

doi:10.12029/gc20221207001

## 渤海湾西北部晚更新世（113.96 ka）以来的沉积环境 及对海侵和构造运动的指示

张晓飞<sup>1</sup>, 张学斌<sup>1</sup>, 张永义<sup>1</sup>, 牛树银<sup>2</sup>, 孙爱群<sup>2</sup>, 王永立<sup>1</sup>, 樊航宇<sup>1</sup>,  
李明辰<sup>1</sup>, 韩荣文<sup>1</sup>

(1.天津市地质调查研究院, 天津, 300191; 2.河北地质大学, 河北 石家庄 050031)

**提要:**【研究目的】渤海湾西北部是华北平原沉积环境变化较为频繁的地区, 也是新构造运动的主要沉降区, 加强渤海湾西北部晚更新世以来的地层研究, 分析沉积环境演变过程, 对研究海岸带地区海平面变化及沉降作用具有重要意义。【研究方法】以渤海湾西北岸地区QLT03孔、QEJ01孔和NHG14孔三个全取心钻孔为基础, 综合岩石地层和生物地层的方法, 采用AMS<sup>14</sup>C和光释光测年技术, 对比分析了邻区收集钻孔, 探讨了研究区晚第四纪以来的沉积环境及对海侵和构造运动的指示作用。【研究结果】结果表明, 研究区晚更新世早期为三角洲平原和河湖相发育期, 中期以漫滩湖泊相和三角洲平原发育为主, 晚期为曲流河-河漫滩相发育期, 全新世为三角洲平原-洪泛平原发育期。研究区自下向上发育三期海侵地层, 分别是晚更新世早期的第三海侵层、晚更新世晚期的第二海侵层和全新世的第一海侵层, 海侵规模由古至今呈现逐渐加强的趋势, 各期海侵层与全球海平面变化较一致, 并自下而上分别与MIS5、MIS3和MIS1阶段的高海面有良好的对应关系。研究区自晚更新世以来存在差异性沉降运动, 且在全新世差异性运动变缓。【结论】在持续的构造沉降背景下, 渤海湾沿岸地区大规模海侵均发生在晚更新世以来, 这些期次海侵与渤海湾沿岸天津东南部地区长期下沉过程相关, 且沉降中心自宝坻八门城镇向汉沽茶淀镇方向移动, 进入全新世以后构造活动减弱, 差异性沉降运动不明显。渤海湾沿岸地区晚第四纪地层发育和沉积环境演化受海平面变化的控制。

**关键词:** 沉积记录; 环境演变; 海侵层; 构造沉降; 海平面变化; 海洋地质调查工程; 渤海湾

**创新点:** (1) 总结了渤海湾西北部晚更新世以来的沉积环境演变过程。(2) 晚更新世以来研究区发生了受次级构造作用控制的差异性沉降运动, 且沉降中心自宝坻八门城镇向汉沽茶淀镇方向移动。(3) 渤海湾西北部晚第四纪地层发育和环境演化受海平面变化的控制。

## Depositional environment since Late Pleistocene (113.96 ka) in the northwestern Bohai Bay and its indications to transgression and tectogenesis

ZHANG Xiaofei<sup>1</sup>, ZHANG Xuebin<sup>1</sup>, ZHANG Yongyi<sup>1</sup>, Niu Shuyin<sup>2</sup>, Sun Aiqun<sup>2</sup>,  
WANG Yongli<sup>1</sup>, FAN Hangyu<sup>1</sup>, LI Mingchen<sup>1</sup>, HAN Rongwen<sup>1</sup>

(1. Tianjin Institute of Geological Survey, Tianjin, 300191; 2. Hebei GEO University,  
Shijiazhuang 050031, hebei, China)

**Abstract:** This paper is the result of marine geological survey engineering.

**[Objective]** The northwest of Bohai Bay is an area where the depositional environment changes frequently in North China Plain and is also the main depressed area of the neotectonics.

**基金项目:** 中国地质调查局项目(编号DD20160042)和天津市国土和房屋管理局项目(编号国土房任(2014)19号)联合资助。

**作者简介:** 张晓飞, 男, 1982年生, 工程师, 主要从事第四纪地质与区域地质研究。E-mail: [zxf280102628@126.com](mailto:zxf280102628@126.com)。

**通讯作者:** 张学斌, 男, 1981年生, 高级工程师, 从事第四纪地质研究工作。E-mail: [tizhangxb@163.com](mailto:tizhangxb@163.com)。

Strengthening the stratigraphic research since Late Pleistocene in Northwestern Bohai Bay and analyzing the evolution process of the depositional environment is of great significance to the study of sea-level change and subsidence of coastal areas. **[Method]** Based on the three full coring boreholes QLT03, QEJ01 and NHG14 in the northwest coast of Bohai Bay, and by integrating the lithostratigraphic and biostratigraphic methods, AMS<sup>14</sup>C and optical stimulated luminescence dating are used to compare and analyze the collection boreholes in the adjacent area, discussing the depositional environment and its indications to transgression and tectogenesis since late Quaternary in the study area. **[Result]** The results show that early Late Pleistocene of the study area is the development period of delta plain and fluvio-lacustrine facies, the middle is the development period of floodplain-lacustrine facies and delta plain, the late is the development period of meandering stream- floodplain facies, and Holocene is the development period of delta plain- flood plain. The study area develops three phases of transgressive strata from bottom to top, namely, the third transgressive layer in early Late Pleistocene, the second transgressive layer in late Late Pleistocene and the first transgressive layer in Holocene. The scale of transgression has gradually strengthened from the ancient to the present. The transgressive layers in each phase are more consistent with the global sea level change and have good correspondence with the high sea level in MIS5, MIS3 and MIS1 phases from bottom to top. There has been differential subsidence movement in the study area since Late Pleistocene, and the differential movement has slowed down in Holocene. **[Conclusion]** Under the background of continuous tectonic subsidence, large-scale marine transgressions in the coastal area of Bohai Bay have all occurred since Late Pleistocene. These transgressions are related to the long-term subsidence process in the southeastern area of Tianjin along the coast of Bohai Bay, and the subsidence center moved from Bamencheng Town of Baodi District to Chadian Town of Hangu District. After entering Holocene, the tectonic activity weakened and the differential subsidence movement was not obvious. The late Quaternary stratigraphic development and depositional environment evolution in the coastal areas of Bohai Bay are controlled by sea level changes.

**Key words:** depositional record; environmental evolution; transgressive layer; tectonic subsidence; sea level change ; marine geological survey engineering; Bohai Bay

**Highlights:** (1) The evolution process of depositional environment in the northwest of Bohai Bay since Late Pleistocene is summarized. (2) Since Late Pleistocene, the study area has experienced differential subsidence movement controlled by secondary tectonics, and the subsidence center has moved from Bamencheng Town of Baodi District to Chadian Town of Hangu District. (3) The stratigraphic development and environmental evolution in the northwest of the Bohai Bay are controlled by sea level changes in late Quaternary.

**About the first author:** ZHANG Xiaofei, male, born in 1982, engineer, is mainly engaged in research on Quaternary geology and regional geology. E-mail: [zxf280102628@126.com](mailto:zxf280102628@126.com)

**About the corresponding author:** ZHANG Xuebin, male, born in 1981, senior engineer, is engaged in Quaternary geological research. E-mail: [tjzhangxb@163.com](mailto:tjzhangxb@163.com)

**Fund support:** Supported by the projects of China Geological Survey (No. DD20160042) and Tianjin Municipal Bureau of Land Resources and Housing Management (No. GTFR (2014) No.19).

## 1 引言

受中国大陆自西向东的掀斜作用,加剧了河流砂坝的进积速度,渤海湾沿岸地区河流携

带大量泥砂入海,在长期的沉积过程中保存了较厚的第四纪沉积物(陈永胜等,2012;胥勤勉等,2014;张晓飞等,2021),为沉积环境的演变提供了良好的载体。自晚第四纪以来,随着冰期和间冰期气候变化以及海平面多次升降(高茂生等,2018),渤海湾沿岸经历了三次大规模的海侵,分别沉积了第I海侵层、第II海侵层和第III海侵层(王强等,1983;杨怀仁等,1985;王强等,2009;庄振业等,1999),时间上分别对应于MIS1(深海氧同位素阶段1)、MIS3和MIS5(闫玉忠等,2006;闫玉忠等,2006;Liu J et al.,2009;胥勤勉等,2011)。渤海湾沿岸地区受海陆交互作用的影响,形成了交替发育的海相地层和陆相地层,蕴含着海相和陆相沉积环境演变的重要信息,吸引了众多学者的研究兴趣。如岳军等利用地球化学数据反映环境指标,还原气候环境规律,从而讨论海平面的波动趋势(岳军等,2011);赵长荣等运用地磁极漂移揭示了地层的沉积事件(赵长荣等,2003);李杰等以TJC-1孔为主,利用孢粉数据获得孢粉组合特征并详细阐明了古气候古环境演变特征(李杰等,2018);秦雅飞等深入分析第四纪沉积物的物理力学性质及其对地面沉降的影响,探讨了晚第四纪沉积物可能潜在的沉积层(秦雅飞等,2003)。前人研究多集中在渤海湾西部地区和南部地区,而对渤海湾西北部地区的研究多以全新世贝壳堤和牡蛎礁为主(王宏等,2011;方晶,2012;岳军等,2012),对其沉积环境和海侵变化关注较少。本文以三角洲陆地岩芯为基础,根据沉积物岩性变化特征、微体古生物特征及年龄测定划分沉积环境和地层对比,建立地层沉积格架,还原沉积演化历史,进一步探讨了渤海湾西北部地区沉积环境演变与海侵作用和新构造运动的响应,为陆海统筹、围填海工程及海洋环境提供沉积环境依据(高茂生等,2018)。

## 2 区域地质概况

研究区位于渤海湾西北岸,由冲积物和海积物相互叠覆塑造成陆,属于潮白河和蓟运河的下游地区,地势相对低洼。北部紧邻燕山南麓的山前洪积-冲积倾斜平原,东抵滦河洪积-冲积扇,西界为永定河冲积扇(王一曼,1982),南部以海河流域以北为界。大地构造位置位于华北盆地的东北部,区内三级构造单元分别为冀中拗陷、沧县隆起和黄骅拗陷,呈北东南西向相间分布,组成了研究区的基本构造格架。研究区自晚更新世以来共经历了三次海平面升降和多次气候冷暖更替,形成了复杂的海陆交替地层序列。本文以渤海湾西北岸地区QLT03孔、QEJ01孔和NHG14孔三个全取心钻孔为基础,综合岩石地层和生物地层的方法,采用AMS<sup>14</sup>C和光释光测年技术,对研究区内晚第四纪以来地层进行精细划分,并深入研究和讨论了渤海湾西北岸地层发育和环境演化及对全球海平面变化与新构造运动的响应。

## 3 样品来源与分析方法

QLT03孔(39° 33' 59" N, 117° 34' 57" E)孔口高程为0.36m,位于天津市宝坻区八门城镇张庄村(图1),距离渤海湾约为74.63km, QEJ01孔(39° 25' 44" N, 117° 24' 4" E)孔口高程为5.972m,位于天津市尔王庄乡高庄户村旁工业园内,距离渤海湾为57.27km, NHG14孔(39° 15' 47" N, 117° 42' 23" E)孔口高程为0.335m,位于天津市汉沽茶淀镇桥沽村西500m处,距离渤海湾为57.27km。钻孔岩心均采用旋转机械钻获得,进尺深度分别为70m、401m和80m,取芯率均达到90%以上。将岩心清理后剖开放入1m的PVC管中,根据沉积物的颜色、岩性、结构、沉积构造和粒度组成等特征,进行详细的岩心编录,同时采集AMS<sup>14</sup>C样品、OSL(光释光)样品、微体古生物样品及粒度分析样品。

