

doi:10.3799/dqkx.2017.569

长江三角洲上新世以来磁性地层及天文调谐年代标尺

谢建磊^{1,3}, 张克信^{1*}, 马小林², 赵宝成³, 张平⁴

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国科学院地球环境研究所, 陕西西安 710061

3. 上海市地质调查研究院, 上海 200072

4. 江苏省地质调查研究院, 江苏南京 210018

摘要: 长江三角洲地区的磁性地层认识存在很大不确定性. 为建立一个可靠的年代标尺, 为区内沉积环境和气候演化研究提供约束, 在年代地层和磁性地层基础上, 以频率磁化率为信号源、ETP为靶曲线, 通过轨道调谐方法对区内LZK1孔开展了天文年代标尺研究, 建立了年代序列框架. 结果显示, M/B界线埋深约为143.0 m, Ga/M界线埋深约为219.0 m, Gi/Ga界线埋深约为296.6 m. 受气候和沉积环境控制, 沉积旋回特征清楚, 沉积速率具有明显的阶段性. 调谐后的频率磁化率显示了显著的125 ka、96 ka、41 ka、23 ka、22 ka、18 ka等轨道周期, 并在轨道周期上与ETP曲线高度相关, 相关性超过了95%检验标准. 100 ka、41 ka和23 ka周期的带通滤波曲线与偏心率、斜率和岁差在振幅和相位上吻合较好, 但局部时间段有差异, 可能与低沉积速率、沉积速率突变或短时间尺度的地层缺失等因素有关. 研究表明, 在具有短暂沉积缺失的持续沉降区域, 只要保证样品分辨率, 可以通过轨道调谐方法建立可靠的年代框架.

关键词: 长江三角洲; 磁性地层; 轨道调谐; 天文标尺; 气候周期; 沉积学; 第四纪.

中图分类号: P534.6

文章编号: 1000-2383(2017)10-1760-14

收稿日期: 2017-02-20

Magnetostratigraphy and Astronomically Tuned Time Scale of Yangtze Delta since Pliocene

Xie Jianlei^{1,3}, Zhang Kexin^{1*}, Ma Xiaolin², Zhao Baocheng³, Zhang Ping⁴

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

3. Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China

4. Jiangsu Institute of Geological Survey, Nanjing 210018, China

Abstract: There is also uncertainty about the magnetostratigraphy in the Yangtze delta. In order to establish a reliable time scale, and provide constraints for sedimentary environment and climate evolution, based on chronostratigraphy and magnetostratigraphy, in this paper astronomical time scale of the LZK1 borehole in the Yangtze delta is researched, and established the chronological framework is established. The results show that M/B, Ga/M and Gi/Ga boundaries locate at 143.0 m, 219.0 m and 296.6 m separately. The deposit cycles are clear and the sedimentary rate has obvious phases, which was influenced by the climate and sedimentary environment. The tuned frequency dependent susceptibility record reveals orbital periods including 125 ka, 96 ka, 41 ka, 23 ka, 22 ka, 18 ka, and is correlated with ETP curves enormously in orbital periods, the confidence interval exceeds 95%. The band-pass filtering curves of 100 ka, 41 ka, 23 ka circles coincide with the corresponding orbital parameter curve in phase and amplitude in total, while existing some inconformities at certain times. The inconformities may be caused by low sedimentary rate or abrupt change of sedimentary rate. In this paper, a conclusion is drawn that in the ongoing subsidence areas with temporary depositional hiatus, as long as the sampling resolution can be assured, we can establish reliable

基金项目: 长江三角洲海岸带综合地质调查与监测(No.GZH201200506); 上海区域地质调查片区总结与服务产品开发(No.DD20160345-07).

作者简介: 谢建磊(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事区域地质调查和研究工作. ORCID: 0000-0003-2635-8003. E-mail: 45118880@qq.com

*** 通讯作者:** 张克信, E-mail: kx_zhang@cug.edu.cn

引用格式: 谢建磊, 张克信, 马小林, 等, 2017. 长江三角洲上新世以来磁性地层及天文调谐年代标尺. 地球科学, 42(10): 1760-1773.

ble chronological framework by orbital tuning.

Key words: Yangtze delta; magnetostratigraphy; orbital tuning; astronomical time scale; climate period; sedimentology; Quaternary.

在长江三角洲地区,古地磁定年是建立松散层长时间尺度年代框架的基本手段,磁化率等磁性参数多被用于古气候、物源研究,也有用于地层对比(邢历生等,1986;Chen *et al.*, 1997;舒强,2004;王润华等,2005;Yang *et al.*, 2006;邱金波和李晓,2007;黄湘通等,2008;王张华等,2008;张平等,2013;Zhang *et al.*, 2013;邹亮等,2015;Duan *et al.*, 2016).上述研究对区内 M/B 和 Ga/M 等极性时界线、漂移事件划分的认识并不一致,对 G414、G418、庙镇、SG7 等孔甚至具有不同的认识(邢历生等,1986;王润华等,2005;邱金波和李晓,2007;张平等,2013).关于 M/B 和 Ga/M 界线埋深,多数学者认为区域上具有差异性,且部分差别较大,但也有学者认为不同次级构造单元内差别不大(邱金波和李晓,2007).全球范围内,第四纪以来记录了达 30 多次的极性漂移或反转事件(李培英,1999;Gradstein *et al.*, 2012;Singer, 2014),但区内已有成果对上述事件多未论述或认为区内有少数事件的记录.此外,除少数成果外(邹亮等,2015;Duan *et al.*, 2016),多数钻孔的古地磁取样间距较大,研究精度较低.磁性地层认识的不确定性,制约了对区内年代地层框架和沉积环境、气候演化的认识.

旋回地层学被认为是地层学解读时间的第三里程碑,在米兰科维奇理论基础上形成的轨道调谐方法已被广泛用于建立不同沉积环境沉积地层的天文年代标尺,并在邻区苏北盆地南缘和南黄海地区获得成功尝试(袁林旺等,2003;田军等,2005;韩志勇和李徐生,2006;于永涛,2006;张茂恒,2009;吴怀春等,2011;Ao *et al.*, 2011;田庆春,2012;Wu *et al.*, 2013;Yao *et al.*, 2014;吴淑玉和刘俊,2015).气候代用指标和物性参数的变化受轨道周期影响.在持续沉降的冲积平原地区,河流沉积能够记录基本完整的冰期—间冰期旋回事件,匈牙利潘诺尼亚盆地第四纪河流沉积的磁化率指标表现了 40 ka、100 ka 的轨道周期(Náador *et al.*, 2003).河流沉积中的短期旋回受偏心率短周期影响,短期基准面旋回界面成因主要与斜率周期的气候波动有关(高志勇,2007);南海 5 Ma 以来沉积物中的赤铁矿/针铁矿具有很强的岁差周期,而有孔虫氧同位素中岁差周期则十分弱(Ao *et al.*, 2011).轨道调谐方法的实质就是基于地球轨道参数变化与气候响应之间的因果关系,将古气候代用指标曲线校准到偏心率、斜率、

岁差或日照量的目标曲线上(田庆春,2012;Yao *et al.*, 2014).理论上,只要地层连续或相对连续、具有旋回性,气候指标具有轨道周期、分辨率足够,均可采用该方法进行年代标尺的建立;但河湖相沉积不易于建立一个便于全球对比的年代框架(于永涛,2006).磁化率在不同沉积物中经常被用作古气候代用指标(Náador *et al.*, 2003;吉云平和夏正楷,2007;Püspöki *et al.*, 2013),作为调谐材料进行天文年代标尺的研究也已取得很好的效果(田军等,2005;于永涛,2006;田庆春,2012;Wu *et al.*, 2013).

为建立一个较可靠的年代标尺,为区内沉积环境演化、气候框架和极性漂移事件的认识提供约束.本文以长江口横沙岛 LZK1 孔为对象,在磁性地层和 OSL、AMS¹⁴C 测试基础上,采用天文轨道调谐方法进行了天文年代标尺的研究.

1 钻孔剖面沉积特征

钻孔位于长江口横沙岛(图 1),孔深 403.83 m,松散层厚 395.4 m,全孔平均取心率大于 90%,取心直径 108 mm.垂向上,根据颜色、岩性、沉积构造特征等可划分为 213 个小层,15 个大层(图 2).主要沉积特征和沉积相如下:

(1)0~13.7 m 段,除浅部 0.6 m 为人工填土外,多为灰色粉砂,上部和下部粉砂与粘土质粉砂呈互层或夹层特征.自下而上先变粗后变细.多发育水平层理、透镜状或脉状层理.与下层突变接触.为一套

