

引用格式: 刘宪光, 杨晋炜, 蒋仁, 等, 2023. 长江三角洲北翼 ZKA01 钻孔第四纪晚期以来的沉积环境演化 [J]. 地质力学学报, 29 (6): 856–868. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023025](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023025)

Citation: LIU X G, YANG J W, JIANG R, et al., 2023. Evolution of sedimentary environment at the ZKA01 borehole in the north wing of the Yangtze River Delta since late Quaternary [J]. Journal of Geomechanics, 29 (6): 856–868. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023025](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023025)

长江三角洲北翼 ZKA01 钻孔第四纪晚期以来的沉积环境演化

刘宪光^{1,2}, 杨晋炜^{1,2}, 蒋仁³, 梁飞刚^{1,2}, 夏斌⁴, 王钜¹, 胡利¹,
孙丰瑞¹, 董军林¹

LIU Xianguang^{1,2}, YANG Jinwei^{1,2}, JIANG Ren³, LIANG Feigang^{1,2}, XIA Bin⁴, WANG Ju¹, HU Li¹,
SUN Fengrui¹, DONG Junlin¹

1. 江苏省有色金属华东地质勘查局地球化学勘查与海洋地质调查研究院, 江苏南京 210007;
2. 自然资源部滨海盐沼湿地生态与资源重点实验室, 江苏南京 210007;
3. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏南京 210016;
4. 中国冶金地质总局中南地质调查院, 湖北武汉 430300

1. *Institute of Geochemical Exploration and Marine Geological Survey, East China Mineral Exploration and Development Bureau for Non-ferrous Metals, Nanjing 210007, Jiangsu, China;*
2. *Key Laboratory of Coastal Salt Marsh Ecosystems and Resources, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210007, Jiangsu, China;*
3. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;*
4. *Central South Geological Survey Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Wuhan 430300, Hubei, China*

Evolution of sedimentary environment at the ZKA01 borehole in the north wing of the Yangtze River Delta since late Quaternary

Abstract: The late Quaternary chronostratigraphic framework and marine transgression have long been research focal points in the Yangtze River Delta. The frequent channel oscillation and river incision in the Yangtze Delta have led to the frequent absence of complete stratigraphic records. Complete marine transgression records have yet to be discovered within the same borehole in this region. Based on lithostratigraphy, biostratigraphy, paleomagnetic chronology, and OSL dating studies of the ZKA01 borehole in the Dongtai area of the northern wing of the Yangtze River Delta region, the stratigraphic chronology framework since Marine Isotope Stage 5 (MIS5) was established. The ZKA01 borehole was found to have comprehensively recorded five marine transgression events in the Yangtze Delta region since late Pleistocene. The results indicate that the B/M boundary of the ZKA01 borehole is located at 108 m, and the M/G boundary is at 300.25 m. The boundary between the Middle and Upper Pleistocene is positioned at the bottom of the third marine transgression layer, precisely at 92.95 m. The boundary between the Upper Pleistocene and Holocene boundaries is located at the bottom of the first marine transgression layer discovered in the borehole, precisely at 16.65 m. The first three transgressions occurred during MIS5 (128–74 ka), of which MIS 5.1 had a larger scale, second only to the scale of the transgressions during the Holocene. The fourth transgression occurred during MIS3 (60–24 ka), equivalent in depth and age to the "II marine phase layer" of MIS3. The fifth transgression occurred during MIS1 (12 ka to present), depositing in a nearshore shallow marine environment, with the largest scale observed. Additionally, it was identified that the first transgression layer (MIS5) is approximately equivalent in burial depth across various regional boreholes, serving as a distinctive stratigraphic marker for stratigraphic division and comparative studies in the Yangtze River Delta. These research findings hold significant importance for Quaternary stratigraphic division and comparative analysis of sedimentary environments in the Yangtze

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (1212011220539, DD20230002)

This research is financially supported by the Geological Survey Projects of the China Geological Survey (Grants No. 1212011220539 and DD20230002).

第一作者: 刘宪光 (1984—), 男, 高级工程师, 主要从事第四纪地质调查、水工环地质调查研究。E-mail: liuxgcugb@qq.com

收稿日期: 2023-03-07; 修回日期: 2023-06-21; 责任编辑: 吴芳

River Delta.

Keywords: Yangtze River Delta; Chronology; Stratum; Sedimentary environment; Microfossils; MIS5; Marine transgression

摘要: 第四纪晚期以来的年代地层框架及海侵问题一直以来都是长江三角洲地区的研究热点。由于长江三角洲地区河道往复摆动、河流下切侵蚀导致地层频繁缺失,目前尚未在该地区同一个钻孔内发现完整的海侵记录。基于长江三角洲北翼东台地区ZKA01钻孔岩石地层、生物地层、古地磁年代学和光释光(OSL)测年研究,对比区域钻孔资料确定了该孔第四纪以来的地层年代框架,发现ZKA01钻孔完整地记录了晚更新世以来长江三角洲地区的5次海侵事件。结果表明,ZKA01孔B/M界线位置在108.00 m处,M/G界线位置为300.25 m处。中、上更新统界线位于第Ⅲ海相层底部,即92.95 m处。上更新统与全新统界线置于该钻孔发现的第Ⅰ海相层底部,即16.65 m处。晚更新世以来,前3次海侵发生在MIS5(128~74 ka)阶段,其中MIS5.1海侵规模较大,仅次于全新世时期的海侵规模。第4次海侵发生在MIS3阶段(60~24 ka),在深度上和年代上相当于MIS3时期的“第Ⅱ海相层”。第5次海侵发生在MIS1(12 ka至今)阶段,沉积环境为滨岸浅水的浅海环境,该次海侵规模最大。同时发现MIS5阶段初次海侵记录在该地区各钻孔埋深大致相当,该界面可作为长江三角地区的地层划分与对比研究的标志性地层。以上研究成果对于长江三角洲地区第四纪晚期地层划分对比、沉积环境研究分析具有极其重要意义。

关键词: 长江三角洲; 年代学; 地层; 沉积环境; 微体生物化石; MIS5; 海侵

中图分类号: P534.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616(2023)06-0856-13

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023025

0 引言

长江三角洲地区一直是第四纪研究的重要区域(李从先和汪品先,1998;范代读等,2001;王张华等,2004;张浩等,2021)。由于长江三角洲地区位于中国东部沿海构造沉降带,持续的沉降背景使该地接受了大量的河流沉积物,因此在长江三角洲地区形成了一套厚达200~300 m厚的第四纪松散沉积层(吴标云和李从先,1987),这为第四纪地质环境研究提供了很好的记录。

第四纪晚期以来年代地层框架及海侵问题一直以来都是长江三角洲地区的研究热点。近年来众多学者采用 ^{14}C 、热释光、光释光、U系、电子自旋共振等同位素测年法与磁性地层学手段来初步构建第四纪晚期年代地层框架,再结合岩石地层、生物地层与气候地层等多重地层划分逐步建立了长江三角洲地区晚新生代的地质序列(李从先等,1999;范代读等,2001;王张华等,2004;李从先等,2013;缪卫东等,2016;于俊杰等,2016;劳金秀等,2016;孙丰瑞等,2019;王中波等,2020;王辉等,2021;刘宪光等,2023)。

研究发现,第四纪时期出现了多次冰期—间冰期波动,长江三角洲地区在这段时期河流沉积物快速沉积、河道往复摆动迁移、河流下切侵蚀等频发

(林春明等,2016;林钟扬等,2019)。在干旱及气候转型时期,发生沉积间断和因冰消期滨岸动力的改造造成部分地层缺失现象(缪卫东等,2009;蒋仁等,2014),这一系列的原因导致了第四纪时期发生的海侵记录很大程度上不能被完整的保留下来,因此很难在长江三角洲地区一个钻孔内发现与深海洋同位素完整对应的海侵记录。

在此背景下,通过对长江三角洲北翼江苏东台地区第四纪标准孔ZKA01钻孔的岩石地层、生物地层及年代学的综合研究,发现该钻孔完整记录了MIS5以来的多次海侵事件、与深海洋同位素MIS1、MIS3、MIS5等多次高海面有着较好的对应关系,为长江三角洲地区新生代以来的地质与环境研究提供了新的数据,同时可以作为长江三角洲地区的典型地层剖面资料供专家学者用以研究晚更新世以来海平面变化。

1 钻孔位置及岩性特征

ZKA01钻孔位于江苏省东台市头灶镇沈河村三组农田内(图1),钻孔坐标为 $120^{\circ}31'42.84''\text{E}$, $32^{\circ}49'06.69''\text{N}$;终孔深度336.76 m。钻孔施工使用 $\Phi 108\text{ mm}$ 岩芯管钻进,保持高浓度泥浆状态下施工,全孔岩芯采取率达到91%。