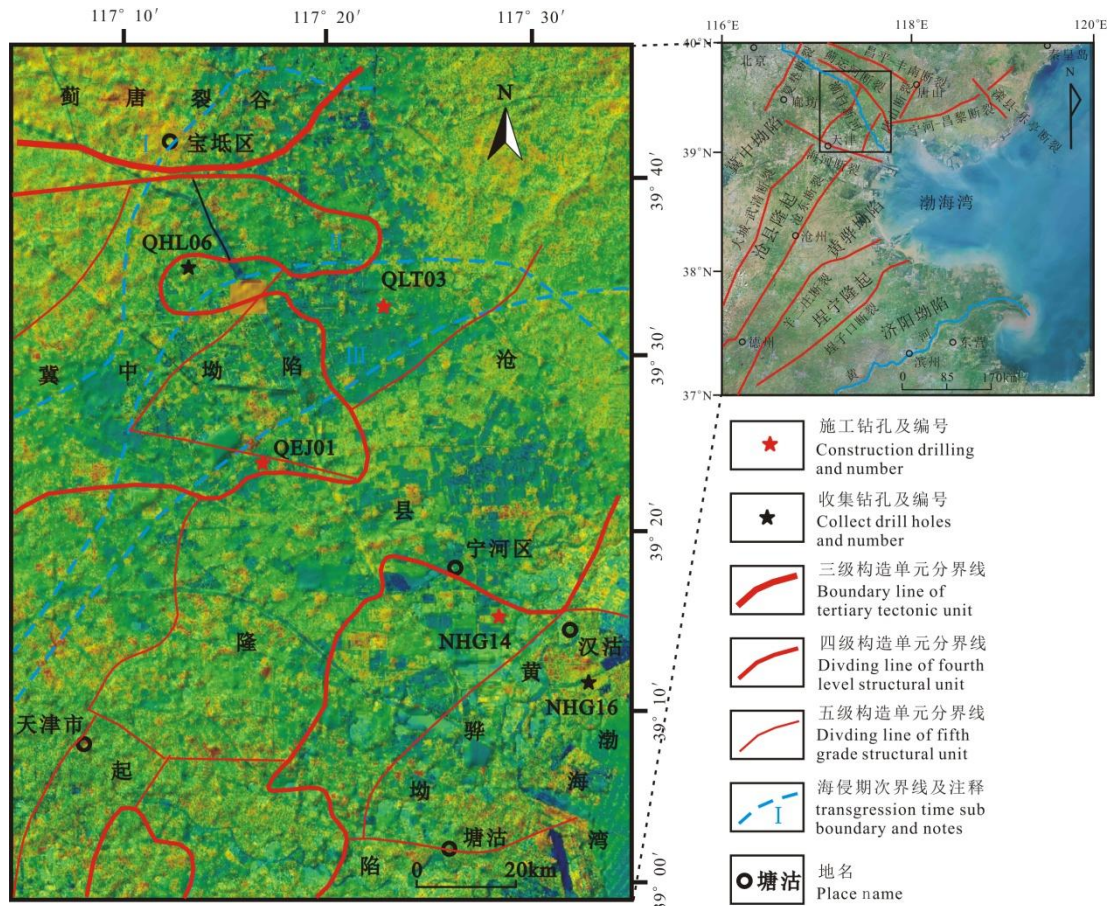


图 1 渤海湾西北部地区钻孔位置及构造分区示意图

Fig.1 Borehole Location and Tectonic Division in Northwest Bohai Bay

OSL (光释光) 测年方法普遍应用于深部沉积物定年, 样品在避光条件下采取, 并用遮光锡纸材料密封保存, 在样品运输过程避免震动, 样品是由中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室释光年代学实验室测得。样品经预处理烘干后称出约 1mg, 再用 Daybreak2200 (美国) 光释光测年仪器上测定, 样品环境剂量率根据样品 U、Th、K 含量, 用 ADAMIEC 等提出的剂量率转化方法计算, 其中 U、Th、K 含量用中子活化法测得。AMS<sup>14</sup>C 样品测试在北京大学考古文博学院第四纪年代测试实验室完成, 年龄数据利用 Calib 软件进行校正获得日历年龄。

微体古生物样品均取 30g 干重, 置于清水内以双氧水分解, 样品充分散开后, 以 240 目分析筛淘洗后, 取筛上物置于蒸发皿内, 烘干后放置显微镜下挑选全部钙质标本; 粗估一个门类样品超过 200 个体后, 即先行样品缩分, 鉴定后再乘回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 时, 一般以算数值和常用对数值 (红色) 曲线表达; 最后将筛上物 (>0.063 mm) 颗粒称重用以编绘全孔粗粉砂含量曲线, 样品测试由中国地质科学院水文地质环境地质研究所微体古生物实验室完成。

粒度分析采用激光粒度仪, 测试仪器型号为 Mastersizer2000, 仪器测量范围为 0.02~2000 $\mu$  m, 测试按照常规试验方法进行, 由中国地质科学院第四纪年代学与水文环境演变重点实验室完成。具体测试步骤为先取样品 3-5g, 放入 100ml 的烧杯中, 注入 10ml10% 的双氧水溶液进行加热, 注入蒸馏水防止烧干, 待溶液中不出现小气泡时注入 10ml10% 的盐酸溶液, 然后注入蒸馏水防止烧干, 待溶液沸腾时取下。烧杯降温后, 注入 50ml 左右的蒸馏水, 静止 12h, 抽取上部分清液, 剩余 20ml 左右, 后注入 10ml (0.05mol/ml) 的偏磷酸钠分散剂, 搅拌均匀将烧杯置于超声波振荡仪中, 震荡十分钟左右, 上机测试。

## 4 研究结果

### 4.1 测年结果

AMS<sup>14</sup>C 测年结果显示基底泥炭年龄值由北西至南东逐渐变小,全新世海侵基底泥炭层年龄约为 7~9.8 cal ka BP, 晚更新世第二海侵层基底泥炭年龄值约为 33~39 cal ka BP, 去除误差较大且不合逻辑的 2 个可疑的 AMS<sup>14</sup>C 测年数据,其它年龄自下而上由古至今自洽性较好。AMS<sup>14</sup>C 测年结果和 OSL 测年结果分别见表 1 和表 2。

表 1 工作区钻孔 <sup>14</sup>C 测年结果

Table 1 <sup>14</sup>C Dating Results of Boreholes in the Working Area

序号	野外编号	采样位置 /m	材料	表观年龄 (ka BP)	校正年龄 (cal ka BP) (2σ)	评价
1	QLT03- <sup>14</sup> C02	13.85	灰黑色泥炭	9.9 ±0.04	11.31	合理可用
2	QLT03- <sup>14</sup> C03	25.15	灰黑色泥炭	11.78 ±0.06	13.615	可疑
3	QLT03- <sup>14</sup> C04	29.6	灰黑色泥炭	39.35 ±0.43	39.35	合理可用
4	QHL06- <sup>14</sup> C01*	0.75	棕黑色粘土	1.865±0.025	1.799	合理可用
5	QHL06- <sup>14</sup> C02*	3.35	灰色泥炭土	6.135±0.03	7.052	合理可用
6	QHL06- <sup>14</sup> C03*	7.35	灰色泥炭	13.34±0.045	16.045	可疑
7	QHL06- <sup>14</sup> C04*	25.3	灰黑色粘土	31.320±0.18	35.210	合理可用
8	QEJ01 <sup>14</sup> C-01	9.6	灰色泥炭	9.310±0.045	9.31	合理可用
9	QEJ01 <sup>14</sup> C-02	32.2	深灰色泥炭	33.42±0.26	33.42	合理可用
10	NHG14 <sup>14</sup> C01	15.1	灰色粉砂质粘土	8.21 ±0.04	9.288	合理可用
11	NHG16 <sup>14</sup> C01*	19.2	灰色粉砂质粘土	8.72 ±0.045	9.832	合理可用

(注: 带\*的测试数据为本项目其他孔的收集数据)

表 2 工作区钻孔 OSL 测年结果

Table 2 OSL Dating Results of Boreholes in the Working Area

野外编号	埋深/m	测量方法	实测含水量 (%)	年剂量率 (Gy/ka)	等效剂量 (Gy)	年龄 (Ka)	评价
QEJ01- GSG001	43.5	SMAR 细颗粒石英 OSL	7%	2.6±0.2	240.0±13.3	92.7±5.5	相近
QLT03- GSG01	32.4	SMAR 细颗粒石英 OSL	12%	2.7±0.3	206.3±11.7	75.5±4.6	相近

### 4.2 钻孔地层记录沉积环境演化特征

自晚第四纪以来,随着气候的频繁波动,渤海湾沿岸的海陆交互作用逐渐加剧,且规模更强,使得海相地层和陆相地层呈现此消彼长的演变规律。相关研究表明本区海侵的发生是在第四纪以来持续构造沉降的背景下(姚政权等, 2015),一方面为海侵作用成构造扩容空间,一方面区域不均匀沉降导致相邻地区地层在沉积物厚度、粒度和颜色等方面存在明显差异。基于末次盛冰期低水位域偏氧化环境背景的认识(王强等, 2008),将上覆形成于积水环境的灰色沉积地层统称为冰后期沉积(吴标云等, 1998; 王强等, 2009)。渤海湾沿岸晚更新世地层共发育两期海侵沉积,且和下辽河地区地层进行对比(中国科学院海洋研究所海洋地质研究室, 1985),在没有直接测年技术可以判断晚更新世底界的情况下,取第三海侵层位下偏氧化或指示水体萎缩的岩石地层学标志,符合岩石地层学标准(鲁庆伟等, 2021)。通常将晚更新世以来受古季风影响的地层水热状况好转确定为晚更新世开始层位,这与天津平原地区整体地层氧化还原状况基本相符。结合以上说明及 AMS<sup>14</sup>C 测年和 OSL 测年数据,

依据岩石地层和微体化石特征判定,研究区全新统底板埋深分别为 15.2m (QLT03)、20m (QEJ01)、25.4m (NHG14),晚更新统底板埋深分别为 58.1m (QLT03)、55m (QEJ01)、73.6m (NHG14)。选取 QEJ01 取得的年龄数据与其深度进行数据拟合,相关系数为 0.96,得到晚更新世地层底界年龄为 113.96Ka。

#### 4.2.1 QLT03 地层特征及沉积环境 (图 2)

(1) 全新世层段 (15.2~0m): 15.2~0m 层段 (DU1): 整体以深灰色黏土、黏土质粉砂和粉砂为主,对应于第Ⅷ沉积旋回。下部以灰色粉砂夹薄层黏土为主,见海相贝壳碎片及白小旋螺等淡水腹足类,发育波状层理,为河口坝相和湖沼相沉积,底部灰黑色黏土中获得 AMS<sup>14</sup>C 年龄 11.31ka BP; 中部为灰色黏土质粉砂,夹有较多贝壳碎片,见少量有孔虫和海相介形类,发育波状层理和透镜状层理,属潮坪沉积,为区域上第一海侵层层位;上部沉积物粒度明显变细,为深灰色黏土,见大量炭质斑点和植物茎干碎屑,属瀉湖沉积;顶部为棕色黏土层,见较多钙核和植物碎屑,为泛滥平原沉积。

(2) 晚更新世层段 (58.1~15.2m): 58.1~49.7m 层段 (DU6): 对应于第Ⅲ沉积旋回,下部为灰色的黏土质粉砂和粉砂,上部为灰色黏土,整层发育较多的炭质斑点和植物根茎,为气候转暖下地层沉积特征,属于湖泊相沉积。

49.7~36.1m 层段 (DU5): 沉积物粒度明显变粗,对应于第Ⅳ沉积旋回,下部为灰黄色、灰色粗砂、中砂和细砂,波状层理、交错层理和平行层理较发育,砂体下部见明显的冲刷界面,为河床相沉积;中部为灰黄色、灰绿色粉砂和细砂,见波状层理,属分支河道沉积;上部为灰棕色、灰黄色粉砂质黏土,局部见粉砂透镜体和平行层理,发育贝壳碎片,为河漫滩相沉积。该时期沉积物粒度从下至上由粗变细,说明水动力由加强逐渐过渡到减弱。

36.1~29.1m 层段 (DU4): 对应于第Ⅴ沉积旋回,下部为灰色粉砂和粉细砂,见平行层理,粒度向上逐渐变细,为边滩沉积;上部为灰绿色、黄绿色粉砂质黏土,可见少量炭质斑点及条带,铁质结核和钙质结核较为发育,为漫滩湖泊沉积,对应于冷干的 MIS4 阶段。

29.1~24.2m 层段 (DU3): 整体以棕黄色粘土质粉砂和黏土为主,局部夹有粉砂薄层,下部发育大量的贝壳碎片,见斜层理和钙质结核,属感潮河道沉积,为区域上第二海侵层层位,对应于第Ⅵ沉积旋回。该地区第二海侵层较为稳定,相关研究表明 30m 钻遇的海侵层应属于 MIS3 阶段 (王强等, 2008)。

24.2~15.2m 层段 (DU2): 下部为棕黄色粘土质粉砂和灰棕色黏土,零星见锈染斑点及炭质斑点,钙质结核和铁质结核较发育,沉积构造多为平行层理,属河漫滩相沉积;中部为灰绿色、灰黄色黏土,见炭质斑点和小型扁旋螺化石,水平层理发育,局部见轻微潜育化现象,表明该时期水动力条件较弱,为漫滩湖泊沉积;上部为灰黄色粉砂,见少量螺类化石和铁质结核,属分支河道沉积。该时期全球气候寒冷干旱,降雨量减少,沉积物颜色多以棕黄色和灰黄色为主,对应于 MIS2 阶段沉积。

#### 4.2.2 QEJ01 地层特征及沉积环境 (图 3)

(1) 全新世层段 (20~0m): 20~0m 层段 (DU1): 对应于第Ⅸ沉积旋回,底部为一套由粗至细的砂体沉积,岩性以深灰色和灰色中粗砂、细砂为主,发育有较多的贝壳碎片和少量小块砾石,见少量有孔虫和海相介形类,沉积构造显示底部波状层理发育,向上部为水平层理,反映水动力由强变弱的趋势,属下切河谷沉积。厚层灰色较粗砂体,反映了其较强的输沙能力,可能受潮白河古河道影响。粗粒沉积物往往出现于高能环境,细粒沉积物出现于低能环境,同时粒径的粗细还受气候干湿变化的影响 (张晓飞等, 2019)。底部沉积物平均粒径 ( $M_z$ ) 1.72 $\Phi$ , 粒度较粗,标准偏差 ( $\sigma$ ) 2.2,分选性相对较差,偏度 (SK1) 0.53,峰度系数 (KG) 为 1.00,频率分布曲线为带有细粒尾端的单峰,正偏 (图 4),表明物质来源单一,且有较高的滚动组分 (70%-80%),为河流下切作用下形成的快速堆积。中部为灰色黏土质粉砂夹粉砂、黑灰色粉砂质黏土,具透镜状层理、水平层理和波状层理,见少量

