

doi: 10.12029/gc20210725002

方晶, 王福, 商志文, 王天娇, 严霞, 康钦威, 曲英晖, 刘宇飞. 2025. 7.8~7.4 ka 天津海河南岸平原富硅藻层形成与相对海平面变化[J]. 中国地质, 52(3): 1069–1079.

Fang Jing, Wang Fu, Shang Zhiwen, Wang Tianjiao, Yan Xia, Kang Qinwei, Qu Yinghui, Liu Yufei. 2025. 7.8–7.4 ka environment of diatom-rich layer and relative sea level change in the south plain of the Haihe River, Tianjin[J]. *Geology in China*, 52(3): 1069–1079(in Chinese with English abstract).

7.8~7.4 ka 天津海河南岸平原富硅藻层形成 与相对海平面变化

方晶¹, 王福^{2,3,4}, 商志文^{2,3,4}, 王天娇⁵, 严霞⁵, 康钦威⁵, 曲英晖⁵, 刘宇飞⁵

(1. 天津名大方地质勘查有限公司, 天津 300192; 2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 3. 中国地质调查局海岸带地质环境重点实验室, 天津 300170; 4. 天津市海岸带地质过程与环境安全重点实验室, 天津 300170; 5. 天津师范大学地理与环境科学学院, 天津 300387)

摘要:【研究目的】研究全新世古环境和海面变化对于预测现代地质环境演化趋势具有重要意义。【研究方法】本文以渤海湾西岸沧州北部为研究区, 通过取自第 V 道贝壳堤附近的 3 个 30 m 深钻孔样品的硅藻分析和¹⁴C 年代学研究, 重建了富硅藻层的古环境和相对海面。【研究结果】3 个钻孔虽硅藻整体稀少, 但各存在一层由泥炭及腐殖质灰色黏土组成的富硅藻层, 厚 10~60 cm, 由海向陆方向厚度变薄。其中, DC01 孔, 7473 cal a BP 由海水影响的沼泽环境转为陆相淡水沼泽环境, 富硅藻层与下伏沼泽层指示当时的相对海面低于-6.37 m; QX02 孔, 7513 cal a BP 由盐沼环境(Ⅰ带)转为受海水影响的沼泽环境(Ⅱ带)再转为受海水影响的盐沼环境(Ⅲ带), Ⅰ带和Ⅱ带界限处指示相对海平面为-6.68 m; QX01 孔, 7836 cal a BP 由淡水沼泽(Ⅰ带)转为盐沼环境(Ⅱ带), Ⅰ带和Ⅱ带界线指示相对海面为-7.68 m。【结论】海面在 7.4~7.8 cal ka BP 约 350 年的时间内上升了近 1 m, 海水影响到第 V 道贝壳堤以西, 盐沼和淡水沼泽环境是全新世海侵达到最大范围时岸线附近的主要环境类型, 因此, 在现代海面上升背景下, 沼泽化是海岸地区面临的一个主要环境问题。

关键词: 相对海面变化; 富硅藻层; 淡水沼泽; 盐沼; 海洋地质调查; 渤海湾西岸

创新点: (1) 首次在渤海湾西岸平原海河以南区域发现富含硅藻的泥炭层; (2) 通过硅藻组合指示的古环境指标, 用来重建海面和海侵过程; (3) 通过全新世古环境重建研究, 发现沼泽化是海面上升背景下现代海岸带地区面临的主要环境问题。

中图分类号: P736; P731.23 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)03-1069-11

7.8–7.4 ka environment of diatom-rich layer and relative sea level change in the south plain of the Haihe River, Tianjin

FANG Jing¹, WANG Fu^{2,3,4}, SHANG Zhiwen^{2,3,4}, WANG Tianjiao⁵, YAN Xia⁵, KANG Qinwei⁵,
QU Yinghui⁵, LIU Yufei⁵

(1. Tianjin Mingdafang Geological Exploration Ltd., Tianjin 300192, China; 2. Tianjin Centre, China Geological Survey, Tianjin

收稿日期: 2021-07-25; 改回日期: 2022-04-12

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20189506)和天津市科委应用基础计划项目面上项目(18JCYBJC91100)联合资助。

作者简介: 方晶, 男, 1963 年生, 教授, 主要从事硅藻分析与海岸带第四纪环境演变研究; E-mail: mdfangjing@163.com。

通信作者: 王福, 男, 1979 年生, 研究员, 主要从事海岸带与第四纪地质环境研究; E-mail: tjwangfu@163.com。

300170, China; 3. Key Laboratory of Coast Geo-environment, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 4. Tianjin Key Laboratory of Coast Geological Processes and Environmental Safety, Tianjin 300170, China; 5. School of Geography and Environmental Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

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

[Objective] Studying the Holocene paleoenvironment and sea-level changes is of great practical significance for predicting the modern geological environment evolution trend. **[Methods]** This paper analyzes the diatoms and AMS ^{14}C dating data from three 30 m deep drilling cores collected near Chenier V of northern Cangzhou, Bohai Bay. **[Results]** The diatoms are rare in these drilling cores, and there is only one diatom rich layer in each core, which is composed of peat and humus gray clay. The thickness of the layer is 10 cm to 60 cm, and thinner from seaward to landward. 7473 cal a BP, site of DC01 changed from a sea water influenced swamp environment to a fresh water swamp environment, indicating a relative sea-level lower than -6.37 m; 7513 cal a BP, site of QX02 was transformed from saltmarsh environment (zone I) to sea water influenced shallow swamp, then to salt marsh environment (zone III), The elevation of the boundary between zone I and zone II indicating a relative sea-level of -6.68 m. 7836 cal a BP, site of QX01 was transformed from a freshwater swamp (zone I) to a salt marsh environment (zone II). The boundary between zone I and zone II indicating a relative sea-level of -7.68 m. **[Conclusions]** Relative sea-level raised -1 m over a period of about 350 years from 7.8 to 7.4 cal ka BP and the sea water affected the area to the west of the Chenier V. The salt marshes and freshwater swamps were the main environmental types near the transgression maximum in the Early-Mid Holocene. Under the background of modern sea-level rise, marshification is a major environmental problem that modern coastal areas must face.

Key words: relative sea-level change; rich diatom layer; freshwater swamp; salt marsh; marine geological survey engineering; west coast of Bohai Bay

Highlights: (1) For the first time the rich diatoms peaty layers were found in the south Haihe River on the west coast of Bohai Bay; (2) The salt marsh environment indicated by the combination of diatoms can be used as paleoenvironmental index to reconstruct sea-level change and transgression process; (3) Marshification is the main environmental problem modern coastal areas must face under a rising sea-level background through the Holocene paleoenvironment reconstruction of Bohai Bay.

About the first author: FANG Jing, male, born in 1963, professor, mainly engaged in diatom analysis and Quaternary environmental evolution of coastal lowland; E-mail: mdfangjing@163.com.

About the corresponding author: WANG Fu, male, born in 1979, researcher, mainly engaged in coastal lowland and Quaternary geological environment research; E-mail: tjwangfu@163.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20189506) and Tianjin Natural Science Foundation (No.18JCYBJC91100).

