

文章编号: 1000-0550(2013)06-1050-09

黄河三角洲 ZK1 孔晚第四纪以来沉积层序演化及其古环境意义^①

李国刚^{1,2} 胡邦琦³ 毕建强^{1,2} 宋卓利^{1,2} 布如源^{1,2} 李建敏^{1,2}

(1. 国家海洋局北海分局 山东青岛 266061; 2. 国家海洋局北海海洋工程勘察研究院 山东青岛 266061;

3. 国土资源部海洋油气资源和环境地质重点实验室 山东青岛 266071)

摘要 对黄河三角洲 ZK1 孔粒度、岩性、微体古生物组合和¹⁴C 年代进行了分析,探讨了研究区晚第四纪以来的沉积层序演化历史及其古环境意义。黄河三角洲的 ZK1 孔共发育三个海侵层,自下而上为深海氧同位素 3 期(MIS3) 的 III 海侵层和 II 海侵层以及氧同位素 1 期(MIS1) 的 I 海侵层。指示自氧同位素 4 期(MIS4) 以来研究区共发生三次主要海平面波动。这三次海平面波动分别对应于渤海海侵、献县海侵和黄骅海侵。根据沉积记录信息,ZK1 孔可分辨第 I 海侵层的河口三角洲相(5.63~14.04 m)和滨岸浅海相(14.04~20.62 m),第 II 海侵层的滨岸浅海相(39.52~49.57 m)和河口三角洲相(49.57~51.52 m),第 III 海侵层的滨岸浅海相(76.00~83.63 m)和潮滩相(83.63~92.70 m),均以特征的微体古生物组合和沉积相为标志。结合前人研究,阐明了本区自晚第四纪以来的海平面变化及沉积环境演变历史。

关键词 黄河三角洲 晚第四纪 海平面变化 沉积层序 渤海

第一作者简介 李国刚 男 1982 年出生 硕士 工程师 海洋地质 E-mail: lotus.olive@126.com

通讯作者 胡邦琦 男 助理研究员 E-mail: bangqihu@gmail.com

中图分类号 TE121.3 文献标志码 A

晚第四纪以来,我国东部沿海平原地区历经多次海陆变迁,以河海交互作用与三角洲发育为主要特色^[1-3]。河口三角洲地区处于海陆过渡地带,受控于海陆交互作用,对气候环境变化敏感,因此大河三角洲沉积研究已成为研究地区海平面升降及气候环境演化历史的重要课题。近年来,与海平面变化密切相关的黄河三角洲形成演化研究成为中国东部海岸研究的热点。前人研究表明,黄河三角洲自晚第四纪以来经历多次海平面升降和气候冷暖更替,形成了海陆交替的复杂地层序列^[4-7]。本文以现代黄河三角洲陆地岩芯 ZK1 为基础,根据岩性变化、微体古生物化石特征、¹⁴C 年龄等划分沉积环境,结合前人资料还原沉积演化历史。与前人研究的岩芯相比,ZK1 孔深 100 m,钻至第 4 陆相层,从取样位置、钻孔深度、测试方法和分析精度等方面来说,ZK1 均属研究黄河三角洲地区沉积环境演化的理想岩芯。

1 研究材料和方法

现代黄河三角洲自 1855 年黄河再次注入渤海后

形成,位于山东北部,渤海湾与莱州湾之间。由于高含沙特性,黄河决口改道频繁发生,在河口形成一系列三角洲叶瓣,现代黄河三角洲就是不同时期叶瓣叠加形成的复合体^[4]。黄河三角洲包括陆上三角洲和水下三角洲,其中陆上三角洲地势平坦,广泛分布决口扇、分流河道和泛滥平原沉积物。

2009 年 5 月采用回转或冲击钻方法,在现代黄河陆上三角洲获取岩芯 ZK1(图 1),该孔坐标 37°51'01" N, 118°28'01" E,地面标高 5.0 m,实际进尺 100.1 m,岩芯采取率 88%。室内首先使用 GEOTEK 生产的多感应岩芯记录仪对全部岩芯进行物理性质无损测试,记录磁化率等参数;然后对岩芯剖样,依次进行岩性描述、拍照等工作;最后以 10 cm 间距对岩芯分样。ZK1 岩芯共测试粒度样品 880 个、微体古生物鉴定 79 个、AMS ¹⁴C 年代 7 个。

粒度分析采用激光粒度分析法,测试步骤为取适量的 10% 的 H₂O₂ 和 0.5 N 的 HCl 分别去除沉积物中的有机质和碳酸盐。处理过后的样品经多次洗盐,加入偏磷酸钠后,超声波分散,上机测试。测试仪器为

^①国家海洋局海洋公益性行业科研专项(编号:200805063)、我国近海海洋综合调查与评估专项(编号:908-01-CJ04)、国家自然科学基金项目(批准号:41206049)、国家海洋局北海分局海洋科技项目(编号:2013B11)联合资助
收稿日期:2013-05-29; 收修改稿日期:2013-08-10

