

文章编号: 1000-0550(2013)06-1041-09

# 长江三角洲 SZ04 孔磁性地层研究及其意义<sup>①</sup>

张平<sup>1</sup> 李向前<sup>1</sup> 潘明宝<sup>1</sup> 宗开红<sup>1</sup> 苗巧银<sup>1</sup>  
李永祥<sup>2</sup> 欧健<sup>1</sup> 冯文立<sup>1</sup> 季文婷<sup>1</sup> 刘维明<sup>3</sup>

(1. 江苏省地质调查研究院 国土资源部地裂缝地质灾害重点实验室 南京 210018; 2. 南京大学地球科学与工程学院 南京 210093  
3. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所山地灾害与地表过程重点实验室 成都 610041)

**摘要** 文章对位于长江三角洲南翼平原区西部的 SZ04 孔进行了详细的磁性地层学研究。结合绝对测年,并与标准极性柱对比认为 269.2 m 岩芯清楚的记录了布容(Brunhes)、松山(Matuyama)、高斯(Gauss)极性带,及贾拉米洛(Jaramillo)、奥尔都维(Olduvai)等亚极性带和布莱克(Black)地磁漂移,其中 B/M、M/G 界限深度分别为 100 m 和 155 m; SZ04 孔底部碎屑沉积物形成的年龄大于 5.23 Ma。研究发现,钻孔沉积物磁化率、岩石地层特征在特殊的时代界限附近有明显变化可进行区域对比。分析表明,第四纪以来长江三角洲地区一直存在持续的构造沉降,且沉降中心持续往东南方向移动,构造沉降运动的发生和发展存在三个重要的期次分别为 2.58 Ma、0.78 Ma 和 0.125 Ma。

**关键词** 长江三角洲 SZ04 孔 磁性地层 极性带

**第一作者简介** 张平 男 1980 年出生 硕士研究生 第四纪地质 E-mail: 15996275775@163.com

**中图分类号** P539 **文献标志码** A

## 0 引言

印度板块和欧亚板块的碰撞是地球新生代历史中的重大构造事件之一,由其所导致的青藏高原的隆升不仅引起了全球气候的深刻变化,而且也对沉积物从源到汇的地表过程产生了深远影响<sup>[1]</sup>。作为青藏高原遭受风化、剥蚀物质汇聚地之一的长江三角洲是记录地表过程对青藏高原构造隆升响应的理想地区<sup>[2]</sup>。同时长江三角洲地区不仅是东亚季风气候影响显著的区域,而且是连接海洋与内陆的关键地段,除了受到青藏高原隆升的环境效应影响外,我国大陆边缘海的形成过程,冰期旋回中大幅度的海进与海退、西太平洋暖池的形成与发展、南中国海形成演化等也势必会对该区产生重要的影响<sup>[3,4]</sup>。可见,该区是海洋—陆地—大气耦合作用影响最为显著的地区,是研究海洋—陆地—大气耦合作用过程与遥相关的理想场所。

自 20 世纪 50 年代以来,不同学者对长江三角洲新生代沉积物进行了大量的研究。其中,长江三角洲钻孔岩芯的磁性地层研究始于 20 世纪 70 年代中后期。迄今该区已有多个钻孔古地磁年代的报道<sup>[5,6]</sup>。这些资料为我国大河口三角洲的环境演变研究提供

了宝贵资料和年代控制。然而,目前对长江三角洲沉积物年代学研究仍存在很多争议,特别是由于受河流—海洋多因素综合作用的影响,几个主要的古地磁极性界限划分还存在很大分歧<sup>[7~11]</sup>,给该区的地质划分和古环境演化研究带来不确定性<sup>[10~14]</sup>,也使得研究者对长江贯通时间的认识出现分歧<sup>[2,15~18]</sup>;并且该区构造单元发育复杂,地层对比困难,构造单元间的相对运动量及构造活动时间无法确定;另外区内地面沉降灾害、水文地质层划分、对比等研究需要以准确地质年代为依据<sup>[5]</sup>;因此建立可靠的地层年代框架是研究和解释长江三角洲地区新生代以来多个地质问题的前提和基础,但区内专门针对某一钻孔的系统磁性地层研究相对较少<sup>[13]</sup>。因此,本文通过对苏州 SZ04 钻孔进行沉积物磁性地层学研究,分析建立该区的磁极性地层年代框架,为该区沉积环境演化、物源变化、长江贯通等研究提供较精确的年代地层标尺。

## 1 钻孔基本情况及沉积特征

长江三角洲 SZ04 孔位于苏州市相城区北桥镇(图 1),于 2010 年 3 月实施钻探取样,钻探进尺 269.2 m,揭露基岩为晚白垩纪赤山组棕红色夹棕黄

<sup>①</sup>江苏 1/5 万盐城市、引水沟、龙王庙、伍佑镇、大丰县、裕华镇幅区调(编号:1212011220536)与江苏 1/5 万昆山市、太仓县、安亭镇、吴江县、芦墟镇幅区调(编号:1212010710610)联合资助  
收稿日期:2012-11-20; 收修改稿日期:2013-03-25

色含砾砂岩,岩芯采取率 > 80%。取样岩芯管直径 108 mm 实际岩芯直径可达 100 mm。取芯率和岩芯状况满足磁性地层学要求。

SZ04 孔岩性以粉砂质黏土、黏土质粉砂、粉砂及细砂为主,局部层位夹薄层砾与粗砂。

依据岩性特征可将钻孔从上到下大致划分为 27 层:

