

doi: 10.13745/j.esf.2016.04.026

# QX01 孔记录的渤海湾西岸沿海低地 MIS 3 晚期以来的河道充填与环境演化

王 福<sup>1,2,3</sup>, 李建芬<sup>1,2</sup>, 陈永胜<sup>1,2</sup>, 王 宏<sup>1,2</sup>, 方 晶<sup>4</sup>, 商志文<sup>1,2</sup>, 田立柱<sup>1,2</sup>,  
姜兴钰<sup>1,2</sup>, 施佩歆<sup>1,2</sup>, 齐乌云<sup>5</sup>

1. 中国地质调查局 天津地质调查中心, 天津 300170
2. 中国地质调查局 泥质海岸带地质环境重点实验室, 天津 300170
3. 天津地质矿产研究所 现代沉积物测年实验室, 天津 300170
4. 天津师范大学 城市与环境科学学院, 天津 300387
5. 中国社会科学院 考古研究所, 北京 100710

WANG Fu<sup>1,2,3</sup>, LI Jianfen<sup>1,2</sup>, CHEN Yongsheng<sup>1,2</sup>, WANG Hong<sup>1,2</sup>, FANG Jing<sup>4</sup>,  
SHANG Zhiwen<sup>1,2</sup>, TIAN Lizhu<sup>1,2</sup>, JIANG Xingyu<sup>1,2</sup>, SHI Peixin<sup>1,2</sup>, QI Wuyun<sup>5</sup>

1. Tianjin Centre, China Geological Survey, Tianjin 300170, China
2. Key Laboratory of Muddy Coast Geo-environment, China Geological Survey, Tianjin 300170, China
3. Young Sediments Dating Laboratory, Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China
4. College of Urban and Environmental Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China
5. Institute of Archaeology, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100710, China

**WANG Fu, LI Jianfen, CHEN Yongsheng, et al. Paleo-environment change and river channel infilling since late MIS 3 recorded by drilling core QX01 from the coastal lowland of Bohai Bay. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(4): 301-309**

**Abstract:** We used an AMS <sup>14</sup>C and OSL dated core (QX01) from the coastal lowland of Bohai Bay to decipher the late Pleistocene paleo-environment change and river channel infilling. Sedimentary facies, grain size, large-amplitude changes in benthic foraminifer's assemblage and diatom assemblage composition indicate that the major environmental changes occurred during the last 40000 years in the study area. The results show that 6 sedimentary stages were identified, which is (1) 30–29.72 m: fluvial deposition; (2) 29.72–29.4 m: transgression deposition, >43.5 ka; (3) 29.4–17.7 m: sandy sediments, river channel filling, ~37.9–29.7 ka; (4) 17.7–13.2 m: sediments finning from sand to clay, ~29.7–8 ka, the environments from river channel infilling to swamp; (5) 13–5 m: 8–4 ka, Holocene transgression deposits, the environments from fresh water swamp, to brackish swamp or salt marsh, to shallow sea, to salt marsh, most strongest marine influence happened during 6000–5750 cal BP, then retreat; (6) 5–0 m: since 1.7 ka, the environment was controlled by river, and it is flood plain deposits during this period. The sedimentary changes were correlated with sea level change very well. During MIS 4 or 6, the sea level was relatively lower, the river cut down and river channel formed, then the river channel was infilling during 37.9–29.7 ka of MIS 3, when the sea level was relatively higher, the height of the river channel were infilled from –24.2 m to –11.8 m of Huanghai 85 highness. Then the last glacial maximum came, the sea water retreated out of Bohai Sea and the study area was swamp or shallow lake; the sedimentation stopped or at a very low level till the early Holocene, 8 ka. With the end of the last glacial maximum, the sea water came back again during 8–4 ka, represented by fresh swamp, salt marsh, and shallow sea deposits. Then the deposition stopped again, till 1.7 ka, with the role of the

收稿日期: 2015-07-30; 修回日期: 2015-10-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41476074); 中国地质调查局项目(1212011120169)

作者简介: 王 福(1979—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事海岸带与第四纪地质环境研究。E-mail: wfu@cgs.cn

river, the environments became floodplain deposits. Moreover, two sedimentary break were identified, which is the break during last glacial of low sea level, and the break during 4–1.7 ka, when the marine influence finished or sea water retreated from the study area, but the role of the river had not started.

**Key words:** palaeochannel; environmental change; coastal lowland; Bohai Bay

**摘要:**在渤海湾沿海低地地区获得1个30 m的全取心机械钻孔(QX01孔),对样品进行了沉积岩石学分析、底栖有孔虫鉴定、硅藻鉴定和粒度分析,结合AMS  $^{14}\text{C}$ 和OSL测年,重建了研究区晚更新世以来的古河道充填及环境演化过程。结果显示QX01孔自下而上可以分为6段:(1)30~29.72 m,陆相洪泛沉积;(2)29.72~29.4 m,海侵沉积, $>43.5$  ka BP;(3)29.4~17.7 m,砂质沉积物,河道填充沉积,37.9~29.7 ka;(4)17.7~13.2 m,沉积物由砂质变为黏土质,29.7~8 ka,由河道填充转为浅湖沼环境;(5)13.2~5 m,8~4 ka,全新世海侵沉积,沉积环境由陆相转为海陆过渡相,6 000~5 750 cal BP海侵达到最强,之后逐渐退出该区;(6)5 m以上,洪泛沉积,约1.7 ka至今。沉积环境与海面具有很好的响应,MIS 4或6阶段时,海面较低,河流下切,形成古河道,下切最深处位于现代高程为-24.2 m。MIS 3阶段早期时,海面上升,37.9 ka河道开始填充,至29.7 ka填充完成,对应高程为-11.8 m。末次盛冰期至早全新世时为浅湖沼环境,沉积作用停止或速率非常低。随着末次盛冰期的结束,海洋作用增强,进入全新世海侵沉积阶段,8~4 ka cal BP。之后,沉积作用停止,至1.7 ka以来,随着河流作用的不断增强,该区变为河流控制的洪泛沉积为主。同时,发现了两次沉积间断,分别发生在末次盛冰期的低海面时期和4~2 ka时的海水退出、河流沉积尚不充分时期。