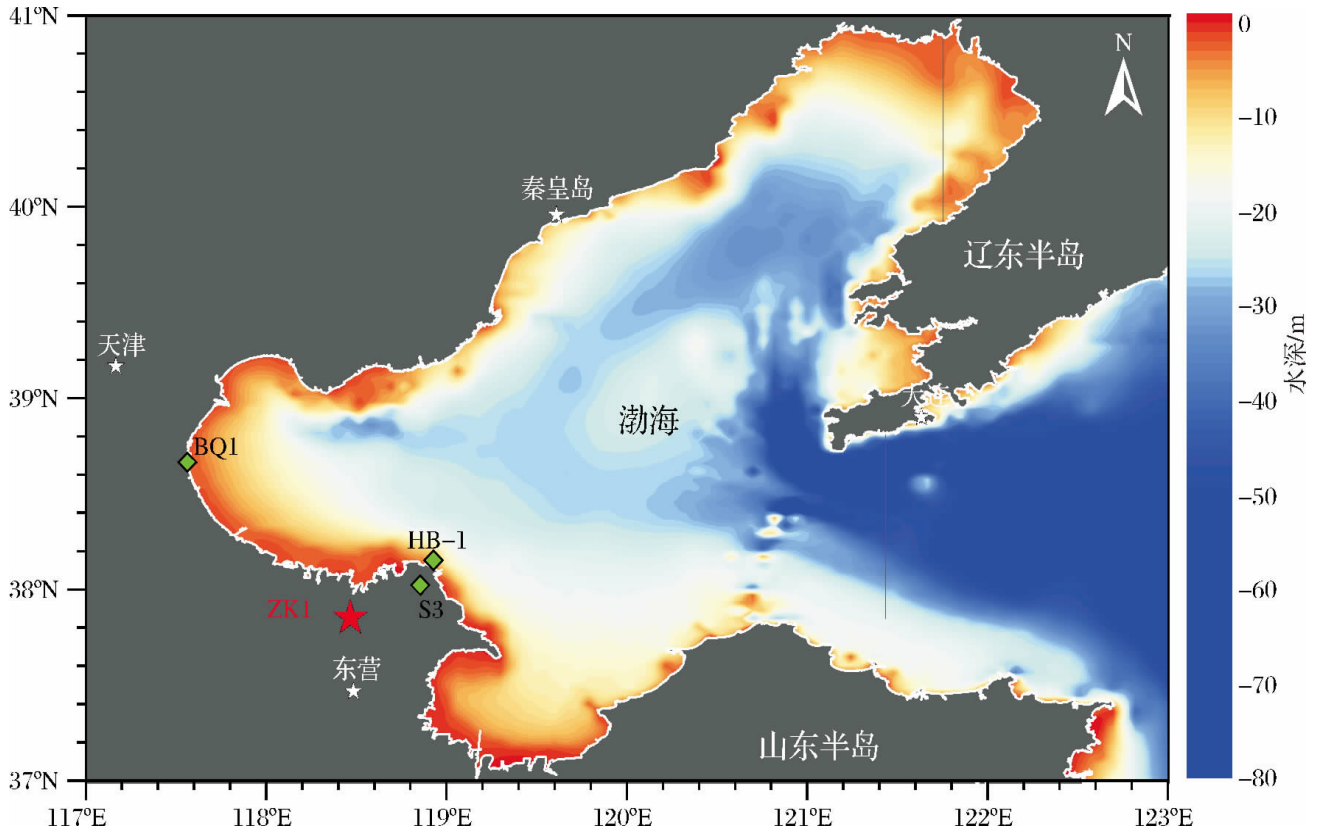


图 1 研究区和钻孔位置

Fig. 1 Map of study area and core location of ZK1

Microtrac S3500 扩展型激光粒度仪。粒级标准采用尤登—温德华氏等比制 Φ 值粒级标准,使用矩法计算粒度参数,沉积物分类命名采用谢帕德沉积物粒度三角图分类法。

微体古生物鉴定样品采用标准方法处理,先将沉积物样品置于烘箱在 60°C 下干燥,称重,干样用纯净水浸泡 2~3 天,待样品充分分解后过 250 目(孔径为 0.063 mm)网筛冲洗,冲洗后筛上样品低温烘干,后过 100 目(孔径 0.154 mm)干筛。对较粗的 (>0.154 mm)组分在体视显微镜下进行有孔虫和介形虫鉴定和统计。微体古生物鉴定在同济大学海洋地质国家重点实验室完成。

按照上述微古鉴定预处理方法处理样品,镜下挑选足够的(不少于 10 mg)混合底栖有孔虫样品做 AMS ^{14}C 测年,测试工作在美国伍兹霍尔海洋研究所完成,测试结果如表 1。鉴于本区有孔虫数量总体偏少,一些层位选取软体动物壳体代替有孔虫测试,但需考虑软体动物壳体作 ^{14}C 测年的局限性,即贝壳壳体可能来源于下伏地层,导致 ^{14}C 年代比实际地层年代偏老。

表 ZK1 孔 AMS ^{14}C 测年结果

Table 1 Results of AMS ^{14}C dating of core ZK1

取样深度(m)	样品类型	^{14}C 年龄(^{14}C aB. P.)
8.26	贝壳	2 090 \pm 25
16.35	贝壳	2 310 \pm 40
17.62	混合底栖有孔虫	4 280 \pm 30
18.73	贝壳	6 550 \pm 30
19.40	混合底栖有孔虫	8 130 \pm 35
19.40	泥炭	8 050 \pm 35
43.12	混合底栖有孔虫	40 700 \pm 440

2 研究结果

2.1 粒度及岩性特征

采用等比制(Φ 值标准)粒级分类,ZK1 沉积物粒级组分由砂($<4\Phi$)、粉砂($4\sim 8\Phi$)、黏土($>8\Phi$)组成,三者平均含量分别为 48.17%、46.93% 和 4.89%,各组分含量如三角图。按照谢帕德沉积物分类法,ZK1 孔沉积物类型以砂、粉砂、砂质粉砂为主(图 2)。沉积物各粒度参数垂向上存在较大差异:平均粒径介于 $1.69\sim 7.85\Phi$,平均为 4.45Φ ;分选系数介于 $0.32\sim 2.57$ 之间,分选程度好—差不等;偏态介

于 -2.15 ~ 2.28 ,大部分沉积物为正偏;峰态介于 0.43 ~ 3.14 之间 ,大部分沉积物为尖峰态。

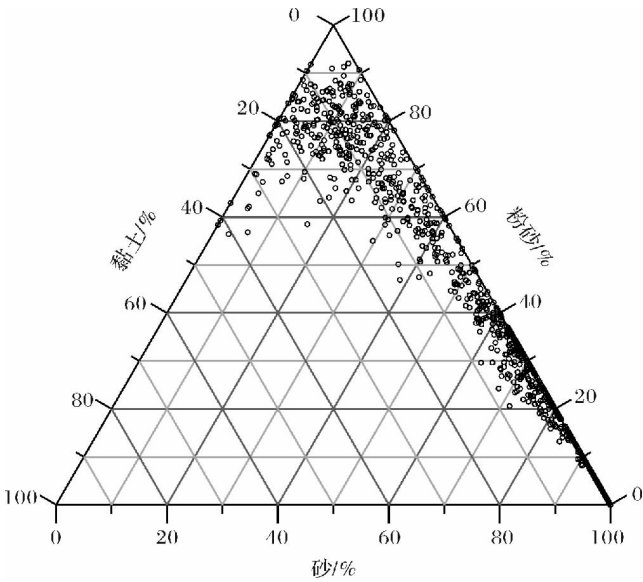


图2 ZK1 孔沉积物粒度组分三角图

Fig.2 The triangular map of sediment grain composition of Core ZK1

通过对 ZK1 孔岩芯沉积物的详细观察和分析 ,包括岩性、颜色、含水量、软体动物壳体情况、沉积构造等特征 ,并结合粒度数据 ,将该孔自上而下分为 24 层 ZK1 孔岩性分层见表 2。