(1) 0~4.0 m,灰黄、青灰、灰褐色粉砂质黏土、黏土质粉砂。

(2) 4.0~14.55 m,青灰色、灰绿色粉砂、黏土质粉砂,显水平层理,底部见波状层理,具贝壳碎片,见植物残体。

(3) 14.55~19.0 m,灰褐色淤泥质黏土,见浅灰黄色泥钙质结核,含有机质斑点。

(4) 19.0~26.9 m,青灰色、浅灰绿色粉细砂、黏土质粉砂,见水平层理,含腐木,见动物遗迹。

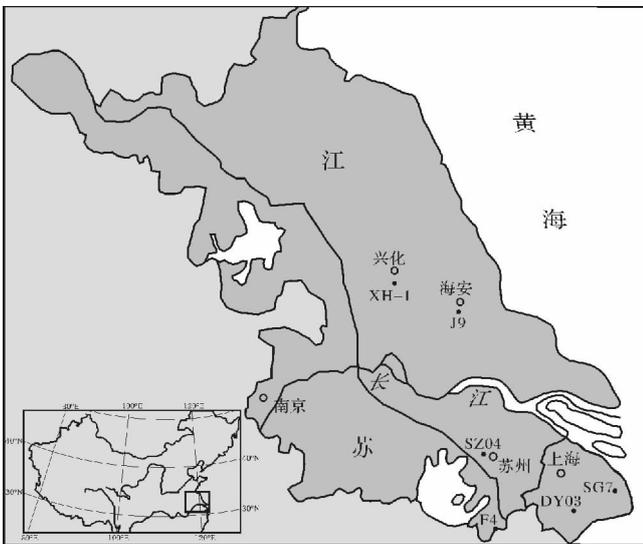


图1 SZ04 孔及文中涉及钻孔位置

Fig. 1 Locations of the SZ04 and the involved drilling

(5) 26.9~28.8 m,灰黄色粉砂、黏土质粉砂,中部为粉砂与黏土互层,见水平层理。

(6) 28.8~36.35 m,青灰色、灰色粉细砂、黏土质粉砂、粉砂质黏土、黏土,沉积韵律为正旋回,水平层理发育,局部见波状层理和交错层理。

(7) 36.35~42.15 m,青灰色、灰色粉细砂、粉砂,局部夹薄层黏土,水平层理发育,见黑色有机质斑点。

(8) 42.15~50.7 m,下部青灰色含砾粉砂、粉砂,砾石磨圆度好,多为坚硬泥砾;上部为灰色黏土与粉砂互层,水平层理发育。

(9) 50.7~54.2 m,灰绿色黏土。

(10) 50.7~67.65 m,下部为青灰色粉砂夹黏土,上部为灰、灰褐色粉砂质黏土夹粉砂,水平层理发育,含黑色有机质条带。

(11) 67.65~90 m,下部为青灰、灰色粉砂、细砂,局部含磨圆好的小砾石,中上部灰褐色、灰绿色黏土,灰褐色黏土中见生物遗迹和植物根茎。

(12) 90~100.5 m,下部为灰色细砂、粉砂,含白色螺壳碎片,底部夹薄层砾石,中部为灰、灰褐色黏土夹粉砂、黏土质粉砂,水平层理发育,顶部为灰绿色黏土。

(13) 100.5~108.85 m,下部为灰色、灰黄色粉砂、细砂,中部为灰色、灰黄色黏土,上部为灰色、暗灰色含黏土粉砂,顶部为深灰绿色黏土。

(14) 108.85~124.45 m,下部为灰黄色黏土质粉砂、黏土,含铁锰质结核及钙质结核,见兰灰色淋滤条带;上部为灰黄色粉细砂、黏土,正韵律沉积旋回。

(15) 124.45~133.3 m,自下而上为灰色、灰黄色砂砾层、黏土夹粉砂、粉砂夹黏土,见水平层理,顶部 0.35 m 为钙质结核层。

(16) 133.3~142.3 m,底部为灰色细砂与灰白色砾石互层,往上为灰色细砂、粉细砂,含砾石。

(17) 142.3~145.35 m,底部为砾石层,往上为灰色粉细砂、粉砂,夹黏土,自下往上沉积物颗粒变细。

(18) 145.35~150.45 m,自下而上为蓝灰色黏土质粉砂、锈黄色粉砂质黏土、灰黄色黏土、灰绿色粉砂质黏土,含蓝灰色条带和锈黄色铁锰质结核及斑点。

(19) 150.45~154.95 m,自下而上为灰色含砾中粗砂、砂砾层、细砂、粉细砂、粉砂质黏土夹粉砂、灰绿色黏土,正韵律沉积旋回,黏土中见动植物遗迹,砂层中见水平层理。

(20) 154.95~180.0 m,灰黄色、棕黄色、棕褐色,局部夹蓝灰色、紫红色及棕红色黏土,局部夹粉砂,含白色钙结核和黑色铁锰质结核,结核大小不一;该大套黏土层接受的淋滤作用明显。

(21) 180.0~187.0 m,自下而上为杂色钙质黏土,锈黄色、蓝灰色黏土质粉砂,蓝灰色、锈黄色黏土,含钙结核和铁锰质结核,上部钙质结核和铁锰质结核似层状分布。

(22) 187.0~198.2 m,底部为棕红、灰绿色黏土,中部夹中粗砂,局部含细小砾石,上部为灰色、锈

黄色细砂、粉砂。

(23) 198.2~210.5 m,白色钙层,见大量蓝灰色淋滤条带,见大量黑色、锈黄色铁锰质斑点及薄膜,整体显豆腐渣状,局部钙质成分较纯。

(24) 210.5~229.75 m,灰绿、棕黄、紫红、灰白色砾石、中粗砂、细砂和粉砂等与黏土互层,含钙质结核和铁锰质斑点,见较多小的沉积间断面。

(25) 229.75~236.95 m,砾石层,磨圆度一般,次圆状一次棱角状,砾石最大为 $10 \times 7 \times 5$  cm,平均为 $8 \times 5 \times 3$  cm,分选一般。

(26) 236.95~240.5 m,自下而上为灰绿、灰、灰黄色砾石层、含砾中粗砂、粉砂质黏土,风化强烈,砾石磨圆度一般,呈次棱角状。

(27) 240.5~269.2 m,强风化基岩,棕红、灰白色粉砂岩与砾岩互层。

## 2 样品的采集及实验测试

### 2.1 样品的采集

对岩芯进行剖开、修平、拍照,岩性描述和采样。古地磁样品利用具有方向标记的 $2 \times 2 \times 2$  cm<sup>3</sup>的塑料盒完成。采样点的确切位置视岩芯状况而定,尽量采集钻探过程中无扰动岩芯,共采集样品503块。样品以细粒级的黏土和黏土质粉砂为主,部分层位为粉砂或细砂。采样间距控制在0.5 m以内,个别层位因岩性扰动采样间距超过1 m。