1 引 言

渤海湾西岸平原为新生代以来一直沉降的地区。构造沉降、海面变化和河流带来的泥沙对其形成起着重要的控制作用。特别是末次冰期最盛期以来,随着气候转暖,海面上升,发生冰后期海侵。海水在 8.5~9.7 cal ka BP 到达渤海湾西岸现海岸,当时相对海面为 $-17\sim-15$ m(陈永胜等, 2012; Wang et al., 2020; Li et al., 2021), 其后海水向西侵入渤海湾西岸平原, 约在 6000~7000 年前深入到内陆 50~90 km 的位置, 达到全新世最大海侵范围(Wang et al., 2015; 王福等, 2023)。最大海侵期后

发生海退,海退过程中在海河以北发育了 11 道牡蛎礁,海河以南发育了 5 道贝壳堤,分别代表了海退停滞期海岸线的位置(Wang et al., 2020)。探讨渤海湾西岸平原最大海侵达到的位置,对于研究全新世海侵最高海面及其后海岸线的变迁等具有重要意义。尤其是,在全球变化背景下,21 世纪以来海面将继续上升(IPCC, 2014),沿海地区面临着海岸侵蚀和洪水淹侵的风险(IPCC, 2021),该区的地质环境演化将影响到沿海经济社会的发展,准确分析该区地质环境变化趋势,为优化国土空间格局提供科学依据,是该区可持续发展的必然要求。分析全新世海侵最大时期的古环境

变化,对于指导分析预测现代海岸变化具有现实意义。

很多研究者对渤海湾西岸相对海面的标志和不同时期的相对海面高度进行了研究。苏盛伟等(2011)、李建芬等(2016)、Wang et al.(2020)、王福等(2020, 2023)、Li et al.(2021)通过牡蛎礁和贝壳堤的时空分布、泥炭层海面标志点的定量研究以及盐沼层有孔虫研究等,重建了全新世渤海湾海面变化及其海陆演化过程。陈永胜等(2024)对渤海湾地区第 II 海相层的发育时间与全球海面变化关系进行了研究。Wang et al.(2019)、王福等(2023)评估了现代海面变化对天津和河北海岸带及浅海区的影响。海河以北发育的埋藏牡蛎礁,其牡蛎壳体内泥质沉积物的硅藻极为丰富,学者们运用硅藻分析,对海河以北的渤海湾西北岸平原埋藏牡蛎礁的形成及其反映的环境变化(李冬玲等, 2009; 商志文等, 2010, 2024; 方晶等, 2012a, b)以及牡蛎礁的水平夹层的成因(方晶等, 2012a)等进行了研究和探讨,这些研究为后续工作提供重要参考。然而,位于海河以南的渤海湾西岸贝壳堤平原,因硅藻保存不好,迄今为止很少有利用硅藻分析海河南岸平原的古环境,亦较少涉及全新世海侵达到最大时的海岸古环境变化。

有鉴于此,为探讨最大海侵期海水可能达到的最大边界及其当时海岸带的古环境,本文在海河以

南最老的第 V 道贝壳堤向西至有可能达到的最大海侵位置, 钻取 3 个 30 m 长的机械钻孔, 通过对这些钻孔做硅藻分析, 首次在海河南岸的贝壳堤平原发现了从淡水种到半咸水种和咸水种都存在的富硅藻泥炭层。结合年代学结果, 对该富硅藻层反映的全新世最大海侵可能达到的位置、古海面的指示意义及其古环境演化进行了探讨, 以为现代海岸环境变化趋势研究提供参考。

2 研究区域概况及研究方法

2.1 研究区域概况

渤海湾西岸平原地区地处华北沉降带,自新生代以来一直处于下沉状态。平原上地势平坦,是华北沿海一带地势最低平的地方。其海河以南平原由新到老发育 5 道贝壳堤,分别以 I ~V 表示(图 1)。为恢复渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境,在河北省沧州市的大城县一带自海向陆方向,使用机械钻分别钻取 3 个 30 m 深的孔,孔号分别为 DC01、QX01 和 QX02。并通过 RDK 对各钻孔孔口标高进行了测量。3 个孔垂直海岸沿东西向大致处于一条直线上(表 1,图 1,图 2)。

2.2 研究方法

对 DC01、QX01 和 QX02 这 3 个机械钻孔岩心做硅藻分析。硅藻薄片制作方法如下: 将各钻孔样品以 20 cm(在富硅藻层附近以 10 cm)的间隔取

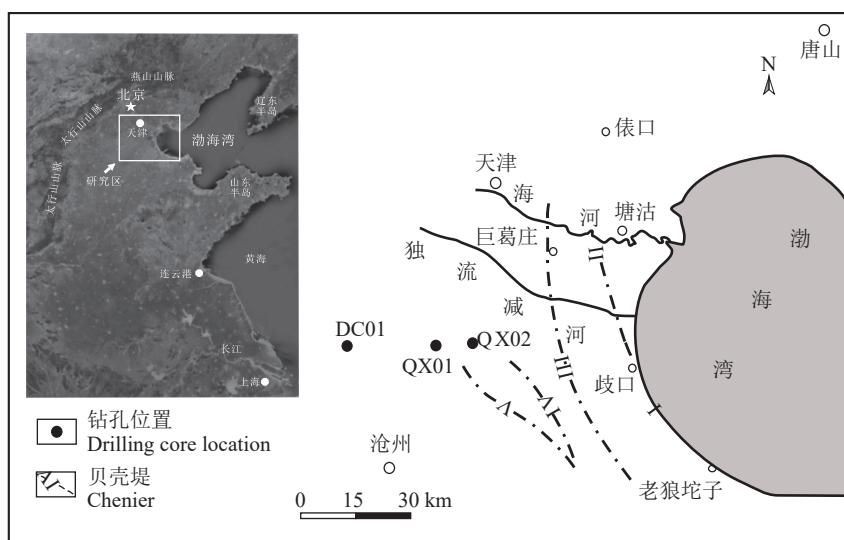


表 1 钻孔信息

Table 1 Borehole information

钻孔号	钻孔地点	地理坐标	孔口高程/m	距现海岸线距离/km
DC01	大城县王裴庄	38°40'9.1"N, 116°39'16.5"E	+3.74	85
QX01	青县盖宿铺村	38°38'52.2"N, 116°48'57.7"E	+5.16	65
QX02	青县刘世印屯	38°38'24.2"N, 116°57'24.2"E	+3.57	53

