

doi: 10.12029/gc20180106

高茂生, 郭飞, 侯国华, 仇建东, 孔祥淮, 刘森, 黄学勇, 庄海海. 2018. 渤海南部莱州湾晚更新世以来沉积演化特征[J]. 中国地质, 45(1): 59-68.
Gao Maosheng, Guo Fei, Hou Guohua, Qiu Jiandong, Kong Xianghuai, Liu Sen, Huang Xueyong, Zhuang Haihai. 2018. The evolution of sedimentary environment since late Pleistocene in Laizhou Bay, Bohai Sea[J]. Geology in China, 45(1): 59-68(in Chinese with English abstract).

渤海南部莱州湾晚更新世以来沉积演化特征

高茂生^{1,2} 郭飞³ 侯国华^{1,2} 仇建东^{1,2} 孔祥淮^{1,2} 刘森^{1,4} 黄学勇⁵ 庄海海⁶

(1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 国土资源部油气资源和环境地质重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266061; 3. 中国科学院地球环境研究所, 陕西 西安 710061; 4. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 5. 辽宁师范大学, 辽宁 大连, 116000; 6. 青岛大学, 山东 青岛 266071)

摘要:晚更新世以来渤海南部莱州湾发生了 3 次重要海侵-海退事件及沉积演化过程, 渤海南部多源河流三角洲对莱州湾沉积环境改变作用明显。本文选择莱州湾剖面进行沉积地层对比, 结合调查资料和测试数据, 初步建立莱州湾沉积地层格架, 分析晚更新世以来莱州湾沉积演化过程。研究发现, 渤海南部中小河流与黄河泥沙为莱州湾沉积物的共同物质来源, 二者在不同阶段分别对莱州湾沉积演化起主导作用。提出本区沉积地层具有分期性、分段性和相关性规律。在 124.6~72.0 ka B.P., 60.0~24.4 ka B.P. 和 10.2~4.0 ka B.P. 出现过 3 次暖湿期, 分别对应沧州海侵、献县海侵和黄骅海侵, 主要发育滨浅海相沉积, 向南退积为三角洲/潮坪—河流沉积; 由陆向海, 短源河流沉积贡献降低, 黄河沉积贡献增加。在 72.0~60.0 ka B.P. 和 24.4~10.2 ka B.P. 出现 2 次冷干期, 分别对应玉木早冰期和玉木晚冰期, 河流相发育, 三角洲进积。受海陆交互作用影响, 晚更新世以来渤海南部莱州湾大致经历了浅海相—三角洲—潮坪—浅海相—三角洲—陆相的沉积演化。

关键词:莱州湾; 晚更新世; 海侵/海退; 沉积演化

中图分类号: P763.21³ 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2018)01-0059-10

The evolution of sedimentary environment since late Pleistocene in Laizhou Bay, Bohai Sea

GAO Maosheng^{1,2}, GUO Fei³, HOU Guohua^{1,2}, QIU Jiandong^{1,2}, KONG Xianghuai^{1,2}, LIU Sen^{1,4}, HUANG Xueyong⁵, ZHUANG Haihai⁶

(1. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, Shandong, China; 2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, Shandong, China; 3. Institute of Earth Environment, CAS, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 4. China University of Geoscience, Wuhan 430074, Hubei, China; 5. Liaoning Normal University, Dalian 116000, Liaoning, China; 6. Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong, China)

收稿日期: 2017-12-05; 改回日期: 2018-01-23

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160144、GZH201200505)、国家重点研发专项(2016YFC0402801)及科技部基础性工作专项(2014FY210600)联合资助。

作者简介: 高茂生, 男, 1966 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事海洋沉积环境及海岸带地质研究; E-mail: gms532@163.com。

Abstract: There have existed three transgression–regression events and sedimentary evolution processes by sea level changes since late Pleistocene in the southern coast of Laizhou Bay, Bohai Sea. It is obvious that a multi–source fluvial delta sedimentary system may be more dominant for the sedimentary environment. Based on previous researchers'survey and collected data, the authors carried out research work such as division of sedimentary units, sedimentary facies analysis and stratigraphic division and correlation, with the purpose of establishing sedimentary stratigraphic framework of the Laizhou Bay. Besides, the authors focused on analyzing the sedimentary processes of the Laizhou Bay since Late Pleistocene. It is concluded that the main provenance of borehole 07 is Bailang River and the Yellow River, which have played an important role in the multi– source fluvial delta sedimentary system of the southern coast of Laizhou Bay since Late Pleistocene. The evolution can be divided into two glacial periods and three interglacial periods, corresponding to three transgression events and two regression events in Laizhou Bay since late Pleistocene. By geochemistry and provenance analysis, sediments have the characteristics of generation, segment and correlation. In 124.6–72.0 ka B.P., 60.0–24.4 ka B.P. and 10.2–4.0 ka B.P., there occurred three warm–wet periods, respectively corresponding to Cangzhou transgression, Xianxian transgression, and Huanghua transgression; In 72.0–60.0 ka B.P. and 24.4–10.2 ka B.P., which were two dry and cold periods, there was a continental sedimentary environment, corresponding to Wurm early glacial age and Wurm late glacial age. During the transgression period, there always developed littoral–neritic facies in marine area, which was gradually transitional to delta and fluvial facies in the land field, with sediments showing retrogradation superposition pattern. Contribution of short runoff rivers (Bailang river) was reduced gradually from land to sea. During the regression period, fluvial and delta facies were formed in most areas of Laizhou Bay. Terrigenous input of short runoff rivers increased, with sediments showing progradational sequences. From late Pleistocene to Holocene, the region went through sedimentary evolution of neritic facies–delta–continental facies–tidal flat–neritic facies–delta–continental facies.

Key words: Laizhou Bay; late Pleistocene; transgression/regression; sedimentary evolution

About the first author: GAO Maosheng, male, born in 1966, doctor, senior researcher, engages in the study of marine sedimentary environment and coastal geology; E–mail: gms532@163.com.

Fund support: Supported by the program of China Geological Survey (No. DD20160144), the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0402801) and National Science and Technology Basic Project (No. 2014FY210600).

