

渤海湾西北岸 MIS3 阶段以来的海侵特征

黄猛^{1,2}, 韩荣文^{1,2}, 牛毅^{1,2}, 胥勤勉^{3*}

HUANG Meng^{1,2}, HAN Rongwen^{1,2}, NIU Yi^{1,2}, XU Qinmian^{3*}

1. 京津冀平原沧州地下水与地面沉降国家野外科学观测研究站, 河北 沧州 061000;

2. 天津市地质调查研究院, 天津 300191;

3. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

1. Beijing-Tianjin-Hebei Plain Cangzhou Groundwater and Land Subsidence National Observation and Research Station, Cangzhou 061000, Hebei, China;

2. Tianjin Institute of Geological Survey, Tianjin 300191, China;

3. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

摘要:晚更新世以来渤海湾沿岸普遍出现三期海侵,不同学者通过钻孔以及古海岸遗迹分析探讨了渤海湾西岸、南岸晚更新世以来的海侵沉积演化及海平面变化,而渤海湾西北岸地区晚更新世海侵沉积特征、古生物特征及海侵层对比缺乏系统的研究。本文通过对渤海湾西北岸多个钻孔岩心进行年代学、沉积学和微体古生物研究,建立了研究区不同构造单元的40 m以浅的标准地层层序、年代格架,划分了微体古生物组合带。研究区 MIS3 阶段以来共发育两期海侵, MIS3 阶段海侵年代为35210~37658 cal. a BP, MIS1 阶段海侵年代为7050~11310 cal. a BP。受古气候变化、古地貌和新构造运动影响,两期海侵层的空间分布和岩相古地理特征差异明显, MIS1 阶段海侵规模大于 MIS3 阶段, MIS1 阶段海侵为潟湖沉积体系, MIS3 阶段海侵为潮坪-河口砂坝沉积体系。

关键词:渤海湾西北岸;海侵;最大海侵边界;沉积特征

中图分类号: P534.63⁺1; P512.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)05-0721-13

Huang M, Han R W, Niu Y, Xu Q M. Marine transgression since the MIS3 stage on the northwest coast of Bohai Bay, China. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(5): 721-733

Abstract: Since Late Pleistocene, there have been three marine transgression in the coastal area of Bohai Bay. Different scholars have explored the marine transgression sedimentary evolution and sea level change in the western and southern coasts of Bohai Bay by analyzing borehole sediment and ancient coastal relics. There is a lack of systematic research on the borehole sediment characteristics of Late Pleistocene Marine transgression in the northwestern coast of Bohai Bay. Based on the study of chronology, sedimentology and microbody paleontology of several boreholes in the northwestern coast of Bohai Bay, this paper established the standard stratigraphic sequence, chronological framework and micropalaeontological assemblage zone of 40 meters to light of different tectonic units in the research area. There are two stages of transgression in the study area since MIS3 stage. The transgression age of MIS3 stage was 35210~37658 cal. a BP and that of MIS1 stage was 7050~11310 cal. a BP. Due to the influence of palaeoclimate change, palaeogeomorphology and neotectonic movement, the spatial distribution and lithofacies paleogeographic characteristics of transgressive strata in the two periods are obviously different. The scale of transgression in MIS1 stage is larger than that in MIS3 stage. It was lagoon sedimentary system in MIS1 stage and it was tidal flat-estuarine sand bar sedimentary system in MIS3 stage.

Key words: northwestern coast of Bohai Bay; marine transgression; maximum boundary of the transgression; sedimentary characteristics

收稿日期:2020-03-26;修订日期:2020-10-16

资助项目:中国地质调查局项目《河北怀安—内蒙凉城地区区域地质调查》(编号:DD20190035)和《燕山—太行成矿带丰宁和天镇地区地质矿产调查》(编号:DD20160042)

作者简介:黄猛(1985-),男,硕士,工程师,从事第四纪地质与区域地质研究。E-mail:390183708@qq.com

* 通信作者:胥勤勉(1979-),男,硕士,高级工程师,从事华北第四纪地层研究。E-mail:xuqinmian@163.com

渤海湾及周边地处华北平原北部,新生代以来受 NE 向、NW 向断裂带交会的影响,成为主要的构造沉降带^[1-2]。第四纪以来,受气候波动影响,渤海海域周边地区经历了多次海陆变迁。晚更新世以来受持续构造沉降的影响,该区域成为海侵的主要区域,广泛出现 3 期海侵事件,根据海侵事件发生时间从早至晚编号分别为第Ⅲ、Ⅱ、Ⅰ期海侵^[3-4]。近年来,不同学者对渤海湾沿岸 3 期海侵特征进行了研究,总结了不同海侵期的沉积学、年代学及生物学特征。

第Ⅰ期海侵层为近 10 ka BP 以来的全新世海侵,沉积记录较齐全,年代学依据较充分,研究较全面。海平面变化与河流进积的共同作用形成了不同的海岸堆积类型,记录了更丰富的海平面变化信息。全新世渤海湾北岸、西南岸受多泥砂河流进积作用影响,形成了滦河三角洲和黄河三角洲。渤海湾西岸大致以海河一线为界,北部为少泥砂河流,形成以牡蛎礁为特征的泥质海岸带及滨海平原^[5-6],南部受古黄河三角洲影响,形成多道贝壳堤沉积^[7-8]。近年来,不同学者通过钻孔及古海岸遗迹分析探讨渤海湾沿岸第Ⅰ海侵层沉积演化及海平面变化^[9-11],主要研究了渤海湾西岸、南岸全新世海侵最大范围^[9,12]、不同时期海岸线的位置^[7,13]、沉积环境演化^[14]等。第Ⅱ、Ⅲ期海侵层深埋于地下,作为特殊的层位,在区域上是稳定的、可对比的,其中第Ⅱ期海侵层自海边向内陆延伸,该层除下切河谷和局部构造沉降外,基本出现在 25.0~32.0 m 深度内^[7]。第Ⅲ期海侵层深度在 40.0~70.0 m 之间,由西向东呈现逐渐变深的趋势^[3]。

渤海湾西北岸海侵的研究焦点多集中在埋藏的牡蛎礁体,不同学者先后对牡蛎礁记录的地区性环境演化^[15]、牡蛎礁对区域性构造运动的响应进行研究^[16],并解释了牡蛎礁建造的间断记录^[17]。目前,渤海湾西北岸晚更新世的海侵特征认识尚不充分,全新世海侵沉积特征仅有个别钻孔进行过研究^[18-19],晚更新世海侵沉积特征、最大海侵范围及影响因素尚未进行深入研究。

渤海湾西北岸地处滨海平原与滦河三角洲的过渡地带,是研究滦河水系河湖、河海相互作用过程及海侵层特征的关键部位。利用“天津 1:5 万新安镇等六幅区域地质调查”^[20]及“天津 1:5 万黑狼口等四幅区域地质调查”2 个项目实施的多个钻

孔,本文在详细分析年代学、沉积学和微体古生物的基础上,对渤海湾西北岸 MIS3 阶段以来的海侵特征进行了研究,旨在获得渤海湾西北岸 MIS3 阶段以来的 2 期海侵的沉积特征及影响因素。

1 地质概况

渤海湾位于渤海盆地的西部,是渤海三大海湾(渤海湾、莱州湾、辽东湾)之一,北起河北乐亭县大清河口,南至山东省黄河口。渤海湾西岸四级构造单元横跨冀中坳陷、沧县隆起、黄骅坳陷等不同构造单元^[21](图 1),各构造单元受 NE 向、NW 向及近 EW 向断裂构造的影响,形成多个次级构造单元。新生代以来,在强烈的构造沉降背景下,松散沉积物不断加积,沉积了巨厚的新生代沉积物^[22-24]。第四纪以来,沉降进一步加速,形成一套以湖相为主,间夹河流相及海相的沉积体系。全新世中晚期以来,在气候波动变化影响下,研究区先后发生海进及阶段性海退,形成一套海侵沉积^[3-6]。

2 材料与方法

2.1 研究材料

本次选择 4 个钻孔岩心作为主要研究对象(图 1;表 1),进行¹⁴C 测年和微体古生物鉴定。同时对 6 条人工陡坎剖面 and 多个第四系控制钻孔进行综合研究。钻孔于 2014 年 6—8 月实施,孔深 70.0~500.0 m(表 1),均采用旋转机械钻进,岩心直径 108.0 mm,岩心采取率均大于 90%。渤海湾西岸已有研究成果表明,MIS3 阶段沉积地层底界深度多在 30.0~35.0 m,因此本次工作仅利用这些钻孔 0~40.0 m 的岩心。人工陡坎剖面选择在砖瓦厂采土坑,深度为 5.0~6.5 m,主要分析研究区第一海侵层特征。

表 1 渤海湾西北岸海侵研究主要钻孔信息

Table 1 Information of major boreholes for marine transgression research in northwest coast of Bohai Bay