注：孔口为黄海85高程。

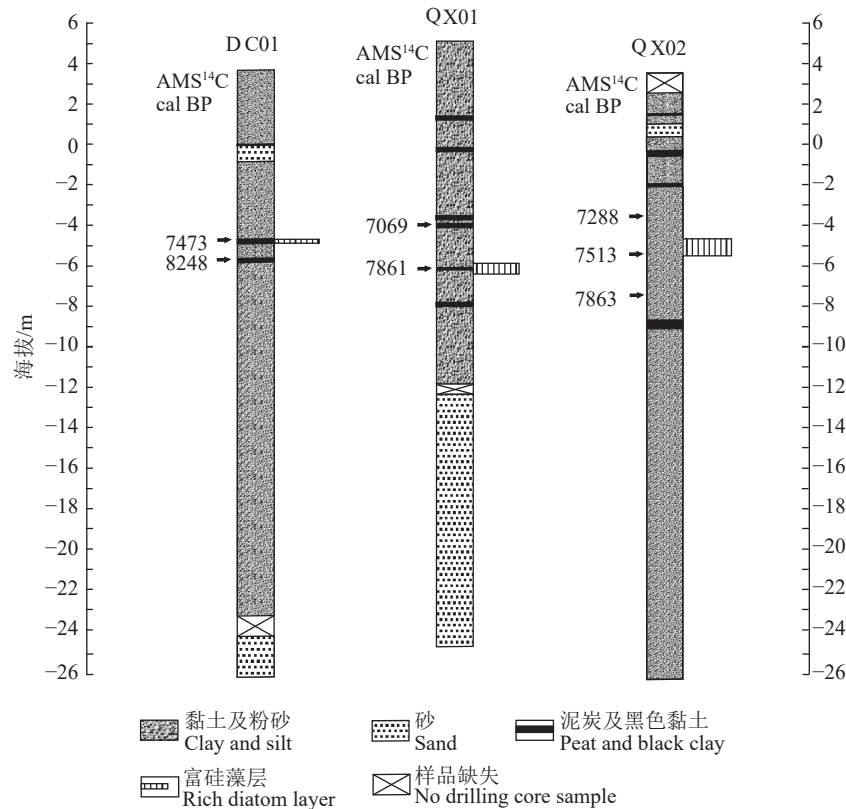


图 2 DC01、QX01、QX02 孔柱状图

Fig.2 Columnar sections of Borehole DC01, QX01 and QX02

样,放入 250 mL 的三角瓶中,加入 15% 的双氧水以分解样品中的有机质并使颗粒分散,反应结束后注入蒸馏水,放置 24 h。倒掉上面的澄液。然后再加入蒸馏水放置 3~4 h,倒掉澄液,反复 3~4 次洗净后,做成硅藻薄片。薄片鉴定使用 OLYMPUS BX53 生物显微镜,放大 400 倍做硅藻鉴定。每个层位的样品至少统计 200 个硅藻,统计出各个种属硅藻的数量并计算其百分含量,做出硅藻图谱。硅藻种类鉴定和硅藻生态参考了日本已有的研究成果(小杉正人, 1988; 鹿岛薰, 1992)。硅藻的分类按其生息环境分为:(1)咸水—半咸水种(marine-brackish),简称 M-B。其在海湾和大洋等海域和潮间带生息,在淡水中并不存在。(2)淡水—半咸水种

(brackish-fresh),简称 B-F。其生存在淡水—半咸水中,而在海域中不存在。(3)淡水种(fresh),简称 F。其在陆地淡水河流、沼泽生存,而在咸水和半咸水环境中不生存。

委托美国 BETA 实验室对 DC01 孔、QX01 孔和 QX02 孔的富硅藻层附近及其上下泥炭层做 AMS¹⁴C 年代测定(表 2),将 ¹⁴C 年龄值代入 Calib Rev 7.0.4 校正程序进行了校正(Reimer et al., 2013)。

3 硅藻分析结果

对天津平原海河以南的沧州市大城县由陆向海方向的 DC01 孔、QX01 孔和 QX02 孔钻孔样品做硅藻分析,根据每个层位的咸水种—半咸水种、

表 2 AMS¹⁴C 年代测定结果
Table 2 Results of AMS¹⁴C dating

钻孔号	BETA 实验室 样品编号	钻孔地点	测试材料	取样深度(海拔)/m	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	¹⁴ C 年龄/a BP	校正年龄/cal BP 中值(年代区间) (或然率)
DC01	329636	大城县王裴庄	泥炭	8.55(-4.81)	-26.8	6590±40	7473(7438~7508)(94.3%)
DC01	329637	大城县王裴庄	泥炭	9.17(-5.43)	-19.2	7410±60	8248(8182~8314)(100%)
QX01	329645	青县盖宿铺村	泥炭	9.16(-4.00)	-27.4	6220±40	7069(7020~7118)(64.5%)
QX01	329640	青县盖宿铺村	泥炭	11.39(-6.23)	-25.3	7010±30	7861(7786~7935)(99.0%)
QX02	333329	青县刘世印屯	泥炭	7.27(-3.70)	-25.7	6360±30	7288(7261~7315)(100%)
QX02	333330	青县刘世印屯	泥炭	8.98(-5.41)	-26.3	6620±30	7513(7457~7569)(97.6%)
QX02	333331	青县刘世印屯	泥炭	10.97(-7.40)	-27.2	7020±30	7863(7792~7934)(100%)

咸水—半咸水种和淡水种含量及硅藻的组合划分硅藻带(图 3)。

3.1 DC01 孔的硅藻分析结果

DC01(38°40′09.11″ N, 116°39′16.5″ E)位于河北省大城县南赵扶镇王裴庄。孔口标高+3.74 m, 孔深 30 m, 距现代海岸线约 85 km。地表-4.55 m 为褐色黏土, 下部为褐色粗砂和粉细砂; 深 4.55~15 m 灰色黏土和砂质粉砂, 其中 8.46~8.56 m 和 9.26~9.4 m 为黑色黏土; 深 15~30 m 为黄褐色砂质粉砂及粉砂质黏土, 上部有少量钙质结核, 下部为褐色细砂。

对 DC01 孔样品以 20 cm 间隔取样做硅藻鉴定。整个 30 m 长的岩心仅在深 8.46~8.56 m(海拔-4.82~-4.72 m)处的黑色腐殖质黏土层见富硅藻层。该处共有 12 个种属的硅藻。淡水种(F)硅藻比例高达 97.4%, 半咸水—淡水种(B-F)占 2.1%, 咸水—半咸水种(M-B)仅占 0.5%。其中湖沼沼泽湿地指标种的 *Melosira ambigua* 占 32.3%, 沼泽环境生息的 *Pinnularia* spp.和 *Diploneis ovalis* 各占 16.4% 和 3.1%, 淡水底栖、河流中常见的 *Synedra ulna* 占 17.9%, *Cymbella minuta* 占 17.4%; 咸水种—半咸水种仅见到一粒 *Nitzschia lorenziana*, 半咸水种—淡水种也仅见到少量 *Rhaphoneis gibberula* 和 *Gyrosigma acuminatum* 各一粒。推测 DC01 孔深 8.50 m 处的富硅藻层为几乎不受海水影响的有河流流入的淡水湖沼环境(图 2)。对 DC01 孔深 8.50 m(海拔-4.71 m)处的泥炭做 AMS¹⁴C 测年, 得到年代值为 7473(7438~7508) cal a BP(图 3)。

3.2 QX01 孔的硅藻分析结果

QX01(38°38′52.2″ N, 116°48′57.7″ E)位于青县盖宿铺村砖厂。孔口标高+5.16 m, 孔深 30 m。距现代岸线约 65 km。地表至 1 m 缺失。深 1~

13.33 m 为褐色—暗灰色黏土及砂质黏土, 其中 3.69~3.95 m、5.28~5.43 m、7.18~7.24 m、8.06~8.23 m 和 8.69~8.73 m 为黑色黏土。11.34~11.39 m、13~13.15 m 为黑色泥炭层; 深 13.33~30 m 为绿灰色—浅黄色粉砂, 灰色—褐色黏土, 绿灰色细砂。偶见钙结核和贝壳碎屑。

对 QX01 孔样品做硅藻鉴定, 整个 30 m 深的岩心样品硅藻稀少, 但在深 11~11.39 m(海拔-5.84~-6.24 m)发现有厚约 40 cm 的富硅藻层。根据硅藻组合将此富硅藻层分为 3 个带。