**关键词:**古河道;环境演化;沿海低地;渤海湾

**中图分类号:**P534.63;P512.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2016)04-0301-09

古环境重建是了解现代环境变化和趋势预测的基础,尤其是了解地质历史时期的海陆演化,对于指导现代地质环境演化研究至关重要。沿海低地地区对海面变化和河流供给十分敏感<sup>[1-5]</sup>,本世纪海面将继续上升<sup>[6]</sup>,沿海低地地区将首先受到直接影响。因此,了解沿海低地地区如何对海面变化进行响应对于应对全球性海面上升具有现实意义。

渤海湾沿海低地晚更新世以来共记录3次海陆变化旋回<sup>[7-8]</sup>、3个古河道发育期与两个古湖沼发育期<sup>[9-10]</sup>,在发育时间上有重叠。海相地层自下而上分别称为III海相层、II海相层和I海相层。除全新世海侵在时代上无争议外,由于测年手段的限制,对于第II和第III海相层的形成时代仍存在争议<sup>[11-13]</sup>。同时,由于华北平原古河道十分发育<sup>[14]</sup>,造成第II海相层(埋深43.9(25.2)~27.5(17.2) m)<sup>[11]</sup>在部分地区被低海面时期河道下切侵蚀。在钻孔剖面中的典型表现就是全新世底泥炭层下伏地层中没有第II海侵层沉积记录,或只有一部分。因此,查明古河道发育时间有助于判断海相层的年龄。

以前人上述研究为基础,本文以渤海湾沿海低地为研究区,选取记录古河道发育的典型钻孔,通过岩心综合研究、AMS  $^{14}\text{C}$ 测年和OSL测年,在修订古河道的发育时代的基础上,重建渤海湾沿海低地近40 ka以来的地质环境演化和对海面变化的响应。

## 1 研究区地质概况

渤海由辽东湾、渤海湾、莱州湾、中央盆地和渤海海峡组成,平均水深18 m,最深处不超过30 m,渤海海峡由于潮流冲刷,局部水道深达60 m以上<sup>[15]</sup>。渤海湾西岸沿海低地位于渤海西部,是由黄河、海河、滦河等河流多次决口改道、泛滥形成。无论地下还是地面均遗留众多古河道<sup>[14]</sup>。构造位置总体位于华北拗陷区(图1),区内主要3级构造单元济阳拗陷、埕宁隆起、黄骅拗陷和沧县隆起呈北东-南西向相间分布<sup>[16]</sup>,第四系沉积物厚约400~500 m。

## 2 材料和方法

### 2.1 取样

在距离现代岸线约65 km的渤海湾沿海低地,通过机械钻探获取1个30 m的机械钻孔(38°38'52.2"N、116°48'57.7"E,孔口高程+5.16 m)(图1),取心率大于95%。岩心通过PVC管保存运输至实验室。在实验室将岩心剖开清理后,据沉积物颜色、粒度组成和沉积构造等特征,进行岩心编录,以20 cm间隔连续取样,用于微体古生物鉴定(有孔虫和硅藻),10~20 cm间隔获得192个粒度分析样品,同时获取AMS  $^{14}\text{C}$ 测年样品12个、OSL(光释光)测年样品4个。

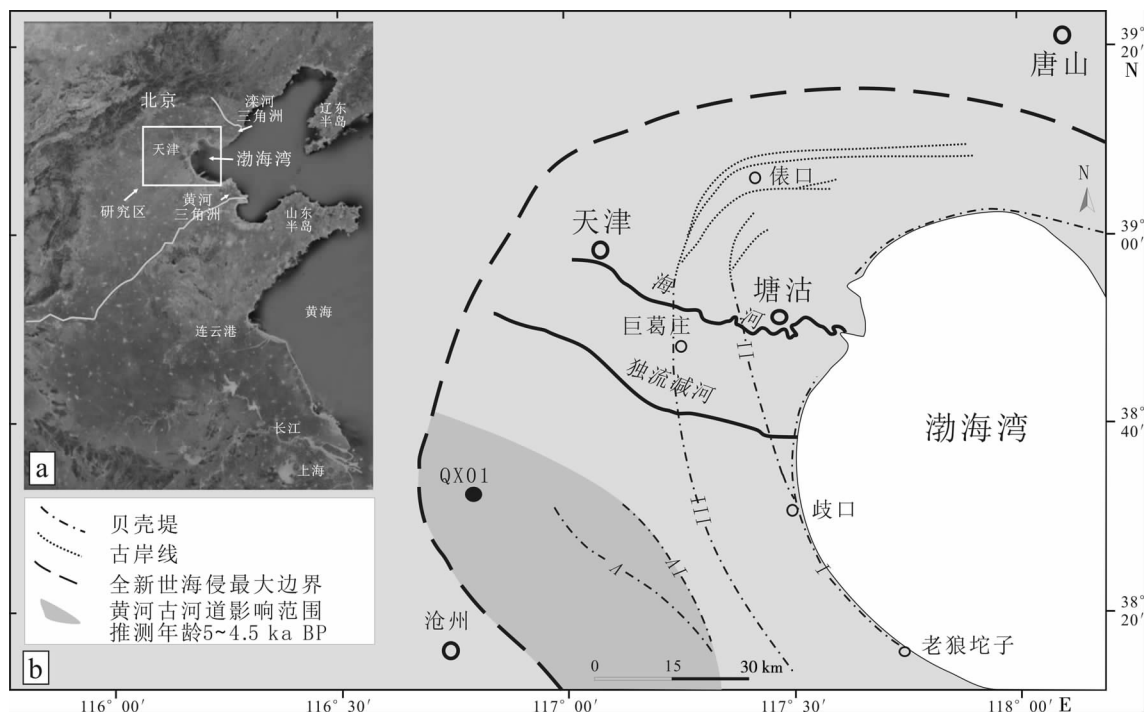


图1 取样位置及研究区概图

(据文献[17]改绘;贝壳堤和古岸线数据据文献[18]和文献[19],全新世海侵最大范围和黄河古河道影响范围据文献[1])