2.2 微体古生物特征

ZK1 孔共对 79 个样品进行微体古生物鉴定 ,其中 40 个样品中发现有孔虫 ,主要分布在孔深 5.67 ~ 20.45 m、40.50 ~ 50.67 m 和 78.05 ~ 92.10 m 的三个取样层中 ,总计挑得 8189 枚 ,丰度在中部 40.50 ~ 50.67 m 层段最高 ,其中在孔深 50.67 m 处最高丰度达 1350 枚/g(图 3)。ZK1 孔有孔虫分属 33 属 59 种 ,其中玻璃质螺旋壳类和平旋壳类种数、丰度等最高。ZK1 孔底栖有孔虫以广盐类和近岸浅海类为多 ,其中数量最多、出现频率最高的是毕克卷转虫 *Ammonia beccarii* ,其相对丰度平均为 32.2% ,在 47.1% 的样品中都以第一优势种出现。其次是缝裂希望虫 *Elphidium magellanicum* ,平均相对丰度为 13.1% ,主要分布在 5.67 ~ 20.45 m、40.50 ~ 50.67 m 之间。其余

表2 ZK1 岩芯岩性分层

Table 2 Division of sediment characteristic of Core ZK1

层号	埋深/m	岩性描述
1	0 ~ 2.00	松散的黄褐色粉砂 ,发育生物扰动构造 ,可见填充有黑色碳质的虫穴。
2	2.00 ~ 5.63	发育多个数十厘米厚的黏土质粉砂、粉砂和砂质粉砂交替层 ,可见铁锈色斑块和氧化面(2.75 m)。
3	5.63 ~ 8.66	灰褐色砂质粉砂—粗粉砂层 ,含贝壳碎屑 ,并有黄褐色黏土质粉砂夹层。8.26 m 处有一个约 20 cm 厚、含贝壳壳体的细砂层 ,与下层分割。
4	8.66 ~ 9.25	灰褐色细砂 ,夹黏土纹层 ,见贝壳碎屑和虫穴。
5	9.25 ~ 14.04	灰色粉砂层 ,可见厘米级细砂层 ,具有纹层和脉状、透镜状层理 ,局部发育生物浅穴。
6	14.04 ~ 16.73	沉积物与上覆地层类似 ,主要为灰色粉砂和砂质粉砂 ,见脉状、透镜状层理和潮汐层理 ,但含有大量的虫穴及生物扰动构造。
7	16.73 ~ 18.95	波状层理的砂床 ,其中底部为 15 cm 厚的贝壳碎屑层。
8	18.95 ~ 20.62	发育生物浅穴的粉砂 ,其中 19.36 ~ 19.56 m 段为富含植物碎屑的泥炭层。
9	20.62 ~ 21.62	沉积物以深灰色为主 ,顶部 1 m 与上覆地层过渡渐变 ,为灰褐色粉砂—砂质粉砂 ,有生物扰动、氧化面。
10	21.62 ~ 39.52	深灰色砂层 ,块状构造 ,分选较好 ,偶见波状层理 ,局部夹泥砾和深黑色粉砂层。本层与下伏地层之间存在一明显分界面。
11	39.52 ~ 47.57	灰褐色—深灰色黏土质粉砂、粉砂 ,含砂质夹层 ,大量发育生物扰动和虫孔构造 ,其中顶部常见铁锈色染痕 ,偶见钙质结核。
12	47.57 ~ 49.57	灰色粉砂质砂 ,含贝壳碎屑 ,波状层理 ,夹毫米级黏土薄层。
13	49.57 ~ 51.52	顶部为 20 cm 厚的含结核粉砂层与上覆地层区分 ,主体为浅灰色—灰褐色砂质粉砂层 ,泛浅锈色。
14	51.52 ~ 54.26	主要为灰褐色粉砂和砂质粉砂 ,可见黄褐色钙质结核。
15	54.26 ~ 64.94	灰褐色—灰色粉砂质砂 ,块状构造 ,波状层理 ,与下伏地层界面明显。
16	64.94 ~ 67.90	灰褐色砂质粉砂 ,顶部可见泥砾 ,局部夹细砂层。
17	67.90 ~ 76.00	灰色细砂 ,分选好 ,波状层理。
18	76.00 ~ 77.60	深灰色砂层 ,夹粉砂团块 ,含有非常丰富的完整贝壳和螺的壳体 ,并发育贝壳碎屑层 ,见生物孔穴。
19	77.60 ~ 78.20	灰黑色有机粉砂 ,含少量贝壳壳体或碎屑。
20	78.20 ~ 81.75	黄褐色—灰色粉砂 ,见填充有上层物质的生物浅穴 ,发育潮汐层理、脉状层理。
21	81.75 ~ 83.63	顶界为 8 cm 的贝壳碎屑层 ,主体为深灰色—灰黑色细砂 ,含贝壳碎片 ,发育虫孔构造。
22	83.63 ~ 92.70	顶界为钙质结核层 ,主体为灰褐色粉砂 ,夹有多层黄褐色—灰褐色砂质夹层 ,含铁锈色染痕、钙质结核。
23	92.70 ~ 98.28	本段岩性多变 ,顶部为 65 cm 厚的细砂层 ,向下粒度渐细 ,依次为数十厘米至米级的灰褐色—黄褐色的砂质粉砂层、粉砂层、黏土质粉砂层 ,局部可见黄褐色氧化面(93.67 m)、深色有机泥(93.89 m)、虫穴(98.15 m)。
24	98.28m 至底部	黄灰色、灰褐色细砂 ,质纯 ,块状构造 ,未见底。顶部见铁锈色染痕 ,夹粉砂细纹层。

常见的属种依次为: 五块虫 *Quinqueloculina* spp. (11.3%) , 具瘤先希虫 *Protelphidium tuberculatum* (9.6%) 、亚易变筛诺宁虫 *Cribronion subincertum* (8.4%) 、德国海恩斯虫 *Haynesina germanica* (4.8%) 和异地希虫 *Elphidium advenum* (4.4%) 。

介形虫出现在 42 个样品中 , 其中海相介形虫见于 39 个样品中 , 陆相介形虫见于 11 个样品中。总计

挑得海相介形虫 3 286 瓣 , 陆相介形虫 41 瓣。介形虫分布与有孔虫一样 , 主要产于上述 3 个取样层中。数量丰度变化大 , 丰度最高为 662 瓣/g , 见于孔深 50.67 m 处。介形虫在样品中的分异度最高 18 种 , 在 5.67 ~ 20.45 m 层中普遍较高 (图 4) 。

