xinglong Sand

的河口环境,而且自下而上潮流作用强度呈由强而弱的交替变化,并最终逐渐减弱的变化趋势。(4)沉积物颜色由灰黄→黄褐色,指示了地球化学环境从还原→氧化的变化。(5)自下而上有孔虫丰度呈现高低相间的变化,而有孔虫外来种逐步减少和广盐浅水种向上增多,通常以 *Epistominella naraensis* 和 *Ammonia coneixidorsa* 之和占样品总数等于 20% 作为潮流作用强弱的标志,而该孔样芯有孔虫分析发现, *Epistominella naraensis* 和 *Ammonia coneixidorsa* 之和占样品总数除层 4 (为 12%) 外均大于 20%, 反映自下而上水深变浅,潮流作用逐渐减弱的变化。

据上述变化过程分析,可以得出该孔层 1→层 4 的沉积相序为:潮流沙脊→潮汐水道→潮流沙脊→潮滩(潮间带、潮上带),自下而上构成了一套潮汐水道充填加积的河口湾沉积相(图 3)。

4 结论

(1) 兴隆沙 XL2 孔样芯磁性矿物以亚铁磁性矿物为主,不完整反铁磁性矿物的相对含量向上递增。亚铁磁性矿物晶粒以 PSD MD 为主, SD 和 SP 晶粒向上递增。

(2) 按 XL2 孔样芯磁性特征的垂向变化可以划分为 4 层,参照样芯沉积特征可以推断兴隆沙沉积环境自下而上的演变序列为:潮流沙脊→潮汐水道→潮流沙脊→潮坪(潮间、潮上带)。

(3) 鉴于磁化率 χ 与粒度关系的复杂性,以 χ 高低判别水动力强弱,在长江口北支有一定的局限性,而指示晶粒大小的磁参数 $\chi_{fd\%}$ 、 χ_{ARM} 等,一般随粘土含量的增加而增大。因此,用 $\chi_{fd\%}$ 、 χ_{ARM} 等参数值的大小来判别水动力强弱,比 χ SIRM 等参数更为有效。

(4) 磁参数对地球化学环境(早期成岩作用)的变化十分敏感。从 XL2 孔的磁性特征来看,当 χ SIRM 和 $\chi_{fd\%}$ 、 χ_{ARM}/χ 同处于低值时,反映细晶粒磁铁矿优先溶解,晶粒粗化,可作为还原环境的判据,而在近地表环境下 SIRM/ χ Bcr 和 HIRM 的高值,以及 $S_{-100mT\%}$ 的低值,一般显示赤铁矿、针铁矿的含量相对较高,可以作为氧化环境的标志。

致谢 对审稿人提出宝贵的修改意见我们深表感谢!

参考文献 (References)

