

doi: 10.12029/gc20160613

缪卫东, 李世杰, 冯金顺, 等. 长江三角洲 NB5 孔第四纪地层划分及环境变化信息[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 2022–2035.

Miao Weidong, Li Shijie, Fen Jinshun, et al. Stratigraphic division of NB5 core in the Yangtze delta area and its environmental change information[J]. *Geology in China*, 2016, 43(6): 2022–2035(in Chinese with English abstract).

长江三角洲 NB5 孔第四纪地层划分及环境变化信息

缪卫东¹ 李世杰² 冯金顺¹ 高 立¹ 鄂 建¹

(1 江苏省地质调查研究院 江苏 南京 210049, 2. 中科院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002)

摘要:长江三角洲北翼 NB5 孔做了古地磁测试、¹⁴C 测试及 ESR 测试结果, 对古地磁变化特征进行了总结分析, 结合区内其他钻孔的对比, 对钻孔第四纪地层划分及所反映的古气候环境进行了探讨。结果表明: 46 m 处为全新世底界, 163 m 为中更新世顶部, 240 m 左右为早更新世顶部, 354 m 为早更新世底部。其中, 海相层有 2 个, 位置在 2~47 m, 125~163 m。分别对应于 I (Qh) 镇江海侵, III (Q_p³⁻¹) 昆山海侵。据晚更新世以后沉积物粒度变粗及磁化率所反映的巨大变化特征, 提出中更新世晚期、晚更新世初期为长江主泓流经本区的时间, 并认为此或与塑造中国现代地貌的共和运动造成的青藏高原再次强烈隆升有关。

关键词:长江三角洲; NB5 孔; 古地磁; 第四纪地层划分; 环境变化

中图分类号: P534.63 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)06-2022-14

Stratigraphic division of NB5 core in the Yangtze delta area and its environmental change information

MIAO Wei-dong¹, LI Shi-jie², FEN Jin-shun¹, GAO Li¹, E Jian¹

(1. *Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210049, Jiangsu, China*; 2. *Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China*)

Abstract: Located in the west beach of Pacific Ocean and the mouth area of Yangtze River, the Yangtze delta area is doubly affected by the sea and the regional big river. Therefore, the sedimentary environment is very complex. The NB5 hole is in the north of Yangtze delta area. The NB5 hole at Xiting Town of Nantong City was drilled 362 m deep with 354m thickness of Quaternary strata. According to testing results of paleomagnetism, ¹⁴C and ESR of NB5 core, analyzing the lithological character, and a comparison with other cores in this area or nearby areas, the strata were divided and the environment evolution since the Quaternary was investigated. The result indicates that the bottom of Holocene is at about 46 m, the top of middle Pleistocene is at about 163 m, the top of lower Pleistocene is at about 240 m, and the bottom of lower Pleistocene is at about 354 m. There are five marine face layers in the core which are located 2–47m and 125–163 m. they are the 1st transgression layer (Zhenjiang transgression) and the 3rd transgression layer (Kunshan transgression), because there exist remarkable different lithological characteristics and magnetic

收稿日期: 2015-08-18; 改回日期: 2015-12-03

基金项目: 中国地质调查局项目(GZH201200506)资助。

作者简介: 缪卫东, 男, 1967年生, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为环境地质及第四纪地质; E-mail: mwd118@163.com。

susceptibilities above 163 m and below 163 m in the core. The authors hold that the Gonghe movement that occurred in late middle Pleistocene might have affected the environment of this area greatly so that the main river flowed through this area.

Key words: Yangtze delta area; The NB5 hole; paleomagnetism; partition of strata; environmental information

About the first author: MIAO Wei-dong, male, born in 1967, doctor and senior researcher, mainly engages in the study of environmental geology and Quaternary geology; E-mail: mwd118@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. GZH201200506).

全球变化一直是第四纪地质工作者探讨的热点问题,相关研究众多,其中时代确定和地层划分是每个工作者首先要面对的基础问题。长江三角洲地区第四纪环境演变及与全球变化的响应也吸引了众多研究者的眼球,做了很多工作^[1-28]。其中,长江何时贯通、长江古河谷发育状况、区内地形倒转等科学问题都是热烈讨论的问题,而探讨这些问题,地层划分和时代的确定是首先需要解决的基本问题。

狭义长江三角洲通常所指为从顶点仪征—扬州—泰州—海安—一线以南、镇江—江阴—张家港—梅李—太仓—一线以北^[1],浅表为全新世沉积物。长江三角洲北西为里下河地区(主要包括高邮、兴化、宝应地区),东南为太湖地区,具有各自不同的地层特征。

NB5孔所处的长江三角洲地区即位于太平洋西岸,又处于长江河口。受到海洋和区域性大河流的双重作用。沉积环境复杂多变。实际工作中,由于第四纪地层多为松散沉积的砂和黏土,其在岩性特征上很难给出确切而分明的地层鉴别标志,造成工作中对第四纪地层的划分甚至新近纪与第四纪地层的划段都有很大的困难和不确定性。长江三角洲地区第四纪地层的底界及第四纪地层内部的划分一直是科研工作者面临的现实问题。

本文通过对长江三角洲北翼典型钻孔NB5的岩性特征研究,结合¹⁴C、ESR及古地磁等相关年龄测试数据的综合运用,对NB5孔代表的第四纪地层进行了划分,从而对长江三角洲地区尤其北部第四纪地层的划分提供参考。还探讨了其中的环境变化信息,为进一步认识本区的环境演变和沉积规律,特别是海陆交互作用提供重要依据。

NB5孔位于长江三角洲北翼的南通市北部西亭镇(图1),钻探深度为362 m,其中第四纪地层深354 m。下伏栖霞组灰岩(P₂q),因而提供了有底的

松散沉积地层,是很好的第四纪研究钻孔,有利于第四纪地层的划段。

1 区域地质背景及NB5孔岩心特征

1.1 区域地质背景

NB5孔位于江苏省中东部,处于长江三角洲北翼,地势平坦。构造属扬子陆块下扬子地块东段。地层属于扬子地层区,下扬子地层分区。区内自白垩纪沉积了一套碎屑物质后,长期隆起剥蚀,直到中新世末,新构造运动使区内普遍沉降,形成新近纪—第四纪的松散沉积物,直接覆盖于晚古生代和中生代地层之上。地表基本为第四纪松散沉积物覆盖。第四纪地层总体发育较全,岩性主要为黏土、粉质黏土、砂、砂砾等。其中,更新世地层岩性变化较大,既有很细的黏土、粉质黏土,又有很粗的粗砂、砂砾。全新世地层岩性相对较细,多为粉砂、粉细砂及粉质黏土、淤泥质粉质黏土。第四纪地层厚度一般在300 m左右,浅处第四纪地层厚200 m左右,深处超过350 m^①。

1.2 NB5孔地层岩性特征

NB5孔位于通州市西亭镇西南约4 km,孔深362 m。钻孔354 m以下为含燧石条带的见瓣类化石的栖霞组灰岩(P₂q),以上均为第四纪地层。第四纪沉积物岩性为砂、砂砾、粉质黏土、黏土、粉砂、粉细砂等(图1)。自上而下分为:

