

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017080104

# 全新世以来苏北平原里下河南部地区的沉积记录和环境演化

程瑜, 李向前, 赵增玉, 张平, 张祥云, 郭刚

江苏省地质调查研究院, 南京 210018

**摘要:**通过对里下河南部泰州地区 PM4 剖面样品的微体古生物鉴定及粒度分析, 结合 AMS<sup>14</sup>C 测年, 探讨了该地区全新世以来沉积环境的演化。研究表明, 全新世以来, 该地区的沉积环境经历了湖相、滨海沼泽、海湾、瀉湖、湖相 5 个阶段。11900~4850cal.aBP: 沉积物颜色为灰色-灰黑色, 颗粒较细, 为极正偏的尖峰态, 水动力条件较弱, 不含有孔虫和介形虫, 为湖相沉积; 4850~4250cal.aBP: 水动力增强及粗颗粒沉积物增加, 含有少量有孔虫, 为滨海沼泽; 4250~4050cal.aBP: 砂质成分急剧增加, 含有大量有孔虫, 位于黄桥沙坝的北汊道内, 为海湾沉积; 4050~1850cal.aBP: 粒度变细, 水动力减弱, 含有少量有孔虫及介形虫, 为瀉湖沉积; 1850~0cal.aBP: 粒度变细, 分选变好, 水动力条件较弱, 不含有孔虫, 含有少量介形虫, 为湖相沉积。

**关键词:** 粒度; 微体古生物; 沉积环境; 苏北平原

**中图分类号:** P736.2, P534.6 **文献标识码:** A

## Sedimentary and environment evolutionary records of the southern Lixiahe area in the Subei Plain during Holocene

CHENG Yu, LI Xiangqian, ZHAO Zengyu, ZHANG Ping, ZHANG Xiangyun, GUO Gang

The Institute of Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China

**Abstract:** The PM4 section, 3.4 m in thickness, occurs in the south of the Lixiahe Plain (32°34'N, 119°56'E). The section lithologically consists of silt, clay and sand. 170 samples every 2cm are taken for grain size analysis in addition to 7 samples for AMS <sup>14</sup>C dating and 86 samples every 4 cm for determination of foraminifera and ostracoda species. 5 stratigraphic units are identified from bottom to top according to the foraminifera and ostracoda assemblages, median grain size and other grain size parameters. The sediments from depth of 1.4~3.4 m or 11900~4850 cal.aBP are dominated by gray-black lacustrine deposits consisting mainly of silt, 83.9% on average. Clay and sand concentrations are 14.9% and 1.2%, respectively on average. Neither foraminifera nor ostracoda has been found. From the depth range of 1.1~1.4 m or 4850~4250 cal.aBP in age, the increase in silt and sand content indicates that water dynamics was intensified comparing to that in previous stage, suggesting an environment of coastal swamps. From 4250~4050 cal.aBP (1.14~0.98 m), sand sharply increased to 11.7%~15.3%, or 13.9% on average, indicating that the depositional environment was a bay behind the north branch of the Huangqiao sand bar. From 4050~1850 cal.aBP or from 0.98~0.68 m in depth, silt increased to 82.9%~88.6%, 86.3% on average, indicating that the hydrodynamics was weakened in that region. Foraminifera was rare, suggesting a lagoonal facies. During the period of 1850~0 cal.aBP (0.68~0 m): sand input was reduced to 1.0%~11.1% or 3.2% on average. No foraminifera is observed excluding small amount of ostracoda, suggesting a lacustrine environment.

**Key words:** grain size; micro-paleontology; sedimentary environment; Subei Plain

里下河平原位于苏北平原西部, 32°~33°30'N、119°~120°E, 面积约 1.2×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>, 地势低洼, 呈中间低、四周高的形态, 是全新世海退之后在河流、湖泊共同影响下所形成的平原<sup>[1]</sup>。末次冰消期以来,

中国东部的海平面上升了 150m<sup>[2]</sup>, 向西影响至洪泽湖一带<sup>[2,3]</sup>。学者对全新世以来里下河地区的海岸变迁及沉积环境做了部分工作<sup>[4-12]</sup>, 揭示了全新世以来里下河地区经历了浅水海湾-瀉湖-湖沼平原

**资助项目:** 中国地质调查局地质调查项目“特殊地质地貌区填图试点”(DD20160060); “江苏 1:5 万港口、泰县、张甸公社、泰兴县、生祠堂镇幅平原区填图试点”(12120114042901); 国家自然科学基金“苏北平原中部地区晚更新世海侵特征研究”(41502119)

**作者简介:** 程瑜(1989—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事古环境研究, E-mail: ftchengyu@msn.com

**收稿日期:** 2017-08-01; **改回日期:** 2018-04-26. 周立君编辑

的演化过程<sup>[1]</sup>,但研究主要集中在东部贝壳堤及东南部青墩遗址等地区,对里下河南部受长江影响的过渡带地区研究相对较少。

粒度是沉积物的属性之一,记录了搬运介质、地形条件、水动力条件、物源与沉积环境等综合信息。根据中值粒径、分选系数、平均粒径、峰态、偏态等方法可以判断沉积物的运移方式、水动力条件及沉积环境<sup>[13-17]</sup>。有孔虫的丰度可以简单地判断是否为海相地层,不同的种属组合也可为判断沉积环境提供一定的基础<sup>[18-20]</sup>。因此,本文在前人研究的基础上,通过对里下河南部 PM4 剖面的粒度组成、微体古生物的分析,结合 AMS<sup>14</sup>C 测年,并与已有的剖面进行对比研究,探讨了全新世以来里下河南部地区的沉积记录和环境演化,为苏北地区全新世海平面变化的研究提供基础资料。

## 1 剖面特征及样品测试

### 1.1 剖面特征

泰州 PM4 剖面(32°34'N、119°56'E)位于泰州市北侧 9km 的北大洲农场(图 1),2014 年 11 月,通过人工挖掘获得 3.4m 的剖面,对沉积物的物质成分、颗粒大小、沉积构造等进行描述记录(图 2),并按照 2cm 的间距采样,共获得样品 170 个。第 1 层:0~60cm,灰褐色粉砂质黏土,见植物根系,为现代耕作层;第 2 层:60~70cm,灰色含粉砂黏土,含少量贝壳碎片,可见完整螺壳,锈黄色铁质斑块零散分布;第 3 层:70~110cm,灰黄色粉砂,含有锈黄色铁质斑块及残留的植物根系,顶部含有姜结核;第 4

