

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020091901

苏北 LYK 钻孔千年以来的沉积记录及古环境演化

齐晓婕¹, 黄宝琦¹, 秦亚超², 刘嘉栋¹

1. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

2. 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

摘要: 对废黄河水下三角洲北翼 LYK 钻孔微体生物群的分布特征及属种组合进行研究, 共鉴定底栖有孔虫 50 属 67 种, 介形类 30 属 46 种, 运用 Q 型聚类分析, 将钻孔内底栖有孔虫划分为 5 个组合, 并结合 AMS¹⁴C 测年结果和沉积物粒度特征, 恢复了研究区域千年以来的沉积环境演化: 在黄河流入前, 研究区发育粒度较细、分选较好的陆架沉积, 微体生物群组合接近正常海相; 在黄河夺淮入海后, 研究区开始接受巨量的粗颗粒沉积物, 分选变差, 出现了大量近岸半咸水属种的有孔虫和介形虫, 沉积环境从典型的浅海向三角洲前缘演变; 直到黄河北归后, 大量泥沙供给断绝, 在波浪和潮流的共同作用下, 研究区经历了侵蚀和再沉积过程, 沉积物砂泥比升高, 微体生物群丰度和分异度急剧下降, 广盐类微体生物群增加; 随着侵蚀中心逐渐南移, 研究区动力条件趋于稳定, 前期形成的侵蚀洼地逐渐接受径流和潮流的双向沉积, 出现大量浮游有孔虫等异地分子; 近年来, 伴随波浪和潮汐的改造加工, 研究区逐渐形成了趋于平缓的夷平面, 由动荡的滨岸逐渐过渡到现今稳定的浅海相沉积环境。

关键词: 废黄河三角洲; 粒度分析; 有孔虫; 介形虫; 古环境

中图分类号: P736.22

文献标识码: A

Sedimentary records and paleo-environmental evolution of core LYK in northern Jiangsu province for a thousand of year.

QI Xiaojie¹, HUANG Baoqi¹, QIN Yachao², LIU Jiadong¹

1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China

2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

Abstract: Quantitative study of micropaleontology is carried out for the core LYK drilled at the northern part of the abandoned Yellow River delta. 106 benthic foraminiferal species of 68 genera and 46 ostracod species of 30 genera are discovered. By Q-mode hierarchical cluster analysis, the foraminifera found can be divided into five assemblages. AMS¹⁴C dating and grain size data are adopted to reconstruct the environmental evolution over the past millennia. The results suggest that the study area was dominated by fine-grained and well-sorted shelf sediments and the microbiota assemblage was close to normal marine facies before the Yellow River poured into the sea. The study area started receiving enormous coarse-grained sediments with worse sorting after the Yellow River seized the Huaihe river channel and entered the sea. There appeared a large number of foraminifers and ostracods of nearshore brackish water genus, and the sedimentary environment was changed from a typical shallow sea to a delta-front. Once the Yellow River moved to the north, large sediment supply was cut off. Under the joint action of waves and tidal currents, the study area was suffered from erosion and redeposition, and the sand/mud ratio was thus increased. The abundance and diversity of microbiota declined sharply, while the wide salinity microbiota increased. With the gradual southward movement of the erosional center, the dynamic conditions of the study area became stabilized. The erosional depressions formed in the early stage gradually accepted sediments from both the runoff and tidal current, and a large number of floating foraminifers and off-site molecules appeared. In recent years, along with the reworking of waves and tides, the study area gradually becomes flatter and changes from a turbulent shoreline to a stable shallow sea.

Key words: the abandoned Yellow River delta; grain size analysis; foraminifera; ostracod; paleo-environment

资助项目: 国家自然科学基金“晚上新世—早更新世西太平洋底栖有孔虫群演变的古海洋学意义及其与深层海水环流变化的关系”(41376043); 中国地质调查局项目“1:25万日照幅、连云港幅海洋区域地质调查”(GZH201400206、DD20160139、DD20190236、DD2019037); 广东省基础与应用基础研究基金“晚上新世—早更新世亚南极太平洋海区古环境演化”(2019A1515110896)

作者简介: 齐晓婕(1996—), 女, 硕士研究生, 古生物与地层学专业, E-mail: qixiaojie7777@126.com

通讯作者: 黄宝琦(1972—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事古海洋学与古气候学研究。E-mail: bqhuang@pku.edu.cn

收稿日期: 2020-09-19; 改回日期: 2020-12-10. 文凤英编辑

黄河是中华文明的摇篮,见证了民族的兴衰与更替,对人民的日常生活与经济状况有着极其深远的影响。以多沙善淤著称的黄河,是中国也是世界含沙量最大的河流。在历史进程中,黄河曾频繁地决口改道,据统计自形成至今,较大的改道共有26次^[1],每次流经的年限长短各异,河流流路和河口位置常在山东—渤海和江苏—黄海之间变动和迁移。

公元1128年,为阻金兵南下,宋人决开黄河堤防,迫使其南徙夺占淮河水道^[2],携带7000余亿吨泥沙注入黄海,巨量沉积物不断进积,岸线逐渐向海推进,浅海区原有的潟湖和沙堤,与海岸处新形成的大规模沙咀、沙洲淤积合并,以增叠并陆的方式发育了沼泽平原相三角洲^[3-4],陆上三角洲面积为9000 km²,水下三角洲面积可达25000 km²^[5]。直到公元1855年黄河在铜瓦厢决口,流路才得以北归,重新注入渤海,自此结束了长达七百余年的黄河南流、夺淮入海局面^[2]。径流量剧减致使苏北沿岸入海泥沙枯竭,废黄河口处的泥沙动力平衡被打破,岸滩与水下三角洲侵蚀后退,原先强烈淤涨的三角洲从此进入一个新的调整阶段,被遗弃在江苏北部,成为废黄河三角洲^[6-8]。

废黄河三角洲的核心区域以云梯关为顶点,向北可至灌河口,向南可达射阳河口。海岸线总长139.9 km,正逐步由淤泥质海岸向砂质海岸转变^[9]。受三角洲地形影响,该地区海岸线与浅水等深线向海凸出,外无大型沙洲和岛屿屏蔽掩护,波浪可长驱直入,且河口区是波浪辐聚区,波能易于集中,动力作用强,是本区岸滩与水下地形演变的重要动力因素^[10]。常浪为偏北向,强浪为北-北东向,受黄海沿岸流和季风的影响,波浪季节性变化显著,冬季主要以偏北向风浪为主,夏季大多是以南向浪为主的混合浪^[11]。苏北沿海受到东海前进驻波和黄海旋转潮波两个系统控制,潮流多属不正规半日潮,往复流较显著,涨潮以南东向流为主,落潮以北西向流为主,涨潮流速大于落潮流速,且沿岸存在自北向南的潮余流^[12]。

苏北废黄河三角洲在地质历史时期短时间内的大幅变迁,为海岸环境演变的系统研究提供了难得的实例,长期以来一直是我国海岸三角洲研究的热点地区之一^[13-14]。对苏北废黄河三角洲的研究,最早主要是利用人类生产生活遗留的痕迹,并结合地方志以及人文标志等方法,来推测古三角洲的演变情况^[15-17]。废黄河三角洲主要以陆源泥沙的纵向推进和横向决口为主要的沉积方式形成^[18],其水下部

分的展布范围,最远仍可至现今20 m等深线处^[19]。秦亚超等结合地层剖面解释和岩心剖面分析,将废黄河水下三角洲北翼的沉积体识别为三角洲前缘和前三角洲两个沉积单元^[20]。近岸海域表层沉积物的分析表明,废三角洲北部受潮流和季风影响显著,沉积物冬季的粒径粗于夏季粒径,沉积物粒度由岸向海、由北至南不断变粗,表明了现今南强北弱的水动力差异^[12]。陈可锋等^[21]通过建立潮波数学模型恢复了黄河北归后,南黄海旋转潮波动力中心由北向南不断迁移的过程。但关于本三角洲地区千年以来沉积环境的演变,尚缺乏具体研究。