图1 钻孔位置图

Fig. 1 Location map of boreholes

该钻孔更新世以河流相沉积为主, 沉积物多具二元结构, 即下部为含砾粗砂, 向上变为中粗砂、粉细砂、粉砂质黏土、黏土, 正粒序旋回性明显。沉积物以灰、灰黄为主色调。全新世主要为一套海侵河流与三角洲相沉积, 沉积物以粉细砂、黏土质粉砂为主, 颜色以灰、深灰色为主(图2, 图3), 将钻孔0~320 m根据岩性特征划分为41层(图4), 详细描述如下。

(1)全新统如东组(Qhr; 1~3层), 埋深0~16.65 m, 厚16.65 m

- ①耕作土, 0~0.30 m;
- ②灰黄色黏土质粉砂、粉砂, 局部见腹足类碎壳和钙质结核, 0.30~2.70 m
- ③灰色粉砂, 局部见水平层理, 多见有孔虫, 2.70~16.65 m

(2)上更新统溇湖组(Qp³g; 4~11层), 埋深16.65~76.00 m, 厚59.35 m

- ④黄褐色黏土夹粉砂, 局部见铁锰质结核, 16.65~21.30 m
- ⑤灰黄色粉砂、粉细砂, 水平层理发育, 见有孔虫, 21.30~29.70 m
- ⑥灰色粉砂、粉细砂, 水平层理发育, 29.70~36.60 m
- ⑦灰黄色黏土, 含钙质结核, 见陆相介形类, 36.60~42.70 m
- ⑧灰黄色粉砂夹黏土, 水平层理较发育, 普遍见黄褐色铁染, 42.70~56.00 m

⑨灰色粉砂与粉砂质黏土互层, 水平层理发育, 含有孔虫 56.00~61.65 m

⑩淡蓝灰色黏土, 局部少量粉砂, 见黄褐色铁染, 61.65~67.60 m

⑪灰色黏土质粉砂夹粉砂薄层, 水平层理发育, 见有孔虫, 67.60~76.00 m

(3)上更新统昆山组(Qp²k; 12~15层), 埋深76.00~92.95 m, 厚16.95 m

- ⑫灰色黏土夹粉砂, 水平层理较发育, 76.00~78.35 m
- ⑬灰色粉细砂, 局部含少量黏土, 具水平层理 78.35~86.70 m
- ⑭灰绿色黏土, 泥质结构, 块状构造, 偶见钙质结核 86.70~88.70 m

⑮棕灰色黏土质粉砂, 水平层理, 含有孔虫 88.70~92.95 m

(4)中更新统启东组(Qp²q; 16~27层), 埋深92.95~174.75 m, 厚81.80 m

- ⑯棕灰色、绿灰色、黑灰色黏土, 泥质结构, 切面光滑 92.95~101.40 m
- ⑰浅棕灰色含黏土粉砂, 见水平层理, 局部夹有少量砾石, 101.40~104.35 m
- ⑱浅灰绿色粉砂夹黏土薄层, 水平层理发育, 104.35~110.05 m
- ⑲灰绿色黏土夹粉砂, 切面较光滑, 下部见钙质结核, 110.05~120.80 m
- ⑳浅棕灰色粉砂夹黏土薄层, 水平层理发育,

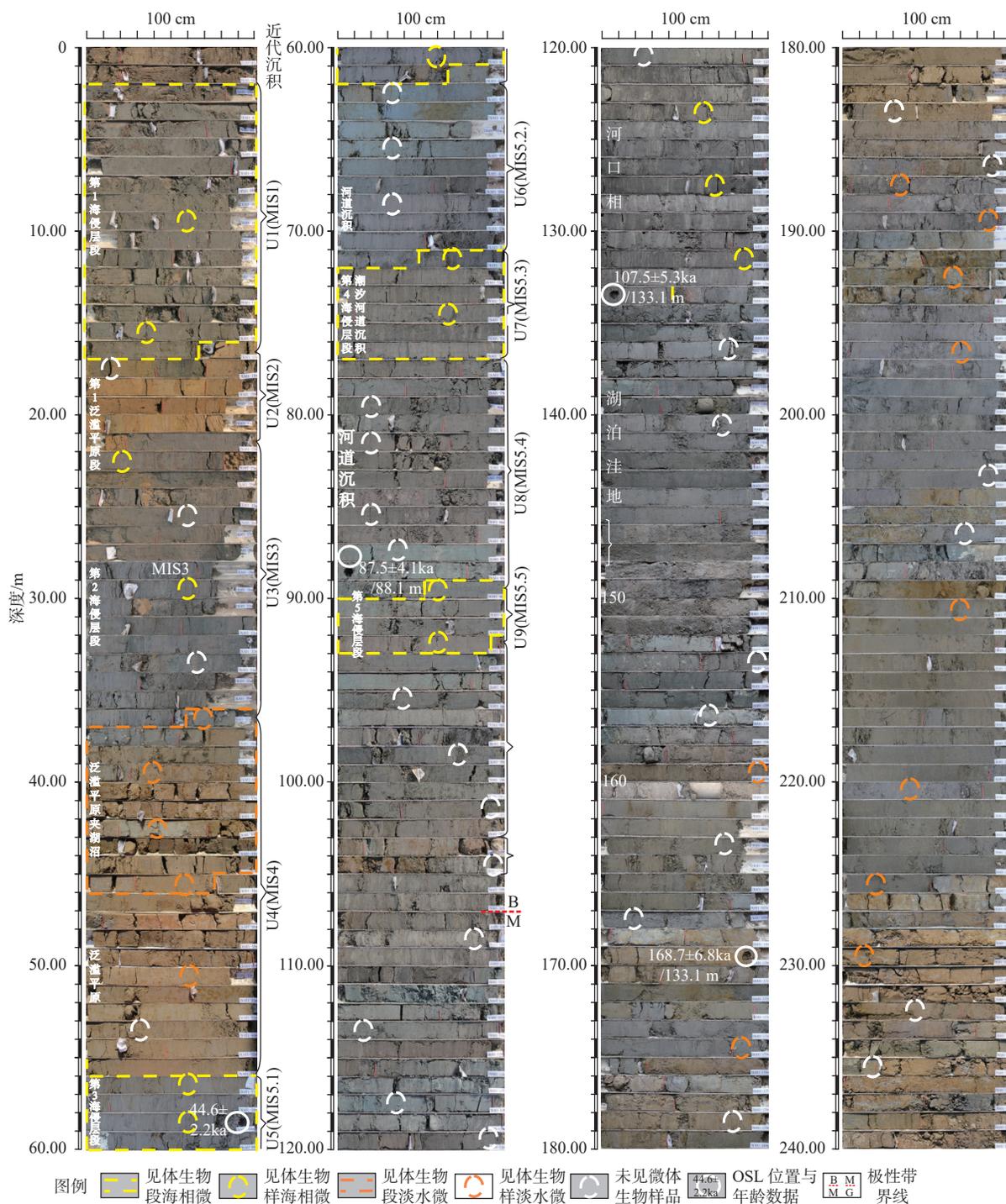


图 2 ZKA01 钻孔岩芯照片及 MIS 地层单元划分 (0~240.00 m)

Fig. 2 Photos and stratigraphic columns of the ZKA01 borehole (0-240.00 m)