介形虫共发现 37 属 45 种 , 其中陆相类 5 属 6 种 , 以广盐类和浅海类占优势 , 又以典型中华美花介

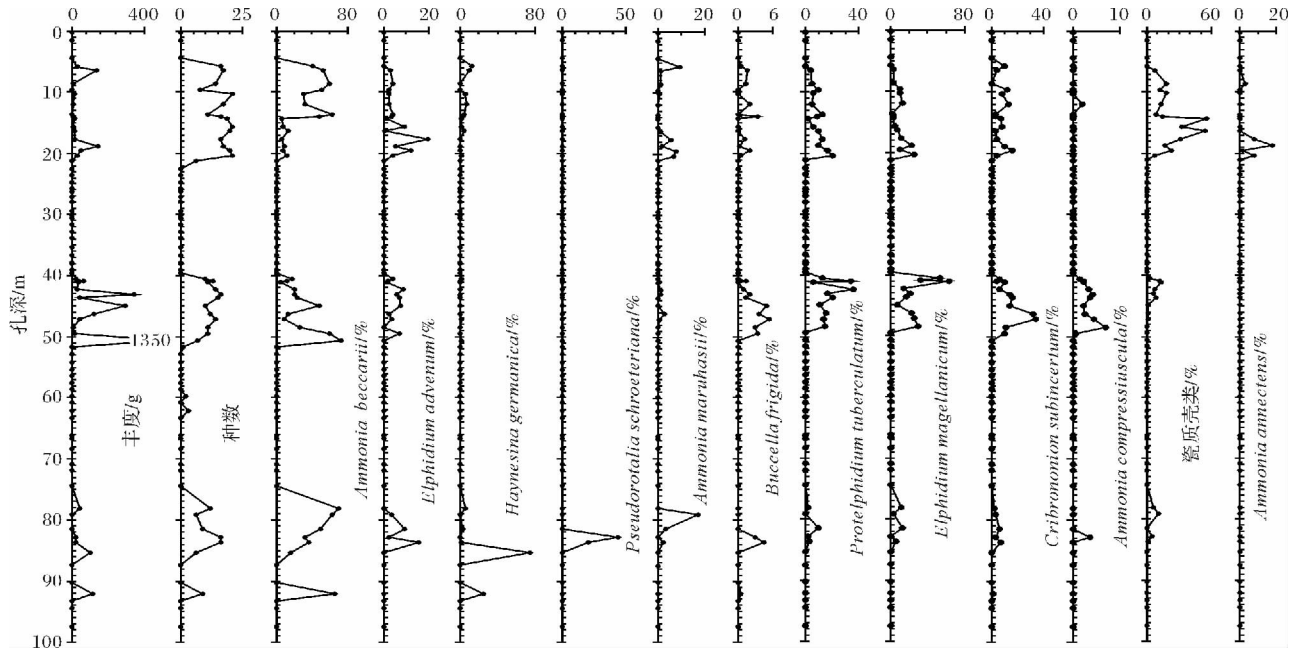


图 3 ZK1 孔有孔虫垂向分布

Fig. 3 The vertical distribution of foraminifer species of Core ZK1

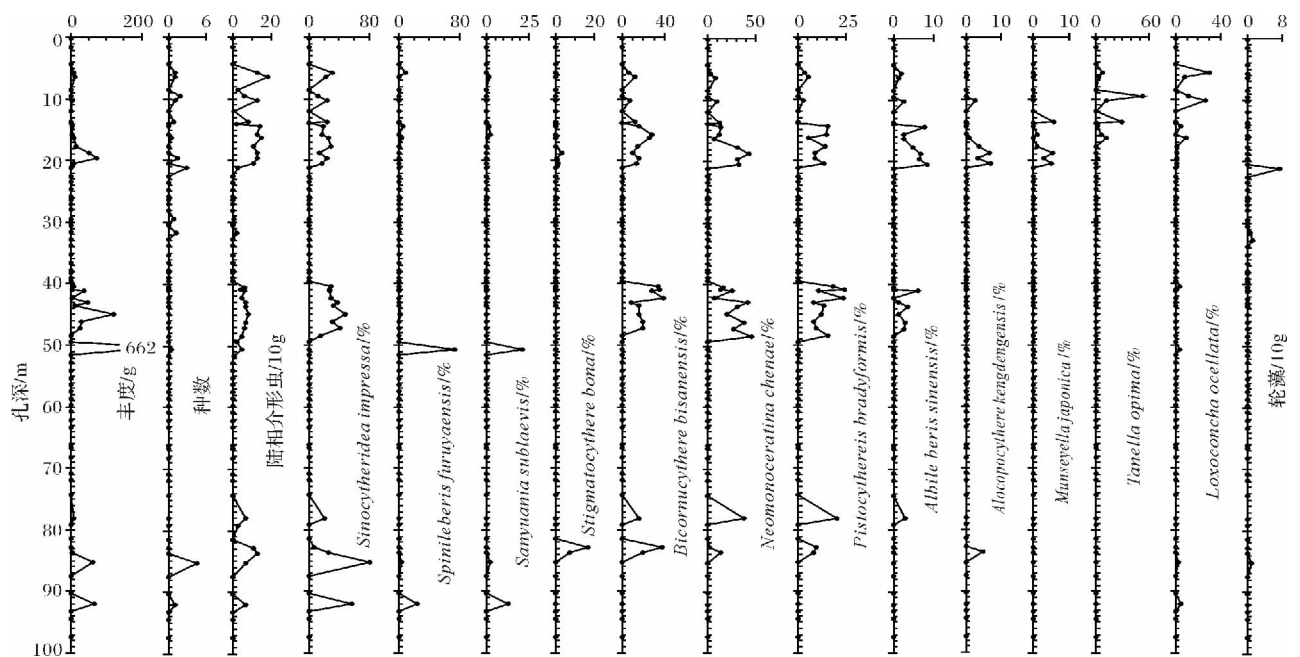


图 4 ZK1 孔介形虫垂向分布

Fig. 4 The vertical distribution of ostracods species of Core ZK1

Sinocytheridea impressa 最多,在全群中的相对丰度平均高达 27.2% 在 39.3% 样品中以第一优势种出现。其余种按平均丰度由高到低依次为: 陈氏新单角介 *Neomonoceratina chenaе* (18.6%)、美山双角花介 *Bicornucythere bisanensis* (17.7%)、布氏形纯艳花介 *Pistocythereis bradyformis* (9.8%)、丰满陈氏介 *Tanella opima* (4.5%)、古屋刺面介 *Spinileberis furuyaensis* (4.2%)、眼点弯贝介 *Loxoconcha ocellata* (3.9%) 和中华洁面介 *Albibleberis sinensis* (2.3%)。陆相介形虫主要见于上部孔深 30 m 以上和 80 m 以下层段,其中孔深 85.32 m 处丰度最高(4.5 瓣/10g)。样品中轮藻化石见于孔深 21.15 m、31.67 m、32.77 m 和 85.32 m 等 4 个样品中,最高丰度(7.3 枚/10g) 见于 21.15 m 处。在孔深 15.72 m、18.8 m 和 82.76 m 等样品中见较多的双壳类和螺类。

