

doi: 10.12029/gc20210621

雷雁翔,何磊,叶思源,赵俐红,袁红明,杨士雄,薛春汀,Edward A.Laws. 2021. 渤海湾晚更新世晚期以来古河道分布和三角洲发育及其古环境的演变[J]. 中国地质, 48(6): 1947–1964.

Lei Yanxiang, He Lei, Ye Siyuan, Zhao Lihong, Yuan Hongming, Yang Shixiong, Xue Chunting, Edward A.Laws. 2021. Paleochannel distribution, delta development and paleoenvironment evolution in Bohai Bay since the Late Pleistocene[J]. Geology in China, 48(6): 1947–1964(in Chinese with English abstract).

渤海湾晚更新世晚期以来古河道分布和三角洲发育及其古环境的演变

雷雁翔^{1,2,3},何磊^{2,4},叶思源^{1,2,4},赵俐红¹,袁红明^{2,4},
杨士雄^{2,4},薛春汀²,Edward A.Laws⁵

(1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 中国地质调查局滨海湿地生物地质重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 3. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013; 4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061; 5. 路易斯安那州州立大学海岸与环境学院, 美国 巴吞鲁日 70803–4110)

摘要:渤海湾及其沿岸是中国海洋地质与第四纪地质研究程度最高的地区之一。虽然研究成果众多,但仍有一些基础的地质问题亟待解决。比如,晚更新世晚期黄河是否流经渤海湾?全新世黄河在渤海湾及其沿岸形成的多期次三角洲叶瓣在海域如何展布?以上问题一直是中国海洋地质研究中备受关注的热点话题。借助2016–2017年在渤海湾获取的约2000 km的浅地层剖面数据、2个30 m左右的取芯钻孔(BXZK2017–1和BXZK2017–2孔)及相应的AMS ¹⁴C和OSL测年数据,同时结合前人的一些浅剖数据和钻孔的研究成果,将渤海湾中部晚更新世以来的地层自上而下划分出4个地震单元(SU1~SU4)和6个沉积单元(DU1~DU6),分别对应前三角洲相、潮坪与浅海、泛滥平原、河道相、海陆交互相、湖沼相。在此基础上综合探讨渤海湾晚更新世晚期以来总体的地层框架和沉积演化特征。研究表明:黄河可能在21.8~9 cal ka BP,由近东西向流经渤海湾北部进入渤海中部盆地;全新世以来,渤海湾从西北侧至南侧,依次分布4期次的三角洲叶瓣,对应的发育时间可能分别是1400 AD~现在、11~1128 AD、700 BC~11 AD和1855~现在;渤海湾西侧最北两期次的水下三角洲可能主要与海河有关,而南侧其余2期次三角洲叶瓣则可能分别对应歧口超级叶瓣以及现代黄河三角洲超级叶瓣。加深了解渤海湾晚更新世晚期以来的地层序列演化、古河道发育以及全新世三角洲在渤海湾的展布情况,将有助于渤海湾海岸带开发、海底工程建设以及地质灾害防范等。

关键词:晚更新世;浅地层剖面;古河道;三角洲;古环境演变;渤海湾;海岸带地质调查工程

中图分类号: P736.2 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2020)06–1947–18

Paleochannel distribution, delta development and paleoenvironment evolution in Bohai Bay since the Late Pleistocene

收稿日期: 2019–05–11; 改回日期: 2019–11–18

基金项目: 科技部政府间科技创新合作重点专项(2016YFE0109600), 中国地质调查局项目(DD20160144, DD20189503)和国家自然科学基金(41706057, 41876057)联合资助。

作者简介: 雷雁翔,男,1994年生,硕士,地球化学专业;E-mail: 479536119@qq.com。

通讯作者: 叶思源,女,1963年生,研究员,主要从事海洋地质、地球化学研究;E-mail: siyuanye@hotmail.com。

LEI Yanxiang^{1,2,3}, HE Lei^{2,4}, YE Siyuan^{1,2,4}, ZHAO Lihong¹, YUAN Hongming^{2,4},
YANG Shixiong^{2,4}, XUE Chunting², Edward A.Laws⁵

(1. School of Science&Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China; 2. Key Laboratory of Coastal Wetland Biogeosciences, Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, Shandong, China; 3. Shandong Geophysical and Geochemical Exploration Institute, Jinan, 250013, Shandong, China; 4. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, Shandong, China; 5. College of the Coast & Environment, Department of Environmental Sciences, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803-4110, USA)

Abstract: The Bohai Bay and its coastal area are one of the most attractive hotspots for the studies of marine geology and Quaternary geology in China. Although many achievements have been made, some fundamental geological questions still remain unsolved. For example, did the Yellow River flow through Bohai Bay during the Late Pleistocene? How was the multi-stage delta lobes of the Yellow River Delta distribute in the Bohai Bay? Those questions have been attracting great attentions from marine geologists in China. Based upon ~2000 km seismic profile data, two ~30m-length boreholes (BHJK2017-1 and BHJK2017-2) in Bohai Bay during 2016—2017, numerous AMS ¹⁴C and OSL dating results and previous achievements of seismic profiles and boreholes, the stratigraphic sequences was divided into four seismic units (SU1—SU4) and six sedimentary units (DU1—DU6) in descending order, namely prodelta, tidal flat, floodplain, river channel, land-sea interaction facies and lacustrine/marsh facies, respectively. The general stratigraphic framework and sedimentary evolution of Bohai Bay since the Late Pleistocene were accordingly analyzed. It is revealed that the Yellow River likely flowed from near the East-West to the central basin of the Bohai Sea through the northern part of the Bohai Bay during 21.8—9 cal ka BP. Moreover, four subaqueous delta lobes distributed from the northwest to the south of the Bohai Bay since the Holocene were formed during 1400 AD—present, 1048—1128 AD, 700 BC—11 AD and 1855—present, respectively. Two northern subaqueous delta lobes were mainly related to the Haihe River, and the other two southern delta lobes were likely to be the Qikou superlobe and the modern Yellow River Delta superlobe respectively. The studies upon the sedimentary evolutions, paleochannel development and the subaqueous delta distribution since the Late Pleistocene would be conducive to the layout of coastal engineering programs and the mitigation of geological hazards in Bohai Bay.

Key words: Late Pleistocene; seismic profile; paleochannel; subaqueous delta; paleoenvironment evolution; Bohai Bay; coastal geological survey engineering

About the first author: LEI Yanxiang, male, born in 1994, master, engaged in the study of geochemistry; E-mail: 479536119@qq.com.

About the corresponding author: YE Siyuan, female, born in 1963, senior researcher, engaged in the study of marine geology and geochemistry; E-mail: siyuanye@hotmail.com.

Fund support: Supported by the key project of Intergovernmental Scientific and Technological Innovation Cooperation of the Ministry of Science and Technology (No.2016yfe0109600), the project of China Geological Survey (No.DD20160144, No.DD20189503) and the National Natural Science Foundation of China (No.41706057, No.41876057).

1 引 言

自20世纪60年代以来,国内外研究机构及学者在渤海湾地区开展了大量的基础地质研究工作,并发表了一系列的论文和专著。这些研究成果主要包含渤海湾晚更新世以来3次海侵(赵松龄等,1978;吴忱等,1982;刘艳霞等,2015;Wang et al.,2015)、海平面变化与海岸变迁(赵希涛等,1979,1996;王强等,1983;杨怀仁等,1990)、渤海湾西岸

的贝壳堤和牡蛎礁(赵希涛等,1980;庄振业等,1991;王宏,1996;苏盛伟等,2011;王海峰等,2011)、黄河三角洲叶瓣研究(薛春汀等,1989,2009;Xue,1993;Saito et al.,2000;何磊等,2019;He et al.,2019)、现代黄河三角洲沉积地质(成国栋等,1986,1997)、黄河水下三角洲沉积动力学(Li et al.,1998;Liu et al.,2004)、滦河冲积扇-三角洲沉积体系(高善明,1981;杜瑞芝等,1990;薛春汀,2016)、渤海湾泥质海岸带沉积地质(王强等,2007;陈永胜等,

2014; Xu et al., 2015; Tian et al., 2017)以及黄河贯通黄渤海(Yao et al., 2017; Liu et al., 2018; Zhang et al., 2019)等研究。

虽然研究成果众多,但是仍有一些关键的基础问题未解决。比如,晚更新世晚期黄河有流经过渤海湾吗?如果有,何时何地?全新世多期次的黄河三角洲叶瓣水下部分在渤海湾内如何展布?显然,渤海湾区域地层对比和研究是解决以上问题的关键所在。然而,之前除了天津近海和黄河口近海有一定量的浅地层剖面测量和少量的短柱和浅钻外(刘春成等, 2010; Liu et al., 2014; Tian et al., 2017),渤海湾内沉积地层对比分析缺乏钻孔(点)和浅地层剖面(面)的支撑,难以和陆域已有的大量研究工作结合起来,形成陆海联动的综合成果。最新的研究工作虽然对渤海湾开展了全覆盖式的浅地层剖面工作(Liu et al., 2019),但由于强震板震源海底穿

透深度有限(<30 m),导致晚更新世地层揭露不够,无法开展较深部地层的分析和对比。

为此,项目组于2016—2017年在渤海湾获取约2000 km浅地层剖面数据资料、2口孔深各30 m左右的浅钻(图1),在此基础上开展了渤海湾中部浅地层剖面解译、沉积环境分析和地层序列划分、年代测试(包含AMS ^{14}C 和OSL)等,在区域已有研究成果的基础上,以此探讨渤海湾中部晚更新世晚期以来的地层序列演化、古河道发育以及全新世三角洲在渤海湾的展布情况。

2 地理背景

渤海湾位于 $38^{\circ}03'\text{N}\sim 39^{\circ}15'\text{N}$, $117^{\circ}45'\text{E}\sim 118^{\circ}53'\text{E}$,是中国渤海三大海湾之一。其北起河北省乐亭县大清河口,南到山东省黄河口(图1)。渤海湾湾口朝东,南临山东,西靠天津和河北,北为河北海

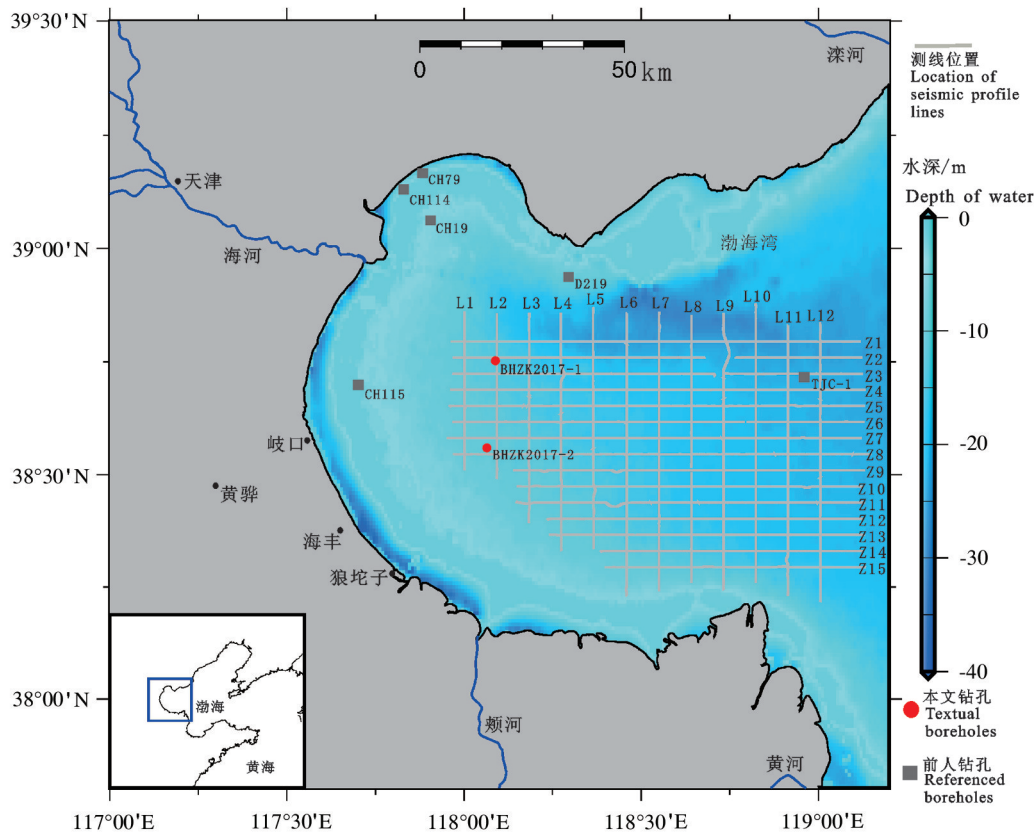


图1 渤海湾浅地层剖面测线和钻孔位置分布图

钻孔CH19、CH79、CH114和CH115引自Tian et al., 2017; 钻孔TJC-1引自李杰等, 2018; 钻孔D219引自胡广元等, 2017