含有孔虫, 120.80~133.45 m

②①灰色、棕灰绿色黏土夹粉砂薄层, 含腹足类碎块, 133.45~139.50 m

②②灰色、浅棕灰色粉细砂, 局部见水平层理, 见丽蚌碎片, 139.50~145.80 m

②③灰色, 含砾中粗砂, 结构松散, 145.80~152.15 m

②④灰绿色、棕灰色黏土, 泥质结构, 硬塑, 152.15~161.05 m

②⑤浅黄灰色粉细砂, 局部见水平层理, 161.05~166.90 m

②⑥灰色含粉砂黏土, 切面粗糙, 硬塑, 166.90~168.30 m

②⑦黄褐色、灰黄色粉细砂, 未见层理,

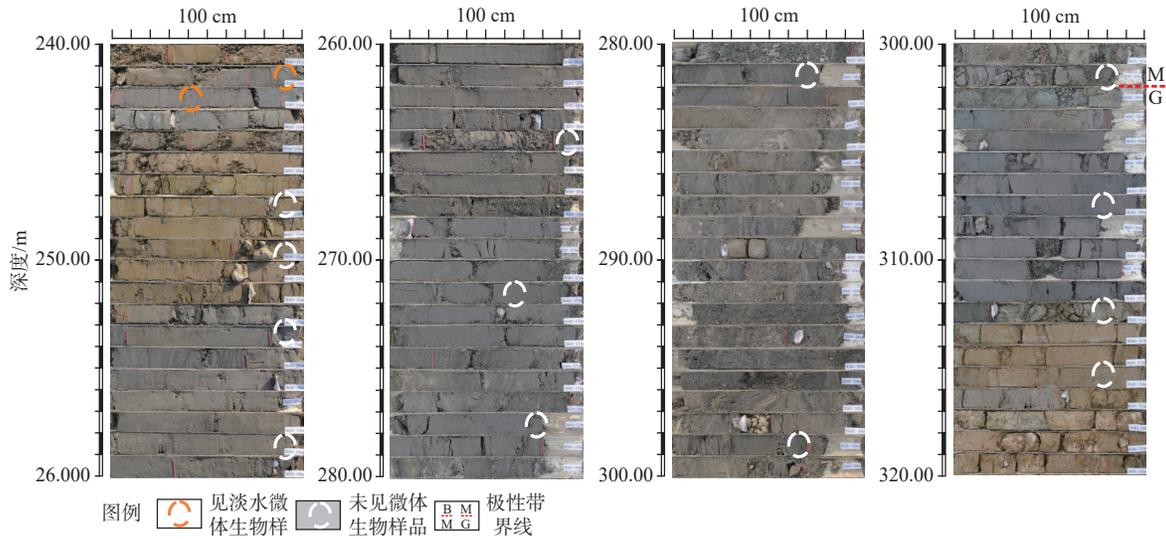


图 3 ZKA01 钻孔岩芯照片 (240.00~320.00 m)

Fig. 3 Photos and stratigraphic columns of the ZKA01 core (240.00–320.00 m)

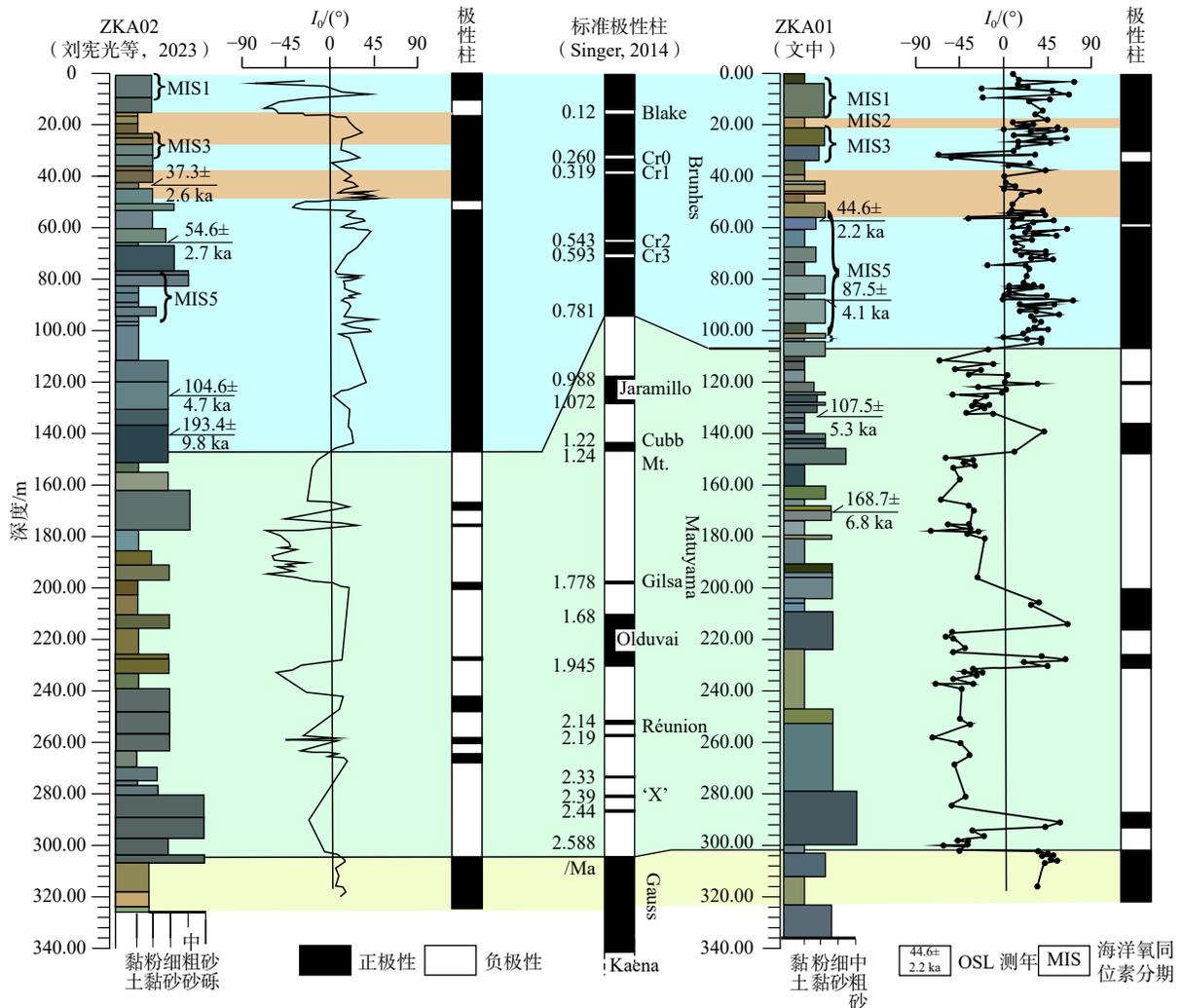


图 4 ZKA01 钻孔与其南侧 ZKA02 钻孔古地磁极性柱对比

Fig. 4 Palaeomagnetism columns, stratigraphic division and OSL dating data in the ZKA01 and ZKA02 boreholes

168.30~174.75 m

(5)下更新统启东组(Qp¹h; 28~38层),埋深174.75~300.25 m,厚125.50 m

⑳灰黄色、灰色含粉砂黏土,岩芯较硬,见非海相介形类化石,174.75~179.35 m

㉑灰色粉细砂,未见层理,质均色匀,179.35~181.55 m

㉒灰黄色、灰色、棕灰色含粉砂黏土,见非海相介形类化石,181.55~191.50 m

㉓黄褐色、灰色黏土质粉砂,未见明显层理特征,191.50~196.10 m

㉔灰色粉细砂,未见明显层理特征,196.10~204.00 m

㉕灰褐色、灰绿色黏土,泥质结构,硬塑,偶见钙质结核,204.00~209.25 m

㉖灰色粉细砂,具水平层理、斜层理,209.25~225.30 m

㉗黄褐色含黏土粉砂,普遍见黄褐色铁染,硬塑225.30~247.80 m

㉘黄灰色粉砂、粉细砂,247.80~253.85 m

㉙灰色粉细砂、细砂,具水平层理、斜层理,253.85~279.00 m

㉚灰色含砾中粗砂,局部见平行层理、交错层理,279.00~300.25 m

(6)新近系盐城组(N₁₋₂yc; 39~41层),未见底

㉛灰绿色、棕灰色含粉砂黏土,岩性硬塑,300.25~302.80 m

㉜深灰色粉砂,整体质均色匀,302.80~312.20 m

㉝棕黄色、黄色黏土,硬塑,发育不规则状钙质结核,312.20~320.00 m

2 材料与方 法

为建立钻孔地层格架以及后续的沉积环境分析,对该孔岩芯样品进行了OSL年代学和古地磁学测试,以及微体生物的分析鉴定。

2.1 光释光(OSL)样品的采集、制备及测试

OSL样品采集4件(图2),由自然资源部地下水矿泉水及环境监测中心测试完成。细颗粒组分制样:在实验室红光(波长640±10 nm)条件下打开样品,用浓度40%的H₂O₂和30%的盐酸去除有机质和碳酸盐类,然后加30%的氟硅酸腐蚀5天,用

蒸馏水清洗至中性。样品测定使用美国Daybreak2200光释光仪,辐照的测片均在801E辐照仪中进行,其⁹⁰Sr-^Yβ放射源的照射剂量率约为0.103871 Gy/Sec。细颗粒样品采用简单多片再生法测量样品的等效剂量,即在天然和再生剂量OSL(Li)测试结束后,辐照试验剂量,并用试验剂量OSL信号(Ti)来监测感量变化,利用天然/再生剂量与其后试验剂量OSL信号的比值(Li/Ti)来确定等效剂量值。

