

长江口潮滩沉积物的磁学性质 及其与粒度的关系*

张卫国** 俞立中

(华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

摘要 对长江口潮滩沉积物的环境磁学研究表明, 沉积物磁性特征由多畴/假单畴磁铁矿所主导. 磁铁矿除陆源碎屑成因外, 在磁性最强的石洞口排污口附近沉积物中出现了球形磁性颗粒, 系工业污染的产物. 粒度是影响长江口潮滩沉积物磁性特征的重要因素, 磁化率、饱和等温剩磁与 $8\sim 16\ \mu\text{m}$ 粒级含量呈正相关, 而非磁滞剩磁磁化率等指示细颗粒亚铁磁性矿物的参数与 $<4\ \mu\text{m}$ 乃至 $<32\ \mu\text{m}$ 粒级组分高度正相关. 这一特征表明, 在将磁化率作为污染物含量代用指标时, 需考虑粒度造成的磁化率波动的可能影响, 非磁滞剩磁磁化率则可以作为沉积物细粒级组分的代用指标, 并应用于污染物含量的粒度校正.

关键词 环境磁学 粒度 沉积物 潮滩 长江口

环境磁学自 20 世纪 70 年代中期发展以来, 在地学许多领域得到了广泛的应用^[1]. 在我国, 围绕古气候、古环境演变, 对黄土、湖泊和海洋沉积物进行了大量的环境磁学研究, 取得了许多重要成果^[2~9]. 目前, 通过现代沉积物环境磁学的研究, 探讨其在环境污染、物源判别等领域的应用是环境磁学重点发展领域之一^[10], 但这方面的工作在国内开展不多. 本文对长江口潮滩沉积物进行了较为细致的环境磁学研究, 并就沉积物粒度组成对磁学特征的影响及磁学参数的环境应用作了探讨.

1 样品和方法

长江口的中等潮差、长江携带的巨量泥沙以及面向广海的低波能缓坡带为河口潮滩发育创造了条件^[11](图 1). 发育典型的潮滩, 自陆向海依次为芦苇带(*Phragmites australis*)、蘆草带(*Scirpus*)和光滩. 长江口潮滩受人类活动影响强烈, 20 世纪 60 年代末以来在潮滩之上建成的西区、南区排污口, 对附近潮滩沉积物影响较大^[12].

为较为完整地反映潮滩沉积物的磁性特征, 本次研究着重选择了 5 个站点, 分别是位于长江口南岸边滩的石洞口、白龙港和东海, 崇明东滩东旺沙和位于江心的九段沙(图 1). 石洞口和白龙港紧邻排污口; 东海和东旺沙位于郊县, 工业化程度低, 而它们所在的区域也是长江口潮滩最为发育的地带; 九段沙刚刚成陆, 目前尚未被围垦, 它和崇明东滩是上海滨海湿地资源

2001-12-29 收稿

* 国家自然科学基金(批准号: 4987068, 40001020)及上海市重点学科资助项目

** E-mail: wgzhang@sklec.ecnu.edu.cn

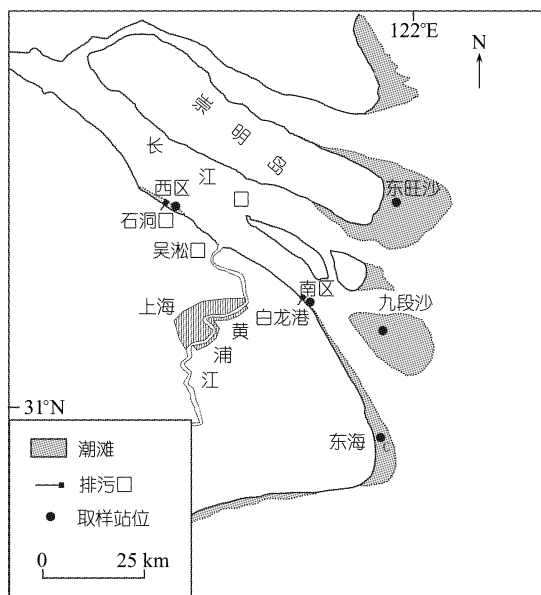


图 1 研究区域及采样站位

的重点保护区域。

在每一站点分别采集了柱状样(约 60 cm 长), 其中石洞口、白龙港和东海 3 个站位的样品采集于 1995 和 1996 年 9 月, 并同步采集了表层样(0~5 cm), 东旺沙和九段沙两个站位的样品采集于 1998 年 4 月。样品采集主要在高潮滩进行, 因为高潮滩物质通常最细^[11], 污染物质也最易富集。在石洞口采集的柱样以 50 cm 为界, 上部为灰黑色, 下部呈黄棕色, 其余柱样上部以黄棕色为主, 30~40 cm 深度以下向青灰色过渡。现场将采集的样品密封好, 在实验室, 以 1~2 cm 间距(东海沉积物为 4 cm 间距)分割柱样, 所有样品于低温下烘干(<40℃), 除粒度分析样品外, 其余样品磨碎, 以备磁性测量。