Fig.1 Location of boreholes and seismic profile lines in Bohai Bay

Boreholes CH19, CH79, CH114 and CH115 were cited from Tian et al., 2017; Borehole TJC-1 is introduced from Li Jie et al., 2018; Borehole D219 is quoted from Hu Guangyuan et al., 2017

岸带,面积约为1.75万 km²(中国科学院海洋研究所,1985)。其海底是发育在中国东部大陆架上的一个形成于中生代和新生代的浅海盆地(赵保仁等,1995),坡度平缓,自四周向中央和渤海湾口微倾斜(图1)。渤海湾沿岸表层粒度较粗,多粉砂和黏土粉砂,东北部则多砂质粉砂;海湾中部粒度较细,多为黏土质和粉砂质黏土(中国科学院海洋研究所,1985)。渤海湾中新代沉积层厚达5000 m以上,蕴藏着丰富的天然气和石油(中国科学院海洋研究所,1985;高瑞琪等,2004;付兆辉等,2008)。作为深入内陆的陆表海湾,晚第四纪以来由于冰期和间冰期气候的更替,海平面曾发生多次升降变化,渤海湾因此受到海陆交互作用的强烈影响(李杰等,2018)。晚更新世以来,由于海面的多次波动和岸线的频繁迁移,渤海湾及相邻沿岸低地经历了3次大的海陆交替过程(赵松龄等,1978)。

渤海湾沿岸河流含沙量巨大,淤积严重,滩涂广阔。目前沿岸入海湾的主要为海河水系,历史时期黄河和滦河也曾注入(杜瑞芝等,1990;薛春汀等,2003)。黄河全长5464 km,发源于中国西北的青藏高原,经黄土高原,现代由山东省垦利县注入渤海,年均径流量580亿 m³,泥沙含量的多年平均值为11亿 t(Wang et al.,2007),约占渤海输沙量的90%以上,是渤海现代沉积物的主要来源(Liu et al.,2016)。海河是由永定河、大清河、子牙河汇合而成的,年均径流量60.2亿 m³,年平均输沙量为428万 t(邢焕政,2003)。滦河发源于冀北山地,于滦县附近流入华北平原东北部,长877 km,年均径流量47.9亿 m³,年输沙量2210万 t(张义丰等,1983)。

渤海湾为三面环陆的半封闭性海湾,位于中纬度季风区,气候主要有以下特征:热量充足,明显受到海洋调节,年平均气温11.9℃;降水集中,变率较大,降水量自东南向西北递减,区内年均降水量为600~900 mm,季节分配极不均匀(中国科学院海洋研究所,1985)。渤海湾的水温冬季沿岸低于湾中,以1月最低,略低于0℃;夏季沿岸高于湾中,8月最高,约为28℃,水温年变差在28℃以上(中国科学院海洋研究所,1985)。冬季常结冰,结冰期始于12月,终于翌年3月,结冰期约为4个月。渤海湾的盐度分布趋势是湾中高于近岸,分别为29‰~31‰和23‰~29‰。但紧邻岸滩一带,受沿岸盐田排卤的

影响,盐度高达33‰。盐度的年变差为8‰(中国科学院海洋研究所,1985)。

渤海湾波浪以风浪为主。波向受季风影响,冬季盛行西北浪或北浪,夏季盛行东南浪,平均波高1.0~1.5 m,最大波高7.5 m(中国科学院海洋研究所,1985)。渤海湾属于半日潮,平均潮差为2~3 m,大潮潮差为4 m左右。落潮的延时大于涨潮的延时,分别为7 h和5 h(董礼先等,1989)。渤海湾的环流主要是由高盐的黄海暖流从渤海海峡北部进入渤海中央并延伸到渤海西岸,受海岸阻挡分成南北两支,南支进入渤海湾北部,转折南下,形成逆时针向的流动。同时黄河冲淡水沿渤海湾南岸向西运动,形成顺时针向的流动。所以渤海湾的平均环流是北部为逆时针向,南部为顺时针向的双环结构(中国科学院海洋研究所,1985;赵保仁等,1995)。

3 材料和方法

3.1 浅地层剖面

浅地层剖面调查于2016年5—6月开展,调查船为业治净号,共获得约2089.3 km的高分辨率地震剖面,具体位置图1所示。采取走航拖曳方式,船速控制在9.26 km/h左右。浅剖测量装备采用英国AAE公司生产的SBP/AAE高分辨率数字浅地层剖面仪,震源为电火花,激发能量500 J,间隔800 ms,打印量程约100 ms,带通滤波为500~6000 Hz。手动震源和水听器释放长度均为30 m(距离船尾),震源与水听器间距约5 m。地层有效穿透深度一般在50 m左右,分辨率优于0.5 m。调查采用美国NAVCOM技术公司生产的C-NAV3050型GPS导航定位系统,差分源为Beacon信号,定位中误差<5.0 m。

3.2 钻孔

研究海域2个钻孔于2017年7月获得,钻孔采用机械回旋取心,取心管直径90 mm。钻孔点位坐标及高程测量由中海达H32 RNSS RTK获取,钻孔位置如图1所示,各个钻孔高程、孔深以及位置数据见表1。岩心剖开后,照相备份,同时对钻孔岩心沉积特征进行描述,包括沉积物颜色、组成、构造、化石、生物扰动及上下层位接触关系,以此来进行沉积环境分析。

3.3 放射性碳测年

钻孔沉积物分样过程对沉积物描述并照相及

表1 渤海湾地区钻孔位置

钻孔名称	钻孔位置		高程/m	孔深/m	取心率/%
	纬度	经度			
BHZK2017-1	38°45'14.61"N	118°05'22.77"E	-16.4	32	88.40
BHZK2017-2	38°33'36.59"N	118°03'51.35"E	-12.5	30.5	95.20

备份,同时对钻孔软体动物贝壳化石进行采集,洗净后进行鉴定及照相。选取其中保存较完整且磨损程度较低的贝壳和少部分泥炭或植物根茎碎屑样品进行AMS ^{14}C 测年。该年龄测试在美国迈阿密Beta实验室完成。渤海湾地区校正值为 $\Delta R = -178 \pm 50 \text{ a}$ (Southon et al., 2002),校正版本为CALIB 7.0.2(Reimer et al., 2013)。

3.4 光释光测年

在钻孔中沉积环境相对稳定层位,获取OSL测年样品28件,每件样品由同一层位两个直径3.5 cm、长6 cm的黑色圆筒胶卷盒密封、防震保存,最终由自然资源部海洋地质实验样品检测中心进行测试,测试具体方法如Wintle (1997)和Qiu et al. (2014)。剂量率计算所需的U和Th的含量采用Thermo X Series II型等离子体质谱仪获得、K的含量采用IRIS Intrepid II XSP型等离子体发射光谱仪检测,等效剂量通过Daybreak 2200型释光测量仪获得,实验激发光源为蓝光二极管($\lambda = (470 \pm 30) \text{ nm}$),仪器的辐照源为($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$) β 源。

4 结果

4.1 测年结果

钻孔BHZK2017-1、2中10件AMS ^{14}C 年龄和11件沉积物OSL年龄如表2和表3所示。

4.2 沉积相和沉积单元

根据沉积岩相特征,可将岩心BHZK2017-1、

BHZK2017-2划分为6个沉积单元,自上而下分别为DU1—DU6(图2,图3)。岩性描述如下:

4.2.1 DU6

深度: BHZK2017-1: 27.23~32 m; BHZK2017-2: 27.5~30.5 m。

该沉积单元以灰色粉砂质黏土为主,局部夹深灰色—灰色粉砂薄层,有机质和虫孔发育,常见植物根茎碎屑和粉砂透镜体(图2、3a),偶见陆相贝壳碎屑、钙质结核。本单元沉积粒度整体较细,且富含有机质,推测为湖沼相沉积。该相在2个钻孔中较为发育,但目前缺少测年数据,暂无法确认DU6年代范围。不过,根据上覆沉积单元DU5和DU4已有的测年数据来判定,该单元沉积时间不早于MIS3晚期。

4.2.2 DU5

深度: BHZK2017-2: 15.5~27.5 m。

该沉积单元含有至少两个沉积旋回,每个旋回可以分为上下两段。上段为灰黄色—棕灰色粉砂与粉砂质黏土互层,以粉砂为主,含铁锈状斑块和虫孔(图2,图3b),局部见贝壳碎片,可见织纹螺属(*Nassarius* sp.)腹足化石,推测为潮坪相沉积;下段见棕灰褐色粉砂质黏土,夹浅灰色粉砂薄层,偶见虫孔和植物根茎碎屑,推测为泛滥平原沉积。根据钻孔BHZK2017-2中多个AMS ^{14}C 和OSL测年数据得出,DU5沉积时间为 $(33.2 \pm 3.3) \sim (39.4 \pm 3.9) \text{ ka BP}$,处在MIS3期晚期。因此,DU5被认为是MIS3期的海陆交互相沉积,多沉积旋回可能揭示了该段时间海平面的快速波动变化。

4.2.3 DU4

深度: BHZK2017-1: 10.9~27.23 m; BHZK2017-2: 11.51~15.5 m。

该沉积单元以灰黄色—浅黄色—棕黄色粗粉

表2 渤海湾钻孔AMS ^{14}C 测年数据Table 2 List of AMS ^{14}C ages from boreholes in Bohai Bay

钻孔	样品号	孔深/m	Beta编号	材料	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	惯用年龄/(a BP)		校正年龄/(cal a BP)	
						中值	范围(1 σ)	中值	范围(1 σ)
BHZK2017-1	B1701-1	2	498274	<i>Potamocorbula laevis</i>	-0.8	1420 \pm 30	1160	1049~1233	
	B1701-2	4.7	498275	<i>Arca subcrenata</i>	-0.8	108.97 \pm 0.41		2002~2009	
	B1707-3	7.58	498276	牡蛎	2	4000 \pm 30	4260	4172~4353	
	B1701-4	23	498277	<i>Dosinia</i> sp.	-2.4	>43500			
BHZK2017-2	B1702-1	1.74	498278	<i>Arcasubcrenata</i>	-0.7	540 \pm 30	365	301~419	
	B1702-2	3.65	498279	<i>Sinonovacula</i> sp.	-5.1	1090 \pm 30	815	753~885	
	B1702-3	7.38	498280	贝壳碎片	-3.1	3290 \pm 30	3345	3268~3420	
	B1702-4	9.21	498281	木屑	-26.9	8850 \pm 30	9995	9887~10146	
	B1702-5	17	498282	有机质泥	-22	33770 \pm 220	38245	37977~38568	
	B1702-6	19.87	498283	贝壳碎片	-1	>43500			