1 引 言

莱州湾位于渤海盆地南部,湾口朝北,呈半圆形,系渤海南部最大海湾,东部与胶东半岛相连,西部与现代黄河三角洲接壤。自晚更新世以来,随着冰期、间冰期气候变化以及海面多次升降,渤海发生了沧州海侵、献县海侵和黄骅海侵以及它们之间的海退事件(秦蕴珊,1985)。期间,相应沉积了海相、陆相及陆海交互相沉积层,在莱州湾南岸由弥河、白浪河、虞河、潍河、胶莱河等共同形成了多源、短源河流三角洲沉积体系,潍河—弥河三角洲向海进积 20~55 km,现今海岸局部加积厚度超过 20 m (薛春汀,2008)。

莱州湾潮流属于非正规半日潮,以往复流为主。在黄河口附近流速达最大,从湾口向湾顶递减。莱州湾南岸系中国典型的淤泥质海岸,地处济阳拗陷中的潍北凹陷构造单元,并长期处于沉降活动中。进入晚更新世以来,受全球气候环境变化的

影响,海侵—海退活动与海岸线变迁频繁,交替发育了海相和陆相地层,蕴涵丰富的沉积环境演化信息,吸引众多学者对本区沉积环境的研究兴趣(李守军等,2017;彭子成等,1992;庄振业等,1999)。如利用钻孔沉积记录,重建渤海西岸沉积演化历史,定量讨论全新世相对海面变化(陈永胜等,2016)。进行中国近海沿岸沉积地球化学变异特征与物源及气候效应分析(赵一阳等,2002),探讨渤海西部沉积物稀土元素分布特征及其物源约束,开展海底沉积物来源、形成条件和控制因素研究(刘建国等,2010;蓝先洪等,2016)。彭子成等(1992)等运用热释光测年和地球化学数据揭示了晚更新世以来莱州湾沉积特征。庄振业等(1999)以 S3 钻孔为主,阐明渤海南部莱州湾晚第四纪以来海陆变迁及古环境演变。韩德亮(2001)发现元素特征值周期性旋回及突变,作为第四纪地层划分指标。刘恩峰等(2004)基于莱州湾南岸 A1 钻孔孢粉,分析植被及古气候交替变化,重建 120 ka B.P.以来莱州

湾古气候环境特征,探讨沉积物元素与陆源输入联系(杨守业和李从先,1999)。王志才等(2006)认为构造活动、海面变化以及陆源河流输入控制着莱州湾晚更新世以来沉积地层变化。总体上,黄河所提供的沉积物对渤海沉积控制作用明显,但不应忽视入海的中小短源河流(如弥河、白浪河、潍河等)对莱州湾沉积贡献。本文选择莱州湾剖面进行沉积地层划分和对比,结合调查资料和测试数据,初步建立浅地层沉积格架,深入了解沉积环境差异性,为陆海统筹、围填海工程及海洋环境提供沉积环境依据。

2 材料和方法

沉积物样品均取自于研究区钻孔,样品间隔取样深度为2~10 cm,样品编号按井号加上取样顺序编录,对该孔岩心进行了岩性描述、 ^{14}C 测年、光释光测年以及粒度等测试,以获得研究区110 ka B.P.以来的沉积地层和沉积环境的演化特征以及沉积物源变迁过程。采用X荧光光谱法(XRF)、等离子质谱法(ICP-MS)以及原子荧光光谱法(AF)进行沉积物样品元素化学测试,样品测试由国土资源部青岛海洋地质实验检测中心完成。 AMS^{14}C 样品测试由美国BETA实验室完成,测年的半衰期为4850 a。测试完成后,依据样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 测试数据,并结合分馏效应对数据进行校正,得到惯用年龄。

物源指数(PI)反映的是沉积物间化学成分接近程度, PI 值介于0和1之间。选择差别较大的元素区分端元物源,当 PI 值小于0.5,表明待判沉积物与端元沉积物1化学组成相近;而 PI 值大于0.5,表明待判沉积物与端元沉积物2化学组成相近。用物源指数(PI)分析物源变化和计算沉积贡献(蓝先洪等,2010;庞守吉等,2008), PI 计算公式如下:

$$PI = \frac{\sum |C_{ix} - C_{i1}|}{(\sum |C_{ix} - C_{i1}| + \sum |C_{ix} - C_{i2}|)}$$

式中: i 为元素或两元素之比; C_{ix} 为待判沉积物中元素 i 的含量; C_{i1} 、 C_{i2} 为端元沉积物1和端元沉积物2中元素 i 含量,本文指黄河与白浪河沉积物。

3 沉积特征

WFZK07孔位于山东潍坊北部的围填海区,距莱州湾南岸白浪河入海口东约1 km处(图1)。该孔于2013年6月完成施工,孔深80.0 m,人工回填深度

5.80 m。沿南北方向将该孔与渤海其他钻孔进行沉积对比,综合莱州湾地质浅钻的岩心记录、测试数据以及前人研究成果(彭子成等,1992;庄振业等,1999; Yao et al., 2014),依据钻孔沉积物沉积特征,进行不同沉积单元沉积相划分,共划分为5个沉积单元(DU1~DU5),初步建立莱州湾浅部沉积结构框架(图2)。其中,BH-1301、WFZK06、WFZK04、WFZK09、WFZK03、WFZK04"孔的数据来源于中国地质调查项目“山东半岛海岸带综合地质调查与监测”(项目编号:GZH201200505),BH08孔的数据来源于 Yao et al., 2014; WFZK06、WFZK09、WFZK03孔未作测年)。

沉积单元DU1:以黏土质粉砂、粉砂为主,在BH-1301和WFZK07孔中DU1单元的底部有约2 cm厚泥炭层,该泥炭层在莱州湾分布广泛,据 AMS^{14}C 测年为9649 cal a B.P.,可作为全新世底界标志层,如图2所示,沉积厚度相对稳定(<30 m),由海向陆沉积减薄。主要为河流—三角洲/潮坪—滨浅海相沉积。

沉积单元DU2:细砂—中砂,沉积厚度4~10 m,多以河流相沉积为主,由海向陆沉积减薄。系晚更新世晚期—玉木晚冰期的河流—三角洲—滨浅海相沉积。

沉积单元DU3:以黏土质粉砂、粉砂为主。陆相层为细砂夹粉砂。系晚更新世玉木冰期亚间冰期的河流—三角洲/潮坪—浅海相沉积,由于海面频繁波动,形成数个海陆交互相沉积地层。此间沉积厚度10~20 m,尤其在三角洲前缘沉积厚度较大。