2.2 古地磁的采集、制备及测试

古地磁样品采集867块,其中黏土采样间隔20 cm,粒度较粗的砂层采样间隔50 cm左右。在岩芯新鲜层面上用2 cm×2 cm×2 cm的无磁立方体塑料盒取样,采样点确切位置视岩芯状况而定,只采取钻探过程中无扰动的岩芯。

所有样品均在中国科学院地质与地球物理研究所古地磁实验室作系统磁性测量。测试仪器为KLY-4卡帕桥旋转磁化率仪、2G760U-Channel岩石超导磁力仪,样品进行10~70 mT(毫特斯拉)交变磁场的逐步退磁,样品的退磁值多选在20~50 mT之间,少数样品选在60~70 mT。交变退磁后的数据结果作为最终的分析依据。

在退磁后数据处理时发现一些问题,如强氧化条件下形成的强潜育化/锈染沉积物以及多含钙质结核的样品,其测试数据质量一般不高;淡灰色、灰绿色等潜育化层位样品剩磁较弱,且难以退净;砂层中的样品磁性矿物含量较少,退磁初始值很小,没有记录下当地的地磁场信息;故而剔除这些类型样品(胡云壮等,2014),最后采用326个有效数据进行全孔磁倾角曲线绘制(图4)。

2.3 微体生物及宏体生物标本的采集及鉴定

微体生物共采集78组样品,采集间隔为2~4 m,在岩性过渡带适当加密,单一较厚地层适当放宽。各样品均开展有孔虫、介形类及其他微体动植物(轮藻、植物根管),以及淡水双壳类腹足类等宏体标本的鉴定。

定量取30 g干样,按照海洋地质调查规范,经双氧水分解,以63 μm分析筛淘洗后,取筛上物烘干在显微镜下挑选全部标本。粗估1个门类标本超过200个个体后,即先行缩分,鉴定后再计算为样品中全部标本总量,编绘分类数量统计图,数量超过100枚(瓣)时以算数值和常用对数值曲线对比表达(图5)。

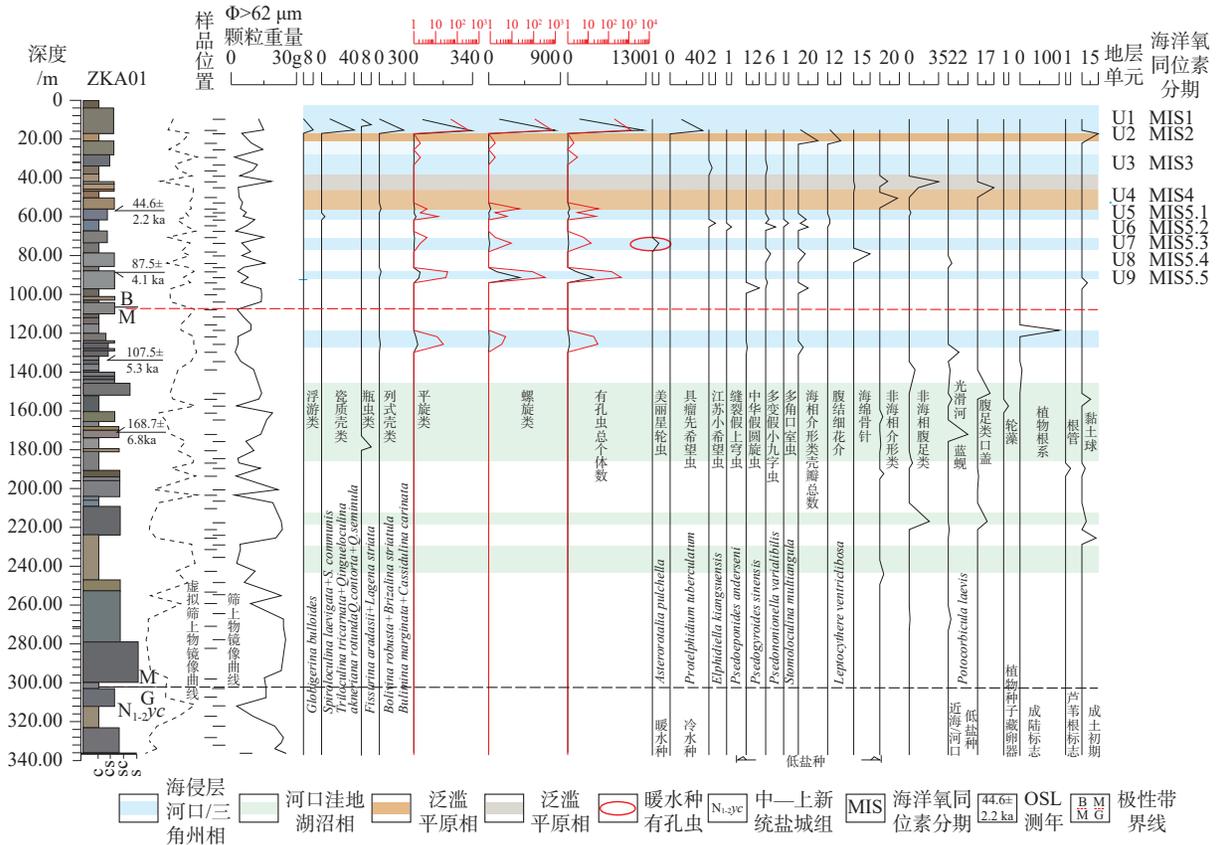


图 5 ZKA01 钻孔微体生物随深度分布变化图

Fig. 5 The down-core variations of the microorganisms contents in the ZKA01 borehole

3 结果

3.1 地层年代确定

ZKA01 钻孔岩芯中共测得 OSL 有效年代数据 4 个(表 1, 图 2)。

据全国地层委员会(2002)规定以布容/松山

(B/M)极性时、松山/高斯(M/G)极性时界线的倒转年代,即 0.78 Ma 和 2.58 Ma 分别作为中更新世/早更新世和第四纪/新近纪地层界线年代。依据整理后的古地磁样品测试结果,编绘 ZKA01 钻孔磁倾角曲线,并与 Singer(2014)提出的松山(Matuyama)极性时以来的时间标尺作对比,建立了全孔古地磁极性柱(图 4)。

表 1 ZKA01 钻孔光释光测年数据

Table 1 OSL dating data of the ZKA01 borehole

样品编号	岩性特征	深度/m	等效剂量/Gy	年剂量Gy/ka	含水量/%	年龄/ka
14G-172	粉砂	58.90	140.27±3.83	3.14±0.13	22.3	44.6±2.2
14G-173	粉细砂	88.10	284.63±7.01	3.25±0.13	24.7	87.5±4.1
14G-174	粉砂	133.10	410.73±11.70	3.82±0.15	22.9	107.5±5.3
14G-175	粉细砂	169.90	578.59±1.34	3.43±0.14	16.5	168.7±6.8

ZKA01 钻孔磁倾角曲线显示的 B/M 界线与 ZKA01 钻孔南侧相距 10 km 的 ZKA02 孔 B/M 界线 147 m 对比(刘宪光等, 2023), ZKA01 钻孔可能存在中更新世地层间断。地层间断长期以来视为陆相

地层中多于海相地层。河流的侧向加积、摆动迁移、河口坝的前展,即都以产生不同时间尺度的地层间断。长江口开敞型泥质潮坪中,若以层偶保存率来讨论潮坪层序的完整性,则可见在约百年的建

造时间里,只有 0.74% 有沉积物记录,剩余的 99.26% 的时间都是沉积间断(范代读等, 2001)。两孔早更新世具河流二元结构序列的地层厚度较为一致,体现了当时河流沉积在两孔所在区域是稳定发育的。因此,划定 ZKA01 钻孔 M/G 界线划在 300.25 m 处, B/M 界线位置定在 108 m。

OSL 测年技术在近 20 余年的不断发展中,逐渐成为了第四纪晚期沉积年代判定的重要手段(刘智荣等, 2021)。该孔 4 个 OSL 测年结果虽然与南侧 10 km 的 ZKA02 孔相关数据(刘宪光等, 2023)接近,部分测试结果的年龄数值要比实际年龄偏小。如 58.90 m 处测得年龄为 44.6 ± 2.2 ka, 此时地层对应 MIS4 阶段,实际年龄应该在 60~72 ka, 133.10 m 处测得年龄为 107.5 ± 5.3 ka, 根据古地磁年龄划分此处年龄应属于中更新世,年龄应大于 0.78 Ma。此类情况最早见于天津 BZ2 孔研究, 100 ka 的 OSL 测年与自上而下第三海侵层底板、古地磁 B/M 界线出现在接近的深度(姚政权等, 2006),即使在东海陆架边缘钻孔地层研究中, OSL 高密度采样测年也出现过年代倒转(Wang et al., 2014)。88.1m 处的测得年龄 87.5 ± 4.1 ka, 年代数据在氧同位素 5 期(MIS5, 74~128 ka)内,尚在合理范围内。

