

文章编号 1001-7410(2009)02-308-10

# 长江三角洲地区晚新生代沉积物 岩石磁学特征及其物源指示意义\*

张 丹<sup>①</sup> 王张华<sup>①</sup> 卫 巍<sup>②</sup> 李 晓<sup>③</sup>

(<sup>①</sup>华东师范大学资源与环境科学学院地理学系,上海 200062; <sup>②</sup>北京大学地球与空间科学学院,北京 100871;  
<sup>③</sup>上海市地质调查研究院,上海 200072)

**摘要** 对长江三角洲地区 7 个晚新生代钻孔沉积物的岩石地层和磁化率特征进行详细对比,并进一步选择浦东机场孔(PD 孔)进行了详细的岩石磁学测试,讨论了该地区的晚新生代沉积物物源的演变。结果显示沉积物磁性的 4 次显著变化:1)各钻孔上新世磁性强弱差异明显;2)早更新世早期本区普遍表现出弱磁性;3)从早更新世中晚期至全新世,磁性强度一般随粒度粗细变化波动,即砂质沉积磁性强,泥质沉积磁性弱;4)晚更新世晚期以来,细颗粒沉积物的磁性较明显增强。磁性参数分析显示上新世和早更新世早期磁性矿物晶体颗粒较细,早更新世中晚期-晚更新世以粗晶粒磁性矿物为主,全新世细晶粒磁铁矿再次占主导。我们认为上述磁性变化反映构造沉降控制下现代长江三角洲地区物源区的不断扩大。

**关键词** 磁化率 磁性矿物 物源演变 长江三角洲 晚新生代

**中图分类号** P343.5, P318.41 **文献标识码** A

## 1 引言

长江连接着青藏高原和中国东部边缘海,三角洲地区受到新构造运动、古气候和海平面波动以及陆源物质供应的综合作用,导致晚新生代地层和沉积环境变化频繁。对于长江物质何时到达现在的河口地区,是很多学者关注的问题,他们采用独居石年龄谱系、同位素地球化学、重矿物等手段对长江三角洲地区物源变化做了深入研究,并提出了不同观点<sup>[1-3]</sup>。范代读等<sup>[1,4]</sup>通过独居石年龄谱证据认为,长江上游物质到达河口区应该在古新/松山地磁极性倒转界限之上,即晚于 2.58Ma;杨守业等<sup>[3]</sup>利用 REE 和 Nd 的同位素地球化学方法也倾向于认同这一观点;而陈静等<sup>[2]</sup>通过重矿物组合研究认为早更新世物源确实发生明显改变,但中更新世后也发生一次物源变化,并认为长江上游物质大量到达现代河口区应该在中更新世后。

环境磁学是一种快速、简便而敏感的分析手段,最近二、三十年已在环境演变研究中得到广泛应用<sup>[5-17]</sup>。由于沉积物的磁性主要受控于其中的铁

磁性矿物类型、含量等因素,因此也是沉积物源研究的有效手段<sup>[18-21]</sup>。碎屑成因的铁磁性矿物尤其磁铁矿有不同的母岩来源,如玄武岩、变质岩等。而由于母岩的形成环境不同,磁铁矿的颗粒大小、元素组成也有所变化。例如玄武岩由于是喷出作用形成,其中的磁铁矿晶体一般较小,而变质岩有充分的结晶时间,因此往往可以形成大颗粒的磁铁矿晶体<sup>[5,22]</sup>。另外,不同母岩产生的磁铁矿类型也不同,如沉积变质成因的磁铁矿镁、铝、锰的含量低,砂卡岩中产出的磁铁矿富锰镁而贫钛,玄武岩中产出的磁铁矿富钛镁<sup>[23-26]</sup>。因此检查沉积物中碎屑铁磁性矿物的含量、类型、颗粒大小等将是一种识别物源的有效手段。我们前期已对本区的一个晚新生代钻孔(SG7)进行了岩石磁学研究,发现该孔沉积物有几次比较明显的物源变化,并且认为长江上游物质大量到达本区的时间大约为晚更新世晚期<sup>[27]</sup>。由于本区古地形差异大,沉积环境多变(图 1)<sup>[2,28-32]</sup>,SG7 孔的结果是否具有代表性值得继续研究。因此本文收集了本区 6 个钻遇基岩的晚新生代钻孔,包括其地层和磁化率测试结果,同时对位于浦东机场

第一作者简介:张丹女 28 岁 博士研究生 第四纪地质专业 E-mail:xtamyd@163.com

\* 国土资源部和上海市合作项目“上海市三维城市地质调查”(批准号:200413000020)资助

2008-12-28 收稿,2009-01-20 收修改稿

通讯作者:王张华 E-mail:zhwang@geo.ecnu.edu.cn

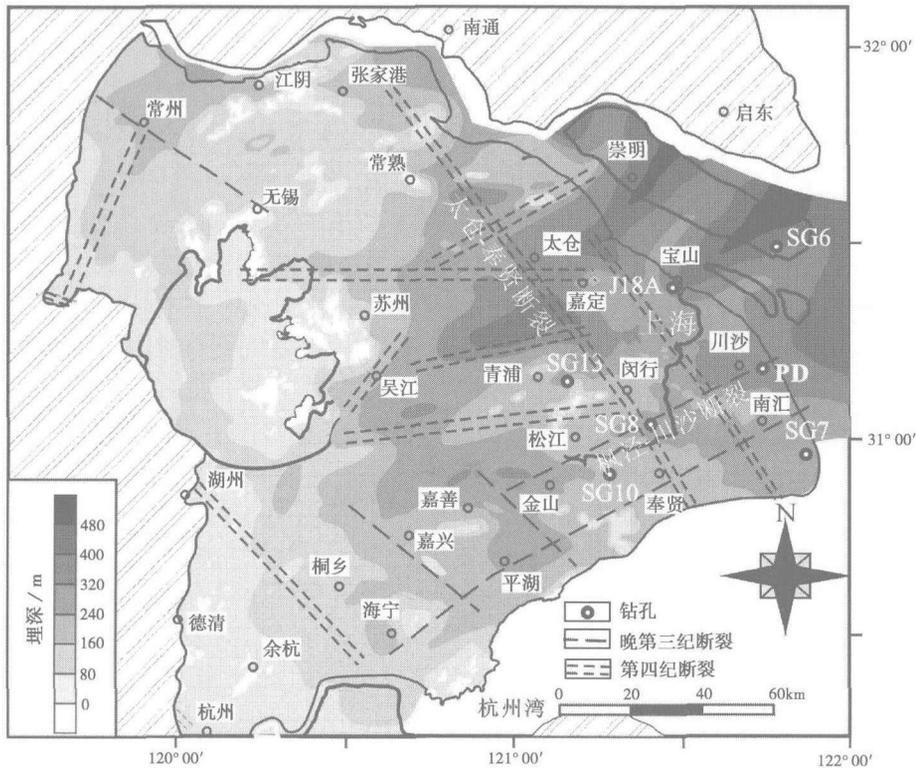


图1 长江三角洲基岩埋深等值线和钻孔分布

Fig. 1 Burial depth of bedrock and distribution of boreholes in the Yangtze delta