表3 渤海湾钻孔光释光(OSL)测年数据
Table 3 List of OSL ages from boreholes in Bohai Bay

送样编号	样品深度/m	钻孔号	实验编号	U/($\mu\text{g/g}$)	Th/($\mu\text{g/g}$)	K/%	等效剂量(Gy)	年龄/ka	误差/ka
BHX19	7.95	BHX2017-1	2018A032	16.4	34.62	505.9	37.82	14	1.4
BHX20	11	BHX2017-1	2018A033	13.53	33.37	505.3	36.64	13.7	1.4
BHX21	15	BHX2017-1	2018A034	16.58	32.31	437.9	4.17	1.6	0.2
BHX22	21.8	BHX2017-1	2018A035	21.58	23.16	536.3	39.82	14.6	1.5
BHX23	24.7	BHX2017-1	2018A036	14.55	26.86	494.5	40.19	16.4	1.6
BHX24	27.2	BHX2017-1	2018A037	24.54	26.04	565.9	60.82	21.8	2.2
BHX25	10.31	BHX2017-2	2018A038	24.03	28.24	519.7	96.74	34.2	3.4
BHX26	16.2	BHX2017-2	2018A039	16.52	27.08	521.4	86.54	33.2	3.3
BHX27	18.9	BHX2017-2	2018A040	16.37	26.49	519.9	101.23	39.4	3.9
BHX28	25.1	BHX2017-2	2018A041	20.92	29.83	433.1	87.64	34.6	3.5

砂—极细砂—细砂为主(图3d),局部夹有粉砂质黏土薄层,发育平行层理,偶见有机质。BHCK2017-1孔深23 m处见钙质结核和贝壳碎屑富集层,碎屑含毛蚶(*Arca subcrenata*)等,但破碎和磨损程度极高,疑为后期搬运再沉积(图3c)。DU4在BHCK2017-1孔中沉积厚度较厚,达到15 m以上,粒度粗且成分均一,推测为主河道沉积,而在BHCK2017-2中发育较薄,并且沉积物粒度以粗粉砂为主,推测为分流河道沉积。根据BHCK2017-1中AMS ^{14}C 和OSL的测年数据,DU4为(13.7 \pm 1.4)~(21.8 \pm 2.2)ka BP发育,为MIS2期的沉积物。

4.2.4 DU3

深度: BHCK2017-1: 7.9~10.9 m; BHCK2017-2: 9.35~11.51 m。

该沉积单元以棕灰色—灰黄色粉砂质黏土夹灰黄色粉砂薄层为主,局部发育虫孔和粉砂透镜体,见细小锰铁质颗粒(图2,图3e),推测为泛滥平原相沉积。BHCK2017-2孔顶部AMS ^{14}C 测年结果为9995 cal a BP,因此该段沉积可能为MIS2期晚期至全新世早期的陆相沉积。

4.2.5 DU2

深度: BHCK2017-1: 6.5~7.9 m; BHCK2017-2: 7.1~9.35 m。

本段以灰色粉砂质黏土为主,夹黏土质粉砂薄层,含丰富的虫孔,见较丰富的贝壳碎屑,如小牡蛎碎屑等(图2,图3f,图3g),推测为潮坪—浅海相沉积。现代黄河三角洲潮坪极其发育,但是本区钻孔中潮坪厚度较薄(<2 m),且典型的潮坪层理(如透镜状层理)不太发育,可能与全新世初海平面较快的上升速率有关(Liu et al., 2004; Hori et al., 2007)。两孔中少量的AMS ^{14}C 数据显示DU2在

9990~3340 cal a BP,为全新世以来的海相沉积。

4.2.6 DU1

深度: BHCK2017-1: 0~6.5 m; BHCK2017-2: 0~7.1 m。

本段以灰色粉砂质黏土夹灰色—深灰色粉砂透镜体为主, BHCK2017-2顶部发育虫孔和有机质(图2,图3h),整体较均匀分布贝壳碎片,如毛蚶(*Arcasubcrenata*)、光滑蓝蛤(*Potamocorbula laevis*)和缢蛏属(*Sinonovacula* sp.),以上贝壳多生长在有淡水注入的潮间带或者河口地区(张素萍, 2008; 徐凤山等, 2008),因此结合下伏地层, DU1主体应为前三角洲相沉积,顶部为现代浅海沉积。根据2孔的AMS ^{14}C 测年结果, DU1在2孔中的沉积时间有所差异,暗示了多期次的三角洲沉积。

4.3 浅地层剖面地震单元

根据浅地层剖面上反射同相轴的不同终止方式,结合其内部的反射结构、振幅强弱、连续性等内部反射形态,并与地质钻探资料(钻孔BHCK2017-1, BHCK2017-2)对比综合分析,在典型浅地层剖面可以识别4个声学反射界面,分别代表了不同沉积环境和不同物质成分的分界面,并分别命名海底为H0,自海底向下分别为H1、H2、H3、H4,另外在H0与H1之间可见两个内部反射界面,自南向北依次为R1和R2。依据这些反射界面,将浅地层剖面地震单元自下而上划分为SU4、SU3、SU2、SU1几个浅剖层,通过几个典型剖面(图4),对应的层深图和层厚图(图5,图6),各层特征分述如下。

4.3.1 地震单元SU4

SU4层是自H4界面以下地层,未见底,整体反射上部较强,下部较弱,可能与电火花信号穿透地层的极限有关。顶界面(H4)为较清晰的侵蚀面,在

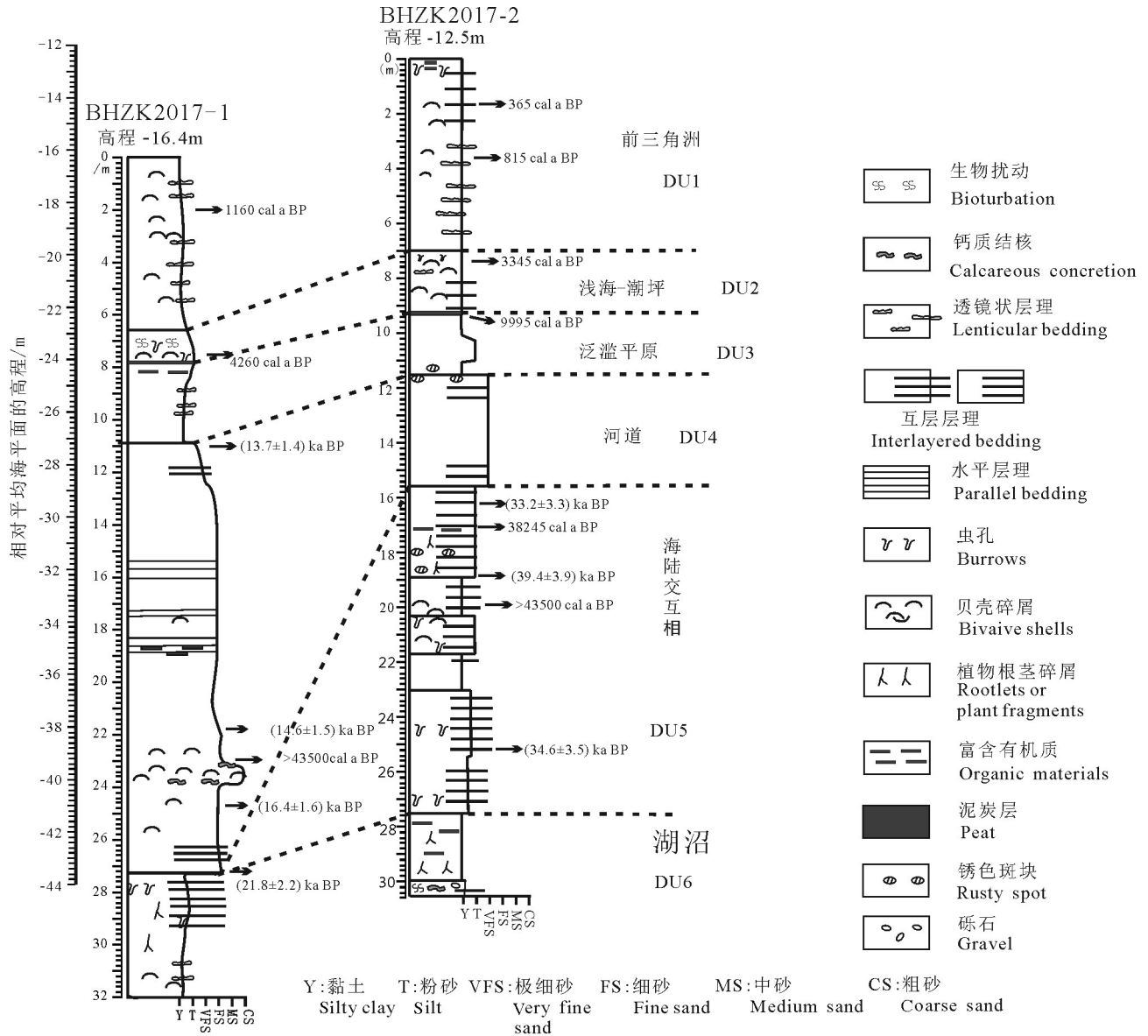


图2 钻孔BHZK2017-1、BHZK2017-2地层对比图
Fig.2 Stratigraphic compared map between borehole BHZK2017-1 and BHZK2017-2

区域范围广泛分布(图4),可能揭示了低体系域时期的侵蚀沉积特征。H4界面平均高程为-45 m(图5d),区域范围内整体呈现北东低南西高的特征,但由于最深处地震数据的缺乏和极其不连续,SU4层厚度无法确定。通过与钻孔沉积地层单元的对比分析,该地震单元与DU4层相对应。根据上覆地层的年代推测,本地震单元可能是MIS4期之后的沉积,顶部有部分MIS4期的陆相湖沼沉积,下部为可能为MIS5的海陆交互相沉积。

4.3.2 地震单元SU3

SU3层是自海底H2向下到H4之间的地层,位

于SU4层上方,整体反射较强。常见明显的反射纹层信号,顶底界面均为较清晰的分界面(图4)。H2界面平均高程约-31 m,北部低西南高(图5c)。SU3有两个沉积中心,分别在西南部和东部地区。在西南部,SU3平均厚度为17 m左右,并向着东北方向逐渐降低(图6c);在东部,沉积层较厚,平均厚度约22 m。在北部,沉积层较薄,平均厚度仅为12 m;在北部,SU3中呈现出东西方向分布,宽度可达9 km的“侵蚀沟”(图4b)。这个沟在地震剖面反射模糊,推测为古河道充填(图7)。根据浅剖和沉积相分析,SU3层中包括MIS3期中DU5、DU4和MIS2期