光释光和电子自旋共振测年样品利用黑色塑料袋采集8~10 cm长度的整块岩芯,装入铁皮盒,利用胶带及石蜡封闭密实,表明方向和样号。样品以氧化色的粉砂—细砂为主。样品的采集要注意避光和保水。

### 2.2 实验测试

#### 2.2.1 古地磁测量

选择代表层位的209块样品进行古地磁测量。其中,根据样品粒度粗细及含砂量的不同,分别进行交变退磁和热退磁的测量。剩磁测量分以下步骤来完成。在对样品剩磁的系统测量之前,先选取不同岩性(如黏土、粉砂、细砂、粉砂质黏土、黏土质粉砂等)且层位上有代表性的样品做系统退磁,以便了解不同岩性样品的退磁特征,从而确定相应的磁清洗方案对其他样品退磁。交变退磁使用Molspin交变退磁仪来完成的,所加的交变场强度通常以每步增加10 mT的幅度增加至90 mT或100 mT。热退磁是用ASC Scientific Inc公司的TD-48热退磁仪来完成的。退磁

温度从室温以每步增加50℃或100℃的幅度逐步增加。所有样品的剩磁测量是在南京大学古地磁实验室的磁屏蔽室(背景场<300 nT)内进行。剩磁的测量是用美国2G公司生产的755R、三轴、高灵敏度超导磁力仪完成。

#### 2.2.2 磁化率测量

磁化率主要用来衡量不同层位样品中磁性矿物含量多少。磁化率不仅在古气候古环境演化的研究中得到广泛应用<sup>[19~21]</sup>,而且在湖相沉积物地层对比<sup>[22,23]</sup>及盆地构造演化<sup>[24]</sup>的研究中也获得了应用。对SZ04孔的503个样品的磁化率进行测量。在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,利用的仪器为AGICO Inc公司的KLY-3 Kappa-bridge磁化率仪,其灵敏度为 $2 \times 10^{-8}$  (SI),文中测试结果为体积磁化率,单位为国际单位SI。

#### 2.2.3 绝对测年样品的测量

光释光样品的测试在国土资源部地下水矿泉水及环境监测中心完成,测试仪器为Daybreak 2200光释光仪(美国)。

电子自旋共振样品的测试在地震动力学国家重点实验室完成,测试仪器为BRULER EMS-6/1型ESR信号测量谱仪(德国)。

### 2.3 数据分析

通过对不同岩性样品的系统交变退磁,发现多数样品在交变场增加至70 mT左右时其剩磁强度衰减至10%以下。黏土的热退磁效果较好,但含砂黏土,粉砂、细砂热退磁曲线不稳定。图2为SZ04孔代表性样品的退磁结果的Z氏图<sup>[25]</sup>。其中,图2A和图2B为代表性的交变退磁结果,退磁结果较好,轨迹趋向原点。热退磁数据揭示SZ04孔的黏土样品通常有2个剩磁分量,低温分量(<200℃)被除去后,高温分量趋于原点(2C,2D),代表了样品的特征剩磁分量。部分样品的退磁结果并不能分离出特征剩磁分量,对于这些不可靠、不能分离出特征剩磁分量的数据予以剔除。对于退磁效果好,能分离出特征剩磁分量的结果运用主成分(PCA,Principal Component Analysis)分析法<sup>[26]</sup>来确定特征剩磁分量的方向。用来衡量退磁结果稳定性的统计参数—最大角偏差(MAD)控制在<15。

### 2.4 实验结果

SZ04孔的磁性地层结果如图3所示,相应的磁性年代柱是根据与标准地磁极性年代柱<sup>[27]</sup>对比来建立的,并综合了钻孔的绝对测年。SZ04孔磁性地层

显示 0 ~ 100 m 正极性段显然对应于布容极性世, 其间 53 m 处的负极性漂移事件可能代表 Black 极性事件, 53m 处光释光测年结果为  $100.7 \pm 6.1$  ka; 100 ~ 155 m 以负极性为主, 对应于松山极性世, 107.40 m 处灰黄色粉细砂样品的电子自旋共振测年(ESR)为  $898 \pm 107$  ka, 其中深度为 114 ~ 124 m 和 134 ~ 140 m 的正极性段, 分别对应于贾拉米洛和奥尔都维亚亚极性世; 155 ~ 189 m 以正极性为主, 对应于高斯极性世, 其间包含深度为 164 ~ 165.5 m 和 174.5 ~ 176.5 m 的负极性段, 分别对应于 Kaena 和 Mammoth 亚极性世。189 m 以下数据资料较少, 结果可能不够准确, 但能大体划分出极性倒转事件, 并根据钻孔高斯极性世顶底界地层沉积速率外推, 能够确定钻孔底部碎屑沉积物的形成年龄大于 5.23 Ma。

SZ04 孔磁化率特征: 155 m 上下磁化率特征存在明显差异, 0 ~ 155 m 磁化率存在 6 个峰值和 5 个谷值, 总体磁化率值较高(图 3); 155 ~ 240 m 值较低, 但也存在两个相对高值区, 分别为 155 ~ 178 m 和 220 ~ 240 m, 一个低值区为 178 ~ 220 m。

### 3 讨论

#### 3.1 磁化率指标的意义

虽然磁化率变化机制与地质环境过程有密切关系<sup>[28]</sup>, 但区域性的地质环境过程基本相似, 因此在长

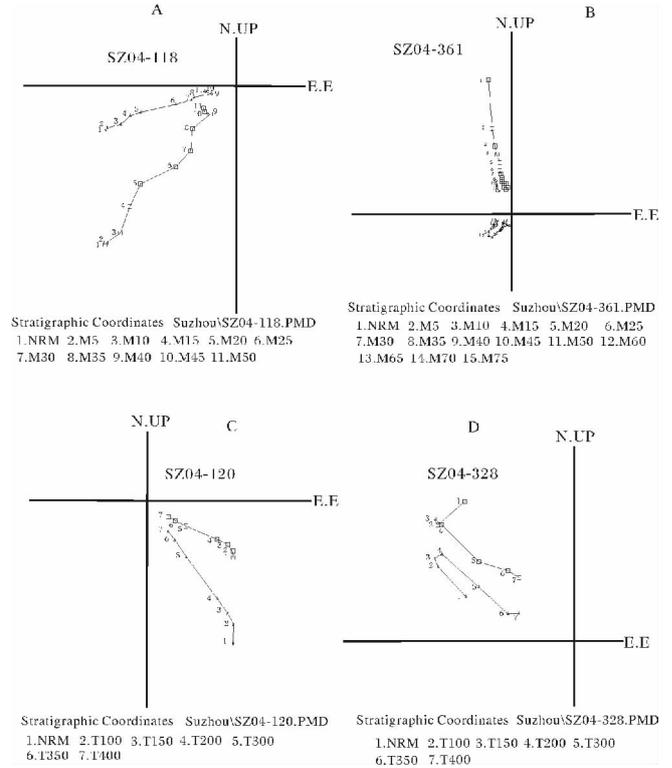


图 2 SZ04 孔代表性样品退磁结果

(A, B 为交变退磁数据; C, D 为热退磁数据)