的PD孔沉积物也进行了多参数的岩石磁学测试,以期更好地分析研究区晚新生代以来的沉积地貌环境演变控制下的物源变化。

## 2 地质背景

长江三角洲地区位于扬子板块南缘。在中渐新世-上新世期间,由于太平洋板块快速俯冲,导致中国东部遭受广泛的弧后扩张、沉降并形成了一系列沿太平洋的断陷盆地,而且发育了大量的陆相裂隙式喷发玄武岩<sup>[33-35]</sup>。在此期间,本区为一个台地,第三系分布十分有限,而其北面的苏北盆地却形成了1000多米厚的沉积地层<sup>[36,37]</sup>。本区和苏北的第四系厚度却相当,说明本区自第四纪发生了强烈沉降。在沉降的过程中,本区经历了丰富的沉积相演变,从下到上依次为冲积扇相→辫状河相→曲流河相→滨海相→浅海相→三角洲相<sup>[30]</sup>。

在本区内,埋藏的断层以北北西向、北东向-近东西向比较明显。这些断层中,有些发育历史悠久,而有些则是新构造运动中发育起来的活动断层。其中,北东向-近东西向的断层如枫泾-川沙断裂对震旦纪-古生代的沉积建造有明显的控制作用,其南盘为震旦纪变质岩,而北盘为下古生界的复理石

建造<sup>[38]</sup>,推测其是形成于晚元古代的正断层。这些北东向的断层在新生代发生构造活化,如枫泾-川沙断裂在晚第三纪时就在马桥、白龙港等地发生了玄武岩的喷发,而在中更新世时依然发生了正断层活动<sup>[39]</sup>。而北北西向的断层则是在新生代发育的正断层,其他方向的断裂明显被该方向的断裂错开。该方向的断层如太仓-奉贤正断裂(图1)明显地制约了本区晚第三纪以来的地貌和古地理演变过程,如在晚第三纪到第四纪初期,该断裂以西基本属于低山剥蚀区,普遍缺失第三系,到中更新世,才开始接受较厚沉积;而在该断裂的东边基本属于晚新生代沉积盆地,第三系分布广泛<sup>[39]</sup>。总的来说,本区陆上的断层最新的活动时间一般为早更新世到中更新世,北北西向的断层在晚更新世甚至现代还在活动。所有的断层均为正断层<sup>[29,39]</sup>。

## 3 材料和方法

本文利用“上海市三维城市地质调查”项目在长江三角洲地区实施的晚新生代钻孔6个(图1),分别为SG6,SG7,SG8,SG10,SG13和J18A孔,各钻孔均钻遇基岩(图2)。其中,SG6位于崇明陈家镇奚家港(31°28′25.1″N, 121°46′20.6″E),孔深

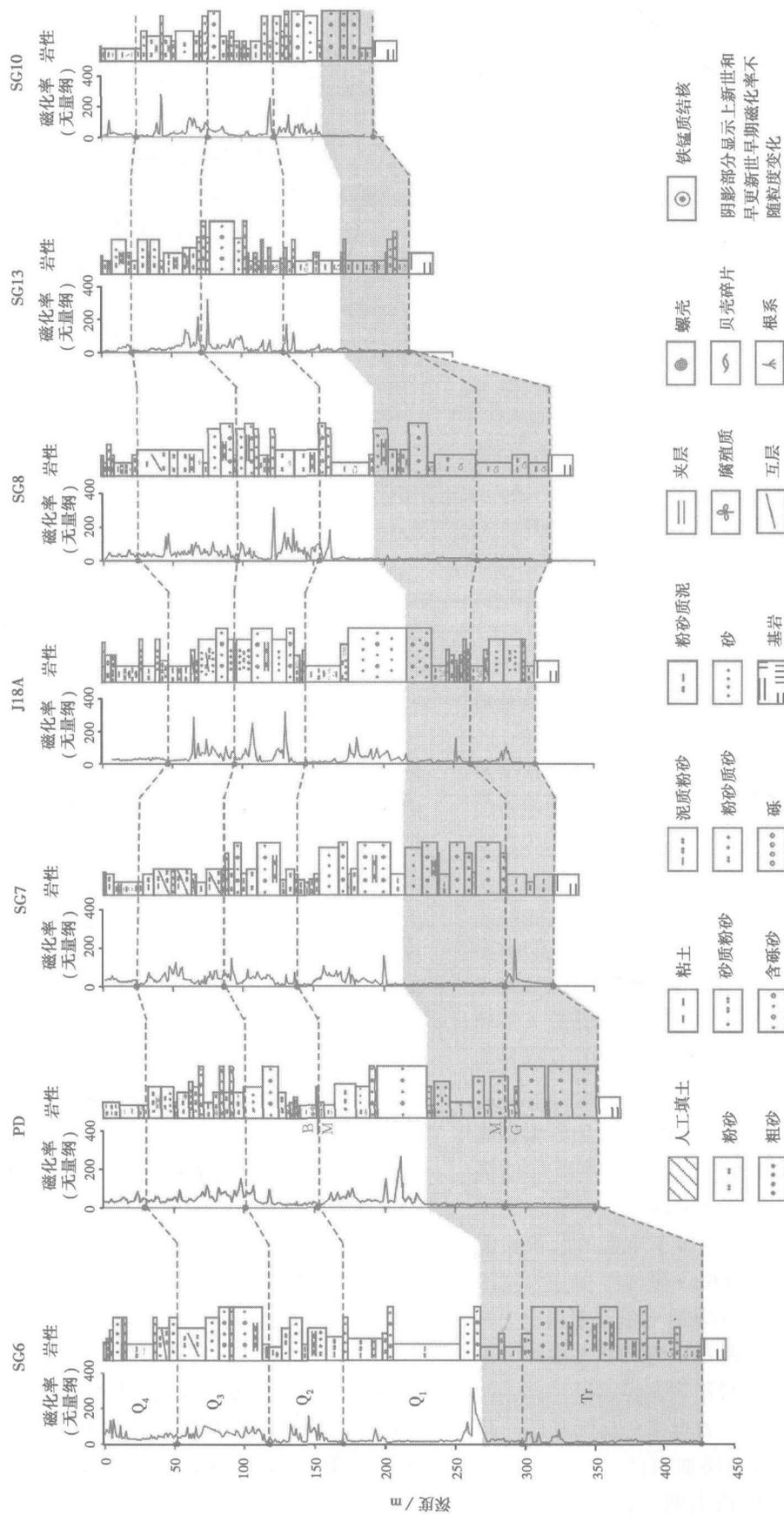


图2 长江三角洲各钻孔地层及磁化率对比图

Fig. 2 Comparison of lithostratigraphy and magnetic susceptibility of boreholes in Yangtze delta area