(1)0.00~2.05 m 灰黄色粉砂质黏土,稍密,饱水,含云母碎片,含植物根茎。具水平、斜交微层理。

(2)2.05~4.35 m 灰色、灰绿色淤泥质粉砂质黏土。较疏松,饱水。本层杂有大量的淤泥质成份。局段可见有微薄层淤泥质粉质黏土,软塑。含有螺贝壳碎片。

(3)4.35~22.40 m 灰绿色粉砂、粉细砂。砂质较纯。夹粉砂质黏土、粉质黏土薄层(一般50 cm),见水平层理。

(4)22.40~24.40 m 灰绿色粉质黏土,局部淤泥质黏土,颜色发黑,见水平层理。含有白色螺贝壳,尤其下部1 m左右

①江苏省地质调查研究院,江苏1:50000南通市、南通县、小海镇、海门市幅区域地质调查报告[R]. 2009

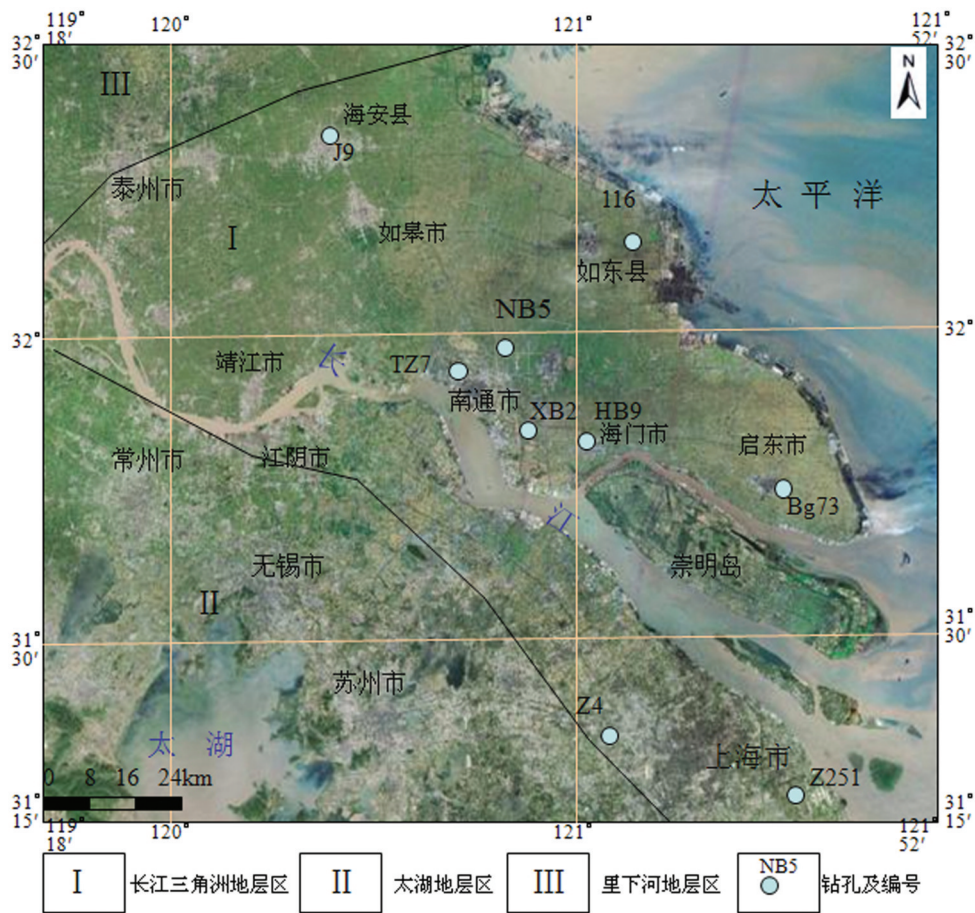


图1 长江三角洲及周边地层分区及NB5孔位置图

Fig.1 Location of NB5 core and the stratigraphic subregion of Yangtze River delta area

螺壳较多。

(5)24.40~34.28 m 灰绿色粉细砂、细砂。砂质较疏松,见水平层理。中部29~31 m 见较多螺贝壳,白色,直径多在3~4 mm。

(6)34.28~41.57 m 灰色粉砂、粉质黏土、黏土。中夹2 m 左右灰绿色、灰黑色粉质黏土。微层理发育,见炭化木屑。

(7)41.57~47.62 m 灰色、灰黑色黏土、粉质黏土(淤泥质)。见植物碎屑。湿时很软,干时很硬,见很多小孔(针眼大小,密密麻麻)。水平层理发育。

(8)47.62~58.92 m 为灰色、灰绿色(略带蓝色)黏土、粉质黏土,其中,55.62 m 以下颜色发黑,水平层理发育。

(9)58.92~64.62 m 为灰色、灰绿色粉砂、粉细砂,含白云母、砂质较纯。上部偏细,下部偏粗。

(10)64.62~75.46 m 灰色(泛白)含砾粗砂,砾径一般2~3 mm,个别1~2 cm。砾为石英质,次棱角状,磨圆度中等。74.16 m 处见10 cm 厚炭化碎屑。见小黏土夹层10 cm。

(11)75.46~86.31 m 灰色、灰绿色粉砂、粉质黏土互层。

粉砂占多,粉质黏土以夹层形式存在。83.11m 处见水平层理,80.5~80.6 m 处见7 cm 厚含泥砂砾,砾0.2~1 cm 不等,呈黄色,下部为黑色黏土,见白云母。

(12)86.31~93.20 m 灰色、灰绿色细砂夹粉砂。其中90.25~91.25 为粉砂。91.25~93.20 为细砂。比上部细砂稍粗,粉砂中见水平层理。

(13)93.20~98.58 m 灰色、灰绿色含砾砂。砾径一般2~4 mm,个别10 mm 左右。砾次棱角状,磨圆差一中等。93.20~94.50 m 为灰绿色、潮湿,砾含量偏少。下为灰色,泛白,干燥,含砾多。

(14)98.58~102.07 m 灰色粉质黏土、黏土。局部粉砂,质密,较硬。上部40 cm 粉砂占多,局部含砾。下部1 m 左右,粉砂居多。

(15)102.07~108.40 m 灰绿色粉砂、粉细砂。湿,疏松,含白云母。中夹薄层粉砂、粉质黏土,灰色,略干,见微层理。近底部粉砂占多,细砂略少,互层,粉砂100 cm 左右厚,细砂40 cm 厚。

(16)108.40~110.73 m 灰色含砾砂。砾径较粗,大部5~10 mm,个别>10 mm,次棱角状,磨圆中等。底部40 cm为砾石层。砾石大小为3~5 cm。

(17)110.73~114.39 m 灰色(微白)含砾砂黏土。砾石大小差异较大,0.3~30 mm,次棱角状,磨圆中等。夹薄层灰黄色黏土,较纯;近底部10 cm见炭化碎屑。

(18)114.39~117.90 m 略泛蓝灰色黏土。含有钙质结核,致密,偶夹泛黄黏土及钙质结核。

(19)117.90~125.40 m 灰色、灰黑色、蓝灰色粉质黏土。上部为灰色粉砂夹粉质黏土。中部夹灰黑色黏土。质较纯,切面很光滑。下部夹蓝灰色黏土及粉质黏土。偶见螺壳,见直径约4 cm白色蚌壳。

(20)125.40~135.14 m 灰黄色黏土。偶夹粉质黏土,中夹灰黑色蓝灰色黏土,见很多螺壳碎片。

(21)135.14~140.52 m 灰色粉砂夹粉砂质黏土。见水平层理,粉砂中偶见钙质结核,直径大者至3~4 cm,呈黄色。

(22)140.52~151.62 m 灰色灰绿色粉细砂、细砂。灰色粉细砂,较干,含白云母。中夹薄层灰绿色细砂,较湿。偶夹黏土夹层。

(23)151.62~152.92 m 灰色粉砂质黏土。粉砂与黏土互层,粉砂较多,见水平层理,白云母。

(24)152.92~158.75 m 灰色、灰绿色粉细砂、细砂。灰绿色粉细砂较湿。

(25)158.75~160.55 m 灰色、灰绿色含砾砂。砾径一般2~4 mm,个别0.8~1 cm。

(26)160.55~163.10 m 灰色粉细砂。局部含黏土。

(27)163.10~210.00 m 蓝灰色、灰黄色、灰黑色黏土。上部为蓝灰色、灰黑色黏土。硬塑,粘度极强,质地均一。中夹灰黄色硬黏土和蓝灰色黏土,略含粉砂,含钙质结核。下部为黄色、棕黄色黏土。含有钙质结核。

(28)210.00~221.96 m 为灰色粉砂,偶夹粉质黏土。上部偏细,下部渐粗。见水平层理。整段基本为粉砂、粉质黏土互层,粉砂居多。

(29)221.96~228.84 m 灰色粉砂、粉细砂。砂质较纯,见白云母。

(30)228.84~231.30 m 灰色、灰黄色含砾砂。砾径2~3 mm,砾呈黄色。231~231.30 m 灰色砾石层。砾径3~4 cm,硅质,次棱角状,磨圆中等。