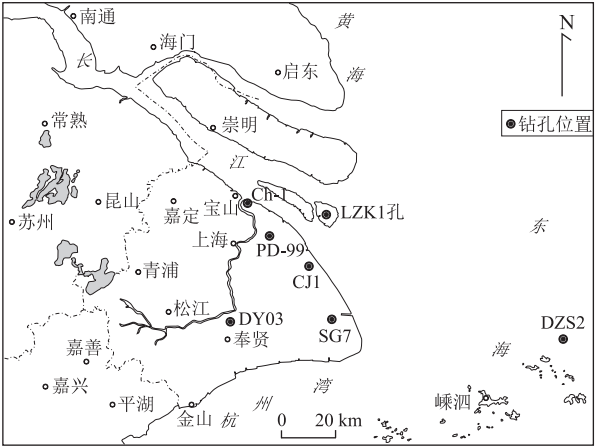


图 1 LZK1 钻孔和对比钻孔位置

Fig.1 Location map of borehole LZK1 and nearby boreholes

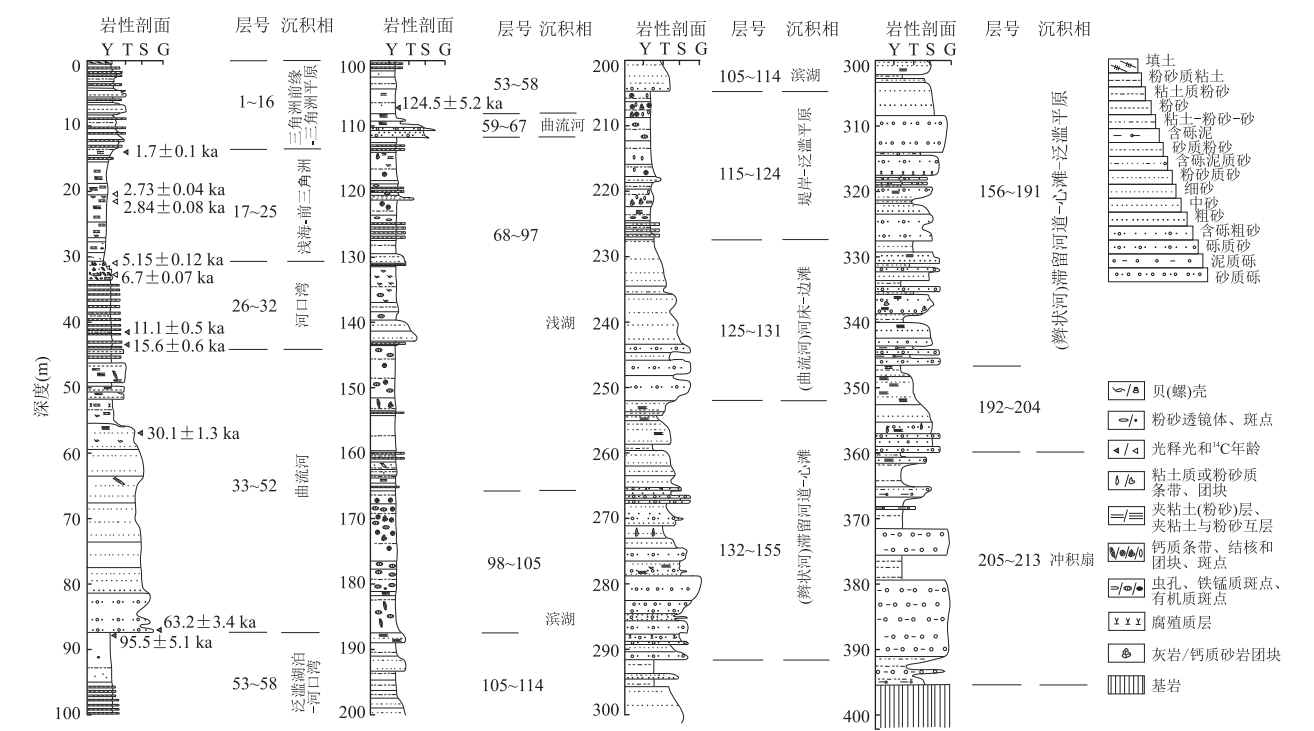


图 2 LZK1 孔柱状与沉积相划分
Fig.2 Sedimentary column and facies of borehole LZK1 with OSL and AMS ¹⁴C ages

三角洲前缘—三角洲平原沉积。

(2)13.7~30.5 m 段,灰色,以粘土质粉砂为主,局部夹粉砂纹层或呈粉砂与粘土质粉砂互层。局部发育水平和透镜状层理。与下层突变接触。为一套浅海—前三角洲沉积。

(3)30.5~45.1 m 段,灰、棕灰色,以粘土质粉砂与粉砂互层为主,33.65 m 以上粉砂多呈团块状、条带状夹层。发育水平层理。与下层突变接触。为一套河口湾沉积。

(4)45.1~87.3 m 段,上部灰、棕灰色,下部黄灰、灰黄色。51.9 m 以浅以粉砂为主,夹粘土质粉砂与粉砂互层,发育水平、波状和脉状层理。51.9~55.3 m 以粘土质粉砂为主,见植物根茎,局部夹粉砂纹层或与粉砂互层。局部发育水平层理。55.3~87.3 m 段以粉砂质砂、细砂、含砾粗砂、砾质砂为主,局部为粉砂质砂、粘土质粉砂夹粘土质粉砂条带。内部分数个正旋回。砾石呈次棱—次圆状。与下层突变接触。为一套总体向上变细的曲流河沉积。

(5)87.3~108.2 m 段,灰色、局部黄灰色,以粘土质粉砂为主,上部和下部土质较匀,夹粉砂纹层、斑点,局部见有机质富集。中部粉砂斑点、纹层增多,局部成互层状。发育水平、微波状和透镜状层理。与下层过渡接触。为一套泛滥湖泊—河口湾沉积。

(6)108.2~111.8 m 段,灰、黄灰色,以粉砂质砂、细砂为主,局部为粘土质粉砂、含砾粗砂。由 3 个正旋回组成。局部发育平行层理。与下层突变接触。为一套曲流河沉积。

(7)111.8~166.0 m 段,灰、灰黄色为主,局部见蓝灰和棕灰色,偶见褐黄色。以粘土质粉砂为主,局部与粉砂互层。118.4~121.2 m、139.9~143.0 m 为细砂、粉砂质砂等构成的正旋回。上部见虫孔、贝壳碎屑、岩石团块,中部见贝壳富集层,夹泥钙质结核、团块或条带、铁锰质斑点。局部发育水平、透镜状和平行层理。与下层突变接触。为一套浅湖沉积。

(8)166.0~187.7 m 段,灰黄色为主,多见夹蓝灰、灰白、褐黄色。粘土质粉砂为主,见较多的铁锰质斑点、钙质团块和条带、泥钙质结核,分布不均,局部富集,下部偶见腐殖质斑点。水平层理和透镜状层理。与下层过渡接触。为一套滨湖泥滩沉积。

(9)187.7~204.6 m 段,蓝灰色为主,夹灰黄、褐黄色。由细砂、粉砂质砂、粘土质粉砂形成三个正旋回。夹钙质结核、条带和斑点,局部有铁锰质斑点,分布不均。底部 20 cm 为砾质泥,砾石棱角状,分选差。局部见水平层理。与下层突变接触。为一套滨湖砂滩沉积。

(10)204.6~227.3 m 段,灰黄色为主,夹蓝灰、褐黄、黄白色,以粘土质粉砂为主,224.0 m 以下与粉砂互层。夹钙质结核、斑点和条带,局部集中。

208.0 m 以浅、221.6~222.1 m 夹成岩团块。局部发育水平层理。与下层突变接触。为一套曲流河堤岸—泛滥平原沉积。

(11)227.3~252.1 m 段,灰黄色,由砾质砂、中细砂、细砂、粉砂质砂等构成一套正旋回沉积。砾石呈次棱角—一次圆状,分选差,局部粘粒含量较高,235.5 m 以上局部夹粘土质粉砂与粉砂互层。局部水平层理。与下层推测突变接触。为一套曲流河河床—边滩沉积。

(12)252.1~291.5 m 段,灰、灰黄色,由砾质砂、含砾粗砂、中砂、细砂和粉砂质砂等构成两个正旋回。局部粘粒含量高,或为粘土质粉砂,形成数个亚正旋回。253.5~254.0 m 夹钙质砂岩团块。288.0 m 夹腐木层。砾石呈次棱角—一次圆状,分选差。局部水平、平行层理发育。内部岩性层及与下层之间多突变接触。为一套辫状河滞留河道—心滩沉积。

(13)291.5~346.4 m 段,灰黄、褐黄色、灰绿、黄绿色为主,局部灰色。以砂质砾、砾质砂、粗砂、中砂、粉砂质砂为主。局部发育粘土质粉砂。砂性土中局部铁锰质斑点、条带发育,泥钙质胶结较好,夹粘土质粉砂薄层、条带,局部见泥砾。砾石次棱角—一次圆状,分选差。内部岩性层及与下层间多突变接触。为一套辫状河滞留河道—心滩—泛滥平原沉积。

(14)346.4~359.8 m 段,灰黄色为主,局部夹蓝灰或为灰色。由含砾粗砂、中砂、粉砂质砂和粘土质粉砂等组成一套正旋回,局部粘粒含量较高,偶见泥砾。泥质胶结中等。砾石多棱角状、分选差。与下层突变接触。为一套辫状河滞留河道—心滩—泛滥平原沉积。

(15)359.8~395.4 m 段,上部褐灰夹蓝灰、灰黄色,下部灰绿、灰和黄白色。由砾质泥、泥质砾、粗砂和粘土质粉砂构成互层,局部为粉砂质粘土等。粘土质粉砂多与下层过渡接触,土质较匀,含褐黄色铁锰质斑点。砾石分选差、棱角状。为一套冲积扇沉积。

2 材料和方法

2.1 样品采集和测试

岩心钻取后,根据层位立即进行 OSL 样品采集。之后,将岩心迅速放进 PVC 管中进行密封保存。室内剖样后,进行详细的地质编录和 AMS ^{14}C 、古地磁等样品采集。