443.25m,于425.78m钻遇基岩。该孔约300m以下主要为灰黄色、黄绿色含砾砂夹粉砂或杂色硬粘土夹粉砂,砾石直径达3~5cm;孔深约120~300m以蓝灰色、灰黄色泥质粉砂为主,局部夹薄层黄灰色细砂、粉砂,含少量砾石;约70~120m以中粗砂、细砂和粉砂为主,砾石分布普遍,砾径多为2~3mm;孔深70m以上沉积物又显著变细,以灰色、深灰色泥质粉砂、粉砂和细砂为主。SG7位于南汇新港镇桃园村(30°59'37.9"N,121°51'31.5"E),孔深305.63m,于249.85m见基岩。该孔中下部以厚层灰白色、灰黄色、浅灰绿色含砾石中粗砂为主,夹杂杂色硬粘土;上部沉积物明显变细,以灰色、深灰色泥质粉砂和粉砂为主,详细岩性见文献[27]。SG8位于闵行北桥镇中春路元江路南(30°52'36.6"N,121°24'39.6"E),孔深336.29m,于320.50m见基岩。本孔全孔以泥质沉积为主,中下部多灰色、灰绿色、棕黄色等杂色硬粘土,局部含砾石,夹薄层灰色、浅灰绿色粉、细砂;孔深100m附近见较厚的含砾、含泥细砂层;上部以青灰色、灰色、灰绿色粉砂和泥质粉砂为主。SG10位于金山亭林镇龙泉村南亭公路大亭公路交界处(30°53'41.0"N,121°21'0.6"E),孔深206.5m,于193m见基岩。该孔下部以厚层灰色含砾石砂为主,夹薄层泥质粉砂;中上部沉积物显著变细,以灰色、蓝灰色、灰黑色、草黄色泥质粉砂、细砂为主,局部夹薄层灰色、黄灰色含砾石砂,砾石长轴明显减小。SG13位于青浦镇贺桥村(31°9'23.1"N,121°6'44.4"E),孔深230m,于218.54m见基岩。该孔下部以浅灰、青灰、灰黄色泥质沉积物为主,碳酸钙胶结显著,局部夹薄层浅灰、草黄色粉砂,中部出现一厚层青灰色、灰黄色含砾石中粗砂,上部又以细颗粒沉积物为主,为灰色、灰黄色粉砂和泥质粉砂。J18A位于宝山上钢五厂(31°23'8.1"N,121°28'53.0"E),孔深327.02m,于308.25m见基岩。本孔中下部在孔深约70~140m,170~230m和275~300m都为厚层含砾石砂,砂层之间则为硬塑的泥质粉砂和粉砂质泥;孔深70m以上以灰色、棕灰色泥和泥质粉砂为主。此外还有2003年实施的PD孔,该孔位于上海市浦东国际机场(31°08'30.8"N,121°47'38.4"E),孔深363.53m,于358.50m钻遇基岩白龙港玄武岩,其岩性详见文献[29,30]。

对钻孔沉积物进行了古地磁测试。古地磁测试在南京地质矿产研究所古地磁实验室完成,根据古地磁结果进行年代地层划分,初步的磁性年代学结果见图2,详细结果将另文发表。同时,我们利

用古地磁测试中获得的磁化率数据,进行各孔沉积物磁性特征的对比。

在上述基础上,又对PD孔以平均4m为间距采样在华东师范大学磁性分析室进行质量磁化率和常温剩磁测试。其中,古新世基岩采样2个,上新统地层采样30个,下更新统地层采样31个,中更新统地层采样10个,上更新统地层采样9个,全新统地层采样9个,共计91个样品。质量磁化率 $\chi$ 测试使用Bartington公司生产的双频率磁化率探头;无磁滞剩磁 $\chi_{ARM}$ 的测量采用Molspin公司生产交变退磁仪(交流磁场峰值为100mT,直流磁场为0.04mT);等温剩磁IRM测试使用Molspin公司生产的旋转磁力仪及脉冲磁场发生器,测试磁场分别为20mT,100mT,300mT,1000mT,-20mT,-100mT和-300mT。样品的预处理和磁性测试方法见王张华等成果<sup>[27]</sup>。

主要计算的磁性参数有:1)质量磁化率 $\chi$ ,它是体积磁化率( $\kappa$ )与物质密度( $\rho$ )的比值,即 $\chi = \kappa/\rho$ ,式中 $\chi$ 指的是低频磁场下的磁化率,单位为 $10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,反映沉积物中铁磁性矿物的组合方式、含量及粒径;2)频率磁化率( $\chi_{fd}$ )是指在不同频率的外加磁场下,沉积物磁化率值的变化程度,用公式: $\chi_{fd}(\%) = (\chi_{lf} - \chi_{hf})/\chi_{lf} \times 100$ 表示。其中, $\chi_{lf}$ 为低频磁场下的磁化率值, $\chi_{hf}$ 为高频磁场下的磁化率值。当磁性矿物粒径很小时(一般小于 $0.02 \mu\text{m}$ ,超顺磁SP),往往 $\chi_{hf}$ 远远小于 $\chi_{lf}$ ,导致 $\chi_{fd}$ 值异常高;3)等温剩磁(IRM),是指物质在一定的温度下(一般是室温)受到稳定磁场作用而获得的剩余磁化强度(即撤离外加磁场后样品中仍保存的剩余磁化强度),单位为 $10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$ 。等温剩磁的大小与外加稳定磁场的强度有关,可能产生的最大剩磁称为饱和等温剩磁(SIRM)。SIRM反映样品中等温剩磁的主要贡献者(亚铁磁性矿物和反铁磁性矿物)的含量,因而常用来指示样品中磁性矿物的总量;4)退磁参数( $S_{-k\text{mT}}$ ): $S_{-k\text{mT}}(\%) = [(SIRM - IRM_{-k\text{mT}})/(2 \times SIRM)] \times 100$ 。其中,k为反向磁场强度数值。该参数可以定性地反映亚铁磁性矿物和不完整反铁磁性矿物的相对重要性。当亚铁磁性矿物含量增加时, $S_{-k\text{mT}}$ 值较大;当不完整反铁磁性矿物含量增加时, $S_{-k\text{mT}}$ 值较小;5)非磁滞剩磁 $\chi_{ARM}$ ,是指在弱恒定磁场下,使样品经受强烈的并平衡降到零的交变磁场作用所得到的剩磁,常用 $\chi_{ARM}$ 表示,单位为 $10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,该参数强烈地受到亚铁磁性矿物晶粒大小的影响,对稳定单畴晶粒SSD极为敏感,其 $\chi_{ARM}$ 要显著高于超顺磁(SP)和多畴晶粒

(MD)<sup>[5,40,41]</sup>。

另外,本文还引用了王张峤等<sup>[30]</sup>中PD孔的粒度分析结果以检查沉积物颗粒粗细和磁性强弱之间的关系(图3)。

## 4 研究结果

### 4.1 年代地层的确定

各孔的年代地层根据古地磁测试结果和沉积旋回来划分。由于本区晚新生代地层以河湖相为主,河流侵蚀作用强烈,地层往往不连续且沉积速率变化大,因此本区的古地磁测试结果一直都很不理想,这在长江三角洲地区过去的钻孔中也很常见,尤其在砂砾层厚的钻孔中<sup>[1,3,42]</sup>。不过,B/M和M/G界面在各孔还都较为清楚,因此我们确定各孔的中更新世和早更新世界面一般出现在孔深150m上下20m范围内,早更新世和上新世界面于SG6,PD,SG7,J18A和SG8各孔孔深约280~300m,SG10和SG13孔未见该界面(图2)。其中,关于PD孔的M/G界面,王张峤等<sup>[30]</sup>定在孔深290m附近、陈静等<sup>[2]</sup>定在孔深250m左右,但结合沉积旋回和其他各孔的古地磁结果(图2),我们认为还是290m附近更为合理。晚更新世和中更新世的分界参考布莱克事件,但同时也根据OSL和U系等绝对年龄测试结果<sup>[27]</sup>。全新世的底界以第一硬土层为标志,在该标志层缺失的钻孔,则根据OSL和<sup>14</sup>C等绝对年龄以及钻孔间的岩性地层对比。