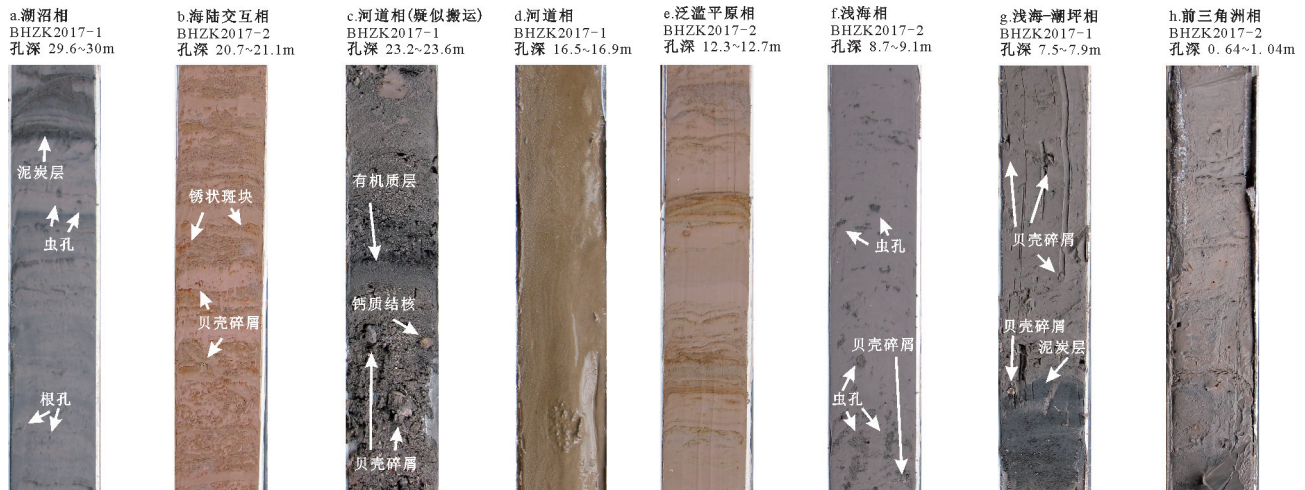


图3 渤海湾钻孔中典型的沉积相及沉积特征

Fig.3 Typical sedimentary facies and characteristics revealed from boreholes in Bohai Bay

中DU3(图4),整体为海陆交互相沉积。

4.3.3 地震单元SU2

SU2层是自海底H1向下到H2之间的地层,地震剖面上反射强烈,呈现深黑色,底界面清晰且局部呈现侵蚀波浪状界面,位于SU3层上方(图4)。H1界面平均高程为-27 m(图5b),SU2层在研究区域广泛分布,厚度比较稳定,平均厚度在3.5~5 m(图6b)。整体趋势为西北向东南逐渐变厚,最厚部分约5 m。在SU2中整体上有S型或者近似平行的地形地貌,利用相应钻孔的对应分析,该层由粉砂与黏土质粉砂组成(图4),综合浅剖和沉积相分析,SU2与DU2相对应,为全新世的潮坪沉积以及部分泛滥平原沉积。因此H2线推测代表全新世海侵之处的界面,而沉积厚度分布图与海侵大致方向一致,即由渤海海峡自东向西流入渤海湾。

4.3.4 地震单元SU1

SU1层是自海底H0向下到H1之间的地层,底界面清晰平直(图4)。SU1近岸地区沉积厚度在7 m左右,并逐渐向东北地区变薄(图6a)。从区域浅地层剖面资料可知,SU1层覆盖整个调查区,水深20 m以上该层厚度平均为5~8 m,在水深超过20 m的区域,特别是调查区北侧,靠近曹妃甸地区厚度仅为2~4 m(图6a)。根据浅剖和沉积相分析,SU1与DU1相对应,为MIS1期。H1线推测可能为最大海泛面。SU1层反射结构大部分为水平状,但在西侧的南北向测线中最多可以识别出R1和R2两条层内部反射界面,西侧的东西向大多可以识别出一条

内部反射界线(图4),出现1次或2次的叠覆,可能显示出多期次的沉积过程。

5 讨论

5.1 渤海湾晚更新世以来的地层框架特征

综合前人的研究成果,同时利用本文浅地层剖面和钻孔中沉积相的特征,大致建立渤海湾地区晚更新世晚期以来的地层框架,分别从渤海湾西部和南部沿岸、北部地区和中部地区进行阐述。

在渤海湾西部和南部地区,根据钻孔BHZK2017-1和BHZK2017-2沉积相和地层序列分析(图2),该地区可以基本分为两种沉积框架。其一,从晚更新世以来的沉积框架向上逐渐由湖沼(高程-43.63~-48.4 m,下同)、河道(-27.3~-43.63 m)、泛滥平原(-24.3~-27.3 m)、浅海-潮坪(-22.9~-24.3 m)到前三角洲以及现代滨浅海沉积(-16.4~-22.9 m),另外一种由湖沼(-40~-43 m)、海陆交互相(MIS3期)(-28~-40 m)、河道(-24.01~-28 m)、泛滥平原(-21.85~-24.01 m)、浅海-潮坪(-19.6~-21.85 m)到前三角洲以及现代滨浅海沉积(-12.5~-19.6 m)。全新世之前,两者最大的区别便是分别发育MIS2期低位体系域的陆相河道沉积以及MIS3期的高位体系域期间的海陆交互相沉积,推测钻孔BHZK2017-1位于主河道,河道下切深,下切时冲刷掉MIS3期的海陆交互相沉积;全新世海侵过程中,普遍发育有1~4 m厚的海侵砂质(潮坪和浅海)沉积;之上,高位体系域时期则广泛发育有多期次

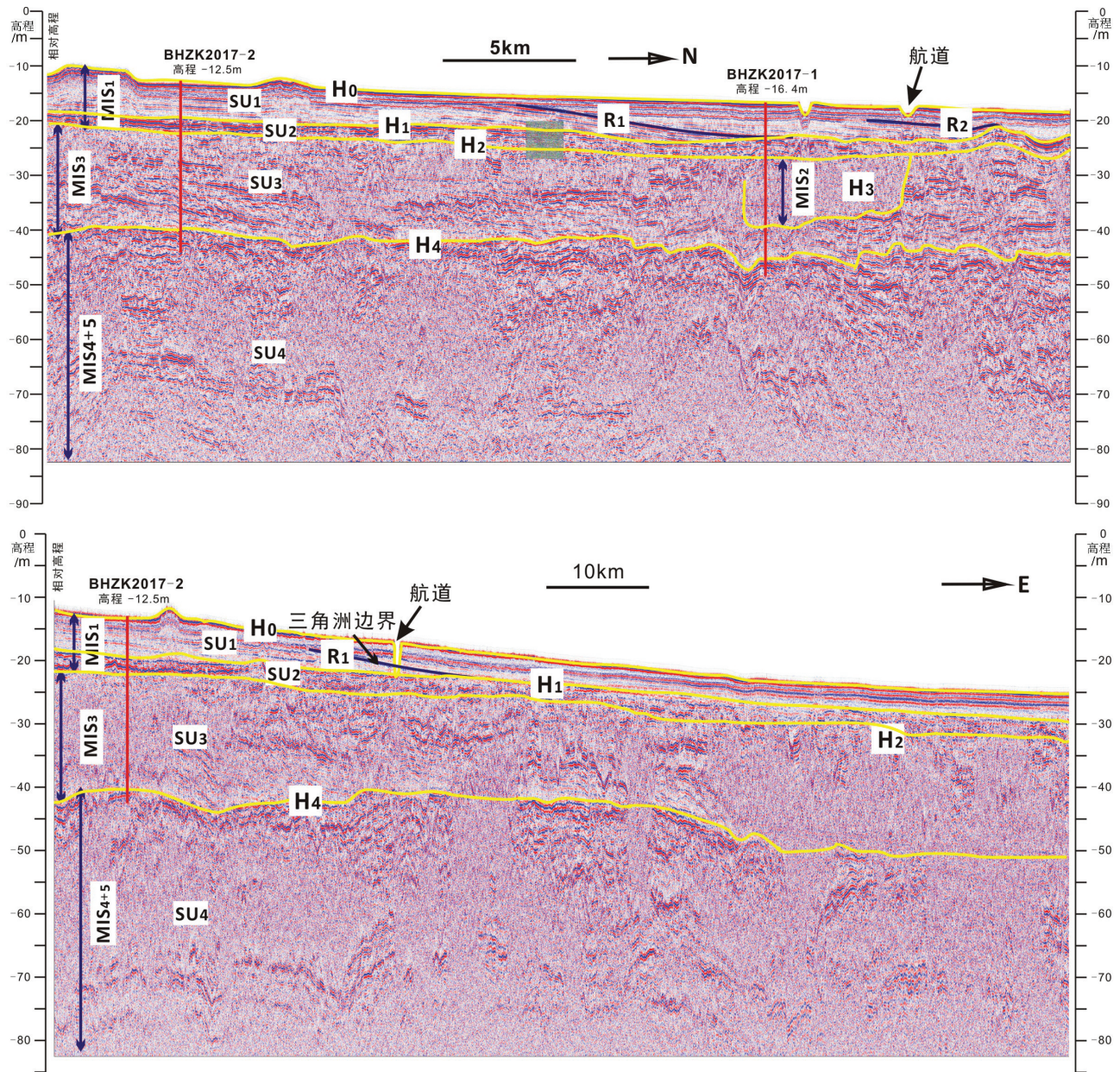


图4 测线L2、Z7浅剖剖面图

Fig.4 Seismic profiles of survey lines L2 and Z7

三角洲沉积,且沉积物的来源可能自古黄河以及海河水系等(Xue, 1993; Saito et al., 2000; Tian et al., 2017; Liu et al., 2019);除海岸带附近的潮坪沉积,以及现代河口(含海河)附近存在水下三角洲沉积外,渤海湾西侧和南侧表层基本为现代滨浅海的泥质或粉砂质沉积物所覆盖(王伟伟等,2013)。

渤海湾北部地区,属于滦河沉积区域。虽然本文浅地层剖面测线并未覆盖到此处,但胡广元(2017)通过钻孔D219(图7)得出渤海湾北部沉积相自下而上划分为陆相层(-52.95~-60.1 m);第二

海相层(-42.3~-52.95 m);分布于-30.5~-42.3 m的陆相层;顶部为全新世海相层(-19.7~-30.5 m)。Liu et al.(2019)渤海湾北部靠近曹妃甸港区的浅地层剖面解译结果则暗示了全新世沉积有10~15 m厚,除了底部的陆相河道/湖沼相(厚4~6 m),上部疑似2~3期次的滦河三角洲的沉积。

根据浅地层剖面资料及地震声波反射的强弱(图4),渤海湾中东部地区晚更新世晚期以来地层也可以分为两种框架。其一是晚更新世晚期以来的地层框架,自下而上划分为河道相、泛滥平原相、