Fig. 1 Sampling site and sketch map of the coastal lowland of Bohai Bay



图2 QX01孔29.5 m处筛选出的贝壳(a)及用于AMS  $^{14}\text{C}$ 测年的贝壳(b)

Fig. 2 Shells winnowed from depth of 29.5 m, Core QX01 (a) and the shell samples for AMS dating (b)

## 2.2 鉴定和测试

在天津地质调查中心对沉积物进行粒度分析。前处理步骤:取2 g左右放入烧杯,加入0.5%的六偏磷酸钠( $\text{NaPO}_3$ )<sub>6</sub>,浸泡24 h,待测。激光粒度分

析仪型号为Microtrac S3500型,测量范围为0.3~2 000  $\mu\text{m}$ 。根据矩法<sup>[20]</sup>计算出粒度参数,包括平均粒径、分选系数( $\sigma$ )、偏态( $Sk$ )和峰态( $Ku$ )。采用尤登-温德华(Udden-Wentworth)松散岩类等比制粒度分级方法,沉积物分类和命名采用谢帕德的沉积物三角图解法<sup>[21]</sup>。有孔虫和硅藻鉴定参见文献[17]。

AMS  $^{14}\text{C}$ 样品在美国BETA实验室进行加速器质谱(accelerator mass spectrometry, AMS)  $^{14}\text{C}$ 测年,所有样品的测试结果均据 $\delta^{13}\text{C}$ 值进行分馏效应校正成为惯用年龄。对于泥炭样品和陆相贝壳样品采用Intcal13曲线,对于海洋样品,在惯用年龄的基础上需进行包括海洋贮存库效应和海洋曲线校正,校正软件版本为Calib Rev 7.0.2<sup>[22-23]</sup>。

OSL测年方法广泛用于各种成因沉积物定年<sup>[24-25]</sup>。文中的OSL测年样品,采用直径5 cm、长10 cm的钢管直接插入岩心中获得,然后密封、防震保存,由伊利诺伊大学地球和环境科学学院(Department of Earth and Environmental Sciences, University of Illinois-Chicago)的光释光实验室完成测试。

## 3 结果

具体的岩心描述和年龄结果参见表1~3。结果

表 1 QX01 孔岩心描述及沉积相划分一览表  
Table 1 List of the core descriptions and sedimentary facies analysis

深度/m	黄海 85 高程/m	QX01 孔岩性描述(38°38′52. 2″N、116°48′57. 7″E, 孔口高程+5. 16 m)	沉积相划分
1. 00~2. 75	+4. 16~+2. 41	黏土质粉砂,暗棕色,固结较好,1. 9 m 以下出现砂泥互层,泥层厚 2~5 cm,与上部地层为突变接触	陆相洪泛沉积
2. 75~5. 60	+2. 41~-0. 44	黏土质粉砂,棕色~灰黄棕色,有锈染,铁锰核,含粉砂层,砂泥互层,泥层厚 5~10 cm	
5. 60~12. 90	-0. 44~-7. 74	黏土质粉砂,10YR4/4 棕色~10YR4/3 浊黄棕色,6. 1~6. 3 m 见小钙核,零星贝屑,在 7. 3 m、8. 2 m、8. 7 m、9. 1 m、9. 6 m、11. 3 m 处分别见 5 cm 厚的炭屑层;9. 6 m、11. 2 m 和 12. 9 m 见海相贝壳碎片	海陆过渡相沉积
12. 90~13. 20	-7. 74~-8. 04	底泥炭层(8 057~7 952 cal BP),黑色	底泥炭
13. 20~17. 70	-8. 04~-12. 54	黏土质粉砂,2. 5Y5/1~5/3,黄灰色~黄棕色,13. 5 m 以下含小钙核、细小贝屑,14. 9~15. 6 m 含较多贝屑,见完整小旋螺,15. 1 m 处见较大贝屑(牡蛎片),16. 8 m 处见小旋螺	湖沼相沉积
17. 70~29. 40	-12. 54~-24. 24	该层 12. 4 m 厚(黄海 85 高程:-24. 24~-11. 84 m),主要为砂质沉积,含量达到 80%,黏土含量仅为 1%,其余为粉砂。其中 17. 7~18. 3 m 为 2. 5Y4/6 橄榄棕色;18. 3~20 m 为 2. 5Y5/4 黄棕色,粒度较上层细,含云母;20~28. 65 m 为 10YR5/6 黄棕色~10YR4/4 橄榄棕,含少量云母、零星贝屑;28. 65~29. 4 m 为 10YR4/2 暗灰黄色~10YR4/4 橄榄棕,含贝屑,与下层侵蚀接触	古河道砂质沉积
29. 40~29. 65	-24. 24~-24. 49	细砂,10YR4/1 黄灰色,含贝屑(海相),与下层侵蚀接触	海侵沉积
29. 65~29. 72	-24. 49~-24. 56	黏土质粉砂,10YR4/3 黄棕色,含贝屑堆积,钙核(风暴沉积?),海洋风暴等高能事件影响下的混杂沉积(图 2)	
30. 00~29. 72	-24. 56~-24. 84	细砂,10YR5/1 黄灰色,含云母贝屑,块状层理,为陆相沉积	陆相洪泛沉积