I 带: 深 11.39 m 处, 为泥炭沉积。淡水种(F)硅藻所占比例最高, 达 94.5%, 半咸水—淡水(B-F)硅藻占 5.5%, 未见咸水—半咸水种(M-B)硅藻。主要有沼泽环境生息的 *Eunotia* spp.(32.8%); 淡水底栖、河流中常见的 *Synedra ulna* (26.2%) 和 *Gomphonema* spp.(8.2%)。半咸水—淡水种(B-F)硅藻所占比例为 4.4%, 主要为淡水和半咸水中都可生息的 *Rhopalodia gibberula* (2.7%) 和 *Nitzschia brevissima* (1.6%)。该层位不含咸水—半咸水(M-B)硅藻, 所以该层出现的少量在淡水和半咸水环境均可出现的 *Rhopalodia gibberula* (2.7%)、*Nitzschia brevissima* (1.6%) 和 *Gyrosigma acuminatum* (1.1%) 应为淡水环境生息。推测 I 带为有河流流入的淡水沼泽环境。对 I 带深 11.39 m(海拔-6.23 m)处的泥炭做 AMS¹⁴C 测年, 得到年代值为 7861(7786~7935) cal a BP。

II 带: 深 11.2 处, 为暗灰色黏土。硅藻含量较 I 带少。淡水种(F)占 58.3%, 半咸水—淡水种(B-F)硅藻占 8.3%, 咸水—半咸水种(M-B)硅藻占 33.3%。主要硅藻为海水浮游咸水种 *Coscinodiscus* spp.占 16.7%, 半咸水种 *Navicula marina* 占 16.7%, 河流中常见的 *Gomphonema* spp.占 12.5%, 淡水底栖、河流中常

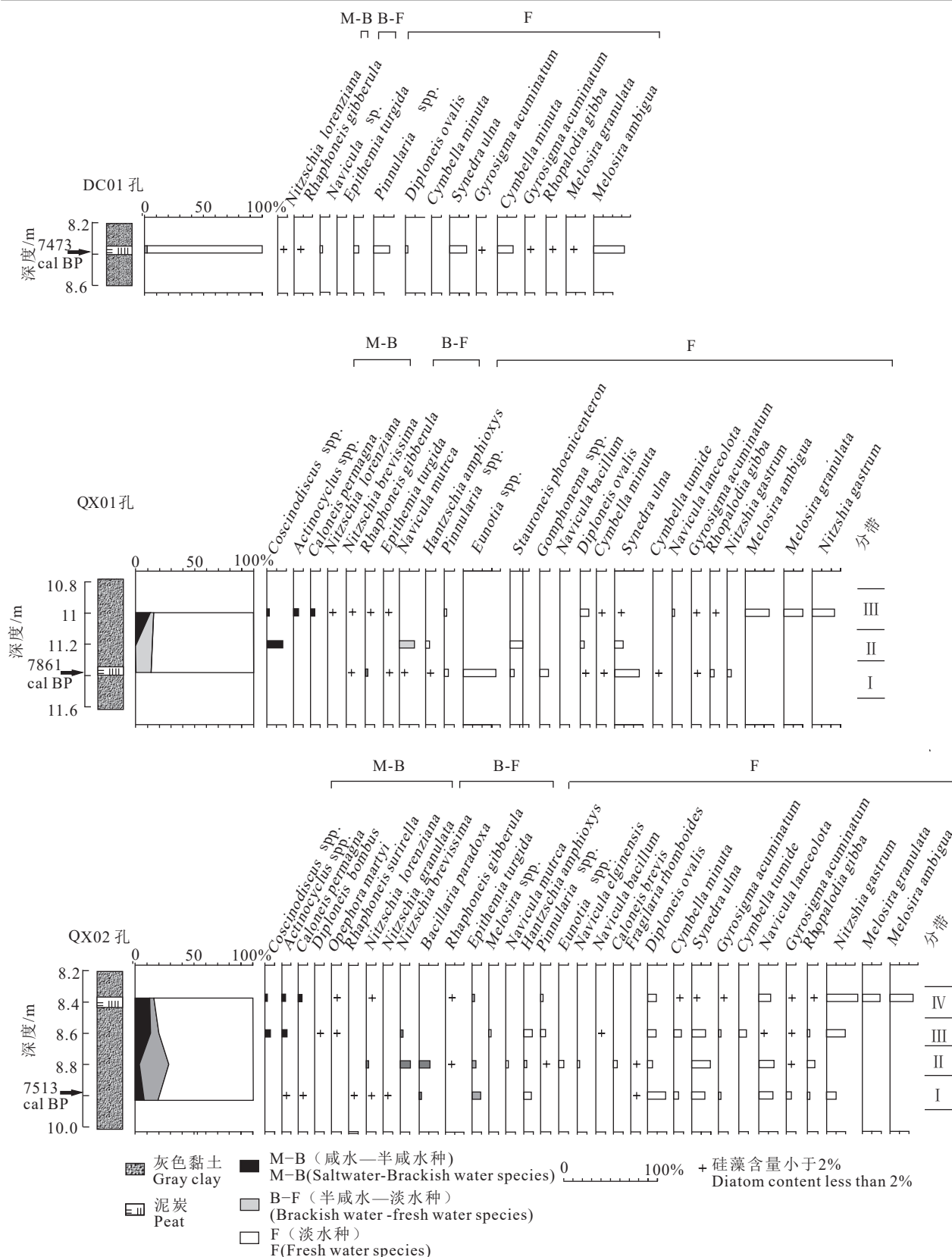


图3 DC01、QX02 和 QX03 孔的硅藻分析结果

Fig.3 Results of diatoms analysis at Borehole DC01, QX01 and QX02

见的 *Synedra ulna* 占 8.3%, 沼泽湿地种的 *Diploneis ovalis* 占 4.2%。推测 II 带为受到来自海水和河流两方面影响的盐沼环境。

III 带: 深 11 m 处, 为暗灰色黏土。淡水种硅藻占 85.7%, 半咸水—淡水种(B-F)占 1.6%, 咸水—半咸水种(M-B)硅藻占 12.7%。其中湖沼浮游的 *Melosira ambigua* 占 25.0%, 淡水的 *Nitzschia gastrum* 占 23.4%, 喜碱性湖沼相浮游种的 *Melosira granulata* 占 19.8%, 沼泽湿地种的 *Diploneis ovalis* 占 8.3%; 另外外洋浮游的 *Coscinodiscus* spp. 和 *Achtiocyclus* spp. 分别为 3.2% 和 4.8%。推定为受海水影响有一定水深的盐沼环境。

3.3 QX02 孔的硅藻分析结果

QX02(38°38'24.2" N, 116°57'24.2" E)位于青县马厂镇刘世印屯砖厂。孔口标高为+3.57 m, 孔深 30.0 m, 距现代海岸线 53 km。地表至深 1 m, 缺失; 深 1~5.15 m 为棕色黏土及粉砂加薄层和褐色粉砂; 深 5.15~18.64 m 为灰色黏土夹多条黑色黏土及泥炭; 深 18.64~19 m 为缺失; 深 19~22.7 m 为褐色粉砂质黏土及褐色粉砂; 深 27.18~31 m 为灰色黏土。