3 讨论

3.1 沉积环境划分

根据微体古生物组合特征和岩性特征 ZK1 孔自上而下可识别出 10 个沉积相(图 5),归结为 3 个海侵层,各海侵层沉积特征如下。

(1) 第 I 海侵层

第 I 海侵层(5.63 ~ 20.62 m),包括河口三角洲相(5.63 ~ 14.04 m)和滨岸浅海相(14.04 ~ 20.62 m)两段:

①河口三角洲相(5.63 ~ 14.04 m)

有孔虫以广盐类为主,其中毕克卷转虫 *Ammonia beccarii* 数量丰度高达 47.2%,高于下段的 8.5%。介形虫群以半咸水种丰满陈氏介 *Tanella opima* (21.1%) 和广盐类眼点弯贝介 *Loxoconcha ocellata* (15.4%) 为主。受河流冲淡水的影响,此段多数(62.5%) 样品中可见少量陆相介形虫和植物种子、真菌类孢子。

本段沉积物以粉砂、砂质粉砂为主,也有细砂层、黏土纹层等,表现为不同粒度交替沉积的层序,为不同时期黄河三角洲叠覆堆积体^[8]。广泛发育的脉状、透镜层理显示曾受潮流影响;底部发育的生物浅穴则说明其形成于低能环境(如三角洲侧缘)。8.26 m 处含贝壳壳体的细砂薄层可能为不同时期三角洲间的改造沉积。取自 8.85 m 处的细砂样品粒度概率累积曲线呈现三段式(图 6),由一个跳跃总体和两个悬浮总体组成,跳跃总体含量近 70%,跳跃组分和悬浮组分交点在 3Φ 附近,具有河流沉积的曲线形式。

②滨岸浅海相(14.04 ~ 20.62 m)

本段微体古生物以浅海类为主,如有孔虫异地希望虫 *Elphidium advenum*、五块虫 *Quinqueloculina spp.* 和介形虫陈氏新单角介 *Neomonoceratina chenaе*、布氏形纯艳花介 *Pistocythereis bradyformis* 等浅海类的丰度明显高于上层,同现卷转虫 *Ammonia annectens*、丸桥卷转虫 *A. maruhasii* 等浅海种主要出现在此层。由于此层中含有较多的冷水种,推测海水较冷。

本段有孔虫和软体动物壳体含量丰富,测年数据较多。取自 16.35 m 和 18.73 m(贝壳碎屑层)的贝壳样品 AMS ¹⁴C 年龄分别为 2 130 ± 40 ¹⁴C aB. P. 和 6 550 ± 30 ¹⁴C aB. P.,取自 17.62 m 和 19.40 m(泥炭层)的混合底栖有孔虫 AMS ¹⁴C 年龄分别为 4 280 ± 30 ¹⁴C aB. P. 和 8 130 ± 35 ¹⁴C aB. P.,均表明该层为全新世海侵以来的沉积。

沉积物表现为海流、波浪、生物等因素影响的沉积构造,对应于滨岸浅水的次级沉积环境,如 16.73 m 处富含贝壳碎屑的细砂层形成于靠近低潮线的前滨环境。其下为潮滩沉积,存在有沼泽沉积物形成的泥炭层,并发育虫穴生物扰动痕迹,取自该层 20.10 m 的粉砂样品概率累积曲线呈二段式(图 6),均为悬浮总体,指示沉积相形成时水动力弱,沉积物在悬浮状态下堆积。

(2) 第 II 海侵层

第 II 海侵层(39.52 ~ 51.52 m)可分为滨岸浅海相(39.52 ~ 49.57 m)和河口三角洲(49.57 ~ 51.52 m)两段,之间被结核薄层区分。

①滨岸浅海相(39.52 ~ 49.57 cm)

微体古生物以广盐类为主,但含有较多的浅海类,其中有孔虫以广盐类的缝裂希望虫 *Elphidium magellanicum* (24.7%)、毕克卷转虫 *Ammonia beccarii* (23.0%) 和浅海类的具瘤先希望虫 *Protelphidium tuberculatum* (17.4%) 为常见,介形虫则以广盐类典型中华美花介 *Sinocytheridea impressa* (35.0%) 和浅海类陈氏新单角介 *Neomonoceratina chenaе* (25.8%) 为优势,推测本段以滨岸浅海的沉积环境为主。根据有孔虫群中出现较多的冷水种冷水面颊虫 *Buccella frigida*、缝裂希望虫 *Elphidium magellanicum* 和具瘤先希望虫 *Protelphidium tuberculatum*,推测该沉积时期可能存在沿岸的冷水流。43.12 m 处的混合底栖有孔虫 ¹⁴C 年龄为 40 700 ± 440 ¹⁴C aB. P.,超出 ¹⁴C 测年上限,仅供参考。

39.52 ~ 47.57 m 处沉积物发育大量虫孔和生物

扰动, 以及概率累积曲线的一段式形态(图 6), 均说明当时为沉积速率较低的低能沉积环境, 如浅滩。顶部出现的钙质结核和铁锈染痕说明后期水面较浅, 甚至暴露出水面^[9]。47.57~49.57 m 含贝壳碎屑的砂体为滨岸沉积, 发育波状层理、潮汐层理。

②河口三角洲相(49.57~51.52 m)

有孔虫仍以广盐类为主, 毕克卷转虫 *Ammonia beccarii* 在数量丰度上占绝对优势(72.2%), 但介形虫中出现大量的半咸水种光滑三原介 *Sanyuania sublaevis*(21.2%) 和古屋刺面介 *Spinileberis furuyaensis* (74.0%), 反映了河口半咸水环境。

本段沉积物主体为浅灰色—灰褐色砂质粉砂层, 沉积物粒度概率累积曲线呈现三段式(如图 6), 以牵引流的跳跃搬运为主, 跳跃总体含量可达 70%~80%, 又因靠近河口, 具有相当的悬浮组分。沉积物浅锈色特征, 说明当时水位较浅, 后期发育钙质结核层, 与上覆地层呈突变接触。推断本层为该海侵层沉积初期的河口三角洲环境。

(3) 第 III 海侵层

本层可细分为滨岸浅海相(76.00~83.63 m)和潮滩相(83.63~92.70 m)两段。

①滨岸浅海相(76.00~83.63 m)