序号	钻孔编号	位置	经度(E)	纬度(N)	高程/m	深度/m
1	QHL06	周良庄西	117°20'25"	39°35'04"	0.55	100
2	QLT03	八门城南	117°34'57"	39°33'59"	0.10	70
3	QEJ01	尔王庄	117°24'04"	39°25'47"	2.16	400
4	QHJ01	东棘坨	117°37'24"	39°25'27"	2.20	500

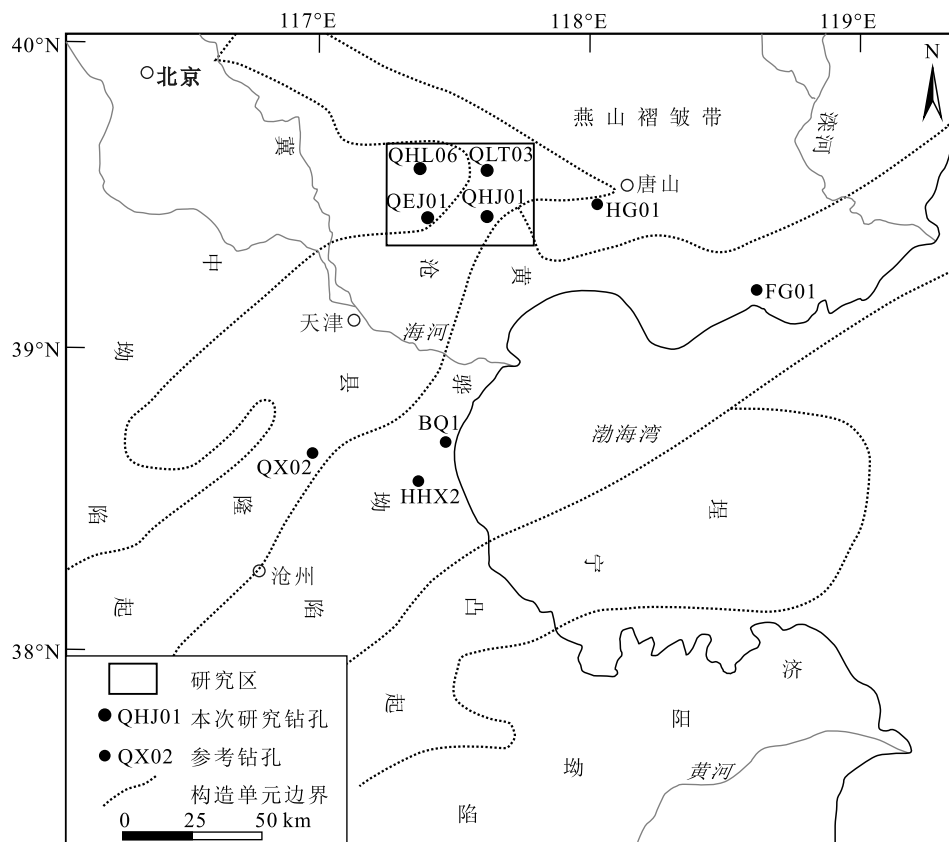


图 1 渤海湾西北岸地质构造图及钻孔位置

Fig. 1 Structural map and borehole location of northwest coast of Bohai Bay

2.2 研究方法

2.2.1 年代学

本次采用 ^{14}C 建立地层年代框架,选取泥炭层等有机质含量较多的样品,利用纯净水浸泡分散,部分样品用超声波清洗机振荡分散,过 180 目筛去掉泥质部分,在 50 倍实体显微镜下挑选其中的炭化植物残体并进行加速器质谱 (accelerator mass spectrometry, 简称 AMS) 测年。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,除个别年龄值较大的结果未校正外,其余结果均进行了日历年校正,所用曲线为 IntCal13 atmospheric curve,所用程序为 OxCal v4.2.4。

2.2.2 微体古生物分析

通过微体生物可以分析判断古环境,特别是海侵作用的影响及其在地层划分中的意义。研究区位于晚更新世以来 3 期海侵的边缘区,高优势度 (个体数量)、低分异度 (种数) 的组合在地层中常见,开展系统分析显得更必要。本次研究采集了大

量的微体生物样品,并做了相关测试分析工作。微体古生物样品采自暗色层或有机质含量略高的粘性土及粉砂质粘土中,采样间距 50~150 cm,主要进行有孔虫和介形类鉴定。样品分析处理和鉴定由天津地质矿产研究所完成,均按照《海洋调查规范——海洋地质地球物理调查 (GB/T 12763.8—2007)》的要求进行。样品均取 30 g 干重,置于清水内以双氧水分解,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,进行鉴定与定量统计;原则上当样品中一个门类数量超过 300 个时,先进行样品缩分,鉴定后再进行乘回计算,统计样品中全部标本总量。有孔虫鉴定标准主要参考郑守仪等^[25]、汪品先等^[26],介形类鉴定标准主要参考侯佑堂等^[27]。

2.2.3 沉积相分析

利用沉积物的岩性、颜色、结构、构造、接触关系、包含物、次生变化等特征,并结合沉积物中粗粉砂含量的相对变化反映沉积物粒度相对粗细的指

标,宏观判断沉积相和沉积环境。研究区第 I、II 海侵层基底泥炭层、末次盛冰期硬粘土均与气候变化和海平面变化密切相关,可作为区域对比的标志层^[14]。

3 结 果

3.1 ¹⁴C 测试

本次共获得 8 个¹⁴C 年龄,其中 7 个年龄值有效,1 个结果仅供参考(表 2)。

3.2 微体古生物鉴定

本次在渤海湾西北岸宝坻—宁河地区 5 个钻孔及 6 个陡坎 40.0 m 以浅的地层中,发现了丰富的有孔虫、介形类微体化石,其中,有孔虫共见 17 属 32 种,介形类化石共见 25 属 40 种。

有孔虫中瓷质壳有孔虫以 *Qinqueloculina akneriana rotunda* (Gerke) (阿卡尼圆形五块虫)、*Qinqueloculina contorta* d'Orbigny (明亮五块虫) 和 *Qinqueloculina semimula* (半缺五块虫) 为主要优势属种。玻璃类平旋类有孔虫以 *Elphidium magellanicum* (Heron-Allen et Earland) (缝裂希望虫)、*Elphidiella kiansuensis* (Ho) (江苏小希望虫)、*Nonion glabrum* (Ho) (光滑九字虫)、*Cribrononion vitreum* (Wang) (透明希望虫) 和 *Protelphidium tuberculatum* (d'Orbigny) (具瘤先希望虫) 为主要优势属种,其他常见属种有 *Elphidium advenum* (Cuhsmann) (异地希望虫)、*Elphidium limpidum* (Ho, Hu et Wang) (清晰希望虫) 和 *Nonion akitaense* (Asano) (秋田九字虫)、*Cribrononion miyakoensis* (Ujiie et Kusukawa) (宫古筛九字虫) 等。玻璃类螺旋类有孔虫以 *Ammonia beccarii* vars. (毕克卷转虫变种)、*Ammonia confertitsta* Zheng

(厚壁卷转虫)、*Pseudoeponides sinensis* (Zheng) 中华假圆旋虫为主要优势种,其他常见属种有 *Ammonia compressiuscula* (Brady) (压缩卷转虫)、*Pseudononionella variabilis* (Zheng) (多变假小九字虫)、*Pseudononion minutum* (Zheng) (小假九字虫)、*Stomoloculina multiangula* (Ho, Hu et Wang) (多角口室虫)、*Pseudoeponides anderseni* Warren (缝裂假上穹虫)、*Epistominella naraensis* (Kuwano) (奈良小上口虫) 等。各层位有孔虫丰度变化较大,最高值为 2656 枚/30 g,最低为 0 枚/30 g。

介形类中海相介形类 15 属 21 种,主要优势属种为 *Sinocytheridea impressa* (Brady) (典型中华美花介)、*Tanella opima* (Chen) (丰满陈氏介)、*Loxococoncha ocellata* (Ho) (眼点弯背介)、*Spinileberis sinensis* (Chen) (中华刺面介)、*Neomonoceratina chenae* (Zhao et Whatley) (陈氏新单角介) 和 *Sanyuania psaronius* (Huang) (斑纹三原介),其他常见属种有 *Albileberis sinensis* (Ho) (中华洁面介)、*Bicornucythere bisanensis* (Okubo) (美山双角花介)、*Hemicytherura cuneata* (Hanai) (窝形半尾花介)、*Leptocythere ventridivosa* (Chen) (腹结细花介) 等。淡水介形类 10 属 19 种,主要优势属种为 *Ilyocypris bradyi* (Sars) (布氏土星介)、*Candoniella albicans* (Brady) (纯净小玻璃介)、*Ilyocypris cornae* (Mandelstam) (柯氏土星介)、*Candona neglecta* (Sars) (疏忽玻璃介)、*Candoniella yunchengensis* (Wang) (运城小玻璃介),其他常见属种有 *Limnocythere dubiosa* (Daday) (疑湖花介)、*Candoniella* sp. (小玻璃介未定种)、*Cyprinotus* sp. (美星介未定种) 等。各层位介形类化石丰度变化较大,最高值为 1030 枚/30 g,最低为 0 枚/30 g。