对 QX02 孔样品做硅藻鉴定, 发现深 7.2~12 m(海拔-3.63~-8.43 m)灰色黏土中见有硅藻, 其中深 8.38~9.0 m(海拔-4.81~-5.43 m)处见厚约 60 cm 的富硅藻层, 硅藻含量极为丰富。其他层位硅藻含量低, 仅见少量 *N. lanceolata* 和 *Synedra ulna* 等淡水硅藻碎片。深 8.38~9.0 m 的富硅藻层共鉴定出 29 个种属的硅藻。根据硅藻组合, 将深 8.38~9.0 m 的富硅藻层分为 3 个硅藻带。

I 带: 深 9.0 m(海拔-5.43 m)。淡水种硅藻占 88.9%, 半咸水—淡水种(B-F)硅藻占 2.7%, 咸水—半咸水种(M-B)硅藻占 8.4%。其中, 沼泽湿地生息的 *Diploneis ovalis* 占 19.5%, 河流中常见的 *Synedra ulna* 占 14.2%, *Navicula lanceolata* 占 15.0%, *Nitzschia gastrum* 占 8.8%, *Epithemia turgida* 占 8.0%, 淡水底栖的 *Hantzschia amphioxys* 占 6.2%, 海洋浮游种 *Achtiocyclus* spp. 和潮间带生息的 *Rhaphoneis surirella* 各占 1.3%。推测为略受海水影响的沼泽湿地环境。对 QX02 孔深 8.98 m(海拔-5.41 m)处的泥炭做 AMS¹⁴C 测年, 得到年代值为 7513 (7457~7569) cal a BP。

II 带: 深 8.8 m(海拔-5.23 m)处, 淡水种硅藻

占 74.2%, 半咸水—淡水种(B-F)占 23.2%, 咸水—半咸水种(M-B)硅藻占 2.6%。其中河流中常见的 *Synedra ulna* 占 19.6%, *Navicula lanceolata* 占 17.0%, 沼泽湿地生息的 *Diploneis ovalis* 和 *Pinnularia* spp. 各占 5.7% 和 1.5%。咸水—半咸水(M-B)硅藻含量低, 仅有 *Nitzschia lorenziana*(2.6%)。但半咸水—淡水种含量比 I 带大幅增加, 主要为 *Bacillaria paradoxa*(11.3%)和 *Nitzschia brevissima*(9.8%)等。推测 II 带为略受海水影响的水深较浅的沼泽环境。

III 带: 深 8.6 m 处。淡水种硅藻占 80.3%, 半咸水—淡水(B-F)占 6.6%, 咸水—半咸水(M-B)硅藻占 13.1%。其中淡水种 *Nitzschia gastrum* 占 19.7%, 沼泽湿地种的 *Diploneis ovalis* 和 *Pinnularia* spp. 各占 8.2% 和 4.9%; 另外, 外洋浮游的 *Coscinodiscus* spp.、*Achtiocyclus* spp. 均为 4.9%, 推测为受海水影响的盐沼环境。

IV 带: 深 8.4 m 处。淡水种硅藻占 88.1%, 半咸水—淡水种(B-F)占 0.4%, 咸水—半咸水种(M-B)硅藻占 11.5%。其中淡水种 *Nitzschia gastrum* 占 19.7%, 湖沼浮游种的 *Melosira ambigua* 和 *Melosira granulata* 各占 22.7% 和 18%, 沼泽湿地种的 *Diploneis ovalis* 占 7.6%; 另外, 外洋浮游的 *Coscinodiscus* spp.、*Achtiocyclus* spp. 分别为 3%、4%, 表明深 8.4 m 处硅藻组合与 QX01 孔深 11 m 处环境相似, 为受海水影响的有一定水深的盐沼环境。

4 讨 论

DC01 孔的富硅藻层出现的层位是深度为 8.55 m(海拔-4.81 m)、厚度约 10 cm 的黑色泥炭层, 淡水种(F)硅藻比例高达 97.4%, 半咸水—淡水种(B-F)占 2.1%, 咸水—半咸水种(M-B)仅占 0.5%。淡水种硅藻以湖沼湿地指标种的 *Melosira ambigua* (32.3%), 沼泽环境生息的 *Pinnularia* spp.(16.4%), 淡水底栖、河流中常见的 *Synedra ulna* (17.9%) 和 *Cymbella minuta*(17.4%) 为主, 半咸水种—淡水种仅见到少量 *Rhaphoneis gibberula* 和 *Gyrosigma acuminatum*。 *Rhaphoneis gibberula* 多淡水底生, 为好碱性种。而咸水种—半咸水种仅见到一粒 *Nitzschia lorenziana*, 推测 DC01 孔深 8.55 m 处的富硅藻泥炭层为几乎不受海水影响的有河流流入的淡水湖沼环境。该富硅藻泥炭层下伏沉积物为厚约 70 cm 的泥炭和含腐殖质的黏土层, 其 EC 和

FeS_2 异常高,形成环境为盐沼环境(方晶等,2018)。据此推测大约在 7473 cal a BP,DC01 孔开始由受海水影响的盐沼环境转为陆相淡水湖沼沉积环境。因为 DC01 孔的盐沼层厚度较薄,仅为 70 cm,可以认为海水影响下发育的盐沼沉积的最远处在 DC01 孔附近略向西的位置。故 DC01 孔富硅藻泥炭层的形成年代,可以代表海水对 DC01 孔完全没有影响由海进转为海退的时期,即大致代表该区最大海侵发生的年代。渤海湾平原地区属于远离冰川中心的远区(Ⅵ带)(Peltier, 1987),自中全新世以来,未有大规模的水动型海面上升(王宏,2001),即该区全新世最大海侵发生后,至今海面高度未发生明显变化。渤海湾西岸地区新生代以来一直处于地壳下沉状态,全新世最大海侵之后,河湖相沉积速率大部分时期大于地壳下降速率,所以海岸线不断向海方向移动,发生海退。DC01 孔富硅藻泥炭层分布在深 8.46~8.56 m,其泥炭层底界 8.56 m(海拔-4.82 m)为淡水沼泽和盐沼的界线。这个高度可以视为最大海侵范围转为海退时的平均大潮高潮线所达到的高度,因为淡水泥炭层下伏的盐沼层仅为 70 cm(方晶等,2018),可以将 DC01 孔视为最大海侵时期海水可以影响的最远位置,代表了全新世最大海侵期海水的平均大潮高潮线的高度。渤海湾西岸海河口平均大潮差为 3.1 m(刘爱菊等,1986),为假设古今潮差不变,约 7473 cal a BP 海水影响形成盐沼最大范围开始海退时的平均大潮高度的-4.82 m 减去平均大潮差的一半(1.55 m),得到 7473 cal a BP 的相对平均海面的高度为-6.37 m(图 4,表 3)。

QX01 孔富硅藻层为厚约 40 cm 的黑色泥炭和暗灰色黏土组成。从下至上,有河流流入的淡水沼泽环境(Ⅰ带)→受到来自海水和河流两方面影响的盐沼环境(Ⅱ带)→受海水影响的有一定水深的盐沼环境(Ⅲ带)的变化趋势。对Ⅰ带深 11.39 mm(海拔-6.23 m)处的泥炭年龄值为 7861 cal a BP,说明海水在 7861 cal a BP 时到达 QX01 孔,当时相对平均大潮高潮线的高度为Ⅰ带和Ⅱ带的界线深 11.3 m(海拔-6.13 m)的高度。这样,7861 cal a BP 相对海面高度为海拔-6.13 m 减去平均大潮差的一半 1.55 m,为-7.68 m(表 3)。