(31)231.30~235.81 m 灰色、灰黄色黏土、粉质黏土。上部为蓝灰色黏土,中部为灰黄色黏土,下部为灰色黏土。致密,硬塑。

(32)235.81~240.66 m 上部为灰色粉质黏土、粉砂互层。粉砂居多。下部为灰色粉细砂,略细,见白云母碎片。

(33)240.66~241.46 m 灰色含砾砂。细砂为主,含砾。砾径2~4 mm,个别5~6 mm。

(34)241.46~270.03 m 灰黄色、棕黄色黏土。上部稍发

灰,2 m以下纯棕黄色,含较多钙结核(泛白,呈团)。

(35)270.03~307.4 m 灰黄色粉质黏土、灰黄色黏土及青灰色粉质黏土。其中,夹蓝灰色黏土,中含白色团块,为高岭土,略显破碎。

(36)307.4~316.61 m 灰色粉砂、粉细砂。见薄层30 cm厚灰色粉细砂盘(坚硬)。中夹灰绿色细砂及灰色粉细砂、粉砂。见白云母。偶夹黏土。

(37)316.61~317.71 m 灰黑色黏土与灰黄色粉砂互层。黏土居多。底部见植物碎屑。

(38)317.71~320.65 m 灰色含砾砂。砾径一般2~4 mm,少数0.8~1 cm,个别达2~3 cm。319.79~320.65 m 灰色砂砾。砾较多,砾径2~3 cm。

(39)320.65~324.53 m 灰色粉砂、粉质黏土互层。

(40)324.53~344.37 m 灰色砂砾层,砾石层。砾径2~3 cm。个别3~5 cm。磨圆中等。夹灰色含砾细砂。偶夹有黏土。

(41)344.37~345.62 m 灰黑色黏土。

(42)345.62~348 m 灰色灰黄色含砾砂。上部为灰色砾砂,砾径差较大,砂为细砂,砾0.8~1 cm。下部为淡黄色,砾径较均匀2~4 mm,个别较大。

(43)348~350.60 m 黑灰色黏土。硬塑,质地较纯。

(44)350.60~352.95 m 灰色灰黑色砂砾层,砾石层。砾径变化大,0.8~4cm,间见褐铁矿化层(352.55 m,约10cm厚),重,胶结好。夹灰白色含砾砂薄层,较松散,砾石多为钙质结核。

(45)352.95~354.25 m 灰白色黏土,明显高岭土化。

(46)354.25~362.00 m 灰岩。见鲕化石,珊瑚化石,燧石条带。

2 测试方法

2.1 AMS¹⁴C测试方法

针对沉积物样品,首先挑选其中的植物体或植物体炭化物或贝壳,如果都没有,沉积物样品处理过程如下:取样品5~10 g,挑出其中肉眼可见的石块(如果有),加入足量2N的HCl,加热至沸腾出去里面的碳酸盐,随后用蒸馏水反复洗涤至中性并烘干。选取100 mg左右的土壤样品加入置有银丝并在650°C下烧过石英管中,然后加入过量的线状氧化铜,接入真空系统,在 1×10^{-3} 真空条件下,抽取4 h以上,用液化气+氧气焰密封焊断。焊断的石英管置于马弗炉中,在860°C高温下加热2 h,将样品中的有机碳全部转化成CO₂气体。冷却后将样品管取出,置于沈承德研究员研发的cracker管中并连接到真空制样系统中,抽好真空后将石英样品管拧断,释放出CO₂气体,通过液氮+酒精的冷阱(温度控制在-70~-100°C)除去里面的水蒸气,通过液氮冷阱

将CO₂气体分离,提纯,在测得CO₂气体含量后,用液氮冷阱将CO₂气体收集在抽好真空,置有Zn+TiH₂的玻璃管中并用液化气+氧气焰密封,将焊断的¹⁴C样品管置于马弗炉中,在500℃加热3h,600℃加热4h的条件合成石墨。

如果原始样品中含有植物体或植物体炭化物或贝壳,处理方法如下:首先将样品初步去除污泥后,然后经过超声振荡后将样品洗干净。植物体或植物炭化物经过酸(2N HCl)+碱(2N NaOH)+酸(2N HCl)处理后,实验方法如上。贝壳样品清洗烘干后,取出10mg左右的样品,置于加有磷酸的反应管中,接入真空系统抽好真空后,让磷酸与碳酸盐反应,完全反应后,接入真空系统,实验方法如第一段所述。实验均在中国科学院广州地球化学研究所AMS-¹⁴C实验室完成,所制石墨靶送北京大学加速器质谱(AMS)中心进行¹⁴C测定。

另外,一些样品送至中科院地球环境研究所做AMS-¹⁴C测定。

2.2 ESR测试方法

电子自旋共振(ESR)测年是近些年来迅速发展起来的以测定地学和考古样品为主的一项新的测年技术。是在热释光(TL)测年技术基础上逐步发展起来的。ESR测年法首先是由原西德学者Zeller^[29]等人于1967年提出,20世纪70年代后期才得到系统的研究并用于地学和考古的测年。1975年后,日本科学家池谷元伺^[30]将它应用于洞穴碳酸盐沉积、珊瑚、贝壳、骨头及火山灰、断层泥等物质的测年,才逐渐引起了人们广泛的关注。20世纪80年代后,这项测年技术取得了迅速的发展。随后,这项技术被引入到中国,并应用于第四纪年代研究。

本次测试样是由青岛海洋地质测试中心测试,具体测试条件为:(1)样品用为E'心测年;(2)测试仪器为德国Bruker公司的EMX型ESR谱仪;(3)测试条件

为,室温、X波段、中心磁场348mT、扫宽5mT、调制幅度0.1mT、转换时间5.12ms、时间常数40.96ms、微波功率0.1mW;(4)年龄误差估算为10%~15%。

2.3 古地磁测试方法

本次样品采集采用专用古地磁样盒(2cm×2cm×2cm),用无磁刀具削样装盒,盒上画上記号严格定向。采集间隔为50~100cm。共采集了455个样品。每个样品重量约10g左右。样品由国土资源部南京地质矿产研究所岩矿测试室在无磁空间进行测试。

样品首先经过称重,得出每个样品的质量。选用了美国Schonstedt仪器公司生产的“DSM-2”型数字旋转磁力仪、“GSD-5”交变退磁仪,以及自制的“HKB-1”高精度磁化率仪等设备,并按序作系统的磁性测量。

具体工作步骤:(1)先对每块样品进行称重;(2)测试每块样品的体积磁化率;(3)计算每块样品的质量磁化率;(4)按50~100mT步长进行磁清洗,并同步测试剩磁的强度和方向;(5)最后作图、表解释。

3 结果与讨论

¹⁴C样品测试结果见表1,表2。ESR测试结果见表3。

经过对分析数据的整理,得到整个钻孔岩心的古地磁数据和曲线图。NB5孔磁性地层划分及与标准极性柱对比见图2。

3.1 绝对年龄测试结果得出结论

据测试结果表1,47.5~47.6m和74.16~74.26m两处AMS¹⁴C测试年龄分别为(10457±50)a B.P和(29901±142)a B.P.。可以初步判断地层全新世底界在47m左右,74m处为晚更新世地层。

NB5孔ESR测试结果表明,310m左右为早更新世地层(1390±208)ka B.P.。336m处亦为早更新世地层(1780±267)ka B.P.。

表1 NB5孔¹⁴C样品测试结果
Table Test result of ¹⁴C in NR5 hole

样号	样品深度/m	样品岩性	¹⁴ C 结果/ a B.P.	校正年龄/ a B.P.
Xt-02	40.7~40.8	炭屑	8892±49	9885
Xt-03	42.17~42.27	灰黑色黏土	10457±50	12147
Xt-04	47.5~47.6	灰色黏土(炭屑)	11541±48	
Xt-09	74.16~74.26	炭屑	29901±142	
Xt-08	99.5~99.6	灰黑色粉质黏土	29958±155	

表2 其它钻孔的AMS¹⁴C测试结果
Table AMS¹⁴C test results of other drill hole

样号	样品深度/m	样品岩性	¹⁴ C 结果/a B.P.	备注
Xh14c003	67.4	深灰色淤泥黏土	12014±49	小海孔(XB2)
SC14C005	55.2	灰黑色淤泥质黏土	12994±53	海门孔(HB9)

表3 NB5孔ESR测试结果
Table 3 ESR test result of NB5 hole

样号	样品深度/m	样品岩性	ESR 结果/ ka B.P
Xtd02	310.7~310.8	灰绿色细砂	1390±208
Xtd03	336.64~336.74	灰绿色含砾细砂	1780±267