表 2 渤海湾西北岸海侵研究¹⁴C 测试结果

Table 2 ¹⁴C dating results of transgression study in northwest coast of Bohai Bay

序号	实验室编号	样品编号	采样位置	埋深/m	测年物质	测试年龄/a BP	校正年龄/cal. a BP
1	BA141286	QLT03-1	八门城南	13.9	灰黑色泥炭	9900±40	11310
2	BA141288	QLT03-3	八门城南	29.6	灰黑色泥炭	39350±430	
3	BA160052	QHL06-1	周良庄西	0.8	灰色泥炭	1865±25	1799
4	BA160053	QHL06-2	周良庄西	3.4	灰色泥炭	6135±30	7052
5	BA160054	QHL06-3	周良庄西	7.4	灰色泥炭	13340±45	16045
6	BA160055	QHL06-4	周良庄西	25.3	灰色泥炭	31320±180	35210
7	BA172308	QEJ01-1	尔王庄	9.6	灰色泥炭	9310±45	10636
8	BA172309	QEJ01-2	尔王庄	32.2	深灰色泥炭	33420±260	37658

此外,还可见少量淡水腹足类 *Gyraulus albus* (白小旋螺)、*Bythenia* sp. (豆螺未定种)、土蜗未定种 *Galba* sp. 及 *Aloides laevis* (光滑蓝蛤)、牡蛎未定种 *Ostrea* sp.、*Potamocorbicula fluminea* (Muller, 河蓝蚬) 等小型个体。

3.3 钻孔综合分析

3.3.1 QEJ01 孔

在该孔 0~40.0 m 共完成 40 个样品测试,根据沉积物组合、微体生物组合特征及测年结果,该孔可以识别出 MIS1 和 MIS3 两期海侵层,自上而下可划分为 6 个组合带(图 2)。

0~4.6 m: 上部 0~2.1 m 沉积物为棕黄色粉砂质粘土,下部 2.1~4.6 m 为黑灰色、黄绿色粘土,含钙质结核。上部样品中以淡水介形类 *I. bradyi* 为优势种,并出现薄壳易碎的 *Cyprinotus* sp.,表明为缓流水的环境,且有淡水腹足类 *G. albus* 个体出现,指示缓流水的洪泛盆地沉积。下部为湖沼沉积,指示地势低洼部位、降水增多背景。

4.6~9.6 m: 沉积物为黑灰色粉砂质粘土,含较多炭质斑点,发育透镜状层理。有孔虫类优势种为 *A. confertitista* 和 *N. glabrum* 两个广盐种;海相介形类优势种为 *L. ocellata*、*S. impressa*、*S. sinensis* 和 *S. psaronius*,为

区域第 I 海侵层。底部泥炭层¹⁴C 测年校正年龄为 10636 cal.a BP。

9.6~22.1 m: 沉积物为灰色、黑灰色粘土质粉砂、粉砂、细砂,发育平行层理、波状层理,为河流砂坝沉积。15.7 m 样品中见 *G. albus* 和广盐有孔虫 *A. beccarii*,为随强水动力搬运该层位所致。15.7 m 以下样品中未见任何生物。按照沉积物反映的氧化还原状况,结合区域上全新统底界判断资料,判断该孔约 22.0 m 处为全新统底界。由于该深度超过了天津滨海地带一般全新统在 20.0 m 深度的普遍规律,加之该孔可能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。

22.1~24.7 m: 沉积物为棕黄色、灰黄色粘土、粉砂质粘土,含粉砂透镜体,见大量钙质结核,潜育化强烈。样品中仅见 *G. albus*,为末次盛冰期洪泛盆地沉积。

24.7~32.3 m: 沉积物为棕灰色、灰黄色夹棕黄色粘土、粉砂质粘土,上部含粉砂透镜体及少量钙质结核,潜育化强烈,发育波状层理。上部样品以有孔虫 *A. beccarii*、*P. variabilis* 及海相介形类 *S. impressa*、*L. ocellata* 为主,下部样品中除有孔虫外,还可见少量淡水介形类。该组合带对应区域第 II 海侵层,

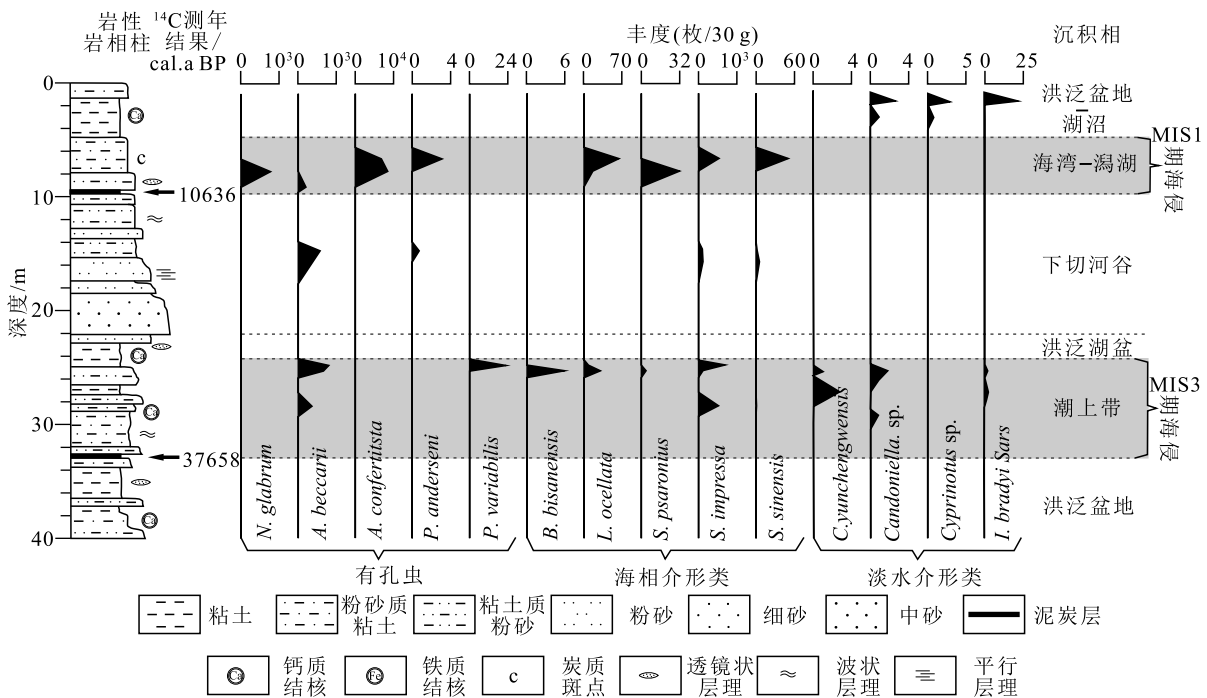


图 2 QEJ01 孔地层层序及微体生物组合特征

Fig. 2 Stratigraphic sequence and microbiological assemblage of borehole QEJ01

33.2 m处¹⁴C 测年树轮校正结果为 37658 cal.a BP, 对应 MIS3 阶段海侵。

32.3~40.0 m: 沉积物为灰黄色、棕黄色、灰棕色粉砂质粘土与粘土互层, 偶见粉砂透镜体, 见钙质结核及钙质斑块。多个样品中见较多 *G.albus* 及少量腹足类口盖、植物种子、*I.bradyi*, 反映浅水、水动力不强的洪泛盆地环境。

3.3.2 QHJ01 孔

该孔 0~40.0 m 共完成 43 个样品测试, 根据沉积物组合、微体生物组合特征及测年结果, 该孔仅识别出 MIS1 海侵层, 自上而下可划分为 7 个组合带(图 3)。

0~2.6 m: 沉积物为棕黄色、棕灰色粉砂质粘土、粘土质粉砂, 含少量钙质结核及铁锰质结核。玻璃质有孔虫螺旋壳类以属种 *A. beccarii*、*P. variabilis* 和 *S. multiangula* 为主, 玻璃质有孔虫平旋壳类以 *E. magellanicum* 和 *P. minutum* 为主。海相介形类以广盐种典型 *S. impressa*、*T. opima*、*A. sinensis* 为主, 整体显示顶部样品盐度最低, 向下盐度增加, 为潮上带-海滩脊(贝壳堆积)沉积环境。

2.6~12.6 m: 沉积物为灰色粘土质粉砂夹粉砂质粘土, 发育波状层理、透镜状层理, 含较多蛤类壳

体及碎屑。下部样品中微古生物含量较少, 向上连续增加。上部样品中广盐低盐种瓷质有孔虫 *Q. akneriana rotunda*、少量 *Q. contorta* 和 *Q. semimula* 连续出现; 玻璃质有孔虫螺旋壳属种以 *A. beccarii* 为绝对优势种, 平旋壳类以 *E. magellanicum* 为第一优势种连续出现, 次为代表冷水团的 *P. tuberculatum*、*N. glabrum* 和 *E. kiangsuenensis*; 海相介形类中, 优势种为广盐种典型 *S. impressa*、近海种 *N. chenae* 和 *B. bisanensis* 始终连续出现, 为区域第 I 海侵层。