QX02 孔的硅藻带从下到上为:略受海水影响的沼泽湿地环境(Ⅰ带)→略受海水影响的水深较浅的沼泽环境(Ⅱ带)→受海水影响的盐沼环境

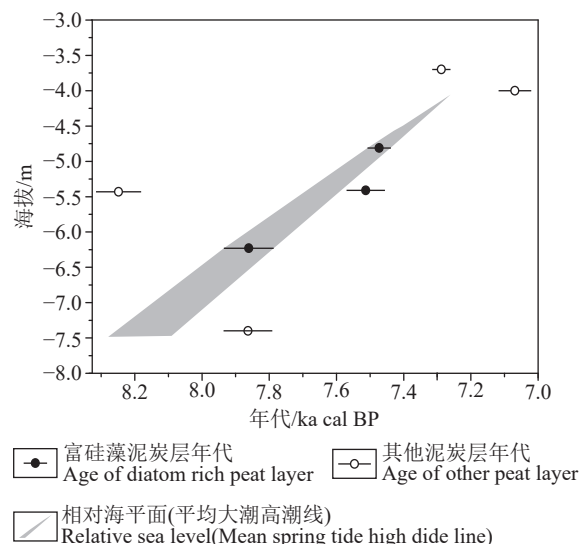


图 4 研究区富硅藻层形成时期的相对海面(平均大潮高潮线)变化图

Fig.4 Relative sea level (mean spring tide high tide line) change chart of rich diatom layer in the study area

(Ⅲ带)→受海水影响的有一定水深的盐沼环境(Ⅳ带)。整体有淡水沼泽向盐沼转化,且水深增大的趋势。但整个富硅藻层的硅藻组合显示均为盐沼环境。推测 7513 cal a BP 时,QX02 孔的位置为盐沼环境,QX02 孔略受海水影响的水深较浅的沼泽环境(Ⅱ带)与受海水影响的盐沼环境(Ⅲ带)的界限为深 8.7 m(海拔-5.13 m),表明早于 7513 cal a BP,当时平均大潮高潮线不低于海拔-5.13 m,相对平均海面的高度不低于-6.68 m(表 3)。

DC01、QX01 和 QX02 孔硅藻分析结果显示,相对海面从 7861 cal a BP 的-7.68 m,上升到 7513 cal a BP 的-6.68 m,约 350 年的时间上升了约 1 m。之后再上升到 7473 cal a BP 的约-6.37 m。

贝壳堤形成于高潮线,因而贝壳堤的位置指示了当时的平均高潮线位置(徐家声,1994)。渤海湾西岸平原最老贝壳堤(V堤)位于东孙村至康庄子一线沿 NNW 方向展布(徐家声,1994),形成于 7300~6400 cal a BP(Wang et al., 2010; 苏盛伟等,2011)。从 DC01、QX01 和 QX02 孔这 3 个孔硅藻分析结果,早中全新世 7861~7473 cal a BP 海水影响到这 3 个孔的位置,富硅藻层显示的环境为淡水沼泽和盐沼环境,DC01 孔淡水沼泽泥炭层直接覆盖在厚度仅为 70 cm 的盐沼层上,淡水泥炭层的年代为 7473 cal a BP,表明在 7473 cal a BP 时 DC01 孔从受海水影响的盐沼转为淡水沼泽环境,代表了海洋影响减

表 3 DC01、QX01 和 QX02 孔富硅藻层硅藻分析推测的古环境

Table 3 Paleoe-environment of diatom rich layer of cores DC01, QX01 and QX02 by diatom analysis

孔位	硅藻带	M-B、B-F和 F硅藻含量/%	主要硅藻种类及含量/%	古环境	年代/cal a BP	海拔/m
DC01	I	0.5	<i>Melosira ambigua</i> (32.3), <i>Pinnularia</i> spp.(16.4), <i>Synedra</i>	几乎不受海水影响的有河 流入的淡水湖沼	7473	-6.37
		2.1	<i>ulna</i> (17.9), <i>Cymbella minuta</i> (17.4), <i>Epithemia turgida</i> (4.6),			
		97.4	<i>Diploneis ovalis</i> (3.1)			
	III	12.7	<i>Melosira ambigua</i> (25.0), <i>Nitzshia gastrum</i> (23.4), <i>Melosira</i>	受海水影响有一定水深的 盐沼	7861	-7.68
		1.6	<i>granulata</i> (19.8), <i>Diploneis ovalis</i> (8.3), <i>Achtiocyclus</i>			
		85.7	spp.(4.8), <i>Coscinodiscus</i> spp.(3.2)			
QX01	II	33.3	<i>Coscinodiscus</i> spp.(16.7), <i>Navicula marina</i> (16.7),	受海水和河流两方面影响 的盐沼		
		8.3	<i>Gomphonema</i> spp.(12.5), <i>Synedra ulna</i> (8.3), <i>Diploneis</i>			
		58.3	<i>ovalis</i> (4.2)			
	I	0	<i>Eunotia</i> spp.(32.8), <i>Synedra ulna</i> (26.2), <i>Gomphonema</i>	有河流流入的淡水沼泽		
		5.5	spp.(8.2), <i>Rhopalodia gibberula</i> (2.7), <i>Nitzschia</i>			
		94.5	<i>brevissima</i> (1.6), <i>Gyrosigma acuminatum</i> (1.1)			
	VI	11.5	<i>Nitzshia gastrum</i> (19.7), <i>Melosira ambigua</i> (22.7), <i>Melosira</i>	受海水影响的有一定水深 的盐沼		
		0.4	<i>granulata</i> (18), <i>Diploneis ovalis</i> (7.6), <i>Coscinodiscus</i>			
		88.1	spp.(3.0), <i>Achtiocyclus</i> spp. (4.0)			
	III	13.1	<i>Nitzshia gastrum</i> (19.7), <i>Diploneis ovalis</i> (8.2), <i>Pinnularia</i>	受海水影响的盐沼环境		
		6.6	spp.(4.9), <i>Coscinodiscus</i> spp(4.9), <i>Achtiocyclus</i> spp.(4.9)			
		80.3				
QX02	II	2.6	<i>Synedra ulna</i> (19.6), <i>Navicula lanceolata</i> (17.0), <i>Diploneis</i>	略受海水影响的水深较浅 的沼泽环境	7513	不低于-6.68
		23.2	<i>ovalis</i> (5.7), <i>Pinnularia</i> spp. (1.5), <i>Bacillaria</i>			
		74.2	<i>paradoxa</i> (11.3), <i>Nitzschia brevissima</i> (9.8), <i>Nitzschia</i>			
	I	8.4	<i>lorenziana</i> (2.6)	略受海水影响的沼泽湿地 环境		
		2.7	<i>Diploneis ovalis</i> (19.5), <i>Synedra ulna</i> (14.2), <i>Navicula</i>			
		88.9	<i>lanceolata</i> (15.0), <i>Nitzshia gastrum</i> (8.8), <i>Epithemia</i>			
			<i>turgida</i> (8.0), <i>Hantzschia amphioxys</i> (6.2), <i>Achtiocyclus</i>			
			spp.(1.3), <i>Rhaphoneis surirella</i> (1.3)			