层:110~145cm,灰色粉砂质黏土,含有灰绿-浅灰色斑块、钙质结核及残留的植物根系;第 5 层:145~160cm,浅灰色含粉砂黏土,植物根系减少;第 6 层:160~250cm,灰黑色含粉砂黏土,零星见浑圆状钙质结核,含有较多残留的植物根系;第 7 层:250~340cm,深灰-灰黑色含粉砂黏土,零星见锈黄色铁质斑点及黑色有机质斑点,植物根系残留。

### 1.2 样品测试

剖面年代测试样品主要为腐殖质和有机质,共选取 7 个样品送往波兰 AMS<sup>14</sup>C 实验室进行测年,日历年龄通过 CAL. 7.1 软件<sup>[21]</sup>进行校正。

粒度的室内分样间距为 2cm,共获得 170 个粒度样品。粒度测量在中国科学院地球化学研究所实验室进行,采用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测量。粒度样品前处理方法的具体步骤为<sup>[22,23]</sup>:

根据样品的成分及粗细程度,称取 0.3~0.4g 样品放入烧杯,加入浓度为 10% 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 煮沸,去除沉积物中的有机质组分。再加入适量浓度为 10% 的 HCl 并煮沸,去除沉积物中的碳酸盐成分。给烧杯注满蒸馏水并静置 24h,抽去蒸馏水,加入 10mL 浓度 0.05mol/L 的 (NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>,并用超声波清洗机振荡 10min 后上机测试。计算样品的平均粒径、分选系数、偏态系数、峰态系数<sup>[24,25]</sup>。

微体古生物的分样间距为 4cm,共获得 86 个样品,微体古生物由中国地质科学院地质研究所鉴定。将样品晾干后,称取 50g 干样放入烧杯,然后加入浓度 13% 的双氧水泡 24h,倒入 200 目(直径 0.074mm)的筛子中用清水冲洗,将样品用水冲移到烧杯中,然后倒入装有滤纸的漏斗滤水,待样品滤

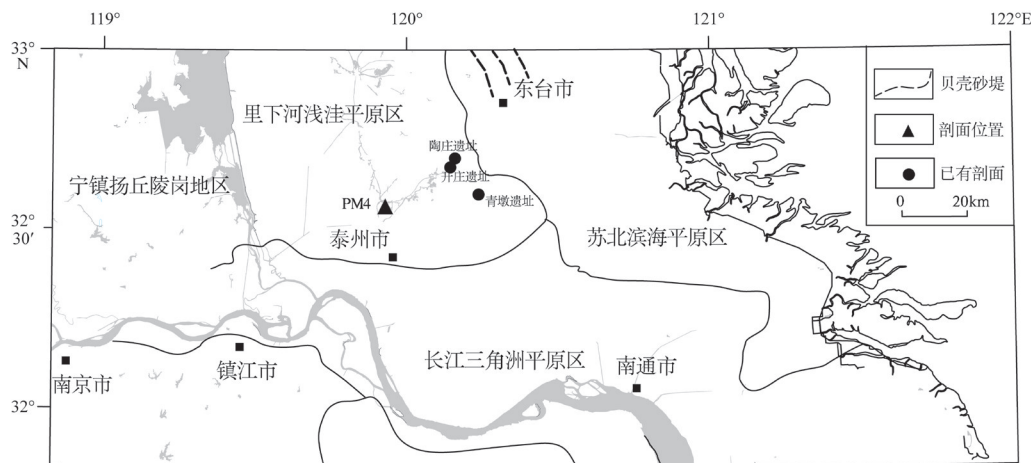


图 1 剖面位置图

Fig.1 Map showing the location of PM4 section

干和彻底干透后,进行每个种属的鉴定和统计。

## 2 结果

### 2.1 AMS<sup>14</sup>C 结果

PM4 共选取 7 个样品进行 AMS<sup>14</sup>C 测年,测年结果基本符合上新下老的沉积序列(表 1),但是 PM4-2 和 PM4-4 的年龄出现了倒转,PM4-4 中砂质成分增加,水动力增强,长江携带的粗颗粒沉积物影响到研究区,物源变广;PM4-2 中粉砂含量增加,砂质含量减少,物源发生了变化,测年的碳源有老碳的参与,故测试的数据偏老,去除这两个数据。根据剩下的 5 个测试年龄进行线性内插获得该剖面的时间标尺(图 2)。

### 2.2 沉积环境划分

根据粒度分级方案<sup>[26]</sup>,沉积物以粉砂为主,含有少量的黏土、砂,选用黏土(<2 $\mu\text{m}$ )、粉砂(2~63 $\mu\text{m}$ )、砂(>63 $\mu\text{m}$ )的百分含量、中值粒径、平均粒径、分选系数、偏度、峰态<sup>[27]</sup>(图 3)来表征粒度特征的变化,分析各类沉积环境水动力条件的变化。

PM4 剖面样品中 0.68~1.4m 含有少量的底栖有孔虫,底栖有孔虫丰度 1~40 枚/50g,简单分异度为 1~7,以广温广盐性浅水种 *Ammonia beccarii* var 的数量最为丰富,为 0~27 枚/50g,含有少量的 *Cribrononion* sp.、*Ammonia* spp.、*Nonion tisburyensis*、*Elphidium* sp.,丰度分别为 1~5、1~3、1~15、1~2 枚/50g,零星见 *Bolivina* sp.、*Cribrononion* sp.、

表 1 PM4 剖面 AMS<sup>14</sup>C 年代序列及 CAL. 7.1 校正结果

Table 1 AMS<sup>14</sup>C dating results of PM4 section

样品号	岩性	深度/cm	测年材料	AMS <sup>14</sup> C 年龄/aBP	校正年龄/cal.aBP(2 $\sigma$ )
PM4-1	灰色含粉砂黏土	60	腐殖质	1365 $\pm$ 30	1299 $\pm$ 39
PM4-2	灰黄色粉砂	78	有机质	5350 $\pm$ 50	6110 $\pm$ 112
PM4-3	灰黄色粉砂	100	有机质	3810 $\pm$ 35	4194 $\pm$ 106
PM4-4	灰色粉砂质黏土	112	有机质	4860 $\pm$ 40	5619.5 $\pm$ 41.5
PM4-5	灰色粉砂质黏土	122	有机质	3870 $\pm$ 35	4321 $\pm$ 95
PM4-6	灰色粉砂质黏土	136	有机质	4145 $\pm$ 35	4698.5 $\pm$ 128.5
PM4-7	深灰-灰黑色含粉砂黏土	338	腐殖质	10280 $\pm$ 50	11982 $\pm$ 209