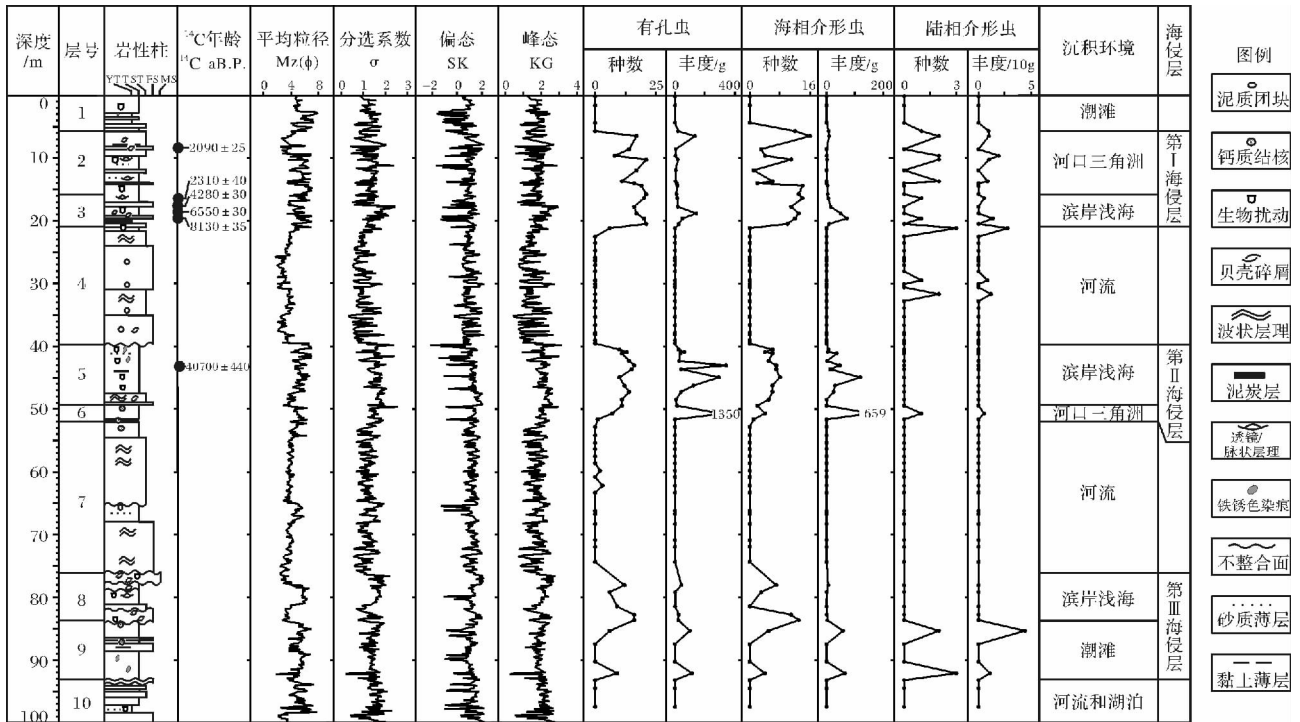


图 5 ZK1 孔综合沉积演化图

Fig.5 General sedimentary environment evolution of Core ZK1

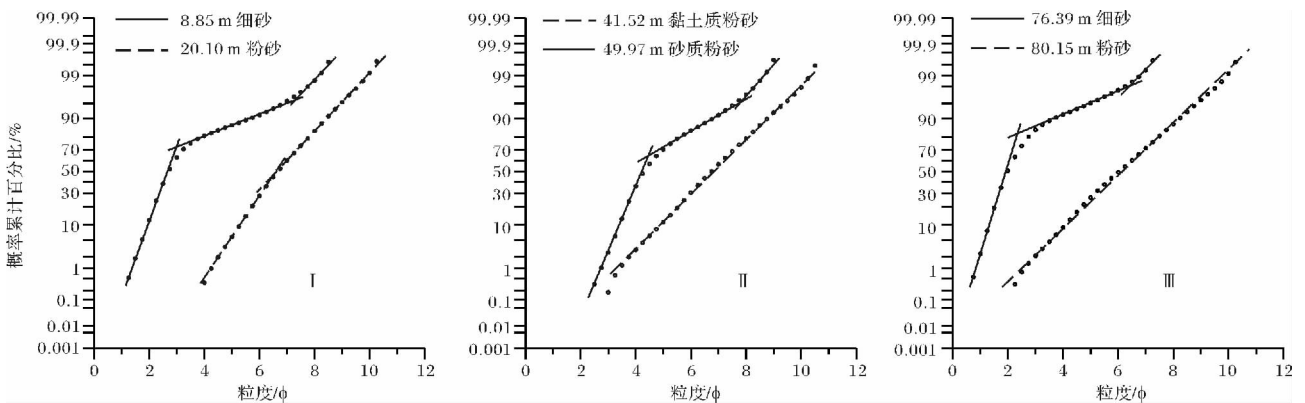


图 6 ZK1 孔各海侵层典型沉积物粒度概率累积曲线

Fig.6 Typical probability accumulation curves of sediments grain size from different transgressions of Core ZK1

微体古生物由广盐类和浅海类组成,其中81.75 m以上层含有较多的冷水种缝裂希望虫 *Elphidium magellanicum* 和具瘤先希望虫 *Protelphidium tuberculatu* 两者平均丰度合计 12.8% ,推断为海水温度较低的滨岸环境,与现代黄河口两侧浅海温度类似;而81.75 m以下层出现暖水种有孔虫施罗特假车轮虫 *Pseudorotalia schroeteriana* ,平均丰度 32.2% ,推断为推测为盐度正常的滨岸浅海沉积环境,海水温度较高,与现代浙闽沿岸温度接近。

76.00 ~ 77.60 m 段沉积物中含贝壳碎屑、生物孔穴的砂体为平均低潮线附近的沿岸砂坝,贝壳碎屑层为鉴别海滩砂体的标志。取自 76.39 m 处的细砂沉积物粒度概率累积曲线包含 1 个跳跃总体和 2 个悬浮总体(图 6),以跳跃组分为主,分选好,为波浪分选结果,由于缺少恒定的强水流,沉积物具有较多分选差的悬浮组分。77.60 ~ 81.75 m 粉砂为潮滩沉积物,具有潮汐层理、脉状层理,可见虫孔构造,其中 77.60 ~ 78.20 m 的黑色有机粉砂为盐沼沉积。潮滩沉积物粒度概率累积曲线以一段式、仅含悬浮总体为特征(图 6)。

②潮滩相(83.63 ~ 92.70 m)