### 4.2 各孔沉积物和磁性对比

#### (1) 上新世

SG13和SG10位于太仓-奉贤断裂以西,缺失上新统(图2)。古地势最低的SG6和PD两孔见50m左右厚的砂砾层夹薄层泥;J18A孔见厚约20m的砂层和数层几米厚的泥;SG7和SG8两孔则以30~50m厚的泥质沉积为主。各孔磁化率表现出较大的差异,如SG6,J18A,PD和SG8孔的泥质沉积物磁化率都很低,但SG7孔的上部却出现异常高值。对于粗颗粒沉积物来说,SG6孔的磁性弱,仅在顶部出现弱峰值,J18A孔磁性有强有弱,但总体较弱,PD孔则完全显示弱磁性(图2)。

#### (2) 早更新世

早更新世J18A,PD,SG7和SG10各孔见单层厚20~50m的砂砾层夹薄层泥(单层厚度<5m),其余孔以细颗粒泥质沉积为主。各孔磁性特征可分为上

下两段,下段不论沉积物颗粒粗细,磁性均很弱;上段粗颗粒沉积物磁化率呈现高值,细颗粒泥质沉积物磁化率则呈现低值(图2)。

#### (3) 中更新世

各孔中更新世砂砾层均减薄,沉积物的磁性特征延续早更新世上段特征,即磁性强弱和沉积物粒度变化基本一致。另外,各孔中更新世沉积物的磁性总体有所增强,如J18A,SG13,SG8和SG10等孔都出现显著高于下更新统的峰值。

#### (4) 晚更新世

晚更新世仅SG6孔见厚层含砾粗颗粒沉积,其余各孔都以细砂、粉砂为主(图2)。磁化率和沉积物颗粒仍然呈现一致的波动,而且细砂、粉砂的磁性较下伏地层强。泥质沉积普遍呈现为弱磁性,但J18A,PD和SG8等孔该段泥质沉积物的磁性要明显强于早、中更新世的泥质沉积。

#### (5) 全新世

全新世沉积物普遍以泥和粉、细砂为主。各孔磁性总体都较低,仅在粉、细砂层(如SG6孔)呈现高值。并且,和早、中更新世的泥质沉积相比,全新世泥质沉积物的磁化率明显较高(图2)。

### 4.3 PD孔的磁性特征及指示的主要磁性矿物

对PD孔的室温磁性测试进一步揭示了导致磁化率波动的磁性矿物类型、晶体颗粒大小等性质(图3)。

#### (1) 基岩(363.53~354.50m)

古新世基岩白龙港玄武岩的各个磁参数值都是全孔最高, $\chi$ 值在358.5m和360.5m处分别达 $297.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $657.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,SIRM值为 $81750.9 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$ 和 $162341.3 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$ , $\chi_{fd}$ 和 $\chi_{ARM}$ 也显著高,各磁场的退磁参数均高, $S_{-100\text{mT}}$ 超过90%, $S_{-300\text{mT}}$ 接近100%,显示了基岩的强磁性特征,而且亚铁磁性矿物、尤其磁铁矿非常富集,矿物的颗粒较细。

#### (2) 上新世(354.50~289.33m)

沉积物粒度变幅较大,在 $2.792 \sim 371.2 \mu\text{m}$ 之间波动,粘土、砂、砾均有分布。但无论沉积物颗粒粗细怎样波动,该带 $\chi$ 值总体偏低( $10.05 \times 10^{-8} \sim 33.40 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ),平均值仅为 $15.23 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。 $\chi_{fd}$ 也维持在很低的水平上,在 $0 \sim 2.07\%$ 之间波动,平均为0.93%。SIRM也呈现显著低值,仅 $1449.93 \times 10^{-6} \sim 3925.29 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$ ,平均值为 $1663.76 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$ 。 $\chi_{ARM}$ 较基岩显著下降,在