样品磁化率及频率磁化率测量采用英国 Bartington MS2 磁化率仪, 非磁滞剩磁

(ARM, 交变磁场峰值 100 mT, 直流磁场 0.04 mT)和等温剩磁(IRM)利用英国 Molspin 公司生产的交变退磁仪、脉冲磁化仪和 Minispin 旋转磁力仪完成, 并根据测量结果计算了磁化率(χ)、频率磁化率(χ_{fd} , $\chi_{fd}=[\chi_{LF}-\chi_{HF}]/\chi_{LF}\times 100$)、饱和等温剩磁($SIRM=IRM_{100mT}$)、软剩磁($SOFT=IRM_{20mT}$)、非磁滞剩磁磁化率(χ_{ARM})、剩磁矫顽力(Bcr)等参数, 以及比值参数 χ_{ARM}/χ , $\chi_{ARM}/SIRM$, $SIRM/\chi$, S_{-100} ($S_{-100}=[SIRM-IRM_{-100mT}]/[2\times SIRM]\times 100$), F_{300} ($F_{300}=IRM_{300}/SIRM\times 100$), χ , $SIRM$, $SOFT$, χ_{ARM} 等参数主要与磁性矿物含量有关, χ_{fd} , χ_{ARM}/χ , $\chi_{ARM}/SIRM$, $SIRM/\chi$, S_{-100} , F_{300} 及 Bcr 主要反映了磁性矿物的颗粒大小和类型^[13]。磁滞回线利用英国 Molspin Nuvo 振动磁强计(VSM)测量, 热磁分析利用可变场磁天平(VFTBE)进行分析。样品的粒度分析采用激光粒度分析仪(Coulter LQ-100Q)进行。每一站点皆选择典型样品, 按文献[14]给出的方法, 将样品置于烧杯中, 加蒸馏水及分散剂(六偏磷酸钠)使之充分分散后, 一边振荡样品, 一边用外裹塑料薄膜的稀土小磁铁提取较粗的磁性颗粒, 如此重复数次。然后再用带蠕动泵的装置, 使样品循环通过一个高梯度的弱磁场, 以收集细的磁性颗粒。对提取的磁性颗粒进行电镜扫描(JXA-840, JEOL100CX II)和电子探针(EPMA-8705QH2, TN-5502N 能谱仪)分析。此外, 部分样品进行了粒级分离基础上的磁性测量。

2 结果

表 1 给出了各站点沉积物磁性参数的变化范围及平均值。由于研究区样品 χ 与 $SIRM$, $SOFT$ 高度相关(见图 2), χ_{ARM}/χ 与 $\chi_{ARM}/SIRM$ 具有极为类似的垂向变化, S_{-100} 和 Bcr 随深度变化不大, 故图 2 仅显示了 χ , χ_{fd} , χ_{ARM} , $\chi_{ARM}/SIRM$, F_{300} 等磁性参数随深度的变化特征。由表 1 和图 2 可见, 与磁性矿物含量有关的参数变化较大, 既存在同一站点垂向上的差异, 也表现出不同站点之间的差异。如 χ 变化于 $43.0\times 10^{-8}\sim 124.8\times 10^{-8} m^3\cdot kg^{-1}$ 之间, $SIRM$ 变化于

表 1 长江口潮滩不同站点沉积物的环境磁学参数^{a)}

站点	石洞口 (n=32)				白龙港 (n=39)				东海 (n=23)				东旺沙 (n=59)				九段沙 (n=48)			
	极小值	极大值	平均值	极小值	极大值	平均值	极小值	极大值	平均值	极小值	极大值	平均值	极小值	极大值	平均值	极小值	极大值	平均值	极小值	极大值
$\chi \times 10^{-8}/\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	72.4	124.8	96.4	49.7	82.8	62.5	43.0	98.4	69.2	49.5	67.2	58.8	59.4	87.0	73.2					
$\chi_{\text{fd}}/\%$	1.5	3.9	2.3	1.1	2.8	2.0	0.7	7.3	3.7	0.1	2.8	2.0	1.7	4.6	3.3					
$\text{SIRM} \times 10^{-6}/\text{Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	8138.5	19943.6	14485.8	5267.4	11006.4	7646.7	6376.7	15897.3	10378.4	7909.7	11265.2	9512.6	8328.6	12932.2	10450.7					
$\text{SOFT} \times 10^{-6}/\text{Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	1140.7	2698.2	1888.2	801.1	1520.3	1003.5	837.4	2076.7	1369.1	918.8	1422.9	1123.3	1151.9	1733.5	1449.1					
$\chi_{\text{ARM}} \times 10^{-8}/\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	141.6	470.5	279.2	100.4	348.6	158.1	107.1	751.6	340.5	142.9	329.1	227.3	169.5	414.0	287.1					
Bct/mT	32.4	37.1	35.5	29.9	37.2	34.8	34.2	39.6	36.9	31.9	43.5	38.0	31.8	37.6	35.4					
$\frac{\chi_{\text{ARM}}}{\text{SIRM}} \times 10^{-5}/\text{m} \cdot \text{A}^{-1}$	8.2	28.3	19.2	14.5	31.6	20.8	15.1	49.1	32.7	16.5	31.7	23.9	20.2	34.9	27.3					
χ_{ARM}/χ	1.3	5.1	2.9	1.6	4.4	2.5	1.9	7.7	4.7	2.5	5.1	3.9	2.7	4.9	3.9					
$\frac{\text{SIRM}}{\chi} \mu\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	11.1	18.1	14.9	10.6	14.9	12.2	11.6	19.5	14.6	14.9	18.1	16.2	12.6	16.0	14.3					
$\text{S}_{-100}/\%$	86.6	88.6	87.1	82.8	89.3	84.9	81.1	86.1	83.3	80.2	85.6	81.7	81.7	85.8	83.9					
$\text{F}_{300}/\%$	93.9	97.9	94.8	88.5	94.9	92.6	90.7	96.6	92.6	90.9	95.3	93.4	91.4	98.8	94.7					