3.2 古地磁得出的地层划段信息

磁性地层划分主要根据钻孔古地磁磁倾角变化情况并参考绝对年龄测试资料及区内前人所做其他钻孔地层古地磁资料,分析古地磁极性变化特征,并将古地磁分析研究结果与标准极性柱^[31]对比,并参考 E.A. 曼可尼(Mankinen)和 G.B. 达尔普尔(Dalryple)古地磁极性修正年表,来确定各个极性事件。本次以区内第四纪研究孔NB5孔的古地磁分析为代表,划分了古地磁的极性带和极性亚带,进而为第四纪地层的划段提供年代学依据。

磁化率曲线显示,本孔磁化率可分成以下几个段,具有以下特点:(1)0~125 m 磁化率平均值约 $630.8 \times 10^{-6} \text{SI}$; (2)125~140 m 磁化率平均值约 $142.24 \times 10^{-6} \text{SI}$; (3)140~165 m 磁化率平均值约 $715.51 \times 10^{-6} \text{SI}$; (4)165~210 m 磁化率平均值约 $145.23 \times 10^{-6} \text{SI}$; (5)210~241 m 磁化率平均值约 $612.08 \times 10^{-6} \text{SI}$; (6)241~310 m 磁化率平均值约 $177.48 \times 10^{-6} \text{SI}$; (7)310~352 m 磁化率平均值约 $773.60 \times 10^{-6} \text{SI}$; (8)352~354 m 磁化率平均值约 $69.88 \times 10^{-6} \text{SI}$ 。从上可看出,磁化率呈现4个高值段,3个大的低值段。从岩心来看,高值段多对应砂性土段,低值段则多对应黏性土段。而特高值点一般为灰色、灰绿色粉砂、粉细砂、砂砾,以灰色为主,个别灰黑色黏土磁化率值也较高,棕黄色的黏土一般磁化率值较小。

通过将古地磁测试结果与标准极性柱对比,磁倾角具以下特点:(1)0~240 m 地层以正极性为主,应为

布容正极性世。其间,45 m 左右处有一明显的负极性事件,应为 Gothenburg 极性事件(10~12.4 ka B.P.),130~140 m 处有一明显的负极性层段,应为 Blake 极性事件(108~114 ka B.P.)。(2)241~352 m 以负极性为主,应为松山负极性世。其间,270~280 m 层段出现明显的正极性,应为 Jaramillo 正极性事件(0.90~0.97 Ma B.P.),310~340 m 层段又出现明显的正极性,应为 Olduvai 正极性事件(1.67~1.87 Ma B.P.)。

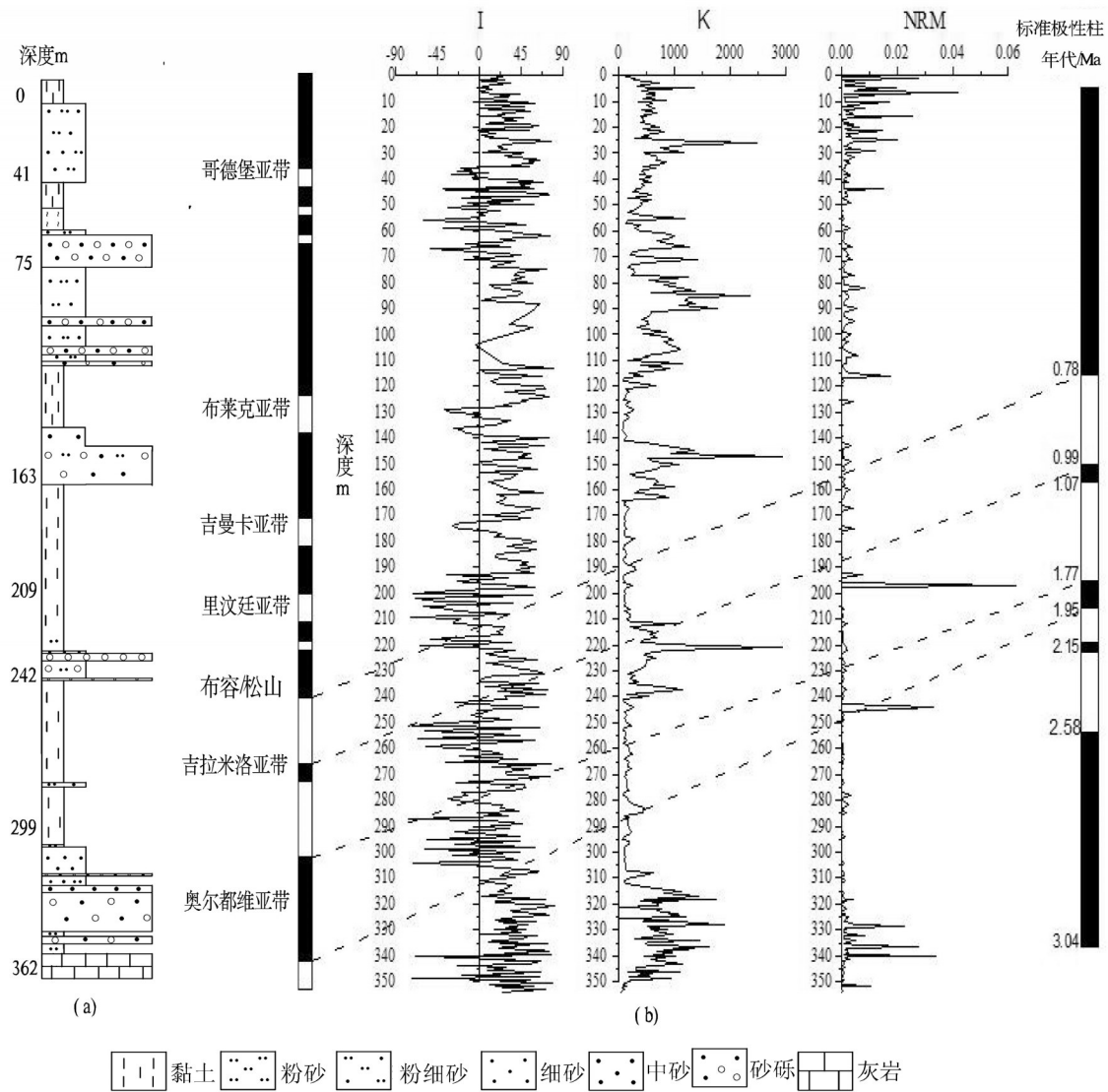
1) 布容正向极性带

据上可知,NB5孔布容正向极性带的底界在240 m 左右。以正向磁性为主,磁倾角一般在45°左右。见几个反向倾角。从240 m 界线附近岩性看:上部为灰色、灰白色含砾砂,砂;下部为灰黄色、灰绿色黏土,粉质黏土;上下岩性差异很大。显示明显的沉积间断。据其他钻孔的相应层位的孢粉分析结果^①,反映温暖湿润的气候环境,产海相有孔虫,代表一次海侵事件。之下的灰黄色、灰绿色粉质黏土、黏土则反映较冷期的沉积环境。此界线应做为启东组与下伏海门组分界的参考依据。年龄距今78万年。其他本区钻孔的B/M界线也大多在此深度上下。

(1) 哥德堡亚带(Gothenburg)

哥德堡亚带(Gothenburg)发生年代一般认为是10~12.4 ka B.P.。NB5孔出现极性倒转位置在35~45 m 之间,其岩性为灰色粉砂、粉质黏土、黏土,反向倾角25°左右,42 m 处测得AMS¹⁴C 年龄为(10457±50) a B.P.。所以此处应为哥德堡亚带所在处。而在47 m 处测得AMS¹⁴C 为(11541±48) a B.P.,应为全新世的底部。这与目前公认的全新世底10~11 ka B.P.是一致的。也与区域外同属长江三角洲北翼的如东北坎116孔¹⁴C 年龄测试结果(36.1 m 处为(9680±520) a),哥德堡亚带位置(37~41 m)是基本对应的。据海相有孔虫鉴定,本孔海相有孔虫在40 m 以浅较多,指示海相地层的发育。所以哥德堡

①江苏省地质调查研究院. 南通市幅1:250000区域地质调查报告[R]. 2003.