沉积单元DU4: BH1301孔中以黏土质粉砂和粉砂为主,WFZK07孔以砂为主,夹粉细砂和泥砾透镜体。该单元形成于晚更新世晚期—玉木早冰期,沉积厚度十余米,在三角洲前缘沉积厚度较大。通过与邻近海域和陆上钻孔对比,三角洲和河流相沉积发育,前三角洲黏土质粉砂是多条短源河流共同贡献的结果,各河流形成的三角洲前缘主要由极细砂组成,河口间湾主要为黏土质粉砂沉积,由于分流河道的频繁迁移,三角洲前缘极细砂和河口间湾黏土质粉砂在纵向上叠置出现。

沉积单元DU5:以黏土质粉砂为主,夹粉细砂层,有粉砂质透镜体和黏土质条带,系晚更新世里斯—玉木间冰期的河流—三角洲/潮坪—浅海相沉积,沉积厚度较稳定,十几米不等,海相沉积厚度薄。

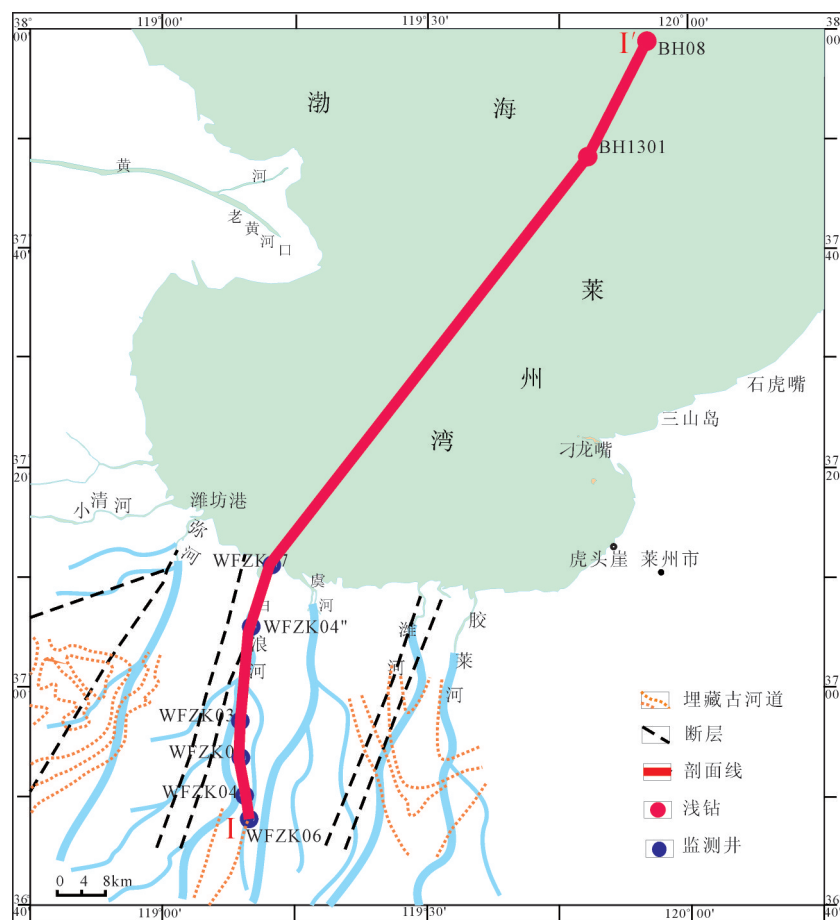


图1 莱州湾钻孔及剖面位置示意图

Fig.1 Location of cores and profile in Laizhou Bay

4 沉积物源

本文以 WFZK07 孔的 $\delta E_{uN} - \Sigma REEs$ 关系和物源判别指数 (PI) 进行沉积物源分析, 研究渤海南部短源河流 (白浪河) 和黄河的陆源输入对沉积体系的贡献。

据本文实测和文献数据 (古森昌等, 1989; 吴明清等, 1991; 石学法等, 1996), δE_{uN} 与 $\Sigma REEs$ 关系曲线如图 3 ($y = -170.61nx + 63.38$, $R^2 = 0.729$)。在 WFZK07 孔的 5 个沉积单元选取 15 个样品, 进行数据成图。图中可见, 数据点分布相对均匀, 深度 5.80~18.58 m、23.27~49.15 m 和 18.58~23.70 m 的样品多数分布于白浪河沉积区, 而深度 49.15~63.70 m 和 63.70~80.00 m 的样品大都集中落在黄河沉积区。白浪河数据大都落于曲线下方 (白浪河沉积区), 黄河数据多落在曲线上方 (黄河沉积区)。

相关性分析可知, 白浪河中 La/Sm 及 $\Sigma LREE/$

$\Sigma HREE$ 与粒度的相关性弱; 与黄河沉积物稀土元素含量对比 (蓝先洪等, 2009; Lim, 2006), 白浪河沉积物中的 La 、 Sm 、 $LREE$ 、 $HREE$ 含量相对偏差均大于 10%。因此, 本文采用对粒度影响较小的 La/Sm 及 $LREE/HREE$ 比值计算物源指数。

WFZK07 孔沉积物中的 La/Sm 及 $LREE/HREE$ 比值及所计算的 PI 值表明 (表 1), 以 49.15 m 为界, 上部以白浪河沉积贡献为主, 下部黄河沉积贡献加大。5.80~18.58 m 底界面 $AMS^{14}C$ 测年为 11.6 ka B.P., 为全新世以来的海陆交互层, 包括早全新世陆相层、中全新世黄骅海侵层和晚全新世陆相层。此阶段全新世的黄骅海侵范围较大, 持续时间短, 加之黄河频繁改道, 物源以白浪河为主。18.58~23.70 m 底界面 OSL 测年为 24.0 ka B.P., 为晚更新世晚期玉木主冰期河流相沉积。此阶段海面下降, 以近源河流为主, 远源的陆源输入较少。23.27~49.15 m 底界面 OSL 测年为 61.0 ka B.P., 为晚更新世晚期形成的