12.6~14.7 m: 上部沉积物为灰黄色、棕黄色粘土质粉砂, 夹粉砂团块, 发育波状层理, 见虫孔构造, 底部为灰黑色泥炭层。样品中仅见少量微体古生物, 有孔虫 *A. beccarii* 及海相介形类 *S. impressa* 和 *N. chenae* 连续出现, 底部见较多的 *G. albus* 和少量淡水介形类 *I. bradyi*。14.3 m 泥炭层¹⁴C 年龄值为 10449 cal.a BP^[2], 为 MIS1 阶段海侵初期洪泛盆地、滨岸湖沼沉积, 局部开始受海水影响。

14.4~15.9 m: 沉积物为浅灰黄色粉砂质粘土, 含少量炭质斑点及团块。样品中见较多的淡水介形类, 反映冰消期的洪泛湖环境。

15.9~19.6 m: 沉积物为浅灰黄色粉砂夹浅灰棕色粉砂质粘土, 发育水平层理, 潜育化强烈。样品

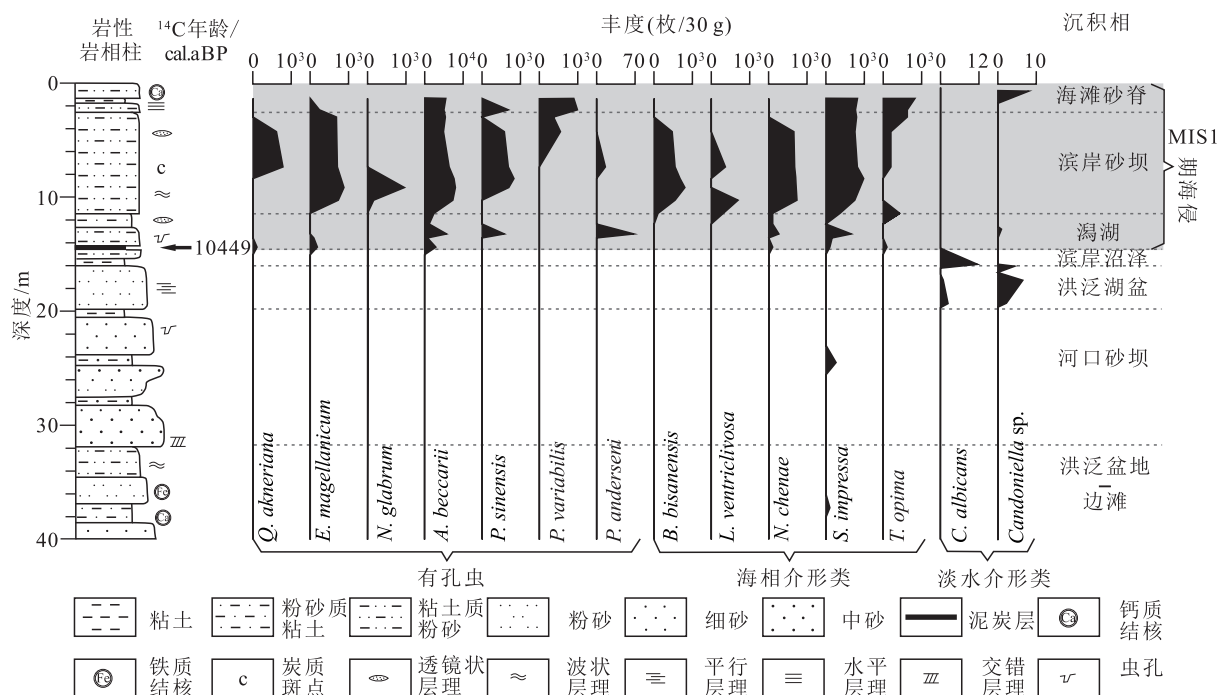


图 3 QHJ01 孔地层层序及微体生物组合特征

Fig. 3 Stratigraphic sequence and microbiological assemblage of borehole QHJ01

中化石以淡水介形类 *C. albicans*、*I. bradyi*、*I. comae* 和 *G. albus*、*Bythenia* sp. 为主。结合地层氧化状况, 总体反映为水动力较弱的洪泛湖环境。

19.6~31.8 m: 上部沉积物为浅棕黄色细砂夹灰棕色粉砂质粘土, 下部沉积物为棕灰色、绿灰色中细砂、粉细砂夹粉砂质粘土, 潜育化发育, 发育交错层理、平行层理。样品中微体古生物较少, 多以 *G. albus* 碎片为主。仅在 23.7 m 见 6 枚 *S. impressa*, 31.1~31.3 m 见少量 *A. laevis*, 由于介形类为卵生生物, 不排除其卵被搬运后在适宜环境再繁殖, 如同在山西运城盐湖钻孔所见^[28], 故此处该种出现不应视为海侵, 最多为咸化湖泊。此段对应砂含量较高层段, 为砂坝沉积, 与 MIS3 海侵层为同期异相。

31.8~40.0 m: 沉积物为棕灰色粉砂质粘土、粘土质粉砂夹少量粉、细砂, 发育水平层理、波状层理, 含较多钙质结核, 向上粒度变细, 样品中未见微体生物, 为曲流河岸边滩-洪泛盆地沉积。

3.3.3 QLT03 孔

该孔 0~40.0 m 共完成 67 个样品测试, 根据沉积物组合、微体生物组合特征及测年结果, 该孔可以识别出 MIS1 和 MIS3 两期海侵层, 可与海洋氧同位素分期对比, 自上而下划分为 6 个组合带(图 4)。

0~3.0 m: 沉积物为灰色、灰绿色粘土, 含少量

钙质结核, 潜育化发育。样品中未见微体生物, 仅见有少量粘土球, 为天津北部中一晚全新世普遍发育的湿草甸土沉积。

3.0~11.1 m: 沉积物为深灰色粉砂质粘土、粘土质粉砂, 含较多炭质碎屑。连续出现数量不等的微体生物, 有孔虫类以 *A. beccarii* 为优势种, 还可见 *C. vitreum*、*E. magellanicum*、*E. kiangsuensis*、*N. glabrum* 等; 海相介形类以 *S. impressa*、*T. opima* 为优势种, 其余为少量 *A. sinensis*、*L. ocellata*、*L. ventriclivosa*、*S. sinensis*。该段对应 MIS1 海侵, 为潟湖沉积。

11.1~15.3 m: 上部沉积物为灰色粉砂, 下部为灰黑色、深灰色粘土夹薄层粉砂, 砂质含量明显增多, 含云母碎片, 植物碎屑丰富, 为河口砂坝沉积。上部样品中含少量 *G. albus*, 顶部见少量有孔虫, 可以解释为海侵初期海水到达该地的表现。下部样品中生物以湖沼相介形类 *C. albicans* 和 *C. yunchengensis* 为主, 总体反映湖沼环境; 个别样品中出现极少的海相介形类 *L. ventriclivosa*、*S. impressa*、*T. opima* 等典型的潮上带优势属种。15.3 m 大量轮藻出现, 显示周边植物繁茂。13.9 m 处¹⁴C 测年树轮校正结果为 11310 cal.a BP, 属于应属冰消期湖沼沉积, 对应降水增多的气候背景。

15.3~23.8 m: 沉积物为灰黄色、棕黄色、灰绿

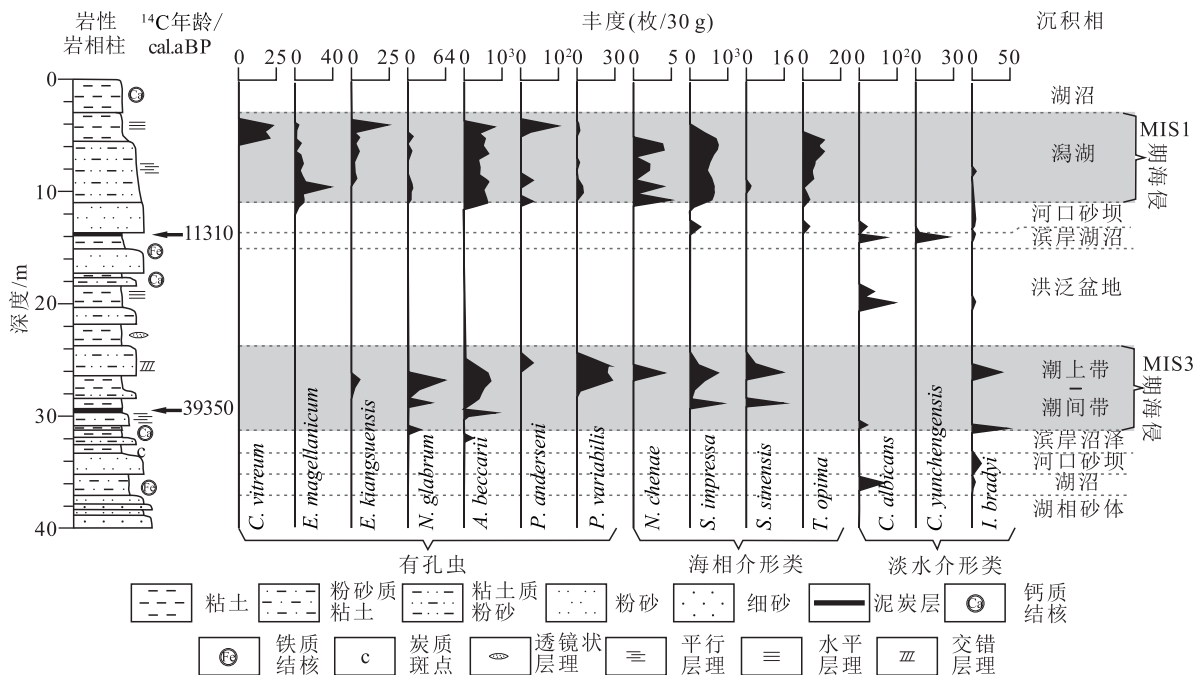


图 4 QLT03 孔地层层序及微体生物组合特征

Fig. 4 Stratigraphic sequence and microbiological assemblage of borehole QLT03

色、灰色粘土质粉砂、粉砂夹粘土、潜育化强烈,含较多钙质结核。仅在个别样品中见淡水介形类 *C. albicans*、*I. bradyi*,表明该段为洪泛盆地夹少量湖沼沉积。