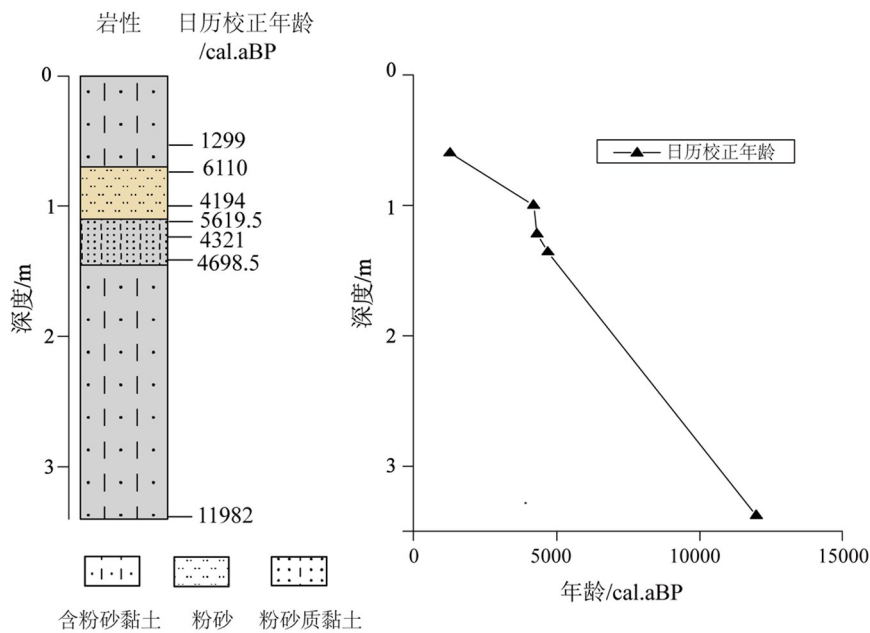


图 2 PM4 剖面岩性特征及年龄-深度图

Fig.2 Lithological stratigraphy of PM4 section based on AMS<sup>14</sup>C dating

*Pseudorotalia schroetariana*、*Ammonia limnetes*、*Cribronion incertum*、*Stomoloculina multangula*、*Nonion* sp.、*Fissurina* sp.、*Elphidiella* sp.、*Elphidium advenum*、*Florilus* sp.、*Epistominella naraensis*。与底栖有孔虫相比,浮游有孔虫数量及种类非常稀少,仅见 *Globigerina* sp. 和 *Globigerina bulloides*,丰度均为 0~1 枚/50g。在沉积物中,介形虫的含量为 0~12 枚/50g,以 *Candona* sp.、*Candoniella* sp.、*Ilyocypris* sp.、*Ilyocypris bradyi* 为主,丰度分别为 0~6、0~6、0~2、0~2 枚/50g,零星见 *Candona candida*、*Candoniella albicans*、*Ilyocypris gibba*、*Ilyocypris kaifengensis*、*Chlamydotheca* sp.。

根据东、南海沉积物中有孔虫分布资料<sup>[28-33]</sup>, *Ammonia beccarii* var 为喜暖的广盐度浅水种群,最佳生长和繁殖的温度是 25~30°C,深度是 0~20m。广泛分布于半咸水的环境中,如海湾、低盐潟湖等环境。

根据底栖有孔虫、浮游有孔虫、介形虫的种类、数量(图 4),结合岩性、粒度特征,将 PM4 剖面划分为 5 个阶段。

阶段 I : 3.4~1.4m(11900~4850cal. aBP): 沉积物以粉砂为主,变化范围为 80.1%~94.6%,平均值为 83.9%,含有少量的黏土和砂,变化范围分别为 4.3%~19.6%、0~5.6%,平均值分别为 14.9%、1.2%。中值粒径变化范围为 7.8~

15.2 $\mu$ m,平均值为 10.4 $\mu$ m。平均粒径整体较小,为 12.4~19.7 $\mu$ m,平均值为 15.5 $\mu$ m,分选系数为 1.16~1.92,平均值为 1.45,分选差,偏度为 1.02~1.68,平均值为 1.25,为极正偏,峰度为 0.3~2.8,平均值为 1.2,为尖峰态。沉积物颗粒较细,分选差,反映水动力条件较弱。其中 2.24~2.42m 中部分样品粉砂含量急剧增加至 94.6%~91.6%,黏土含量急剧减少至 4.3%~8.1%。本阶段不含有孔虫和介形虫,底样大部分为泥砂质颗粒和植物残渣,该阶段的岩性颜色为灰色-灰黑色,反映的是湖相沉积环境。

阶段 II : 1.4~1.14m(4850~4250cal. aBP): 沉积物中粉砂和砂含量增加,变化范围分别为 87.1%~89.7%、1.9%~5.9%,平均值为 88.9%、3.10%,黏土含量降低,平均值为 7.96%,变化范围为 6.9%~8.8%。中值粒径和平均粒径增大,变化范围分别为 16~21.6、20.0~25.7 $\mu$ m,平均值分别为 18.1、17.1 $\mu$ m。分选系数变大,为 1.53~1.87,平均值为 1.65,峰度变小,为 0.17~0.56,平均值为 0.34,为很平峰态,表明频率分布曲线变矮变宽,分选变差。偏度变小,为 0.8~1.0,平均值为 0.89,表明水动力条件增强及粗颗粒沉积物加入。本阶段有孔虫丰度值较低,为 1~4 枚/50g,简单分异度为 1~3,见 *Ammonia* spp.、*Ammonia beccarii* var.、*Nonion tisburyensis*,零星见浮游有孔虫 *Globigerina* sp.,不含虫管及介形虫。加双氧水后冒浓烟,表

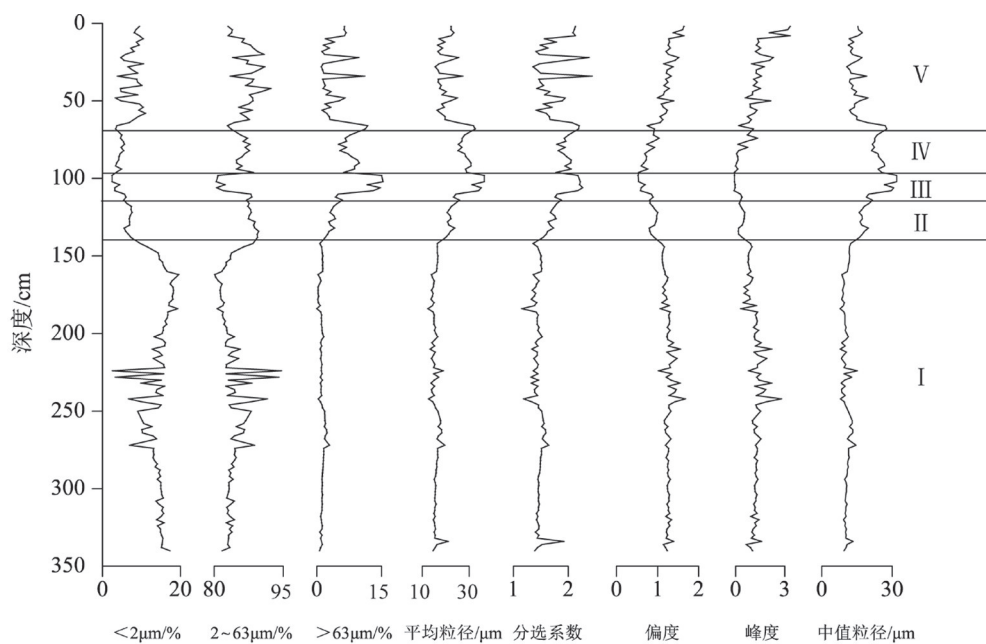


图 3 PM4 剖面黏土、粉砂、砂质、中值粒径及粒度参数垂向分布

Fig.3 Vertical distribution of clay, silt, sand, median size and other grain size parameters of PM4 section