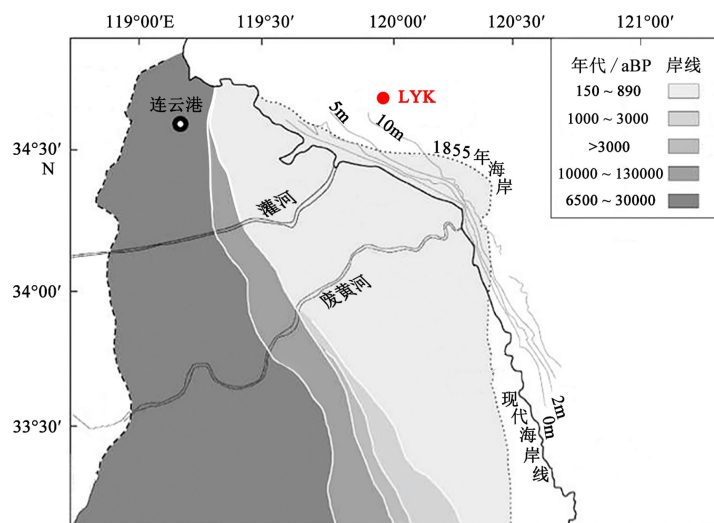
苏北废黄河三角洲发育在海陆过渡相环境中,对气候和环境的变化非常敏感^[22-23],作为黄河在黄海入海口处形成的沉积物,其形成演化与径流、潮流的双重动力作用密切相关,入海泥沙的扩散使三角洲岸线不断向海推进,而海洋作用又会导致岸线逐渐向陆后退^[24]。当黄河入海口的位置发生移动时,海岸线位置与形态会随之发生变化,三角洲沉积物的粒度、分选、微体生物群等多方面性质也会显著改变,因此沉积物的性质能够提供沉积环境和沉积特征等重要信息^[25-27]。

本文在测得位于废黄河三角洲北部LYK钻孔沉积物AMS¹⁴C年龄的基础上,对该钻孔底栖有孔虫和介形虫的属种组合变化进行分析,并结合沉积物的粒度特征,恢复了研究区千年以来的沉积古环境变化,为重建苏北废黄河三角洲的演化过程提供了重要依据。

1 材料和方法

本文研究的LYK钻孔位于南黄海苏北海域的废黄河三角洲北部(34°46'42.768"N、119°58'41.364"E)(图1)、灌河口外,水深13.9 m,取芯长度75.6 m。以上部21.3 m晚全新世岩心为研究对象,进行沉积物粒度分析的样品采样间隔为20 cm,共取得107个样品;微体化石研究样品采样间隔为20 cm,每个样品50 g,共取得107个样品。

沉积物样品过筛后,用Mastersizer 2000型激光粒度仪进行粒度数据的测量,粒径间隔为0.25 Φ。粒度样品的前处理方法如下:称取适量样品置于烧杯,充分混合后加入浓度为6%的H₂O₂,以除去沉积物中的有机组分;加入适量稀盐酸溶解掉生物壳体等碳酸盐成分;用蒸馏水清洗样品至pH值呈中性;最后加入适量(NaPO₃)₆,并用超声波机振荡,待样品完全分散之后,再进行上机测试^[20]。利用GRADISTAT

图 1 LYK 钻孔位置及苏北岸线变迁^[9]Fig.1 The location of core LYK and the change of northern Jiangsu shoreline^[9]

粒度处理软件, 采用 Folk-Ward 公式计算沉积物的平均粒径、分选系数、偏态和峰态等粒度参数的垂向变化^[28-29]。

将粒度波动较大处的样品置于显微镜下, 挑选其中的贝壳碎片并进行称重, 在壳类质量多于 5 mg 的样品中选取 4 个样品, 各挑出 10 mg 贝壳碎片在美国 Beta 实验室进行 AMS¹⁴C 年龄测定,¹⁴C 半衰期采用 5568a, 测年范围通常在 46.6ka 以内。测试结果据其 $\delta^{13}\text{C}$ 值进行分馏效应校正为惯用年龄, 并根据 Marine 20 海洋曲线进行系统校正, 海洋储库校正 (Delta R) 为 $(-234 \pm 60)\text{a}$, 校正软件为 BetaCal 8.20。

进行微体古生物研究的样品, 取样后置于 60 °C 低温环境下进行干燥, 称重后将其放入水中, 浸泡至样品充分散开; 用孔径为 63 μm 的标准铜筛和纯净水进行筛洗至样品无泥附着, 收集粒径大于 63 μm 的粗组分, 置于烘箱进行 60 °C 低温烘干并称量; 置于显微镜下分别鉴定样品中的有孔虫属种和介形虫属种并统计相应数量^[30]。在鉴定过程中, 若样品所含微体生物个体数量较大, 则需进行分样至样品中的底栖有孔虫个体数达 150 枚左右^[31]。挑出的样品主要依据郑守仪^[32]、汪品先^[33-34]、Loeblich and Tappan^[35] 等标准进行鉴定统计, 并计算样品中有孔虫和介形虫的丰度、简单分异度、优势属种含量、底栖有孔虫三大类壳含量等特征值。将每个样品中底栖有孔虫属种的百分含量导入数据分析软件 PAST 3.0, 以主要用于生态学和环境科学的 Bray-Curtis 相似性作为判别距离, 进行 Q 型聚类分析^[36]。底栖有孔虫的氧碳同位素测试由美国 Beta 实验室的 IRMS 稳定同位素质谱仪完成, 选取 2 mg 干净且完整的 *Ammonia beccarii* 个体作为测试样本, 结果换算为 PDB 标准

数据, $\delta^{18}\text{O}$ 的分析精度优于 $\pm 0.2\%$, $\delta^{13}\text{C}$ 的分析精度优于 $\pm 0.1\%$ 。

2 结果分析

2.1 年龄框架的建立

贝壳碎片质量相对大, 不易受外力搬运扰动, 测年结果可信度高, 为浅海测年的常用材料。在 LYK 钻孔粒度波动较大处选取的 4 个测年样品中, 下部 3 个样品的沉积物年龄符合下老上新的沉积序列, 但钻孔最上部的一个样品年龄出现了倒置现象 (表 1), 这可能反映了在水动力或风暴干扰下, 较老的沉积物被侵蚀搬运后发生了再沉积现象。据记载黄河于公元 1128 年夺淮入海^[2], 结合测年结果, 推测黄河改道的沉积记录应始于 1834 cm 深度之下。

2.2 沉积物粒度特征

粒度分布是对沉积物源和动力条件的综合响应, 是沉积物的基本属性之一。根据砂泥百分比、平均粒径、分选、峰态、偏态等粒度参数, 可以有效地判断沉积物的物质来源、搬运介质、动力条件和气候变化等环境信息^[37-38], 粒度的时空变化机制已经成为沉积学中研究海陆相互作用和全球气候变化不可或缺的手段^[9], LYK 钻孔沉积物粒度参数的垂向变化揭示了相应的沉积环境演化过程。

LYK 钻孔沉积物以粉砂为主, 平均含量为 43.84%, 分布较均匀, 垂向差异小; 其次是砂质沉积物, 主要分布在钻孔中上部, 平均含量为 34.86%, 含量由下向上递增且垂向差异较大; 黏土含量最少, 平均含

表1 LYK 站位壳类 AMS¹⁴C 测年结果
Table 1 AMS¹⁴C dating of core LYK

实验室编号	深度/cm	测年材料	直接测定值	常规年龄/aBP	日历年龄/AD
Beta-493151	1060~1064	贝壳	670±30	1100±30	1219±170
Beta-493152	1206~1210	贝壳	180±30	580±30	1649±158
Beta-493153	1830~1834	贝壳	440±30	800±30	1485±165
Beta-493154	1956~1960	贝壳	890±30	1320±30	1010±195

量仅为 21.30%，主要集中在钻孔底部，含量向上递减(图 2)。平均粒径代表了粒度分布的集中趋势，它受控于物源及搬运动力等因素^[39]。LYK 钻孔沉积物的平均粒径为 3.28~8.25 Φ ，平均值为 5.65 Φ 。自钻孔底部向上，沉积物粒径呈明显的递增变化，颗粒由细变粗。