a) 括号中数字为每一站点样品数, 含表层样

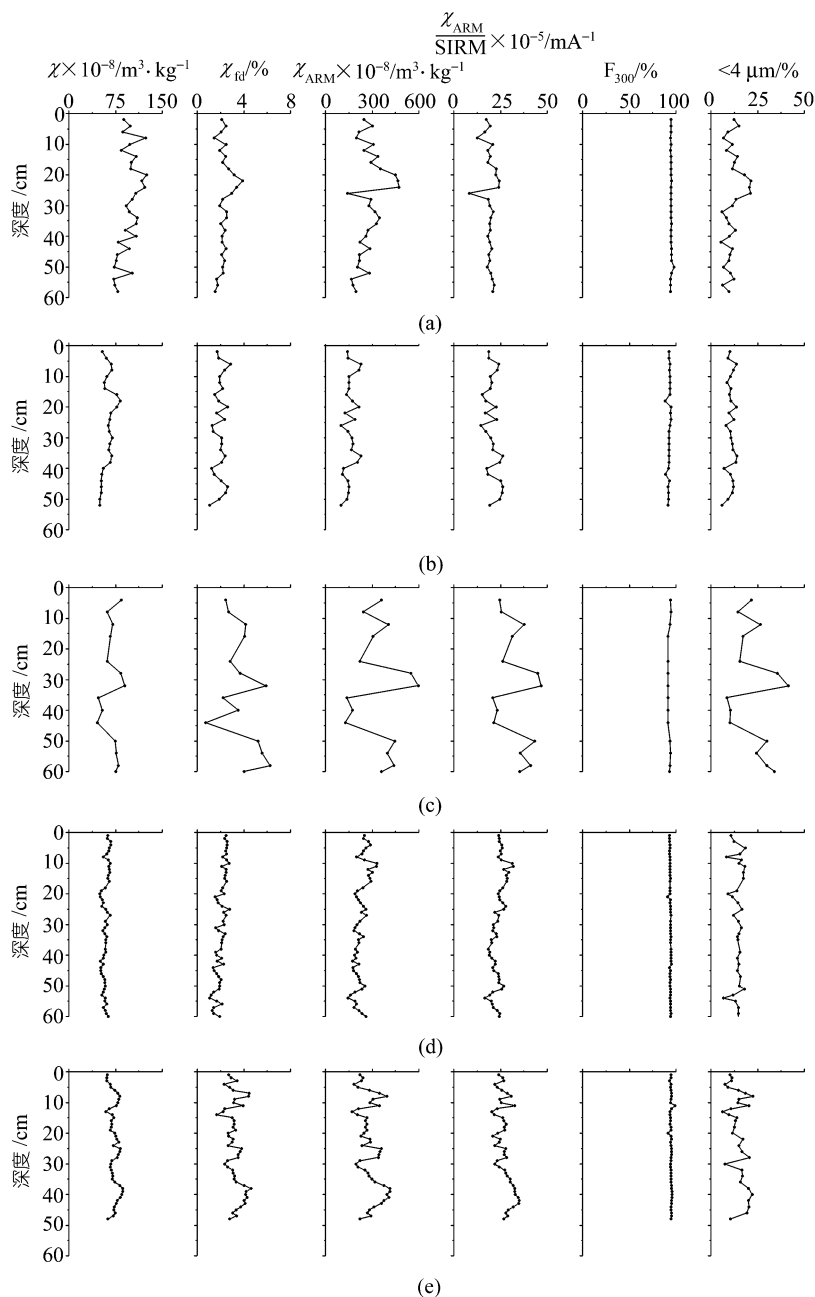


图 2 不同站点柱样磁学参数及粘土组分含量的垂向变化

(a)石洞口, (b)白龙港, (c)东海, (d)东旺沙, (e)九段沙

$5267.4 \times 10^{-6} \sim 19943.6 \times 10^{-6} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 相差 3~4 倍。平均而言, 石洞口沉积物磁性最强。而 S_{-100} 和 F_{300} 的最大值和最小值非常接近, 且各站点相差不大, 显示了潮滩沉积物磁性特征的差异性和共性。

2.1 磁性矿物

F_{300} 是样品在 300 mT 磁场中磁化后所携带剩磁与饱和等温剩磁的比值, 反映了样品中亚铁磁性矿物(如磁铁矿)与不完整反铁磁性矿物(如赤铁矿、针铁矿)的相对比例, 它随着不完整反铁磁性矿物贡献的增加而下降。本区沉积物样品的 F_{300} 平均达到 92 % 以上, 即经 300 mT 磁场磁化后, 样品所携剩磁已接近饱和, 说明亚铁磁性矿物主导了样品的磁性特征, 但同时存在不完整的反铁磁性物质的贡献。本区潮滩沉积物剩磁矫顽力 B_{cr} 较低, 介于 30~40 mT 之间, 这些特征都表明低矫顽力的亚铁磁性矿物主导了样品的磁性特征。各个站点都具有相似的 F_{300} 和 B_{cr} 的平均值, 显示了相对一致的磁性矿物组成。