I—磁倾角曲线;K—磁化率曲线;NRM—天然剩磁;a—钻孔岩芯柱状图,
b—极性柱、磁倾角曲线、磁化率曲线、天然剩磁曲线、标准极性柱图

图2 NB5孔岩性剖面(a)与古地磁曲线图(b)
Fig.2 Lithological characters (a) and paleomagnetism curve (b) of NB5 core

亚带对于本区地层年代学划分具有区域性意义。

(2) 布莱克亚带(Blake)

布莱克亚带(Blake)发生年代一般认为是 108~114 ka B.P.。NB5孔出现极性倒转位置在 130~140 m 处,反向倾角约 25°~30°,所在岩性为灰黄色黏土、灰色粉砂夹粉砂质黏土。所处地层为昆山组,指示已经接近晚更新世地层底部。岩相微体孢粉分析资料*显示此带早中期为暖湿气候,晚期转为较冷气候。

(3) 吉曼卡亚带(C)

吉曼卡亚带的年代为 198~215 ka B.P.。本区 NB5孔在 170~180 m 有负极性显示,方向倾角为 25°左右,岩性灰黄色、灰绿色黏土,应与吉曼卡亚带相对应。据同属长江三角洲北翼的如东北坎 116孔,出现深度 158~162 m,反向倾角 35°~37°。与琵琶湖 C 事件相当。孢粉及微体古生物反映形成于寒冷期,为陆相沉积。属于中更新世地层,为启东组上段。此带在钻孔中不是很明显,只在一些钻孔中可见。

(4) 里汶廷亚带(D)

里汶廷亚带的年代为293~311 ka B.P.。NB5孔在200~220 m有相对应的反向极性显示。反向倾角达50°~70°。所在层位岩性为灰色的粉砂、粉细砂。为启东组上下段的分界处。据116孔,出现深度为178~180 m,反向倾角38.5°~50.8°。相当于琵琶湖D事件。

2) 松山反向极性带

松山反向极性带一般认为年代为780~2600 ka B.P.,其上界是中更新世与早更新世的界线,下界为早更新世与新近纪的界线。NB5孔上界出现在240 m左右,下界直接为栖霞灰岩,因而未见底。而在116孔,其出现深度范围为242~309 m,以反向极性为主。松山反向极性带中可划分以下两个亚带。

(1) 吉拉米洛极性亚带(Jaramillo)

吉拉米洛极性正极性亚带的年代为0.90~0.97 Ma B.P.。NB5孔出现深度在270~280 m,反向倾角为50°~70°,所在地层为海门组地层,岩性为灰黄色的黏土、粉质黏土。此带在如东北坎116孔出现在266~171 m,正向磁化倾角为18.9°~74.2°,岩性为棕黄色黏土中。此极性亚带在这两个孔对应较好。

(2) 奥尔都维极性亚带(Olduvai)

奥尔都维正极性亚带的年代为1.67~1.87 Ma B.P.。NB5孔出现的深度在310~340 m,正向磁性倾角为45°左右。所处地层为海门组中下段。位于海门组中下部的灰色、灰白色砂砾层中。而据116孔,此带出现深度在291~299 m,正向磁化倾角为29.1°~75.6°,位于海门组中段下部的棕黄色粉质黏土中。

3.3 地层综合划分

第四纪下限在 258×10^4 a左右,相当于古地磁表中松山反向极性世的底部。

国内很多学者对长江三角洲第四纪下限做过研究^[1,27]。据海门四甲D7孔研究,277.80~286.50 m砂层中发现寒冷气候孢粉带、云杉、松、菊科组合,其下部310~330 m砂层中发现以栎、榆、松、山核桃孢粉组合,反映温带孢粉组合。据此认为第四纪底界孢粉特征是以木本花粉为主,约占60%,主要有针叶林的云杉、松占优势,并出现少量冷杉及阔叶树花粉如桦、胡桃、栎,草本花粉含量较低为29%,反映了针叶林植被类型,显示冷湿气候,表明进入第四纪气候显著转冷,与下覆层新近纪温暖气候有

重大变化。

从岩性上看第四纪初期与新近纪晚期地层沉积岩性存在较明显差异:新近纪地层上部以灰绿色、青灰色、猪肝色、棕红色、紫灰色黏土、粉质黏土间隔薄层细砂和粉砂为主,厚度10~50 m不等,下部以灰绿色、紫灰色、深灰色细砂为主,厚度约70 m。此特征即可与第四纪初期地层相区别^[1]。

1969年在巴黎召开的国际第四纪研究联合会全新世研究分委员会上提出。全新世界限的年龄规定为距今1万年。

国内外都倾向于 1×10^4 a左右。认为自末次冰期后,气候开始转暖,海平面又开始上升,人类进入现代人阶段等都是全新世的标志。长江三角洲地区以往研究将全新世下界面置于距今 1×10^4 a~ 1.2×10^4 a。全新世岩性一般由粉质黏土-粉砂-细砂-淤泥质粉质黏土、粉砂组成细-粗-细的海侵海退完整的沉积旋回。其下覆层为陆相的灰黄色、暗绿色的黏土或粉质黏土层,呈硬塑状,简称第一黄绿色硬土层。

野外观察及相关资料显示长江三角洲北翼全新统岩性基本为灰色、灰黑色粉质黏土、粉砂质黏土、粉砂、细砂。而长江三角洲南翼则以灰色、灰黑色粉质黏土为主,间夹粉砂质黏土。显然南翼全新世地层岩石粒度要略细于长江三角洲北翼区。

长江三角洲南翼地区晚更新世地层顶部普遍发育灰绿色粉质黏土,质地较硬,也就是所说的“晚更新世硬黏土层”。而北翼多无此层硬黏土,显示北翼为古河谷分布区。此与以往大多数研究成果是一致的。长江三角洲晚更新世末期硬土层总埋藏趋势是,东部沿海平原埋深达15~26 m,向西部逐渐变浅,仅1~5 m,在太湖周围和苏北冈身以西地区出露地表。它的分布规律与河系格局关系密切:苏北冈身及其以东的平原地区,硬土层大片分布,与当时该处长江古河系不发育特征相符;在镇江—泰州—如皋—如东—崇明一带的长江古河谷发育区,硬土层普遍缺失;太湖—上海地区硬土层普遍出现,但明显受网状河系格局的控制,分布在古河道两侧平原的湖沼洼地中。另外,同位素测试表明,硬土层顶部(25 m)的沉积年龄为 (11440 ± 130) a B.P.,南汇孔硬土层顶部(25 m)为 (15050 ± 650) a B.P.^[1]。由此可见,长江三角洲硬土层沉积之时,中国东部

海面较低,大片古三角洲地区裸露地表,直接受到了洪水泛滥的堆积,在当时湿冷气候波动和后期全新世沉积物的堆积-压实作用下,逐步演变成今日的硬土^[27-28]。

可以看出,上述研究给出了划段第四纪地层与古近一新近纪地层及全新世地层与更新世地层的特征。然而,实际工作中,由于长江三角洲地区沉积环境非常复杂,相变频繁,特别是本工作区,处于河口主泓区,这些特点并非处处可见,需要多种资料的综合判断。

NB5孔ESR测试结果336 m处为早更新世地层((1780±267)ka B.P.),结合古地磁曲线及岩性特征,认为底部灰岩之上(354 m以上)应该为第四纪地层。

240 m处上下的岩性差异,显示大的沉积间断,古地磁结果为B/M界线,指示此处为早更新世与中更新世地层界线。

163 m处上下同样存在岩性的巨大差异,指示明确的沉积间断,结合古地磁特征,认为大致是中更新世与晚更新世地层的界线。

NB5孔全新世地层的确定资料相对较多。

据前古地磁测试,NB5孔在45m左右有一明显的负极性事件,应为Gothenburg极性事件(10~12.4 ka B.P.),47.5 m处AMS¹⁴C测试结果为(11541±48) a B.P.,对应很好。AMS¹⁴C测试结果与古地磁测试结果是基本相符的。因而,推断全新世底界应该在45 m左右。

另外,长江三角洲地区绝对年龄测试资料大多是针对全新世地层和晚更新世晚期地层。比如,上海市东部东海1井(D1)孔,在20.5~20.7 m处¹⁴C测年为(10165±625) a B.P.,为全新世地层。上海市西部赵巷4井(Z4孔)在10.95~11.15 m处¹⁴C测年为(8225±300)a B.P.,亦为全新世地层。长江以北的启东南阳Bg73孔在36.1m处¹⁴C测年为(9680±520)a B.P.^[22]。南通TZ7孔43.86 m淤泥质粉质黏土¹⁴C测年为(11810±180)a B.P.^①。上海南汇Z251孔硬土层顶部(25 m)为(15050±650)a B.P.^[1]。为晚更新世晚期地层。