弱的过程,而几乎同时,在 QX02 孔仍为盐沼环境沉积,对 QX02 孔的富硅藻层的年代测定值为 7513 cal a BP,表明 QX01 孔在完全不受海水影响的淡水环境应晚于 7513 cal a BP。综合以上分析,全新世海侵向内陆影响的最大范围为略远于 DC01 孔的位置,DC01 孔的富硅藻淡水水泥炭层的形成的 7473 cal a BP 为海水到达最大范围后刚刚后退的时期,即本区海侵达到最大范围的时期不晚于 7473 cal a BP。这 3 个孔都发育了盐沼泥炭,也就是说这 3 个孔没有发育真正的海侵层,这些盐沼层处于平均高潮线—平均大潮高潮线之间的发育沼泽的盐沼环境,随着海退,至第 V 道贝壳堤附近,由于黄河改道,海岸受到侵蚀,大量的潮间带潮下带泥沙贝壳被卷到海岸形成贝壳堤,据此推测第 V 道贝壳堤可以代表最大海侵的界限,而 3 孔所在位置发育了潮上带的淡沼泽和盐沼沉积。因此,判断最大海侵时期因为不晚于或接近 7473 cal a BP,最大海侵的海岸边界未达到 QX02 孔的位置,而 QX02 孔位于第 V 道贝壳堤附近以西,故推测本区最大海侵边界没超过第 V 道贝壳堤的位置,即第 V 道贝壳堤为最大海侵的

边界的平均高潮线的位置。

硅藻分析显示,DC01 孔硅藻为淡水泥炭,QX01 孔由下至上为淡水沼泽向盐沼转化的趋势,QX02 孔也是略受海水影响的沼泽环境向盐沼环境转化,QX01 孔和 QX02 孔的富硅藻层都有淡水沼泽向盐沼环境转化的趋势,且 QX02 孔受海水影响较 QX01 孔强一些。

5 结 论

(1)在渤海湾西岸海河以南平原,全新世沉积物整体硅藻保存不好,但存在厚度 60~10 cm 的早中全新世富硅藻层。最内陆距现代海岸约 85 km 处 DC01 孔的硅藻层主要由沼泽环境生息的 *Melosira ambigua*、*Pinnularia* spp.和 *Diploneis ovalis* 以及河流中常见 *Synedra ulna* 等淡水硅藻组成。位于中间距现代海岸约 65 km 的 QX01 孔富硅藻层有淡水硅藻层(I 带)和半咸水种为主的盐沼层(II 带)组成,最靠近海一侧距现代海岸约 53 km 的 QX02 孔富硅藻层的硅藻组合显示主要为受海水影响的沼

泽和盐沼环境。

(2)通过盐沼与淡水湖沼的界限所代表的当时平均大潮高潮位,推定出研究区早中全新世两个相对海面高度:7861 cal a BP 相对海面高度为海拔-7.68 m;7473 cal a BP 相对平均海面的高度为-6.37 m,揭示早中全新世约 350 年的时间,相对海面上升超过 1 m。

(3)3 个孔所在位置古环境为淡水沼泽和盐沼环境,未发育真正的海相层,最大海侵的界限应位于 DC01 孔和 QX01 孔之间,该区最大海侵发生的时间早于或接近 7513 cal a BP。

References

- Chen Yongsheng, Wang Hong, Li Jianfen, Tian Lizhu, Shang Zhiwen. 2012. Sedimentary environment since 35 ka and terrestrial-marine interaction revealed by borehole BT113 in the western coast of Bohai Bay China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(S1): 344-354.
- Chen Yongsheng, Hu Yipan, Jiang Xingyu, Li Jianfen, Shang Zhiwen, Fang Jing, Wang Fu. 2024. Time correlation between MIS5a transgression and global sea level change of the second Marine layer in the coastal lowland of Bohai Bay[J]. *Geology in China*, 51(6): 2056-2065 (in Chinese with English abstract).
- Fang Jing, Wang Fu, Fang Yuting, Pan Long, Li Yang, Hu Ke, Qi Wuyun, Wang Zhongliang. 2018. Application of the ancient sedimentary environment restoration and correlation analysis of EC, FeS₂ content and pH: A case study of DC01 Core on the plain of West Bohai Bay[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 48 (4): 1-11.
- Fang Jing, Yang Yongqiang, Shang Zhiwen, Fan Changfu, Wang Fu, Wang Hong. 2012a. Reconstruction of the environment by *Auliscus caelatus* in Dawuzhuang buried oyster reef on northwest coast of Bohai Bay[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(Sup.2): 343-351 (in Chinese with English abstract).
- Fang Jing, Wang Hong, Wang Fu, Hang Zhiwen, Hu Ke, Yang Yongqiang, Fan Changfu, Wang Haifeng. 2012b. Diatom analysis in the top and bottom muddy sediments of buried oyster reef for the reef-mud conversion palaeoenvironmental reconstruction, Northwest Bohai Bay[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(5): 879-890 (in Chinese with English abstract).
- IPCC. 2014. Climate change 2014: Synthesis report summary for policymakers[R]. 1-31.
- IPCC. 2021. Climate change 2021: The physical science basis[R]. 1-42.
- Kaoru Kashima. 1992. Catalog of Holocene diatom fossil. Part 1. To-koro Plain, Hokkaido, North Japan[R]. Reports on Earth Science Collage of General Education Kyushu University, 29: 1-36(in Japanese).
- Li Dongling, Fan Changfu, Huang Yue, Jiang Hui, Wang Hong, Shang Zhiwen. 2009. Paleo-environment reconstruction with diatom assemblages in the buried oyster reef on the northwest coast of the Bohai Bay during the Middle Holocene[J]. *Marine Science*, 28(3): 22-28 (in Chinese with English abstract).
- Li J F, Shang Z W, Wang F, Chen Y S, Tian L Z, Jiang X Y, Yu Q, Wang H. 2021. Holocene sea level trend on the west coast of Bohai Bay, China: Reanalysis and standardization[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 40(7): 198-248.
- Li Jianfen, Su Shengwei, Shang Zhiwen, Jiang Xingyu, Chen Yongsheng, Wang Fu, Tian Lizhu, Wang Hong. 2016. Sea level reconstruction based on foraminifera assemblages: A paradigm obtained in Jugezhuang Chenier, Bohai Bay, and its underlying muddy sediments[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(10): 1584-1589 (in Chinese with English abstract).
- Liu Aiju, Zhang Yanting, Huang Yichang. 1986. Characteristics of the coastal tidal in Hebei Province[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 4(3): 1-7.
- Masato Kosugi. 1988. Classification of living diatom assemblages as the indicator of environments, and its application to reconstruction of paleoenvironments[J]. *The Quaternary Research*, 27(1): 1-20 (in Japanese with English abstract).
- Peltier W R. 1987. Mechanisms of Relative Sea-level Change and The Geophysical Responses to Ice-water Loading[M]. *Sea Surface Studies (R.J.N. Devoyed.)*, Croom Hlem, 57-94.
- Reimer P J, Bard E, Bayliss A, Beck J W, Blackwell P G, Bronk-Ramsey C, Buck C E, Cheng H, Edwards R L, Friedrich M, Grootes P M, Guilderson T P, Hafliadason H, Hajdas I, Hatté C, Heaton T J, Hogg A G, Hughen K A, Kaiser K F, Kromer B, Manning SW, Niu M, Reimer R W, Richards D A, Scott E M, Southon J R, Turney C S M, Van der Plicht J. 2013. IntCal13 and MARINE13 radiocarbon age calibration curves 0-50 000 years cal BP[J]. *Radiocarbon*, 55(4): 1869-1887.
- Shang Zhiwen, Fan Changfu, Li Dongling, Tian Lizhu, Pei Yandong, Wang Fu, Wang Hong. 2010. Revealing Paleoenvironment difference of two oyster reefs by diatom assemblage in the northwest coast of Bohai Bay[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(5): 33-39 (in Chinese with English abstract).
- Shang Zhiwen, Li Jianfen, Wang Hong, Fang Jing. 2024. Paleo-environment reconstruction of the oyster reefs around 4.2 ka BP in the North West Coast of Bohai Bay, China[J]. *Geology in China*, 51(6): 2042-2055 (in Chinese with English abstract).
- Su Shengwei, Shang Zhiwen, Wang Fu, Wang Hong. 2011. Holocene cheniers: Spatial and temporal distribution and sea level indicators in Bohai Bay[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(9): 1382-1395 (in Chinese with English abstract).
- Wang F, Li J F, Chen Y S, Fang J, Zong Y Q, Shang Z W, Wang H. 2015. The record of mid-Holocene maximum landward marine transgression in the west coast of Bohai Bay, China[J]. *Marine*