的炭化植物碎屑和贝壳碎片，有孔虫和海相介形类极为丰富，为潮坪和瀉湖相沉积。沉积物平均粒径 ( $Mz$ )  $2.22-2.32\Phi$ ，标准偏差 ( $\sigma$ )  $1.62-1.71$ ，偏度 ( $SK1$ )  $0.75-0.78$ ，峰度系数 ( $KG$ ) 为  $3.22-3.67$ ，频率分布曲线为带有细粒尾端的单峰，正偏。上部为黄绿色、黑灰色黏土，深棕灰色粉砂质黏土，具水平层理，钙核轻微发育，见少量扁小旋螺化石及植物碎屑，局部潜育化现象轻微发育，为湖沼相和泛滥平原沉积。沉积物平均粒径 ( $Mz$ )  $2.48\Phi$ ，标准偏差 ( $\sigma$ )  $1.59$ ，偏度 ( $SK1$ )  $0.53$ ，峰度系数 ( $KG$ ) 为  $1.00$ ，频率分布曲线为带有细粒尾端的单峰，正偏；该单元为全新世以来的沉积地层，平均粒径显示了地层的正旋回特征，对应 MIS1 阶段沉积。

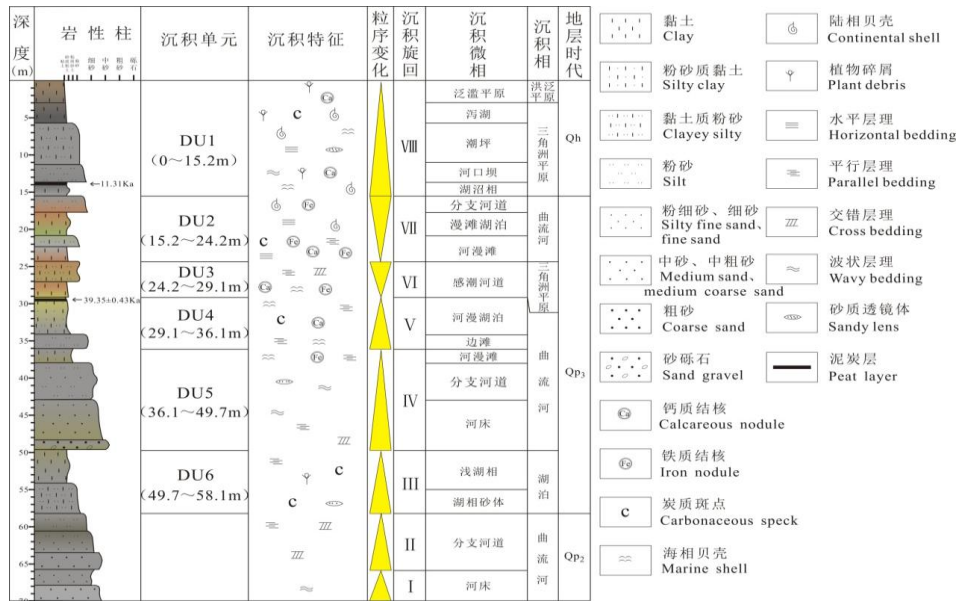


图 2 QLT03 地层特征及沉积环境

Fig.2 QLT03 stratigraphic characteristics and sedimentary environment

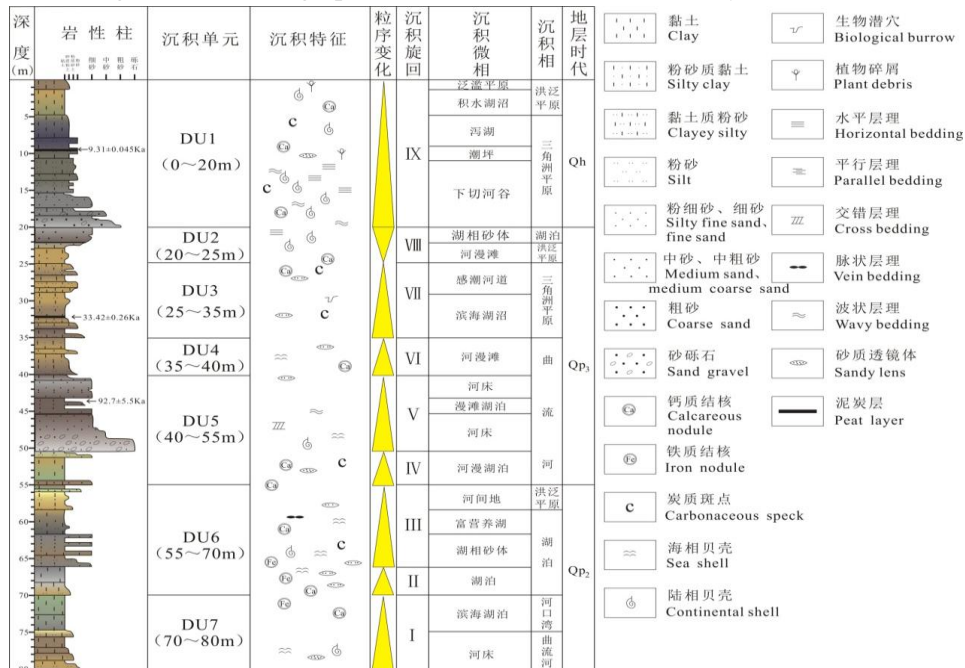


图 3 QEJ01 地层特征及沉积环境

Fig.3 QEJ01 stratigraphic characteristics and sedimentary environment

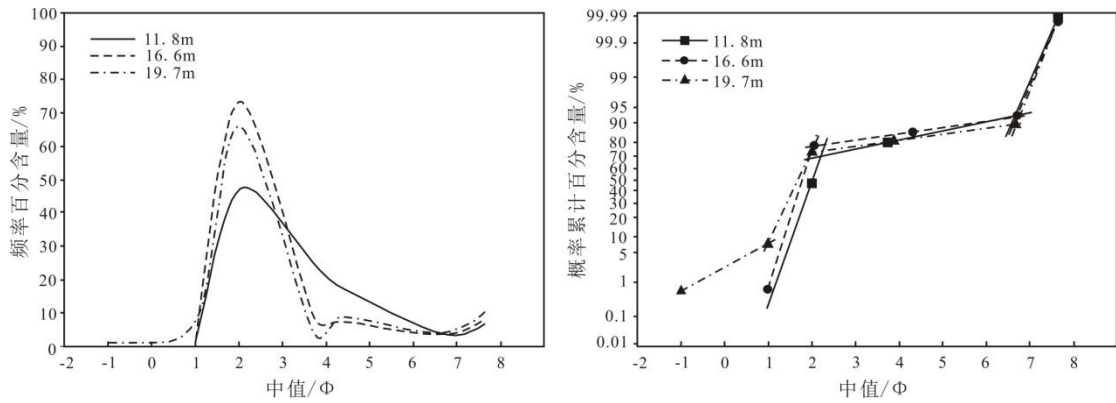


图 4 QEJ01 孔全新世 (DU1) 沉积物粒度特征

Fig.4 Grain size characteristics of Holocene (DU1) sediments in hole QEJ01

(2) 晚更新世层段 (55~20m): 55~40m 层段 (DU5): 下部以灰黄色、深灰绿色黏土为主, 夹细砂和粉砂, 对应于第IV沉积旋回, 见大量钙质结核及少量炭质斑点, 局部发育粉砂透镜体, 潜育化现象较为发育, 处于长期滞水环境, 其平均粒径 ( $Mz$ ) 2.19~2.96 $\Phi$ , 标准偏差 ( $\sigma$ ) 1.57~2.91, 偏度 ( $SK1$ ) 0.23~0.79, 峰度系数 ( $KG$ ) 为 0.86~1.41, 频率分布曲线为带有细粒尾端的双峰 (图 5), 可能与水动力强弱变化相关, 分选较差, 为漫滩湖泊相沉积。上部以棕灰色中细砂、细砂为主, 对应第V沉积旋回, 砂体向上呈现由粗到细递变正粒序沉积, 波状层理和交错层理较发育, 底部含较多的砾石, 总体显示陆源河流输入物质较多、较快, 平均粒径 ( $Mz$ ) 1.64~2.38 $\Phi$ , 标准偏差 ( $\sigma$ ) 1.53~2.3, 偏度 ( $SK1$ ) 0.38~0.78, 峰度系数 ( $KG$ ) 为 1.51~3.47, 频率分布曲线为带有细粒尾端的单峰, 正偏, 粗粒组分含量较大, 为河床沉积。概率累计曲线为三段式, 缺推移质, 跃移总体为两段, 具双跃移组分, 截点为 1.8 $\Phi$  左右, 含少量悬移质。在 43.5m 处取得 OSL 测年为 92.7 $\pm$ 5.5Ka BP, 该层段沉积物颜色所反映的氧化-还原状况交替现象, 指示了沉积环境在河流和漫滩湖泊之间的频繁变迁, 同时也印证了进入晚更新世气候冷暖的明显波动, 该层对应于 MIS5 阶段。

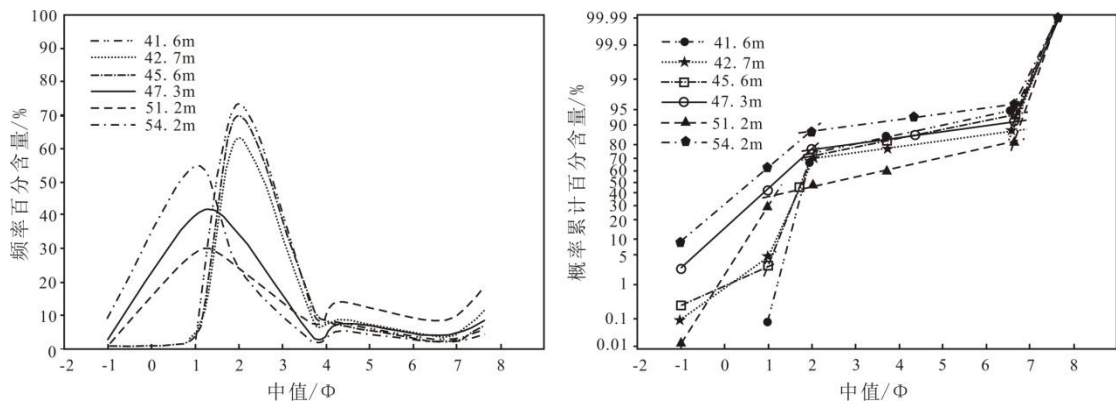


图 5 QEJ01 孔晚更新世 (DU5) 沉积物粒度特征

Fig.5 Grain size characteristics of late Pleistocene (DU5) sediments in hole QEJ01

40~35m 层段 (DU4): 以棕黄色粉砂质黏土和黏土为主, 局部夹有粉砂透镜体, 呈正粒序沉积, 具微斜层理, 对应第VI沉积旋回。潜育化现象轻微发育, 见少量钙质结核, 该段沉积层微体古生物标本仅见白小旋螺, 沉积物粒度整体变细, 反映其水动力变弱, 沉积能量变低。平均粒径 ( $Mz$ ) 为 3.85~3.98 $\Phi$ , 标准偏差 ( $\sigma$ ) 为 1.67~2.08, 偏度 ( $SK1$ ) 0.04~0.05, 峰度系数 ( $KG$ ) 为 1.12~3.79, 频率分布曲线为带有细粒尾端的双峰 (图 6), 表明有多个物质来源, 负偏, 分选差, 有较高的跳跃组分 (50%), 悬移组分约为 30%, 主要为河漫滩沉积。



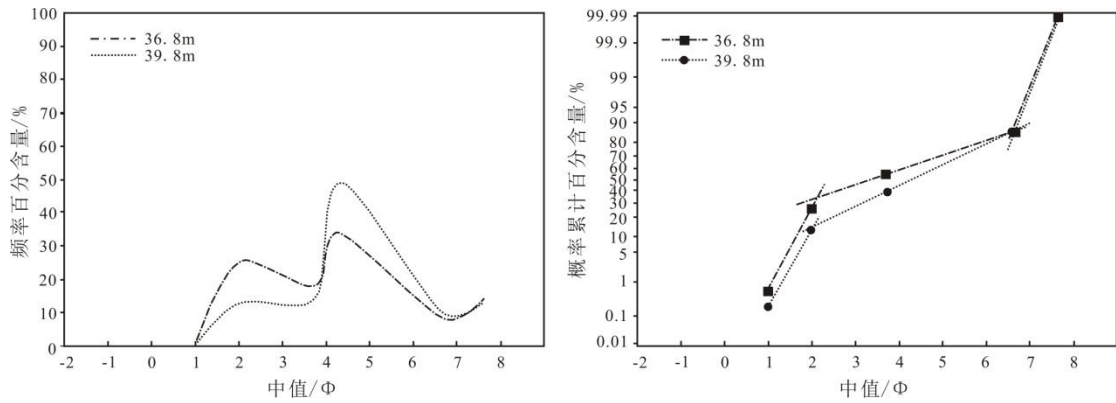


图 6 QEJ01 孔晚更新世 (DU4) 沉积物粒度特征

Fig.6 Grain size characteristics of late Pleistocene (DU4) sediments in hole QEJ01

35~25m 层段 (DU3): 对应第Ⅶ沉积旋回。下部沉积物粒度偏细, 岩性较均一, 发育黑色炭质斑点, 偶见潜育化现象和砂层透镜体, 局部发育炭质黏土层, 并在 32.2m 处炭质黏土中获得测年结果显示为  $33.42 \pm 0.26\text{Ka}$ , 大致可对应于区域上海侵层的基底泥炭, 该现象普遍出现在渤海湾沿岸地质钻孔 30m 左右的层位, 因此推测 DU3 单元为 MIS3 阶段以来保存的海侵沉积。其平均粒径 ( $Mz$ ) 为  $3.07 \sim 4.13\Phi$ , 标准偏差 ( $\sigma$ ) 为  $1 \sim 2.29$ , 偏度 ( $SK1$ )  $0.01 \sim 0.61$ , 峰度系数 ( $KG$ ) 为  $0.85 \sim 1$ , 顶部及底部频率分布曲线为带有细粒尾端的双峰 (图 7), 正偏; 中部为单峰, 细粒组分含量高, 分选差。概率累计曲线为多段式, 跃移总体由多段组成, 含少量悬移质, 反映为滨岸湖沼沉积。上部多呈现棕黄色、灰黄色黏质砂土与粉砂互层, 潜育化现象发育, 见少量钙质结核和砂层透镜体, 埋藏微体生物丰富, 局部隐约见虫孔构造, 为感潮河道沉积。