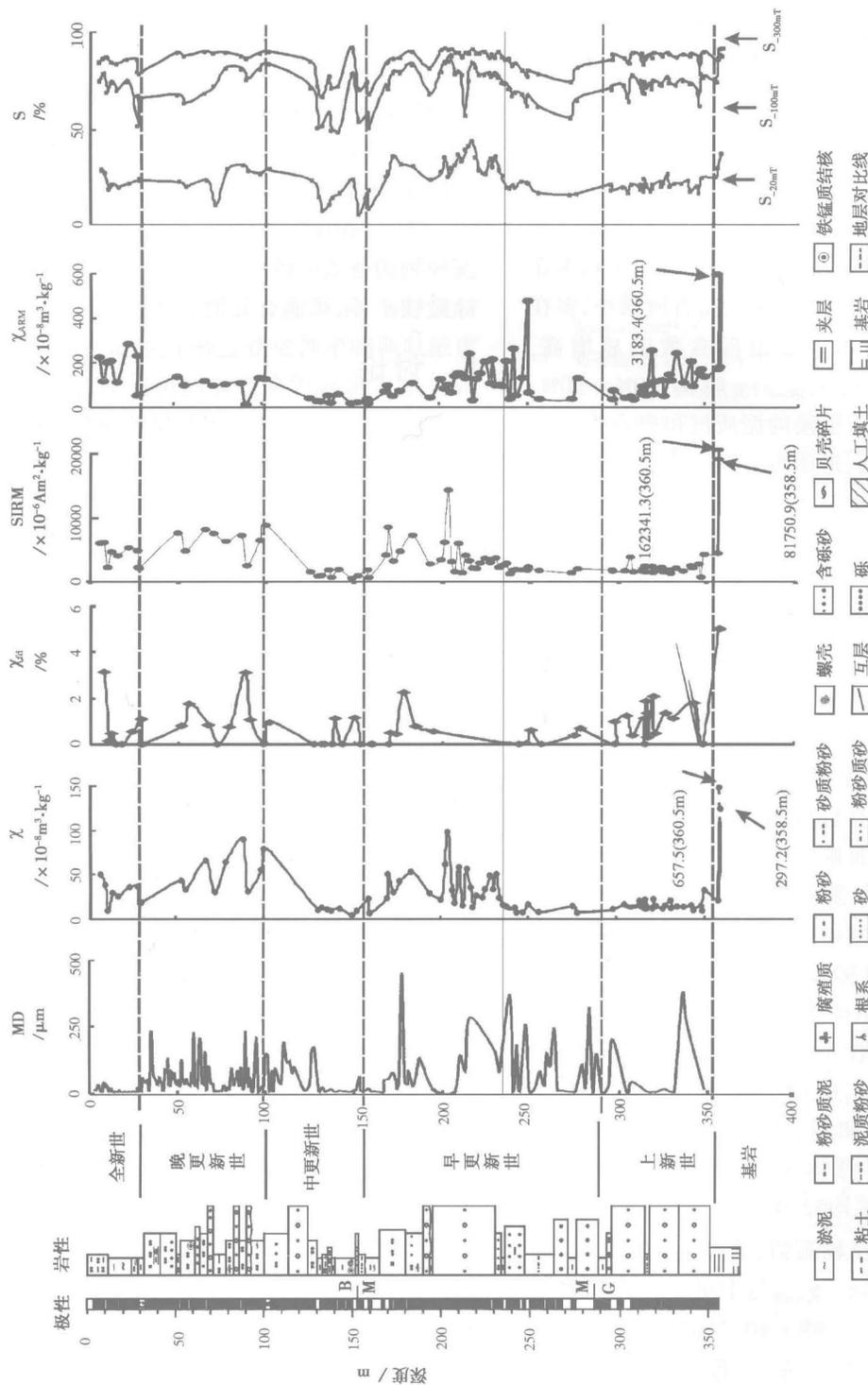


图 3 PD 孔沉积物粒度<sup>[30]</sup>和磁性参数的分布  
其中,孔深 200 ~ 250m 因高频磁场不稳定未获  $\chi_{a\dot{v}i}$  数据  
Fig. 3 Distribution of grain size and magnetic properties of PD borehole

$24.81 \times 10^{-8} \sim 245.78 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  之间, 平均  $95.20 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 且自下往上明显减小。各磁场的退磁参数也较基岩明显下降, 分别是 16.0% ~ 26.3%, 66.3% ~ 83.0% 和 84.8% ~ 97.3%。该段磁性特征显示沉积物中仍以亚铁磁性矿物为主, 但含量很低, 矿物晶体颗粒较基岩变大。个别层段中不

完整反铁磁性矿物含量较高。

(3) 早更新世 (289.33 ~ 153.70m)

早更新世沉积物的中值粒径值偏大, 为  $4.59 \sim 452.35 \mu\text{m}$ 。磁性特征以孔深约 236.2m 为界, 可分为上、下两段: 下段和上新世相似, 即不管沉积物颗粒粗细变化, 磁性均弱,  $\chi$  仅为  $7.2 \times 10^{-8} \sim 16.9 \times$

$10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , SIRM 为  $1030 \times 10^{-6} \sim 2498 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$ ,  $\chi_{\text{fd}}$  都  $< 2\%$ ,  $\chi_{\text{ARM}}$  变化较大, 下低上高, 为  $7.86 \times 10^{-8} \sim 469.39 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 且呈现为基岩上面整个沉积剖面的峰值, 各退磁参数明显偏低,  $S_{-100\text{mT}}$  和  $S_{-300\text{mT}}$  更明显, 较上、下层低  $10\% \sim 20\%$ , 因此该段磁性偏硬且磁性矿物的含量仍然很低, 上部单畴磁性矿物增加; 上段磁性明显增强, 尤其砂质沉积物的  $\chi$  多在  $20 \times 10^{-8} \sim 100 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , SIRM 则多在  $2000 \times 10^{-6} \sim 8000 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$ ,  $\chi_{\text{ARM}}$  有所减小, 多在  $100 \times 10^{-8} \sim 200 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 退磁参数明显增高,  $S_{-20\text{mT}}$  多在  $30\% \sim 40\%$ ,  $S_{-100\text{mT}}$  一般为  $80\% \sim 90\%$ ,  $S_{-300\text{mT}}$  则多接近  $100\%$ ; 上段的泥质沉积表现为弱磁性, 各磁性参数都偏低, 退磁参数显示磁性偏硬。因此上段砂质沉积中以亚铁磁性矿物主导, 且含量显著增加、矿物晶体变大, 泥质沉积中反铁磁性矿物含量也明显增加。

#### (4) 中更新世(153.7 ~ 100.0m)

中更新世早期沉积物颗粒以粉砂和粘土为主, 晚期沉积物颗粒以细砂、含砾砂为主, 在  $4.9 \sim 189.3 \mu\text{m}$  之间波动。该时期泥质沉积和砂质沉积的磁性差异明显, 即泥质沉积表现为弱磁性,  $\chi$ , SIRM 和  $\chi_{\text{ARM}}$  值都明显偏低, 且各退磁参数也总体偏低, 显示磁性偏硬, 反映以不完整反铁磁性矿物为主; 砂质沉积表现为强磁性,  $\chi$  和 SIRM 分别为  $79.38 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  和  $8482.01 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$ , 退磁参数显示  $S_{-300\text{mT}}$  达到  $97\%$  以上, 反映磁性偏软, 以亚铁磁性矿物为主, 而且从  $\chi_{\text{fd}}$  和  $\chi_{\text{ARM}}$  值较低来看, 磁性矿物的晶体颗粒较大。

#### (5) 晚更新世(100.0 ~ 29.4m):

该带沉积物以泥和粉、细砂为主, 中值粒径为  $5.74 \sim 236.10 \mu\text{m}$ 。  $\chi$  总体较高, 为  $30.43 \times 10^{-8} \sim 90.23 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 平均  $52.00 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。  $\chi_{\text{fd}}$  均  $< 4\%$ 。 SIRM 也维持在较高值, 为  $2146.63 \times 10^{-6} \sim 7796.90 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$ 。  $\chi_{\text{ARM}}$  与中更新世沉积物相似, 为  $2.53 \times 10^{-8} \sim 127.68 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。退磁参数和磁性强弱变化较为一致, 在  $-20\text{mT}$  和  $-100\text{mT}$  磁场的值偏低, 尤其在中上部表现较明显, 但在  $-300\text{mT}$  磁场多在  $95\%$  以上。上述磁性参数反映本带仍以较大晶体的亚铁磁性矿物主导。

#### (6) 全新世(29.4 ~ 0m):

沉积物中值粒径显著下降, 仅  $4.16 \sim 40.73 \mu\text{m}$ 。  $\chi$  为  $10.75 \times 10^{-8} \sim 49.40 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , 比晚更新世略有下降, 但除个别样品外, 总体比早、中更新世同样粒径沉积物的磁性明显增强。  $\chi_{\text{fd}}$  除

表层样略高外, 其余均  $< 2\%$ 。 SIRM 也比晚更新世略有下降, 为  $1742.99 \times 10^{-6} \sim 5795.61 \times 10^{-6} \text{ Am}^2/\text{kg}$ 。  $\chi_{\text{ARM}}$  显著增大, 与早更新世下部和上新世沉积物相当, 为  $43.43 \times 10^{-8} \sim 274.12 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。退磁参数有所降低,  $-20\text{mT}$ ,  $-100\text{mT}$  和  $-300\text{mT}$  磁场的值分别为  $18\% \sim 28\%$ ,  $55\% \sim 84\%$  和  $85\% \sim 94\%$ , 显示稍偏硬的磁性, 结合其他参数, 推测本带沉积物的亚铁磁性矿物晶体颗粒偏细, 且局部层位除磁铁矿外, 可能有其他类型亚铁磁性矿物。

## 5 讨论

长江三角洲地区, 从上新世到全新世, 在构造沉降运动作用下, 古地理环境从山麓冲积平原演变为长江三角洲平原<sup>[30]</sup>, 随着流域范围的不断扩大, 蚀源区也相应发生变化。我们根据各钻孔的磁性特征及磁性矿物变化, 也能追踪到 4 次物源变化信息。