本段微体古生物化石含量较少,具有较多的半咸水种,其中半咸水有孔虫德国海恩斯虫 *Haynesina*

germanica 平均丰度高达 50%。介形虫中的半咸水种光滑三原介 *Sanyuania sublaevis* 和古屋刺面介 *Spinileberis furuyaensis* ,两者的平均丰度为 21.5% ,并出现 4 属 4 种的陆相介形虫,平均丰度 4.4% 。

从沉积物岩性特征上看,本段主体为灰褐色粉砂,夹有多个黄褐色—灰褐色砂质粉砂层,多处发育铁锈色染痕和钙质结核,均说明此沉积相时而露出水面,时而被海水淹没,存在多次海陆交替,推测为海陆过渡的潮滩相沉积环境。

3.2 地层对比与海平面变化

选取渤海邻近区域研究较深入的岩芯 BQ1、S3、HB-1^[5-7,10] 与本区 ZK1 孔作对比,讨论黄河三角洲古环境变化和海平面升降历史。BQ1 孔位于渤海西岸,钻进深度 95.6 m,可分辨出晚更新世以来 3 个海相层。S3 孔位于黄河三角洲顶端东部边缘,孔深 450.27 m,是渤海及其周边最长的晚新时代岩芯之一,可分辨出中更新世中晚期以来 7 个海相地层(图 7)。HB-1 孔位于黄河三角洲顶端近海,孔深 61 m,可分辨出 MIS3 以来的 7 次海平面变化。这 3 孔测年资料详细,海陆地层划分清楚。

通过测年资料对比,确定 ZK1 孔与已知岩芯相应层位年代一致。如 S3 孔第 1 海相层(0 ~ 23 m)底部滨海沼泽相泥炭¹⁴C 年龄为 8340 ± 120 aB. P. ,与

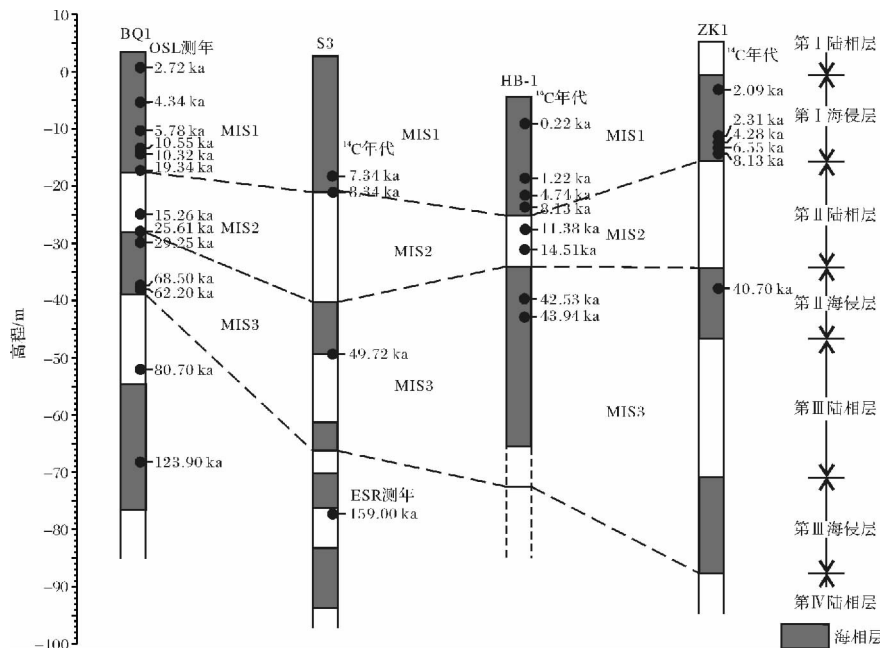


图 7 ZK1 孔与邻近海区钻孔地层对比

(BQ1 引自阎玉忠等 2006; S3 引自庄振业等,1999; HB-1 孔引自 Liu et al. 2009)

Fig. 7 Stratigraphic comparison between Core ZK1 and other cores from the nearby area

(core BQ1 was cited from Yan et al. (2006); core S3 was from Zhuang et al. (1999); core HB-1 was from Liu et al. (2009))

取自 ZK1 第 1 海侵层潮滩沼泽沉积物和有孔虫¹⁴C 年龄相一致(分别为 $8\,130 \pm 35$ aB. P. 和 $8\,050 \pm 35$ aB. P.)。S3 孔第 2 海相层(43 ~ 52 m) 底界贝壳碎屑¹⁴C 年龄为 $49\,720 \pm 2\,200$ aB. P. 亦与取自 ZK1 第 2 海相层的有孔虫¹⁴C 年代相一致($40\,700 \pm 440$ aB. P.)。根据已知岩芯研究,渤海自晚更新世以来海平面发生过多次重大变化^[1,5~7],其中包括 3 次大的海平面上升过程,分别是 MIS3 的渤海海侵($65 \sim 53$ kaB. P.) 和献县海侵($39 \sim 22$ kaB. P.)、MIS1 的黄骅海侵($9 \sim 0$ kaB. P.)。其地层均以海相微体古生物组合和沉积相为标志,分别对应 MIS3 以来 ZK1、S3、HB-1 孔的各海相层。

由此概括 ZK1 孔的海平面变化过程:晚更新世进入末次冰期以来(MIS4),该区气候较冷,海水退出渤海海区,沉积了 ZK1 底部的陆相河湖沉积(图 7 中第 IV 陆相层)。MIS3 开始,气候变暖,进入末次冰期的第一间冰阶,海面上升,发生了晚更新世的首次海侵——本区称为渤海海侵,沉积有 ZK1 孔的第 III 海侵层;之后气候变冷,海平面下降,沉积了第 III 陆相层;约距今 39 ka 开始,气候再次变暖,进入末次冰期的第二间冰阶,海水上升,再次淹没渤海,沉积有献县海侵层,即 ZK1 孔的第 II 海侵层。大约 20 kaB. P. 进入末次冰期冰盛期(MIS2),海水再次退出渤海,本区分布河流湖泊,沉积了第 II 陆相层。约 11 kaB. P. 气候急剧升温,末次冰期结束,进入冰后期(MIS1)。约 8.5 kaB. P. 开始海水淹没本区,陆续沉积第 I 海侵层中的潮滩、滨浅海相沉积。6 kaB. P. 海侵达到最大范围,约 4 kaB. P. 开始,黄河多次注入渤海^[8,11],沉积了第 I 海侵层中的水下三角洲沉积。由于黄河的高含沙量,河口三角洲淤积成陆,黄河在三角洲平原泛滥摆动,沉积了 ZK1 孔顶部的第 I 陆相层。