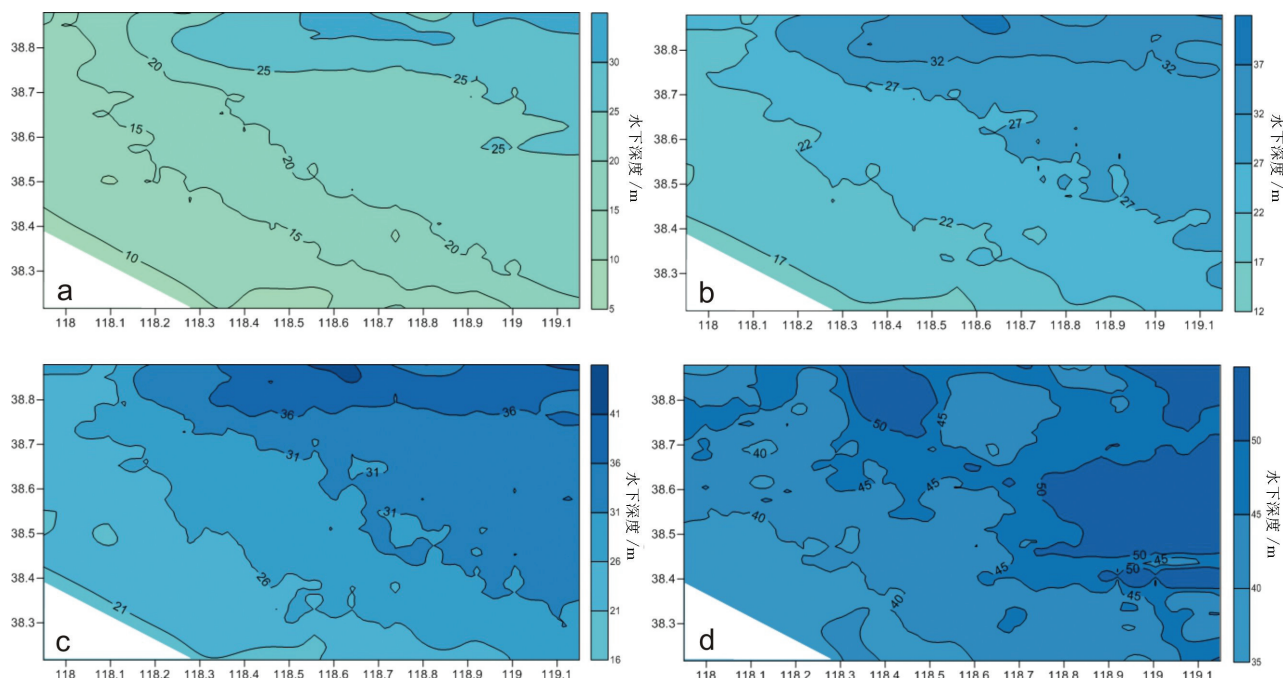


图5 地震单元层等深图(a,b,c,d分别是H0,H1,H2,H4层)

Fig.5 Isobath map of seismic units (a,b,c,d are H0,H1,H2,H4 respectively)

潮坪浅海相;另一种自下而上为海陆交互相、泛滥平原相、潮坪浅海相。渤海湾东侧钻孔TJC-1(图7)自孔深55 m以上的地层框架揭示了渤海湾晚更新世以来的沉积演化过程(李杰等,2018):MIS5期

(-56.03~-81 m)为海相(潮坪—浅海);MIS4期(-53.04~-56.03 m)为河道相;MIS3期上部(-43.66~-51.04 m)为潮坪—浅海相,下部(-51.04~-53.04 m)为陆相的河道相;MIS2期(-41.63~-43.66 m)为中

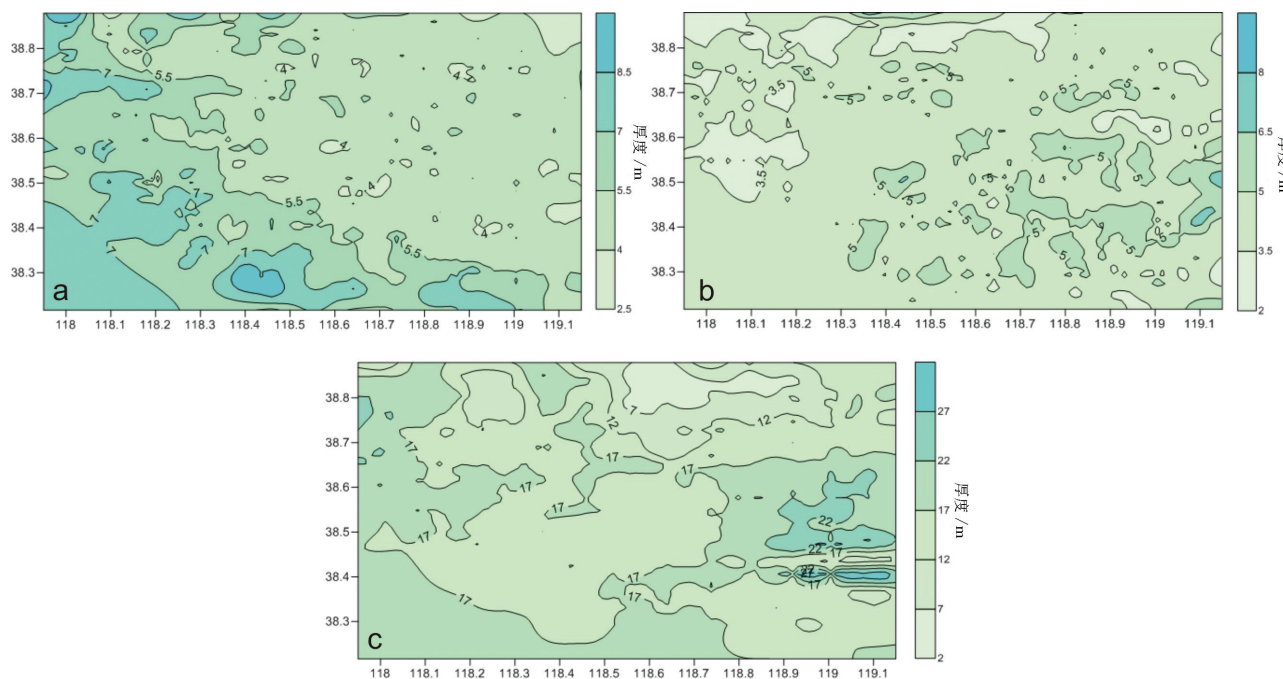


图6 地震单元层等厚图(a,b,c分别是SU1,SU2,SU3)

Fig.6 Isopach map of seismic units (a,b,c are SU1,SU2,SU3 respectively)

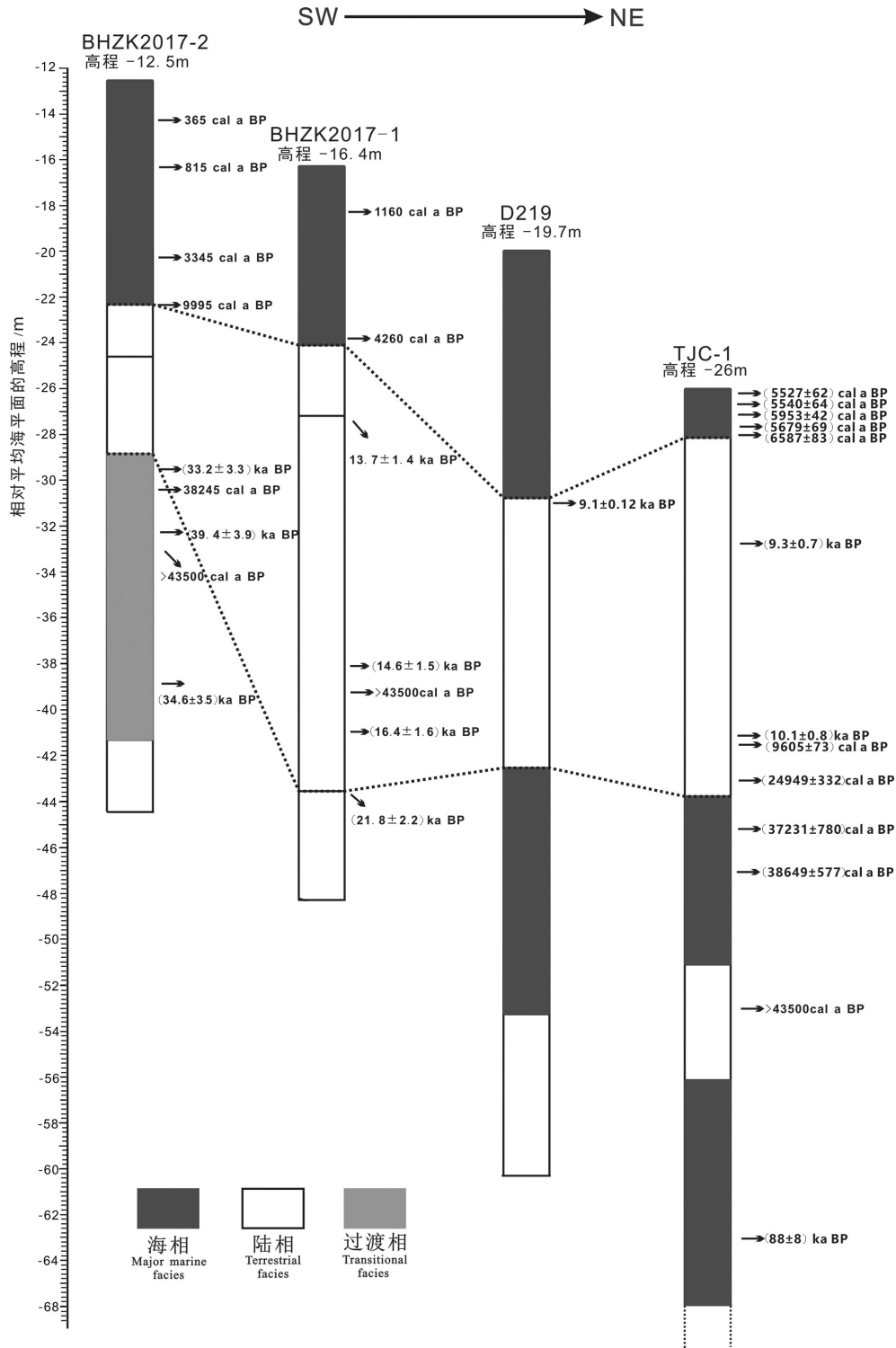


图7 渤海湾钻孔晚更新世以来的区域地层对比

D219钻孔引自胡广元等, 2017; TJC-1钻孔引自李杰等, 2018

Fig.7 Regional comparison of the strata in the boreholes of Bohai Bay since the Late Pleistocene Borehole D219 is quoted from Hu Guangyuan et al., 2017; borehole TJC-1 is quoted from Li Jie et al., 2018

细砂河道相;全新世初(-28.03~-41.63 m)为局部受潮汐影响的河道相,顶部(-26~-28.03 m)为海侵后的浅海潮坪相。

5.2 古河道分布

现代黄河流经华北平原注入渤海,相比较其他北方入海河流,黄河对黄渤海盆地沉积贡献最为巨大。薛春汀等(2003)在谭其骧(1981)的基础上系统总结了有历史记录时期古黄河的变迁历史,认为除了1128—1855年黄河主河道南迁至苏北一带,其余历史记录时期均注入渤海。另外,根据钻孔资料和部分海域浅剖资料,薛春汀等(2004)推测距今8500 a BP至公元前7世纪黄河没有经苏北入南海。

近来,渤海BH08孔(Yao et al., 2017)以及南黄海CSDP-1孔(Liu et al., 2018; Zhang et al., 2019)的资料显示黄河可能在0.8 Ma之前就已经影响了黄渤海地区。在渤海湾西南侧沿岸, Xu et al. (2015)在22个钻孔的基础上,认为古黄河在10.8 ~ 8.5 ka BP流经黄骅和海丰之间,大致垂直现今海岸线向东北注入渤海湾。胡广元等(2017)利用钻孔和浅地层剖面提出全新世海侵之前渤海湾北部古平原上分布岐口古河道系统(图8),推测可能为当时的古黄河。Tian et al. (2017)在天津海域附近利用浅地层剖面 and 钻孔数据揭示区域内可见多条全新世海侵之前(~9.4 cal ka BP之前)的古河道和侵蚀沟(图8)。综上所述,在渤海湾内及沿岸区域,至少全新世初期或全新世海侵之前古河道较为发育,且疑似为黄河的古河道系统,该河流系统整体似乎有向渤海湾北侧聚拢的趋势(图8)。