与磁化率不同的是, 饱和等温剩磁不受顺磁性和抗磁性物质的影响, 主要由亚铁磁性矿物和不完整反铁磁性矿物所贡献, 而软剩磁 SOFT 则主要反映了亚铁磁性矿物的含量^[15]。 χ 与 SIRM 的高度线性相关(图 3(a)), 及 SIRM 与 SOFT 的显著正相关(图 3(b)), 也反映了 χ 的变化主要受到亚铁磁性矿物的控制。

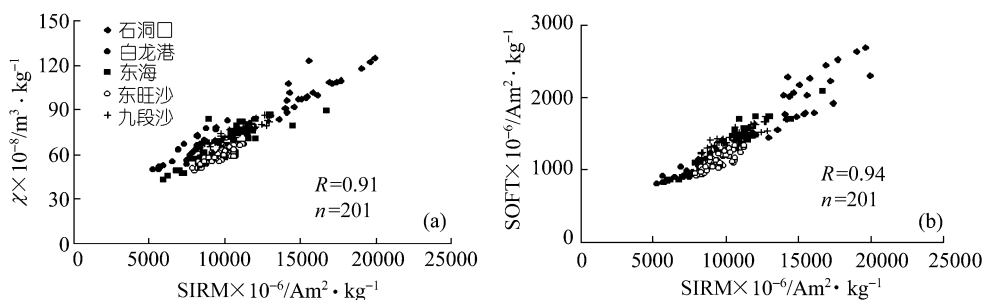


图3 SIRM 与 χ (a) 及 SOFT (b) 关系图

图 4 揭示了典型样品(原样)的热磁曲线特征, 其中 CM98-1 来自东旺沙柱样表层 0~1 cm, BLG95-8 取自白龙港柱样 6~8 cm 深度, SDK95-22 取自石洞口柱样 20~22 cm 深度。前两个样品呈黄棕色, 显示了相对氧化的环境, 而后一个样品则呈灰黑色, 代表了相对还原的环境。这

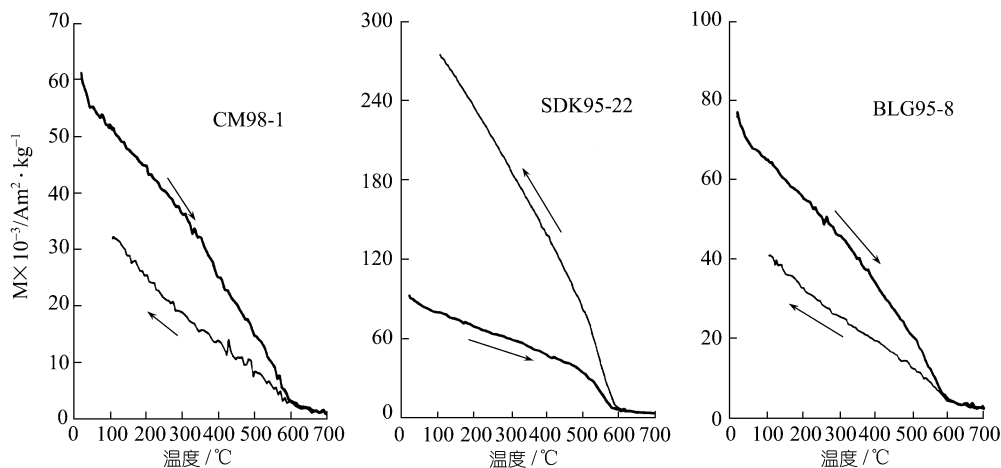


图4 典型样品(原样)热磁曲线
粗线、细线分别代表加热和冷却过程

3 个样品的居里点 T_c 都在 580°C 左右, 表明磁铁矿是主要的亚铁磁性矿物. 样品加热过程和冷却过程显示了不可逆特征, 样品 SDK95-22 冷却后的磁化强度是加热前的 3 倍左右, 指示了在加热过程中生成了新的亚铁磁性矿物, 而其余样品冷却后磁化强度下降, 指示了磁铁矿在空气中氧化生成了弱磁性矿物(如赤铁矿)^[5].

2.2 磁性矿物的粒度特征

本区样品 χ_{fd} 介于 $0.7\%\sim 7.3\%$ 之间, 显示了超顺磁颗粒的存在. 由于 χ_{ARM} 对稳定单畴(SSD,

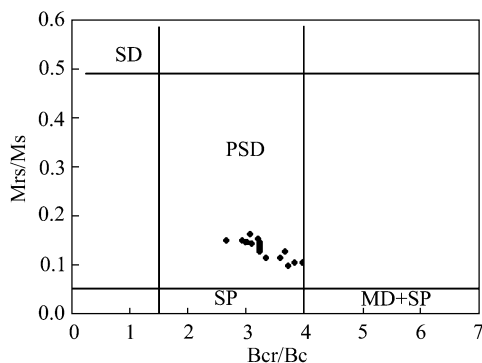


图 5 沉积物 Bcr/Bc-Mrs/Ms 图

$0.04\sim 0.06\ \mu\text{m}$)颗粒的敏感性, 比值参数 χ_{ARM}/χ 可指示亚铁磁性矿物颗粒的大小, 较高的比值反映了 SSD 颗粒, 而较低的比值则显示了较多的多畴(MD)或超顺磁(SP)颗粒^[16, 17]. χ_{ARM}/SIRM 也指示磁性颗粒的粒度变化, 但由于不受 SP 颗粒的影响, 较低的比值则反映了较粗的 MD 颗粒. 本区沉积物 $\chi_{ARM}/\chi < 10$, $\chi_{ARM}/\text{SIRM} < 50 \times 10^{-5}\ \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$ (表 1), 指示了亚铁磁性矿物以假单畴(PSD, $0.1\sim 10\ \mu\text{m}$)-多畴为主^[18].