表 2 QX01 孔 AMS <sup>14</sup>C 年龄一览表  
Table 2 List of AMS <sup>14</sup>C ages of Core QX01

BETA 编号	样品深度/m	测年材料	δ <sup>13</sup> C/‰	惯用年龄/a	校正年龄(2σ)(cal BP)/a	概率	采用的年龄(cal BP)/a
332791	3. 80	有机物	-23. 9	1 700±30	1 637~1 544 1 697~1 646	0. 75 0. 25	1 637~1 544
329647	5. 52	有机物	-22. 5	4 300±30	4 892~4 829 4 960~4 924 4 908~4 899 4 917~4 913	0. 88 0. 10 0. 02 0. 01	4 892~4 829
329644	6. 35	有机物	-23. 6	5 010±50	5 900~5 644	1. 00	5 900~5644
329643	7. 20	有机物	-25. 0	5 090±30	5 831~5 748 5 912~5 843	0. 62 0. 38	5 912~5 748
329641	8. 20	泥炭	-24. 6	5 830±30	6 732~6 554	1. 00	6 732~6 554
329642	8. 70	泥炭	-24. 3	6 030±40	6 981~6 778 6 763~6 755	0. 99 0. 01	6 981~6 778
329645	9. 16	泥炭	-27. 4	6 220±40	7 133~7 006 7 250~7 140	0. 55 0. 45	7 250~7 006
329640	11. 39	泥炭	-25. 3	7 010±30	7 935~7 786 7 771~7 763	0. 99 0. 01	7 935~7 786
329646	13. 05	泥炭	-25. 1	7 200±30	8 057~7 952 8 108~8 092 8 128~8 122 8 151~8 143	0. 97 0. 02 0. 01 0. 01	8 057~7 952
331460	15. 30	有机物	-22. 9	19 000±90	23 154~22 560	1. 00	23 154~22 560
384666	29. 50	贝壳	-7. 0	>43 500			
384665	29. 50	贝壳	-8. 0	42 730±580	44 718~46 914	1. 00	44 718~46 914

表 3 QX01 孔 OSL 年龄一览表  
Table 3 List of OSL ages of Core QX01

样品 编号	实验室样品 编号	样品深度/ m	石英颗粒粒径/ $\mu\text{m}$	测片数 <sup>a</sup>	离散度 <sup>b</sup> / %	等效剂量 <sup>c</sup> / Gy	$w_b/10^{-6}$			含水率/ %	宇宙射线剂量 <sup>e</sup> / ( $\text{mGy} \cdot \text{a}^{-1}$ )	剂量率 ( $\text{mGy} \cdot \text{a}^{-1}$ )	OSL 年龄/ a
							U <sup>d</sup>	Th <sup>d</sup>	K <sup>d</sup>				
DSL-1	UIC3482	1.15~1.20	4~11	30/30	108±14	3.69±0.51	2.6±0.1	13.6±0.1	2.15±0.02	40±10	0.06±0.01	2.73±0.14	1 340±205 <sup>g</sup>
DSL-20	UIC3489	15.25~15.30	63~100	30/30	38±5	34.87±2.61	2.0±0.1	9.6±0.1	1.83±0.02	30±5	0.03±0.01	2.29±0.13	15 225±1 560 <sup>g</sup>
DSL-25	UIC3492	22.65~22.70	63~100	35/37	33±4	66.12±4.39	0.8±0.1	4.5±0.1	2.12±0.02	30±5	0.02±0.01	1.98±0.10	33 450±3 470 <sup>g</sup>
DSL-27	UIC3493	26.82~26.87	63~100	42/45	39±4	73.07±4.41	1.4±0.1	6.2±0.1	1.89±0.02	40±5	0.02±0.01	1.85±0.10	36 210±3 470 <sup>g</sup>

注:<sup>a</sup>用于计算等效剂量的测片数/原始测片数;  
<sup>b</sup>离散度反映精度超过仪器误差,≤20%(2倍方差)指示等效剂量低离散度分布;  
<sup>c</sup>等效剂量的测量采用单片再生剂量法<sup>[24]</sup>,激发光源为蓝光(470±20 nm),纯石英颗粒大约200~500粒/片(约2 mm平面面积),等效剂量的计算采用CM模型(Central Age Model)<sup>[25]</sup>;  
<sup>d</sup>U、Th、K含量由加拿大安全大略激活实验室采用电感耦合等离子体质谱仪分析测定(Activation Laboratory LTD, Ontario, Canada);  
<sup>e</sup>宇宙射线剂量计算参见文献<sup>[26]</sup>;  
<sup>f</sup>误差值为1倍方差,包括系统误差和偶然误差,基准年为AD2000;  
<sup>g</sup>等效剂量及相关年龄采用有限混和模型计算(Finite Mixture Model)<sup>[25]</sup>。

显示,从下向上依次为陆相洪泛沉积(30~29.72 m)、海侵沉积(29.72~29.4 m)、陆相河道沉积(29.4~17 m)、陆相湖沼沉积(17~13.2 m)、全新世海侵沉积(13.2~5.6 m)和陆相洪泛沉积(5.6~0 m),记录了两次海侵旋回。

根据平均粒径变化趋势(图 3)从下向上可以划分为:30~17 m,砂质沉积物,黏土平均含量仅为1%,几乎均为>63  $\mu\text{m}$ 的砂;17~16.4 m,沉积物粒度快速变细,表现为黏土含量迅速增加,从0.4%增加到61.4%,>63  $\mu\text{m}$ 的砂含量从90%多迅速降低到20%至1.6%;16.4~13.4 m,沉积物粒度表现为粗化的趋势,黏土含量由60%多降低到10%,砂的含量从1.6%增加到21.8%;13.4 m以上,沉积物粒度整体上变化不大,有一个细化—粗化—细化的过程。