根据渤海湾地区浅地层剖面数据、2口钻孔岩心地层和测年分析,本文研究表明:渤海湾北部有一条东西流向,宽度约9 km(包含河谷阶地在内),水深可达11 m左右的古河道(图8)。在浅剖剖面上可以清晰地观测到切割的河谷和谷底的反射界面(图9a、b)。根据钻孔BHZK2017-1(图2)的沉积物特征和测年数据,大致推断该段古河道年龄在21.8 ~ 13.7 ka BP。在推测古河道的东侧,前人也发现在钻孔TCJ-1中有较厚的河道相沉积,沉积时间在10.1 ~ 9.0 cal ka BP,且河道相似受到潮流影响(李杰等, 2018)。结合前人研究成果和本文的发现,可能在晚更新世晚期至全新世早期(至少21 ~ 9 ka BP),古黄河均流经渤海湾,在渤海湾地层中留存

有广泛分布且相对较厚的河道相沉积。虽然目前没有矿物学方面的证据,但根据古河道的宽度和下切深度来看,该段河道是古黄河主干道的可能性最大,并且也极有可能是古黄河和古海河,甚至是古滦河共同汇集继续向东流的河道系统。

渤海湾古河道中充填的沉积物比周围地层晚,埋藏较浅,固结压实作用较差,另外受当时河流水动力影响,古河道中的沉积物在粒度组成、分选程度、密度、抗剪强度等物理性质上明显区别于周围地层。因此在古河道区域工程建设时需注意以上影响,而本文古河道的研究为今后在该区从事水下工程选址提供了导向。

5.3 三角洲发育

薛春汀和成国栋(1989)首次提出并在之后梳理完善了黄河三角洲至少共10期次超级叶瓣大致的分布范围和发育时间(薛春汀等, 1989, 2009; Xue et al., 1993)。然而,由于历史原因,薛春汀等人并未对各个叶瓣在海域时空分布的范围进行讨论和分析。近来的研究虽然对渤海湾内三角洲多期次的沉积厚度和空间分布进行了综合分析,但是未给出整体时空分布的范围和展布情况(Liu et al., 2019)。本文通过解译渤海湾中部地区海域的浅地层剖面数据(图9a、b、c、d)、2口钻孔以及在钻孔DU1单元中6个AMS ^{14}C 测试数据,同时结合已有的黄河三角洲叶瓣的研究,划分出在渤海湾中部海域内共4期水下三角洲叶瓣范围。其中由于最北侧的三角洲叶瓣超过研究区范围,超出的空间分布只能大致推测(图8)。

5.3.1 第一期三角洲水下叶瓣(700 BC—11AD)

研究区浅地层剖面解译结果显示第一期三角洲叶瓣以R1界面与其他叶瓣分开,其主体位于黄骅港—岐口外海,分布范围较广,最远可延伸到渤海湾中部(图8)。其三角洲叶瓣沉积物的展布范围与Liu et al. (2019)所认为的SU4和SU5段分布特征较为相似。钻孔BHZK2017-2(图2)中根据DU2(浅海相)上部高程约-7.38 m样品AMS ^{14}C 测年结果为3345 cal a BP,暗示其三角洲起始时间至少晚于3300 cal a BP之后;顶部由于为现代滨浅海沉积,DU1层的主体—前三角洲沉积结束时间暂无法确定。利用已有黄河古河道变迁的研究(邹逸麟等, 1982),薛春汀等(2003)认为700 BC左右黄河下游

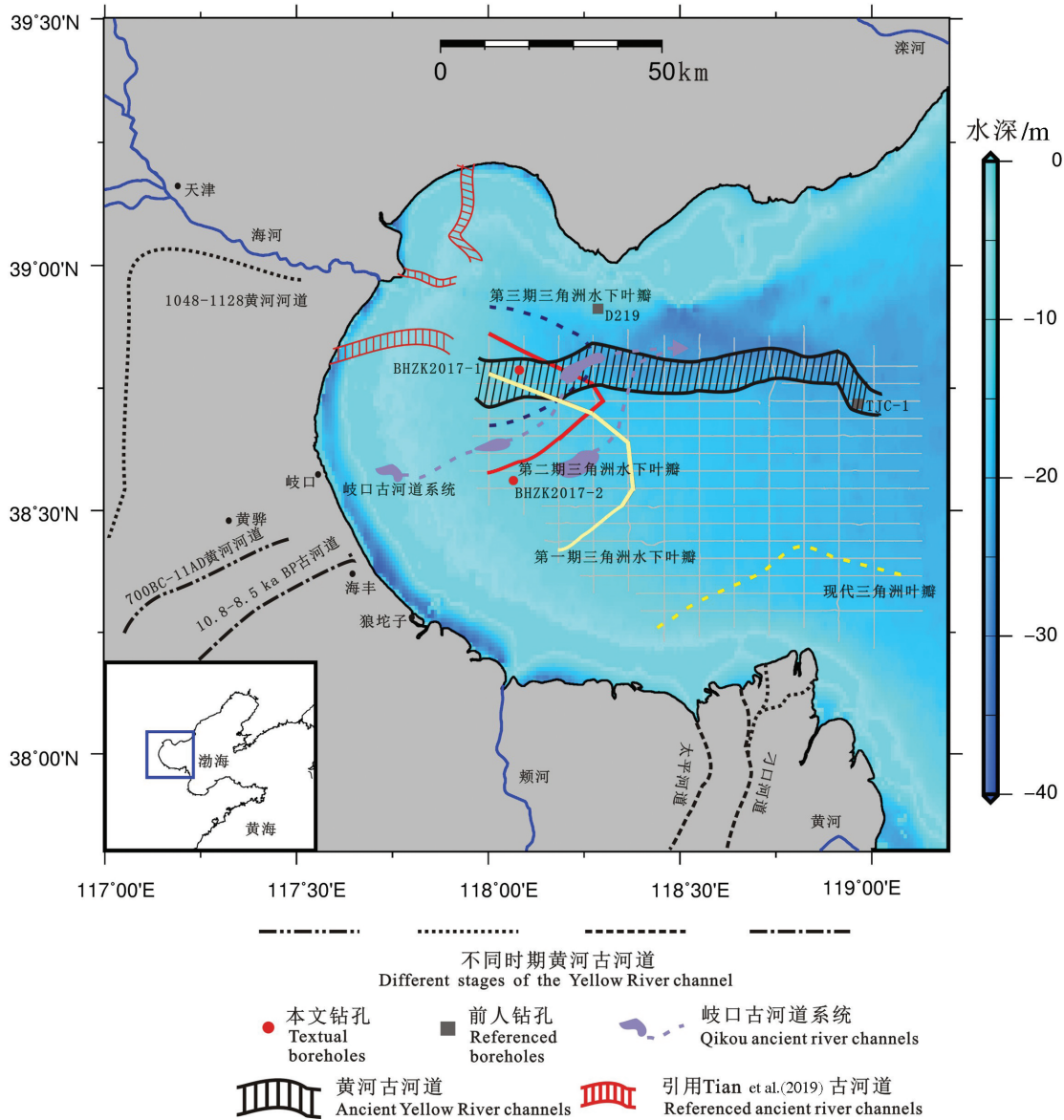


图8 渤海湾古河道及水下三角洲范围分布图

海河入海口附近红色古河道段引自 Tian et al., 2017; 歧口古河道系统引自胡广元等, 2017; 10.8 ~ 8.5 ka BP 古河道段引自 Xu et al., 2015; 700BC—11AD 黄河河道、1048—1128 黄河河道、太平河道和刁口河道引自薛春汀等, 2003

Fig.8 Distribution of ancient river channels and phases of subaqueous deltas in Bohai Bay

The red ancient river section near the Haihe River estuary is cited from Tian et al., 2017; the Qikou ancient river system is cited from Hu Guangyuan et al., 2017; the 10.8 ~ 8.5 ka BP ancient river section is cited from Xu et al., 2015; the 700BC—11AD Yellow River, 1048—1128 Yellow River, Taiping River and Diaokou River are cited from Xue Chunting et al., 2003

主河道经过河北歧口地区(图8),同时另有一条支流到达狼坨子,形成黄河三角洲第四期的歧口超级叶瓣。根据叶瓣水下展布的位置以及少量的测年数据,本文大致推测研究区域第一期水下三角洲叶瓣可能为黄河三角洲歧口超级叶瓣的海域延展部分,即发育时间在700 BC~11 AD。

5.3.2 第二期三角洲叶瓣(11~1128 AD)

第二期三角洲水下叶瓣分布通过浅地层剖面中

的R1和R2线进行框定(图8,图9a,b),其展布在歧口至天津港外,与Liu et al.(2019)所认为SU6范围大致相似。钻孔BHZK2017-1中-2 m处的AMS ¹⁴C测年结果(表2)为约1160 cal a BP,而第二期叶瓣覆盖在第一期叶瓣之上,因此形成时间应该晚于11 AD。已有研究认为古黄河在3600~2600 cal a BP经过天津海河地区,使得海河地区的多条支流逐渐汇拢,大约公元11之后,海河逐渐形成,因此在11~1048 AD之间

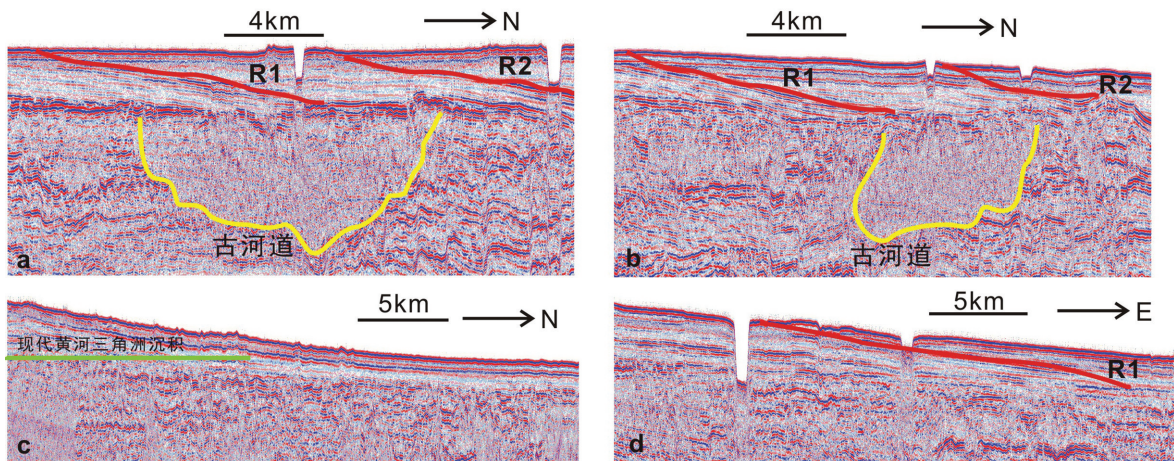


图9 典型古河道和三角洲叶瓣浅剖分析图

Fig.9 Typical Seismic profiles of ancient river channels and delta lobes

应该发育有古海河三角洲(薛春汀等,2003)。1048—1128年,黄河河道一度过天津入海,袭夺了海河河道(图8),形成了塘沽超级叶瓣(薛春汀等,2003,2008)。根据第二期叶瓣的展布和测年数据,本文推测第二期三角洲可能为古海河三角洲和塘沽超级叶瓣水下部分,发育时间在11~1128 AD。

5.3.3 三期三角洲叶瓣(1400AD—现在)

第三期三角洲叶瓣覆盖在第二期之上,以R2线为底界,主体分布在现代海河口外,对应Liu et al.(2019)所认定的SU7部分。由于浅剖测线未覆盖到三角洲叶瓣边界,目前无法准确得到三期三角洲叶瓣北界的具体位置,且缺少测年数据。但根据前人的研究(地理系海岸研究组,1974)以及本文三期三角洲的位置,本文推断可能是现代海河三角洲(图8),其大致形成于1400 AD后。