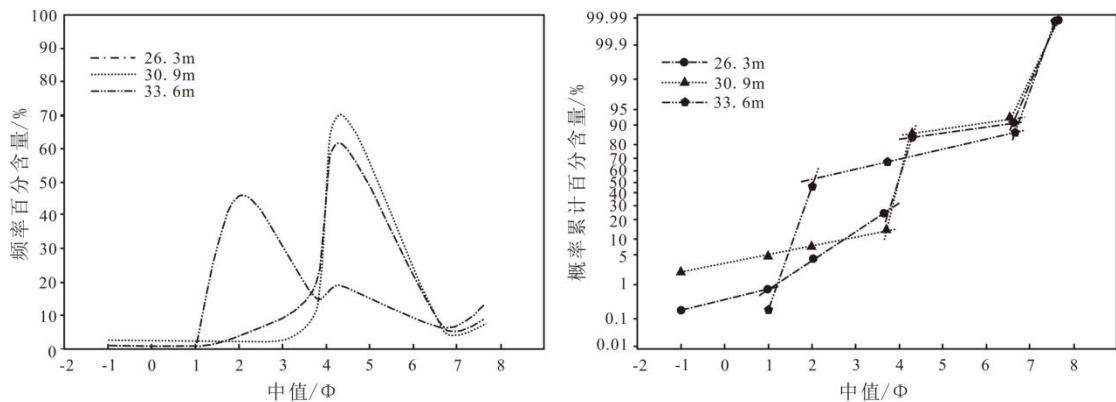


图 7 QEJ01 孔晚更新世 (DU3) 沉积物粒度特征

Fig.7 Grain size characteristics of late Pleistocene (DU3) sediments in hole QEJ01

25~20m 层段 (DU2): 对应于第Ⅷ沉积旋回。沉积物粒度向下变细, 呈倒粒序沉积。上部岩性灰色细砂和粉砂为主, 发育少量淡水扁旋螺及植物碎屑, 下部岩性以棕黄色黏土为主, 见大量的钙质结核且潜育化现象发育, 海相微体生物几乎缺失, 属湖相砂体和河漫滩相沉积。下部地层长期处于氧化环境作用下, 受干旱气候影响而形成硬黏土层, 可作为区域地层的对比标志, 为 MIS2 阶段沉积。

#### 4.2.3 NHG14 地层特征及沉积环境 (图 8)

(1) 全新世层段 (20~0m): 25.4~15.6m 层段 (DU2): 整体以灰色的细砂和粉砂为主, 隐约发育波状层理, 见少量钙质结核和螺类化石, 底部见明显的冲刷界面, 对应于Ⅵ沉积旋回, 属下切河谷沉积。在冰后期降水增加, 河流进积作用加强, 下切河谷过程不断转换为堆积和充填过程。

25.4~0m 层段 (DU1) : 对应于第 I 沉积旋回。下部为深灰色黏土质粉砂, 透镜状层理和水平层理较发育, 见少量贝壳碎片和毛蛤, 为滨海湖泊沉积, 底部黏土中获得 AMS<sup>14</sup>C 年龄为 9.288ka BP; 中部为灰色粉砂质黏土夹粉砂薄层, 平行层理、波状层理和透镜状层理较发育, 海相沉积构造特征明显, 见较多的贝壳碎片, 属潮坪及瀉湖沉积, 区域上对应于第一海侵层, 属 MIS1 阶段。上部为棕色粉砂质黏土, 发育少量铁锰质结核, 见炭质斑点和植物碎屑, 为泛滥平原沉积。

(2) 晚更新世层段 (73.6~25.4m) : 73.6~63.9m 层段 (DU6) : 对应于第 II 沉积旋回。下部为灰色粉砂, 含少量贝壳碎片, 见轻微锈染, 微体显示有大量的有孔虫, 未见明显的海相沉积构造, 属滨河口低地沉积; 上部为棕灰色粉砂质黏土, 见少量贝壳碎片, 含铁质结核和钙质结核, 微体显示含淡水螺类化石, 表明水体淡化, 为滨湖相沉积。

63.9~48.4m 层段 (DU5) : 下部为厚层的青灰色粉砂, 发育波状层理和交错层理, 零星见铁质结核和钙质结核, 为河床沉积; 上部为绿灰色黏土质粉砂和棕色粉砂质黏土, 见少量炭质斑点和钙质结核, 属河间地和漫滩湖泊沉积。该时期降水充沛, 河湖发育, 对应于第 III 沉积旋回。

48.4~37.2m 层段 (DU4) : 对应于第 IV 沉积旋回。下部为黄棕色粉砂, 交错层理和波状层理较发育, 且氧化作用加强, 属分支河道沉积; 上部为厚层的棕色粉砂质黏土夹黏土质粉砂, 见少量炭质斑点和铁锰质结核, 为泛滥平原沉积。由于干冷的气候, 沉积物多为杂色黏土, 区域上为 MIS4 阶段沉积。

37.2~25.4m 层段 (DU3) : 对应于第 V 沉积旋回。下部为灰色黏土质粉砂夹粉砂和粉砂质黏土, 含有少量贝壳碎片及粉砂透镜体, 见轻微潜育化现象, 零星见钙质结核, 为三角洲平原沉积, 区域上属于第二海侵层开始层位, 对应于 MIS3 阶段。上部为棕色粉砂质黏土, 铁质结核和钙质结核较为发育, 属洪泛平原沉积, 该层发育的棕色硬粘土层, 为末次盛冰期气候环境下的产物, 可作为区域上地层的对比标志, 对应于 MIS2 阶段。

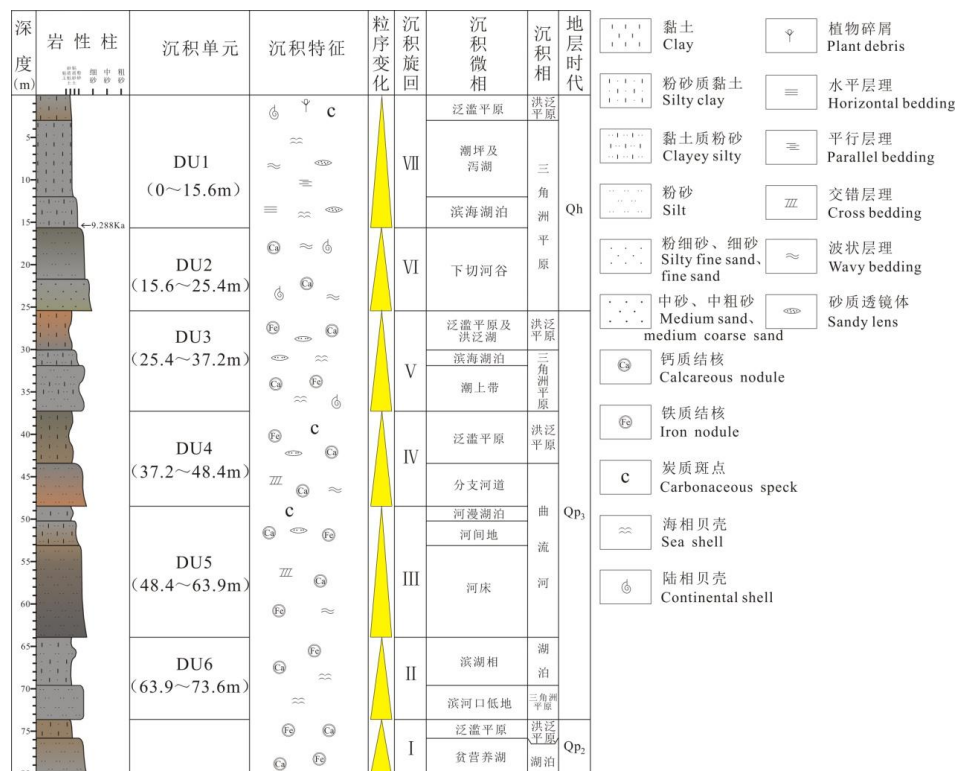


图 8 NHG14 地层特征及沉积环境

Fig8. NHG14 stratigraphic characteristics and sedimentary enviroment

### 4.3 微体古生物记录海侵事件

#### 4.3.1 QLT03 孔微体古生物特征

QLT03 孔共取样 103 块，按照微体生物组合以及岩性特征，海侵地层大致可以与海洋氧同位素分期对比。

在 1.8m 和 2.3 m 样品见黏土球，判断为天津北部中全新世晚期普遍发育的湿草甸土沉积。

4.1-11.4 m，见有孔虫 524 枚，海相介形类 168 瓣，但分异度极低（图 9），有孔虫仅四种，即透明希望虫 *Cribronion vitreum* Wang、缝裂希望虫、*Elphidium magellanicum* Heron-Allen et Earland、江苏小希望虫 *Elphidiella kiangsuensis* Ho, Hu et Wang 和光滑九字虫 *Nonion glabrum* Ho, Hu et Wang；所见资质壳有孔虫阿卡尼圆形五块虫 *Quinqueloculina akneriana rotunda* Gerker，由于个体小，只能视为随水流漂移进入本地。海相介形类共见八种，即中华洁面介 *Albileberis sinensis* Ho、广盐始海星介 *Propontocypris euryhalina* Zhao、眼点弯贝介 *Loconcha ocellata* Ho、腹结细花介 *Leptocythere ventriclivosa* Chen、陈氏新单角介 *Neomonoceratina chenae* Zhao、典型中华美花介 *Sinocytheridea impressa* (Brady)、中华刺面介 *Spinileberis sinensis* Chen、丰满陈氏介 *Tanella opima* Chen。有孔虫简单分异度为 1~6，海相介形虫简单分异度为 1~5。底部 11.4 m 样品仅见少量有孔虫，依岩性分层处理，可以解释为海侵初期海水到达该地的表现。伴随着冰后期气候逐渐转暖，海侵进积作用加强，陆地后退，海岸线不断扩大，形成较厚的海相地层，为区域上第一海侵层。

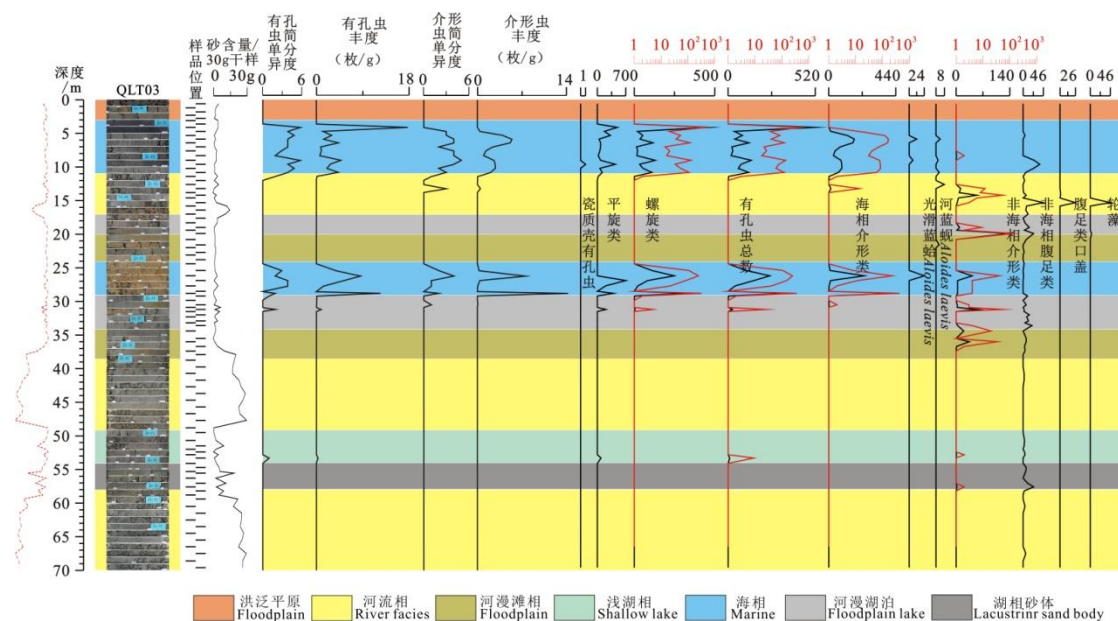


图 9 QLT03 孔微体古生物统计及海侵期次划分

Fig.9 Micro paleontology statistics and transgression period division of QLT03 hole

12.0m 和 12.6 m 各见白小旋螺 *Gyraulus albus* (O. F. Muller)和河蚬少量，为河口沉积。

14.2-15.3 m 连续三个样品少量出现湖沼相介形类，以纯净小玻璃介 *Candoniella albicans* (Brady)和运城小玻璃介 *C. yunchengensis* Wang (MS)为主，总体反映湖沼环境；除此尚见苏北丽星介 *Cypria subeiensis* Hou、史氏达尔文介 *Darwinula stevensoni* (Brady et Robertson)、布氏土星介 *Ilyocypris bradyi* Sars、柯氏土星介 *I. cornae* Mandelstam、小玻璃介未定种 *Candoniella* sp.等。顶部样品出现极少的海相介形类腹结细花介、丰满陈氏介和典型中华美花介都是典型的潮上带优势属种，按照“非海相盐湖有孔虫”的概念，不排除钻孔所在水体咸化，风水鸟都可以搬运海相介形类的卵，继而在适宜水体繁衍。在 15.2m 处见大量轮藻，显示周边植被繁茂，此段属于全新世早期湖沼沉积，对应降水增多的气候背景。