根据磁滞回线测量结果, 计算饱和和剩余磁化强度与饱和磁化强度之比 Mrs/Ms, 以及剩磁矫顽力与矫顽力之比 Bcr/Bc, 可以看出样品落在 Day 图的 PSD 区间^[19], 且明显接近 MD 区域(图 5).

2.3 磁性矿物的形貌特征

对不同站点典型样品提取的磁性矿物的扫描电镜分析表明, 磁性颗粒的外形多不规则, 反映了沉积物搬运过程中磁铁矿遭受了较为强烈的物理、化学变化(图 6(a)). 除了这种碎屑成因磁铁矿外, 在石洞口沉积物中还出现了球状磁性颗粒, 并可分为两类: 一类表面爆裂, 直径约 $7\ \mu\text{m}$ (图 6(b)); 另一类表面较为光滑、完整, 直径 $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 左右(图 6(c)). 电子探针分析揭示, 前者基本由 Fe 构成, 而后者除 Fe 外, 还含有金属元素 Si 和 Al. 这些球形颗粒在其他站位未检出.

2.4 沉积物粒度组成与磁性特征的关系

本文研究的样品粘土($<4\ \mu\text{m}$)含量为 $5.0\%\sim 41.4\%$, 其中 88 % 的样品粘土含量低于 20 %, 粘土含量大于 20 % 的样品主要来自东海高潮滩. 粉砂含量为 $53.3\%\sim 88.2\%$, 其中极细粉砂($4\sim 8\ \mu\text{m}$)含量平均为 7.5 %, 细粉砂($8\sim 16\ \mu\text{m}$)含量平均为 12.6 %, 中粉砂($16\sim 32\ \mu\text{m}$)含量平均为 24.6%, 粗粉砂($32\sim 63\ \mu\text{m}$)含量平均为 30.2%, 显示了中、粗粉砂主导了粉砂粒级. 砂含量 $1.6\%\sim 41.5\%$, 其中 88 % 的样品砂含量低于 20%. 按照粒度组成三因分类法, 本文研究的沉积物主要属于粉砂, 其次为砂质粉砂和粘土质粉砂(图 7).

图 2 中还显示了沉积物粘土含量随深度的垂直变化. 对比磁参数曲线, 可以发现粘土含量与 χ_{ARM} 的垂向变化较为相似, 但与 χ 的变化差异较大. 磁性参数与粒度组成的相关分析也表明(表 2), χ_{ARM} 与 $0\sim 2\ \mu\text{m}$, $2\sim 4\ \mu\text{m}$, $4\sim 8\ \mu\text{m}$, $8\sim 16\ \mu\text{m}$ 以及 $<4\ \mu\text{m}$, $<8\ \mu\text{m}$, $<16\ \mu\text{m}$, $<32\ \mu\text{m}$ 粒级皆成显著的正相关性, 以与 $2\sim 4\ \mu\text{m}$ 相关性最为显著. χ_{fd} , χ_{ARM}/χ , χ_{ARM}/SIRM 与 χ_{ARM} 类似, 但其相关最显著粒级为 $0\sim 2\ \mu\text{m}$. S_{-100} 和 F_{300} 与上述细粒级组分呈负相关, Bcr 则无显著相关性. χ , SIRM 和 SOFT 与上述粒级相关程度较低, 与 χ_{ARM} 等指示细晶粒磁铁矿的参数不同的是, 这些

参数与 8~16 μm 粒度相关最为显著. 所有参数与 16~32 μm 粒度无明显相关性, 与 32~63 μm 粒度大多呈负相关. 这些结果表明, 磁性矿物的大小以 <32 μm 为主, 其中细晶粒磁铁矿(SD, SP)在 < 4 μm 粒度中富集, 而较粗的磁铁矿(MD)在 8~16 μm 粒度中富集.

3 讨论

3.1 磁性矿物的来源

上述结果表明, 本区沉积物磁性特征主要由较粗的 PSD/MD 磁铁矿所主导. 对长江沉积物的矿物学研究也表明, 磁铁矿是长江沉积物的一种特征重矿物^[20]. 已有的研究表明, 化石燃料(如煤)在高温燃烧过程中, 所含的黄铁矿会转化为球状磁铁矿^[21]. 考虑到石洞口附近的火力发电厂以及粉煤灰堆场, 本文认为球状的磁性颗粒系人类活动的产物. 所有站点中, 磁性最强的沉积物出现在石洞口(表 1, 图 2), 与污染导致的球形磁性颗粒输入不无关系. 白龙港尽管也位于排污口, 但该处污水以生活污水为主, 附近也没有重工业, 因此其沉积物磁性无明显增强, 磁化率与位于郊区的东海和东旺沙站点沉积物强弱相当.