因此晚更新世以来的地层界线根据岩石地层和生物底层综合判定。中、上更新统界线位于钻孔的第三海相层底部,即 92.95 m 处。上更新统与全新统界线置于该钻孔发现的第 I 海相层底部,即 MIS1 阶段与末次盛冰期时硬黏土层界面 16.65 m 处。

3.2 微体化石鉴定结果

ZKA01 钻孔 78 组样品经过鉴定分析,仅在 13 件样品中发现海相微体生物,继而依据其组合、代表层段确定了海侵层位。同时结合岩性,对全孔地层划分为 10 个层段(U1~U10; 图 5)。

(1) U1(深度: 0~16.65 m)

取样 2 个,其中 9.60 m 样见有孔虫近 200 枚,未见浮游种。瓷质壳中少见广盐种三室三块虫 *Triloculina tricarnata* d'Orbigny、阿卡尼圆形五块虫 *Qingueloculina akneriana rotunda* (Gerke) 等。平旋类 50 枚,以冷水团种具瘤先希望虫 *Protelphidium tuberculatum* d'Orbigny 居多,另见少量广温广盐种凹坑筛九字虫 *Cribronionion gnytsusuturalis* Ho, Hu et Wang、异地希望虫 *Elphidium advenum* (Cushman) 和优美花朵虫 *Florilus decorus* (Cushman et McCulloch)

等,低盐广盐种孔缝筛九字虫 *C.porisuturalis* Ho, Hu et Wang 和缝裂希望虫 *E. magellanicum* Heron-Allen et Earland 更少,正常盐度的亚洲希望虫 *E. asiaticum* Polski 和塔斯曼管九字虫 *Pacinonion tasmaniensis* Carter 各 2 枚。卷转虫类有孔虫 133 枚,以广盐广温种毕克卷转虫变种 *Ammonia beccarii* vars. (Lineé) 为主,偏深水的少室卷转虫 *A. pauciloculata* (Phleger et Parker) 次之,偏正常盐度的高锅卷转虫 *A. takanabensis* (Ishizaki) 次之,近亲卷转虫 *A. sobrina* (Shupack) 和同现卷转虫 *A. annectens* Parker et Jones、小个体的河口种奈良小上口虫 *Epistminella naraensis* (Kuwano) 各见一两枚。

15.40m 样见有孔虫近 1500 枚,其中见小个体浮游有孔虫泡抱球虫 *Globigerina bulloides* d'Orbigny 8 枚,稍大个体的瓷质壳光滑抱环虫 *Spiroloculina laevigata* Cushman et Todd、普通抱环虫 *S. communis* Cushman et Todd、半缺五块虫 *Q. seminula* (Linné) 共 40 枚,小个体正常盐度的线纹瓶虫 *Lagena striata* (d'Orbigny) 和瓜子缝口虫 *Fissurina aradasii* Sequenza 共 8 枚,列式壳类强壮箭头虫 *Bolivina robusta* Brady、条纹判草虫 *Brizalina striatula* Cushman 和具缘小泡虫 *Bulimina marginata* d'Orbigny 共 28 枚,皆指示河口区小个体微体生物由海向陆的搬运,被称为“易漂种”(李从先等, 1998)。有孔虫含量大大高于海相介形类,即指示河口相生物埋藏群特点(汪品先等, 1986)。

(2) U2(深度: 16.65~21.30 m)

取样 1 个,浊红棕色黏土,块状,下部纹层发育,上部硬度增高,大部呈中度潜育化锈染,为寒冷气候下沉积,属于 MIS2。在北方河北黄骅地区钻孔,末次冰期浊黄棕色/浊黄橙色块状黏土沉积中也可能发现 2 个有孔虫标本,视为滨海风水鸟的再搬运,不代表海侵(Wang et al., 2008)。

(3) U3(深度: 21.30~36.60 m)

取样 4 个,其中 22.2 m 样中见有孔虫异地希望虫和毕克卷转虫变种各 1 枚。25.6 m 样未见生物等。29.6 m 见低盐广盐有孔虫江苏小希望虫 *Elphidiella kiangsuensis* Ho, Hu et Wang、毕克卷转虫变种、多变小假九字虫 *Pseudonionionella variabilis* Zheng 各一枚,所在棕灰色粉砂层中下部水平层理和沙泥互层沉积发育,判断为内河口或河湾沉积,属于 MIS3。

(4)U4(深度: 36.60~56.00 m)

取样 6 个, 该层段见淡水陆相介形类, 以布氏土星介 *Ilyocypris bradyi* Sars、纯净小玻璃介 *Candoniella albicans* (Brady) 为主。除此之外见淡水陆相腹足类副豆螺 *Parabythenia* sp.、白小旋螺 *Gyraulus albus* 等。

(5)U5(深度: 56.00~61.65 m)

取样 3 个, 自下而上为浅蓝绿色~浅灰色黏土, 略显水平纹层, 3 个样品中 56.6 m 见小个体列式壳强壮箭头虫 2 枚, 平旋类广盐低盐种异地希望虫和偏深水的亚洲希望虫 *Elphidium asiaticum* Polski 各 2 枚。卷转虫类广盐种毕克卷转虫变种 24 枚, 广盐种多变假小九字虫 2 枚。海相介形类 8 瓣, 为腹结细花介、东台中华花介 *Sinocythere dongtaiensis* Chen、典型中华美花介 *Sinocytheridea impressa* (Brady) 等广盐低盐种。该层整体显示向上水深变浅, 为低盐湿地相, 判断为 MIS5.1。

(6)U6(深度: 61.65~70.50 m)

取样 3 个, 系长江三角洲及毗邻杭嘉湖平原(陈忠大, 2002)低水位域沉积的“灰绿色黏土”, 块状结构, 局部略显纹层。该层未发现微体生物及腹足类。

(7)U7(深度: 70.50~76.00m)

取样 2 个, 分别见数个和十数个有孔虫, 螺旋类以主要为毕克卷转虫变种 *A. beccarii* vars.、多变假小九字虫 *P. variabilis*, 平旋类以孔缝筛九字虫 *C. porisuturalis* 居多, 其中见一个暖水种美丽星轮虫 *Asterotalia pulchella*, 7 瓣海相介形类为美山双角花介 *Bicornucythere bisanensis* 和中华美花介 *Sinocytheridea impressa*。海绵骨针 15 个。

(8)U8(深度: 76.00~88.70m)

取样 4 个, 未见微体生物, 见近海河口相双壳类光滑河蓝蚬 *Potocorbicula laevis* 碎块, 可能系风浪搬运。

(9)U9(深度: 88.70~92.95 m)

取样 2 个, 分别见 100 余和 400 余枚有孔虫, 螺旋类以毕克卷转虫变种 *A. beccarii* vars. 为优势种, 零星见低盐种中华假圆旋虫 *Pseudogyroidina sinensis*。平旋类以见光滑九字虫 *Nonion laevigata*、孔缝筛九字虫 *C. porisuturalis* 居多。下部样品尚见 10 瓣海相介形类, 以东台中华花介 *Sinocythere dongtaiensis*(8 瓣) 居多, 其余为中华美花介 *Sinocytheridea*。

(10)U10(深度: 92.95~320.00 m)

取样 51 个, 整个中下更新统及新近系盐城组上部(92.95~320.00 m)仅 124.00 m、128.00 m 和 132.00 m 处 3 个样品见少量海相为体古生物化石, 最多见 20 余枚有孔虫, 以缝裂希望虫、孔缝筛九字虫、凹坑筛九字虫、奈良小上口虫为主, 正常盐度种海相介形类布氏纯艳花介 *Pistocythereis bradyi* 和广盐种中华美花介极少出现, 不排除强浪搬运作用。

4 第四纪晚期以来沉积环境演化

4.1 ZKA01 孔的年代地层格架及古沉积环境演化

据微体古生物鉴定结果可知, ZKA01 钻孔在沉积记录中完好的保存了 3 套海相地层记录(图 5), 较好地揭示了晚更新世以来 3 次大规模海侵在研究区的响应(汪品先等, 1981; 王强和田国强, 1999; 王中波等, 2020), 即全新世时期(MIS1)的“第 I 海相层”、MIS3 时期(24~60 ka)的“第 II 海相层”和 MIS5 时期(74~128 ka)的“第 III 海相层”。海相层作为标志性的层序地层为该钻孔的地层划定提供了重要依据。