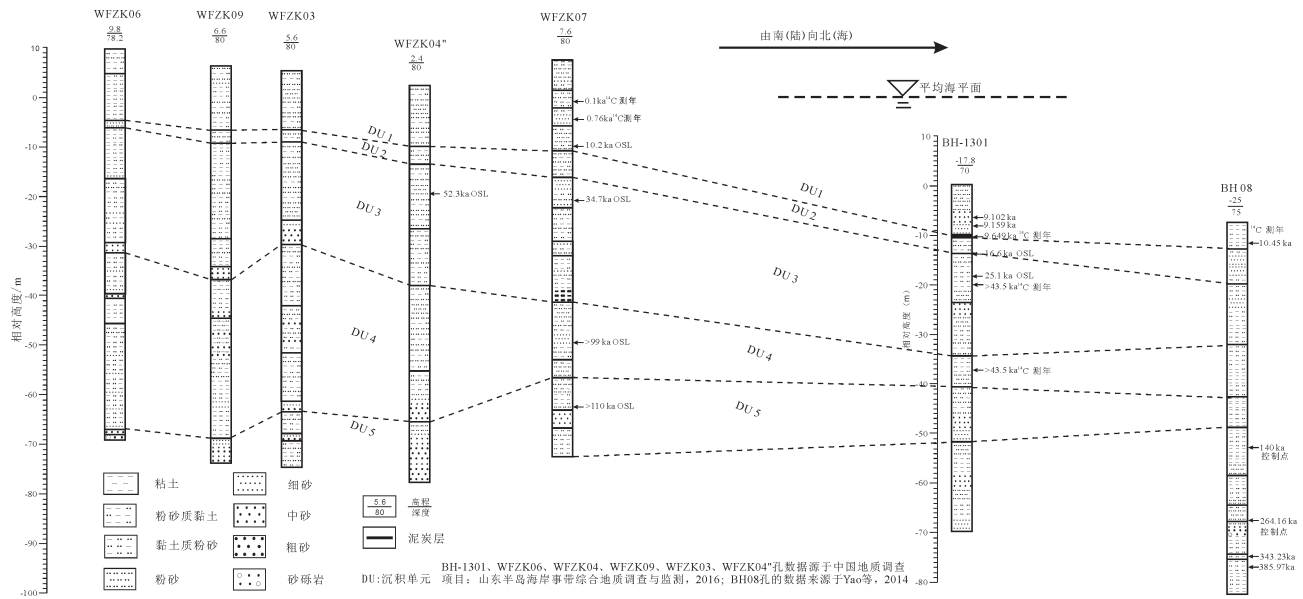


图2 莱州湾浅部沉积地层对比剖面 (I—I')

Fig.2 Profile of shallow sedimentary strata correlation in Laizhou Bay(I—I')

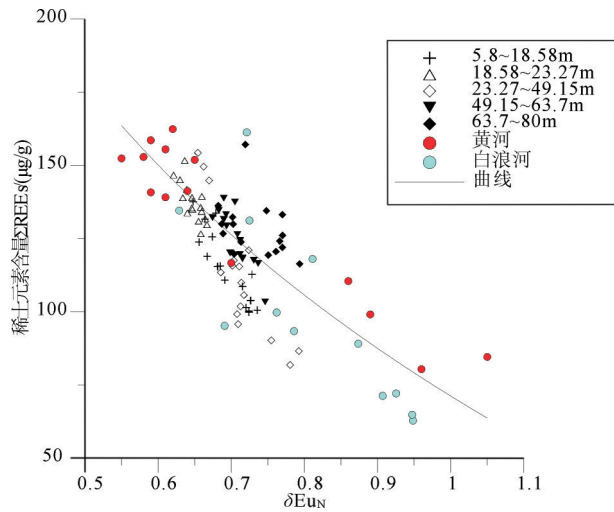


图3 WFZK07孔沉积物 δE_{uN} - $\Sigma REEs$ 关系图

Fig.3 Correlation between δE_{uN} and $\Sigma REEs$ for sediments in core 07

献县海侵层及其陆相层。以上海侵事件,以晚更新世晚期的献县海侵范围最小。此外,晚更新世晚期海退期的古黄河三角洲沉积物重矿物组合受现代黄河沉积物的物源控制(蓝先洪等,2010),因黄河已流入黄海陆架区,是东海陆架和黄海区的主要物源(韩有松和吴洪发,1982),黄河对莱州湾的沉积贡献相对减小,以白浪河等短源河流为主要物源。

49.15~63.70 m底界面 OSL 测年为 74.0 ka B.P., 为晚更新世晚期玉木早冰期的陆相层,以浅灰、浅黄色黏土质粉砂夹细粉砂及薄互层为主。受区域新构造活动影响,早更新世发生由相对隆起向绝对沉降转换,黄河贯通成为可能(杨守业等,2001)。因此,早更新世黄河全河贯通而形成一条完整河流,影响华北平原地区(Wang,2007),现代黄河改道几乎都经历漫流、汊流、归股、改道等阶段(庄振业,1991)。在地质历史时期,黄河改道频繁且河道行踪不定,晚更新世晚期黄河由东入海的格局转到向北入渤海的过渡阶段,发生漫流和汊流,使其可能成为主要物源。63.70~80.00 m底界面 OSL 测年为 128 ka B.P.,为晚更新世早期的沧州海侵层。在地质时期,黄河主要流路位于华北平原。短源河流输入量小,易受气候变化影响。在海面上升期,以黄河为主要物源,表现退积的叠加样式。

总体上,海侵期温暖湿润,沉积物粒度细,以化学风化为主,矿物元素富集。海退期寒冷干燥,化学风化作用弱,以物理风化为主,矿物含量较低(操应长等,2007)。如 Si/Al 和 Ti/Al 在垂向上的变化反映了莱州湾在全新世和晚更新世的冰期搬运动力及化学风化作用相对较弱;与之对应,从晚更新世晚期玉木早冰期到晚更新世早期,化学风化较强

表1 莱州湾WFZK07孔沉积物物源指数(PI)比较
Table 1 Comparison of provenance indexes (PI) of sediments in Core 07

深度/m	PI 白浪河		PI 黄河		物源判别
	LREE/HREE	La/Sm	LREE/HREE	La/Sm	
5.80~18.58	0.33	0.26	0.67	0.74	以白浪河为主
18.58~23.27	0.32	0.17	0.68	0.83	以白浪河为主
23.27~49.15	0.47	0.35	0.53	0.65	以白浪河为主
49.15~63.70	0.62	0.51	0.38	0.49	以黄河为主
63.70~80.00	0.63	0.64	0.37	0.36	以黄河为主