分选系数反映了颗粒沉积时的一致性^[40]，LYK 钻孔沉积物的分选系数为 0.81~2.63，平均值为 1.78，分选中等，由下到上呈先增大后减小的趋势。偏度代表粒度分布的不对称程度，一般而言，河成沉积粒度分布以正偏为主，海滩沉积物偏度近于零^[41]，LYK 钻孔沉积物的偏度为 -0.18~0.65，平均值为 0.34，正偏显著；钻孔峰度分布范围为 0.71~2.48，平均值为 1.37，代表粒度频率曲线较为尖锐。

根据粒度特征分析，将 LYK 钻孔沉积物自下而上划分为 4 段，分别描述如下：

阶段 I (2132~1892 cm)：沉积物以粉砂和黏土为主，几乎不含砂质沉积物，粉砂含量为 46.8%~62.56%，平均值为 52.7%，黏土含量为 37.4%~53.2%，平均值为 47.3%；平均粒径分布稳定，整体较小，平均值为 8.02 Φ ；分选系数为 1.36~1.66，平均值为 1.49，分选好；偏度为 0.12~0.19，平均值为 0.16，分布近对称；峰度为 0.94~1.01，平均值为 0.97，近正态分布。粒度频率分布为单峰曲线，峰值较低平，为宽峰曲线。

阶段 II (1892~1262 cm)：沉积物中的粉砂和黏土含量均减少，粉砂含量范围为 34.95%~69.47%，平均值为 49.19%，黏土含量降低显著，分布范围为 12.77%~46.01%，平均值为 31.13%，砂质沉积物含量波动增长，最低含量为 0%，最高含量为 52.28%，平均值为 19.68%。平均粒径、分选系数、偏度以及峰度变化剧烈且频繁，平均粒径为 4.84~7.99 Φ ，平

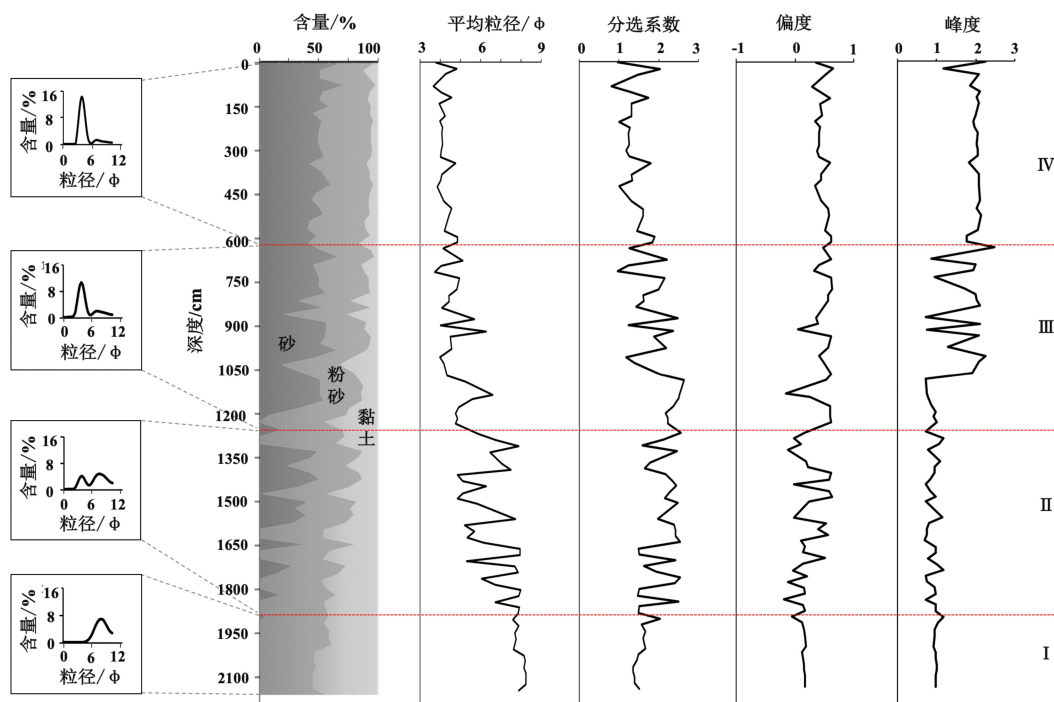


图2 LYK 钻孔粒度参数垂向变化

Fig.2 Vertical variation of grain-size parameters of the core LYK

均值为 6.68 Φ , 较上段变粗; 分选系数最低值为 1.48, 最高可达 2.55, 平均值为 2.06, 是该钻孔分选最差的阶段; 偏度为 -0.18~0.63, 平均值为 0.20, 以对称和正偏交错分布; 峰度平均值为 0.91, 分布近正态。粒度频率曲线为双峰型, 峰值较低。

阶段 III (1262~632 cm): 沉积物以砂质为主, 含量范围为 10.29%~75.68%, 平均值为 41.34%; 粉砂含量次之, 含量范围为 23.87%~51.81%, 平均值为 37.40%; 黏土含量逐步降低, 最低含量为 3.21%, 平均含量为 12.50%。平均粒径向上逐渐波动升高, 波动范围为 3.72~6.60 Φ , 平均值为 4.75 Φ ; 分选系数向上波动降低, 平均值为 1.91, 较上段分选变好; 偏度为 -0.15~0.64, 平均值为 0.47, 分布以近对称为主; 峰度较上段显著增加, 平均值增高至 1.47, 峰值逐步尖锐。粒度频率曲线为不明显的双峰, 粗粒首峰的峰值较高, 范围较窄, 细粒次峰较宽平, 且峰值较低。

阶段 IV (632~0 cm): 沉积物以砂、粉砂为主, 超过总沉积的 90%, 砂质沉积含量范围为 42.82%~61.08%, 平均值为 55.98%; 粉砂含量范围为 34.53%~46.97%, 平均值 37.44%; 黏土平均含量达到本钻孔最低, 仅为 6.58%。平均粒径上下基本一致, 为 3.85~4.85 Φ , 平均值为 4.24 Φ ; 分选系数也很稳定, 平均值为 1.39, 较上段分选性显著变好; 偏度为 0.34~0.62, 平均值为 0.47, 全部为正偏, 分布以近对称为主; 峰度曲线上下几乎一致, 峰值尖锐, 平均值为 2.01。粒度频率曲线为不明显的双峰, 首次峰差异较大, 首峰为粗粒沉积, 峰值较大。

2.3 微体古生物特征

受到径流和潮流的双向作用, 三角洲海域的水深、温度、盐度和动力条件等变化极为显著, 而广泛生活在其中的有孔虫、介形虫等微体生物群对这些环境因子非常敏感, 且壳体能够很好地保存在沉

积物中, 是指示环境变化的可靠依据^[42]。钻孔中微体生物群属种组合的垂向差异性分布, 可以有效恢复地质历史时期的气候变迁和沉积环境演变。侵蚀、搬运、再沉积、溶解等次生作用会对埋藏在沉积物中的微体生物群壳体进行改造, 壳体的保存情况亦为指示沉积环境的有效指标^[43]。对沉积物中有孔虫和介形虫的分布研究, 仍然是现今重建海陆过渡相沉积环境的重要载体^[44-46]。

LYK 钻孔共发现底栖有孔虫 50 属 67 种, 丰度为 12~2080 枚/50g, 简单分异度为 5~23。以滨岸-浅水的广盐底栖属种为主, 部分层位含有小个体的浮游有孔虫。以 *Ammonia beccarii*、*Elphidium magellanicum*、*Astrononion tasmanensi*、*Quinqueloculina* sp.、*Elphidium advenum* 为优势种(占全群比例高于 3% 的种), 其他属种 *Cribrononion frigidum*、*Bolivina* sp.、*Pararotalia* sp.、*Elphidium* sp.、*Ammonia compressiuscula*、*Nonion* sp. 等含量亦较高, 其中以 *A. beccarii* 的数量最为丰富, 为 0~512 枚/50 g。LYK 钻孔中的底栖有孔虫以玻璃壳主, 共鉴别有 56 种, 平均含量为 91.9%, 瓷质壳质有 5 种, 平均含量为 7.3%, 胶结壳质有 6 种, 平均含量最低, 为 0.8%。