(1)MIS1 时期(U1: 0~16.65 m), 沉积物岩性特征以灰色-灰黄色粉砂、粉细砂为主, 中部夹有黏土层, 层理发育。除上部 0~2.70 m 外, 下部沉积层(2.70~16.67 m)中有孔虫丰度为钻孔丰度最高, 且多以近岸浅水种毕克卷转虫变种 *Ammonia. beccarii* vars. 为主, 与已报道结果较为一致(张茂恒和王建, 2003; 王颖等, 2006; 韦一等, 2011; 于俊杰等, 2014)。介形类以海相腹结细花介 *Leptocythere ventriclivosa* 居多, 推断此层段中下部为滨岸浅水的浅海环境。整个层段对应 12 ka 以来 MIS1 的“第 I 海相层”。

(2)MIS2 时期(U2: 16.65~21.30 m), 沉积物以黄褐色黏土为主, 表示较强氧化背景, 符合末次盛冰期古气候特点(王强等, 2008), 未见微体生物, 仅见十余个黏土球, 显示经历了因水位下降脱水形成的硬黏土层(成土过程)。同时, 沉积物中含铁锰斑点, 这是由于地下水活跃多见铁锰元素剧烈迁移所形成。推断属于末次盛冰期, 即 MIS2 时期形成的洪泛平原沉积(陆相)。该层硬黏土层为长江三角洲地区标志性地层, 顶板常被用作全新世更新世地层划分界线(陈报章等, 1991; 孙丰瑞等, 2019)。

(3)MIS3 时期(U3: 21.30~36.60m), 沉积物以

浅灰色-浅棕灰色粉砂、黏土质粉砂为主,局部显薄层-互层状。间断零星含有的有孔虫属种为半咸水江苏小希望虫 *Elphidium. kiagsuensis* 和近岸浅水种异地希望虫 *Elphidium. advenum*, 揭示这样的沉积构造可能系河道韵律沉积,间受近岸强潮影响。在深度上和年代上相当于 MIS3 时期(24~60 ka)的“第Ⅱ海相层”(杨达源等, 2004; 张振克等, 2010; 夏非等, 2012)。

(4) MIS4 时期(U4: 36.60~56.00 m), 沉积物以灰黄色硬黏土、粉砂。该层段不含有孔虫化石、介形类全部是非海相属种布氏土星介 *Ilyocypris. bradyi*、平行小玻璃介 *Candona. parallera*、疏忽玻璃介 *Candona. neglecta*, 以及陆相但是腹足类 *Parabythenia* sp.、白小旋螺 *Gyraulus. albus*, 反映该层段的陆相淡水环境,可能为泛滥平原上短暂积水形成的湖沼相。

(5) MIS5 时期(U5~U9: 56.00~92.95 m), 根据岩性特征及沉积环境进一步划分为5个层段: 55.95~61.65 m、61.65~67.60 m、67.60~76.00 m、76.00~88.70 m、88.70~92.95 m。整体对应于 MIS5 时期(74~128 ka)的“第Ⅲ套海相层”。

①MIS5.1 时期(U5: 56.00~61.65 m)

该层段岩性特征以灰色、浅棕灰色黏土质粉砂为主,夹粉砂薄层,水平层理发育。见20~30枚有孔虫,其中见浮游种一个个体,暖水种美丽星轮虫 *Asterorotalia pulchella* 一个,下部样品见7瓣海相介形类,推测为海相沉积环境。

②MIS5.2 时期(U6: 61.65~70.50 m)

该层段岩性特征以灰色粉细砂,水平层理较发育,底部灰绿色黏土,泥质结构,块状构造,偶见钙质结核。该层未发现微体化石,见光滑河蓝蜆 *Potamocorbicula laevis*, 推测为河漫滩相沉积。在北方沿海经验性总结中,浅部六七十米地层内氧化/还原层段交替,基本就是海陆相地层更迭(王强,李从先, 2009)。

③MIS5.3 时期(U7: 70.50~76.00 m)

该层段岩性特征以棕灰色黏土质粉砂为主,水平层理。见数个和十数个有孔虫,主要为毕克卷转虫变种、孔缝筛九字虫、多变假小九字虫,其中见浮游种一个个体,暖水种美丽星轮虫 *Asterorotalia pulchella*。见7瓣海相介形类,主要为美山双角花介 *Bicornucythere bisanensis* 和中华美花介 *Sinocythereidea impressa*。海绵骨针15个。该段推测

为河口沉积环境,受海洋潮汐作用影响。

④MIS5.4 时期(U8: 76.00~88.70 m)

该套地层岩性特征主要为3套棕灰色粉砂与绿灰色、黑灰色黏土层,见水平层理,黏土见铁锰结核、钙质结核。该层未发现微体化石及腹足类化石,底部地层见植物根系与炭屑,为河漫滩相沉积。

⑤MIS5.5 时期(U9: 88.70~92.95 m)

该层段岩性特征以浅棕灰色粉砂夹黏土薄层,水平层理发育。发育有孔虫和海相介形虫,数量达数百枚,以毕克卷转虫变种 *Ammonia. beccarii* vars. 为优势种。次之为光滑九字虫、孔缝筛九字虫、中华假圆旋虫,海相介形类,除中华美花介,又以东台中华花介 *Sinocythere dongtaiensis* 居多。该段为 MIS5 早期海侵,海侵强度较大,仅次于全新世海侵。

综上所述, ZKA01 钻孔 MIS5 时期(74~128 ka)的深度范围在 56.00~92.95 m, MIS3(24~60 ka)时期深度范围在 21.30~36.60 m, MIS1 时期(现在~12 ka)深度范围在 0~16.65 m。ZKA01 钻孔连续的海相层反映出该地区自晚更新世以来沉积环境未受到大的河床冲刷,从而比较完整的保存了 MIS1、MIS3、MIS5 各时期海侵沉积层,同时,也指示着古长江河道晚更新世以后可能由东台地区开始逐渐向南部摆动至现今位置。

4.2 长江三角洲北翼地区多孔海侵地层的对比

为了更好地认识长江三角洲北翼地区的晚更新世以来的海侵层分布规律,对该地区海侵层进行对比(图6),并对有微体古生物的钻孔(图1)进行分析。

长江三角洲北翼地区晚更新世以来的 MIS1、MIS3、MIS5 海侵层发育齐全。全新世时期的第 I 海侵层(MIS1)在晚更新世以来3期海侵中规模最大,发现的有孔虫数量最多。第 II 海侵层(MIS3)在发育深度向南逐渐变深,同时也指示这长江主河道逐渐南移。第 III 海侵层(MIS5)底部在各钻孔埋深大致相当,长江三角洲地区东台一如东一带3个钻孔中, ZKA01 钻孔深度为 92.95 m, ZKA02 钻孔深度为 98.90 m(刘宪光等, 2023), D9 钻孔深度为 95.30 m(吴标云和李从先, 1987),也预示着海侵初期长江三角洲北翼地势相对平坦。第 III 海侵层(MIS5)底部可作为一个很好标志性地层界面或等时面给长江三角地区的地层划分与对比工作提供依据(图6,图1)。

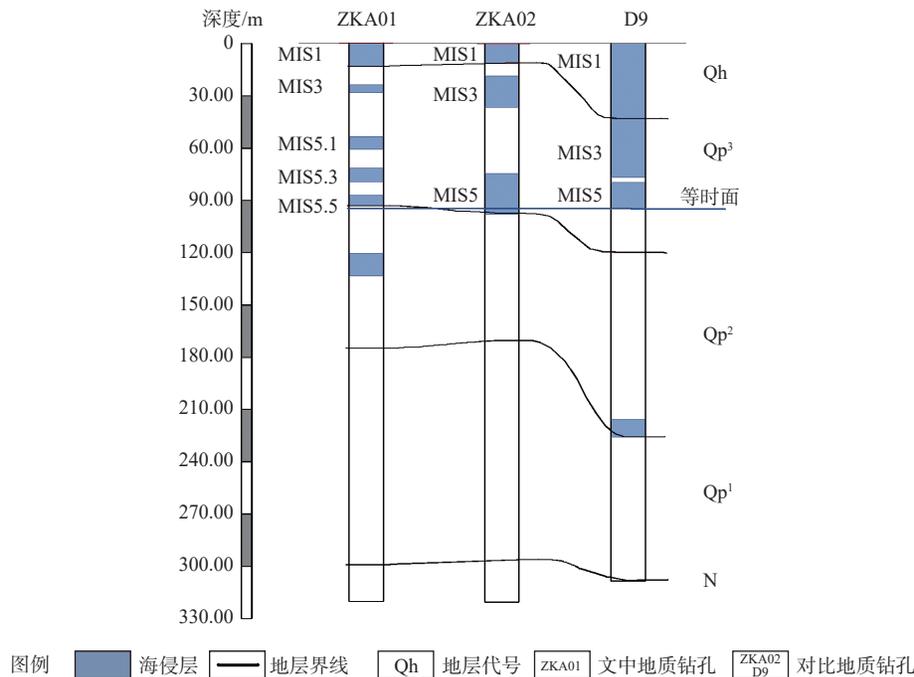


图 6 长江三角洲北翼晚第四纪海侵层对比图

Fig. 6 Comparison of Late Quaternary Marine transgressions in the north wing of the Yangtze River Delta