(Nesbitt et al.,1997; Zabel et al.,2001), Rb/Sr 值与风化强度成正比。Mg/Ca 从晚更新世晚期至早冰期到早冰期早期发生较大波动,表明莱州湾沉积环境及物源在晚更新世晚期发生了重要的转变。全新世、晚更新世早期及晚期的海相层中常微量元素及特征值元素呈明显的旋回变化,对应多个峰值。在晚更新世晚期的陆相地层中,矿物元素变化弱;晚更新世早期陆相地层中,元素变化幅度较小,对应多个峰值。矿物元素的变化所反映的沉积特征与晚更新世以来的气候和海面的变化有对应关系,指示海侵海退过程中的沉积环境及海面可能发生多次改变。此外,在海退成陆时期,长期蒸发作用和季节性河流物质运输形成卤水存储,在蒸发泵和回流渗滤的共同作用下,发生盐份的向下运移、累积、分馏、矿物蚀变,陆相沉积物掩埋了前期高盐水成为地下卤水(高茂生等,2015;彭子成等,1992)。其中,第I海相层中卤水 TDS 值 50~130 g/L,第II海相层中卤水 TDS 值 50~165 g/L,第III海相层中卤水 TDS 值 50~140 g/L,以第II海相层的卤水 TDS 值高,储量大。

5 讨论

晚更新世早期的沧州海侵期海相层(Qp₃¹,距今约124.6~72.0 ka B.P.):海面上升,PI平衡线向陆源移动(图4a)。古岸线大致在花官—卧铺南部—寿光北部—潍北总场—龙池北部一带(郑懿珉等,2014),此阶段海面处于上升期,陆源碎屑物质供应少,为退积叠加。黄河与白浪向海沉积贡献量降低,但在波浪、潮汐及沿岸流影响下,远源河流平均径流量大,携带大量泥沙的黄河沉积贡献仍大于白浪河,为晚更新世以来全球最高海面期。据渤海南岸羊口盐场附近E钻孔(韩德亮等,2001),现代黄河三角洲的9个钻孔(王绍鸿等,1979)以及本文研究,此阶段气候温暖湿润,化学风化较强,北部河流相

发育,三角洲发育不全,向南过渡为以细粒为主的潮坪或沼泽沉积。

晚更新世晚期的玉木早冰期陆相层(Qp₃³,距今72.0~60.0 ka B.P.):海面下降,以黄河为主的陆源输入量增加,PI平衡线向河流漂移(图4b)。由于黄河径流量大,携带泥沙多,影响范围广,南部河流发育,向北发展为三角洲—浅海相沉积。进积时间短,陆源输入量充足,与沧州海侵期的沉积相差不大。

晚更新世晚期献县海侵层(Qp₃³,距今60.0~24.4 ka B.P.):海面上升幅度大,PI平衡线向北离陆移动。海侵范围远,古岸线大致在莱州湾南岸的广饶南—寿光—固堤北—昌邑北—新河—土山—沙河口一带。碎屑物质供应少,黄河、白浪河的沉积贡献降低,但沉积空间增大,属沉积退积。晚更新世晚期黄河已流入黄海陆架区,短源河流为主要物源。南部河流沉积发育,向北过渡到三角洲或潮坪、沼泽沉积,再到浅海相沉积。

此期有多个波峰和波谷,对应多次海面波动发生,形成海陆交互层。与沧州海侵相比,此阶段气候暖湿,化学风化作用弱。与刘恩峰等(2004)用孢粉反演古气候的变化一致,气候属于由干冷向暖湿转变的过渡期,受波浪和潮汐的共同作用,海相层发育。经历了“陆—海—陆”的演变,属于大理亚间冰期的滨岸湖沼相沉积环境。

晚更新世晚期玉木主冰期陆相层(Qp₃³,距今24.4~10.2 ka B.P.):PI平衡线向黄河(西北方向)偏移。此阶段天气寒冷干燥,海面处于下降阶段,莱州湾大部分地区有陆相河流沉积,厚度小。黄河沉积贡献增加,表现为进积的叠加样式。

全新世黄骅海侵(Qh,距今10.2~4.0 ka B.P.):PI平衡线向北移动加剧(图4c)。海侵范围最远达到花官北—寿光北—固堤南—昌邑北—新河—土山—虎头崖一带。海面处于上升期,沉积退积。白浪河和黄河沉积贡献逐渐降低,黄河频繁改道,不同