- Geology, 359: 89–95.
- Wang F, Li J F, Shi P X, Shang Zhiwen, Li Yong, Wang Hong. 2019. The impact of sea-level rise on the coast of Tianjin-Hebei, China[J]. *China Geology*, 2(1): 26–39.
- Wang F, Zong Y Q, Mauz B, Li J F, Fang J, Tian L Z, Chen Y S, Shang Z W, Jiang X Y, Spada G, Melini D. 2020. Holocene sea-level change on the central coast of Bohai Bay, China[J]. *Earth Surface Dynamics*, 8(3): 679–693.
- Wang Fu, Shang Zhiwen, Li Jianfen, Jiang Xingyu, Wen Mingzheng, Shi Peixin, Tian Lizhu, Chen Yongsheng, Yang Peng, Hu Yunzhuang, Li Yong, Yuan Haifan, Wang Hong. 2020. Research status and protection suggestions of cheniers on Bohai Bay[J]. *North China Geology*, 43(4): 293–316 (in Chinese with English abstract).
- Wang Fu, Wang Hong, Li Jianfen, Wang Feicui, Tian Lizhu, Yu Qian, Huang Zhaoquan, Fang Jing, Hu Yunzhuang, Xiao Guoqiang, Li Chang. 2023. Evolution and trending prediction of the Chinese mainland coasts since 20 ka BP: Implication for ecological protection and restoration[J]. *Geology in China*, 50(1): 61–83 (in Chinese with English abstract).
- Wang H, Shang Z W, Li J F, Pei Y D, Wang F, Tian L Z, Fan C F, Sheng J J, Chen Y S, Liu H M. 2010. Holocene shoreline changes and marine impacts on the muddy coast, western Bohai Bay, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(5): 627–640 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hong. 2001. Oyster reefs and neotectonic movents in the Bohai Bay: Discussion of some questions[C]//Lu Yanchou, Gao Weiming, Chen Guoxing, et al. *Neotectonism and Environment*. Beijing: Seismological Press, 171–184.
- Xu Jiasheng. 1994. Shell mounds and sea level changes in Huanghua Coastal of Bohai Bay[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 16(1): 68–77 (in Chinese).
- 附中文参考文献
- 陈永胜, 胡亦潘, 姜兴钰, 李建芬, 商志文, 方晶, 王福. 2024. 渤海湾沿海低地第 II 海相层 MIS5a 阶段海侵与全球海平面变化的时间对比研究[J]. *中国地质*, 51(6): 2056–2065.
- 陈永胜, 王宏, 李建芬, 裴艳东, 田立柱, 商志文. 2012. 渤海湾西岸 BT113 孔 35ka 以来的沉积环境演化与海陆作用[J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 42(S1): 344–354.
- 方晶, 王福, 方雨婷, 潘隆, 李杨, 胡克, 齐乌云, 王中良. 2018. 钻孔岩心的 EC、w (FeS₂)、pH 相关分析及其对古沉积环境复原的应用: 以渤海湾西岸平原 DC01 孔为例[J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 48(4): 1–11.
- 方晶, 王宏, 王福, 商志文, 胡克, 杨永强, 范昌福, 王海峰. 2012b. 渤海湾西北岸埋藏牡蛎礁礁顶上下沉积物中硅藻对“礁泥转换”古沉积环境的重建[J]. *沉积学报*, 30(5): 879–890.
- 方晶, 杨永强, 商志文, 范昌福, 王福, 王宏. 2012a. 硅藻 *Auliscus caelatus* 对渤海湾西北岸大吴庄埋藏牡蛎礁形成环境的复原[J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 42(增刊 2): 343–351.
- 李冬玲, 范昌福, 黄玥, 蒋辉, 王宏, 商志文. 2009. 渤海湾西北岸全新世埋藏牡蛎礁的硅藻记录及古环境意义[J]. *海洋通报*, 28(3): 22–28.
- 李建芬, 苏盛伟, 商志文, 姜兴钰, 陈永胜, 王福, 田立柱, 王宏. 2016. 渤海湾巨葛庄贝壳堤与下伏泥层有孔虫组合的海面变化意义[J]. *地质通报*, 35(10): 1584–1589.
- 刘爱菊, 张延廷, 黄易畅. 1986. 河北省海岸带潮汐特征[J]. *黄渤海海洋*, 4(3): 1–7.
- 鹿島薫. 1992. 沖積層から得られた珪藻化石カタログ(その1) 北海道常呂平野[R]. 九州大学教養学部地学研究報告, 29: 1–36.
- 商志文, 范昌福, 李冬玲, 田立柱, 裴艳东, 王福, 王宏. 2010. 硅藻组合指示的渤海湾西北岸两个牡蛎礁体生长环境的差异[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 30(5): 33–39.
- 商志文, 李建芬, 王宏, 方晶. 2024. 渤海湾西北岸埋藏牡蛎礁体 4.2 ka BP 前后古环境重建[J]. *中国地质*, 51(6): 2042–2055.
- 苏盛伟, 商志文, 王福, 王宏. 2011. 渤海湾全新世贝壳堤: 时空分布和海面变化标志点[J]. *地质通报*, 30(9): 1382–1395.
- 王福, 商志文, 李建芬, 姜兴钰, 文明征, 施佩歆, 田立柱, 陈永胜, 杨朋, 胡云壮, 李勇, 袁海帆, 王宏. 2020. 渤海湾贝壳堤现状及保护建议[J]. *地质调查与研究*, 43(4): 293–316.
- 王福, 王宏, 李建芬, 汪翡翠, 田立柱, 于谦, 黄昭权, 方晶, 胡云壮, 肖国强, 李畅. 2023. 中国海岸 20 ka 以来的演替过程及趋势分析: 对现代海岸生态保护修复的启示[J]. *中国地质*, 50(1): 61–83.
- 王宏. 2001. 渤海湾牡蛎礁与新构造活动: 几个基本问题的讨论 [C]//卢演铸, 高维明, 陈国星, 等. 主编. *新构造与环境*. 北京: 地震出版社, 171–184.
- 小杉正人. 1988. 珪藻の環境指標種群の設定と古環境復原への応用[J]. *第四紀研究*, 27(1): 1–20.
- 徐家声. 1994. 渤海湾黄骅沿海贝壳堤与海平面变化[J]. *海洋学报*, 16(1): 68–77.