25.4-29.1m 共七个样品近连续出现有孔虫, 28.8m 是全孔见有孔虫数量最高的样品(364枚)、见海相介形类最多的样品(440瓣), 但依然是广盐种的组合, 且有4瓣柯氏土星介共生, 指示有淡水注入搬运。有孔虫简单分异度为1~4, 海相介形虫简单分异度为2~4。下伏29.1 m 仅见2枚有孔虫。这一现象显示: 海侵过程中, 由于河流进积作用加大, 可以导致海侵层的“中断”, 其间则形成淡水的积水洼地, 同时也表明当时海面没有多高。地层沉积特征中显示“海侵”发生在有机质沉积上覆砂层中, 表明海侵是海水沿河道上溯所致, 故为感潮河段, 区域上对应于第二海侵层, 依据有机质  $^{14}\text{C}$  测年, 其时代为 MIS3 阶段。

31.2 m 见 26 枚有孔虫与 57 瓣淡水介形类共生, 显示淡水环境可能受到轻微海水影响。33.2 m 样由于短暂成土, 出现根管。34.4m 和 36.0 m 两个样品分别见 20 和 34 瓣淡水介形类, 与上覆样品之间淡水腹足类连续出现, 这两个样品之间也有白小旋螺碎块, 显示一直处于水流搬运中。

53.3 m 样品见 9 枚有孔虫, 其上下略见淡水介形类。按沿海研究认识(王强等, 2009), 这一深度在 MIS5 阶段海侵层内。钻孔地层样品砂含量曲线显示, 35m 以下为两期曲流河夹浅水湖泊沉积, 有孔虫、淡水介形类恰出现在水流减缓的湖泊层段, 故而可称为 MIS5 阶段海侵影响的表现, 但也不能排除风水鸟的再搬运, 不宜直接称为海侵地层。

### 4.3.2 QEJ01 孔微体古生物特征

QEJ01 孔共取样 109 块, 在 0.85m 和 1.55m 样采自棕黄色粉砂质黏土, 下伏 1.90-2.00m 为黑灰色黏土, 相当可以进行测年的晚全新世最后形成的湖沼沉积, 故而上覆两个样品指示泛滥平原沉积。1.55m 样出现较多的布氏土星介 *Ilyocypris bradyi* Sars, 少量的柯氏土星介 *I. cornae* Mandelstam, 小玻璃介未定种 *Candoniella* sp., 美星介未定种, 为缓流水的环境, 两个样品且有淡水腹足类白小旋螺 *Guraulys albus* (O.F.Muller) 个体出现, 指示泛滥平原的沉积背景。1.90-2.00m 黑灰色黏土系地势低洼部位、降水增多背景下形成。2.95m 和 4.05m 样品采自黄绿色黏土, 其中 2.95m 样中见小玻璃介未定种、美星介未定种、柯氏土星介各一瓣, 指示为积水湖沼环境。

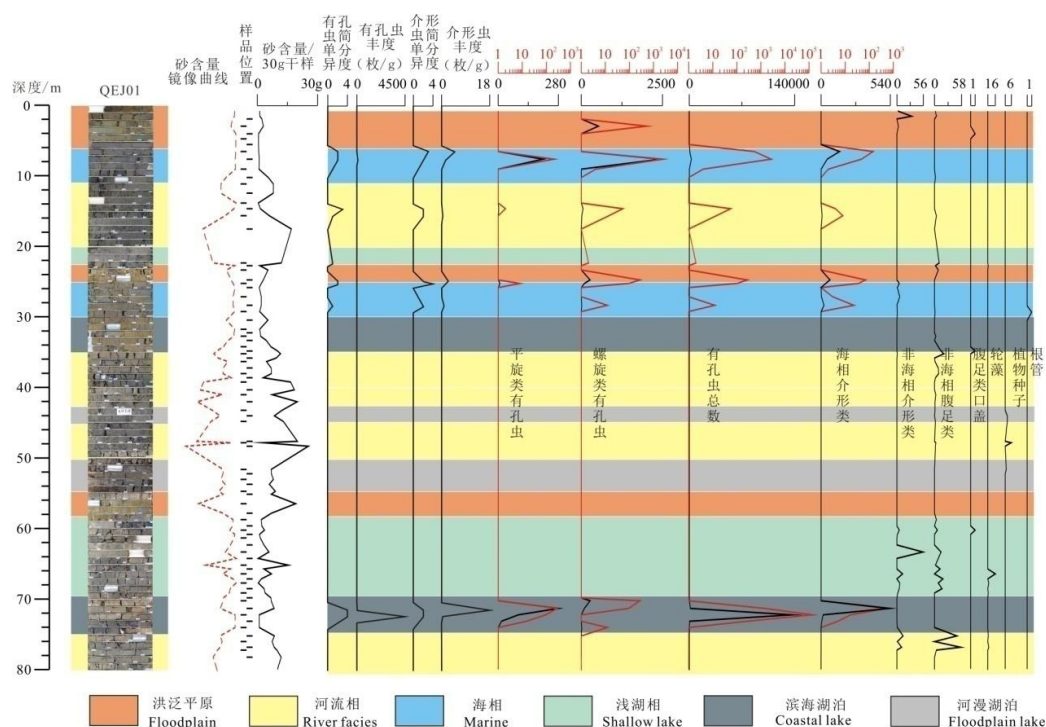


图 10 QEJ01 孔微体古生物统计及海侵期次划分

Fig.10 Micro paleontology statistics and transgression period division of QEJ01 hole

4.70-7.70m 共计 4 个样品采自黑灰色粉砂质黏土层, 见大量有孔虫和少量的海相介形类, 该现象往常见于河口地区, 虽然有孔虫仅见厚壁卷转虫变种 *Ammonia confertitsta* Zheng 和光滑九字虫 *Nonion glabrum* Ho, Hu et Wang 两个广盐种, 但就整体而言其又是高优势度组合; 海相介形类是同样的广盐低盐种眼点弯背介 *Loxoconcha ocellata* Ho、典型中华美花介 *Sinocytheridea impressa* (Brady)、中华刺面介 *Spinileberis sinensis* Chen 和斑纹三原介 *Sanyuania psaronius* Huang。有孔虫简单分异度为 1~2, 丰度为 18~89 枚/g, 介形虫分异度为 1~4, 丰度为 2~5 枚/g。典型中华美花介、斑纹三原介最远见于我国二级阶梯地貌单元的桑干-汾渭断陷带的渭河、运城盐湖盆地, 中华刺面介和眼点弯背介皆见于潮上带环境, 厚壁卷转虫多见于江苏太湖钻孔地层, 故而这一低分异度高优势度低盐-广盐微体生物组合, 可能指示非正常海环境中的富有机质沉积的河湾-潟湖环境。

9.05-12.45m 分析四个样品, 上部见数个广盐有孔虫毕克卷转虫变种 *Ammonia beccarii* vars. (Lineé) 和一瓣潮间带浅海介形类陈氏新单角介 *Neomonoceratina chenaе* Zhao et Whatley; 下伏样品中砂含量较高, 当为河流砂坝沉积。

14.65-15.65m 样品分别见几十枚毕克卷转虫变种个体以及少量典型中华美花介、中华刺面介海相介形类, 15.65m 尚见少量白小旋螺碎片, 当为随强水动力搬运该层位所致。

17.50-17.60m 的样品中未见任何生物, 可能与强大的水流有关, 由于该样品砂含量较高, 故判断为砂坝旋回开始层位。该层位上下为连续的厚层灰色砂体沉积, 加之该孔位于古永定河古河道处, 故考虑该孔可能有末次盛冰期下切河谷的存在。全新统在天津地区海侵区边部并非只是海侵一个环境, 而是多种环境的组合, 特别是河流供给可以发生变化的地点, 这样的环境变化更是多变。

17.55-23.35m 见一个有孔虫毕克卷转虫变种, 略见淡水腹足类白小旋螺碎片, 极少量有孔虫等海相微体生物出现不具有区域稳定地层意义, 亦不可排除风水鸟的搬运, 沉积环境为湖相砂体。

24.70-25.30m 两个样品分别见近三百和百余个有孔虫, 以及七十与三十多瓣海相介形类, 以毕克卷转虫变种, 以及湿地种多变小假九字虫多变假小九字虫 *Pseudononionella variabilis* Zheng 和光滑筛九字虫 *Cribrononion laevigatum* Ho, Hu et Wang 为主, 海相介形类见典型中华美花介、眼点弯背介两个种、广盐-低盐种海相介形类斑纹三原介和美山双角花介 *Bicornucythere bisanensis* (Okubo)。

25.80-28.40m 共计 3 个样品, 其中下部见毕克卷转虫变种 12 枚, 上部样品皆见极少淡水介形类布氏土星介、小玻璃介未定种以及运城小玻璃介 *Candoniella yunchengensis* Wang (MS); 中部所见塔尔薄丽星介 *Dolerocypris taalensis* Tressler, 系原定广盐始海星介 *Propontocypris euryhalina* Zhao, 认为是海侵的标志, 但随着近年来该种在淡水中多被发现, 表明其尚能适应于盐度的水体, 根据其岩性沉积特征, 其沉积环境为感潮河道。区域上该层位多以棕黄色、灰黄色粘土质粉砂和细砂沉积为主, 且多见有孔虫和海相介形类, 与该层地质特征较为吻合, 故而判断该层可能相当海洋氧同位素 3 阶段 (MIS3) 的区域第二海侵层。

28.25-58.75m 之间 33 个样品中, 未发现有孔虫和介形虫化石, 以白小旋螺、腹足类口盖和植物种子为主; 中部样品中见布氏土星介一瓣, 反映浅水、水动力不强的环境。53.75m 深灰绿色黏土暂确定为水热状况好转、晚更新世的开始层位, 与天津平原地区整体地层氧化还原状况基本相符, 但是由于离海较远, 未发生海侵。上覆地层的深灰色、黑灰色黏土即相当暖期沉积。

71.30-73.20m 的样品见数百枚甚至上万枚有孔虫, 以毕克卷转虫变种为绝对优势种, 海相介形类皆有多少不等的出现, 同时见浅海相的介形类日本花形介 *Cytheromopha japonica* (Brady) 一些个体。这样的高优势度低分异度组合依然指示了偏离正常海水环境, 由于没有相当潮间带的沉积构造, 目前只能归入滨海湖泊沉积环境。

### 4.3.3 NHG14 孔微体古生物特征

3m 以上地层具中度-弱潜育化-锈染现象，指示约近两千年来多水位波动的低平原。此层段内 1.5 m 和 2.5 m 两个样各见近 200 枚/瓣有孔虫和海相介形类，以及数量不等的淡水介形类，显示有短暂淡化或淡水注入过程。该层段有孔虫除毕克卷转虫变种居绝对优势外，低盐种清晰希望虫是第二优势种，低盐广盐种光滑九字虫、多变小假九字虫数量上居第三位。海相介形类除中华美花介居优外，主要就是低盐种中华洁面介 *Albileberis sinensis* Ho、眼点弯背介 *Loxoconcha ocellata* Ho、丰满陈氏介 *Tanella opima* Chen。

3-15m 层段有孔虫为阿卡尼圆形五块虫-凹坑筛九字虫-毕克卷转虫变种为稳定出现优势种的组合。13.5-14.5m 间样品见八九十枚牡蛎贝壳碎片，海相介形类以 4.5 m 和 5.5 m 所见数量最多（图 11），除前述优势种中华洁面介等外，代表稍开放水域的美山双角花介和陈氏新单角介增多，尚少见舟耳形介 *Aurila cymba* (Brady)、日本穆赛介 *Munseyela japonica* Hanai，大海花介 *Pontocythere spatiosus* Zhao、日本花形介 *Cytherorpha japonica* Hahai、玫瑰戳花介 *Stigmatocythere roesmani* Kingma、中华唇形介 *Xiphichilus sinensis* Yang et Hou 等。10-15m 有机质含量高接近瀉湖沉积特征，其中 11.5-12.0 m 生物扰动潜穴粉砂质充填明显，12-15 m 略显轻度生物扰动，14-15 m 夹杂少量褐黄色泥质沉积，显示陆源物质的介入。

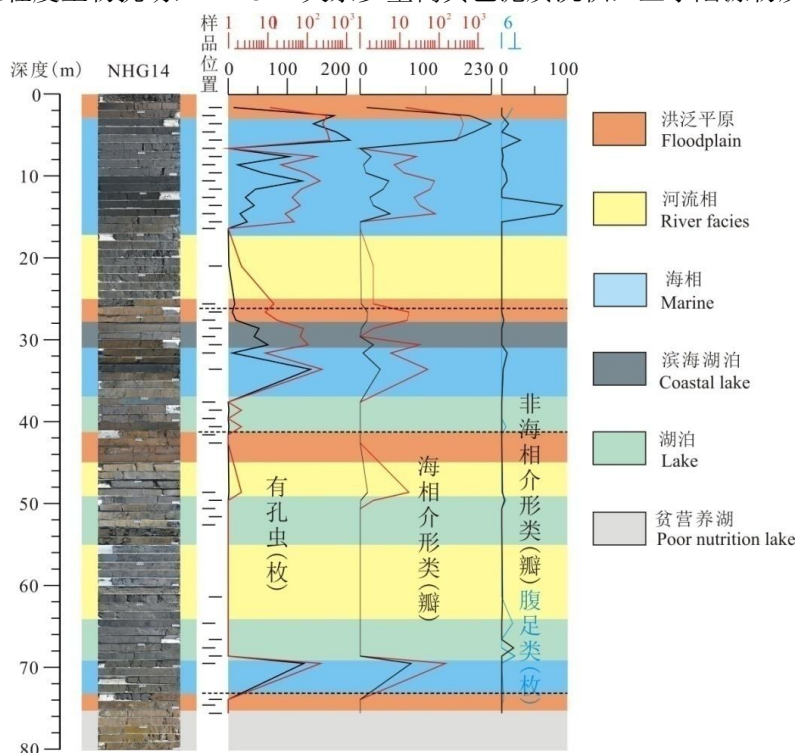


图 11 NHG14 孔微体古生物统计及海侵期次划分

Fig.11 Micro paleontology statistics and transgression period division of NHG14 hole