4 结论

通过对黄河三角洲百米岩芯 ZK1 孔沉积物沉积粒度、微体古生物鉴定、AMS¹⁴C 测年等测试分析,结合岩性特征得到如下结论:ZK1 孔共发育 10 个沉积相,可识别 3 个海侵层,其中第 I 海侵层的河口三角洲相和滨岸浅海相,第 II 海侵层的滨岸浅海相和河口三角洲相,第 III 海侵层的近岸浅海相和潮滩相,均以广盐或浅海类微古组合和特征岩性为标志。与前人研究对比,3 个海侵层自下而上对应于 MIS3 的渤海海侵和献县海侵、MIS1 的黄骅海侵,指示自 MIS4 以来研究区共发生 3 次主要海平面波动。ZK1 孔与邻

近钻孔结合,丰富了晚第四纪以来黄河三角洲地区沉积环境演变和海平面变化研究。

致谢 国家海洋局第一海洋研究所乔淑卿、刘焱光、姚政权、吴永华、王昆山,以及同济大学赵泉鸿教授等在样品分样、鉴定测试等方面提供了大量帮助,在此衷心感谢。对审稿人提出宝贵建议深表感谢!

参考文献(References)

- 1 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社,1985 [Department of Marine Geology, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. Geology of the Bohai Sea[M]. Beijing: Science Press, 1985]
- 2 胥勤勉,袁桂邦,张金起,等. 渤海湾沿岸晚第四纪地层划分及地质意义[J]. 地质学报,2011,85(8):1352-1367 [Xu Qinqian, Yuan Guibang, Zhang Jinqi, et al. Stratigraphic division of the Late Quaternary strata along the coast of Bohai Bay and its geology significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(8): 1352-1367]
- 3 王颖,邹欣庆,殷勇,等. 河海交互作用与黄东海域古扬子大三角洲体系研究[J]. 第四纪研究,2012,32(6):1055-1064 [Wang Ying, Zou Xinqing, Yin Yong, et al. Study on river-sea interaction and formation of Paleo-Yangtze Grand Delta system in the area of South Yellow Sea and East China Sea [J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(6): 1055-1064]
- 4 成国栋,薛春汀. 黄河三角洲沉积地质学[M]. 北京:地质出版社,1997 [Cheng Guodong, Xue Chunting. Sedimentary Geology of the Yellow River Delta [M]. Beijing: Geology Press, 1997]
- 5 庄振业,许卫东,刘东生,等. 渤海南部 S3 孔晚第四纪海相地层的划分及环境演变[J]. 海洋地质与第四纪地质,1999,19(2):27-35 [Zhuang Zhenye, Xu Weidong, Liu Dongsheng, et al. Division and environmental evolution of Late Quaternary marine beds of S3 hole in the Bohai Sea [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1999, 19(2): 27-35]
- 6 阎玉忠,王宏,李凤林,等. 渤海湾西岸 BQ1 孔揭示的沉积环境与海平面波动[J]. 地质通报,2006,25(3):357-382 [Yan Yuzhong, Wang Hong, Li Fenglin, et al. Sedimentary environment and sea-level fluctuations revealed by hole BQ1 on the west coast of the Bohai Bay, China [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(3): 357-382]
- 7 Liu Jian, Saito Yoshiki, Wang Hong, et al. Stratigraphic development during the Late Pleistocene and Holocene offshore of the Yellow River delta, Bohai Sea [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 36: 318-331
- 8 Xue Chunting. Historical changes in the Yellow River Delta, China [J]. Marine Geology, 1993, 113: 321-329
- 9 刘庆生,刘高焕,励惠国. 近现代黄河三角洲地貌形态反演[J]. 地理与地理信息科学,2003,19(2):93-96 [Liu Qingsheng, Liu Gao-huan, Li Huiguo. Geomorphologic shape inversion of the neoteric and modern Yellow River Delta [J]. Geography and Geo-information Science, 2003, 19(2): 93-96]
- 10 赵长荣, J. Hus, 阎玉忠,等. 渤海湾西岸湾顶晚更新世-全新世年

代地层序列与地磁极漂移[J]. 地质调查与研究, 2003, 26(3): 183-192 [Zhao Changrong, J. Hus, Yan Yuzhong, *et al.* Late Pleistocene-Holocene chronostratigraphic sequence and the geomagnetic polar excursion on the west coast of Bohai Bay [J]. Geological Survey and Research, 2003, 26(3): 183-192]

11 赵松龄, 杨光复, 苍树溪, 等. 关于渤海湾海相地层与海岸线问题[J]. 海洋与湖沼, 1978, 9(1): 15-24 [Zhao Songling, Yang Guangfu, Cang Shuxi, *et al.* Problems about marine strata and coastline of west coast of Bohai Bay [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1978, 9(1): 15-24]

Stratigraphic Evolution of the Huanghe Delta (Bohai Sea) since the Late Quaternary and Its Paleoenvironmental Implications: Evidence from Core ZK1

LI Guo-gang^{1 2} HU Bang-qi³ BI Jian-qiang^{1 2} SONG Zhuo-li^{1 2}
BU Ru-yuan^{1 2} LI Jian-min^{1 2}

(1. North China Sea Branch of the State Oceanic Administration, Qingdao 266061;

2. Beihai offshore engineering survey institute of the State Oceanic Administration, Qingdao 266061;

3. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Qingdao 266071)

Abstract: A 100-m-long sediment core (ZK1) from the modern Huanghe Delta (Bohai Sea) were analyzed to document the stratigraphy and sea-level changes since the Late Quaternary. Accelerator mass spectrometry ¹⁴C dating and analyses of benthic foraminifera, ostracods, and sedimentary characteristics were analyzed for Core ZK1. Seven depositional units (DU1 to DU7 in descending order) were identified and interpreted as follows: DU 7 corresponds to terrestrial facies in MIS 4; DU 6 and DU 4, to alternating terrestrial and marine facies in MIS 3; DU 3, to terrestrial facies in MIS 2; DU 2, to Holocene marine facies; and DU 1, to the modern Huanghe Delta sediments deposited since 1855. By correlation with other well-studied cores in the nearby area, three transgressive layers of Core ZK1 were in agreement with Bohai and Xianxian transgressions in MIS3, and Huanghua transgressions in MIS1. These sedimentary facies of Core ZK1 reflect several sea-level fluctuations since MIS4, which played a key role in controlling the sedimentary environments in the study area.

Key words: Huanghe delta; Late Quaternary; sea-level change; stratigraphic evolution; Bohai Sea