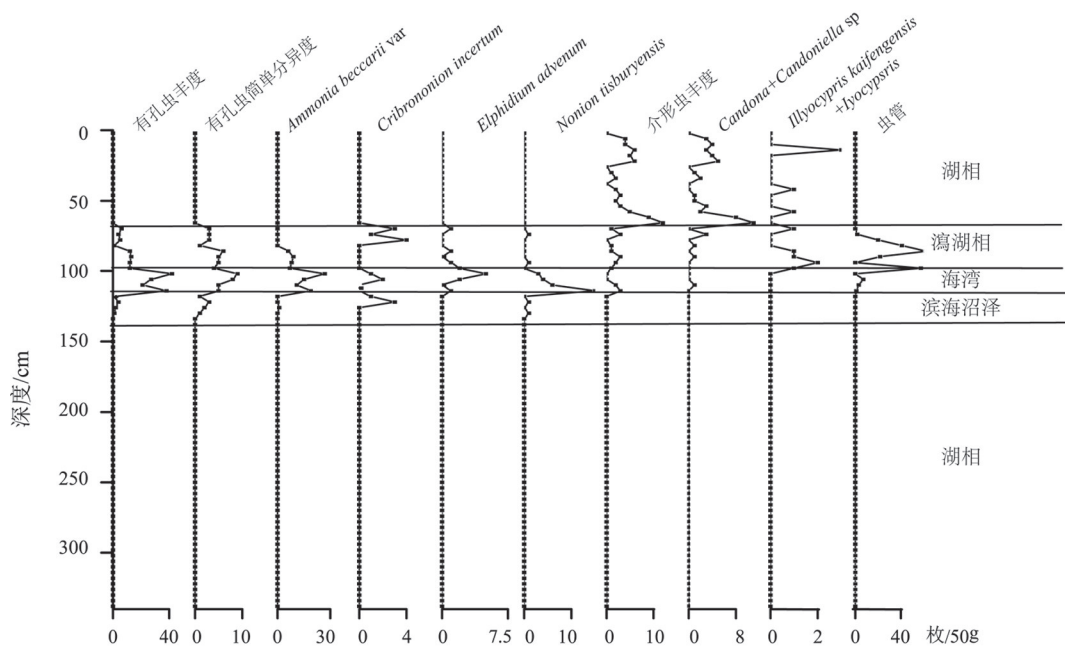


图 4 PM4 剖面有孔虫和介形虫垂向分布

Fig.4 The vertical distribution of foraminifera and ostracoda in the PM4 section

明碳含量高,反映的是滨海沼泽沉积环境。

阶段Ⅲ: 1.14~0.98m(4250~4050cal.aBP): 沉积物中砂质成分急剧增加,变化范围为 11.7%~15.3%,平均值为 13.9%,粉砂和黏土含量降低,变化范围分别为 80.4%~82.3%、4.2%~5.9%,平均值为 81.2%、4.82%。相比上一阶段,偏度和峰度变化不大;平均粒径、中值粒径值、分选系数增高,为 31.2~36.4 $\mu\text{m}$ 、26.6~32.0 $\mu\text{m}$ 、2.17~2.26,均值为 34.53 $\mu\text{m}$ 、30.09 $\mu\text{m}$ 、2.22,表明水动力增强,物质来源发生变化。有孔虫的丰度增高,为 21~42 枚/50g,简单分异度为 5~9,以 *Ammonia beccarii* var、*Nonion tisburyensis*、*Cribrononion* sp. 为主,丰度分别为 11~27、0~15、0~2 枚/50g,零星见 *Bolivina* sp.、*Cribrononion* sp.、*Ammonia* spp.、*Elphidiella* sp.、*Epistominella naraensis*、*Florilus* sp.;浮游有孔虫丰度为 0~2 枚/50g,为 *Globigerina* sp.和 *Globigerina bulloides*;含有大量虫管,为 0~7 枚/50g;介形虫丰度为 0~3,主要为 *Ilyocypris bradyi*,零星见 *Candoniella* sp.和 *Candoniella albicans*。反映的是海湾沉积环境。

阶段Ⅳ: 0.98~0.68m(4050~1850cal.aBP),沉积物中粉砂含量增加,为 82.9%~88.6%,均值为 86.3%,砂质成分减少,为 5.1%~11.8%,均值为 7.8%,相比上一阶段,黏土百分含量、分选系数、中值粒径、平均粒径、峰度、偏度变化不大;沉积物颗粒中细粒级的含量增加,水动力条件减弱。有孔虫的

丰度较低,为 1~13 枚/50g,简单分异度为 1~6,以 *Cribrononion* sp.、*Ammonia beccarii* var 为主,丰度分别为 0~2、0~9 枚/50g,零星见浮游有孔虫 *Globigerina* sp.,虫管含量为 0~62 枚/50g,介形虫丰度为 0~3 枚/50g,为 *Candoniella* sp.和 *Ilyocypris* sp.。反映的是瀉湖相暖水环境,水深 0~1m。

阶段Ⅴ: 0.68~0m(1850~0cal.aBP): 沉积中粉砂、黏土的百分含量增加,变化剧烈且频繁,范围分别为 83.0%~92.3%、5.0%~12.0%,平均值分别为 87.8%、9.0%。砂质百分含量及中值粒径、平均粒径变小,变化范围为 1.0%~11.1%、10.7~19.7 $\mu\text{m}$ 、15.6~27.3 $\mu\text{m}$ ,平均值为 3.2%、15.5 $\mu\text{m}$ 、22.1 $\mu\text{m}$ ;偏度变大,为 0.99~1.64,平均值为 1.46,沉积物中细颗粒含量增加,水动力条件减弱。分选系数整体变小但段内变化较大,变化范围为 1.35~2.44,平均值为 1.7,峰度变大,为 0.5~3.3,平均值为 1.5,为很窄峰态类型,分选变好。沉积物整体较细,分选较上一阶段变好,表明水动力较弱,与湖相沉积的特点相似。本阶段以广生性介形虫种类的 *Candona* sp.、*Candoniella* sp.、*Chlamydotheca* sp. 为主,丰度分别为 0~6、0~6、0~2 枚/50g,不含有孔虫和虫管。因此,该阶段反映的是湖相沉积环境。