AMS ^{14}C 测试对象为完整贝壳,在美国 Beta 实验室完成,共 4 件。OSL 测试对象以粉砂、细砂为主,

个别层位为粘土质粉砂。在国土资源部地下水矿泉水及环境监测中心完成,共 8 件。采用仪器为 Day-break 2200 光释光仪。

古地磁样品采用边长 2 cm 的正方体无磁性塑料盒采集,间距多为 20 cm,局部粘性土中至 10 cm,砂性土中至约 50 cm,总计 1 561 件。在中国科学院地球环境研究所环境磁学实验室零磁空间完成。采用 2G-600 型在线交变退磁系统逐步进行磁清洗后通过 2G-755R U-Channel 超导磁力仪进行剩磁强度测量。设定的交变退磁场分别为 NRM、2.0 mT、5.0 mT、7.5 mT、10.0 mT、15.0 mT、20.0 mT、25.0 mT、30.0 mT、35.0 mT、40.0 mT、45.0 mT、50.0 mT、60.0 mT、70.0 mT、80.0 mT,共分 16 步。

磁化率样品按 20 cm 间距采集,总计采集 1 741 件。室内低温烘干后在玛瑙研钵内轻压、分散,并搅拌均匀。之后,将边长为 2 cm 的标准样盒装满,压实。在中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室完成,实际测试 1 663 件。采用仪器为捷克 AGICO 公司 MFK1-FA/CS4 多功能磁化率仪,低频为 976 Hz,高频为 15 616 Hz。

2.2 调谐方法

不同学者在进行轨道调谐时采用的靶曲线不同,有北半球高纬太阳辐射量、ETP 和特定地球轨道参数等(田军等,2005;田庆春,2012;Yao *et al.*, 2014)。本文以 ETP 曲线(正交化的偏心率+正交化的斜率—正交化的岁差)作为靶曲线,轨道参数采用 Laskar *et al.* (2004)的计算方案。气候系统对地球轨道响应周期的滞后程度采用 Imbrie *et al.* (1984)的标准,即在斜率和岁差周期上分别滞后 8 ka、5 ka。

具体调谐过程如下:首先,以较可靠的磁性地层、OSL 和 ^{14}C 年龄为控制点获得初始年代标尺,结合沉积学特征,通过频谱分析判断剖面是否具备进行轨道调谐的基础;其次,以上述控制点为基础,将频率磁化率曲线与深海氧同位素曲线进行对比,确定新控制点。最后,以新控制点为约束,通过目视的方法将标准化后的频率磁化率曲线与 ETP 曲线进行对比,并根据滤波曲线和轨道参数对比、交叉频谱分析的检验情况,不断调整峰谷的对应关系和增加新的控制点,直到获得最终的天文年代标尺。采用 Analyseries 软件进行曲线比对和滤波分析,采用 redfit38 软件进行频谱分析。频谱分析时,笔者对原始数据进行了去趋势化处理。

表 1 光释光测年结果
Table 1 OSL ages for sediments from LZK1 borehole

野外 编号	埋深 (m)	U (10 ⁻⁶)	Th (10 ⁻⁶)	K (%)	等效剂量 (Gy)	年剂量 (Gy/ka)	含水量 (%)	年龄 (ka)
gsg-1	13.6	1.80	9.80	1.80	4.94±0.37	3.02	27.26	1.6±0.1
gsg-2	14.0	2.56	13.7	2.25	6.50±0.19	3.78	36.92	1.7±0.1
gsg-5	41.6	2.30	12.7	2.26	41.04±0.71	3.71	29.98	11.1±0.5
gsg-6	43.3	1.76	8.70	1.63	43.62±0.31	2.77	22.68	15.6±0.6
gsg-7	57.0	1.54	7.25	1.77	82.56±1.17	2.74	20.39	30.1±1.3
gsg-8	86.8	1.20	5.56	1.82	168.70±2.90	2.67	10.82	63.2±3.4
gsg-9	87.5	2.91	15.5	2.68	435.76±15.62	4.56	27.35	95.5±5.1
gsg-10	107.1	3.11	14.4	2.24	532.54±6.40	4.28	20.57	124.5±5.2

表 2 AMS ¹⁴C 测年结果
Table 2 AMS ¹⁴C ages for sediments from LZK1 borehole

野外 编号	埋深 (m)	直接测年年龄 (a BP)	惯用年龄 (a BP)	日历校正年龄 2σ(a BP)	¹³ C/ ¹² C 比值 (%)
AC-1	20.6	2 660±30	3 000±30	2 760~2 690	-4.4
AC-2	21.2	2 710±30	3 110±30	2 910~2 760	-0.6
AC-3	30.8	4 480±30	4 890±30	5 260~5 030	-0.3
AC-5	32.8	5 890±30	6 290±30	6 760~6 630	-0.6

3 基于频率磁化率的轨道调谐时间标尺的建立

3.1 晚更新世以来年代地层

光释光测年显示 41.6 m 处年代约 11.1 ka,基本对应于全新统底部;107.1 m 处年龄约 124.5 ka,基本对应于上更新统底界(表 1).AMS ¹⁴C 测年获得了直接测年年龄、惯用年龄、日历校正年龄以及 ¹³C/¹²C 比值等结果(表 2),基本控制了上全新统、中全新统底界深度。

3.2 磁性地层

退磁曲线显示大多数样品均存在原生和次生两种磁性组分,分别在 0~10 mT 和 10~80 mT 两种剩磁组分存在一定的区别(图 3)。前者为包含粘滞剩磁在内的次生剩磁,而后者为样品的特征剩磁方向。用主成分分析法对后者的退磁数据进行拟合获得最终的特征剩磁方向。根据理论和实验情况,剔除了 MAD 大于 15°、磁倾角大于 60°或小于-60°和无稳定退磁方向的样品数据,保留了 978 个样品数据。其中,近 90%的样品具有清晰的通过原点的退磁曲线,但部分样品在 50 mT 之后的退磁曲线方向不稳定(图 3i~3l)。载磁矿物的后生变化会使初始剩磁被掩盖,复杂多变环境中沉积物剩磁的原生性需认真判读(Duan *et al.*, 2016)。经排除明显扰动、与光释光和 ¹⁴C 年龄对比、退磁曲线和岩性特征分析等

方法的甄别,建立本孔的极性柱(图 4),确定本孔磁性地层可能结束于 Gilbert 负极性时下部第一个正极性亚时 C3An.1n 或第 1 个负极性亚时晚期 C3An.1r,孔底年龄推测约为 6.3 Ma。区域上,太仓-昆山一带松散层底界约为 8 Ma(Zhang *et al.*, 2013),浦东沿岸松散层下伏玄武岩(相当于崧县组)多形成在 5~10 Ma(Ho *et al.*, 2003;于振江等, 2004;李相传等,2014)。上述地区松散层底部与本文剖面底部岩性组合类似,因此本文确定的钻孔底界年龄应该是可靠的。磁极性变化明显呈 4 段,M/B 界线约在 143.0 m,Ga/M 界线约在 219.0 m,Gi/Ga 界线约在 296.6 m,Gilbert 负极性时底界约在 369.6 m。其中,M/B 界线与邻区 Ch-1 孔(Chen *et al.*, 1997)、SG7 孔(王张华等,2008)、PD-99 孔(Yang *et al.*, 2006)、CJ1 孔(Duan *et al.*, 2016)等基本相当,比奉贤 DY03 孔(黄湘通等,2008)深,比 DZS2 孔(邹亮等,2015)浅(图 1)。Ga/M 和 Gi/Ga 界线与邻区差别较大,但与部分学者对一些钻孔的划分相当(邢历生等,1986;于振江等,2004)。上述极性分段与沉积构造变化特征总体一致。143.0 m 左右以下沉积物呈比较明显的杂色特征,钙质结核、条带等比较发育;219.0 m 左右以下,钙质结核、条带已明显减少;296.0 m 左右以下沉积物呈褐黄、灰绿、黄绿色。此外,明显存在 Jaramillo、Olduvia、Kaena 和 Mammoth 等较可靠的极性亚时事件。