Fig. 2 The demagnetization results of the representative samples from the SZ04 drilling (A and B are the alternating demagnetization results; C and D are the thermal demagnetization results)

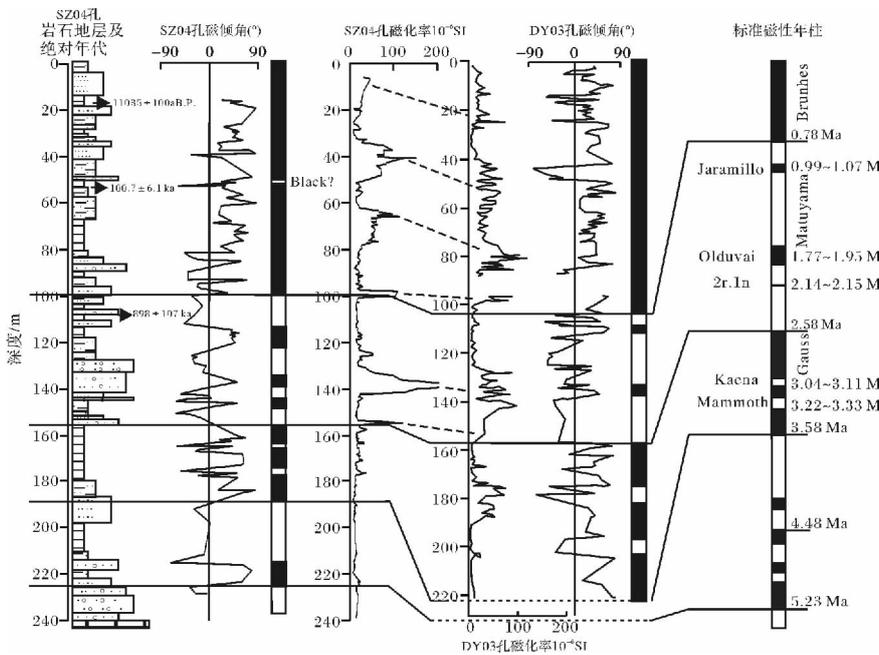


图 3 SZ04 孔岩石地层和磁性特征基于与 Dy03 孔<sup>[13]</sup>的对比

Fig. 3 The lithostratigraphic and magnetostratigraphic features of the SZ04 drilling based on comparison with Dy03 hole<sup>[13]</sup>

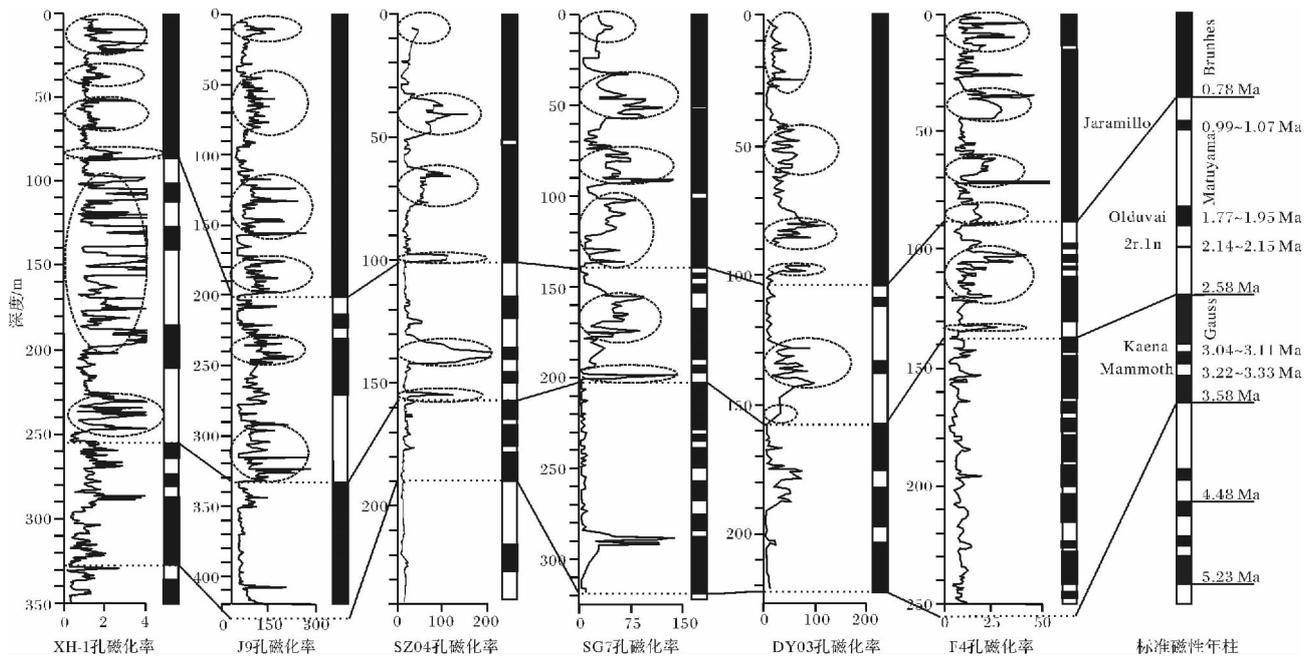


图 4 XH-1 孔<sup>[33]</sup> J9 孔<sup>[29]</sup> SZ04 孔<sup>[30]</sup> SG7 孔<sup>[30]</sup> DY03 孔<sup>[13]</sup> 和 F4 孔<sup>[10]</sup> 磁性地层对比