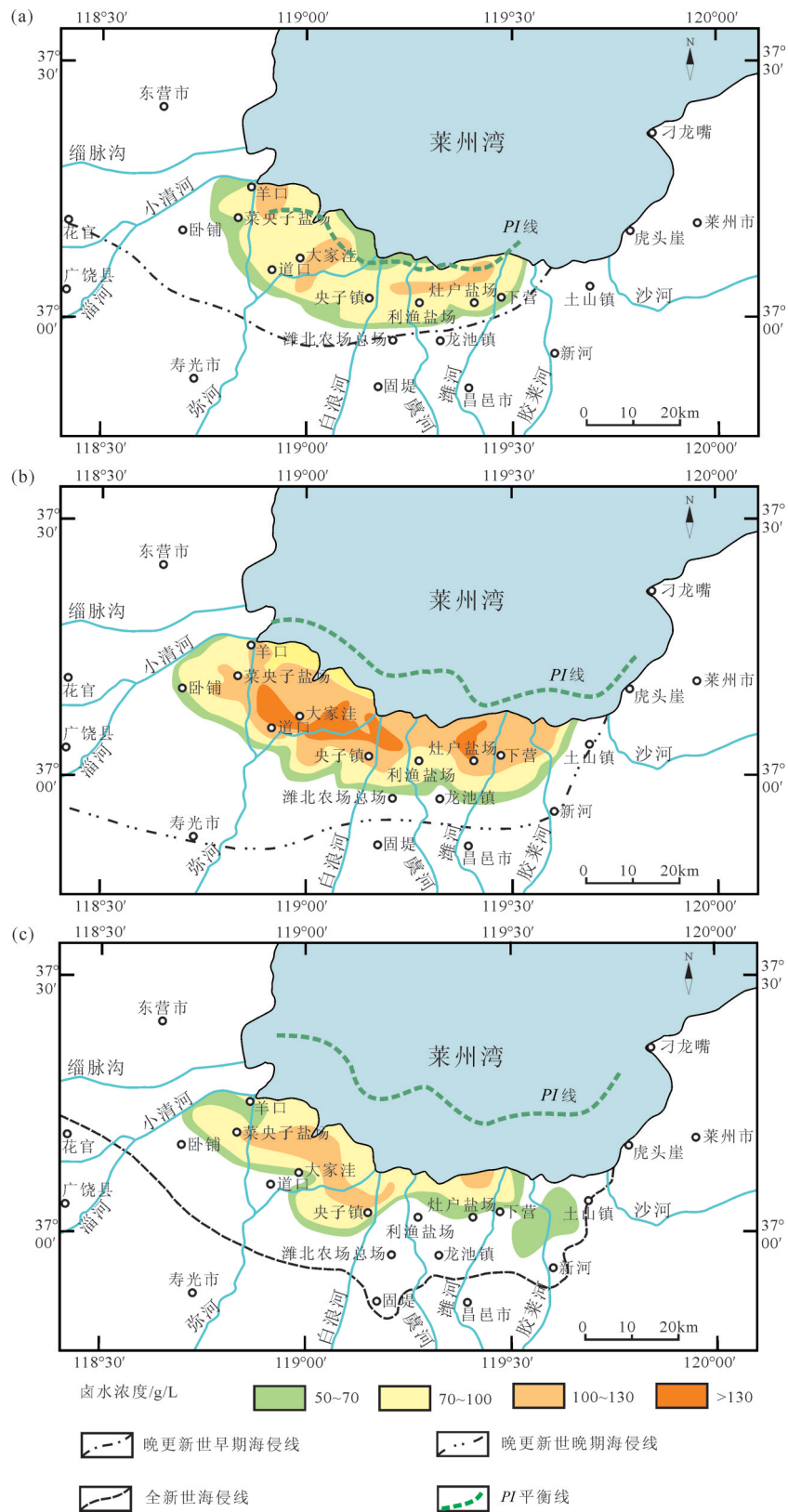


图4 莱州湾主要海侵线、地下卤水分布及PI平衡线图(据高茂生等,2015修改)

Fig.4 Three transgressions, underground brine and PI in Laizhou Bay

地区的物源存在差异性。北部滨浅海相沉积发育,南向三角洲、潮坪、沼泽过渡。在此时期,多数矿物元素对应1个峰和1个谷,表明海面发生过一次升降和气候冷暖变化。依据刘恩峰等(2004)研究,在10.0~4.0 ka B. P.期间莱州湾沿岸属于暖湿的滨海沉积,渤海西岸海侵事件比本区晚约2000a(徐家声,1994),在全新世中期(6.0 ka B.P.)海侵范围达到最远,此后海水消退。在全新世晚期,海面开始下降,现代河流沉积发育。

总体上,海侵期,由陆向海黄河泥沙贡献增加,白浪河等短源河流沉积贡献降低;浅海相沉积发育,以三角洲、潮坪为沉积过渡,表现为退积叠加。海退期,陆源输入增加,河流或湖泊沉积发育,表现为进积叠加。晚更新世以来莱州湾大致经历了浅海—三角洲—潮坪—浅海—三角洲—陆相或湖泊的沉积演化。

全球海面变化研究表明(Waelbroeck, 2002),晚更新世以来至少存在3次高海面时期和2次低海面时期。莱州湾晚更新世的海面变化也出现“三高两低”的趋势。但由于区域差异和构造背景的不同,莱州湾海面升降时间与升降幅度与相邻海区存在差异性。

莱州湾从128.0 ka B.P.开始进入晚更新世,其中124.6~72.0 ka B.P.为温暖的末次间冰期,对应发育有沧州海侵层;晚更新世的后半段,72.0~10.2 ka B.P.为寒冷的末次冰期;全新世(10.2~0.0 ka B.P.)为温暖的冰后期。末次冰期气候相对温暖湿润,沉积物粒度小,化学风化作用较强,常微量元素在此阶段地层中富集。末次冰期气候寒冷干燥,以物理风化为主,多数元素在此阶段的沉积含量较低。Si/Al和Ti/Al在剖面上的变化反映了莱州湾在全新世和晚更新世的冰期搬运动力及化学风化作用相对较弱;与此对应,CIA相对不高,从晚更新世晚期玉木早冰期到晚更新世早期,化学风化作用较强,晚更新世晚期玉木早冰期之后,化学风化作用减弱;Rb/Sr值与风化强度成正比。Mg/Ca从晚更新世晚期玉木早冰期到晚更新世早期才发生较大的波动,表明莱州湾的沉积环境及物源在晚更新世晚期发生了重要转变。在全新世、晚更新世早期及晚期的海相层中,常量、微量元素及元素特征值呈明显的旋回变化,对应多个峰值。在晚更新世晚期的陆相地层

变化小;晚更新世早期陆相地层中变化较缓,对应多个峰值。这种元素地球化学变化指示了海侵—海退过程中的沉积环境以及海面发生过多次改变,所反映的沉积特征与晚更新世以来的气候和海面变化有较好的对应关系。

莱州湾在124.6~72.0 ka B.P., 60.0~24.4 ka B.P., 10.2~0.0 ka B.P.出现3次暖湿期,分别对应于沧州海侵、献县海侵、黄骅海侵,在3次暖湿期中发育海陆交互相滨浅海、三角洲相或潮坪及河流相沉积环境,分别对应里斯—玉木间冰期、玉木亚间冰期以及玉木冰后期。3次海侵的范围分别在花官—卧铺南部—寿光北部—潍北总场—龙池北部、广饶南—寿光—固堤北—昌邑北—新河—土山—沙河口和花官北—寿光北—固堤南—昌邑北—新河—土山—虎头崖一带,献县海侵的范围最远,其次为全新世的黄骅海侵,晚更新世早期的沧州海侵范围最近。这与吕厚远(1989)利用渤海南部的4个钻孔和2个剖面的孢粉样分析的结果相吻合,即渤海南部晚更新世以来有3次较湿润期和2次高降水量较大期。在72.0~60.0 ka B.P.和24.4~10.2 ka B.P.期间,为2次干冷的陆相沉积环境,分别对应玉木早冰期和玉木晚冰期。而地球化学元素所反映的晚更新世以来莱州湾古气候演化与全球性的气候事件及渤海沿岸古环境变化有较好的可比性。

6 结 论

(1)受控于黄河陆源碎屑输入和南部中小河流的共同影响,二者在各自阶段对莱州湾沉积演化起主导作用,莱州湾沉积物源存在阶段性和分期性。

(2)莱州湾地球化学变化所反映的沉积特征与晚更新世以来的气候和海面变化有明显的对应关系,晚更新世以来经历的3次高海面期和2次低海面期,对应发生了3次海侵及海退事件。晚更新世早期PI线向陆南移,晚更新世晚期海面上升,PI线向海北移,全新世PI线北移加剧。