磁化率变化明显呈 7 段,0.7~13.6 m 磁化率平

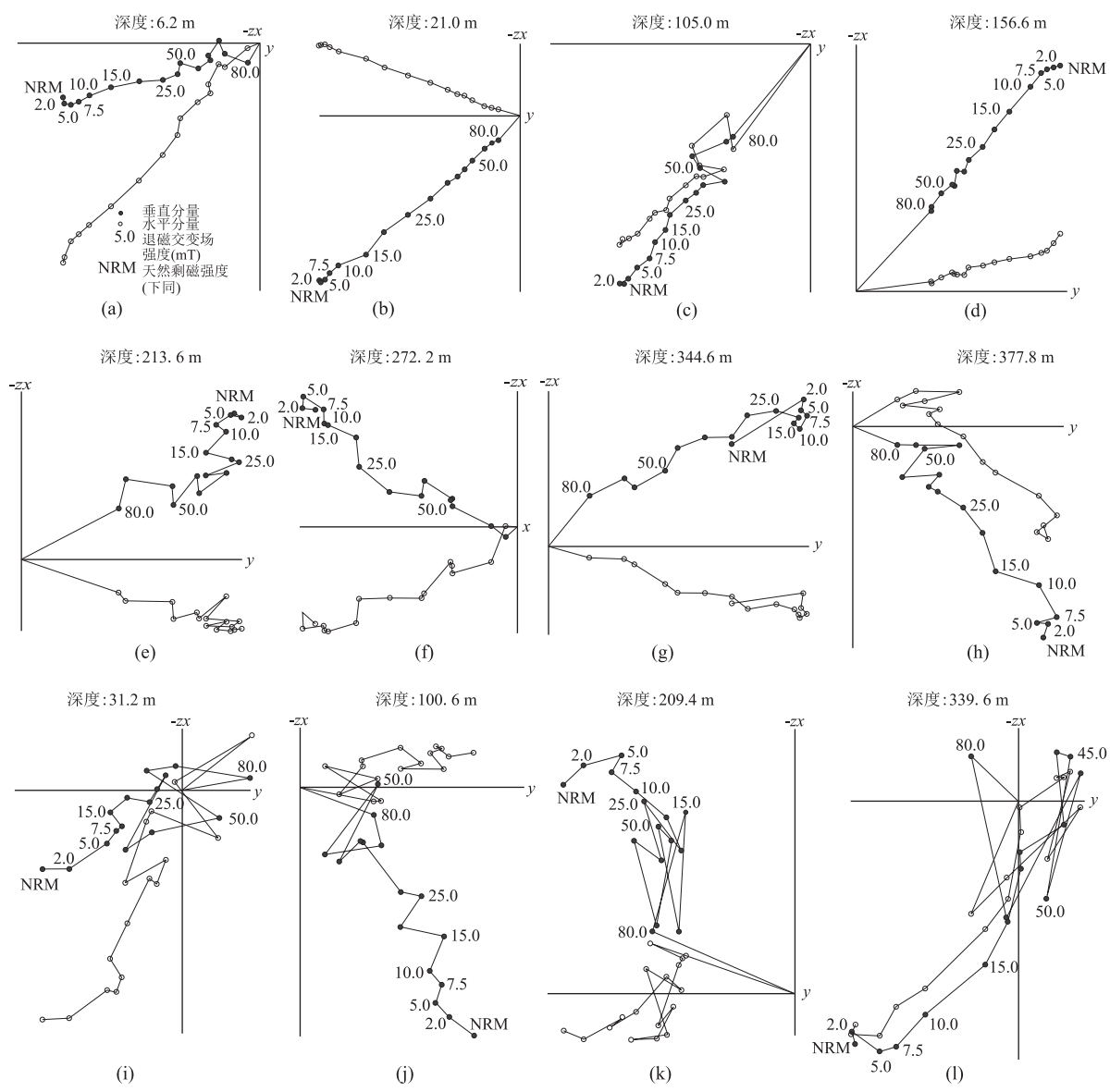


图 3 LZK1 孔代表性样品退磁曲线的正交矢量投影

Fig.3 Orthogonal vector projection of typical samples of borehole LZK1

均值 $34.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$; 13.6~30.4 m 磁化率平均值 $16.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 波动比较小; 30.4~82.2 m 磁化率平均值 $40.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$; 82.2~138.2 m 磁化率平均值 $13.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$; 138.2~226.8 m 磁化率平均值 $10.4 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 为全孔次低值; 226.8~291.0 m 磁化率平均值 $39.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 为全孔次高值, 波动较大, 但频率磁化率波动较小; 291.0 m 以下磁化率平均值 $9.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 为全孔最低值, 波动较小. 磁化率与频率磁化率之间总体呈明显的负相关关系. 相比磁化率, 频率磁化率的细节变化丰富得多, 高低峰值呈有规律的变化. 古地磁极性时的主要界线深度与磁化率的变化阶段基本对应, 这与区域上很多钻孔的类似特征一致(王润

华等, 2005).

3.3 初始年代模型的建立及沉积速率变化

以 ^{14}C 、OSL 和较可靠的磁性地层界线为控制点, 采用线性内插的方法建立钻孔的初始年代模型(图 5a), 并按照深度-年代关系计算了不同阶段的平均速率(图 5b). 结果显示, 平均沉积速率变化具有明显的阶段性. 晚更新世以来(约 107.0 m 以浅)沉积速率较高, 总体呈阶段性增大的趋势, 晚全新世达到最大, 平均可达 4.1~8.5 m/ka; 但在冰后期早期(42.0 m 左右)、末次间冰期晚期到末次冰期初期(87.0 m 左右)为低值段, 这表明该时期可能存在一定的沉积缺失. 晚更新世以前, 平均沉积速率整体波动不大, 其中在 1076~1 787 ka 和 5232~6 033 ka

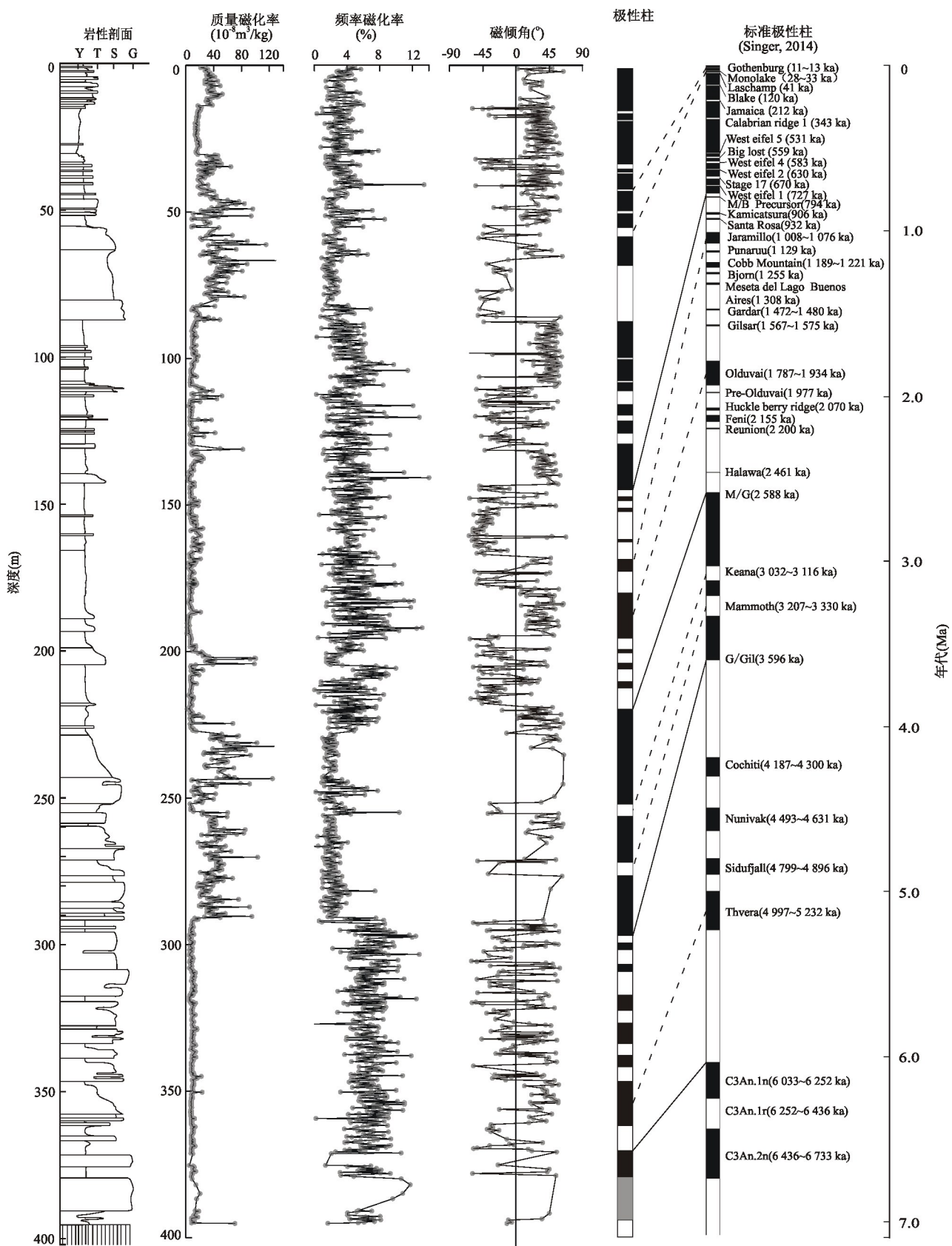


图 4 LZK1 孔柱状、质量(频率)磁化率和极性对比

Fig.4 Lithologic column, curves of mass susceptibility and frequency dependent susceptibility of borehole LZK1, polarity with the correlation to the GPTS 2012