### 3 全新世以来里下河南部地区的沉积环境演变

由上述分析可知,全新世以来,里下河南部地区

先后经历了湖相、滨海沼泽、海湾、潟湖、湖相的沉积环境变迁,不同沉积相表现出不同的粒度特征及水动力条件。

11900~4850cal.aBP,里下河地区上更新世顶部普遍发育灰绿色的“硬土层”,自SE—NW呈逐渐抬高的掀斜状<sup>[34,35]</sup>。北半球全新世的温度变化直接受控于北半球夏季太阳辐射<sup>[36,37]</sup>。在早全新世,夏季太阳辐射达到最大值<sup>[38]</sup>(图5),全球温度升高,石笋记录的亚洲夏季风增强<sup>[39]</sup>,海平面上升<sup>[40]</sup>,海水首先侵入长江古河谷和沿海地区,影响到里下河的东部和东南部,庆丰剖面为滨海沼泽、泥质海滩-潟湖(9300~6500aBP)<sup>[6]</sup>;开庄遗址、陶庄遗址、青墩遗址<sup>[12]</sup>(全新世初期~7800cal.aBP)为浅海或滨海沉积环境。研究区地势较高,未受到海水影响,沉积了灰黑色含粉砂黏土,水动力弱且相对稳定,不含有孔虫和介形虫,为湖相沉积环境。2.24~2.42m对应的年龄为7870~8520cal.aBP,部分样品黏土含量急剧降低,粉砂含量增高,可能对应8.2ka气候变冷事件,气候干冷导致湖水变浅,粗颗粒物增加<sup>[41]</sup>。

4850~4250cal.aBP,全新世中期,全球海平面上升至最高值<sup>[40]</sup>,长江三角洲的海侵范围达到最大<sup>[42-44]</sup>,古河谷地区沉积速度大于剥蚀速度,开始了

长江三角洲的发育。在黄桥地区形成了黄桥沙坝(6500~4000aBP)<sup>[45,46]</sup>,庆丰剖面为开放潟湖-海湾环境<sup>[6]</sup>;开庄遗址、陶庄遗址、青墩遗址由于长江河口沙坝和东部贝壳堤的发育,阻隔了海水从苏北东部通道漫延过来,为陆相沼泽环境(7800cal.aBP至今)<sup>[12]</sup>。海水沿下切河谷向陆侵袭,至4850cal.aBP,海水逐渐跨过晚更新世时期在江都-泰州一带形成的堤坝<sup>[46]</sup>,蔓延至研究区,形成滨岸沼泽环境,沉积物中有孔虫丰度值较低,为1~4枚/50g,粉砂和砂质含量增加,分选变差,水动力增强,岩性由含粉砂黏土转变为粉砂质黏土。现代长江入海口沉积物的粒度以砂质粉砂为主,平均粒径15~60 $\mu\text{m}$ <sup>[47,48]</sup>。当时长江的入海口在扬州-泰州一带,研究区沉积物中增加的粗颗粒沉积物可能是来自于长江。

4250~4050cal.aBP,由于黄桥沙坝的出现,长江分为南北两个汉道,海岸线位于海安-北陵公社一带<sup>[46]</sup>,剖面的地理位置位于海岸线以东,有孔虫的丰度为21~42枚/50g,简单分异度为5~9,沉积物中砂质成分急剧增加,岩性由粉砂质黏土转变为粉砂,水动力条件增强,其粒度特征与与现代长江口的沉积物相似<sup>[47,48]</sup>,表明研究区位于北汉道内,在该时期为海湾环境。

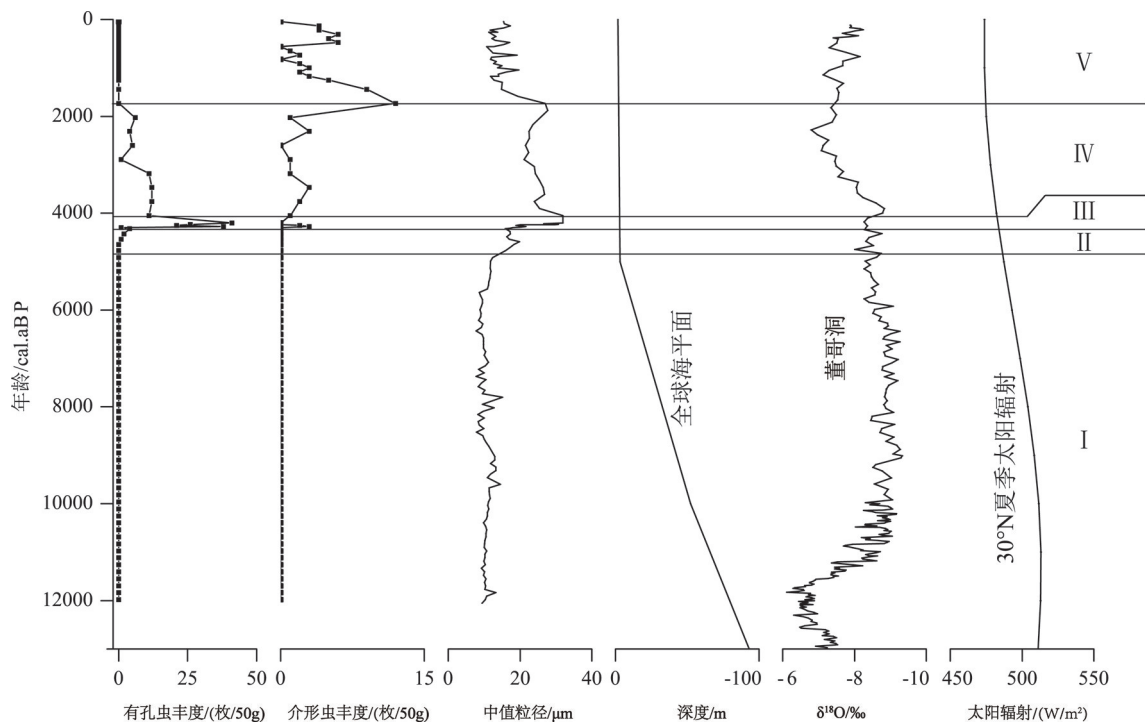


图5 PM4剖面全新世以来PM4剖面的有孔虫丰度、介形虫丰度、中值粒径与海平面<sup>[40]</sup>、亚洲季风<sup>[39]</sup>、30°N夏季太阳辐射<sup>[38]</sup>的特征