首先是上新世, 各孔之间的磁性差异显著, 反映母岩来源也各不相同。如 SG7 孔的强磁性与 PD 孔的基岩磁性相当, 反映了其母岩为玄武岩<sup>[27]</sup>。但其他钻孔未见同样信号, 甚至 PD 孔的上新世沉积也未见强磁性沉积。我们推测这一方面反映玄武岩的分布范围十分有限, 从现在埋藏的基岩来看, 玄武岩主要分布在东部沿海一带, 仅 PD 孔和 SG7 孔在玄武岩分布范围内。另一方面, 反映此时本区以侵蚀和泥沙产出为主, 受古地形控制, 沉积主要发生在一些古沟谷, 如 J18A 和 SG6 孔处在同一条古沟谷(图 1), 它们的沉积物磁性分布比较相似(图 2); SG8 在 SG7 孔的上游, 但磁性极弱, 可见来源于贫磁性母岩; PD 孔处在另一条古沟谷, 虽然基岩为玄武岩, 但其上新世沉积物显示了极弱的磁性, 结合沉积物岩性特征, 推测该处侵蚀搬运作用强烈。因此上新世期间, 本区古地形起伏较大, 沉积物的来源范围都较狭小。

其次为早更新世早期, 不论沉积物粗细变化, 各孔都表现出弱磁性, 反映了都来自贫磁性矿物的母岩, 推测在构造沉降作用下, 本区由侵蚀区逐渐向开放的沉积体系演变。此时位于天马山凸起、秦皇山凸起边缘的 SG10 和 SG13 孔也开始接受堆积(图 2), 也正是构造沉降作用的显示。

第三, 自早更新世中期, 粗颗粒沉积物显示以亚铁磁性矿物主导的强磁性特征, 且矿物晶体较大, 显示新物源的加入。前人对 PD 孔进行的重矿物研究也发现, 在孔深 230m 附近, 重矿物组合发生显著变化<sup>[2]</sup>。类似的物源变化信息在范代读等<sup>[1]</sup>、杨守业

等<sup>[3]</sup>的研究中也有明显反映。

第四次变化发生在晚更新世 - 全新世,磁性研究发现晚更新世 - 全新世的泥质沉积物磁性增强,尤其全新世沉积物中细晶体颗粒的磁性矿物含量明显增加,推测是长江上游物源加入的体现。由于长江上游分布较大规模的玄武岩,因此,其产出的单畴为主的磁铁矿可以作为长江上游的标志性物源。前人对三峡出口处的江汉盆地所进行的磁性研究指出,在B/M界面附近,三峡可能已被切穿,其磁性特征标志就是沉积物磁化率和亚铁磁性单畴颗粒浓度明显增加<sup>[21]</sup>。长江三角洲地区晚更新世以来出现的泥质沉积物磁性增强现象,也是由单畴磁铁矿含量增加引起;因此也应该指示长江上游物质。

上述几次物源变化,都和本区的构造沉降密切相关。汪品先<sup>[43]</sup>指出,新生代晚期亚洲发生巨大的构造形变,即西部青藏高原隆升,东部边缘海扩张,东西地形发生倒转。青藏高原分别于3.4Ma(A幕)、2.5Ma(B幕)、1.67Ma(C幕)发生3幕强烈抬升<sup>[44]</sup>,东部地区也相应发生沉降。本区上新世开始堆积,可对应A幕抬升。我们钻孔揭示的上新世 - 早更新世物源变化及早更新世早期 - 中后期的变化,可能正是对应了B和C两幕抬升。前人研究也显示,从晚第三纪以来,现代长江口区域的沉积中心从苏北逐渐南偏到目前位置<sup>[36]</sup>。我们推测现代长江三角洲地区可能直到全新世才主要由上游来的泥沙贡献。

## 参考文献 (References)

- 1 范代读,李从先, Yokoyama K 等. 长江三角洲晚新生代地层独居石年龄谱与长江贯通时间研究. 中国科学(D辑), 2004, 34(11): 1015 ~ 1022  
Fan Daidu, Li Congxian, Yokoyama K et al. Monazite age spectra in the Late Cenozoic strata of the Changjiang delta and its implication on the Changjiang run-through time. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(10): 1718 ~ 1727
- 2 陈 静,王 哲,王张华等. 长江三角洲东西部晚新生代地层中的重矿物差异及其物源意义. 第四纪研究, 2007, 27(5): 700 ~ 708  
Chen Jing, Wang Zhe, Wang Zhanghua et al. Heavy mineral distribution and its provenance implication in Late Cenozoic sediments in western and eastern area of the Changjiang River delta. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(5): 700 ~ 708
- 3 杨守业,韦刚键,夏小平等. 长江口晚新生代沉积物的物源研究: REE 和 Nd 同位素地制约. 第四纪研究, 2007, 27(3): 339 ~ 346  
Yang Shouye, Wei Gangjian, Xia Xiaoping et al. Provenance study of the Late Cenozoic sediments in the Changjiang delta: REE and Nd isotopic constraints. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(3): 339 ~ 346
- 4 范代读,李从先, Yokoyama K 等. 河口地层独居石 Th(U) - Pb 年龄对长江贯通时限的约束. 海洋地质动态, 2006, 22(7): 11 ~ 15  
Fan Daidu, Li Congxian, Yokoyama K et al. Constraints on the Yangtze River running-through time, using Th(U) - Pb dating of Monazite. *Marine Geology Letters*, 2006, 22(7): 11 ~ 15
- 5 Thompson R, Oldfield F. *Environmental Magnetism*. London: George Allen & Unwin, 1986. 227
- 6 邓成龙,刘青松,潘永信等. 中国黄土环境磁学. 第四纪研究, 2007, 27(2): 193 ~ 209  
Deng Chenglong, Liu Qingsong, Pan Yongxin et al. Environmental magnetism of Chinese loess-paleosol sequences. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(2): 193 ~ 209
- 7 刘秀铭,夏敦胜,刘东生等. 中国黄土和阿拉斯加黄土磁化率气候记录的两种模式探讨. 第四纪研究, 2007, 27(2): 210 ~ 220  
Liu Xiuming, Xia Dunsheng, Liu Dongsheng et al. Discussion on two models of paleoclimatic records of magnetic susceptibility of Alaskan and Chinese loess. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(2): 210 ~ 220
- 8 方小敏,徐先海,宋春晖等. 临夏盆地新生代沉积物高分辨率岩石磁学记录与亚洲内陆干旱化过程及原因. 第四纪研究, 2007, 27(6): 989 ~ 1000  
Fang Xiaomin, Xu Xianhai, Song Chunhui et al. High resolution rock magnetic records of Cenozoic sediments in the Linxia Basin and their implications on drying of Asian inland. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(6): 989 ~ 1000
- 9 朱艳明,周力平,张世红. 中国北方上新世晚期 - 更新世早期风成沉积物磁化率各向异性初探. 第四纪研究, 2007, 27(6): 1009 ~ 1015  
Zhu Yanming, Zhou Liping, Zhang Shihong. A preliminary study on anisotropy of magnetic susceptibility of the Late Pliocene-Early Pleistocene aeolian deposits in Northern China. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(6): 1009 ~ 1015
- 10 刘青松,邓成龙,潘永信. 磁铁矿和磁赤铁矿磁化率的温度和频率特性及其环境磁学意义. 第四纪研究, 2007, 27(6): 954 ~ 962  
Liu Qingsong, Deng Chenglong, Pan Yongxin. Temperature-dependency and frequency-dependency of magnetic susceptibility of magnetite and maghemite and their significance for environmental magnetism. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(6): 954 ~ 962
- 11 夏敦胜,魏海涛,马剑英等. 中亚地区现代表土磁学特征及其古环境意义. 第四纪研究, 2006, 26(6): 937 ~ 946  
Xia Dunsheng, Wei Haitao, Ma Jianying et al. Magnetic characteristics of surface soil in arid region of Central Asia and their paleoenvironmental significance. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(6): 937 ~ 946
- 12 夏敦胜,陈发虎,马剑英等. 黄土高原 - 阿拉善高原典型断面表土磁学特征研究. 第四纪研究, 2007, 27(6): 1001 ~ 1108  
Xia Dunsheng, Chen Fahu, Ma Jianying et al. Environmental magnetic investigations of surface soils along a NW-SE transect from the Chinese Loess Plateau to the Alxa Plateau. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(6): 1001 ~ 1108
- 13 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. 第四纪研究, 2007, 27(6): 1053 ~ 1062  
Zhang Weiguo, Dai Xuerong, Zhang Furui et al. Magnetic properties of sediments from the Chaohu Lake for the last 7000 years and their implications for the evolution of Asian monsoon. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(6): 1053 ~ 1062