LYK 钻孔共鉴别介形虫 30 属 46 种, 丰度为 3~1664 枚/50 g, 简单分异度为 2~20, 主要分布在钻孔 0.6 m 以下深度范围, 以 *Cytheropteron miurense*、*Bicornucythere bisanensis*、*Sinocythere reticulata*、*Aurila miii*、*Neomonoceratina dongtaiensis*、*Leptocythere* sp.、*Sinocytheridea impressa*、*Sinocythere dongtaiensis*、*Cythere lutea lutca*、*Callistocythere multirugosa*、*Munseropteron pupilla* 等滨岸广盐型属种为主要优势种(占全群比例高于 3% 的种)。

为了进一步分析钻孔内微体生物群与沉积环境之间的关系, 选取 107 个底栖有孔虫样品进行 Q 型聚类分析(图 3), 并综合有孔虫和介形虫的丰度、分异度、优势属种含量、底栖有孔虫三大壳类

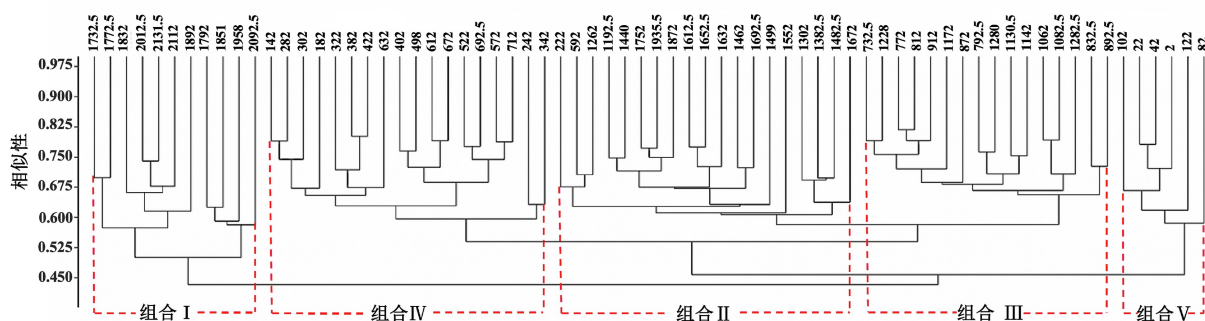


图 3 LYK 钻孔聚类结果

Fig.3 Clustering of the core LYK

比例、底栖有孔虫壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 等指标的变化,将钻孔沉积物分成 5 种环境类型(图 4):组合 I (2132~1892 cm)、组合 II (1892~1192 cm)、组合 III (1192~732 cm)、组合 IV (732~142 cm)、组合 V (142~0 cm)。

组合 I (2132~1892 cm):本层段底栖有孔虫丰度为 12~1072 枚/50 g,简单分异度平均值为 10,底栖有孔虫三大类壳体中以玻璃质壳为主,含量可达 89.56%~100%,瓷质壳平均含量为 8.15%,垂向分布上相对较高,胶结质壳含量几乎为零,未见浮游属种。以 *A. beccarii*、*E. advenum*、*A. tasmanensis*、*Pararotalia* sp.等广温广盐浅水种为优势种,其中 *A. beccarii* 含量最高,在样品中所占比例为 12.5%~75%,其次为 *E. advenum*,含量为 6.06%~23.44%,两者均为近岸内陆架种^[47]。介形虫丰度为 3~272 枚/50 g,简单分异度为 3~11,以广盐性喜半咸水种 *C. miurense* 为主要优势种^[48],其他优势种包括 *S. reticulata*、*A. miii*、*C. multirugosa*、*M. pupilla* 等。

组合 II (1892~1192 cm):本层段底栖有孔虫丰度为 26~2080 枚/50 g,平均值为 758 枚/50 g,简单分异度增加至 7~22,平均值为 15,浮游属种含量极少;壳体以玻璃质为主,瓷质壳含量略有降低,胶结质壳含量迅速增加至本钻孔最高值。以 *A. beccarii*、*E. magellanicum*、*E. advenum*、*A. tasmanensis*、*Quinqueloculina* sp.等浅水种为优势类群,*E. magellanicum* 含量增加为第 2 优势种,含量最高可达 30.86%,为低温低盐型属种^[48]。介形虫丰度为 6~1664 枚/50 g,简单分异度为 2~20,以 *C. miurense*、*S. reticulata* 等

浅水种为主要优势类群,其他优势属种包括 *B. bisane*、*N. dongtaiensis* 等近岸半咸水种,内陆架广盐性浅水种 *C. multirugosa*、*M. pupilla* 等含量显著减少^[48], $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 均出现不同程度的负偏。

组合 III (1192~732 cm):本层段底栖有孔虫丰度急剧降低,最高值仅为 976 枚/50 g,平均含量仅为 481 枚/50 g,简单分异度降低为 10~20,平均值为 14。玻璃质壳含量出现钻孔内最低值,胶结质含量为 1%,瓷质壳有孔虫含量出现钻孔最高值,平均含量增高至 9%,几乎不含浮游属种。以 *A. beccarii*、*E. magellanicum*、*A. tasmanensis*、*Quinqueloculina* sp.等浅水种为优势类群。介形虫丰度和简单分异度亦显著降低,丰度平均值为 323 枚/50 g,简单分异度为 2~20,平均值仅为 13.9,以 *N. dongtaiensis*、*B. bisane*、*S. impressa*、*C. miurense* 等广盐种为主要优势类群,其中广盐型 *S. impressa* 增加显著。本层段微体生物群丰度和分异度大幅降低,广盐型属种含量显著增加。

组合 IV (732~142 cm):本层段底栖有孔虫丰度迅速回升至 118~1744 枚/50 g,平均值为 581 枚/50 g,简单分异度回升至 10~23,平均值为 18.2,以 *A. beccarii*、*E. magellanicum* 等近岸半咸水属种为绝对优势种,*Quinqueloculina* sp.、*Bolivina* sp.、*Nonion* sp.等广盐浅海型属种含量减少。壳体仍然以玻璃质为主,平均含量为 93.5%,瓷质壳含量降低至 5.9%,胶结质含量在该段中部再次升高,最高值为 3.7%。浮游属种爆发式增加至 48~240 枚/50 g,平均值为

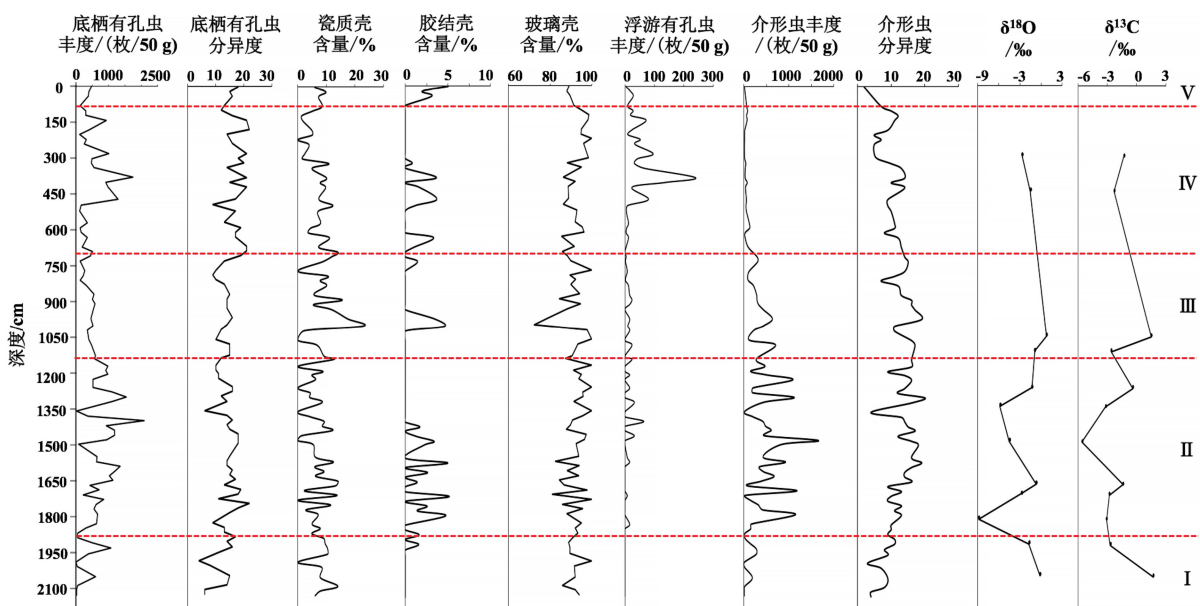


图 4 LYK 孔微体古生物特征及特征属种变化

Fig.4 Distribution of micropaleontology assemblages and special species in the core LYK