23.8~31.4 m:沉积物为棕黄色、黄绿色、灰色粘土质粉砂、粉砂质粘土、粘土,潜育化强烈,发育水平层理、脉状层理、透镜状层理。样品中连续出现有孔虫和海相介形类,仍以广盐种组合为主。28.8 m 见淡水介形类 *I. cornae*,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不高。31.2 m 见 26 枚有孔虫与 57 枚淡水介形类共生,显示淡水环境开始受到轻微海水影响。该组合带对应区域第 II 海侵层。29.6 m 处¹⁴C 测年结果为 39350±430 a BP,证明 29.1~29.7 m 泥炭层应为 MIS3 海侵基底泥炭层。

31.4~40.0 m:沉积物为灰色、深灰色粉砂、细砂夹粘土质粉砂、粉砂质粘土,颜色偏深,粘性土中含较多钙质结核,砂层中发育平行层理、交错层理。样品中仅见少量淡水介形类 *C. albicans*、*I. bradyi*。表明该段为 MIS4 阶段湖沼及水下分支河道、河口砂坝沉积,与 QEJ01 孔、QHJ01 孔为同期异相。

3.3.4 QHL06 孔

该孔 0~40.0 m 共完成 41 个样品测试,根据沉积物组合、微体生物组合特征及测年结果,该孔自上而下可划分为 8 个组合带(图 5)。

0~2.5 m:沉积物为深棕色、灰棕色粉砂质粘土、粘土,含少量钙质结核,潜育化发育。其中,0.8 m 棕黑色粘土¹⁴C 测年结果为 1799 cal.a BP,为三角洲平原顶部沼泽沉积,与以往区域研究结果一致。底部样品中见淡水介形类 *C. albicans*、*C. yunchengensis*,指示积水环境,整体为洪泛盆地及湖沼沉积。

2.5~3.5 m:沉积物为灰色粘土质粉砂夹粉砂质粘土,富含云母碎片,含炭质条带,发育平行层理、脉状层理。样品中含少量广盐低盐有孔虫 *N. glabrum* Ho 及海相介形类 *S. impressa*。3.4 m 泥炭层¹⁴C 测年树轮校正结果为 7052 cal.a BP,综合分析表明,该段受海水影响较弱,基本处于海侵的边缘部位。

3.5~5.8 m:沉积物为灰色中砂,磨圆度较好,分选性中等。样品中含少量淡水介形类 *C. albicans* 及 *Bythenia* sp., *G. albus*,为水下分支河道及河口砂坝沉积。

5.8~10.5 m:沉积物为灰绿色粉砂质粘土、灰棕色粘土夹少量粘土质粉砂透镜体,含少量炭质斑点

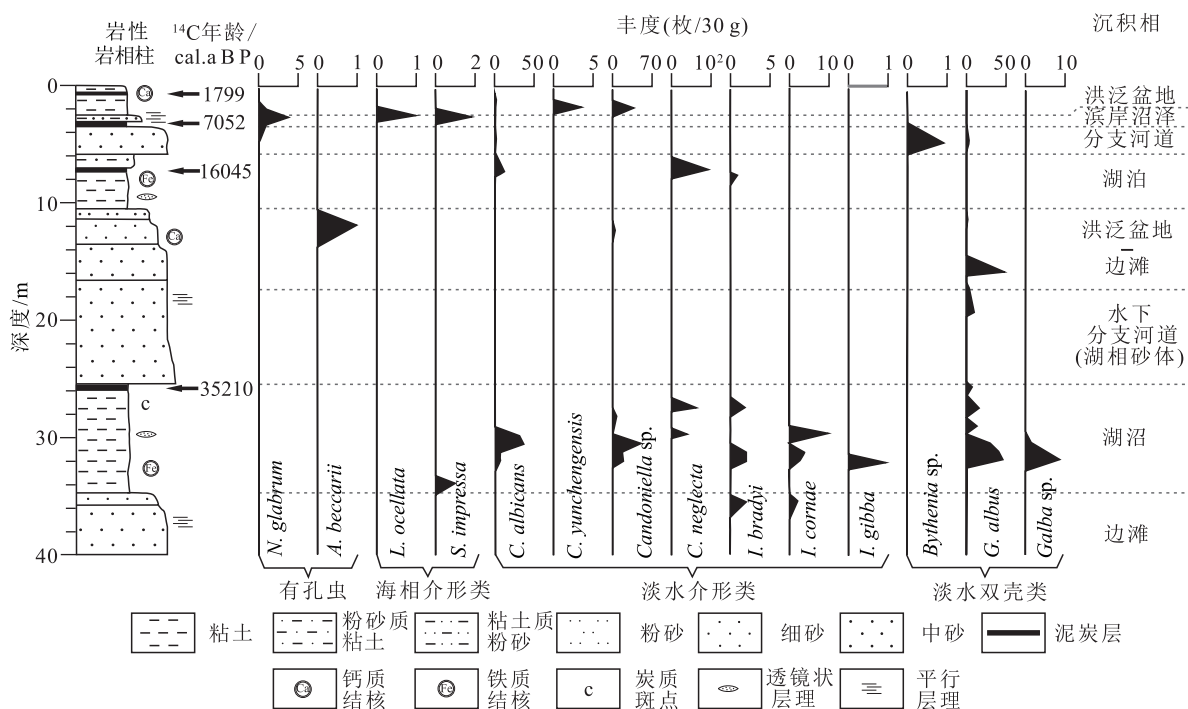


图 5 QHL06 孔地层层序及微体生物组合特征

Fig. 5 Stratigraphic sequence and microbiological assemblage of borehole QHL06

及条带, 潜育化发育。样品中含指示静水环境的 *C. neglecta* (Sars)、少量 *C. albicans* 等淡水介形类。7.4 m 泥炭层¹⁴C 测年树轮校正结果为 16045 cal.a BP, 综合分析表明, 该段为冰消期湖泊沉积。

10.5~16.5 m: 沉积物为黄棕色粉砂质粘土、粘土质粉砂、粉砂, 潜育化强烈, 粘性土中含少量钙质结核, 样品中未见微体生物, 根据地层氧化情况可对应 MIS4 阶段末次盛冰期边滩-洪泛盆地沉积。

16.5~25.2 m: 沉积物为灰色、灰黑色中砂、粗砂夹少量薄层粉砂, 发育平行层理, 含丽蚌碎屑及鱼骨化石, 为湖相砂体沉积。

25.2~34.5 m: 沉积物为灰色、灰棕色、灰绿色粘土夹粉砂、粘土质粉砂薄层, 发育透镜状层理, 潜育化发育, 零星见钙质结核。样品中生物以 *C. neglecta*, *I. bradyi* 和 *G. albus* 为主, 顶底 2 样品分别见轮藻, 显示周边植物繁茂, 指示暖湿气候环境, 25.3 m 泥炭层¹⁴C 测年树轮校正结果为 35210 cal.a BP, 为湖沼沉积。

34.5~40.0 m: 沉积物为黄绿色、灰棕色、灰色中砂、细砂, 发育平行层理, 向上粒度变细, 潜育化强烈, 磨圆度较好。样品中见少量淡水介形类 *I. bradyi*, *I. cornae*。综合分析该段为河流边滩沉积。

4 讨 论

4.1 海侵气候背景

第四纪以来全球气候波动明显, 晚更新世以来气温呈现出大幅度的冷暖变化。不同区域孢粉分析结果表明, 晚更新世的植被与气候在时间演变与空间分布规律上具有高度相似性^[29-32], 同受全球气候变化控制, 但仍存在局部自然环境差异^[33]。晚更新世全球海平面、内陆湖泊发育及水位变化与全球变化基本同步^[34-37]。温湿、凉湿的气候环境下相对湿度大, 蒸发量小, 水源充足, 海平面上升, 海侵发育, 同时利于内陆湖泊发育, 而炎热干燥及寒冷干燥的气候环境下, 降水量小, 蒸发量大, 海平面下降, 不利于湖泊发育。晚更新世早期、中期及全新世中期为相对温暖湿润期, 海平面较高, 形成了晚更新世以来的 3 期海侵, 分别对应海洋氧同位素阶段 MIS5、MIS3、MIS1, 其间冷期对应海洋氧同位阶段 MIS4、MIS2。