Fig.5 A profile showing the abundance of foraminifera and ostracoda, median size, sea level<sup>[40]</sup>, Asian monsoon<sup>[39]</sup>, and the insolation at 30°N<sup>[38]</sup> since Holocene

4050~1850cal.aBP,亚洲夏季风在4000cal.aBP减弱<sup>[39]</sup>,全球海平面趋于稳定<sup>[40]</sup>,长江带来的沉积物持续堆积,海岸线向南东方向迁移。由于长江属于中等强度的潮汐河口,在科氏力的作用下,由于黄桥沙坝形成的北汊道逐渐衰退,最后完全淤塞,使河口沙坝与北岸陆地连接起来,阻隔了南部海水对研究区的影响。苏北中部贝壳堤阻隔了东部海水对研究区的影响<sup>[49,50]</sup>,里下河地区形成了四面高中部低的地形特征,研究区从海湾逐步演化为瀉湖,有孔虫的丰度较低,为1~13枚/50g,简单分异度为1~6。

1850cal.aBP至今,晚全新世时期,全球温度降低<sup>[51]</sup>,海平面下降及海岸线东迁<sup>[6,40]</sup>,使瀉湖受到海洋作用逐渐减小,而受区内河流影响增强,使得瀉湖的盐度逐渐降低,演化为淡水湖泊,含有少量介形虫。根据历史记载<sup>[52,53]</sup>,春秋-秦汉时期,由于古邗沟的开通,江淮相通,流向里下河地区的地表径流减少,里下河逐渐干涸,形成了一系列村落,与根据AMS<sup>14</sup>C年龄推测的研究区干涸的1850cal.aBP的年龄相符,这也从侧面说明了AMS<sup>14</sup>C测年结果的可靠性。在湖泊和人类耕地的共同作用下,岩性由粉砂转变为含粉砂黏土-粉砂质黏土。

## 4 结论

通过对泰州地区PM4剖面的粒度和微体古生物鉴定分析发现,全新世以来研究区经历了湖相、滨海沼泽、海湾、瀉湖、湖相的沉积环境:(1)11900~4850cal.aBP不含有孔虫和介形虫,沉积物颗粒较细,分选差,为极正偏的尖峰态,水动力条件较弱,研究区地势较高,未受到海水影响,为湖相沉积,2.24~2.42m中部分样品黏土含量急剧降低,粉砂含量增高,可能对应8.2ka气候变冷事件;(2)4850~4250cal.aBP,含有少量的有孔虫,海洋性较弱,沉积物中的粗颗粒含量增加,水动力条件增强,为滨海沼泽沉积。当时长江的入海口在扬州-泰州一带,研究区沉积物中增加的粗颗粒沉积物可能是来自于长江;(3)4250~4050cal.aBP,沉积物中砂质成分急剧增加,其粒度特征与现代长江口的沉积物相似,研究区位于黄桥沙坝的北汊道内,为海湾沉积;(4)4050~1850cal.aBP,有孔虫丰度较低,沉积物中细颗粒物增加,水动力减弱,分选系数整体变小而峰度变大,分选变好,苏北中部贝壳堤阻隔了东部海水对研究区的影响,里下河地区形成了四面高中部低的地形特征,从海湾逐步演化为瀉湖;(5)1850~0cal.

aBP,不含有孔虫,含有少量介形虫,沉积物中细颗粒含量增加,分选系数变小,为很窄峰态类型,分选变好,瀉湖的盐度逐渐降低,演化为淡水湖泊。

**致谢:**感谢林景星教授对本文中有孔虫和介形虫种属的鉴定。

## 参考文献 (References)

- [1] 凌申. 全新世以来里下河地区古地理演变[J]. 地理科学, 2001, 21(5): 474-479. [LING Shen. Palaeogeographic changes of the Lixiahe district since the Holocene [J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(5): 474-479.]
- [2] 王靖泰, 汪品先. 中国东部晚更新世以来海面升降与气候变化的关系[J]. 地理学报, 1980, 35(4): 299-312. [WANG Jingtai, WANG Pinxian. Relationship between sea-level changes and climatic fluctuations in east China since late Pleistocene [J]. Acta Geographica Sinica, 1980, 35(4): 299-312.]
- [3] 杨競红, 王颖, 张振克, 等. 苏北平原 2.58 Ma 以来的海陆环境演变历史—宝应钻孔沉积物的常量元素记录[J]. 第四纪研究, 2006, 26(3): 340-352. [YANG Jinghong, WANG Ying, ZHANG Zhenke, et al. Major element records of land-sea interaction and evolution in the past 2.58 Ma from the Baoying borehole sediments, Northern Jiangsu plain, China [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(3): 340-352.]
- [4] 舒强, 李才林, 赵志军, 等. 苏北盆地浅钻沉积物磁化率与粒度记录的末次冰消期以来的环境变化[J]. 沉积学报, 2009, 27(1): 111-117. [SHU Qiang, LI Cailin, ZHAO Zhijun, et al. The records of mass susceptibility and grain size for climate changes in Subei Basin during the last deglaciation [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(1): 111-117.]
- [5] 赵希涛, 鲁刚毅, 王绍鸿, 等. 江苏建湖庆丰剖面全新世地层及环境变迁与海面变化的初步研究[J]. 科学通报, 1990, 35(4): 285-288. [ZHAO Xitao, LU Gangyi, WANG Shaohong, et al. Study on the Holocene stratigraphy, environmental changes and sea level variations from the Qingfeng section, Jianhu County, Jiangsu Province [J]. Chinese Sciences Bulletin, 1990, 35(4): 285-288.]
- [6] 赵希涛, 唐领余, 沈才明, 等. 江苏建湖庆丰剖面全新世气候变迁和海面变化[J]. 海洋学报, 1994, 16(1): 78-88. [ZHAO Xitao, TANG Lingyu, SHEN Caiming. Holocene climate and the change of sea level in Jianhu County, Jiangsu Province [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1994, 16(1): 78-88.]
- [7] 凌申. 苏北全新世海进与古砂堤研究[J]. 台湾海峡, 1994, 13(4): 338-345. [LING Shen. Study on Holocene transgression and sandbars in North Jiangsu [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1994, 13(4): 338-345.]
- [8] 凌申. 全新世以来苏北平原古地理环境演变[J]. 黄渤海海洋, 1990, 8(4): 23-25. [LING Shen. Changes of the palaeogeographic environment in north Jiangsu plains since the Holocene [J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1990, 8(4): 23-25.]