52.5 枚/50 g。介形虫丰度极低, 平均值仅为 40 枚/50 g, 简单分异度为 5~14, 以 *N. dongtaiensis*、*A. sinensis*、*B. bisane*、*S. dongtaiensis*、*Wichmannella* sp. 等近岸浅水种为主要优势类群。

组合 V (142~0 cm): 本层段底栖有孔虫丰度较上段变化较小, 为 140~476 枚/50 g, 分异度略微上升至 13~18, 在三大类壳体中, 玻璃壳含量降低, 胶结质和瓷质壳含量升高, 浮游属种较上段减少。介形虫丰度极低, 分异度亦逐渐减低, 平均值仅为 7.8。

3 沉积环境恢复

综合 LYK 钻孔的测年结果、沉积特征、有孔虫及介形虫属种组合等信息, 将研究区千年以来的沉积古环境演化分为 5 个阶段(图 5)。

阶段 I (2132~1892 cm): 该段沉积整体以细粒、分选好、近对称、宽平峰为特征, 不含砂质粗组分, 沉积物来源较单一, 反映了沉积区相对稳定的水动力条件。不同壳质的底栖有孔虫属种分别适应于不同的生态环境, 玻璃质壳为正常浅海底栖有孔虫中的优势属种, 胶结壳底栖有孔虫主要分布在潮上带和低盐潟湖带等低盐的海陆过渡相环境中, 瓷质壳底栖有孔虫群则主要出现于盐度正常甚至偏高的海洋环境中^[49-50]。本层段底栖有孔虫丰度和分异度较高, 壳体大多为玻璃质, 几乎不含胶结质壳体, 指示了较高的海水盐度。优势属种为

A. beccarii 和 *E. advenum*, *A. beccarii* 是我国分布最广泛的广盐浅水种, 在 0.5~50‰ 的盐度范围内均能生存, 大量分布于潮间带、河口、海湾等滨浅海环境中^[51], 而后者在我国黄海常分布在水深 20~50 m 的区域^[48], 为典型的近岸内陆架种。介形虫丰度和简单分异度亦较高, 以 *C. miurense* 为主要优势种, 该种为一广盐性喜半咸水种, 多分布于水深 20~50 m 的内陆架区^[49]。以上特征反映了本层段接近正常海相的沉积环境, 与陆架环境相符。在黄河改道前, 南黄海苏北沿岸发育有小型水下三角洲, 系之前多次小型的黄河侵淮事件形成^[52]。钻孔所在区域离岸较远, 水深相对较深, 环境稳定, 沉积颗粒较细, 分选好, 主要发育浅海—半咸水型微体生物群, 丰度和分异度均较高, 属于典型的浅海陆架沉积。

阶段 II (1892~1192 cm): 该段沉积整体以中细粒、分选中等、双峰、波动频繁为特征, 黏土含量减少, 砂质粗组分显著增多, 粒度参数波动剧烈且频繁, 双峰态频率曲线显示潮流与径流的双向作用, 沉积物分选变差指示了水动力条件的增强。底栖有孔虫丰度和分异度较上段增加, 壳体仍以玻璃质为主, 耐低盐度的胶结质壳含量迅速增加至本钻孔最高值, 反映了淡水输入的增强; 有孔虫优势属种为浅水种, *E. magellanicum* 的含量迅速增多, 为低温低盐型属种, 在我国黄海通常代表水深为 5~10 m 的低潮坪近岸环境^[53]。介形虫丰度和分异度皆为本钻孔的最高值, 以 *C. miurense*、*S. reticulata* 等近岸半

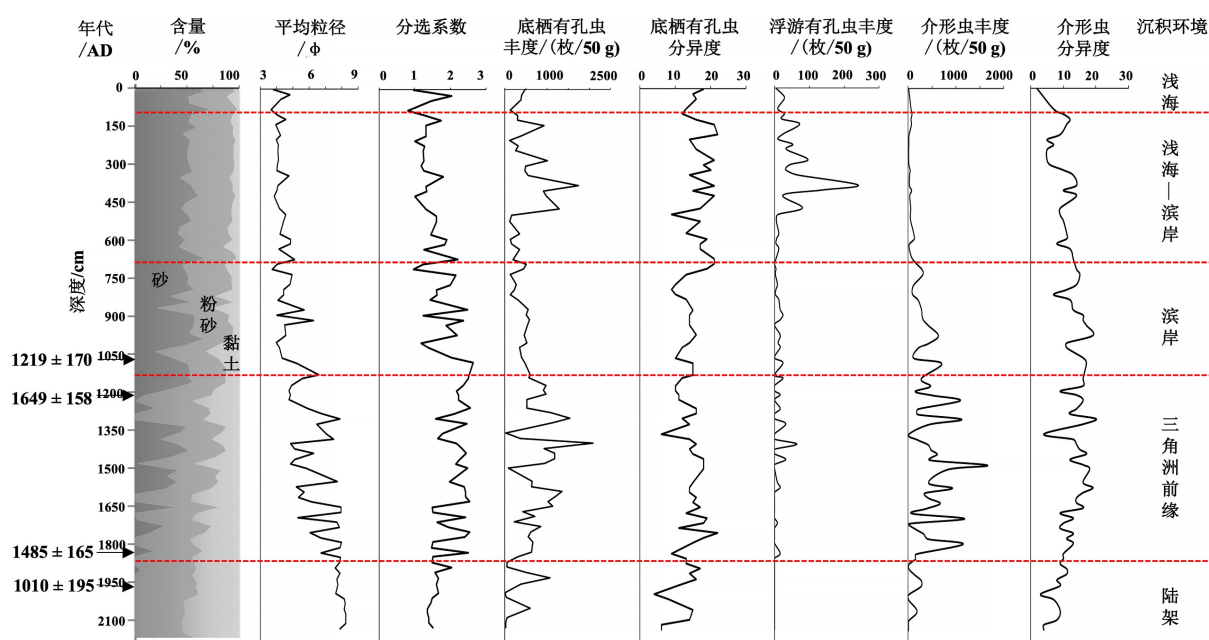


图 5 废黄河三角洲 LYK 钻孔综合参数及沉积环境恢复

Fig. 5 Palaeoenvironmental parameters and evolution of the abandoned Yellow River delta from core LYK

咸水种为主,多分布于水深小于20 m的近岸区^[49],内陆架广盐性的浅水种含量显著减少, $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的负偏表明沉积区盐度降低,这是由于同位素分馏作用而导致的大气降水贫 ^{18}O ,因此地表径流中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值会明显低于海水。这些特征均反映了水深变浅、淡水输入增强的沉积环境,与三角洲前缘沉积特点相似,结合测年数据,推测该阶段即为黄河夺淮入海期间形成的沉积物。