MIS5 阶段全球海平面最高, 内陆湖泊水位最高, 中国东部陆架全部被海水淹没^[38-41], 青藏高原

现代分割的湖泊是相互连通的古大湖^[35-37]。MIS4 阶段全球气候变冷^[34], 冰期鼎盛时期, 东海海域的海平面下降 100 m 以上, 青藏高原古湖面拔湖高度从 140 m 降到 26 m^[37]。MIS3 阶段全球气候再次变暖, 中国东部沿海普遍发生海侵, 长江中下游地区海岸线到达溧阳一带^[42], 青藏高原内陆湖湖面再次上升, 形成多级湖泊阶地和湖蚀地貌。MIS2 阶段海平面下降 130~150 m, 同时藏北高原逐渐干旱化, 湖水补给量小于蒸发量, 湖面下降, 湖泊逐渐解体, 形成多个孤立的湖泊。MIS1 阶段初期, 海水已基本达到现在海岸线的位置; 7000 a BP 左右的中全新世, 海侵达到最大范围, 5000 a BP 后海平面逐渐下降。

本次¹⁴C 测年结果表明, 研究区第 II 海侵层及其相当层位年龄值范围在 35210~37658 cal.a BP, 大致可以与 MIS3 阶段(24.1~61.0 ka BP)对应。第 I 海侵层基底泥炭层¹⁴C 年龄值范围在 7050~11310 cal.a BP, 大致可与 MIS1 阶段(0~11.7 ka BP)对应。通过与古气候及海平面变化特征对比, 研究区海侵层的形成主要受晚更新世以来气候变化波动的影响。

4.2 海侵层岩相古地理

4.2.1 MIS3 阶段

区域研究表明, 渤海湾西岸第 II 海侵层出现在 40.00 m 以上深度, 其时代为 24~39 ka BP^[14]。研究区 4 个钻孔揭露第 II 海侵层埋深为 -17.40~-31.30 m(黄海高程, 下同)。根据研究区 4 个标准孔的地层层序、微体生物研究结果, 综合分析研究区其他地质钻孔沉积特征, MIS3 阶段海侵最大海岸线边界大致在上马台镇—大白庄—八门城—后邦道沽一线。

微体古生物鉴定结果显示, 尔王庄 QEJ01 孔 -22.5~-30.1 m 段在下部样品中除有孔虫外, 还可见少量淡水介形类, 上部均为有孔虫及海相介形类, 微生物组合表明海侵层下部有少量淡水注入, 向上过渡为咸水环境^[43]。八门城 QLT03 孔在该层位除有孔虫和海相介形类外, 样品中持续出现少量淡水介形类, 这一现象显示该孔处于河口附近, 海侵过程中, 由于河流进积作用加大, 淡水持续输入, 甚至在局部导致海侵层的“中断”, 其间则形成淡水的积水洼地, 也表明当时海平面较低。QLT03 孔北东方向 QLT02 孔在该层位以棕黄色粉砂、细砂为主

的河道沉积,也证明上述观点。东棘坨 QHJ01 孔及周边为水下分支河道—河口相,样品中未见有孔虫类,仅见几枚 *S. impressa*,为北部河道沉积的水下延伸(图 6)。

4.2.2 MIS1 阶段

受气候变暖的影响,末次冰消期以来海平面逐渐上升,造成地下水水位上升,使裸露的内陆地区逐渐过渡为滨海湿地,形成海侵层底部的基底泥炭层。基底泥炭层的形成过程是海平面上升的直接证据,其形成后基本未受后期影响,¹⁴C 测年数据较可靠^[44]。基底泥炭层的埋深是判断古地貌的关键,通过分析最大海平面与基底泥炭层的相对关系,结合沉积相分析,可以综合判断海侵的边界。河口地区河流进积与海平面上升的交互作用可形成多层泥炭层,¹⁴C 测年是判断基底泥炭层的重要信息。

QLT03 孔、QLT04 孔基底泥炭层的深度较其南部钻孔埋深稍大,且呈现出向北变深的趋势,推测与蓟运河断裂活动性有关。QEJ01 孔、QLT03 孔¹⁴C 年龄值较其两侧钻孔测年数据大,疑为受碳累积效应影响所致^[45]。QEJ01 孔-2.5~-7.5 m 段有孔虫丰度明显高于介形类海相,微体生物组合以低分异度、高优势度—广盐低盐种微体生物组合出现为特征,其中 *A. confertitista*、*L. ocellata* 等在滦河口以西潟湖中出现率较高^[10],该组合样品指示非正常海水环境中富含有机质沉积的河湾—潟湖环境。QLT03 孔-2.9~-10.9 m 段样品中连续出现数量不等的微体生物,其中有孔虫最多 524 枚,海相介形类最多 168 枚,含典型河口相 *A. laevis* 和 *P. fluminea*,同时下部可见淡水沼泽环境的 *I. bradyi*,表明其具有沉积再搬运的特征,说明该段为靠近河口的潟湖沉积。QHJ01 孔-5.80~-10.40 m 段以 *A. beccarii*、*E. magellanicum*、*P. sinensis*、*P. tuberculatum* 为优势种,且数量较大。*E. magellanicum* 一般在渤海水深大于 20 m 的海域出现率较高^[10],*P. tuberculatum* 在渤海湾北部水深 10.00~20.00 m 海域出现率较高,二者均为近岸浅水种^[46],二者与潮上带、潮间带的优势种属 *A. beccarii* 共生,表明其经历了较强的海洋动力搬运。该微体生物组合在丰南 HG01 孔一带为滨岸砂坝沉积^[10],QHJ01 孔该段砂质含量高,砂粒较粗,符合滨岸砂坝的沉积特征,但该孔沉积物颜色偏灰,为水下砂坝^[47]。向上-0.4~-4.8 m 该组合仍为优势种,但丰度明显降低,同时 *Q. akneriana rotunda*、*P. variabilis*、*C. miyakoensis*、

S. reticulata、*E. naraensis* 等河口相微体生物开始出现^[48],表明河流逐渐进积,海洋搬运动力减弱,形成海滩砂脊(图 7)。

钻孔剖面 PM I 显示,QHL06 与 QHL04 孔两侧基底泥炭层底板高程差别较大(图 8),QHL06 孔基底泥炭层底板高程位于 QHL04 海侵沉积最高层位之上,同时该孔未见海侵沉积特征,仅见几枚广盐低盐有孔虫 *N. glabrum* Ho 及海相介形类 *S. impressa*,推测为风暴潮影响所致。地层层序分析结果表明,QHL06 孔处于海侵的边缘部位,基本未受海侵影响,因此剖面 PM I 最大海侵边界在 QHL06 与 QHL04 之间。综合分析钻孔、陡坎剖面地层层序及微体生物特征,MIS1 阶段海侵最大海岸线边界在大黄堡—黑狼口—郝各庄—林亭口—石臼窝一线(图 7、图 8)。

4.3 新构造运动对海侵的影响

4.3.1 区域构造沉降

海侵的发生主要受全球性气候变化引起的海平面波动控制,同时新构造运动对其空间分布起重要的作用^[3]。根据晚第四纪全球海平面变化研究结果,MIS1 阶段最高位海平面明显大于 MIS3 阶段^[49],对比研究区 2 期海侵的最大范围和垂向厚度可知,MIS1 阶段海侵规模明显大于 MIS3 阶段。全新世沉降速率较晚更新世沉降速率明显增加也是 MIS1 阶段海侵规模较大的原因之一。渤海湾沿岸全新世沉降速率为 1.0~1.5 mm/a,而晚更新世沉降速率为 0.21~0.43 mm/a^[50]。珠三角地区海侵研究也表明了这一结果。MIS3 阶段海侵普遍不发育,晚更新世以来的海侵仅在 MIS1 和 MIS5 阶段^[51]发育。

4.3.2 差异性构造沉降

渤海湾及其周边地处华北板块东部,是中、新生代的主要断陷区。受伸展构造环境影响,新构造运动以来以差异性的断块活动为主,形成 NE 走向隆起与坳陷相间的构造格局。第四纪时期渤海湾西岸及周边地区有向 NE 方向倾伏的趋势,北部构造沉降速率明显大于南部^[2]。

MIS3 阶段,沧县隆起南部 QX2 孔海侵埋深为-15.4~-27.1 m^[52],而北部 QLT03 孔为-23.7~-31.3 m;黄骅凹陷南部 HXX2 孔海侵埋深为-18.2~-35.0 m^[45],中部 BQ1 孔为-27.0~-37.9 m^[53],而其北部 FG1 孔为-27.9~-42.6 m^[45],仍呈现出向 NE 方向倾伏的趋势,表明晚更新世不同构造单元差异