3.2 粒度对沉积物磁性特征的影响

对水环境中的碎屑沉积物而言, 影响其磁性特征的因素主要有物源、沉积动力以及沉积后的次生变化等因素. 长江口潮滩沉积物来自长江泥沙的沉积, 除了石洞口沉积物受局地污染的影响外, 物源的因素可以忽略. 潮滩是一个开放的环境系统, 由于水动力的周期性和非周期性变化, 沉积物的粒度组成差异较大^[11]. 由于沉积物中所含的磁性矿物往往是不同颗粒大小的组合, 假设各以独立颗粒存在的话, 可以预见, MD 磁铁矿多集中在粉砂、砂粒级中, 而超细的 SP 和 SSD 磁铁矿多集中在粘土中, 不同粒度组成的沉积物其磁性

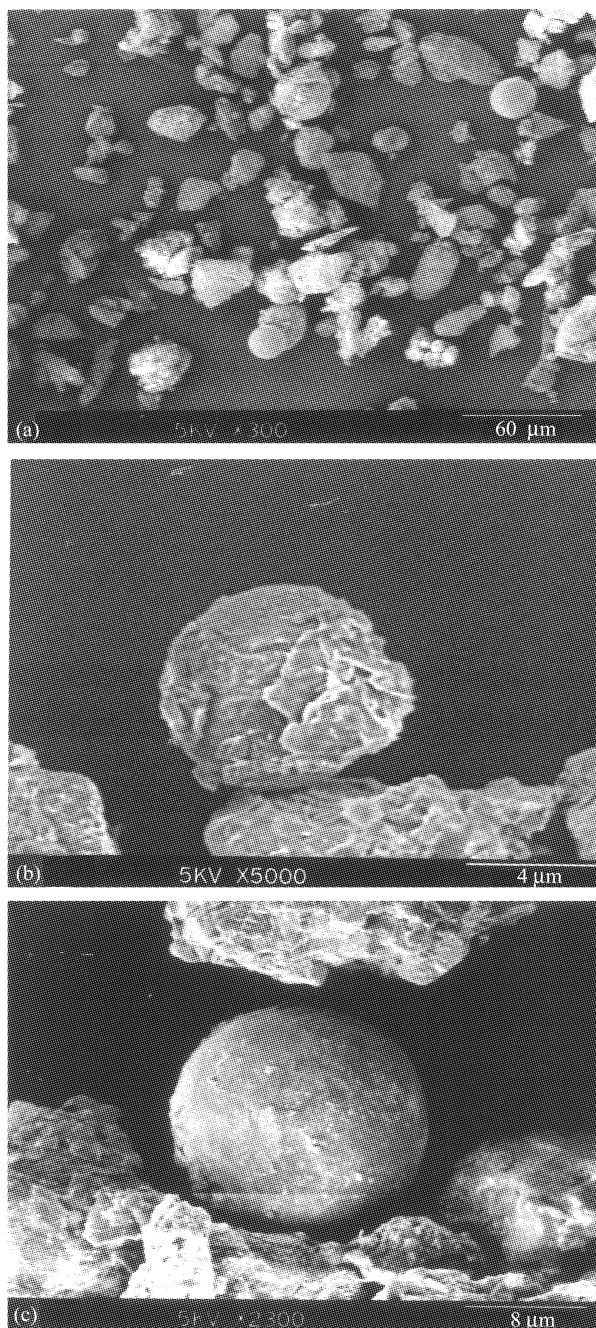


图 6 扫描电镜下石洞口沉积物提取磁性颗粒特征

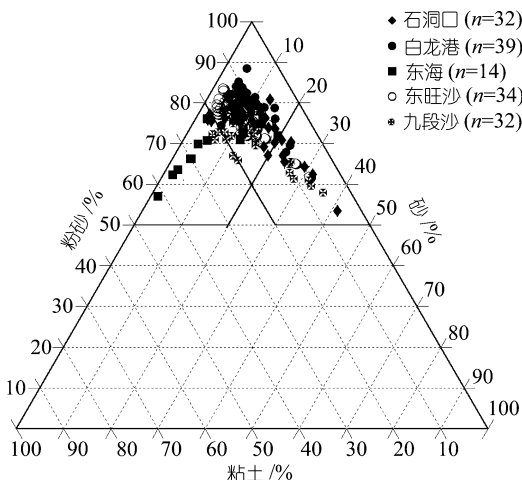


图 7 粒度成分三角图

大部分样品为粉砂,一小部分为砂质粉砂和粘土质粉砂,
图例括号中数字为样品数

特征将会有所差异. 在本文研究的 5 个站点中, 考虑到排污对磁性特征的可能影响, 仅比较东海、东旺沙和九段沙这三个相对远离排污口的站点, 仍可发现站点间及站点内磁性特征的变化还是比较显著的(表 1, 图 2). 对细颗粒亚铁磁性矿物敏感的参数 χ_{fd} 和 χ_{ARM} , 其最大值出现在沉积物最细的东海(表 1, 图 2). 在研究区, 由于 χ 主要与样品中所含的 PSD/MD 磁铁矿含量有关, 也即 $>0.1 \mu\text{m}$ 的颗粒对磁化率都有贡献, 这部分粗晶粒的磁铁矿可以落在几个粒度组中, 因此 χ 与粒度组分的关系更为复杂, 这也是其相关程度较低的原因之一. 对于沉积后次生变化的影响, 我们将另文探讨, 但沉积物细粒级组分与 χ_{ARM} 等参数具有高度相关性, 也说明沉积后次生变化对磁性特征的影响是较小的, 否

则细颗粒磁性矿物在早期成岩过程中的优先溶解^[22], 可能会使得其与沉积物细粒级组分的相关性丧失.