与其他钻孔测年数据对比可知:长江以南全新世地层埋深约在20 m以浅,而长江以北相对应位置则在40 m左右。此与NB5孔测试结果应是吻合的。

综上所述,得到NB5孔地层划分表(表4)。

3.4 岩性差异及沉积环境探讨

岩性特征上看,钻孔163 m上下岩性差异明显,之下黏土含量明显占据优势,之上则粗粒沉积占多。判断为长江主泓流经本地所引起。而之前则多为河湖相沉积。因而推测可能与地质构造上大的变化有关。

中国的黄河和长江有着一致的发源地青藏高原,又均为流入西太平洋边缘海的河流,应该具有相似的历史。据探讨黄河历史文献,黄河从源区直到入海三角洲,各家研究的结果不尽相同,但黄河入海的历史都限于更新世^[32-34]。这与海盆的演化历史相吻合:黄河注入黄海与渤海,而黄、渤海本身的海相盆地也是更新世才产生,虽然古近纪时那里就有裂谷湖盆发育^[35-36]。近年来报道黄河中游在黄土高原的出口处,5 Ma年前就有古湖泊存在;直到晚更新世黄河方才切穿三门峡,东流入海^[37]。长江与黄河两条大河在青藏高原的源头位置十分相近相似,长江三角洲大量陆上钻井地层的总结,也发现其历史不超过更新世^[1]。长江三角洲沉积大都属于晚更新世和全新世^[38-39],尚未见早于更新世的水下三角洲。统计表明,中国东部岸外的沉积速率在上一更新世时迅速增大^[40],也与这些大河偏新的历史相一致。青藏高原的隆升被认为是触发新生代最大全球气候变化的地质因素^[41]。从更宽的视角来看,亚洲大陆的隆升可以从3方面影响气候:一是高原的形成,二是海陆分布的变化,三是河网系统的改组。这3种过程都影响气候,但是各自所起作用的大小却大有争论。

NB5孔和J9孔虽相距甚远,岩性虽有差异,特别是粗粒和细粒的占比上明显不同,但岩性粒度粗细变化的节奏上有相似之处,基本能对比(图3),两个孔的磁化率曲线高低变化基本同步,J9孔158 m左右出现最大的磁化率值,NB5孔在150 m左右也显示近于最大的磁化率值,其他段均表现出波动一致性,显示了较强的相似度,指示区域上沉积环境的变化同步性。另外,NB5孔163 m上下具有截然不同的岩性,海安J9孔也有此种差异(153 m),结合163 m左右所处地质时期,为中更新世晚期和晚更

①江苏省地质调查研究院.江苏1:50000南通市、南通县、小海镇、海门市幅区域地质调查报告[R].2009

表4 NB5孔地层划分及沉积环境一览
Table 4 Stratigraphic division and sedimentary environment of NB5 core

分带号	地质年代	地层及代号	深度/m	岩性特征	沉积环境
1	全新世	如东组 (Q _{hr})	0~47	灰色、灰绿色粉砂、粉细砂为主夹灰色、灰黑色粉质黏土, 近底部以灰黑色黏土(淤泥质)为主	滨浅海沉积环境和河口湾环境 ^①
2	晚更新世	溇湖组上段(Q _{hg} ³)	47~65	上部岩性为灰色、灰绿色(略带蓝色)黏土、粉质黏土, 下部为灰色、灰绿色粉砂、粉细砂, 含白云母、砂质较纯。上部偏细, 下部偏粗	泛滥平原, 河湖相
3		溇湖组中段(Q _{hg} ²)	65~114	上部为灰色、灰绿色粉砂、粉质黏土互层, 中部为灰色、灰绿色细砂夹粉砂, 下部为灰绿色粉砂、粉细砂, 底部为灰色含砾砂	深水河道或滨海、浅海相沉积环境
4		溇湖组下段(Q _{hg} ¹)	114~125	以灰色、灰黄色、蓝灰色黏土为主, 下部5 m为灰色粉砂夹粉砂质黏土	泛滥平原, 河湖相。
5	中更新世	昆山组(Q _{pk})	125~163	上部以灰色、灰绿色粉砂、粉细砂为主, 下部为灰色含砾粉细砂、细砂	深水河道沉积, 含海侵层 ^①
6		启东组(Q _{pq})	163~241	下部(241~210 m), 岩性以灰色发生、细砂、含砾砂为主; 上部(210~163 m), 岩性以灰黄色、棕黄色黏土、粉质黏土为主, 黏土中见钙质结核	上部河流相沉积环境。下部属泛滥平原, 河湖相, 偶夹海侵层
7	早更新世	海门组上段(Q _{ph} ³)	241~270	灰黄色、棕黄色黏土为主, 含较多钙质结核	泛滥平原、湖沼相为主
8		海门组中段(Q _{ph} ²)	270~307	灰黄色、棕黄色、青灰色黏土、粉质黏土为特征。	泛滥平原、湖沼相为主
9		海门组下段(Q _{ph} ¹)	307~354	下部为灰岩风化剥蚀产生的坡积层。354~345 m岩性为灰色、灰白色砂砾层, 含较多钙质结核, 最底部见灰白色黏土, 有明显的高岭土化, 为残坡积物。345~307 m岩性以灰色粉砂、粉细砂、含砾砂为主	河流相沉积为主, 偶夹海侵层

新世早期左右,也就是1300 ka B.P.左右,正是青藏运动之共和运动时期。已有一些研究表明,青藏高原在中更新世末期以来有强烈的上升,隆升幅度至少达1000 m^[42]。有理由认为此时期本地区发生了巨大的环境变化,进而影响了区内河网系统的布局,长江主泓开始流经此地,导致沉积岩性的巨大变化。

同样,NB5孔240 m上下亦存在岩性的巨大差异和沉积间断,其他本区域内钻孔亦有类似特征(如J9孔在200 m左右,116孔,242 m)。可以认为本区的早更新世与中更新世地层的界线应该在200~240 m。而岩性上的巨大差异可能亦与区域上大的构造运动(昆黄运动)有关。昆仑山大断层0.7 Ma B.P.以来左旋走滑达30 km,垂直断距超过1000 m,整个昆仑山经过这次运动才成为海拔高峻的大山,故昆黄运动是意义重大的一次构造运动。黄河经过1.2~

0.6 Ma B. P的昆黄运动干流溯源侵蚀进入青藏高原^[43]。长江与黄河具有类似的发育过程。而本区200~240 m地层代表的时间为0.78 Ma B.P.左右,正是昆黄运动时期。作为区域性大河长江的发育受到昆黄运动的影响应该是必然的。

另外,NB5孔中2.05~34.28 m可见较多的螺贝壳,灰色灰绿色的粉砂、粉细砂及粉质黏土等,显示海相沉积环境。125 m左右亦见有少量螺贝壳碎片等化石,岩性也为灰色蓝灰色的黏土沉积物。NB5孔有孔虫鉴定结果^①表明,此两段中均有有孔虫存在,明确指示存在海相层,两处分别对应I(Q_h)镇江海侵和III(Q_p³⁻¹)昆山海侵。钻孔其它位置未见有孔虫。说明I(Q_h)镇江海侵和III(Q_p³⁻¹)昆山海侵在本区是较强的海侵,其中镇江海侵为最强海侵。

可见,工作区经历了地势的高低起伏,海陆的

①江苏省地质调查研究院. 江苏1:50000南通市、南通县、小海镇、海门市幅区调报告[R]. 2009.