15.7-25.4 m 为厚层棕灰色块状粉砂。按照已经取得的经验（张晓飞等，2021），当属于末次盛冰期下切河谷充填沉积。

25.4-41.0 m 层段，基本以块状无层理泥质沉积物为主，颜色多变，显示不同程度的氧化还原状况变化，经区域岩石地层对比，发现连续几个样品所见生物显示属于 MIS3 海侵层。28.5 m 所见标本产自略具潜育化斑的棕灰色黏土层，属于贫营养湖沉积；其中所见氧化半氧化标本显示沉积时有含三价铁地下水溶入，或是沉积时一度暴露空气之下遭氧化，偏深水的二津满幅艳花介、布氏纯艳花介偶尔出现显示短暂强水流影响，以致牡蛎幼体与之共生。29.5m 处仅见一半发生程度不同氧化现象的有孔虫，归属于潮上带沉积。

30.5-33.5 m 样品突然出现大比重的抱环虫诸种,包括了最多的普通抱环虫 *Spiroloculina communis* Cushman et Todd、少见的印度抱环虫 *S. indica* Cushman et Todd, 以及极少见的渤海抱环虫 *S. bohaiensis* Zheng; 其他玻璃质壳有孔虫极少见几个毕克卷转虫变种和光滑九字虫,显示了可能发生了水流分选作用,系沙坝沉积,共生的海相介形类数量低于抱环虫诸种,几乎没见幼体,且以大个体壳饰较发达布氏纯艳花介、美山双角花介、陈氏新单角介居多,低盐的典型中华美花介、中华洁面介极少,亦可证实水流分选。33.5 m 所见如此丰富的大个体标本,且经过水流分选,故而虽确定为海侵层,尚需解释为突然的海浪搬运,属异地沉积。该样品中淡水生物仅见腹足类白小旋螺。

41-44m 轻度-中度-重度潴育化层段为低水位域沉积,则其下部以棕灰色为主的层段相当于区域 MIS5 地层,但由于多砂层,采样密度欠缺很多,48.5 m 样品零星见有孔虫和海相介形类,但属种显示水深差异较大,故认为经水流搬运;52.5 m 样品零星有淡水介形类出现。

68.5m 样见淡水白小旋螺、纯净小玻璃介、布氏土星介,以及一瓣中华美花介显示一度淡化。69.4 m 灰色粉砂质黏土样,则见百余枚有孔虫,以毕克卷转虫变种居绝对优势,凹坑筛九字虫、光滑九字虫等为次要种的组合,海相介形类以中华美花介和陈氏新单角介、布氏纯艳花介为主,判断为滨河口低地。

## 5 讨论

### 5.1 钻孔地层对比与区域环境演变

自晚更新世以来,由于频繁的海进海退现象,造成渤海湾沿岸现今的地层格架。冰期时,海面降低,海水退出渤海湾沿岸,形成陆地,接受陆相沉积,局地可形成咸水湖泊;间冰期,气候变暖,冰川融化,降水量增加,海侵进积作用加强,此时又接受海相沉积。由于渤海湾盆地处于长期下沉过程 (Hu S B et al., 2001), 地层得以完整的保存,为地层对比和沉积环境演化提供了可靠的信息。

晚更新世早期为三角洲平原和河湖发育期,对应于 MIS5 阶段,在气候转暖的大环境背景下,降水增加明显,河流充沛,湖泊扩张,该时期在新疆和青藏高原,一些内陆湖泊出现高湖面,如艾丁湖、青海湖和纳木错等 (田明中等, 2009), 而此时渤海湾沿岸地区海侵逐渐向西推进,在研究区西北的 QHL06 孔、QLT03 孔和 QEJ01 孔中未见相关沉积构造的海侵地层 (图 12), 表明海水入侵还未到达该地,而是多发育河湖相地层,应被视为第三海侵时水热良好的同期异相的陆相沉积,仅在 NHG14 孔中发育薄层海侵地层,微体古生物显示尚有百余枚有孔虫和海相介形类,结合沉积环境和微体古生物组合,确定为滨河口低地沉积。MIS5 阶段后期各个钻孔中均发育有河流相沉积,且地层稳定较为连续, QEJ01 中粒度特征显示该期整体沉积物粒度偏粗,以跳跃组分为主,含少量悬移组分,判断该地区后期存在河流穿插影响的古河道,也可能导致该期海侵层被下切河谷侵蚀和充填,造成海侵地层的不连续发育。

晚更新世中早期以漫滩湖泊和河漫滩发育为主,气候异常寒冷,水动力条件变弱,沉积物多以细粒为主。依据 QEJ01 中粒度分析情况,沉积物粒度整体偏细,沉积能量变低,沉积物多以棕黄色和黄绿色色调为主,反映其氧化作用加强,应属于 MIS4 阶段。微体古生物显示该时期以淡水介形类和腹足类为主,沉积环境为轻度-中度-重度潴育化层段的低水位域沉积。研究区北部的 QHL06 孔、QLT03 孔显示该时期以漫滩湖泊为主,而东南部的 QEJ01 孔、NHG14 孔以及 NHG16 孔河漫滩沉积为主,表明北部该时期为低洼不平的汇水区域,东南部为水流缓慢的走水区域。

晚更新世中晚期为三角洲平原和湖沼发育期,区域上为暖期的第二海侵层,对应于 MIS3 阶段,相当于末次冰期中的间冰阶,古气候研究发现该时期气温较高,降水较多,已达到了间冰期的气候环境 (Shi Y et al., 2001; 施雅风等, 2003)。微体古生物数据显示 QLT03 孔

在该时期有孔虫和海相介形类数量达到了全孔的最高值，QEJ01 孔中塔尔薄丽星介 *Dolerocypris taalensis* Tressler 被认为是海侵的标志，NHG14 孔见深水环境的海相介形类及大部分氧化的有孔虫，属潮上带沉积；据地层沉积特征，NHG14 孔和 NHG16 孔均为潮上带沉积环境，QLT03 孔和 QEJ01 孔为感潮河道和滨海湖沼沉积环境，而 QHL06 孔中未见海侵沉积，其丰富的淡水介形类及周边茂盛的植物表明其暖期的沉积特征，其沉积环境相当于 MIS3 海侵暖期的湖沼相沉积。可见，区域上的第二海侵层并未到达 QHL06 孔，海侵规模和范围较 MIS5 时期更为广泛，整体自南东至北西呈减薄趋势。

晚更新世晚期为曲流河-河漫滩发育期，对应于 MIS2 阶段，为盛冰期，是末次冰期最为寒冷的时期，在我国西部的青藏高原、新疆和河西走廊多发育不连续的岛状冻土，此时研究区海水再次退出渤海湾沿岸，以陆相沉积为主。QLT03 孔先后发育了河漫滩、漫滩湖泊和分支河道相沉积，QEJ01 孔沉积环境由河漫滩过渡为湖相砂体，NHG14 孔以泛滥平原为主，此时 NHG16 孔发育较薄河漫滩相沉积，该时期 QHL06 孔为漫滩湖相沉积，微体古生物略见淡水腹足类小白旋螺碎片。

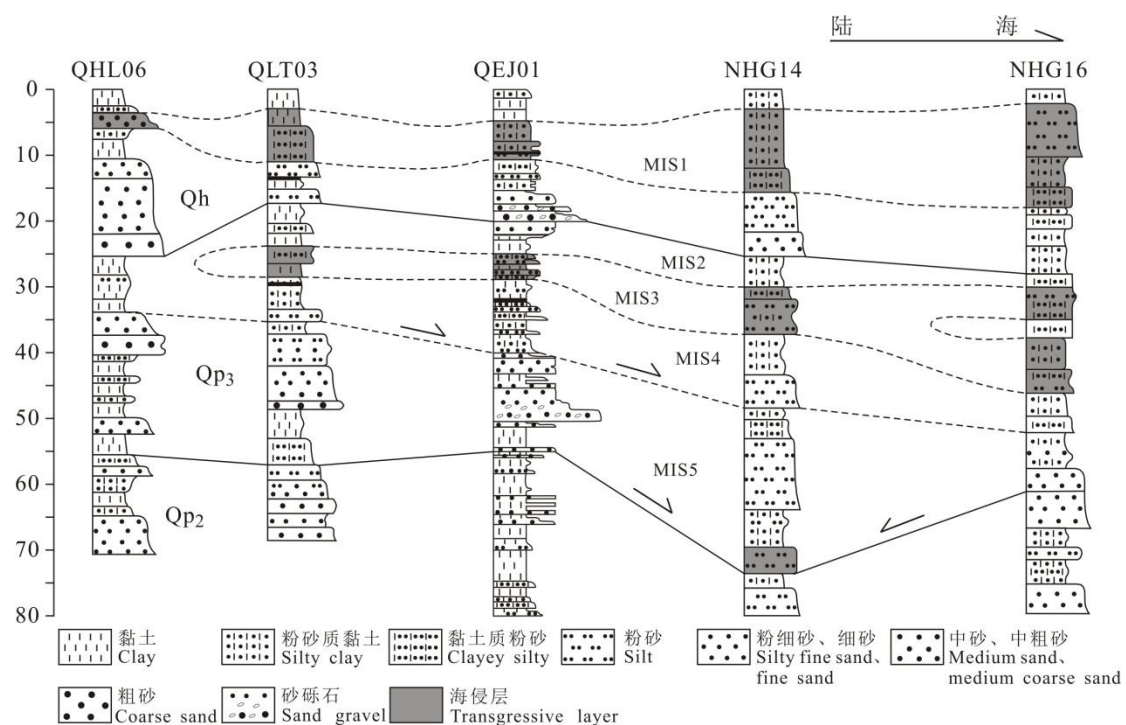


图 12 地层对比及沉积环境演变图

Fig.12 Stratigraphic correlation and evolution of sedimentary environment

全新世为三角洲平原-洪泛平原发育期，该时期也称为冰后期，属于 MIS1 阶段，气温经历了升温期至降温期的旋回，迅速升高，降水增加，冰川融化，海平面上升。此时我国东北平原开始发育湖沼相沉积，青藏高原山地形成了几道终碛堤，华北平原渤海湾沿岸海侵加剧，形成了区域上第一海侵层沉积，其它区域由于平原水流下泄较难，则河流、沼泽广布（张宗祜，2021）。受末次盛冰期最低海平面环境效应作用形成的下切河谷，再进入气候转暖的末次冰消期 MIS1 后，该地点率先接受沉积和充填，巨厚的砂层显示其快速堆积的过程，顶托了海侵的发生（张晓飞等，2021）。进入全新世大暖期，早期在 QHL06 孔、QEJ01 孔和 NHG14 孔中均发育厚层下切河谷，底部均发育明显的冲刷界面，上部为块状无层理的砂层，样品中见极少海相微体古生物，多为广温广盐的毕克卷转虫变种，砂层为 LGM 下切河谷充填沉积（王强，2019），粒度特征显示其处于高能环境。据以上钻孔分布位置显示从北西至南东有较好的线性分布特征，表明该时期地层沉积受古河道的影响，而位于线状分布下游的



NHG16 孔并未见明显的河谷下切侵蚀和充填沉积, 为湖沼相沉积, 可能为古河道影响的末端, 水动力减弱, 输沙作用变低, 亦或是受地形地貌及差异沉降影响, 古河道并未经过此处。同期, QLT03 孔为河口坝相沉积。之后, 海侵进积作用加强, 河流塑陆作用减弱, 微体古生物显示有孔虫和海相介形类较为丰富, 沉积微相为潮坪沉积和瀉湖沉积, 该时期为海侵规模最大时期, 海侵层自南东向北西延伸整体呈变薄尖灭, 生物分异度和丰度均逐渐变低, 尤其在西北部见孤立分布的海侵层沉积, 可能为海水沿古河道逆流而上并泛滥到低地残留下来, 形成“孤岛状”海侵层。全新世晚期, 研究区多为泛滥平原和积水湖沼沉积, 微体生物多以淡水腹足类白小旋螺 *Guraulys albus* (O.F.Muller) 个体出现, 指示泛滥平原的沉积背景。

## 5.2 海侵层与新构造运动的关系

华北平原是从新生代以来由盆岭构造发展起来的, 自中新世逐渐演变为整体下沉的大型盆地, 第四纪以来仍继承着这种发展趋势 (桂焜长等, 1989), 而此时全球海平面呈现波动性逐渐减弱的趋势 (Chappell J et al., 1986; Shackleton N J, 1987), 倘若在构造稳定区域, 海侵规模应呈现逐渐变小趋势, 然而, 大量研究发现, 晚更新世以来渤海湾沿岸发生了多次大规模海侵, 表明海侵过程与渤海湾沿岸地区长期下沉相关 (汪品先等, 1981)。研究区地貌自北西向南东呈小角度缓慢倾斜, 理论上各期海侵层应整体呈低角度向海倾斜, 厚度则应向海方向逐渐增大 (肖国桥等, 2008)。QHL06 孔和 QLT03 孔位于沧县隆起上, QEJ01 孔位于冀中拗陷, NHG14 孔和 NHG16 孔属于黄骅拗陷, MIS5 阶段早期仅在 NHG14 孔发育薄层海侵层, 可能受区域差异沉降作用影响, 拗陷区其它两孔均为陆相沉积, 同期在隆起区的 QHL06 孔和 QLT03 孔多以湖泊相沉积为主, 为气候转暖水热状况变好的同期异相沉积。后期, 各孔均发育河床相沉积, 该时期气候以暖湿为主, 降水增加使得物源丰富, 地层沉积多以快速堆积的砂体为主。整体而言 MIS5 阶段 NHG14 孔沉积加厚, 沉积速率最高, 拗陷区内 QEJ01 孔和 NHG14 孔地层沉积相对较薄, 沉积速率相对较低, 表明沉降中心此时位于黄骅拗陷区北部 NHG14 孔附近。QHL06 孔和 QLT03 孔沉积相对较厚, 但砂体多呈块状无层理沉积, 可能为河谷下切形成的快速堆积产物。