5 结论

(1) 通过岩石地层、层序地层(海侵层), 辅以 OSL、古地磁等测年数据, 划定 ZKA01 钻孔 B/M 界线位置在 108.00 m, M/G 界线位置为 300.25 m。中、上更新统界线位于该钻孔发现的第 III 海相层底部, 即 92.95 m 处。上更新统与全新统界线置于该钻孔发现的第 I 海相层底部, 即 MIS1 阶段与末次盛冰期时硬黏土层界面 16.65 m 处。

(2) 利用海相微体化石分析识别出的晚更新世以来多期海侵与深海氧同位素 MIS1, MIS3, MIS5 有着较好的对应关系。其中 MIS5 阶段多期次的海陆交互作用也表明氧同位素的多周期性在该钻孔中具有较好的沉积旋回响应。

(3) 通过对东台—如东一带 3 个钻孔 (ZKA01、ZKA02、D9) 的对比发现, 第 I 海侵层发育规模较大, 第 II、III 海侵层在长江三角洲南北两处均有记录, 同时发现第 III 期海侵层 (MIS5) 早期海侵记录在该地区各钻孔埋深大致相当, 该界面可作为长江三角洲地区的地层划分与对比研究的标志性地层。

致谢: 本文成文中得到青岛海洋地质研究所王飞飞副研究员的悉心指导, 在此深表感谢。同时感谢谢思聪、邹彬等同事的大力帮助, 以及自然资源

部地下水矿泉水及环境监测中心测试年代样品。感谢中国地质调查局天津地质调查中心王强先生分析鉴定微体/宏体生物, 并指导区域对比和绘图创新。感谢审稿专家的宝贵意见。

References

- All China Commission of Stratigraphy, 2002, China Regional Chronostratigraphy (Geological Chronology) Table Instructions [M], Beijing: Geosciences Press: 1-72(in Chinese with English abstract)
- CHEN B Z, LI C X, YE Z Z, 1991. Holocene bottom boundary and "Hard Clay Band" in the northern flank of the Changjiang River Delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 11(2): 37-46. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Z D, QIN Z S, LIANG H, et al., 2002. High-resolution stratigraphic correlation method of the Quaternary in the Hangzhou-Jiaxing-Huzhou plain[J]. Geology in China, 29(3): 275-280. (in Chinese with English abstract)
- FAN D D, LI C X, CHEN M F, et al., 2001. Quantitative analyses on diastems of the mudflat deposits in the Yangtze river delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 21(4): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- HU Y Z, XU Q M, YUAN G B, et al., 2014. Magnetostratigraphy of borehole CK3 and record of the Quaternary volcanic activities in Xiaoshan of Haixing, Hebei Province[J]. Journal of Palaeogeography, 16(3): 411-426. (in Chinese with English abstract)
- JIANG R, YANG Z L, YU J J, et al., 2014. Stratigraphic division of Quaternary strata and paleoenvironment analysis for Xinghua-Tongzhou region in the north flank of the Yangtze River delta[J]. Resources Survey Environ-

- ment, 35(4): 263-269. (in Chinese with English abstract)
- LAO J X, YANG Z L, YU J J, et al., 2016. Quaternary multistratigraphic study of Borehole ZK10, Xinghua, Jiangsu Province[J]. Geological Bulletin of China, 35(10): 1705-1714. (in Chinese with English abstract)
- LI C X, WANG P X, 1998. Study on late quaternary estuary stratigraphy of the Yangtze River[M]. Beijing: Science Press: 1-222. (in Chinese)
- LI C X, CHEN Q Q, FAN D D, et al., 1999. Palaeogeography and palaeoenvironment in Changjiang delta since last glaciation[J]. Journal of Palaeogeography, 1(4): 12-25. (in Chinese with English abstract)
- LI C X, WANG Q, FAN D D, 2013. Chapter 15, Marine delta sediment[M]//FENG Z Z. China Sedimentology. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press: 812-905. (in Chinese)
- LIN C M, ZHANG X, DENG C W, et al., 2016. Sedimentary characteristics and environmental evolution of the Late Quaternary incised-valley fills in the Nantong Area of Jiangsu Province, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 34(2): 268-280. (in Chinese with English abstract)
- LIN Z Y, JIN X L, GUAN M L, et al., 2019. Quaternary sedimentary sequence of the southern Yangtze River Delta and its coupling with palaeoenvironmental evolution[J]. Science Technology and Engineering, 19(13): 15-24. (in Chinese with English abstract)
- LIU X G, YANG J W, HU L, et al., 2023. Research on Quaternary multiple stratigraphic division of ZKA02 in the North Flank of the Yangtze river delta[J]. Journal of Stratigraphy, 47(1): 49-58. (in Chinese with English abstract)
- LIU Z R, XUE H Y, WANG C S, 2021. Late Quaternary depositional characteristics and environment significance of the Xibozhang section in Baoding, central Hebei Plain, China[J]. Journal of Geomechanics, 27(6): 1011-1023. (in Chinese with English abstract)
- MIAO W D, LI S J, WANG R H, 2009. Preliminary Study On Sedimentary Characteristics and stratum division of J9 core in the North Wing of the Yangtze River delta[J]. Quaternary Sciences, 29(1): 126-134. (in Chinese with English abstract)
- MIAO W D, LI S J, FENG J S, et al., 2016. Stratigraphic division of NB5 core in the Yangtze delta area and its environmental change information[J]. Geology in China, 43(6): 2022-2035. (in Chinese with English abstract)
- SINGER B S, 2014. A Quaternary geomagnetic instability time scale[J]. *Quaternary Geochronology*, 21: 29-52.
- SUN F R, YANG J W, LIU X G, et al., 2019. The ups and downs of the ancient ground in the front of the northern wing of the Yangtze River Delta during the Last Glacial Maximum[J]. Mineral Exploration, 10(5): 1038-1043. (in Chinese with English abstract)
- WANG H, ZHENG X M, QIAN P, et al., 2021. An overview on the first hard soil layer (FHSL) of the Late Pleistocene in the Yangtze River Delta[J]. Quaternary Sciences, 41(6): 1771-1780. (in Chinese with English abstract)
- WANG P X, MIN Q B, BIAN Y H, et al., 1981. Strata of Quaternary transgressions in east China: a preliminary study[J]. Acta Geologica Sinica, 55(1): 1-13. (in Chinese with English abstract)
- WANG P X, BIAN Y H, 1986. Ostracod/foraminifer ratios as indicators of sedimentary environments[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 3(1): 37-50. (in Chinese with English abstract)
- WANG Q, TIAN G Q, 1999. The Neotectonic setting of Late Quaternary transgressions on the Eastern Coastal plain of China[J]. Journal of Geomechanics, 5(4): 41-48. (in Chinese with English abstract)
- WANG Q, YUAN G B, HU Y Z, et al., 2008. Microfossils in tidal flat strata on the northern Huanghua area since the MIS 3[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 25(1): 1-18.
- WANG Q, ZHANG Y F, YUAN G B, et al., 2008. Since MIS 3 stage the correlation between transgression and climatic changes in the north Huanghua area, Hebei[J]. Quaternary Sciences, 28(1): 79-95. (in Chinese with English abstract)
- WANG Q, LI C X, 2009. The type of Quaternary sequence in the East China coastal plain[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 29(4): 39-51. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y, ZHANG Z K, ZHU D K, et al., 2006. River-sea interaction and the North Jiangsu Plain formation[J]. Quaternary Sciences, 26(3): 301-320. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z B, YANG S Y, WANG Q, et al., 2014. Late Quaternary stratigraphic evolution on the outer shelf of the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 90: 5-16.
- WANG Z B, ZHANG J Y, MEI X, et al., 2020. The stratigraphy and depositional environments of China's sea shelves since MIS5 (74-128) ka[J]. Geology in China, 47(5): 1370-1394. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z H, QIU J B, RAN L H, et al., 2004. Chronostratigraphy and transgression/regression during Late Pleistocene in the southern Changjiang (Yangtze) River Delta Plain[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 24(4): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- WU B Y, LI C X, 1987. Quaternary geology in Changjiang delta[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-166. (in Chinese)
- WEI Y, HAN F, WEI N Y, et al., 2011. Discovery and Geological Significance of Late Pleistocene-Holocene Marine Facies Foraminifer Assemblage in Daqiao Town, Jiangdu, Jiangsu Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(3): 66-72. (in Chinese with English abstract)
- XIA F, YIN Y, WANG Q, et al., 2012. Sequence stratigraphy of the central part of North Jiangsu coasts since Late MIS 3, Eastern China[J]. Acta Geologica Sinica, 86(10): 1696-1712. (in Chinese with English abstract)
- YANG D Y, CHEN K F, SHU X M, 2004. A preliminary study on the palaeoenvironment during MIS 3 in the Changjiang delta region[J]. Quaternary Sciences, 24(5): 525-530. (in Chinese with English abstract)
- YAO Z Q, GUO Z T, CHEN Y K, et al., 2006. Magnetostratigraphy of marine-terrestrial facies deposits in Bohai Bay[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 26(1): 9-15. (in Chinese with English abstract)
- YU J J, HU F, YANG Z L, et al., 2014. Identification of Holocene foraminifera assemblages in Sijia Town of Nantong City, Jiangsu Province, and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 33(10): 1609-1620. (in Chinese with English abstract)
- YU J J, LAO J X, JIANG R, et al., 2016. Reconstruction of the Late Quaternary palaeoenvironment on the north wing of Yangtze River Delta, based on comparative study of the multistratigraphies[J]. Geological Bulletin of China, 35(10): 1692-1704. (in Chinese with English abstract)