GPTS 引自 Gradstein *et al.* (2012); 岩性剖面中岩性同图 2

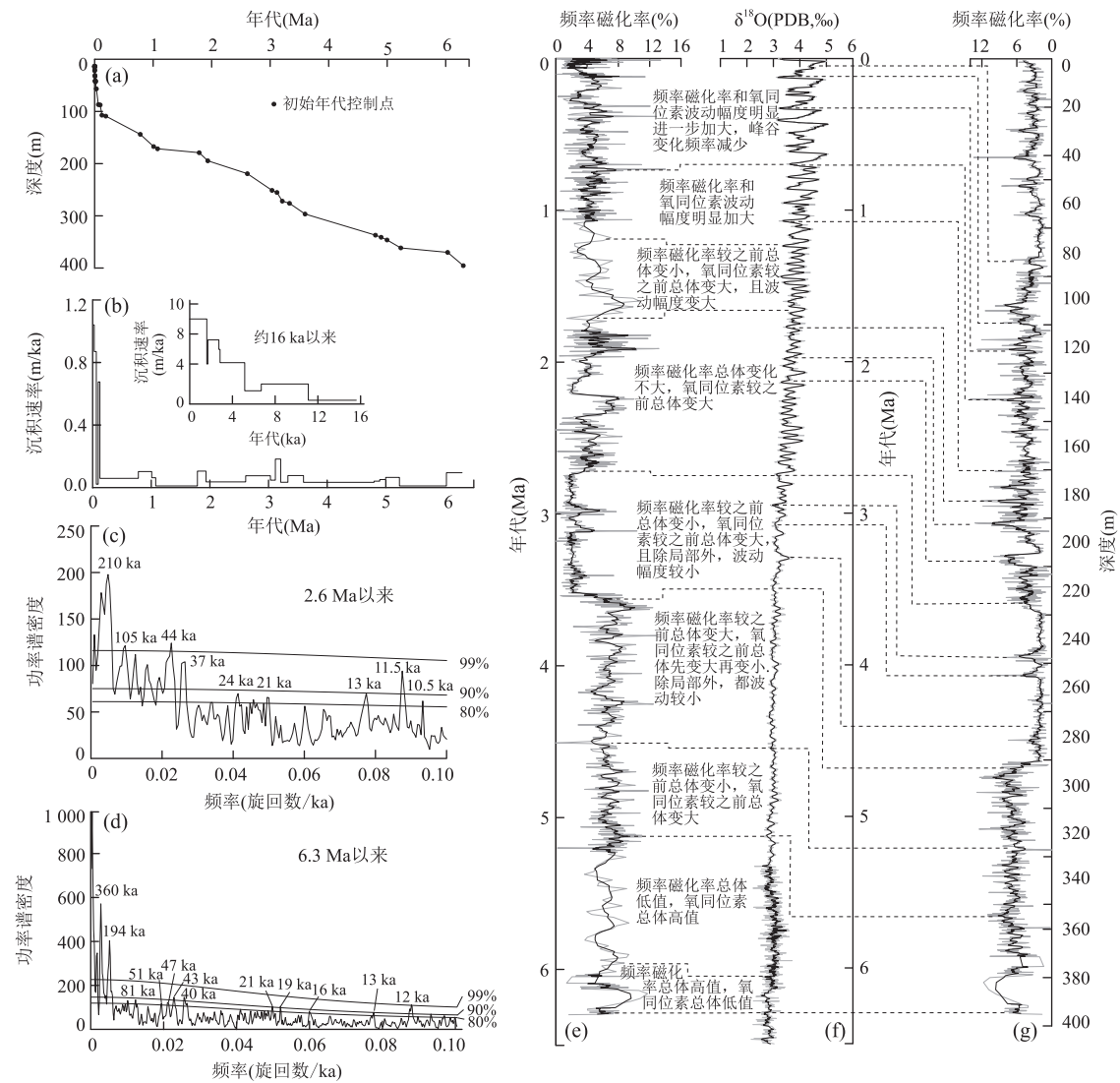


图 5 LZK1 孔初始年代模型、沉积速率及频谱分析、深海氧同位素对比

Fig.5 Curves of initial time scale and sedimentary rate, spectrum analysis and χ_{td} of borehole LZK1, comparison with marine oxygen isotope

黑色粗线为 5 点滑动平均曲线,0~5.3 Ma 氧同位素数据引自 Lisiecki and Raymo(2005);其他引自 Zachos *et al.*(2001)

间极低,约 0.011 m/ka,其他段多约 0.03~0.07 m/ka,3 116~3 207 ka(255.0~270.0 m 左右)和 6 033 ka 以前(370.0 m 以深)稍大,可达 0.18 m/ka、0.1 m/ka.

沉积环境对沉积速率具有明显控制作用.区内中新世晚期以冲积扇为主,距今 6 Ma 左右,由扇中演化为扇端,沉积速率明显降低.中上新世之交至早更新世早期,整体为一套河流沉积,沉积速率相对较高.早更新世中期为滨湖泥滩沉积,铁锰质和钙质结核、团块和条带十分发育,显示经历频繁的暴露,比早期的滨湖沙滩和早更新世晚期一中更新世早期的浅湖沉积的沉积速率明显低.中更新世末期,由湖泊演化为河流沉积,冲刷面发育,沉积不连续,沉积速

率再次迅速降低.末次间冰期早期,转化为湖泊—浅海沉积,沉积速率迅速增大;约 95~63 ka,河道滞留沉积和冲刷面发育,存在明显地层缺失.约 63 ka 以来,以河床沉积为主,沉积速率再次迅速升高.冰后期早期演化为河口湾,沉积速率相对明显下降.全新世以来,沉积速率再次明显迅速增高.

3.4 频率磁化率的气候指示意义

除黄土沉积外,对湖泊和河流、近海等沉积物中磁化率指标的气候指示意义具有相反的认识(吉云平和夏正楷,2007),应用中需具体分析.在区内,通常认为磁化率高值指示冷干气候,低值指示暖湿气候(舒强,2004;王润华等,2005;王张华等,2008;徐方建等,2011).相比磁化率,频率磁化率对样品中

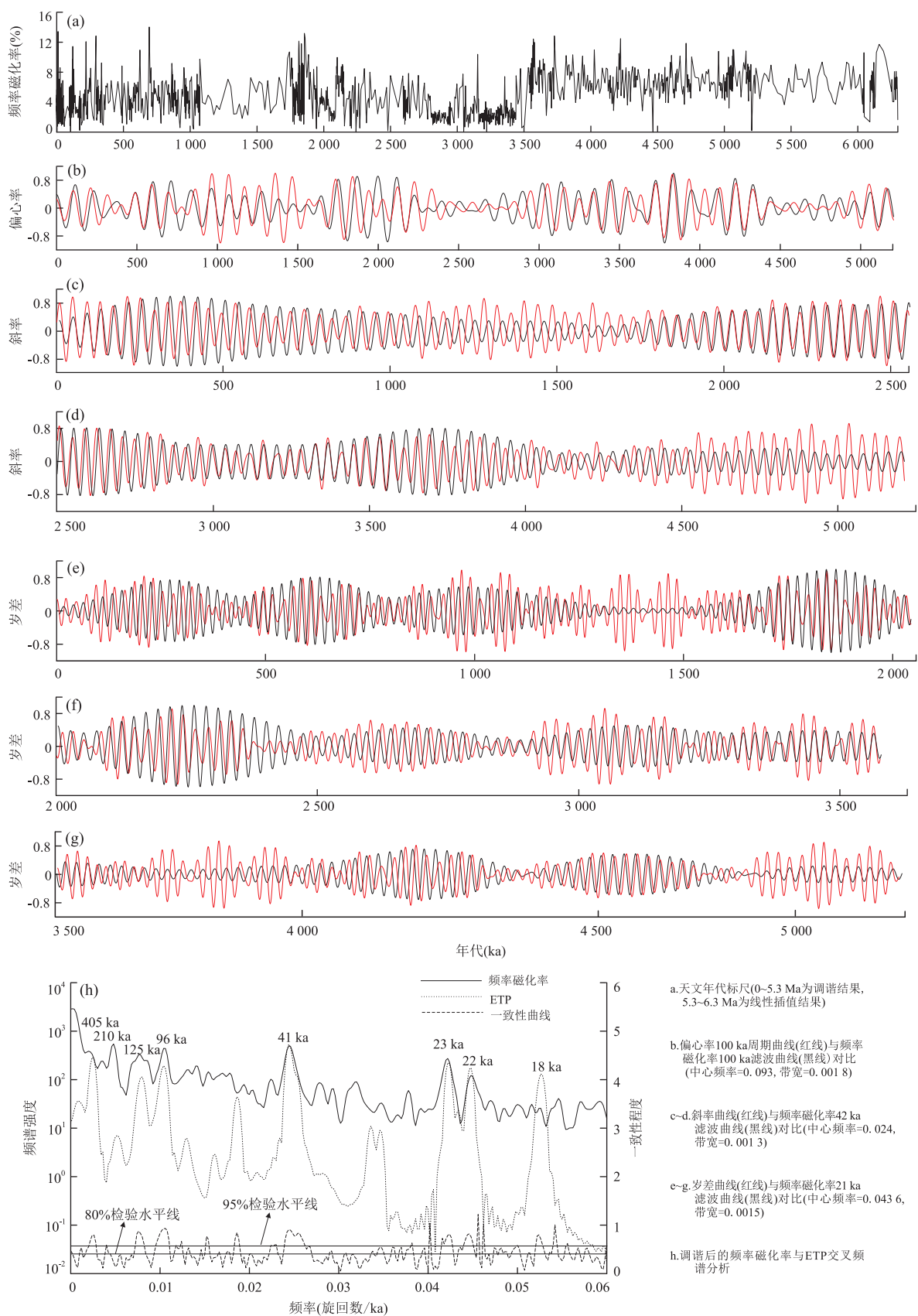


图 6 LZK1 孔天文年代标尺和频率磁化率滤波与轨道参数对比、与 ETP 交叉频谱分析

Fig.6 Astronomically tuned time scale, comparison between χ_{ld} band-pass filtering curves and the orbital parameters, and cross spectrum analysis with ETP, of borehole LZK1