有孔虫结果(图 4)显示,QX01 孔有孔虫主要集中在埋深6.6~11.2 m,共发现12属25种。有孔虫以低盐度的半咸水种或广盐性种为主,主要有 *Nonion glabrum* (光滑九字虫)、*Ammonia beccarii* vars. (毕克卷转虫变种)、*Pseudononionella variabilis* (多变假小九字虫)和 *Pseudononion minutum* (小假九字虫)等。有孔虫个体数量多变,20 g干样最少含有孔虫2个,最多可达3万余个。有孔虫优势度高、分异度低,复合分异度为0.12~1.45。

根据有孔虫的组合及含量等特征,将有孔虫分为6个组合带(图 4),自下而上描述如下:

(1)I带:埋深11.2~10.8 m,有孔虫丰度较低,20 g干样含量为772~404个,有孔虫分异度极低,为0.12~0.18;优势度高,*Nonion glabrum* 含量达95%以上,其他有 *Ammonia beccarii* vars. 和 *Pseudoeponides anderseni* (缝裂假穹背虫)等,代表了低盐度的半咸水环境,推测为偶尔受到海洋影响的高潮线之上的洼地沼泽环境。

(2)II带:埋深10.8~9.4 m,有孔虫丰度极低,20 g干样中不含有孔虫或仅见数个个体,偶见 *Nonion glabrum* 和 *Ammonia beccarii* vars.,表明为潮上的盐沼低地环境。

(3)III带:埋深9.4~8.8 m,有孔虫丰度较低,20 g干样含量为68~338个,有孔虫分异度较低,为0.66~0.86;优势度较高,*Nonion glabrum* 含量达70%~85%,其他有 *A. granulumbilica* (粒脐卷转虫)、*A. beccarii* vars. 和 *Elphidium magellanicum* (缝裂希望虫)等。*A. granulumbilica* 在现代渤海湾常见于潮间带环境,*Elphidium magellanicum* 在

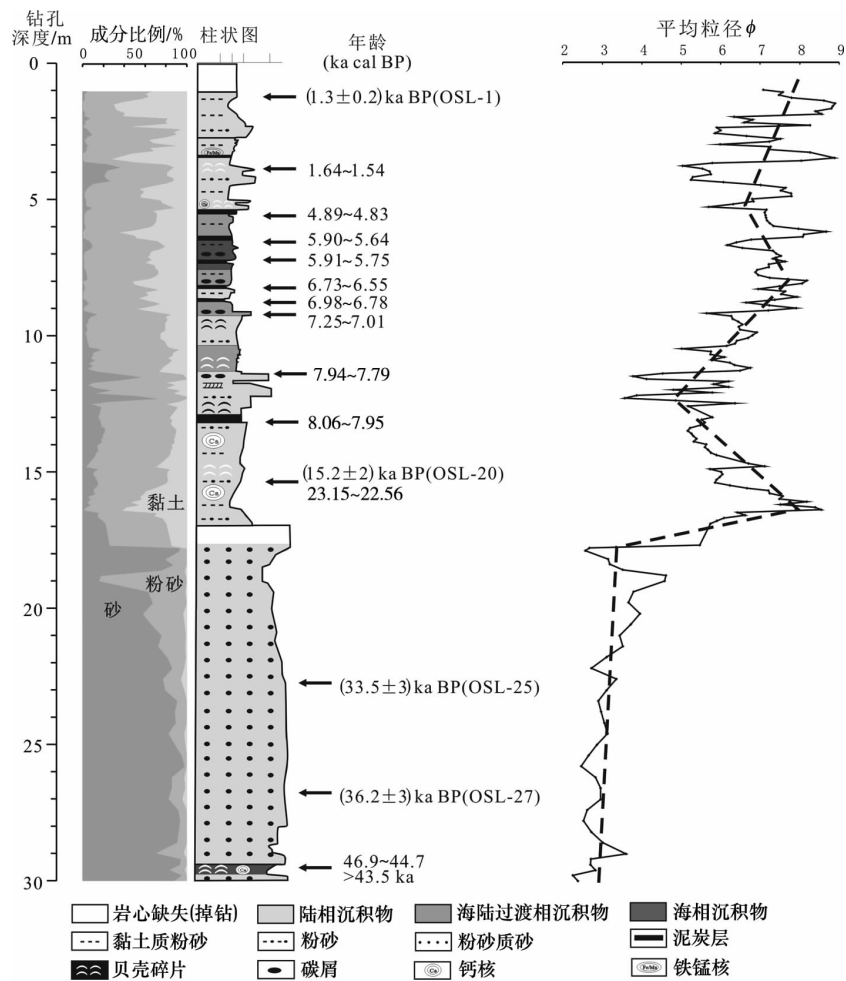


图 3 QX01 孔沉积相和粒度综合图  
Fig. 3 Depositional facies and grain size distribution of Core QX01