黄河南流夺淮水道后,携带大量沉积物注入黄海,研究区沉积环境从典型的陆架向三角洲前缘演变,以三角洲的进积和加积作用为主导,接受了巨量的黄河粗颗粒沉积物。研究区位于灌河口外,由于废黄河河道是向东北方向进积的,在扇形三角洲的北翼,从废黄河口至灌河口一带,随着距离河口和主河道越来越远,进积和加积逐渐减弱,并且灌河是黄河南流入黄海时期的重要分流河道,入海泥沙持续堆积。结合秦亚超等人在研究区的浅地层剖面结果^[20],推测该段沉积物为两个相邻三角洲叶瓣的并置和叠加沉积的结果。

阶段Ⅲ(1192~732 cm):该段沉积整体以中粒、分选中等、偏好—不明显双峰为特征,黏土含量大幅减少,砂质粗组分占明显优势,粒度参数依旧大幅波动。底栖有孔虫丰度急剧降低,耐恶劣环境的瓷质壳类属种含量出现钻孔最高值。介形虫丰度和简单分异度亦显著降低至钻孔最低值,其中*S. impressa*含量明显增加,是我国分布最广的广盐型属种,在2‰至正常盐度的海水中均可生存,较为集中地分布在水深50 m以浅的滨岸带^[49]。微体生物群丰度和分异度大幅降低,广盐型属种含量的增加以及粒度参数的强烈波动,均反映了水深加深且极为动荡的滨岸沉积环境。结合样品测年数据的倒置现象,推测该阶段水动力条件极为动荡,发生了大范围的侵蚀和再沉积现象。

黄河北归之后,泥沙供给枯竭,且苏北沿岸无其他大型河流注入,地势较高的水下三角洲顶部,在以潮流和偏北向波浪为主导的海洋动力下^[54],侵蚀掀起表层松散泥沙沉积物,剥蚀下来的物质呈再悬浮状态在波浪作用下向两侧搬运,在落潮流输沙作用下离岸搬运。侵蚀初期,由于废黄河三角洲的海岸线以入海口为中心呈尖头状向突出20余千米,且发育有宏大的水下三角洲,由北向南传播的强波受到阻挡,侵蚀主要集中在三角洲北部^[10],故研究区接受强烈剥蚀。但经过长期的侵蚀后退,废三角洲岸段水下地形已发生了明显变化,向海突出部分已被夷平,近岸等深线也趋于平直,昔日的河口已

后退形成小型海湾,阻碍消失后的潮流和波浪,在由北向南传播时更加顺畅无阻,波能辐聚中心和强侵蚀部位也因此向南逐渐偏移,研究区水动力逐渐减弱,在水深较大的区域发生再沉积。

阶段Ⅳ(712~142 cm):该段沉积整体以中粒、分选好、不明显双峰为特征,以砂质粗粒沉积为主,几乎不含黏土,各粒度参数较稳定,上下基本一致,水动力较上段稳定。底栖有孔虫丰度和分异度迅速回升,壳体仍然以玻璃质壳为主,耐低温低盐的胶结质含量在该段中部再次升高,反映了陆源输入增强。浮游属种爆发式增加,浮游有孔虫本质上为大洋性生物,在现代黄海仅生活在120°E以东的海域,它们在浅海沉积中大量出现,明显是由潮流从大洋搬运而来,在近岸埋藏^[55-56],本段近岸半咸水属种为绝对优势种,广盐浅海型属种含量减少,这表明了河流影响的加强和海水的逐渐淡化。介形虫丰度极低,近岸浅水种为主要优势类群。该阶段出现了近岸原地半咸水属种、窄盐海相属种、浮游有孔虫混合的现象,表明了陆源输入和潮流搬运的增强。以上特征表明该阶段水动力条件较上段减弱,潮流和径流双向沉积的环境条件,环境由滨岸向浅海逐渐过渡。

当侵蚀中心转移到废黄河三角洲南部区域后,研究区的水动力条件再次回归稳定,伴随水深进一步加大,水动力条件偏弱的侵蚀洼地开始接受潮流和径流的双相沉积,以灌河为代表的小型河流逐渐向海加积,海水盐度降低后,出现了大量半咸水型微体生物群;同时潮流沉积的增强,使得该阶段出现大量浮游有孔虫及窄盐型属种等异地分子,系由黄海暖流及涨潮流搬运而来。因此,地势崎岖不平的水下三角洲经历了夷平过程。

阶段Ⅴ(142~0 cm):本层段底栖有孔虫丰度和分异度较上段差异不大,在三大类壳体中,玻璃壳含量降低,胶结质和瓷质壳含量升高,浮游属种较上段减少。介形虫丰度和分异度较上段逐渐减低,微体生物群均以广盐浅海相为优势属种。这反映了近年来研究区在经历了波浪和潮汐一个多世纪以来的改造加工后,逐渐形成了趋于平缓的夷平面和现今稳定的浅海相沉积。

4 结论

综合AMS¹⁴C测年结果、粒度特征、有孔虫和介形虫微体生物群记录,恢复了LYK钻孔所在区域千年以来的沉积古环境变化,为重建苏北废黄河

三角洲的演化过程提供了重要依据。

研究区在黄河流入以前发育粒度较细、分选较好的陆架沉积,有孔虫丰度和分异度较高;在公元1128年黄河夺淮入海后,研究区接受巨量的黄河沉积物,径流作用占主导地位,沉积环境从典型的浅海向三角洲前缘演变,沉积物粒度变粗,分选变差,且出现了大量近岸半咸水属种的有孔虫和介形虫;直到公元1855年黄河北归,大量泥沙供给断绝,在波浪和潮流的共同作用下,水下三角洲经历了剥蚀和搬运再沉积过程,研究区水深加大,沉积物中砂泥比波动升高,微体生物群丰度和分异度急剧下降,广盐类微体生物群增加。随侵蚀中心的逐渐南移,研究区动力条件趋于稳定,沉积物粒度参数趋于稳定,侵蚀洼地逐渐接受径流和潮流的双向沉积,导致海水盐度降低,出现大量半咸水型有孔虫和浮游有孔虫等异地分子。近年来,伴随波浪和潮汐的改造加工,研究区逐渐形成了趋于平缓的夷平面,由动荡的滨岸逐渐过渡到现今稳定的浅海相沉积。

致谢: 感谢北京大学重离子加速器中心在AMS¹⁴C测年方面提供支持。

参考文献 (References)