的超顺磁超细晶粒比较敏感,更能记录古气候波动的细节(张振克等,1998;张玉芬,2016)。温湿程度较高、持续时间较长的成壤或化学作用,有利于超顺磁超细晶粒的形成(强小科,2003)。初始年代标尺显示,本剖面频率磁化率的变化趋势、阶段与深海氧同位素的变化特征总体上具有一致性,多数对应点年龄偏差在10~20 ka。频率磁化率的峰值和变大趋势分别对应于氧同位素的低值和变低趋势,反之亦然(图5e、5f)。这在一定程度上指示本剖面的频率磁化率具有明确的气候意义,同时表明上述建立的初始年代模型是可信的。从沉积特征和地层年代看,44.1~87.3 m、108.2~111.8 m为MIS2-4、MIS6沉积,频率磁化率为相对的低值。87.3~108.2 m为MIS5沉积,频率磁化率为相对的高值。296~346.4 m沉积物多呈褐黄、灰绿、黄绿色,为明显的湿热、弱还原-弱氧化环境沉积,而该阶段频率磁化率为明显的高值。这些与上述总体变化特征显示的气候指示意义相一致。因此,区内频率磁化率应该可以用作气候代用指标,高值指示暖湿气候,低值指示冷干气候,与通常认为的频率磁化率气候指示意义一致(张振克等,1998)。由于剖面中磁化率与频率磁化率的总体反相关系,频率磁化率的气候指示意义与上述区内通常对磁化率的气候意义认识也相一致。

3.5 轨道调谐和年代标尺的建立

长江三角洲及邻区松散沉积记录了轨道、亚轨道尺度的气候周期,且轨道尺度的气候变化与森林火发生的频率关系密切(Yao *et al.*, 2014; Miao *et al.*, 2015, 2016; Shi *et al.*, 2016)。基于初始年代模型的频率磁化率频谱分析明显显示,本剖面具有轨道尺度的气候周期,且在第四纪及其以前略有差异(图5c、5d)。按磁性地层框架计算,本次磁化率数据的平均时间分辨率约为4 ka,但在168.0~181.0 m、360.0~370.0 m间较低,分别约为16 ka、21 ka。这都表明该剖面频率磁化率数据具有进行轨道调谐建立更精确天文年代标尺的基础和条件。

ETP决定了北半球高纬度太阳辐射量的变化,进而影响全球冰量的变化。峰值代表北半球夏季辐射量的最大值,变低表示全球冰量的增加和降温。因此,ETP的峰值应对应于本文剖面频率磁化率的高值,指示暖湿气候。调谐过程中,通过深海氧同位素低值与频率磁化率曲线高值的对比,新确定了上新世以来15个深度-年代对应点(图5f、5g)。以上述对应点和80.0 m以浅的光释光和 ^{14}C 年龄为新的控制点,进一步将ETP曲线的峰值与频率磁化率曲线

的峰值进行了匹配。该过程中只对明显和规律的峰值进行匹配,忽略杂乱的次峰和波动较小的峰,尤其是在170.0~177.0 m、227.0~243.0 m和340.0~345.0 m三段。经多次比对和检验、调整,最终建立了剖面的天文年代标尺(图6a)。

4 天文年代标尺评价和极性漂移事件认识

中-上新世以来,邻区苏北-南黄海盆地发生大面积拗陷,现长江口地区位于该沉降中心边缘(Chen and Stanley, 1995; 舒强, 2004)。自接受沉积以来,区域上基本表现为一连续沉积区,无长时间的大规模沉积间断(王润华等, 2005)。本文剖面沉积特征显示,区内上新世之前地层缺失时间可能稍长,上新世以来沉积速率具有波动,但阶段性明显,旋回特征清楚。在砂、泥突变层位和粗粒层之间的冲刷面,可能代表一定的地层缺失,但从87.0 m上下的测年资料分析,这种缺失应该多在一个岁差到斜率周期左右。

本次仅针对上新世以来沉积地层开展轨道调谐,调谐过程中忽略了上述短尺度的沉积缺失。尽管这会影响到调谐的结果,但在5 Ma的尺度内,一个岁差到斜率周期误差在可以接受的范围之内,短尺度的地层缺失对于整体并无太大影响(田军等, 2005)。

4.1 磁化率滤波曲线与轨道参数的对比

气候指标的滤波曲线与目标曲线对比、与目标曲线的交叉频谱分析是评估天文年代标尺可靠性的常用方法。本文年代标尺100 ka、41 ka和23 ka周期的带通滤波曲线与相应轨道参数在振幅和相位上总体吻合较好(图6b~6g)。100 ka周期的滤波曲线与偏心率曲线振幅变化基本一致,并未出现部分学者提出的布容期以前两者匹配较差的现象(丁仲礼等, 1991; 韩志勇和李徐生, 2006; 张茂恒, 2009);但在1850~2050 ka、2300~3050 ka、4450~4850 ka段存在轻微的相位移,个别呈反相。此外,在通常划定的中更新世气候转型时段之后,并未发现100 ka周期增强的信号。这与低纬度亚洲季风区石笋氧同位素、孢粉、粘土矿物、赤铁矿/针铁矿等指标具有很强的岁差周期和较弱的偏心率周期记录相一致(Ao *et al.*, 2011)。41 ka周期的滤波曲线与斜率曲线相比主要是存在轻微的相位移,但在1050~1700 ka、4500~5200 ka间的滤波曲线的振幅较弱,且相位

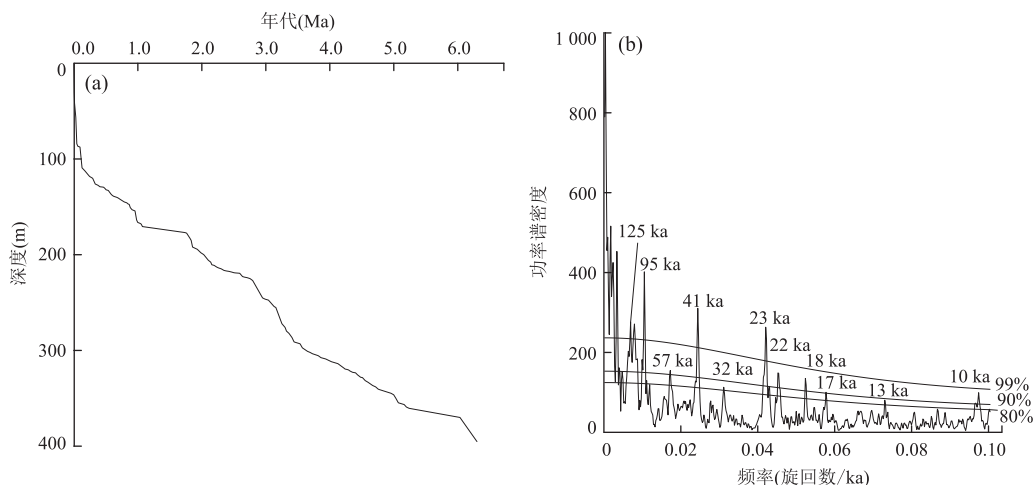


图 7 LZK1 孔基于天文年代标尺的频率磁化率频谱分析及深度—时间对应曲线

Fig.7 Spectrum analysis of χ_{fd} based on astronomically tuned time scale and the depth-time curve of borehole LZK1

移稍加大,23 ka 周期的滤波曲线与岁差曲线相比除在 1 200~1 600 ka、3 700~3 900 ka 和 4 900 ka 以后滤波曲线的振幅明显较强外,振幅较吻合,也主要表现为局部的相位移,但相比偏心率和斜率,位移稍明显.尤其是在 450 ka、850~1 600 ka、2 500~2 600 ka、3 100~3 300 ka、3 700 ka 以后,局部呈反相.岁差周期的相位移,可能与调谐方法有关(田军等,2005),也可能受较短尺度上沉积速率的变化较大影响(袁林旺等,2003).本剖面沉积层序和调谐后的年代模型显示,明显的相位移和振幅偏差段主要发生在低沉积速率、沉积速率突变或冲刷面发育层位(图 2,图 7a).

4.2 频率磁化率滤波曲线与 ETP 的交叉频谱分析

一个成功的调谐应使 ETP 和调谐后的气候曲线具有很好的相关性,通常应超过 95% 的检验标准(Brüggemann,1992).交叉频谱显示,本次调谐后的频率磁化率呈现了显著的偏心率(125 ka 和 96 ka)、斜率(41 ka)和岁差(23 ka、22 ka 和 18 ka)等轨道周期,且与 ETP 高度相关,相关性都超过了 95% 检验标准(图 6h).此外,还显示了 57 ka、32 ka、17 ka、13 ka 等周期特征(图 7b).气候周期的小幅变化可能与沉积物的供给、沉积速率的波动有关(Nádor *et al.*,2003).调谐后轨道周期峰值大多呈现较强的窄峰,表明本剖面的调谐过程已在相当程度上再现了轨道周期性在气候记录中的节拍(袁林旺等,2003).

结合滤波分析和交叉频谱分析结果,本文的轨道调谐结果总体上应该是可信的.