5.3.4 现代三角洲叶瓣

根据浅剖数据(图9c)可以看出研究区渤海湾南部有明显的三角洲沉积,整体分布范围较广。由于位于黄河废弃河道入海口附近(图8),其推测可能是现代黄河三角洲沉积。黄河下游主河道于1855年之后重新回归到山东北部入渤海,形成了现代黄河三角洲(Xue et al.,1995)。在现代黄河三角洲地区黄河入海河道自1855—1996年以来发生了7次改道,形成8期次三角洲小叶瓣,位于北侧的三角洲叶瓣活动时间分别在1904—1929年(太平河道)和1964—1976年(刁口河道)(薛春汀,1994;Xue et al.,1995)。

由于三角洲特有的泥沙混合的沉积结构,沉积速度快,导致整体地层结构不稳,为一种潜在的孕灾环境。通过浅地层剖面数据和钻孔分析解译,本文初步解析的全新世三角洲在渤海湾的展布情况,将有助于渤海湾海岸带开发、海底工程建设以及地质灾害防范等。

6 结 论

(1)利用渤海湾2个钻孔和约2000 km浅地层剖面资料分析,研究区晚更新世以来地层框架和沉积序列可以分两种:其一自下而上分别为湖沼相、河道相(MIS2期)、泛滥平原、浅海—潮坪到前三三角洲以及现代滨海沉积,另外一种湖沼相、海陆交互相(MIS3)、泛滥平原、浅海—潮坪到前三三角洲以及现代滨海沉积。

(2)根据浅地层剖面数据分析解译,渤海湾北部有一条东西向宽度可达9 km,水深约11 m的古河道。结合前人钻孔和测年数据推测,该段古河道可能是晚更新世以来的黄河主河道,其年龄在21.8~9 cal ka BP,并且古海河、古滦河可能也汇聚在此段河道,向东注入黄渤海盆地。

(3)浅地层剖面的研究表明:研究区西部和南部地区全新世浅海沉积上分布着至少4期次的三角洲,分别是第一期三角洲(700 BC~11AD)、二期三角洲(11~1128 AD)、三期三角洲(1400AD~现在)和现代黄河三角洲,大致对应了黄河三角洲第四期的歧口超级叶瓣、古海河三角洲和塘沽超级叶瓣、现

代海河三角洲和现代黄河三角洲叶瓣。

致谢:感谢项目组成员赵广明、丁喜桂、王锦以及山东科技大学博士生凌子龙,研究生郭若舜和贵州大学研究生金宗玮在野外调查、室内分析和论文写作过程中给予的帮助。

References

- Chen Yongsheng, Wang Fu, Tian Lizhu, Li Jianfen, Shang Zhiwen, Wang Hong, Qi Wuyun. 2014. Holocene sedimentation rates and their response to fluvial supply on the west coast of Bohai Bay[J]. Geological Bulletin of China, 33(10): 1582–1590 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Guodong, Ren Yucan, Li Shaoquan, Li Guangxue, Dong Wan. 1986. Evolution and vertical sequence of river channels in the modern Yellow River delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 6(2): 3–17 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Guodong, Xue Chunting. 1997. Sedimentary Geology of Yellow River Delta[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–8 (in Chinese).
- Coast Studies Group, Department of Geography. 1974. The subaqueous delta of the Hai–Ho and silting problem of Tientsin New Port[J]. Journal of Nanjing University(Natural Science), (1): 80–89 (in Chinese with English abstract).
- Dong Lixian, Su Jilan, Wang Kangshan. 1989. Tide current in the Yellow Sea and its relationship with sediment transport[J]. Acta Oceanologica Sinica, 11: 102–114.
- Du Ruizhi, Liu Guoxian, Yang Songlin, Zhou Yihua, Zhang Bing. 1990. Modern sedimentation rate and sedimentation process in Bohai Bay[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 10(3): 15–22 (in Chinese with English abstract).
- Fu Zhaohui, Chen Fajing, Li Min, Shi Pitong, Min Feiqiong. 2008. Sedimentary characteristics of the Xinbei oilfield and their controls on hydrocarbon accumulation[J]. Geology in China, 35(4): 691–698 (in Chinese with English abstract).
- Gao Ruiqi, Zhao Wenzhi, Kong Fanxian. 2004. The Young Explorers Discussed Petroleum Geology of Bohai Bay Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Gao Shanming. 1981. Sedimentary model in Luanhe river[J]. Chinese Science Bulletin, 26: 895–896 (in Chinese).
- He Lei, Xue Chunting, Ye Siyuan, Alessandro Amorosi, Yuan Hongming, Yang Shixiong, Edward A Laws. 2019. New evidence on the spatial–temporal distribution of superlobes in the Yellow River Delta Complex[J]. Quaternary Science Reviews, 214: 117–138.
- He Lei, Ye Siyuan, Yuan Hongming, Xue Chunting. 2019. Rethinking the spatio–temporal distribution of Lijin superlobe in the Yellow River Delta[J]. Acta Geographica Sinica, 74(1): 146–161 (in Chinese with English abstract).
- Hori Kazuaki, Saito Yoshiki. 2007. An early Holocene sea–level jump and delta initiation[J]. Geophysical Research Letters, 34(18): L18401.
- Hu Guangyuan, Zhuang Zhenye, Yin Ping, Zhao Dongpo, Liu Shuang, Wang Ling. 2017. The hole D219 and the Late Quaternary paleogeographic environments in the northern Bohai Bay, China[J]. Marine Geology Frontiers, 33(6): 16–23 (in Chinese with English abstract).
- Institute of Oceanography. 1985. Chinese Academy of Sciences. Geology of Bohai Sea[M]. Beijing: Science Press, 1985 (in Chinese).
- Li Guangxue., Wei Helong, Yue Shuhong, Cheng Yiji, Han Yeshen. 1998. Sedimentation in the Yellow River delta, part II: Suspended sediment dispersal and deposition on the subaqueous delta[J]. Marine Geology, 149: 113–131.
- Li Jie, Li Rihui, Yang Shixiong, Chen Xiaohui, Chen Shanshan. 2018. Pollen assemblages and induced palaeoenvironmental changes in the western Bohai Sea since Late Pleistocene[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 38(2): 115–128 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chuncheng, Dai Fugui, Yang Jin, Yang Kesheng. 2010. Seismic interpretation of Eocene–Neogene geological structures and tectonic styles in the sea area of Bohai Gulf basin[J]. Geology in China, 37(6): 1545–1558 (in Chinese with English abstract).
- Liu J Paul, John D Milliman, Gao Shu, Cheng Peng. 2004. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, north Yellow Sea[J]. Marine Geology, 209(1/4): 45–67.
- Liu Jian, Wang Hong, Wang Feifei, Qiu Jiandong, Saito Yoshiki, Lu Jingfang, Zhou Liangyong, Xu Gang, Du Xiaolei, Chen Qiang. 2016. Sedimentary evolution during the last ~1.9 Ma near the western margin of the modern Bohai Sea[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 451: 84–96.
- Liu Jian, Zhang Xunhua, Mei Xi, Zhao Quanhong, Guo Xingwei, Zhao Weina, Liu Jianxing, Yoshiki Saito, Wu Zhiqiang, Li Jie, Zhu Xiaoqing, Chu Hongxian. 2018. The sedimentary succession of the last ~3.50 Myr in the western South Yellow Sea: Palaeoenvironmental and tectonic implications[J]. Marine Geology, 399: 47–65.
- Liu Shihao, Feng Aiping, Du Jun, Xia Dongxing, Li Ping, Xue Zuo, Hu Weifen, Yu Xiaoxiao. 2014. Evolution of the buried channel systems under the modern Yellow River Delta since the Last Glacial Maximum[J]. Quaternary International, 349: 327–338.
- Liu Shihao, Feng Aiping, Liu Chenguang, Zheng Yanpeng, Li Peiyong, Zhang Zhiwei. 2019. Seismic stratigraphy and morphology of the Holocene progradational system beneath Bohai Bay, Bohai Sea: Lobate evolution of a multi–sourced subaqueous fluvial–deltaic complex[J]. Marine Geology, 409: 31–47.
- Liu Yanxia, Huang Haijun, Dong Huijun, Qi Yali, Zhang Yi. 2015. Geomorphic characteristics and location of the maximum Holocene transgression boundary in the southwestern coast of the Bohai

- Sea[J]. *Quaternary Sciences*, 35(2): 340–353 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Jiandong, Liu Jian, Saito Yoshiki, Wang Hong, Yang Zigeng, Nakashima Rei. 2014. Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinoform off the Southern Shandong Peninsula in the Western South Yellow Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 13 (5): 747–760.
- Reimer Paula J, Bard Edouard, Bayliss Alex, Beck J Warren, Blackwell Paul G, Ramsey Christopher Bronk, Buck Caitlin E, Cheng Hai, Edwards R Lawrence, Friedrich Michael, Grootes Pieter M, Guilderson Thomas P, Hafliason Hafliði, Hajdas Irka, Hatte Christine, Heaton Timothy J, Hoffmann Dirk L, Hogg Alan G, Hughen Konrad A, Kaiser K Felix, Kromer Bernd, Manning Sturt M, Niu Mu, Reimer Ron W, Richards David A, Scott E Marian, Southon John R, Staff Richard A, Turney Christian S M, Plicht Johannes van der. 2013. IntCal13 and marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50000 years cal BP[J]. *Radiocarbon*, 55: 1869–1887.
- Saito Yoshiki, Wei Helong, Zhou Yongqing, Akira Nishimura, Yoshio Sato, Setsuya Yokota. 2000. Delta progradation and chenier formation in the Huanghe (Yellow River) delta, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18: 489–497.
- Southon John, Kashgarian Michael, Fontugne Michel, Merivier Bernard, Yim Wyss. 2002. Marine reservoir corrections for the Indian Ocean and Southeast Asia[J]. *Radiocarbon*, 44: 167–180.
- Su Shengwei, Shang Zhiwen, Wang Haifeng, 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).
- Tan Qixiang. 1981. The lower reaches of the Yellow River before the Western Han Dynasty[J]. *Historical Geography*, (1): 48–64 (in Chinese with English abstract).
- Tian Lizhu, Chen Yanping, Jiang Xingyu, Wang Fu, Pei Yandong, Chen Yongsheng, Shang Zhiwei, Li Jianfen, Li Yan, Wang Hong. 2017. Post-glacial sequence and sedimentation in the western Bohai Sea, China, and its linkage to global sea-level changes[J]. *Marine Geology*, 388: 12–24.
- Wang F, Li J, Chen Y, Fang J, Zong Y, Shang Z, Wang H. 2015. The record of Mid-holocene maximum landward marine transgression in the west coast of Bohai Bay[J]. *China Marine Geology*, 359: 89–95.
- Wang Haifeng, Pei Yandong, Liu Huimin, Fan Changfu, Wang Hong. 2011. Holocene cheniers: Spatial and temporal distribution and sea level indicators in Bohai Bay[J]. *Geological Bulletin of China*, 30 (9): 1396–1404 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hong. 1996. Paleoenvironment of the Holocene cheniers and oyster reefs in the Bohai Bay, China[J]. *Quaternary Sciences*, 16: 71–79 (in Chinese with English abstract).
- Wang Houjie, Yang Zuosheng, Saito Yoshiki, J.Paul Liu, Sun Xiaoxia, Wang Yan. 2007. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950–2005): Impacts of climate change and human activities[J]. *Global and Planetary Change*, 57: 331–354.
- Wang Qiang, Li Fenglin. 1983. Changes of Quaternary sea and land in the west coast of Bohai Bay[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 3: 85–91 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiqiang, Yuan Guibang, Zhang Shu, Liu Zengshou, 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 (in Chinese with English abstract).
- Wang Weiwei, Fu Yuanbin, Li Shutong, Li Peiyong. 2013. Distribution on surface sediment and sedimentary divisions in the middle part of Bohai Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(3): 478–485 (in Chinese with English abstract).
- Wintle Ann G. 1997. Luminescence dating: Laboratory procedures and protocols[J]. *Radiat.Meas.*, 27: 769–817.
- Wu Chen, Hu Jingrong, Wang Zihui. 1982. Transgression of the west coast of Bohai Bay in the middle Holocene[J]. *Geological Bulletin of China*, 6: 26–31 (in Chinese with English abstract).
- Xing Huanzheng. 2003. Evolution of Haihe River port line and analysis of sediment source[J]. *Haihe Water Resources*, (2): 28–30 (in Chinese).
- Xu Fengshan, Zhang Suping. 2008. An Illustrated Bivalvia Mollusca Fauna of China Seas[M]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Xu Qinmian, Yang Jilong, Yuan Guibang, Chu Zhongxin, Zhang Zhenke. 2015. Stratigraphic sequence and episodes of the ancient Huanghe Delta along the southwestern Bohai Bay since the LGM[J]. *Marine Geology*, 367: 69–82.
- Xue Chunting, Cheng Guodong. 1989. Shelly ridges in west coast of Bohai Sea and Holocene Yellow River delta system[C]//Yang Zigeng, Lin Hema (eds.). *Quaternary Processes and Events in China Offshore and Onshore Areas*. Beijing: China Ocean Press: 117–125 (in Chinese).
- Xue Chunting. 1993. Historical changes in the Yellow River delta, China[J]. *Marine Geology*, 113: 321–330.
- Xue Chunting. 1994. Decision and recognition of modern Yellow River delta lobes[J]. *Geographical Research*, 13(2): 59–66 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunting, Zhu Xionghua, Lin Hema. 1995. Holocene sedimentary sequence, foraminifera and ostracod in west coastal lowland of Bohai Sea, China[J]. *Quaternary Science Review*, 14: 521–530.
- Xue Chunting, Zhou Yongqing, Wang Guiling. 2003. Reviews of the Yellow River delta superlobes since 700BC[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 23(3): 23–29 (in Chinese with English abstract).