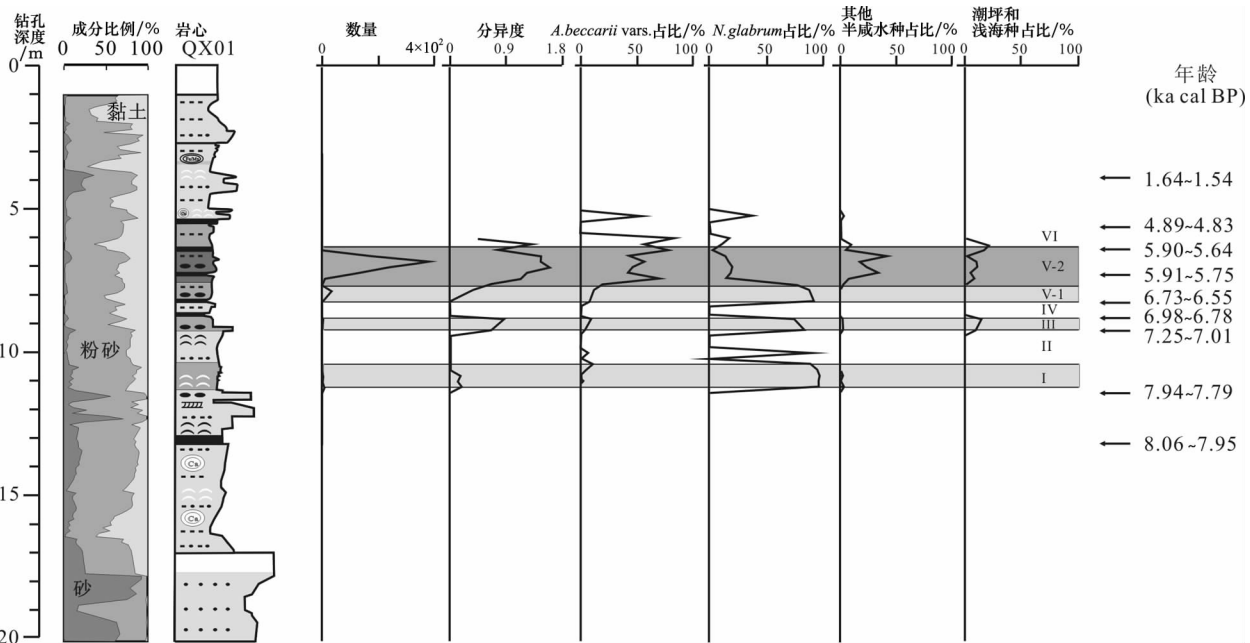


图 4 QX01 孔有孔虫图谱<sup>[17]</sup>  
Fig. 4 Foraminiferal spectrum of Core QX01<sup>[17]</sup>



现代渤海湾多见于潮间带下部及浅海区(该种个体小,易于被搬运),二者含量 8%~15%,可能是由大潮经潮道及河道搬运至此。根据该组合推测为偶尔受到海洋影响的高潮线之上的洼地沼泽环境。

(4)IV 带:埋深 8.8~8.2 m,不含或偶见数个有孔虫。推测为位于潮上带的低地环境。

(5)V-1 带:埋深 8.2~7.6 m,有孔虫个体数量由 7.8 m 处的 3 456 个降为 7.6 m 处的 103 个,组成与 I 带类似,推测为偶尔受到海洋影响的高潮线之上的洼地沼泽环境。

V-2 带:埋深 7.6~6.4 m,有孔虫丰度极高,20 g 干样含量达 3 万余个。有孔虫分异度较以上各带增高,为 1.11~1.45。有孔虫优势度仍较高,以 *A. beccarii* vars. 为主,含量 43%~80% 不等,除此之外,适于低盐半咸水环境生长的 *Nonion glabrum*、*P. variabilis* 和 *P. minutum* 等含量为 16%~43% 不等,还有含量约 1%~9% 的适于潮间带和浅海区的种。推测为与海连通较好的潟湖洼地环境。

(6)VI 带:6.4~5.2 m,不含或偶见数个有孔虫。推测为位于潮上带的盐沼低地环境。

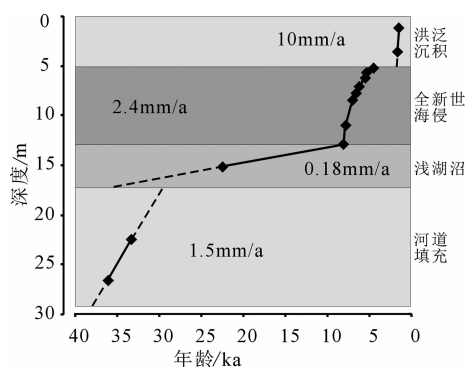
尽管总体上 QX01 孔硅藻稀少,但深 11 m 和 11.39 m 处硅藻却极为丰富,共鉴定出 26 个属种的硅藻。镜下硅藻大部分较完整,外形为圆形的咸水种的 *Coscinodiscus* spp.、*Achtiocyclus* spp.,以及长条形的、易破碎的 *Thalassiosira nitzschoides*,其完整率约为 60%。对完整程度大于 50% 的硅藻进行了统计,结果表明深 11.39 m 处的泥炭沉积物不含咸水-半咸水(M-B)种硅藻,半咸水-淡水(B-F)种硅藻占到 4%,淡水(F)种硅藻高达 90%,其中沼泽环境生息的 *Eunotia* spp. 所占比例最高,达 33%,淡水底栖的 *Synedra ulna* 占 26%,推测为略受海水影响的沼泽湿地环境。其上,11 m 处的咸水-半咸水(M-B)种硅藻占 15.5%,半咸水-淡水(B-F)种硅藻占 0.4%,淡水(F)种硅藻占 84.1%。其中湖沼相浮游种的 *Melosira ambigua* 占 25%,喜碱性湖沼相浮游种的 *Melosira granulata* 占 20%,浮游种 *Nitzschia gastrum* 占 23%,淡水底栖的 *Diploneis ovalis* 占 8%;外洋浮游的 *Coscinodiscus* spp.、*Achtiocyclus* spp. 分别为 3%和 5%;半咸水种的 *Nitzschia lorenziana*、*Navicula marina* 等占 6%,表明深 11 m 处为受海水影响的盐沼环境。在深 11.2 m 处也见有硅藻,但含量低,3 张薄片见 24 个硅藻,主要为咸水种-半咸水种占 17%,淡水种占