磁性地层显示,在布容、松山、高斯和吉尔伯特极性时中至少存在 29 个反向磁化层,天文年代标尺

显示约 17.0 m、32.2~33.8 m、41.0 m、54.0~57.0 m、67.0~86.0 m、107.0 m、146.0~147.5 m、150.0~151.0 m、161.0~162.0 m、168.0~172.0 m、179.0~195.0 m、209.5~212.0 m、251.5~255.0 m、271.0~276.0 m、338.0~341.0 m、346.5~361.0 m 等 16 个深度的反向磁化层与相关的极性漂移事件、极性(亚)时比较接近(李培英等,1999; Singer, 2014),值得进一步研究.

5 结论

(1)剖面垂向上划分为 213 个小层,15 个大层,沉积旋回特征清楚,经历了冲积扇、辫状河、曲流河、湖泊、曲流河、湖泊、滨海、曲流河、河口湾、浅海、三角洲等沉积阶段,沉积速率变化与沉积环境密切相关,呈现明显的阶段性.晚更新世以来沉积速率较高,晚全新世达到最大,平均可达 4.1~8.5 m/ka;晚更新世以前,平均沉积速率整体波动不大.在 1 076~1 787 ka 和 5 232~6 033 ka 间极低,约 0.011 m/ka.

(2)M/B 界线埋深约在 143.0 m、Ga/M 界线埋深约在 219.0 m、Gi/Ga 界线埋深约在 296.6 m.磁化率变化明显呈七段,在每段内变化比较平稳.频率磁化率与磁化率总体呈负相关关系,且高低峰值呈有规律的变化,细节变化丰富,在区内可以作为气候代用指标,高值指示暖湿气候,低值指示冷干气候.

(3)调谐后的频率磁化率显示了典型的 125 ka、96 ka、41 ka、23 ka、22 ka 和 18 ka 轨道周期,且都与 ETP 曲线高度相关,超过了 95% 的检验标准.轨道

周期的带通滤波曲线与偏心率、斜率和岁差在振幅和相位上总体吻合较好,但局部时间段具有差异,可能受低沉积速率或沉积速率的突变等因素有关。上述检验显示,本文建立的新世以来的天文年代标尺总体应该是可信的,同时表明在具有短暂沉积缺失的持续沉降区域,只要保证样品的分辨率,可以通过轨道调谐方法建立可靠的年代框架。

(4)约 17.0 m、32.2~33.8 m、41.0 m、54.0~57.0 m、67.0~86.0 m、107.0 m、146.0~147.5 m、150.0~151.0 m、161.0~162.0 m、168.0~172.0 m、179.0~195.0 m、209.5~212.0 m、251.5~255.0 m、271.0~276.0 m、338.0~341.0 m、346.5~361.0 m 等 16 个深度的反向磁化层与相关极性漂移事件、亚时比较接近。

References

- Ao, H., Dekkers, M. J., Qin, L., 2011. An Updated Astronomical Timescale for the Plio-Pleistocene Deposits from South China Sea and New Insights into Asian Monsoon Evolution. *Quaternary Science Reviews*, 30 (13–14): 1560–1575. doi:10.1016/j.quascirev.2011.04.009
- Brüggemann, W., 1992. A Minimal Cost Function Method for Optimizing the Age-Depth Relation of Deep-Sea Sediment Cores. *Paleoceanography*, 7(4): 467–487. doi:10.1029/92PA01235
- Chen, Z. Y., Chen, Z. L., Zhang, W. G., 1997. Quaternary Stratigraphy and Trace-Element Indices of the Yangtze Delta, Eastern China, with Special Reference to Marine Transgressions. *Quaternary Research*, 47(2): 181–191. doi:10.1006/qres.1996.1878
- Chen, Z. Y., Stanley, D. J., 1995. Quaternary Subsidence and River Channel Migration in the Yangtze Delta Plain, Eastern China. *Journal of Coastal Research*, 11(3): 927–945.
- Ding, Z. L., Yu, Z. W., Liu, D. S., 1991. Progress in Loess Research (Part 3): Time Scale. *Quaternary Sciences*, (4): 336–348 (in Chinese with English abstract).
- Duan, Z. Q., Liu, Q. S., Shi, X. F., et al., 2016. Reconstruction of High-Resolution Magnetostratigraphy of the Changjiang (Yangtze) River Delta, China. *Geophysical Journal International*, 204(2): 948–960. doi:10.1093/gji/ggv497
- Gao, Z. Y., 2007. Correlation of Parasequence and Short-Term Base Level Cycles in River Facies: A Case of the Xujiahe Formation in Central Sichuan. *Acta Geologica Sinica*, 81 (1): 109–118 (in Chinese with English abstract).
- Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D., et al., 2012. The Geologic Time Scale 2012. Elsevier, Amsterdam, 1–1176.
- Han, Z. Y., Li, X. S., 2006. Orbitally Tuned Time Scale Based on Climate Proxy Indicator of Grain Size Distribution in Nihewan Basin. *Earth Science*, 31 (6): 773–779 (in Chinese with English abstract).
- Ho, K. S., Chen, J. C., Lo, C. H., et al., 2003. ⁴⁰Ar–³⁹Ar Dating and Geochemical Characteristics of Late Cenozoic Basaltic Rocks from the Zhejiang-Fujian Region, SE China: Eruption Ages, Magma Evolution and Petrogenesis. *Chemical Geology*, 197(1–4): 287–318. doi:10.1016/S0009-2541(02)00399-6
- Huang, X. T., Zheng, H. B., Yang, S. Y., et al., 2008. Magnetostratigraphy and Its Applications of Core DY03 in the Yangtze River Delta. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 28(6): 87–93 (in Chinese with English abstract).
- Imbrie, J., Hays, J. D., Martinson, D. G., et al., 1984. The Orbital Theory of Pleistocene Climate: Support from a Revised Chronology of the Marine $\delta^{18}\text{O}$ Record. In: Berger, A., Hays, J., Kukla, G., et al., eds., *Milankovitch & Climate: Understanding the Response to Astronomical Forcing*. D. Reidel Publishing Co., Norwell, 269–305.
- Ji, Y. P., Xia, Z. K., 2007. Comparison and Primarily Interpretation of Magnetic Susceptibilities in Different Sediments. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(6): 541–549 (in Chinese with English abstract).
- Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., et al., 2004. A Long-Term Numerical Solution for the Insolation Quantities of the Earth. *Astronomy & Astrophysics*, 428 (1): 261–285. doi:10.1051/0004-6361:20041335
- Li, P. Y., Wang, Y. J., Liu, Z. X., 1999. Chronostratigraphy and Deposition Rate in the Okinawa Trough. *Science in China (Series D)*, 29(1): 50–55 (in Chinese).
- Li, X. C., Sun, B. N., Xiao, L., et al., 2014. Stratum Characteristics of the Neogene Shengxian Formation in Zhejiang Province and Its Related Fossil Studies. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 50(2): 145–153 (in Chinese with English abstract).
- Lisiecki, L. E., Raymo, M. E., 2005. A Pliocene-Pleistocene Stack of 57 Globally Distributed Benthic $\delta^{18}\text{O}$ Records. *Paleoceanography*, PA1003. doi:10.1029/2004PA001071
- Miao, Y. F., Fang, X. M., Song, C. H., et al., 2016. Late Cenozoic Fire Enhancement Response to Aridification in Mid-Latitude Asia: Evidence from Microcharcoal Records. *Quaternary Science Reviews*, 139: 53–66. doi:10.1016/j.quascirev.2016.02.030
- Miao, Y. F., Zhang, P., Lu, S. M., et al., 2015. Late Quaternary Pollen Records from the Yangtze River Delta, East China, and Its Implications for the Asian Monsoon Evolution. *Arabian Journal of Geosciences*, 8 (10): 7845–