Fig. 4 The magnetostratigraphic correlation among the XH-1<sup>[33]</sup> J9<sup>[29]</sup> SZ04<sup>[30]</sup> SG7<sup>[30]</sup> DY03<sup>[13]</sup> and F4<sup>[10]</sup>

江三角洲地区进行地层的磁化率对比是可行的。SZ04 孔与 J9 孔<sup>[29]</sup>、DY03 孔<sup>[13]</sup> 及 F4 孔<sup>[10]</sup> 磁化率特征对比显示四钻孔磁化率特征极为相似: 2.58 Ma 以前磁化率值较低波动平稳, 0.78 ~ 2.58 Ma 存在 2 个谷值 2 个峰值, 0 ~ 0.78 Ma 存在 4 峰值夹 3 个谷值。并且四个钻孔地层界线均对应相似的磁化率变化位置(图 4 表 1): 例如全新统底界位于第 1 个峰值的下部, 上更新统底界位于第 2 个峰值下部, 中更新统底界位于第 4 个峰值的下部, 下更新统底界位于第 6 个峰值的下部, 古地磁测定的 Jaramillo 和 Olduvai 亚极性事件分别位于磁化率的第 4 谷值区和第 5 峰值区。

表 1 SZ04 孔<sup>[29]</sup> J9 孔<sup>[29]</sup> DY3 孔<sup>[13]</sup> 和 F4 孔<sup>[10]</sup> 时代地层界线  
Table 1 Chronostratigraphic boundaries of the SZ04, J9<sup>[29]</sup>, DY3<sup>[13]</sup> and F4<sup>[10]</sup> holes

SZ04		J9		DY3		F4	
时代 (ka)	深度 (m)						
0	0	0	0	0	0	0	0
11	17	11	39	11	24.8	11	11.7
100	53	111	115	125	61.8	125	44
780	100	780	200	780	103.7	780	87
2581	155	2580	334	2580	157.3	2580	138.3

以上结果证明了长江三角洲地区利用磁化率进行地层划分的可靠性, 利用磁化率对比可以确定地层

的时代。陶士康和王张华等分别把长江三角洲地区 SG7 孔第四系底界定于 204 m 和 284 m 处<sup>[17, 30]</sup>。利用 SG7 孔的磁化率变化特征可以确定其第四系的底界应在 204 m 处。

### 3.2 地层对比标志层

SZ04 孔 2.58 Ma 附近上下地层特征差异明显, 新近系顶部以黄褐、棕红、青灰、灰黄、灰绿、蓝灰等大套杂色黏土—粉砂质黏土为主, 坚硬, 局部含白色钙质和黑色铁锰质结核, 结核大小不一, 垂直层理发育的蓝灰色条带多见, 表明淋滤作用明显, 局部夹粉砂层; 第四系底部自下而上出现一套正韵律沉积旋回, 为灰色含砾中粗砂、砂砾层、细砂、粉细砂、粉砂质黏土夹粉砂、灰绿色黏土, 黏土中见动植物遗迹, 砂层中见水平层理。第四纪地层整体表现为灰色等还原色层明显增加的特征(图 5)。综合 J9 孔<sup>[29]</sup>、DY03 孔<sup>[13]</sup> 和 SG7 孔<sup>[30]</sup> 地层特征对比发现 SZ04 孔第四纪界线附近岩性特征在长江三角洲地区钻孔中普遍存在, 可作为地层划分的重要标志层。

前人的大量研究表明, 长江三角洲地区普遍发育硬黏土层, 其中第一硬黏土层和第二硬黏土层的顶界分别为全新统和上更新统的底界<sup>[13, 31, 32]</sup>。但本次研究发现, SZ04 孔缺失第一硬黏土层, J9 孔缺失第二硬黏土层, 并且同时期、不同位置地层沉积厚度差异明显(表 1), 因此利用硬黏土层进行地层的划分对比应

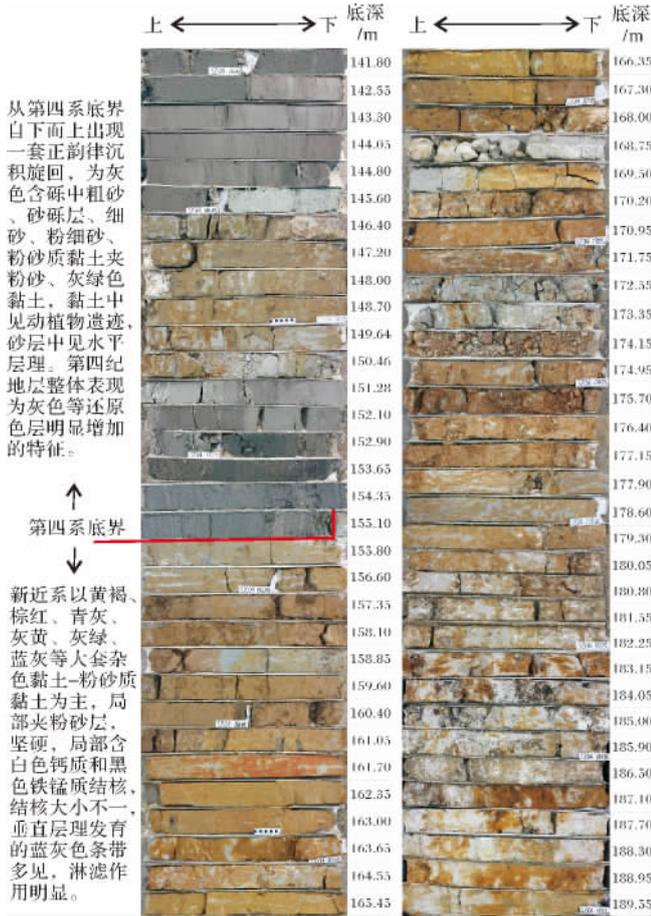


图5 SZ04孔141.14~189.55m岩芯照片

Fig.5 Lithology photo of the SZ04 hole (from 141.14 to 189.55m)