87%,未达到 200 个硅藻的统计要求。从深 11.39 m 到 11 m 为沼泽湿地环境向盐沼环境的转化,受海水影响有增强趋势。

11.39 m 处 AMS  $^{14}\text{C}$  年龄为 7.94~9.79 ka cal BP,5.5 m 处 AMS  $^{14}\text{C}$  年龄为 4.89~4.83 ka cal BP,在这个约 8~4.8 ka cal BP 的时段,QX01 孔所在位置,受到海洋环境的影响,经历了洼地—盐沼低地—洼地—与海连通较好的潟湖洼地—盐沼低地的环境演化过程,在埋深 7.6~6.4 m (6.0~5.75 ka cal BP 时),受到海洋的影响最强。

根据沉积相和年龄框架计算出的平均沉积速率(图 5)显示,两个光释光数据揭示 17 m 以下的砂质沉积物的沉积速率为 1.5 mm/a,17 m 至 13.2 m 底泥炭层段沉积速率 0.18 mm/a,13.2 m 至 5.6 m 段平均沉积速率为 2.4 mm/a,5.6 m 至 3.8 m 段平均沉积速率<1 mm/a,3.8 m 以上沉积速率为 10 mm/a。

沉积速率<1 mm/a 的两段分别发生在 29.7 ka 至 8 ka cal BP 和 4.89~1.64 ka cal BP,分别对应末次盛冰期低海面时期和全新世海侵退出该区后。



实线为根据年龄和深度计算的平均沉积速率,虚线为同沉积层中推测的沉积速率。

图 5 QX01 孔平均沉积速率图

Fig. 5 Sedimentation rates of the different depths calculated by both AMS  $^{14}\text{C}$  and OSL data in Core QX01

## 4 讨论

结合 QX01 孔的综合沉积相划分和年龄数据,重建了该区 44 ka 以来的地质环境演化过程。

最下部的沉积物为第 II 海相层以下的陆相沉积,然后发生海侵。第 II 海相层沉积物厚度仅为 0.3 m,含完整海相贝壳和陆相贝壳及贝壳碎片(单瓣光滑河蓝蛤、毛蚶碎片及牡蛎碎片等)和钙核的混杂堆积,取该层中的完整贝壳(螺类,未定名)进行 AMS

$^{14}\text{C}$  测年(图 2), 显示贝壳年龄均大于 43.5 ka, 推测该次海侵发生在 MIS 3 早期或者为 MIS 5。结合与其相邻 QX02 和 QX03 钻孔的第 II 海侵层的厚度等信息<sup>[13]</sup>, 推断第 II 海侵层在本文取样位置未能完整保存, 而是被后来的河流作用侵蚀。换言之, 被低海面时的河道下切侵蚀, 然后随着海面上升又被河道砂填充。OSL 年龄显示该层河道砂的年龄为 36.2~33.5 ka, 平均沉积速率 1.5 mm/a。据此平均沉积速率推算, 河道砂层在 17 m 结束时的年龄约为 29.7 ka, 而在 29.4 m 发生填充时的年龄为 37.9 ka。由此获得该层河道砂的总体发育时间为 37.9~29.7 ka, 此时与 MIS 3 阶段的相对高海面对应。而该河道的形成(下切)时间必然要早于该阶段, 即该河道最有可能的形成时间是 MIS 4 或者 MIS 6 阶段的低海面时期。具体是前者抑或后者, 现有的数据还无法给出准确判断。

在 29.7 ka 以后河道充填结束, 该区变成浅湖沼环境, 地层中见较多贝屑, 包括完整的淡水小旋螺、小钙核, 15.25~15.3 m 处的 OSL 的年龄为  $(15.2 \pm 2)$  ka BP, 而 15.3 m 处的有机物测得的 AMS  $^{14}\text{C}$  年龄为 23.15~22.56 ka cal BP。虽然有机物 AMS  $^{14}\text{C}$  给出的年龄较 OSL 明显偏老, 但是它们均显示此阶段为末次盛冰期的极端低海面时期。根据河道结束发育和底泥炭出现的年龄, 该时段沉积速率仅为 0.18 mm/a, 可以视为沉积间断, 此过程一直持续到全新世早期的 8 ka。

8 ka 以来进入全新世早期, 以底泥炭形成为地层重要界线, 该区重新进入受海水影响时期, 全新世海侵逐渐由东向西侵入该区。最强海洋影响发生在 6.0~5.75 ka cal BP, 之后海水退出该区<sup>[17]</sup>。

海水退出该区后, 沉积作用重新停止或沉积速率非常低。根据 OSL 和 AMS  $^{14}\text{C}$  年龄计算, 表层的陆相层平均沉积速率为 10.4 mm/a。据此推断, 至 5 m 处(5.2 m 以上不含有孔虫, 5 m 处可以定义为陆相影响开始层位, 即洪泛沉积开始时间)的年龄为 1.7 ka, 这与下部的海洋影响结束时间 4 ka 左右之间有一个明显的沉积间断, 即 4~1.7 ka 这个时间段没有沉积。

QX01 孔位于历史时期黄河第 2 次在渤海湾黄骅入海<sup>[1]</sup>影响范围内, 时间为 5.0~4.5 ka BP。QX01 孔显示 4 ka 左右该区海洋影响才完全结束, 以 5 m 以上有孔虫消失为地层界线。而在 5.0~4.5 ka BP 时段在黄骅入海的黄河, 并未明显影响

到该区的沉积。1.7 ka 以后, 河流在该区开始沉积, 形成洪泛沉积。

## 5 结论

距现代岸线 65 km 处的 30 m 深的钻孔, 记录到了 MIS 3 晚期以来的河道充填与环境演化过程:

(1) 该孔沉积物从下向上依次记录到: 陆相洪泛沉积; 海侵沉积, >43.5 ka; 砂质沉积物, 河道填充沉积, 约 37.9~29.7 ka; 沉积物由砂质变为黏土质, 由河道填充转为浅湖沼环境, 约 29.7~8 ka; 全新世海侵沉积, 8~4 ka, 沉积环境由陆相转为海陆过渡相, 6~5.75 ka cal BP 海侵达到最强, 之后逐渐退出该区; 洪泛沉积, 约 1.7 ka cal BP 至今。

(2) MIS 4 或 6 阶段, 海面较低, 河道下切, 形成古河道, 下切最深处的现代高程为 -24.2 m; MIS 3 阶段早期, 海面上升, 37.9 ka 河道开始填充, 至 29.7 ka 完成填充的层位, 对应现代高程 -11.8 m; 末次盛冰期至早全新世时为浅湖沼环境, 沉积作用停止或速率非常低; 随着末次盛冰期的结束, 海洋作用增强, 进入全新世海侵沉积阶段; 之后, 沉积作用停止。1.7 ka 以来, 随着河流作用的不断增强, 该区进入河流控制的洪泛沉积阶段。

(3) 发现了两次沉积间断, 分别发生在末次盛冰期的低海面时期和 4~2 ka 时的海水退出、河流作用微弱时期。

## 参考文献

- [1] Xue C T. Historical changes in the Yellow River delta, China [J]. Marine Geology, 1993, 113: 321-329.
- [2] 陈永胜, 王福, 田立柱, 等. 渤海湾西岸全新世沉积速率对河流供给的响应[J]. 地质通报, 2014, 33(10): 1582-1590.
- [3] Wang F, Wang H, Zong Y, et al. Sedimentary dynamics along the West Coast of Bohai Bay, China, during the 20th century[J]. Journal of Coastal Research, 2014, 30(2): 379-388.
- [4] 方晶, 武亚芳, 李瑞武, 等. 辽宁沿海早、中期全新世海进中的一次海退事件探讨[J]. 地学前缘, 2009, 16(2): 396-403.
- [5] 谢志仁, 夏胜俊. 面向未来的海面变化研究[J]. 地学前缘, 1997, 4(2): 235-246.
- [6] Church J A, Clark P U, Cazenave A, et al. Sea level change [R]// Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of



- Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK; New York, USA: Cambridge University Press, 2014: 1137-1216.
- [7] 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.
- [8] 阎玉忠, 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.
- [9] Wu C, Xu Q H, Zhang X Q, et al. Palaeochannels on the North China plain: Types and distributions[J]. Geomorphology, 1996, 18(1): 5-14.
- [10] Wu C, Zhu X Q, Ma Y H. Compiling the map of shallow buried palaeochannels on the North China plain[J]. Geomorphology, 1996, 18(1): 47-52.
- [11] 赵松龄, 杨光复, 苍树溪, 等. 关于渤海湾西岸海相地层与海岸线问题[J]. 海洋与湖沼, 1978, 9(1): 15-25.
- [12] 陈永胜, 王宏, 裴艳东, 等. 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, 2012, 42(3): 747-759.
- [13] 王福, 陈永胜, 李建芬, 等. AMS  $^{14}\text{C}$  测年揭示的渤海湾沿海低地第 II 海相层年龄[J]. 地质通报, 2014, 33(10): 1591-1595.
- [14] 吴忱, 朱宣清, 何乃华, 等. 华北平原古河道的形成研究[J]. 中国科学: B 辑, 1991(2): 188-197.
- [15] 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.
- [16] 李德生. 渤海湾及沿岸盆地的构造格局[J]. 海洋学报, 1980, 2(4): 93-101.
- [17] Wang F, Li J, Chen Y, et al. The record of mid-Holocene maximum landward marine transgression in the west coast of Bohai Bay, China[J]. Marine Geology, 2015, 359: 89-95.
- [18] 苏盛伟, 商志文, 王福, 等. 渤海湾全新世贝壳堤: 时空分布及海面变化标志点[J]. 地质通报, 2011, 30(9): 1382-1395.
- [19] 王宏, 陈永胜, 田立柱, 等. 渤海湾全新世贝壳堤和牡蛎礁: 古气候和海面变化[J]. 地质通报, 2011, 30(9): 1405-1411.
- [20] McManus J. Grain size determination and interpretation[M]//Techniques in Sedimentology. Oxford: Blackwell, 1988: 63-85.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.8—2007 海洋地质调查规范第 8 部分: 海洋地质地球物理调查[S].
- [22] Reimer P J, Bard E, Bayliss A, et al. IntCal13 and MARINE13 radiocarbon age calibration curves 0-50000 years cal BP[J]. Radiocarbon, 2013, 55(4): 1869-1887.
- [23] Stuiver M, Braziunas T. Modelling atmospheric  $^{14}\text{C}$  influences and  $^{14}\text{C}$  ages of marine samples to 10000 BC[J]. Radiocarbon, 1993, 35: 137-189.
- [24] Duller G. Luminescence dating of Quaternary sediments: Recent advances[J]. Quaternary Sciences, 2004, 19: 183-192.
- [25] Bianca M. Luminescence chronology of Pleistocene marine terraces of Vaticano Peninsulas (Calabria Southern Italy)[J]. Quaternary International, 2011, 232: 114-121.
- [26] Murray A S, Wintle A G. The single aliquot regenerative dose protocol: Potential for improvements in reliability[J]. Radiation Measurements, 2003, 37: 377-381.
- [27] Galbraith R F, Roberts R G, Laslett G M, et al. Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rock shelter, northern Australia: Part I. Experimental design and statistical models[J]. Archaeometry, 1999, 41: 339-364.
- [28] Prescott J R, Hutton J T. Cosmic ray contribution to dose rates for luminescence and ESR dating: Large depths and long-term time variations [J]. Radiation Measurements, 1994, 23: 497-500.