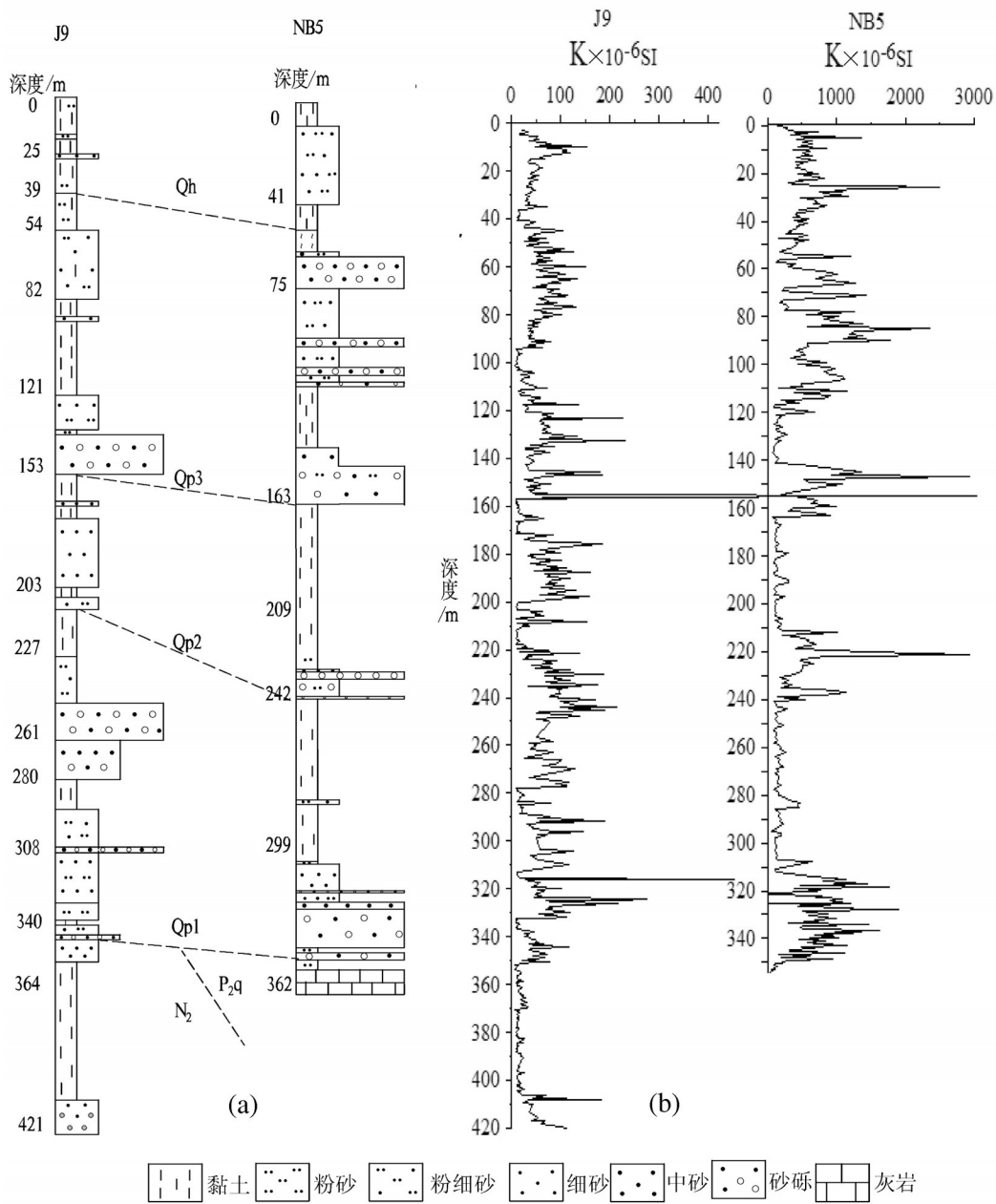


图3 NB5孔和J9孔岩性和磁化率对比图(a—钻孔岩性对比柱;b—钻孔磁化率对比柱;K—磁化率)
 Fig. 3 Correlation of lithology and magnetic susceptibility between NB5 and J9 cores

多次变迁,与整个大的构造和环境演变是相关的。

4 结 论

(1)NB5孔第四纪地层大致划分为:45 m左右为全新世底,163 m应为晚更新世底,240 m为中更新世底,之下为早更新世地层。

(2)NB5孔163 m上下巨大的岩性差异,磁化率

曲线上亦反映了这种突变。结合全球变化,特别是青藏高原隆升相关研究成果,认为共和运动影响波及本区,导致区内巨大的环境变化,从之前长期的河湖相河间沉积并伴有沉积间断的环境,变为河床相沉积,推测此层位代表的时间是长江主泓流经本地的时间。同样,240 m上下的岩性大差异也可能与昆黄运动有关。作为区域性大河长江的发育受

到青藏高原隆升及全球环境变化的影响。

参考文献(References):

- [1] 吴标云,李从先.长江三角洲第四纪地质[M].北京:地质出版社,1987:4-60.
Wu Biaoyun, Li Congxian. Quaternary Geology of Yangtze River Delta[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 4-60(in Chinese).
- [2] 王绍忠,周红科,杨启浩.渤海湾埕岛东部古近系层序地层及沉积特征研究[J].中国地质,2010,37(2):404-413.
Wang Shaozhong, Zhou Hongke, Yang Qihao. Sequence stratigraphy and sedimentary characteristics of Paleogene hydrocarbon reservoirs in eastern Chengdao offshore oilfield of Bohai Gulf[J]. Geology in China, 2010, 37(2): 404-413(in Chinese with English abstract).
- [3] 栾英波,蔡向民,郭高轩,等.北京平原区新5孔岩心特征及地层初步划分[J].中国地质,2011,38(2):495-503.
Luan Yingbo, Cai Xiangmin, Guo Gaoxuan, et al. Core characteristics and preliminary stratigraphic classification of the New-5 Hole in Beijing Plain[J]. Geology in China, 2011, 38(2): 495-503(in Chinese with English abstract).
- [4] 何伟相,周矿水,喻晓平,等.江西萍乐坳陷带西段早三叠世地层划分与对比及沉积环境分析[J].中国地质,2014,41(1):148-161.
He Weixiang, Zhou Kuangshui, Yu Xiaoping, et al. Stratigraphic classification and correlation and sedimentary environment analysis of the Early Triassic in western Pingxiang-Leping depression, Jiangxi Province[J]. Geology in China, 2014, 41(1): 148-161(in Chinese with English abstract).
- [5] 陈洪全.论长江三角洲的北界[J].浙江师范大学学报,2004,27(1):76-79.
Chen Hongquan. Decision thinking for the northern demarcation line of Yangtze River Delta[J]. Journal of Zhejiang Normal University, 2004, 27(1): 76-79(in Chinese with English abstract).
- [6] 唐珉,杨守业,李保华等.长江三角洲冰后期沉积物的有机碳氮和有机碳同位素组成与古环境指示[J].海洋地质与第四纪地质,2006,26(5):1-10
Tang Min, Li Shouye, Li Baohua, et al. Compositions of organic carbon and nitrogen and carbon isotope of Postglacial sediments in the Yangtze River Delta and the Paleoenvironment implication[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(5): 1-10(in Chinese with English abstract).
- [7] 杨达源,陈可锋,舒肖明.深海氧同位素第3阶段晚期长江三角洲古环境初步研究[J].第四纪研究,2004,24(9):525-530.
Yang Dayuan, Chen Kefeng, Shu Xiaoming. A preliminary study on the paleoenvironment during MIS 3 in the Changjiang delta region[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(9): 525-530(in Chinese with English abstract).
- [8] 范代读,李从先, K.Yokoyama, 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[J].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 of the Changjiang delta and its implication on the Changjiang run through time[J]. Science in China (Series D), 2004, 34(11): 1015-1022(in Chinese).
- [9] 吴月英,陈中原,王张华.长江三角洲平原黏土矿物分布特征及其环境意义[J].华东师范大学学报,2005,1:92-98.
Wu Yueying, Chen Zhongyuan, Wang Zhanghua. Distribution of clay minerals in the Yangtze Delta plain and Its Paleoenvironmental Implication[J]. Journal of East China Normal University(Natural Science), 2005, 1: 92-98(in Chinese with English abstract).
- [10] 吴燕开,刘松玉,洪振舜.苏北与长江三角洲沉积环境及其土体物理性质关系探讨[J].水文地质工程地质,2005,(2):49-52.
Wu Yankai, Liu Songyu, Hong Zhenshun. Relation between physical properties and deposit environment of stratum in North of Jiangsu Province and Changjiang River delta[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, (2): 49-52(in Chinese with English abstract).
- [11] 曹光杰,王建.长江三角洲全新世环境演变与人类关系研究综述[J].地球科学进展,2005,20(7):757-764.
Cao Guangjie, Wang Jian. An overview of the research on the environmental evolution and human-environment relationship in Holocene Epoch of the Yangtze Delta[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(7): 757-764(in Chinese with English abstract).
- [12] 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(spl): 618-625(in Chinese with English abstract).
- [13] 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(spl): 612-617(in Chinese with English abstract).
- [14] 刘杜娟,叶银灿.长江三角洲地区的相对海平面上升与地面沉