表 2 磁性参数与粒度组成、粒度参数的相关系数^{a)}

	χ	SIRM	SOFT	χ_{fd}	χ_{ARM}	χ_{ARM}/χ	$\chi_{ARM}/SIRM$	SIRM/ χ	S-100	F ₃₀₀	Bcr
<2 μm	0.16	0.21	0.20	0.74	0.76	0.80	0.78	0.20	-0.46	-0.46	0.06
2~4 μm	0.25	0.32	0.27	0.62	0.71	0.69	0.60	0.30	-0.36	-0.28	0.16
4~8 μm	0.30	0.39	0.34	0.65	0.77	0.72	0.62	0.35	-0.38	-0.31	0.21
8~16 μm	0.30	0.44	0.37	0.50	0.69	0.64	0.48	0.46	-0.35	-0.21	0.35
16~32 μm	-0.13	-0.04	-0.12	-0.27	-0.20	-0.13	-0.21	0.15	0.05	0.23	0.22
32~63 μm	-0.35	-0.48	-0.44	-0.62	-0.78	-0.71	-0.55	-0.47	0.33	0.18	-0.32
>63 μm	0.03	-0.05	0.04	-0.22	-0.28	-0.37	-0.31	-0.17	0.27	0.18	-0.16
<4 μm	0.20	0.26	0.23	0.71	0.76	0.78	0.73	0.24	-0.43	-0.40	0.10
<8 μm	0.24	0.31	0.28	0.69	0.77	0.76	0.69	0.28	-0.41	-0.37	0.14
<16 μm	0.27	0.36	0.32	0.66	0.77	0.75	0.65	0.36	-0.41	-0.33	0.21
<32 μm	0.20	0.32	0.25	0.51	0.64	0.65	0.52	0.39	-0.36	-0.22	0.30
平均粒径	0.08	0.02	0.09	-0.32	-0.34	-0.49	-0.46	-0.14	0.36	0.22	-0.04
中值粒径	-0.20	-0.31	-0.25	-0.57	-0.67	-0.68	-0.57	-0.36	0.38	0.25	-0.28
标准偏差	0.36	0.38	0.42	0.00	0.10	-0.15	-0.23	0.17	0.23	0.11	0.20
偏态	0.57	0.59	0.58	0.17	0.37	0.02	-0.08	0.27	0.33	0.08	0.23
峰态	0.53	0.55	0.51	0.05	0.26	-0.10	-0.19	0.22	0.39	0.12	0.22

a) 总样品数 $n=151$, $r_{0.05}=0.195$

在对 Irish 海滨岸沉积物的研究中, Oldfield 等^[13]发现 ARM 和 ARM/χ 与细粒级组分($<31 \mu\text{m}$)含量高度相关, 并提出这两个参数可作为沉积物细颗粒含量的代用指标. 这一关系在长江口潮滩沉积物中也得到了证实(表 2). 鉴于 χ_{fd} 与粘土含量的高度相关性, 可将它也视作沉积物粘土含量的代用指标. 但在解释其机理时, 他们认为是细菌成因的 SSD 磁铁矿在粘土中富集的结果. 然而, 在长江口潮滩沉积物中, 对提取的粘土粒级测量结果表明, χ_{ARM}/SIRM 最高也

只有 $100 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{A}^{-1}$, 远低于细菌合成磁铁矿主导样品具有的 $\sim 200 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{A}^{-1}$ 高值^[18], 对提取的磁性矿物作透射电镜分析也未发现细菌成因磁铁矿的存在, 表明本区沉积物中细颗粒磁铁矿主要是无机成因. 这一结果说明, 无论细颗粒磁铁矿的成因如何, 其在粘土中富集是普遍现象, 这在我国滇池沉积物^[23]和西部黄土^[24~26]的研究中也得到证实.

3.3 磁学研究的环境意义

在一些受工业污染的环境中, 磁化率常被用作反映重金属污染状况的替代指标^[1, 10, 27], 无疑具有简单、快捷的特点. 其假设是, 来自工业活动排放的污染物中, 往往同时含有重金属和磁性颗粒, 一旦沉积下来, 即导致污染的物质磁性增强. 这样一个假设对于物质来源一致、沉积动力差异不显著的环境是适用的, 但如果沉积动力有所差异的话, 则必须考虑由于粒度组成而引起的磁化率变化. 此外, 磁学性质与污染的联系机制是复杂的, 在某些环境中, 磁性矿物与重金属不一定具有共同来源, 但环境磁学参数仍然是可以发挥作用的. 大量研究证实, 细颗粒沉积物对重金属、有机污染物具有较强的吸附作用, 因此在评价污染状况时, 必须扣除由于粒度而造成的污染物含量的变化^[28]. 鉴于 χ_{ARM} 与沉积物细粒级组分的高度相关性, 可将其作为粘土含量的代用指标, 用于污染物的粒度校正, 但其前提是, 沉积后磁性矿物次生变化不显著, 保持了沉积时的磁学特征.