(3)晚更新世以来莱州湾经历了浅海—三角洲—潮坪—滨浅海—三角洲—陆相或湖泊的演化过程。海侵期主要发育滨浅海相沉积,向南退积为三角洲/潮坪—河流沉积;由陆向海,短源河流沉积贡献降低,黄河沉积贡献增加。海退期陆源输入增加,河流相及三角洲进积发育。

References

- Cao Yingchang, Wang Yanzhong, Xu Taoyu, Mi Lianshan. 2007. Application of the ratio of characteristic elements in provenance analysis: A case study from the upper part of the fourth member of the Shahejie Fm in the 58 area, Dongying Depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(2): 230–238(in Chinese with English abstract).
- Chen Yongsheng, Li Jianfen, Wang Fu. 2016. Records of Holocene sedimentation environment and relative sea level by the boreholes collected along the present shoreline of the west coast of Bohai Bay, China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(2): 499–517(in Chinese with English abstract).
- Gao Maosheng, Zheng Yimeng, Liu Sen. 2015. Palaeogeographic condition for origin of underground brine in southern coast of Laizhou Bay, Bohai Sea[J]. *Geological Review*, 61(2):393–400(in Chinese with English abstract).
- Gu Senchang, Chen Shaomo, Wu Bihao. 1989. REE geochemistry in surface sediments of South China Sea[J]. *Tropic Oceanology*, 8(2): 93–101(in Chinese with English abstract).
- Guo Fei, Gao Maosheng, Hou Guohua, Liu Sen, Wang Jin. 2017. Source tracing of rare earth elements: A case study of core 07 on the southern coast of Laizhou Bay[J]. *Continental Shelf Research*, 136, 29–38.
- Guo Fei, Gao Maosheng, Hou Guohua. 2016. Geochemical characteristics of sediment in core 07 since the late Pleistocene in Laizhou Bay[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 38(3):145–155(in Chinese with English abstract).
- Han Deliang. 2001. Geochemistry of core E in the Laizhou Bay since late stage of Middle Pleistocene[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 23(2):79–85(in Chinese with English abstract).
- Han Yousong, Wu Hongfa. 1982. The origin of underground brines in the coastal plain of Laizhou Bay[J]. *Geological Review*, 28(2):126–131(in Chinese with English abstract).
- Lan Xianhong, Li Rihui, Wang Zhongbo. 2017. Geochemical records of surface sediments in the western Bohai Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 37(03):75–85(in Chinese with English abstract).
- Lan Xianhong, Zhang Xianjun, Zhao Guangtao. 2009. Distributions of rare earth elements in sediments from core NT1 of the South Yellow Sea and their provenance discrimination[J]. *Geochimica*, 38(4):123–132(in Chinese with English abstract).
- Lan Xianhong, Zhang Zhixun, Li Rihui. 2010. Provenance study of sediments in core NT2 of the South Yellow Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(6):1182–1189(in Chinese with English abstract).
- Li Shoujun, Cui Xiaohui, Xu Hua, Zhang Zhou, Zhao Xiuli, Gao Zongjun, Liu Qiang, Liu Xiao. 2017. Distribution characteristics of benthic foraminifera of the late Quaternary in Laizhou Bay, Bohai Sea. China and its paleoenvironmental significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(2):287–301(in Chinese with English abstract).
- Lim D I, Jung H S, Choi J Y. 2006. Geochemical compositions of river and shelf sediments in the Yellow Sea: grain-size normalization and sediment provenance[J]. *Continental Shelf Research*, 26(1):15–24.
- Liu Enfeng, Zhang Zhulu, Shen Ji. 2004. Spore pollen records of environmental change on south coast plain of Laizhou Bay since the Late Pleistocene[J]. *Journal of Palaeogeography*, 6(1):78–84(in Chinese with English abstract).
- Liu Jianguo, Li Anchun, Chen Muhong. 2007. Geochemical characteristics of sediments in the Bohai Sea mud area during Holocene[J]. *Geochimica*, 36(6):633–637(in Chinese with English abstract).
- Lu Houyuan. 1989. The spore-pollen assemblages in the sediments in the southern Bohai sea since the late Pleistocene and its palaeoenvironment analysis[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 7(2):11–26(in Chinese with English abstract).
- Nesbitt Wayne H, Markovics G. 1997. Weathering of granodioritic crust, long term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments[J]. *Geochimica & Cosmochimica Acta*, 61(8):1653–1670.
- Pang Shoujie, Ye Siyuan, Su Xin. 2008. REE Distribution characteristics of coastal wetlands surface soil from the Yellow River Delta[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(5):607–612(in Chinese with English abstract).
- Peng Zichen, Han Yue, Han Yusong. The study of the changes of sedimental environments in the Laizhou Bay[J]. *Geological Review*, (4):360–367(in Chinese with English abstract).
- Qin Yunshan. 1985. Bohai Geology[M]. Beijing: Science Press, 215–219(in Chinese).
- Shi Xuefa, Chen Lirong, Ma Jianguo. 1996. REE Geochemistry of Sediments from West Philliping Sea[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 16(3):260–267(in Chinese with English abstract).
- Waelbroeck C, Labeyrie L, Michel E. 2002. Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotope records[J]. *Quaternary Science Reviews*, 21: 295–305.
- Wang Houjie, Yang Zuosheng, Li Yunhai, Guo Zhigang, Sun Xiaoxia, Wang Yan. 2007. Dispersal pattern of suspended sediment in the shear frontal zone off the Yellow River mouth[J]. *Continental Shelf Research*, 27(6): 854–871.
- Wang Hong, Li Jianfen, Pei Yandong. 2011. Study of Quaternary geology on the west coast of Bohai[J]. *Geological Survey and Research*, 35(2):81–97(in Chinese with English abstract).
- Wang Shaohong. 1979. Preliminary study of marine bed and its depositional conditions in Late Quaternary off the west coast of Laizhou Bay[J]. *Oceanology Limnology Sinica*, (1): 9–23(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhicai, Dong Qidong, Du Xiansong. 2006. Active fault survey on the Tan-Lu Fault Zone in Laizhou Bay[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 28(5):493–503(in Chinese with English abstract).
- Wu Mingqing, Wang Xianjue. 1991. Rare-earth and trace elements in the East China Sea sediments[J]. *Geochimica*, 20(1):40–46(in Chinese with English abstract).