谨慎。

### 3.3 沉积速率变化及其意义

岩性特征表明 2.58 Ma 以来长江三角洲地区灰色砂层明显增多,与该区相对海平面越来越高,水流作用越来越强有密切关系,然而自 2.58 Ma 以来全球变冷,海平面变低<sup>[33]</sup>,由此推断自 2.58 Ma 以来长江三角洲地区存在持续的构造沉降。2.58~0.78 Ma 长江三角洲地区北部兴化地区 XH-1 孔<sup>[34]</sup>沉积速率最高,依次往南东方向降低(图 6),表明沉降中心此时位于长江三角洲的北部地区。

图 6 表明长江三角洲地区沉积速率约 0.78 Ma 后明显增高。我国在约 0.8 Ma 前后冬夏季风同时加强,冰期一间冰期反差加大<sup>[35]</sup>,青藏高原发生大幅度隆升<sup>[1]</sup>,区域性板块的持续下沉<sup>[36]</sup>等这些气候和构造事件均是区域性沉积速率加快的重要因素。位于长江三角洲北部兴化的 XH-1 孔沉积速率虽然相对其他钻孔较高,但在 0.78 Ma 后增加不明显,表明引

起长江三角洲地区沉积速率在 0.78 Ma 增高的主要因素应该是区域性的不均衡构造沉降。0.78 Ma 以来江苏东部沿海的沉降中心南移,长江古河道也随之南移,长江三角洲地区沉积物开始丰富起来,沉积速率增加。此时 J9 孔沉积速率最大,表明沉降中心距 J9 孔位置较近。

全球最适宜期 MIS5 阶段为海平面较高期,但是长江三角洲地区此时受海侵影响幅度较 MIS3 和 MIS1 小,表明晚更新世以来长江三角洲地区区域性构造沉降加剧<sup>[37]</sup>。长江三角洲北部 XH-1 孔沉积速率最低、增加幅度最小,长江三角洲地区的 5 个钻孔沉积速率增加幅度明显且往南西方向逐渐降低(图 6),表明构造沉降中心较中更新世时期向南东方向移动。虽然沉降中心距 J9 孔位置仍较近,但对长江三角洲南翼顶部地区的影响逐渐增强。此外,全新世以来沉积速率增高的另一主要因素是人类活动的影响。

以上研究表明自第四纪以来,长江三角洲地区一直存在持续的构造沉降,且沉降中心持续向南东方向移动,沉降运动的发生和发展存在三个重要的期次分别为 2.58 Ma、0.78 Ma 和 0.125 Ma。这三个时间点分别与青藏高原隆升的三个期次相对应<sup>[1]</sup>,江苏东部沿海持续的构造沉降,青藏高原的持续隆升是否是印度板块、欧亚板块及太平洋板块相互作用的“同期异象”的产物有待今后进一步研究。

## 4 结论

(1) 通过详细的磁性地层学分析,并结合绝对测年结果揭示出 SZ04 孔中 B/M、M/G 界限深度分别为 100 m 和 155 m,其中亚极性事件包括 53 m 处的 Black 负极性事件,114~124 m 处的贾拉米洛正极性事件,134~140 m 处的奥尔都维正极性事件,164~165.5 m 处的 Kaena 负极性事件,174.5~176.5 m 处的 Mammoth 负极性事件。SZ04 孔底部碎屑沉积物形成的年龄大于 5.23 Ma 标志着长江三角洲地区最晚开始接受沉积的时间为中全新世。该结果为长江三角洲地区地层对比、海陆环境变化,长江贯通及新构造运动研究等提供了可靠的年代地层框架。

(2) 长江三角洲地区及江苏东部沿海钻孔沉积物在 2.58 Ma 前后的岩石地层和磁化率特征均发生明显变化。2.58 Ma 以前岩石地层为大套杂色黏土,随后灰色等还原色岩层开始出现,磁化率值均存在明显增大的特征。这一特征可以用于钻孔间地层对比。

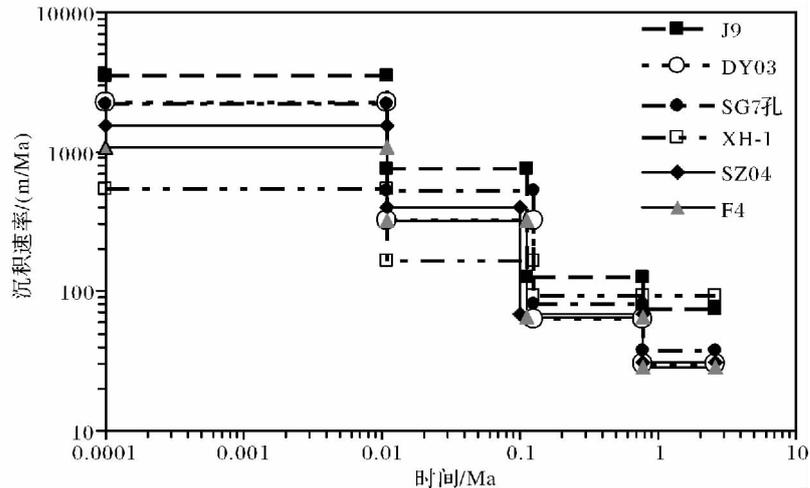


图6 长江三角洲以北 XH-1 孔、长江三角洲地区 J9 孔、SZ04 孔、SG7 孔、DY03 孔和 F4 孔时间与沉积速率对应关系图  
 Fig.6 The correlation between age and deposition rate of the XH-1 hole north to the Yangtze River Delta , and the J9 , SZ04 , SG7 , DY3 and F4 holes in the Yangtze River Delta

(3) 第四纪以来,长江三角洲地区一直存在持续的构造沉降,且沉降中心持续向东南方向移动,沉降运动的发生和发展存在三个重要的期次分别为 2.58 Ma, 0.78 Ma 和 0.125 Ma。

(4) 长江三角洲地区不同部位的钻孔年代界限的深度差异较大,即第四纪以来不同地质单元沉积物厚度的空间变化较大,且区域内特殊的硬黏土层在局部地区存在缺失,因此利用沉积物厚度和特征地层对全区地层进行对比时应特别谨慎。

致谢 感谢水环所赵华和王成敏老师,地震动力学国家重点实验室的李建平老师,以及南京大学地质系的温斌硕士等在野外和室内工作给予的帮助。

参考文献 (References)