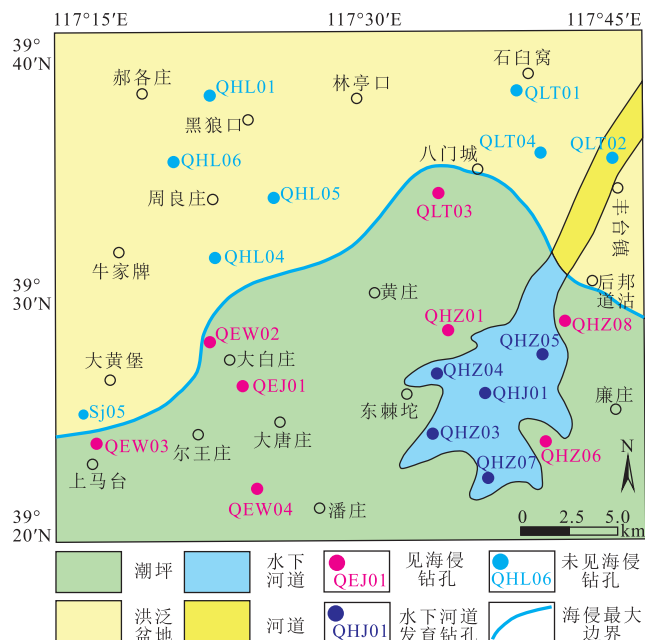


图 6 渤海湾西北岸 MIS3 阶段最大海侵范围示意图

Fig. 6 The maximum transgression area of MIS 3 stage
in northwest coast of Bohai Bay

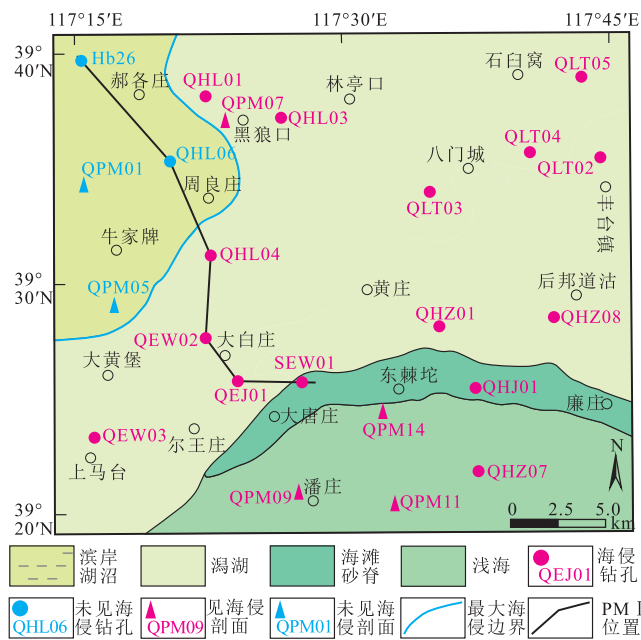


图 7 渤海湾西北岸 MIS1 阶段最大海侵范围示意图

Fig. 7 The maximum transgression area of MIS 1 stage in northwest coast of Bohai Bay

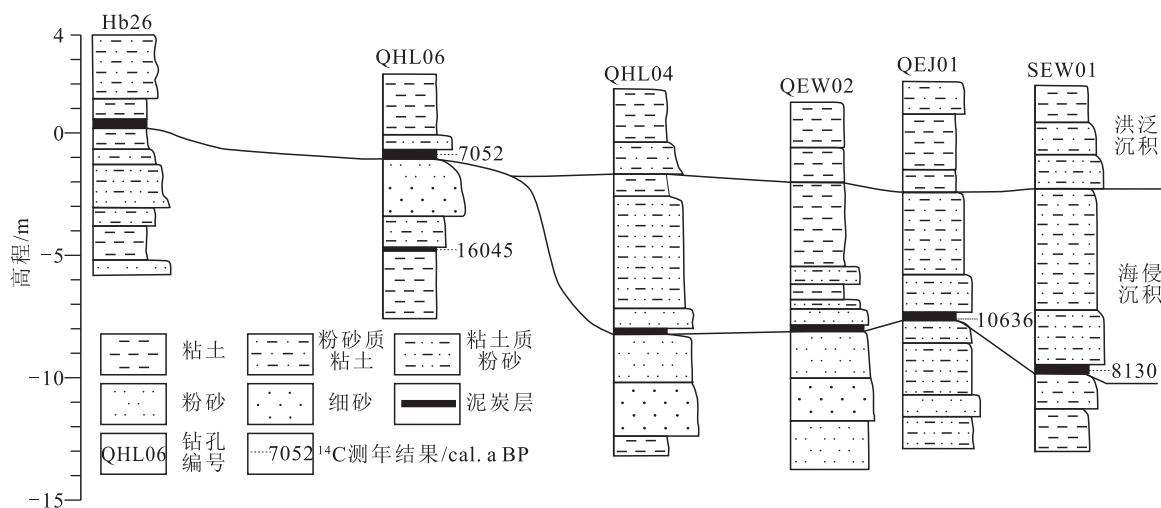


图 8 渤海湾西北岸 MIS1 阶段海侵沉积剖面

Fig. 8 Transgression sedimentary profile of MIS 1 stage in northwest coast of Bohai Bay

性沉积持续存在。第四纪以来,受喜马拉雅造山运动的影响,渤海湾及周边区域应力场发生变化,形成以张家口-蓬莱断裂带为中心的区域性差异沉降带^[54],晚更新世以来黄骅凹陷东北部成为新的沉降中心。这一时期古滦河冲积扇-三角洲沉积体系由研究区逐渐向东摆动^[55],使研究区持续处于冲积扇

侧翼洼地环境。

MIS1 阶段构造差异沉降主要受渤海盆地统一沉降影响,表现为东西向的差异,渤海湾西岸总体表现为由西向东受海侵影响的程度逐渐增强^[3],同一基准面的地层基底泥炭形成年龄东部略早于西部^[56]。渤海湾沿岸除受构造通道或古地貌影响外,

海侵层底界埋深整体表现为向渤海湾中心逐渐变深、海侵层厚度逐渐增大的趋势。这一阶段,滦河持续向东摆动,研究区仍处于洼地环境中,物源持续供给不足,长期处于潟湖沉积;渤海湾南部受黄河三角洲的影响,呈现出海陆交互沉积的特点,发育多层泥炭沉积,海侵作用受河流堆积影响较大。MIS1 阶段渤海湾北岸海侵作用较强,形成 10.0~15.0 m 厚的海侵层,渤海湾南部仅形成 3.0~5.0 m 厚的潟湖沉积^[45]。渤海湾西北部基底泥炭深度埋深相对渤海湾南部深,这一现象除受河流进积作用强弱影响外,还受宝坻—蓟运河断裂和宁河—昌黎断裂带的影响,整个渤海湾仍呈现出向 NE 向倾伏的趋势。

5 结 论

渤海湾西北岸 MIS3 阶段以来的海侵受古气候变化、古地貌、新构造运动等多重因素影响,形成不同的海侵规模和岩相古地理格局。

(1) 渤海湾西北岸 MIS3 阶段海侵埋深-17.40~-31.30 m,基底泥炭层年龄值为 35210~37658 cal.a BP。海侵受气候变化和差异性构造沉降的共同影响,海侵最大边界位于上马台镇—大白庄—八门城—后邦道沽一线,整体为一套潮坪沉积,在东棘坨、八门城一带发育水下分支河道及河口砂坝沉积。

(2) 渤海湾西北岸 MIS1 阶段海侵基底泥炭层年龄值为 7050~11310 cal.a BP。最大海岸线边界在大黄堡—黑狼口—郝各庄—林亭口—石臼窝一线。研究区西部钻孔为富含有机质沉积的河湾—潟湖环境,北部为靠近河口的潟湖沉积,东南部一带下部为水下砂坝沉积,上部河流进积作用逐渐增强,形成海滩砂脊沉积。