进入末次冰期间冰阶, 气候温暖湿润的程度较现今更高, 冰盖消融造成全球海平面上升, 渤海湾沿岸接受区域上第二次海侵沉积, 属于 MIS3 阶段。自北西至南东 QLT03 孔、QEJ01 孔、NHG14 孔和 NHG16 孔均发育海侵层, 沉积厚度呈现逐渐变厚趋势, 该时期 QHL06 孔为湖泊相沉积, 未见海相微体生物, 说明海侵范围并未到达 QHL06 孔。QLT03 孔、QEJ01 孔和 NHG14 孔顶底板高程明显高于 NHG16 孔, 且在 NHG16 孔第二海侵层中发现夹有薄层陆相沉积物, 说明了晚更新以来研究区发生了受次级构造作用控制的差异性沉降运动, NHG16 孔经历过短期的隆升。拗陷区内尽管 QEJ01 孔附近也发生了沉降, 但整体趋势显示沉降中心自宝坻八门城镇向汉沽茶淀镇方向移动, 沉降中心依然在 NHG14 孔附近。研究表明, 海侵旋回沉积是在持续的构造沉降背景下, 冰期和间冰期气候旋回造成海平面波动下发生的。

MIS1 阶段为全球气候大变暖时期, 世界洋面再度回升, 在世界各陆架海发生了规模不等的海侵, 渤海湾沿岸地区此次海侵规模较 MIS3 时期更大。受末次冰期河流侵蚀基准面下降影响, 河流侵蚀造陆作用加强, 线状分布中 QHL06 孔、QEJ01 孔和 NHG14 孔早期均发育厚层无层理下切河谷, 中期近海方向多发育潮坪和瀉湖沉积, 近陆方向则以感潮河道沉积为主, 海侵层沉积厚度大体自北西向南东逐渐减薄, 而 QLT03 孔沉积较厚的海侵层主要受地形地貌影响, 为汇水洼地区, 与现代地形地势较为一致, 表明在进入全新世以后构造活动减弱, 差异性沉降运动不明显 (李守军等, 2017)。

渤海湾沿岸地区自 MIS5、MIS3、MIS1 时期均发生过大规模海侵现象, 就海侵规模和范围而言由早至晚呈现逐渐加强趋势, 而处于全球高海面期的 MIS5 阶段的海侵规模却较低海面时期的 MIS3 和 MIS1 阶段均较小, 表明自晚更新世以来渤海湾沿岸地区区域性构造沉

降加剧(姚政权等, 2015; 张晓飞等, 2021), 导致海侵作用自海向陆方向加剧, 这与长江三角洲地区(张平等, 2013)、辽东湾地区(孙荣涛等, 2015)该阶段构造沉降加剧背景一致。

### 5.3 海侵层与全球海平面变化的响应

第四纪以来, 受冰期间冰期旋回影响, 全球气候频繁波动导致全球海平面发生变化, 往往在间冰期形成高海面, 在冰期形成低海面。由于气候变迁、构造运动和海盆体积变化等多种因素作用, 不同地区恢复的地质历史时期的海面变化并不一致(Lambeck K et al., 2005), 且各期次海侵层的顶底板高程和厚度存在不同的差异(王宏等, 2011; 李守军等, 2017)。前人在渤海湾西北岸划分了6道牡蛎礁(岳军等, 2012), 并利用牡蛎礁顶所在高度近似反映当时海平面位置(王宏等, 2011; 王海峰等, 2011), 本文通过对渤海湾沿岸研究区内钻孔深入分析及对比研究, 揭示了晚更新世以来共经历了三期海侵作用, 并于 MIS5、MIS3 和 MIS1 阶段高海面有良好的对应关系。MIS5 阶段全球海平面波动范围在-40~0m, 同一时期渤海湾沿岸地区海侵厚度为7~11m, 而研究区仅在 NHG14 孔中发育厚约4m的海侵层, NHG16 孔未见明显的海侵层沉积构造, 这种现象可能是晚更新世早期海侵的同时发生差异性沉降运动, 形成区域性强烈的“视海侵”(姚政权等, 2015), 同时表明其沉降中心主要在 NHG14 孔附近。氧同位素 3 期海侵地层中暖水种较多, 世界各地均见该次高海面的遗迹, 如日本的伊丹面海成阶地、泰国 Pattaya 海成阶地、湄公河平原 Moc Hoa 海侵层等。受构造运动的影响, 目前所处的高度并不相同。据 Cabioch 分析认为, 西南太平洋马拉库拉岛在 MIS3 高海面时期, 海平面位于现今海平面以下-30~-60m (Cabioch G et al., 2001), 日本 Boso 半岛 MIS3 阶段的海平面高度是-22~-34m (Kuwabara T et al., 1999), 而研究区经统一高程计算后该时期海平面高度主要集中在-30~-45m, 这与中国渤海地区揭示的 MIS3 海平面在-35~-60m 之间变化是一致的(Liu J et al., 2009; 仇建东等, 2012)。冰后期, 气候环境转型为大暖期, 全新世海侵沉积多为受潮汐影响的三角洲沉积为主(王强等, 2007), MIS1 以来研究区第一海侵层持续时间为9.3Ka BP 至今, 厚度约为15m, 揭示了自9.3Ka BP 以来海平面上升约15m, 与同一时期全球海平面变化相当(Bintanja R et al., 2005)。渤海湾沿岸所记载的海侵现象表明了各时期海面变化趋势与全球海面变化较一致, 波动范围也在全球海面波动范围内, 说明渤海湾沿岸地区晚第四纪地层发育和环境演化受到海平面变化的控制。

## 6 结论

(1) 通过对渤海湾西北岸钻孔的岩性特征和微体古生物研究结果, 结合测年和粒度分析, 揭示了研究区晚更新世早期为三角洲平原和河湖发育期, 中期以漫滩湖泊和三角洲平原发育为主, 晚更新世晚期为曲流河-河漫滩发育期, 全新世为三角洲平原-洪泛平原发育期。研究表明, 海侵时期在靠近海域的钻孔中沉积环境以潮上带、潮坪和泻湖为主, 在靠近陆域的钻孔中沉积环境以河流和湖相为主, 二者的过渡区域沉积环境以河口、感潮河道为主。

(2) 自晚第四纪以来, 渤海湾沿岸地区共经历了三次海侵运动, 海侵规模和范围由早至晚呈现逐渐加强的趋势。多次大规模海侵及海侵层顶底板高程和厚度差异表明海侵过程与渤海湾沿岸地区长期下沉相关, 并加剧海侵作用自海向陆方向的延伸, 整体趋势显示沉降中心自宝坻八门城镇向汉沽茶淀镇方向移动, 沉降中心依然在 NHG14 孔附近, 而进入全新世以后构造活动减弱, 差异性沉降运动不明显。

(3) 依据多个钻孔沉积地层的研究结果, 结合渤海湾沿岸地区晚第四纪以来的三个海侵层特征与全球海面变化对比, 发现海侵层自下而上分别与 MIS5、MIS3 和 MIS1 阶段的高海面有良好的对应关系, 说明研究区各时期海面变化趋势与全球海面变化是一致的, 表明渤海湾沿岸地区晚第四纪地层发育和环境演化受到海平面变化的控制。而研究区 MIS5 阶段局

部未发育海侵层,可能与当时地形地貌和河流侵蚀作用有关,并不完全代表海侵未到达此地。

致谢:项目组成员在野外工作中提供了大量帮助;审稿专家提供了十分有益和建设性的意见;编辑部老师为本文的顺利出版付出了辛劳;在此一并表示最诚挚的谢意!

## References

- Bintanja R, Van de Wal R, Oerlemans J. Modeled Atmospheric Temperature and Global Sea Levels over the Past Million Years [J]. *Nature*, 2005, 437: 125-128.
- Chappell J, Shackleton N J. Oxygen isotopes and sea level [J]. *Nature*, 1986, 324: 137-140.
- Gabioch G, Ayliffe L K. Raised coral terraces at Malakula, Vanuatu, southeast Pacific, indicate high sea level during marine isotope stage 3 [J]. *Quaternary Research*, 2001, 56: 357-365.
- Chen Yongsheng, Wang Hong, Pei Yandong, Tian Lizhu, Li Jianfen, Shang Zhiwen. 2012. Division and Its Geological Significance of the Late Quaternary Marine Sedimentary Beds in the West Coast of Bohai Bay [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(3): 747-759.
- Fang Jing, Hu Ke, Fan Changfu, Shang Zhiwen, Yang Yongqiang, Qi Wuyun, Wang Fu, Pei Yandong, Wang Hong. 2012. Diatom Records of the Vinhu Buried Oyster reef, In BinHaihu, Northwest Bohai Bay and Paleo-environmental Implications [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(5): 81-88.
- Gui Kunchang, Luo Xiaozhen. 1989. The surface uplift and crustal movement in North China Plain [J]. *Geological Science and Technology Information*, 8 (4): 47-54.
- Gao Maosheng, Guo Fei, Hou Guohua, Qiu Jiandong, Kong Xianghui, Liu Sen, Huang Xueyong, Zhuang Haihai. 2018. The evolution of sedimentary environment since late Pleistocene in Laizhou Bay, Bohai Sea [J]. *Geology in China*, 45(1): 59-68.
- Hu S B, O' Sullivan P B, Raza A, Kohn B. 2001. Thermal history and tectonic subsidence of the Bohai Basin, northern China: a Cenozoic rifted and local pull-apart basin [J]. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 126 (3): 221~235.
- Institute of marine geology, Institute of Oceanography, Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences. 1985. Bohai Geology [M]. Beijing: Science Press, 202-223.
- Kuwabara T, Kikuchi T, Suzuki T. 1999. Terraces and sea level estimate from oxygen isotope stage 3 in the lower Isumi River Basin, Boso Peninsula, Central Japan [J]. *Quaternary Research*, 38: 313-326.
- Lambeck K, Purcell A. Sea-level change in the Mediterranean Sea since the LGM: model predictions for tectonically stable areas [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24: 1969-1988.
- Liu J, Saito Y, Wang H, Zhou L, Yang Z. 2009. Stratigraphic Development During the Late Pleistocene and Holocene Offshore of the Yellow River Delta, Bohai Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36: 318-331.
- Li Shoujun, Cui Xiaohui, Xu Hua, Zhang Zhuo, Zhao Xiuli, Gao Zongjun, Liu Qiang, Liu Xiao. 2017. Distribution characteristics of benthic foraminifera of the Late Quaternary in Laizhou Bay, Bohai sea, China and its paleoenvironmental significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(2): 287-301.
- Li Jie, Li Rihui, Yang Shixiong, Chen Xiaohui, Chen Shanshan. 2018. Pollen spore assemblages and induced palaeoenvironmental changes in the western Bohai Sea since Late Pleistocene [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 38(2): 115~128.
- Lu Qingwei, Guo Wei, Shi Wenxue, Wang Xiyu, Zhan Jian, Jia Chao. 2021. Study on the three stages of transgression and paleochannel of western Bohai Bay since the Late Pleistocene [J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40 (4): 480-490.
- Qin Yafei, Xu Qinmian, Jiang Hongtao, Fang Cheng, Yuan Guibang, Yang Jilong. 2003. Physical and Mechanical Parameters of the Late Quaternary Sediments and Effect on Land Subsidence in the Northern Coast of Bohai Bay [J]. *Geological Survey and Research*, 37(2): 123-130.