- 14 张春霞, 黄宝春, 骆仁松等. 钢铁厂附近树木年轮的磁学性质及其环境意义. 第四纪研究, 2007, 27(6): 1092 ~ 1104  
Zhang Chunxia, Huang Baochun, Luo Rensong *et al.* Magnetic properties of tree ring samples close to a smelting factory and their environmental significance. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(6): 1092 ~ 1104
- 15 沈明洁, 胡守云, Blaha U 等. 土壤剖面的磁学特征及其对交通污染的指示意义——以北京首都机场高速公路为例. 第四纪研究, 2007, 27(6): 1113 ~ 1120  
Shen Mingjie, Hu Shouyun, Blaha U *et al.* Mineral magnetic properties of soil profile and their application in traffic pollution measurements: A case study from the capital airport expressway in Beijing. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(6): 1113 ~ 1120
- 16 段雪梅, 胡守云, 杨涛. 武汉市汤逊湖沉积物重金属垂向变化的磁响应特征及环境意义. 第四纪研究, 2007, 27(6): 1105 ~ 1112  
Duan Xuemei, Hu Shouyun, Yang Tao. Vertical variation of heavy metals and its magnetic response property and environmental significance in core sediment from Lake Tangxun, Wuhan, China. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(6): 1105 ~ 1112
- 17 王辉, 郑祥民, 王晓勇等. 长江中下游干流河底沉积物环境磁性特征. 第四纪研究, 2008, 28(4): 640 ~ 648  
Wang Hui, Zheng Xiangmin, Wang Xiaoyong *et al.* Environmental magnetic properties of sediments from middle and lower reaches of Changjiang River. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 640 ~ 648
- 18 葛淑兰, 石学法, 韩盼兵. 南黄海海底沉积物的磁化率特征. 科学通报, 2001, 46(增刊): 34 ~ 38  
Ge Shulan, Shi Xuefa, Han Yibing. Magnetic susceptibility characteristics of the South Yellow Sea seabed sediment. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(Suppl.): 34 ~ 38
- 19 Liu Jian, Zhu Rixiang, Li Guangxue. Rock magnetic properties of the fine ~ grained sediment on the outer shelf of the East China Sea: Implication for provenance. *Marine Geology*, 2003, 193: 195 ~ 206
- 20 李萍, 李培英, 张晓龙等. 冲绳海槽沉积物不同粒级的磁性特征及其与环境的关系. 科学通报, 2005, 50(3): 262 ~ 268  
Li Ping, Li Peiying, Zhang Xiaolong *et al.* Okinawa Trough sediments magnetic characteristics with different grain size and their relationship between environment. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(3): 262 ~ 268
- 21 张玉芬, 李长安, 王秋良等. 江汉平原沉积物磁学特征及对长江三峡贯通的指示. 科学通报, 2008, 53(5): 577 ~ 582  
Zhang Yufen, Li Chang'an, Wang Qiuliang *et al.* Jianghan Plain magnetic characteristics of the sediments and the Three Gorges on the Yangtze River through the instructions. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(5): 577 ~ 582
- 22 (苏)金兹堡 А И 著, 徐海江, 王剑锋译. 成因矿物学概论. 北京: 地质出版社, 1982. 1 ~ 133  
Ginzburg А И, Translator by Xu Haijiang, Wang Jianfeng. *Очеркипо Генетической Минералогии*. Beijing: Geological Publishing House, 1982. 1 ~ 133
- 23 林师整. 磁铁矿物化学、成因及演化的探讨. 矿物学报, 1982, (3): 166 ~ 174  
Lin Shizheng. A contribution to the chemistry, origin and evolution of magnetite. *Acta Mineralogica Sinica*, 1982, (3): 166 ~ 174
- 24 王顺金. 论磁铁矿的标型特征. 矿物学岩石学论丛, 1987, (3): 139 ~ 154  
Wang Shunjin. The typical characteristics of magnetite. *Collection of Mineralogy and Petrology*, 1987, (3): 139 ~ 154
- 25 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 成因矿物学与找矿矿物学. 重庆: 重庆出版社, 1987. 234 ~ 235  
Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Yin Hui'an. *Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy*. Chongqing: Chongqing Press, 1987. 234 ~ 235
- 26 Nielsen R L, Forsythe L M, Callahan W E *et al.* Major-and trace-element magnetite-melt equilibria. *Chemical Geology*, 1994, 117: 167 ~ 191
- 27 王张华, 张丹, 李晓等. 长江三角洲地区晚新生代沉积物磁性和磁性矿物分布特征及其对物源、古地理环境演变的指示意义. 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. *Geology in China*, 2008, 35(4): 670 ~ 682
- 28 孙秀荣, 戴纯俊, 刘志高等. 长江三角洲南翼晚更新世 - 全新世沉积物地球物理研究. 物探与化探, 2002, 26(3): 175 ~ 178  
Sun Xiurong, Dai Chunjun, Liu Zhigao *et al.* Geophysical studies of Epileistocene-Holocene sediments in the southern limb of the Yangtze Delta. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2002, 26(3): 175 ~ 178
- 29 魏子新. 长江三角洲东部第四纪沉积环境演化新构造运动古气候与海平面变化的耦合作用. 上海: 华东师范大学资源与环境科学学院博士论文, 2003. 1 ~ 116  
Wei Zixin. *Quaternary Environmental Evolution in Eastern Yangtze Delta: Coupling of Neotectonic Movement, Paleoclimate and Sea-level Fluctuation*. Shanghai: East China Normal University, Ph. D Dissertation, 2003. 1 ~ 116
- 30 王张娇, 陈中原, 魏子新等. 长江口第四纪沉积物中构造与古气候耦合作用的探讨. 科学通报, 2005, 50(14): 1503 ~ 1511  
Wang Zhangjiao, Chen Zhongyuan, Wei Zixin *et al.* Coupling controls of neotectonism and paleoclimate on the Quaternary sediments of the Yangtze (Changjiang) coast. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(14): 1503 ~ 1511
- 31 丁元陶. 长江三角洲东部沉积物粒度特征及其环境意义. 资源调查与环境, 2006, 27(4): 261 ~ 267  
Ding Yuantao. Grain-size characteristics of the eastern Yangtze delta sediments and its environmental implication. *Resources Survey & Environment*, 2006, 27(4): 261 ~ 267
- 32 王建华, 周洋, 郑卓等. 杭州湾晚第四纪沉积与古环境演变. 古地理学报, 2006, 8(4): 551 ~ 558  
Wang Jianhua, Zhou Yang, Zhen Zhuo *et al.* Late Quaternary sediments and paleoenvironmental evolution in Hangzhou Bay. *Journal of Palaeogeography*, 2006, 8(4): 551 ~ 558
- 33 郭玉贵, 李延成, 许东禹等. 黄东海大陆架及邻域大地构造演化史. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(1): 1 ~ 11  
Guo Yugui, Li Yanchen, Xu Dongyu *et al.* Tectonic evolution of Yellow Sea, East China Sea and continental shelf and adjacent areas. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1997, 17(1): 1 ~ 11
- 34 程三友. 中国东北地区区域构造特征与中生代盆地演化. 北京: 中国地质大学(北京)博士论文, 2006. 1 ~ 121  
Cheng Sanyou. *Regional Tectonic Characters and Meso-Cenozoic Basin Evolution in North Eastern China*. Beijing: China University of Geosciences, Ph. D Dissertation, 2006. 1 ~ 121