参考文献

- [1] Xu Q M, Yuan G B, Yang J L, et al. Plio-Pleistocene magnetostratigraphy of northern Bohai Bay and its implications for tectonic events since ca.2.0 Ma[J]. Journal of Geodynamics, 2017, 111: 1-14.
- [2] 黄猛, 李明辰, 樊航宇, 等. 渤海湾西北岸 QHJ01 孔记录的晚新生代气候与沉积环境演化[J]. 地质学报, 2019, 93(4): 899-914.
- [3] 王强, 李凤林. 渤海湾西岸第四纪海陆变迁[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1983, 3(4): 83-89.
- [4] 袁路朋, 王永, 姚培毅, 等. 河北雄县全新世中期海侵地层的发现[J]. 地质通报, 2019, 38(6): 911-915.
- [5] 王宏, 范昌福, 李建芬, 等. 渤海湾西北岸全新世牡蛎礁研究概述[J]. 地质通报, 2006, 25(3): 315-331.
- [6] 黄猛, 张学斌, 韩荣文, 等. 数字高程模型在天津滨海平原区地质填图中的应用[J]. 中国地质调查, 2020, 7(5): 123-133.
- [7] 王强, 袁桂邦, 张熟, 等. 渤海湾西岸贝壳堤堆积与海陆相互作用[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 775-786.
- [8] 岳军, Dong Y, 张宝华, 等. 渤海湾西岸的几道贝壳堤[J]. 地质学报, 2012, 86(3): 522-534.
- [9] 方晶, 胡克, 张国艳, 等. 渤海湾西岸全新世最大海侵位置探讨——以天津市西南精武镇一带为例[J]. 海岸工程, 2012, 31(3): 45-54.
- [10] 闫晓洁, 胥勤勉, 范友良, 等. 渤海湾西北岸 HG01 孔晚更新世以来的微体化石特征及沉积环境演化[J]. 第四纪研究, 2017, 37(1): 98-107.
- [11] 魏灵, 贾玉连, 易朝路, 等. 近 4 万年渤海西岸海侵时古海面的现代标高对比研究[J]. 第四纪研究, 2006, 26(3): 361-369.
- [12] 刘艳霞, 黄海军, 董慧君, 等. 渤海西南岸全新世最大海侵界线及其地貌特征[J]. 第四纪研究, 2015, 35(2): 340-353.
- [13] 刘艳霞, 齐雅莉, 黄海军, 等. 渤海湾西南岸 6000 年古海岸线重建及其影响因素解析[J]. 第四纪研究, 2006, 35(2): 265-274.
- [14] 胥勤勉, 胡云壮, 袁桂邦, 等. 渤海湾西南岸古黄河三角洲全新世地层层序和演化过程[J]. 第四纪研究, 2015, 35(2): 326-339.
- [15] 范昌福, 裴艳东, 王宏, 等. 渤海湾西岸牡蛎壳体形态、生长速率与生长环境的关系[J]. 海洋通报, 2010, 29(5): 526-533.
- [16] 范昌福, 王宏, 李建芬, 等. 渤海湾西北岸牡蛎礁体对区域性构造活动与水动力型海面变化的响应[J]. 第四纪研究, 2005, 25(2): 235-244.
- [17] 范昌福, 高抒, 王宏. 渤海湾西北岸全新世埋藏牡蛎礁建造记录单中的间断及其解释[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(5): 27-35.
- [18] 李元芳, 安凤桐. 天津平原第四纪微体化石群及其古地理意义[J]. 地理学报, 1985, 40(2): 155-168.
- [19] 林防, 李凤林, 李建芬, 等. 渤海湾西北岸全新世介形类组合特征及海进海退旋回[J]. 地球学报, 2004, 25(1): 53-58.
- [20] 黄猛, 陈星, 王莉, 等. 天津 1:50 000 黄庄公社幅地质图数据库[J]. 中国地质, 2020, 47(S1): 99-111.
- [21] 天津市地质调查研究院. 中国区域地质志(天津志)[M]. 北京: 地质出版社, 2019: 595-710.
- [22] 郭海朋, 白晋斌, 张有全, 等. 华北平原典型地段地面沉降演化特征与机理研究[J]. 中国地质, 2017, 44(6): 1115-1127.
- [23] Xu Q M, Yang J L, Hu Y Z, et al. Magnetostratigraphy of two deep boreholes in southwestern Bohai Bay: Tectonic implications and constraints on the ages of volcanic layers [J]. Quaternary Geochronology, 2018, 43: 102-114.
- [24] Yang J L, Liang M Y, Algeo T J, et al. Upper Miocene-Quaternary Magnetostratigraphy and magnetic susceptibility from the Bohai Bay Basin (eastern China) and implications for regional volcanic and basinal subsidence history [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2020, 538: 112.
- [25] 郑守仪, 郑执中, 王喜堂, 等. 山东省打渔张灌区第四纪有孔虫及其沉积环境的初步探讨[M]//中国科学院海洋研究所. 海洋科学集刊(第十三集). 北京: 科学出版社, 1978: 16-78.
- [26] 汪品先, 章纪军, 赵泉鸿, 等. 东海底质中的有孔虫与介形虫[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 1-307.
- [27] 侯佑堂, 勾韵娴. 中国介形类化石(第二卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1-798.

- [28] 王强,李彩光.7.1Ma 以来运城盆地地表系统巨变及盐湖形成的构造背景[J].中国科学(D 辑),2000,30(4): 420-428.
- [29] 张静,徐建明,刘海坤,等.华北平原晚更新世以来岩石地层、生物地层及气候地层[J].现代地质,2009,23(1): 64-74.
- [30] 李春海,唐领余,冯兆东,等.甘肃静宁地区晚更新世晚期高分辨率的孢粉记录及其反映的气候变化[J].中国科学(D 辑),2006,36(5): 453-460.
- [31] 杨湘奎,杜绍敏,张烽龙.呼伦贝尔高原晚更新世以来的古气候演变[J].自然灾害学报,2006,15(2): 157-159.
- [32] 王艳.渤海湾曹妃甸晚更新世末期以来古植被与古气候演变序列[J].海洋地质与第四纪地质,2000,20(2): 87-92.
- [33] 李秉成,孙建中.黄土高原晚更新世的植被与气候环境[J].地理研究,2004,23(5): 641-648.
- [34] 杨明桂,马振兴.庐山第四纪冰川遗迹的观察与思考[J].地质通报,2019,38(2131): 189-199.
- [35] 李明慧,郑绵平.西藏扎布耶盐湖晚更新世沉积学及古气候意义[J].湖泊科学,2005,17(1): 24-27.
- [36] 杨俊峰,卢书伟,赵虹,等.西藏结则茶卡湖岸沉积物中铀系年龄及意义[J].地球科学与环境学报,2006,28(3): 6-10.
- [37] 朱大岗,孟宪刚,赵希涛,等.西藏纳木错和藏北高原古大湖晚更新世以来的湖泊演化与气候变迁[J].中国地质,2004,31(3): 269-277.
- [38] 姚政权,石学法.渤海湾沿岸第四纪海侵研究进展[J].海洋地质前沿,2015,31(2): 9-16.
- [39] 陈双喜,赵信文,孙荣涛,等.现代珠江三角洲地区晚第四纪海侵的微体古生物记录[J].微体古生物学报,2015,32(3): 292-307.
- [40] 马明明,刘秀铭,周国华,等.福建沿海地区晚第四纪海侵研究进展及存在的问题[J].亚热带资源与环境学报,2016,11(3): 9-19.
- [41] 苗巧银,朱志国,陈火根,等.苏北盆地高邮凹陷第四纪年代地层格架的建立及海侵期次探讨——据兴化钻孔 ZKJ43[J].地层学杂志,2018,42(3): 336-343.
- [42] 秦蕴珊,赵一阳,陈丽蓉,等.东海地质[M].北京: 科学出版社,1987: 39-103.
- [43] 李元芳,何希贤.渤海湾北岸表层沉积中的有孔虫群及其生态环境[J].地理研究,1983,2(1): 65-73.
- [44] 王强.渤海西岸全新世早期基底泥炭堆积时间域初步研究[J].第四纪研究,1999,19(1): 91.
- [45] 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.
- [46] 李建芬,商志文,王宏,等.渤海湾西部现代有孔虫群垂直分带的特征及其对全新世海面、地质环境变化的指示[J].地质通报,2010,29(5): 650-659.
- [47] 高峰,胥勤勉,袁桂邦,等.渤海湾北岸 TZ02 孔晚新生代沉积环境演化过程[J].第四纪研究,2017,37(3): 1-12.
- [48] 李稳,宫少军,赵卫,等.渤海湾西岸表层沉积物中有孔虫和介形类分布特征及其环境意义[J].海洋地质前沿,2018,34(9): 32-42.
- [49] 刘振夏,印萍, Serge B,等.第四纪东海的海进层序和海退层序[J].科学通报,2001,45(S1): 74-79.
- [50] 段永侯.环渤海新构造活动与渤海形成演化对现今地质环境之影响[J].中国地质灾害与防治学报,1998,9(S1): 110-117.
- [51] 陈双喜,赵信文,孙荣涛,等.现代珠江三角洲地区晚第四纪海侵的微体古生物记录.微体古生物学报,2015,32(3): 292-307.
- [52] 陈永胜,王福,姜兴钰,等.渤海湾西岸 QX2 孔 II 海的认识及 OSL 年龄[J].地质通报,2016,35(10): 1600-1606.
- [53] 闫玉忠,王宏,李凤林,等.渤海湾西岸晚更新世沉积的差异性特征[J].第四纪研究,2006,26(3): 321-326.
- [54] 陈江欣,侯方辉,李日辉,等.渤海海域中西部新构造运动特征[J].海洋地质与第四纪地质,2018,38(4): 83-91.
- [55] 胡云壮,张金起,白耀楠,等.3.45Ma 以来滦河冲积扇中部唐山 TD1 孔记录的区域构造和气候演化[J].古地理学报,2014,16(2): 249-262.
- [56] 鲁庆伟,石文学,郭维,等.渤海湾西岸全新统沉积特征及环境演化[J].海洋地质与第四纪地质,2017,37(1): 60-66.