- Xue Chunting, Zhou Yongqing, Zhu Xionghua. 2004. The Yellow River course and delta from end of Late Pleistocene to the 7th century BC[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 26(1): 48–61 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunting, Ding Dong. 2008. Weihe River–Mihe River Delta in south coast of Bohai Sea, China: Sedimentary sequence and architecture[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 28(5): 672–676 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunting. 2009. Historical changes of coastlines on west and south coasts of Bohai Sea since 7000 a.B.P.[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 29(2): 217–222 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunting. 2016. Extents, type and evolution of Luanhe river fan–delta system, China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 36(6): 13–22 (in Chinese with English abstract).
- Yang Huairan, Wang Jian. 1990. Quaternary transgression and coastline changes in Huanghe River (Yellow River) Delta[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 10: 1–14 (in Chinese with English abstract).
- Yao Zhengquan, Shi Xuefa, Qiao Shuqing, Liu Qingsong, Selvaraj Kandasamy, Liu Jianxing, Liu Yanguang, Liu Jihua, Fang Xisheng, Gao Jingjing, Dou Yanguang. 2017. Persistent effects of the Yellow River on the Chinese marginal seas began at least ~880 ka ago[J]. *Scientific Reports*.
- Zhang Jin, Wan Shiming, Peter D Clift, Huang Jie, Zhang Kaidi, Mei Xi, Liu Jian, Nan Qingyun, Zhao Debo, Li Anchun, Chen Lihui, Zheng Hongbo, Yang Shouye, Li Tiegang, Zhang Xunhua. 2019. History of Yellow River and Yangtze River delivering sediment to the Yellow Sea since 3.5 Ma: Tectonic or climate forcing?[J]. *Quaternary Science Reviews*, 216:74–88.
- Zhang Suping. 2008. *Atlas of Marine Mollusks in China*[M]. Beijing: China Ocean Press (in Chinese).
- Zhang Yifeng, Li Xinfeng. 1983. The characteristics of material component and the material resources in Huanhe(Yellow) River, Luanhe River[J]. *Marine Sciences*, 3:15–18 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Baoren, Zhuang Guoqiang, Cao Deming, Lei Fanghui. 1995. The circulation and tidal residual current of Bohai Sea and their influence on sediment distribution[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 26(5): 466–473 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Songling, Yang Guangfu, Cang Shuxi, Zhang Hongcai, Huang Qingfu, Xia Dongxing, Wang Yongji, Liu Fushou, Liu Chengfu. 1978. On the Marine stratigraphy and coastlines of the western coast of the gulf of Bohai[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 9: 15–25(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xitao, Geng Xiushan, Zhang Jingwen. 1979. Sea level change in eastern China over 20000 years[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1: 269–281 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xitao, Zhang Jingwen, Jiao Wenqiang, Li Guiying. 1980. Shelly ridge on the west coast of Bohai Bay[J]. *Chinese Science Bulletin*, 25: 279–281 (in Chinese).
- Zhao Xitao, Chen Zongyong, Zhu Jiwen. 1996. *Sea Level Changes in China*[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press (in Chinese with English abstract).
- Zhuang Zhenye, Xu Weidong, Li Xuelun. 1991. The coastline evolution on the south coast of the Bohai Sea since 6 ka B.P.[J]. *Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition)*, 21(2): 99–110 (in Chinese with English abstract).
- Zou Yilin, Tan Qixiang, Shi Nianhai. 1982. *Yellow River, Changes of river system in China history*[C]//Physical Geography of China, Historical Physical. Beijing: Science Press, 38–86 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈永胜, 王福, 田立柱, 李建芬, 商志文, 王宏, 齐乌云. 2014. 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*, 33(10): 1582–1590.
- 成国栋, 任于灿, 李绍全, 李广雪, 董万. 1986. 现代黄河三角洲河道演变及垂向序列[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 6(2): 3–17.
- 成国栋, 薛春汀. 1997. 黄河三角洲沉积地质学[M]. 北京: 地质出版社: 1–8.
- 地理系海岸研究组. 1974. 海河水下三角洲的演变特征和天津新港泥沙来源的初步探讨[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, (1):80–89.
- 董礼先, 苏纪兰, 王康墀. 1989. 黄渤海潮流场及其与沉积物搬运的关系[J]. *海洋学报*, 11, 102–114.
- 杜瑞芝, 刘国贤, 杨松林, 周义华, 张兵. 1990. 渤海湾现代沉积速率和沉积过程[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 10(3): 15–22.
- 付兆辉, 陈发景, 李敏, 时丕同, 闵飞琼. 2008. 新北油田沉积特征及对油气成藏的影响[J]. *中国地质*, 35(4): 691–698
- 高瑞琪, 赵文智, 孔凡仙. 2004. 青年勘探家论渤海湾盆地石油地质[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 高善明. 1981. 滦河三角洲沉积模式[J]. *科学通报*, 26: 895–896.
- 何磊, 叶思源, 袁红明, 薛春汀. 2019. 黄河三角洲利津超级叶瓣时空范围的再认识[J]. *地理学报*, 74(1): 146–161.
- 胡广元, 庄振业, 印萍, 赵东坡, 刘爽, 王玲. 2017. D219孔和渤海湾北部晚第四纪地质环境[J]. *海洋地质前沿*, 33(6): 16–23.
- 李杰, 李日辉, 杨士雄, 陈晓辉, 陈姗姗. 2018. 渤海西部海域晚更新世以来的孢粉组合及古环境变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 38(2):115–128.
- 刘春成, 戴富贵, 杨津, 杨克绳. 2010. 渤海湾盆地海域古近系—新近系地质结构和构造样式地震解译[J]. *中国地质*, 37(6):1545–1558.
- 刘艳霞, 黄海军, 董慧君, 祁雅莉, 张翼. 2015. 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*, 35(2): 340–353.
- 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.
- 谭其骧. 1981. 西汉以前的黄河下游河道[J]. *历史地理*, (1): 48–64.

- 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: 1396-1404.
- 王宏. 1996. 渤海湾全新世贝壳堤和牡蛎礁的古环境[J]. 第四纪研究, 16: 71-79.
- 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: 85-91.
- 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.
- 王伟伟, 付元宾, 李树同, 李培英. 2013. 渤海中部表层沉积物分布特征与粒度分区[J]. 沉积学报, 31(3): 478-485.
- 吴忱, 胡镜荣, 王子惠. 1982. 全新世中期渤海湾西岸的海侵[J]. 海洋通报, 6: 26-31.
- 邢焕政. 2003. 海河口岸线演变及泥沙来源分析[J]. 海河水利, (2): 28-30.
- 徐凤山, 张素萍. 2008. 中国海产双壳类图志[M]. 北京: 科学出版社.
- 薛春汀, 成国栋. 1989. 渤海西岸贝壳堤及全新世黄河三角洲体系[C]//杨子庚, 林和茂主编. 中国沿海及近海地区第四纪进程与事件[M]. 北京: 海洋出版社: 117-125.
- 薛春汀. 1994. 现代黄河三角洲叶瓣的划分和识别[J]. 地理研究, 13(2): 59-66.
- 薛春汀, 周永青, 王桂玲. 2003. 古黄河三角洲若干问题的思考[J]. 海洋地质与第四纪地质, 23(3): 23-29.
- 薛春汀, 周永青, 朱雄华. 2004. 晚更新世末至公元前7世纪的黄河流向和黄河三角洲[J]. 海洋学报, 26(1): 48-61.
- 薛春汀, 丁东. 2008. 渤海莱州湾南岸潍河—弥河三角洲: 沉积序列和沉积格架[J]. 地理科学, 28(5): 672-676.
- 薛春汀. 2009. 7000年来渤海西岸、南岸海岸线变迁[J]. 地理科学, 29(2): 217-222.
- 薛春汀. 2016. 滦河冲积扇—三角洲的范围和类型及其演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 36(6): 13-22.
- 杨怀仁, 王建. 1990. 黄河三角洲地区第四纪海进与岸线变迁[J]. 海洋地质与第四纪地质, 10: 1-14.
- 张素萍. 2008. 中国海洋贝类图鉴[M]. 北京: 海洋出版社.
- 张义丰, 李凤新. 1983. 黄河、滦河三角洲的物质组成及其来源[J]. 海洋科学, 3: 15-18.
- 赵保仁, 庄国文, 曹德明, 雷方辉. 1995. 渤海的环流、潮余流及其对沉积物分布的影响[J]. 海洋与湖沼, 26(5): 466-473.
- 赵松龄, 杨光复, 苍树溪, 张宏才, 黄庆福, 夏东兴, 王永吉, 刘福寿, 刘成福. 1978. 关于渤海湾西岸海相地层与海岸线问题[J]. 海洋与湖沼, 9: 15-25.
- 赵希涛, 耿秀山, 张景文. 1979. 中国东部20000年来的海平面变化[J]. 海洋学报, 1: 269-281.
- 赵希涛, 张景文, 焦文强, 李桂英. 1980. 渤海湾西岸的贝壳堤[J]. 科学通报, 25: 279-281.
- 赵希涛, 陈宗镛, 朱季文. 1996. 中国海面变化[M]. 济南: 山东科学技术出版社.
- 中国科学院海洋研究所. 1985. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社.
- 庄振业, 许卫东, 李学伦. 1991. 渤海南岸6000年来的岸线演变[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 21(2): 99-110.
- 邹逸麟, 谭其骧, 史念海. 1982. 历史时期的水系变迁, 黄河[C]//中国自然地理, 历史自然地理. 北京: 科学出版社: 38-86.