- 1 李吉均,方小敏.青藏高原隆起与环境变化研究[J].科学通报,1998,43(15):1569-1574 [Li Jijun, Fang Xiaomin. Uplift of the Tibetan Plateau and environmental changes [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(15): 1569-1574]
- 2 范代读,李从先.长江贯通时限研究进展[J].海洋地质与第四纪地质,2007,27(2):121-131 [Fan Daidu, Li Congxian. Reviews on researches of timing of the Yangtze draining the Tibetan plateau to the East China Sea [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2007, 27(2): 121-131]
- 3 汪品先.亚洲形变与全球变冷——探索气候与构造关系[J].第四纪研究,1998,3(3):213-221 [Wang Pinxian. Deformation of Asia and global cooling: searching links between climate and tectonics [J]. Quaternary Sciences, 1998, 3: 213-221]
- 4 汪品先.我国海洋第四纪研究与环境演变中的海陆相互作用[J].第四纪研究,2001,21(3):218-222 [Wang Pinxian. Marine Quaternary

- ry research in china and sea-land interaction in environmental changes [J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(3): 218-222]
- 5 于军,苏小四,梁秀娟,等.苏锡常地区地面沉降地质结构三维可视化模型[J].自然灾害学报,2004,13(6):218-221 [Yu Jun, Su Xiaosi, Liang Xiujuan, et al. Three dimensional visual model for geo-structure of land subsidence in Suzhou-Wuxi-Changzhou area [J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13(6): 218-221]
- 6 吴标云,李从先.长江三角洲第四纪地质[M].北京:海洋出版社,1987:1-120 [Wu Biaoyun, Li Congxian. Quaternary Geology of Changjiang Delta [M]. Beijing: China Ocean Press, 1987: 1-120]
- 7 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[D].上海:华东师范大学,2003 [Wei Zixin. Quaternary environmental evolution in eastern Yangtze Delta: Coupling of neotectonic movement, Paleoclimate and Sea-level Fluctuation [D]. Shanghai: East China Normal University, 2003]
- 8 韦桃源.长江三角洲东部地区第四纪海侵地层、古气候古季风演化研究[D].上海:华东师范大学,2004 [Wei Taoyuan. The Quaternary transgression and paleoclimate-monsoon evolution of eastern Changjiang Delta, China [D]. Shanghai: East China Normal University, 2004]
- 9 于振江,郭盛乔,梁晓红,等.长江三角洲(江南)地区第四纪海侵层的划分及时代归属[J].地层学杂志,2005,29(增刊):618-625 [Yu Zhenjiang, Guo Shengqiao, Liang Xiaohong, et al. Division and age assignment of the Quaternary transgression layers in the Yangtze delta area (southern Yangtze) [J]. Journal of Stratigraphy, 2005, 29 (Supp.): 618-625]
- 10 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[J].地层学杂志,2005,29(增刊):612-617 [Wang Runhua, Guo Kunyi, Yu Zhenjiang, et al. Quaternary magneto-stratigraphy of the Yangtze delta area [J]. Journal of Stratigraphy, 2005, 29 (Supp.): 612-617]
- 11 陈静.长江河口区晚新生代沉积物中标志性物源分析及其河流贯通入海意义[D].上海:华东师范大学,2006 [Chen Jing. Diagnostic