- ZHANG H, SHI G, WU H, et al., 2021. Quaternary activity of the Luodian-Zhoupu buried fault in the Shanghai region: integrated exploration and research[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(2): 267-279. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG M H, WANG J. 2003, Environmental significance of Holocene foraminiferal assemblages in Shanggang, Yancheng[J]. *Marine Geology Letters*19(9): 5-8. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Z K, XIE L, ZHANG Y F, et al., 2010. Sedimentary records of the MIS 3 transgression event in the North Jiangsu Plain, China[J]. *Quaternary Sciences*, 30(5): 883-891. (in Chinese with English abstract)
- ### 附中文参考文献
- 陈报章, 李从先, 业治铮, 1991. 长江三角洲北翼全新统底界和“硬粘土层”的讨论[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 11(2): 37-46.
- 陈忠大, 覃兆松, 梁河, 等, 2002. 杭嘉湖平原第四纪地层高精度对比方法研究[J]. *中国地质*, 29(3): 275-280.
- 范代读, 李从先, 陈美发, 等, 2001. 长江三角洲泥质潮坪沉积间断的定量分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 21(4): 1-6.
- 胡云壮, 胥勤勉, 袁桂邦, 等, 2014. 河北海兴小山 CK3 孔磁性地层与第四纪火山活动记录[J]. *古地理学报*, 16(3): 411-426.
- 蒋仁, 杨祝良, 于俊杰, 等, 2014. 长江三角洲北翼兴化-通州地区第四纪地层划分及古环境分析[J]. *资源调查与环境*, 35(4): 263-269.
- 劳金秀, 杨祝良, 于俊杰, 等, 2016. 江苏兴化 ZK10 孔第四纪多重地层研究[J]. *地质通报*, 35(10): 1705-1714.
- 李从先, 汪品先, 1998. 长江晚第四纪河口地层学研究[M]. 北京: 科学出版社: 1-222.
- 李从先, 陈庆强, 范代读, 等, 1999. 末次盛冰期以来长江三角洲地区的沉积相和古地理[J]. *古地理学报*, 1(4): 12-25.
- 李从先, 王强, 范代读, 2013. 第十五章 海洋三角洲沉积[M]//冯增昭. 中国沉积学. 2版. 北京: 石油工业出版社: 812-905.
- 林春明, 张霞, 邓程文, 等, 2016. 江苏南通地区晚第四纪下切河谷沉积与环境演变[J]. *沉积学报*, 34(2): 268-280.
- 林钟扬, 金翔龙, 管敏琳, 等, 2019. 长江三角洲南翼第四纪沉积层序及其与古环境演变的耦合[J]. *科学技术与工程*, 19(13): 15-24.
- 刘宪光, 杨晋炜, 胡利, 等, 2023. 长江三角洲北翼 ZKA02 孔第四纪多重地层划分研究[J]. *地层学杂志*, 47(1): 49-58.
- 刘智荣, 薛怀宇, 王昌盛, 2021. 河北平原中部保定西伯章剖面晚第四纪沉积特征及其环境意义[J]. *地质力学学报*, 27(6): 1011-1023.
- 缪卫东, 李世杰, 王润华, 2009. 长江三角洲北翼 J9 孔岩芯沉积特征及地层初步划分[J]. *第四纪研究*, 29(1): 126-134.
- 缪卫东, 李世杰, 冯金顺, 等, 2016. 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*, 43(6): 2022-2035.
- 全国地层委员会, 2002. 中国区域年代地层(地质年代)表说明书[M]. 北京: 地质出版社: 1-72.
- 孙丰瑞, 杨晋炜, 刘宪光, 等, 2019. 末次盛冰期长江三角洲北翼前缘古地面的起伏[J]. *矿产勘查*, 10(5): 1038-1043.
- 王辉, 郑祥民, 钱鹏, 等, 2021. 长江三角洲晚更新世第一硬土层研究进展[J]. *第四纪研究*, 41(6): 1771-1780.
- 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 等, 1981. 我国东部第四纪海侵地层的初步研究[J]. *地质学报*, 55(1): 1-13.
- 汪品先, 卞云华, 1986. 介形虫/有孔虫比值作为沉积环境的标志[J]. *微体古生物学报*, 3(1): 37-50.
- 王强, 田国强, 1999. 中国东部晚第四纪海侵的新构造背景[J]. *地质力学学报*, 5(4): 41-48.
- 王强, 张玉发, 袁桂邦, 等, 2008. MIS 3 阶段以来河北黄骅北部地区海侵与气候期对比[J]. *第四纪研究*, 28(1): 79-95.
- 王强, 李从先, 2009. 中国东部沿海平原第四系层序类型[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 29(4): 39-51.
- 王颖, 张振克, 朱大奎, 等, 2006. 河海交互作用与苏北平原成因[J]. *第四纪研究*, 26(3): 301-320.
- 王张华, 丘金波, 冉莉华, 等, 2004. 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*, 24(4): 1-8.
- 王中波, 张江勇, 梅西, 等, 2020. 中国陆架海 MIS5(74~128 ka) 以来地层及其沉积环境[J]. *中国地质*, 47(5): 1370-1394.
- 吴标云, 李从先, 1987. 长江三角洲第四纪地质[M]. 北京: 海洋地质出版社: 1-166.
- 韦一, 韩芳, 魏乃颐, 等, 2011. 江苏江都市大桥镇晚更新世晚期一全新世有孔虫动物群的发现及其地质意义[J]. *地质科技情报*, 2011, 30(3): 66-72.
- 夏非, 殷勇, 王强, 等, 2012. MIS 3 晚期以来江苏中部海岸的层序地层[J]. *地质学报*, 86(10): 1696-1712.
- 杨达源, 陈可锋, 舒肖明, 2004. 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*, 24(5): 525-530.
- 姚政权, 郭正堂, 陈宇坤, 等, 2006. 渤海湾海陆交互沉积的磁性地层学[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 26(1): 9-15.
- 于俊杰, 胡飞, 杨祝良, 等, 2014. 江苏南通市四甲镇全新世以来有孔虫动物群的发现及其地质意义[J]. *地质通报*, 33(10): 1609-1620.
- 于俊杰, 劳金秀, 蒋仁, 等, 2016. 基于多重地层对比研究还原长江三角洲北翼晚第四纪古环境演变[J]. *地质通报*, 35(10): 1692-1704.
- 张浩, 施刚, 巫虹, 等, 2021. 上海罗店-周浦隐伏断裂第四纪活动性综合探测与研究[J]. *地质力学学报*, 27(2): 267-279.
- 张茂恒, 王建, 2003. 盐城上岗全新世有孔虫组合的环境意义[J]. *海洋地质动态*, 19(9): 5-8.
- 张振克, 谢丽, 张云峰, 等, 2010. 苏北平原 MIS 3 阶段海侵事件的沉积记录[J]. *第四纪研究*, 30(5): 883-891.