- [1] 陈志清. 历史时期黄河下游的淤积、决口改道及其与人类活动的关系[J]. *地理科学进展*, 2001, 20(1): 44-50. [CHEN Zhiqing. The deposition, breach, and diversion in the lower yellow river and their relationships with human activities during the historical period [J]. *Progress in Geography*, 2001, 20(1): 44-50.]
- [2] 钱宁. 1855年铜瓦厢决口以后黄河下游历史演变过程中的若干问题[J]. *人民黄河*, 1986(5): 68-74. [QIAN Ning. Problems concerning evolution of the lower yellow river subsequent to dykebreach in 1855 at Tongwaxiang [J]. *Yellow River*, 1986(5): 68-74.]
- [3] Liu J P, Li A C, Xu K H, et al. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(17-18): 2141-2156.
- [4] 凌申. 全新世以来硕项湖地区的海陆演变[J]. *海洋通报*, 2003, 22(4): 48-54. [LING Shen. Changes of land and sea in the Shuoxiang Lake Area since holocene [J]. *Marine Science Bulletin*, 2003, 22(4): 48-54.]
- [5] 杜利琼. 近30年来江苏侵蚀海岸演变研究[D]. 南京: 南京大学, 2011. [DU Liqiong. Research on the evolution of eroded coasts in Jiangsu in the past 30 years[D]. Nanjing: Nanjing University, 2011.]
- [6] 虞志英, 陈德昌, 金鏐. 江苏北部旧黄河水下三角洲的形成及其侵蚀改造[J]. *海洋学报*, 1986, 8(2): 197-206. [YU Zhiying, CHEN Dechang, JIN Liu. Formation of the old Yellow River underwater delta in northern Jiangsu and its erosion transformation [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1986, 8(2): 197-206.]
- [7] 袁迎如, 陈庆. 古黄河三角洲的发育和侵蚀[J]. *科学通报*, 1983, 28(21): 1322-1322. [YUAN Yingru, CHEN Qing. Development and erosion of the ancient Yellow River Delta [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1983, 28(21): 1322-1322.]]
- [8] 孙效功, 杨作升, 陈彰榕. 现行黄河口海域泥沙冲淤的定量计算及其规律探讨[J]. *海洋学报*, 1993, 15(1): 129-136. [SUN Xiaogong, YANG Zuosheng, CHEN Zhangrong. Current quantitative calculation of sediment erosion and sedimentation in the Yellow River Estuary and its regularity [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1993, 15(1): 129-136.]
- [9] 张林, 陈沈良, 刘小喜. 800年来苏北废黄河三角洲的演变模式[J]. *海洋与湖沼*, 2014, 45(3): 626-636. [ZHANG Lin, CHEN Shenliang, LIU Xiaoxi. Evolution of the abandoned Huanghe (yellow) river delta in north Jiangsu province in 800 years [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2014, 45(3): 626-636.]
- [10] 虞志英, 张国安, 金鏐, 等. 波流共同作用下废黄河河口水下三角洲地形演变预测模式[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(6): 583-590. [YU Zhiying, ZHANG Guoan, JIN Liu, et al. Fan Shejun. Evolution prediction of the abandoned yellow river submerged delta under wave and current [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(6): 583-590.]
- [11] 陈洪全, 彭俊, 陈沈良, 等. 苏北废黄河三角洲海域表层沉积物粒度的空间变异和分布特征[J]. *应用海洋学学报*, 2014, 34(4): 574-580. [CHEN Hongquan, PENG Jun, CHEN Shenliang, et al. Spatial variability characteristics of sediment grain size in sea area of the abandon Yellow River Delta, north of Jiangsu Province [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2014, 34(4): 574-580.]
- [12] 张林, 陈沈良. 苏北废黄河三角洲沉积物的时空变化特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(3): 11-19. [ZHANG Lin, CHEN Shenliang. Spatial and temporal variation in sediment distribution in the abandoned yellow river delta of north Jiangsu [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(3): 11-19.]
- [13] CHEN Kefeng, WANG Yanhong, LU Peidong, et al. Effects of coastline changes on tide system of Yellow Sea off Jiangsu Coast, China [J]. *China Ocean Engineering*, 2009, 23(4): 741-750.
- [14] 彭修强, 夏非, 张永战. 苏北废黄河三角洲海岸线动态演变分析[J]. *海洋通报*, 2014, 33(6): 630-636. [PENG Xiuqiang, XIA Fei, ZHANG Yongzhan. Analysis of the dynamic changes of the coastline along the Abandoned Yellow River delta of Northern Jiangsu, China [J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, 33(6): 630-636.]
- [15] 郭瑞祥. 江苏海岸历史演变[J]. *江苏水利*, 1980(1): 53-69. [GUO Ruixiang. Historical evolution of the coast of Jiangsu [J]. *Jiangsu Water Resources*, 1980(1): 53-69.]
- [16] 万延森. 苏北古黄河三角洲的演变[J]. *海洋与湖沼*, 1989, 20(1): 66-74. [WAN Yansen. Development and decline of ancient Huanghe River estuary delta in northern Jiangsu [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1989, 20(1): 66-74.]
- [17] 张忍顺. 苏北黄河三角洲及滨海平原的成陆过程[J]. *地理学报*, 1984, 39(2): 173-184. [ZHANG Renshun. Land-forming history of the Huanghe River delta and coastal plain of north Jiangsu [J]. *Acta*

- Geographica Sinica*, 1984, 39(2): 173-184.]
- [18] 叶青超. 试论苏北废黄河三角洲的发育[J]. *地理学报*, 1986, 41(2): 112-122. [YE Qingchao. On the Development of the Abandoned Yellow River Delta in Northern Jiangsu province [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1986, 41(2): 112-122.]
- [19] 夏非, 张永战, 王瑞发, 等. 苏北废黄河水下三角洲沉积范围研究述评[J]. *地理学报*, 2015, 70(1): 29-48. [XIA Fei, ZHANG Yongzhan, WANG Ruifa, et al. Review for the studies on sedimentation range of the Abandoned Yellow River subaqueous delta, North Jiangsu plain coast [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 29-48.]
- [20] 秦亚超, 顾兆峰. 连云港海域废黄河水下三角洲北翼的沉积特征与空间分布[J]. *海洋学报*, 2019, 41(11): 101-116. [QIN Yachao, GU Zhaofeng. The depositional feature and spatial distribution of the northern flank of the abandoned subaqueous Yellow River Delta off the Lianyungang coast, western South Yellow Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 41(11): 101-116.]
- [21] 陈可锋, 王艳红, 陆培东, 等. 苏北废黄河三角洲侵蚀后退过程及其对潮流动力的影响研究[J]. *海洋学报*, 2013, 35(3): 189-196. [CHEN Kefeng, WANG Yanhong, LU Peidong, et al. Research on the abandoned Huanghe River Delta erosion process and impact on tidal current dynamic characteristic of the Huanghai Sea off the coast of North Jiangsu, China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(3): 189-196.]
- [22] 刘春莲, 吴洁, 杨婷婷, 等. 珠江三角洲南部晚第四纪环境变化的稀土元素记录[J]. *古地理学报*, 2011, 13(2): 221-228. [LIU Chunlian, WU Jie, YANG Tingting, et al. Rare earth element records from core sediments of southern Pearl River Delta: Geochemical response to palaeoenvironmental changes during the Late Quaternary [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(2): 221-228.]
- [23] Nash G J, Binnie M N, Cann J H. Distribution of foraminifera and ostracods in the Onkaparinga Estuary, South Australia [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2010, 57(7): 901-910.
- [24] 韩广轩, 栗云召, 于君宝, 等. 黄河改道以来黄河三角洲演变过程及其驱动机制[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 467-472. [HAN Guangxuan, LI Yunzhao, YU Junbao, et al. Evolution process and related driving mechanisms of Yellow River Delta since the diversion of Yellow River [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2): 467-472.]
- [25] 任寒寒, 范德江, 张喜林, 等. 黄河入海口变迁的沉积记录: 来自粒度和²¹⁰Pb的证据[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(4): 21-29. [REN Hanhan, FAN Dejiang, ZHANG Xilin, et al. Sedimentary records of the Yellow River mouth migration: evidence from grain size and ²¹⁰Pb [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(4): 21-29.]
- [26] 尹延鸿, 周永青, 丁东. 现代黄河三角洲海岸演化研究[J]. *海洋通报*, 2004, 23(2): 32-40. [YIN Yanhong, ZHOU Yongqing, DING Dong. Evolution of modern Yellow River delt coast [J]. *Marine Science Bulletin*, 2004, 23(2): 32-40.]
- [27] Bornhold B D, Yang Z S, Keller G H, et al. Sedimentary framework of the modern Huanghe (Yellow River) delta [J]. *Geo-Marine Letters*, 1986, 6(2): 77-83.
- [28] Folk R L, Ward W C. Brazos river bar [Texas]: A study in the significance of grain size parameters [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27(1): 3-26.
- [29] Friedman G M. Differences in size distributions of populations of particles among sands of various origins: addendum to IAS Presidential Address [J]. *Sedimentology*, 2006, 26(6): 859-862.
- [30] 李鹤, 黄宝琦, 王娜. 南海北部MD12-3429站位海水古生产力和溶解氧含量特征[J]. *古生物学报*, 2017, 56(2): 238-248. [LI He, HUANG Baoqi, WANG Na. Changes of the palaeo-sea surface productivity and bottom water dissolved oxygen content at md12-3429, northern South China Sea [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2017, 56(2): 238-248.]
- [31] 商志文, 田立柱, 李建芬, 等. 渤海湾西岸CH114孔全新世沉积环境演化与海陆作用[J]. *海洋通报*, 2013, 32(5): 527-534. [SHANG Zhiwen, TIAN Lizhu, LI Jianfen, et al. Evolution of the Holocene sedimentary environment and terrestrial-marine interaction revealed by the borehole CH114 in the west coast of the Bohai Bay of China [J]. *Marine Science Bulletin*, 2013, 32(5): 527-534.]
- [32] 郑守义. 东海的胶结质和瓷质有孔虫[M]. 北京: 科学出版社, 1984. [ZHENG Shouyi. Cementation and Porcelain Foraminifera in the East China Sea[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 1984.]
- [33] 汪品先, 章纪军, 赵泉鸿, 等. 东海底质中的有孔虫和介形虫[M]. 北京: 海洋出版社, 1988. [WANG Pinxian, ZHANG Jijun, ZHAO Quanhong, et al. Foraminifera and mesophila in the sediment of the East China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 1988.]
- [34] 汪品先. 海洋微体古生物论文集[M]. 北京: 海洋出版社, 1980. [WANG Pinxian. Proceedings of Marine Micropaleontology[M]. Beijing: China Ocean Press, 1980.]
- [35] Loeblich A R, Tappan H. Foraminiferal Genera and Their Classification[M]. Van Nostrand Reinhold Company, 1988.
- [36] 李涛, 向荣, 李团结. 珠江口外表层沉积物底栖有孔虫组合及其与环境的关系[J]. *热带海洋学报*, 2011, 30(4): 51-57. [LI Tao, XIANG Rong, LI Tuanjie. Benthic foraminiferal assemblages in surface sediments off the Pearl River Estuary and their environmental implications [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, 30(4): 51-57.]
- [37] 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): 113-122. [WANG Feifei, WANG Hong, LIU Jian, et al. Characteristics of the benthic foraminifera community in the late Quaternary SYS-0803 in the northwestern part of the South Yellow Sea and its paleoenvironmental significance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(4): 113-122.]
- [38] 石学法, 申顺喜, YI H I, 等. 南海现代沉积环境及动力沉积体系[J]. *科学通报*, 2003, 48(1): 1-7. [SHI Xuefa, SHEN Shunxi, YI H I, et al. Modern sedimentary environments and dynamic depositional systems in the southern Yellow Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(1): 1-7.]
- [39] 姜韬, 曾志刚, 南青云, 等. 全新世以来冲绳海槽北部S9孔粒度变化特征及其古气候响应[J]. *第四纪研究*, 2015, 35(2): 307-318. [JIANG Tao, ZENG Zhigang, NAN Qingyun, et al. The grain size characteristics of the core S9 sediments in the northern Okinawa trough