4 结论

(1) 长江口潮滩沉积物的磁性特征由 PSD/MD 磁铁矿所主导. 磁铁矿除碎屑成因外, 在局部地区尚有人类活动产生的球状磁性颗粒, 可以作为环境污染的证据.

(2) 在将磁化率作为污染物含量的代用指标时, 必须考虑由于粒度造成的磁化率天然波动, 并加以扣除.

(3) 无论细颗粒磁铁矿的成因如何, 其在粘土中富集是普遍现象. 如不遭受沉积后次生变化的影响, χ_{ARM} 及 χ_{fd} 可作为粘土、乃至 $< 32 \mu\text{m}$ 粒级含量的代用指标, 并用于污染物含量的校正.

致谢 J. A. Dearing 及 J. Shaw 教授允许第一作者使用 Liverpool 大学的环境磁学实验室及地磁实验室完成论文部分工作, 作者深表谢意.

参 考 文 献

- 1 Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism. London: Allen and Unwin, 1986. 1~227
- 2 刘秀铭, 刘东生, Shaw J. 中国黄土磁性矿物特征及其古气候意义. 第四纪研究, 1993, 3: 281~287
- 3 朱日祥, 李春景, 吴汉宁, 等. 中国黄土磁学性质与古气候意义. 中国科学, B 辑, 1994, 24(9): 992~997
- 4 孙继敏, 丁仲礼, 刘东生, 等. 黄土与古土壤磁组测定在重建冬季风风向上的初步应用. 科学通报, 1995, 40(21): 1976~1978
- 5 刘秀铭, 安芷生, 强小科, 等. 甘肃第三系红粘土磁学性质初步研究及古气候意义. 中国科学, D 辑, 2001, 31(3): 192~205
- 6 刘 椿, 刘东生, 金增信, 等. 北京颐和园昆明湖近代沉积物的环境磁学初步研究及意义. 科学通报, 1994, 39(21): 1989~1991
- 7 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. 地球物理学报, 1996, 39(2): 178~187
- 8 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

- 9 刘 健, 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. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(4): 13~24
- 10 Dekkers M J. Environmental magnetism: an introduction. *Geologie en Mijnbouw*, 1997, 76: 163~182
- 11 邵虚生, 严钦尚. 上海潮坪沉积. 见: 严钦尚, 许世远主编. 长江三角洲现代沉积研究. 上海: 华东师范大学出版社, 1987. 27~36
- 12 戴维明, 顾友直. 上海西、南区排污口沉积物中重金属元素累积行为分析. 上海环境科学, 1990, 9(7): 38~40
- 13 Oldfield F, Yu L. The influence of particle size variations on the magnetic properties of sediments from the north-eastern Irish Sea. *Sedimentology*, 1994, 41: 1093~1108
- 14 Hounslow M W, Maher B A. Quantitative extraction and analysis of carriers of magnetization in sediments. *Geophys J Int*, 1996, 124: 57~74
- 15 Oldfield F. Environmental magnetism—a personal perspective. *Quat Sci Rev*, 1991, 10: 73~85
- 16 Banerjee S K, King J, Marvin J A. Rapid method for magnetic granulometry with applications to environmental studies. *Geophys Res Lett*, 1981, 8: 333~336
- 17 King J W, Banerjee S K, Marvin J A, et al. A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials: some results from lake sediments. *Earth Planet Sci Lett*, 1982, 59: 404~419
- 18 Oldfield F. Toward the discrimination of fine-grained ferrimagnets by magnetic measurements in lake and near-shore marine sediments. *J Geophys Res(B)*, 1994, 99: 9045~9050
- 19 Day R, Fuller M, Schmidt V A. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain size and compositional dependence. *Phys Earth Planet Inter*, 1977, 13: 260~267
- 20 杨守业, 李从先, 朱金初, 等. 长江与黄河沉积物中磁铁矿成分标型意义. 地球化学, 2000, 29(5): 480~484
- 21 Flanders P J. Identifying fly ash at a distance from fossil fuel power stations. *Environ Sci Technol*, 1999, 33: 528~532
- 22 Karlin R, Levi S. Diagenesis of magnetic minerals in recent hemipelagic sediments. *Nature*, 1983, 303: 327~330
- 23 Yu L, Oldfield F, Wu Y, et al. Paleoenvironmental implications of magnetic measurements on sediments core from Kunming Basin, Southwest China. *J Paleolimn*, 1990, 3: 95~111
- 24 Zheng H, Oldfield F, Yu L, et al. The magnetic properties of particle-sized samples from the Luo Chuan loess section: evidence for pedogenesis. *Phys Earth Planet Inter*, 1991, 68: 250~258
- 25 Chen F, Wu R, Pompei D, et al. Magnetic property and particle size variations in the late Pleistocene and Holocene parts of the Dadongling Loess section near Xining, China. *Quat Proceed*, 1995, 4: 27~40
- 26 韩家懋, 姜文英, 褚 骏. 黄土和古土壤中磁性矿物的粒度分布. 第四纪研究, 1997, 3: 282~287
- 27 旺 罗, 刘东生, 吕厚远. 污染土壤的磁化率特征. 科学通报, 2000, 45(10): 1091~1094
- 28 Williams T B, Bubb J M, Lester J N. Metal accumulation within salt marsh environments: a review. *Mar Pollut Bull*, 1994, 28(5): 277~290