- [9] 郭盛乔,马秋斌,张祥云,等. 里下河地区全新世自然环境变迁[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 341-351. [GUO Shengqiao, MA Qiubin, ZHANG Xiangyun, et al. Holocene environmental changes in Lixiahe area[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 341-351.]
- [10] 张景文,李桂英,赵希涛. 苏北地区全新世海陆变迁的年代学研究[J]. 海洋科学, 1983, 7(6): 8-11. [ZHANG Jingwen, LI Guiying, ZHAO Xitao. Chronological study of the Holocene sea-land shift in northern Jiangsu[J]. *Marine Sciences*, 1983, 7(6): 8-11.]
- [11] 冯金顺,孙磊,葛云,等. 江苏省里下河(兴化-泰州)地区浅表沉积物特征及古地理环境演变[J]. 江苏地质, 2007, 31(2): 101-107. [FENG Jinshun, SUN Lei, GE Yun, et al. On shallow sediment properties and paleographic environment Xinghua-Taizhou, Jiangsu[J]. *Jiangsu Geology*, 2007, 31(2): 101-107.]
- [12] 朱诚,吴立,李兰,等. 对江苏新石器时代海面变化问题的再认识[J]. 科学通报, 2016, 61(3): 374-387. [ZHU Cheng, WU Li, LI Lan, et al. Recognition of sea-level change during the Neolithic period in the Jiangsu Area, East China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(3): 374-387.]
- [13] 陈冬梅,穆桂金. 不同沉积环境下沉积物的粒度分形特征的对比研究[J]. 干旱区地理, 2004, 27(1): 47-51. [CHEN Dongmei, MU Guijin. Comparising study of grain-size fractal dimensions characteristics between several sediments with different forming environments[J]. *Arid Land Geography*, 2004, 27(1): 47-51.]
- [14] 王中波,杨守业,张志珣,等. 东海陆架中北部沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(6): 1039-1049. [WANG Zhongbo, YANG Shouye, ZHANG Zhixun, et al. The grain size compositions of the surface sediments in the east China sea; indication for sedimentary environments[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43(6): 1039-1049.]
- [15] 王伟,李安春,徐方建,等. 北黄海表层沉积物粒度分布特征及其沉积环境分析[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(5): 525-531. [WANG Wei, LI Anchun, XU Fangjian, et al. Distribution of surface sediments and sedimentary environment in the north Yellow sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2009, 40(5): 525-531.]
- [16] 石学法,申顺喜,陈志华,等. 南黄海现代沉积环境及动力沉积体系[J]. 科学通报, 2001, 46(s1): 1-6. [SHI Xuefa, SHEN Shunxi, CHEN Zhihua, et al. Modern sedimentary environments and dynamic depositional systems in the southern Yellow Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(s1): 1-6.]
- [17] 王飞飞,王红,刘健,等. 南黄海西北部 SYS-0803 孔第四纪晚期底栖有孔虫群落特征及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(4): 113-123. [WANG Feifei, WANG Hong, LIU Jian, et al. Late quaternary benthic foraminifera of core SYS-0803 from the northwestern south Yellow sea and their paleoenvironmental significance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(4): 113-123.]
- [18] 赵泉鸿,翦知湓,张在秀,等. 东海陆架泥质沉积区全新世有孔虫和介形虫及其古环境应用[J]. 微体古生物学报, 2009, 26(2): 117-128. [ZHAO Quanhong, JIAN Zhimin, ZHANG Zaixiu, et al. Holocene benthic foraminifera and ostracoda from the shelf mud area of the east China sea and their paleoenvironmental implications[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2009, 26(2): 117-128.]
- [19] Li L, Zhu C, Lin L, et al. Evidence for marine transgression between 7500-5400BC at the Luotudun Site in Yixing, Jiangsu Province[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2009, 19(6): 671-680.
- [20] 蔡庆芳,王飞飞,印萍,等. 全新世以来长江口底栖有孔虫组合及古环境演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(6): 175-184. [CAI Qingfang, WANG Feifei, YIN Ping, et al. Subassemblages of benthic foraminifera and palaeoenvironmental implication in the Yangtze river estuary since Holocene[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(6): 175-184.]
- [21] Stuiver M, Reimer P J. A computer program for radiocarbon age calibration. *Radiocarbon*[J], 1986, 28(2B): 1022-1030.
- [22] 鹿化煜,苗晓东,孙有斌. 前处理步骤与方法对风成红黏土粒度测量的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(3): 129-135. [LU Huayu, MIAO Xiaodong, SUN Youbin. Pretreatment methods and their influences on grain-size measurement of aeolian "red clay" in north China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22(3): 129-135.]
- [23] 鹿化煜,安芷生. 前处理方法对黄土沉积物粒度测量影响的实验研究[J]. 科学通报, 1997, 2(23): 2535-2538. [LU Huayu, AN Zhisheng. Pretreatment methods in loess-paleosol granulometry[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42: 237-240.]
- [24] Clark M W. Some methods for statistical analysis of multimodal distributions and their application to grain-size data[J]. *Mathematical Geology*, 1976, 8(3): 267-282.
- [25] Blott S J, Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(11): 1237-1248.
- [26] Müller G, Förstner U. General relationship between suspended sediment concentration and water discharge in the Alpenrhein and some other rivers[J]. *Nature*, 1968, 217(5125): 244-245.
- [27] Friedman G M, Sanders J E. Principles of sedimentology[M]. New York: Wiley, 1978: 1-792.
- [28] 闫晓洁,胥勤勉,范友良等. 渤海湾西北岸 HG01 孔晚更新世以来的微体化石特征及沉积演化过程[J]. 第四纪研究, 2017, 37(1): 97-107. [YAN Xiaojie, XU Qinmian, FAN Youliang, et al. Microfossil assemblages characteristics and sedimentary evolution of HG01 borehole in the northwest coast of Bohai Bay since Late Pleistocene[J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(1): 97-107.]
- [29] 汪品先,章纪军,赵泉鸿,等. 东海底质中的有孔虫与介形虫[M]. 北京: 海洋出版社, 1988. [WANG Pinxian, ZHANG Jijun, ZHAO Quanhong, et al. Foraminiferal and Ostracoderm in Sediments in the East China Sea[M]. Beijing: China Ocean