- 35 李延栋,莫 杰. 中国滨太平洋构造域构造格架和东海地质演化. 海洋地质与第四纪地质,2002,22(4): 1~6  
Li Yangdong, Mo Jie. Tectonic framework of the West Circumpacific tectonic tract and the geological evolution of the East China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*,2002,22(4): 1~6
- 36 Chen Zhongyuan, Stanley D J. Quaternary subsidence and river channel migration in the Yangtze Delta Plain, Eastern China. *Journal of Coastal Research*,1995,11: 927~945
- 37 陈中原. 长江三角洲之沉降. 火山地质与矿产,2001,22(2): 95~101  
Chen Zhongyuan. Yangtze delta subsidence. *Volcanology & Mineral Resources*,2001,22(2): 95~101
- 38 秦大正. 上海覆盖区活断层. 地震地质,1994,16(2): 160~166  
Qin Dazhen. The active fault in Shanghai overburden area. *Seismology and Geology*,1994,16(2): 160~166
- 39 章震铨,刘昌森. 上海两条隐伏第四纪断裂的研究. 地震地质,2001,23(4): 545~555  
Zhang Zhenshuan, Liu Changsen. Research on two buried Quaternary faults in Shanghai. *Seismology and Geology*,2001,23(4): 545~555
- 40 Oldfield F. Environmental magnetism—A personal perspective. *Quaternary Science Reviews*,1991,10: 73~85
- 41 董瑞斌,张卫国,卢升高等. 土壤和沉积物的磁参数及其在环境科学中的应用. 科技通报,2000,16(6): 479~483  
Dong Rui bin,Zhang Weiguo,Lu Shenggao *et al.* The magnetic indexes for soil and sediment and their applications on environmental studies. *Bulletin of Science and Technology*,2000,16(6): 479~483
- 42 王润华,郭坤一,于振江等. 长江三角洲地区第四纪磁性地层学研究. 地层学杂志,2005,29(增刊): 612~617  
Wang Runhua,Guo Kunyi,Yu Zhenjiang *et al.* Quaternary magnetostratigraphy of the Yangtze delta area. *Journal of Stratigraphy*,2005,29(Suppl.): 612~617
- 43 汪品先. 亚洲形变与全球变冷——探索气候与构造的关系. 第四纪研究,1998,(3): 213~221  
Wang Pingxian. Deformation of Asia and global cooling: Searching links between climate and tectonics. *Quaternary Sciences*,1998,(3): 213~221
- 44 施雅凤,李吉均,李炳元等. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化. 地理学报,1999,54(1): 10~20  
Shi Yafeng,Li Jijun,Li Bingyuan *et al.* Uplift of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and East Asia environmental change during Late Cenozoic. *Acta Geographica Sinica*,1999,54(1): 10~20

## ROCK MAGNETIC PROPERTIES AND SOURCE INDICATIONS OF LATE CENOZOIC SEDIMENTS IN YANGTZE DELTA AREA

Zhang Dan<sup>①</sup> Wang Zhanghua<sup>①</sup> Wei Wei<sup>②</sup> Li Xiao<sup>③</sup>

(<sup>①</sup>Department of Geography, School of Resources and Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062;

<sup>②</sup>School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; <sup>③</sup>Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072)

### Abstract

Lithostratigraphy and magnetic properties of sediments from 7 Late Cenozoic boreholes (SG6, SG7, SG8, SG10, SG13, J18A, and PD) drilled in the Yangtze delta area were analyzed to reveal the sediment source and its change in this area. Paleomagnetism was measured for all boreholes with the sampling intervals of 1.0~1.5m. The sediments of PD were further measured for rock magnetic property with a mean sampling interval of ca. 4m. The results show that gravelly sand and hard clay dominate the sediments deposited during Pliocene to mid-Pleistocene. Fine-grained soft sediments mainly occur after Late Pleistocene. Results also show that magnetic susceptibility changes significantly among Pliocene sediments in 7 boreholes. The strongest magnetic susceptibility is found in SG7, exceeding 200, which is believed to be contributed by the local bedrock of basalt. By contrast, magnetic susceptibility is generally weak in other boreholes. Palaeotopography is suggested to control the spatial distribution of magnetic properties and the associated local sediment source. During early stage of Early Pleistocene, magnetic signals become extremely weak in all boreholes, suggesting a uniform sediment source. During the middle and late stages of Early Pleistocene to Holocene, magnetic susceptibility fluctuates along with the change of grain size of sediments. It is stronger in sandy sediments and weaker in muddy sediments, reflecting new sediment source of rich magnetic minerals. Since the Late Pleistocene, magnetic susceptibility of fine-grained sediments enhanced obviously. This indicates the increase of fine-grained magnetic mineral that is possibly contributed from the upper Yangtze drainage basin. Rock Magnetic property analysis of PD demonstrates that magnetite is the major magnetic mineral and its crystal particle size is smaller in Pliocene and the early stage of Early Pleistocene, and bigger during the middle and late stages of Early Pleistocene to Late Pleistocene. Fine-grained magnetite dominated Holocene sediments again. We believe that these magnetic changes reflect the sediment sources of the present Yangtze delta area which kept on expanding during Late Cenozoic era under the control of the tectonic subsidence.

**Key words** magnetic susceptibility, magnetic mineral, source evolution, Yangtze delta, Late Cenozoic