- sediment indicators in the Late Cenozoic sediments, the Yangtze River coast, China—a special reference to river channelization into the sea [D]. Shanghai: East China Normal University, 2006]
- 12 陈中原 杨文达. 长江河口地区第四纪古地理古环境变迁[J]. 地理学报, 1991, 46(4): 436-448 [Chen Zhongyuan, Yang Wenda. Quaternary paleogeography and paleoenvironment of Changjiang River estuarine region[J]. Acta Geographica Sinica, 1991, 46(4): 436-448]
  - 13 黄湘通, 郑洪波, 杨守业, 等. 长江三角洲 DY03 孔磁性地层研究及其意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(6): 87-93 [Huang Xiangtong, Zheng Hongbo, Yang Shouye, et al. Magnetostratigraphy and its implications of core DY03 in the Yangtze River delta[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2008, 28(6): 87-93]
  - 14 于振江, 张于平, 王润华, 等. 长江三角洲(江南)地区新近纪地层划分及时代讨论[J]. 地层学杂志, 2004, 28(3): 257-264 [Yu Zhenjiang, Zhang Yuping, Wang Runhua, et al. The division and age of the Neogene strata in the Yangtze delta area[J]. Journal of Stratigraphy, 2004, 28(3): 257-264]
  - 15 Yang Shouye, Li Congxian, Yokoyama K. Elemental compositions and monazite age patterns of core sediments in the Changjiang delta: implications for sediment provenance and development history of the Changjiang river[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 245: 762-776
  - 16 贾军涛, 郑洪波, 黄湘通, 等. 长江三角洲晚新生代沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄及其对长江贯通的指示[J]. 科学通报, 2010, 55(4-5): 350-358 [Jia Juntao, Zheng Hongbo, Huang Xiangtong, et al. Detrital zircon U-Pb ages of Late Cenozoic sediments from the Yangtze delta: Implication for the evolution of the Yangtze River[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(4-5): 350-358]
  - 17 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]
  - 18 Chen Jing, Wang Zhanghua, Chen Zhongyuan, et al. Diagnostic heavy minerals in Plio-Pleistocene sediments of the Yangtze Coast, China with special reference to the Yangtze River connection into the sea[J]. Geomorphology, 2009, 113: 129-136
  - 19 刘东生, 等. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 1-251 [Liu Dongsheng, et al. Loess and the Environment[M]. Beijing: Science Press, 1985: 1-251]
  - 20 Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess[J]. Nature, 1990, 346: 737-739
  - 21 Heller F, Liu T S. Magnetism of Chinese loess deposits[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1984, 77: 125-141
  - 22 Zhu R X, Hoffman K. A, Potts R, et al. Earliest presence of humans in northeast Asia[J]. Nature, 2001, 413: 413-417
  - 23 朱日祥, 邓成龙, 潘永信. 泥河湾盆地磁性地层定年与早期人类演化[J]. 第四纪研究, 2007, 27(6): 922-944 [Zhu Rixiang, Deng Chenglong, Pan Yongxin. Magnetostratigraphy of the fluvio-lacustrine sequences in the Nihewan Basin and its implications for early human colonization of northeast Asia[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(6): 922-944]
  - 24 Sun J M, Yang Z Y, Pei J L, et al. Magnetostratigraphy of Paleogene sediments from northern Qaidam Basin, China: Implications for tectonic uplift and block rotation in northern Tibetan Plateau and Planetary Science Letters[J]. Earth, 2005, 237: 635-646
  - 25 Zijdeveld J D A. AC demagnetization of rocks—analysis of results, in Methods in Palaeomagnetism [M]. In: Collison D W, Creer K M, Runcorn S K, eds. New York: Elsevier Sci, 1967: 254-286
  - 26 Kirschvink J L. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1980, 62(3): 699-718
  - 27 Cande S C, Kent D V. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the Late Cretaceous and Cenozoic[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100: 6093-6095
  - 28 刘青松, 邓成龙. 磁化率及其环境意义[J]. 地球物理学报, 2009, 52(4): 1041-1048 [Liu Qingsong, Deng Chenglong. Magnetic susceptibility and its environmental significances[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(4): 1041-1048]
  - 29 缪卫东, 李世杰, 王润华. 长江三角洲北翼 J9 孔揭示地层和古地磁特征[J]. 中国地质, 2008, 35(3): 489-495 [Miao Weidong, Li Shijie, Wang Runhua. Stratigraphic and paleomagnetic characteristics revealed by the J9 hole in the north flank of the Yangtze River delta[J]. Geology in China, 2008, 35(3): 489-495]
  - 30 陶士康. 长江三角洲地区晚新生代沉积物磁性特征及其沉积环境、物源与古气候意义[D]. 上海: 华东师范大学, 2007 [Tao Shikang. Magnetic properties of late cenozoic sediments in the Yangtze River Delta and implications for their sedimentary environment, provenance and paleoclimate[D]. Shanghai: East China Normal University, 2007]
  - 31 覃军干, 吴国璋, 郑洪波, 等. 从孢粉、藻类化石组合看长江三角洲第一硬质黏土层的成因及其古环境意义[J]. 第四纪研究, 2004, 24(5): 546-554 [Qin Jungan, Wu Guoxuan, Zheng Hongbo, et al. Palynomorph assemblages, origin and paleoenvironmental of the upper most hard clay in the deltaic area of the Changjiang River [J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(5): 546-554]
  - 32 王张华, 丘金波, 冉莉华, 等. 长江三角洲南部地区晚更新世年代地层和海水进退[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(4): 1-8 [Wang Zhanghua, Qiu Jinbo, Ran Lihua, et al. Chronostratigraphy and transgression/regression during late Pleistocene in the southern Changjiang( Yangtze) River Delta Plain[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2004, 24(4): 1-8]
  - 33 Kenneth G. Miller, Michelle A. Komins, James V, et al. The Phanerozoic Record of Global Sea-Level Change[J]. Science, 2005, 310: 1293-1298
  - 34 舒强. 苏北盆地兴化钻孔近 3Ma 环境变化记录研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2004 [Shu Qiang. Study on the changes of palaeoenvironment and palaeoclimate during the past 3Ma recorded in Xinghua core at northern Jiangsu Basin[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2004]

- sity, 2004]
- 35 郭正堂, 刘东生, Fedoroff N 等. 约 0.85Ma 前后黄土高原区季风强度的变化 [J]. 科学通报, 1993, 38(2): 141-146 [Guo Zheng-tang, Liu Dongsheng, Fedoroff N, *et al.* Shift of monsoon intensity on the Loess Plateau at ca. 0.85Ma B. P. [J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(2): 141-146]
- 36 陈中原. 长江三角洲之沉降 [J]. 火山地质与矿产, 2001, 22(2): 95-101 [Cheng Zhongyuan. Yangtze delta subsidence [J]. Volcanology and Mineral Resources, 2001, 22(2): 95-101]
- 37 王张华, 赵宝成, 陈静, 等. 长江三角洲地区晚第四纪年代地层框架及两次海侵问题的初步探讨 [J]. 古地理学报, 2008, 10(1): 99-110 [Wang Zhanghua, Zhao Baocheng, Chen Jing, *et al.* Chronostratigraphy and two transgressions during the Late Quaternary in Changjiang delta area [J]. Journal of Palaeogeography, 2008, 10(1): 99-110]

## Magnetostratigraphy of Borehole SZ04 in the Yangtze River Delta and Its Implications

ZHANG Ping<sup>1</sup> Li Xiang-qian<sup>1</sup> Pan Ming-bao<sup>1</sup> Zong Kai-hong<sup>1</sup> Miao Qiao-yin<sup>1</sup>  
Li Yong-xiang<sup>2</sup> Ou Jian<sup>1</sup> Feng Wen-li<sup>1</sup> Ji Wen-ting<sup>1</sup> Liu Wei-ming<sup>3</sup>

(1. Jiangsu Institute of Geological Survey, Key laboratory for Earth fissures Geological disaster, Ministry of Land and Resources, Nanjing 210018;

2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093;

3. CAS Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041)

**Abstract:** This study aims to establish a high resolution paleomagnetic age scale of Borehole SZ04 (269.2 m in length) which was drilled from the western part of plain region on the south flank of the Yangtze River Delta. Combining with the absolute age and compared with the standard polarity column, the results show that the 269.2 m core consists of three polarity events including Brunhes, Matuyama and Gauss and three subpolarity events including Black, Jaramillo and Olduvai. The B/M and the M/G boundary are found at the depth of 100 m and 155 m, respectively; Clastic deposit at the bottom of Borehole SZ04 was formed at about 5.23 Ma. Analysis of the dating results indicates that obvious changes of the sediments magnetic susceptibility and lithostratigraphy characteristic are existed near each particular boundaries, which can be correlated with in a large region. Therefore, it is concluded that crust subsidence in this region was continuously occurred since Quaternary, accompanied with the subsidence center moving to the south and the crust subsidence activities were concentrated and intensified in three important time phase at about 2.58 Ma, 0.78 Ma and 0.125 Ma.

**Key words:** the Yangtze River Delta; Borehole SZ04; Magnetostratigraphy; polarity event