- Chinese with English abstract).
- Xu Jiashen. 1994. Shell ridge and sea level change in Huanghan coast, Bohai Sea[J]. *Acta Oceanologic Sinica*, 16, (1):68–77(in Chinese with English abstract).
- Xue Chuntin, 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.
- Yang Shouye, Cai Jingong, Li Congxian. 2001. New discussion about the run– through time of the Yellow River[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 21(2):15– 20(in Chinese with English abstract).
- Yang Shouye, Li Congxian. 1999. Characteristic element composition the Yangtze and their Yellow River sediments and geological background[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 19(2):19–26(in Chinese with English abstract).
- Yao Zhengquan, Shi Xuefa, Liu Qingsong. 2014. Paleomagnetic and astronomical dating of sediment core BH08 from the Bohai Sea, China: Implications for glacial– interglacial sedimentation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 393:90–101.
- Zabel Matthias, Schneider Ralph R, Wagner Thomas, Adegbie Adesina T. 2001. Late Quaternary climate changes in central Africa as inferred from terrigenous input to the Niger Fan[J]. *Quaternary Research*, 56(2):207–217.
- Zhao Yiyang, Wu Mingcai, Li Anchun. 2002. Geochemistry of mud along of China and their significance[J]. *Geology in China*, 29(02): 181–185(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yiming, Gao Maosheng, Liu Sen. 2014. Distribution characteristics of subsurface brine resources on the southern coast of laizhou bay since late pleistocene[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 41(5):11– 17(in Chinese with English abstract).
- Zhuang Zhenye, Xu Weidong, Li Xuelen. 1991. The coastline evolution on the south coast of the Bohai Sea since 6 ka B. P.[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 21(2): 99–110(in Chinese with English abstract).
- Zhuang Zhenye, Xu Weidong, Liu Dongsheng. 1999. Division and environmental evolution of Late Quaternary marine beds of S₃ hole in the Bohai Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 19(2): 27–35(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 操应长,王艳忠,徐涛玉,弥连山.2007.特征元素比值在沉积物物源分析中的应用[J].*沉积学报*, 25(2):230–238.
- 陈永胜,李建芬,王福,田立柱,商志文,施佩歆,姜兴钰,王宏. 2016.渤海湾西岸现代岸线钻孔记录的全新世沉积环境与相对海面变化[J].*吉林大学学报(地球科学版)*, 46(02):499–517.
- 高茂生,郑懿珉,刘森.2015.莱州湾地下卤水形成的古地理条件分析[J].*地质论评*, 61(2):393–400.
- 郭飞,高茂生,侯国华.2016.莱州湾07钻孔沉积物晚更新世以来的元素地球化学特征[J].*海洋学报*, 38(3):145–155.
- 古森昌,陈绍谋,吴必豪.1989.南海表层沉积物稀土元素地球化学[J].*热带海洋*, 8(2):93–101.
- 韩德亮.2001.莱州湾E孔中更新世末期以来的地球化学特征[J].*海洋学报*, 23(2):79–85.
- 韩有松,吴洪发.1982.莱州湾滨海平原地下水成因初探[J].*地质论评*, 28(2):126–131.
- 蓝先洪,李日辉,王中波.2017.渤海西部表层沉积物的地球化学记录[J].*海洋地质与第四纪地质*, 37(03):75–85.
- 蓝先洪,张宪军,赵广涛.2009.南黄海NT1孔沉积物稀土元素组成与物源判别[J].*地球化学*, 38(2):123–132.
- 蓝先洪,张志珣,李日辉.2010.南黄海NT2孔沉积物物源研究[J].*沉积学报*, 28(6):1182–1189.
- 李守军,崔肖辉,徐华,张卓,赵秀丽,高宗军,刘强,刘晓.2017.渤海莱州湾晚第四纪底栖有孔虫分布特征及古环境意义[J].*地质学报*, 91(2):287–301.
- 刘建国,李安春,陈木宏.2007.全新世渤海泥质沉积物地球化学特征[J].*地球化学*, (06):559–568.
- 刘恩峰,张祖陆,沈吉.2004.莱州湾南岸滨海平原晚更新世以来古环境演变的孢粉记录[J].*古地理学报*, 6(1):78–84.
- 吕厚远. 1989.渤海南部晚更新世以来的孢粉组合及古环境分析[J].*黄渤海海洋*, 7(2):11–26.
- 庞守吉,叶思源,苏新.2008.黄河三角洲滨海湿地表层土壤稀土元素分布特征[J].*地球学报*, 29(5):607–612.
- 彭子成,韩岳,韩有松.1992.莱州湾地区10万年以来沉积环境变化[J].*地质论评*, (4):360–367.
- 秦蕴珊.1985.渤海地质[M].北京:科学出版社, 215–219.
- 石学法,陈丽荣,马建国.1996.西菲律宾海沉积物稀土元素地球化学[J].*矿物学报*, 16(3):260–267.
- 王宏,李建芬,裴艳东,等. 2011. 渤海湾西岸海岸带第四纪地质研究成果概述[J].*地质调查与研究*, 35(2):81–97.
- 王绍鸿.1979.莱州湾西岸晚第四纪海相地层及其沉积环境的初步研究[J].*海洋与湖沼*, (1):9–23.
- 王志才,邓起东,杜宪宋.2006.莱州湾海域郯庐断裂带活断层探测[J].*地震学报*, 28(5):493–503.
- 吴明清,王贤觉.1991.东海沉积物的稀土和微量元素[J].*地球化学*, 20(1):40–46.
- 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.
- 薛春丁,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.
- 杨守业,蔡进功,李从先.2001.黄河贯通时间的新探索[J].*海洋地质与第四纪地质*, 21(2):15–20.
- 杨守业,李从先.1999.长江和黄河沉积物元素组成及地质背景[J].*海洋地质与第四纪地质*, 19(2):19–26.
- 赵一阳,鄢明才,李安春.2002.中国近海沿岸泥的地球化学特征及其指示意义[J].*中国地质*, 29(02):181–185.
- 郑懿珉,高茂生,刘森.2014.晚更新世以来莱州湾南岸地下卤水资源分布特征[J].*水文地质工程地质*, 41(5):11–17.
- 庄振业,许卫东,李学伦.1991.渤海南岸6000年来的岸线演变[J].*青岛海洋大学学报*, 21(2):99–110.
- 庄振业,许卫东,刘东生.1999.渤海南部S3孔晚第四纪海相地层的划分及环境演变[J].*海洋地质与第四纪地质*, 19(2):27–35.