- Press, 1988.]
- [30] 汪品先, 闵秋宝, 卞云华. 南黄海西北部底质中有孔虫, 介形虫分布规律及其地质意义[C]//海洋微体古生物论文集. 北京:海洋出版社, 1980: 84-100. [WANG Pinxian, MIN Qiubao, BIAN Yunhua. A preliminary study of foraminiferal and ostracod assemblages of the Yellow Sea[C]//Papers on Marine Micropaleontology. Beijing: China Ocean Press, 1980: 84-100.]
- [31] 张静, 林景星, 刷远景, 等. 东海 E1 孔晚更新世以来的地层、生物与环境[J]. 地质学报, 2004, 78(1): 9-16. [ZHANG Jing, LIN Jingxing, JU Yuanjing, et al. Stratigraphy, biology and environment of the E1 core from the east China sea in late Pleistocene[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(1): 9-16.]
- [32] 李小艳, 翦知潜, 石学法, 等. 全新世东海内陆架泥质区有孔虫特征及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(4): 61-71. [LI Xiaoyan, JIAN Zhinmin, SHI Xuefa, et al. Holocene foraminifera from the mud area of the inner shelf, east China sea and their paleoenvironmental significances[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(4): 61-71.]
- [33] 赵泉鸿, 翦知潜, 张在秀, 等. 东海内陆架泥质沉积区全新世古环境变迁: 有孔虫证据[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(2): 79-86. [ZHAO Quanhong, JIAN Zhimin, ZHANG Zaixiu, et al. Holocene paleoenvironmental changes of the inner-shelf mud area of the east China sea: evidence from foraminiferal faunas[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(2): 79-86.]
- [34] 邓兵, 李从先. 长江三角洲地区第一古土壤层及其古气候记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(3): 29-37. [DENG Bing, LI Congxian. Paleoclimate recorded in the first layer of paleosol in Yangtze delta area[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1999, 19(3): 29-37.]
- [35] 陈报章, 李从先, 业治铮. 长江三角洲北翼全新统底界和硬黏土层的讨论[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1991, 11(2): 37-46. [CHEN Baozhang, LI Congxian, YE Zhizheng. Holocene bottom boundary and hard clay band in the northern flank of the Changjiang river delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1991, 11(2): 37-46.]
- [36] 徐海. 中国全新世气候变化研究进展[J]. 地球地球化学, 2001, 29(2): 9-16. [XU Hai. Advance in research on the Holocene climate fluctuations[J]. Geology-Geochemistry, 2001, 29(2): 9-16.]
- [37] 王淑云, 吕厚远, 刘嘉麒. 湖光岩玛珥湖高分辨率孢粉记录揭示的早全新世适宜期环境特征[J]. 科学通报, 2007, 52(11): 1285-1291. [WANG Shuyun, LU Houyuan, LIU Jiaqi, et al. The Early Holocene optimum inferred from a high-resolution pollen record of Huguangyan Maar lake in Southern China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(11): 1285-1291.]
- [38] Berger A, Loutre M F. Insolation values for the climate of the last 10 million years[J]. Quaternary Science Reviews, 1991, 10(4): 297-317.
- [39] Wang Y J, Chen H, Edwards R L, et al. Millennial and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years[J]. Nature, 2008, 451(28): 1090-1093.
- [40] Miller K G, Kominz M A, Browning J V, et al. The Phanerozoic record of global sea-level change[J]. Science, 2005, 310(5752): 1293-1298.
- [41] 类延斌, 张成君, 尚华明, 等. 青藏高原东北部希门错湖岩心粒度特征及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(3): 31-38. [LEI Yanbin, ZHANG Chengjun, SHANG Huaming, et al. The grain size characteristics of Ximencuo lake core in the northeast Tibet Plateau and its environmental significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(3): 31-38.]
- [42] Hori K, Saito Y, Zhao Q, et al. Evolution of the coastal depositional systems of the Changjiang (Yangtze) River in response to late Pleistocene-Holocene sea-level changes [J]. Journal of Sedimentary Research, 2002, 72(6): 884-897.
- [43] Hori K, Saito Y, Zhao Q, et al. Progradation of the Changjiang River delta since the mid-Holocene[J]. Science in China Series B: Chemistry, 2001, 44(1): 87-91.
- [44] Song B, Li Z, Saito Y, et al. Initiation of the Changjiang (Yangtze) delta and its response to the mid-Holocene sea level change[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 388: 81-97.
- [45] 李从先, 郭蓄明, 许志远, 等. 全新世长江三角洲地区砂体的特征和分布[J]. 海洋学报, 1979, 1(2): 252-268. [LI Congxian, GUO Xumin, XU Shiyuan, et al. The characteristics and distribution of Holocene sand bodies in Changjiang river delta area[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1979, 1(2): 252-268.]
- [46] 王靖泰, 郭蓄民, 许世远, 等. 全新世长江三角洲的发育[J]. 地质学报, 1981(1): 69-83. [WANG Jingtai, GUO Xumin, XU Shiyuan, et al. Evolution of the Holocene Changjiang Delta [J]. Acta Geologica Sinica, 1981(1): 69-83.]
- [47] 王中波, 杨守业, 张志珣, 等. 东海陆架中北部沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(6): 1039-1049. [WANG Zhongbo, YANG Shouye, ZHANG Zhixun, et al. [Grain size characteristics of sediments and its depositional environment in the north of East China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(6): 1039-1049.]
- [48] 刘红, 何青, 王元叶, 等. 长江口表层沉积物粒度时空分布特征[J]. 沉积学报, 2007, 25(3): 445-455. [LIU Hong, HE Qing, WANG Yuanye, et al. Temporal and spatial characteristics of surface sediment grain-size distribution in Changjiang estuary[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(3): 445-455.]
- [49] 同济大学海洋地质系三角洲科研组. 全新世长江三角洲的形成和发育[J]. 科学通报, 1978, 23(5): 310-313. [Delta Research Group of Department of Marine Geology, Tongji University. Formation and development of Yangtze Delta since the Holocene (in Chinese) [J]. Chinese Science Bulletin, 1978, 23(5): 310-313.]
- [50] 王伟铭, 舒军武, 陈炜, 等. 长江三角洲地区全新世环境变化与人类活动的影响[J]. 第四纪研究, 2010, 30(2): 233-244. [WANG Weimin, SHU Junwu, CHEN Wei, et al. Holocene environmental changes and human impact in the Yangtze Riv-

- er Delta area, East China[J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(2):233-244.]
- [51] Marcott S A, Shakun J D, Clark P U, et al. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11300 years [J]. *Science*, 2013, 339(6124):1198-1201.
- [52] 彭安玉. 论明清时期苏北里下河自然环境的变迁[J]. *中国农史*, 2006, 25(1):111-118. [PENG Anyu. On natural environment vicissitudes of Lixiahe Basin in North Jiangsu Province during Ming and Qing Dynasties[J]. *Agricultural History of China*, 2006, 25(1):111-118.]
- [53] 刘会远. 黄河明清故道考察研究[M]. 南京: 河海大学出版社, 1998:278. [LIU Huiyuan. Surveying of the Old Course of Yellow River in Ming-Qing Dynasties[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1998:278.]