1 Thompson R O Liffeld F. Environmental Magnetism [M]. London: Allen and Unwin, 1986: 227

- 2 刘秀铭, 刘东生, John Shaw. 中国黄土磁性矿物特征及其古气候意义 [J]. 第四纪研究, 1993 (3): 281-287 [Liu Xiuming, Liu Tungheng, John Shaw. Magnetic mineral characteristics of Chinese loess and its palaeoclimatic significance [J]. Quaternary Sciences, 1993 (3): 281-287]
- 3 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): 141-149 [Yu Lizhong, Xu Yu, Xu Shiyuan, et al. Palaeoenvironmental implication of magnetic measurements on sediment cores from Taihu Lake, East China [J]. Journal of Lake Sciences, 1995 7(2): 141-149]
- 4 吴瑞金. 湖泊沉积物磁化率、频率磁化率及其古气候意义——以青海湖、岱海近代沉积为例 [J]. 湖泊科学, 1993 5(2): 128-135 [Wu Ruijin. Magnetic susceptibility (χ) and frequency dependent susceptibility ($\chi_{(f)}$) of lake sediments and their palaeoclimatic implication: the case of recent sediments of Qinghai Lake and Dahai Lake [J]. Journal of Lake Sciences, 1993 5(2): 128-135]
- 5 刘建, 李绍全, 王圣洁, 等. 南黄海东北陆架 YSDP105 孔冰消期以来沉积层序的磁学特征研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997 17(4): 13-23 [Liu Jian, Li Shaoquan, Wang Shengjie, et al. A rock magnetic study of the Last Deglacial to Holocene sedimentary sequence in the YSDP105 Core on the Northeast Shelf of the South Yellow Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1997 17(4): 13-23]
- 6 张卫国, 俞立中, 李维显. 东海陆架表层沉积物的磁性测量及其油气勘探意义 [J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1998 (1): 76-81 [Zhang Weiguo, Yu Lizhong, Li Weixian. Magnetic measurements on surface sediments from East China Sea Continental Shelf and its potential application in oil and gas exploration [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 1998 (1): 76-81]
- 7 张卫国, 俞立中. 长江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), 2002 32(9): 783-792 [Zhang Weiguo, Yu Lizhong. Magnetic properties of tidal flat sediments of Yangtze Estuary and its relationship with particle size [J]. Science in China (Series D), 2002 32(9): 783-792]
- 8 韩晓非, 张卫国, 陈满荣, 等. 长江口潮滩植物对沉积物铁的地球化学循环及磁性特征的影响 [J]. 沉积学报, 2003 21(3): 495-499 [Han Xiaofei, Zhang Weiguo, Chen Manrong, et al. Influence of plant on geochemical cycling of iron and the magnetic properties of intertidal sediments in the Yangtze Estuary [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003 21(3): 495-499]
- 9 贾海林, 刘苍宇, 张卫国, 等. 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 [Jia Hailin, Liu Cangyi, Zhang Weiguo, et al. Magnetic properties of Core CY from Chongming Island, the Yangtze Estuary and its environmental significance [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004 22(1): 117-123]
- 10 邹德森. 长江口北支的演变过程及今后趋势 [J]. 泥沙研究, 1987 (1): 66-76 [Zou Desen. The evolutionary process and its current on the North Branch of Yangtze River Estuary in the future [J]. Journal of Sediment Research, 1987 (1): 66-76]
- 11 吕全荣, 严肃庄. 长江口重矿物组合的研究及其意义 [J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1981 (1): 73-82 [Lv Quanrong, Yan Suzhuang. A study of the heavy mineral groups in the Changjiang estuary

- ary region and their significance[J. Journal of East China Normal University (Natural Science Edition), 1981, (1): 73-83]
- 12 张树夫, 肖家仪, 俞立中, 等. 沉积物矿物磁性测量在古环境研究中的应用[J. 地理科学, 1991 11(2): 182-193] Zhang Shufu Xiao Jiayi Yu Lizhong et al. Mineral magnetic measurement of Lake sediments and its environmental implication[J. Scientia Geographica Sinica 1991 11(2): 182-193]
- 13 Oldfield F. Toward the discrimination of fine-grained ferrimagnets by magnetic measurements in lake and nearshore marine sediments[J. Journal of Geophysical Research 1994 99(b5): 9045-9050]
- 14 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[J. 地理学报, 1996 51(2): 155-163] Wang Jian Liu Zechun Jiang Wenying et al. A relationship between susceptibility and grain-size and minerals and their paleo-environmental implication [J. Acta Geographica Sinica 1996 51(2): 155-163]
- 15 葛宗诗. 南黄海 QC2 孔磁化率研究[J. 海洋地质与第四纪地质, 1996 16(4): 35-42] Ge Zongshi Study on magnetic susceptibility of Hole QC-2 in the South Yellow Sea[J. Marine Geology & Quaternary Geology 1996 16(4): 35-42]

Magnetic Properties and Sedimentary Environment of Core XL2 on Xinglong Sand in the North Branch, the Yangtze Estuary

ZHOU Kai-sheng^{1,3} MENG Yi² LIU Cang-zi² ZHANG Wei-guo² HONG Xue-qing³

(1. Department of Foodstuff & Bioengineering Bengbu College Bengbu Anhui 233030)

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

3. Department of Geography East China Normal University Shanghai 200062)

Abstract Magnetic measurements were conducted on Core XL2 from Xinglong Sand the Yangtze Estuary. The result indicates that ferromagnetic mineral of multi-domain (MD)/pseudo-single domain (PSD) in size dominates the magnetic properties of the samples. The core of XL2 can be divided into four layers according to the variations of magnetic susceptibility and other magnetic parameters. On the basis of magnetic properties, lithofacies and foraminifer and assembled character, it can be found that the mode of environmental evolution of Xinglong sand bar tidal current ridge-tidal channel-tidal current ridge-supratidal zone (intertidal zone and supertidal zone), forming the sedimentary facial sequence of the filled estuary. In addition, the significance of some magnetic parameters on determining sedimentary hydrodynamics and geochemical environment is also discussed.

Key words Xinglong Sand magnetic properties sedimentary environment