- 7854.doi:10.1007/s12517-015-1777-8
- Nádor, A., Lantos, M., Tóth-Makk, Á., et al., 2003. Milankovitch-Scale Multi-Proxy Records from Fluvial Sediments of the Last 2.6 Ma, Pannonian Basin, Hungary. *Quaternary Science Reviews*, 22(20): 2157–2175. doi: 10.1016/S0277-3791(03)00134-3
- Püspöki, Z., Demeter, G., Tóth-Makk, Á., et al., 2013. Tectonically Controlled Quaternary Intracontinental Fluvial Sequence Development in the Nyírség-Pannonian Basin, Hungary. *Sedimentary Geology*, 283: 34–56. doi: 10.1016/j.sedgeo.2012.11.003
- Qiang, X.K., An, Z.S., Chang, H., 2003. Paleoclimatic Implication of Frequency-Dependent Magnetic Susceptibility of Red Clay Sequences in the Jiaxian Profile of Northern China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 23(3): 91–96 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J.B., Li, X., 2007. Quaternary Stratigraphy and Sedimentary Environment of Shanghai Area, Shanghai Scientific & Technical Publishers, Shanghai (in Chinese).
- Shi, X.F., Yao, Z.Q., Liu, Q.S., et al., 2016. Sedimentary Architecture of the Bohai Sea China over the Last 1 Ma and Implications for Sea-Level Changes. *Earth & Planetary Science Letters*, 451: 10–21. doi: 10.1016/j.epsl.2016.07.002
- Shu, Q., 2004. Study on the Changes of Palaeoenvironment and Palaeoclimate during the Past 3 Ma Recorded in Xinghua Core at Northern Jiangsu Basin (Dissertation). Nanjing Normal University, Nanjing (in Chinese with English abstract).
- Singer, B. S., 2014. A Quaternary Geomagnetic Instability Time Scale. *Quaternary Geochronology*, 21: 29–52. doi: 10.1016/j.quageo.2013.10.003
- Tian, J., Wang, P.X., Cheng, X.R., et al., 2005. Astronomically Tuned Time Scale 12 Ma–18.3 Ma, ODP Site 1148, Northern South China Sea. *Earth Science*, 30(5): 513–518 (in Chinese with English abstract).
- Tian, Q. C., 2012. Climate Variations Documented by Lake Sediments in the Hinterland of Tibetan Plateau since Mid-Pleistocene. Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Wang, R. H., Guo, K. Y., Yu, Z. J., et al., 2005. Quaternary Magneto-Stratigraphy of the Yangtze Delta Area. *Journal of Stratigraphy*, 29(Suppl.): 612–617 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.H., Zhang, D., Li, X., et al., 2008. Magnetic Properties and Relevant Minerals of Late Cenozoic Sediments in the Yangtze River Delta and Their Implications. *Geology in China*, 35(4): 670–682 (in Chinese with English abstract).
- Wu, H.C., Zhang, S.H., Feng, Q.L., et al., 2011. Theoretical Basis, Research Advancement and Prospects of Cyclostratigraphy. *Earth Science*, 36(3): 409–428 (in Chinese with English abstract).
- Wu, H.C., Zhang, S.H., Jiang, G.Q., et al., 2013. Astrochronology of the Early Turonian-Early Campanian Terrestrial Succession in the Songliao Basin, Northeastern China and Its Implication for Long-Period Behavior of the Solar System. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385: 55–70. doi: 10.1016/j.palaeo.2012.09.004
- Wu, S.Y., Liu, J., 2015. Characteristics of Milankovitch Cycle in Eocene Formation, Eastern Depression of the North Yellow Sea Basin. *Earth Science*, 40(11): 1933–1944 (in Chinese with English abstract).
- Xing, L.S., Xu, S.J., Zhang, J.X., 1986. Division of Quaternary Magnetostratigraphy in the Yangtze Delta Area. *Bulletin of the Institute of Geomechanics CAGS*, (8): 89–95 (in Chinese with English abstract).
- Xu, F.J., Li, A.C., Li, T.G., et al., 2011. The Paleoenvironmental Significance of Magnetic Susceptibility of Sediments on the East China Sea Inner Shelf since the Last Deglaciation. *Acta Oceanologica Sinica*, 33(1): 91–97 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S.Y., Li, C.X., Yokoyama, K., 2006. Elemental Compositions and Monazite Age Patterns of Core Sediments in the Changjiang Delta: Implications for Sediment Provenance and Development History of the Changjiang River. *Earth & Planetary Science Letters*, 245(3–4): 762–776. doi: 10.1016/j.epsl.2006.03.042
- Yao, Z.Q., Shi, X.F., Liu, Q.S., et al., 2014. Paleomagnetic and Astronomical Dating of Sediment Core BH08 from the Bohai Sea, China: Implications for Glacial-Interglacial Sedimentation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 393: 90–101. doi: 10.1016/j.palaeo.2013.11.012
- Yu, Y.T., 2006. Mid-Pleistocene Climatic Transition (MPT) as Evidenced by a Sediment Record from Lake Gas Hure, Northwestern Qaidam Basin, Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Yu, Z.J., Zhang, Y.P., Wang, R.H., et al., 2004. The Division and Age of the Neogene Strata in the Yangtze Delta Area. *Journal of Stratigraphy*, 28(3): 257–264 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, L.W., Chen, Y., Liu, Z.C., 2003. Restudy on the Orbital Tuning Time Scale of Deep Core in Qaidam Basin. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science)*, 26(2): 87–93 (in Chinese with English abstract).
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., et al., 2001. Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science*, 292(5517): 686–693. doi: 10.1126/sci

science.1059412

Zhang, M. H., 2009. Sedimentary Infilling and Environmental Changes of the Northern Jiangsu Basin since Latest Miocene Recorded in Xinghua Cores. Nanjing Normal University, Nanjing (in Chinese with English abstract).

Zhang, P., Li, X. Q., Pan, M. B., et al., 2013. Magnetostratigraphy of Borehole SZ04 in the Yangtze River Delta and Its Implications. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31 (6): 1041—1049 (in Chinese with English abstract).

Zhang, P., Miao, Y. F., Zhang, Z. Y., et al., 2013. Late Cenozoic Sporopollen Records in the Yangtze River Delta, East China and Implications for East Asian Summer Monsoon Evolution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 388: 153—165. doi: 10.1016/j.palaeo.2013.08.014

Zhang, Y. F., Li, C. A., Sun, X. L., et al., 2016. Sediment Magnetism Characteristics and Its Climatic Environment Significance of Northeast Margin of Jiangnan Plain. *Earth Science*, 41 (7): 1225—1230 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Z. K., Wu, R. J., Wang, S. M., 1998. Implication of Magnetic Frequency Dependent Susceptibility on Environmental Variation from Lacustrine Sediment in Daihai Lake. *Geographical Research*, 17 (3): 297—302 (in Chinese with English abstract).

Zou, L., Zhang, Z. Z., Han, Y., 2015. Magnetostratigraphy of Core DZS2 off the Yangtze River Estuary. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 35 (2): 43—52 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

丁仲礼, 余志伟, 刘东生, 1991. 中国黄土研究新进展 (三) 时间标尺. 第四纪研究, 11 (4): 336—348.

高志勇, 2007. 河流相沉积中准层序与短期基准面旋回对比研究——以四川中部须家河组为例. 地质学报, 81 (1): 109—118.

韩志勇, 李徐生, 2006. 泥河湾盆地基于粒度气候指标的轨道调谐时间标尺. 地球科学, 31 (6): 773—779.

黄湘通, 郑洪波, 杨守业, 等, 2008. 长江三角洲 DY03 孔磁性地层研究及其意义. 海洋地质与第四纪地质, 28 (6): 87—93.

吉云平, 夏正楷, 2007. 不同类型沉积物磁化率的比较研究和初步解释. 地球学报, 28 (6): 541—549.

李培英, 王永吉, 刘振夏, 1999. 冲绳海槽年代地层与沉积速率. 中国科学 (D 辑), 29 (1): 50—55.

李相传, 孙柏年, 肖良, 等, 2014. 浙江新近纪嵊县组地层特征及其化石研究进展. 兰州大学学报 (自然科学版), 50

(2): 145—153.

强小科, 安芷生, 常宏, 2003. 佳县红粘土堆积序列频率磁化率的古气候意义. 海洋地质与第四纪地质, 23 (3): 91—96.

邱金波, 李晓, 2007. 上海市第四纪地层与沉积环境. 上海: 上海科学技术出版社.

舒强, 2004. 苏北盆地兴化钻孔近 3 Ma 环境变化记录研究 (博士学位论文). 南京: 南京师范大学.

田军, 汪品先, 成鑫荣, 等, 2005. 南海 ODP1148 站中新世 (12~18.3 Ma) 天文调谐的年代标尺. 地球科学, 30 (5): 13—518.

田庆春, 2012. 青藏高原腹地湖泊沉积物记录的中更新世以来的气候变化 (博士学位论文). 兰州: 兰州大学.

王润华, 郭坤一, 于振江, 等, 2005. 长江三角洲地区第四纪磁性地层学研究. 地层学杂志, 29 (增刊): 612—617.

王张华, 张丹, 李晓, 等, 2008. 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. 中国地质, 35 (4): 670—682.

吴怀春, 张世红, 冯庆来, 等, 2011. 旋回地层学理论基础、研究进展和展望. 地球科学, 36 (3): 409—428.

吴淑玉, 刘俊, 2015. 北黄海东部坳陷始新统米兰科维奇旋回特征. 地球科学, 40 (11): 1933—1944.

邢历生, 徐树金, 张景鑫, 1986. 长江三角洲地区第四纪磁性地层划分. 地质力学研究所所刊, (8): 89—95.

徐方建, 李安春, 李铁刚, 等, 2011. 末次冰消期以来东海内陆架沉积物磁化率的环境意义. 海洋学报, 33 (1): 91—97.

袁林旺, 陈晔, 刘泽纯, 2003. 柴达木盆地深钻孔轨道调谐时间标尺的再研究. 南京师大学报 (自然科学版), 26 (2): 87—93.

于永涛, 2006. 柴达木盆地西北缘尕斯库勒湖钻孔记录的中更新世气候转型 (博士学位论文). 兰州: 兰州大学.

于振江, 张于平, 王润华, 等, 2004. 长江三角洲 (江南) 地区新近纪地层划分及时代讨论. 地层学杂志, 28 (3): 257—264.

张茂恒, 2009. 中新世末期以来苏北盆地沉积环境演化的兴化钻孔记录 (博士学位论文). 南京: 南京师范大学.

张平, 李向前, 潘明宝, 等, 2013. 长江三角洲 SZ04 孔磁性地层研究及其意义. 沉积学报, 31 (6): 1041—1049.

张玉芬, 李长安, 孙习林, 等, 2016. 江汉平原东北缘麻城剖面磁化率特征及气候环境意义. 地球科学, 41 (7): 1225—1230.

张振克, 吴瑞金, 王苏民, 1998. 岱海湖泊沉积物频率磁化率对历史时期环境变化的反映. 地理研究, 17 (3): 297—302.

邹亮, 张志忠, 韩月, 2015. 长江口外海区 DZS2 孔第四纪磁性地层. 海洋地质与第四纪地质, 35 (2): 43—52.