- and their Paleoclimate response since holocene [J]. *Quaternary Sciences*, 2015, 35 (2): 307-318.]
- [40] 卫艳, 舒强, 陈晔. 苏北盆地兴化1#钻孔的沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. 南京师大学报: 自然科学版, 2005, 28 (2): 101-107. [WEI Yan, SHU Qiang, CHEN Ye. Grain Size characteristics and their paleo environmental significance of Xinghua 1# core sediments in Northern Jiangsu Basin, China [J]. *Journal of Nanjing Normal University: Natural Science*, 2005, 28 (2): 101-107.]
- [41] 卢连战, 史正涛. 沉积物粒度参数内涵及计算方法的解析[J]. *环境科学与管理*, 2010, 35 (6): 54-60. [LU Lianzhan, SHI Zhengtao. Analysis for sediment grain size parameters of connotations and calculation method [J]. *Environmental Science and Management*, 2010, 35 (6): 54-60.]
- [42] 李涛, 向荣, 李团结. 珠江口表层沉积物底栖有孔虫分布及环境指示[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31 (6): 95-102. [LI Tao, XIANG Rong, LI Tuanjie. Benthic foraminiferal distribution in surface sediments of Zhujiang estuary and its environmental implications [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31 (6): 95-102.]
- [43] 周洋, 谢叶彩, 陈芳, 等. 珠江三角洲ZK201-2孔晚更新世以来微体生物群与古环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35 (4): 113-123. [ZHOU Yang, XIE Yecai, CHEN Fang, et al. Microfaunas in hole zk201-2 at zhujiang river delta since late pleistocene and their implications for paleoenvironments [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35 (4): 113-123.]
- [44] Scott T D B. Ostracodes and agglutinated foraminifera as indicators of paleoenvironmental change in an early carboniferous brackish bay, Atlantic Canada [J]. *PALAIOS*, 1999, 14 (3): 246-260.
- [45] Mendes I, Gonzalez R, Dias J M A, et al. Factors influencing recent benthic foraminifera distribution on the Guadiana shelf (Southwestern Iberia) [J]. *Marine Micropaleontology*, 2004, 51 (1-2): 171-192.
- [46] 刘春莲, Fürsich F T, 董艺辛, 等. 珠江三角洲PRD05孔的高分辨率介形类记录与晚第四纪古环境重建[J]. *古地理学报*, 2008, 10 (3): 313-322. [LIU Chunlian, Fürsich F T, DONG Yixin, et al. High resolution outraced records of borehole PRD05 and the Late Quaternary Palaeoenvironment in Pearl River delta [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10 (3): 313-322.]
- [47] 李小艳, 石学法, 程振波, 等. 渤海莱州湾表层沉积物中底栖有孔虫分布特征及其环境意义[J]. *微体古生物学报*, 2010, 38 (1): 38-44. [LI Xiaoyan, SHI Xuefa, CHENG Zhenbo, et al. Distribution of benthic foraminifera in surface sediments of the Laizhou bay, Bohai sea and its environmental significance [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2010, 38 (1): 38-44.]
- [48] 赵泉鸿. 东海、黄海海岸带现代介形虫分布的研究[J]. *海洋学报*, 1985, 7 (2): 193-204. [ZHAO Quanhong. Study on the distribution of modern mesophila in the East China Sea and Yellow Sea coastal zone [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1985, 7 (2): 193-204.]
- [49] Cronin T M, DeNinno L H, Polyak L, et al. Quaternary ostracode and foraminiferal biostratigraphy and paleoceanography in the western Arctic Ocean [J]. *Marine Micropaleontology*, 2011, 111: 118-133.
- [50] 孙息春. 广东深圳湾和海南新村港底质中的有孔虫[J]. *微体古生物学报*, 1991, 8 (3): 325-337. [SUN Xichun. Foraminifera from sediments of the Shenzhen bay, Guangdong, and the Xincun Harbour, Hainan island [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1991, 8 (3): 325-337.]
- [51] 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[M]. 北京: 海洋出版社, 1980: 61-83. [WANG Pinxian, MIN Qiubao, BIAN Yunhua. Distribution of foraminifera and mesophila in the sediments of the northwestern part of the South Yellow Sea and their geological significance[M]. Beijing: China Ocean Press, 1980: 61-83.]
- [52] 薛春汀, 刘健, 孔祥淮. 全新世淮河三角洲初步研究[J]. *第四纪研究*, 2010, 30 (5): 892-901. [XUE Chunting, LIU Jian, KONG Xianghuai. Preliminary study of holocene Huaihe River delta on west coastal plain of Yellow Sea, China [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30 (5): 892-901.]
- [53] 郑光膺. 南黄海第四纪层型地层对比[M]. 北京: 科学出版社, 1989. [ZHENG Guangying. Quaternary Stratigraphic Comparison of the Southern Yellow Sea[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 1989.]
- [54] 管君阳, 谷国传. 废黄河口海岸近期侵蚀特征与机理[J]. *海岸工程*, 2011, 30 (2): 50-61. [GUAN Junyang, GU Guochuan. Recent erosion characteristics and mechanism of Old Yellow River estuarine shoreline [J]. *Coastal Engineering*, 2011, 30 (2): 50-61.]
- [55] Murray J W. A method of determining proximity of marginal seas to an ocean [J]. *Marine Geology*, 1976, 22 (2): 103-119.
- [56] 朱晓东, 施丙文, 尤坤元, 等. 海州湾有孔虫埋葬群及其与沉积环境的关系[J]. *地理科学*, 1998, 18 (2): 147-155. [ZHU Xiaodong, SHI Bingwen, YOU Kunyuan, et al. Roraminiferal taphocoenose in Haizhou bay, Jangsu (China) and its relationship to sedimentary environment [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1998, 18 (2): 147-155.]