- 降[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(4): 400-404.
- Liu Dujuan, Ye Yincan. Relative sea surface rise and landsubside in Changjiang Delta area[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2005, 16(4): 400-404(in Chinese with English abstract).
- [15] 贾丽, 张玉兰. 长江三角洲东缘晚新近纪沉积的孢粉与古环境研究[J]. 微体古生物学报, 2006, 23(1): 70-76.
- Jia Li, Zhang Yulan. Studies on palynological assemblages and paleoenvironment of late Quaternary in the east margin of the Changjiang River Delta[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2006, 23(1): 70-76(in Chinese with English abstract).
- [16] 信忠保, 谢志仁. 长江三角洲地貌演变模拟模型的构建[J]. 地理学报, 2006, 61(5): 549-560.
- Xin Zhongbao, Xie Zhiren. Construction of the simulating model for geomorphic evolution of the Yangtze Delta[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(5): 549-560(in Chinese with English abstract).
- [17] 王国庆, 石学法, 李从先. 长江三角洲晚第四纪沉积地质学研究述评[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(6): 131-137
- Wang Guoqing, Shi Xuefa, Li Congxian. A review on late Quaternary sedimentary geology of the Yangtze River Delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(6): 131-137(in Chinese with English abstract).
- [18] 顾莉, 李国卿. 长江三角洲生态系统的近代演化特征及其生态与环境问题分析[J]. 江苏环境科技, 2006, 19(6): 9-12
- Gu Li, Li Guoqing. Modern evolution characteristics of ecosystems and analysis of ecological and environmental problems in the Changjiang Delta[J]. Jiangsu Environmental Science and Technology, 2006, 19(6): 9-12(in Chinese with English abstract).
- [19] 郑祥民, 刘飞. 长江三角洲与东海岛屿黄土研究综述[J]. 华东师范大学学报, 2006, 6: 9-24.
- Zheng Xiangmin, Liu Fei. Review of research on loess in the Yangtze River Delta and the East China Sea islands[J]. Journal of East China Normal University(Natural Science), 2006, 6: 9-24(in Chinese with English abstract).
- [20] 丁元陶. 长江三角洲东部沉积物粒度特征及其环境意义[J]. 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[J]. Resources Survey & Environment, 2006, 27(4): 261-267(in Chinese with English abstract).
- [21] 朱大奎, 王颖, 王栋, 等. 长江三角洲水环境水资源研究[J]. 第四纪研究, 2004, 24(5): 486-495.
- Zhu Dakui, Wang Yin, Wang Dong, et al. Research on water environment and resources in Yangtze River Delta[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(5): 486-495(in Chinese with English abstract).
- [22] 张玉兰. 长江三角洲地区晚更新世晚期的孢粉特征及古环境[J]. 同济大学学报, 2005, 33(9): 1201-1205.
- Zhang Yulan. Characteristics of palynological assemblage of late stage of Late Pleistocene in Changjiang River delta area and paleoenvironment[J]. Journal of Tongji University, 2005, 33(9): 1201-1205(in Chinese with English abstract).
- [23] 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. Chronostratigraphy and transgression/regression during Late Pleistocene in the southern Changjiang River delta plain[J]. Marine Geology & Quaternary, 2004, 24(4): 1-8(in Chinese with English abstract).
- [24] 邓兵, 李从先, 张经, 等. 长江三角洲古土壤发育与晚更新世末海平面变化的耦合关系[J]. 第四纪研究, 2004, 24(2): 222-230.
- Deng Bing, Li Congxian, Zhang Jing, et al. Correlation of Paleosoil development in the Changjiang Delta with sea level fluctuations in the Late Pleistocene[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(2): 222-230(in Chinese with English abstract).
- [25] 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.
- Tan Jungan, Wu Guoxuan, Zhen Hongbo, et al. Palynomorph assemblages, origin and palaeoenvironmental significance of the upper most hard clay in the deltaic area of the Changjiang River[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(5): 546-554(in Chinese with English abstract).
- [26] 曹光杰, 张学勤, 熊万英. 冰后期长江河口段古河谷地层层序特征[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(3): 1-5.
- Cao Guangjie, Zhang Xueqing, Xiong Wanying. Characteristics of post-glacial incised-valley stratigraphic sequence in Yangtze river mouth area[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006, 28(3): 1-5(in Chinese with English abstract).
- [27] 缪卫东, 李世杰, 王润华. 长江三角洲北翼J9孔岩心沉积特征及地层初步划分[J]. 第四纪研究, 2009, 29(1): 126-134.
- Miao Weidong, Li Shijie, Wang Runhua. Preliminary study on sedimentary characteristics and stratum division of J9 core in the north wing of the Yangtze River Delta[J]. Quaternary Sciences, 2009, 29(1): 126-134(in Chinese with English abstract).
- [28] 曹光杰, 王建, 屈贵贤. 末次盛冰期以来南通段古河谷的地层特征[J]. 地层学杂志, 2007, 31(2): 175-178.
- Cao Guangjie, Wang Jian, Qu Guixian. Stratigraphic framework

- characteristics of the Yangtze River's incised valley in Nantong since the Last Glacial maximum[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2007, 31(2):175-178(in Chinese with English abstract).
- [29] Zeller E J. Geological dating by electron spin resonance, Symposium on radioactive and low level counting[J]. I.A.E.A., Wein, 1967: 531-540.
- [30] Mikikeya, T Miki. A decade of ESR dating from speleology at Akiyoshi-do Cave, Japan[J]. *Soc. Japan*. 1984, 9:36-57.
- [31] 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(B4): 6093-6096
- [32] Li Jijun. The environmental effects of the uplift of the Qinghai - XiZang Plateau[J]. *Quaternary Science Review*, 1991, 10:479-483.
- [33] Xue C. Historical changes in the Yellow River delta[J]. *China. Mal. Geol.* 1993, 113:321-329.
- [34] Saito Y, Wei H, Zhou Y, et al. Delta progradation and chenier formation in the Huanghe (Yellow River) delta. China[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 2000, 18:489-497.
- [35] Wang P X. Neogene stratigraphy and paleoenvironments of China[J]. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 1990, 77: 325-334.
- [36] 汪品先. 亚洲形变与全球变冷_探索气候与构造的关系[J]. *第四纪研究*, 1998(3): 213-221.
Wang Pinxian. Deformation of Asia and global cooling searching links between climate and tectonics[J]. *Quaternary Sciences*, 1998 (3): 213-221(in Chinese with English abstract).
- [37] 王苏民, 吴锡浩, 张振克, 等. 三门古湖沉积记录的环境变迁与黄河贯通东流研究[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, 31(9): 760-768.
Wang Suming, Wu Xihao, Zhang Zhenke, et al. Sedimentary records of environmental evolution in the Sanmen Lake basin and the Yellow River running through the Sanmenxia Gorge eastward into the sea[J]. *Sci. in China(Series D)*, 2001, 31(9): 760-768(in Chinese).
- [38] Li C X, Chen Q, Zhang J, et al. Stratigraphy and paleoenvironmental changes in the Yangtze delta during late Pleistocene[J]. *Asian Earth Sci.*, 2000, 18: 453-469.
- [39] Hori K, Saito Y, Zhao Q, et al. Architecture and evolution of the tide-dominated Changjiang (Yangtze) River delta. China[J]. *Sedim. Geol.*, 2002, 146: 249-264.
- [40] Metivier F, Gaudemer Y. Mass transfer between eastern Tien Shan and adjacent basins(central Asia): Constraints on regional tectonics and topography[J]. *Geophys. J. Internat.*, 1997, 128:1-17.
- [41] Ruddiman W F, Raymo M E, Prell W I, et al. The uplift-climate connection: A synthesis[C]//Ruddiman W F (eds). *Tectonic Uplift and Climate Change*. Plenum, New York, 1997: 471-51.
- [42] 汪品先. 新生代亚洲形变与海陆相互作用[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2005. 30(1): 1-18
Wang Pinxian. Cenozoic deformation and history of sea-land interactions in Asia[J]. *Earth Science——Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(1): 1-18(in Chinese with English abstract).
- [43] 李吉均, 方小敏, 潘保田, 等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(5): 381-391.
Li Jijun, Fang Xiaomin, Pan Baotian, et al. Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai-Xizang Plateau and its impacts on environments in surrounding area[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21 (5): 381-391(in Chinese with English abstract).