- Qiu Jiandong, Liu Jian, Bai Weiming.2012.Progress of the studies of paleoclimate and sea level changes in the marine oxygen isotope Stage 3[J].Marine Geology Frontiers, 28(11): 12~16.
- Shackleton N J.1987. Oxygen isotopes, ice volume and sea level [J].Quaternary Science Reviews, 6: 183-190.
- Shi Yafeng, Yu Ge. 2003.Warm-humid climate and transgressions during 40~30KaB.P. and their potential mechanisms [J].Quaternary Sciences, 23 (1): 1~11.
- Shi Y, Yu G, Liu X, Li B, Yao T. 2001.Reconstruction of the 30-40 Ka enhanced Indian monsoon climate based on geological records from the Tibetan Plateau[J].Palaeogeograph, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 169 (1/2): 69~83.
- Sun Rongtao, Zhao Jingtao, Li Jun, Hu Bangqi.2015.Stratigraphic and Paleo-Environmental Evolution of Liaodong Bay Since Late Pleistocene: Evidence from Core LDD7 [J].Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 45(5): 1460-1469.
- Tian Mingzhong, Chen Jie.2019.Quaternary Geology and Geomorphology[M].Beijing: Geological Publishing House, 227~238.
- Wang Pinxian, Min Qiubao, Bian Yunhua, Cheng xinrong.1981.strata of quaternary transgressions in East China: A preliminary study[J].Acta Geologica Sinica, 55(1): 1~12.
- Wang Yiman.1982.A preliminary study on the Holocene transgression on the coastal plain along the North-Western Bohai Bay[J].GeoGraphical Research, 1(2): 59~69.
- Wang Qiang, Li Fenglin.1983.The changes of marine-continental conditions in the west coast of the Bohai Gulf during Quaternary[J].Marine Geology and Quaternary Geology, 3(4): 83~89.
- Wu Biaoyun, Li Congxian.1998.Quaternary Geology of the Yangtze River Delta[M].Beijing: Geological Publishing House, 12-151.
- Wang Qiang, Yuan Guibang, Zhang Shu, Liu Zegnshou, Wang Weidong, Liu Zhijie, Zhuang Zhenye.2007.Shelly ridge accumulation and sea-land interaction on the West Coast of the Bohai Bay[J].Quaternary Sciences, 27(5): 775-786.
- Wang Qiang, Zhang Yufa, Yuan Guibang, Zhang Wenqin. 2008.Since MIS3 stage the correlation between transgression and climatic changes in the north Huanghua area, Hebei[J].Quaternary Science, 28 (1): 79-95.
- Wang Qiang, Li Congxian. 2009.The type of Quaternary sequence in the east China coastal plain[J].Marine Geology & Quaternary Geology, 29 (4): 39~51.
- Wang Hong, Chen Yongsheng, Tian Lizhu, Li Jianfen, Pei Yandong, Wang Fu, Shang Zhiwen, Fan Changfu, Jiang Xingyu, Su Shengwei, Wang Haifeng.2011.Holocene cheniers and oyster reefs in Bohai Bay: palaeoclimate and sea level changes[J].Geological Bulletin of China, 30(9): 1405~1411.
- Wang Haifeng, Pei Yandong, Liu Huimin, Fan Changfu, Wang Hong.2011.Holocene oyster reefs: spatial and temporal distribution and sea level indicators in Bohai Bay[J]. Geological Bulletin of China, 30(9): 1396~1404.
- Wang Qiang.2019.Incised valley of Last Glacial Maximum Stage in the drilling strata on the Tianjin-Hebei coastal plain[J].Journal of Geomechanics, 25 (5): 876~888.
- Xiao Guoqiao, Guo Zhengtang, Chen Yukun, Yao Zhengquan, Shao Yongxin, Wang Xulong, Hao Qingzhen, Lu Yanchou.2008.Magneto stratigraphy of BZ<sub>1</sub> borehole in West Coast of Bohai Bay, Northern China[J].Quaternary Sciences, 28(5): 909~916.
- Xu Qinmian, Yuan Guibang, Zhang Jinqi, Qin Yafei.2011.Stratigraphic division of the Late Quaternary Strata along the coast of Bohai Bay and Its Geology significance[J].Acta Geologica Sinica, 85(8): 1352~1367.
- Xu Qinmian, Yuan Guibang, Xin Houtian, Pan Tong.Functions of 1: 50000 Regional Geological Survey in Ecological Civilization Construction: A Case Study on Northern Coast of Bohai bay [J].Geological Survey and Research, 2014, 37(2): 85-89.

- Yang Huairan, Chen Xiqing.1985.Quaternary transgressions, eustatic changes and shifting of shoreline in East China[J].Marine Geology & Quaternary Geology, 5 (4): 59-80.
- Yan Yuzhong, Wang Hong, Li Fenglin, Tian Lizhu.2006.Different depositional processes of boreholes BQ1 and BQ2 in the Late Pleistocene on the West Coast of Bohai Bay[J]. Quaternary Sciences, 26(3): 321-326.
- Yan Yuzhong, Wang Hong, Li Fenglin, Li Jianfen, Zhao Changrong, Lin Fang. 2006.Sedimentary environment and sea-level fluctuations revealed by Borehole BQ1 on the west coast of the Bohai Bay, China[J].Geological Bulletin of China, 25(3): 357-382.
- Yue Jun, Dong yue, Zhang Baohua, Mu Lin, Wang Guoming, Chen Anshu, Yuan Baoyin, Liu Jinglan, Wei Junhao.2011.Several Geochemical Indicators of the West Coast of Bohai Sea[J].Acta Geologica Sinica, 85(7): 1239-1250.
- Yue Jun, Dong yue, Zhang Baohua, Han Fang, Zhao Xitao, Liu Dongyan, Duan Huanchun, Zhang Baiming, Zhao Changrong.2012.Several Oyster Barrier Reefs in the Northwest Coast of Bohai Sea[J].Acta Geologica Sinica, 86(8): 1175-1187.
- Yao Zhengquan, Shi Xuefa.2015.A review of quaternary transgression researches along the Bohai Bay[J].Marine Geology Frontiers, 31(2): 9~16.
- Zhuang Zhenye, Xu Weidong, Liu Dongsheng, Zhuang Lihua, Liu Baozhu, Cao Youyi, Wang Qiang.1999.Division and environmental evolution of Late Quaternary marine beds of S3 hole in the Bohai Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 19(2): 27~35.
- Zhao Changrong, J. Hus, Yan Yuzhong, Wang Hong, Zhang Jinqi. 2003.Late Pleistocene-Holocene chronostratigraphic sequence and the geomagnetic polar excursion on the west coast of Bohai Bay[J].Geological Survey and Research, 26(3): 183-192.
- Zhang Zonghu.2001.Geological environment since the Late Pleistocene and the Future environment evolution trend for existence in Northern China[J].Quaternary Sciences, 21(3): 208~217.
- Zhang Ping, Li Xiangqian, Pan Mingbao, Zong Kaihong, Miao Qiaoyin, Li Yongxiang, Qu Jian, Feng Wenli, Ji Wenting, Liu Weiming.2013.Magnetostratigraphy of Borehole SZ04 in the Yangtze River Delta and Its Implications[J].Acta Sedimentologica Sinica, 31(6): 1041~1049.
- Zhang Xiaofei, Wang Yongli, Huang Meng, Fan Hangyu, Li Mingchen, Li Jijun.2019.Sporopollen Record of Paleoenvironmental Change Since Late Middle Pleistocene in Xiwuqi, Inner Mongolia[J].Geological Science and Technology Information, 38 (5): 174~185.
- Zhang xiaofei, Li Jijun, Zhang Xuebin, Huang Men, Fan Hangyu, Li Mingchen, Zhang Yongyi, Wu Rongze, Han Rongwen.2021. Evolution of the climatic environment and sedimentary environment since the middle-Pleistocene on the northwestern coast of the Bohai Bay[J]. Acta Geologica Sinica, 95 (6): 1868~1888.

#### 附中文参考文献

- 陈永胜, 王宏, 裴艳东, 田立柱, 李建芬, 商志文.2012.渤海湾西岸晚第四纪海相地层划分及地质意义[J].吉林大学学报(地球科学版), 42(3): 747-759.
- 方晶, 胡克, 范昌福, 商志文, 杨永强, 齐乌云, 王福, 裴艳东, 王宏.2012.渤海湾西北岸滨海湖埋藏牡蛎礁硅藻及其记录的古环境[J].海洋地质与第四纪地质, 32(5): 81-88.
- 桂焜长, 罗夏贞.1989.华北平原地区地面隆起与地壳运动 [J].地质科技情报, 8 (4): 47-54.
- 高茂生, 郭飞, 侯国华, 仇建东, 孔祥淮, 刘森, 黄学勇, 庄海海. 2018.渤海南部莱州湾晚更新世以来沉积演化特征[J].中国地质, 45(1): 59-68.
- 李守军, 崔肖辉, 徐华, 张卓, 赵秀丽, 高宗军, 刘强, 刘晓.2017.渤海莱州湾晚第四纪底栖有孔虫分布特征及古环境意义[J].地质学报, 91(2): 287-301.
- 李杰, 李日辉, 杨士雄, 陈晓辉, 陈珊珊.2018.渤海西部海域晚更新世以来的孢粉组合及古环境变化.海洋

- 地质与第四纪地质, 38(2): 115~128.
- 鲁庆伟, 郭维, 石文学, 王西玉, 詹健, 贾超. 2021.渤海湾西晚更新世以来 3 期海侵与古河道研究[J] 地质通报, 40 (4): 480-490.
- 秦雅飞, 胥勤勉, 姜洪涛, 方成, 袁桂邦, 杨吉龙. 2003.渤海湾北岸晚第四纪沉积物物理力学性质及其对地面沉降的影响 [J]地质调查与研究, 37(2): 123-130.
- 仇建东, 刘健, 白伟明. 2012.深海氧同位素第 3 阶段古气候-海平面变化研究进展 [J].海洋地质前沿, 28(11): 12~16.
- 施雅风, 于革. 2003.40-30ka BP 中国暖湿气候和海侵的特征与成因探讨[J]第四纪研究, 23 (1): 1~11.
- 孙荣涛, 赵京涛, 李军, 胡邦琦. 2015.辽东湾 LD07 孔晚更新世以来的沉积层序与古环境演化[J]吉林大学学报, 45(5): 1460-1469.
- 田明中, 程捷. 2009.第四纪地质学与地貌学[M]北京: 地质出版社, 227~238.
- 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 成鑫荣. 1981.我国东部第四纪海侵地层的初步研究[J]地质学报, 55(1): 1-12.
- 王一曼. 1982.渤海湾北岸全新世海侵问题的初步探讨 [J]地理研究, 1(2): 59-69.
- 吴标云, 李从先. 1998.长江三角洲地区第四纪地质[M] 北京: 地质出版社, 12-151.
- 王强, 李凤林. 1983.渤海湾西岸第四纪海陆变迁[J]海洋地质与第四纪地质, 3(4): 83-89.
- 王强, 袁桂邦, 张熟, 刘增寿, 王卫东, 刘志杰, 庄振业. 2007.渤海湾西岸贝壳堤堆积与海陆相互作用[J]. 第四纪研究, 27(5): 775-786.
- 王强, 张玉发, 袁桂邦, 张文卿. 2008.MIS3 阶段以来河北黄骅北部地区海侵期与气候期的对比[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.
- 王宏, 陈永胜, 田立柱, 李建芬, 裴艳东, 王福, 商志文, 范昌福, 姜兴钰, 苏盛伟, 王海峰. 2011.渤海湾全新世贝壳堤与牡蛎礁: 古气候与海面变化[J]地质通报, 30(9): 1405-1411.
- 王海峰, 裴艳东, 刘会敏, 范昌福, 王宏. 2011.渤海湾全新世牡蛎礁: 时空分布和海面变化标志点[J]地质通报, 30(9): 1396-1404.
- 王强. 2019.天津-河北沿海钻孔地层中的末次盛冰期下切河谷 [J]地质力学学报, 25 (5): 876-888.
- 肖国桥, 郭正堂, 陈宇坤, 姚政权, 邵永新, 王旭龙, 郝青振, 卢演铸. 2008.渤海湾西岸 BZ1 钻孔的磁性地层学研究[J]第四纪研究, 28(5): 909-916.
- 胥勤勉, 袁桂邦, 张金起, 秦雅飞. 2011.渤海湾沿岸晚第四纪地层划分及地质意义[J]地质学报, 85(8): 1352-1367.
- 胥勤勉, 袁桂邦, 辛后田, 潘桐. 2014.平原区 1: 5 万区域地质调查在生态文明建设中的作用-以渤海湾北岸为例[J]地质调查与研究, 37(2): 85-89.
- 杨怀仁, 陈西庆. 1985.中国东部第四纪海面升降、海侵海退与岸线变迁[J]海洋地质与第四纪地质, 5 (4): 59-80.
- 闫玉忠, 王宏, 李凤林, 田立柱. 2006.渤海湾西岸晚更新世沉积差异性特征 [J]第四纪研究, 26(3): 321-326.
- 闫玉忠, 王宏, 李凤林, 李建芬, 赵长荣, 林防. 2006.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, 25(3): 357-382.
- 岳军, Dong yue, 张宝华, 牟林, 王国明, 陈安蜀, 袁宝印, 刘景兰, 魏俊浩. 2011.渤海湾西岸几种地球化学的环境指标 [J]地质学报, 85(7): 1239-1250.
- 岳军, Dong yue, 张宝华, 韩芳, 赵希涛, 刘冬雁, 段焕春, 张百鸣, 赵长荣. 2012.渤海湾西北岸的几道牡蛎礁 [J]地质学报, 86(8): 1175-1187.
- 姚政权, 石学法. 2015.渤海湾沿岸第四纪海侵研究进展[J]海洋地质前沿, 31(2): 9-16.
- 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 1985.渤海地质[M] 北京: 科学出版社, 202-223.
- 庄振业, 许卫东, 刘东生, 庄丽华, 刘宝柱, 曹有益, 王强. 1999.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, 19(2): 27-35.
- 赵长荣, J. Hus, 闫玉忠, 王宏, 张金起. 2003.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, 26(3): 183-192.

张宗祜.2001.中国北方晚更新世以来地质环境及未来生存环境变化趋势[J]第四纪研究, 21(3): 208~217.

张平, 李向前, 潘明宝, 宗开红, 苗巧银, 李永祥, 欧健, 冯文立, 季文婷, 刘维明.2013.长江三角洲 SZ04 孔磁性地层研究及其意义[J]沉积学报, 31(6): 1041~1049.

张晓飞, 王永利, 黄猛, 樊航宇, 李明辰, 李继军.2019.内蒙古西乌旗中更新世晚期以来古环境变迁的孢粉记录[J]地质科技情报, 38 (5): 174~185.

张晓飞, 李继军, 张学斌, 黄猛, 樊航宇, 李明辰, 张永义, 吴荣泽, 韩荣文. 2021.渤海湾西北岸中更新世中期以来的气候环境和沉积环境演变[J]地质学报, 95 (6): 1868~1888.